

EFFECTOS DE INTERFASES DÉBILES EN LA ESTIMULACIÓN HIDRÁULICA EN VACA MUERTA

Humberto Celleri¹, Santiago Serebrinsky¹, Martín Sánchez¹, Juan Pablo Alvarez¹, Emilio A. Winograd¹

1: YPF Tecnología S.A., humberto.celleri@ypftecnologia.com, santiago.serebrinsky@ypftecnologia.com, martin.sanchez@ypftecnologia.com, juan.p.alvarez@ypftecnologia.com, emilio.winograd@ypftecnologia.com

Palabras clave: interfaces débiles, fracturamiento hidráulico, Y-FRAC[®]

ABSTRACT

Weak interfaces effects on hydraulic fracture stimulation in Vaca Muerta.

Hydraulic stimulation of unconventional reservoirs, such as Vaca Muerta formation, is one of the key-factors to reach economically attractive productivity. It is therefore, of fundamental interest to understand and predict the hydraulic fracture behavior, which is affected by several factors, including the stress state, the stimulation protocol and the characteristics of the reservoir.

One of the important aspects that can impact on the stimulation success, is the presence of mechanical heterogeneities in the reservoir due to vertical changes in the lithology. In Vaca Muerta formation, for example, different facies with variable content of organic matter, carbonates, volcanic deposits, among others, with diverse textures, coexist (Sagasti *et al.* 2013). They produce a distinct mechanical behavior to each facie. The contact surface of two facies with different mechanical properties are called interfaces, which, depending on their lithologies and origins, may have different characteristics.

In this work we numerically study the effects of weak interfaces (planes with low cohesion and friction) in the propagation of the hydraulic fracture, in both, 2D and 3D. We also designed and performed laboratory tests to analyze the possibility of sliding of a weak interface due to the stimulation.

INTRODUCCIÓN

Reservorios shale de hidrocarburos se caracterizan por tener una permeabilidad extremadamente baja, del orden de las centenas de nD, por lo cual requieren de estimulación hidráulica, generando, de esta manera, un canal conductivo entre la formación y el pozo que permite hacer viable la extracción de hidrocarburos. El comportamiento de la fractura hidráulica producto de la estimulación, está influido por numerosos factores, entre los que se destacan las propiedades geológicas, mecánicas y petrofísicas del reservorio, como así también del diseño de la estimulación, los fluidos empleados, etc.

Los modelos tradicionalmente utilizados para estimar la geometría de la fractura, suelen ser modelos 2D (o pseudo 2D), conocidos como KGD (Khristianovic y Zheltov 1955, Geertsma y de

Klerk 1969) y PKN (Perkins y Kern 1961, Nordgren 1972), o extensiones basados en ellos. Estos describen una fractura hidráulica planar de forma elipsoidal y presumen propiedades homogéneas del reservorio.

En formaciones que presentan heterogeneidades litológicas y, en consecuencia, de propiedades mecánicas, como Vaca Muerta, la aplicabilidad de estos modelos es limitada y, para estimar el crecimiento en altura de la fractura hidráulica, típicamente se suele analizar el contraste vertical de esfuerzo mínimo. Sin embargo, existen evidencias analíticas (Cleary 1978), de simulaciones (Thiercelin *et al.* 1989) de laboratorio (Suarez-Rivera *et al.* 2013) y de campo (Fisher y Warpinski 2012) que muestran que otras propiedades también juegan un rol fundamental en el crecimiento de la fractura hidráulica.

En este trabajo estudiamos los efectos de las interfases débiles (planos de baja cohesión y fricción) en la propagación de la fractura hidráulica. Para esto utilizamos el código de elementos finitos de desarrollo propio, Y-Frac[®], que permite, a diferencia de los softwares comerciales, modelar la propagación de la fractura hidráulica, acoplando la mecánica del sólido con la del fluido (Parte 1), respetando leyes físicas bien establecidas. Además, realizamos ensayos de laboratorio especialmente diseñados para estudiar los efectos de interfases débiles ante la inyección de fluido (Parte 2).

Parte 1: Estudio Numérico

Metodología

Para el estudio numérico se utilizó el software de desarrollo propio Y-FRAC[®]. Éste permite resolver de manera acoplada el problema de la deformación y rotura del sólido, tanto en 2D como en 3D, junto con la propagación del fluido. A continuación, describiremos brevemente la técnica utilizada. Para más detalle, puede consultarse la referencia Serebrinsky *et al.* 2017.

Para la solución del problema del sólido, se utiliza una formulación de elementos finitos basada en el método Galerkin Discontinuo (DG), que introduce discontinuidades en los desplazamientos entre caras de elementos adyacentes. Estas superficies de discontinuidad representan las fracturas, y están dotadas de propiedades que el modelo incorpora respetando consideraciones físicas bien establecidas. Las fracturas se propagan, formando una “zona de proceso” alrededor de la punta, donde ocurren los fenómenos a nivel microscópico, siguiendo el modelo de elementos cohesivos. Estos fenómenos están representados por una ley fenomenológica de cohesión que gobierna todo el proceso de decohesión, incluyendo la iniciación y la propagación de la fractura.

Las fracturas de la roca que resultan de los procesos de fracturación hidráulica son discretas, es decir, las fracturas son superficies de discontinuidad dentro del material. DG es una generalización de la formulación débil del problema de mecánica de sólidos que incorpora, desde el principio,

la presencia de discontinuidades en la solución, como en los procesos de fractura, permitiendo modelar el carácter discontinuo del problema en cuestión.

En el modelo, la fractura se localiza en las caras de los elementos. El empleo de un criterio mecánico de falla indica el inicio de la fractura y la tracción cohesiva impone la continuidad de desplazamientos a través de esas superficies. Una vez producida la fractura, las tracciones son una función de la apertura de las mismas. En todos los casos se ha utilizado un material lineal elástico y un criterio de falla de máxima tensión principal en tensión y de Mohr-Coulomb en compresión, los cuales indican el inicio de la generación de una fractura.

El fluido se transporta a través de la fractura generada y su dinámica está gobernada, como es típico en modelos de flujo en fracturas, y en particular en la simulación de estimulación hidráulica, por la ecuación de lubricación de Reynolds,

$$\mathbf{q} = \frac{h^3}{12\mu} \nabla p, \quad (1)$$

donde q corresponde al caudal direccional, h al espesor de la fractura, μ a la viscosidad dinámica y p a la presión. El fluido se considera Newtoniano.

El acoplamiento se realiza resolviendo escalonadamente el problema del sólido y del fluido. La solución de cada uno de los problemas se usa como dato de entrada para la solución del otro.

Modelo Geomecánico

Con el objeto de identificar la contribución de distintos factores (esfuerzos remotos, coeficiente de fricción) a la interacción entre la fractura hidráulica y la interfase débil, se incorporaron independientemente estos factores en las simulaciones.

El modelo utilizado consistió en 3 facies mecánicas, cada una de ellas con propiedades homogéneas, descriptas en la Tabla 1. En la Tabla 2 se muestran las propiedades de las dos interfases. Por cuestiones de confidencialidad, los valores de las propiedades están puestos con relación a los valores del bloque central.

Propiedad	BLOQUE		
	Superior	Medio	Inferior
Mod. Young	$\sim 1.8 * E$	E	$\sim 0.6 * E$
Relación Poisson	0.29	0.18	0.2
Angulo fricción interna	30	30	30
Cohesión	$\sim 1.5 * C_0$	C_0	$\sim 0.6 * C_0$
Resistencia a tracción	$\sim 1.5 * \sigma_c$	σ_c	$\sim 0.6 * \sigma_c$
UCS	$\sim 1.6 * UCS$	UCS	$\sim 0.6 * UCS$
Densidad (kg/m ²)	1910.00	2560.00	2510.00
K_{IC}	$\sim 1.5 * K_{IC}$	K_{IC}	$\sim 1.5 * K_{IC}$

Tabla 1. Propiedades mecánicas de las facies.

Propiedad	INTERFASE	
	Superior	Inferior
Angulo fricción	30	30
Cohesión	$\sim 0.0001 * C_0$	$\sim 0.1 * C_0$
Resistencia a tracción	$\sim 0.0002 * \sigma_c$	$\sim 0.15 * \sigma_c$
K_{IC}	$\sim 0.0005 * K_{IC}$	$\sim 0.1 * K_{IC}$

Tabla 2. Propiedades mecánicas de las interfaces.

El dominio simulado, con la geometría de la Figura 1, fue típicamente de 20 m x 20 m x 20 m, con la capa intermedia de 3 m de espesor centrada en la altura. Para algunos casos particulares se utilizó un dominio más grande. Los esfuerzos remotos efectivos considerados pueden verse en la misma figura.

