

35

Fecha de presentación: octubre, 2017

Fecha de aceptación: diciembre, 2017

Fecha de publicación: enero, 2018

ANÁLISIS FÍSICO-MECÁNICO

DE MORTEROS ASFÁLTICOS COMPUESTOS A PARTIR DE MATERIALES RECICLADOS

PHYSICAL-MECHANICAL ANALYSIS OF ASPHALT MORTARS MADE FROM RECYCLED MATERIALS

Aquiles Ullauri¹

E-mail: aquilesullauri@gmail.com

Nella Friend¹

E-mail: nellafriend16@gmail.com

MSc. Julio Barzola¹

E-mail: julio.barzola@ug.edu.ec

¹ Universidad de Guayaquil. República del Ecuador.

Cita sugerida (APA, sexta edición)

Ullauri, A., Friend, N., & Barzola, J. (2018). Análisis físico-mecánico de morteros asfálticos compuestos a partir de materiales reciclados. *Universidad y Sociedad, 10(1)*, 245-254. Recuperado de <http://rus.ucf.edu.cu/index.php/rus>

RESUMEN

Al ser el mortero asfáltico, un compuesto necesario para la construcción de vías. El presente trabajo busca evaluar, la resistencia mecánica de dicho compuesto como matriz, en unión con materiales reciclados de elasticidad variable, tales como el politereftalato de etileno (PET) y Caucho. Con la finalidad de comparar la resistencia mecánica que puede aportar dichos compuestos y sustentar la resistencia que debe presentar diariamente el mortero asfáltico, al estar expuesto al tránsito de vehículos. El presente trabajo forma parte de la investigación en el área de ingeniería civil, utilizando las herramientas de composición de materiales mediante software, proporcionando parámetros mecánicos de los materiales descritos, se procederá a determinar los nuevos compuestos. Se realizará un ensayo por compresión para los resultados en cada composición. Los parámetros mecánicos estarán establecidos bajo norma ASTM 1559, estos datos serán procesados por el ordenador utilizando los programas de Simulación Mecánica MEF y Helios Composite, como alternativa a los ensayos en un experimento en el laboratorio. Los resultados obtenidos serán parámetros físico – mecánicos, que rigen el comportamiento de los nuevos compuestos de matriz, en este caso el mortero asfáltico. Finalmente, se presentan las conclusiones sobre los resultados de estos materiales.

Palabras clave: Mezcla asfáltica, simulación, composición, caucho, PET.

ABSTRACT

As the asphalt concrete, a composite material necessary for the construction of roads. This paper seeks to assess the mechanical strength of the material as a matrix, in conjunction with variable elasticity recycled such as PET and rubber materials. In order to compare the mechanical strength that can provide such materials and support resistance due on asphalt when exposed to transit of heavy vehicles concrete daily. This work is part of research Applied Chemistry, using the tools of composition of materials by software, using physical-mechanical materials described, proceed to determine the new compounds parameters to compression test results rolling for each composition was analyzed. Mechanical parameters will be established under ASTM 1559, these data will be processed by the computer using Mechanical Simulation programs and Helios Composite MEF, and these allow us to approximate the actual values of an experiment in the laboratory. The results will be mechanical parameters that govern the behavior of the new compounds with asphaltic concrete. Finally, the conclusions on the results of these materials are presented.

Keywords: Mezcla asfáltica, simulación, composición, caucho, PET.

INTRODUCCIÓN

Uno de los retos más grandes de ingeniería, es la optimización de recursos que causen a su vez, un menor impacto al medio ambiente, esto nos ha puesto la mirada directa al reciclaje, a la reutilización de materiales de uso común, reconsiderando materiales.

El mortero asfáltico, es la mezcla de bitumen y agregados muy utilizado para la construcción de vías, esta cuenta con poca durabilidad, con la que tiene que ser reemplazado con frecuencia, por lo que suele ser muy costoso (Instituto Chileno del Asfalto, 1992; Sánchez Sánchez, 1997), por otro lado tenemos, al caucho y el politereftalato de etileno, por sus siglas en inglés (PET), estos últimos como materiales reciclados tienen un bajo costo en su obtención, y por sus propiedades mecánicas de resistencia, pueden ser utilizados para diversas aplicaciones en la construcción, siendo amigable con el ecosistema (Arandes, Bilbao & López Valerio, 2004; Cuattrocchio, Botasso, Rebollo & Soengas, 2006) y en nuestro caso como agregado adicional al mortero asfáltico ya que transfiere las propiedades mecánicas a nuestro material.

