

Análisis estructural de un bioreactor anaerobio de fibrocemento por el método de los elementos finitos

Structural analysis of a fibrocement anaerobic bioreactor for finite elements method

Yans Guardia-Puebla^I, Suyén Rodríguez-Pérez^{II}, Raúl Pacheco-Gamboa^I, Yoan Ramos-Botello^I, Leonardo Palma-Ramírez^I

I. Universidad de Granma, Facultad de Ciencias Técnicas. Granma. Cuba.

II. Universidad de Oriente, Centro de Estudios de Biotecnología Industrial. Santiago de Cuba. Cuba

Correo electrónico: yguardiap@udg.co.cu

Recibido: 13 de abril de 2015

Aceptado: 20 de junio de 2015

Resumen

El trabajo consistió en evaluar la resistencia mecánica de los tanques de fibrocemento como una propuesta de un sistema anaerobio de bajo costo para la producción de biogás. Para el diseño se utilizó el método de los elementos finitos (MEF), el cual fue una herramienta fundamental para realizar el análisis estructural de la resistencia a la tracción de los bioreactores anaerobios. Con el nuevo sistema se propone una alternativa adecuada para generalizar, de manera sostenible y económica, la producción de biogás en las zonas rurales. Para el diseño se

utilizaron tanques de fibrocemento de 1900 L, y tuberías y accesorios plásticos, obtenido un volumen máximo de acumulación de biogás de 1,12 m³. Los tanques de fibrocemento no cumplieron con las especificaciones necesarias para el objetivo de diseño; por tanto, se desarrolló un nuevo diseño dimensional para garantizar la resistencia a la tracción como bioreactores anaerobios.

Palabras claves: bioreactor anaerobio, elementos finitos, fibrocemento, biogás, diseño, resistencia.

Abstract

The paper consist on asses the mechanical resistant of the fibrocement tanks as a proposal of an anaerobic system of low cost for biogas production. For the design was used the finite elements method (FEM), which it is fundamental tool to carried out the structural analysis of the resistant to the traction of the anaerobic bioreactor. With this new system, a suitable option to spread, of sustainable and economic means, the biogas production on rural zones. For the design was used fibrocement tanks of 1900 L, and pipes and accessories plastics, achieving a maximum volume of

cumulative biogas of 1,12 m³. The fibrocement tank was not accomplished with the necessary specifications to achieve the design aim; for that reason, a new dimensional design was developed to guarantee the traction resistant as anaerobic bioreactors.

Keywords: anaerobic bioreactor, finite elements, fibrocement, biogas, design, resistant.

Introducción

Los requerimientos principales para un apropiado diseño de un bioreactor anaerobio en el cual ocurre el proceso de tratamiento anaerobio de los residuos, es que deben permitir una adecuada carga orgánica volumétrica (COV), un corto tiempo de retención hidráulica (TRH) y producir el máximo volumen posible de biogás [1, 2]. También, otros factores como el mezclado, el número de tanques y la temperatura, en conjunto con el sustrato a degradar, forman también bases fundamentales en el apropiado diseño de un bioreactor anaerobio [3, 4]. Aunque comúnmente los bioreactores se construyen con bloques de concretos o con ladrillos de barro, existen otras alternativas favorables que puedan simplificar su construcción, los costes globales y su mantenimiento [5, 6].

El fibrocemento es un material muy utilizado en la construcción, el cual está constituido por una mezcla de un aglomerante inorgánico hidráulico (cemento) y un material calcáreo, reforzado con fibras orgánicas, minerales y/o fibras inorgánicas sintéticas; es un material resistente al fuego y de fácil manipulación. Además, las placas de fibrocemento son impermeables y fáciles de cortar y de perforar. Se utilizan principalmente en construcciones como material de acabado. Por esas razones, ha sido muy utilizado en la construcción de tuberías y tanques de distribución de agua potable [7].

Una aplicación potencial del uso de los tanques de fibrocemento sería como bioreactores anaerobios para el tratamiento de residuos y la producción de biogás. Esto reduciría los costos y facilitaría el montaje del mismo, pero deberá garantizar que las presiones generadas no hagan colapsar dicho recipiente [8].

