

IMPLEMENTACIÓN DE PROPANTES ULTRALIVIANOS EN EL FRACTURAMIENTO HIDRÁULICO DE POZOS

Daniela Serrano-Serrano¹, César-Augusto Pineda-Gómez²,
Reinel Corzo-Rueda³, Rubén-Darío Castillo-Núñez⁴

RESUMEN

Uno de los modelos de trabajo más empleados para suplir la creciente demanda de petróleo a nivel mundial se basa en la estimulación local de pozos productores, donde se busca reducir el daño alrededor de las perforaciones y aumentar el área disponible de flujo; entre estas técnicas se destaca el fracturamiento hidráulico, aplicación en la que se inducen una serie de fracturas en la formación de interés mediante la inyección de un fluido a alta presión, acompañado de un material granular que actúa como agente de soporte de las fracturas.

En este trabajo se estudia y evalúa el uso de diversos propantes ultralivianos como agentes de sostén de fracturas hidráulicas, se determinan y analizan propiedades físicas de estos materiales a nivel de laboratorio bajo diversos escenarios de trabajo.

A partir de estos resultados, integrados a información técnica identificada en otros estudios, se elabora una metodología estructurada donde se establecen criterios y factores limitantes para su selección.

Palabras claves: Fracturamiento hidráulico, Propantes ultralivianos, Fractura, Metodología de laboratorio.

IMPLEMENTATION OF ULTRALIGHT PROPPANTS IN HYDRAULIC FRACKING

ABSTRACT

One of the most common work model used to contribute to the oil supply is based in the local stimulation of producing wells, where is intended to minimize the skin around the perforation and increase the flow available area. Within these techniques the hydraulic fracturing stands out, in which a series of fractures are induced in the net pay by the injection of a high pressured fluid and a granular material.

This work studies and evaluates the use of different ultralight proppants as supporting agents in hydraulic fractures, physical properties of these materials are determined and analyzed in the laboratory to prove different work scenarios.

From the results and the collected data from other studies, a structured methodology is designed with established criteria and limiting factors to make a conscious choice.

Keywords: Hydraulic fracturing, Ultra lightproppants - Ultra light weighted proppants, Fracture, Lab methodology.

1. Ingeniera de Petróleos. Universidad Industrial de Santander, UIS. Bucaramanga, Colombia.

2. Magister (C) Ingeniería de Hidrocarburos. Universidad Industrial de Santander, UIS. Bucaramanga, Colombia.
E- mail: cpineda@uis.edu.co

3. Magister en Ingeniería de Hidrocarburos. Instituto Colombiano del Petróleo, ICP – ECOPEPETROL S.A. Piedecuesta, Colombia. E- mail: Reinel.corzo@ecopetrol.com.co

4. Ingeniero de Petróleos. Instituto Colombiano del Petróleo, ICP – ECOPEPETROL S.A. Piedecuesta, Colombia.
E- mail: Ruben.castillo@ecopetrol.com.co

1. INTRODUCCIÓN

El fracturamiento hidráulico es un tratamiento de estimulación diseñado para crear una serie de canales conductivos en la formación, con el fin de obtener un mayor índice de productividad del pozo. Estos canales se obtienen mediante la inyección de fluidos a presiones superiores a los esfuerzos locales de la formación, acompañada de material apuntalante o de sostén para ser depositado dentro del sistema. En el momento en que los esfuerzos de cierre comienzan a actuar sobre la fractura inducida, el material propante debe soportar y mantener abierto el canal conductivo creado, permitiendo una mayor capacidad de flujo desde el yacimiento hacia la cara del pozo.

La eficiencia del proceso depende sustancialmente de la correcta integración de análisis geomecánicos del sistema (magnitud y orientación de esfuerzos) y de las características físicas del material a ser empleado como soporte, del que se pueden distinguir dos grandes grupos: convencionales y ultralivianos.

Si bien, la implementación de materiales con bajas densidades no ha sido empleada a mayor escala debido a que su resistencia no suele ser suficiente para mantener abierta la fractura, recientes investigaciones han permitido el desarrollo de nuevos materiales ultralivianos con características alentadoras para ser incorporados en condiciones operacionales cada vez más exigentes [1].

En el presente trabajo se muestra un completo análisis de las propiedades físicas de estos materiales a nivel de laboratorio bajo diversos escenarios de operación, los cuales se integran finalmente en una metodología práctica para evaluar su implementación en operaciones de fracturamiento de pozos.

2. DESCRIPCIÓN DE LA TECNOLOGÍA

El material de soporte más utilizado en la industria petrolera para operaciones de fracturamiento hidráulico, es la arena. No obstante, existen más de cincuenta tipos de propantes según tamaños y composiciones. El siguiente esquema muestra las dos principales categorías en las que se pueden agrupar los materiales de soporte: naturales y elaborados.



Figura 1. Clasificación de materiales de soporte de fracturas hidráulicas. Fuente: El autor

Los propantes artificiales de tipo convencional pueden encontrarse en distintos tamaños y aunque la mayoría de ellos son elaborados con materiales cerámicos, muchas veces son sometidos a recubrimiento con resina para aumentar su resistencia a los esfuerzos de cierre de la fractura. En la figura 2 se presentan los rangos típicos de aplicación para estos materiales.

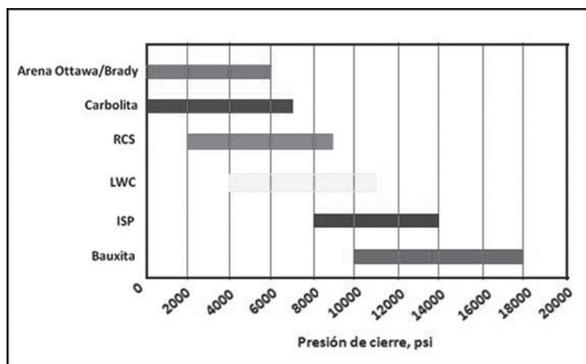


Figura 2. Rangos de resistencia a los esfuerzos de cierre de la fractura para propantes tamaño 20/40. Fuente: Modificada de “Modern Fracturing Enhancing Natural Gas Production”, Michael J. Economides (2007).

