

EVALUACIÓN REOLÓGICA DE LODOS BENTONÍTICOS PARA LA CONSTRUCCIÓN

Vivas, Juan C., Adrián Guerrero y Claudio Rocco

Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería UNLP, C.P. 1900, La Plata, Argentina. juancarlos.vivas@ing.unlp.edu.ar

1. Introducción

Las bentonitas son arcillas del grupo montmorilonítico, originadas por la descomposición química de las cenizas volcánicas. Presentan una expansividad particularmente aguda, lo que las hace sumamente críticas en su comportamiento mecánico [1]. Estas arcillas resaltan por ser un material con múltiples aplicaciones en distintas ramas de la industria, entre ellas la construcción civil.

Argentina cuenta con una de las mayores reservas mundiales de bentonita sódica de excelente calidad, siendo en la actualidad el segundo productor a nivel internacional detrás de EEUU [2]. En nuestro país los principales yacimientos se encuentran en las provincias de San Juan, Neuquén y Río Negro, donde la formación natural de este material surgió a partir de la alteración por fenómenos de meteorización de tobas y cenizas volcánicas depositadas durante el proceso geológico de la formación de la cordillera de los andes [3]. La clasificación más aceptada establece tres tipos de bentonita en función de su capacidad de hinchamiento en agua [4]. Según este criterio existen bentonitas altamente hinchables o sódicas; bentonitas poco hinchables o cálcicas y bentonitas moderadamente hinchables o intermedias.

La mezcla de las bentonitas con agua da lugar a los denominados “lodos bentoníticos”. Debido a que este tipo de arcillas presenta un muy alto límite líquido, a pesar de que el contenido de bentonita respecto al agua sea bajo, la suspensión suele presentar buena consistencia.

El uso de estos lodos, en la construcción, reside principalmente en las perforaciones destinadas a la construcción de pilotes y muros colados. El lodo se introduce en la excavación, a medida que esta se realiza y sirve para evitar los derrumbes de las paredes de la fosa. Esto es posible debido a la tixotropía de esta suspensión. Cuando el lodo se encuentra en movimiento presenta poca consistencia y su comportamiento es como el de un fluido. Sin embargo, cuando se deja en reposo, la viscosidad aumenta, adquiriendo la resistencia necesaria para evitar el desprendimiento de las paredes de la excavación.

En general el diseño y la selección de mezclas que incorporan bentonitas, se basan en la experiencia y el conocimiento adquirido por similitud de casos anteriores, no existiendo en la literatura trabajos que brinden criterios racionales para proyectar y optimizar este tipo de mezclas. Como consecuencia de esto, la aplicación en obra de mezclas con bentonita conlleva en la práctica extensas campañas de experimentación basadas en criterios de convergencia por prueba y error que implican un excesivo consumo de tiempo y de recursos en ensayos de laboratorio que en muchos casos da como resultado una solución no optimizada.

En aras de aportar al mejor conocimiento del comportamiento reológico y mecánico de mezclas a base de bentonitas, y apuntando a la realización de morteros y hormigones con estas arcillas como adición, en el Departamento de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata, se ha emprendido un proyecto de investigación que pretende establecer leyes que permitan abordar de manera más racional el diseño y selección de la proporciones de los materiales de este tipo de mezclas.

Este trabajo forma parte de las instancias iniciales, en el cual, se evaluó la variación de parámetros reológicos de lodos bentoníticos que incorporaron entre el 1 y el 9% (en peso) de una arcilla bentonita sódica de alta calidad de producción nacional. El estudio comprendió la medición y evaluación de la viscosidad dinámica, con viscosímetro rotacional cilíndrico coaxial, a diferentes velocidades de giro, entre 100 y 600 RPM, tanto a los 30 minutos de preparadas las mezclas, como a las 48 horas. El objetivo fue analizar la influencia de la dosis de esta bentonita y del tiempo de hidratación, sobre los parámetros reológicos del lodo.