Nuestro modelo se desarrollará para visualizar estos cambios de las propiedades mecánicas, creando nuevos compuestos. Los modelos físicos, por lo general se los obtienen mediante ensayo – error, y ponerlos a prueba suelen ser muy costosos, además de tomarse su tiempo. Con los nuevos modelos matemáticos generados por computadora, las estimaciones y los ensayos, se los visualiza con mayor precisión, ya que las variables se ajustan rápidamente obteniendo resultados cada vez más fiables (Sánchez Sánchez, 1997). Los modelos matemáticos realizados por diferentes programas son utilizados para fines de predicción. Un modelo matemático permite determinar un resultado final a partir de los datos ingresados al modelo. La creación de un modelo es esencial para la investigación científica (Autodesk, Inc., 2000; Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, 2017). La versatilidad de utilizar este procedimiento matemático, a través de cálculos computacionales, ofrece la posibilidad de crear nuevos compuestos, agregando materiales a la matriz, en este caso los materiales reciclados al mortero, alterando las propiedades físicas - mecánicas de dicho compuesto y obtener rápidamente los resultados producidos por esos cambios. Así, el objetivo de la modelización de materiales es construir un modelo teórico que se asemeje lo más posible a un modelo real, permitiendo reunir dentro de su composición, aquellos factores que pueden intervenir en el desempeño del material y que están directa e indirectamente relacionados (Ariza, Ventura & Ortiz, 2011). El objetivo es lograr una mayor precisión, enfocada al diseño con nuevos materiales, y transmitir un

comportamiento real a diversas aplicaciones, pues esto no desmerece saber el hecho que la ingeniería no es una ciencia exacta, y que está ligado a errores, por lo que es necesario introducir factores de seguridad; sin embargo, los resultados tienden a ser lo más cercanos al comportamiento real, permitiendo englobar la gran cantidad de factores, que influyen en el comportamiento de los materiales, y a su vez, favorecer la predicción a corto plazo de estos compuestos en estructuras amigables con el medio ambiente.

La necesidad de estimar un mejor desempeño de los materiales aprovechando las propiedades elásticas, ya que al estudiar el mortero asfáltico como tal, es muy complejo al variar mucho los rangos mecánicos como físicos. Nuestro modelo matemático, intenta dar respuesta a nuestro problema, donde se desea elegir, el mejor entre los elementos que afronte los agentes externos especialmente los de carga.

DESARROLLO

Debemos modelar nuestros compuestos, que en este caso serán el mortero asfáltico en mezcla con caucho reciclado al 30% y con la mezcla de PET reciclado al 30%, matemáticamente se realizará las nuevas composiciones y mediante el método de elementos finitos, se evaluará ambos compuestos, este método ha tenido una gran acogida para resolución de muchos problemas físicos. (Chapra & Canale, 2006). Permitiendo resolver casos que hasta hace poco tiempo eran prácticamente imposibles de resolver por métodos matemáticos clásicos. Esta circunstancia obligaba a hacer prototipos, ensayar los materiales e ir realizando mejoras de forma iterativa, lo que traía consigo un elevado coste, tanto económico como en tiempo (Zill, 2009).

La composición de los materiales, la realizamos mediante Helius Composite (Autodesk, Inc., 2016a), que utiliza la aleación o la fusión micro mecánica del compuesto de manera isotrópica como en la Figura 1, para ello el programa utiliza el criterio de falla de Tsai Hill (Autodesk, Inc., 2016d) y Tsai Wu (Autodesk, Inc., 2016b). Este criterio identifica la falla de la fibra, epóxico y cualquier otro material de propiedades elásticas. Nuestras fórmulas a aplicar, depende de nuestro modo de fallo a estudiar. El criterio de Tsai Hill y el criterio de Tsai-Wu, gozan de gran popularidad para la realización de las operaciones y en este caso del nuestro, en los que comparan las tensiones del material con los límites resistentes del mismo

$(\sigma_1^F, \sigma_2^F, \tau_2^F)$ que deben obtenerse de forma experimental,

de los tres materiales a estudiar.

El criterio de Tsai Hill es:

$$\frac{\sigma_1^2}{F_1^2} + \frac{\sigma_2^2}{F_2^2} + \frac{\sigma_1\sigma_2}{F_{11}F_{22}} + \frac{\tau_{12}^2}{F_{66}} = 1; \quad (1)$$

Y el criterio de Tsai Wu es :

$$F_1\sigma_1 + F_2\sigma_2 + F_{11}\sigma_1^2 + F_{22}\sigma_2^2 + 2F_{12}\sigma_1\sigma_2 + F_{66}\tau_{12}^2 = 1(2)$$

Siendo:

$$F_1 = \frac{1}{\sigma_1^T} + \frac{1}{\sigma_1^C}; F_2 = \frac{1}{\sigma_2^T} + \frac{1}{\sigma_2^C}; F_{12} = \frac{1}{2}\sqrt{F_1 F_2}; \quad (3)$$

$$F_{11} = \frac{1}{\sigma_1^T \sigma_1^C}; F_{22} = \frac{1}{\sigma_2^T \sigma_2^C}; F_{66} = \left(\frac{1}{\tau_{12}^S}\right)^2; \quad (4)$$

Dónde los subíndices _T, _C y _S corresponden a las resistencias de tracción, compresión y cortante, respectivamente.

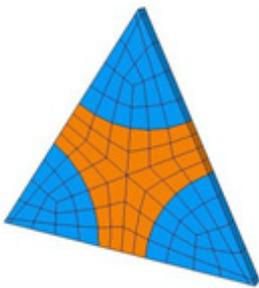


Figura 1. Micro-aleación Teórica del Mortero Asfáltico como Matriz.