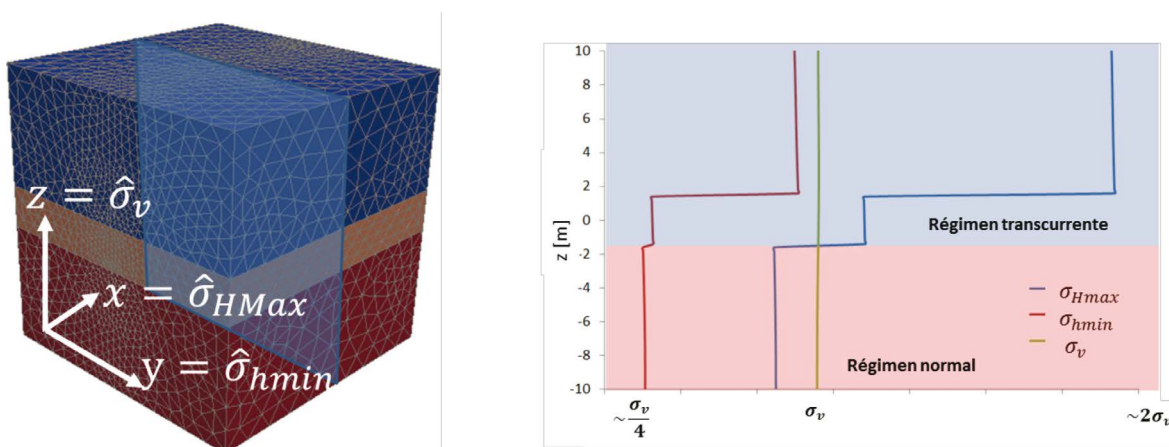


Figura 1. Izquierda: Dominio de simulación y sistema de coordenadas de los esfuerzos principales. El plano corresponde al dominio de las simulaciones 2D. Derecha: Esfuerzos remotos efectivos considerados. Notar que el régimen de esfuerzos es transcurrente en las 2 capas superiores y es normal en la inferior.

Resultados

Simulaciones 2D

De acuerdo con el esquema de la Figura 1 la dirección vertical en el modelo 2D corresponde a la dirección de σ_v (dirección vertical z en 3D). La dirección horizontal corresponde en este caso a la dirección de σ_{hmin} , de modo de garantizar que el crecimiento de la fractura es en dirección vertical, de acuerdo con los esfuerzos principales.

Estimulación sin Esfuerzos Remotos

Inicialmente se ejecutaron simulaciones sin esfuerzos remotos, $\sigma_{hmin} = \sigma_v = 0$, para luego

poder evaluar el efecto de los mismos sobre la interacción entre la fractura hidráulica y la interfase débil.

La Figura 2(a) muestra la configuración durante la primera etapa de la propagación de la fractura hidráulica, cuando aún es despreciable la interacción con la interfase débil. Se observa que en el punto de inyección (punzado), el esfuerzo es de compresión, mientras que alrededor de la punta de la fractura el esfuerzo es de tracción, de acuerdo con lo esperado.

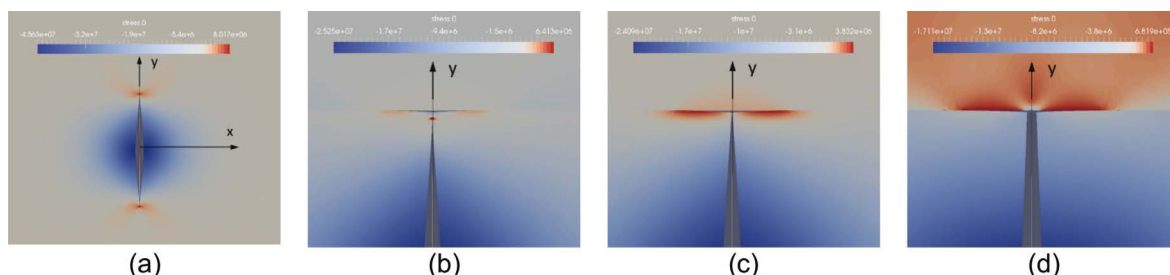


Figura 2. Propagación de la fractura hidráulica: (a) lejos de las interfaces; (b) Activación de la interfase previo al arribo del fluido; (c) Llegada del fluido a la interfase; (d) penetración del fluido en el plano débil. En la escala de colores se representa el esfuerzo en la dirección del esfuerzo mínimo.

La fractura hidráulica avanza hacia la interfase, y en una etapa intermedia comienza a interactuar con ella. La interfase está sometida a esfuerzos de tracción inducidos por el campo alrededor de la punta de la fractura hidráulica, que no están compensados por la sobrecarga. Así, la interfase comienza a abrirse antes de que la fractura hidráulica arribe, como se muestra en la Figura 2(b).

En una tercera etapa, la fractura hidráulica arriba a la interfase y ambas forman un dominio fracturado continuo, como se muestra en la Figura 2(c). Luego, el fluido ingresa en la interfase y, mientras continúa la inyección de fluido, las dos puntas de fractura avanzan en forma horizontal. La Figura 2(d) muestra la configuración durante esta etapa de propagación. En la Figura 3(a) se grafican los desplazamientos en la dirección del esfuerzo mínimo (x) a la altura del punto de inyección de fluido (en violeta) y en la interfase (en rojo). Puede verse que la apertura de la fractura en la intersección con la interfase es aproximadamente la mitad que la apertura de la fractura en el punto de inyección.

Estimulación con Esfuerzos Remotos

Como segunda etapa, se simuló la propagación de la fractura hidráulica en condiciones similares a las anteriores, incorporando los esfuerzos remotos representados en la Figura 1.

Durante la aproximación de la fractura hidráulica a la interfase, el campo de esfuerzos de tracción en la dirección vertical hacia el frente de la fractura genera una ligera apertura, de manera similar al caso sin esfuerzos remotos. En este caso la interfase débil también actúa como una barrera para la propagación de la fractura hidráulica en altura, dentro de la capa superior. A

diferencia del caso sin esfuerzos remotos, cuando la fractura hidráulica se une con la interfase, la pequeña apertura no es suficiente para que el fluido ingrese en la interfase.

En la etapa más avanzada de la propagación, los esfuerzos de corte sobre la interfase generan un pequeño deslizamiento tangencial sobre la interfase, en una zona acotada alrededor del punto de intersección, como se muestra en la Figura 3(c).

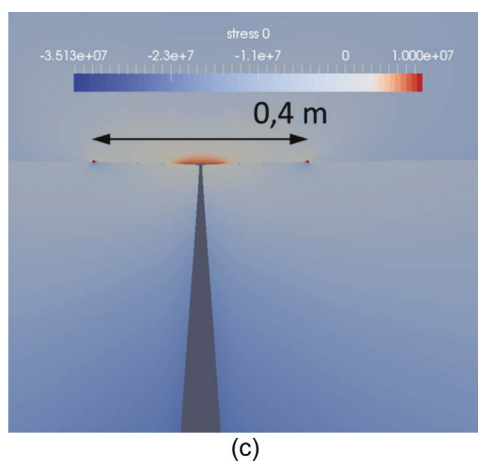
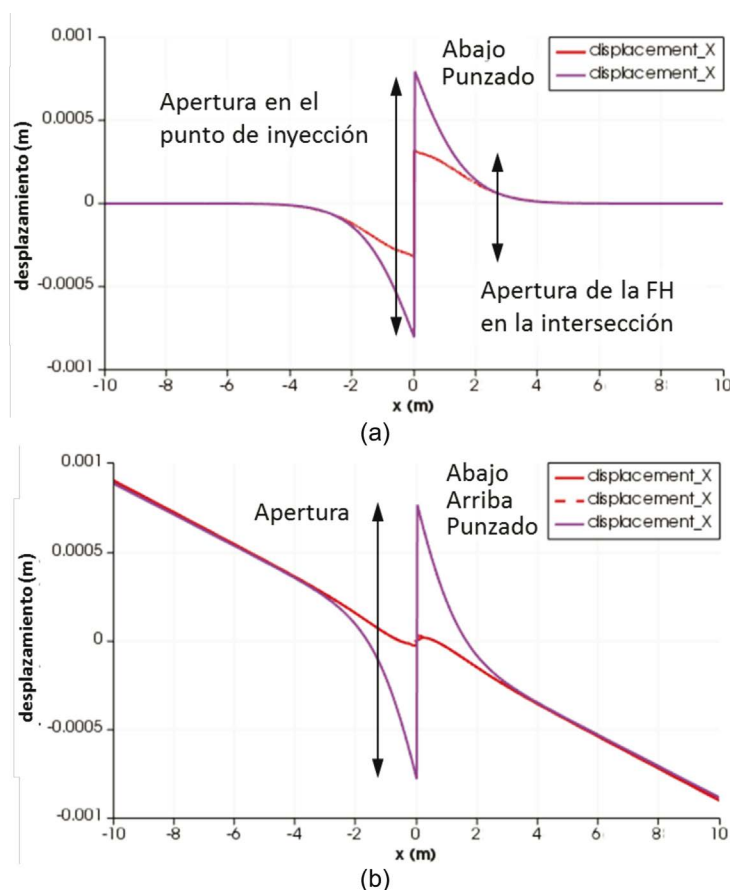