2.1 PROPANTES ULTRALIVIANOS

Los propantes ultralivianos (Ultralight-Weight Proppants - ULWP), son nuevos materiales de soporte manufacturados, con una densidad baja (no mayor a 2.02 g/cm³), diámetros promedio de partícula bajos y menores velocidades de sedimentación [2]. Los principales tipos de propantes ultralivianos se describen a continuación:

ULWP - 1.25: Son cáscaras de nuez modificadas químicamente, recubiertas y endurecidas con resina, la cual penetra el espacio poroso y enreda la estructura del cascarón aumentando la resistencia total de la partícula. Estudios previos de laboratorio realizados por la universidad de Oklahoma [3], muestran que al someter a presión una

partícula de cáscara de nuez sin recubrir, ésta presenta un punto de ruptura mucho menor que al ser recubierta con algún tipo de resina. En la figura 3 se muestra la estructura porosa de la cáscara de nuez a escala microscópica antes y después del recubrimiento con resina, así como el aspecto de las partículas ULW-1.25 a mayor escala.

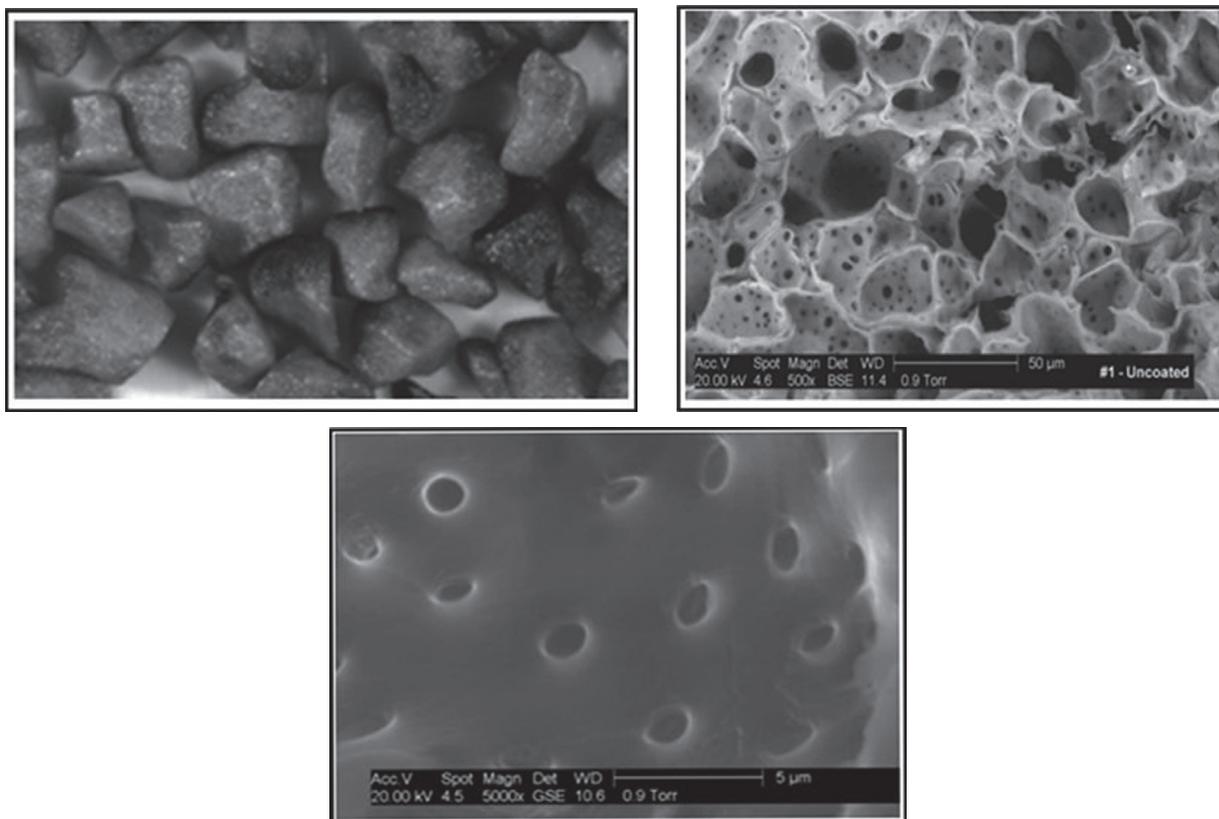


Figura 3. Propante ultraliviano 1.25: (Arr. Izq.) Escala normal; (Arr. Der.) Estructura porosa antes del recubrimiento con resina; y (Ab.) después del recubrimiento. Fuentes: Economides (2007) y Stephenson (2005).

ULWP - 1.08: Son materiales tratados térmicamente (nanocompuestos termoestables) que han sido introducidos recientemente como propantes ultralivianos (ver figura 4). Actualmente son usados para aplicaciones de fracturas mono capa parcial, donde se obtiene la máxima capacidad de flujo, aún por encima de multicapas de propante con las que se obtienen mayores anchos de fractura. Debido a su baja densidad, proporcionan un mayor volumen de paquete de propante por unidad de masa, guardando una relación 1:2.5 con respecto a la arena convencional, lo cual se traduce en una ventaja al momento de transportar y colocar el propante a lo largo de la fractura.

ULWP - 1.75: Son partículas cerámicas porosas que usan una novedosa tecnología de resina, la cual recubre

y protege el espacio poroso de la invasión de líquidos. Estos materiales emplean el aire encapsulado dentro de la porosidad del cerámico para lograr una mayor flotabilidad [3]. El proceso de recubrimiento está diseñado para permanecer en el diámetro exterior de la partícula sin penetrar en ella; si la invasión de líquidos ocurre, la gravedad específica del material se vería afectada e incrementaría considerablemente.

ULWP - 2.02: Son partículas cerámicas porosas recubiertas con resina, similares a las partículas ULW-1.75, pero con una mayor gravedad específica ($GE=2.02$). Constituyen el tipo de propante ultraliviano con mayor densidad. Una ilustración de este tipo de material es presentada en la figura 4, donde se observa un alto grado de redondez y esfericidad de las partículas.