Para realizar el cálculo de deformación se utilizará el programa Simulación Mecánica (Autodesk, Inc., 2016c), generado por Autodesk, este programa utiliza el método numérico de elementos finitos, tomando en cuenta el módulo de elasticidad, el módulo de corte y la relación de poisson. En función que nuestra mezcla tiende a ser un material no lineal, para este caso se tuvo que realizar una transformación para trabajarlo, ya que los materiales comúnmente están dados por características mecánicas como el módulo de Young (Timoshenko, 1957) y el coeficiente de Poisson, para realizar esta transformación

utilizamos las formulas. Y con estas fórmulas obtener el modulo volumétrico K y el módulo de corte G (Pytel & Singer, 1994).

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (5)$$

$$K = \frac{E}{3(1-\nu)} \quad (6)$$

Donde G=modulo de Corte

E=modulo de Elasticidad

ν =modulo de Poisson

En nuestro desarrollo de la mezcla asfáltica consideramos datos reales obtenidos de diferentes pruebas realizadas y estipuladas en la norma ASTM 1959 (ASTM International, 1989) que se encuentran en el rango de mezcla bituminosa, y de esta manera tenemos los datos para la simulación numérica del sistema real, por lo que podríamos predecir el comportamiento en el medio natural, todo dentro de los criterios establecidos, para que funcione nuestro sistema y así podríamos ajustar el diseño gradualmente, de manera que se ajuste a lo requerido. Los valores de las pruebas de mortero asfáltico que se ha tomado, están regidas bajo la norma antes mencionada, ésta es la del ensayo Marshall (ASTM International, 2008) al igual que información del caucho y del plástico PET (ASTM International, 2011; Hill, 1998). Se analizará la información recopilada del mortero asfáltico sin ser modificado, posteriormente del caucho y del PET. Los valores de los polímeros no son muy variables y podemos obtener los valores de tablas dadas, pero para los valores del mortero asfáltico simple, estos son muy variables dependiendo de la calidad del asfalto líquido. Se tomó como dato los valores promedio, estos se los puede variar dependiendo de la mezcla a tratar. Los valores de ingreso de nuestro programa Helius Composite, son el módulo de Young, módulo de corte, módulo de poisson, y mediante fórmulas descritas anteriormente, podemos obtener otros valores como la resistencia a la tracción, compresión, tensiones deformación y resistencia al corte.

Los símbolos con sus respectivas descripciones y unidades a ingresar, son las siguientes (tabla 1):

Tabla 1. Lista de símbolos.

Símbolo como aparece en el programa	Descripción	Unidades SI
+ e + eps	Tracción-deformación	m/m
-e, - eps	Tensión de compresión	m/m
E	Módulo de Young	Pa
G	Módulo de elasticidad transversal	Pa
NU	Coefficiente de Poisson	
+ S	Resistencia a tracción	Pa
-S	Resistencia a la compresión	Pa
y (subíndice)	Dirección Y	
1 (subíndice)	Lámina 1-orientación	
11(subíndice)	Lámina 1-orientación	
2 (subíndice)	Lámina 2-dirección	
22 (subíndice)	Lámina 2-dirección	
12 (subíndice)	Dirección 1 cortante de lámina	
21 (subíndice)	Para NU21 denota flexión en el vencimiento de la dirección 1 para cargar en dirección 2	
Density	Densidad del material	g/mm3

Luego de haber obtenido los valores mediante tablas de mecánica de materiales, según la norma ASTM 1559, para los tres materiales tenemos que:

El mortero asfáltico simple, los valores a ingresar son los siguientes (tabla 2).

Tabla 2. Valores mecánicos de Hormigón Asfáltico.

E11 (MPa)	1,10E+09
E22 (MPa)	1,10E+09
G12 (MPa)	5,38E+08
NU12	3,00E+04
NU23	3,00E+04
+S1 (MPa)	2,00E+07
-S1 (MPa)	-2,00E+07
S12 (MPa)	1,00E+07
Density (g/mm3)	2,30E+02

Como observamos en la figura 2 la representamos en barra, con rangos máximos en la ordenada, de 20000 Mpa, en la abscisa, podemos apreciar los modelos de elasticidad E y sus direcciones, de igual manera su módulo de corte G.

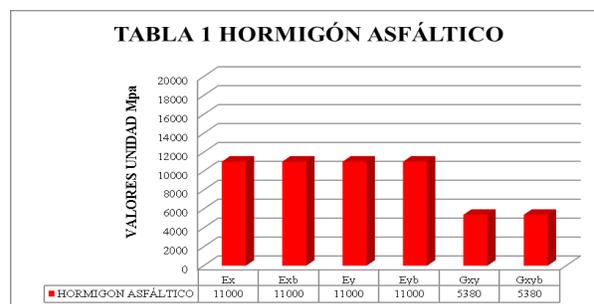


Figura 2. Propiedades mecánicas de mortero asfáltico en barras.

En la Figura 3 representamos la curva de las propiedades, expresadas en Mpa, en la abscisa, podemos apreciar los modelos de elasticidad E y sus direcciones, de igual manera su módulo de corte G.

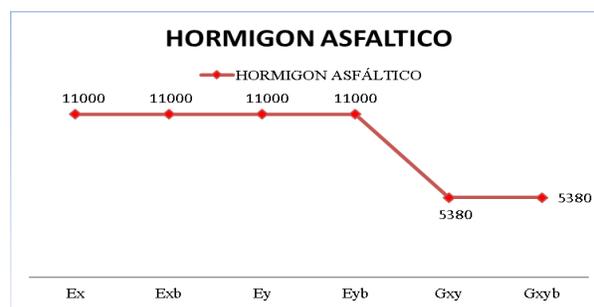


Figura 3. Curva de propiedades mecánicas de mortero asfáltico.

