

# TENACIDAD A LA FRACTURA DE CEMENTOS DE USO PETROLERO: EFECTO DE TRATAMIENTOS SUPERFICIALES EN FIBRAS DE REFUERZO

**Palabras clave:** cementación, fibras, tratamientos superficiales, tenacidad a la fractura, Jc.  
**Key words:** protection pipe, fibers, surface treatments, fracture toughness, Jc.

En la industria hidrocarburífera para generar un sello entre las formaciones de interés del pozo, y a fin de proteger y asegurar la tubería de revestimiento en el mismo, se utilizan cementos con ciertos aditivos. En forma similar al uso de la grava en el concreto para la construcción, uno de los refuerzos mecánicos comúnmente empleado con el cemento de pozos petroleros son las fibras poliméricas. Si bien éstas provocan una mejora en el comportamiento mecánico del cemento el mismo está limitado a sólo algunos adelantos. Así dado que las fibras no tienen afinidad química con el cemento, se requiere de tratamientos superficiales para mejorar la adhesión con la matriz cementícea. En este trabajo presentaremos los resultados que hemos obtenido cuando se realizan sobre ellas tratamientos de tipo químico en base a surfactantes, ácido sulfúrico y dicromato de potasio y los efectos de estos tratamientos en sus propiedades a la fractura. Se observaron mejoras en esas propiedades sólo con algunos de los tratamientos resultando el más satisfactorio el de ácido sulfúrico al 10 %. Los tratamientos con surfactantes no arrojaron resultados positivos. Se realizaron también observaciones de las fibras por medio de microscopía electrónica de barrido. En las fibras tratadas no se observó un esperado daño superficial (variación de rugosidad) importante. Se estudió también con esa técnica la interfase fibra-cemento constatándose en todos los casos la pobre interacción mecánica entre estos elementos aún con las fibras tratadas químicamente. Se concluye que las mejoras a la tenacidad alcanzadas son pequeñas dada la interacción casi exclusivamente de tipo mecánica, debiendo indagarse para mejorarla tratamientos que posibiliten cierta afinidad química fibra - matriz.

■ **Pablo Cirimello<sup>1</sup>,  
Walter Morris<sup>2</sup> y  
Juan E. Pérez Ipiña<sup>3</sup>**

1 INVAP INGENIERIA S.A;

2 YPF S.A;

3 UNIVERSIDAD NACIONAL DEL COMAHUE  
- CONICET

Cement based composites are used in oil well industry as annular protection of casing (well protection pipe) and as a seal in order to isolate production zones. As gravel-stone is used as concrete reinforcement, polymeric fibers are used as oil well cements reinforcement.

Although polypropylene fibers are commonly used as cement based composites reinforcement its toughening effect is limited because of poor adhesion to matrix. Different alternatives have been proposed to overcome this drawback. We show in this work the effect on fracture properties by applying chemical treatments to the fibers: surfactants, sulfuric acid and potassium dichromate. Treatment with H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-2% had no-effect on fracture toughness; however treatment with H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-10% presented the best toughening effect.

Electronic microscopy imaging was used to see fiber surfaces and to evaluate the damage caused by different treatments (roughness changes). This technique was also used to see fiber-cement interface, and a poor mechanical interaction was seen, still in chemical treated fibers. Little fracture toughness improvements were achieved because we only provoked mechanical fiber-cement interaction. Other treatments that permit fiber matrix chemical affinity should be investigated.

## 1. INTRODUCCIÓN

En el proceso de cementación utilizado en la completación de pozos petroleros el material es diseñado según sean las características del pozo de manera que su composición se establecerá en función de los requisitos de tiempo de bombeabilidad, tiempo de fragüe, densidad, viscosidad y resistencia a la compresión del material luego del fraguado. No obstante, ha sido reportada (Bosma, 1999; Banthia, 1996) la necesidad de evaluar otras propiedades mecánicas y en particular las propiedades a la fractura del cemento utilizado, debido a exigencias de la vida en servicio como lo son el punzado y la fractura hidráulica (Cirimello et al., 2004).

En trabajos anteriores (Cirimello et al., 2003) ha sido evaluada la tenacidad de fractura mediante ensayos de determinación de  $K_{IC}$  (ver Anexo) del material y se ha determinado la incidencia de la temperatura y tiempo de fragüe en la tenacidad a la fractura. También ha sido reportado que el agregado de fibras poliméricas implica un cambio de comportamiento mecánico respecto al material sin aditivar: de un comportamiento marcadamente frágil pasa a observarse crecimiento subcrítico de fisura.

Los compuestos cementíceos reforzados con fibras exhiben, en general, el comportamiento de compuestos frágiles (Singh (2004)): la falla de la matriz precede a la ruptura de las fibras, produciéndose un puenteo (*bridging*) de las mismas a través de la fisura. Los mecanismos de absorción de energía de este tipo de compuestos incluyen *bridging*, arranque de las fibras de la matriz (*pull-out*), despegue de las fibras, deslizamiento y rotura de fibras.

La contribución de las fibras po-

liméricas a la tenacidad a la fractura de este tipo de compuestos es limitada debido a la escasa o nula adherencia de las fibras a la matriz cementícea. En el caso de fibras de polipropileno es aceptado que no existe adhesión físico - química al cemento ya que las fibras de polipropileno tienen una superficie hidrofóbica y un menor módulo de elasticidad que la matriz (Peled et al., 1992).

Esta falencia ha sido abordada en la literatura, (Li et al., 1997) buscándose mejorar la adhesión fibra-matriz por distintas metodologías: tratamientos mecánicos, químicos, de atmósfera gaseosa (plasma) y densificación de la interfase fibra matriz.