2. Programa experimental

2.1. Materiales y mezclas

Para la experiencia de prepararon “lodos” a partir de la mezcla de agua desmineralizada comercial y 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 y 9 % de arcilla bentonítica, en peso. La bentonita empleada es sódica de origen nacional, de la firma “Del Lago”, cuya La planta industrial se encuentra ubicada en las márgenes del lago Pellegrini, Cinco Saltos, Provincia de Río Negro, considerado, actualmente, uno de los yacimientos de bentonita sódica más importantes de América Latina. Fueron preparados de cada lodo al menos dos litros, el mezclado se realizó empleando una taladradora manual de 500 vatios (Figura 1) equipada con accesorio mezclador de tres aspas helicoidales concéntricas. El tiempo de mezclado fue al menos 1 minuto.



Figura 1. Mezclado mecánico

2.2. Medición de viscosidad.

La viscosidad del fluido en movimiento fue determinada empleando un viscosímetro rotacional cilíndrico coaxial, marca Baroid®, modelo 286, que se muestra en la Figura 2. Este equipo permite determinar viscosidades a diferentes velocidades de giro, entre 3 y 625 revoluciones por minuto (RPM), seleccionadas mediante perillas incorporadas en el dispositivo.

Antes de realizar una medición se dispone la mezcla en la copa del equipo y una vez llena hasta el nivel indicado, se le ubica en la base del dispositivo, para ello se inclina hacia atrás la carcasa superior del viscosímetro y se inserta el recipiente en tres agujeros que posicionan la copa e impiden su movimiento durante la prueba, luego se regresa la carcasa a su posición original, de manera que el tambor giratorio cilíndrico se introduzca en el fluido.

Acto seguido, para determinar la viscosidad del lodo, a través del giro de la perilla, se configura el giro a 600 RPM durante de 5 segundos, luego se selecciona la velocidad del giro a la que se desea medir. Con el equipo en movimiento, se toma lectura de la viscosidad a través del dial analógico, cerciorándose que el mismo se encuentre estabilizado. El tiempo de estabilización del dial dependerá de cada mezcla evaluada.



Figura 2. Viscosímetro Multi-Speed 286 marca Baroid ®.

Al representar las lecturas de viscosidad (eje y) para cada velocidad de giro (eje x), se obtiene la que se denomina “curva de flujo”. En la Figura 3 se muestra un esquema, proporcionado en el manual del viscosímetro, de las curvas de flujo de un fluido newtoniano y uno no newtoniano (tipo Bingham). Como se indica, la pendiente de la curva del fluido de Bingham se denomina viscosidad plástica (μ^P), mientras que el valor de la ordenada en el eje, de la proyección de la curva de flujo, se llama punto de cedencia (YP), que es el esfuerzo mínimo de corte que debe aplicarse al fluido para que inicie el desplazamiento. El valor de YP en fluidos newtonianos es cero mientras que en mezclas no newtonianas de Bingham es mayor a cero.

Con el viscosímetro empleado, la magnitud de la μ^P (en centipoise) se determina como la diferencia entre las lecturas a 600 y 300 RPM. Mientras que el YP (en lb/100 pie²) se calcula restando la viscosidad plástica de la lectura a 300 RPM. Otro parámetro típico que se deriva de este ensayo es la viscosidad aparente (μ^a) que se define como el 50% de la lectura registrada a 600 RPM (en centipoise). En fluidos newtonianos las viscosidades μ^P y μ^a son coincidentes.

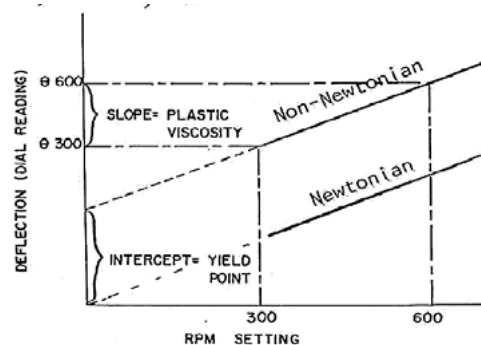


Figura 3. Curvas de flujo de fluidos newtoniano y no newtoniano [5]

