

Comportamiento mecánico a compresión de materiales compuestos a partir de una matriz de poliuretano rígido

MILDER MOISÉS MENGUAL VELÁSQUEZ¹

FABIÁN AUGUSTO LAMUS BÁEZ²

JENNY MAGALY PIRA RUIZ³

SANDRA ELODIA OSPINA LOZANO⁴

RESUMEN

El poliuretano rígido es un material que presenta una excelente relación entre su resistencia a la compresión y su densidad, considerando que se trata de una espuma. Además del hecho de que puede ser mezclado in situ, cambiando rápidamente de estado líquido a sólido, resultan características interesantes que pueden ser aprovechadas en la fabricación de rellenos estructurales. En este trabajo se estudia el comportamiento a la compresión de materiales compuestos por una matriz de poliuretano rígido en la que se embeben segmentos de materiales como *Guadua angustifolia* y caucho de llantas en trozos. Inicialmente se diseñaron diferentes mezclas, variando el contenido de cada uno de los materiales. Para cada mezcla se construyeron probetas con el fin de determinar la resistencia de estas a la compresión simple y a la confinada. Finalmente se verificó el aporte del material de relleno a la resistencia a la compresión radial en elementos cilíndricos de PVC. Se encontró que la incorporación de macropartículas de *Guadua a.* a la matriz de poliuretano permite obtener un relleno con resistencia a la compresión superior a la de la matriz, lo que reduce en un 95 % la cantidad necesaria de este polímero para obtener el mismo volumen.

Palabras clave: compresión, *Guadua angustifolia*, poliuretano, relleno, resistencia.

¹ Ingeniero civil, miembro del Semillero de investigación ESMAV, Universidad del La Salle, Colombia. Correo electrónico: mildermoisés@hotmail.com

² Ingeniero civil. Doctor en Ciencia y Tecnología de Materiales. Profesor asistente de la Universidad de La Salle, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: falamusb@unisalle.edu.co

³ Estudiante de Ingeniería civil. Miembro del Semillero de investigación ESMAV, Universidad de La Salle. Correo electrónico: jpira48@unisalle.edu.co

⁴ Ingeniero civil. Magíster en Ingeniería-Geotecnia. Profesor asistente de la Universidad de La Salle, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: seospina@unisalle.edu.co

FECHA DE RECEPCIÓN: 19 DE SEPTIEMBRE DE 2013 • FECHA DE APROBACIÓN: 16 DE MARZO DE 2014

Cómo citar este artículo: Mengual Velásquez, M. M., Lamus Báez, F. A., Pira Ruiz, J. M. y Ospina Lozano, S. E. (2014). Comportamiento mecánico a compresión de materiales compuestos a partir de una matriz de poliuretano rígido. *Épsilon* (23), 161-176.

Mechanical compressive behavior of composite materials from a matrix of rigid polyurethane

ABSTRACT

Rigid polyurethane foam is a material that shows an excellent relationship between compressive strength and density. Besides, it can be mixed on-site, changing rapidly from liquid to solid, interesting characteristics that can be exploited in the construction of structural fills. This work studies the compressive behavior of composite materials in a matrix of rigid polyurethane in which segments of materials like *Guadua angustifolia* and rubber tire chips are embedded. Initially, different mixtures were designed, varying the content of each of the materials. Samples for each mixture were constructed to determine their resistance to simple compression and confined compression. Finally, the filler's contribution to the resistance to radial compression was observed in cylindrical PVC elements. It was found that the addition of particulate *Guadua* to the polyurethane matrix allows to obtain a filler with higher resistance to compression than the matrix, which reduces by 95% the amount of polymer needed to obtain the same volume.

Keywords: polyurethane, *Guadua angustifolia*, filling, resistance, compression.

Comportamento mecânico a compressão de materiais compostos a partir de uma matriz de poliuretano rígido

RESUMO

O poliuretano rígido é um material que apresenta uma excelente relação entre a sua resistência à compressão e sua densidade, considerando que se trata de uma espuma. Além do fato de que pode ser misturado no lugar, mudando rapidamente de estado líquido a sólido, resultam características interessantes que podem ser aproveitadas na fabricação de recheios estruturais. Neste trabalho se estuda o comportamento à compressão de materiais compostos por uma matriz de poliuretano rígido onde se embebem segmentos de materiais como *Guadua angustifolia* e borracha de pneus em pedaços. Inicialmente foram desenhadas diferentes misturas, variando o conteúdo de cada um dos materiais. Para cada mistura construíram-se provetas para determinar a resistência destas à compressão simples e à compressão confinada. Finalmente se verificou a contribuição do material de enchimento à resistência à compressão radial em elementos cilíndricos de PVC. Encontrou-se que a incorporação de macro partículas de *Guadua a.* à matriz de poliuretano permite obter um enchimento com resistência à compressão superior à da matriz, fato que reduz em 95 % a quantidade necessária deste polímero para obter o mesmo volume.

Palavras chave: poliuretano, *Guadua angustifolia*, enchimento, resistência, compressão.

