

Tubos geotextil, características, conceptos, materiales y aspectos del análisis

Geotextil tubes characteristics, concepts, materials and analysis aspects

Carlos E. Espinosa y Omar L. Torres

Geomatrix S. A., Bogotá (Colombia)

RESUMEN

Los tubos geotextil son estructuras hidráulicas que se manufacturan con geotextiles tejidos de alta resistencia y se llenan por medios hidráulicos con una mezcla fluida de agua y suelo dragado o bombeado. Los tubos geotextil se utilizan, en su mayoría, en aplicaciones marinas y fluviales para construir obras de control de erosión, encausamiento, defensa y protección. En este documento se definen las partes que componen un tubo geotextil y sus características principales. Se presenta una metodología de análisis para calcular la geometría y los esfuerzos internos que se desarrollan durante el llenado, la cual se basa en un modelo matemático bidimensional. Con el uso de este modelo se calculan las diversas geometrías que se obtienen para un mismo tubo geotextil al variar los valores de la presión de llenado en las condiciones sumergido o no sumergido. Los resultados obtenidos permiten conocer la presión necesaria para alcanzar una geometría y altura determinada. Se evidencia que la altura del tubo geotextil cambia con respecto al valor de la presión de llenado, para valores bajos de presión, la altura tiende a cambiar de manera significativa, mientras que para altos niveles de esta presión no se obtienen mayores cambios, lo cual debe considerarse en la definición del rango de trabajo e incrementos del esfuerzo a tensión que se aplican al geotextil durante la operación de llenado del tubo.

ABSTRACT

Geotextile tubes are hydraulic structures that are manufactured with high strength geotextile fabrics and filled hydraulically with a fluid mixture of water and soil dredged or pumped. Geotextile tubes are used in coastal and river applications erosion control, course, defense and protection. This document defines the parts of a geotextile tube and its main characteristics. It presents an analysis methodology to calculate the geometry and internal forces that develop during filling, which is based on a two-dimensional mathematical model. Using this model are calculated different geometries that result for the same geotextile tube by varying the values of filling pressure in the non-submerged or submerged conditions. The results provide insight into the pressure needed to reach a certain height and geometry. The height of the geotextile tube changes from the value of filling pressure, low values of pressure, height tends to change significantly, while for high levels of this pressure does not get major changes, which should be considered in defining the operating range and increases the tensile stress applied to the geotextile during the filling tube.

Palabras clave: tubo geotextil, geotubo, geotextil, geosintético, estructura hidráulica geosintética, poliéster.

1. INTRODUCCIÓN

Los proyectos hidráulicos marinos y fluviales en ocasiones requieren de la construcción de estructuras no convencionales, que se puedan construir de manera rápida y sencilla. Entre este tipo de estructuras se encuentran los tubos geotextil o geotubos, como también se conocen, que son contenedores cilíndricos alargados que se manufacturan con franjas de geotextiles tejidos de alta resistencia cosidas entre sí.

Los tubos geotextil se llevan vacíos y en empaques individuales al sitio de la obra, donde se disponen según el diseño hidráulico para llenarse, utilizando equipos de succión y bombeo, con una mezcla de suelo y agua a una determinada presión.

Los tubos geotextil implican un alto nivel de exigencia tanto mecánica como de durabilidad, razón por la cual los geotextiles tejidos de poliéster de alta tenacidad PET tienen allí un campo

de aplicación fundamental, dada su alta resistencia a la tensión, alto módulo de deformación y baja fluencia ante carga sostenida a largo plazo.

Por lo general, los proyectos con tubos geotextil se diseñan para construirse de manera rápida, simple y económica con el material del sitio, apoyados sobre el terreno natural. No obstante, se construyen proyectos de tubos geotextil donde el material para su llenado tiene que transportarse al sitio de la obra; en otros casos, los tubos después de haber sido llenados, se sueltan en el lecho desde barcasas de fondo partido.

