

TRABAJO DE GRADO

FACTIBILIDAD DE USO DE MICROESFERAS DE POLÍMERO EN LA FORMULACIÓN DE LECHADAS DE CEMENTO PARA POZOS A SER SOMETIDOS A PROCESOS DE INYECCIÓN ALterna DE VAPOR

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
para optar al título de
M. Sc. en Ingeniería Química
Por la Ing. Pereira Montezuma, Fedymar Del Valle

Caracas, Febrero de 2012

© Pereira Montezuma Fedymar Del Valle, 2012

Hecho el Depósito de Ley

Depósito Legal N° lft4872012620360

TRABAJO DE GRADO

FACTIBILIDAD DE USO DE MICROESFERAS DE POLÍMERO EN LA FORMULACIÓN DE LECHADAS DE CEMENTO PARA POZOS A SER SOMETIDOS A PROCESOS DE INYECCIÓN ALterna DE VAPOR

TUTOR: M. Sc. Aiskely Blanco

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
para optar al título de
M. Sc. en Ingeniería Química
Por la Ing. Pereira Montezuma, Fedymar Del Valle

Caracas, Febrero de 2012

DEDICATORIA

A mis padres Fedilia y Arturo

A mi esposo Carlos Miguel

A mis hermanos Wilfredo[†], Robert y Elvis

A mis sobrinos y a mis cuñadas

AGRADECIMIENTOS

A Dios por haberme guiado en el largo camino recorrido para alcanzar esta meta, por darme salud para trabajar, por darme fortaleza espiritual, perseverancia y constancia en todo momento y sobre todo por haberme ayudado a levantarme después de cada caída y darme fuerzas y voluntad para continuar adelante. Al Ánima de Pica-Pica por ayudarme en los momentos más difíciles.

A mi esposo Carlos Miguel por su apoyo incondicional, por su comprensión y por las fuerzas que me da para seguir adelante y para poder culminar esta etapa profesional.

A mi Mamá y a mi Papá por su apoyo moral en todo momento, su comprensión, su paciencia y su empatía, gracias Mami por estar allí siempre a mi lado. Gracias por confiar en mí.

A mis hermanos Wilfredo[†], Robert y Elvis, a mis cuñadas Mary, Doris y Gregori, por su confianza, apoyo y por estar siempre dispuestos a ayudarme.

A Aiskely Blanco y a Francisco Yánez por la ayuda e incondicional disposición para desarrollar este Trabajo y resolver los problemas que se presentaron, gracias por darme apoyo y ánimo en todo momento.

A la Universidad Central de Venezuela por contribuir con mi formación como profesional.

A Intevep por el aporte conceptual y material a esta investigación.

Pereira M. Fedymar Del V.

**FACTIBILIDAD DE USO DE MICROESFERAS DE POLÍMERO
EN LA FORMULACIÓN DE LECHADAS DE CEMENTO PARA
POZOS A SER SOMETIDOS A PROCESOS DE INYECCIÓN
ALTERNA DE VAPOR**

**Tutor: M. Sc. Aiskely Blanco. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería.
Escuela de Ingeniería Química. 2012, 96 pág.**

**Palabras claves: lechada de cemento, microesferas de polímero, inyección
alterna de vapor, crudos pesados, cementación de pozos**

Resumen. La presencia de formaciones con bajo gradiente de fractura requiere del uso de lechadas de cemento de baja densidad, formuladas con aditivos llamados extendedores, para evitar inducir fracturas y pérdidas de circulación durante la operación de cementación. Por otro lado, el aislamiento zonal efectivo durante la vida útil del pozo adquiere mayor relevancia cuando se aplican métodos térmicos de recuperación de hidrocarburos donde el sello de cemento debe evitar la retrogresión de la resistencia a la compresión, entre otros aspectos. Con la finalidad de evaluar la factibilidad de uso de las microesferas de polímero como extendedor en la formulación de lechadas de cemento de baja densidad para pozos sometidos a procesos de inyección alterna de vapor (IAV), en este estudio se presenta la caracterización mecánica convencional de dicho sistema cementante considerando las condiciones operacionales de los pozos de la unidad de explotación de yacimientos (UEY) lago del occidente venezolano y luego se propone un diseño adecuado para su uso en la cementación de pozos donde se aplicará la IAV, según las condiciones operacionales de la UEY tierra del occidente venezolano. La caracterización mecánica consistió en determinar la resistencia a la compresión destructiva y no destructiva, la resistencia a la tensión, la permeabilidad al gas y la morfología de las lechadas de cemento formuladas con microesferas de polímero y de una lechada de

cemento comercial formulada con microesferas de vidrio, antes y después de simular las condiciones existentes en los procesos de IAV mediante la aplicación de dos choques térmicos de 350 °F cada uno. En los ensayos destructivos se evidenció el incremento de la resistencia a la compresión y a la tensión en los sistemas cementantes evaluados después de los choques térmicos; las propiedades de las lechadas de cemento formuladas con microesferas de polímero mostraron valores aceptables promedios de 2570 psi en compresión y 520 psi en tensión. En los ensayos no destructivos las lechadas de cemento formuladas con microesferas de polímero incrementaron su resistencia a la compresión alcanzando valores aceptables, después de aplicar los choques térmicos. La permeabilidad al gas de los sistemas cementantes evaluados disminuyó significativamente después de aplicar los choques térmicos. Mediante microscopía electrónica de barrido se determinó que las microesferas de polímero no sufren degradación de su estructura química por efecto de las altas temperaturas, pues no hubo carbonización de las mismas, sólo se observaron cambios en la forma de dichas microesferas, pasando de una estructura celular a una estructura semi hueca o compacta. En cuanto al diseño final propuesto para la UEY tierra se demostró que se puede obtener un diseño que cumple con los requerimientos técnicos de densidad, estabilidad, reología y tiempo de bombeabilidad así como resistencia mecánica frente a los choques térmicos. Con base en los resultados obtenidos, las lechadas de cemento formuladas con microesferas de polímero pueden ser consideradas como una alternativa para sustituir a las microesferas de vidrio comúnmente empleadas para el aislamiento zonal de los pozos donde se apliquen procesos de IAV, ya que las propiedades de las microesferas de polímero no se ven afectadas negativamente frente a las altas temperaturas. Las lechadas de cemento formuladas con microesferas de polímero podrían ser utilizadas para la cementación de pozos en los yacimientos de crudo pesado y extrapesado ubicados en el occidente venezolano y en la Faja Petrolífera del Orinoco (FPO), debido a que la IAV se ha venido utilizando desde hace aproximadamente 50 años en el occidente del país y se utilizará para la explotación de las reservas de la FPO.

ÍNDICE GENERAL

	Página
LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE TABLAS	xiv
NOMENCLATURA	xv
ABREVIACIONES	xvi
GLOSARIO	xvii
INTRODUCCIÓN	1
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
OBJETIVOS	5
MARCO TEÓRICO	6
1. Construcción de pozos de hidrocarburos	6
1.1 Cementación primaria de pozos de hidrocarburos	6
1.2 Objetivos de la cementación primaria	8
1.3 Materiales cementantes	9
1.4 Cemento Pórtland [1]	10
1.5 Química del cemento Pórtland a altas temperaturas [1]	10
1.6 Cementos con alto contenido de alúmina	12
1.7 Cemento clase J	12
1.8 Sistemas aluminosilicato de calcio	13
1.9 Sistemas fosfato de calcio	13
1.10 Cementación de pozos para recuperación mediante métodos térmicos	13
1.11 Consideraciones para el diseño de lechadas en pozos a ser sometidos a procesos de IAV	15
2. Inyección alterna o cíclica de vapor	16
2.1 Utilización de la inyección alterna de vapor	18
METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	19

1.	Materiales	19
1.1	Microesferas de polímero	19
1.2	Cemento petrolero y aditivos	23
2.	Metodología experimental y equipos	24
2.1	Preparación de las lechadas de cemento	28
2.2	Densidad	28
2.3	Reología	29
2.4	Tiempo de bombeabilidad	30
2.5	Pérdida de filtrado	31
2.6	Fluido libre	32
2.7	Curado de las lechadas de cemento a condiciones de pozo	33
2.8	Simulación de las condiciones de los procesos de inyección alterna de vapor	34
2.9	Estabilidad	35
2.10	Resistencia a la compresión destructiva	36
2.11	Resistencia a la compresión no destructiva	37
2.12	Resistencia a la tensión	38
2.13	Permeabilidad al gas sin confinamiento	39
2.14	Morfología	40
	PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	42
1.	Selección de las condiciones de operación y del sistema cementante de una unidad de explotación de yacimientos con aplicación de inyección alterna de vapor	42
1.1	Unidad de explotación de yacimientos lago	43
1.2	Unidad de explotación de yacimientos tierra	46
2.	Caracterización de las lechadas de cemento formuladas con microesferas de polímero bajo condiciones simuladas de los procesos de IAV	49
2.1	Estabilidad	51
2.2	Resistencia a la compresión	53

2.3	Resistencia a la tensión	61
2.4	Permeabilidad	64
2.5	Morfología	65
3.	Propuesta de diseño de una lechada de cemento formulada con microesferas de polímero para la cementación de pozos a ser sometidos a procesos de IAV	74
4.	Factibilidad de uso de las lechadas de cemento formuladas con microesferas de polímero en la cementación de pozos a ser sometidos a procesos de IAV	84
	CONCLUSIONES	88
	RECOMENDACIONES	89
	BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	90

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Proceso de cementación primaria [1].....	8
Figura 2. Objetivos de la cementación primaria [1].....	9
Figura 3. Condiciones de formación de varios silicatos de calcio [1].....	11
Figura 4. Esquema del proceso de inyección alterna de vapor [7].....	17
Figura 5. Respuesta típica a la inyección alterna de vapor [6].....	18
Figura 6. Aspecto físico de las microesferas de polímero, fotografía tomada con microscopio óptico a 5X.....	20
Figura 7. Fotografía tomada con microscopio electrónico de barrido de la estructura interna de las microesferas de polímero	20
Figura 8. Calorimetría diferencial de barrido de las microesferas de polímero (DSC, por sus siglas en inglés).....	22
Figura 9. Distribución de tamaño de partículas promedio de las microesferas de polímero.....	23
Figura 10. Diagrama esquemático de la metodología experimental	27
Figura 11. Mezcladora.....	28
Figura 12. Balanza presurizada	29
Figura 13. Viscosímetro rotacional	30
Figura 14. Consistómetro presurizado.....	31
Figura 15. Celda de filtración estática ATAP	32
Figura 16. Cilindro de vidrio	33
Figura 17. Moldes cúbicos (a) y cilíndricos (b) empleados para el curado de las lechadas de cemento	34
Figura 18. Cámara de curado presurizada	34
Figura 19. Simulación de las condiciones de los procesos de inyección alterna de vapor	35
Figura 20. Prensa Universal Shimadzu UH 20A.....	37
Figura 21. Analizador Ultrasónico de Cemento	38

Figura 22. Ilustración del ensayo de tensión indirecta	38
Figura 23. Equipo de perfil de permeabilidad modelo PDPK-400	40
Figura 24. Diagrama mecánico típico de los pozos para IAV en la UEY Lago.....	44
Figura 25. Diagrama mecánico típico de los pozos en la UEY tierra	47
Figura 26. Estabilidad de los diseños LMP 1 y LMP 2 y la lechada comercial 1 después del curado inicial a 160 °F y 2000 psi durante 24 h	53
Figura 27. Resistencia a la compresión destructiva según la norma ISO 10426-2 [14] de las lechadas de cemento formuladas con microesferas de polímero y su equivalente sistema comercial antes y después de someterlos a condiciones simuladas de los procesos de IAV	55
Figura 28. Fotografía de las muestras después del ensayo de resistencia a la compresión destructiva según la norma ISO 10426-2 [14] de las lechadas de cemento formuladas con microesferas de polímero y la lechada comercial 1	56
Figura 29. Resistencia a la compresión no destructiva según la norma ISO 10426-2 [14] de las lechadas de cemento formuladas con microesferas de polímero y su equivalente sistema comercial antes y después de someterlos a condiciones simuladas de los procesos de IAV.....	59
Figura 30. Curva de resistencia a la compresión no destructiva del diseño LMP 1 obtenida en el UCA a 160 °F y 2000 psi con aplicación de dos choques térmicos a 350 °F cada uno	60
Figura 31. Curva de resistencia a la compresión no destructiva del diseño LMP 2 obtenida en el UCA a 160 °F y 2000 psi con aplicación de dos choques térmicos a 350 °F cada uno	60
Figura 32. Curva de resistencia a la compresión no destructiva de la lechada de cemento comercial 1 obtenida en el UCA a 160 °F y 2000 psi con aplicación de dos choques térmicos a 350 °F cada uno	61
Figura 33. Resistencia a la tensión según la norma ASTM C496 / C496-04 [15] de los diseños LMP 1 y LMP 2 y el sistema comercial 1 antes y después de someterlos a condiciones simuladas de los procesos de inyección alterna de vapor	62

Figura 34. Fotografía de las muestras después del ensayo de resistencia a la tensión indirecta según la norma ASTM C 496 [15] de las lechadas de cemento formuladas con microesferas de polímero y la lechada comercial 1	63
Figura 35. Permeabilidad al gas a 14,7 psi de los diseños LMP 1 y LMP 2 y la lechada comercial 1 antes y después de someterlos a condiciones simuladas de los procesos de inyección alterna de vapor	65
Figura 36. Microfotografía de una sección del diseño LMP 1, curado a 160 °F y 2000 psi durante 24 h	67
Figura 37. Espectrograma por energía dispersiva de Rayos X de las microesferas de polímero identificadas en el diseño LMP 1	68
Figura 38. Microfotografías tomadas mediante MEB del diseño LMP 1 antes y después de someterlo a condiciones simuladas de los procesos de inyección alterna de vapor	69
Figura 39. Microfotografía de una sección de la lechada de cemento comercial 1, curado a 160 °F y 2000 psi durante 24 h	71
Figura 40. Espectrograma por energía dispersiva de Rayos X de las microesferas de vidrio identificadas en la lechada de cemento comercial 1	72
Figura 41. Microfotografías tomadas mediante MEB de la lechada de cemento comercial 1 antes y después de someterla a condiciones simuladas de los procesos de inyección alterna de vapor	73
Figura 42. Tiempo de bombeabilidad a 100 °F y 2000 psi del diseño LMP 3	78
Figura 43. Estabilidad del diseño LMP 3 después del curado a 120 °F y 2000 psi durante 24 h	80
Figura 44. Resistencia a la compresión destructiva y no destructiva (UCA) del diseño LMP 3 antes y después de ser sometido a los choques térmicos	81
Figura 45. Fotografía de las muestras después del ensayo de resistencia a la compresión destructiva según la norma ISO 10426-2 [14] de la lechada de cemento formulada con microesferas de polímero (LMP 3) propuesta	81
Figura 46. Resistencia a la compresión no destructiva (UCA) a 120 °F y 2000 psi del diseño LMP 3	83

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características de las microesferas de polímero.....	21
Tabla 2. Condiciones operacionales de la sección intermedia-productora de un pozo en la UEY lago	45
Tabla 3. Formulación de la lechada de cemento comúnmente utilizada en el revestidor intermedio-productor, UEY lago (lechada comercial 1)	45
Tabla 4. Especificaciones técnicas de la lechada de cemento comúnmente utilizada en el revestidor intermedio-productor, UEY lago (lechada comercial 1)	46
Tabla 5. Condiciones operacionales de la sección intermedia-productora de un pozo en la UEY tierra.....	48
Tabla 6. Especificaciones técnicas de la lechada de cemento comúnmente utilizada en el revestidor intermedio-productor, UEY tierra	48
Tabla 7. Formulación de las lechadas de cemento con microesferas de polímero (LMP) propuestas para la UEY lago	50
Tabla 8. Formulación de la lechada de cemento con microesferas de polímero (LMP 3) propuesta para la UEY tierra.....	75
Tabla 9. Especificaciones técnicas del diseño LMP 3.....	76
Tabla 10. Lecturas reológicas a 100 °F del diseño LMP 3 obtenidas en el viscosímetro de cilindros concéntricos y los parámetros reológicos según la norma ISO 10426-2 [14].....	77
Tabla 11. Comparación de las propiedades físicas de las lechadas LMP 1 y lechada comercial 1, antes y después de la aplicación de dos choques térmicos	85

NOMENCLATURA

Bc	unidad de consistencia, expresada en <i>Bearden</i>
cp	unidad de viscosidad, expresada en centipoise
gal/sc	unidad de concentración de aditivos líquidos en lechadas de cemento, expresada en galones por saco de cemento
lb/sc	unidad de concentración de aditivos sólidos en lechadas de cemento, expresada en libras por saco de cemento
lb _f /100pie ²	unidad de esfuerzo cortante
lpg	abreviatura de la unidad de densidad, expresada en libras por galón
md	unidad de permeabilidad, expresada en milidarcy
psi	unidad de presión, expresada en libras por pulgada cuadrada (<i>pounds per square inches</i> , por sus siglas en inglés)
r.p.m.	revoluciones por minuto

ABREVIACIONES

A	Óxido de Aluminio, alúmina (Al_2O_3), simbología abreviada en química del cemento Pórtland
ASTM	<i>American Society for Testing Material</i>
BSE	<i>Backscattered electrons</i>
BWOC	<i>By weight of cement</i>
C	Óxido de Calcio, cal (CaO), simbología abreviada en química del cemento Pórtland
DSC	<i>Differential Scanning Calorimetric</i>
EDS	<i>Energy Dispersive X ray Spectroscopy</i>
FPO	Faja Petrolífera del Orinoco
H	Agua, simbología abreviada en química del cemento Pórtland
IAV	Inyección alterna de vapor
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LMP	Lechada de cemento con microesferas de polímero
MEB	Microscopía Electrónica de Barrido
S	Dióxido de silicio, sílice (SiO_2), simbología abreviada en química del cemento Pórtland
SE	<i>Secondary electrons</i>
TGA	<i>Thermo Gravimetric Analysis</i>
UCA	<i>Ultrasonic Cement Analyzer</i>
UEY	Unidad de explotación de yacimientos de hidrocarburos

GLOSARIO

Arremetida: consiste en el desbordamiento de fluidos (gas y/o petróleo, agua: fresca o salada) de la formación hacia el hoyo y ocurre cuando la presión ejercida por el fluido de perforación en el hoyo es menor que la presión que tienen algunas de las formaciones perforadas o la formación que está siendo penetrada por la mecha de perforación.

Pérdida de circulación: condición en la cual los fluidos contenidos en el pozo penetran significativamente en la formación, debido a que la presión hidrostática y dinámica es mayor que la presión de fractura del yacimiento.

Tiempo de tránsito: es el tiempo promedio que tarda un pulso de sonido o ultrasonido en viajar a través de una muestra, desde que sale del emisor y es detectado por el receptor.

Revestidor: es la tubería metálica que se coloca dentro del hoyo perforado que luego será fijada mediante el proceso de cementación primaria. Dependiendo de la zona que se está perforando, se tienen cuatro tipos principales de revestidores que de menor a mayor profundidad son: conductor, superficial, intermedio y productivo.

Zapata: se llama así al dispositivo que se coloca en el extremo inferior del revestidor y su función es guiar a la tubería o revestidor durante la bajada en el hoyo, también permite el flujo de fluidos en una sola dirección.

Premezclado: se dice que una lechada de cemento es premezclada cuando todo el volumen a bombear al pozo es preparado y mezclado en los equipos en superficie, luego que se obtiene una lechada homogénea y con la densidad de diseño se realiza el bombeo. Cuando la lechada de cemento no es premezclada, se dice que se bombea al vuelo, es decir a medida que se prepara la lechada se bombea al pozo. El premezclado se realiza cuando se trata de volúmenes pequeños y cuando se tienen lechadas de baja densidad, las cuales requieren mayor cuidado en su preparación.

Factor de recobro: Es la relación expresada en porcentaje que existe, de acuerdo con métodos reconocidos por la industria petrolera, entre el volumen de hidrocarburo que

puede ser recuperado de un yacimiento y el volumen de hidrocarburo original existente en el mismo yacimiento.

Terminación / completación de pozos: se refiere a la etapa donde las pruebas y evaluaciones finales de producción de los estratos e intervalos seleccionados son consideradas satisfactorias y el pozo ha sido provisto de los aditamentos definitivos requeridos y, por ende, se ordena el desmantelamiento y salida del taladro del sitio.

Preflujos: es el conjunto de fluidos llamados lavadores y espaciadores que se bombean delante de la lechada de cemento, para separar la lechada de cemento del fluido de perforación, realizar la limpieza del hoyo y garantizar buena adherencia en las interfases cemento-tubería y cemento-formación.

Extendedor: es un aditivo utilizado para disminuir la densidad de las lechadas de cemento, pueden ser de naturaleza inerte (microesferas de vidrio, microesferas de polímero, nitrógeno, etc.) o reactiva (bentonita, perlita, etc.).

Lechada de cemento espumado: es una lechada de cemento que contiene una fase gaseosa estabilizada con surfactantes; se pueden obtener densidades tan bajas como 5 lpg.

Porosimetría por inyección de mercurio: es una técnica que consiste en inyectar mercurio a una muestra de modo que se desplace el aire alrededor de las partículas; es una técnica indirecta para la caracterización del sistema poroso de los materiales, obteniéndose fundamentalmente a partir de ella la distribución de la porosidad en función del tamaño aparente de acceso a los poros, así como también se puede determinar la gravedad específica y el volumen de poros de la muestra.

Bentonita: es una arcilla que al estar en presencia de agua expande su volumen original varias veces, lo cual permite disminuir la densidad de la lechada de cemento debido a la incorporación de mayor cantidad de agua.

Perlita expandida: es un material obtenido a partir de la expansión a altas temperaturas de la perlita, la cual es un vidrio volcánico amorfo; este material posee una baja gravedad específica (0,03 – 0,15) y por ello es utilizado para disminuir la densidad de las lechadas de cemento.

Temperatura estática de fondo de hoyo: se refiere a la temperatura en el fondo del hoyo cuando los fluidos están estáticos y se corresponde con la temperatura del yacimiento.

Temperatura circulante de fondo de hoyo: se refiere a la temperatura en el fondo del hoyo cuando los fluidos están circulando y es menor que la temperatura estática de fondo de hoyo.

Mezcla seca: se refiere a la mezcla formada por el cemento y los aditivos sólidos.

Agua de mezcla: se refiere a la mezcla formada por el agua y los aditivos líquidos y/o algunos aditivos sólidos que deben ser disueltos en el agua antes de la incorporación de la mezcla seca.

INTRODUCCIÓN

El objetivo principal de la cementación primaria es lograr el aislamiento zonal entre diferentes formaciones dentro del pozo mediante la colocación de una lechada de cemento que al fraguarse provea una adecuada integridad mecánica para sellar el espacio anular formado entre el hoyo y el revestidor. La lechada de cemento debe cumplir una serie de requisitos que dependerán de las características del pozo, entre ellos está la densidad, mediante la cual se controlan los fluidos en el pozo durante y después de la cementación. Cuando se tienen formaciones con bajo gradiente de fractura se requiere de lechadas de baja densidad que son formuladas con aditivos llamados extendedores, con el fin de disminuir la presión ejercida por la columna de fluidos y de ese modo evitar el fracturamiento de la formación y la pérdida de circulación en el pozo.

Por otro lado, cuando el pozo va a ser sometido a procesos de recuperación térmica como la inyección alterna de vapor, es necesario proveer un aislamiento zonal que impida las pérdidas de calor hacia la superficie mediante erupción de vapor. Para ello se deben diseñar lechadas de cemento que soporten altas temperaturas y ciclos de temperatura a lo largo de la vida productiva del pozo.

En esta investigación se evalúa la factibilidad de uso de un extensor de naturaleza polimérica, para diseñar lechadas de cemento de baja densidad que cumplan con los requerimientos técnicos exigidos para la cementación de pozos a ser sometidos a procesos de inyección alterna de vapor, es decir de baja densidad y resistente a los ciclos de temperatura. Esto permitirá ofrecer una alternativa a las tecnologías convencionales para el diseño de lechadas de baja densidad, tales como el uso de microesferas de vidrio, a ser utilizadas en la cementación de pozos que serán sometidos a procesos de inyección alterna de vapor, como por ejemplo en los pozos ubicados en el occidente venezolano y en la Faja Petrolífera del Orinoco.

En la primera parte de este trabajo se presentan los fundamentos teóricos relacionados con la cementación de pozos, donde se explican los objetivos, el proceso y los

materiales cementantes empleados. Asimismo, se explica la teoría relacionada con la química del cemento petrolero a altas temperaturas y los criterios asociados a la cementación de pozos que serán sometidos a procesos de recuperación térmica, como la inyección alterna de vapor. También se presenta una sencilla explicación del proceso de inyección alterna de vapor por ser éste el escenario bajo el cual se realiza esta investigación.

Seguidamente se detalla la metodología experimental utilizada para cumplir con los objetivos propuestos en esta investigación y los resultados obtenidos. Por último, se presentan las conclusiones y las recomendaciones derivadas del análisis de los resultados experimentales.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las microesferas huecas de vidrio constituyen el aditivo extendedor mayormente utilizado en el diseño de lechadas de cemento de baja densidad, bien sea para la cementación de pozos convencionales o para la cementación de pozos que serán sometidos a procesos de inyección alterna de vapor. Cuando se aplican estos métodos térmicos se presentan una serie de condiciones que requieren del uso de materiales, equipos y fluidos capaces de soportar tales condiciones.

Debido a que durante la vida productiva de los pozos donde se aplican estos métodos térmicos existen elevadas temperaturas, la estructura del pozo constituida por el sistema de revestidores, aislamiento zonal mediante un sello hidráulico (cemento fraguado), tuberías de producción, entre otros, deben resistir las altas temperaturas y garantizar la integridad del pozo.

Actualmente, en particular en el área de aislamiento zonal de pozos a ser sometidos a métodos térmicos para la recuperación de hidrocarburos, se utilizan lechadas de cemento formuladas con microesferas de vidrio para disminuir la densidad de la lechada, y con aditivos como harina de sílice y escoria de alto horno micronizada los cuales permiten que las lechadas de cemento sean resistentes a ciclos de temperatura que oscilan entre la temperatura original del yacimiento y 700 °F. Sin embargo, el uso de las microesferas de vidrio incrementa los costos de la operación de cementación primaria porque las lechadas obtenidas son más costosas que las convencionales, aproximadamente de 4 a 10 veces más costosas [1].

En ese sentido y considerando que se requiere de nuevas tecnologías para el diseño de sistemas cementantes aptos para el aislamiento zonal de pozos ubicados en yacimientos de baja presión donde se aplicarán métodos térmicos de recuperación de crudos pesados y extrapesados, el estudio que aquí se presenta tiene la finalidad de proponer la factibilidad de uso de materiales poliméricos para diseñar lechadas de cemento de baja densidad que sean capaces de soportar elevadas temperaturas y

garantizar la integridad mecánica del pozo, como una alternativa de menor costo frente al uso de las microesferas de vidrio.