Introducción

El poliuretano es un material usado frecuentemente en la industria en múltiples aplicaciones, principalmente como aislante, adhesivo y material de relleno (Asociación Técnica del Poliuretano Aplicado [Atepa], 2009). En la industria de la construcción ha desempeñado un papel importante en el aislamiento, tanto acústico como térmico, e incluso ha sido probado como estabilizante de suelos expansivos (López *et al.*, 2010). La espuma de poliuretano se obtiene básicamente a partir de dos componentes: un polioliol y un diisocianato, aunque en su elaboración generalmente se usan otros componentes. El poliuretano puede ser de tres tipos: flexible, rígido y maleable, y sus características dependen de los componentes empleados en la mezcla (Alonzo, 2010).

Las espumas rígidas de poliuretano tienen una función importante en la construcción moderna gracias a su estabilidad dimensional y a su excelente relación entre resistencia y densidad (Dedecker, 2002). En la elaboración de estas espumas, los componentes más usados son el diisocianato difenilmetano (MDI) o sus derivados, y una mezcla de polioliol, espumantes, tensoactivos, catalizadores y otros aditivos (Wu, Hemert y Camargo, s. f.). El polímero se obtiene al mezclar los componentes y agitar la mezcla, lo cual puede realizarse generalmente por dos métodos: la pulverización y la colada (Alonzo, 2010). La mezcla se realiza en estado líquido, lo que facilita su vertimiento en espacios reducidos. Posteriormente, cuando comienza la polimerización, el material inicia su proceso de expansión y solidificación, presentando una estructura de celdas cerradas que permite que la espuma de poliuretano alcance densidades inferiores a los 30 kg/m³.

Por otra parte, la *Guadua angustifolia* (*Guadua a.*) es un material de origen vegetal que también ha demostrado tener una excelente relación entre las propiedades mecánicas y su densidad. La resistencia a la compresión de este material puede superar fácilmente la de los concretos de resistencia normal, y su rigidez es comparable con la de una madera densa. Adicional a esto, se trata de una especie altamente renovable, cuyo aprovechamiento, al ejecutarse de forma correcta, genera consecuencias favorables al medio ambiente.

El caucho, sintético o natural, contenido en las llantas para automóviles, en cambio, resulta ser un desecho de difícil disposición final. Aunque en las últimas décadas se han realizado esfuerzos para reutilizar este material, aún continúa siendo una

fuente de contaminación. Tan solo en los Estados Unidos anualmente se desechan alrededor de 290 millones de llantas, equivalentes a un 2 % del total de los residuos sólidos, de los cuales un poco más del 80 % son reciclados o reutilizados (Environmental Protection Agency [EPA], 2003). Sin embargo, el reciclaje de estos productos generalmente requiere su pulverización y calentamiento, lo cual genera efectos negativos en la salud humana, como dermatitis, irritaciones en las vías respiratorias y asma. Por otra parte, los componentes presentes en las llantas han demostrado ser mutagénicos o cancerígenos, por lo que se establece una duda razonable respecto a su uso como combustible.

La *Guadua a.* y el caucho han sido procesados mecánicamente para producir macropartículas con un tamaño nominal de 15 mm. En esta investigación se han desarrollado mezclas en las cuales las macropartículas son embebidas en una matriz de poliuretano rígido y ocupan la mayor parte del volumen, lo cual reduce los costos de usar solo el polímero y aumenta tanto la resistencia como la rigidez del material.

Caracterización mecánica del polurietano

Para determinar la dosificación y el diseño adecuado de la mezcla que podría usarse en el material compuesto, se definió un criterio referente a la capacidad de expansión del compuesto y la resistencia a compresión correspondiente. El poliuretano rígido usado en esta investigación se obtiene a partir de dos componentes que se mezclan en igual proporción y puede llegar a tener una expansión de hasta 48 veces su volumen inicial, de acuerdo con pruebas iniciales desarrolladas por los autores. El factor de expansión (F. E.) del poliuretano se calcula como la relación entre el volumen final (V_f) y volumen inicial (V_i) de este.

La preparación del polímero se realizó mediante el método de colada. Para esto se vierten dentro del recipiente las cantidades exactas de cada uno de los componentes por medio del uso de jeringas aforadas (figuras 1a y 1b), e inmediatamente las cantidades son agitadas usando un mezclador de vidrio mediante rápidos movimientos circulares durante 20 s (figura 1c), tiempo después del cual la mezcla entra en un estado de pasta.

El porcentaje de expansión se limitó con el fin de obtener muestras de espuma de poliuretano rígido con distintas densidades, y por tanto con diferentes propieda-