Figura 3. Configuración en la etapa avanzada de la propagación de la fractura hidráulica. En los paneles (a) y (b) se grafican los desplazamientos en dirección del esfuerzo mínimo, a la altura del punto de inyección de fluido (violeta) y de la interfase (rojo), para los casos sin y con esfuerzos, respectivamente. En el panel (c) se muestra el estado final de la estimulación (incluyendo esfuerzos remotos), donde puede apreciarse la rotura parcial por corte de la interfase, sin ingreso de fluido. En escala de color se grafica el esfuerzo en la dirección del esfuerzo mínimo y los desplazamientos están aumentados en un factor 100 para mejorar la visualización.

La Figura 3(b) muestra la apertura de la fractura hidráulica en el punzado y en el punto de intersección. Comparando con el caso libre de esfuerzos remotos, se aprecia que, si bien la apertura en el punzado es similar, la apertura inducida en la intersección con la interfase es bastante menor. Este es un efecto combinado de los esfuerzos remotos y de la falta de lubricidad de la interfase.

Efecto del Coeficiente Fricción de la Interfase Débil

Para estudiar la incidencia del coeficiente de fricción (μ) sobre los posibles deslizamientos de la interfase, se realizaron simulaciones con valores reducidos de μ . Se seleccionó un valor de $\mu = 0.0525 = \tan(3^\circ)$, correspondiente a inclinaciones típicas de las interfases débiles. Este valor es muy bajo comparado con los valores esperados.

La Figura 4 muestra una comparación de los resultados para $\mu = 0.58 = \tan(30^\circ)$ (Figura 4(a), la misma que la Figura 3(c)) y el caso actual. Dado que la tensión de corte máxima que resiste la interfase es menor al caso anterior, la carga sobre la zona fracturada debido a la presurización, que se transfiere al corte de la interfase débil, se distribuye en una zona con deslizamiento bastante más extendida.

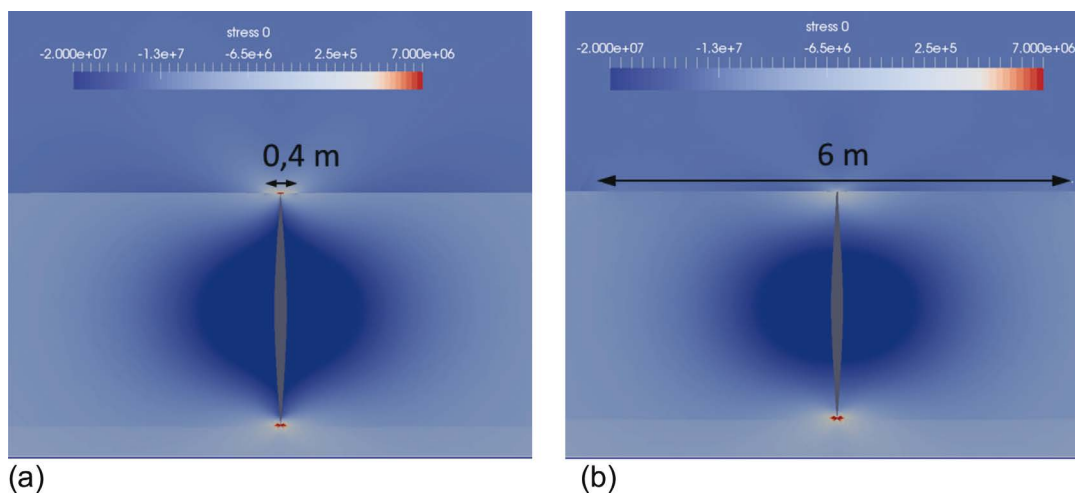


Figura 4. Configuración en la etapa avanzada de la propagación de la fractura hidráulica, con coeficiente de fricción (a) $\mu=0,58$ (igual a Figura 3(c)), y (b) $\mu=0,0525$. Los desplazamientos están aumentados en un factor 100 para mejorar la visualización.

La Figura 5 muestra la apertura de la FH, donde se ve que el deslizamiento de la interfase es mayor que en el caso anterior.

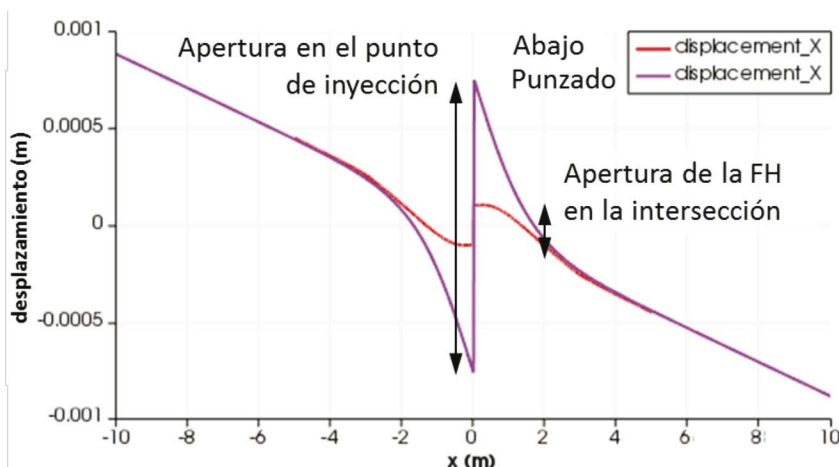


Figura 5. Perfiles de desplazamientos al nivel de los punzados y debajo de la interfase, en función de la coordenada horizontal.

Simulaciones 3D

Con el fin de analizar la interacción de las fracturas hidráulicas y los planos débiles se realizaron simulaciones 3D acopladas. Estas simulaciones son similares a las discutidas anteriormente en 2D, pero permiten consideraciones más realistas a la hora de entender las posibles fenomenologías presentes en el problema y su influencia en la propagación de la fractura hidráulica.

Estimulación sin Esfuerzos Remotos

Considerando que los esfuerzos remotos de la formación, en particular la sobrecarga, pueden reducir los efectos de la reactivación de los planos débiles horizontales o sub-horizontales, en primera instancia se analizó la interacción bajo condiciones libres de esfuerzos ($\sigma_{HMax} = \sigma_{hmin} = \sigma_v = 0$), análogamente al caso 2D. Vale recordar aquí que, bajo estas mismas condiciones en 2D, la interfase débil es reactivada y el fluido de fractura ingresa horizontalmente en ella, aumentando así la propagación y reactivación.

La Figura 6 muestra los resultados obtenidos para estas simulaciones, donde la interfase se considera horizontal (ángulo de interacción de 90°). En esta figura se observa la propagación de la fractura hidráulica, la misma crece en la dirección vertical y su geometría es prácticamente circular debido a la ausencia de esfuerzos remotos. El crecimiento vertical es debido a restricciones impuestas en la dirección de propagación en el modelo. El objetivo de estas restricciones es asegurar el ángulo de interacción entra la fractura hidráulica y el plano débil.

Como se puede apreciar, la fractura hidráulica propaga e interacciona con la interfase débil. Durante la interacción, la interfase es activada y se produce la falla por corte sobre la misma. El corte producido por la interacción genera el deslizamiento horizontal del plano débil, pero no se produce un cambio en la dirección de propagación de la fractura (propagación horizontal) como lo observado en las simulaciones 2D. En este caso, de acuerdo con los análisis realizados,

la fractura hidráulica continúa creciendo en la dirección de la media ala dada la menor energía que le demanda frente al cambio de dirección. En las simulaciones 2D, la imposibilidad de crecimiento en la tercera dirección genera el cambio de propagación observado. Hemos observado en algunos casos que ciertos elementos de fluido se activan en la interfase, considerando que, de alguna manera, se produce cierto ingreso de fluido, pero éste no es suficiente para que la fractura hidráulica cambie su dirección, propagándose horizontalmente.