OBJETIVOS

General:

- Determinar la factibilidad técnica de utilizar microesferas de polímero como extendedor en las lechadas de cemento que serán sometidas a procesos de inyección alterna de vapor.

Específicos:

- Identificar y seleccionar una unidad de explotación de yacimientos donde se apliquen métodos térmicos para la recuperación de petróleo.
- Evaluar el desempeño de las lechadas de cemento formuladas con microesferas de polímero bajo condiciones simuladas de los procesos de inyección alterna de vapor.
- Caracterizar las propiedades físicas de las lechadas de cemento formuladas con microesferas de polímero, antes y después de ser sometidas a condiciones simuladas de los procesos de inyección alterna de vapor.

MARCO TEÓRICO

1. Construcción de pozos de hidrocarburos

El proceso de construcción de pozos de hidrocarburos tiene como objetivo fundamental establecer un canal de comunicación entre el yacimiento de interés y la superficie, mediante la construcción de un pozo, cuya primera etapa consiste en perforar un hoyo a través de la técnica de perforación rotatoria.

En la perforación rotatoria se utiliza un fluido de perforación que tiene como objetivo garantizar la seguridad, estabilidad y eficiencia del proceso en términos de control de presión del pozo, control de pérdida de filtrado, daño a la formación, transporte de ripios, enfriamiento y lubricación de los equipos e interpretación de los registros del pozo [2]. Posteriormente, se extrae la tubería de perforación y se baja un revestidor cuya función es dar soporte al hoyo perforado. Luego se acondiciona el hoyo mediante la circulación del fluido de perforación para romper los geles formados y retirar los ripios remanentes en el hoyo y se procede al bombeo de preflujos que garantizan la adherencia tubería-cemento-formación. Este revestidor es fijado mediante el proceso de cementación primaria donde se coloca una lechada de cemento en el espacio anular existente entre la formación y el revestidor, utilizando la técnica de desplazamiento de fluidos. Una vez concluido el proceso de construcción del pozo, se conecta la superficie con el yacimiento y mediante un sistema de válvulas en superficie se lleva a cabo la extracción de los hidrocarburos [1, 3].

1.1 Cementación primaria de pozos de hidrocarburos

La cementación primaria es el proceso de colocación de una lechada de cemento en el espacio anular que existe entre el revestimiento y las paredes del hoyo; para ello la lechada es bombeada dentro del revestidor y es desplazada hacia el espacio anular. Los principales objetivos de la cementación primaria son sellar el anular y con ello obtener el aislamiento zonal. Este último es alcanzado si el cemento en el anular evita el flujo de los fluidos de la formación [3]. Adicionalmente, el cemento entre la

formación y el revestimiento debe igualmente proteger este último de la corrosión potencial producida por gases agrios tales como CO_2 y H_2S , presentes naturalmente en algunos yacimientos de hidrocarburos [4].

Para lograr el aislamiento zonal, debe obtenerse un sello hidráulico entre el revestimiento y el cemento, y entre el cemento y la formación, mientras que al mismo tiempo evita canales de flujo en la matriz de cemento (ver Figura 2) [1]. Estos requerimientos hacen de la cementación primaria una de las más importantes operaciones ejecutadas en un pozo. Sin un completo aislamiento zonal en el pozo, éste nunca podrá alcanzar su completa producción potencial.

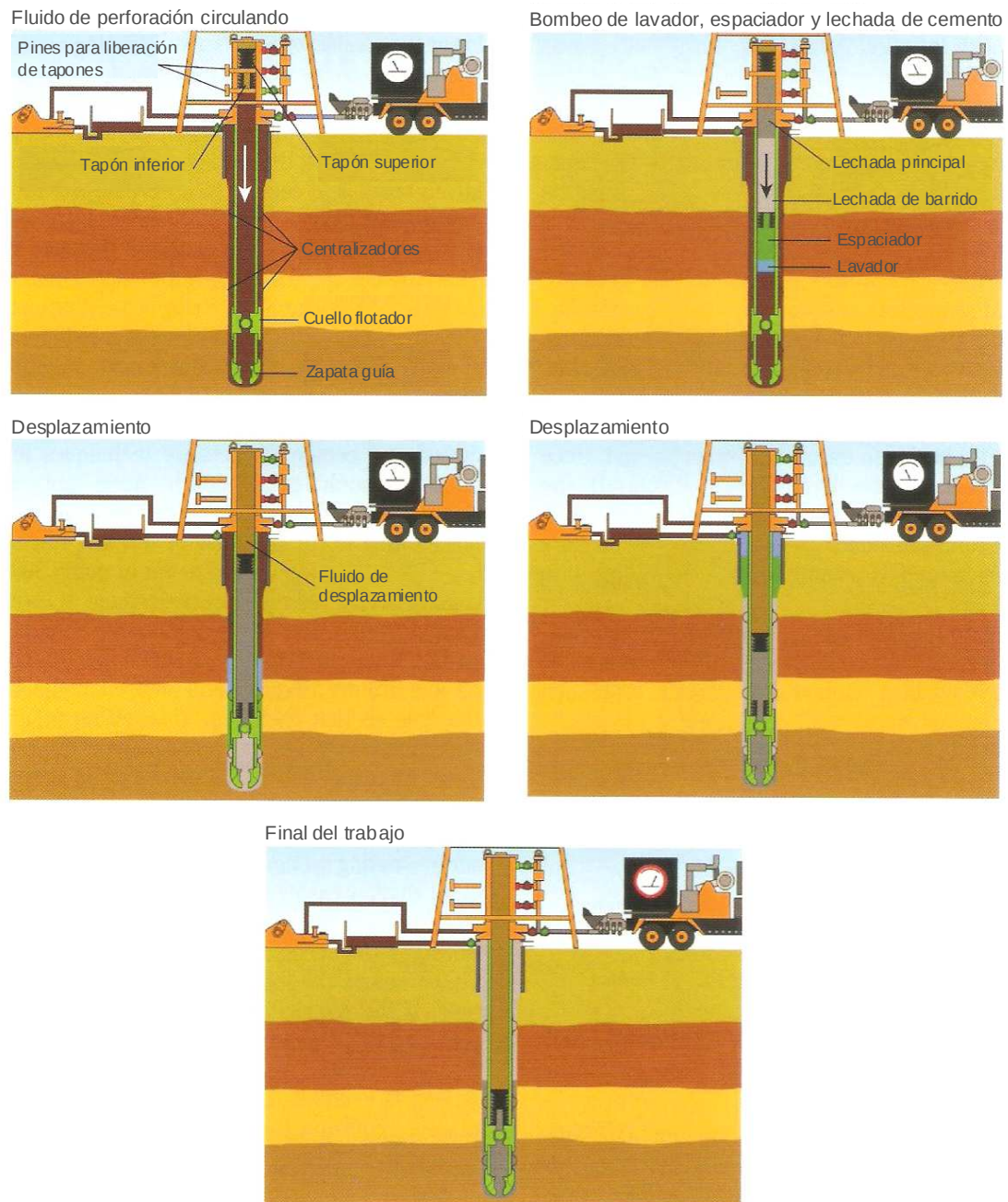


Figura 1. Proceso de cementación primaria [1]

1.2 Objetivos de la cementación primaria

Los principales objetivos del proceso de cementación primaria son:

- Aislar la formación restringiendo el movimiento de los fluidos en el anular.

- b. Soportar y unir el revestimiento a la formación.
- c. Proteger al revestimiento de la corrosión y cargas axiales, y reforzarlo para que soporte las presiones durante la perforación de las siguientes secciones del hoyo.
- d. Proteger las zonas acuíferas.

El cemento endurecido, también debe ser capaz de soportar diferentes operaciones tales como estimulación, perforación, producción e intervención durante la vida útil del pozo [3].

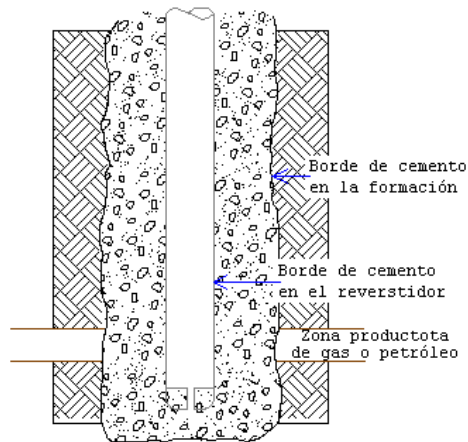


Figura 2. Objetivos de la cementación primaria [1]

1.3 Materiales cementantes

La lechada de cemento que es bombeada al pozo y desplazada hacia el espacio anular hoyo-revestidor está compuesta básicamente de cemento, agua y aditivos. El cemento Pórtland es el material seleccionado para aproximadamente el 99% de todos los trabajos de cementación primaria. Este material está disponible en todo el mundo y es económico, en comparación con otros materiales cementantes. Materiales como la escoria y las puzolanas también son económicos pero no están disponibles en todas las áreas [3]. Existen otros tipos de cementos y materiales con propiedades cementantes activas o latentes, algunos clasificados como cementos especiales, entre los cuales se encuentran: puzolanas, escoria, sílice, cemento con alto contenido de alúmina, cemento clase J, sistemas aluminosilicato de calcio [5].

1.4 Cemento Pórtland [1]

El cemento Pórtland es el material más utilizado para la preparación de la lechada de cemento que al ser colocada en el espacio anular entre el hoyo y el revestidor, se hidratará y endurecerá permitiendo crear un sello mecánico que garantizará el aislamiento zonal. El cemento Pórtland está constituido por cuatro compuestos: silicato tricálcico, silicato dicálcico, aluminato tricálcico y aluminoferrato tetracálcico. Estos compuestos son formados en un horno a través de una serie de reacciones químicas a temperaturas tan altas como 2732 °F (1500 °C). En la manufactura del cemento Pórtland se utilizan como materias primas cal, sílice, alúmina y óxido de hierro; estos materiales son finamente molidos y mezclados en determinadas proporciones, luego la mezcla es introducida en un horno y se convierte en clínker de cemento. El clínker es enfriado, se añade entre 3 y 5% de yeso y se pulveriza; el producto pulverizado es el cemento Pórtland.

1.5 Química del cemento Pórtland a altas temperaturas [1, 5]

El cemento Pórtland es básicamente silicato de calcio, siendo el silicato tricálcico y el silicato dicálcico los compuestos más abundantes. Estos compuestos al estar en presencia de agua se hidratan formando un gel de silicato de calcio hidratado llamado “gel CSH”, el cual es el responsable del desarrollo de la resistencia mecánica y de la estabilidad dimensional del cemento endurecido a temperaturas ordinarias. Adicional al gel CSH se forma una notable cantidad de hidróxido de calcio.

El gel CSH es el producto de la hidratación temprana del cemento incluso a elevada temperatura y presión, hasta un máximo de 230 °F. A mayores temperaturas el gel CSH sufre una transformación que trae como consecuencia la disminución de la resistencia a la compresión y el incremento de la permeabilidad del cemento endurecido. Este fenómeno es conocido como retrogresión de la resistencia.

A temperaturas mayores que 230 °F el gel CSH sufre transformaciones y se convierte en una fase llamada alfa silicato dicálcico hidratado (α -C₂SH), la cual es altamente cristalina y mucho más densa que el gel CSH; como resultado de la formación de α -C₂SH ocurre una disminución del volumen del cemento endurecido que deteriora la

integridad del cemento. Más grave que la disminución de la resistencia es el significativo incremento de la permeabilidad del cemento endurecido, ya que para prevenir la comunicación interzonal la permeabilidad al agua del cemento debe ser menor que 0,1 md, y ésta puede incrementar entre 10 y 100 veces a altas temperaturas.

El problema de la retrogresión de la resistencia puede ser prevenido mediante la disminución del módulo de óxido de calcio/sílice (módulo C/S) en el cemento; para lograr esto el cemento Pórtland es parcialmente reemplazado por cuarzo molido, usualmente como harina de sílice. En la Figura 3 se muestra un diagrama que refleja las condiciones de formación (módulo de óxido de calcio/dióxido de silicio y temperatura) de diferentes compuestos de silicato de calcio.

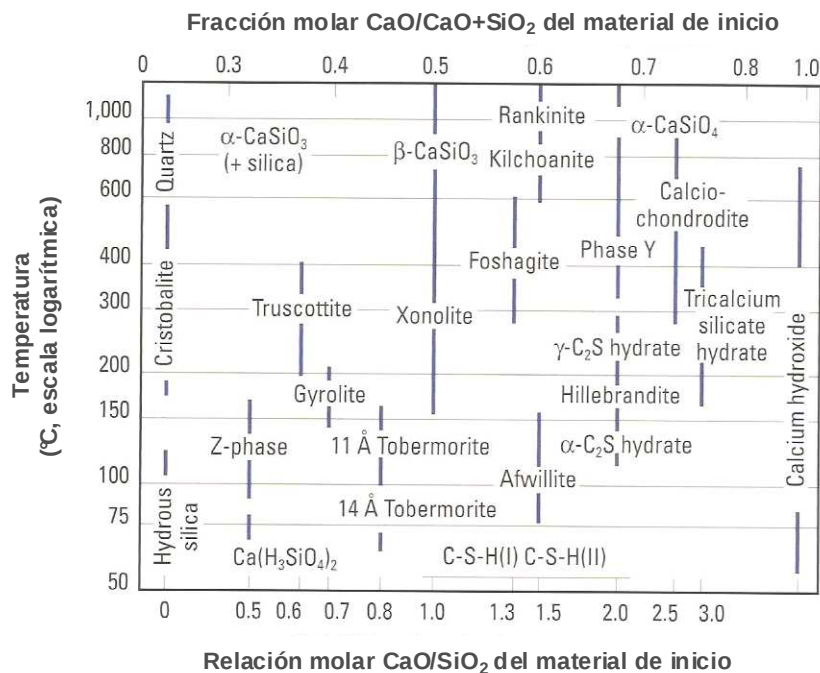


Figura 3. Condiciones de formación de varios silicatos de calcio [1]

El gel CSH tiene una relación molar óxido de calcio/dióxido de silicio (módulo C/S) promedio de 1,5. La formación de $\alpha\text{-C}_2\text{SH}$ a 230 °F puede ser evitada mediante la adición de 35 a 40% BWOC de sílice, lo cual permite la reducción del módulo C/S a 1. En estas condiciones se forma un mineral conocido como Tobermorita

$((\text{CaO})_5(\text{SiO}_2)_6(\text{H}_2\text{O})_5)$, el cual permite mantener una alta resistencia a la compresión y una baja permeabilidad. A medida que la temperatura de curado incrementa hasta 300 °F, la Tobermorita se convierte en Xonotlita $((\text{CaO})_6(\text{SiO}_2)_6\text{H}_2\text{O})$ y una pequeña cantidad de Gyrolita $((\text{CaO})_6(\text{SiO}_2)_3(\text{H}_2\text{O})_2)$, generando poco deterioro en la matriz de cemento. En algunos casos, la Tobermorita soporta hasta 482 °F en los sistemas de cemento Pórtland debido a la sustitución del aluminio en la estructura de red.

En general, los cementos endurecidos que consisten en geles CSH con módulos C/S menores o iguales que 1 tienden a poseer elevada resistencia a la compresión y baja permeabilidad al agua, cuando son sometidos a altas temperaturas.

La formación de Tobermorita y Xonotlita está asociada con el desarrollo favorable de la resistencia a la compresión del cemento.

1.6 Cementos con alto contenido de alúmina

Los cementos con alto contenido de alúmina son fabricados especialmente para aplicaciones donde se requieren aglomerantes refractarios. Este tipo de material es utilizado en aquellos pozos donde se aplicará la combustión en sitio y cuando se van a cementar zonas congeladas. El principal compuesto cementante es el aluminato monocálcico. A diferencia del cemento Pórtland, los cementos con alto contenido de alúmina endurecidos no contienen hidróxido de calcio y esta es la razón por la cual pueden soportar grandes fluctuaciones de temperatura [1].

1.7 Cemento clase J

Este tipo de cemento fue desarrollado a principios de los años 1970 para la cementación de pozos cuya temperatura estática sea mayor que 260 °F; a pesar de que el cemento J fue extraído de la lista de cementos de la API, aún se fabrica y es utilizado para aplicaciones en pozos geotérmicos. Al igual que el cemento Pórtland, el cemento clase J es rico en silicato de calcio, sin embargo, no presenta fases de aluminato o silicato tricálcico. El cemento clase J presenta la ventaja de que no requiere la adición de sílice, pues presenta un módulo C/S ajustado de modo que luego del endurecimiento se obtiene la Tobermorita y la Xonotlita. Adicionalmente,

la resistencia a los sulfatos del cemento clase J es muy alta debido a la ausencia del aluminato tetracálcico [1].

1.8 Sistemas aluminosilicato de calcio

Este tipo de sistemas tiene una composición tal que busca parecerse a la composición de la formación en aplicaciones de pozos geotérmicos. Bajo ambientes térmicos uno de los minerales más estables es la Anortita, la cual contiene en determinadas proporciones CaO , Al_2O_3 y SiO_2 . Los sistemas aluminosilicato de calcio que se asemejan a la Anortita consisten en una solución sólida conformada por una mezcla trimodal entre partículas finas de caolinita calcinada y harina de sílice, partículas de tamaño medio de cemento clase G y partículas gruesas de microesferas cerámicas. Las microesferas además permiten disminuir la densidad de la lechada de cemento [1].

1.9 Sistemas fosfato de calcio

Los sistemas con fosfato de calcio fueron desarrollados originalmente para aplicaciones en odontología, pero recientemente se han encontrado aplicaciones para cementos térmicos, en particular para pozos geotérmicos donde se presentan altas concentraciones de CO_2 . El cemento Pórtland es susceptible al ataque por CO_2 , resultando en la pérdida de material cementante y trayendo como consecuencia pérdida de la resistencia a la compresión y disminución de la permeabilidad. La principal fase cementante es la hidroxapatita. El cemento con fosfato de calcio muestra una excelente resistencia a la carbonatación provocada por el ataque del CO_2 [1].

1.10 Cementación de pozos para recuperación mediante métodos térmicos [6]

La aplicación de calor para estimular la producción de crudo pesado y extrapesado ha sido practicada por más de 50 años y se realiza a través de diferentes métodos tales como combustión en sitio, calentadores de fondo de pozo, inyección de fluidos calientes y estimulación con vapor; de todos ellos los más usados son combustión en

sitio e inyección de vapor. Estas técnicas han sido la salvación de muchos campos con crudos de alta viscosidad y se basan en la transferencia de calor para reducir la viscosidad.

Tal como ocurre en los pozos geotérmicos, los pozos donde se aplicarán los métodos de combustión en sitio e inyección de vapor presentan formaciones problemáticas y se caracterizan por presentar zonas débiles y no consolidadas, con bajo gradiente de fractura y alta permeabilidad; como resultado de ello son frecuentes los problemas de pérdida de circulación.

La mayoría de los pozos para recuperación térmica tienen profundidades menores que 3000 pie y pueden ser horizontales o desviados. Las temperaturas de circulación durante las operaciones de cementación primaria frecuentemente son menores que 104 °F y por ello se requiere del uso de aceleradores tales como cloruro de calcio o cloruro de sodio para promover el desarrollo temprano de la resistencia a la compresión.

Generalmente, las tuberías en la superficie están revestidas con material aislante y los pozos inyectoros pueden ser terminados o completados de tal manera que se reduzcan las pérdidas de calor. Debido a los esfuerzos que por el calor se le imprime al revestidor de los pozos inyectoros, es costumbre utilizar pozos nuevos y cementar el revestidor hasta la superficie.

Cuando el calor es suplido, inicialmente el incremento de temperatura debe ser controlado para prevenir un choque térmico indebido al revestidor y al cemento. Sin embargo, debido a la expansión térmica, surgen altos niveles de esfuerzo sobre la tubería y el sello de cemento, por lo tanto, se requiere la mayor adherencia en las interfaces cemento-tubería y cemento-formación. Si no existe una buena adherencia puede ocurrir comunicación interzonal y expansión de la tubería.

Se han realizado diferentes estudios para desarrollar nuevas técnicas de cementación que minimicen los efectos de la expansión térmica, entre los cuales está la colocación de empaaduras térmicas y la inclusión de una manga deslizante en el revestidor de modo que se pueda mover libremente en respuesta a los esfuerzos originados por los cambios de temperatura. Otro procedimiento consiste en mantener el revestidor

tensionado durante la operación de cementación para minimizar la expansión durante los choques térmicos.

El sello de cemento debe ser capaz de soportar la exposición a elevadas temperaturas y los ciclos de temperatura asociados con los métodos de combustión en sitio e inyección de vapor. Para maximizar la entrega de calor a las zonas de interés se recomienda utilizar un cemento aislante, sin embargo la presencia de este tipo de cemento incorpora esfuerzos adicionales sobre el revestidor.

1.11 Consideraciones para el diseño de lechadas en pozos a ser sometidos a procesos de IAV

En la mayoría de los casos, la lechada de cemento está sujeta a temperaturas relativamente bajas durante el trabajo de cementación primaria y el curado inicial; pero una vez que el cemento se endurece, éste debe ser capaz de soportar el choque térmico asociado al proceso de recuperación mejorada de crudos, como es la inyección de vapor [7].

La temperatura de los yacimientos raramente excede los 600 °F, por lo tanto, el cemento Pórtland es usado en casi todas las completaciones de pozos donde se utilizará la inyección de vapor como método de recuperación de crudos.

En este tipo de pozos se requiere de un cemento resistente y con baja permeabilidad, condiciones que son perfectamente alcanzadas con lechadas de cemento de densidad normal a alta densidad. Pero tales lechadas no se pueden utilizar debido a las consideraciones de pérdida de circulación y conductividad térmica. Por ello, se han estado realizando investigaciones para desarrollar lechadas de cemento de baja densidad con alta resistencia a la compresión y baja permeabilidad que soporten las condiciones existentes cuando se aplican métodos térmicos de recuperación.

Las lechadas de cemento Pórtland formuladas con extendedores convencionales, tales como perlita, bentonita, tierras diatomáceas, etc., pueden ofrecer un desempeño adecuado para la cementación de pozos a ser sometidos a inyección de vapor, siempre y cuando la densidad de tales lechadas sea mayor que 12,5 lpg [1].

Las formaciones presentes en los pozos donde se aplicará inyección de vapor conducen al uso de lechadas de cemento con densidades menores que 12,5 lpg con el fin de evitar pérdidas de circulación o daños a la formación. En consecuencia, las lechadas de cemento espumado que contienen sílice y lechadas extendidas con microesferas de vidrio son comunes en las completaciones de pozos que serán sometidos a inyección de vapor.

El material de mayor uso para la obtención de lechadas de cemento de baja densidad lo constituyen las microesferas cerámicas huecas y macizas, tanto vítreas como cristalinas, cuya gravedad específica oscila entre 0,12 y 2; éstas son agregadas a las lechadas de cemento como material extendedor e inerte para obtener densidades entre 9,5 y 11 lpg (1,14 y 1,32 gr/cm³) [8]. Sin embargo, la principal desventaja de este material es su elevado costo, el cual oscila entre 2 y 3,2 US\$/lb y esto incrementa el precio por barril de la lechada de cemento, atribuido a que las microesferas de vidrio son manufacturadas en el exterior, en algunos casos con material de alta pureza [8, 9].

2. Inyección alterna o cíclica de vapor [2, 6]

Es un proceso de estimulación y consiste en inyectar vapor de agua durante un período corto o largo en un pozo productor de baja tasa de petróleo. Luego se cierra por un corto período y se pone otra vez en producción por un período adecuado. Este proceso es conocido por varios nombres: remojo con vapor, estimulación con vapor, inyección alterna o inyección cíclica de vapor.

Las etapas del proceso de inyección alterna de vapor son las siguientes y son mostradas en la Figura 4:

- Inyección de vapor por un período conveniente: generalmente una a tres semanas.
- Cierre de producción por un corto período (remojo o empape): normalmente tres a cinco días, para que el vapor “empape” la formación.
- Apertura de producción por un período conveniente (ciclo): en general cuatro a seis meses.
- Se repite el ciclo una, dos, tres veces y así sucesivamente.

En este proceso, a diferencia de la inyección continua de vapor, un mismo pozo se comporta como pozo inyector durante la etapa de inyección de vapor y luego se comporta como pozo productor durante la etapa de producción.

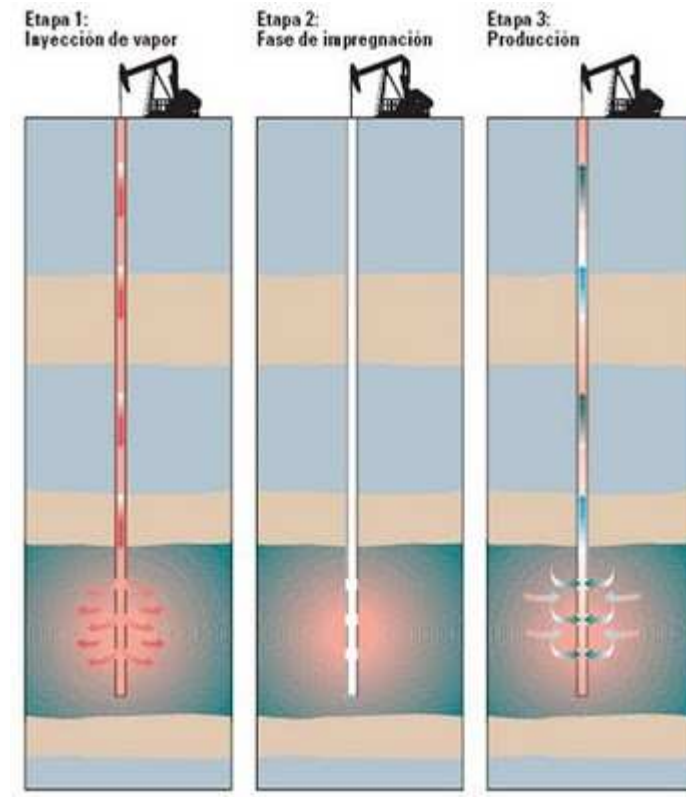


Figura 4. Esquema del proceso de inyección alterna de vapor [7]

La inyección alterna de vapor es apreciada porque la respuesta de producción se obtiene antes y la cantidad de petróleo extraído por cantidad de vapor inyectado es frecuentemente mayor que la obtenida mediante desplazamientos térmicos. Además, se pueden utilizar calderas relativamente pequeñas que también pueden ser llevadas de pozo a pozo. Los pozos pueden ser estimulados con vapor varias veces. Un ejemplo de la respuesta de producción de petróleo obtenida por la operación de cinco ciclos de estimulación de vapor se representa en la Figura 5 [6].

