

Técnica de gelificación ácida en yacimientos de gas para mejorar la estimulación en el fracturamiento ácido

Gelation technique in acid gas fields to improve the acid fracturing stimulation

**¹Rosario Romero, ²Miguel Sánchez, ³Luis Barboza,
³Andreina Sánchez, ³José Sánchez**

Resumen

El propósito general del artículo es analizar una técnica de gelificación ácida en yacimientos de gas para mejorar la estimulación en el fracturamiento ácido. La investigación se fundamenta teóricamente en los planteamientos de la Sociedad de Ingenieros Petroleros, las Normas COVENIN, el Programa Educación Petrolera PDVSA, entre otros. La investigación se desarrolla de tipo experimental con diseño documental y de laboratorio. Las unidades de análisis son los investigadores y operadores de laboratorio con los trabajadores del campo de producción. Se concluye con el análisis de una nueva modalidad de uso del ácido en yacimientos de gas, que permita seleccionar formulaciones líquidas y las condiciones de inyección para una formación determinada (diseño de tratamientos de fracturamiento ácido), ya que los ácidos gelificados son menos eficientes en términos de rugosidad de la superficie que los straight acids a la misma concentración. Se recomienda la implemen-

Recibido: 15/03/2015 Aceptado: 30/04/2015

Autor para correspondencia: rosarioromero5@hotmail.com

- 1 UNERMB. Programa Educación. Proyecto Profesionalización Docente. Correo: rosarioromero5@hotmail.com. Teléfono: 0426-5673725
- 2 UNERMB. Vice-rectorado Académico. Programa Administración
- 3 Universidad Nacional Experimental "Rafael María Baralt", Programa Ingeniería y Tecnología. Los Puertos de Altagracia, Venezuela.

tación de ácido gelificado para el estudio de las condiciones de fondo de pozo para la acumulación de torta y de la erosión que influyen en la formación de agujeros de gusano en la pared fractura, puesto que un aumento de la permeabilidad tiene un efecto menor en la velocidad de propagación del agujero de gusano.

Palabras clave: Técnica, gelificación ácida, fracturamiento ácido.

Abstract

The general purpose of the article is to analyze acid gelation technique in gas to improve the acid fracturing stimulation. The research is based on theoretical approaches of the Society of Petroleum Engineers, COVENIN Rules, PDVSA Oil Education Program, among others. The research is conducted with experimental documentary and laboratory design. The units of analysis are the researchers and laboratory operators farmworkers production. It concludes with an analysis of a new mode of use of acid gas fields, which allows selecting liquid formulations and injection conditions for a given training (design treatments for acid fracturing), since the gelled acids are less efficient in terms of surface roughness that straight acids at the same concentration. The implementation of gelled acid to study the conditions downhole for accumulation of cake and erosion that influence the formation of wormholes in the fracture wall is recommended, since an increased permeability has an effect lower propagation speed in the wormhole.

Key words: Technical, acid gel, acid fracturing.

INTRODUCCIÓN

En Venezuela el 90% de las reservas de gas natural son de gas asociado. En sus yacimientos, una parte del petróleo existe en fase gaseosa, otra porción como líquido, y una tercera fase se encuentra en fase sólida o semisólida. Cada una de estas fases se han denominado: gas natural, petróleo crudo y bitumen natural.

Los yacimientos se clasifican según las rocas que lo forman, siendo los carbonáceos (calizas, dolomitas), uno de los yacimientos que presentan un gran reto de planificación y desarrollo de la capacidad técnica de Venezuela para que optimice los procesos de producción del gas natural. En este tipo de reservorio se suele emplear un mecanismo llamado fracturamiento ácido; El objetivo

de este tipo de tratamiento es inyectar ácido dentro de la fractura creada en la formación a una presión lo suficientemente alta para abrir fracturas naturales o para fracturar (romper) la formación.

Esquemáticamente una cantidad razonable de fluido –agua inicialmente– debe inyectarse con un caudal superior al que la matriz puede aceptar, con la finalidad de provocar un incremento en la presión lo suficientemente alta para sobrepasar los esfuerzos compresivos de la tierra y los esfuerzos tensionales de la roca. Hasta que la formación cede el paso por una ruptura y se forma una fractura. Luego debe inyectarse ácido para que reaccione con la formación creando canales de flujo que se extiendan en profundidad dentro de la roca y se mantengan abiertos cuando el pozo empiece a producir.