Chan et al. (1997) analizan en extenso este último mecanismo. Llegan a la conclusión de que en algunos tipos de compuestos la microestructura de la zona de transición cercana a la interfase puede no ser el factor que gobierna la adhesión. En particular, en el caso de pobre adhesión fibra-matriz, la baja energía de unión es un factor que predomina por sobre las propiedades de la zona de transición. Las fibras poliméricas (Ej: polipropileno) poseen baja energía superficial y son prácticamente inertes frente a la matriz cementícea. En este caso, entonces, la densificación de la zona de transición no será un factor que mejore la unión de la fibra- matriz y en consecuencia las propiedades mecánicas del compuesto. Se requieren por lo tanto modificaciones superficiales de las fibras.

Las modificaciones de tipo mecánicas buscan aumentar el área de contacto con la matriz y en consecuencia una mayor adhesión mecánica por mayor fricción. Esto se logra variando la morfología de las fibras: fibrilado, curvado, enlulado, microidentaciones superficiales, etc.

Si bien han sido reportadas (Peled et al., 1992; Li, 1997) mejoras en las propiedades mecánicas de compuestos con fibras tratadas mecánicamente, en el caso de aplicación que este trabajo presenta este tipo de modificación superficial sería contraproducente con respecto al uso del compuesto: su bombeabilidad hacia el interior del pozo se vería seriamente afectada.

Son así las modificaciones de tipo químicas y gaseosas las de mejor aplicabilidad y posible efectividad al tipo de compuesto aquí analizado. Peled et al. (1992) realizan un estudio del efecto de distintos tratamientos químicos sobre la superficie de las fibras, las propiedades de interface y las propiedades mecánicas medidas en términos de resistencia al *pull-out*. La finalidad de estos tratamientos es provocar una mayor rugosidad superficial en las fibras y quizás alguna afinidad química entre fibra y matriz.

Algunos de estos tratamientos han sido tomados como referencia en este trabajo a fin de investigar el efecto en las propiedades a la fractura del compuesto, medida en términos de los parámetros  $K_{IC}$  y  $J_c$ .

## 2. MATERIAL

El material base empleado es: Cemento tipo API "G" + 44% en peso de Agua + 0,4 % de fibras de polipropileno sin tratar (ST).

### Tratamientos químicos

Se realizaron tratamientos químicos a las fibras de polipropileno con la finalidad antes mencionada de mejorar la adhesión a la matriz ya sea a través de la interacción mecánica como la de generar algún tipo de reactividad química con la matriz cementícea. Los tratamientos se realizaron por inmersión de las

fibras durante 18 h a 50° C en distintos reactivos que son descriptos a continuación:

1) Surfactantes: (Estos productos comerciales buscan mejorar el mojado de las fibras a la pasta de cemento)

- Con el producto comercial Aqua Free: AF10 (0,1% tiempo 10seg)

AF1 (1min + secado)

- Con el producto comercial SC40:

SC10 (0,1% 10seg)

SC1 (1min + secado)

SCH (0,1% 1 min, sin secar)

2) Ataques:

- Con Acido Sulfúrico  $H_2SO_4$  2%: SU2

$H_2SO_4$  10%: SU10

- Con Acido Sulfúrico  $H_2SO_4$  2% + Dicromato de Potasio 5%: SU2Di

- Con Acido Sulfúrico  $H_2SO_4$  10% + SC40: SU10SC

- Con Acido Sulfúrico  $H_2SO_4$  2% + Dicromato de Potasio 5% + SC40: SU2DiSC

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1 Construcción de probetas

Para la obtención de las pastas se mezcló el cemento en agua agitando en dos etapas a 4000 y 12000 rpm, respectivamente, de acuerdo a normas API (1990). Las fibras tratadas o sin tratar se incorporan a la pasta de cemento recién preparada. En la figura 1 se muestra el dispositivo de mezclado.

Se prepararon probetas del tipo

de flexión en tres puntos SE(B) de acuerdo a norma ASTM E1820/01 (2001) mediante colado de la pasta en moldes metálicos desarmables. Las dimensiones nominales de las probetas fueron de 50 mm de alto (W), 25 mm de ancho y 200 mm de largo (L).

El fragüe se realizó en inmersión en agua durante 7 días a 50 °C.

Una vez completado el tiempo de fragüe deseado, se realizó en cada probeta una entalla mecánica buscando una relación longitud de fisura / profundidad (a/W) de 0.5.

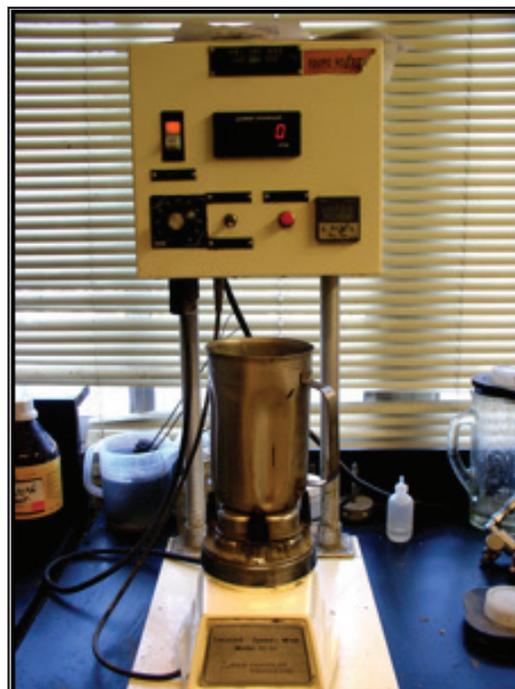
#### 3.2 Ensayos de medición de tenacidad de fractura

Se implementó la medición de tenacidad de fractura de acuerdo a norma ASTM E1820/01 (2001) (ver figura 2).