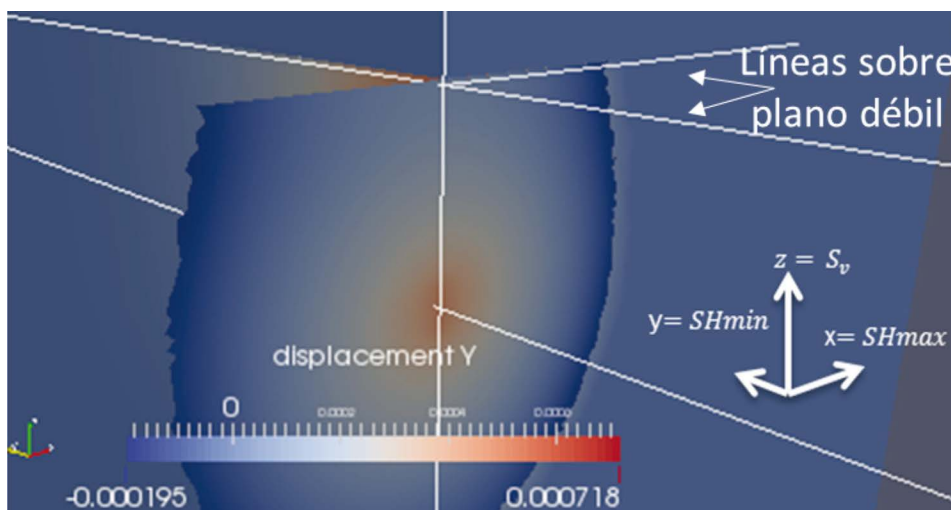


Figura 6. Propagación de fractura hidráulica para condiciones libres de esfuerzos. La fractura hidráulica interacciona con el plano débil horizontal (ángulo de interacción de 90°). Si bien se produce la falla de la interfase y el deslizamiento horizontal de la misma no se produce un cambio de dirección de la fractura hidráulica.

La Figura 7 muestra dos instantes de tiempo en la propagación de la FH. Inicialmente (Figura 7(a)) la FH avanza e interacciona con el plano débil. Debido a la apertura de la fractura, en el punto de interacción se produce un estado de tracción que genera la rotura de la interfase.

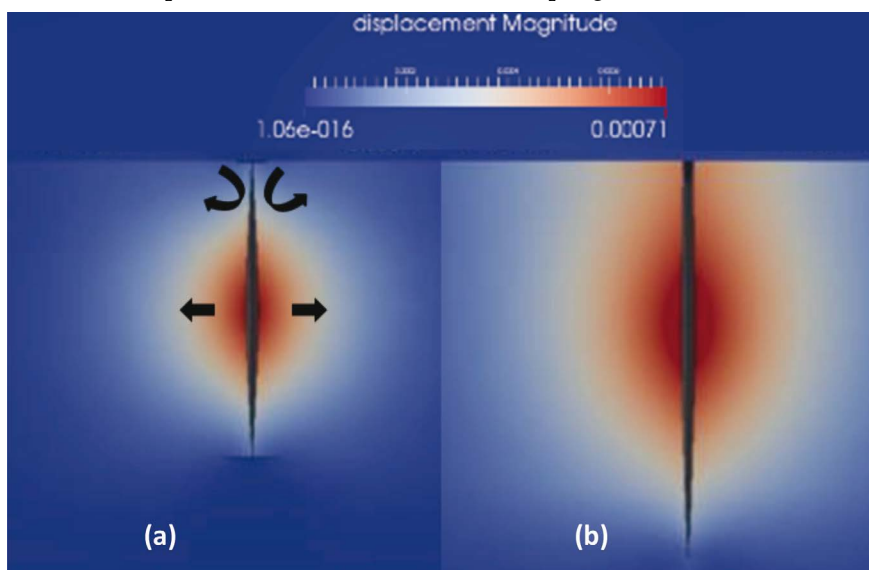


Figura 7. Crecimiento vertical de la fractura hidráulica para dos instantes de tiempo diferente. (a) Se observa el momento de interacción en donde la apertura de fractura genera un estado inicial de tracción sobre la interfase. (b) Finalmente el plano débil falla por corte produciendo el deslizamiento observado.

Si bien la tracción genera una apertura local en el plano débil, esta apertura no es suficiente para que el fluido pueda ingresar en ella. Esta observación coincide con lo obtenido en las simulaciones 2D con esfuerzos remotos no nulos.

Al continuar la propagación de la FH (ver Figura 7(b)), el crecimiento avanza en la dirección de la media ala de fractura (dirección perpendicular al plano de la Figura 7). El aumento del ancho de la FH produce finalmente la rotura por corte de la interfase, sin ingreso de fluido.

La Figura 8(a) muestra el estado tensional de corte y la presión hidráulica a través de la dirección de propagación (eje x de la Figura 6) sobre el plano débil. Como se puede apreciar, en la punta de la FH existen fuertes tensiones de corte. Sin embargo, las mismas son localizadas y desaparecen al alejarse del punto de propagación. Adicionalmente, las mismas se relajan ni bien se produce la falla por corte en la interfase.

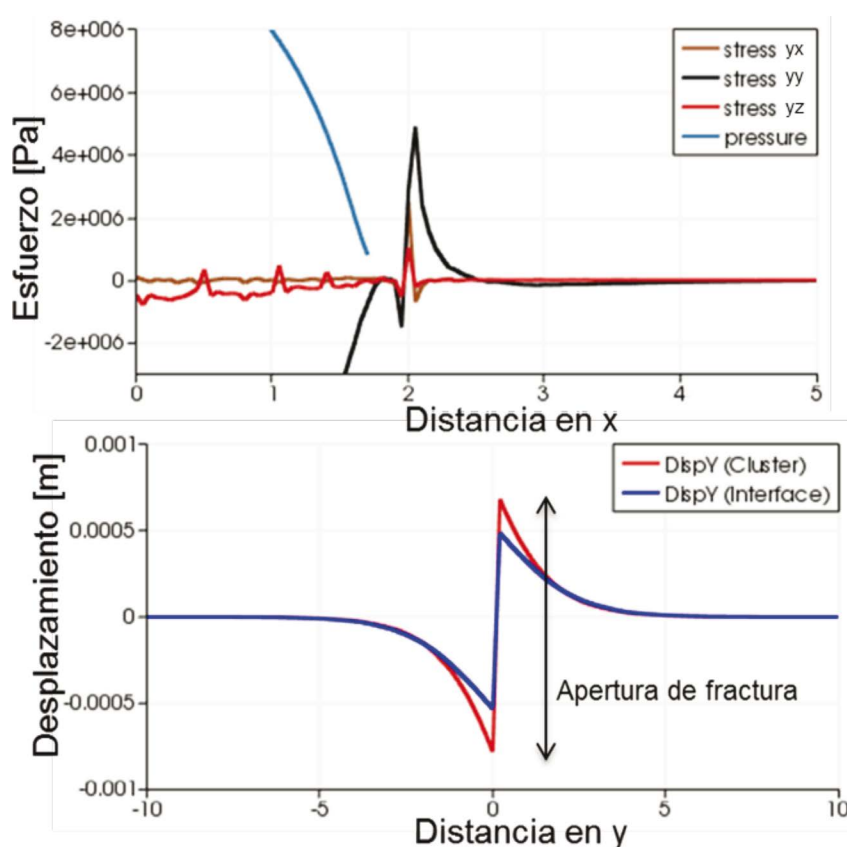


Figura 8. (a) Estado tensional de corte y presión hidráulica sobre el plano débil en dirección a la propagación de la FH (ver eje x de la Figura 6). (b) Aperturas máximas alcanzadas para la zona del punzado y en las inmediaciones de la interfase. Los desplazamientos observados en la interfase son similares a las aperturas de la FH (del orden de los milímetros).

La Figura 8(b) muestra la apertura generada por la fractura durante la propagación. Los deslizamientos generados por la activación del plano débil son del orden de los milímetros y son locales.

Estimulación con Esfuerzos Remotos

En coincidencia con el análisis 2D, se analizó el mismo caso de la Figura 6, pero con los esfuerzos de la formación presentes (ver Figura 1 como referencia). Bajo estas condiciones, el plano débil se encuentra sometido a un régimen transcuriente de esfuerzos (estado más propenso que el anterior para la reactivación y el ingreso de fluido en la interfase). La Figura 9 muestra los resultados para estas simulaciones.

