

CEMENTO DE ALTA TENACIDAD PARA OPTIMIZAR LA RESPUESTA DE AISLACIONES DE POZOS

W. Morris M. Criado, J. Robles, G. Bianchi

VP de Ingeniería y Tecnología, San Antonio – Pride International

Resumen

Durante la vida productiva de un pozo el cemento que aísla niveles productivos, protege y soporta el casing, está sometido a condiciones extremas de servicio que pueden causar su deterioro prematuro. Las operaciones de punzado y fractura, los cambios de temperatura y presión que ocurren durante la recuperación y depletación del pozo, así como los esfuerzos mecánicos generados por desplazamientos tectónicos pueden causar severos daños en el cemento de aislación.

En este trabajo se evalúan los parámetros mecánicos (resistencia a la compresión, resistencia al impacto, resistencia a la tracción, módulo de Young, coeficiente de Poisson y deformación específica) que caracterizan el comportamiento elástico-plástico y la tenacidad del cemento. Se ensayaron diseños de lechadas comúnmente empleadas en las operaciones de cementación de pozos haciendo especial hincapié en la incidencia de aditivos tales como el látex, micro fibras y polímeros utilizados como reductores de filtrado y fricción.

Las propiedades mecánicas de los cementos fueron determinadas siguiendo normas y procedimientos ASTM y API. La resistencia al impacto fue evaluada utilizando el estándar API RP 43 para la evaluación de cargas de punzado.

Los resultados obtenidos a la fecha reflejan que las propiedades mecánicas de los cementos son altamente dependientes de los aditivos incorporados en su preparación. Si bien el cemento sin aditivos presenta en general una elevada resistencia a la compresión, su comportamiento es de tipo frágil con limitada deformación y baja tenacidad. La incorporación de látex mejora el comportamiento elástico del cemento, si bien disminuye su resistencia a la compresión y no incrementa significativamente su resistencia al impacto. Por su parte, la incorporación de fibras poliméricas otorga elevada tenacidad al cemento y mejora en forma apreciable su comportamiento elástico. Según fuera comprobado a través de perfiles CBL, VDL y SBT corridos en pozos cementados con y sin fibras, la incorporación de este aditivo al cemento evita su deterioro generalizado en la zona a punzar y optimiza el desempeño del material frente a los distintos eventos a los cuales está sometido el pozo durante su vida útil.

Introducción

Existen diversos factores que deben ser considerados cuando se diseñan lechadas para pozo petroleros, especialmente en zonas productivas, alguna de las más críticas son: Temperatura, densidad, reología, filtrado, resistencia, etc. Se han desarrollado una extensa variedad de aditivos para lograr cementaciones exitosas.

La norma API RP-10B especifica los procedimientos de laboratorio para evaluar las lechadas y predecir su comportamiento en condiciones de operación, de manera de caracterizar el comportamiento de las lechadas en el corto plazo, desde que el cemento se hidrata hasta que adquiere resistencia. Para ello se evalúan propiedades tales como la reología, el control de filtrado, la bombeabilidad, etc. Los estudios realizados hasta la fecha prestan menos atención a la

performance del cemento en el mediano y largo plazo. Sin embargo, son estas las propiedades que permitirán predecir el comportamiento del cemento frente a los distintos eventos que ocurren durante la vida útil del pozo. Una vez cementado el pozo, la aislación es expuesta a condiciones extremas como ocurre durante el punzamiento y la estimulación (bombeos a alta presión en fracturas hidráulicas y agentes químicos en tratamientos ácidos), como así también a variaciones de temperatura y cambios de nivel de fluido que Inciden directamente en la eficiencia de la aislación a largo plazo.

Durante los últimos años se incrementaron los estudios orientados a evaluar la evolución de la calidad del cemento a lo largo de la vida útil del pozo y la búsqueda de aditivos que mejoren el comportamiento elastoplástico y tenacidad del material. En el presente trabajo se pretende evaluar la influencia de aditivos como látex y fibras poliméricas en las propiedades mecánicas del cemento, los estudios están basados en pruebas de laboratorio y operaciones de campo.

Metodología

Se evaluó la incidencia de aditivos tales como látex (estireno butadieno), reductores de filtrado (copolímeros) y micro fibras poliméricas frente a las propiedades mecánicas de cementos hidratados. En la tabla 1 se presenta la composición de las lechadas ensayadas.

Tabla 1. Diseño de lechadas e identificación de probetas.

Identificación de lechadas	Relac. Agua cemento a/c	Copolímero reductor de filtrado	Dispersante	Fibras poliméricas	Latex (Estireno Butadieno)
NA (Sin Aditivos)	0.44	-	-	-	-
ST (lechada estándar)	0.44	1.2	0.6	-	-
F (aditivada con fibras)	0.44	1.2	0.6	0.4	-
L (aditivadas con latex)	0.34	0.3	0.4	-	10
FL (fibras y latex)	0.34	0.3	0.4	0.4	10

Preparación de probetas

Se prepararon 4 probetas cúbicas de 2" (50 mm) de lado para efectuar ensayos de resistencia a la compresión y 2 probetas cilíndricas de 1.5" (38 mm) de diámetro y 3" (76 mm) de longitud, para evaluar la resistencia a la tensión de acuerdo a la norma ASTM C-496. Las probetas cilíndricas fueron curadas en baño termostático a la misma temperatura que los cubos. Las probetas fueron curadas a 183°F (84°C) y 3000 psi de acuerdo a lo indicado en la norma API RP10B, sección 7.7. "Well Simulation Compressive Streng Test", Table 2 "Well simulation test schedule for curing compressive strength specimens" para 7900 ft (2400 m) de profundidad y 1.3 °F/100ft (2.4 °C/100m) de gradiente de temperatura.