Para el terefalato de polietileno conocido como PET, son los siguientes (tabla 3):

Tabla 3. Valores mecánicos de PET.

Title	Value
Ex (MPa)	3,10E+08
Ey (MPa)	3,10E+08
Gxy (MPa)	2,80E+08
NUxy	4,40E+06
NUyx	4,40E+06
Exb (MPa)	3,10E+08
Eyb (MPa)	3,10E+08
Gxyb (MPa)	2,80E+08
NUxyb	-4,40E+06
NUyxb	-4,40E+06
Density (g/mm3)	1,40E-01

En las figuras 4 y 5, expresamos las propiedades en barra, de los dos materiales para realizar el compuesto, y así facilitar de manera visual comparación de ambos materiales

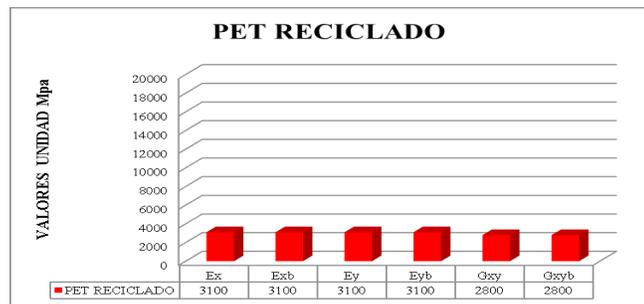


Figura 4. Propiedades mecánicas PET en barras.

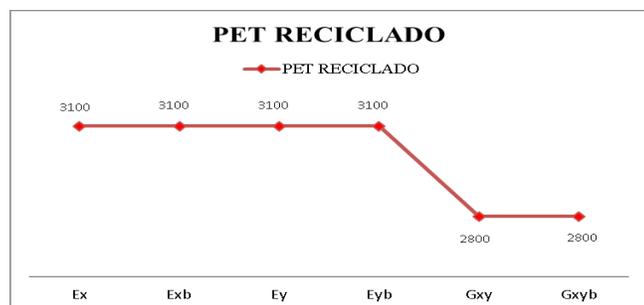


Figura 5. Curva de propiedades mecánicas PET.

Como último tenemos al caucho con las siguientes propiedades (tabla 4).

Tabla 4. Valores mecánicos de caucho.

Descripción	Valor
Ex (MPa)	2,00E+09
Ey (MPa)	2,00E+09
Gxy (MPa)	9,00E+08
NUxy	4,00E+04
NUyx	4,00E+04
Exb (MPa)	2,00E+09
Eyb (MPa)	2,00E+09
Gxyb (MPa)	9,00E+08
NUxyb	-4,00E+04
NUyxb	-4,00E+04
Density (g/mm3)	9,50E+01

En la Figura 6 y 7 representamos la curva de las propiedades, expresadas en Mpa. De los materiales reciclados, en la abscisa x podemos apreciar los modelos de

elasticidad E y sus direcciones, de igual manera su módulo de corte G.

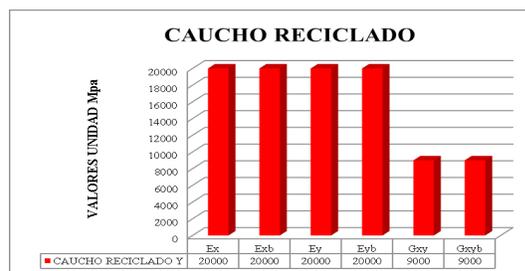


Figura 6. Propiedades mecánicas caucho en barras.

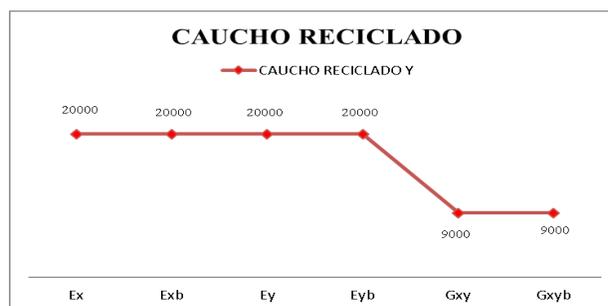


Figura 7. Curva de propiedades mecánicas caucho.

En este desarrollo de cada uno de los materiales para ámbito de estudio de las gráficas su análisis fue tomado como una placa de muestra de 100 mm, isotrópica.

Luego de haber obtenido las propiedades de cada uno de los materiales a tratar, se procedió con el método descrito anteriormente mezclando la matriz (Mortero Asfáltico) con las fibras (Caucho y PET). Se usó para nuestro análisis una composición al 30 % de caucho y PET, para ambas mezclas. Nuestro valor en porcentaje fue sugerido por el programa ya que al ser menor al 30%, los cambios de propiedades mecánicas del nuevo material tienden a ser mínimos, sin lograr el cambio requerido. Haciendo la prueba con valores del menos del 30%, se tiende a ajustarse a un valor promedio, aproximando rápidamente a la propiedad mecánica de la matriz (mortero asfáltico), sin lograr cambios notables, en nuestro método la composición del Mortero Asfáltico más caucho al 30 por ciento y la composición del nuevo material de mortero asfáltico con PET al 30%, los resumimos en las tablas 5 y tabla 6.