3. Resultados

Las diez mezclas preparadas fueron evaluadas empleando el método descrito en la Sección 2, tomando lectura de la viscosidad a 100, 200, 300, 400, 500 y 600 RPM. Las determinaciones se realizaron a los 30 minutos de la preparación del lodo y a las 48 horas del mezclado. En la Tabla 1 se resumen los resultados de las mediciones a los 30 minutos y en la Figura 4a se representaron las curvas de flujo de todos los lodos a esta misma edad. Nótese que en la Tabla 1 se incorporaron, para cada mezcla, la magnitud de la viscosidad plástica (μ^P), viscosidad aparente (μ^a) y del punto de cedencia (YP) y que en la Figura 4a se empleó una escala logarítmica en el eje de las ordenadas, a fin de observar con mayor facilidad todas las curvas.

Tal como se esperaba, en cada mezcla se registró una mayor lectura de viscosidad con el aumento de la velocidad de giro. Sin embargo, este incremento fue proporcional al contenido de arcilla del lodo, resultando mayor para la mezcla con 9% de bentonita. Tomando como referencia las viscosidades a 300 y 600 RPM se preparó la Figura 4b en que, para cada lodo, se representa en incremento en la viscosidad relativos a la mezcla con 0% de contenido de bentonita (agua pura). Nótese que, si bien se incrementa la viscosidad con la dosis de bentonita, el incremento no resultó lineal, sino de tendencia exponencial. Además, se observa que este incremento en la viscosidad del lodo es más crítico a bajas velocidades de giro. Aspecto que podría resultar de interés en muchas aplicaciones, de este tipo de lodos, en obras de Ingeniería Civil.

Tabla 1. Viscosidad en lodos con 0 al 9% de incorporación de bentonita. Edad de ensayo: 30 minutos

Mezcla	Viscosidad (cP)						μ^P (cP)	μ^a (cP)	YP (lb/100pie ²)
	RPM								
	100	200	300	400	500	600			
9%	49,5	55,0	61,0	65,5	70,5	74,5	13,5	37,3	47,5
8%	25,5	31,0	38,0	46,0	51,0	55,0	17,0	27,5	21,0
7%	19,0	22,5	26,5	30,0	33,5	37,0	10,5	18,5	16,0
6%	10,5	14,0	18,0	20,0	22,0	24,5	6,5	12,3	11,5
5%	7,0	9,0	11,5	13,0	14,5	16,5	5,0	8,3	6,5
4%	4,0	6,0	7,5	8,5	9,5	11,0	3,5	5,5	4,0
3%	2,5	4,0	5,0	6,0	6,5	7,5	2,5	3,8	2,5
2%	1,5	2,5	3,5	4,0	5,0	5,5	2,0	2,8	1,5
1%	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	1,5	2,0	1,0
0%	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	1,5	1,8	0,5

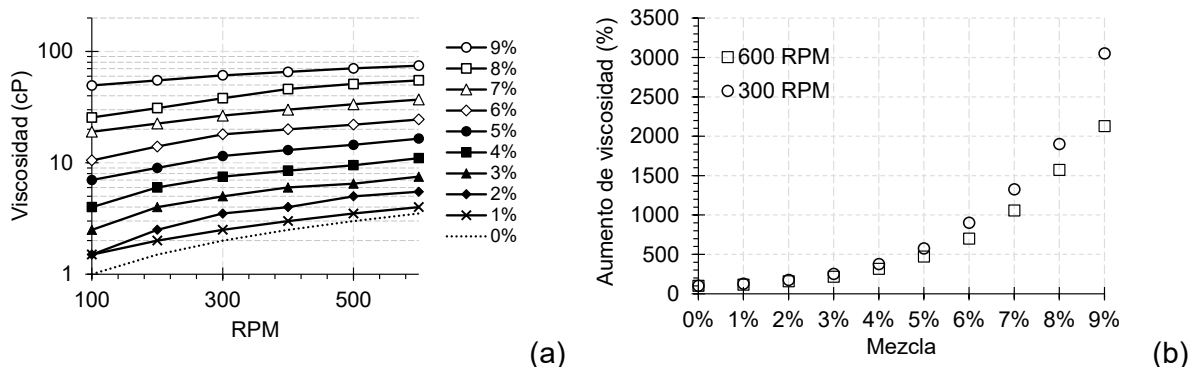


Figura 4. (a) Curvas de flujo a los 30 minutos y (b) aumento relativo de la viscosidad a 300 y 600 RPM, en lodos bentoníficos con 0 al 9% de contenido de arcilla.