Ensayo mecánicos

La resistencia a la compresión del cemento fue evaluada después de 48 horas de curado siguiendo los procedimientos indicados en la norma API RP 10B. Las pruebas fueron realizadas

usando un prensa Carver con una carga máxima de 15 toneladas, la deformación horizontal y vertical de las probetas fue medida con 2 sensores electrónicos de desplazamiento. Las lecturas obtenidas permitieron la determinación del Modulo de Young (E) y Relación de Poisson (ν). La resistencia a la tracción del cemento fue medida de acuerdo a la ASTM 496 standart test method for “Splitting tensile strength of cylindrical test especimens”, dos probetas cilíndricas de las dimensiones antes señaladas fueron preparadas para cada diseño de lechada. La tenacidad del cemento fue determinada a partir del cálculo del área debajo de la curva resistencia a la tensión vs. deformación.

Prueba de cañoneo

Estas pruebas se realizaron con el objeto de comparar la performance del cemento estándar vs, el cemento con fibra sometidos a condiciones de cañoneo. El ensayo se realiza siguiendo los procedimientos indicados en la norma API RP 43. EL objeto de este ensayo fue determinar la influencia de distintas proporciones de fibras incorporadas a la lechada en la integridad del cemento luego de hacer detonar cargas similares a las utilizadas en las operaciones de punzado.

Se construyeron 4 moldes metálicos para preparar probetas de cemento que simulan las condiciones a las cuales esta sometido el cemento en el anular. Los moldes consisten de un caño de 8” (200 mm) de diámetro y 34” (800 mm) de largo. La figura 1 muestra esquemáticamente la geometría de las probetas y los moldes. El disco metálico representa la pared del casing (3/8” de espesor) a ser perforado; el cemento API de respaldo representa la formación y el disco de cemento de 2” (50 mm) de espesor representa el anillo de cemento anular.

Los principales aspectos evaluados fueron el deterioro del cemento en las proximidades del orificio de punzado, la presencia de grietas radiales o transversales en el cemento y la variación de adherencia sobre el cemento API de respaldo

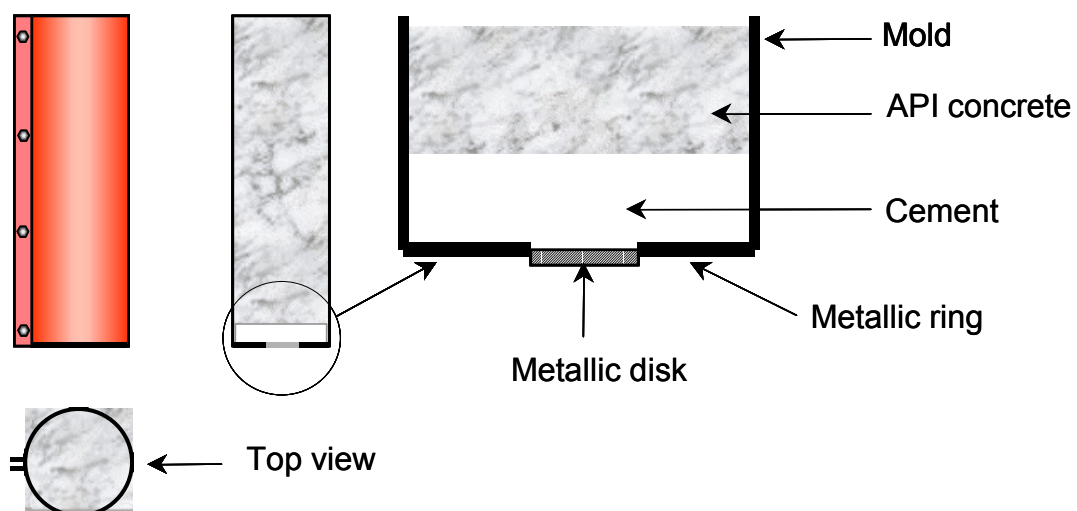


Figura 1. Características de las probetas utilizadas para realizar el ensayo de cañoneo.

Se prepararon 4 lechadas identificadas como: NA, F(0.2), F(0.4) y F(0.6) donde 0.2, 0.4 y 0.6 representan la proporción en peso de cemento de micro fibras que se adicionaron a la lechada en

cada caso. EL cemento de respaldo API fue preparado usando arena de fractura de granulometría 20/40, cemento clase “A” y una relación agua cemento de 0.4. El cemento fue curado a temperatura ambiente por 7 días.