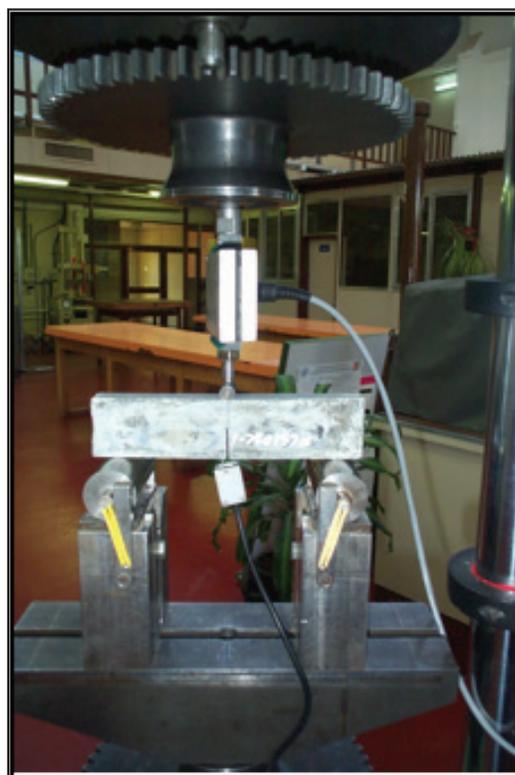
El ensayo de medición de tenacidad de fractura consiste en obtener un registro de la carga aplicada (P) vs. el desplazamiento de la apertura de boca de fisura (CMOD) y desplazamiento del punto de aplicación de la carga (V<sub>I</sub>). Estas magnitudes se miden mediante celda de carga y transductores de desplazamiento (clip y LVDT) dispuestos en el tren de carga y el clip en la boca de la entalla mecánica (CMOD).

#### 4. RESULTADOS

En las figuras 3 y 4 se muestran



**Figura 1:** Dispositivo de mezclado para la elaboración de la pasta de cemento y aditivos.



**Figura 2:** Dispositivo utilizado para ensayos de determinación de la tenacidad a la fractura de los cementos.

los resultados de los ensayos de tenacidad a la fractura de probetas de cementos reforzadas con fibras de

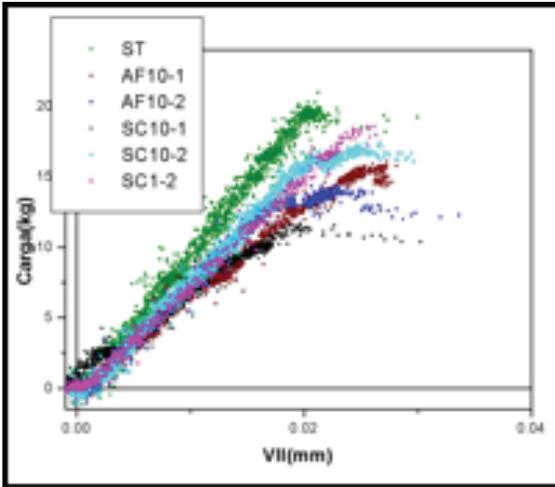


Figura 3: Registro Carga-desplazamiento obtenido en ensayos de cementos reforzados con fibras tratadas con surfactantes.

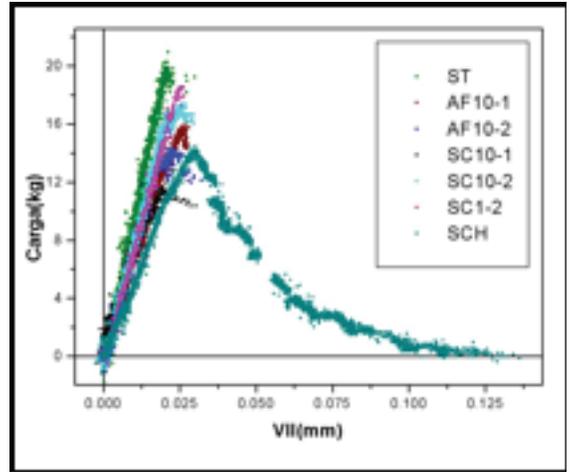


Figura 4: Registro Carga-desplazamiento obtenido en ensayos de cementos reforzados con fibras tratadas con surfactantes.

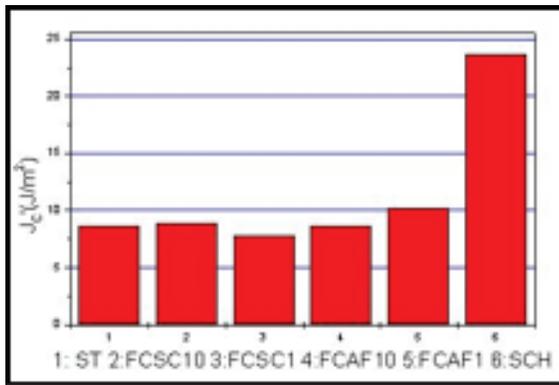


Figura 5: Tenacidad  $J_c$  de cementos reforzados con fibras tratadas con surfactantes.

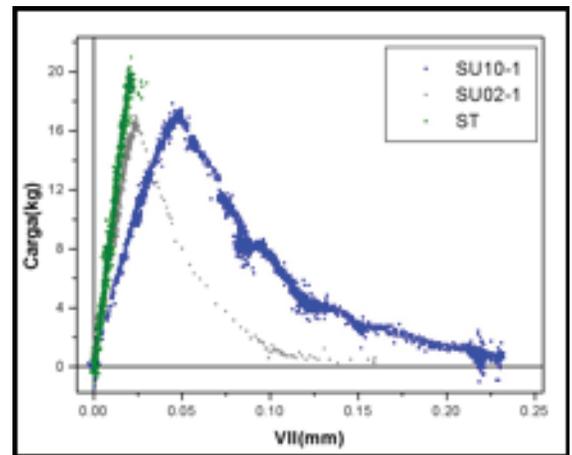


Figura 6: Registro Carga-desplazamiento obtenido en ensayos de cementos reforzados con fibras tratadas con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

polipropileno tratadas con los surfactantes AQUA FREE y SC40.