Al observar la Figura 4a y comparando las viscosidades μ^P y μ^a de la Tabla 1, se verifica lo ampliamente mencionado en la bibliografía: que el agua (mezcla 0%) se trata de un fluido newtoniano, y si bien las mezclas 1 y 2% exhiben un comportamiento similar, la incorporación de bentonita modifica la reología del fluido y lo convierten en uno de tipo no newtoniano (tipo Bingham). Esto último es más evidente al comparar las magnitudes de YP (punto de cedencia), donde a partir de un contenido de 2% de arcilla, resulta mayor a 1 lb/100pie². Respecto a esta variable, nótese que para contenidos mayores a 5%, la YP toma valores de importancia relativa, mayores a 10 lb/100pie², alcanzando valores de hasta casi 50 lb/100pie², con 9% de incorporación de arcillas, lo cual representa un incremento casi constante, de un 40% en la YP con cada 1% de adición de arcilla al lodo.

En la Tabla 2 se resumen las viscosidades obtenidas a las 48 horas de preparación de las mezclas. Estos valores se representaron gráficamente en las Curvas de Flujo de la Figura 5a. Se ha empleado la misma escala del vertical que en la Figura 4a para facilitar la comparación. El comportamiento entre lodos a esta edad de ensayo es análogo a lo observado a los 30 minutos de mezclado, sin embargo, se observó que la diferencia de las viscosidades dependió del porcentaje de bentonita que incorporó el lodo. Para divisar mejor el efecto, se presenta la Figura 5b, en que se graficó la diferencia porcentual de la viscosidad a las 48 horas respecto a la registrada a los 30 minutos. Se tomaron referencialmente las viscosidades a 300 y 600 RPM. En los lodos con un contenido menor al 6% de bentonita, se presentaron viscosidades a 48 horas hasta 20% menores que las observadas a 30 minutos, pero en mezclas con más de 6% de arcilla, las viscosidades resultaron mayores, especialmente en lodos con altos contenidos de bentonita. Particularmente en el lodo al 9% las viscosidades se duplicaron luego de un tiempo de hidratación de 48 hrs. Este comportamiento podría deberse a la separación de las partículas de arcilla en la suspensión y sugiere la existencia de un contenido umbral, en el presente caso 6%, en que un mayor tiempo de hidratación incrementa la viscosidad del lodo.

Tabla 2. Viscosidad en lodos con 0 al 9% de incorporación de bentonita. Edad de ensayo: 48 horas

Mezcla	Viscosidad (cP)						μ ^P (cP)	μ ^a (cP)	YP (lb/100pie ²)
	RPM								
	100	200	300	400	500	600			
9%	109,0	120,0	133,0	148,0	150,0	164,0	31,0	82,0	102,0
8%	59,0	68,0	77,0	79,0	85,0	90,0	13,0	45,0	64,0
7%	23,0	28,0	32,0	36,0	40,0	43,0	11,0	21,5	21,0
6%	11,0	15,0	18,0	21,0	23,0	24,0	6,0	12,0	12,0
5%	6,0	8,0	10,0	12,0	13,0	15,0	5,0	7,5	5,0
4%	3,5	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	3,0	4,5	3,0
3%	2,5	3,0	4,5	5,0	6,0	6,5	2,0	3,3	2,5
2%	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	1,5	2,3	1,5
1%	1,5	1,8	2,0	2,5	3,0	3,5	1,5	1,8	0,5
0%	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	1,5	1,8	0,5