Las pruebas de cañoneo fueron realizadas en un bunker de uno de los mayores fabricantes de cargas de punzado de la Argentina. Los moldes fueron ubicados hacia arriba y una carga hueca de 22 gramos fue posicionada sobre el disco metálico a *distancia cero* de la superficie del disco. Las figuras 2 y 3 presentan una vista de las probetas antes de realizar las pruebas, a la izquierda anillo metálico y disco, a la derecha la carga de perforación ubicada sobre el disco metálico.



Figura 2. Anillo metálico y disco de la probeta.



Figura 3. Carga hueca de 22 g ubicada sobre el disco metálico.

Pruebas de campo

La performance del cemento con fibras en operaciones de campo fueron evaluadas mediante perfiles de adherencia de cemento, CBL (Cement bond log), VDL (Variable density log) y SBT (Segmented bond tool) antes y después del punzamiento. Estos perfiles fueron corridos en dos pozos del área de Las Heras, uno cementado con una lechada estándar y el otro con micro fibras. La tabla 2 muestra información resumida sobre estos pozos.

Tabla 2 Diseño de lechada e identificación de pozo

Pozo	Fibras	Diseño de lechada
A-487	No	Cemento Clase “G”, a/c = 0.63, 15 % Rafaelita, 0.7 % Reductor de filtrado+ 0,2%
B-614	0.4 %	Metasilicato de sodio anhidro + 2% Latex + 0,2% Antiespumante

A la fecha se han realizado numerosos trabajos con micro fibras adicionadas a las lechadas en una proporción que varió entre 0.3 y 0.5% respecto al peso de cemento. El principal motivo por el cual fueron utilizadas es evitar la comunicación entre punzados próximos luego del cañoneo y

cuando se prevén tratamiento de bombeo que aumentaran la sollicitación sobre el cemento de aislamiento. También se a utilizado en tapones desviadores para conferir mayor resistencia al cemento y por ende chance de que él desvió se produzca.

Resultados

La tabla 3 presenta los resultados de los ensayos de reología y filtrado para cada diseño de lechada estudiada.

Tabla 3. Reología y filtrado de las lechadas en estudio

Lechada	Reología		Filtrado API (cc)
	n'	K'	
NA	0.445	0.0512	n/c
ST	0.877	0.0070	20
F	0.792	0.0150	19
L	0.640	0.0205	20
FL	0.786	0.0120	12

Ensayos mecánicos

La figura 4 muestra los gráficos de presión uniaxial de compresión (σ_c) vs. deformación (ϵ) para los diferentes tipos de cemento estudiado (ver tabla 1). Con el propósito de visualizar mejor las diferentes tendencias, se grafica solo una curva por condición.

Como se observa en la figura 4 algunas tendencias mostraron un comportamiento no lineal de σ_c vs ϵ durante las fases inicial y final de las pruebas, debido a esto los valores de Modulo de Young (E) fueron determinados por una regresión lineal considerando la porción intermedia de las curvas. Los coeficiente de Poisson (ν) fueron calculadas como Δ_h / Δ_v , donde Δ_h y Δ_v son las deformaciones horizontales y verticales respectivamente. Los valores promedio de los esfuerzo de compresión, los módulos de Young y los coeficientes de Poisson pueden observarse en la tabla 4. La figura 4 muestra que los cementos con micro fibras (F y FL, ver tabla 1) conservan capacidad de soportar carga después de haber alcanzado su máxima resistencia de compresión. En esta fase el cemento comienza a fisurarse pero las partes de la probeta de cemento se mantienen unidas, observándose valores de deformación cercanos al 10%

La figura 5 presenta el gráfico de esfuerzo de tracción diametral vs. deformación para cada tipo de cemento en estudio. La tenacidad fue determinada como el área bajo la curva de σ_T vs. ϵ . La tabla 4 resume las propiedades mecánicas de cada tipo de cemento.