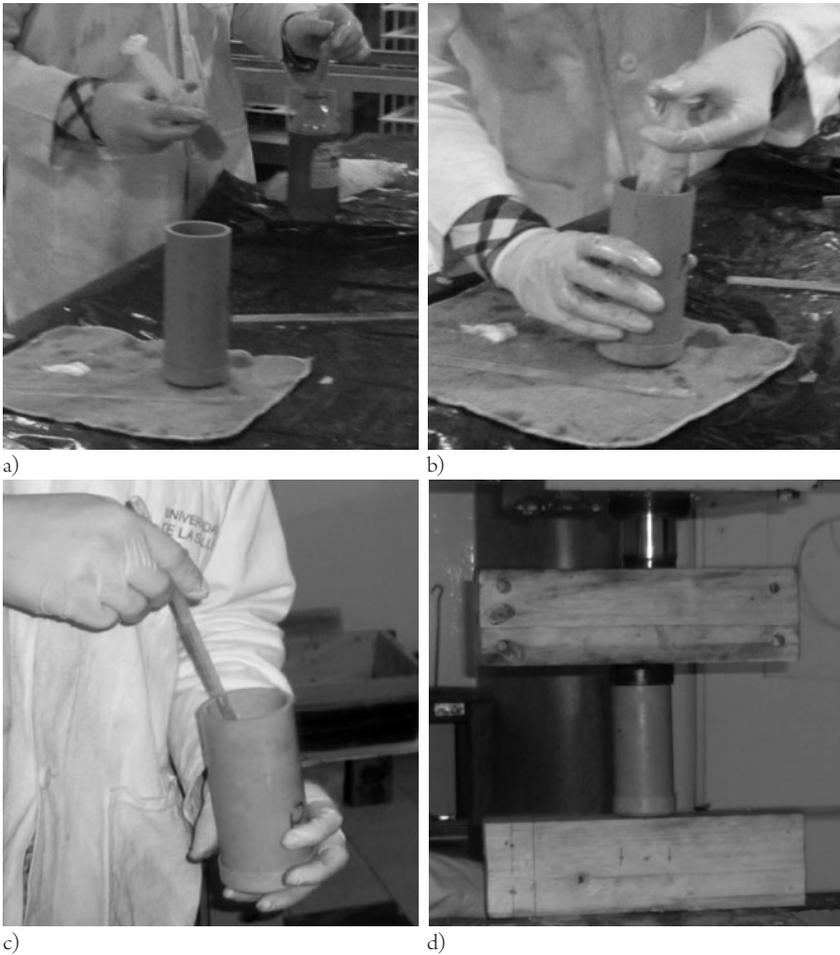


Figura 1. Preparación de probetas de poliuretano

Fuente: elaboración propia.

des mecánicas. Para esto se usaron recipientes contenedores contruidos a partir de tubos de PVC con un diámetro interno de 52 mm y longitud de 104 mm, los cuales fueron sellados herméticamente empleando tapones para tubería de PVC y la aplicación de carga mediante una prensa hidráulica con el fin de contrarrestar las fuerzas producidas por la expansión del polímero (figura 1d). El recipiente de PVC fue preparado con una capa delgada de vaselina industrial para así facilitar la posterior extracción de la probeta.

Se evaluaron cinco diferentes relaciones de expansión (tabla 1), para lo cual se fabricaron tres probetas por cada dosificación, para un total de 15 probetas de poliuretano simple (figura 2a), las cuales fueron ensayadas a compresión uniaxial no confinada usando la máquina universal de ensayos servocontrolada (figura 2b). Las probetas se prepararon de tal forma que se garantizara una relación longitud sobre diámetro igual a 2, y para que las caras cargadas estuvieran paralelas entre sí.

Tabla 1. Porcentajes de expansión evaluados

IDENTIFICACIÓN	FACTOR DE EXPANSIÓN
P5	5
P10	10
P15	15
P20	20
P25	25

Fuente: elaboración propia.

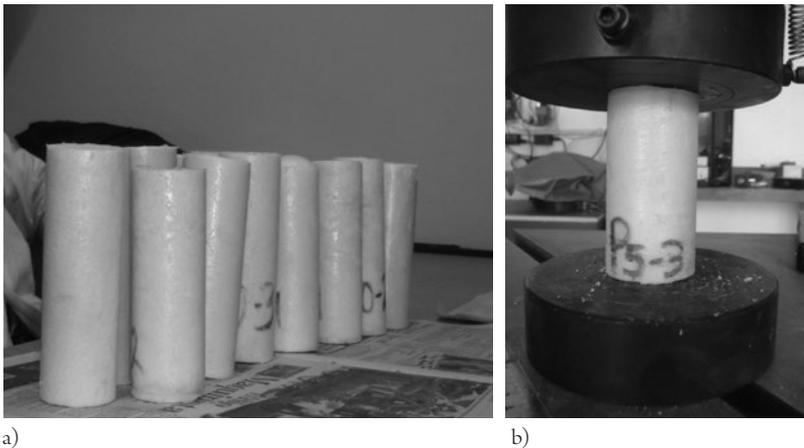


Figura 2. Ensayo a compresión uniaxial

Fuente: elaboración propia.

A partir de los resultados de carga y el área transversal del cilindro se calcularon los esfuerzos normales; mientras que las deformaciones unitarias se obtuvieron dividiendo el acortamiento de la probeta por la longitud inicial de esta. El acortamiento de la probeta se determinó a partir del desplazamiento relativo entre los

platos de carga, medido por el extensómetro interno de la máquina universal. En la figura 3 se presentan las relaciones esfuerzo-deformación promedio para cada uno de los grupos de probetas.