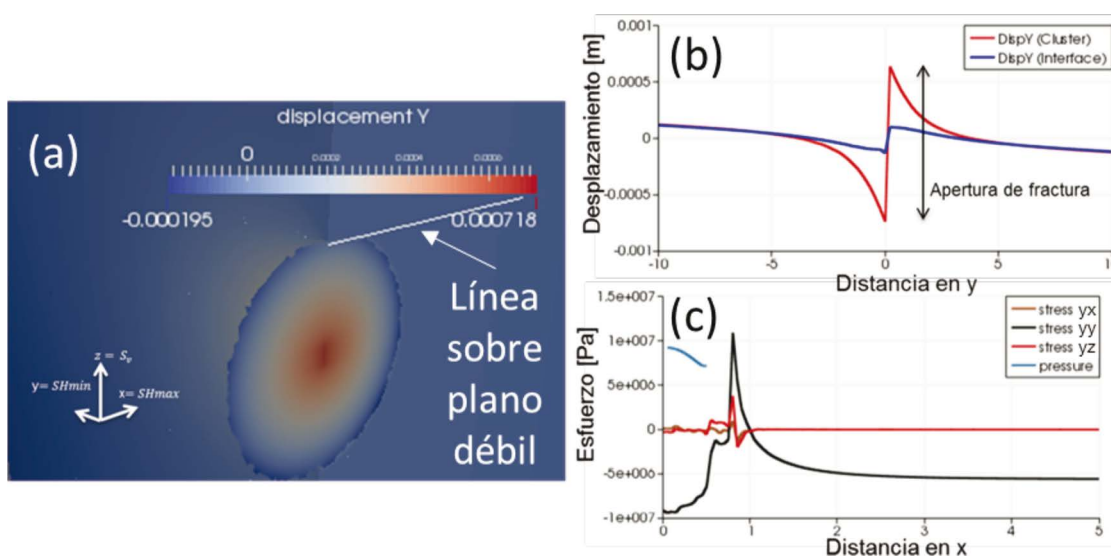


Figura 9. (a) Propagación de fractura hidráulica para condiciones de reservorio (régimen transcuriente). La fractura hidráulica interacciona con un plano débil horizontal (ángulo de interacción de 90°). (b) Aperturas máximas alcanzadas para la zona del punzado y en las inmediaciones de la interfase. Los desplazamientos observados en la interfase son similares a las aperturas de la FH (del orden de los milímetros). (c) Estado tensional de corte y presión hidráulica sobre el plano débil en dirección a la propagación de la FH (ver eje x de la Figura 6).

Como se puede apreciar en la Figura 9(a) y al igual que para el caso anterior donde los esfuerzos remotos no estaban presentes, el plano débil actúa como barrera en el crecimiento de la FH. Al producirse la interacción, se observan fallas por corte de la interfase producidas por la intensificación de tensiones de la FH (ver Figura 9(c)). Sin embargo, y debido al estado de confinamiento, los deslizamientos observados en la interfase son menores a los obtenidos para condiciones libres (Figura 9(b)). Esto puede verse comparando con los resultados de la Figura 8(b). El estado tensional de la formación actúa limitando los desplazamientos sobre el plano débil, como es de esperar.

Interfase Sub-Horizontal

Dado que bajo las condiciones analizadas hasta aquí no se obtuvieron activaciones importantes de la interfase débil, se generó un modelo donde la interfase se encuentra sub-horizontal, con el

fin de evaluar la factibilidad de que ésta tenga un deslizamiento relevante. El aumento del ángulo de la interfase puede producir un efecto favorecedor en la activación de estos planos al producirse la interacción con la FH propagante.

Del análisis de imágenes de pozo, se encuentra que la máxima inclinación observada es aproximadamente 5° . La Figura 10 muestra los resultados obtenidos para las simulaciones cuando el plano débil se encuentra inclinado a 5° . Como se observa en la figura, la interacción entre la FH y el plano débil produce la rotura por corte de manera local al igual que en las simulaciones anteriores. De manera general se puede considerar que la extensión de falla depende de la altura de la FH. Cuanto mayor sea la altura, mayor será la perturbación de esfuerzos alrededor de la misma y mayor la superficie del plano débil afectada. En el caso estudiado en la Figura 10, la extensión de la falla es del orden del 10% de la altura de la fractura.

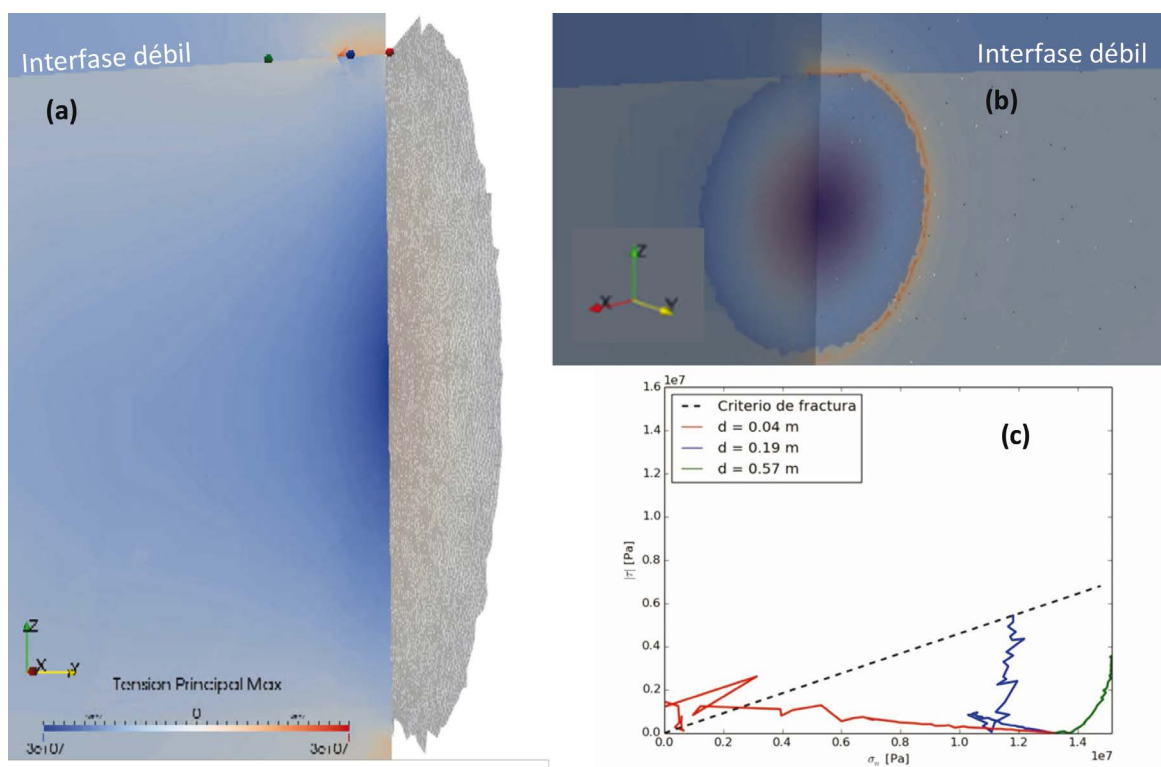


Figura 10. (a) Propagación de fractura hidráulica para condiciones de reservorio (régimen transcuriente) y una interfase a 5° . La fractura hidráulica interacciona con un plano débil horizontal. (b) Perturbación de esfuerzos en la formación debido a la propagación de la FH. (c) Esfuerzo normal vs esfuerzo de corte para distintos puntos sobre la interfase (colores de acuerdo con los puntos del panel (a)). Las curvas indican la evolución temporal de los esfuerzos en esos puntos. En particular puede verse que, al instante en el que la interfase falla por corte en el punto en azul (a una distancia de 0.19m del plano vertical), en el punto rojo falló previamente mientras que en el verde aún no lo hizo.

En la Figura 10(c) puede verse la evolución de los esfuerzos normales y tangenciales sobre el plano débil durante la propagación de la fractura hidráulica. En esta figura, las

líneas de color rojo, azul y verde corresponden a los puntos del mismo color en la Figura 10(a). Estos puntos se encuentran sobre la interfase, a distintas distancias (d) con el plano de propagación vertical. Como se puede ver en la figura, el esfuerzo de corte aumenta a medida que la FH propaga y la falla se produce en régimen de compresión por esfuerzos de corte. La línea punteada corresponde a las propiedades de rotura del plano débil ($C_0=0$; $\mu=\tan(30^\circ)$).

Nuevamente, aquí, y tal como se observa en los resultados obtenidos, si bien la interacción entre la FH y la interfase produce la rotura por corte de esta última y esta falla genera desplazamientos sobre el plano débil, la magnitud de los mismos continúa siendo baja debido a que la mayor parte de la extensión de la interfase continúa sin fallar y con sus propiedades originales de fricción. Asimismo, se observa que los esfuerzos decaen rápidamente en distancia, a medida que se va alejando de la zona de proceso de fractura.