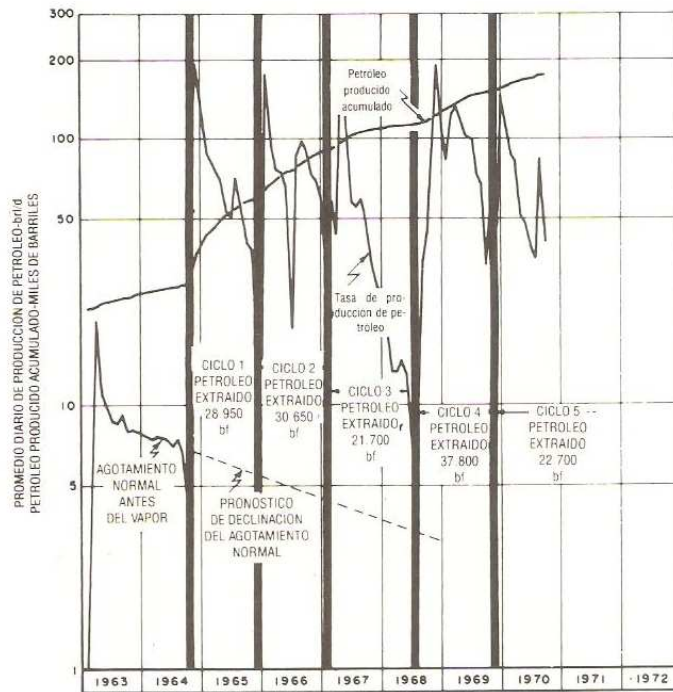


Figura 5. Respuesta típica a la inyección alterna de vapor [6]

2.1 Utilización de la inyección alterna de vapor [10]

La inyección alterna de vapor puede ser aplicada en los siguientes casos:

- En yacimientos pequeños o con pobre continuidad (no justifican muchos pozos para aplicar un proceso de desplazamiento) es lo mejor para aumentar la tasa de petróleo y rendimiento económico.
- En yacimientos con crudos de alta viscosidad para reducir ésta. Debe haber energía natural.
- Como precursora en yacimientos donde la inyección continua de vapor es favorable.

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Para determinar si es o no factible técnicamente el uso de las microesferas de polímero como extendedor en lechadas de cemento para la cementación de pozos donde se aplicará la inyección alterna de vapor se utilizaron los materiales, procedimientos y equipos mencionados a continuación.

1. Materiales

1.1 Microesferas de polímero

El material cuya funcionalidad es objeto de estudio en este trabajo consta de microesferas de polímero, las cuales son incorporadas en la lechada de cemento como extendedor, es decir como un aditivo para disminuir la densidad de la lechada, en sustitución de las microesferas de vidrio que representan el extendedor comercial.

Desde el punto de vista morfológico las microesferas de polímero consisten en un polvo blanco que contiene partículas esféricas, cuyo interior tiene una estructura de celdas cerradas donde contiene aire atrapado (ver Figura 6 y Figura 7), siendo ésta la razón por la cual este material tiene una muy baja gravedad específica respecto al cemento, es aproximadamente seis veces más liviano que el cemento petrolero, el cual tiene una gravedad específica de 3,14.

En cuanto a su composición química se puede decir que es un polímero tipo vinil expandido que además se caracteriza por ser hidrofóbico, es decir que no absorbe agua lo cual es muy apropiado ya que incrementara el requerimiento de agua en la lechada de cemento y la microesfera de polímero no perderá su condición de extendedor.

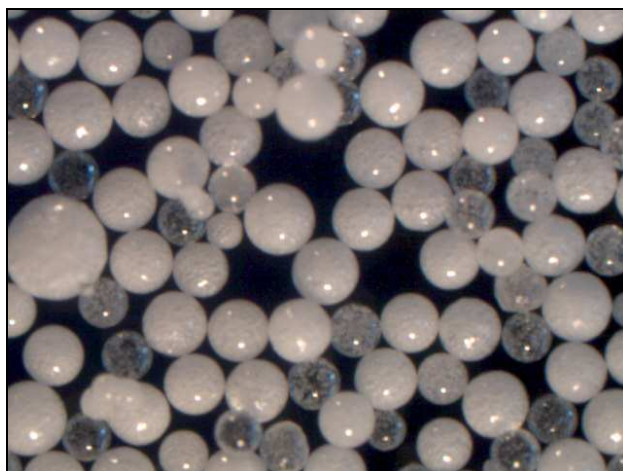


Figura 6. Aspecto físico de las microesferas de polímero, fotografía tomada con microscopio óptico a 5X



Figura 7. Fotografía tomada con microscopio electrónico de barrido de la estructura interna de las microesferas de polímero

En la Tabla 1 se muestran las características físicas de las microesferas de polímero empleadas en esta investigación.

Tabla 1. Características de las microesferas de polímero

<i>Propiedad</i>	<i>Valor</i>
Gravedad específica, adimensional	0,49
Densidad aparente, kg/m ³	300
Temperatura de transición vítrea, °F	210
Temperatura de fusión, °F	464

La gravedad específica de este material se determina mediante la técnica de porosimetría por inyección de mercurio a bajas presiones, según la norma ASTM D 4284-07 [11]. Este valor es el utilizado para realizar los cálculos de la cantidad de aditivos que debe llevar la lechada de cemento para una densidad determinada.

La densidad aparente se determina mediante el cociente entre la masa de la cantidad de polímero que ocupa un volumen de 100 ml en un cilindro graduado, sin compactar el material, como se verá esta propiedad incluye el aire que rodea a las partículas entre sí.

La temperatura de transición vítrea es la temperatura a la cual el material comienza a reblandecerse, en este punto el material no tiene resistencia mecánica y adquiere una consistencia pastosa; este parámetro se determina mediante la técnica de calorimetría diferencial de barrido. En la Figura 8 se muestra la curva de calorimetría diferencial de barrido realizado a las microesferas de polímero, donde se evidencia que la temperatura de transición vítrea de dicho material es 210 °F. Esto significa que las microesferas de polímero no deben someterse a temperaturas mayores que 210 °F para evitar que pierdan su integridad mecánica.

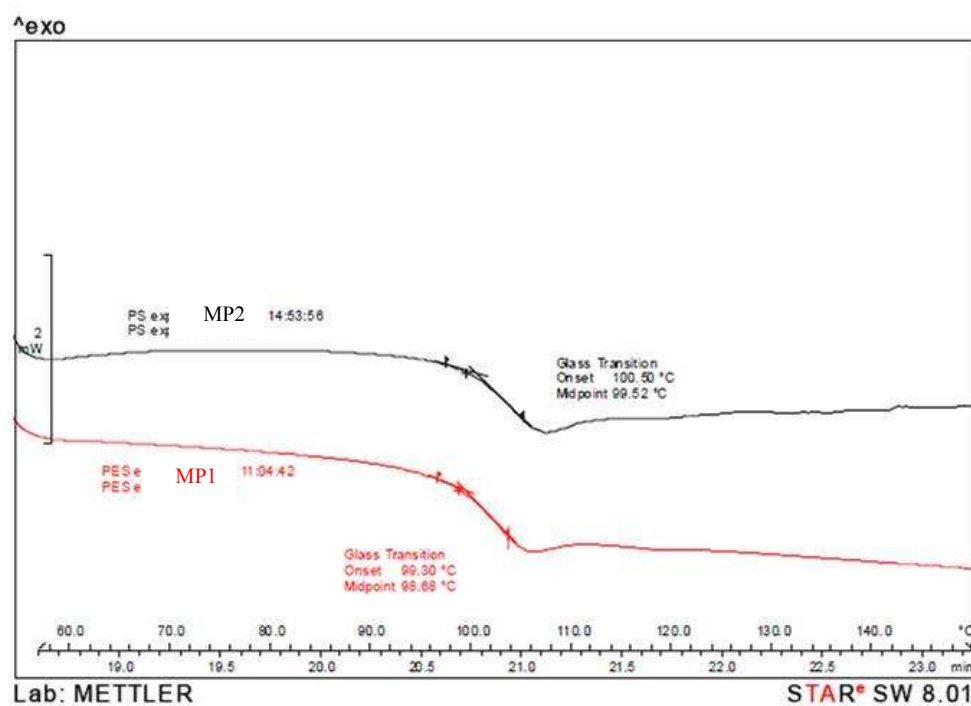


Figura 8. Calorimetría diferencial de barrido de las microesferas de polímero (DSC, por sus siglas en inglés)

El tamaño promedio de las microesferas de polímero oscila entre 250 y 350 micras y su correspondiente distribución de tamaño de partículas se muestra en la Figura 9; dicha distribución se determina mediante el tamizado de 100 gr de material en una serie de tamices durante 10 min [12].

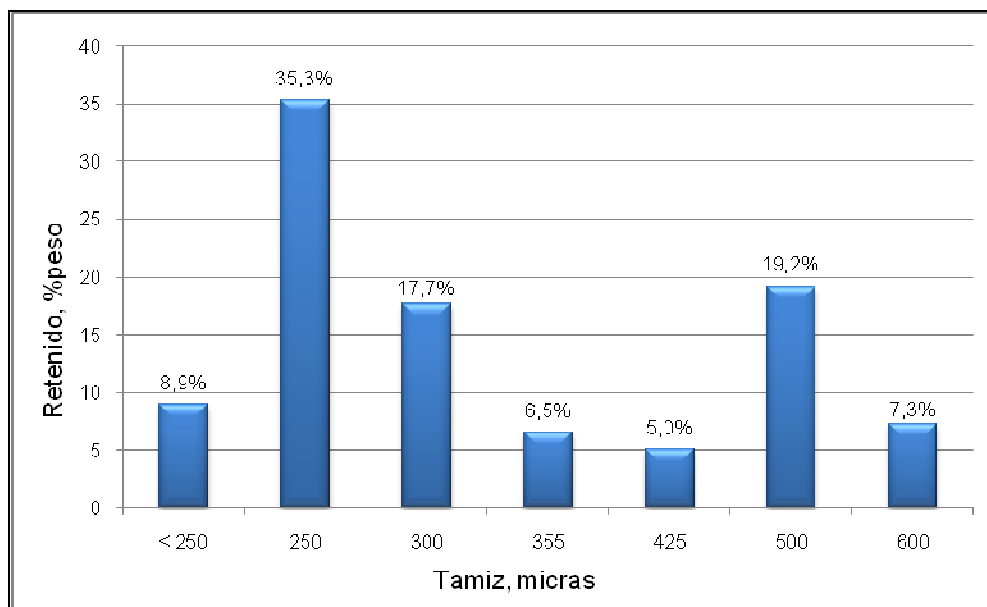


Figura 9. Distribución de tamaño de partículas promedio de las microesferas de polímero

1.2 Cemento petrolero y aditivos

En la preparación de las lechadas de cemento se utiliza el cemento petrolero como el material base que es el responsable del desarrollo de la resistencia y de la integridad mecánica del sello de cemento en el espacio anular formado por el hoyo y el revestidor. La clase de cemento petrolero (clasificación establecida en la norma ISO 10426-1 [13]) empleado en esta investigación es clase B y clase H, debido a la profundidad de las unidades de explotación de yacimientos (UEY) consideradas para el estudio y a la disponibilidad del material.

Adicionalmente, se utiliza agua y una serie de aditivos que cumplen funciones específicas y se emplean para ajustar las propiedades de la lechada a los requerimientos técnicos del trabajo de cementación.

Entre los aditivos utilizados en las lechadas de cemento evaluadas en este estudio, el más importante es la harina de sílice debido a que evita el fenómeno de retrogresión de la resistencia mecánica en la lechada de cemento cuando ésta es sometida a temperaturas mayores que 230 °F, en la cual se produce una disminución de la resistencia a la compresión y un incremento en la permeabilidad del sello de cemento.

Los efectos antes mencionados son indeseables en los pozos sometidos a procesos térmicos de recuperación, pues de ocurrir permitirían la comunicación interzonal.

El resto de los aditivos utilizados en las lechadas de cemento formuladas con microesferas de polímero y en la lechada de cemento comercial fueron proporcionados por las compañías de cementación, y su función y familia química se mencionan en la sección de resultados. Según su funcionalidad se utilizaron aditivos para control de filtrado, incrementar la viscosidad, acelerar o retardar el tiempo de fraguado y evitar la formación de espuma (durante la preparación de la lechada).

2. Metodología experimental y equipos

Para evaluar la factibilidad técnica de utilizar lechadas de cemento formuladas con microesferas de polímero destinadas a la cementación de pozos donde se aplicarán métodos térmicos de recuperación de hidrocarburos, específicamente la inyección alterna de vapor, se diseñó una metodología conformada por tres etapas cuyo esquema es mostrado en la Figura 10 y se explica a continuación.

Etapas 1: Selección de las condiciones operacionales de una unidad de explotación de yacimientos donde se apliquen procesos de inyección alterna de vapor para la extracción de crudos pesados y extrapesados.

Para la selección de las UEY se consideraron los siguientes parámetros: la temperatura estática de fondo de hoyo, la presión de fractura del yacimiento, la profundidad vertical de los pozos, el método de producción de hidrocarburos. Esto permitió definir las condiciones de evaluación de las lechadas de cemento en el laboratorio. También se identificaron los diseños de las lechadas de cemento comúnmente utilizadas por las compañías de servicios a pozos en dichas áreas operacionales.

Una vez identificadas las UEY donde se aplica la inyección alterna de vapor, se procedió a seleccionar aquellas áreas con las siguientes características:

- Temperatura estática de fondo de hoyo igual o inferior a 180 °F, para evitar exponer las microesferas de polímero a temperaturas cercanas a su temperatura de transición vítrea o punto de reblandecimiento.
- Bajos gradientes de fractura, es decir donde se requiera una lechada de cemento de densidad entre 11,5 y 13,5 lpg.
- La profundidad de la sección a cementar no debe ser mayor que 6900 pie.

Los valores antes mencionados de temperatura, densidad de lechada de cemento y profundidad de la sección a cementar, están definidos por las características de las microesferas de polímero.

Etapas 2: Caracterización de las lechadas de cemento formuladas con microesferas de polímero bajo condiciones simuladas de los procesos de inyección alterna de vapor

En esta etapa se formularon y prepararon dos lechadas de cemento extendidas con microesferas de polímero a partir del diseño comúnmente utilizado en la UEY seleccionada, denominadas LMP 1 y LMP 2. Para ello se sustituyó el aditivo extendedor (microesferas de vidrio) utilizado en la lechada comercial 1 por las microesferas de polímero y posteriormente se realizaron los cambios necesarios en la composición de la lechada de cemento hasta cumplir con los criterios de mezclabilidad, densidad, reología y resistencia a la compresión.

Luego se realizó el curado inicial de cada lechada de cemento (LMP 1, LMP 2 y lechada comercial 1) aplicando las condiciones del pozo y la matriz de cemento obtenida fue caracterizada por determinación de la estabilidad, resistencia a la compresión destructiva y no destructiva, resistencia a la tensión (indirecta), permeabilidad y morfología.

Paralelamente, se sometió nuevamente cada lechada de cemento (LMP 1, LMP 2 y lechada comercial 1) al curado inicial seguido por la aplicación de dos choques térmicos de 350 °F cada uno para simular las condiciones existentes en los procesos de inyección alterna de vapor. La matriz de cemento resultante fue caracterizada por

determinación de la resistencia a la compresión destructiva y no destructiva, resistencia a la tensión (indirecta), permeabilidad y morfología.

Con base en la comparación de los valores de las propiedades medidas a la lechada de cemento luego del curado inicial y luego de la aplicación de los choques térmicos se determina el desempeño de cada lechada de cemento (LMP 1, LMP 2 y lechada de cemento comercial 1) bajo las condiciones simuladas de los procesos de inyección alterna de vapor. También se comparó el desempeño de las lechadas LMP 1 y LMP 2 con el de la lechada comercial 1, para determinar la factibilidad técnica del diseño propuesto en este trabajo.

Etapa 3: Propuesta de diseño de una lechada de cemento formulada con microesferas de polímero para la cementación de pozos a ser sometidos a inyección alterna de vapor

En esta etapa se realizó el diseño, formulación y caracterización basada en las prácticas recomendadas en la norma ISO 10426-2 [14], de las lechadas de cemento extendidas con microesferas de polímero, mediante ensayos de densidad, reología, filtrado, tiempo de bombeabilidad, fluido libre, estabilidad y resistencia a la compresión (destructiva y no destructiva) bajo las condiciones simuladas de los procesos de inyección alterna de vapor, tomando en cuenta las condiciones operacionales de la UEY seleccionada.

Con esta etapa, además de verificar el desempeño de las lechadas de cemento extendidas con microesferas de polímero, se presenta la propuesta del diseño de una lechada de cemento (LMP 3) que puede ser empleada en la cementación de pozos que serán sometidos a inyección alterna de vapor.

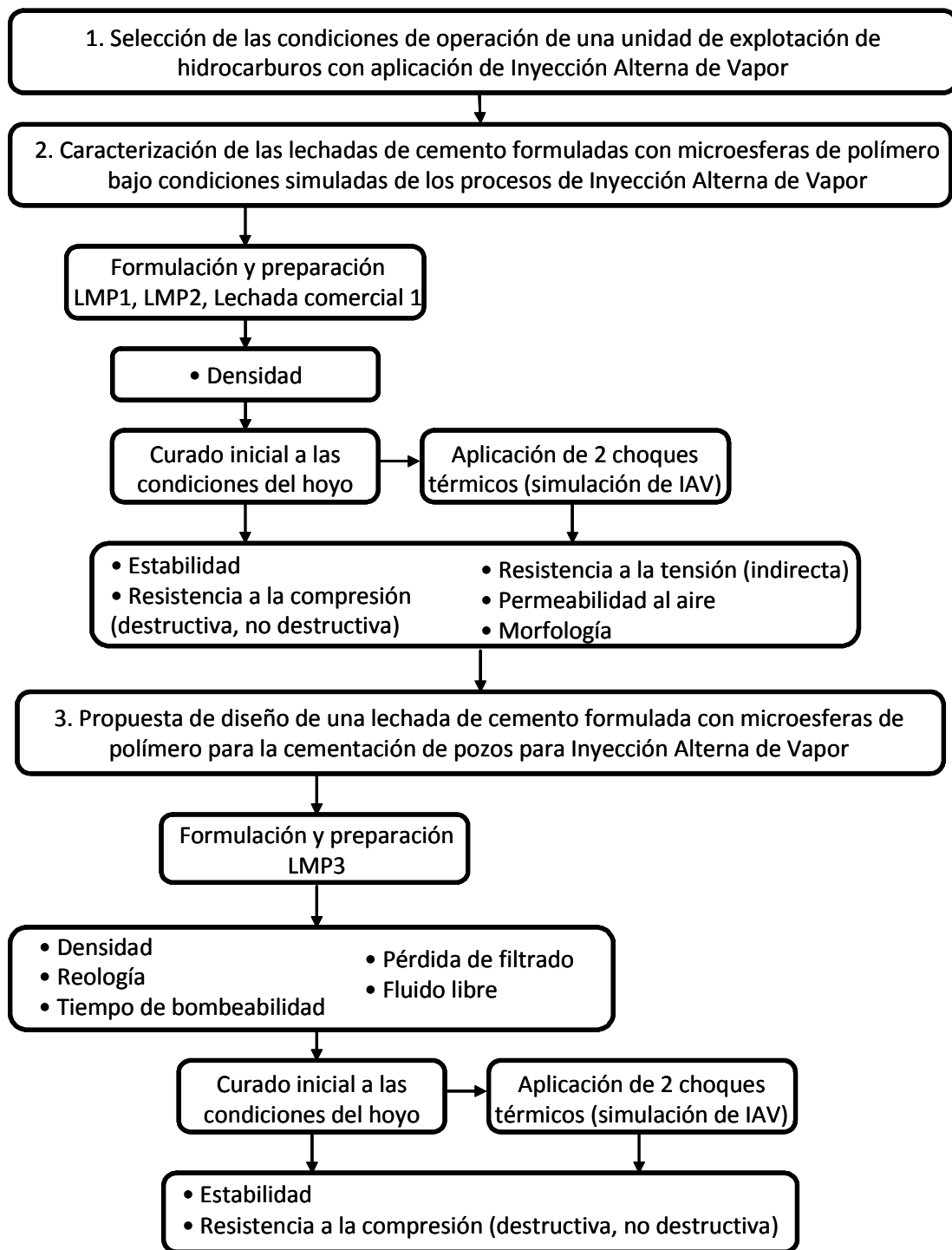


Figura 10. Diagrama esquemático de la metodología experimental

2.1 Preparación de las lechadas de cemento

En la preparación de las lechadas de cemento LMP 1, LMP 2 y LMP 3 se utilizaron las microesferas de polímero, cemento, agua y aditivos según el diseño de cada una y fueron preparadas mediante el mezclado a 4000 r.p.m. durante 5 min contados a partir de la incorporación de la mezcla seca al agua de mezcla, para permitir un mezclado homogéneo de los aditivos. Del mismo modo, se procedió con la lechada de cemento comercial la cual fue preparada utilizando microesferas de vidrio, cemento, agua y aditivos. En esta sección se observa si los componentes de la lechada se integran apropiadamente entre sí bajo las condiciones antes mencionadas, es decir si su mezclabilidad es aceptable o no. Si se observa dificultad de incorporación de los aditivos durante el mezclado entonces se debe modificar el diseño ya que, por lo general, no se logrará el mezclado con los equipos de campo. El equipo de mezcla utilizado se muestra en la Figura 11.



Figura 11. Mezcladora

2.2 Densidad

La densidad de la lechada de cemento se determinó según las prácticas recomendadas en la norma ISO 10426-2 [14], para verificar que la lechada preparada cumpliera con el requerimiento de densidad exigido por las características de la UEY, si este valor está por debajo o por encima del requerido se puede perder el control de los fluidos

dentro del pozo ya que se produciría una arremetida o una pérdida de circulación, respectivamente. El equipo utilizado es una balanza presurizada como la mostrada en la Figura 12 y tiene una apreciación de 0,1 lpg. Se reporta el valor de una medida con una incertidumbre de $\pm 0,05$ lpg.

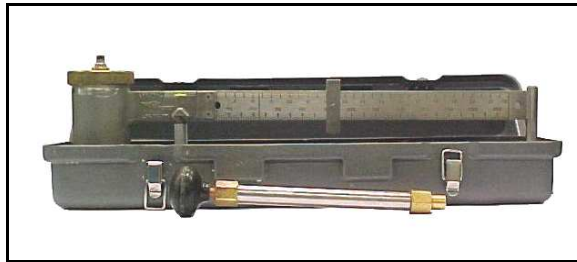


Figura 12. Balanza presurizada

2.3 Reología

La reología de la lechada de cemento se realizó según el procedimiento descrito en las prácticas recomendadas en la norma ISO 10426-2 [14], con el fin de determinar los parámetros reológicos más utilizados en la industria petrolera como lo son la viscosidad plástica y el punto cedente, los cuales son empleados para determinar si la lechada de cemento puede ser mezclada y bombeada en el campo sin generar problemas operacionales como por ejemplo la pérdida de circulación. El equipo utilizado es un viscosímetro rotacional como el mostrado en la Figura 13 y tiene una apreciación de $1 \text{ lb}_f/100\text{pie}^2$. Se reporta el promedio de dos lecturas con una incertidumbre de $\pm 0,5 \text{ lb}_f/100\text{pie}^2$, para cada velocidad del viscosímetro.



Figura 13. Viscosímetro rotacional

2.4 Tiempo de bombeabilidad

El tiempo de bombeabilidad se determinó según el procedimiento descrito en las prácticas recomendadas en la norma ISO 10426-2 [14], el cual se fundamenta en medir cuánto tiempo tarda la lechada en alcanzar una consistencia de 75 unidades Bearden, mientras es agitada con una paleta que gira a 150 r.p.m., bajo las condiciones de presión y temperatura del pozo. Este parámetro indica el tiempo después del cual la lechada ya no puede ser bombeada al pozo. El equipo utilizado es un consistómetro presurizado como el mostrado en la Figura 14 y tiene una apreciación de 1 s y 1 Bc, en las dimensiones de tiempo y consistencia, respectivamente. Se reporta el valor de una medida con una incertidumbre de ± 1 s, en el tiempo de bombeabilidad.



Figura 14. Consistómetro presurizado

2.5 Pérdida de filtrado

La pérdida de filtrado de la lechada de cemento se realizó siguiendo las prácticas recomendadas en la norma ISO 10426-2 [14] con el objetivo de determinar cuánto volumen de filtrado genera la lechada o si se deshidrata bajo las condiciones de temperatura del pozo y aplicando 1000 psi de presión; las lechadas de cemento para zonas productoras deben tener baja pérdida de filtrado para evitar que el filtrado genere daños a la formación y evitar que pierda el fluido necesario para su completa hidratación y curado. El equipo utilizado es una celda de filtración estática ATAP como la mostrada en la Figura 15. El volumen de filtrado se recolecta y mide en un cilindro graduado de 50 ml de capacidad con una apreciación de 1 ml. Se reporta el valor de la medida con una incertidumbre de $\pm 0,5$ ml.



Figura 15. Celda de filtración estática ATAP

2.6 Fluido libre

El porcentaje de fluido libre de la lechada de cemento se realizó siguiendo las prácticas recomendadas en la norma ISO 10426-2 [14] con el objetivo de determinar si se genera fluido libre en el tope de la lechada una vez que ésta ha sido colocada en el pozo. Las lechadas de cemento no deben generar fluido libre, de lo contrario esto indica que parte del fluido, necesario para su adecuada hidratación y curado, no estará disponible. El equipo utilizado es un cilindro de vidrio como el mostrado en la Figura 16. El ensayo se realiza en un cilindro graduado de 250 ml de capacidad y una apreciación de 2 ml. Se reporta el valor de la medida con una incertidumbre de ± 1 ml.

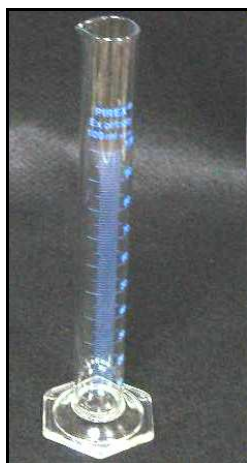


Figura 16. Cilindro de vidrio

2.7 Curado de las lechadas de cemento a condiciones de pozo

Una vez preparada la lechada de cemento en la mezcladora, se realizó el curado de las mismas en moldes cúbicos de 2 plg x 2 plg (ver Figura 17 a) para obtener las muestras a ser sometidas a los ensayos de resistencia a la compresión destructiva y en moldes cilíndricos de 1 plg diámetro x 8 plg largo (ver Figura 17 b) para obtener las muestras a ser sometidas a los ensayos de resistencia a la tensión (indirecta), estabilidad, permeabilidad al gas y morfología.