La forma transversal de un tubo geotextil es ovalada y la altura y ancho que éstos alcanzan dependen directamente de su perímetro y de la presión de llenado. La longitud se limita por la capacidad de llenado o por factores logísticos, como el peso de los tubos vacíos o la geometría de la estructura.

En desarrollo del presente documento, en el numeral 2 se hace una descripción detallada de cada una de sus partes, junto con las principales características que debe tener el geotextil. En el numeral 3 se presenta una metodología de análisis de tubos geotextil basada en los trabajos de Liu (1981), Kazimierowicz (1994) y Carroll (1994), en donde se consignan las formulaciones básicas y condiciones para el modelamiento numérico. En el numeral 4 se presenta un análisis de tendencias a través de gráficas del comportamiento de la geometría con respecto a la variación de la presión de llenado o del perímetro de los tubos geotextil, a partir del cual se plantean, finalmente, recomendaciones relacionadas con el diseño y llenado.

2. CARACTERÍSTICAS, PARTES Y APLICACIONES DE LOS TUBOS GEOTEXTIL

2.1 Partes de un tubo geotextil

Un tubo geotextil se compone de franjas de geotextil de alta resistencia cosidas entre sí por mediante un procedimiento industrial. Esta costura forma una envoltura cilíndrica y es la responsable de soportar las fuerzas de tensión presentes tanto en el sentido transversal como en el longitudinal. Además de la envoltura o cuerpo, un tubo geotextil cuenta con otras partes, tal como se muestra en las figuras 1 y 2.

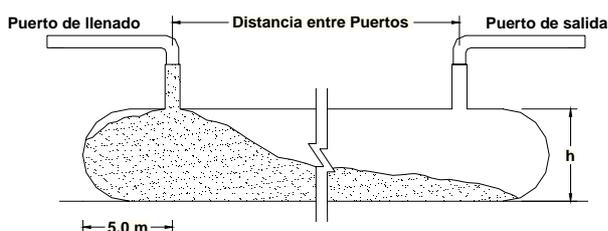


Figura 1. Sección longitudinal del tubo geotextil

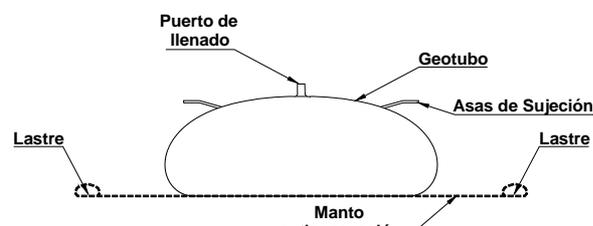


Figura 2. Sección transversal del tubo geotextil

Puertos de llenado y alivio

Los tubos geotextil están provistos de mangas o chimeneas por donde se introduce la tubería de llenado. Además de permitir el llenado, los puertos permiten aliviar la presión durante el bombeo de material. La ubicación y cantidad de los puertos se define en el diseño de acuerdo con el tipo de material con que se va a llenar el tubo geotextil. Sprague (2000) presenta un modelo matemático para calcular la distancia entre puertos. Como mínimo un tubo geotextil deberá contar con dos puertos de llenado. Pilarczyk (2000) anota que los puertos de llenado no podrán quedar a menos de 5.0 m de distancia de los extremos frontales del tubo geotextil, tal como se muestra en la figura 1.

Asas u orejas de sujeción

Son correas confeccionadas con geotextil en forma de argollas que van cosidas al tubo. De éstas se pueden sujetar cuerdas o eslingas para mantener su posicionamiento durante el llenado (fig. 2).

Manto antisocavación

Con el objetivo de evitar la socavación asociada al oleaje y a las corrientes presentes entre el suelo de fundación y el tubo se dispone un manto antisocavación que se manufactura con geotextil. El manto cuenta con dispositivos de anclaje a manera de lastres que lo mantienen adherido a la superficie que protege, como se muestra en la figura 2.

