

## DETERMINACIÓN DE LA ADHERENCIA ENTRE CEMENTO TIPO PORTLAND Y EL REVESTIDOR EN UN POZO PETROLERO UTILIZANDO EL ENSAYO DE CORTE DIRECTO

Miguel Castillejo<sup>1\*</sup>; Diego Marchán<sup>1</sup>, Alejandro Virgos<sup>1</sup>, Diomar Martínez<sup>1</sup>

<sup>1\*</sup> Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería

\* [miguel.castillejo@ucv.ve](mailto:miguel.castillejo@ucv.ve)

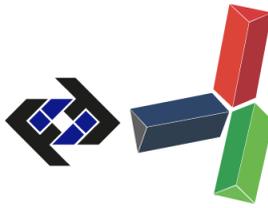
### RESUMEN

El proceso de cementación de los pozos petroleros es de vital importancia debido al papel que cumple ofreciendo un soporte mecánico entre el revestidor y la formación. Así que el cemento debe ser capaz de soportar todos aquellos esfuerzos o cargas que puedan presentarse durante la perforación del pozo, así como durante la vida productiva del mismo. La falta de adherencia o una adherencia débil del cemento con el revestidor puede causar problemas como una presión de superficie elevada, zona de aislamiento pobre, pérdidas de gas a las zonas no productivas, bajas tasas de producción, etc. De aquí la importancia conocer cuál es la resistencia al corte de la interface cemento-revestidor, que puede soportar el cemento fraguado después de un tiempo determinado. Se evalúan estos esfuerzos de corte a través de ensayos de corte directo con Rigidez Normal Constante (Constant Normal Stiffness - CNS) a muestras de cemento Portland tipo I y cemento Portland tipo I con arena de sílice, los cuales tuvieron un tiempo de curado de 28 días, en contacto con cortes de revestidor de Grado: N-80 y con espesor de pared: 0,317 pulgadas. De esta manera, se pudo obtener datos de cohesión y ángulo de fricción, los cuales permitieron hacer una descripción general de la adherencia entre el cemento y el revestidor a condiciones de temperatura ambiente (aproximadamente 24 °C) y con diferentes cargas de presión, evidenciando que la adherencia más alta la tiene el cemento sin arena de sílice. Los valores de cohesión y ángulo de fricción para el cemento con arena de sílice son:  $c=1,15\text{MPa}$ ,  $\phi=15,5^\circ$  y para el cemento:  $c=1,64\text{MPa}$ ,  $\phi=21,83^\circ$ , dando como resultado valores bajos tomando como referencia que para materiales elasto-plásticos los valores promedios de cohesión y ángulo de fricción son de  $c=4,3\text{MPa}$  y  $\phi=16^\circ$  según estudios previos realizados a muestras de cementos evaluadas mediante ensayos de corte directo. Sin embargo, es necesario destacar que la investigación realizada sirve como punto de partida para la profundización del estudio de la adherencia del cemento con el revestidor, generándose de esta forma bases para desarrollar nuevas y más avanzadas investigaciones.

*Palabras Clave: Adherencia, Revestidor, Cemento-Acero, Cementación de Pozos, Corte Directo, Mohr-Coulomb*

### ABSTRACT

The process of cementing the oil wells is of vital importance due to the role that it gives by providing a mechanical support between the casing and the formation. So the cement must be capable of supporting all those stress or burdens that may arise during the drilling of the well, as well as during the productive life of the well. The lack of adhesion or a weak adhesion of the cement with the casing can cause problems such as high surface pressure, poor insulation area, gas losses to non-productive areas, low production rates, etc. Hence, the importance of knowing the resistance to the cut of the cement-steel interface, which can support the cement set after a certain time. These