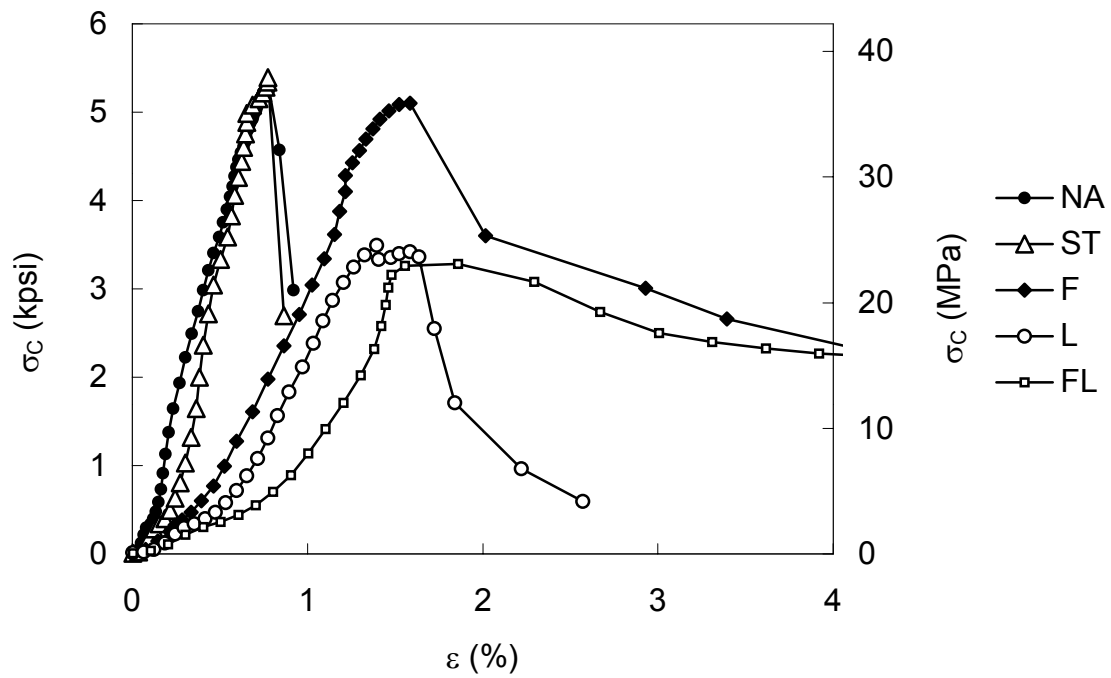


Figura 4. Resistencia a la compresión (σ_c) vs. Deformación (ϵ) obtenida de los cubos ensayados después de 48 hs. De curado a 183.2 °F (84 °C).

Tabl4 4 Propiedades mecánicas de cada tipo de cemento (σ_c = resistencia a la compresión , σ_T = resistencia a la tracción, E = Modulo de Young, ν = coeficiente de Poisson y T = tenacidad).

Tipo de Cemento	σ_c	σ_T	E	ν	T
	Kpsi (MPa)	psi (MPa)	Kpsi (GPa)	in/in	lb-in
NA	5.24 (36.9)	270.6 (1.90)	(5.48)	0.015	75.8
ST	5.05 (35.6)	264.1 (1.86)	(6.28)	0.036	100.4
F	5.07 (35.7)	447.3 (31.5)	(2.56)	0.08	810.9
L	3.53 (24.9)	258.5 (18.2)	(2.62)	0.16	74.5
FL	3.48 (24.5)	487.1 (34.3)	(2.54)	0.19	790.1

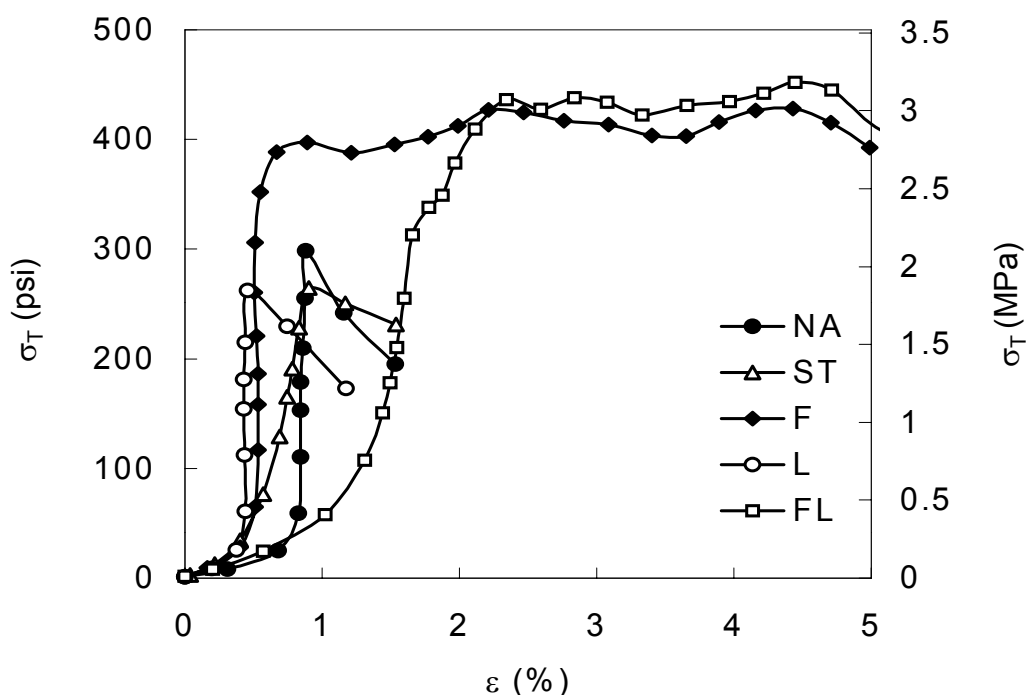


Figura 5. Resistencia a la tracción (σ_T) vs. deformación (ϵ) obtenida del ensayo de compresión diametral acorde a las normas ASTM C 496 usando probetas cilíndricas.

Ensayo de cañoneo

Después de efectuada la carga de punzado, las probetas fueron retiradas del molde metálico para observar el estado del disco de cemento. En el caso de la probeta sin fibras y en el F(0.2) el disco no se encontraba adherido al cemento API de respaldo (que simula la formación). Por su parte, las probetas F(0.4) y F(0.6) presentaban buena adherencia entre el disco de cemento y el cemento API.