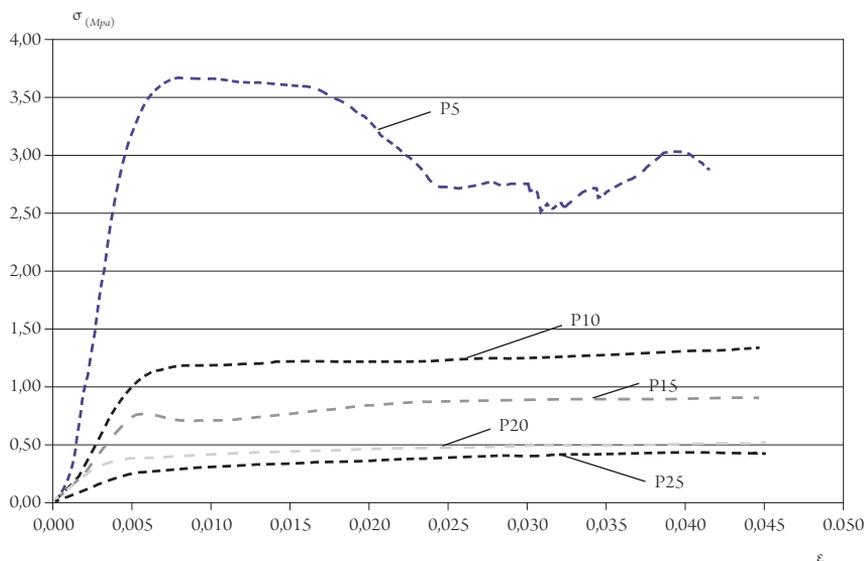


Figura 3. Comparativo de curvas esfuerzo vs. deformación unitaria para cada tipo de mezcla utilizado

Fuente: elaboración propia.

Para cada F. E. se calculó el promedio de los valores de carga máxima y del módulo de elasticidad. Estos valores se presentan en la tabla 2.

Tabla 2. Máxima carga, esfuerzo máximo a compresión y módulo de elasticidad

DOSIFICACIÓN	CARGA ESFUERZO MÓDULO DE ELASTICIDAD		
	N	MPa	MPa
P5	7843,5	3,63	881,7
P10	2844,3	1,34	267,5
P15	1907,6	0,91	177,2
P20	1178,6	0,57	90,1
P25	994,3	0,46	56,7

Fuente: elaboración propia.

Diseño de la mezcla

La resistencia del poliuretano, así como su rigidez, dependen de la densidad, y esta a su vez del F. E. Para el diseño del material compuesto se usaron únicamente matrices de poliuretano con F. E. P10 y P5. El poliuretano con F. E. = P5 presenta la mayor resistencia; sin embargo, la presión generada al expandirse podría ocasionar daños en el contenedor; por esta razón se decidió considerar adicionalmente el poliuretano con F. E. = P10 en los diseños del material compuesto. Las densidades aparentes para las matrices P5 y P10 son de $0,22 \text{ g/cm}^3$ y $0,11 \text{ g/cm}^3$, respectivamente.

Los dos materiales, *Guadua a.* y caucho, empleados como agregados en esta investigación se mezclaron en cinco diferentes proporciones en peso (figura 4a), de manera que ocuparan en conjunto la totalidad del volumen total del recipiente. El tamaño máximo de las partículas tanto de *Guadua a.* como de caucho se fijó en 20 mm de lado. Cada dosificación se evaluó dentro de una matriz de poliuretano rígido para formar un material compuesto. La cantidad usada de poliuretano se calculó en función del porcentaje de vacíos dejados por los materiales granulares en el recipiente.

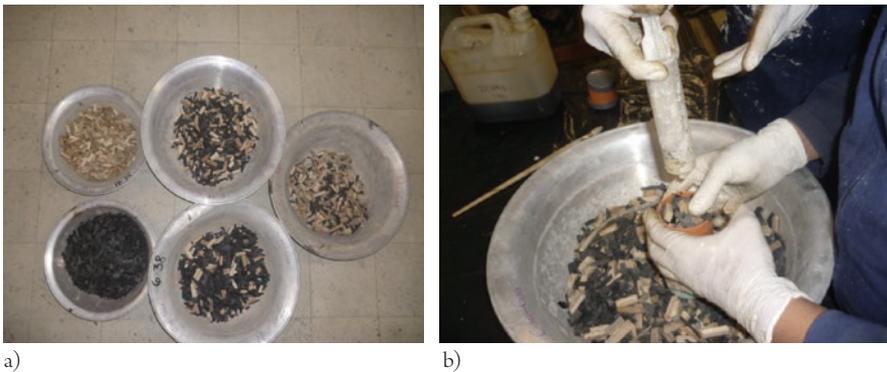


Figura 4. Proceso de relleno y mezclado, (a) 5 proporciones de materiales utilizados, (b) inyección de los componentes de poliuretano

Fuente: elaboración propia.

El porcentaje de vacíos se determinó mediante ensayos experimentales, en los que se llenó un recipiente aforado con la mezcla granular, se pesó el recipiente con el contenido, se llenaron los vacíos usando agua y se registró de nuevo el peso total.

Con la diferencia de pesos se calculó el volumen de agua, equivalente al de vacíos. El porcentaje de vacíos se obtiene de la relación entre el volumen de vacíos y el del recipiente.

Para cada una de las dosificaciones se fabricaron tres probetas cilíndricas de dimensiones similares a las usadas para determinar la resistencia del poliuretano simple, para un total de 30 probetas. En la fabricación de las probetas, primero, se rellenó el recipiente de PVC con la mezcla de agregados y, posteriormente, se inyectó el poliuretano líquido, lo cual permitió que este fluyera y se expandiera a lo largo de los vacíos dejados por los agregados (figura 4b). En la tabla 3 se presentan las dosificaciones para las mezclas evaluadas, en las que % G y % C se refieren a los porcentajes en peso de macropartículas de *Guadua a.* y macropartículas de caucho, respectivamente.