La pérdida excesiva de líquido se evita mediante el uso de ácidos gelificados o por bombeo de un lecho de fluido viscoso por delante del ácido. Mientras en el primer caso el ácido viscoso reduce la tasa de pérdida de fluido, en el segundo caso, el ácido de alta resistencia se emplea para erosionar algunos parches en la cara de la fractura donde se produce el grabado, con el riesgo de carcomer la

formación (wormholing, por sus siglas en inglés), y altas pérdidas de fluido.

ESTUDIO DE NÚCLEOS ROCOSOS

Células especiales han sido diseñadas para los estudios de pérdida de fluido. (2). Tres tipos de equipos se describen esquemáticamente a continuación. Estos son:

1. El núcleo hueco (Hollow Core): el fluido circula en el interior del núcleo a través de un agujero y la fuga se da radialmente, a veces se aplica el flujo en la dirección opuesta: desde el exterior del núcleo hasta el interior para aumentar el área superficial del volumen fluido; esta geometría ha sido recientemente utilizado para la evaluación de pérdidas de ácido.
2. La celda de ranura de flujo (Slot Flow Cell): el cilindro central se corta en dos mitades y el flujo se establece entre las dos mitades del núcleo. Tasas de reacción con ácido y la conductividad han sido estudiadas.
3. La célula tangencial (Tangential Cell): el fluido circula en una ranura paralela a la cara del núcleo y el flujo entra en el núcleo a una presión constante.

FORMACIÓN DE WORMHOLES Y PATRONES DE DISOLUCIÓN

La propagación ácida exhibe tres comportamientos. A una tasa de inyección muy baja, el consumo de ácido se produce en la cara del núcleo con la formación de un patrón de disolución muy superficial. A medida que se incrementa la tasa de inyección de ácido, los agujeros de gusano se empiezan a formar. Los wormholes siguen creciendo siempre que el ácido vivo se suministra a la punta del agujero. En algunos casos, el wormhole se desarrolla paso por paso. Esto se produce en un intervalo de flujo intermedio.

El patrón de disolución correspondiente es un agujero de gusano grueso posteriormente denominado el patrón pseudocompacto para distinguirla de la figura agujero de gusano ramificado mostrado a alta tasa de inyección de flujo (4) Para este rango de alta inyección, la velocidad de flujo corresponde al posteriormente denominado régimen de wormholing.

De esta manera, las tasas de propagación de ácido experimentan un nivel óptimo. La velocidad del fluido en la transición, llamada “velocidad óptima de flujo”, corresponde a la transición entre la pseudocompacta y los regímenes wormholing. Aunque óptimo se refiere al proceso de acidificación de la matriz, en este documento se utiliza la misma terminología. Finalmente, a tasas de flujo muy altas, extremadamente ramificado, patrones arborescentes de disolución se han observado.

PÉRDIDA DE FLUIDO (LEAKOFF)

Mientras que la tasa de propagación de ácido está relacionada con la formación del agujero de gusano dominante, ácido tasa de pérdida de fluido se espera que estar relacionado con la permeabilidad de la formación y al aumento de la permeabilidad resultante del patrón de agujero de gusano (figura 1).