La figura 6 muestra el aspecto de los discos de cemento en cada probeta una vez realizada la prueba. Como se observa en esta figura la probeta de cemento estándar muestra grietas en el sentido radial alrededor del agujero producido por el punzado con una substancial pérdida de cemento. La probeta F(0.2) (fig. 6b) presentaba también grietas radiales alrededor del cañoneo, sin embargo se observa un agujero limpio sin deterioro del cemento. En el caso de la probeta F(0.4) (fig. 6c), el disco de cemento se mantiene firmemente adherido al cemento API de respaldo, no se observa deterioro alguno en la integridad de la probeta alrededor del agujero y casi sin agrietamiento. Finalmente la probeta F(0.6) (fig. 6d), presenta similar comportamiento que la F(0.4), mostrando muy buena adherencia con el cemento API de respaldo, ninguna señal de deterioro del cemento ni agrietamiento. La tabla 5 resume la evaluación cualitativa obtenida de la prueba de cañoneo.

Cabe notar que la lechada de la probeta F(0.6) (0.6% de fibra por peso de cemento), presenta inconvenientes de mezclado durante la etapa de preparación dado que las fibras tienden a agruparse sobre las paletas del agitador.

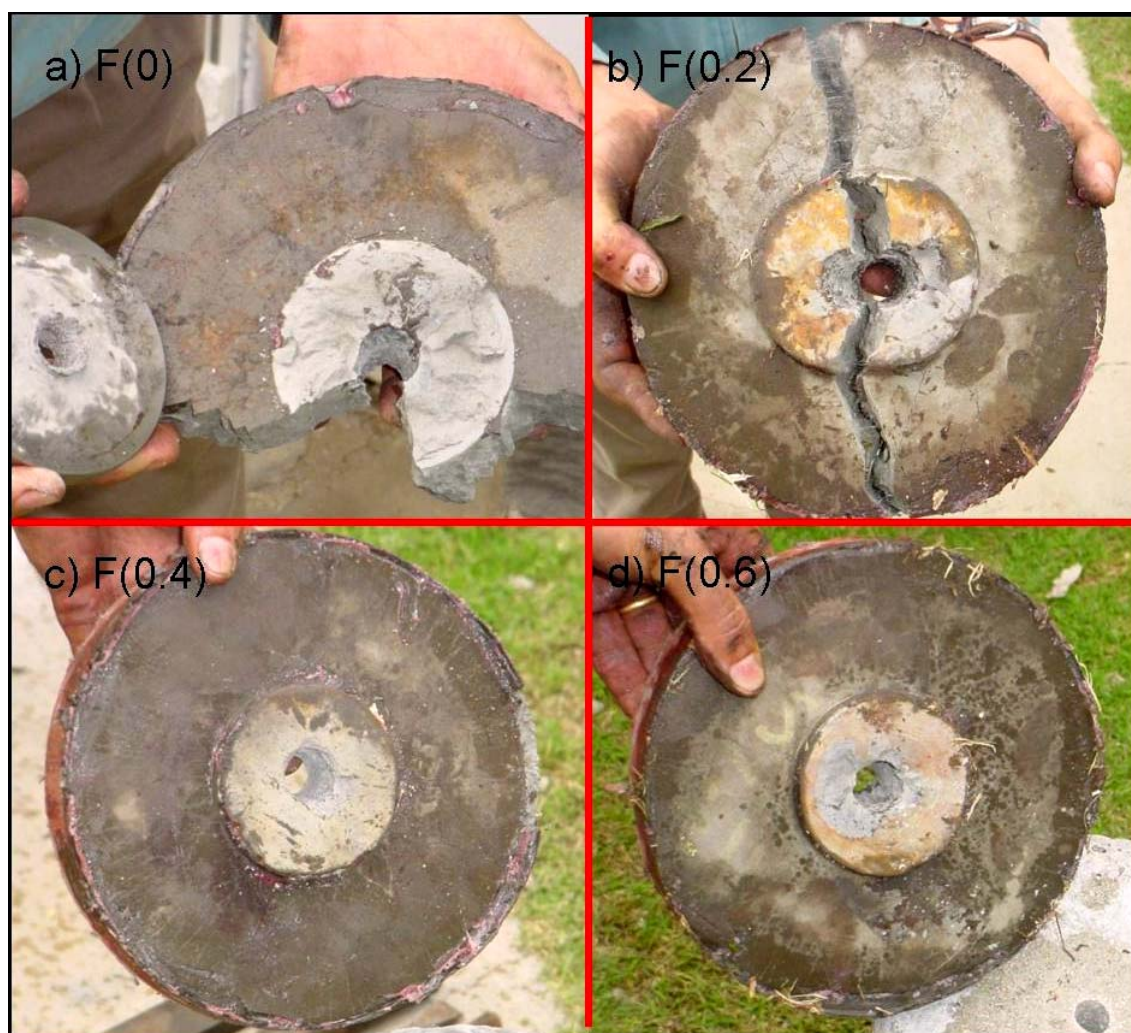


Figura 6. Aspecto de los discos de cemento conteniendo 0 (a), 0.2 % (b), 0.4 % (c) y 0.6 % (d) de fibras aditivadas (probeta ST, F0.2), F(0.4) y F(0.6) después de cañoneada y retirada del molde.