Se ha observado que el tratamiento de las fibras con los surfactantes no produce un cambio sustancial en el comportamiento mecánico del compuesto. Hay una escasa variación en el módulo elástico y las cargas alcanzadas son análogas a las del compuesto con fibras sin tratar. Desde el punto de vista de la tenacidad de fractura medida como  $J_c$ , no hay mejoras de la tenacidad por el tratamiento con los surfactantes. Esto se muestra en la figura 5.

A pesar de ello el tratamiento con el surfactante SC40 arrojó algún resultado positivo al modificar el pro-

cedimiento, al tratar con el surfactante las fibras y sin secar incorporarlas a la pasta de cemento para formar el compuesto (SCH). Esto se vio reflejado en un incremento de  $J_c$ , respecto a los valores del compuesto con fibras ST.

El tratamiento con ácido sulfúrico induce un comportamiento de mayor absorción de energía y posible crecimiento subcrítico de fisura (figura 6). El incremento en concen-

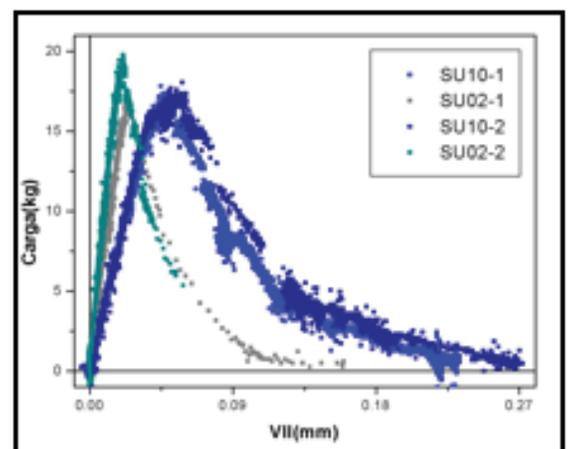
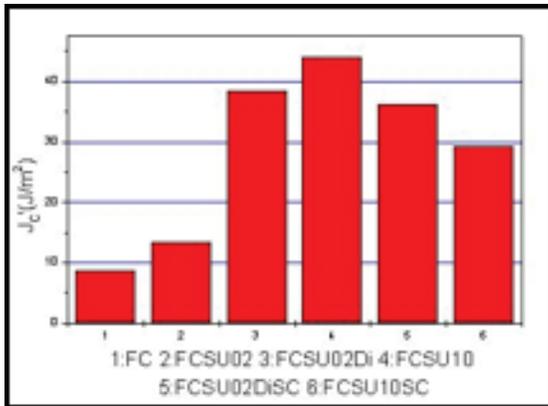
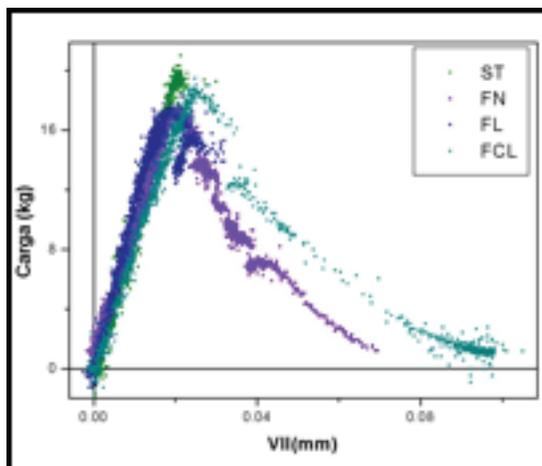


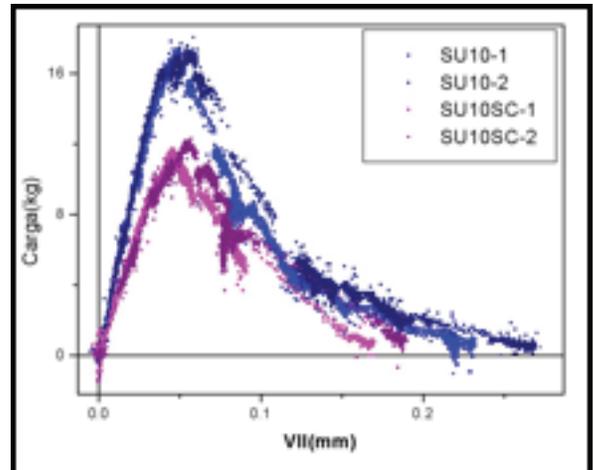
Figura 7: Registro Carga-desplazamiento obtenido en ensayos de cementos reforzados con fibras tratadas con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (2 y 10 %).



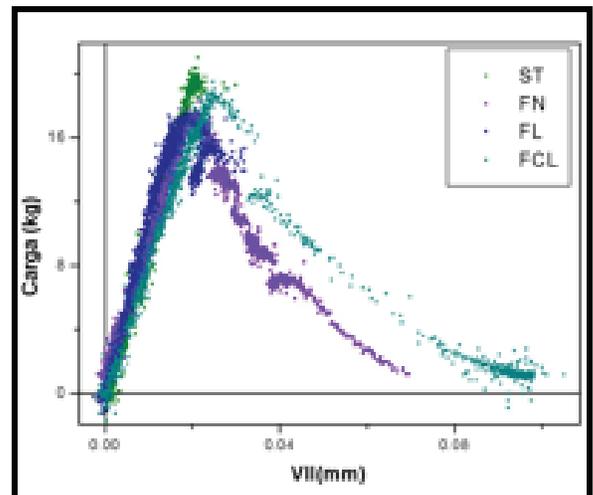
**Figura 8:** Tenacidad Jc de cementos reforzados con fibras tratadas con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y surfactantes.



**Figura 10:** Registro Carga-desplazamiento obtenido en ensayos de cementos reforzados con fibras tratadas con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (2%) y dicromato de potasio.