El uso de métodos clásicos de cálculo, es probablemente la mejor forma de analizar estructuras simples; no obstante, su uso es poco aconsejable cuando el sistema es complejo, tal como es el caso de un tanque de fibrocemento, por la geometría del recipiente y las características de este material. En estos casos la mejor

alternativa, es usualmente una solución obtenida con el método de los elementos finitos (MEF). El mismo es utilizado en diversos problemas de ingeniería, fundamentalmente en aquellos que no tienen una solución analítica o es muy difícil obtenerla, por lo que se convierte en la única alternativa de resolución [9]. En esta investigación, además de los cálculos analíticos se utilizará el método de los elementos finitos con la ayuda de un software profesional de cálculo numérico tal como plantea [10]. Autores como Gopalan et al. han realizado estudios de recipientes a presión donde comparan los resultados numéricos con experimentales [11]. Otros como García y Frías analizaron el comportamiento de tanques fabricados de materiales compuestos [12]; mientras que, Christopher et al. realizaron estudios estáticos y dinámicos con dependencia de recipientes sometidos a presión [13]; sin embargo, existen limitados reportes sobre el estudio del comportamiento de tanques de fibrocemento a presión. Muchos son los autores que utilizan el MEF para este tipo de cálculo. Los resultados satisfactorios obtenidos del cálculo de recipientes a presión aplicando el MEF por dichos autores, corroboran las potencialidades de este método para este tipo de cálculo.

El objetivo de este trabajo fue calcular las tensiones y desplazamiento de los tanques de fibrocemento, que componen un sistema anaerobio, usando el cálculo numérico y comparar dichos resultados con los obtenidos por las formulaciones clásicas.

Métodos y Materiales

Descripción del sistema anaerobio

El sistema anaerobio estudiado fue diseñado con el software SolidWorks 2013. El sistema estuvo compuesto por 3 tanques de fibrocemento de 1900 L de capacidad cada uno (ver Fig. 1). Dos tanques se usarán como bioreactores anaerobios para la producción de biogás, y el tercero como tanque de compensación.

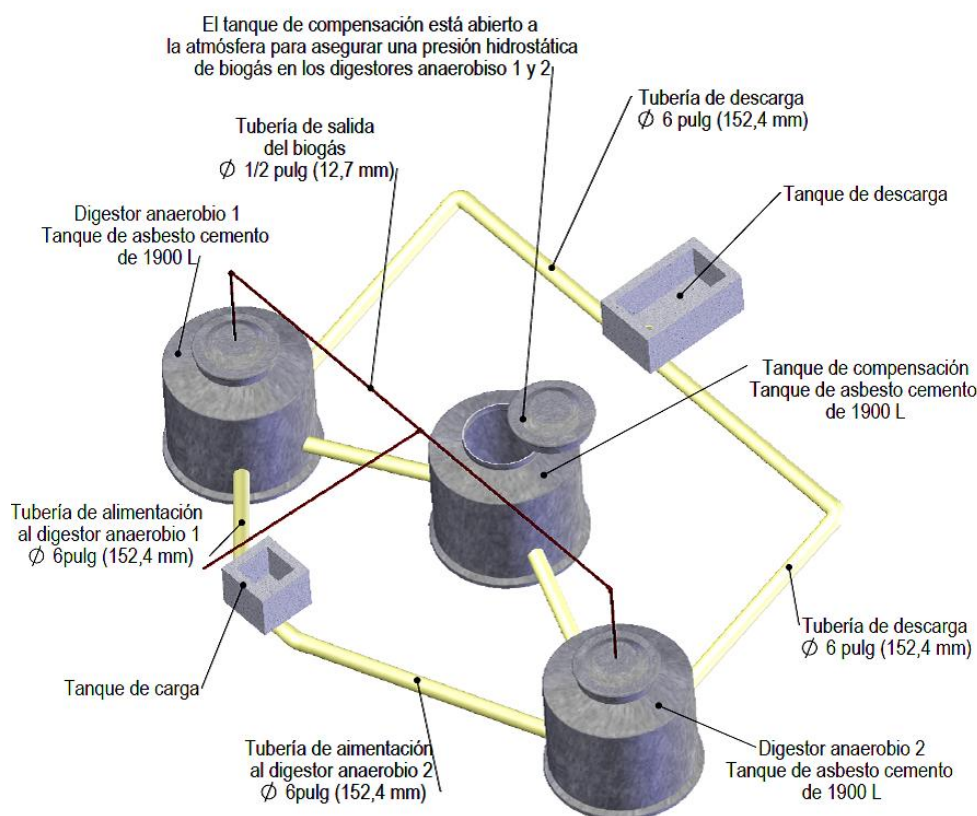


Fig. 1. Sistema de digestión anaerobia usando tanques de fibrocemento para la producción de biogás