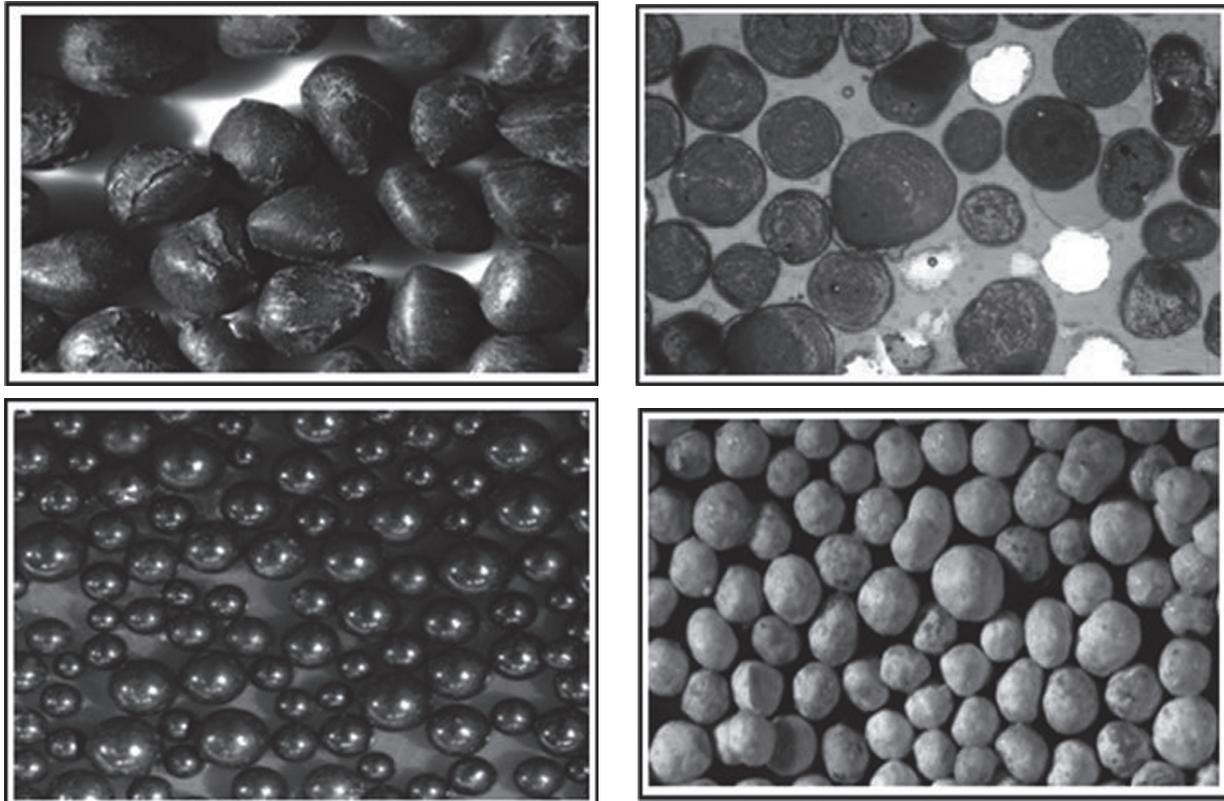


Figura 4. (Arr. Izq.) Propante ultraliviano 1.50; (Arr. Der.) Partículas ULW-175 recubiertas con resina; (Ab. Izq.) Propante ultraliviano 1.08; (Ab. Der.) Propante ultraliviano 2.02. Fuentes: Economides (2007) y Stephenson (2005).

2.2 DIFERENCIAS ENTRE PROPANTES CONVENCIONALES Y ULWP.

En operaciones de fracturamiento hidráulico, ocasionalmente se presentan distribuciones poco uniformes del material propante dentro de la fractura, debido a las altas tasas de sedimentación de las partículas.

Matemáticamente, esta cualidad se puede valorar mediante la ley de Stokes, la cual se muestra en la ecuación 1:

$$V = 1.15 * 10^3 \left(\frac{d_{prop}^2}{\mu_{fluido}} \right) (GE_{prop} - GE_{fluido}) \quad (1)$$

Se puede decir que la velocidad de sedimentación tiene una relación directa con la gravedad específica y el diámetro de las partículas. Es decir, a mayor tamaño y gravedad específica del material propante, más rápidamente caerá al ser inyectado en la fractura. La figura 5 y la tabla 1 presentan los valores de gravedad específica para cada tipo de propante y una comparación entre las velocidades de caída para propantes convencionales y ultralivianos, respectivamente [2].

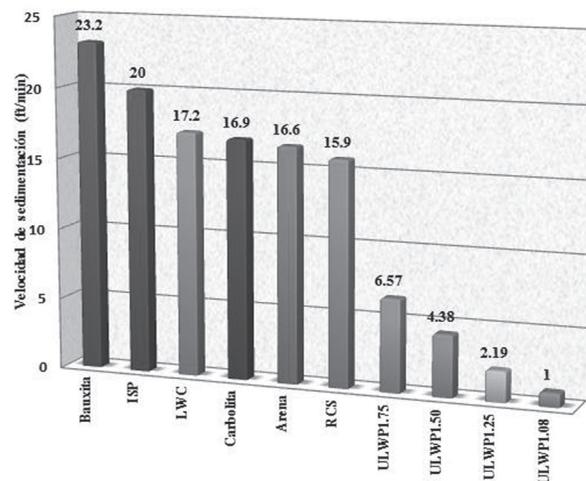


Figura 5. Velocidad de sedimentación para diferentes tipos de propantes en agua. **Fuente:** El autor.

Los valores registrados fueron determinados utilizando material propante convencional y ultraliviano tamaño 20/40. Es pertinente resaltar que al utilizar otro tamaño de propante, se obtendrán valores diferentes en las tasas de caída de las partículas, aún cuando se trate del mismo tipo de material.

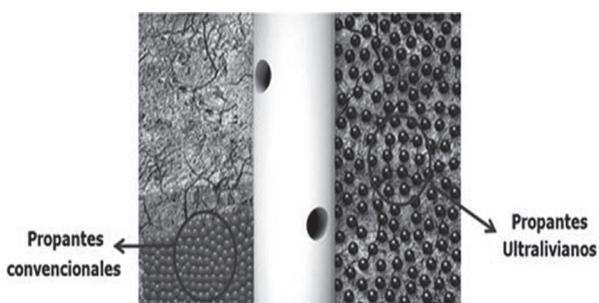
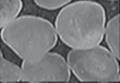
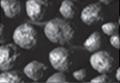
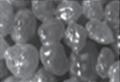
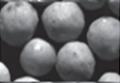


Figura 6. Distribución del material propante en una fractura hidráulica. **Fuente:** el autor.

Tabla 1. Gravedad específica para diferentes tipos de propantes.

	ULWP's	Convencionales	
	ULWP-1.25 GE=1.25	Arena GE=2.65	
	ULWP-1.08 GE=1.08	Bauxita GE=3.55	
	ULWP-1.50 GE=1.50	RCS GE=2.55	
	ULWP-1.75 GE=1.75	LWC GE=2.71	
	ULWP-2.02 GE=2.02	Carbolita GE=2.714	

Fuente: El autor.

Como se puede observar en la figura 6, la cualidad clave de los propantes ultralivianos está en su baja gravedad específica, que les permite ser transportados más profundo dentro del canal conductivo, distribuirse con una mayor uniformidad y proporcionar mayor longitud efectiva de fractura.

