

Determinación de participación de componentes para la evaluación de las propiedades mecánicas y térmicas de un material compuesto (Thermo Egg).

RESUMEN: En la presente investigación, se estudió el comportamiento mecánico y térmico del material compuesto de poliestireno expandido (EPS), libre de aire, y con un refuerzo natural de cascarón de huevo con membrana. Con el objetivo de crear un material nuevo que permita ser una alternativa para los problemas ambientales que existen en la actualidad. El procedimiento, para la liberación del aire del poliestireno expandido a través de un solvente y la preparación del refuerzo natural a partir de los residuos orgánicos del huevo de ave. En ese sentido es pertinente el diseño experimental para mezclas, específicamente el diseño simplex - lattice, para determinar el porcentaje de participación de cada uno de sus componentes.

Este material sometido a pruebas mecánicas y pruebas de conductividad térmica en laboratorios certificados cuenta con una resistencia mecánica de 96.4 Kg/cm², un módulo de elasticidad de 627.77 Kg/cm², un porcentaje de deformación de 24.54% y un coeficiente de conductividad térmica de 0.232 W/m*k.

El material Thermo Egg mejora significativamente con estas propiedades mecánicas y térmicas del poliestireno expandido convencional, además, convertirse en una alternativa de material aislante de bajo costo y mayor resistencia en comparación con los que actualmente se encuentran en el mercado.

PALABRAS CLAVE: Cascarón de huevo, Coeficiente de conductividad térmica, Diseño de experimentos, Poliestireno expandido, Resistencia mecánica.



Colaboración

Emma Zayuri Castellanos Pulido, Ana Roselyn Pérez Méndez, Saúl Reyes Barajas, Leonel Lira Cortes, Instituto Tecnológico Nacional de México / Campus Misantla Sergio Aurelio Zamora Castro, CENAM / Universidad Veracruzana

ABSTRACT: In the present investigation, the mechanical and thermal behavior of the composite material of expanded polystyrene (EPS), free of air, with a natural reinforcement of eggshell with membrane was studied; the procedure, for the air release of the expanded polystyrene through a solvent and the preparation of the natural reinforcement from the organic residues of the poultry egg; in order to obtain a new material, having better characteristics than the used ones. Prepared based on a design of experiments for mixtures, specifically the simplex - lattice design, to determine the percentage of participation of each of its elements.

This material subjected to mechanical tests and thermal conductivity tests in certified laboratories, has a mechanical resistance of 96.4 Kg / cm², a modulus of elasticity of 627.77 Kg / cm², a percentage of deformation of 24.54% and a coefficient of thermal conductivity of 0.232 W / m * k.

The Thermo Egg material improves significantly with these mechanical and thermal properties of conventional expanded polystyrene, in addition, becoming an alternative of insulating material with low cost and greater resistance compared to those currently on the market.

KEYWORDS: Eggshell, Coefficient of thermal conductivity, Design of experiments, Expanded polystyrene, Mechanical resistance.

INTRODUCCIÓN

De acuerdo con las cifras de SEMARNAT en el 2017 en México se generan diariamente 102,895.00 toneladas de residuos, de los cuales se recolectan 83.93%, y el 78.54% disponen de un sitio oficial para su correcta disposición, de estos residuos

generados solo se recicla el 9.63%. En el municipio de Misantla se generan 50 toneladas diarias, 21 toneladas son residuos alimenticios y 10.5 toneladas es plástico, que es donde se clasifica el poliestireno expandido, teniendo un equivalente de 5 kg. En respuesta a esta necesidad, surge la inquietud de generar soluciones que permitan el aprovechamiento de residuos generados de las diferentes actividades, es un reto en materia de sustentabilidad ambiental, por otra parte, constituye a disminuir la generación de residuos y darles un segundo uso, como es el caso de los residuos generados por el consumo de huevos de gallina y el poliestireno expandido utilizado para empaques y embalajes. El objetivo de este estudio fue el de determinar el porcentaje de participación de los componentes para desarrollar un nuevo material, compuesto por una mezcla de dos materiales diferentes, poliestireno expandido (unicel) liberado de aire por medio de un solvente y cascarón de huevo pulverizado como refuerzo, con mejores características de los usados.