Cada bioreactor anaerobio fue diseñado con un volumen de almacenamiento para el biogás de $0,551 \text{ m}^3$, por lo que ambos recipientes en conjunto contarían con un volumen aproximado de almacenamiento de $1,12 \text{ m}^3$. El tanque de compensación fue ubicado 300 mm por encima de los bioreactores. Esta decisión en el diseño está basada en evitar un posible fallo estructural. Para el diseño también fueron consideradas tuberías plásticas de 152,4 mm (6 pulgadas) para las operaciones de carga del residual a tratar y la descarga del lixiviado y el lodo estabilizado. En la conexión de las tuberías fueron utilizados 2 accesorios en forma de T, 2 codos de 90° y 2 codos de 45° . Por otro lado, se emplearon tuberías plásticas de 12,7 mm ($\frac{1}{2}$ pulgada), con el objetivo de extraer el biogás acumulado en los bioreactores anaerobios. Se debe de señalar que a las tuberías y

accesorios empleados en la propuesta del sistema anaerobio no se le realizaron los cálculos correspondientes de resistencia, debido a que este material ha sido comúnmente usado para este tipo de actividad.

Propiedades mecánicas del fibrocemento

Las dimensiones de los tanques de fibrocemento considerados en el diseño fueron obtenidos de la Norma Cubana 232: 2002. Al no contar dicha norma con las propiedades mecánicas del fibrocemento, se realizó una revisión de la literatura especializada, para obtener las propiedades mecánicas necesarias para el cálculo por el MEF. Estas propiedades se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Propiedades mecánicas del fibrocemento [14].

Propiedades mecánicas	Valor
Módulo elástico (GPa)	25
Módulo cortante (MPa)	318,9
Límite a tracción (MPa)	30
Límite elástico (MPa)	20
Densidad (kg m^{-3})	383

Los valores de peso específico del suelo varían en función de las propiedades de éstos, y fundamentalmente con la textura y el contenido de materia orgánica. Sin embargo, como valores medios se consideraron los que se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Pesos específicos promedios de los suelos [15].

Suelo	Peso específico (g m^{-3})
Arenas	1,4 – 1,6
Francos	1,3 – 1,4
Arcillas	1,1 – 1,3
Suelos orgánicos	0,7 – 1,1

Cargas y restricciones

Para los cálculos se plantearon tres variantes que corresponden a las posibles posiciones en las que se pueden colocar los bioreactores anaerobios.

Variante 1. Bioreactor anaerobio ubicado en la superficie del suelo:

Para este primer caso se consideró que el tanque está apoyado sobre el nivel del suelo. Para simular las restricciones de esta condición, al modelo se le restringieron los desplazamientos en la cara inferior del tanque (Fig. 2a).

Variante 2. Bioreactor enterrado hasta una profundidad de 1,44 m:

Para el segundo caso se consideró el tanque enterrado hasta una altura de 1,44 m. Para este se le restringieron los desplazamientos en la base del tanque de cara cilíndrica lateral hasta la altura especificada (Fig. 2b).

Variante 3. Bioreactor completamente enterrado hasta una profundidad de 1,68 m:

Para este caso, se consideraron las mismas restricciones de la variante 2, con la diferencia de que en esta si considera el peso de la tierra que soportará en la parte superior (Fig. 2c).