Un estudio adelantado por Petrobras y BJ Services en que se realizaron pruebas de flujo para observar el comportamiento y distribución de diferentes propantes a medida que son bombeados, demostró que los materiales ultralivianos proporcionan menores alturas de fractura empaquetada pero mejores distribuciones de material, comparado con propantes convencionales [4]. Adicionalmente, éstos ULWP pueden ser transportados a bajas presiones de bombeo, lo cual los convierte en excelentes candidatos para operaciones de fracturamiento hidráulico.

Por otra parte, los bajos valores de gravedad específica inciden en la cantidad de masa necesaria para llenar la fractura hidráulica creada; si se tiene una cantidad de masa de propante convencional para llenar un volumen

determinado de fractura, ésta también puede ser llenada por material ultraliviano utilizando menor cantidad de masa que la que se usa convencionalmente [5]; es así como el término “densidad Bulk” adquiere importancia en el estudio de los materiales de sostén ultralivianos.

En la tabla 1 se muestran diferentes tipos de material propante con sus respectivos valores de “densidad bulk”.

Tabla 1. Densidad bulk para propantes convencionales y ultralivianos.

Propante	Densidad Bulk (gr/cm ³)	Densidad Bulk (lb/ft ³)
Arena	2.65	103
Bauxita	2	124.85
RCS	1.53	95.51
LWC	1.57	98
ISP	1.88	117.36
Carbolita	1.57	98
ULWP-1.08	0.66	41.2
ULWP-1.25	0.74	46.19
ULWP-1.50	0.87	54.31
ULWP-1.75	1.25	78

Fuente: El autor

Ventajas de la tecnología

- Tienen bajas tasas de sedimentación, permitiendo una distribución más uniforme del material, comparados con los agentes convencionales.
- Debido a su baja densidad, los propantes ultralivianos requieren menor cantidad de masa para llenar un mismo volumen de fractura.
- Pueden ser transportados más profundo dentro de la fractura, proporcionando mayor longitud de fractura empaquetada.
- Al aumentar la longitud de fractura empaquetada, se tiene un área mayor de la zona productiva expuesta por lo que se incrementa la productividad en yacimientos de baja permeabilidad.
- Pueden ser transportados por espumas y geles ligeros. Además, son compatibles con la mayoría de los fluidos de fractura.

- Reducen la complejidad de los fluidos de fractura, permitiendo la utilización de fluidos con menores viscosidades, menores concentraciones de aditivos y reduciendo los daños ocasionados por el gel.
- No requieren altas velocidades de flujo para ser transportados, lo que permite reducir los caudales de bombeo, las potencias requeridas y como consecuencia, los costos del tratamiento.

Limitaciones de la tecnología

- No son recomendables para tratamientos con presiones de cierre mayores a 8000 psi.
- En algunas variedades de estos materiales, si la temperatura estática de fondo de pozo es inferior a 110°F (43°C) se requiere de un nuevo recubrimiento con resina.

3. EVALUACIÓN DE PROPANTES ULTRALIVIANOS CON BASE EN LA NORMA API RP 19C ISO 13503-2:2008 [6].

Para esta fase se desarrollaron diversas pruebas de laboratorio en el Instituto Colombiano del Petróleo - ICP, con base en la norma API RP 19C/ISO 13503-2:2008, diseñada originalmente para propantes convencionales. Las muestras de propante corresponden a cuatro tipos de materiales de soporte: ultraliviano 1.25 #14/30, ultraliviano 1.25c #14/30, ultraliviano 1.75 #20/40 y ultraliviano 1.08 #14/40. Las pruebas desarrolladas incluyen: tamizado, diámetro promedio de partículas, esfericidad, redondez, densidad bulk, turbidez, solubilidad en ácido y test de aplastamiento. Los resultados de las pruebas y su respectivo análisis se muestran a continuación.

3.1 TAMIZADO: DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULAS

Esta prueba se realiza con el fin de verificar si las partículas de propante se encuentran en el tamaño especificado de la muestra. Las tablas 2 y 3 presentan los resultados obtenidos para el análisis de granulometría de los propantes evaluados.

Tabla 2. Resultados prueba de tamizado ultraliviano 1.25 y 1.25c #14/30.

Descripción		ULWP 1.25 #14/30		ULWP 1.25c #14/30	
No. De Malla	Tamaño grano (um)	% Retenido	% Acumulado	% Retenido	% Acumulado
12	1700	0.030	0.030	0.000	0.000
14	1400	5.868	5.898	0.010	0.010
16	1180	27.432	33.330	8.958	8.968
20	850	55.253	88.583	72.555	81.523
25	710	0.290	88.873	7.898	89.421
30	600	7.768	96.641	7.508	96.929
40	425	1.859	98.500	1.850	98.779
Pan	<425	0.800	99.300	0.550	99.329
% Retenido entre tamices designados		99,30 %		99,30 %	

Fuente: Instituto Colombiano del Petróleo.

Tabla 3. Resultados prueba de tamizado ultraliviano 1.08 #14/40 y 1.75 #20/40.

Descripción		ULWP 1.08 #14/40		ULWP 1.75 #20/40	
No. De Malla	Tamaño grano (um)	% Retenido	% Acumulado	% Retenido	% Acumulado
12	1700	0.000	0.000	0.000	0.000
14	1400	0.060	0.060	0.000	0.000
16	1180	0.670	0.730	0.040	0.040
20	850	48.041	48.771	27.175	27.215
25	710	0.420	49.191	0.410	27.625
30	600	38.277	87.468	70.446	98.071
40	425	4.707	92.175	1.240	99.311
50	300	6.566	98.741	0.070	99.381
Pan	<300	0.800	99.541	0.120	99.501
% Retenido entre tamices designados		99,54 %		99,50 %	

Fuente: Instituto Colombiano del Petróleo.

Según los resultados obtenidos se puede observar que todas las muestras cumplen con los parámetros de calidad exigidos; según la normativa API, después del tamizado se debe recolectar por lo menos el 95.5% de la muestra inicial, y en este caso se recolectó más del 99 % para todas las variedades de material evaluado.

Paralelo a esto, en el primer tamiz no debe quedar retenido más del 0.1% en peso de la muestra, y en el último no más del 1.0%; para cada una de las cuatro muestras, el porcentaje en peso del material retenido

en la primera y en la última malla presentaron un valor inferior al establecido, verificando de esta manera que las muestras de propante pertenecen a los tamaños especificados previamente y son representativas de las variedades a probar.