**Figura 9:** Registro Carga-desplazamiento obtenido en ensayos de cementos reforzados con fibras tratadas con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (10 %) y surfactante SC-40.



**Figura 11:** Registro Carga-desplazamiento obtenido en ensayos de cementos reforzados con fibras cortas (1/2"), largas (1"), de nylon y con látex.

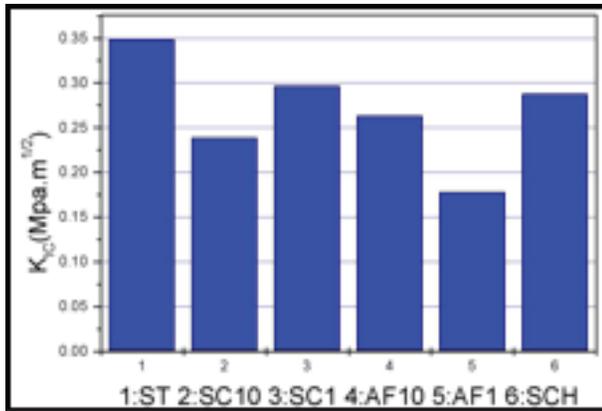
tración de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> muestra un incremento en el área debajo de la curva P-VII, deduciéndose que el tratamiento con ácido redonda beneficiosamente en cuanto a propiedades mecánicas (figura 7). En general, las probetas tratadas con la participación de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> presentan valores de Jc superiores a los del material con fibras sin tratar (figura 8). El incremento de Jc es mayor, cuanto mayor la concentración de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

En la figura 9 se muestra que al incorporar SC al tratamiento con ácido sulfúrico se observa una peor respuesta mecánica indicando la inutilidad de este tipo de combina-

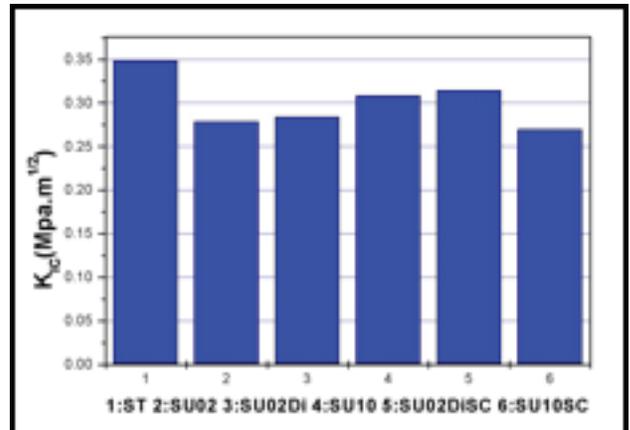
ción. En la figura 8 el Jc se ve disminuido respecto al material que presenta exclusivamente el tratamiento ácido.

En las probetas en que se realizó un tratamiento a las fibras con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y Dicromato de Potasio, la incorporación de este último parece ser beneficiosa en cuanto al comportamiento P-VII. Esto puede verse comparando las figuras 10 y 8: desde el punto de vista de Jc, la incorporación del dicromato produce un incremento respecto al tratamiento con ácido sulfúrico al 2%.

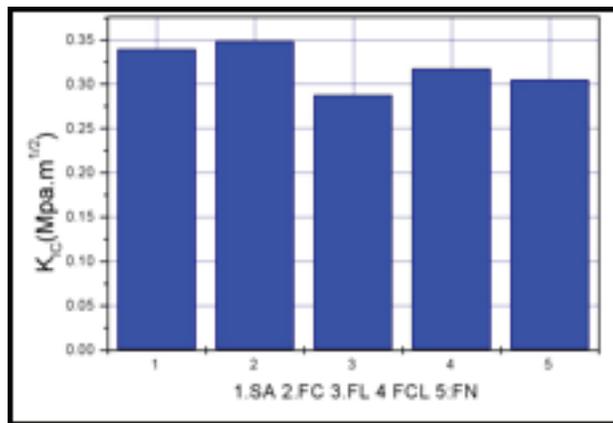
Si bien el trabajo básico fue realizado con probetas preparadas según se describe en 2, el uso de las fibras de nylon (FN) también fue ensayado. Éste no dio lugar a un cambio sustancial en el comportamiento mecánico mostrando una respuesta similar a la obtenida con las fibras de polipropileno de 2,5 cm de largo (FL). En este tipo de ensayos mecánicos el mejor resultado lo arrojó el uso del compuesto con fibras cortas de 1,25 cm mezcladas con látex (FCL) (figura 11). Desde el punto de vista de Jc la tenacidad se ve incrementada por



**Figura 12:** Tenacidad K<sub>IC</sub> de cementos reforzados con fibras tratadas con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y surfactantes.



**Figura 13:** Tenacidad K<sub>IC</sub> de cementos reforzados con fibras tratadas con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y surfactantes.



**Figura 14:** Tenacidad K<sub>IC</sub> de cementos reforzados con fibras cortas 1,25 cm, largas 2,5 cm, de nylon y con látex.

un mayor largo de las fibras y también por la incorporación del látex.

Por último la incorporación del surfactante SC40 al compuesto reforzado con fibras tratadas con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y dicromato de potasio no produce más mejoras al comportamiento mecánico respecto a las ya obtenidas con el tratamiento ácido. Puede observarse en la figura 8 que el J<sub>c</sub> correspondiente a este tratamiento es menor al medido en el caso de fibras tratadas sólo con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> al 2 % y dicromato de potasio.

Desde el punto de vista del área debajo de la curva P-VII el tratamiento con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> en su mayor concentración (10%) es el que presenta mejor comportamiento. Esto se ve

reflejado en el mayor J<sub>c</sub> obtenido en los ensayos mostrados en las figuras 6 y 7.