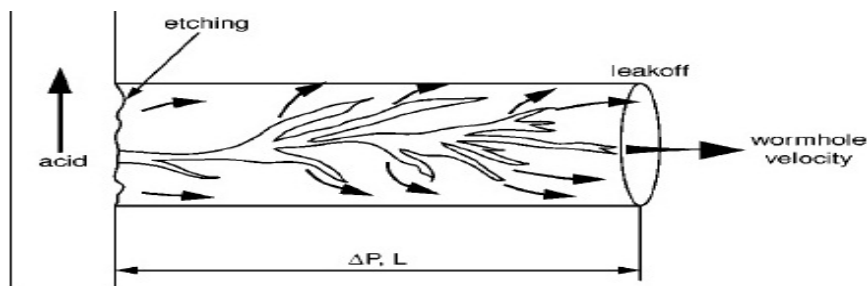


Figura 1. Evaluación de propagación. SPE-140138-PA-P. 2012

ÁCIDOS GELIFICADOS

La adición de un agente gelificante afectará al comportamiento ácido por varias razones. (2) Se cree comúnmente que los agentes gelificantes reducen el consumo del ácido debido a un coeficiente de difusión más bajo, sino que también puede hacerse hincapié en que el agente gelificante se reduce la pérdida de fluido ácido a través de las paredes de agujero de gusano (figura 1). El resultado neto de estos dos efectos se espera que sea un agujero de gusano de velocidad de propagación mayor. El agente viscoso reduce la tasa de fluido intersticial, que a la luz de los resultados anteriores puede disminuir la velocidad de propagación del ácido.

FRACTURAS ÁCIDAS

El objetivo de este tipo de tratamientos es inyectar ácido dentro de la fractura creada en la formación a una presión lo suficientemente alta para abrir fracturas naturales o para fracturar la formación. El método es ampliamente utilizado en dolomitas.

Se utilizan ácidos (acidificación) para grabar las caras de las fracturas promoviendo que ellas no sean parejas mediante la creación de canales o "worm-ho-

les" para prevenir que se cierren completamente en las formaciones carbonáticas. La fractura grabada actuará como un canal de alta conductividad para mover los fluidos hacia las cercanías del pozo con mayor facilidad.

La tomografía axial computarizada (TAC)

Tomografía computarizada, también denominada escáner, es una técnica de imagen médica que utiliza radiación X para obtener cortes o secciones de objetos anatómicos con fines diagnósticos. Esta tecnología permite al geólogo evaluar la estructura interna de la roca yacimiento para determinar las causas de los problemas de producción.

MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación puede definirse según (1), como un esfuerzo que se emprende para resolver un problema de conocimiento. La presente investigación estuvo orientada en primer lugar bajo la modalidad de investigación experimental y de laboratorio.

La presente investigación es de carácter experimental, ya que se hace un estudio de investigación en el que se manipulan deliberadamente una o más variables independientes (supuestas causas) para analizar las consecuencias

de esa manipulación sobre una o más variables dependientes (supuestos efectos) dentro de una situación de control para el investigador (5).

En el caso de esta investigación la variable manipulada es técnica de gelificación ácida en yacimientos de gas para analizar las consecuencias en la estimulación del fracturamiento ácido (variable dependiente), verificando la relación causa-efecto entre ambas variables. Se consideran como unidades de análisis a los investigadores y operadores de laboratorio, trabajadores del campo de producción, esto comprende una serie de estudios que se desean aplicar, como por ejemplo estudios tangenciales y de disolución.

Sistemáticamente atendiendo los criterios de (6), la presente investigación es llevada a cabo en cuatro fases fundamentales. La primera fase; con la que se busca confinar de manera teórica los distintos dispositivos y procedimientos básicos para realzarla. La segunda fase, consta de un método práctico que permite simular condiciones de estudio particulares deseadas, que permitan arrojar resultados. Finalmente, la tercera fase permite de manera clara y por observación directa, manipular resultados de análisis que permiten caracterizar patro-

nes de disolución de sustancias ácidas en núcleos de rocas, sin necesidad de manipular la misma variable mencionada.

RESULTADOS

Experimento, dispositivos y tecnología

Celdas especiales han sido diseñadas para los estudios de pérdida de fluido. Tres tipos de equipos se describen a continuación. Estos son:

- a. El núcleo hueco (hollow core): el fluido circula en el interior del núcleo a través de un agujero y la fuga se da radialmente, a veces se aplica el flujo en la dirección opuesta: desde el exterior del núcleo hasta el interior para aumentar el área superficial del volumen fluido; esta geometría ha sido recientemente utilizado para la evaluación de pérdidas de ácido.
- b. La celda de ranura de flujo (slot flow cell): el cilindro central se corta en dos mitades y el flujo se establece entre las dos mitades del núcleo. Tasas de reacción con ácido y la conductividad han sido estudiadas.
- c. La celda tangencial (tangential cell): el fluido circula en una ranura paralela a la cara del núcleo y el flujo entra en el núcleo a una presión constante.