Efecto del Coeficiente de Fricción de la Interfase Débil

Para favorecer aún más el posible deslizamiento de la interfase, se redujo el valor del coeficiente de fricción al 10% del utilizado previamente. En estas condiciones, las propiedades mecánicas de rotura de la interfase son prácticamente nulas (sin cohesión y con mínima fricción).

El objetivo principal aquí es analizar el efecto de la fricción sobre la activación del plano débil inducida por la propagación de la fractura hidráulica. Teniendo en cuenta que bajo todas las condiciones anteriormente estudiadas no se han encontrado mecanismos que produzcan la activación total de la interfase y el consiguiente desplazamiento tangencial sobre el plano, estas simulaciones analizan las condiciones más favorables para producir un eventual deslizamiento general del plano débil.

De manera general, los resultados obtenidos para un coeficiente de fricción menor son similares a los analizados en la sección precedente. Al propagar la FH las perturbaciones de los esfuerzos generados por ella producen la rotura de la interfase por corte, sin embargo, el fluido no ingresa al plano débil.

La Figura 11 muestra una comparación de la zona de interfase afectada por la propagación de la FH para los dos coeficientes de fricción analizados. Como se puede ver, la disminución de la fricción produce un aumento considerable de la extensión de la interfase afectada.

Para $\mu=0.05$, la rotura de la interfase se extiende al doble de la altura de fractura alcanzada, aproximadamente. Sin embargo, al no producirse el deslizamiento total del plano, continúan existiendo zonas “fijadas” por la fricción de la interfase. Nuevamente, los desplazamientos obtenidos son del orden de los milímetros.

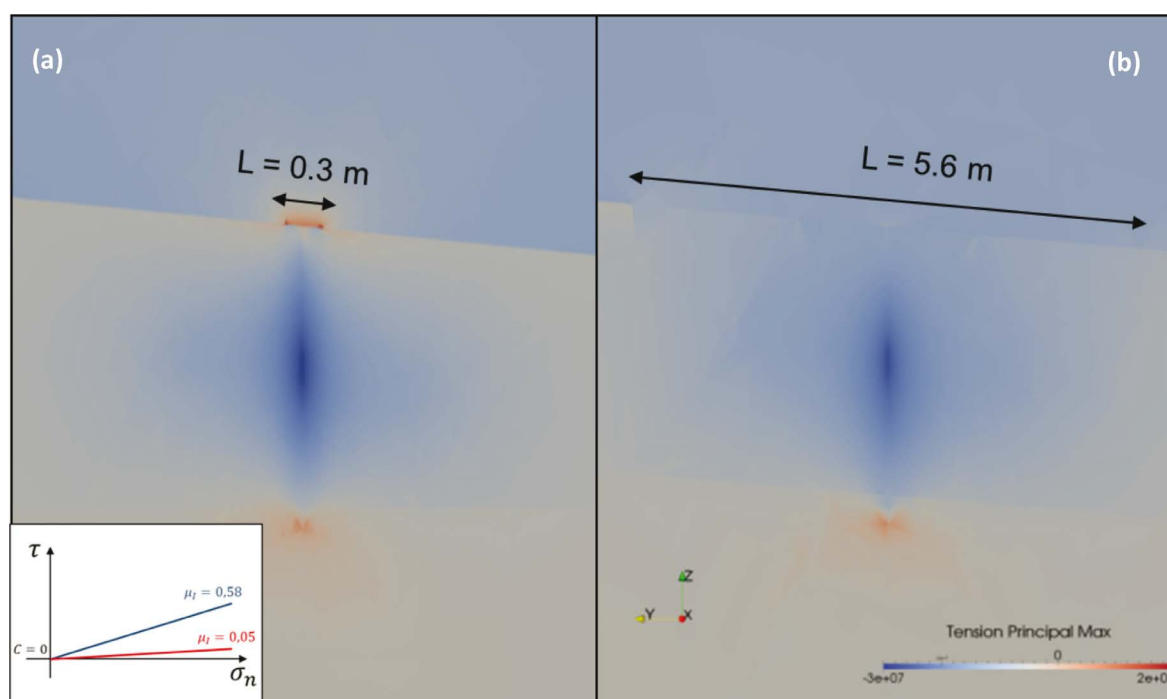


Figura 11. Efecto del coeficiente de fricción del plano débil con una orientación de 5°. (a) Reactivación de la interfase para $\mu=0.58$. (b) Reactivación de la interfase para $\mu=0.05$. En el gráfico interior de (a) pueden verse los dos criterios de falla utilizados.

Parte 2: Estudio Experimental

El estudio experimental tuvo como objetivo principal buscar alguna posible evidencia de activación de un plano sub-horizontal de baja fricción y cohesión, ante la inyección de fluido. Dado que, con el análisis numérico bajo las hipótesis consideradas no se obtuvo un deslizamiento importante de la superficie y una penetración del fluido (salvo para el caso 2D sin esfuerzos remotos, el cual no es un escenario realista para VM), se diseñó un ensayo de laboratorio que incluyera algunos de estos elementos. En caso de encontrar evidencias de activación y/o penetración del fluido, esto implicaría volver a analizar las hipótesis del modelo de simulación.

Metodología

El esquema del ensayo puede verse en la Figura 12. Utilizando testigos de afloramiento de 2 pulgadas de longitud y 1 pulgada de diámetro, se les realizó un corte a 5 grados del eje horizontal, para simular una interfase de nula cohesión y baja fricción. A una mitad resultante se le realizó un orificio vertical, de manera de que se pudiera inyectar fluido hasta llegar a la interfase. Las muestras fueron ensayadas en una prensa triaxial, bajo presión de confinamiento (P_c), un esfuerzo axial (S_v) e inyectando fluido por el orificio con una presión P_f . Para detectar un posible deslizamiento de

la interfase, se colocaron sensores de deformación radial de los dos lados de la interfase, como se muestra en la figura.

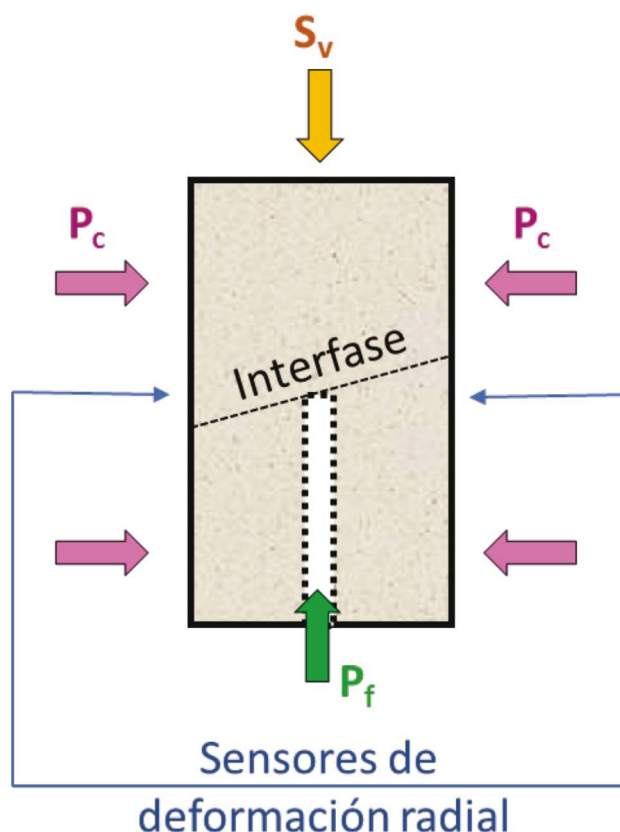


Figura 12. Esquema del ensayo para la evaluación de una posible activación y penetración de fluido en la interfase débil.

Para definir el protocolo de carga e inyección del fluido de la muestra, se realizaron simulaciones numéricas de elementos finitos con el software Abaqus®. Ellas mostraron que, si seguía el protocolo habitual de ensayos en prensa triaxial, que consiste en las aplicaciones sucesivas de P_c , P_f y carga axial, la muestra podría colapsar por el orificio generado. Por lo tanto, se decidió incrementar cada uno de estos alternadamente y en etapas. De esta forma, las simulaciones mostraron que el testigo se preservaría íntegramente hasta alcanzar los valores deseados de carga. Las propiedades mecánicas de estas muestras fueron previamente obtenidas realizando ensayos triaxiales y brasileros.

A modo de tener un caso base para el cual poder evaluar los desplazamientos relativos de la interfase, primeramente, se procedió a ensayar un testigo en iguales condiciones que las descritas en la Figura 12, pero sin la interfase. En la Figura 13, se muestran distintos cortes de las imágenes tomadas en micro tomógrafo de esta muestra.