MATERIAL Y MÉTODOS

Para la elaboración de este material se utilizó una metodología con cinco fases:

Fase 1: Se determinaron las características correctamente para la materia prima y los requisitos de la muestra.

La caracterización de la materia prima se determina por los componentes de la mezcla: poliestireno expandido + cascarón de huevo + solvente.

Poliestireno expandido de acuerdo con la clasificación que dicta la norma ASTM C578, cascarón de huevo tamizado bajo la norma ASTM E11-13 con un tamiz de 50 ASTMS y uso de solvente patente de EP1013708A3 que es el Thinner americano no solo por sus características es el que mejor reacciona con la mezcla.

Fase 2: El diseño de mezclas lattice o reticular, $\{q, m\}$ considera q componentes (en este caso tres componentes), y permite ajustar un proceso estadístico m . Los puntos del diseño consistente en todas las posibles combinaciones de componentes o mezclas que se forman a considerar proporciones pueden tomar valores $m+1$ entre cero y uno, dado por:
 $X_i = 0, 1/m, 2/m, \dots, m/m$ [1]

El diseño reticular que se usó para este caso, es el de $\{3,2\}$, e implica que $q = 3$ y $m = 2$; por ello, los valores que los componentes toman son de $X_i = 0, 1/2, 1$. Con lo que las mezclas de tres componentes que se pueden formar con estos valores son:

$(X_1, X_2, X_3) = (1, 0, 0); (0, 1, 0); (0, 0, 1); (1/2, 1/2, 0); (1/2, 0, 1/2)$ y $(0, 1/2, 1/2)$

La representación gráfica de este diseño se representa en la figura 1

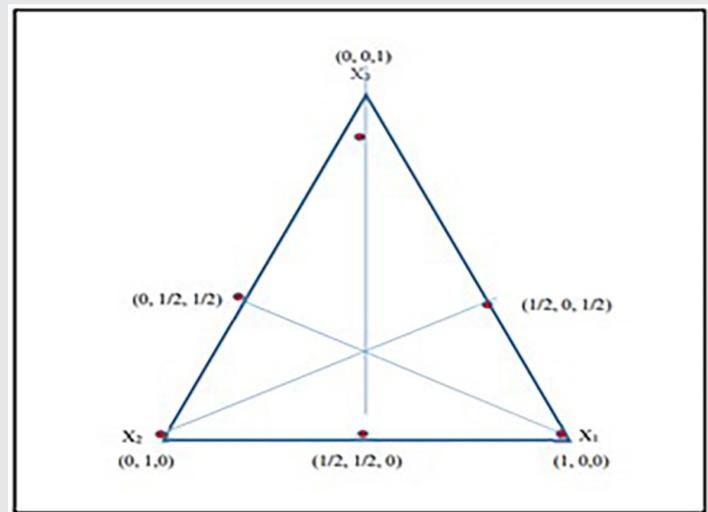


Figura 1. Diseño simplex-lattice para la mezcla Thermo Egg.

Fase 3: Con la ayuda del Software STATGRAPHICS Centurión, que utiliza estadística avanzada, para analizar datos y combinarlos con procedimientos analíticos y gráficos interactivos. Se corre el modelo de Diseño de mezclas, por el método simplex, por recomendación del mismo software, con un diseño de vértices extremos, este es que abarcan solo una porción o un espacio más pequeño dentro del simplex.

El modelo estadístico resultante se muestra en la Tabla 1, a continuación.

Tabla 1. Experimentos resultantes por STARGRAPHICS

Experimento	% de cascarón de Huevo	% de Poliestireno Expandido	% de thinner en mml
1	60	15	25
2	40	15	45
3	45	30	25
4	40	30	30
5	53.125	18.75	28.125
6	43.125	18.75	38.125
7	45.625	26.25	28.125
8	43.125	26.25	30.625
9	50	15	35
10	52.5	22.5	25
11	40	22.5	37.5
12	42.5	30	27.5
13	46.25	22.5	31.25

Como se observa, el software arroja 13 experimentos, cada experimento se repetirá dos veces para sacar un promedio de las lecturas que arroje 26 probetas o muestras. Y como se realiza la prueba con tres tamaños de partícula diferentes (tamiz ASTM 16, tamiz

ASTM 20 y tamiz ASTM 50), se tiene un total de 78 probetas o muestras, para determinar las propiedades de la mezcla.