El principal inconveniente del núcleo hueco (hollow core) y la celda de ranura de flujo (slot flow cell) es la pequeña distancia permitida para la filtración de ácido. Por otro lado, las células tangenciales han sido especialmente diseñadas para aceptar trayectorias más largas de flujo y se han utilizado con éxito para la evaluación de la pérdida de fluido en el fracturamiento convencional con fluidos. También han sido utilizados para examinar las propiedades de filtración de los fluidos de perforación.

En efecto, la celda de flujo tangencial está particularmente adaptada para la evaluación de los fluidos gelificados cuando tanto la filtración y la acumulación de costras de lodo inciden. Uno de los propósitos de este docu-

mento es el uso de tal equipo para fluidos ácidos y para hacer posible una evaluación de los ácidos gelificados en condiciones representativas de flujo en una pared o cara de la fractura.

EL EXPERIMENTO

El equipamiento de la celda tangencial se describe en la figura 2. La pieza central del aparato es de tipo tangencial, y el soporte de núcleo es de acero. La idea básica para el diseño de la célula es realizar mediciones mientras el fluido circula en la ranura. La penetración del ácido en el interior del núcleo se realiza mediante la aplicación de una presión diferencial (∇p) entre la entrada y la salida del núcleo perpendicularmente a la ranura de flujo.

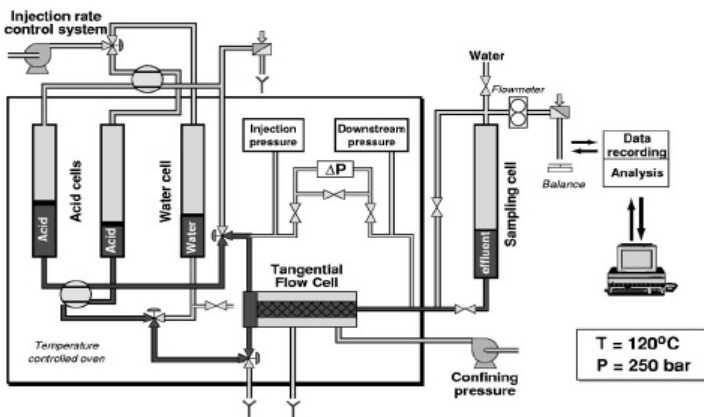


Figura 2. Esquema de la configuración tangencial

Fuente: (3).

El diseño de la célula es tal que el núcleo se coloca con su superficie entera al ras del ácido. El diámetro del núcleo es 5 cm y la longitud puede variar hasta 40 cm. Para todas las pruebas que se describen a continuación, el flujo de la ranura es de 50 ml/min. Una presión de confinamiento de 40bar se utiliza en la mayoría de los experimentos. En el lado efluente un regulador de contrapresión se ajusta para mantener el CO₂ producido durante la reacción química en la fase acuosa. Como por ejemplo, 180 bar se requiere cuando se utiliza 15% de HCl a 50 °C.

Dos células de fluido de acero inoxidable están montadas a ras alternativamente con agua o ácido. Un transductor de presión absoluta situado cerca de la entrada de la célula tangencial se utiliza para controlar la presión de entrada en el inicio del experimento. El arreglo de la válvula está diseñado para bloquear au-

tomáticamente la línea a la salida de la celda tangencial cuando el agujero de gusano abre paso.

Los datos registrados en un archivo de computadora incluyen la presión de entrada, la velocidad de flujo en la ranura, la presión diferencial entre la entrada y la salida del núcleo, las mediciones de la pérdida de fluido de volumen acumulativo como una función del tiempo, y la tasa de flujo a través el núcleo. La toma de datos se registra cada segundo.

Además, se utilizó una célula hassler para señalar el impacto de la metodología en los resultados de las velocidades de propagación del ácido en el agujero para el caso en que una costra de lodo se acumula en la cara del núcleo. Las propiedades de los medios porosos se presentan en la Tabla 1. El agente gelificante es un polímero comercial común sintético utilizado en la industria para los tratamientos de fracturamiento ácido.