Tabla 5. Valores mecánicos de Asfalto con PET.

Descripción	Valor
Fiber Vf	3,00E+04
E11 (MPa)	7,74E+08
E22 (MPa)	5,37E+08
E33 (MPa)	5,37E+08
G12 (MPa)	4,46E+08
G13 (MPa)	4,46E+08
G23 (MPa)	4,39E+08
NU12	2,98E+04
NU13	2,98E+04
NU23	3,04E+04
+S1 (MPa)	2,40E+06
+S2 (MPa)	3,26E+07
-S1 (MPa)	-1,06E+07
-S2 (MPa)	-3,26E+07
S12 (MPa)	1,23E+07
+e1 (mm/mm)	3,10E+02
+e2 (mm/mm)	6,07E+03
-e1 (mm/mm)	-1,36E+03
-e2 (mm/mm)	-6,07E+03
e12 (mm/mm)	2,76E+03
Density (g/mm3)	1,61E+02

Tabla 6. Valores mecánicos de Asfalto con caucho.

Descripción	Valor
Fiber Vf	3,00E+04
E11 (MPa)	1,37E+09
E22 (Mpa)	1,30E+09
E33 (Mpa)	1,30E+09
G12 (Mpa)	6,26E+08
G13 (MPa)	6,26E+08
G23 (MPa)	6,21E+08
NU12	3,36E+04
NU13	3,36E+04
NU23	3,26E+04
+S1 (MPa)	1,68E+06
+S2 (MPa)	1,78E+07
-S1 (MPa)	-1,80E+06
-S2 (MPa)	-1,78E+07
S12 (MPa)	9,00E+06
+e1 (mm/mm)	1,22E+02
+e2 (mm/mm)	1,37E+03

-e1 (mm/mm)	-1,31E+02
-e2 (mm/mm)	-1,37E+03
e12 (mm/mm)	1,44E+03
Density (g/mm3)	1,90E+02



Figura 8. Barra de relación Asfalto con PET.

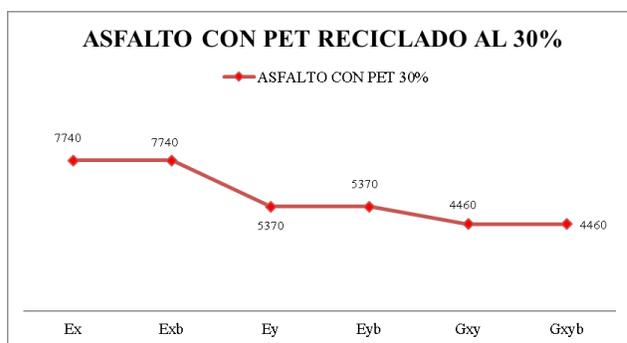


Figura 9. Curva de relación Asfalto con PET.

En la tabla 5 y la tabla 6 podemos apreciar los valores del nuevo compuesto la mezcla asfáltica con el PET y con el caucho respectivamente, y de la misma manera expresamos los datos en graficas de tablas y curva como las mostradas en las figuras 8 y 9 para el PET y en las figuras 10 y 11.



Figura 10. Propiedades mecánicas del asfalto con caucho reciclado.

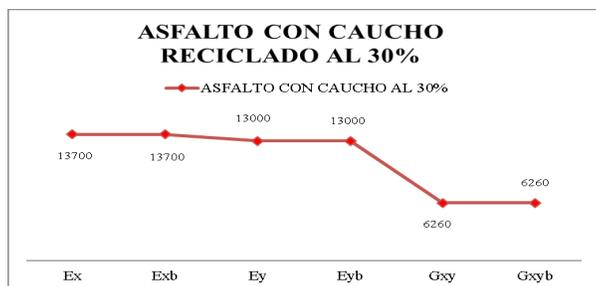


Figura 11. Curva de relación Asfalto con Caucho.

De esta manera tenemos las propiedades mecánicas del nuevo material de nuestros dos casos. Para visualizar de manera gráfica, igualmente utilizando el método de elementos finitos observaremos el desplazamiento, para ello usaremos una probeta de forma cilíndrica de 100 mm de alto por un radio de 50 mm Como muestra en la figura.

Para comparar el desplazamiento de ambos materiales usaremos una fuerza de 20000 N, asumiendo que el peso de un camión tiene una masa de 2000 kg, y esta al ser sometida a la acción de la gravedad 9.8 m-s^2 , redondeamos a la fuerza antes mencionada, esta estará distribuida en toda la cara simulando el contacto con un automotor. Diseñando la probeta analizaremos las propiedades físicas de nuestro cilindro de mortero asfáltico con caucho al 30%. Y el mortero asfáltico con PET al 30% (tabla 7).

Tabla 7. Propiedades físicas del cilindro con caucho.