La evaluación de la tenacidad a la fractura desde el punto de vista de K<sub>IC</sub> muestra que el tratamiento con surfactantes no arroja mejoras en las propiedades respecto al material base. Esto se representa en la figura 12. Se ve, al igual que con J<sub>c</sub>, que el material SCH presenta una mejor respuesta mecánica.

En el caso del ataque con ácido sulfúrico, el K<sub>IC</sub> no da cuenta de mejoras en la tenacidad de fractura como lo hace la evaluación con J<sub>c</sub> (figura 13). Dado que K<sub>IC</sub> es función de la carga máxima y longitud inicial de fisura, no se tienen en cuenta

la energía absorbida por el material una vez superada carga máxima.

Algo similar ocurre con los materiales FL, FCL y FN, en los cuales se observaba una carga soportada (cada vez menor) pasada carga máxima. Si analizamos la figura 14 notamos que el incremento en tenacidad que se había observado en J<sub>c</sub> no se hace evidente al evaluar la tenacidad como K<sub>IC</sub>.

Los estudios de las propiedades mecánicas se complementaron con observaciones en el microscopio electrónico de barrido a fin de analizar el efecto de los tratamientos químicos sobre las superficies de las fibras. Las fibras poliméricas que no tenían ningún tratamiento (ST) pre-

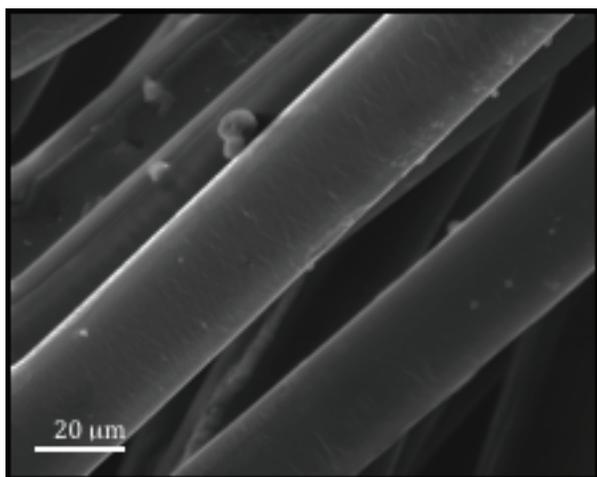
sentan una superficie exterior lisa, casi sin rugosidad y algunas estriaciones transversales al eje de la fibra (figura 15) posiblemente producto del proceso de fabricación (extrudado). En las fibras tratadas con  $H_2SO_4$  (2%) encontramos estriaciones más marcadas (figura 16) sin una variación significativa de la rugosidad. En este caso el ataque parece simplemente haber profundizado e incrementado la estriación transversal, incipiente en el caso de las fibras ST.

Las tratadas con una concentración del 10% se ven con una rugosidad más marcada y el daño superficial que presentan es en el sentido

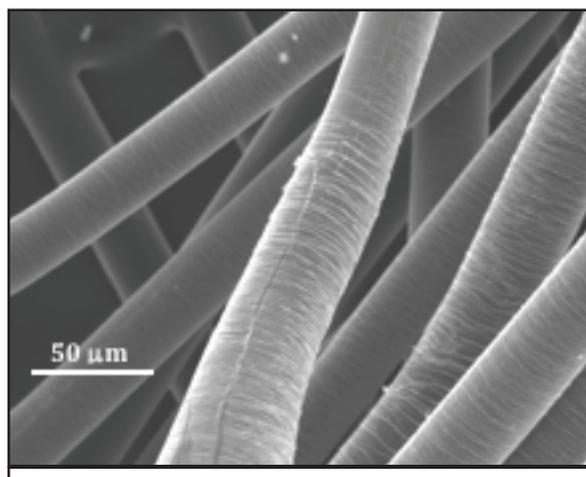
longitudinal de las fibras. En este caso parece haber un efecto adicional al notado con el ataque del sulfúrico a 2% (estriaciones o rugosidad en el sentido longitudinal) (figura 17). Asumimos que las marcas transversales se observan aleatoriamente (en algunas fibras) mientras que las marcas longitudinales son sistemáticas, producto del ataque efectuado.

Las interfaces fibra-cemento fueron también observadas en el microscopio electrónico de barrido. La foto de la figura 18 corresponde a una micrografía de la interfase fibra de polipropileno no tratada y la matriz de cemento. Se ve, en general,

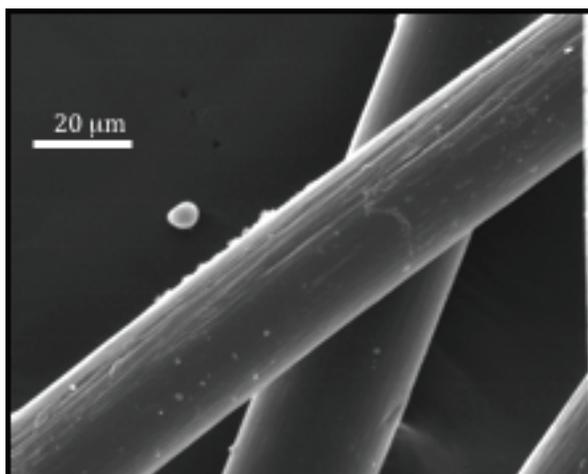
una muy pobre o nula interacción mecánica entre ambas. Asimismo y con este mismo medio de observación, la misma no parece variar significativamente con las fibras atacadas con ácido sulfúrico (figura 19). No obstante en estas últimas se nota mayor daño superficial, indicativo quizás de mayor roce y abrasión, un mecanismo importante de disipación de energía. También se observan partículas de cemento sobre las superficies de las fibras expuestas a diferencia de las fibras ST que también puede ser indicativo de mayor interacción fibra-matriz.