Tabla 1
Propiedades del medio poroso

Naturaleza	Nombre	Porosidad (%)	Permeabilidad (md)
Caliza	Lavoux	0.22	2.1-2.9
Caliza	Estailadas	0.31	170-220
Dolomita	...	0.20	0.2-1.0

Fuente: Elaboración propia.

PROCEDIMIENTOS

La propagación ácida exhibe tres comportamientos. A una tasa de inyección muy baja, el consumo de ácido se produce en la cara del núcleo con la formación de un patrón de disolución muy superficial. A medida que se incrementa la tasa de inyección de ácido, los agujeros de gusano se empiezan a formar.

Los wormholes siguen creciendo siempre que el ácido se suministre a la punta del agujero. En algunos casos, el wormholes se desarrolla paso por paso. Esto se produce en un intervalo de flujo intermedio. El patrón de disolución correspondiente es un agujero de gusano grueso posteriormente denominado el patrón pseudocompacto para distinguirlo de la figura de agujero de gusano ramificada mostrada a alta tasa de inyección de flujo.

Para este rango de alta inyección, la velocidad de flujo corresponde al posteriormente denominado régimen de grabado (wormholing régimen). De esta manera, las tasas de propagación de ácido experimentan un nivel óptimo. La velocidad del fluido en la transición, llamada "velocidad óptima de flujo", corresponde a la transición entre la pseudocompacto y la de grabado. Aunque óptimo se refiere al proceso de

acidificación de la matriz, en este documento se utiliza la misma terminología.

Finalmente, a tasas de flujo muy altas, extremadamente ramificado, patrones arborescentes de disolución se han observado. Con respecto a este estudio, los agujeros de gusano altamente ramificados deben ser evitados y condiciones que conducen a la disolución compacta o wormholes gruesos de pequeña extensión son preferidos. Estos deben ser definidos para la formulación del fluido de ácido en relación con la inyección y las condiciones del yacimiento.

El ácido se consume por varios mecanismos: filtración a través de las paredes del agujero, el crecimiento en la punta agujero de gusano, y la extensión del diámetro del agujero. Dado que los resultados de la tasa de propagación de ácido de una combinación de estos diversos mecanismos, es extremadamente difícil predecir la variación de la velocidad de propagación de ácido incluso cuando sólo un parámetro, por ejemplo la temperatura, la velocidad de inyección, la viscosidad o de la concentración, es variado. Por lo tanto, las mediciones de referencia con ácidos puros (straight acids) son necesarias antes de la evaluación de la eficacia de cualquier sistema nuevo.

VELOCIDAD DE LA PROPAGACIÓN ÁCIDA

Las velocidades de propagación ácida para núcleos caliza tipo lavoux se derivan de experimentos a un flujo constante (figura 3). Las curvas representan la misma forma como ya se ha observado, es decir, un régimen pseudo-compacto a baja tasa de fluido intersticial (línea discontinua) y un régimen wormholing, a altas velocidades de fluido intersticial (línea continua).

En el régimen wormholing, es decir, a una velocidad de flujo alta, la tasa de propagación ácida aumenta significativamente con la concentración de ácido. Como ejemplo, la velocidad de propagación de ácido se multiplica por un factor de 6 entre las soluciones muy diluidas (0,7%) y las concentradas (17%).

La llamada “velocidad óptima de flujo” aumenta con la concentración, de forma que las mayores tasas de inyección son necesarias para alcanzar el régimen wormholing. Como ejemplo, a una tasa de inyección de fluido intersticial de 0,4cm/min, la disolución se produce en la región wormholing con una solución de ácido 7%, mientras que el aumento de la concentración de 17% conduce a una disolución pseudocompacto.

Un aumento de temperatura afecta débilmente la velocidad de propagación de ácido en la región wormholing, para las tasas altas de inyección de flujo (figura 4). Hay sólo un pequeño aumento de la velocidad de propagación de ácido con la temperatura. Sin embargo un aumento de temperatura tiene un fuerte efecto a bajas tasas de inyección de flujo. La llamada “tasa óptima de inyección” aumenta con la temperatura.