El llenado de los moldes con la lechada de cemento se realizó según el procedimiento descrito en las prácticas recomendadas en la norma ISO 10426-2 [14], luego se colocaron en una cámara de curado presurizada (ver Figura 18) a la temperatura estática de fondo de hoyo y una presión de 2000 psi, durante 24 h para el curado inicial de la lechada. El curado y desmontaje de los moldes se realizó según el procedimiento descrito en las prácticas recomendadas en la norma ISO 10426-2 [14].



(a)



(b)

Figura 17. Moldes cúbicos (a) y cilíndricos (b) empleados para el curado de las lechadas de cemento



Figura 18. Cámara de curado presurizada

2.8 Simulación de las condiciones de los procesos de inyección alterna de vapor

Para la simulación de las condiciones de los procesos de inyección alterna de vapor se aplicó a cada lechada de cemento el siguiente programa de calentamiento, tanto en la cámara de curado presurizada (ver Figura 18) como en el Analizador Ultrasónico de Cemento, siguiendo la metodología aplicada en estudios previos [7]:

- Curado inicial: temperatura estática de fondo de hoyo, 2000 psi, 24 h; simula el proceso de curado después que se ha colocado la lechada de cemento en el pozo.
- Aplicación del 1^{er} choque térmico: se incrementa la temperatura hasta 350 °F en 1 h, 2000 psi, se mantiene en 350 °F durante 24 h; simula la etapa de inyección de vapor.

- Se deja enfriar el sistema hasta la temperatura estática de fondo de hoyo manteniendo una presión de 2000 psi, 24 h; simula la etapa de remojo o empape del yacimiento y la etapa de producción.
- Aplicación del 2^{do} choque térmico: se incrementa la temperatura hasta 350 °F en 1 h, 2000 psi, se mantiene en 350 °F durante 24 h; simula la etapa de inyección de vapor después que la producción ha disminuido, generalmente después de 6 meses a 1 año luego de la primera inyección de vapor.
- Enfriamiento hasta temperatura ambiente y desmontaje.

En la Figura 19 se esquematiza la simulación de las condiciones de ciclos de inyección alterna de vapor.

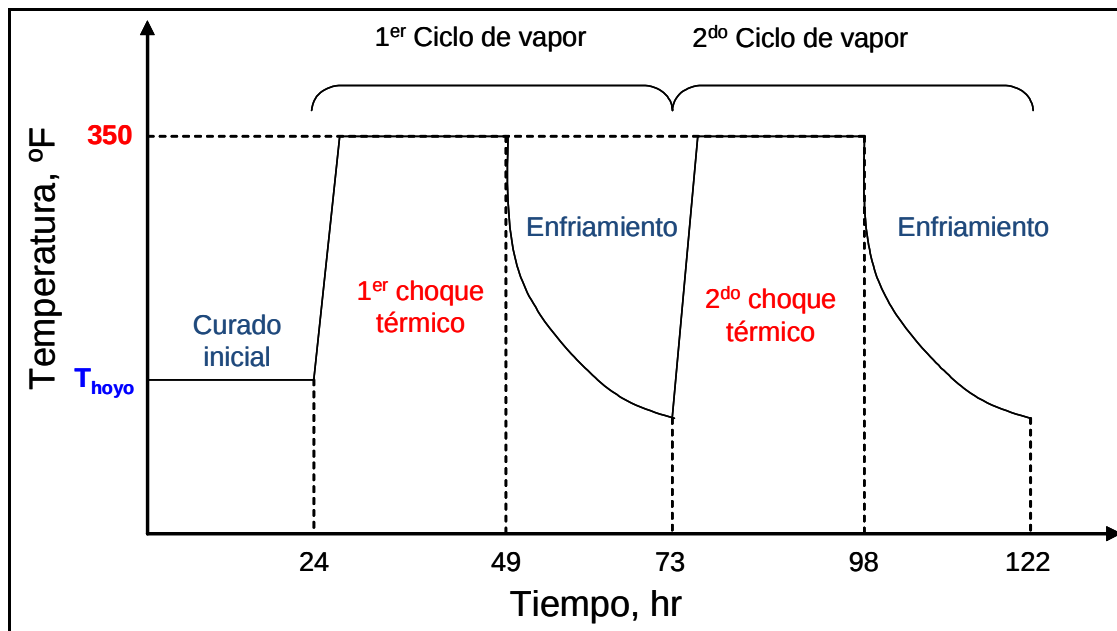


Figura 19. Simulación de las condiciones de los procesos de inyección alterna de vapor

2.9 Estabilidad

La estabilidad de la lechada de cemento se determina después que ha sido curada en moldes cilíndricos a las condiciones del pozo y consiste en medir la densidad mediante el principio de flotabilidad de Arquímedes a secciones de igual longitud

obtenidas del corte de un cilindro de 1 plg de diámetro y 8 plg de largo; de ese modo se mide la densidad del cemento desde el tope hasta el fondo. Se dice que una lechada de cemento es estable cuando su densidad no varía más de 0,5 lpg entre el tope y el fondo, y este parámetro ha sido establecido basado en las experiencias de campo. El procedimiento aplicado está descrito en las prácticas recomendadas en la norma ISO 10426-2 [14] y se emplean los moldes y el equipo mostrados en la Figura 17 b y Figura 18, respectivamente. El valor de densidad de la lechada luego del curado se reporta como el promedio de dos mediciones con una incertidumbre de $\pm 0,01$ lpg.

2.10 Resistencia a la compresión destructiva

La resistencia a la compresión destructiva de la lechada de cemento se determina después que ha sido curada en moldes cúbicos (ver Figura 17 a) a las condiciones del pozo empleando el equipo mostrado en la Figura 18; los cubos obtenidos se extraen de los moldes y cada uno es colocado en una prensa hidráulica marca Shimadzu, modelo UH-20A (ver Figura 20) donde se aplica una carga axial hasta que se produce la fractura. El procedimiento aplicado está descrito en las prácticas recomendadas en la norma ISO 10426-2 [14]. El valor de resistencia a la compresión destructiva se reporta como el promedio de cuatro mediciones con una incertidumbre calculada como el error cuadrático medio, según la Ecuación 1.

$$\Delta x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n \cdot (n-1)}}$$

Ecuación 1

Donde $\bar{x}$ es el valor promedio de las medidas y n es el número de medidas.

Las medidas se realizan a las muestras curadas a condiciones iniciales y a aquellas sometidas a 2 choques térmicos.



Figura 20. Prensa Universal Shimadzu UH 20A

2.11 Resistencia a la compresión no destructiva

La resistencia a la compresión no destructiva se determina a partir de mediciones de cambios en la velocidad de la señal de ultrasonido que es enviada por el equipo a través de la lechada de cemento. A medida que incrementa la resistencia a la compresión de la lechada el tiempo de tránsito de la señal de ultrasonido disminuye, permitiendo mediante un algoritmo el cálculo de la resistencia a la compresión. Este ensayo fue realizado siguiendo las prácticas recomendadas en la ISO 10426-2 [14]. El uso de esta técnica, a diferencia de la anterior, permite observar el comportamiento de esta propiedad en forma dinámica, en el tiempo y no de manera puntual.

En este ensayo se obtiene el valor de resistencia a la compresión a las condiciones de curado inicial y luego de la aplicación de los choques térmicos empleando la misma muestra de lechada de cemento.

Esta propiedad se determinó mediante el equipo Analizador Ultrasónico de Cemento (ver Figura 21), UCA por sus siglas en inglés, en el cual se obtienen valores relativos de resistencia a la compresión de la lechada mientras se está curando bajo las condiciones de presión y temperatura de fondo de hoyo, y tiene una apreciación de 1 psi. Se reporta el valor de una medida con una incertidumbre de ± 1 psi.



Figura 21. Analizador Ultrasónico de Cemento

2.12 Resistencia a la tensión

Esta propiedad se determinó mediante ensayos de tensión indirecta, siguiendo el procedimiento descrito en la norma ASTM C496 / C496M-04 [15] donde se evaluaron secciones con un diámetro de 1 plg y una longitud de 2 plg, obtenidas a partir del corte de cilindros curados en moldes cilíndricos (ver Figura 17 b). El ensayo consiste en aplicar una carga uniaxial de manera perpendicular al eje longitudinal de la muestra tal como se muestra en la Figura 22, utilizando la prensa hidráulica (ver Figura 20).

Las medidas se realizan a las muestras curadas a condiciones iniciales y a aquellas sometidas a 2 choques térmicos.

El valor de resistencia a la tensión indirecta se reporta como el promedio de tres mediciones, con una incertidumbre calculada como el error cuadrático medio, según la Ecuación 1.



Figura 22. Ilustración del ensayo de tensión indirecta

El parámetro de resistencia a la tensión es importante para determinar si el sello de cemento soportará los esfuerzos de tensión inducidos por calentamiento en el revestidor.

La resistencia a la tensión debe ser determinada mediante ensayos de tensión directa y puede realizarse según la norma ASTM C307-99 [16] que utiliza probetas con forma de hueso de perro, y la JIS ACI-2, conocida también como método japonés. Sin embargo, el método según la norma ASTM C307-99 [16] presenta dos inconvenientes [17, 18], uno es la dificultad para obtener las probetas en forma de hueso de perro, y dos la probeta no falla en la zona esperada. En ese sentido, se ha determinado mediante modelaje numérico que las probetas utilizadas en ambos ensayos no son adecuadas ya que no cumplen con el requisito de fracturarse justo en la zona central, al contrario la fractura se genera en los puntos de unión con las mordazas, debido a que se producen puntos de concentración de esfuerzos en los puntos de contacto entre la probeta y la mordaza ocasionando que la muestra se fracture antes de alcanzar el máximo esfuerzo de tensión [19]. Por estos motivos se realizaron ensayos de tensión indirecta según la norma ASTM C496 / C496M-04 [15], mejor conocido como el método brasileño.

2.13 Permeabilidad al gas sin confinamiento

La permeabilidad de las muestras se determinó en base a la permeabilidad al gas mediante un equipo de perfil de permeabilidad (Modelo PDPK-400, ver Figura 23). Este equipo trabaja con Helio como gas inerte, el cual es inyectado a la muestra (núcleo) mediante un pistón que se coloca sobre la superficie del material y por diferencia de presiones, de volúmenes del gas inyectado y aplicando la Ley de Darcy se determina la permeabilidad del material. La permeabilidad se determinó bajo condiciones ambientales, es decir sin confinar el núcleo de cemento. El valor de permeabilidad que se muestra en los resultados es el promedio de tres medidas realizadas en diferentes puntos sobre la cara de la sección transversal del núcleo de

cemento curado en moldes cilíndricos (ver Figura 17 b) con una incertidumbre de $\pm 0,001$ md.

Las medidas se realizan a las muestras curadas a condiciones iniciales y a aquellas sometidas a 2 choques térmicos.



Figura 23. Equipo de perfil de permeabilidad modelo PDPK-400

2.14 Morfología

La morfología de las muestras se realizó mediante Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) para observar la morfología y la identificación de los materiales extendedores presentes en los sistemas cementantes bajo estudio; el análisis se realizó específicamente a cuatro muestras, lechada de cemento con microesferas de polímero y lechada comercial 1, curadas a las condiciones iniciales y con la aplicación de dos choques térmicos. Se utilizó un microscopio electrónico de barrido (MEB) marca Philips modelo XL30 y se tomaron fotografías en modo de electrones secundarios (SE) para observar la morfología de la superficie y en modo de electrones retrodispersados (BSE) con el propósito de diferenciar las distintas fases presentes e identificar porosidad en la muestra. Acoplado al MEB se encuentra un Espectrómetro de Energía Dispersiva de Rayos X, EDAX® modelo X4, con el cual se identificaron las fases presentes. Para realizar el análisis las muestras fueron recubiertas con Oro a fin de proporcionarle la conductividad suficiente para su caracterización por MEB.

Es importante observar la morfología de la matriz de cemento con microesferas de polímero antes y después de la aplicación de 2 choques térmicos porque en los mismos se tienen temperaturas mayores que la temperatura de transición vítrea del material en estudio y mediante MEB se debe determinar qué ocurre con la porosidad de la matriz de cemento.

PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La presentación y discusión de resultados está estructurada de la siguiente manera: en la primera sección se discuten los aspectos relacionados con la selección de las UEY cuyas condiciones operacionales y diseños de lechadas de cemento empleadas eran necesarias para las dos siguientes etapas de esta investigación. Seguidamente se presentan y analizan los resultados de las propiedades físicas evaluadas a las lechadas de cemento propuestas y se comparan con las correspondientes a la lechada de cemento comercial. Posteriormente, se realiza la propuesta de una lechada de cemento con microesferas de polímero para la cementación de hoyos intermedio productores en pozos a ser sometidos a inyección alterna de vapor. Finalmente, se presenta un resumen de los aspectos más resaltantes obtenidos en la investigación.

1. Selección de las condiciones de operación y el sistema cementante de una unidad de explotación de yacimientos con aplicación de inyección alterna de vapor

Para el estudio de factibilidad de uso de las lechadas de cemento formuladas con microesferas de polímero se seleccionaron dos UEY ubicadas en el occidente del país, por tratarse de una zona que ha sido continuamente explotada desde hace más de 50 años y actualmente sus yacimientos están agotados o poseen energía insuficiente para producir hidrocarburos por sí mismos.

En ese sentido y con el fin de incrementar el factor de recobro en los yacimientos agotados, uno de los métodos de recuperación mejorada de hidrocarburos que más se utiliza en algunos campos petroleros del occidente del país es la inyección alterna de vapor.

Se seleccionaron dos UEY, una ubicada en tierra y la otra en lago, en las cuales la temperatura estática de fondo de hoyo es inferior que la temperatura de transición vítrea de las microesferas de polímero, de modo que se garantiza que las mismas mantendrán su integridad mecánica y el efecto reductor de densidad en la lechada de cemento durante su bombeo al pozo y su posterior endurecimiento. Por otro lado, en

las UEY seleccionadas se utilizan lechadas de cemento con densidades del orden de 13,1 lpg y este valor está dentro del rango de aplicación de las microesferas de polímero. Adicionalmente, los pozos perforados tienen profundidades menores que 6900 pie de modo que las microesferas de polímero no se colapsarán debido a la presión ejercida por la columna de fluidos en el pozo.

Por ultimo, el método de producción aplicado en estos pozos es la inyección alterna de vapor, entonces son aptos para evaluar la factibilidad técnica de uso de lechadas formuladas con microesferas de polímero.

Las lechadas de cemento comerciales utilizadas en la cementación del revestidor intermedio-productor de los pozos pertenecientes a las UEY seleccionadas, son formuladas con microesferas de vidrio para disminuir su densidad y en este trabajo son sustituidas por las microesferas de polímero, las cuales son de menor costo.

A continuación se describen las características de las UEY seleccionadas para realizar este estudio.

1.1 Unidad de explotación de yacimientos lago

En este campo el diagrama mecánico típico de los pozos está conformado por un revestidor superficial de 9 5/8 plg de diámetro nominal seguido por un revestidor intermedio – productor cuyo diámetro nominal es de 7 plg (ver Figura 24).

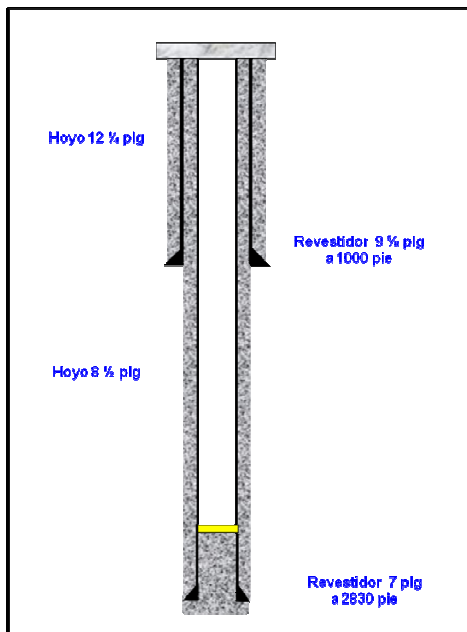


Figura 24. Diagrama mecánico típico de los pozos para IAV en la UEY Lago

En este caso, donde el método de producción es mediante IAV el revestidor intermedio-productor es cementado hasta la superficie para proporcionar integridad mecánica y sello a lo largo de todo el revestidor así como para impedir fugas de vapor u otros fluidos a través de las interfaces cemento-formación y cemento-revestidor.

Las condiciones operacionales típicas en el revestidor intermedio-productor se mencionan en la Tabla 2.

Tabla 2. Condiciones operacionales de la sección intermedia-productora de un pozo en la UEY lago

<i>Característica</i>	<i>Valor</i>
Tipo de pozo	Trayectoria vertical
Diámetro nominal del revestidor, plg	7
Método de producción	Inyección alterna de vapor (± 600 °F)
Profundidad total promedio del hoyo, pie	2838
Temperatura estática de fondo de hoyo, °F	160
Temperatura circulante de fondo de hoyo, °F	126

La formulación y las especificaciones técnicas de la lechada de cemento comúnmente utilizada en el revestidor intermedio-productor son descritas en la Tabla 3 y la Tabla 4, respectivamente.

Tabla 3. Formulación de la lechada de cemento comúnmente utilizada en el revestidor intermedio-productor, UEY lago (lechada comercial 1)

<i>Aditivo</i>	<i>Concentración</i>	<i>Función</i>
Cemento B	80 lb/sc	Material cementante
Sílice fina	14 lb/sc	Disminuir la densidad de la lechada y contribuir con el desarrollo de la resistencia a la compresión
Extendedor (microesferas de vidrio)	12% BWOC	Disminuir la densidad de la lechada
Harina de sílice (sílice gruesa)	25% BWOC	Evitar la retrogresión de la resistencia a la compresión
Controlador de filtrado (sales orgánicas y sílice)	0,2% BWOC	Disminuir la pérdida de filtrado
Antimigratorio	1,2% BWOC	Evitar la migración de fluidos
Antiespumante	0,25 gal/sc	Evitar la formación de espuma
Retardador	0,4% BWOC	Incrementar el tiempo de bombeabilidad
Micro sílice	18% BWOC	Evitar la retrogresión de la resistencia a la compresión

Como se puede observar en la Tabla 3 las lechadas comerciales contienen los siguientes aditivos, esenciales para un trabajo de cementación en este tipo de pozos:

- Un extendedor, pues al tratarse de un yacimiento de bajas presiones se requiere una lechada de baja densidad.
- Harina de sílice para evitar la retrogresión de la resistencia a la compresión del sello de cemento cuando el pozo sea sometido a altas temperaturas durante los procesos de IAV.

Tabla 4. Especificaciones técnicas de la lechada de cemento comúnmente utilizada en el revestidor intermedio-productor, UEY lago (lechada comercial 1)

<i>Propiedad</i>	<i>Valor</i>
Densidad, lpg	13,1
Resistente a $T \geq 230$ °F	Si
Tiempo de bombeabilidad, h	4 (incluye 1 h de premezclado)

A partir de la información mostrada en la Tabla 3 y la Tabla 4 se procedió al diseño de una lechada de cemento formulada con microesferas de polímero, tal como se verá en el punto 2, y se comparó con la lechada comercial 1.

1.2 Unidad de explotación de yacimientos tierra

En este campo el diagrama mecánico típico de los pozos está conformado por un revestidor superficial de 9 5/8 plg de diámetro seguido por un revestidor intermedio – productor cuyo diámetro nominal es de 7 plg (ver Figura 25).

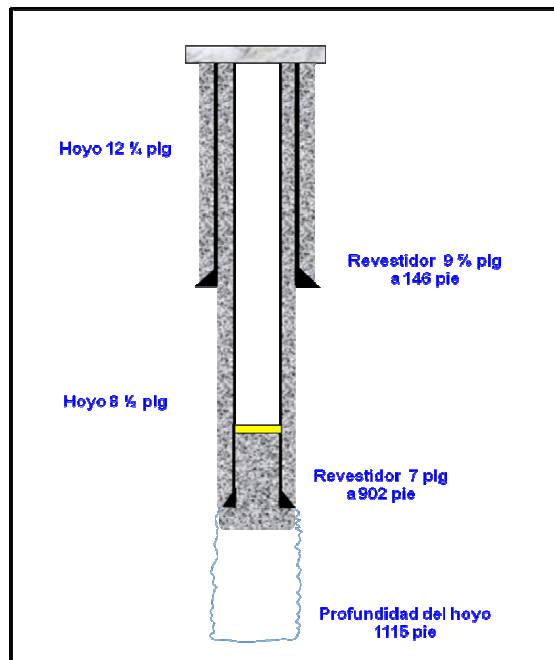


Figura 25. Diagrama mecánico típico de los pozos en la UEY tierra

En este caso, donde el método de producción es IAV el revestidor intermedio-productor es cementado hasta la superficie para proporcionar integridad mecánica y sello a lo largo de todo el revestidor así como para impedir fugas de vapor u otros fluidos a través de las interfaces cemento-formación y cemento-revestidor. Particularmente, en este campo el revestidor intermedio-productor es colocado de modo que la zapata quede a una profundidad de 200 a 500 pie por encima del fondo del hoyo, luego se realiza la cementación y la sección 200 a 500 pie de hoyo abierto es completado con una tubería ranurada o malla empacada con arena. Posteriormente, en la etapa de inyección de vapor y de producción, esta malla permite el flujo de vapor hacia el yacimiento y el flujo del petróleo hacia el pozo, a través de las ranuras.

Las condiciones operacionales típicas en el revestidor intermedio-productor se mencionan en la Tabla 5.

Tabla 5. Condiciones operacionales de la sección intermedia-productora de un pozo en la UEY tierra

<i>Característica</i>	<i>Valor</i>
Tipo de pozo	Trayectoria vertical
Diámetro nominal del revestidor, plg	7
Método de producción	Inyección alterna de vapor (+/- 600 °F)
Profundidad total promedio, pie	1115
Temperatura estática de fondo de hoyo, °F	120
Temperatura circulante de fondo de hoyo, °F	100

Las especificaciones técnicas de la lechada de cemento comúnmente utilizada en el revestidor intermedio-productor son descritas en la Tabla 6.

Tabla 6. Especificaciones técnicas de la lechada de cemento comúnmente utilizada en el revestidor intermedio-productor, UEY tierra

<i>Propiedad</i>	<i>Valor</i>
Densidad, lpg	13,1
Resistente a $T \geq 230$ °F	Si
Tiempo de bombeabilidad, h	3 (incluye 1 h de premezclado)

Esta zona fue seleccionada para proponer un diseño de una lechada de cemento formulada con microesferas de polímero, con el fin de que pueda ser empleada para el aislamiento zonal en los revestidores intermedio-productores, tal como se presenta en el punto 3.

2. Caracterización de las lechadas de cemento formuladas con microesferas de polímero bajo condiciones simuladas de los procesos de IAV

Con el fin de evaluar de manera preliminar el comportamiento de las lechadas de cemento formuladas con microesferas de polímero al ser sometidas a las condiciones existentes en los procesos de inyección alterna de vapor, se trabajó con las condiciones operacionales de la UEY Iago. Para ello se utilizó el criterio más comúnmente utilizado en la Industria Petrolera, el cual se basa en la caracterización de la resistencia a la compresión de la lechada de cemento luego del curado inicial y luego de la aplicación de una serie de choques térmicos, los cuales simulan las condiciones de temperatura existentes durante la IAV, así como evaluar si ocurre retrogresión de la resistencia a la compresión.

Tal como se mencionó la UEY Iago fue la referencia y punto de partida para el diseño de lechadas de cemento formuladas con microesferas de polímero que cumplieran con los requerimientos técnicos mostrados en la Tabla 4 y se utilizó la formulación mostrada en la Tabla 3. El procedimiento de diseño consistió en sustituir el extendedor microesferas de vidrio por la concentración de microesferas de polímero necesaria para obtener la densidad de 13,1 lpg, luego mediante ajustes en el tipo y cantidad de aditivos de modo tal que se obtuviera una resistencia a la compresión mínima de 1200 psi a las 24 h de curado, se encontró el diseño de una lechada de cemento con microesferas de polímero mostrado en la Tabla 7. Como se podrá observar se muestran dos diseños debido a que se trabajó con aditivos de dos proveedores comerciales, esto con el fin de evaluar la versatilidad de formular con aditivos de diferentes compañías de servicio de cementación.

Tabla 7. Formulación de las lechadas de cemento con microesferas de polímero
(LMP) propuestas para la UEY lago

<i>LMP 1</i>		<i>LMP 2</i>		<i>Función</i>
<i>Aditivo</i>	<i>Concentración</i>	<i>Aditivo</i>	<i>Concentración</i>	
Cemento H	100% BWOC	Cemento H	100% BWOC	Material cementante
Extendedor (Microesferas de polímero)	11,3% BWOC	Extendedor (Microesferas de polímero)	11,3% BWOC	Disminuir la densidad de la lechada
Harina de sílice	43% BWOC	Harina de sílice	43% BWOC	Evitar la retrogresión de la resistencia a la compresión
Controlador de filtrado (naftaleno sulfonato)	1,4% BWOC	Controlador de filtrado (copolímero acrílico)	1,3% BWOC	Controlar la pérdida de filtrado
Silicato de sodio	1% BWOC	Silicato de sodio	1,4% BWOC	Viscosificante
Acelerador (CaCl_2)	1% BWOC	Acelerador (CaCl_2)	1% BWOC	Disminuir el tiempo de bombeabilidad
Sílice fina en suspensión	0,5 gal/sc	Micro sílice	3% BWOC	Mejorador de propiedades mecánicas
Agua	71,52 %	Agua	78,79 %	Fluido base

Tal como se refleja en la Tabla 7 es factible formular y preparar lechadas de cemento con microesferas de polímero utilizando una concentración que es incluso inferior a la requerida si se emplearan las microesferas de vidrio para obtener una lechada de cemento con la misma densidad, 13,1 lpg. En ese sentido, se necesitaría un 11,3% BWOC de microesferas de polímero en lugar de 12% BWOC de microesferas de vidrio (ver Tabla 3). Esto se atribuye a que las microesferas de polímero tienen una gravedad específica de 0,48 y es menor que la de las microesferas de vidrio, 0,8, en consecuencia se requiere menor concentración de microesferas de polímero para alcanzar la misma reducción de densidad de la lechada en comparación con las de

vidrio. Una consecuencia directa de lo anterior es que se podrían disminuir los costos asociados a la preparación de la lechada de cemento, ya que aún cuando se puedan sustituir las microesferas de vidrio por otras de polímero en la misma concentración, las segundas son más económicas que las primeras.