3.2 DIÁMETRO PROMEDIO DE PARTÍCULA.

Los resultados de esta prueba permiten determinar el diámetro promedio de todas las partículas de la muestra de propante utilizada. Es calculado por medio de la ecuación 2:

$$d_{promedio} = \frac{\sum n*d}{\sum n} \quad (2)$$

donde d es el diámetro de tamaño intermedio de partícula y n es la frecuencia de ocurrencia (fracción másica retenida).

En los resultados mostrados en la Tabla 4, se puede observar que las partículas más pequeñas corresponden al propante ultraliviano 1.75 tamaño 20/40, ya que las partículas tienen un diámetro de 0.171 μm en promedio. En contraste, las partículas de propante más grandes corresponden al ultraliviano 1.25c tamaño 14/30 con un diámetro de 0.284 μm . Sin embargo, al comparar los valores de diámetro promedio para las cuatro muestras evaluadas, se observa que no hay una diferencia significativa en estas medidas (son del orden de micras) y por lo tanto los resultados permiten considerar que esta medida no compromete la calidad de los materiales en estudio [7].

Tabla 4. Diámetro promedio de propantes evaluados.

Descripción			ULWP 1.08 #14/40		ULWP 1.25 #14/30		ULWP 1.25c #14/30		ULWP 1.75 #20/40	
Rango de malla	Intervalo tamaño de partícula (um)	Tamaño intermedio entre mallas, d (um)	Fracción másica retenida, n	Diámetro Promedio (um)	Fracción másica retenida, n	Diámetro Promedio (um)	Fracción másica retenida, n	Diámetro Promedio (um)	Fracción másica retenida, n	Diámetro Promedio (um)
12 a 14	1700 a 1400	300	0.06	216	0.03	200	0.01	284	---	171
14 a 16	1400 a 1180	220	0.67		5.87		8.96		---	
16 a 20	1180 a 850	330	48.04		27.43		72.56		27.18	
20 a 25	850 a 710	140	0.42		55.25		7.9		0.41	
25 a 30	710 a 600	110	38.28		0.29		7.51		70.45	
30 a 40	600 a 425	175	4.71		7.77		1.85		1.24	
40 a 50	425 a 300	125	0.82		1.86		0.55		0.07	
50 a 60	300 a 250	50	6.57		---		---		---	
Total			99.57		98.5		99.34		99.35	

Fuente: Instituto Colombiano del Petróleo.

3.3 ESFERICIDAD Y REDONDEZ

Esta prueba tiene como objetivo evaluar qué tanto se aproxima la partícula de propante a una esfera (esfericidad) y tener una medida relativa de la forma de las esquinas y curvaturas de la partícula (redondez).

La esfericidad y redondez son características muy importantes en el momento de analizar la efectividad de los propantes en operaciones de fracturamiento hidráulico. Si se tienen valores altos, el paquete de propante que soportará la fractura tendrá mayor facilidad para que los

fluidos se desplacen desde el yacimiento hasta la cara de pozo pues tienen más espacio en el canal creado para poder fluir. Por el contrario, si las partículas son angulares, se hará más tortuoso el camino que deben seguir los fluidos del yacimiento para llegar a la cara de pozo [8].

Fotografías de veinte granos tomados al azar de cada muestra de material propante en estudio, son mostradas en las figuras 7 y 8. Para complementar, la tabla 5 presenta los respectivos valores de redondez y esfericidad al comparar cada grano de la muestra con el diagrama visual de Krumbien/Sloss.

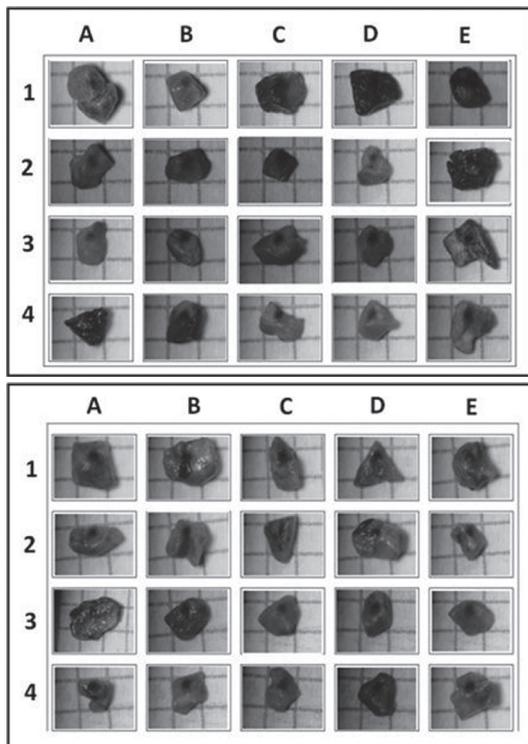


Figura 7. Arr. Fotografía granos ULWP 1.25. Ab. Fotografía granos ULWP 1.25c. Fuente: Instituto Colombiano del Petróleo.

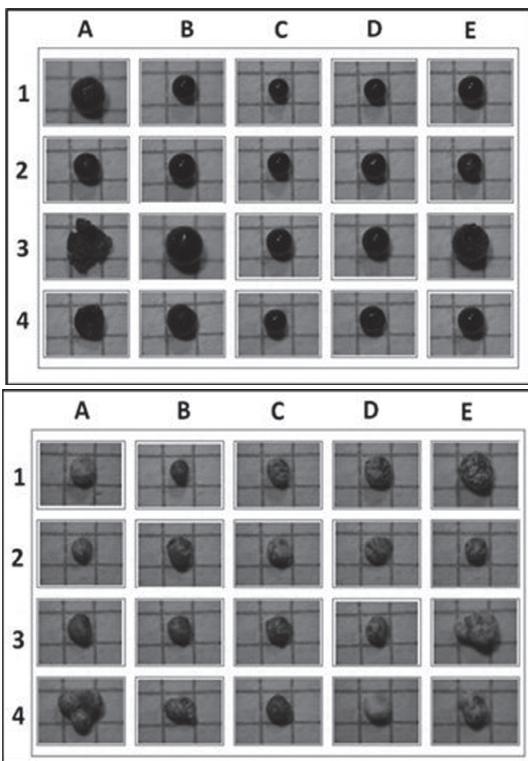


Figura 8. Arr. Fotografía granos ULWP 1.08. Aba. Fotografía granos ULWP 1.75. Fuente: Instituto Colombiano del Petróleo.