Material	Hormigón Asfáltico con PET al 30%
Densidad	1.61 g/cm ³
Masa	1.26449 kg
Área	47123.9 mm ²
Volumen	785398 mm ³
Centro de gravedad	x=0.0000000104568 mm

Luego proporcionamos las propiedades mecánicas de ambos materiales a estudiar, estos datos serán ingresados para la simulación de deformación en Autodesk Simulation Mechanical, estos datos nos proporcionaron el estudio de la composición de los materiales con caucho y con PET, que lo analizamos en el primer paso (tabla 8).

Tabla 8. Propiedades físicas del cilindro con caucho al 30%.

Nombre	Hormigón Asfáltico con caucho al 30%	
General	Densidad de masa	1.895 g/cm ³
	Límite de elasticidad	10000 MPa
	Resistencia máxima a tracción	16 MPa

Tensión	Módulo de Young	13.7 GPa
	Coefficiente de Poisson	0.35 su
	Módulo cortante	5.07407 GPa
Nombre(s) de pieza	Cemento Asfáltico con caucho	

Tabla 9. Propiedades físicas del cilindro con PET al 30%.

Material	Hormigón Asfáltico con caucho 30
Densidad	1.895 g/cm ³
Masa	1.48833 kg
Área	47123.9 mm ²
Volumen	785398 mm ³
Centro de gravedad	x=0.0000000104568 mm

Tabla 10. Propiedades mecánicas del cilindro con PET al 30%.

Nombre	Hormigón Asfáltico con PET al 30 %	
General	Densidad de masa	1.61 g/cm ³
	Límite de elasticidad	6000 MPa
	Resistencia máxima a tracción	No requerida
Tensión	Módulo de Young	7.73 GPa
	Coefficiente de Poisson	0.3 su
	Módulo cortante	2.97308 GPa
Nombre(s) de pieza	Cemento Asfáltico con PET	

Otro paso por seguir será colocarle las restricciones de movimiento de nuestro espécimen, como restricción tenemos la cara inferior (figura 12), que está de color cian, este proceso se lo realiza para poder visualizar y simular una prueba de compresión de un laboratorio, de manera física. Las caras libres tenemos la superior y la circunferencia del cilindro.

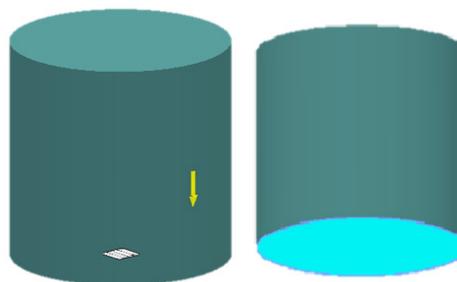


Figura 12. Aplicación de la fuerza normal con restricción de superficie de nuestro cilindro.

Analizaremos la probeta de la mezcla asfáltica con PET al 30%, de sus propiedades físicas y mecánicas, como muestra en la tabla 9 y 10 respectivamente.

Realizamos la corrida del programa para estudiar el análisis tensional de ambos elementos, en primer lugar, proporcionamos los resultados del material con caucho al 30%, para luego realizarlo con el otro compuesto.

Como podemos apreciar en la tabla 11 y la tabla 12, tenemos los resultados de nuestros compuestos al ser sometidos a la carga por rodadura, los datos brindados mediante la simulación, son los esfuerzos mecánicos, como son la tensión von mises, que es la energía de disipación (Jenett, 2015, las tensiones principales en los ejes tridimensionales, así como su deformación.

Tabla 11. Análisis del cilindro de Mortero Asfáltico con caucho al 30%.

Nombre	Mínimo	Máximo
Volumen	785398 mm ³	
Masa	1.48833 kg	
Tensión de Von Mises	0.777433 MPa	3.84877 MPa
Primera tensión principal	-0.463927 MPa	1.21209 MPa
Tercera tensión principal	-4.33819 MPa	0.190885 MPa
Desplazamiento	0.000025417 mm	0.0120139 mm
Coefficiente de seguridad	15 su	15 su
Tensión XX	-0.952531 MPa	1.21193 MPa
Tensión XY	-0.387146 MPa	0.384384 MPa
Tensión XZ	-0.726247 MPa	0.732477 MPa
Tensión YY	-0.99316 MPa	1.21049 MPa
Tensión YZ	-0.735059 MPa	0.769159 MPa
Tensión ZZ	-4.33369 MPa	0.196812 MPa
Desplazamiento X	-0.00242136 mm	0.00245703 mm
Desplazamiento Y	-0.00244178 mm	0.00244909 mm
Desplazamiento Z	-0.0117556 mm	0 mm
Deformación equivalente	0.0000541606 su	0.000259052 su
Primera deformación principal	0.0000278857 su	0.000126587 su
Tercera deformación principal	-0.00028792 su	-0.0000359344 su
Deformación XX	0.000011591 su	0.000126149 su
Deformación XY	-0.0000381494 su	0.0000378773 su
Deformación XZ	-0.0000715644 su	0.0000721784 su
Deformación YY	0.0000124518 su	0.000119297 su
Deformación YZ	-0.0000724328 su	0.000075793 su
Deformación ZZ	-0.000287476 su	-0.0000357362 su

Tabla 12. Propiedades físicas del cilindro de H. AS. Con PET al 30%.