Por otro lado, se observó que las lechadas LMP 1 y LMP 2 presentaron mezclabilidad aceptable en el laboratorio y esto es un indicativo de que no tendrán problemas de mezclado homogéneo con los equipos de mezclado en campo. Siendo aceptable el mezclado de las lechadas LMP 1 y LMP 2 se puede continuar con la caracterización del resto de las propiedades físicas.

2.1 Estabilidad

La estabilidad de las lechadas de cemento evaluadas se muestra en la Figura 26; los valores indicados en las figuras cilíndricas representan la densidad del cemento endurecido medida a cuatro secciones que van desde el tope hasta el fondo y al lado de cada cilindro se indica cuánto varió la densidad entre ambos extremos para reflejar si hubo sedimentación o si hubo separación de los materiales mas ligeros hacia el tope; también se muestra la densidad de la lechada mientras está fluida (antes de su endurecimiento), denominada como densidad de la lechada experimental obtenida con la balanza presurizada.

Tal como se muestra en la Figura 26, la lechada comercial 1 presenta una variación en la densidad de 0,00 lpg entre tope y fondo después del curado, siendo un sistema muy estable, mientras que los diseños LMP 1 y LMP 2 presentan una variación en la densidad entre tope y fondo de $0,32 \pm 0,01$ lpg y $0,21 \pm 0,01$ lpg, respectivamente, siendo aceptable para una operación de cementación de un pozo vertical. Cabe destacar que la máxima diferencia de densidad entre el tope y el fondo permitida según las experiencias de campo es de 0,5 lpg, es decir, que las lechadas LMP 1 y LMP 2 son estables porque la diferencia de densidad entre tope y fondo está por debajo del valor máximo permitido para un trabajo de cementación.

Además de la estabilidad, otro parámetro importante es cuánto incrementa la densidad de la lechada después del curado a las condiciones del pozo, es decir, la

diferencia entre la densidad de la lechada (experimental) y la del cemento curado. En la Figura 26 se aprecia que la densidad promedio de LMP 1, LMP 2 y la lechada comercial 1 después del curado fue de $13,90 \pm 0,01$ lpg, $14,14 \pm 0,01$ lpg y $14,17 \pm 0,01$ lpg, respectivamente, es decir que incrementaron su densidad en 0,80 lpg, 1,04 lpg y 1,07 lpg, cada una. Según las experiencias de los ingenieros encargados de diseñar y realizar las operaciones de cementación, incrementos de la densidad de la lechada en 1 lpg son aceptables. Sin embargo, esto estará determinado por las condiciones de hoyo, en particular dependerá de cuán cercanas o no estén las presiones de poro y de fractura de la formación; por ejemplo si la lechada tiene una densidad tal que ejerce una presión hidrostática y dinámica muy cercana a la presión de fractura entonces posiblemente no se admitirán variaciones entre la densidad de la lechada y la densidad del cemento curado para evitar fracturar la formación. Para el caso particular de la UEY lago donde se está proponiendo el uso de las microesferas de polímero, el incremento de densidad obtenido en LMP 1 y LMP 2 es aceptable e incluso fue inferior al reportado para la lechada comercial 1. Por lo tanto, de utilizarse las lechadas LMP 1 y LMP 2 para la cementación en los pozos de la UEY lago no se presentarán problemas operacionales asociados con el incremento de la densidad de la lechada después del curado, es decir después que haya sido colocada en el pozo.

Es importante acotar que el incremento de densidad observado en las lechadas LMP 1 y LMP 2 se debe a que parte de las microesferas de polímero se colapsaron debido a la aplicación de una presión de 2000 psi, debe recordarse que se trata de un material elástico y tiende a ceder a medida que es confinado; en el caso de la lechada comercial 1, el incremento de densidad se atribuye a que las microesferas de vidrio a pesar de ser mas resistentes y duras que las de polímero, también son susceptibles de romperse bajo presión, ya que son frágiles.

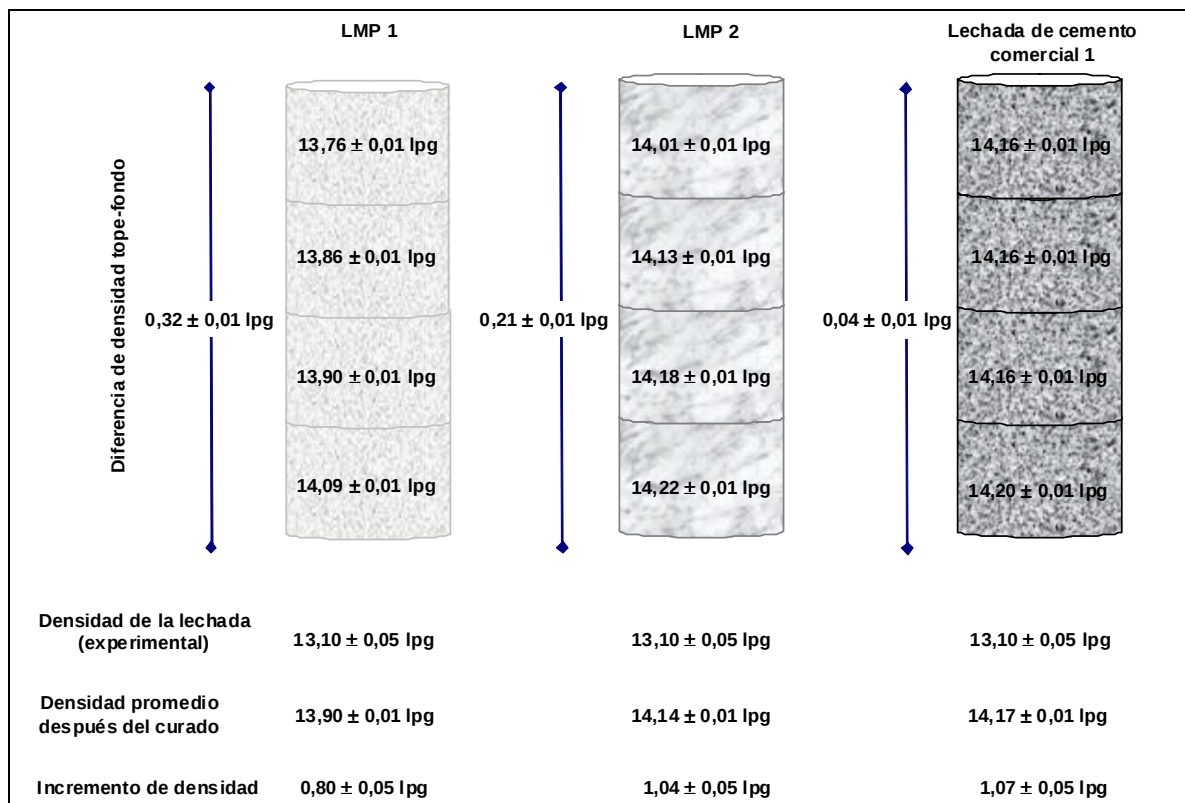


Figura 26. Estabilidad de los diseños LMP 1 y LMP 2 y la lechada comercial 1 después del curado inicial a 160 °F y 2000 psi durante 24 h

2.2 Resistencia a la compresión

En la Figura 27 se muestran los resultados obtenidos de resistencia a la compresión destructiva para las lechadas de cemento con microesferas de polímero LMP 1 y LMP 2 y para la lechada comercial 1 luego del curado inicial y luego de la aplicación de dos choques térmicos de 350 °F cada uno.

Tal como se aprecia en la Figura 27 los diseños LMP 1 y LMP 2 desarrollan una resistencia a la compresión igual a 1300 ± 50 psi y 1220 ± 60 psi, respectivamente, después del curado inicial a 160 °F y 2000 psi durante 24 h, lo cual es aceptable para la mayoría de los trabajos de cementación primaria, ya que el valor mínimo de resistencia a la compresión durante las primeras 24 h de curado de la lechada de cemento debe ser 1200 psi por los siguientes motivos, uno es que al momento de evaluar la calidad del trabajo de cementación mediante herramientas de registro

sónicas y ultrasónicas el cemento debe estar endurecido para que pueda ser detectado por la herramienta, y dos es que mientras más rápido se endurezca el cemento se ahorra tiempo y dinero en las operaciones de construcción, completación y producción del pozo.

Aún cuando la lechada comercial 1 desarrolló una resistencia a la compresión que es, aproximadamente, 2,6 veces mayor que las lechadas LMP 1 y LMP 2, estas últimas tienen una resistencia a la compresión aceptable; esta diferencia se puede atribuir a que efectivamente las microesferas de vidrio son más duras que las de polímero y esto contribuye con la resistencia a la compresión del sistema completo. A pesar de que una porción de las microesferas de vidrio colapsan durante el curado a una presión de 2000 psi, tal como se dedujo a partir del análisis de estabilidad explicado en la sección anterior, la dureza de las microesferas de vidrio fracturadas y las que permanecen intactas contribuyen con la resistencia a compresión de la matriz de cemento, en mayor grado que las microesferas de polímero.

Ahora bien una vez que se aplican los dos choques térmicos de 350 °F cada uno, se evidencia que las tres lechadas de cemento incrementan su resistencia a la compresión y esto es muy importante y favorable porque indica que no sufren retrogresión de la resistencia a la compresión por efecto de las altas temperaturas, siendo este el requerimiento más importante para la cementación de pozos donde se aplicará la IAV. La no retrogresión de la resistencia a la compresión mostrada por las lechadas evaluadas se debe principalmente a que en cada diseño se incluyó 43% BWOC de sílice para llevar la relación molar CaO/SiO_2 a 1 y evitar la formación de la fase cristalina alfa silicato dicálcico hidratado, la cual es responsable de la pérdida de resistencia mecánica y del incremento de la permeabilidad del cemento. En particular, los diseños LMP 1 y LMP 2 incrementan su resistencia a la compresión casi en un 100% después de ser sometidos a los dos choques térmicos. No obstante, debe tenerse en cuenta que no es conveniente que la lechada desarrolle valores muy elevados de resistencia a la compresión porque generalmente a medida que dicha propiedad aumenta, el material tiende a comportarse como un vidrio, muy duro pero a la vez muy frágil.

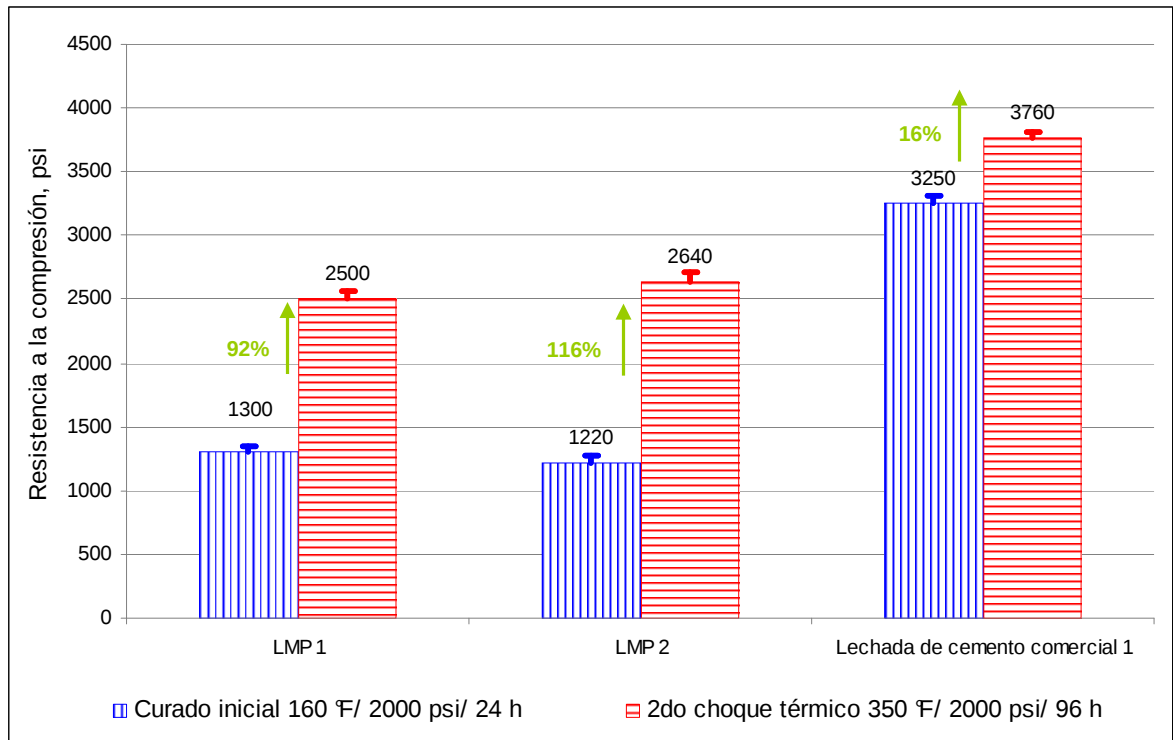


Figura 27. Resistencia a la compresión destructiva según la norma ISO 10426-2 [14] de las lechadas de cemento formuladas con microesferas de polímero y su equivalente sistema comercial antes y después de someterlos a condiciones simuladas de los procesos de IAV

En la Figura 28 se muestran las fotografías de los cubos después de los ensayos de resistencia a la compresión, donde se aprecia la formación de una fractura con una inclinación de 45° típica de los materiales frágiles.

	Curado inicial	Con dos choques térmicos de 350 °F cada uno
LMP 1		
LMP 2		
Lechada comercial 1		

Figura 28. Fotografía de las muestras después del ensayo de resistencia a la compresión destructiva según la norma ISO 10426-2 [14] de las lechadas de cemento formuladas con microesferas de polímero y la lechada comercial 1

La resistencia a la compresión de la lechada de cemento también puede ser determinada mediante ensayos no destructivos, los cuales son convencionalmente utilizados en la Industria Petrolera. En general, los valores de resistencia a la compresión no destructiva son menores que los obtenidos en ensayos destructivos y

la mayor o menor diferencia está dada por la mayor o menor heterogeneidad de la lechada de cemento, sobretodo cuando están presentes materiales no convencionales. En ese sentido, en la Figura 29 se presentan los valores de resistencia a la compresión no destructiva de las lechadas LMP 1, LMP 2 y la lechada comercial a las 24 h de curado inicial y luego de la aplicación de 2 choques térmicos, mientras que en la Figura 30, Figura 31 y Figura 32 se puede observar como fue el desarrollo de la resistencia a la compresión en el tiempo así como su respuesta frente a la aplicación de los 2 choques térmicos, para las lechadas LMP 1, LMP 2 y la lechada comercial.

Al comparar los valores de resistencia a la compresión, bajo las mismas condiciones, presentados en la Figura 27 y Figura 29, se nota que los obtenidos en ensayos destructivos son mayores que aquellos obtenidos en ensayos no destructivos, tal como se esperaba.

Con fines comparativos, se realizó el ensayo de resistencia a la compresión destructiva y no destructiva a una lechada de cemento formulada con cemento H y agua, con una densidad de 16,5 lpq, sin aditivos, obteniéndose que luego del curado a 120 °F y 2000 psi durante 24 h, desarrolló una resistencia destructiva de 4350 ± 50 psi y no destructiva de 2951 ± 1 psi; es decir que la diferencia entre el ensayo destructivo y no destructivo fue de 1400 psi, aproximadamente.

Teniendo el valor anterior como referencia, se puede decir que las diferencias obtenidas entre los valores de resistencia a la compresión destructiva y no destructiva en las lechadas LMP 1, LMP 2 y lechada comercial 1, son aceptables.

Por otro lado, según la Figura 29, se puede decir que la lechada LMP 1 es resistente a la aplicación de 2 choques térmicos y no sufre retrogresión de la resistencia debido a que dicho valor incrementó desde 455 ± 1 psi hasta 942 ± 1 psi luego de la aplicación de los dos choques térmicos, tal como se concluyó a partir de los resultados mostrados en la Figura 27, para la misma lechada.

Sin embargo, el comportamiento de la resistencia a la compresión no destructiva luego de la aplicación de dos choques térmicos en LMP 2 y lechada comercial 1 no se corresponde con el observado en los ensayos destructivos, es decir que basado en los

resultados mostrados en la Figura 29 las lechadas LMP 2 y lechada comercial 1 no resisten la aplicación de choques térmicos, contrario a lo observado en la Figura 27.

La posible causa de las discrepancias encontradas entre ambos tipos de ensayos se puede atribuir a que se evaluaron lechadas de cemento con aditivos especiales, tales como las microesferas de polímero y de vidrio, las cuales interfieren en la transmisión y recepción de las ondas de ultrasonido afectando negativamente los resultados de resistencia a la compresión reportados por el equipo. Es por ello que debe otorgarse mayor peso e importancia a los resultados de los ensayos destructivos al momento de tomar decisiones y seleccionar el diseño más adecuado.

De lo anterior se deriva la necesidad de ajustar los algoritmos de cálculo de la resistencia a la compresión no destructiva considerando los nuevos materiales que se están evaluando en las lechadas de cemento.

El objetivo de determinar la resistencia a la compresión mediante ensayos no destructivo era el de validar el comportamiento obtenido mediante los ensayos destructivos, por ser la primera una prueba muy rutinaria pero no siempre es la fiel representación del comportamiento mecánico del material.

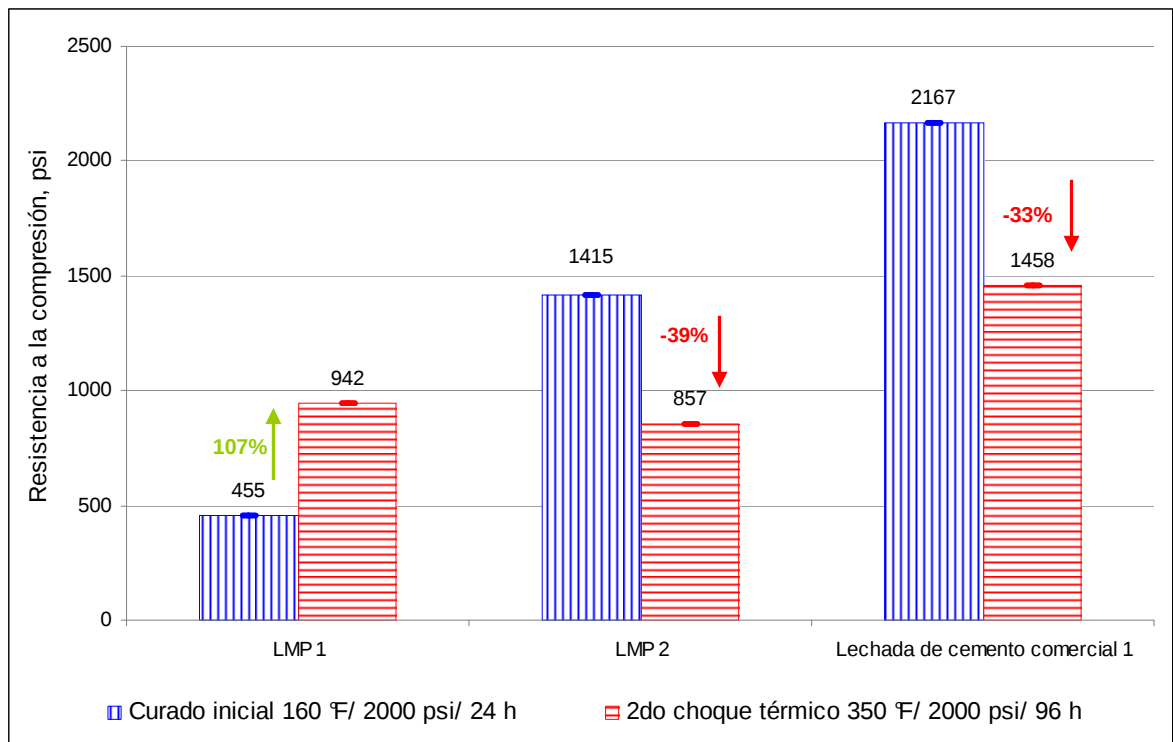


Figura 29. Resistencia a la compresión no destructiva según la norma ISO 10426-2 [14] de las lechadas de cemento formuladas con microesferas de polímero y su equivalente sistema comercial antes y después de someterlos a condiciones simuladas de los procesos de IAV

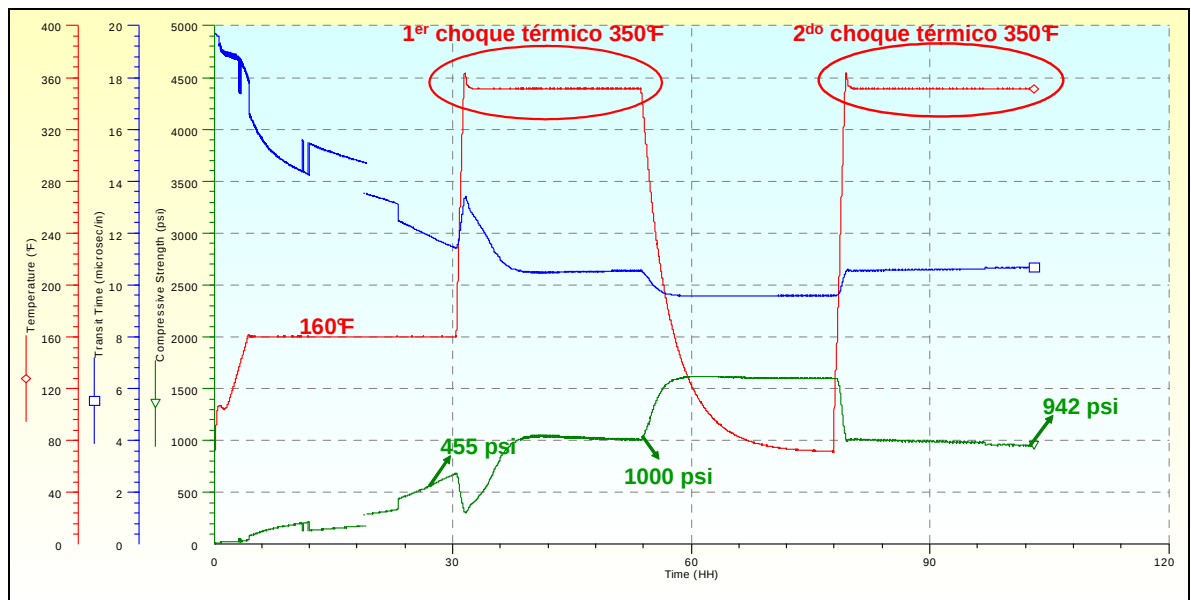


Figura 30. Curva de resistencia a la compresión no destructiva del diseño LMP 1 obtenida en el UCA a 160 °F y 2000 psi con aplicación de dos choques térmicos a 350 °F cada uno

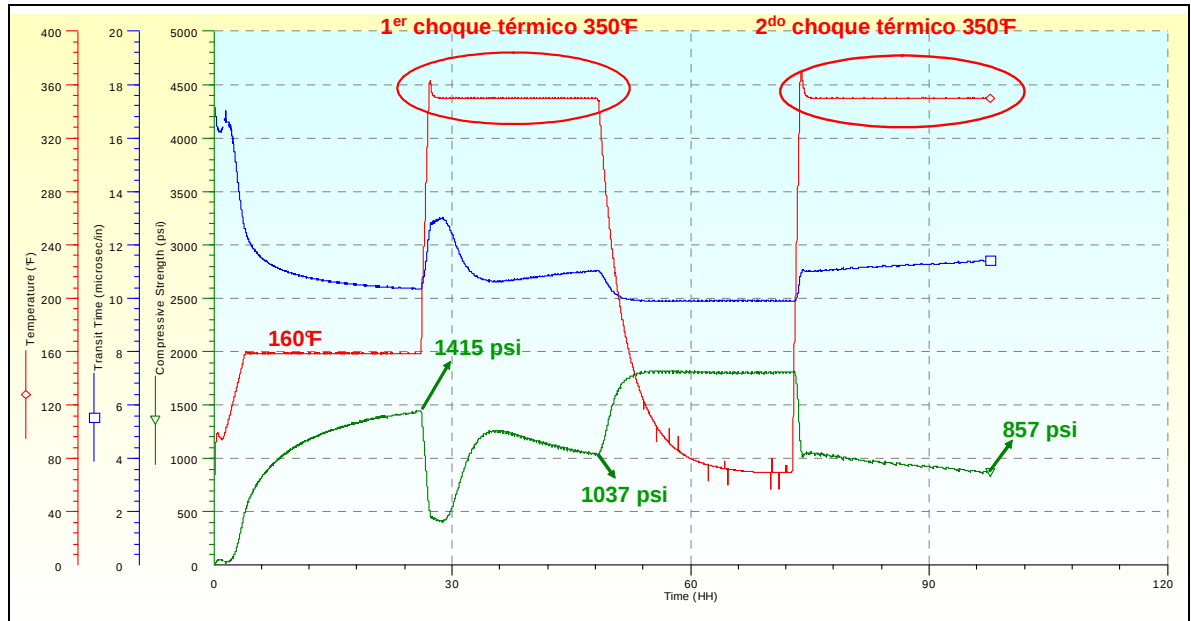


Figura 31. Curva de resistencia a la compresión no destructiva del diseño LMP 2 obtenida en el UCA a 160 °F y 2000 psi con aplicación de dos choques térmicos a 350 °F cada uno

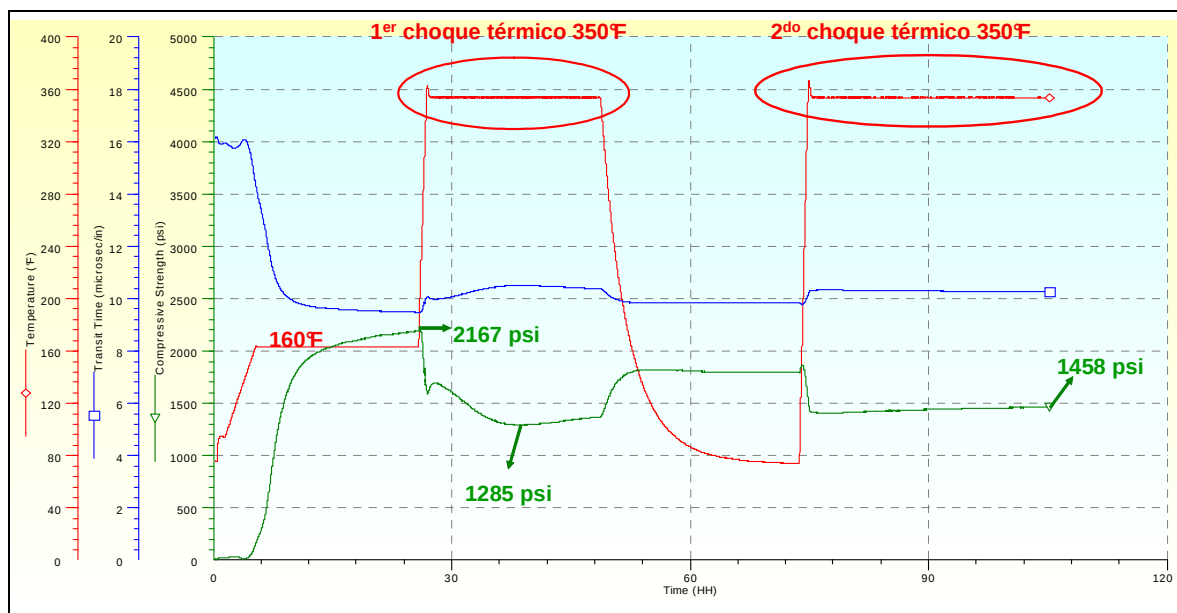


Figura 32. Curva de resistencia a la compresión no destructiva de la lechada de cemento comercial 1 obtenida en el UCA a 160 °F y 2000 psi con aplicación de dos choques térmicos a 350 °F cada uno

2.3 Resistencia a la tensión

Además de que el cemento desarrolle una aceptable resistencia a la compresión, también debe tener resistencia a la tensión, porque este tipo de esfuerzos se presentan en los pozos como consecuencia de los cambios de temperatura durante los procesos de inyección alterna de vapor. En la Figura 33 se presentan los resultados obtenidos de resistencia a la tensión indirecta para las lechadas de cemento con microesferas de polímero LMP 1 y LMP 2 y para la lechada comercial 1, luego del curado inicial y luego de la aplicación de dos choques térmicos de 350 °F cada uno.