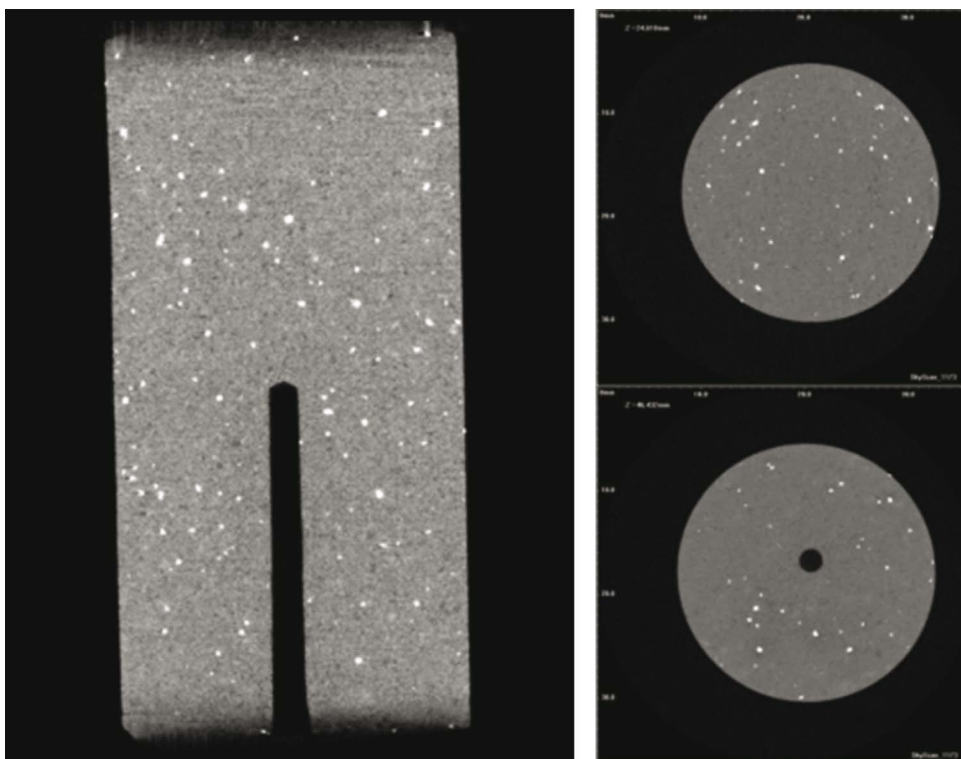


Figura 13. Imágenes de microtomografía de la muestra para el caso base (sin la interfase). Puede advertirse la presencia del orificio en la mitad inferior del plug, como así también la ausencia de fracturas en la muestra.

Resultados

Caso Base: Ensayo sin Interfase

El procedimiento de ensayo consistió en ir aumentando escalonadamente la presión interna (P_f), que representa la presión de la fractura hidráulica, y la presión de confinamiento (P_c). Por último, se aumentó S_v para lograr un esfuerzo diferencial axial ($\Delta\sigma_v = S_v - P_c$) hasta llegar a las condiciones iniciales del experimento. A partir de estas condiciones iniciales, se aumentó la presión interna hasta superar la presión de confinamiento, mientras se monitoreaban los sensores de deformación. La Figura 14 muestra la evolución del ensayo y la ausencia de movimiento en los sensores de deformación (ϵ_x y ϵ_y corresponden a los sensores radiales y ϵ_v al sensor vertical) cuando se aumentó la presión interna por encima de la presión de confinamiento.

Ensayo con Interfase

Para este ensayo, además de la perforación, se realizó un corte sub-horizontal (a 5°) para simular la interfase débil. En este caso, la presión interna P_f , la presión de confinamiento y el

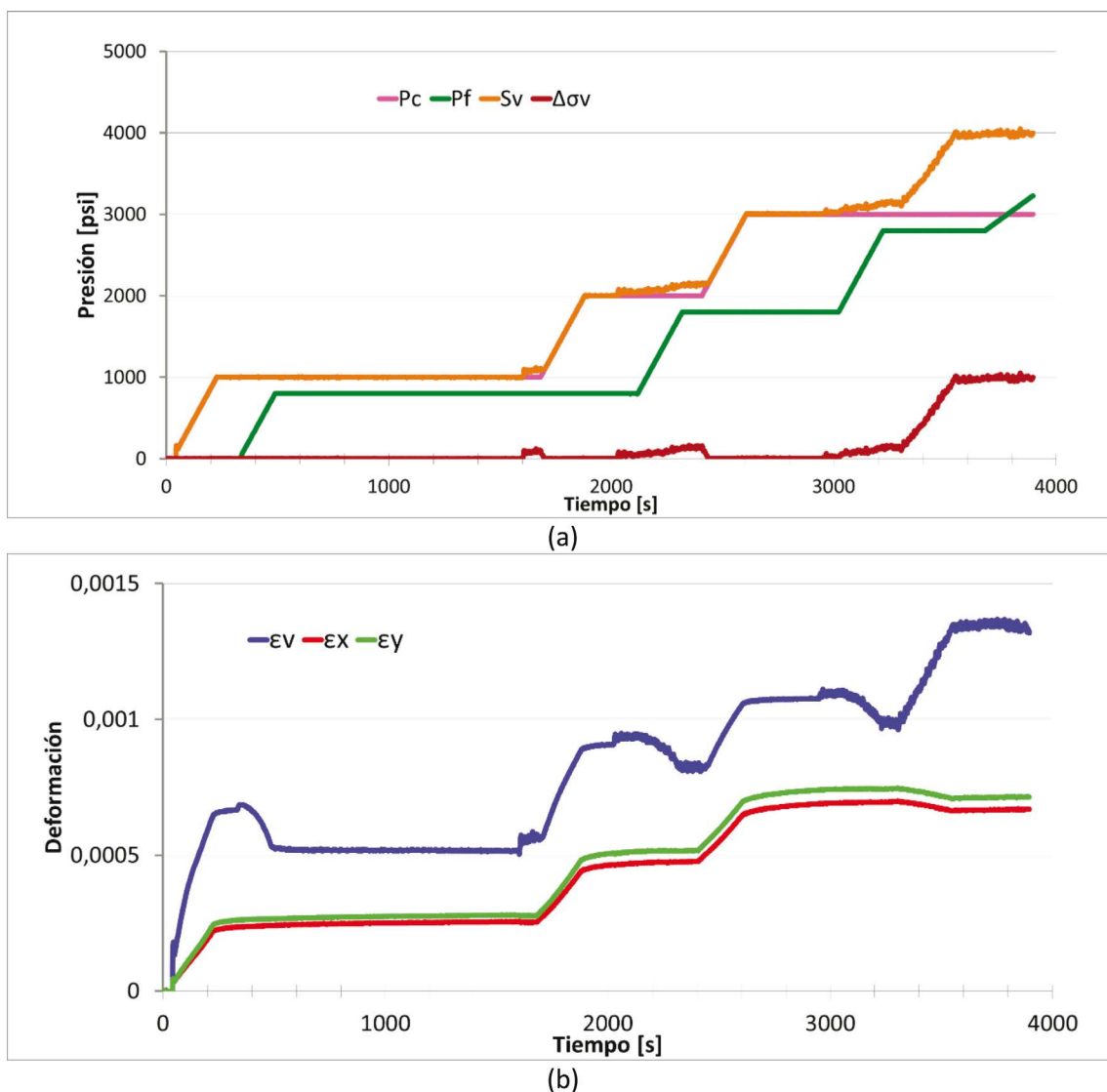


Figura 14. Presiones (a) y deformaciones (b) del ensayo sin interfase.

esfuerzo diferencial axial fueron aumentados en simultáneo hasta llegar a las condiciones iniciales, en un tiempo aproximado de 1200 s (ver Figura 15(a)). Luego se incrementó P_f hasta alcanzar la presión de confinamiento, sin observarse una deformación tal que permitiera inferir el deslizamiento de la interfase (Figura 15(b)). Por último, se retiró la carga axial hasta igualarla con la presión de confinamiento. El resultado de la evaluación de los sensores fue, en este caso, también negativo.