Nombre	Mínimo	Máximo
Volumen	785398 mm ³	
Masa	1.26449 kg	
Tensión de Von Mises	0.779499 MPa	3.8934 MPa
Primera tensión principal	-0.44193 MPa	1.18545 MPa
Tercera tensión principal	-4.34184 MPa	0.187385 MPa
Desplazamiento	0.0000378063 mm	0.0215723 mm
Coefficiente de seguridad	15 su	15 su
Tensión XX	-0.874593 MPa	1.18528 MPa
Tensión XY	-0.353907 MPa	0.351455 MPa
Tensión XZ	-0.727047 MPa	0.732338 MPa
Tensión YY	-0.903285 MPa	1.18385 MPa
Tensión YZ	-0.735319 MPa	0.768823 MPa
Tensión ZZ	-4.33814 MPa	0.194492 MPa
Desplazamiento X	-0.00456834 mm	0.0046238 mm
Desplazamiento Y	-0.00460214 mm	0.00461389 mm
Desplazamiento Z	-0.0210622 mm	0 mm
Deformación equivalente	0.0000970017 su	0.000455675 su
Primera deformación principal	0.0000348078 su	0.000188754 su
Tercera deformación principal	-0.000522192 su	-0.0000521541 su
Deformación XX	0.0000167533 su	0.000188145 su
Deformación XY	-0.0000595187 su	0.0000591062 su
Deformación XZ	-0.000122272 su	0.000123162 su
Deformación YY	0.0000223831 su	0.00017692 su
Deformación YZ	-0.000123663 su	0.000129297 su
Deformación ZZ	-0.00052157 su	-0.0000509589 su

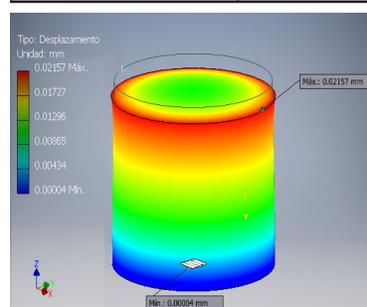


Figura 13. Desplazamiento del compuesto del Asfalto con Caucho.

Al realizar los nuevos compuestos se pudo observar las propiedades relevantes del caucho, como apreciamos en la gráfica de barras de la figura 13, cabe recalcar que, los valores tomados bajo la norma de plásticos ASTM (Jenett, 2015) se tomó los valores más altos en el rango, ya que al ser reciclado, probablemente tenga cauchos sintéticos de propiedades mecánicas mucho mayores que el caucho normal, como por ejemplo el caucho de las llantas de automóviles.

En nuestro análisis se consideró solamente las propiedades mecánicas, ya que estos materiales tienen consigo propiedades térmicas, y en nuestro análisis no aplica.

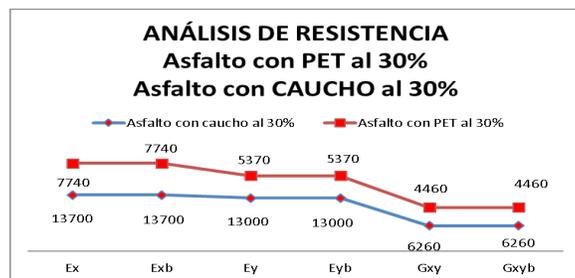


Figura 15. Comparación de desplazamiento del compuesto del Asfalto con PET en relación con el de caucho.

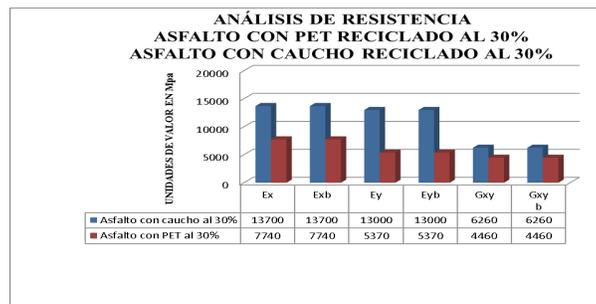


Figura 16. Comparación de desplazamiento del compuesto del Asfalto con PET en relación con el de caucho.

Como podemos apreciar en el análisis de resultados la deformación (figura 14 y 15) del cilindro de mortero Asfáltico con Caucho al 30% es menor con 0.01201 mm, comparado con el mortero Asfáltico con PET al 30% con 0.02157 mm.

CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos, el Mortero Asfáltico con caucho presenta más resistencia a la deformación que el mortero asfáltico con PET, por analogía podríamos predecir el resultado, el caucho tiene mejores propiedades mecánicas que el PET. Mediante el modelo sencillo de una probeta con las dimensiones especificadas se pudo agilizar los cálculos, considerando la deformación constante, el estudio de la fluencia de los materiales, su

sencillez es una desventaja ante los resultados que por lo general, se aproximan pero no son del todo realistas para suprimir el margen de error se deberían ingresar datos calibrados y bajo ensayos locales, y con ayuda del avance de la programación y en esta ocasión de la simulación mecánica en Autodesk, se minimiza el error al momento de procesar los datos de deformación, pero con el número de interacciones realizadas es suficiente para demostrar la composición del asfalto con el caucho y el PET. Por otra parte, hay que destacar que el cálculo del coeficiente de Poisson es fundamental, en nuestro caso fue de 0.30 para el mortero asfáltico.