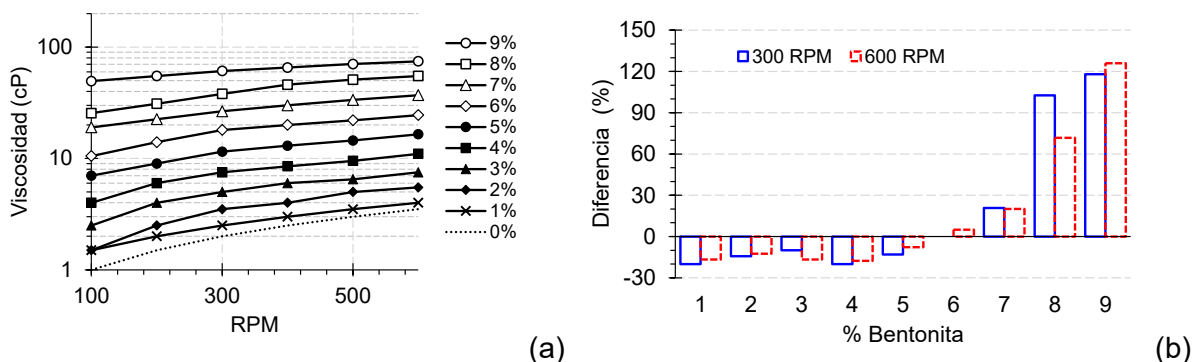


Figura 5. (a) Curvas de flujo las 48 horas de moldeo y (b) diferencia porcentual de viscosidad a las 48 horas.

4. Conclusiones

Se evaluaron, desde el punto de vista reológico, lodos que incorporaron entre el 1 y el 9% (en peso) de una arcilla bentonita sódica de alta calidad de producción nacional. El estudio comprendió la medición y evaluación de la viscosidad, con viscosímetro rotacional cilíndrico coaxial, a diferentes velocidades de giro, entre 100 y 600 RPM, tanto a los 30 minutos de

preparadas las mezclas, como a las 48 horas. Las principales conclusiones se resumen a continuación:

- La viscosidad registrada del lodo depende de la velocidad de giro del viscosímetro, a mayor velocidad se registra mayor magnitud.
- La magnitud de la viscosidad dinámica y del punto de cedencia se incrementan con el contenido de arcilla del lodo. El incremento en la viscosidad dinámica resultó exponencial, mientras que el incremento relativo en la magnitud de la tensión de cedencia fue aproximadamente constante.
- Las propiedades reológicas de los lodos de bentonita dependen de la edad de la mezcla, para las mezclas estudiadas se verificó que, a contenidos de arcilla menores a 6%, a las 48 horas, se presenta una disminución en la viscosidad, mientras que, a dosis mayores de bentonita, las viscosidades se incrementan altamente.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen al Lic. Carlos Marconi quien proporcionó la bentonita empleada en esta investigación y el viscosímetro empleado en las mediciones. El apoyo financiero de la Facultad de Ingeniería de la UNLP también es ampliamente agradecido.

6. Bibliografía

- [1] E. Juarez Badillo, A. Rico Rodriguez (1973) Mecánica de Suelos, Segunda Edición. Tomo I: Fundamentos de la Mecánica de Suelos., Editorial, México DF, 1973.
- [2] C. Marconi (1998) Bentonitas en Argentina, en: I Jorn. en Miner. Ind., Instituto de Geología y Recursos Minerales SEGEMAR, Instituto de Geología y Recursos Minerales SEGEMAR. Fundación Empremin, Argentina, 2,123-157, pp. 123–157.
- [3] M. Gonzalvez, C. Herrmann, E. Zappettini (2004) Minerales Industriales de la República Argentina, Instituto, Buenos Aires, Argentina.
- [4] S. Patterson, H. Murray, Clays. Industrial Minerals and Rocks, New York, USA, 1983.
- [5] Eritia, Mud Rheology Test, (2017). <https://drillingfluid.org/drilling-fluids-handbook/mud-rheology-test.html> (consultado el 19 de marzo de 2023).