Tabla 3. Dosificaciones de los materiales compuestos

MEZCLA	F. E.**	PORCENTAJE DE VACÍOS	GUADUA*	CAUCHO*	POLIURETANO*
100 % G+0 % C	5	58,90	3,02	0,00	1
75 % G+25 % C	5	58,87	1,75	0,58	1
50 % G+50 % C	5	59,70	1,33	1,33	1
25 % G+75 % C	5	60,00	0,71	2,12	1
0 % G+100 % C	5	60,37	0,00	2,56	1
100 % G+0 % C	10	58,90	6,03	0,00	1
75 % G+25 % C	10	58,87	3,49	1,16	1
50 % G+50 % C	10	59,70	2,66	2,66	1
25 % G+75 % C	10	60,00	1,41	4,23	1
0 % G+100 % C	10	60,37	0,00	5,11	1

*Proporciones en peso; **Factor de expansión del poliuretano.

Fuente: elaboración propia.

Luego de que el poliuretano se ha expandido y se ha detenido la reacción, se retiran las probetas de los contenedores para ser ensayadas a compresión axial inconfínada en una máquina universal de ensayos, con una velocidad de carga de 4 mm/min. En las figuras 6 y 7 se presentan los resultados de las curvas promedio de esfuerzo vs. deformación unitaria para cada una de las mezclas con P5 y P10, respectivamente.

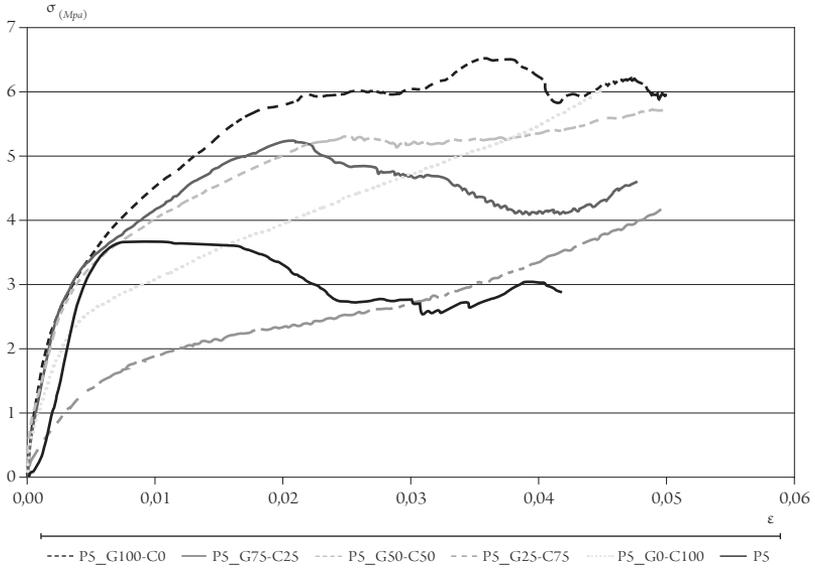


Figura 6. Curvas de esfuerzo-deformación unitaria para probetas de material compuesto con matriz P5

Fuente: elaboración propia.

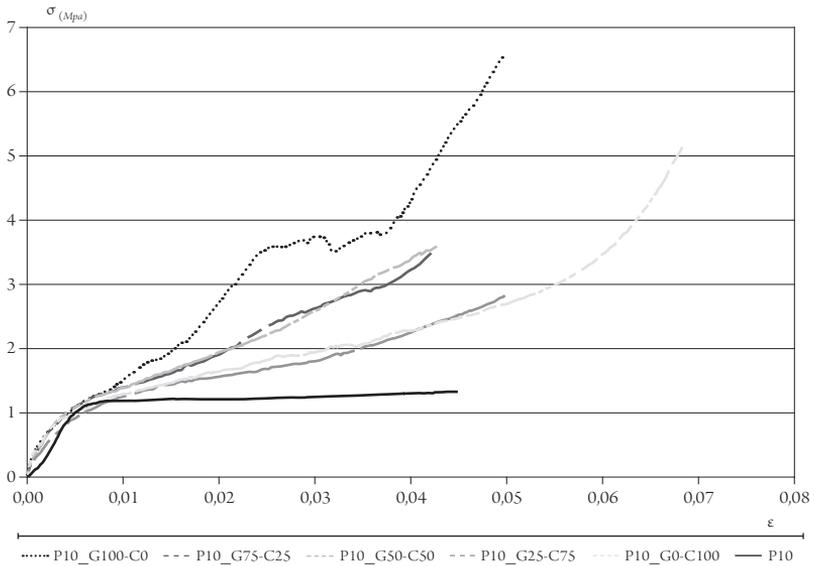


Figura 7. Curvas de esfuerzo-deformación unitaria para probetas de material compuesto con matriz P10

Fuente: elaboración propia.

Comportamiento mecánico confinado

Considerando que existe la posibilidad de que el relleno presente algún tipo de confinamiento al estar solicitado a fuerzas de compresión, se procedió a encontrar la resistencia a compresión de probetas confinadas dentro de los tubos de PVC que sirven de formaleta, con el objetivo de hallar la proporción de mezcla con el mejor comportamiento a compresión confinada, teniendo en cuenta la resistencia máxima y las deformaciones unitarias en estados límites de servicio.