Está demostrado que el cemento endurecido soporta mayores cargas y es más fuerte bajo compresión que bajo tensión y en la mayoría de los escenarios de presión en los pozos, el sello de cemento falla por tensión. Dado que la mayoría de las fallas en el sello de cemento ocurren por tensión, es importante que el mismo sea diseñado para soportar tales condiciones de esfuerzos y particularmente debe tener la adecuada resistencia a la tensión [19, 21].

Por ese motivo se determinó en este estudio la resistencia a la tensión a cada lechada de cemento, encontrándose que bajo condiciones de curado inicial todas las lechadas de cemento en evaluación desarrollaron valores de resistencia a la tensión similares entre sí variando entre 300 ± 40 psi y 310 ± 50 psi, sin embargo después de la aplicación de los choques térmicos el mayor incremento en esta propiedad se observó en la lechada de cemento comercial 1, pasando de 310 ± 50 psi a 870 ± 30 psi (ver Figura 33). En el caso de los diseños propuestos, LMP 1 y LMP 2, se observó incremento de la resistencia a la tensión hasta valores aceptables para la mayoría de los trabajos de cementación, variando entre 520 ± 30 psi y 510 ± 30 psi.

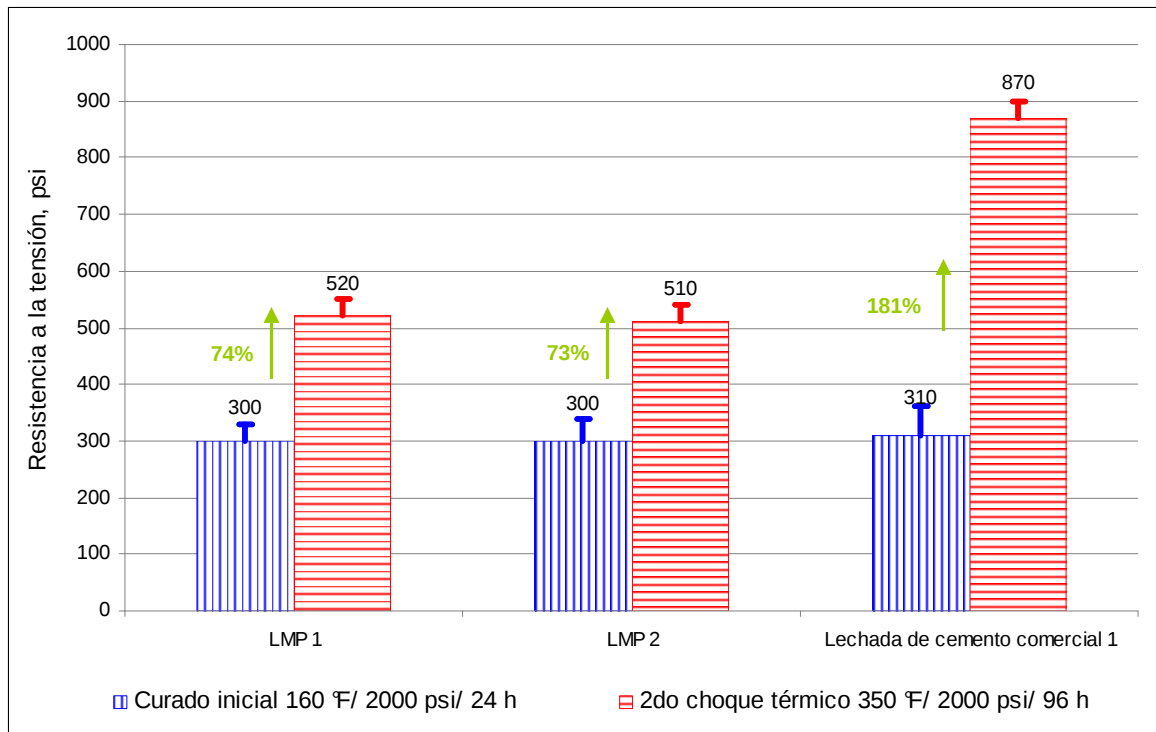


Figura 33. Resistencia a la tensión según la norma ASTM C496 / C496-04 [15] de los diseños LMP 1 y LMP 2 y el sistema comercial 1 antes y después de someterlos a condiciones simuladas de los procesos de inyección alterna de vapor

De la Figura 33 se puede decir que las lechadas LMP 1, LMP 2 y lechada comercial 1 no sufrieron retrogresión de la resistencia, en este caso la resistencia a la tensión, ya que la misma incrementó luego de la aplicación de los dos choques térmicos.

Por otro lado, en la Figura 34 se aprecia el tipo de fractura de las muestras sometidas a esfuerzos de tensión indirecta; la fractura observada en todos los casos se caracteriza porque se produce en el centro del cilindro y se extiende hacia el perímetro, siguiendo la línea diametral. La fractura observada corresponde con lo esperado ya que de lo contrario el valor de resistencia a la tensión no sería confiable y si la muestra exhibiera una falla diferente generalmente se debe a defectos en la muestra y debe descartarse.

	Curado inicial	Con dos choques térmicos de 350 °F cada uno
LMP 1		
LMP 2		
Lechada comercial 1		

Figura 34. Fotografía de las muestras después del ensayo de resistencia a la tensión indirecta según la norma ASTM C 496 [15] de las lechadas de cemento formuladas con microesferas de polímero y la lechada comercial 1

2.4 Permeabilidad

La permeabilidad de la matriz de cemento es un parámetro muy importante ya que de ella depende la calidad del aislamiento zonal que debe cumplir la lechada de cemento una vez que está colocada en el pozo y se endurece.

Los valores de permeabilidad al gas, medidos sin confinar las muestras, de las lechadas LMP 1, LMP 2 y lechada comercial, bajo las condiciones de curado inicial y luego de la aplicación de los dos choques térmicos, se muestran en la Figura 35.

Respecto a los valores de permeabilidad al gas luego del curado inicial, la lechada LMP 1 presentó el mayor valor de permeabilidad siendo igual a $1,050 \pm 0,001$ md, mientras que las lechadas LMP 2 y lechada comercial 1 presentan permeabilidades de $0,635 \pm 0,001$ md y $0,614 \pm 0,001$ md. Tales valores son relativamente elevados considerando como referencia que para prevenir la comunicación entre zonas, la permeabilidad al agua del cemento utilizado en aplicaciones de inyección alterna de vapor no debe ser mayor de 0,1 md [22].

Después de la aplicación de los dos choques térmicos se observó que la permeabilidad al gas de las tres lechadas disminuyó significativamente, hasta valores que oscilan entre $0,020 \pm 0,001$ md, $0,194 \pm 0,001$ md y $0,215 \pm 0,001$ md para LMP 1, LMP 2 y lechada comercial 1, respectivamente. Si en vez de un gas, se utilizara el agua la permeabilidad a esta última sería significativamente menor que al gas, debido a que la viscosidad del agua es aproximadamente 30 veces mayor que la del Helio y esto conduciría a una drástica disminución del caudal de fluido que puede pasar a través de la muestra [23]. Considerando lo anterior, se puede decir que los valores de permeabilidad obtenidos en las tres lechadas son aceptables para aplicaciones de IAV; esto es muy ventajoso ya que garantiza que no existan pérdidas en la transferencia de calor al yacimiento por efecto de alta permeabilidad y evita la comunicación entre zonas.

Por otro lado, comparando la permeabilidad de los diseños LMP 1 y LMP 2 con la de la lechada comercial 1, se tiene que los primeros tienen permeabilidades iguales e incluso muy inferiores respecto a la lechada de cemento comercial 1. Por ejemplo, el diseño LMP 1 presentó una permeabilidad de $0,020 \pm 0,001$ md, valor diez veces

inferior al de la lechada comercial 1, $0,215 \pm 0,001$ md, indicando esto que las lechadas con microesferas de polímero presentan ventajas frente a la lechada comercial 1.

También se puede decir que las lechadas evaluadas no sufrieron reprogresión frente a las aplicaciones de los dos choques térmicos, pues de lo contrario se hubiera producido un incremento notable de la permeabilidad.

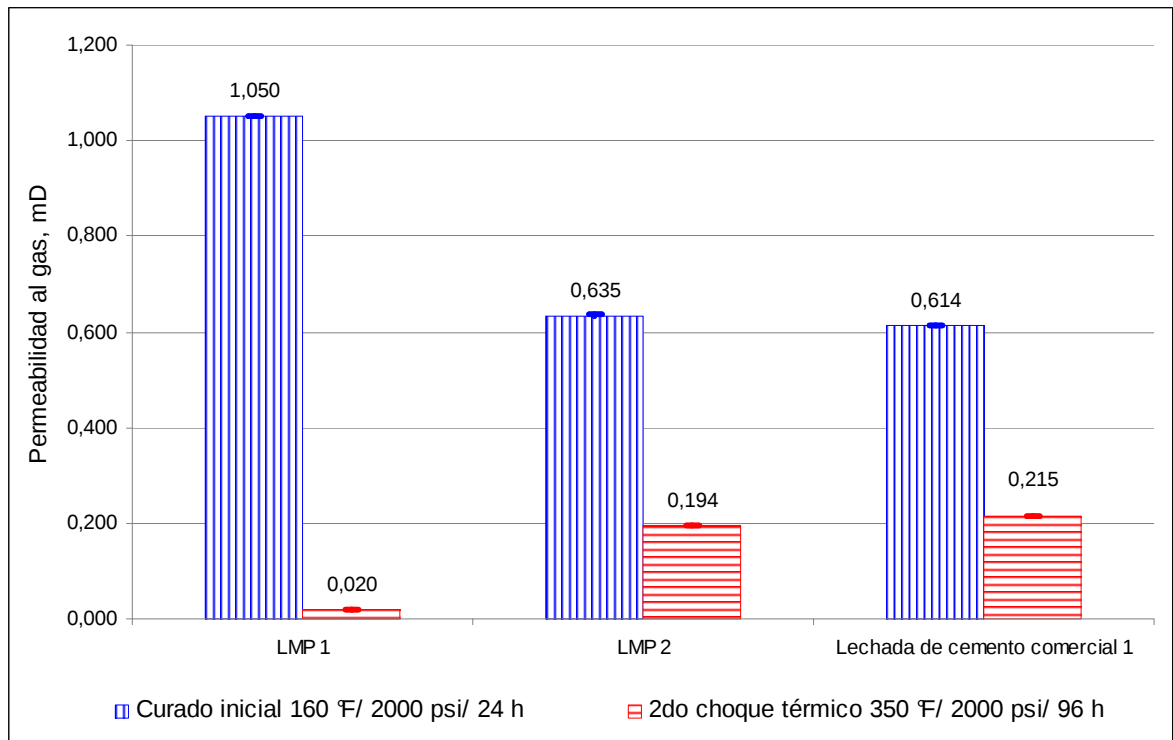


Figura 35. Permeabilidad al gas a 14,7 psi de los diseños LMP 1 y LMP 2 y la lechada comercial 1 antes y después de someterlos a condiciones simuladas de los procesos de inyección alterna de vapor

2.5 Morfología

El estudio de la morfología de las lechadas de cemento con microesferas de polímero se realizó mediante el análisis de la matriz de cemento de LMP 1 y se comparó con la correspondiente a la lechada comercial 1, mediante fotografías tomadas con un MEB.

En la sección de metodología experimental se mencionó que la máxima temperatura de uso de las microesferas de polímero es de 180 °F ya que a mayores temperaturas se estaría cercano a la temperatura de transición vítrea del polímero y esto ocasionaría un reblandecimiento del mismo, con la consecuente pérdida de la resistencia mecánica de las microesferas de polímero y por ende aumento de su densidad porque se estaría produciendo un colapso de las partículas por efecto térmico. Esto a su vez conllevaría a un incremento de la densidad de la lechada debido a que las microesferas de polímero tendrían mayor gravedad específica y perderían su efecto reductor de densidad. Con el fin de aclarar esta duda se realizaron microfotografías mediante MEB a la matriz del diseño LMP 1 y a la lechada de cemento comercial 1, con el fin de observar la morfología de las partículas y establecer comparaciones.

Diseño LMP 1

En la Figura 36 y Figura 38 se presenta la morfología de la lechada LMP 1 y en la Figura 37 el EDS que permitió identificar las microesferas de polímero en el MEB.

En la Figura 36 se muestra una sección de la matriz del diseño LMP 1 luego de ser curado a 160 °F y 2000 psi durante 24 h donde se pueden apreciar las microesferas de polímero (la mayoría con estructura celular y algunas con estructura casi compacta) y la presencia de porosidad. El EDS de Rayos X mostrado en la Figura 37 corresponde a una microesfera de polímero, ya que está presente una señal de alta intensidad del Carbono, indicando que se trata de un compuesto orgánico, en este caso el polímero en estudio.

La presencia de microesferas de polímero con estructura celular, en la matriz de cemento, era de esperarse debido a la naturaleza de las mismas, pues contienen un gas atrapado en su interior. La presencia de microesferas de polímero con estructura casi compacta se debe a que parte de ellas sufrió un colapsamiento al estar bajo presión, en este caso 2000 psi, y esto se evidenció por el incremento de la densidad de la lechada después del curado inicial, tal como se explicó en la sección de estabilidad.

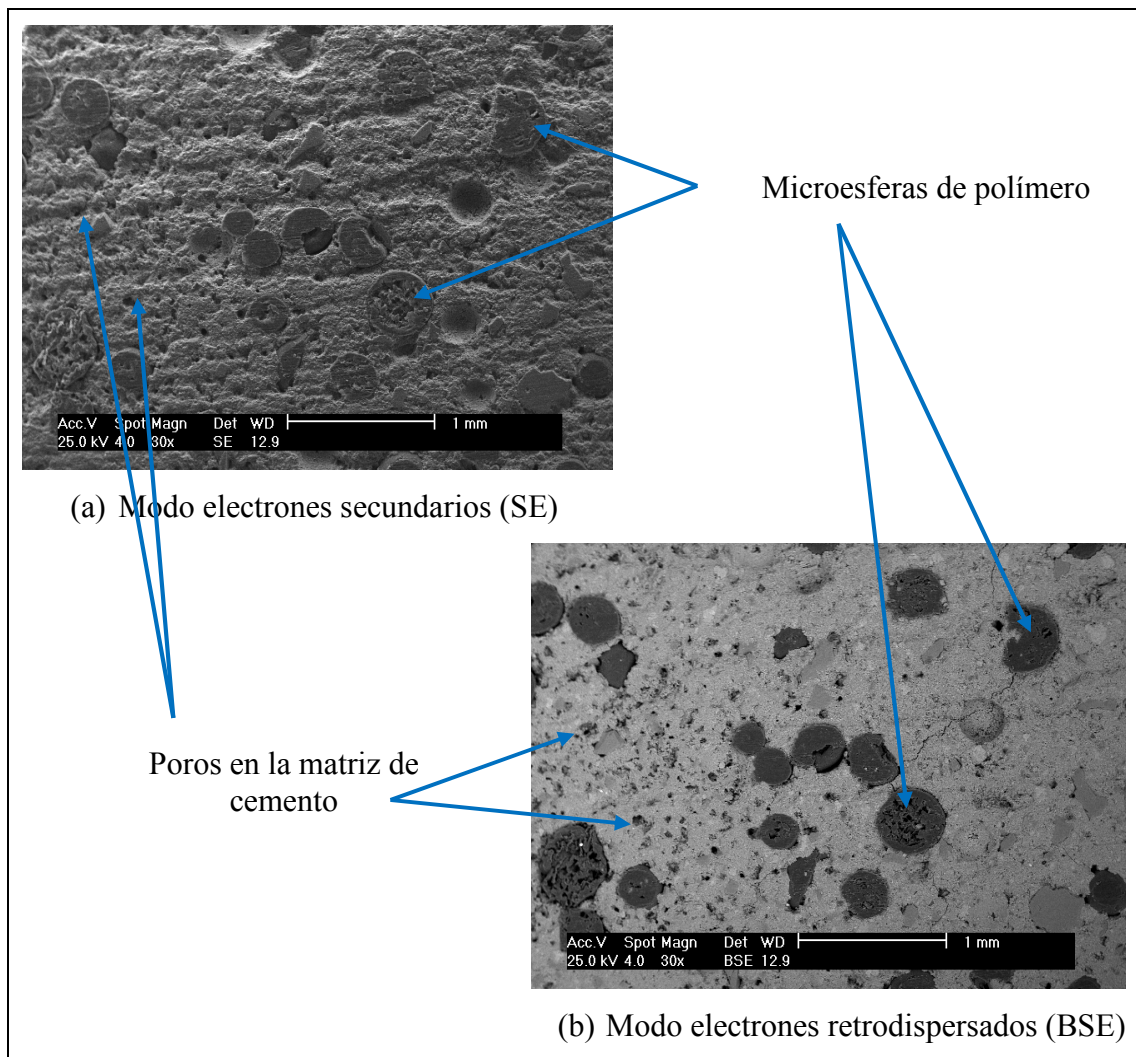


Figura 36. Microfotografía de una sección del diseño LMP 1, curado a 160 °F y 2000 psi durante 24 h

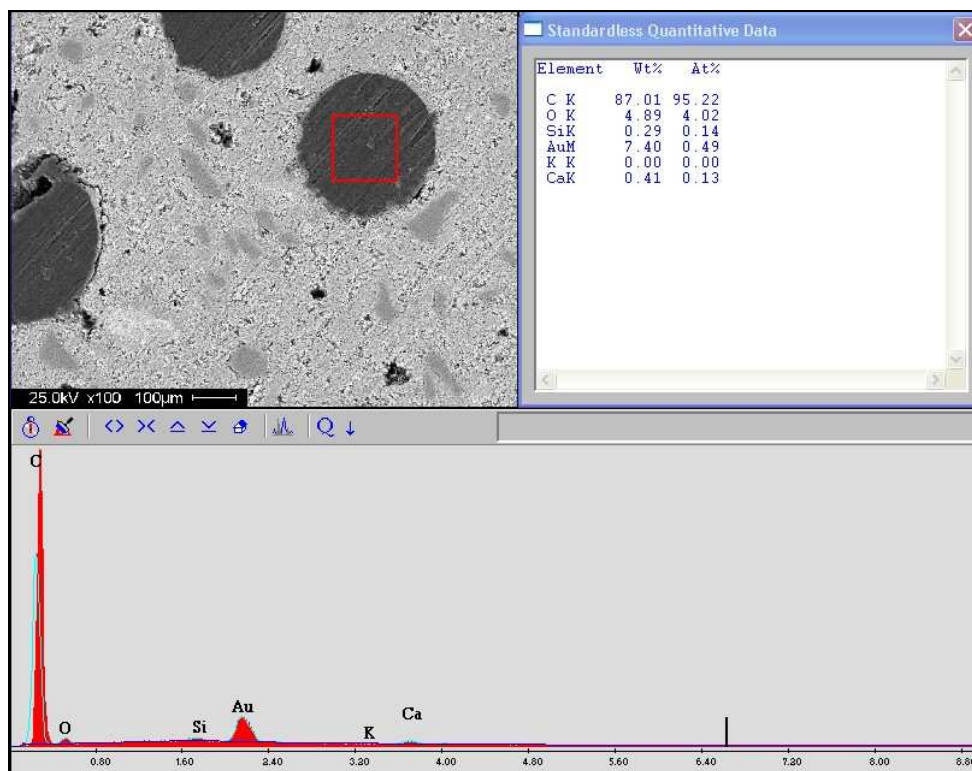


Figura 37. Espectrograma por energía dispersiva de Rayos X de las microesferas de polímero identificadas en el diseño LMP 1

En cuanto a la porosidad, debe mencionarse que se encontró una diferencia de porosidad, desde un punto de vista cualitativo, entre la sección central y la sección periférica, observándose presencia de mayor número de poros hacia la zona periférica (ver Figura 41).

Después de aplicar los dos choques térmicos se aprecia, de manera cualitativa, una notable reducción en el número de poros en la zona periférica, donde es muy importante que la matriz de cemento tenga la menor porosidad debido a que es la zona directamente expuesta al contacto con los fluidos presentes en el pozo. Esta reducción de la porosidad se corresponde con los resultados obtenidos al evaluar la permeabilidad donde también se observó disminución de dicha propiedad luego de la aplicación de los dos choques térmicos. Esto se podría atribuir a que, después de aplicar los dos choques térmicos, ocurre una densificación de la matriz de cemento

que garantiza mayor impermeabilidad del sistema y mayor garantía de aislamiento zonal, reducción de la transferencia de calor y pérdida de vapor de agua.

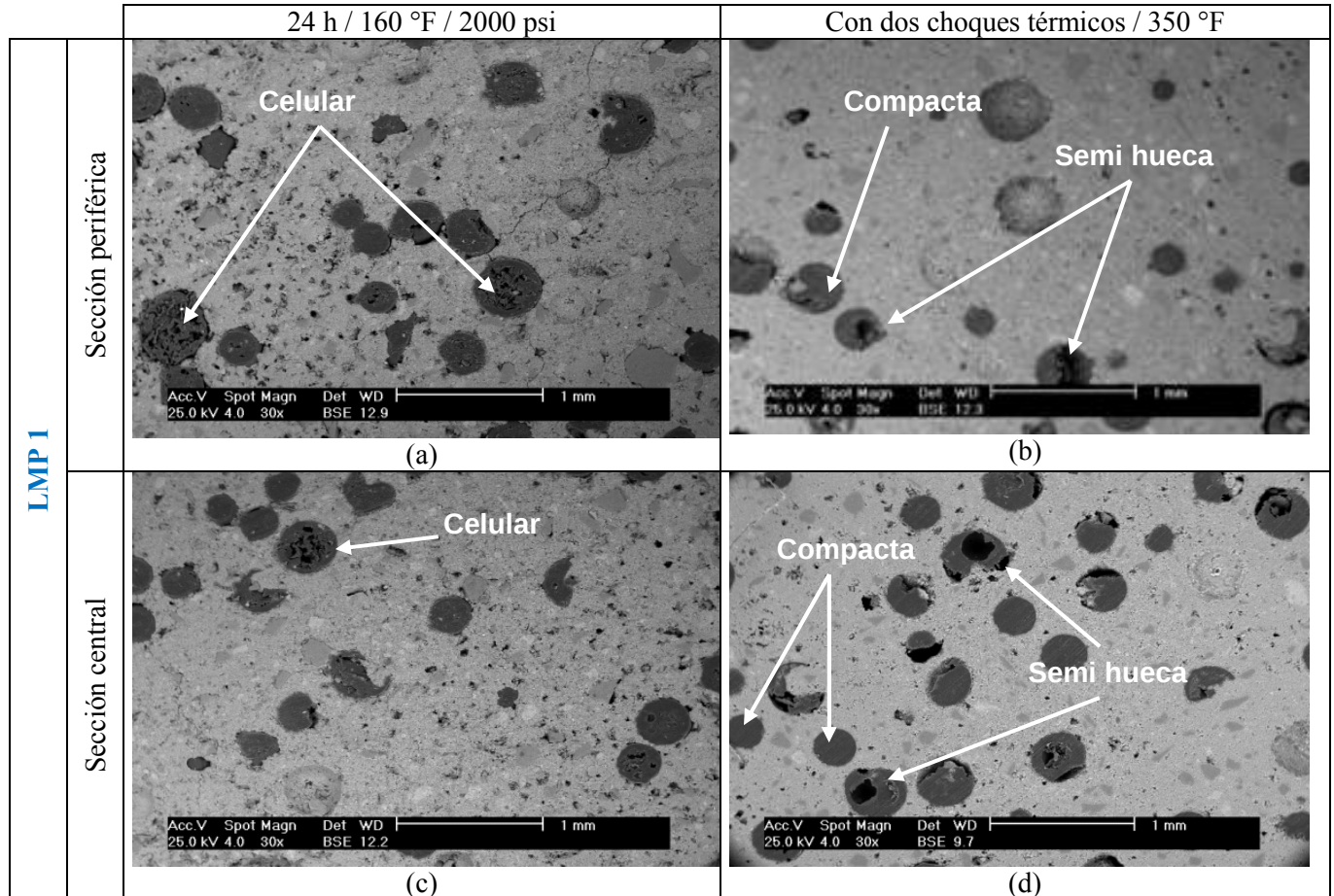


Figura 38. Microfotografías tomadas mediante MEB del diseño LMP 1 antes y después de someterlo a condiciones simuladas de los procesos de inyección alterna de vapor

Por otro lado, en la Figura 38 puede apreciarse claramente que las microesferas de polímero no se ven afectadas negativamente por la aplicación de los dos choques térmicos a 350 °F, se observa que dichas partículas permanecen adheridas a la matriz de cemento después de estar sometidas a altas temperaturas y esto posiblemente se debe a que una vez fraguado el sistema cementante las microesferas de polímero quedan confinadas dentro de la matriz de cemento, la cual a su vez las protege de las

altas temperaturas. La apariencia física de las microesferas de polímero sugiere que no hubo degradación de la estructura química del polímero; adicionalmente, durante la simulación de los choques térmicos se aplicaron temperaturas inferiores al punto de fusión de las microesferas de polímero que es 464 °F.

El hecho de que las microesferas de polímero se mantengan aún después de aplicar los dos choques térmicos a 350 °F sin sufrir carbonización garantiza que el sistema cementante no incrementará su porosidad porque no se crean espacios vacíos dejados por las microesferas de polímero.