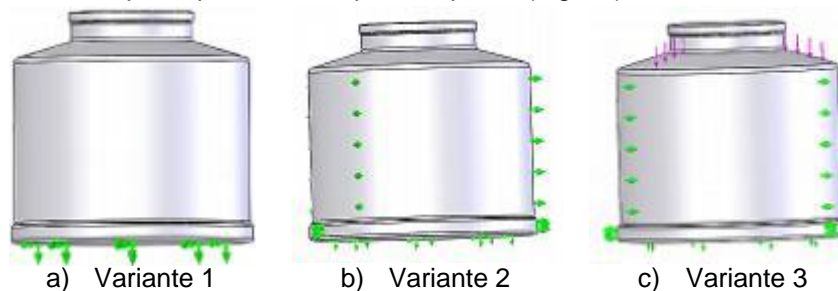


Fig. 2. Cargas y restricciones

Para los tres casos analizados, los tanques de los extremos (bioreactores) estarán sometidos a una presión interior que puede variar en función de la cantidad de residuos y la producción de biogás. En el caso de la variante tres, además de estas presiones, también deberá soportar la presión ejercida por el volumen de tierra que recae sobre el tanque.

Para realizar los cálculos se consideraron las condiciones extremas a las que se puede ser sometido el recipiente: altura de lixiviado de 312 mm y la producción máxima de biogás en el tanque.

La presión en el fondo del recipiente se determinó a partir de la ecuación 1:

$$P_1 = P_{atm} + h \cdot \gamma \quad (1)$$

Donde:

P_1 : Presión en el fondo del tanque.

P_{atm} : Presión atmosférica (101 235 Pa).

h : Diferencia de altura (1,7 m).

γ : Peso específico del líquido lixiviado dentro del sistema anaerobio ($1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$).

Teniendo en cuenta estos valores y la ecuación 1, la presión absoluta obtenida es de 102 935 Pa. Aunque este no es el valor de presión que actúa en todas las superficies del tanque, es el valor que se utilizará para los cálculos, ya que este es el mayor valor de presión interna que se puede estar sometido el tanque de fibrocemento. En el caso de la variante 3 además del valor de presión antes calculado también consideró el peso ejercido por la tierra que tendrá encima, la cual se calculó a partir de la ecuación (2).

$$P_{tierra} = V \cdot \gamma_{tierra} \quad (2)$$

Donde:

P_{tierra} : Fuerza ejercida por la tierra sobre el tanque.

γ_{tierra} : Peso específico de la tierra ($0,7 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

V : Volumen de tierra sobre el tanque ($0,3925 \text{ m}^3$).

Finalmente este valor de la fuerza tuvo un valor de 274,61 kgf (2693 N).

Mallado

Al modelo propuesto se le realizó un mallado estándar donde se utilizó un elemento finito tipo sólido tetraédrico de alto orden (10 nodos), con tres grados de libertad por nodo con un tamaño global del elemento de 3 mm y una tolerancia de 0,1 mm. Finalmente se obtuvieron un total de 128 827 elementos y 257 218 nodos.

Resultados y Discusión

Análisis de los valores de tensiones para la variante 1

Al analizar los valores del primer esfuerzo principal, se observó que los máximos valores de tensiones en el tanque fueron de 96 MPa en la parte superior del mismo, en la zona donde se produce el cambio de sección. Esos valores de tensiones sobrepasan el límite de rotura, el cual fue de 20 MPa. En esta situación se provoca la rotura del recipiente, pues no resiste la presión ejercida por la acumulación de biogás. La comprobación del factor de seguridad, con un valor de 0,31 corrobora lo antes dicho (Fig. 3a).

Análisis de los valores de tensiones para variante 2

Los valores del primer esfuerzo principal disminuyeron con respecto al caso anterior, aunque se observaron en la misma zona. Esos valores fueron de 54,8 MPa, pero superan igualmente el límite de rotura del material del tanque. Al analizar el factor de seguridad se observó un valor de 0,55 (Fig. 3b).

Análisis de los valores de tensiones para variante 3

En este caso, donde se tuvo en cuenta la fuerza ejercida por la tierra en la parte superior del tanque los valores de tensiones disminuyeron en 0,6 unidades con respecto a la variante 2. No obstante, los valores de tensiones todavía son altos, lo que provocaría la destrucción del tanque. La comprobación del factor de seguridad muestra que no hay una diferencia significativa con las variantes anteriores (Fig. 3c).