2.2 Geotextiles de poliéster de alta tenacidad PET para tubos geotextil

El alto desempeño mecánico de los geotextiles de poliéster de alta tenacidad PET se asocia fundamentalmente con su proceso de obtención y transformación. El poliéster de alta tenacidad es un polímero obtenido en la industria petroquímica, con un mayor grado de polimerización frente a otros polímeros utilizados en la industria de los geosintéticos, como el polipropileno PP o el polietileno de alta densidad HDPE. El poliéster de alta tenacidad se caracteriza por presentar un peso específico de 1.39 gr/cm³, peso molecular superior a 25.000 g/mol y nivel de grupo carboxilo final menor que 30, características que le confieren una alta estabilidad química y física.

El poliéster de alta tenacidad se transforma mediante técnicas de hilatura en fibras de multifilamento, las cuales se asemejan a pequeños torones de alta resistencia, como se aprecia en la figura 3. Estas fibras se caracterizan por poseer una alta relación resistencia a la tensión-deformación, tal como se ilustra en la figura 4, y alta estabilidad mecánica a través del tiempo (bajo creep) como se aprecia en la figura 5.

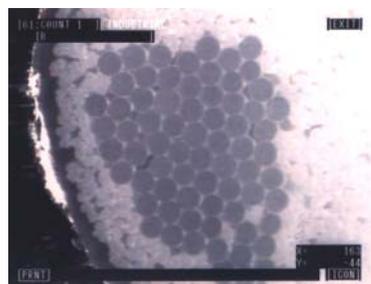


Figura 3. Fotografía vista al microscopio de una sección de fibra multifilamento de PET ampliada 200 veces

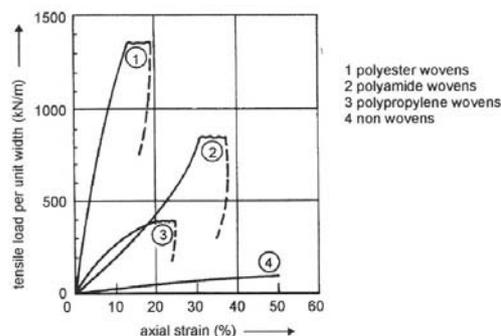


Figura 4. Relación resistencia a la tensión-deformación (Pilarczyk K.W, 2000)

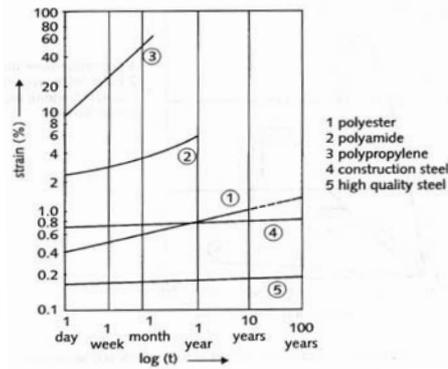


Figura 5. Deformación plástica a través del tiempo. Sometido al 60% de la carga a la rotura (Pilarczyk K.W., 2000)

2.3 Aplicaciones características

Las obras de ingeniería donde tienen aplicación los tubos geotextil son del tipo hidráulico. Estas obras se pueden dividir como ribereñas o marinas, además de existir aplicaciones especiales.

Obras ribereñas

- Protección, recuperación y rehabilitación de orillas.
- Protecciones marginales en ríos.
- Espigones de encauzamiento fluvial.
- Relleno de vórtices.
- Construcción y mantenimiento de canales fluviales.
- Muelles y embarcaderos.
- Estructuras de disipación de energía.
- Diques de contención.

Obras marinas

- Protección, recuperación y rehabilitación de orillas de líneas costeras.
- Espolones costeros.
- Rompeolas.
- Escolleras.
- Islas artificiales.
- Refuerzo y realce de dunas.
- Rellenos submarinos.
- Muelles y embarcaderos
- Construcción y mantenimiento de canales marítimos.