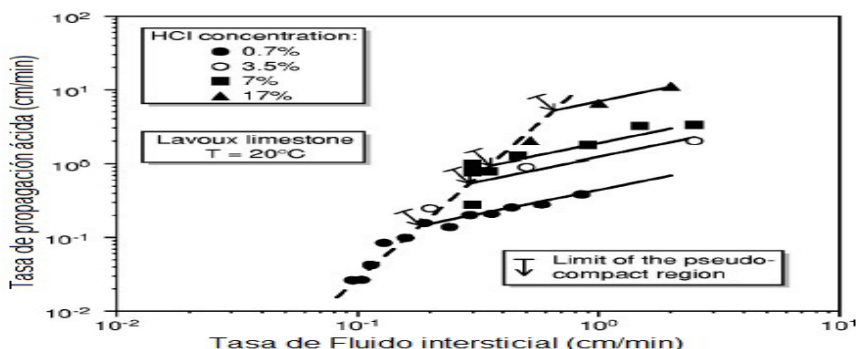


Figura 3. Efecto de la concentración de HCl en la tasa de propagación ácida
Fuente: (3).

Técnica de gelificación ácida en yacimientos de gas para mejorar la estimulación en el fracturamiento ácido

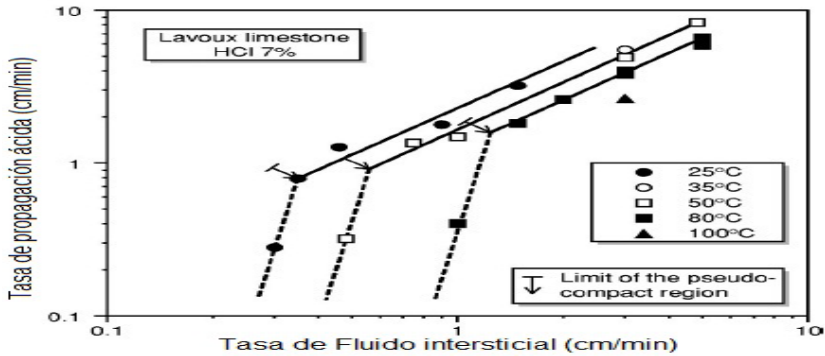


Figura 4. Efecto de la temperatura en la tasa de propagación ácida

Fuente: (3).

La comparación entre las tasas de propagación de ácidos con calizas lavoux de baja permeabilidad y estallades de alta permeabilidad muestra un desplazamiento de las curvas (figura 5). La velocidad de propagación de ácido es menor en el núcleo de permeabilidad más alta tanto en la región pseudocompacta como en la región wormholing. Para dolomita, existe también un cambio de los resultados obtenidos a 50 °C. Sin embargo, es más sencillo

que los mecanismos de wormholing a alta temperatura.

Estas observaciones son cualitativamente consistentes con los resultados publicados anteriormente. Revelan los complejos mecanismos de propagación de ácido en piedra caliza. En el régimen pseudocompacto, la velocidad del agujero de gusano es fuertemente disminuida por el consumo en las paredes del agujero. Dado que la reacción química es la transferencia de masa limitada, el consumo

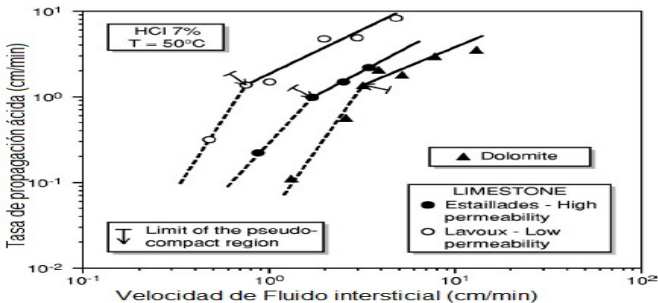


Figura 5. Efecto de la permeabilidad y la mineralogía

Fuente: (3).

de ácido es proporcional al coeficiente de difusión y de la concentración de ácido. Aumentando así la concentración aumenta el consumo de ácido con una extensión consiguiente de la región pseudo-compacto. La misma tendencia se observó para el efecto de la temperatura.

Al considerar fracturamiento ácido, el desarrollo de las figuras pseudocompactas de extensión limitada en la pared de la fractura son preferidas. Ellos son favorecidos por una baja velocidad del fluido que entra en la formación, es decir, un ∇P bajo entre la fractura y la formación. Se muestra que una alta temperatura, una alta concentración, y una alta permeabilidad limitan la propagación de la figura de agujero de gusano, siempre y cuando que el ∇P entre la fractura y la formación sea bajo.