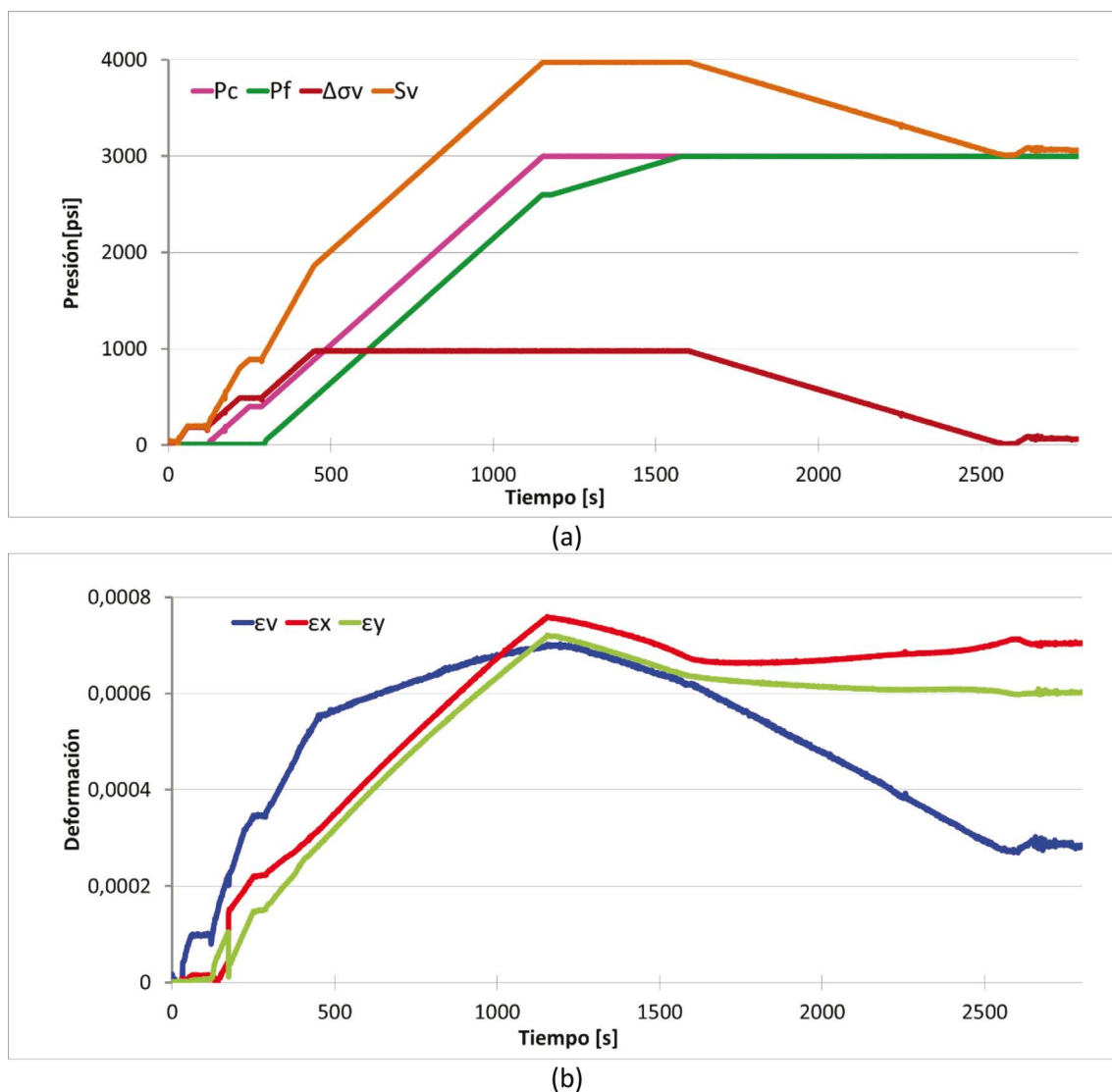


Figura 15. Presiones (a) y deformaciones (b) del ensayo con interfase sin cohesión.

Como se muestra en la Figura 15, no se observa ningún desplazamiento en los sensores radiales que permita inferir el deslizamiento de la interfase. Tampoco una inspección visual de la interfase luego de realizado el ensayo, permitió concluir que el fluido haya ingresado en ella. La metodología de ensayo experimental propuesta permite inferir que, bajo las condiciones analizadas, la activación de planos débiles y/o de baja cohesión sub-horizontales ante la inyección de fluido, no resulta un proceso evidente.

CONCLUSIONES

En este trabajo se estudió los efectos de interfases de baja cohesión y fricción en la estimulación hidráulica, bajo condiciones representativas de la formación Vaca Muerta. Dado

las heterogeneidades existentes en esta formación, tanto de propiedades mecánicas, esfuerzos, la presencia de fallas, etc., es importante aclarar que la aplicabilidad de estos resultados debe analizarse particularmente para cada caso.

Los estudios por simulación numérica mostraron importantes diferencias entre el caso 2D y 3D, en ausencia de esfuerzos remotos. A diferencia del caso 2D, en 3D la interfase débil no generó una apertura lo suficientemente grande como para que el fluido se propagara por ella y, en cambio, resultó favorable al crecimiento longitudinal de la fractura hidráulica. Este resultado sirve como alerta en la correcta utilización de los modelos simplificados 2D, en el cual se basan la mayoría de los simuladores comerciales de estimulación. Un modelo 2D puede ser representativo del caso real (3D) cuando la fractura hidráulica está muy extendida en su dirección longitudinal (media ala de fractura extensa), y la pérdida de carga en la fractura es importante, restringiendo el crecimiento continuado en esa dirección.

En términos generales, bajo las condiciones analizadas, la interfase débil actúa como barrera de crecimiento vertical de la fractura hidráulica y el fluido no se propaga a través de ella. Los esfuerzos de corte en la intersección de la punta de la fractura hidráulica con la interfase son importantes, pero locales. Al activarse el plano de debilidad se observa una relajación de los esfuerzos.

La rotura por corte y el deslizamiento de la interfase se ve fuertemente afectada por el coeficiente de fricción del plano débil. Cuanto menor es la fricción, mayor es la extensión de la zona de falla. De todos modos, para los casos analizados incluyendo la inclinación del plano débil en 5°, en ningún caso el fluido se propagó en la interfase.

El ensayo de laboratorio especialmente diseñado para analizar el impacto de la inyección de fluido sobre una interfase débil tampoco generó claras evidencias de que ésta pudiera deslizarse ni que el fluido penetrara la misma.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a YPF-Tecnología S. A. y a YPF S. A., por autorizar la publicación de este trabajo y a Claudia Terán y Luciano Monti, quienes contribuyeron en la discusión de los resultados.

REFERENCIAS CITADAS

- | | |
|--|--|
| Cleary, M. P., 1978, "Primary Factors Governing Hydraulic Fracture in Heterogeneous Stratified Porous Formations", ASME Energy Technology Conference, Houston, Estados Unidos. | Fisher, K., Warpinski, N., 2012, "Hydraulic-Fracture-Height Growth: Real Data", SPE Production & Operations 27, N° 1, p. 8-19. |
|--|--|

- Geertsma, J., de Klerk, F., 1969, "A rapid method of predicting width and extent of hydraulically induced fractures", *Journal of Petroleum Technology* 21, N° 12, p. 1571-1581.
- Khristianovic, S.A., y Zheltov, Y.P., 1955, "Formation of vertical fractures by means of highly viscous liquid", en *Proceedings of the Fourth World Petroleum Congress*, p. 579-586, Roma, Italia.
- Nordgren, R.P., 1972, "Propagation of a vertical hydraulic fracture", *SPE Journal* 12, N° 8, p. 306-314.
- Perkins, T.K., Kern, L.R., 1961, "Widths of hydraulic fractures", *Journal of Petroleum Technology* 13, N° 9, p. 937-949.
- Sagasti, G., Ortiz, A., Hryb, D., Foster, M. y Lazzari, V., 2014, "Understanding Geological Heterogeneity to Customize Field Development: An Example from the Vaca Muerta Unconventional Play, Argentina", en *Unconventional Resources Technology Conference*, Denver, Estados Unidos.
- Serebrinsky, S.A., Winograd, E., Celleri, H.M., Sánchez, M., Alvarez, J.P., Hryb, D.E., y López, R.G., 2017, "Finite elements simulation of the interaction of a hydraulic fracture with a natural fracture", en *51st US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. American Rock Mechanics*, San Francisco, Estados Unidos.
- Suarez-Rivera, R., Burghardt, J., Stanchits, S., Edelman, E., & Surdi, A., 2013, "Understanding the effect of rock fabric on fracture complexity for improving completion design and well performance", en *International Petroleum Technology Conference*, Beijing, China.
- Thiercelin, M., R. Jeffrey, and K.B. Naceur, 1989, "Influence of fracture toughness on the geometry of hydraulic fractures", *SPE Production Engineering*, p. 435-442.