cutting efforts were evaluated through direct cutting tests with Constant Normal Stiffness (CNS) to samples of Portland cement type I and Portland cement type I with silica sand, which had a curing time of 28 days, in contact with Grade coater cuts: N-80 and wall thickness: 0.317 inches. In this way, it was possible to obtain data of cohesion and angle of friction, which allowed to make a general description of the adhesion between the cement and the coater at ambient temperature conditions (approximately 24 ° C) and with different pressure loads, evidencing the cement has the highest adhesion without silica sand. The values of cohesion and friction angle for cement with silica sand are:  $c = 1,15\text{MPa}$ ,  $\phi = 15,5^\circ$  and for cement:  $c = 1,64\text{MPa}$ ,  $\phi = 21,83^\circ$ , resulting in low values, taking as reference that for elasto-plastics materials the average values of cohesion and angle of friction are of  $c = 4.3 \text{ MPa}$  and  $\phi = 16^\circ$  according to previous studies made to samples of cements evaluated by direct cutting tests. However, it is necessary to emphasize that the research carried out serves as a starting point for the deepening of the study of cement adhesion with the coater. Generating in this way bases to develop new and more advanced research..

*Keywords: Adhesion, Casing, Cement-Steel, Well Cementing, Direct Shear, Mohr-Coulomb*

## INTRODUCCIÓN

El proceso de cementación de los pozos petroleros es de vital importancia debido al papel que cumple ofreciendo un soporte mecánico entre el revestidor y la formación. La principal función de la cementación de pozos petroleros es unir y soportar la sarta de revestidores y proveer una zona de aislamiento completa, obteniendo con éstas una buena cementación. Lo que implica que es de vital importancia lograr una buena adherencia entre el cemento y el revestidor. Los revestidores y su cementación pueden representar entre 16 y 25 % del costo de perforación, de acuerdo al diámetro, longitud y otras propiedades físicas de cada sarta de revestidores. Así que el cemento debe ser capaz de soportar todos aquellos esfuerzos o cargas que puedan presentarse durante la perforación del pozo, así como durante la vida productiva del mismo. Por esto es importante conocer cuál es la resistencia al corte de la interface cemento-revestidor, que puede soportar el cemento fraguado después de un tiempo determinado. Se evalúan estos esfuerzos de corte a través de ensayos de corte directo con Rigidez Normal Constante (Constant Normal Stiffness - CNS) a muestras de cemento Portland tipo I y cemento Portland tipo I con arena de sílice, los cuales tuvieron un tiempo de curado de 28 días, en contacto con cortes de revestidor de Grado: N-80 y con espesor de pared: 0,317 pulgadas. De esta manera, se pudo obtener datos de cohesión y ángulo de fricción, los cuales permitieron hacer una descripción general de la adherencia entre el cemento y el revestidor a condiciones de temperatura ambiente (aproximadamente 24°C) y con diferentes cargas de presión, evidenciando que la adherencia más alta la tiene el cemento sin arena de sílice. Los valores de cohesión y ángulo de fricción para el cemento con arena de sílice son:  $c=1,15\text{MPa}$ ,  $\phi=15,5^\circ$  y para el cemento:  $c=1,64\text{MPa}$ ,  $\phi=21,83^\circ$ , dando como resultado valores bajos tomando como referencia que para materiales elasto-plásticos los valores promedios de cohesión y ángulo de fricción son de  $c=4,3 \text{ MPa}$  y  $\phi=16^\circ$  según estudios previos realizados a muestras de cements evaluadas mediante ensayos de corte directo. Sin embargo, es necesario destacar que la investigación realizada sirve como punto de partida para la profundización del estudio de la adherencia del cemento con el revestidor. Generándose de esta forma bases para desarrollar nuevos e investigaciones más avanzadas. En el siguiente estudio se realizó una evaluación directa de la adherencia entre el cemento y el revestidor mediante ensayos de corte directo con muestras elaboradas en el Laboratorio de Mecánica de Rocas de La Facultad de Ingeniería de Universidad

Central de Venezuela, obteniendo con ellos, valores de cohesión y ángulo de fricción.

## METODOLOGÍA

Como lo define Díaz [1], la cementación es un proceso que consiste en mezclar cemento seco y ciertos aditivos con agua, para formar una lechada que es bombeada al pozo a través de la sarta de revestimiento, el volumen a bombear es predeterminado según la configuración del pozo, esta lechada se coloca en el espacio anular entre la superficie externa del revestidor y la formación.