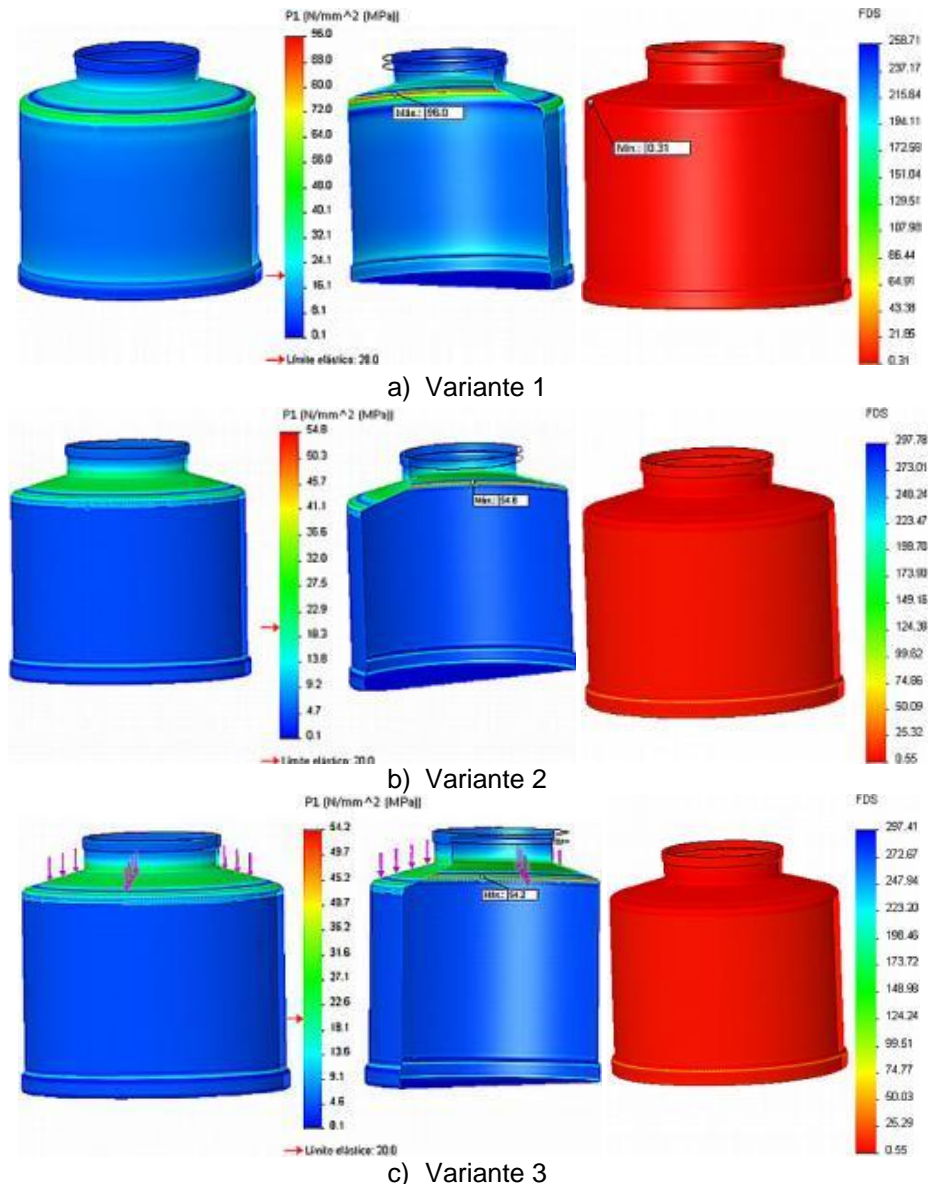


Fig. 3. Valores máximos de tensiones y su factor de seguridad

Estrategia de solución de los problemas de la rotura de los tanques de fibrocemento como bioreactores anaerobios

Para garantizar la solución al problema de rotura de los tanques de fibrocemento, se analizaron 2 variantes, con espesores de pared correspondiente a 12 mm y 24 mm y una tercera variante con estos mismos espesores pero con un reforzado de 12 mm en la unión entre la pared y la parte superior del tanque (Fig. 4). Estas variantes fueron seleccionadas con el objetivo de garantizar la resistencia a las presiones producidas en el interior del tanque.