3. FORMULACIÓN Y MODELO ANALÍTICO

Para el análisis y cálculo de la geometría que se alcanza y los esfuerzos que se desarrollan sobre la envoltura geotextil durante el llenado, se han desarrollado modelos matemáticos establecidos a partir de trabajos experimentales entre los cuales se destaca el realizado por Liu en 1981, titulado *Desing criteria of sand sausages for beach defenses*, que llenó tubos sobre platos transparentes de plexiglás para poder medir la longitud de contacto en la base del tubo.

Las fuerzas que se desarrollan sobre el geotextil son de naturaleza bidimensional. Una tensión ejercida en la circunferencia denominada T , que corresponde a la sección transversal, siendo la de mayor valor (fig. 7); y otra, de menor valor, en el sentido longitudinal que se denomina T_{long} la cual es ortogonal a la de tensión en la circunferencia.

El modelamiento considera las siguientes condiciones de frontera y suposiciones de acuerdo con Liu (1981), Kazimierowicz (1994) y Carroll (1994):

- El problema es de naturaleza bidimensional. Es decir, el tubo se considera largo y que todas sus secciones transversales son idénticas en geometría y propiedades de los materiales.
- No hay lugar para pérdida de presión.
- El geotextil que conforma el geotubo es delgado, flexible y de peso despreciable por unidad de longitud.
- El material de llenado es una mezcla hidráulica que imparte un estado de esfuerzos hidrostático dentro del tubo.
- No existen esfuerzos cortantes entre el material de llenado y el geotextil.

Tal como se muestra en la figura 6, el tubo geotextil se considera lleno con un solo tipo de fluido de peso unitario γ en condición no sumergido, es decir, rodeado de aire. Se considera que la sección es simétrica y el valor máximo en el eje x (la altura) es igual a h . Un ancho máximo denominado B . Una superficie plana de contacto, correspondiente a la fundación del tubo en la superficie de longitud b . La presión de llenado de la mezcla en el tubo geotextil p_0 . Si se tiene que la mezcla fluida presenta una presión hidrostática dentro del tubo, para cualquier valor de x con respecto a la altura, se cumple que, $p(x) = p_0 + \gamma x$.

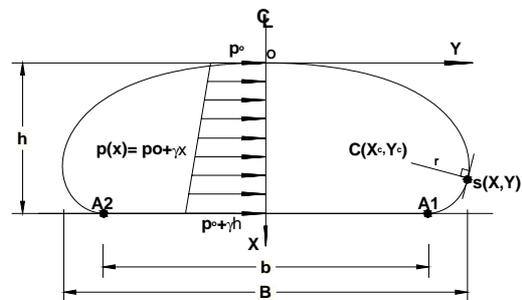


Figura 6. Sección transversal del tubo geotextil

Nótese (fig. 6) que el origen del eje de coordenadas (x,y) se ubica en el punto O . Según lo anterior, la geometría de la sección transversal del tubo geotextil se puede definir por una función desconocida $y = f(x)$. En el punto $S(x,y)$ el tubo geotextil presenta una curvatura con radio r , con su centro en $C(x_c, y_c)$. Tanto r como C cambian de acuerdo con la función $y = f(x)$.

En la figura 7 se muestra un arco infinitesimal de longitud ds en el punto $S(x,y)$, donde se analizan las fuerzas presentes en el geotextil en el sentido transversal.

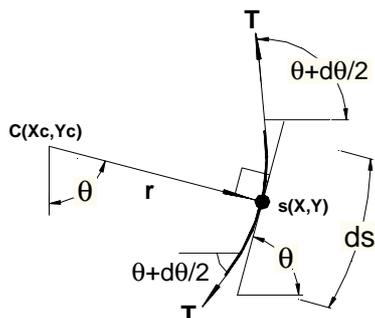


Figura 7. Sección curvatura de la sección transversal

Donde,

p_0 = presión de llenado.

γ = peso unitario de la mezcla hidráulica.

h = altura.

B = ancho del tubo geotextil.

b = ancho en la base.