Aunque la norma API RP 19C ISO 13503-2:2008 no establece un parámetro comparativo para el control de calidad de la redondez y esfericidad de los propantes, según los resultados experimentales obtenidos se hace evidente que los materiales ultralivianos de gravedad específica 1.08 y 1.75 tienen un alto grado de redondez y esfericidad, comparados con las otras dos muestras de propantes analizados. Los ultralivianos 1.25 y 1.25c muestran una pobre calidad en los valores de redondez y esfericidad, lo cual indica que, según este estudio, para operaciones de fracturamiento hidráulico puede resultar más efectivo utilizar material de soporte ultraliviano 1.08 o 1.75.

Tabla 5. Esfericidad y redondez ULWP 1.25, 1.25c, 1.08, 1.75.

CELDA	ULWP 1.25		ULWP 1.25c		ULWP 1.08		ULWP 1.75	
	Esfericidad	Redondez	Esfericidad	Redondez	Esfericidad	Redondez	Esfericidad	Redondez
1-A	0.9	0.3	0.9	0.1	0.9	0.9	0.9	0.7
1-B	0.9	0.1	0.7	0.1	0.9	0.9	0.9	0.5
1-C	0.7	0.5	0.3	0.3	0.9	0.9	0.9	0.7
1-D	0.7	0.3	0.5	0.1	0.9	0.9	0.9	0.5
1-E	0.9	0.5	0.7	0.5	0.9	0.9	0.9	0.7
2-A	0.7	0.1	0.3	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
2-B	0.7	0.5	0.7	0.3	0.9	0.9	0.9	0.7
2-C	0.9	0.1	0.5	0.1	0.9	0.9	0.9	0.5
2-D	0.7	0.5	0.5	0.3	0.9	0.9	0.9	0.5
2-E	0.3	0.5	0.7	0.1	0.9	0.9	0.9	0.9
3-A	0.5	0.3	0.5	0.7	0.7	0.1	0.7	0.9
3-B	0.5	0.5	0.9	0.1	0.9	0.9	0.9	0.9
3-C	0.7	0.3	0.7	0.5	0.9	0.9	0.9	0.3
3-D	0.5	0.7	0.5	0.5	0.9	0.9	0.9	0.5
3-E	0.5	0.7	0.5	0.3	0.9	0.7	0.7	0.5
4-A	0.5	0.1	0.7	0.3	0.9	0.7	0.9	0.3
4-B	0.7	0.1	0.7	0.3	0.9	0.5	0.7	0.3
4-C	0.7	0.3	0.7	0.3	0.9	0.9	0.9	0.5
4-D	0.7	0.1	0.5	0.5	0.9	0.9	0.9	0.7
4-E	0.3	0.3	0.7	0.1	0.9	0.9	0.7	0.7
PROM.	0.7	0.3	0.6	0.3	0.9	0.8	0.9	0.6

Fuente: Instituto Colombiano del Petróleo.

3.4 “DENSIDAD BULK”

Representa la densidad aparente del material, y se calcula como la relación matemática entre la masa de material propante que ocupa un volumen de 100 ml. La figura 9 muestra los valores de densidad obtenidos para cada material evaluado, al registrar la masa de propante necesaria para llenar una pipeta graduada con un volumen de 100 ml.

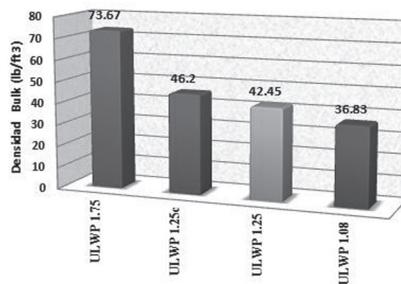


Figura 9.- “Densidad bulk para muestras evaluadas”. Fuente: Instituto Colombiano del Petróleo.

Con esta prueba se puede verificar que una de las ventajas de los propantes ultralivianos es la baja cantidad de masa de propante necesaria para llenar un volumen determinado. Al comparar los valores de densidad bulk de las muestras analizadas, se puede decir que, para llenar un volumen de 100 ml, se necesitan 73.67 gramos de ultraliviano 1.75, o 46.20 gramos de ultraliviano 1.25c, o 42.45 gramos de ultraliviano 1.25 o, por último, 36.83 gramos de ultraliviano 1.08. Si bien, el propante ultraliviano 1.08 es el material que menos cantidad de masa necesita para llenar un volumen determinado, el valor de densidad bulk para todas las muestras evaluadas es menor que para propantes convencionales, lo cual permite concluir que todos los propantes ultralivianos proporcionan una reducción en cantidad de masa y que en general, a mayor gravedad específica del material propante, mayor requerimiento de masa del mismo para llenar un volumen determinado de fractura.

3.5 TURBIDEZ

La prueba de turbidez se basa en la observación de la falta de transparencia de un líquido, debido a la presencia de partículas de propante en suspensión.

Según los resultados obtenidos para las cuatro muestras evaluadas, se puede decir que la evaluación de turbidez es bastante satisfactoria, ya que en todos los casos los valores fueron inferiores a 250 NTU (Unidades Nefelométricas de Turbidez), valor máximo establecido por la norma para materiales de soporte de fracturas hidráulicas.

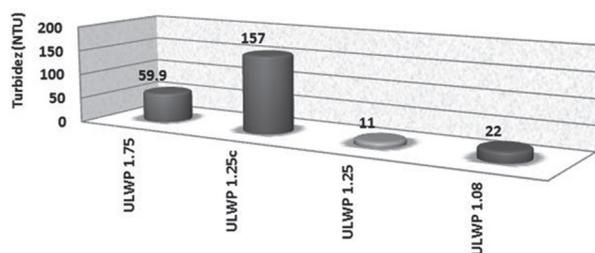


Figura 10. “Turbidez de los propantes evaluados”. Fuente: Instituto Colombiano del Petróleo.

Este parámetro deber ser considerado en el momento de elegir el tipo de material propante para el tratamiento, pues el valor de turbidez afecta la calidad del fluido de transporte. En otras palabras, cuanto más turbio pueda estar el fluido de transporte, menor será la calidad del mismo durante la operación.

3.6 SOLUBILIDAD EN ÁCIDO

Esta prueba se realiza con el objetivo de determinar la conveniencia de uso del material propante en aplicaciones donde puede entrar en contacto con ácidos; es un indicativo de la cantidad de materiales solubles presentes en el material de sostén. El método utilizado para determinar la solubilidad en ácido es recomendado en la norma API RP 19C ISO 13503-2:2008 en la cual se utiliza una solución de HCl y HF. En la tabla 6 se registran los valores resultantes de solubilidad en ácido para las cuatro muestras de material propante evaluadas.

Tabla 6. Solubilidad en ácido en las muestras evaluadas.