Los resultados de los experimentos en la celda de flujo tan-

gencial. Wormholes: velocidad de propagación ácida. Los datos registrados durante un experimento con ácido gelificado en el dispositivo de célula tangencial se representan en la figura 6. En el fracturamiento ácido, la forma de las curvas de pérdida de fluido para los agentes gelificantes convencionales en agua se caracteriza por: (1) un aumento rápido del volumen al inicio del experimento que se refiere como el período de chorro, (2) una segunda etapa que corresponde a la acumulación de torta (cake), (3) una tasa de filtración constante del fluido a través del núcleo.

Las curvas de pérdida de fluido con geles ácidos no pueden ser interpretadas en términos de período de chorro y cake buildup como se muestra. Ellos muestran un aumento lineal en el volumen de pérdida de fluido en función del tiempo, desde los primeros minu-

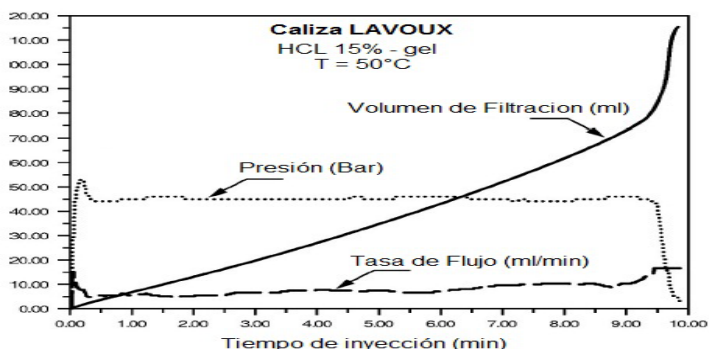


Figura 6. Datos recolectados del experimento tangencial

Fuente: (3).

Técnica de gelificación ácida en yacimientos de gas para mejorar la estimulación en el fracturamiento ácido

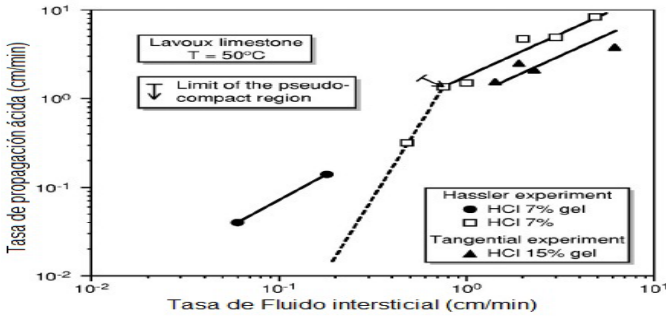


Figura 7. Comparación entre los efectos de los ácidos gelificados y straight en núcleos de caliza lavoux

Fuente: (3).

tos. Ni un chorro, ni una acumulación de torta se pueden distinguir.

En los experimentos tangenciales, las velocidades de propagación ácida son reportadas como una función de la velocidad de filtración (figura 7). Cuando altos gradientes de presión se aplican, correspondientes a las altas velocidades de filtración; la penetración del ácido gelificado se produce inmediatamente en el núcleo. Todos los experimentos dan avance excepto a un gradiente de presión bajo donde la velocidad de propagación de ácido es demasiado baja para avanzar más de 5 cm en 20 minutos.

Las velocidades de propagación de ácido son sólo ligeramente inferiores con el ácido gelificado en comparación con straight acids (en el alto rango de velocidad del fluido intersticial). En calizas estalladas de alta permeabilidad, no se encontraron diferencias en

las velocidades de agujero de gusano en experimentos a tasa de flujo constante y caída de presión constante (figura 8). Esto sugiere que no hay formación de torta en la superficie del núcleo.