Fase 4: Las pruebas mecánicas son ensayos destructivos en las que los materiales de estudio son sometidos a esfuerzos mediante la aplicación de una fuerza externa hasta su deformación y/o ruptura, para determinar sus propiedades de dureza, elasticidad, fragilidad y resistencia a la penetración. Se pueden estudiar materiales diversos como: polímeros, metales de baja dureza, materiales cerámicos, materiales compuestos, productos farmacéuticos y alimentos, así como productos o piezas elaboradas con estos materiales. [2]

Una vez validado el sistema de medición, por medio de un análisis de repetibilidad y reproducibilidad, que verifica el sistema de medición de las pruebas con una variación de 27.6 %. Con base al diseño experimental se elaboran trece mezclas las diferentes y sus resultados con pruebas mecánicas que mostrará más adelante en los resultados.

Las pruebas de compresión y elasticidad se realizaron en el Laboratorio de Materiales Avanzados de la Universidad Veracruzana, especializado en la fabricación y caracterización de nuevos materiales.

A continuación, en la figura 2 se muestran las dimensiones correspondientes a los ensayos con el tamiz ASTM malla 50, la muestra uno y la muestra cinco no se puede llevar acabo con todas las proporciones ya que en el caso de la muestra uno que se realiza con 60 gr de cascarón de huevo + 15 gr de poliestireno expandido + 25 ml de solvente, al ser poco poliestireno esta probeta tiene un sobrante de cascarón de 3.7 gr. En la muestra cinco la mezcla 53.125 gr + 18.75 gr + 28.125 ml., con un sobrante de 8.9 gr de cascarón [3], y con la respuesta relacionada a las propiedades mecánicas se determina la formula donde los componentes contribuyen más a las respuestas.

MUESTRA	CARAS	MUESTRA	CARAS	MUESTRA	CARAS
1		5		9	1.2 1.7
PESO		PESO		PESO	1.8
					5.1
MUESTRA	1.4 1.65	MUESTRA	1.3 1.7	MUESTRA	1.6 1.3
2	ALTURA	6	ALTURA	10	ALTURA
	1.2		1.65		1.9
PESO	3.6	PESO	3.9	PESO	4.05
MUESTRA	1.4 1.5	MUESTRA	1.2 1.65	MUESTRA	1.8 1.2
3	ALTURA	7	ALTURA	11	ALTURA
	1.7		1.75		1.8
PESO	3.5	PESO	3.55	PESO	3.2
MUESTRA	1.6 1.6	MUESTRA	1.5 1.5	MUESTRA	1.4 1.65
4	ALTURA	8	ALTURA	12	ALTURA
	1.3		1.85		1.75
PESO	3.1	PESO	4.6	PESO	3.6
				MUESTRA	1.3 1.2
				13	ALTURA
					1.7
				PESO	3.75

Figura 2. Dimensionamiento promedio de las probetas o muestras con ASTM malla 50.

Fase 5: Con base a la optimización del diseño experimental se tiene como resultado la siguiente participación de los componentes optima: 43% de cascarón de huevo+ 15% de poliestireno expandido + 25% Solvente.

Con un mínimo y máximo de cascarón de 40% - 60%; Poliestireno expandido 15% - 30 % y solvente en 25% - 45%.

Con estos resultados obtenidos se establece el proceso de producción preliminar para este material y se determina la conductividad térmica.

Aparato de Placa Caliente con Guarda (APCG). La prueba de conductividad térmica, λ, de este material, fue realizada en el Centro Nacional de Metrología (CENAM). El equipo utilizado en la medición es un instrumento de placa caliente con guarda de doble lado de medición. El instrumento está compuesto por una placa caliente central y dos placas frías en los extremos. [4] En la figura 3 se muestra una fotografía del instrumento.