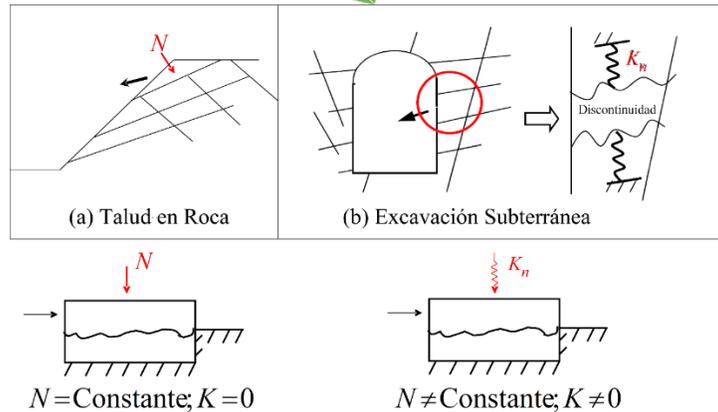
Para Nelson [2], la cementación de los pozos petroleros consiste en dos operaciones principales: la cementación primaria y la cementación con fines de remediación o cementación secundaria.

Uno de los principales objetivos del presente trabajo es aportar información que permita una mejor comprensión del comportamiento friccional de las discontinuidades en la configuración mecánica de los pozos petroleros, en este caso, específicamente en el contacto cemento - acero (revestidor).

Mientras que el movimiento normal del bloque en la superficie de deslizamiento es relativamente libre de moverse en el caso de un talud, la dilatancia de las interfaces de los bloques alrededor del túnel está confinada en cierta medida por los bloques adyacentes (formación). Por lo tanto, el comportamiento al corte de las discontinuidades presentes en los hoyos perforados, no sólo dependen de las propiedades de las superficies de sus discontinuidades, sino también de las condiciones de contorno a las cuales están sometidas esas discontinuidades.

Aun así, es posible identificar dos comportamientos característicos distintos:

- Un primer caso, donde la discontinuidad puede tener una dilatancia libre (por ejemplo, un talud en roca). Esta condición es reproducida en el laboratorio manteniendo una fuerza normal constante (*CNL – Constant Normal Load*) durante todo el ensayo de corte (Figura 1a) sobre la superficie de la discontinuidad: Esta condición por ejemplo podría ser aplicada a un bloque de roca deslizándose por una pendiente
- Un segundo caso, que es el aplicado en el presente trabajo, donde es el de rigidez normal constante (*CNS - Constant Normal Stiffness*), bajo esta condición los esfuerzos normales varían durante el proceso de corte. Esta situación ocurre cuando los bloques del techo o hastiales de una excavación subterránea caen hacia la excavación. Durante el movimiento de los bloques, los esfuerzos normales a la superficie de la discontinuidad no son constantes, cambiando continuamente debido a las restricciones de dilatancia normal, es decir, la discontinuidad está confinada y cualquier dilatancia, genera cargas normales adicionales, esto se simula en el laboratorio manteniendo una rigidez constante durante el ensayo (Figura 1b), esta situación presentada para el caso de pozos petroleros el número de interfases presentes en el interior del pozo serían dos: acero-cemento y acero-formación geológica.



**Figura 1. Simulación de las condiciones in-situ de los ensayos de corte directo [3]**

Smith [3], ha realizado algunas consideraciones de la adherencia entre el cemento y el revestidor en un pozo, la adherencia de corte e hidráulica son las dos fuerzas que deben ser consideradas para lograr una zona totalmente aislada en todo el contacto revestidor/cemento y cemento/formación. La de corte soporta mecánicamente la tubería en el hoyo, y está determinada por la cantidad de fuerza requerida para iniciar el movimiento de la tubería que está en contacto con el cemento fraguado. Esta fuerza dividida por el área de superficie de contacto del cemento/revestidor produce la adherencia de corte en libras por pulgadas cuadradas.