Por último, considerando fracturamiento ácido, la comparación entre las velocidades de propagación wormholes debe hacerse sobre la base de una misma ∇P aplicación. Debido al efecto de la viscosidad, las velocidades intersticiales son mucho menor para los ácidos gelificados en comparación con los straight acids. Por lo tanto, el resultado neto de fracturamiento ácido es una velocidad de propagación agujero de gusano reducido en gran medida por la adición del agente gelificante. Por otra parte, cuando una torta se acumula en la cara de la fractura, hay un efecto drástico en la formación y propagación de agujero de gusano.

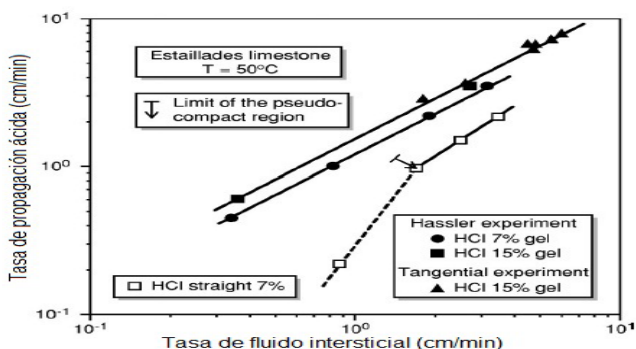


Figura 8. Comparación entre los efectos de los ácidos gelificados y straight en núcleos de caliza estallades

Fuente: (3).

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en esta investigación permitieron realizar las siguientes conclusiones en relación a los objetivos tratados, en relacionados con la propuesta de la técnica de gelificación ácida en yacimientos de gas para mejorar la estimulación en el fracturamiento ácido, en primer lugar se describieron los dispositivos y procedimientos experimentales empleados en la determinación del efecto del ácido en el núcleo de roca de los yacimientos de gas, estableciéndose que el principal inconveniente del núcleo hueco (hollow core) y la celda de ranura de flujo (slot flow cell) es la pequeña distancia permitida para la filtración de ácido.

Por otro lado, las células tangenciales han sido especialmente diseñadas para aceptar trayecto-

rias más largas de flujo y se han utilizado con éxito para la evaluación de la pérdida de fluido en el fracturamiento convencional con fluidos. También han sido utilizados para examinar las propiedades de filtración de los fluidos de perforación. Atendiendo los procedimientos se determina que la propagación ácida exhibe tres comportamientos. A una tasa de inyección muy baja, el consumo de ácido se produce en la cara del núcleo con la formación de un patrón de disolución muy superficial. A medida que se incrementa la tasa de inyección de ácido, los agujeros de gusano se empiezan a formar.

Además, se pudo definir el mecanismo de disolución de los ácidos mediante el empleo de una célula de flujo tangencial, la cual está particularmente adaptada para la evaluación de los fluidos

gelificados cuando tanto la filtración y la acumulación de costras de lodo inciden. Uno de los propósitos de esta investigación fue establecer una técnica para hacer posible una evaluación de los ácidos gelificados en condiciones representativas de flujo en una pared o cara de la fractura.

Por último, se caracterizó la extensión de la picadura (wormholing) en los núcleos de los yacimientos de gas, las tasas ba-

jas de inyección producen un valor pseudocompacto a una velocidad de propagación baja. Por el contrario, las tasas de inyección altas dan patrones de agujero de gusano que se desarrollan continuamente a medida que la inyección avanza; en el primer caso, el agujero de gusano es grueso con ramificaciones muy pequeños y en el segundo caso, el agujero de gusano tiene un árbol bien estructurado.

LITERATURA CITADA

- (1) Arias, F. (2006). El proyecto de investigación. Quinta edición. Ediciones Episteme.
- (2) Alarcon, I. Vázquez, D. y Hurtado, J. (2005). Ensayos de permeabilidad usando el permeámetro de pared flexible. (astm d5084-90).
- (3) Espinoza, C. (2004). Sociedad de ingenieros petroleros. Tercera Edición.
- (4) Escobar, M. (2006). Proceso de perforación. CIED PDVSA. Primera versión.
- (5) Hernández, R. Fernández, C. Y Baptista, P. (2006). Metodología de la investigación. Tercera Edición. D.F. McGraw-Hill interamericana, S.A.
- (6) Méndez, C. (2003). Metodología. Diseño y desarrollo del proceso de investigación. Colombia. Ediciones McGraw-Hill. Tercera Edición.