Tabla 5. Evaluación cualitativa del ensayo de cañoneo.

Aspecto evaluado	ST	F(0.2)	F (0.4)	F (0.6)
Deterioro del cemento alrededor del orificio	Si	Algo	No	No
Fisuramiento	Si	Algo	No	No
Adherencia cemento / concreto	Si	Si	No	No
Inconvenientes en el mezclado	No	No	No	Algo

Pruebas de campo

Cemento sin fibras. La figura 7 muestra los perfiles CBL, VDL y SBT corridos antes y después de punzar en el pozo A-487. Se puede apreciar en todos los perfiles la muy buena calidad del cemento y óptima adherencia en el caso del cemento previo al cañoneo. Luego del punzamiento los mismos

perfiles revelan un importante deterioro del cemento en las proximidades de la zona cañoneada (zonas claras en el mapeo del SBT). Los primeros arribos marcados en el VDL dan claras muestras de que el cemento fue afectado por la energía transferida en el impacto del cañoneo y podría hacer peligrar la aislación si se pretende trabajar en niveles próximos.

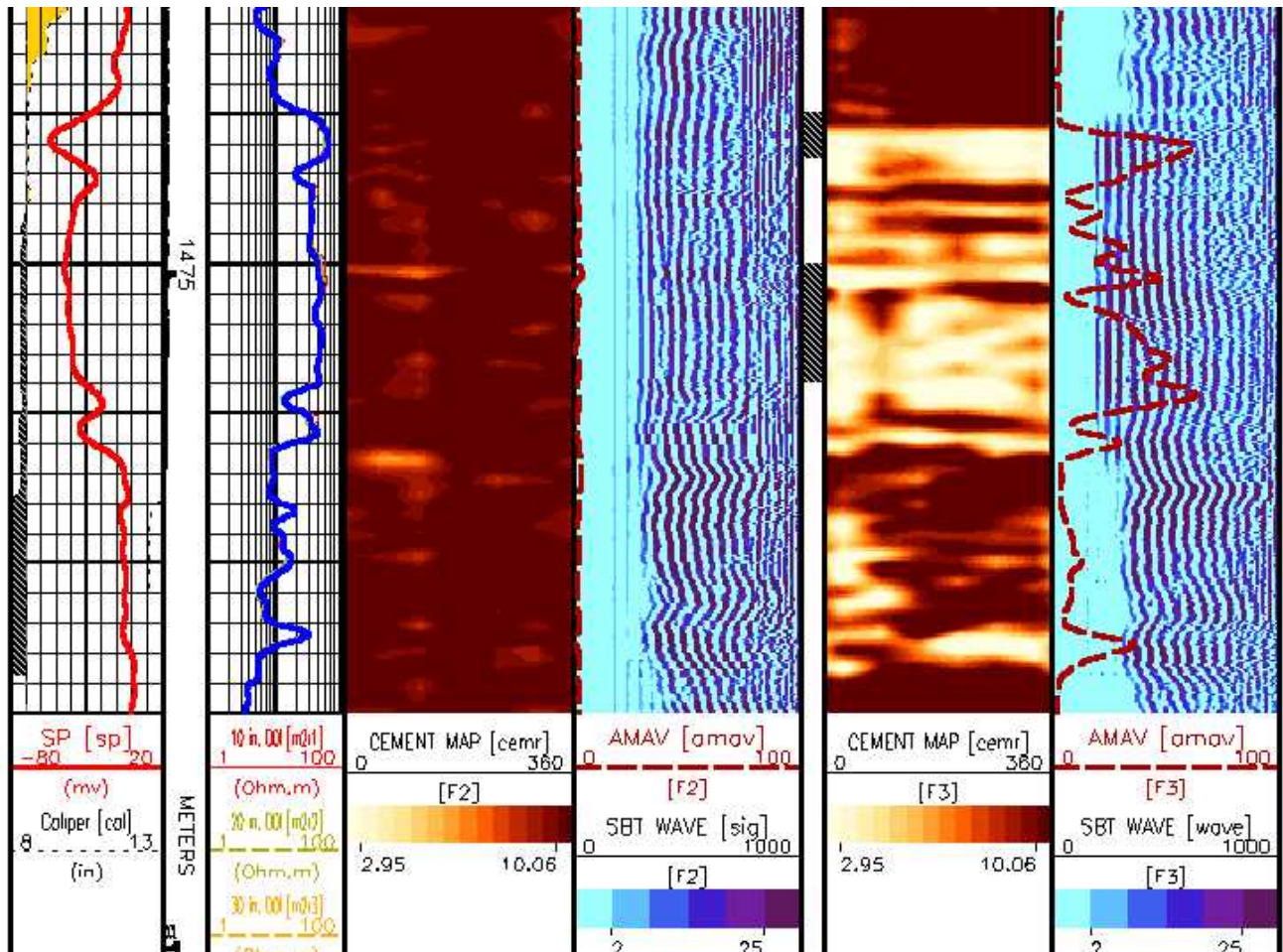


Figura 7. Perfiles Pre y post-cañoneo CBL,VDL and SBT corridos en pozos A-487. Cementado sin fibras (profundidad del pozo 1474 to 1478 m).