Bajo la naturaleza asumida del problema como bidimensional y al no considerar el desarrollo de fuerzas cortantes entre el geosintético y el fluido, se llega a que la fuerza a tensión T presente en el geosintético será constante a lo largo de todo el perímetro del tubo. Al escribir la ecuación de equilibrio de fuerzas para cualquier punto (x, y) se obtiene la ecuación (1) que es la expresión para calcular la fuerza a tensión correspondiente a la circunferencia del geotextil.

$$r(x) = \frac{T}{p(x)} \quad (1)$$

La ecuación (1) sólo es válida para el tramo de la circunferencia comprendido entre A2 O A1 en la figura 6. De acuerdo con Leshchinsky (1996), en esta metodología de análisis para efectos de la simplificación del cálculo de la fuerza T y dentro de un escenario conservador, en el tramo A1A2 se puede considerar que el suelo de cimentación del tubo no asume nada del esfuerzo y todo es soportado por el mismo geotextil. Con la geometría de la sección y mediante un cálculo diferencial se puede conocer el radio de curvatura dado por

$$r(x) = \frac{\left[1 + (y')^2\right]^{\frac{3}{2}}}{y''} \quad (2)$$

donde $y' = dy/dx$, y $y'' = d^2y/dx^2$. Al sustituir $r(x)$ de la ecuación (2) y $p(x) = p_0 + \gamma x$, en la ecuación (1) se obtiene,

$$T y'' - (p_0 + \gamma x) \left[1 + (y')^2\right]^{\frac{3}{2}} = 0 \quad (3)$$

la cual es una ecuación diferencial no lineal, que se puede solucionar numéricamente. De acuerdo con los desarrollos y soluciones dadas a la ecuación (3) por autores como Carroll (1994), en la solución numérica de la ecuación se obtienen relaciones entre la geometría del tubo $y = f(x)$, la altura h , la fuerza a tensión T , la presión de llenado p_0 , y el peso unitario del fluido γ , por lo cual se puede escribir,

$$y = f(x|T, p_0, h, \gamma) \quad (4)$$

Teniendo que el peso unitario de la mezcla hidráulica se puede conocer (ej., mezcla arena - agua $\gamma = 1.2 \text{ kN/m}^3$), y que x es una variable independiente, entonces y estará en función de x , y de

los tres parámetros T , p_0 y h . Normalmente $y = f(x)$ se encuentra para un parámetro de diseño dado, ya sea la presión de llenado p_0 , la altura h o la tensión T . Es decir, si cualquiera de estos tres parámetros es dado como dato del problema (parámetro de diseño), los otros dos parámetros harán parte de la solución. Mediante un cálculo que reemplaza los dos parámetros desconocidos por dos restricciones físicas de éstos, se pueden encontrar soluciones explícitas para el problema. Estas soluciones dadas en términos de la geometría del tubo geotextil, el parámetro de diseño y los dos parámetros encontrados.

4. ANÁLISIS PARAMÉTRICO DE TUBOS GEOTEXTIL DE POLIÉSTER DE ALTO MÓDULO

4.1 Análisis de un tubo geotextil

Para conocer la geometría que se alcanza durante el llenado de un tubo geotextil, se realizó un análisis con datos correspondientes a tubos confeccionados con geotextiles de poliéster.

El cálculo se realizó con el uso de una herramienta computacional que soluciona las ecuaciones planteadas en el numeral 3. La metodología de análisis se estructura en las previsiones planteadas por Liu (1981), Kazimierowicz (1994) y Carroll (1994). Los cálculos se realizaron variando parámetros de entrada como la presión de llenado p_0 , la altura h , y el perímetro P .

Después de realizar los cálculos correspondientes se obtienen los resultados que se presentan en las figuras 8-10.