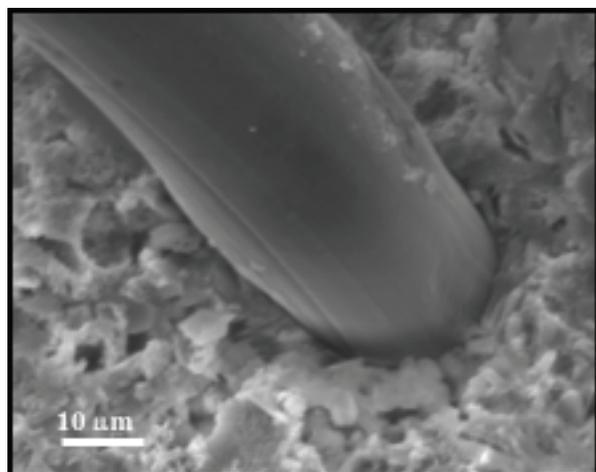
**Figura 15:** Micrografía de fibras de polipropileno sin tratamiento (600x).



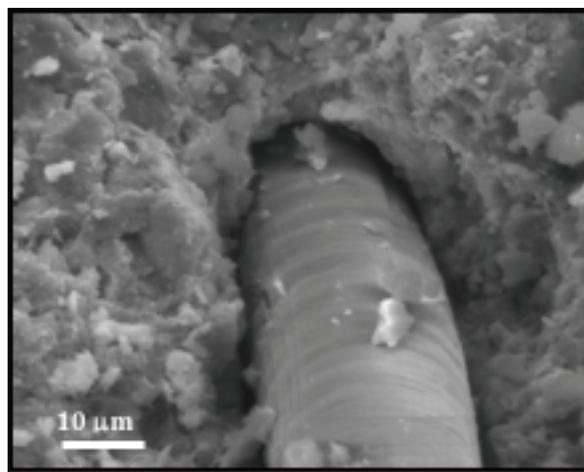
**Figura 16:** Micrografía de fibras de polipropileno tratadas con  $H_2SO_4$  al 2% (320x).



**Figura 17:** Micrografía de fibras de polipropileno tratadas con  $H_2SO_4$  al 10% (640x).



**Figura 18:** Micrografía de la interfase entre las fibras de polipropileno sin tratar y el cemento (1120x).



**Figura 19:** Micrografía de la interfase entre las fibras de polipropileno tratadas con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> al 10% y cemento (1120x).

## 5. DISCUSIÓN

Asumiendo que en los ensayos mecánicos realizados se inicia la fisuración en la matriz a valores cercanos a la carga máxima, la rama descendente de los registros carga-desplazamiento puede ser interpretada como la de propagación estable de la fisura, siendo el mecanismo de absorción de energía operante el de *bridging* y *pull-out* de las fibras. De hecho, al finalizar el ensayo la fisura se ha propagado a lo largo de todo el ligamento remanente a través de la matriz cementícea mientras que las fibras no han sufrido daño, sólo se han despegado de la matriz. Si se buscara un comportamiento óptimo del compuesto, en una contribución más efectiva de las fibras, éstas deberían operar antes y después de la iniciación de la fractura. Los ensayos mostrarían mayor alinealidad antes de alcanzar carga máxima y un descenso de la carga mucho menos pronunciado después de alcanzada ésta. Esto significa la necesidad de tener una unión fibra-matriz no sólo mecánica, también de tipo química. Los tratamientos empleados en este trabajo no parecen inducir una afinidad química sino un leve incremento en el roce mecánico, consumiendo más energía el *pull-*

*out* de la fibra por el incremento de la fricción. En este sentido creemos que futuros trabajos de investigación deberían encararse sobre el problema de afinidad química, utilizando algún reactivo que vincule a las fibras con los compuestos cementíceos por ejemplo: PVAC, Titanatos (orgánicos).

Por otro lado, dado el incremento de tenacidad con el tratamiento a mayor concentración de sulfúrico sería importante profundizar en el conocimiento del efecto del mismo a mayores concentraciones y tiempos de exposición en las propiedades a la fractura.

## 6. CONCLUSIONES

Las fibras de polipropileno proveen de un refuerzo al cemento que induce, en general, a cierto grado de crecimiento subcrítico de fisura. El mecanismo de absorción de energía fundamental es el de *bridging* y *pull-out*. No se observa rotura de fibras por lo que se asume que la adhesión de las fibras a la matriz es pobre. Se desarrollaron tratamientos químicos que buscan variar la morfología superficial de las fibras y de esa manera aumentar la superficie de contacto con la matriz: aumenta

la energía consumida por fricción. De estos tratamientos, el que mejor resultados arroja desde el punto de vista de propiedades mecánicas es el del ácido sulfúrico al 10%. Esta mejora se traduce en un incremento de valores de  $J_c$  respecto al sin tratamiento. La incorporación al tratamiento superficial del dicromato de potasio también parece inducir mejoras en propiedades, no así el surfactante SC40. Se plantea como trabajos futuros profundizar en el conocimiento del efecto del tratamiento químico superficial con ácido sulfúrico e indagar en tratamientos que redunden en afinidad de tipo química fibra-matriz.

## ■ BIBLIOGRAFÍA

- A.P.I. Specification 10 (1990) Specification for Materials and Testing for Well Cement, 5<sup>th</sup> ed., American Petroleum Institute.
- ASTM E 1820 – 01 (2001) Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness.
- Banthia N., Sheng. J. (1996). Cement and Concrete Composites 18, 251-269.
- Bosma M. (1999). Society of Petro-

leum Engineers, SPE 56536.

Chan Y.W., Li V. (1997). Effects of Transition Zone Densification On Fiber /Cement Paste Bond Strength Improvement. *Advanced Cement Based Materials* 5, 8-17.

Cirimello P., Morris W., Pérez Ipiña J. (2003) Evaluación del comportamiento a la fractura de cementos petroleros. Jornadas SAM 2003.