Figura 3. Aparato de Placa Caliente con Guarda (APCG).

Cada una de las muestras se coloca entre la placa fría y la placa caliente central, una transferencia de energía térmica (calor) se genera en la placa caliente hacia las placas frías a través de las muestras. La guarda reduce las perdidas por transferencia radial de calor. Las temperaturas de las placas y la guarda se miden con termopares calibrados, el área de medición y el espesor con un medidor Vernier.

La conductividad térmica del material se determina a partir de la ecuación de estado estable para el instrumento de placa caliente con guarda:

$$\lambda = \frac{q L}{2A \Delta T} \quad \text{Ec. (1)}$$

En la cual:
 q es el flujo de calor a través de la muestra en W.
 λ es la conductividad térmica aparente de la muestra en W m⁻¹ K⁻¹.

ΔT es la diferencia de temperatura aplicada a la muestra en °C o °K.

L es el espesor de la muestra en m.

A es el área efectiva de la sección transversal en m².

Cuando una muestra de material es un compuesto laminar, contiene porosidades, celdas vacías o mezclas de materiales, el calor se puede transferir por convección y radiación, además de la conducción, en estos casos al parámetro λ , de la ecuación anterior, se le denomina conductividad térmica efectiva o aparente.

Se estableció el estado permanente en las muestras. Una vez terminada la medición se desmontaron las muestras del equipo y se verificó la integridad física del material.

Con las cantidades de contribución mayor para el aporte de propiedades mecánicas El material fabricado tiene como resultado una resistencia mecánica de 96.4 Kg/cm², un módulo de elasticidad de 627.77 Kg/cm², un porcentaje de deformación de 24.54%.

RESULTADOS

Con base en los resultados mecánicos de cada una de las muestras o ensayos realizados, se podría concluir sobre que muestra cuenta con mayores propiedades, pero esto se vuelve complejo cuando se analiza y se ve que unas muestras presentan mayor resistencia, mientras que otra, mayor módulo de elasticidad. Es aquí donde radica la importancia del modelo de diseño de mezcla (DOE) para determinar la muestra que usando las proporciones óptimas permite tener los mejores resultados en todas las variables.

En la Tabla 2, se muestran los resultados promedio de las pruebas mecánicas que se obtuvieron después de realizar ensayos a las diferentes muestras. Los resultados siguientes son de las muestras elaboradas con un tamaño particular, se puede observar que la mezcla que se obtiene para obtener resultados óptimos con respecto a la resistencia a la compresión y al % de deformación es la combinación de cascarón 40% + Poliestireno Expandido 15% + Solvente 45%, estas proporciones las posee la probeta dos y posee los siguientes resultados.

A continuación, en la tabla 3 se muestran los resultados del estudio de conductividad térmica realizado con el Aparato de Placa Caliente con Guarda (APCG), realizado en el CENAM.

Tabla 2. Resultados mecánicos promedio

TAMIZ 50				
No	Resistencia	PROMEDIO	PROMEDIO	PROMEDIO
	PROMEDIO	% Deformación	MODULO DE ELASTICIDAD (kg/cm ²)	Peso Volumetrico (g/cm ³)
2	94.295	20.546	568.635	1.10
3	45.456	12.500	363.711	0.96
4	51.603	13.780	374.503	0.91
6	45.914	12.246	381.810	1.08
7	47.023	10.710	442.974	1.10
8	30.453	7.816	398.096	1.04
9	43.901	11.920	388.552	1.25
10	58.549	13.654	459.056	1.03
11	15.432	18.729	85.792	0.78
12	18.992	13.728	139.539	0.80
13	71.648	15.655	496.431	1.20

Tabla 3. Resultados del procedimiento aparato de placa caliente con Guarda (APCG).