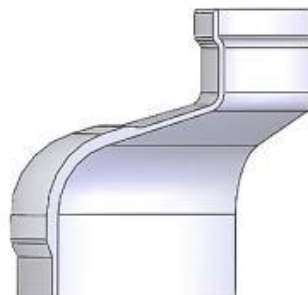


Fig. 4. Detalle del reforzamiento entre la pared y la parte superior del tanque

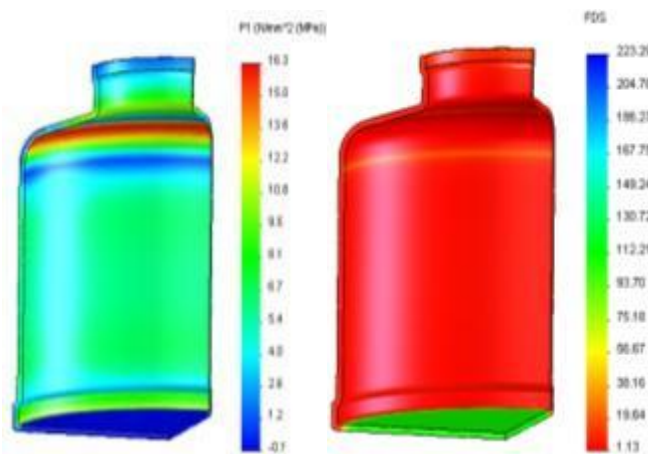
En la tabla 3 se muestra un resumen de los resultados obtenidos por el software SolidWorks Simulation considerando estas soluciones.

Tabla 3. Resumen de las variantes seleccionadas para la solución de los problemas del tanque de fibrocemento

Variantes	Espesor δ (mm)	Radio de Curvatura R_1 (mm)	Tensión máxima obtenida por el MEF (MPa)	Factor de Seguridad
Variante 1	12	100	50,6	0,34
	12	150	34,8	0,49
Variante 2	24	100	22,0	0,83
	24	150	16,3	1,13
Variante 3 reforzada	12	150	24,9	0,75
	24	150	12,6	1,54

Como ejemplo, se muestra en la figura 5 el estudio de la variante 2 con R_1 igual a 150 mm donde se verificó la resistencia del tanque teniendo en cuenta el primer criterio de resistencia, el cual plantea que:

$$\sigma_{lim} \geq \sigma_1 \quad (3)$$

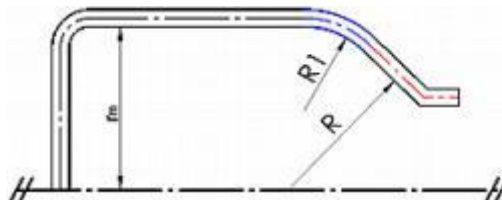
**Fig. 5.** Tensiones del primer esfuerzo principal y su factor de seguridad para la variante de solución 2

El mayor valor del primer esfuerzo principal fue de 16,3 MPa; mientras que, el límite de rotura es de 20 MPa. Al analizar el factor de seguridad se observa un valor de 1,13 lo que corrobora lo descrito anteriormente.

Asimismo en la variante 3 reforzada se observa que para esas condiciones se obtiene un factor de seguridad de 1,54 la cual también cumple con la condición de resistencia y es más aconsejable para la utilización de esta variante.

Validación de los resultados de las tensiones

Para verificar los resultados obtenidos por elementos finitos se calcularon las tensiones según la teoría para el cálculo de resistencia a presión de paredes delgadas. Para los casos a calcular, los mayores valores de tensiones estarán dados en la zona denotada por R_1 en la figura 6.

**Fig. 6.** Sección transversal del tanque

En esta zona, las tensiones circunferenciales estarán dadas por la ecuación 4.

$$\sigma_t = \frac{P \cdot R}{\delta} \cdot \left(1 - \frac{R}{2 \cdot R_1}\right) \quad (4)$$

Donde:

δ : Espesor.

P : Presión en el interior del tanque (101235 Pa).

R : Radio en el cambio de sección (1210 mm).

R_1 : Radio en la parte superior del tanque (150 mm).

Finalmente la tensión circunferencial da como resultado -15 481 924,7 Pa. La diferencia entre este valor y el obtenido por elementos finitos que se muestran en la Figura 5 no es significativa.