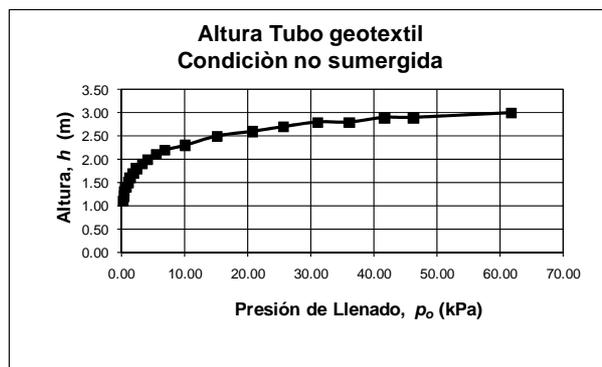


Figura 8. Altura del tubo para una presión de llenado

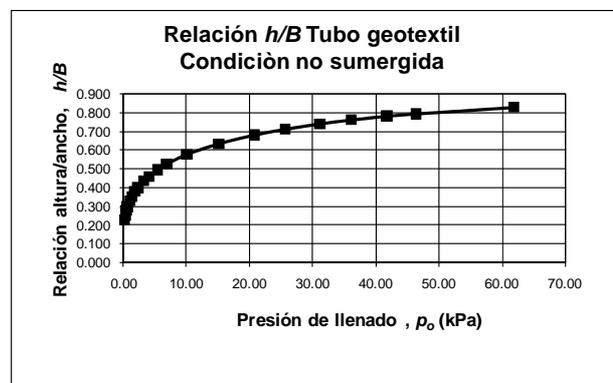


Figura 9. Relación geométrica para una presión de llenado

La figura 8 se obtuvo para una altura requerida a la cual le corresponde un valor de presión de llenado p_0 , en condiciones no sumergidas. En ésta se aprecia que al cambiar la presión de lle-

nado p_o en un rango de valores bajos, la altura h del tubo se incrementa de manera significativa. Por el contrario, para altos valores de presión de llenado p_o se denota un incremento mínimo en la altura h y la curva tiende a volverse horizontal, es decir, después del punto de inflexión de la curva la altura h del tubo geotextil se mantiene cercana a ser constante ante cualquier incremento de la presión de llenado p_o .

La figura 9 se obtuvo para una altura requerida a la cual le corresponde un valor de presión de llenado p_o , en condiciones no sumergidas. Se aprecia que al aumentar la presión de llenado p_o la relación altura/ancho (h/B) también aumenta. Es decir, al ir incrementando la presión de llenado p_o el tubo geotextil pasa de tener una forma “aplastada” (más ancha que alta) a tener una forma más redondeada o circular. Luego del punto de inflexión no se nota mayor incremento en la relación (h/B), correspondiendo a que la altura y el ancho tratan de igualarse. Para bajos valores de la relación (h/B) la estabilidad ante el volcamiento será mayor porque se tendría una estructura con más superficie de contacto con el suelo de fundación.

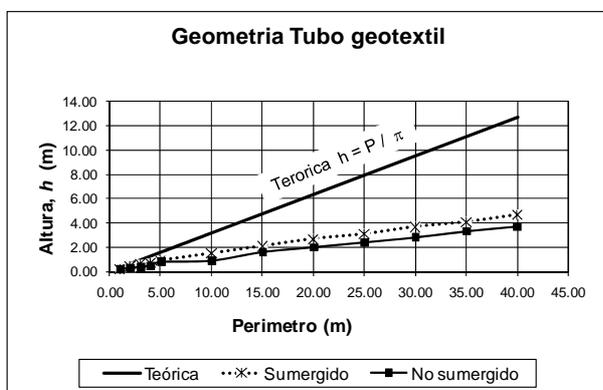


Figura 10. Alturas de acuerdo con el perímetro

La figura 10 se obtuvo para una presión mínima de llenado $p_o = 0.30$ kPa, con la cual se calcularon los valores correspondientes a altura mínima h_{min} para tubos geotextil de diferentes perímetros. La línea punteada corresponde a la condición de llenar tubos completamente sumergidos en agua y la línea continua para la condición no sumergida. En la figura 10 se observa que en la condición sumergida se alcanzan alturas mayores del tubo geotextil que en la condición no sumergida. Se muestra la curva teórica que representa la relación para un tubo geotextil de forma ideal (totalmente circular), en donde se cumple que el diámetro de la circunferencia del tubo geotextil es igual a su altura h . La curva correspondiente a la condición sumergida se inclina más hacia la curva teórica de la circunferencia, por lo cual, se tiene que un tubo geotextil mantiene una forma más circular cuando se llena en condición sumergida, resultando más fácil alcanzar la altura durante el llenado.