La adherencia hidráulica bloquea la migración de fluidos en el espacio anular cementado y generalmente se mide aplicando presión a la interface tubería/cemento antes de que ocurre la fuga. Factores que influyen en la adherencia del revestidor/cemento son la superficie del revestidor, que mientras más pulida este la superficie del revestidor menor será la adherencia, la dirección en la cual es aplicada la presión y la cantidad de tiempo en que esta es aplicada en la interface. Concluyendo que, un cambio en la presión interna en el revestidor causará un cambio directamente proporcional en la adherencia de corte e hidráulica. Si el revestidor se cierra mientras se está cementando, el calor de hidratación causa una acumulación de presión que disminuye la adherencia y puede crear microporos por donde el gas puede migrar fácilmente. La fuerza de la adherencia hidráulica y de corte se incrementa con la rugosidad de la superficie. A medida que aumenta la viscosidad del fluido presurizado, la presión incrementa, acelerando la falla o comunicación del fluido donde la tubería y el cemento entran en contacto.

Para la ejecución de los ensayos se realizaron en un equipo GCTS RDS-500, siguiendo el procedimiento establecido en el Método Sugerido para la Determinación de la Resistencia al Corte Directo en el Laboratorio de la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM) [5], en ella se realiza una revisión y actualización de los requerimientos y procedimientos para realizar el ensayo de corte directo de discontinuidades en el laboratorio utilizando las condiciones de contorno de Carga Normal Constante (CNL) y Rigidez Normal Constante (CNS).

Las muestras para los ensayos se realizaron con revestidor grado N-80, peso nominal 23 lb/pie y con un espesor de pared de 0,317 pulgadas, cortado en forma de cuadrados de 3.17 pulgadas, a las cuales se les fijaron unos anclajes en la parte inferior mediante soldadura 4 cortes de cabilla de construcción, de longitud 2 pulgadas en las esquinas del corte de revestidor como se muestra en la siguiente imagen (Figura 2)

Se elaboraron dos tipos de lechada de cemento, la primera con cemento Portland tipo I, arena de

sílice y agua, y otra con solo cemento del mismo tipo y agua. La relación agua cemento es (masa de cemento/volumen de agua es de  $42,5\text{kg}/19,5\text{ litros} = 2,1794\text{kg/lt}$  (figura 2.b).



**Figura 2. Elaboración de muestras para el ensayo [6]**

En la Figura 3, se presenta de manera simplificada el procedimiento para la ejecución del ensayo de corte, que abarca desde el encapsulamiento de la muestra hasta la ejecución del ensayo.



**Figura 3. Esquema simplificado en imágenes del ensayo de corte [6]**

El ensayo de corte directo en las discontinuidades tiene como objetivo principal determinar la resistencia de la muestra de cemento a un esfuerzo de corte determinado, el ensayo se realiza en cuatro puntos, el primer punto es el esfuerzo necesario para romper la discontinuidad y los tres puntos restantes para determinar los parámetros de cohesión y ángulo de fricción.

Es importante mencionar que en los ensayos de corte directo generalmente se realizan 3 etapas de carga variando el esfuerzo normal. En el caso de los ensayos en roca y en la determinación de la adherencia la discontinuidad debe existir previamente a la realización del ensayo de corte, en consecuencia, el número de etapas a realizar son 4, ya que la primera es la generación de la discontinuidad, y esta etapa de resistencia pico no puede ser considerada dentro del ensayo de corte, pero si se debe considerar la resistencia residual en la evaluación de las mismas.

Para cada uno de los ensayos se realizó su respectivo reporte con todos los detalles de cada ensayo y cada una de las etapas involucradas, incluyendo la tabla final de la interpretación del ensayo en particular. En la figura 4, se presenta la condición final de la muestra una vez concluido el ensayo.



**Figura 4. Condición final de las muestras, vez concluido el ensayo en la parte inferior se observa el revestidor y en la parte superior el cemento, con ambas superficies totalmente pulidas. Las flechas indican la dirección del movimiento de corte [6]**

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

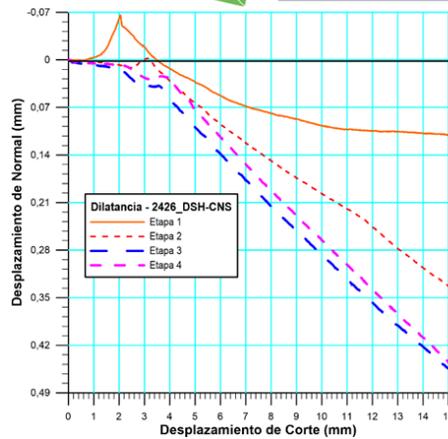
En la Tabla 1, se presentan las propiedades y los resultados obtenidos de cada una de las muestras que se ensayaron en el laboratorio, la rigidez aplicada en los ensayos varió entre 3800kPa y 15200 kPa.