Cirimello P., Morris W., Robles J., Pérez Ipiña J. (2004) Comportamiento mecánico de los cementos en operaciones de fracturamiento hidráulico. V Seminario SEFLU – CEMPO, PDVSA.

Li V., Stang H. (1997) Interface Property Characterization and Strengthening Mechanisms in Fiber Reinforced Cement Based Composites, *Advanced Cement Based Composites* 6, 1-20.

Peled A., Guttman H., Bentur A. (1992) Treatments of Polypropylene Fibres to Optimize their Reinforcing Efficiency in Cement Composites. *Cement and Concrete Composites* 14, 277-285.

Singh S., Shukla A., Brown R. (2004) Pullout behaviour of polypropylene fibres from cementitious matrix. *Cement and Concrete Research*.

## ■ GLOSARIO

En la industria hidrocarburífera la cementación de pozos productores es una operación que consiste en preparar y bombear una lechada de cemento al espacio anular existente entre la cañería de encamisado (*casing*) y las formaciones geológicas atravesadas por el pozo. La finalidad de la operación de cementado es la de generar un sello entre distintas

formaciones de interés (productoras de gas y petróleo) y acuíferos, puestas en comunicación durante la operación de perforación. Además se busca controlar la migración de gases, consolidar formaciones mecánicamente inestables, eliminar barros y residuos sólidos generados durante la perforación y proteger y ligar al encamisado.

**Crecimiento subcrítico de fisura:** La fisura crece mientras el material se encuentra sometido a carga externa, al remover la misma se detiene el avance de la fisura. Cuando se alcanzan condiciones de criticidad, la fisura crece en forma rápida (instantánea) y se produce la rotura del material.

**Cementación de pozos:** proceso que consiste en mezclar cemento seco y ciertos aditivos con agua para formar una lechada que es bombeada al interior del pozo. Constituye una barrera permanente e impermeable al movimiento de fluidos generando un aislamiento zonal.

**Completación de pozos petroleros:** conjunto de trabajos que se realizan en un pozo después de la perforación o durante la reparación para dejarlos en condiciones de producir eficientemente.

**Tiempo de bombeabilidad (espesamiento):** El tiempo de bombeabilidad de una lechada de cemento es el tiempo durante el cual la lechada de cemento puede ser bombeada y desplazada dentro del espacio anular (la lechada es bombeable durante este tiempo).

**Punzado de pozos:** disparo de cargas explosivas frente a una capa potencialmente productiva desde el interior del pozo: de esta forma se comunican los fluidos contenidos en la capa con el pozo.

**Fracturación hidráulica o fractura hidráulica** (comúnmente conocida en inglés como *hydraulic fracturing* o *fracking*): técnica para posibilitar o aumentar la extracción de gas y petróleo del subsuelo.

**Fractura frágil:** es aquella en la cual una fisura se propaga en forma rápida con muy poca deformación plástica en su vértice.

## ■ APÉNDICE

$K_{IC}$  es uno de los parámetros que caracteriza la resistencia al crecimiento de fisura de un material y se lo denomina entonces tenacidad a la fractura o *fractotenacidad*. Un material es más tenaz (más resistente al crecimiento de fisura) cuanto mayor es su valor.

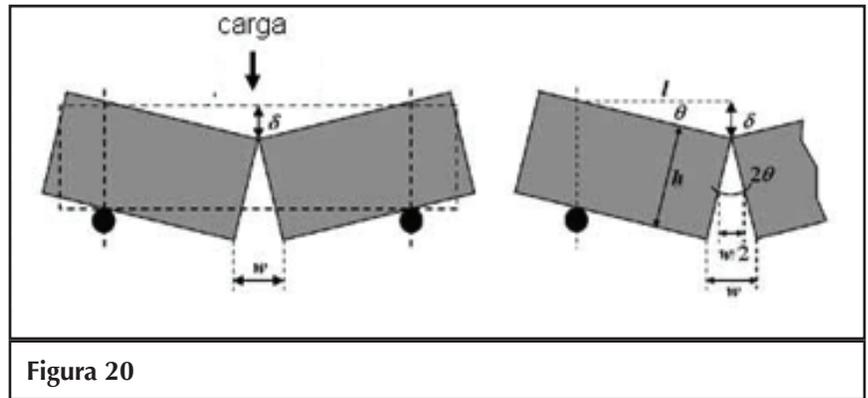
Otro parámetro cuya magnitud caracteriza el campo de tensiones en el vértice de la fisura es la integral  $J$ . El crecimiento de una fisura se producirá cuando el valor de la integral  $J$  tome un valor crítico  $J_c$ .

Ambos parámetros,  $K_{IC}$  y  $J_c$  están relacionados y se usa uno u otro para caracterizar la tenacidad a la fractura según que el análisis *fractomecánico* que se haga sea lineal-elástico o en el rango elasto-plástico dependiendo de las características de la fisura.

$K_{IC}$  y  $J_c$  pueden ser obtenidos a partir de ensayos de medición de tenacidad de fractura, en particular en un ensayo de flexión en tres puntos. En este ensayo, a una muestra de determinadas dimensiones y a la que se le efectúa una entalla previa al ensayo se le aplica una carga como está esquematizado en la figura 20.

Durante el mismo se realiza un registro continuo de la carga aplicada en función de la apertura de la boca de la fisura (CMOD, designado

en la figura  $w$  por razones de claridad) y del desplazamiento del punto de aplicación de la carga (VII, indicado en la figura como  $\delta$  por razones de claridad). Estas magnitudes se miden mediante celda de carga y trasductores de desplazamiento (clip y LVDT) dispuestos en el tren de carga y el clip en la boca de la entalla mecánica (CMOD). Formas típicas de las curvas que se obtienen son las que se presentan en las diversas figuras del trabajo.



**Figura 20**

Trabajando con estas curvas pueden determinarse  $J_c$  o  $K_{Ic}$  de interés para caracterizar el comportamiento a la fractura de un dado material.