En cuanto a la morfología, en la Figura 38 se observa que las microesferas de polímero pasaron de una estructura interna celular a una estructura compacta o semi hueca, posiblemente al estar sometido a una temperatura mayor que la temperatura de transición vítrea del polímero éste se reblandeció, adquiriendo un estado líquido, perdió su estructura celular y al enfriarse resultó en una estructura compacta y en algunos casos con espacios vacíos (ver Figura 38 b y d).

Lechada de cemento comercial 1

En la Figura 39 y Figura 41 se presenta la morfología de la lechada LMP 1 y en la Figura 40 el EDS que permitió identificar las microesferas de vidrio en el MEB.

En la Figura 39 se muestra una sección de la matriz de la lechada comercial 1 luego de ser curado a 160 °F y 2000 psi durante 24 h donde se pueden apreciar las microesferas de vidrio y la presencia de porosidad. En la Figura 40 se evidencia el EDS de Rayos X de una microesfera de vidrio; la presencia de las señales de alta intensidad de oxígeno y silicio indican que se trata de vidrio.

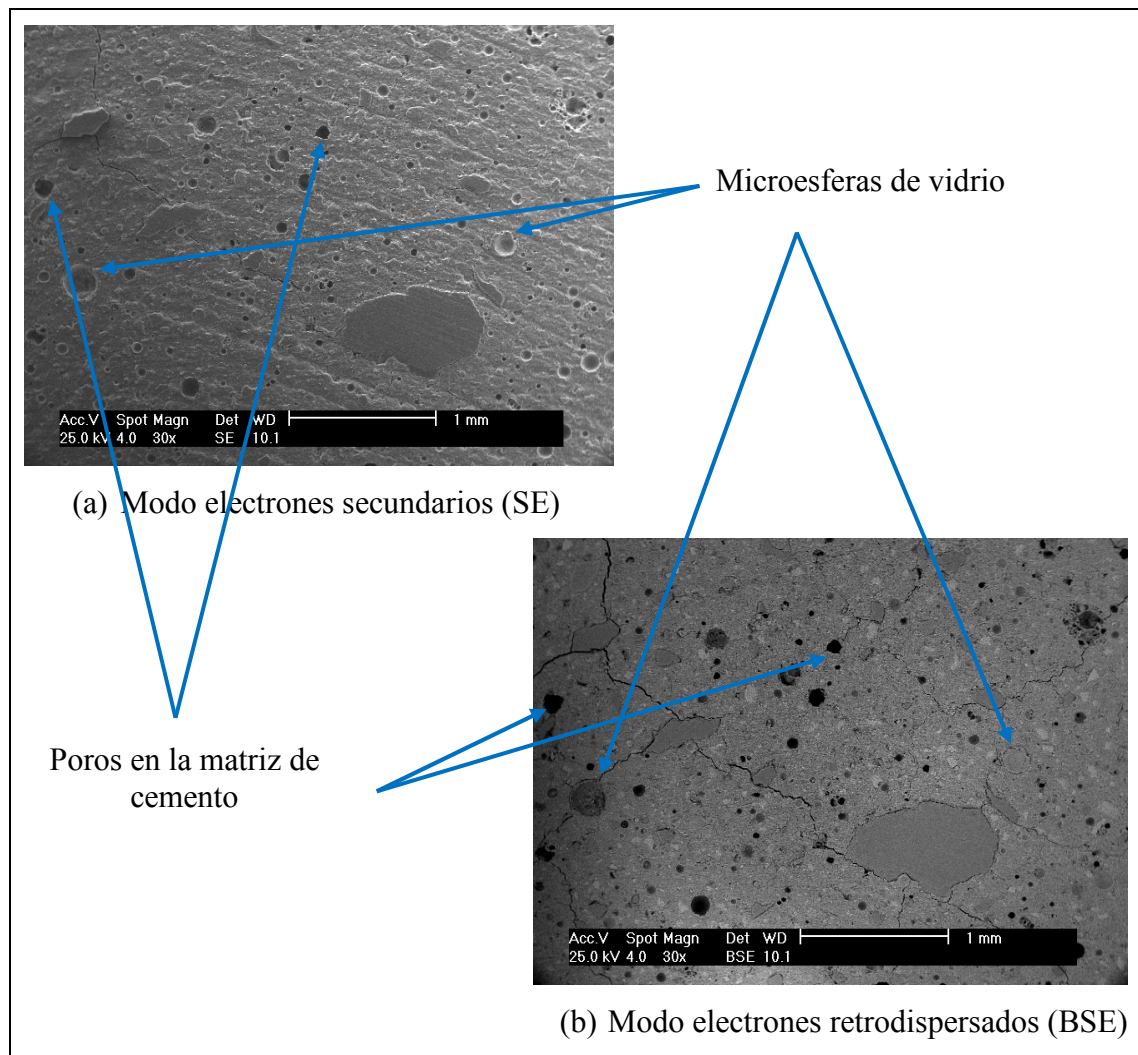


Figura 39. Microfotografía de una sección de la lechada de cemento comercial 1, curado a 160 °F y 2000 psi durante 24 h

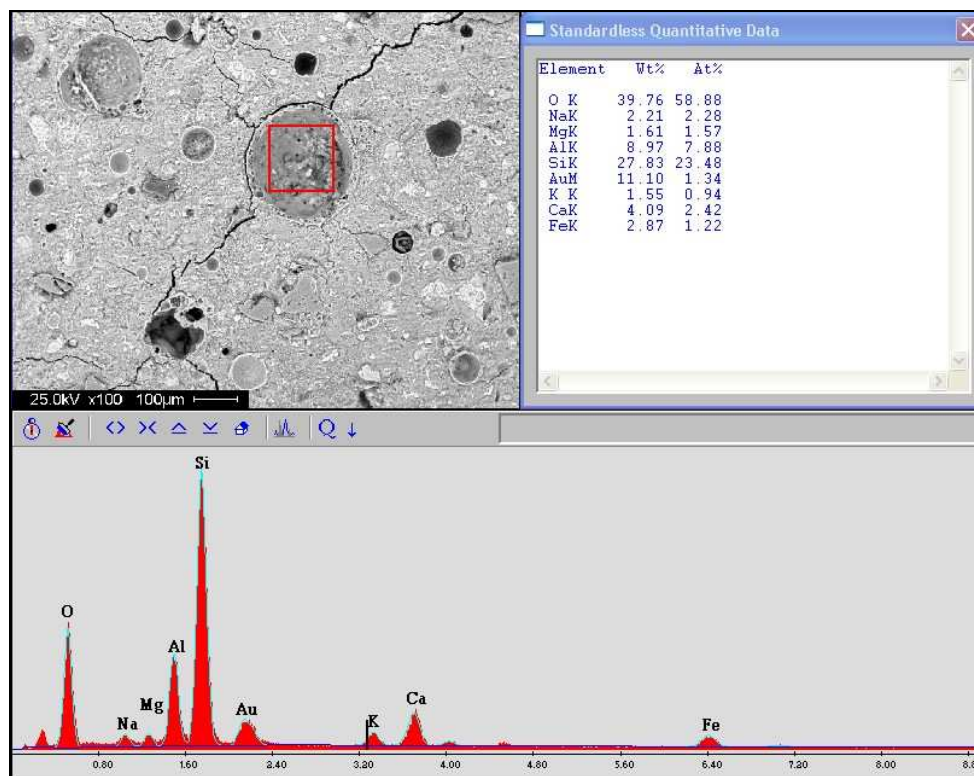


Figura 40. Espectrograma por energía dispersiva de Rayos X de las microesferas de vidrio identificadas en la lechada de cemento comercial 1

De acuerdo a la Figura 41, la lechada comercial 1 exhibió un efecto similar al caso del diseño LMP 1 como consecuencia de la aplicación de los dos choques térmicos, donde ocurrió una reducción cualitativa en el número de poros presentes en la matriz de cemento, lo cual es muy apropiado en aplicaciones de IAV ya que con la disminución de la porosidad y de la permeabilidad se evita la comunicación entre zonas.

También se observó que las microesferas de vidrio, en su mayoría, mantienen su integridad mecánica, es decir no colapsan, como ocurre con las microesferas de polímero. Esto se puede atribuir a que las microesferas de vidrio son muy duras y una evidencia de ello es que en la Figura 40 se observa una fractura en la matriz de cemento que no atraviesa a la microesfera de vidrio.

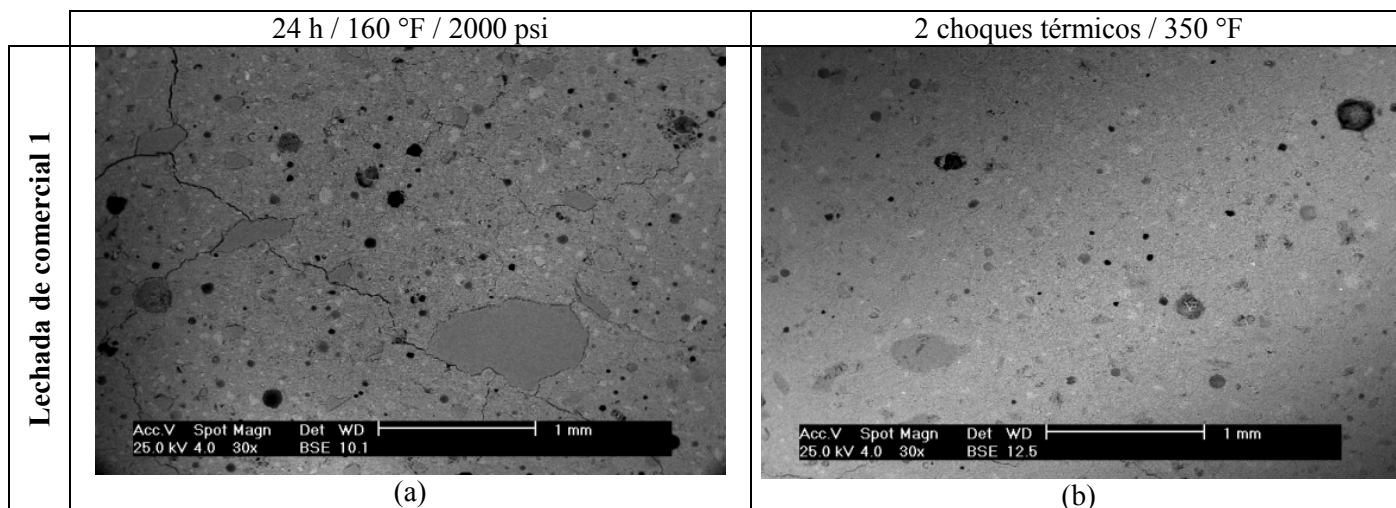


Figura 41. Microfotografías tomadas mediante MEB de la lechada de cemento comercial 1 antes y después de someterla a condiciones simuladas de los procesos de inyección alterna de vapor

Se puede afirmar que no existe inconveniente en utilizar las microesferas de polímero en la formulación de lechadas para pozos donde se aplicará la IAV porque las mismas no son afectadas negativamente por la aplicación de los dos choques térmicos a 350 °F cada uno.

Habiéndose demostrado que las lechadas de cemento formuladas con microesferas de polímero soportan las condiciones existentes en los procesos de inyección alterna de vapor, se puede proponer el diseño de una lechada de cemento siguiendo las prácticas recomendadas en la norma ISO 10426-2 [14], tal como se presenta en la siguiente sección.

3. Propuesta de diseño de una lechada de cemento formulada con microesferas de polímero para la cementación de pozos a ser sometidos a procesos de IAV

Para proponer el uso de las lechadas de cemento formuladas con microesferas de polímero en el aislamiento zonal de pozos sometidos a procesos de IAV, se seleccionaron las condiciones operacionales de la UEY tierra, donde se requiere una lechada de cemento que cumpla con los requerimientos técnicos mostrados en la Tabla 6.

En este caso, se tomó como punto de partida que la lechada de cemento formulada con microesferas de polímero propuesta en este trabajo cumpliera con los requerimientos técnicos para la UEY tierra, específicamente se inició con el ajuste de la densidad, luego los ensayos de reología, tiempo de bombeabilidad, la pérdida de filtrado, el fluido libre y la estabilidad; posteriormente se evaluó la resistencia a la compresión destructiva y no destructiva bajo condiciones simuladas de los procesos de IAV.

En la Tabla 8 se muestra la composición de la lechada de cemento formulada con microesferas de polímero propuesta para la cementación del hoyo intermedio-productor en la UEY tierra; para alcanzar este diseño uno de los parámetros evaluados fue la mezclabilidad en el laboratorio, la fluidez de manera cualitativa y la distribución homogénea de las microesferas de polímero.

Cabe destacar que se utilizó una concentración de 14% BWOC de las microesferas de polímero para obtener una lechada de densidad igual a $13,40 \pm 0,05$ lpg, que es el valor requerido para la cementación de pozos en la UEY tierra.

Con la finalidad de garantizar la distribución homogénea de las microesferas de polímero dentro de la lechada, se incorporaron a la lechada dos aditivos que incrementan la viscosidad de la lechada y de ese modo evitar que el extendedor se separe hacia la superficie; estos aditivos viscosificantes son el silicato de sodio, el cual además contribuye con el desarrollo temprano de la resistencia a la compresión, y el poli glicol éter.

En general, se puede utilizar cualquier aditivo que garantice la distribución homogénea de las microesferas de polímero así como la estabilidad de la lechada.

Adicionalmente, se incorporó 45% de harina de sílice para evitar la retrogresión de la resistencia a la compresión de la lechada de cemento una vez endurecida, ya que la misma estará sometida a las condiciones existentes en los procesos de IAV utilizados en la UEY tierra para la recuperación de los hidrocarburos.

Tabla 8. Formulación de la lechada de cemento con microesferas de polímero (LMP 3) propuesta para la UEY tierra

<i>Aditivo</i>	<i>Concentración</i>	<i>Función</i>
Cemento H	100% BWOC	Material cementante
Microesferas de polímero	14% BWOC	Disminuir la densidad de la lechada
Harina de sílice	45% BWOC	Evitar la retrogresión de la resistencia a la compresión
Controlador de filtrado (polímero)	0,6% BWOC	Controlar la pérdida de filtrado
Silicato de sodio	0,35% BWOC	Viscosificante / contribuir con el desarrollo de la resistencia a la compresión
Antiespumante	0,05 gal/sc	Evitar la formación de espuma
Retardador	0,02 gal/sc	Incrementar el tiempo de bombeabilidad
Poli glicol éter	0,06 gal/sc	Incrementar la viscosidad de la lechada
Agua	63,96 %	Fluido base

En la Tabla 9 se muestran los valores de densidad, pérdida de filtrado, fluido libre y tiempo de bombeabilidad de la lechada LMP 3, en la cual se puede observar que la lechada presenta un buen control de filtrado, pues la pérdida de filtrado es $16,0 \pm 0,5$ ml en 30 min y el valor máximo permitido es 40 ml / 30 min para una lechada que será utilizada en la cementación de un hoyo productor. Por otro lado, la lechada LMP 3 presenta 0% de fluido libre, lo cual es ideal ya que garantiza que la lechada tendrá un fraguado homogéneo.

Se puede decir entonces que la lechada LMP 3 cumple con los parámetros de densidad, pérdida de filtrado y fluido libre, ya que son apropiados para un trabajo de cementación en los hoyos productores de la UEY tierra.

Tabla 9. Especificaciones técnicas del diseño LMP 3

<i>Propiedad</i>	<i>Valor</i>
Densidad, lpg	13,40 ± 0,05
Pérdida por filtrado, ml/30 min	16,0 ± 0,5
Fluido libre, %	0
Tiempo de bombeabilidad a 100 °F y 2000 psi, h:min	3:32 ± 0:01 a 75 Bc

En la Tabla 10 se muestran las lecturas reológicas a la temperatura circulante de fondo de hoyo típica para la UEY tierra, 100 °F, correspondientes al diseño LMP 3. En general, se evidencia que los valores de tales lecturas son aceptables aunque un poco mayores que los mostrados por otros sistemas cementantes. Esta tendencia es normal para los diseños de lechadas de cemento con microesferas de polímero debido a que al poseer dichas microesferas un tamaño de partícula mayor al indicado en la norma ISO 10426-2 [14] para la configuración del viscosímetro de cilindros concéntricos recomendado en la misma norma, interfieren en la tolerancia entre el rotor y el cilindro interno, también llamado *bob*; esto origina un incremento ficticio en las lecturas y se traduce en elevados valores de viscosidad plástica y punto cedente.

En la norma ISO 10426-2 [14] se especifica que para que la muestra esté homogéneamente distribuida y la transmisión del esfuerzo de corte sea lo más uniformemente posible en el anular del viscosímetro de cilindros concéntricos, debe cumplirse que $R1/R2 > 0,9$ y $R2-R1 > 10 \cdot D_p$, donde R1 y R2 son los diámetros de los cilindros interno y externo, respectivamente, y D_p es el diámetro promedio de la partícula más grande en la lechada de cemento. De acuerdo a esto y considerando las dimensiones del viscosímetro de cilindros concéntricos recomendado en la norma ISO 10426-2 [14], el tamaño de las partículas presentes en la lechada no debe ser

mayor que 117 μm , para que no existan interferencias en las lecturas. En el caso de las microesferas de polímero, las partículas tienen diámetros promedios entre 250 y 350 μm , por lo que están fuera de los valores de tamaño de partícula recomendados por la norma ISO 10426-2 [14].

A pesar de que las lecturas reológicas registradas en el viscosímetro de cilindros concéntricos sean muy elevadas esto no es indicativo de que la lechada no se pueda mezclar ni bombear con los equipos convencionales de cementación en campo.

Cabe destacar que el ajuste a los modelos reológicos se realizó siguiendo la norma ISO 10426-2 [14]; en particular se muestra el ajuste al modelo Plástico de Bingham debido a que los parámetros de este modelo, la viscosidad plástica y el punto cedente, son los más comúnmente manejados en la Industria Petrolera para realizar los cálculos relacionados con el desplazamiento de fluidos durante el proceso de cementación de pozos.

Tabla 10. Lecturas reológicas a 100 °F del diseño LMP 3 obtenidas en el viscosímetro de cilindros concéntricos y los parámetros reológicos según la norma ISO 10426-2 [14]

<i>Tasa de corte, r.p.m.</i>	<i>Lectura promedio, lb_f/100pie²</i>
3	16,5 ± 0,5
6	26,0 ± 0,5
30	83,0 ± 0,5
60	134,0 ± 0,5
100	191,0 ± 0,5
200	311,5 ± 0,5
300	330,0 ± 0,5
Fuerza de Gel 10 s, lb _f /100pie ²	19,0 ± 0,5
Fuerza de Gel 10 min, lb _f /100pie ²	53,0 ± 0,5
Fuerza de Gel 30 min, lb _f /100pie ²	95,0 ± 0,5
Viscosidad plástica, cp	443
Punto cedente, lb _f /100pie ²	30

En la Tabla 9 se muestra el tiempo de bombeabilidad de la lechada propuesta LMP 3, evidenciándose que cumple con el tiempo mínimo requerido para ser bombeada en una operación de cementación de una sección intermedio-productora en la U.E.Y. tierra, siendo igual a 3 h 32 min $\pm$ 1 min (ver Tabla 9).

En la Figura 42 se muestra el gráfico de la consistencia de la lechada de cemento en función del tiempo. Allí se aprecia que la consistencia inicial de la lechada es aceptable, estando en el orden de 26 unidades de consistencia Bearden (Bc) y dicha consistencia presenta un comportamiento estable hasta que alcanza los 75 Bc, valor que representa el punto en el cual la lechada ya no puede ser bombeada debido a su poca fluidez como consecuencia de la hidratación y el desarrollo de geles, en un tiempo adecuado para la colocación de la lechada en el espacio anular.

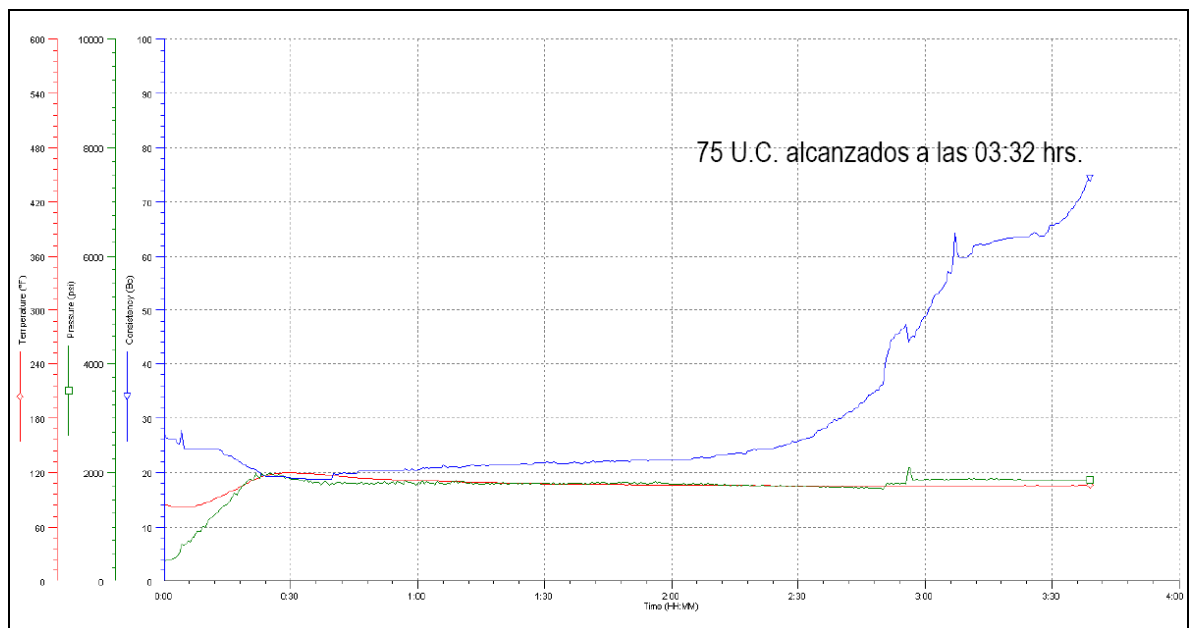


Figura 42. Tiempo de bombeabilidad a 100 °F y 2000 psi del diseño LMP 3

En la Figura 31 se presentan los resultados obtenidos de la evaluación de la estabilidad de la lechada LMP 3 luego del curado inicial a 120 °F y 2000 psi durante 24 h. Allí se puede observar la densidad de cada sección de la lechada, desde el tope hacia el fondo, luego del curado, encontrándose que el diseño LMP 3 es estable

debido a que no presenta diferencia de densidad a lo largo del cilindro evaluado, lo cual permite asegurar que al utilizar este diseño en un trabajo de cementación se tendrá una columna de cemento homogénea. Esta característica que presenta la lechada LMP 3 se debe a los aditivos silicato de sodio y poli glicol éter, los cuales al viscosificar la lechada permiten la distribución homogénea de las microesferas de polímero.

Por otro lado, se evidenció un incremento de $1,19 \pm 0,05$ lpg en la densidad de la lechada luego del curado a 120 °F y 2000 psi durante 24 h, es decir que la densidad de la lechada en la balanza presurizada fue de $13,40 \pm 0,05$ lpg y la densidad promedio después del curado fue de $14,59 \pm 0,01$ lpg. Tal como se explicó en la sección 2 de los resultados, este incremento de densidad se debe a que parte de las microesferas de polímero se colapsaron al estar sometidas a 2000 psi de presión produciendo esto el incremento de la densidad. Sin embargo, este incremento de densidad es aceptable ya que por lo general la densidad de las lechadas se selecciona de modo que esté entre 1 y 2 lpg por debajo de la densidad necesaria para generar una presión hidrostática igual a la presión de fractura de la formación.

Adicionalmente, se observó una disminución de $1,35 \pm 0,05$ cm en la altura de la columna de cemento respecto a una longitud inicial de 21 cm, es decir que la reducción de la altura de la columna de cemento fue de 6,4%. Este fenómeno es consecuencia del colapso que sufre un determinado porcentaje de las microesferas de polímero durante el curado a 120 °F y 2000 psi y se corresponde con el incremento de densidad observado después del curado.

Esta reducción de la altura de la columna de cemento es aceptable y es importante considerarlo para el diseño del trabajo de cementación; debe incluirse en el cálculo del volumen de lechada de cemento a bombear para garantizar que se alcance el tope de cemento deseado en el espacio anular.

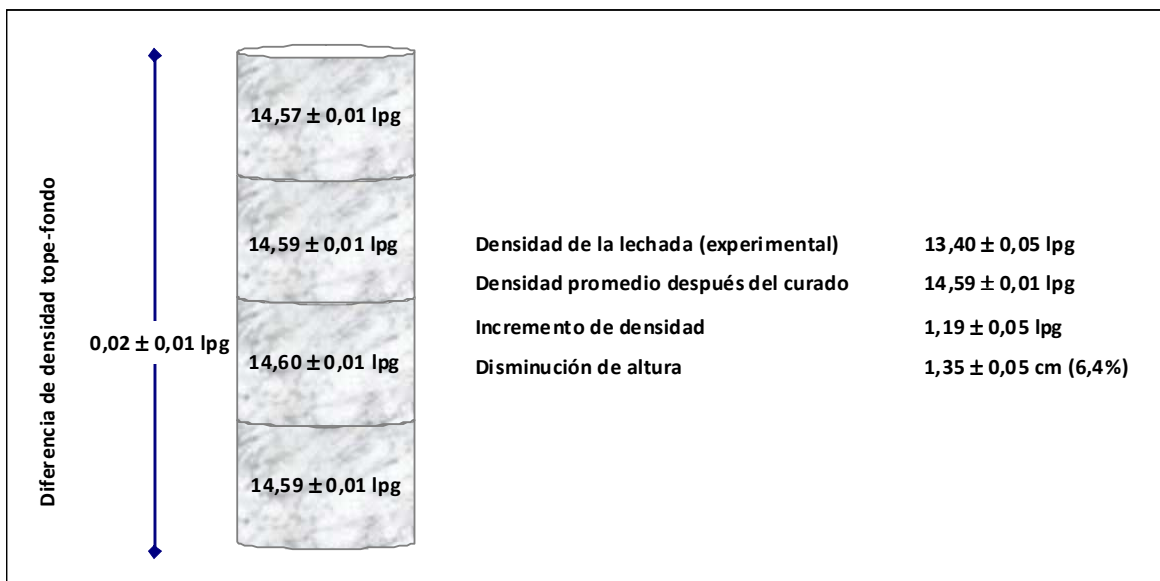


Figura 43. Estabilidad del diseño LMP 3 después del curado a 120 °F y 2000 psi durante 24 h

En la Figura 44 se muestran los resultados obtenidos del ensayo de resistencia a la compresión destructiva realizada a la lechada LMP 3 luego del curado inicial y luego de la aplicación de cada choque térmico con lo cual se simulan las condiciones existentes en los procesos de inyección alterna de vapor.