Cemento con fibras. La figura 8 muestra los perfiles CBL, VDL y SBT obtenidos del pozo B-614 que fue cementado con fibras. Estos perfiles revelan muy buena adherencia previo al cañoneo a excepción de la zona de interés donde aparece un despegue debido presumiblemente a efectos de micro anillo. Los perfiles post-punzado no presentan diferencias significativas respecto de los registrados antes del cañoneo. La mejora en la respuesta del cemento esta asociada al incremento en la tenacidad del material, que le permite absorber la energía del impacto de punzado sin alterar sus propiedades mecánicas.

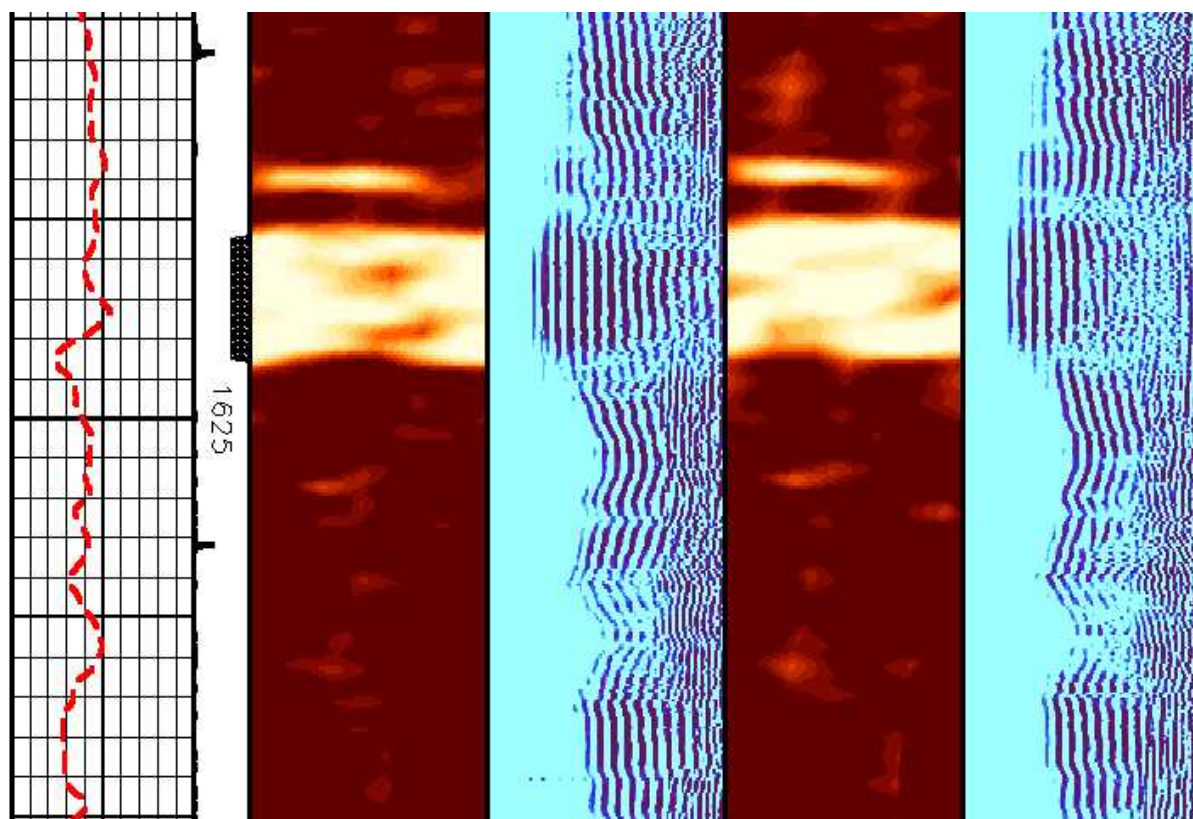


Figura 8. Perfiles CBL, VDT y SBT obtenidos del pozo B-614 el cual fue cementado con fibras (Profundidad del pozo 1623 a 1627 m).

Discusión

Mejorando las propiedades mecánicas del cemento

Como es de esperar las propiedades mecánicas del cemento fraguado dependen fuertemente de los aditivos que se incorporen a la lechada. Las lechadas no aditivadas o estándar presentan alta resistencia a la compresión pero tienen un comportamiento frágil caracterizado por baja resistencia a la tracción y escasa tenacidad. Sus altos Módulos de Young y bajos coeficiente de Poisson reflejan su capacidad de deformación.

El uso de Látex en la lechada mejora el comportamiento elástico del cemento ya que reduce su modulo de Young e incrementa el coeficiente de Poisson. Como contraparte, el uso de látex produce una significativa disminución en la resistencia a la compresión del cemento y no ayuda a mejorar su tenacidad. Como se indica en la tabla 4, el cemento con fibras y látex presenta una alta resistencia a la tracción, pero solo las fibras colaboran en el mejoramiento de la tenacidad del cemento. El valor de tenacidad de cemento con fibras es aproximadamente 8 veces superior al cemento estándar o con látex. También el cemento con fibras presenta las mejores propiedades mecánicas del grupo ya que tiene alta resistencia a la compresión y a la tracción, muy buen comportamiento elástico y alta tenacidad.