La composición del asfalto con caucho y con PET se la ha tomado de un 30% para ser muy notorio el proceso de evaluación del material, y además que este valor es el recomendable o uno mayor, para que el proceso de Elementos Finitos sea confiable.

Estos procesos son recientes y no existen mayor información que la generada por los fabricantes Autodesk, además que las propiedades mecánicas del mortero asfáltico de la elasticidad o de la viscosidad de aquello no existe información, ya que su estudio se requiere un mayor análisis, y para nuestro estudio ha sido transformado.

Los resultados que hemos obtenido a través de este trabajo de investigación contribuyen al estudio de materiales bajo este proceso, que podría ser de cualquier material teniendo los datos de las propiedades mecánicas.

Este resultado se lo podría validar con un mayor número de ensayos para ajustar los procesos de análisis mediante este método, ya que si llega a ser ajustado tendremos resultados más fiables respecto a la vibración por las cargas de tráfico, análisis de suelos debajo del pavimento de mortero asfáltico, cimientos, es un potencial infinito e instrumento valioso para nuevas investigaciones.

Nuestro ensayo fácilmente se podría comparar con resultados en un laboratorio, suprimiendo el error al realizar el modelo físico del espécimen. Hay que enfatizar que abre la puerta a grandes a nuevas soluciones, no solo al permitir nuevas formas de aleaciones con mejoras de resistencia, sino en la parte ambiental, al ser el plástico y el caucho, grandes contaminantes actuales, este proyecto podría darle un derrotero amigable con el ambiente al plástico, pudiendo ser usado en revestimiento de calles o callejones de poco tránsito vehicular. De la misma forma el uso del caucho sería aún más beneficioso al ser de los dos materiales, el que mayor resistencia aporte al asfalto, su uso en carreteras podría mermar considerablemente su impacto ambiental con respecto al tiempo que demora su degradación. Cabe recalcar que los programas utilizados, nos permiten en lo posterior no sólo hacer

ensayos para la resistencia de materiales con fibras elásticas como el PET y el caucho, sino que se puede hacer uso de otros materiales amigables con el ambiente, con características elásticas tales como la caña Guadua, etc. Siempre y cuando estos cuenten con el criterio de la micro aleación, como lo requiere Heliuss Composite, para generar la combinación, dicho material debe ser prácticamente pulverizado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arandes, J. M., Bilbao, J., & López Valerio, D. (2004). Reciclado de residuos plásticos. *Rev. Iberoam. polímeros*, 5(1), 28–45. Recuperado de <http://www.arpet.org/docs/Reciclado-de-residuos-plasticos-Revista-Iberoamericana-de-Polimeros.pdf>
- Ariza, M. P., Ventura, C., & Ortiz, M. (2011). Modelo de fuerzas interatómicas para el grafeno a partir del potencial AIREBO,” *Rev. Int. Métodos numéricos para cálculo y diseño en Ing.*, 27(2), 105–116. Recuperado de <https://authors.library.caltech.edu/28780/>
- ASTM International. (1989). *Test Method for Resistance of Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus*. Pennsylvania: ASTM.
- ASTM International. (2008). *Nuevas normas propuestas se centran en revestimientos vinílicos con respaldo y condiciones de biorreacción en rellenos sanitarios*. Pennsylvania: ASTM.
- ASTM International. (2011). *Standard Specification for Compostable Plastics*. Pennsylvania: ASTM.
- Autodesk, Inc. (2000). *Autodesk Simulation Case studies. Case Studies*. San Rafael: Autodesk, Inc.
- Autodesk, Inc. (2016a). *Heliuss Composite*. San Rafael: Autodesk, Inc.
- Autodesk, Inc. (2016b). *Criterio de Tsai-Wu*. San Rafael: Autodesk, Inc.
- Autodesk, Inc. (2016c). *Simulation Mechanical*. San Rafael: Autodesk, Inc.
- Autodesk, Inc. (2016d). *Tsai-Hill Criterion*. San Rafael: Autodesk, Inc.
- Chapra, S. C., & Canale, R. P. (2006). *Métodos numéricos para ingenieros*. Mexico: McGraw - Hill Interamericana.
- Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería. (2017). *PLastic Crack dynamic*. Barcelona: CIMNE.
- Cuattrocchio, A. C., Botasso, H. G., Rebollo, O., & Soengas, C.J. (2006). *El uso de caucho de cubiertas en mezclas asfálticas*. La Plata: Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional.
- Hill, R. (1998). *The mathematical Theory of Plasticity*. New York: Clarendon Press.
- Jenett, B. (2015). *Digital Material Aerospace Structures*. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology.
- Instituto Chileno del Asfalto. (1992). *Construcción*. Santiago de Chile: Asphalt Institute.
- Pytel, A., & Singer, F. L. (1994). *Resistencia de Materiales*, 4st ed. México: Harla.
- Sánchez Sánchez, G. (1997). *Modelos de regresión para variables dependientes cualitativas dicotómicas*. Sonora: Universidad de Sonora.
- Timoshenko, S. (1957). *Resistencia de materiales*. Madrid: Espasa-Calpe S.A.
- Zill, D. (2002). *Ecuaciones Diferenciales con Aplicaciones de Modelado*. México: Thomson Learning.