5. CONCLUSIONES

Se presentaron las partes, materiales y características con que se confeccionan los tubos geotextil, así como una metodología de diseño desarrollada para realizar un análisis numérico. Se realizaron cálculos a manera de estudio paramétrico para encontrar curvas de comportamiento ante diferentes condiciones y parámetros durante el llenado de tubos geotextil. A partir de los resultados obtenidos con el software de análisis, sumado a la experiencia propia del diseño y construcción de tubos geotextil se consignan las siguientes conclusiones.

Se evidencia que la presión de llenado p_o es el parámetro que controla tanto la geometría como las tensiones que se alcanzan durante el llenado de un tubo geotextil.

En el llenado de los tubos geotextil se debe controlar la presión de llenado p_o , para alcanzar una determinada altura cuidando de no exceder los límites que se asocian a la resistencia a la tensión del geotextil con que se encuentra confeccionado el tubo.

Después por un cierto valor en la presión de llenado el tubo no sigue aumentando su altura y sólo se experimentan incrementos en la tensión presente en el geotextil. Los altos incrementos en la presión de llenado se ven representados en el aumento de las tensiones sobre el geotextil, el cual puede llegar a fallar por tensión.

La tensión última T_{ult} de un geotextil y la tensión disponible T_{dis} son los parámetros principales con que cuenta un geotextil para ser seleccionado como material de confección de un tubo geotextil. La resistencia a la tensión disponible T_{dis} depende de manera inversa a los factores de reducción de ésta, por consiguiendo los geotextiles que cuenten bajos valores de los factores de reducción son mejores para utilizarse en la confección de tubos geotextil, tal como pasa con los geotextiles de alta tenacidad de PET. Los geotextiles producidos a partir del poliéster presentan los factores de reducción más bajos característica que los convierte en la mejor opción para confeccionar tubos geotextil.

Los tubos geotextil llenados en condición sumergida alcanzan una mayor altura que si fuesen llenados bajo los mismos parámetros pero en condición no sumergida. De igual manera tienden a ser de forma más redondeada.

6. AGRADECIMIENTOS

Al equipo de trabajo de la compañía Geomatrix S.A. por su colaboración y apoyo.

7. REFERENCIAS

- Carroll, R. (1994). Submerged geotextile flexible forms using noncircular cylindrical shapes. *Geotechnical Fabricas Report, IFAI*, 8, 4-15.
- Kazmierowicz, K. (1994). *Simple analysis of deformation of sand-sausages*. Fifth Int. Conf. on Geotextile and Geomembranes. Singapore, pp. 775-778.
- Koerner, R. M. (2005). *Designing with geosynthetics*. New York: Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River.
- Leshchinsky, D., Leshchinsky, O., Ling H., & Gilbert P. (1996). Geosynthetic tubes for confining pressurized slurry: Some desing aspects, *Journal of Geotechnical Engineering*, 122(8), 682-690.
- Liu, S. (1981). Desing criteria of sand sausages for beach defenses. *19th IAHR congress*, pp. 123-131.
- Pilarczyk K. (2000). *Geosynthetics and geosystems in hydraulic and coastal engineering*. Rotterdam: A.A. Balkema.
- Plaut, R. & Suherman, S. (1998). Two-dimensional analysis of geosynthetics tubes. *Acta Mechanica*, pp. 207-218.
- Sprague, J. T. (2000). *Dredged-material filled geotextile tubes: Desing and construction*. *Designers Forum TRI*, pp. 114-1118.