Se evidenció que la lechada de cemento con microesferas de polímero LMP 3 desarrolló una resistencia a la compresión de $1430 \pm 30 \text{ psi}$ a 24 h, el cual es un valor aceptable porque cumple con el valor mínimo de resistencia a la compresión durante las primeras 24 h; de modo que se garantiza que el sello de cemento será detectado por las herramientas sónicas y ultrasónicas utilizadas para evaluar la calidad de la cementación.

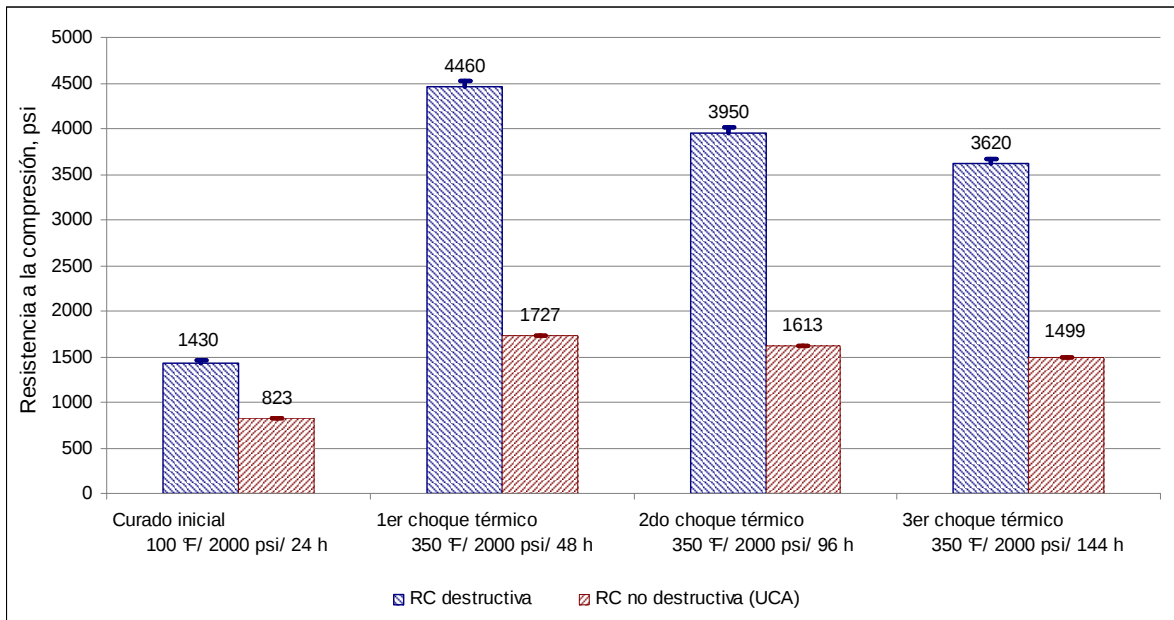


Figura 44. Resistencia a la compresión destructiva y no destructiva (UCA) del diseño LMP 3 antes y después de ser sometido a los choques térmicos

En la Figura 45 se muestran las fotografías de los cubos de la lechada LMP 3 luego del ensayo de resistencia a la compresión destructivo, después del curado inicial y después de la aplicación de tres choques térmicos.



Figura 45. Fotografía de las muestras después del ensayo de resistencia a la compresión destructiva según la norma ISO 10426-2 [14] de la lechada de cemento formulada con microesferas de polímero (LMP 3) propuesta

Respecto a los valores de resistencia a la compresión destructiva obtenidos luego de la aplicación de cada uno de los choques térmicos de 350 °F cada uno, se aprecia que son mayores que el obtenido luego del curado inicial, indicando esto que la lechada LMP 3 soporta la aplicación de los choques térmicos porque no sufre retrogresión de la resistencia a la compresión.

Al observar los valores de resistencia a la compresión no destructiva, mostrados en la Figura 44 y en la Figura 46, se evidencia en primer lugar que los mismos son inferiores a los obtenidos en los ensayos destructivos, tal como se esperaba según la tendencia observada para la lechada de cemento H de densidad 16,5 lpg, mencionada en el punto 2.1 de la sección de resultados.

En cuanto a los valores de resistencia a la compresión no destructiva luego de la aplicación de los tres choques térmicos, se obtuvo el mismo comportamiento que el mostrado en el caso de los ensayos destructivos.

Tanto en los ensayos de resistencia a la compresión destructivo y no destructivo se observa que la lechada de cemento LMP 3 no presentó retrogresión de la resistencia a la compresión luego de la aplicación de los tres choques térmicos; se aprecia que luego del primer choque térmico hubo un incremento considerable de la resistencia a la compresión y luego fue disminuyendo a medida que se aplicó mayor número de choques térmicos pero aún la resistencia a la compresión final se mantuvo mayor que la desarrollada durante el curado inicial.

Debe recordarse que en el ensayo no destructivo la resistencia a la compresión se obtiene a partir de algoritmos matemáticos que relacionan el tiempo de tránsito de la onda ultrasónica a través del cemento con su resistencia a la compresión. Por otro lado, la velocidad de la onda ultrasónica se ve afectada por la presencia de las microesferas de polímero que contienen un gas atrapado en su interior y la presencia del gas interfiere en la transmisión de las ondas ultrasónicas.

Sin embargo, el ensayo no destructivo de resistencia a la compresión brinda información sobre el desarrollo en tiempo real de la resistencia a la compresión de las lechadas de cemento.

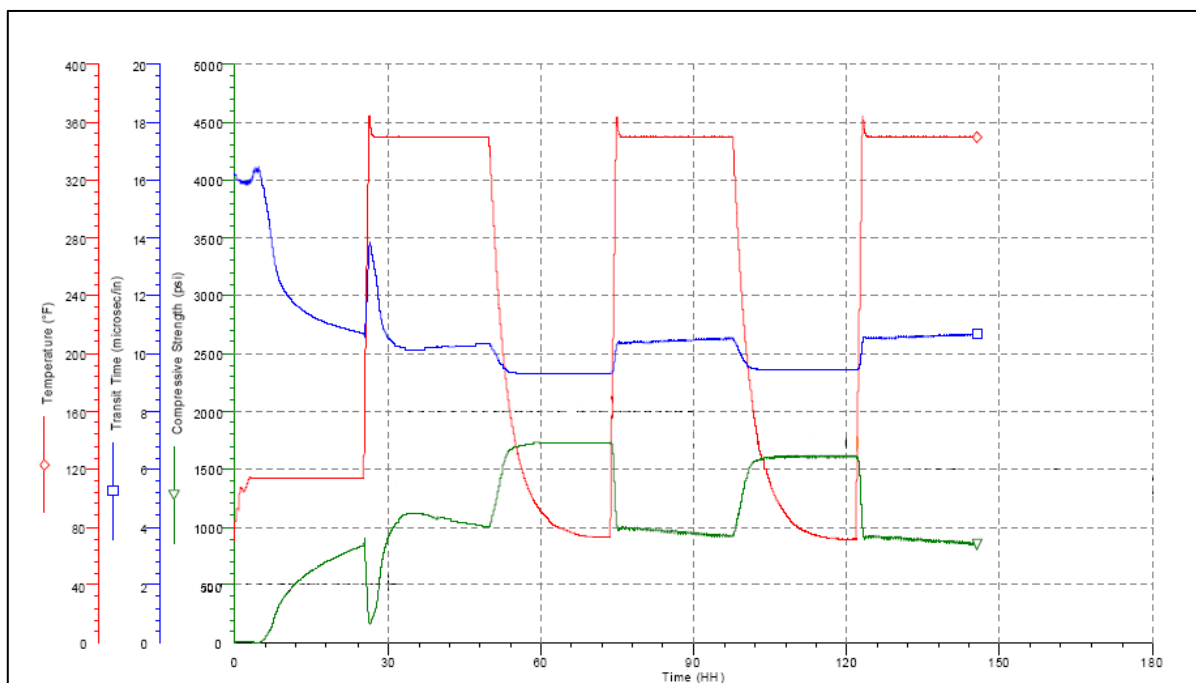


Figura 46. Resistencia a la compresión no destructiva (UCA) a 120 °F y 2000 psi del diseño LMP 3

En resumen, considerando los resultados mostrados en esta sección se puede decir que la lechada LMP 3 cumple con los requerimientos técnicos necesarios para realizar un trabajo de cementación en el hoyo productor de los pozos ubicados en la UEY tierra, los cuales son mostrados en la Tabla 6. Se resalta además que es resistente a la aplicación de choques térmicos con los cuales se simulan las condiciones de los procesos de IAV.

4. Factibilidad de uso de las lechadas de cemento formuladas con microesferas de polímero en la cementación de pozos a ser sometidos a procesos de IAV

Basado en los resultados mostrados en esta sección se puede decir que las lechadas de cemento formuladas con microesferas de polímero representan una solución tecnológica atractiva para la cementación de pozos que serán sometidos a procesos de inyección alterna de vapor, debido a que pueden soportar elevadas temperaturas sin sufrir retrogresión de la resistencia a la compresión, a pesar de que dichas microesferas de polímero sólo pueden ser utilizadas en pozos cuya temperatura estática de fondo de hoyo sea inferior a 180 °F y esto se debe a que la lechada de cemento es sometida a altas temperaturas una vez que la misma ha sido curada y endurecida a las condiciones iniciales del pozo donde las temperaturas son menores que 180 °F.

Como se pudo observar las microesferas de polímero propuestas en este estudio pueden ser empleadas para el diseño de lechadas de cemento a ser sometidas a las condiciones de los procesos de IAV, como una alternativa económica para la sustitución de las microesferas de vidrio, las cuales son el extendedor más utilizado pero que encarece el costo por barril de lechada de cemento.

A continuación se presenta una tabla comparativa de las propiedades físicas más importantes consideradas en este estudio para la factibilidad de uso de las lechadas de cemento con microesferas de polímero, como una alternativa de sustitución de las microesferas de vidrio. Para efectos de comparación se muestran los valores de la lechada de cemento con microesferas de polímero con los mejores resultados y los correspondientes a la lechada comercial 1.

Tabla 11. Comparación de las propiedades físicas de las lechadas LMP 1 y lechada comercial 1, antes y después de la aplicación de dos choques térmicos

<i>Propiedad</i>	<i>LMP 1</i>		<i>Lechada comercial 1</i>	
	<i>Curado inicial</i>	<i>Con 2 choques térmicos de 350 °F</i>	<i>Curado inicial</i>	<i>Con 2 choques térmicos de 350 °F</i>
Concentración del extendedor, %BWOC	11,3	n/a	12	n/a
Densidad de la lechada de cemento, lb/gal	13,1	n/a	13,1	n/a
Estabilidad, lb/gal	0,32 ± 0,01	-	0,04 ± 0,01	-
Resistencia a la compresión destructiva, psi	1300 ± 50	2500 ± 70	3250 ± 70	3760 ± 50
Resistencia a la tensión, psi	300 ± 30	520 ± 30	310 ± 50	870 ± 30
Permeabilidad, md	1,050 ± 0,001	0,020 ± 0,001	0,614 ± 0,001	0,215 ± 0,001
Morfología	No se evidenció degradación de la estructura química de las microesferas ni incremento de la porosidad luego de la aplicación de los dos choques térmicos.		No se evidenció incremento de la porosidad luego de la aplicación de los dos choques térmicos.	

Tal como se aprecia en la Tabla 11, las lechadas LMP 1 y la lechada comercial 1, presentan una resistencia a la compresión destructiva mayor que 1200 psi, luego del curado a las 24 h a las condiciones de presión y temperatura del hoyo, cumpliendo con el requisito exigido para las operaciones de cementación primaria. Por otro lado, ambas lechadas de cemento incrementaron sus propiedades mecánicas de resistencia a la compresión y de tensión, así como también disminuyeron la permeabilidad luego de la aplicación de los dos choques térmicos de 350 °F cada uno, que simulan las condiciones de los procesos de IAV, indicando esto que soportan condiciones de altas temperaturas y de ciclos de temperaturas sin presentar el fenómeno de retrogresión de la resistencia a la compresión.

Adicionalmente, la lechada LMP 1 desarrolló una resistencia a la tensión similar a la desarrollada por la lechada comercial 1 luego del curado inicial, lo cual es aceptable ya que es una evidencia más de que es factible la sustitución de las microesferas de vidrio por las microesferas de polímero.

Otro aspecto resaltante, es que la permeabilidad de la lechada LMP 1 disminuyó de manera significativa respecto a la de la lechada comercial 1 y en lo referente a la integridad de las microesferas de polímero se encontró que las mismas no sufren degradación de su estructura química luego de ser sometidas a 350 °F, que es la máxima temperatura que puede ser obtenida con los equipos disponibles en el laboratorio para la evaluación de lechadas de cemento. En el caso de que las microesferas de polímero sufrieran degradación al ser sometidas a temperaturas mayores que su punto de fusión (464 °F), por ejemplo carbonización, se podría plantear la hipótesis de que permanecería intacta la matriz de cemento, los poros estarían ocupados por el carbón formado luego de la transformación por efecto térmico de las microesferas y no incrementaría la permeabilidad ya que los poros se mantendrían aislados o sin comunicación entre ellos manteniendo la condición del curado inicial. Bajo este escenario sería muy recomendable evaluar las propiedades mecánicas así como realizar el análisis numérico de los esfuerzos de la nueva matriz de cemento que tendría mayor número de poros dejados por las microesferas de polímero, las cuales podrían tener menor tamaño o estar degradadas químicamente como consecuencia de las altas temperaturas. Este estudio quedaría como una recomendación para próximas investigaciones.

La propuesta de uso de lechadas de cemento formuladas con microesferas de polímero para la UEY tierra realizada en este estudio puede ser trasladada y adaptada a las condiciones existentes en los pozos de la Faja Petrolífera del Orinoco, ya que se ha demostrado un desempeño aceptable bajo las condiciones existentes en los procesos de IAV y las condiciones de presión, temperatura y profundidad típicas encontradas en los pozos de FPO son similares a las de las UEY tierra y lago, y son aptas para la aplicación de las lechadas formuladas con microesferas de polímero.

Por otro lado, se debe realizar un estudio completo sobre los esfuerzos a los que está sometido el sello de cemento durante los procesos de IAV, ya que en estudios recientes se ha encontrado que una de las propiedades mecánicas determinantes en la integridad mecánica del cemento frente a cambios bruscos de temperatura es la resistencia a la tensión, y ello se determina a través del modelaje numérico [24].

Este estudio puede hacerse mediante el análisis numérico de los esfuerzos mecánicos con el uso de programas de computación mediante los cuales es posible determinar si el sello de cemento soportará los esfuerzos asociados a los cambios bruscos de temperatura, tomando en cuenta las características geomecánicas del hoyo y del cemento y las especificaciones de la tubería aislada [21]. No obstante, este tipo de análisis deberá ser considerado en otro trabajo de investigación ya que está fuera del alcance de este estudio.

CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos en este estudio se concluye lo siguiente:

1. Es factible técnicamente el uso de las microesferas de polímero como extendedores para la formulación de lechadas de cemento que estarán sometidas a las condiciones existentes en los procesos de inyección alterna de vapor.
2. Las lechadas de cemento formuladas con microesferas de polímero evaluadas en esta investigación compiten técnicamente con aquellas formuladas con las microesferas de vidrio utilizadas por las compañías de cementación.
3. Las lechadas de cemento formuladas con microesferas de polímero desarrollan aceptables valores de resistencia a la compresión y a la tensión durante las primeras 24 h de curado.
4. Las lechadas de cemento formuladas con microesferas de polímero no sufren retrogresión de la resistencia a la compresión después de aplicar dos choques térmicos a 350 °F cada uno.
5. Las lechadas de cemento formuladas con microesferas de polímero disminuyen significativamente su permeabilidad al gas después de aplicar dos choques térmicos a 350 °F cada uno.
6. Las lechadas de cemento formuladas con microesferas de polímero después del curado a bajas temperaturas pueden ser sometidas a temperaturas tan altas como 350 °F.
7. Las lechadas de cemento formuladas con microesferas de polímero representan una alternativa para la cementación de hoyos productores, en yacimientos de bajo gradiente de fractura y de baja temperatura, que serán sometidos a procesos de inyección alterna de vapor, como por ejemplo los campos presentados en este trabajo y los de la Faja Petrolífera del Orinoco.

RECOMENDACIONES

1. Determinar la temperatura a la cual están sometidas las microesferas de polímero durante los ensayos de laboratorio donde se aplican choques térmicos de 350 °F a las lechadas de cemento, para comprender los posibles cambios físicos que sufre el material dentro de la matriz de cemento.
2. Diseñar un procedimiento experimental donde se pueda someter la lechada de cemento formulada con microesferas de polímero a temperaturas de 700 °F, para evaluar el efecto de las altas temperaturas sobre: la estructura de las microesferas de polímero, la estructura y las propiedades mecánicas de la matriz de cemento.
3. Completar el estudio de las lechadas de cemento formuladas con microesferas de polímero bajo condiciones simuladas de los procesos de inyección alterna de vapor, con una evaluación mecánica mediante modelaje y simulación numérica de los esfuerzos a los que está sometido el sello de cemento en el espacio anular durante los procesos de inyección alterna de vapor.
4. Realizar pruebas de campo en las unidades de explotación de yacimientos tierra y lago ubicadas en el occidente venezolano, así como en la Faja Petrolífera del Orinoco, para verificar el desempeño de las lechadas de cemento formuladas con microesferas de polímero en pozos que serán sometidos a los procesos de inyección alterna de vapor.
5. Establecer correlaciones entre los resultados de resistencia a la compresión destructiva (obtenidos en la prensa hidráulica) y no destructiva (obtenidos en el UCA) de lechadas de cemento con diferentes concentraciones de las microesferas de polímero, ya que los algoritmos para determinar la resistencia a la compresión mediante ultrasonido fueron realizados en base a lechadas con materiales convencionales, no se consideró el uso de materiales poliméricos.

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. NELSON, E. and GUILLOT, D. *Well Cementing*. 2nd ed. Sugar Land, Texas: Schlumberger Dowell, 2006. ISBN-13: 978-097885300-6. ISBN-10: 0-9788530-0-8.
2. *Manual IMCO. Tecnología aplicada de lodos*. 7ma ed. Houston, Texas: Halliburton, 1981.
3. ECONOMIDES, M.J.; WATTERS, L. T. and DUNN-NORMAN, S. *Petroleum Well Construction*. New York: John Wiley & Sons Edition, 1998. ISBN 0-471-96938-9.
4. CAMPOS, M. *Estudio de materiales cementantes resistentes al H_2S y/o CO_2 usados en construcción de pozos*. Caracas, Venezuela, 2003. Trabajo especial de grado para optar el título de Magíster en la Universidad Simón Bolívar.
5. *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*. Edited by Peter C. Hewlett. 4th ed. Elsevier Butterworth-Heinemann, 1998. ISBN 0 7506 6256 5.
6. PRATS, Michael. *Procesos térmicos de extracción de petróleo*. Traducido por Efraín Barberii. 1ra ed. Los Teques, Venezuela: Ediciones Técnicas de Intevep, 1987. Traducción de Thermal Recovery. ISBN 980-259-099-1.
7. BLANCO, A. *Propiedades mecánicas de materiales cementantes bajo condiciones simuladas de pozos de inyección de vapor*. Maracaibo, Venezuela, 1999. Trabajo especial de grado para optar el título de Magíster en La Universidad del Zulia.
8. QUERCIA, G. *Síntesis y caracterización de microesferas cerámicas*. Caracas, Venezuela, 2007. Trabajo especial de grado para optar el título de Magíster en la Universidad Simón Bolívar.
9. CABRERA, O. *Consulta sobre microesferas 3M*. [online]. Mensaje para: F. Pereira. 27 de Enero de 2006. Comunicación personal.
10. CARRUYO, J. *Evaluación de la tecnología de lodo cementante aplicada en pozos de inyección alterna de vapor en las áreas de Tierra Este Pesado*.

- Maracaibo, Venezuela, 2005. Trabajo especial de grado para optar el título de Ingeniero de Petróleo en La Universidad del Zulia.
11. *Standard Test Method for Determining Pore Volume Distribution of Catalysts by Mercury Intrusion Porosimetry*. American Society for Testing and Materials. ASTM D 4284 – 07. United States: ASTM, 2007.
 12. *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. American Society for Testing and Materials. ASTM C 136 – 06. United States: ASTM, 2006.
 13. *Cements and materials for well cementing – Part 1: Specification*. International Organization for Standardization. 2nd ed. ISO 10426-1:2005. Switzerland: ISO, 2005.
 14. *Cements and materials for well cementing – Part 2: Testing of well cements*. International Organization for Standardization. 1st ed. ISO 10426-2:2005. Switzerland: ISO, 2003. Amendment 1.
 15. *Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. American Society for Testing and Materials. ASTM C 496 / C 496M – 04. United States: ASTM, 2004.
 16. *Standard Test Method for Tensile Strength of Chemical-Resistant Mortar, Grouts and Monolithic Surfacing*. American Society for Testing and Materials. ASTM C 307-99. United States: ASTM, 1999.
 17. WIJK, G. Some new theoretical aspects of indirect measurements of the tensile strength of rocks. En: *International Journal Rock Mechanical Mines Science and Geomechanics*. Vol. 15, (1978), p 149-160.
 18. HEINOLD, T.; DILLENBECK, R.; BRAY, W.; ROGERS, M. *Analysis of tensile strength test methodologies for evaluating oil and gas well cement systems*. Society of Petroleum Engineers [en línea]. N° 84565. Octubre, 2003. Disponible en: <http://www.spe.org>.
 19. PINEDA, G.; CICCOLA, V.; MILLÁN, J. *Consideraciones teóricas y modelado del comportamiento mecánico de probetas usadas para la determinación de la resistencia a la tensión directa del cemento*. Seminario Internacional de Fluidos

- de Perforación, Completación y Cementación de Pozos [en línea]. VIII SEFLU CEMPO. Noviembre, 2010. Disponible en: <http://seflucempo.com>.
20. MUELLER, D. T.; EID, R. N. *Characterization of the Early-Time Mechanical Behavior of Well Cements Employed in Surface Casing Operations*. Society of Petroleum Engineers [en línea]. N° 98632. Febrero, 2006. Disponible en: <http://www.spe.org>.
21. PINEDA, G.; CICCOLA, V.; GARCÍA, J. *Evaluación mecánica de sistemas cementantes propuestos para pozos SAGD – Formulación numérica y modelado*. Seminario Internacional de Fluidos de Perforación, Completación y Cementación de Pozos [en línea]. VII SEFLU CEMPO. Mayo, 2008. Disponible en: <http://seflucempo.com>.
22. NELSON, E. B. Improved cement slurry designed for thermal EOR wells. En: Oil and Gas Journal. Diciembre, 1996.
23. PERRY, R. *Manual del Ingeniero Químico*. 3ra ed. en Español. México: McGraw-Hill, 1992. Tomo I. ISBN 968-422-971-2. Traducido de la sexta edición en Inglés de Perry's Chemical Engineers' Handbook.
24. MYERS, S.; EL SHAARI, N.; DILLENBECK, L. *A New Method to Evaluate Cement Systems Design Requirements for Cyclic Steam Wells*. Society of Petroleum Engineers [en línea]. N° 93909. 30 de Marzo – 01 de Abril, 2005. Disponible en: <http://www.spe.org>.

ANEXOS

Tabla A-1. Valores de resistencia a la compresión destructiva según la norma ISO 10426-2 [14] de las lechadas de cemento formuladas con microesferas de polímero y su equivalente sistema comercial antes y después de someterlos a condiciones simuladas de los procesos de IAV

<i>Lechada de cemento</i>	<i>Resistencia a la compresión destructiva, psi</i>	
	<i>Curado inicial 160 °F / 2000 psi / 24 h</i>	<i>Luego de dos choques térmicos 350 °F / 2000 psi / 96 h</i>
LMP 1	1300 ± 50	2500 ± 70
LMP 2	1220 ± 60	2640 ± 70
Lechada comercial 1	3250 ± 70	3760 ± 50

Tabla A-2. Valores de resistencia a la compresión no destructiva según la norma ISO 10426-2 [14] de las lechadas de cemento formuladas con microesferas de polímero y su equivalente sistema comercial antes y después de someterlos a condiciones simuladas de los procesos de IAV

<i>Lechada de cemento</i>	<i>Resistencia a la compresión no destructiva, psi</i>	
	<i>Curado inicial 160 °F / 2000 psi / 24 h</i>	<i>Luego de dos choques térmicos 350 °F / 2000 psi / 96 h</i>
LMP 1	455 ± 1	942 ± 1
LMP 2	1415 ± 1	857 ± 1
Lechada comercial 1	2167 ± 1	1458 ± 1

Tabla A-3. Valores de resistencia a la tensión indirecta según la norma ASTM C496 / C496M-04 [15] de las lechadas de cemento formuladas con microesferas de polímero y su equivalente sistema comercial antes y después de someterlos a condiciones simuladas de los procesos de IAV

<i>Lechada de cemento</i>	<i>Resistencia a la tensión indirecta, psi</i>	
	<i>Curado inicial 160 °F / 2000 psi / 24 h</i>	<i>Luego de dos choques térmicos 350 °F / 2000 psi / 96 h</i>
LMP 1	300 ± 30	520 ± 30
LMP 2	300 ± 40	510 ± 30
Lechada comercial 1	310 ± 50	870 ± 30

Tabla A-4. Valores de permeabilidad al gas a 14,7 psi de los diseños LMP 1 y LMP 2 y la lechada comercial 1 antes y después de someterlos a condiciones simuladas de los procesos de inyección alterna de vapor

<i>Lechada de cemento</i>	<i>Permeabilidad, md</i>	
	<i>Curado inicial 160 °F / 2000 psi / 24 h</i>	<i>Luego de dos choques térmicos 350 °F / 2000 psi / 96 h</i>
LMP 1	1,050 ± 0,001	0,020 ± 0,001
LMP 2	0,635 ± 0,001	0,194 ± 0,001
Lechada comercial 1	0,614 ± 0,001	0,215 ± 0,001

Tabla A-5. Valores de resistencia a la compresión destructiva y no destructiva del diseño LMP 3 antes y después de ser sometido a los choques térmicos

<i>Condición</i>	<i>Resistencia a la compresión, psi</i>	
	<i>Destructiva</i>	<i>No destructiva</i>
Curado inicial 160 °F / 2000 psi / 24 h	1430 ± 30	823 ± 1
Luego de un choque térmico 350 °F / 2000 psi / 48 h	4460 ± 60	1727 ± 1
Luego de dos choques térmicos 350 °F / 2000 psi / 96 h	3950 ± 70	1613 ± 1
Luego de tres choques térmicos 350 °F / 2000 psi / 144 h	3620 ± 40	1499 ± 1