Número de Prueba: Uno	Lugar donde se realizó la medición: CENAM
Descripción de la muestra	
Características: Material compuesto.	
Identificación: 1-C y 2-C	
Dimensiones: Placas de 16 cm x 16 cm x 1.34 cm.	
Descripción del patrón	
Patrón nacional: CNM-PNE-16.	
Nombre del aparato: Aparato de placa caliente con guarda.	
Orientación de los planos: Horizontal.	
Modo de operación: Doble lado de medición.	
Procedimiento de prueba	
Estado permanente con aparato de placa caliente con guarda	
Valores experimentales	
Nombre de la variable:	
Calor disipado durante la prueba / W	11.44
Temperatura en la placa caliente / °C	29.79
Temperatura en la placa fría / °C	14.37
Gradiente de temperatura en la muestra / °C	15.43
Temperatura media o de la prueba / °C	22.08
Temperatura ambiente / °C	21.16
Humedad relativa / %HR	54.4
Espesor promedio de las muestras / m	0.0134
Área de medición / m ²	0.0214484
Conductividad térmica aparente / W m ⁻¹ K ⁻¹	0.2322
Incertidumbre relativa expandida (k=2) / %	6.8
Peso final 1-C / g	456.6
Peso final 2-C / g	455.9

Estableciendo una comparación con diferentes materiales en relación con el coeficiente de conductividad tabla 4.

Tabla 4. Coeficiente de conductividad térmica (APCG).

Material	Coeficiente de conductividad térmica. W/m*K
Asfalto	0.74-0.76
Arcilla cocida a 1450°C	1.28-1.4
Baquelita	0.233
Cemento	1.004
Granito	3.000
Fibra de vidrio	0.035
Madera	609-801
Yeso	0.814
Poliestireno	0.157
Thermo Egg	0.232

CONCLUSIONES

La importancia del diseño de una mezcla a través del DOE (diseño de experimentos) en comparación con el método tradicional del ensayo y error, radica en que este método permite conocer las proporciones correctas a utilizar de cada componente y con base en los porcentajes resultantes de estos, se puede obtener una mezcla que como respuesta cuenta con propiedades mecánicas superiores a las de los componentes utilizados para su elaboración.

Este es el caso del material Thermo Egg, el cual, en comparación con el poliestireno expandido y de acuerdo a la ficha técnica que se tiene de sus propiedades según KNAUF (empresa dedicada a las ventas de poliestireno expandido para la construcción), las placas de poliestireno expandido sometidos a cargas, como son suelos, cubiertas, aislamiento perimetral de muros, etc; la deformación en estas aplicaciones es inferior al 10 % y por influencia de compresión tiene $\% \leq 2$ %. Para este material podemos alcanzar un $\% \geq 20$.

Con respecto a la compresión el poliestireno expandido posee ≥ 1 y un módulo de elasticidad ≥ 1.5 , en cuanto a esa característica los resultados de este material para la compresión es ≥ 90 y el módulo de elasticidad es de ≥ 500 . En cuanto a la dureza tiene un resultado muy similar a la madera.

Con respecto al fuego los productos de poliestireno expandido al ser expuestos a temperaturas superiores a 100 °C se reblandecen mientras que, en muestras de este material, se consume el fuego y queda el material quemado, en un 10%, aproximadamente expuesto a una temperatura de 378 °C hasta 400 °C.

Al igual que el poliestireno expandido es un material que se podría usar como aislante térmico, gracias a sus propiedades.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Gutierrez Pulido, H., & de la Vara Salazar, R. (2012). *Análisis y diseño de experimentos*. México: Mc Graw Hi Education.

[2] CFATA, L. d. (Marzo de 2020). *Laboratorio de Pruebas Mecánicas*. Obtenido de <http://www.fata.unam.mx>

[3] Perez Ana Roselyn (2017) *Mezcla: Poliestireno expandido y cascarón de huevo*. Misantla, Ver.: ITSM.

[4] Lira Cortés, L. (2017). *Necesidades de medición de conductividad térmica para el cumplimiento de normas de eficiencia energética en edificaciones*. México: Secretaría de economía.

[5] Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2011). *Transferencia de calor y masa: Fundamentos y aplicaciones / Yunus A. Çengel y Afshin J. Ghajar (4a. ed.--)*. México D.F.: McGraw Hill.

[6] Pérez Ana Roselyn (2016) *Utilización del cascarón de huevo como elemento constitutivo*, *Ingeniantes Año 3 / No. 2 / Vol. 1*, <https://n9.cl/5t-fe6>