Se repitió el mismo procedimiento de mezclado para realizar tres probetas por cada proporción de materiales, con el fin de esperar una expansión del poliuretano de cinco veces su volumen inicial. Luego se tomaron las probetas sin extraerlas del tubo para aplicar la fuerza de compresión axial con una máquina universal, y garantiza que las condiciones de carga fueran resultado de una aplicación de carga confinada en la probeta (figura 8a). Esta fase se realizó únicamente para las tres mezclas que presentaron los mejores resultados en compresión inconfineda, G100-C0, G75-C25 y G50-C50.

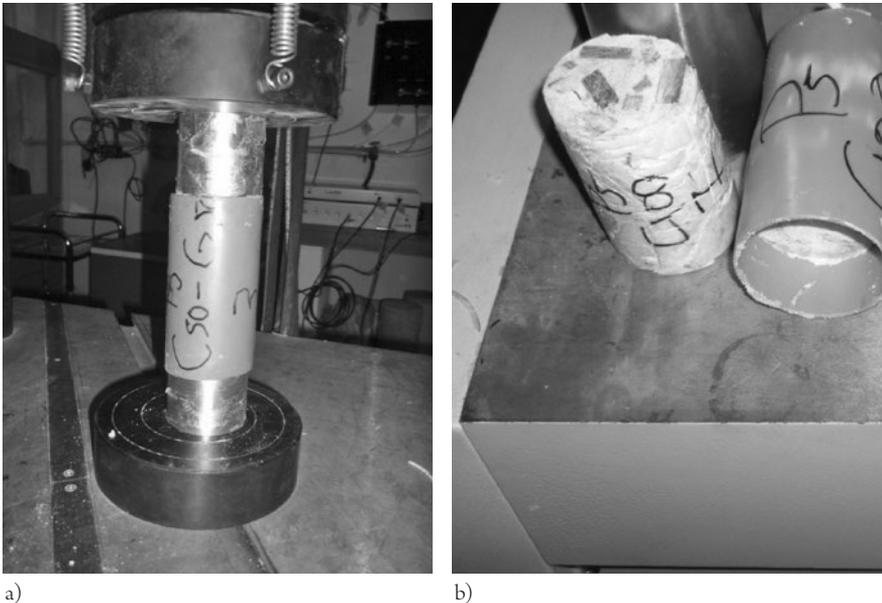


Figura 8. a) ensayo de compresión axial confinada. b) probetas luego de la aplicación de la carga de compresión confinada

Fuente: elaboración propia.

En la figura 9 se muestran las curvas promedio de los resultados de esfuerzo vs. deformación unitaria para las dosificaciones ensayadas. Se puede identificar una curva en cual la resistencia aumenta proporcionalmente con las deformaciones de la probeta y no hay un punto de pérdida de carga, debido a que cuando un material está en confinamiento su relación de vacíos tiende a ser cero hasta que las partículas sólidas se compactan de tal manera que su resistencia va aumentando en relación con su grado de confinamiento. Por otro lado, el material contenedor (PVC) permite grandes deformaciones plásticas sin llegar a la ruptura, por ser un material plástico con altos índices de ductilidad.

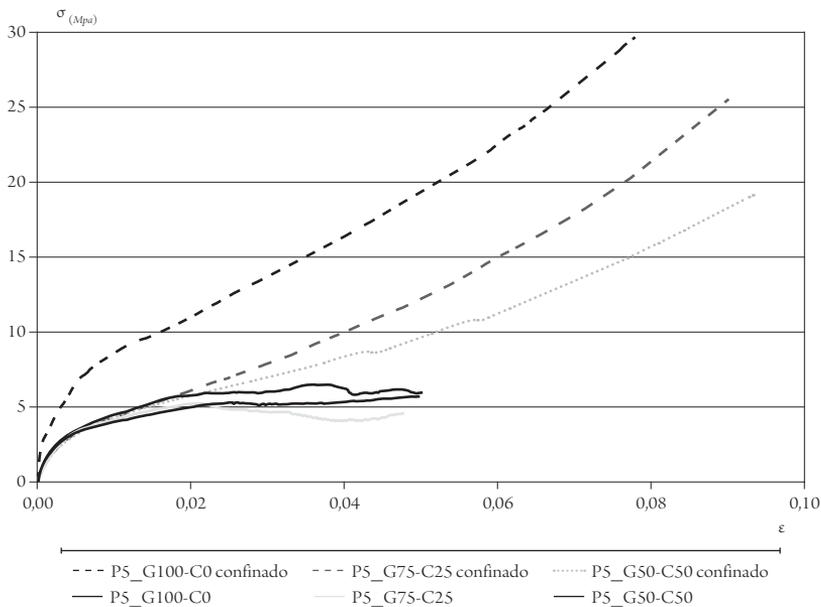


Figura 9. Curvas promedio de esfuerzo-deformación unitaria según la proporción de materiales utilizados

Fuente: elaboración propia.

Se encuentra entonces que la mezcla con mayor resistencia a la compresión confinada es la P5 G100, con esfuerzos mayores a los de las otras dos mezclas hasta en un 60 %. Por esta razón se seleccionó un material de relleno con 100 % de su volumen aparente conformado por trozos de guadua y una expansión del poliuretano de cinco veces el volumen inicial de los componentes para ser ensayado a fuerzas de aplastamiento.