**Tabla 1. Propiedades y programa de carga de muestras ensayadas**

Tipo	Muestra	Propiedades físicas			Ensayo de corte directo					
		altura (mm)	largo (mm)	ancho (mm)	prof. (Km)	rigidez (Kpa)	punto 1 (Kpa)	punto 2 (Kpa)	punto 3 (Kpa)	punto 4 (Kpa)
cemento con sílice	2411	133,2	83,1	82,0	1	3800	475	950	1900	3800
	2412	105,3	80,8	80,7	2	7600	950	1900	3800	7600
	2413	152,0	83,5	81,7	2	7600	950	1900	3800	7600
	2414	122,0	87,7	84,4	3	11400	1425	2850	5700	11400
	2415	144,2	80,8	82,0	3	11400	1425	2850	5700	11400
	2416	128,0	80,2	81,3	4	15200	1900	3800	7600	15200
cemento	2417	138,0	85,1	83,5	1	3800	475	950	1900	3800
	2418	136,2	82,9	82,2	1	3800	475	950	1900	3800
	2419	146,7	84,7	84,4	2	7600	950	1900	3800	7600
	2420	124,6	86,8	85,3	3	11400	1425	2850	5700	11400
	2421	128,0	85,1	83,6	3	11400	1425	2850	5700	11400
cemento	2422	128,7	86,5	84,6	3	11400	1425	2850	5700	11400
	2423	142,1	84,7	84,7	2	7600	950	1900	3800	7600
	2424	134,6	81,0	81,2	4	15200	1900	3800	7600	15200
	2425	131,5	83,9	82,0	4	15200	1900	3800	7600	15200
	2426	145,3	85,3	81,1	2	7600	950	1900	3800	7600

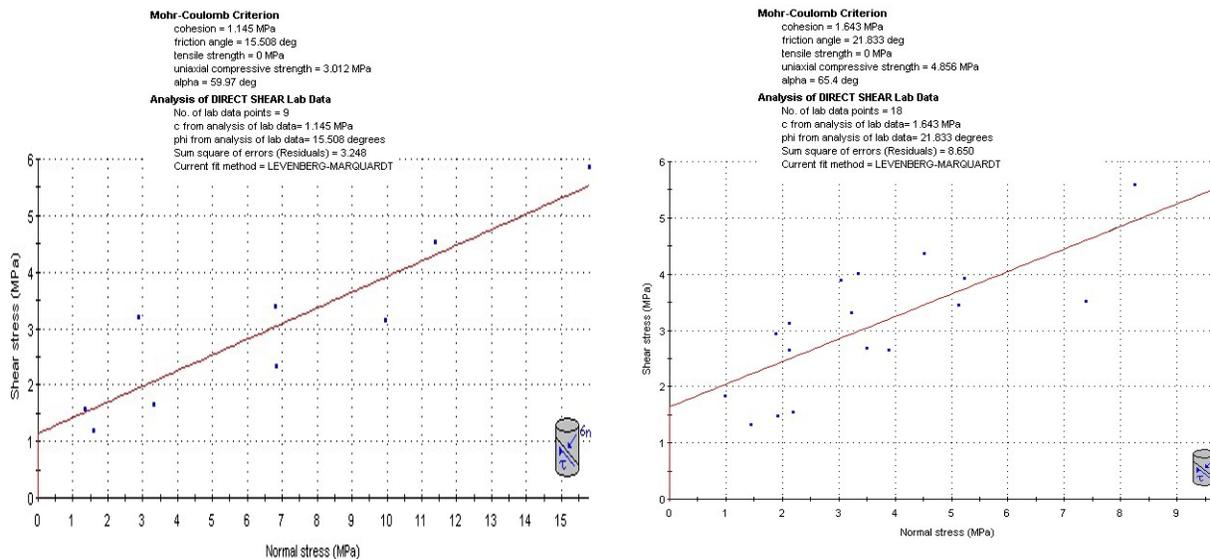
Los valores de rigidez aplicados se tomaron de acuerdo a la regla de Heim que según Zang & Stephansson [7], que se conoce como la suposición de un estado de esfuerzo litostático a medida que se penetra más profundo en la corteza terrestre.