Tipo ULWP	1.08	1.25	1.25c	1.75
% en peso soluble en ácido	0.62	1	1.71	6.95

Fuente: Instituto Colombiano del Petróleo.

La norma API RP 19c no define un parámetro de calidad o patrón de referencia para medir y comparar valores de solubilidad en ácido para materiales de soporte. Sin embargo, al observar la tabla 6 se puede concluir que el porcentaje en peso del material soluble en ácido es bajo, lo cual indica que solo una pequeña parte de estos materiales podrán disolverse en productos ácidos utilizados con anterioridad en procesos de limpieza y reacondicionamiento de pozos. Por lo tanto, los resultados son satisfactorios para los propantes evaluados.

3.7 APLASTAMIENTO (CRUSHING)

Esta prueba se realiza con el fin de determinar la presión a la cual el material propante muestra excesiva generación de finos (mayor al 30%) y a partir de estos resultados, establecer los rangos de presión para la aplicación de cada tipo de propante en estudio. La prueba de aplastamiento es una de las más importantes en el momento de elegir el propante adecuado para una operación de fracturamiento hidráulico. De hecho, esta prueba permite establecer el rango de aplicación de cada material propante con base en las presiones de confinamiento que soporta, sin quebrarse o generar altas cantidades de finos.

A continuación se muestran los resultados de la prueba de aplastamiento para cada muestra de propante al ser sometidas a presiones desde 1000 hasta 9000 psi.

Tabla 7. Porcentaje de finos generados para el material de soporte evaluado.

Descripción	% EN PESO DE FINOS GENERADOS			
	ULWP 1.08	ULWP 1.25	ULWP 1.25c	ULWP 1.75
1000	1.396	0.298	0.055	0.034
2000	1.466	0.357	0.109	0.103
3000	4.537	0.595	0.109	0.379
4000	0.907	0.357	0.274	1.379
5000	5.654	0.476	0.438	3.448
6000	2.722	0.536	0.383	5.828
7000	1.486	0.536	0.547	7.31
8000	0.349	N/A	N/A	N/A
9000	0.838	N/A	N/A	N/A </tr

Fuente: Instituto Colombiano del Petróleo.

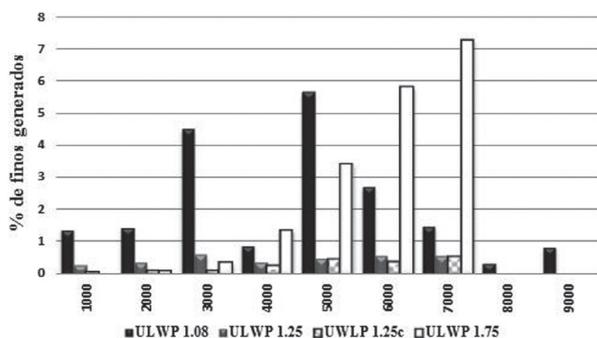


Figura 11. “Crushing a diferentes presiones para muestras evaluadas”. Fuente: Instituto Colombiano del Petróleo.

La norma API no establece los porcentajes máximos de finos generados a una determinada presión de confinamiento. Sin embargo, se trabajó con la consideración de un 30% como porcentaje máximo de finos aceptado para aplicaciones de fracturamiento. Bajo esta consideración, y observando los resultados de la prueba, se puede decir que las muestras de ultraliviano 125 y 125c generan bajos porcentajes de finos hasta una presión de aplicación de 7000 psi. Paralelo a esto, el ultraliviano 1.75 presenta también un incremento en la generación de finos al aumentar la carga aplicada sobre el mismo, llegando a presiones de cierre de 7000 psi. De este valor en adelante, el propante no aplica debido a que la generación de finos excede el 30% permitido para este estudio.

Los materiales evaluados, presentan un comportamiento normal en la deformación experimentada a causa de la aplicación de una carga. No obstante, el ultraliviano 1.08 pareciera presentar un comportamiento inusual en la prueba de crushing. En la tabla 8 se puede ver cómo cambia el porcentaje de finos generados con la presión aplicada: para presiones de 4000, 6000, 7000

y 8000 psi el porcentaje de finos generados disminuye considerablemente, lo cual no concuerda con el comportamiento que se debería presentar.

Con el fin de identificar posibles causas por las que se da este comportamiento, las muestras utilizadas en la prueba de crushing se tamizaron nuevamente y se tomaron fotografías de las partículas retenidas en la malla de mayor tamaño para determinar el efecto de la presión en esas partículas de material (Ver figura 12).

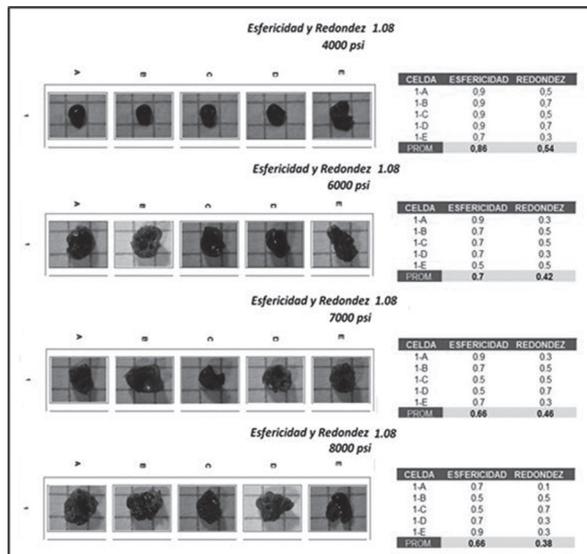


Figura 12. “Evaluación de la esfericidad y redondez – ultraliviano 1.08 después del crushing”. Fuente: Instituto Colombiano del Petróleo

Con ayuda de las fotografías presentadas en la figura anterior, se puede observar que el comportamiento inusual del propante ultraliviano 1.08 obedece a que, a partir de 4000 psi, las partículas del material comienzan a adherirse entre sí y, en lugar de generar un mayor porcentaje de finos, la adhesión de los granos resulta en partículas de propante más grandes con menores valores de esfericidad y redondez. Lo anterior afectará de manera negativa tanto la porosidad del paquete de propante como la conductividad de la fractura.

4. DIAGRAMA METODOLÓGICO DE IMPLEMENTACIÓN

Teniendo en cuenta las pruebas de laboratorio realizadas para evaluar la calidad de los propantes y establecer el rango de aplicación de los mismos, el diagrama de implementación (ver figura 13) incorpora tanto los resultados obtenidos para materiales ultralivianos como los rangos de aplicación para propantes utilizados convencionalmente.