Comportamiento a fuerzas de aplastamiento

En una última fase se evaluó el aporte del material compuesto, cuando se usa como relleno en un tubo y este es solicitado a una carga perpendicular a su eje. Para esto se utilizó el compuesto G100-C0 por ser el que presentó un mejor comportamiento solicitado a compresión confinada. Este compuesto presenta una densidad de $0,52 \text{ g/cm}^3$.

Se elaboraron probetas de dos tipos con tramos de tubo cerrados en ambos extremos, con una relación longitud sobre diámetro igual a 2 en las del primer tipo (figura 10a) e igual a 3 (figura 10b) en las del segundo tipo. En la mitad de las probetas se usó relleno, mientras que las probetas restantes se mantuvieron vacías.

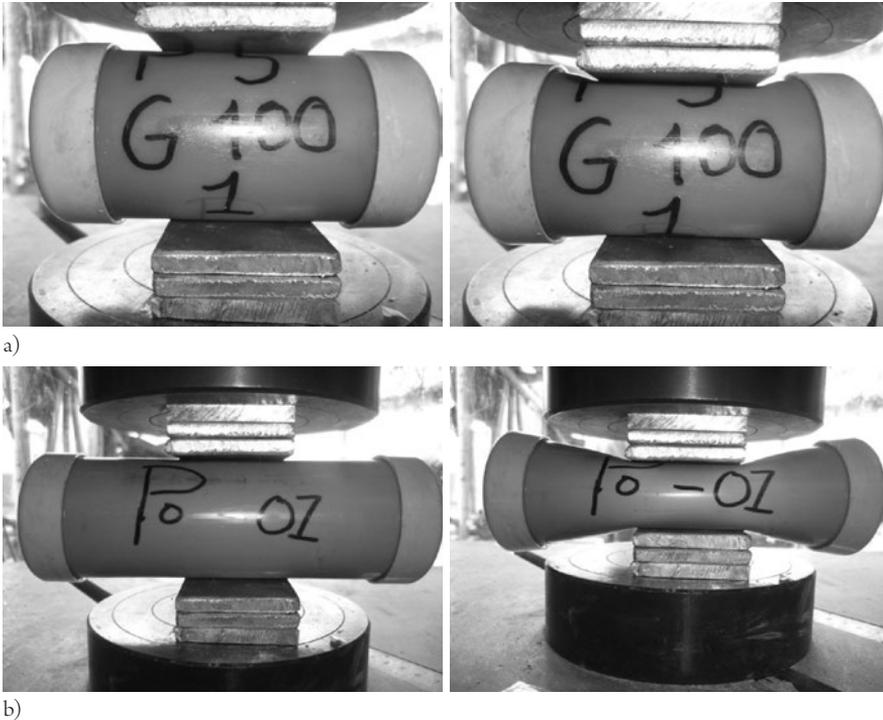


Figura 10. Ensayo a fuerzas de aplastamiento. a) Probetas con relación $D/L = 2$, b) Probetas con relación $D/L = 3$

Fuente: elaboración propia.

Los ensayos se realizaron en una máquina universal, que garantiza la aplicación de la carga de tal forma que se aplicara perpendicularmente a la probeta en el centro de la longitud de esta. La figura 11 muestra la curva de carga contra desplazamiento para probetas sin relleno y con relleno P5 - G100 con relación 1:2. Claramente es notable la diferencia de carga que puede soportar el tubo cuando está lleno de la mezcla diseñada anteriormente con aquella que resiste el tubo vacío.

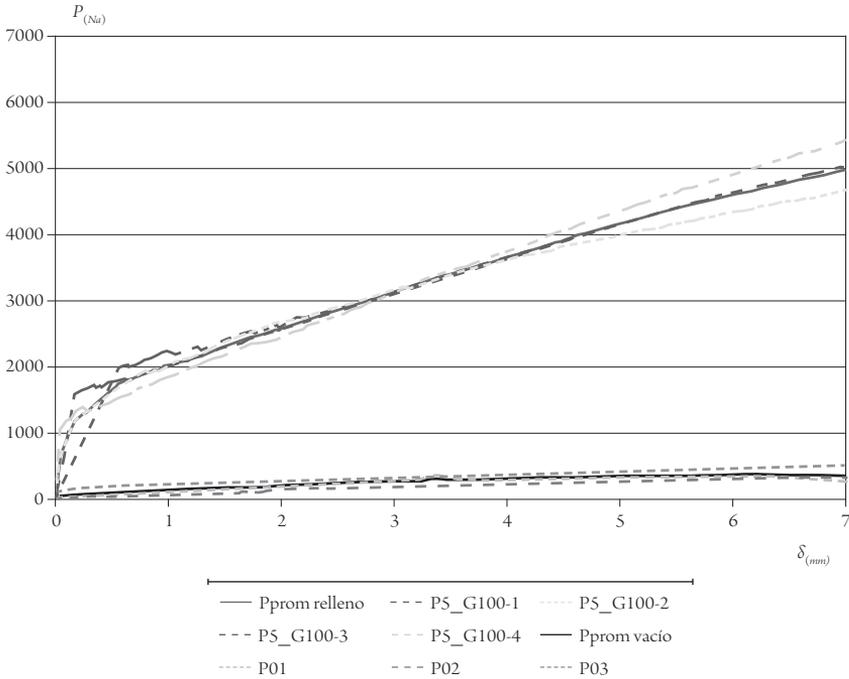


Figura 11. Carga contra desplazamiento en probetas de relación 1:2

Fuente: elaboración propia.