En cada etapa sucesiva del ensayo la muestra sufre un continuo pulimiento de la discontinuidad cemento-acero. Esto puede ser evidenciado en la figura 5 de dilatación vs desplazamiento horizontal, puede observarse para la etapa 1 el resalto que indica que durante esta etapa la muestra tuvo un desplazamiento en sentido contrario a la aplicación de la carga y las etapas sucesivas el pulimiento de las imperfecciones en la discontinuidad y un desplazamiento vertical en el sentido de la aplicación de la carga.



**Figura 5. Dilatancia vs. Desplazamiento horizontal en la muestra 2426-DSH [3]**

Para el análisis global de la adherencia para cada tipo de cemento se elaboraron las envolventes de falla con el criterio de Mohr-Coulomb, para determinar los valores de cohesión y ángulo de fricción de las muestras de cemento con arena de sílice (figura 6a) y las muestras de cemento sin aditivo (figura 6b).



**a) muestras de cemento con arena de sílice**

**b) muestras de cemento**

**Figura 6. Envolvente con el criterio de falla Mohr-Coulomb [3]**

En la figura 6 son graficados a los valores máximos de  $\tau$  y  $\sigma_n$ . La figura 6a se observa que para las muestras de cemento con sílice se obtiene una cohesión de 1,14 MPa y un ángulo de fricción igual a 15,51°; la figura 6b se obtiene un valor de cohesión de 1,643 MPa y un ángulo de fricción igual a 21,83 grados.

## CONCLUSIONES

Concluyendo que la presencia de sílice en las muestras disminuye la cohesión y la fricción, mientras que los valores obtenidos en muestras con solo pasta de cemento los valores fueron superiores para la cohesión del 44.12% y para el ángulo de fricción del 40.75%.

Se recomienda continuar las siguientes investigaciones de la adherencia de Cemento-Acero con los cementos más usados en la industria petrolera, por ejemplo, clase G y H; investigar el efecto que podrían tener las altas temperaturas, características de las profundidades que se manejan en la perforación de pozos petroleros, en el comportamiento de adherencia; realizar los ensayos con muestras de revestidor que posean una rugosidad mayor, para conocer si el cambio en adherencia es significativo; investigar el efecto de los fluidos presentes en las formaciones cuando entran en contacto con el cemento y como afecta esto al comportamiento de la adherencia e iniciar los estudios de la adherencia simulando el contacto cemento-formación y con los ensayos de acero-cemento y elaborar el modelo formación – cemento – revestidor.

### REFERENCIAS

- [1] Díaz, P. (2007). «Fundamentos Teóricos Prácticos de Perforación y Construcción de Pozos». Caracas: Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Petróleo
- [2] Nelson, Erick B. (2012). «Well Cementing Fundamentals». Oilfield Review, p. 59
- [3] Castillejo, M. (2017). «Resistencia al Corte en Discontinuidades: Casos de estudio en Venezuela». Caracas: Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Petróleo
- [4] Smith, D. K. (1990). «Cementing». New York: Henry Doherty Memorial Fund of AIME Society of Petroleum Engineers Inc.
- [5] ISRM. (2007). «The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006». (J. A. Hudson, & R. Ulusay, Eds.) Ankara, Turkey: International Society Rock Mechanics (ISRM)
- [6] Martínez L., Diomar J. & Virgos P, Alejandro F. (2018). «Determinación de la adherencia del cemento tipo portland con el revestidor en un pozo petrolero utilizando ensayos de corte directo». Caracas: Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería, Escuela de Petróleo.
- [7] Zang, A., & Stephansson, O. (2010). «Stress Field of the Earth's Crust». Nueva York: Springer