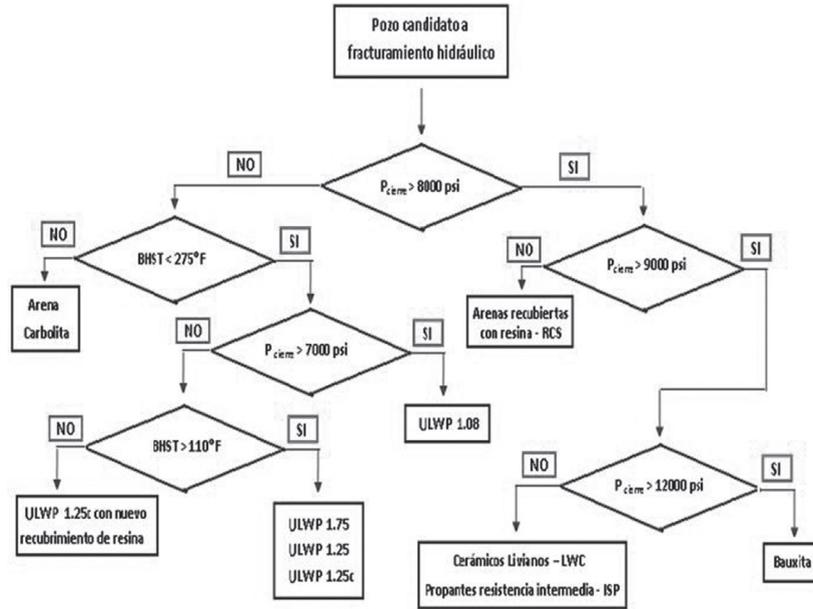


Figura 13. “Metodología para selección para uso de propantes ultralivianos y convencionales”. Fuente: El autor.

Es importante resaltar que todas las pruebas de laboratorio realizadas, permitieron verificar que los propantes ultralivianos evaluados, cumplen con los parámetros de calidad establecidos por la norma API RP 19C ISO 13503-2:2008; este proceso es fundamental para validar su factibilidad como materiales de prueba en procesos de fracturamiento hidráulico; las mayores diferencias se observaron al ser sometidos a diversas presiones de confinamiento.

Por estos aspectos, el diagrama metodológico se orienta hacia los resultados de la prueba de aplastamiento, ya que la selección final del tipo de material adecuado, se fundamenta en las presiones de cierre a las que puede ser sometido sin experimentar un alto grado de crushing y generación de finos que reduzcan progresivamente la misma conductividad de la fractura creada. En complemento, se consideran las temperaturas a las cuales se pueden implementar los propantes ultralivianos con recubrimiento de resina.

5. CONCLUSIONES

En tratamientos de estimulación, donde ocasionalmente se obtienen distribuciones poco uniformes de material propante dentro de la fractura, es recomendable el uso de propantes ultralivianos considerando las bajas tasas de sedimentación de las partículas.

Los materiales de soporte ultralivianos 1.08, 1.25, 1.25c y 1.75, cumplen con los parámetros de calidad exigidos por la norma API RP 19C ISO 13503-2:2008. Lo anterior

implica que estos materiales pueden ser utilizados como soporte de fracturas inducidas.

Aunque la norma API RP 19C ISO 13503-2:2008 no establece valores específicos para evaluar la calidad de los propantes en las pruebas de solubilidad en ácido, redondez y esfericidad, los resultados obtenidos muestran que los propantes evaluados tienen un bajo porcentaje en peso del material soluble en ácido y un grado alto-medio de redondez y esfericidad, lo cual permite que sean utilizados como materiales de sostén en fracturas hidráulicas.

El rango de aplicación de propantes ultralivianos evaluados tiene un valor máximo de presión de cierre de 8000 psi. A partir de este valor se obtiene una progresiva generación de finos (mayor al 30%) en todas las muestras evaluadas. Por lo tanto, puede decirse que son materiales de resistencia intermedia.

Para un pozo tipo con presiones de confinamiento inferiores a las 7000 psi, se puede esperar que al emplear propante ultraliviano se reduzca considerablemente la masa requerida para llenar un mismo volumen de fractura así como aumentar la longitud efectiva de la misma.

NOMENCLATURA

ULWP = Ultralight Weight Proppant
V = Velocidad de sedimentación (ft/min)
d = Diámetro de la partícula de propante (in)

NTU = Unidad Nefelométrica de Turbidez
GE = Gravedad específica

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento al Instituto Colombiano del Petróleo (ICP), a la Universidad Industrial de Santander (UIS) y al grupo de investigación Estabilidad de Pozo (GIEP) por su constante acompañamiento en la realización de este proyecto.

REFERENCIAS

- GAURAV, A., DAO, E.K. and MOHANTY K. "Evaluation of ultra-light-weight proppants for shale fracturing". Journal of Petroleum Science and Engineering, 2012, vol 92-93, p. 82-88.
- ECONOMIDES, M., and MARTIN, T. Modern fracturing enhancing natural gas production. Energy Tribune Publishing, 2007. ISBN: 1604616880.
- RICKARDS, A.R. BRANNON, H.D., WOOD, W.D., and Stephenson, C.J. High Strength, Ultralightweight Proppants Lends New Dimensions to Hydraulic Fracturing Applications. SPE Prod & Oper. 2006, vol 21, núm 2, p. 212-221. SPE-84308-PA.
- PEDROSO, C.A., et al., "Lightweight proppants: solution for gravel packing horizontal wells under extreme conditions", 2006.
- WOOD, W.D., et al., "Ultralight weight proppants development yields exciting new opportunities in hydraulic fracturing design". Formation Damage Control, 15-17 February 2006. Lafayette, Louisiana U.S.A.. ISBN: 978-1-55563-239-7.
- AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, API RP 19C / ISO 13503-2:2008. Petroleum and natural gas industries - Completion fluids and materials - Part 2: Measurement of properties of proppants used in hydraulic fracturing and gravel-packing operations", 2008.
- SERRANO, Daniela., "Factibilidad técnica y económica del uso de propantes ultralivianos en el fracturamiento hidráulico de pozos: aplicación en un campo colombiano". Director: Cesar Augusto Pineda Gómez. Universidad Industrial de santander, Escuela de ingeniería de petróleos, 2011.
- BRANNON, H. D. and STARKS, T. R., "Maximizing return on fracturing investment by using ultra-lightweight proppants to optimize effective fracture area: Can less really deliver more?". SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference, 19-21 January 2009. The Woodlands, Texas. ISBN: 978-1-55563-208-3.

Recepción: 15 de Abril de 2013

Aceptación: 14 de Junio de 2013