La figura 12 muestra los resultados de carga contra desplazamiento de las probetas con relación 1:3, con relleno P5-G100 y sin relleno. Al igual que en la figura anterior, se observa una mayor carga soportada en las probetas a las cuales se les aplicó relleno, con una ganancia de carga aproximadamente de cinco veces a la carga soportada por el tubo sin relleno.

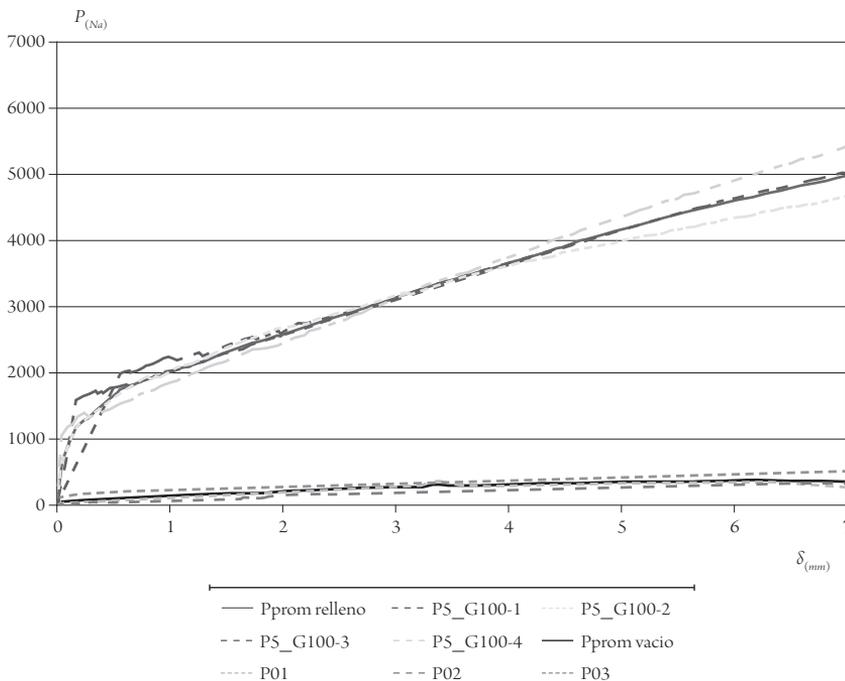


Figura 12. Carga contra desplazamiento en probetas de relación 1:3

Fuente: elaboración propia.

Conclusiones

La resistencia del poliuretano rígido a la compresión simple se incrementa a medida que la espuma de poliuretano presenta una mayor densidad.

Usar una matriz de poliuretano rígido con macropartículas de *Guadua a.* y caucho puede incrementar levemente la resistencia a la compresión axial inconfiada de la matriz. Este incremento es mayor a medida que se presenta un mayor porcentaje de *Guadua a.* en la mezcla.

El uso de macropartículas de *Guadua a.* dentro de la matriz de poliuretano, en las proporciones estudiadas en este trabajo, permite reducir en un 50 % la cantidad de poliuretano necesario para obtener un relleno de poliuretano rígido con características mecánicas similares.

Si se usa una mezcla de poliuretano rígido con un F. E. = 5 y macropartículas de *Guadua a.* como relleno de un elemento tubular de PVC, la resistencia al aplastamiento de este puede incrementarse entre cinco y diez veces.

La densidad del material compuesto por una matriz de poliuretano rígido con un F. E. = 5,0 y macropartículas de *Guadua a.* con una relación de vacíos de 0,58 es de 0,52 g/cm³ equivalente a 2,36 veces la densidad de matriz de la respectiva matriz de poliuretano.

Referencias

- Asociación Técnica del Poliuretano Aplicado. (2006). *Guía de ventajas y soluciones de espuma rígida de poliuretano proyectado para aislamiento térmico, acústico e impermeabilización, conforme al CTE*. Madrid.
- Alonso, C. (2010). *Implementación del sistema de controles de producción para la elaboración de la espuma de Poliuretano, para la industria manufacturera* (tesis). Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Dedecker, K. (2002). Introduction to rigid foams. En D. Randall y S. Lee (Eds.), *The polyurethanes book* (pp. 169-188). UK: Wiley.
- Environmental Protection Agency. (2003). Wastes – Resource conservation – Common wastes & materials – Scrap tires. Recuperado de <http://www.epa.gov/osw/conserves/materials/tires/basic.htm>
- López, T., Hernández, J., Horta, J., Coronado, A. y Castaño, V. (2010). Polímeros para la estabilización volumétrica de arcillas expansivas. *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 11(3), 159-168.
- Wu, L., Van Gemert, J. y Camargo, R. (s. f.). Rheology Study in Polyurethane Rigid Foams. *Huntsman Corporation*. Recuperado de http://www.huntsman.com/polyurethanes/Media%20Library/a_MC1CD1F5AB7BB1738E040EBCD2B6B01F1/Products_MC1CD1F5AB8081738E040EBCD2B6B01F1/Construction_MC1CD1F5AEF051738E040EBCD2B6B01F1/Technical%20presentati_MC1CD1F5AF6F41738E040EBCD2B6B01F1/files/cpi_08_lifengwu_revised.pdf