De igual manera se calcularon las tensiones circunferenciales en la parte cilíndrica del tanque a partir de la ecuación 5 la cual plantea que:

$$\sigma_t = \frac{P \cdot r_m}{\delta} \quad (5)$$

Según esta expresión el valor de tensión da como resultado 3 037 050 Pa. Los resultados obtenidos se asemejan bastante a los obtenidos por elementos finitos.

Los valores obtenidos por ambos métodos fueron similares, por lo que se puede concluir que los resultados son correctos.

Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos por el método de los elementos finitos y del método clásico de cálculo, se comprobó que los tanques de fibrocemento construidos actualmente no satisfacen las condiciones de resistencia requeridas para ser utilizados como bioreactores anaerobios.

Para garantizar que los tanques de fibrocementoresistan los esfuerzos a los que serán sometidos debido a la acumulación máxima de biogás, debe de aumentarse el espesor del tanque hasta 24 mm, colocar un refuerzo de 12 mm de espesor en la unión entre la pared con la parte superior y variar el radio de curvatura de esta zona hasta 150 mm. Esto garantizará un factor de seguridad de 1,54.

Referencias

- Demirbas MF, Balat M, Balat H. Biowastes-to-biofuels. *Energy Conversion and Management*. 2011;52:1815-28. ISSN 0196-8904.
- Rao PV, Baral SS. Experimental design of mixture for the anaerobic co-digestion of sewage sludge. *Chemical Engineering Journal*. 2011;172:977-86. ISSN 1385-8947.
- Nizami AS, Murphy JD. What type of digester configurations should be employed to produce biomethane from grass silage? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010;14:1558-68. ISSN 1364-0321.
- Zhang C, Su H, Baeyens J, et al. Reviewing the anaerobic digestion of food waste for biogas production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014;38(0):383-92. ISSN 1364-0321.
- Chong S, Sen TK, Kayaalp A, et al. The performance enhancements of UASB reactors for domestic sludge treatment: A State-of-the-art review. *Water Research*. 2012;46:3434-70. ISSN 0043-1354.
- Gupta P, Singh RS, Sachan A, et al. A re-appraisal on intensification of biogas production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012;16:4908-16. ISSN 1364-0321.
- Smolders S, Verhoest L, Gueldre GD, et al. Inspection of deteriorating asbestos cement force mains with georadar technique. *Water Science & Technology*. 2009;60(4):995-1001. ISSN 0273-1223.
- Lindmark J, Thorin E, Bel Fdhila R, et al. Effects of mixing on the result of anaerobic digestion: Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014;40(0):1030-47. ISSN 1364-0321.
- Freytag M, Shapiro V, Tsukanov I. Finite element analysis in situ. *Finite Elements in Analysis and Design*. 2011;47(9):957-72. ISSN 0168-874X.
- Jeyakumar M, Christopher T. Influence of residual stresses on failure pressure of cylindrical pressure vessels. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2013;26(6):1415-21. ISSN 1000-9361.
- Gopalan A, Samal MK, Chakravarty JK. Fracture toughness evaluation of 20MnMoNi55 pressure vessel steel in the ductile to brittle transition regime: Experiment; numerical simulations. *Journal of Nuclear Materials*. 2015;465:424-32. ISSN 0022-3115.
- García de la Figal Costales J, Frías O. Cálculo de tanque de PRFV de 200 000 litros de capacidad. *Ingeniería Mecánica*. 2002;5(1):49-54. ISSN 1029-516X.
- Christopher T, Rama Sarma BSV, Govindan Potti PK, et al. A comparative study on failure pressure estimations of unflawed cylindrical vessels. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2002;79(1):53-66. ISSN 0308-0161.
- Roma LC, Martello LS, Savastano H. Evaluation of mechanical, physical and thermal performance of cement-based tiles reinforced with vegetable fibers. *Construction & Building Materials*. 2008;22(4):668-74. ISSN 0950-0618.
- Alvarez R, Steinbach HS. A review of the effects of tillage systems on some soil physical properties, water content, nitrate availability and crops yield in the Argentine Pampas. *Soil and Tillage Research*. 2009;104(1):1-15. ISSN 0167-1987.