La prueba de cañoneo demuestra la contribución de las fibras a la adherencia a formación lo que fue confirmado por los perfiles corridos en los trabajos de campo con y sin fibras. La experiencia de campo luego de más de 10 operaciones en Argentina, muestra que la óptima concentración de fibras poliméricas varía entre 0.3 a 0.5% por peso de cemento.

Evaluación de las propiedades mecánicas del cemento

Publicaciones recientes sobre tecnología de cementos insisten en la necesidad de no considerar solo la resistencia a la compresión cuando se pretende una efectiva y durable aislación de pozo. La dirección para una aislación duradera tiene que orientarse hacia una mejor caracterización de las propiedades mecánicas de los cementos. Muchos parámetros como la resistencia a la tracción, modulo de Young, coeficiente de Poisson y tenacidad están siendo usados cada vez más para predecir la performance del cemento bajo los eventos críticos a los cuales será sometido el pozo durante su vida útil. Ciertas operaciones de completación de pozo como cañoneo, fracturamiento hidráulico, cambios de temperatura y presión durante la etapa de producción e inyección de un pozo y efectos tectónicos, fluido de formación corrosivo, etc. son solicitaciones que debemos tener en cuenta al diseñar la lechada en una cementación, especialmente en el tramo de producción del pozo. La relación de esfuerzos y por ende la determinación de propiedades mecánicas tales como modulo de Young, Poisson, resistencia a la compresión y tracción dependerá de diversos factores tales como procedimientos de ensayos (geometría de la probeta, ubicación de los transductores de desplazamiento, velocidad de aplicación de la carga), condiciones y tiempo de curado del cemento (temperatura, presión humedad, etc.) entre otros. Con el fin de estandarizar a futuro la obtención de estos y otros parámetros mecánicos para una mejor caracterización de la performance a largo plazo de los cementos, será necesario normalizar los procedimientos de ensayo para obtener resultados útiles y comparables.

Conclusiones

- Como era de esperar las propiedades mecánicas del cemento dependen fuertemente de los aditivos incorporados en la lechada. Aún cuando el cemento sin aditivos (lechada estándar) presenta una elevada resistencia la compresión, se caracteriza por mostrar un comportamiento frágil y limitada deformación.
- Los cementos aditivados con fibras combinan una elevada resistencia a la compresión con una muy buena resistencia a la tracción, elasticidad y valores de tenacidad significativamente superiores a los observados en cemento estándar o con cualquier otro aditivo (incluso látex). Además, los ensayos de cañoneo reflejan una mejora en la adherencia entre el cemento y la formación.
- Las operaciones de cañoneo pueden causar severo daño en la integridad del cemento y a la adherencia del mismo lo que llevaría a la pérdida de la aislación lo cual es crítico para la correcta producción de un yacimiento. El uso de fibras poliméricas controla el deterioro del cemento y el fisuramiento alrededor de la zona punzada, esto fue confirmado en ensayos de laboratorio y pruebas de campo.

- Existen muchos factores experimentales que deben ser considerados cuando se evalúan propiedades mecánicas de cementos. Estandarizando procedimientos específicos de ensayo para determinar cada uno de los parámetros llevará a obtener resultados útiles y comparables que podrán ser usados para predecir la performance de aislamiento en el largo plazo.

Agradecimientos

Los autores quieren agradecer a San Antonio – Pride por promover la divulgación del presente trabajo y por su autorización a presentarlo. También queremos agradecer a los ingenieros Raul Gunkel y Juan Carlos Nauman quienes coordinaron las pruebas de campo y proveyeron la información que se transcribe en el presente trabajo. Finalmente queremos reconocer al Sr. Ernesto Ramón por su cooperación y trabajos de laboratorio, como también a todos los miembros del departamento de Tecnología de San Antonio – Pride.

Referencias

1. Goodwin, K. J. and Crook, K. J., “Cement shear stress failure”, Paper SPE 20453 presented on the Annual Technical Conference and Exhibition held in New Orleans, September.23-26, 1990
2. Blanco, A., Centeno A., Trujillo, M., Rodríguez, W. and Rodríguez, S. “Nuevas tendencias en aislamiento zonal para condiciones de esfuerzos críticos”, XIII Congreso Latinoamericano de perforación, Colaper, Venezuela, 2002.
3. Bosma, M., Ravi, K., Van Driel, W. And Schreppers, G. J., “Design Approach to Sealant Selection for the Life of the Well”, Paper SPE 56536 presented on the Annual Technical Conference and Exhibition held in Houston, Texas 3-6 October, 1999.
4. Thiercelin, M., J., Baret, J., Dargaud, B. and Rodriguez, W. J., “ Cement design based on cement mechanical response”, SPE Drilling and Completion, December, 1998, (pp. 266-273).
5. Altuna, G., Centurión, S. and Perez Ipiña, J. E., “Variation of the mechanical properties for cementong slurries with different compositions”, paper SPE 69616 presented on the Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference held in Buenos Aires, Argentina,25-28 March, 2001.
6. Smith, D. K., *Cementing*, Society of Petroleum Engineers Inc. ISBN # 1-55568-006, New York, 1990.