

**REDES NEUMÁTICAS ALTERNATIVAS PARA LA PROTECCIÓN DE
ELEMENTOS FRÁGILES**

AUTORES:

SIMÓN BEDOYA FLÓREZ

LUISA MONTOYA HENAO

NICOLÁS PAREJA BETANCUR

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

ESCUELA DE ARQUITECTURA Y DISEÑO

FACULTAD DE DISEÑO INDUSTRIAL

MEDELLÍN / ANTIOQUIA

2019

MONOGRAFÍA:

**REDES NEUMÁTICAS ALTERNATIVAS PARA LA PROTECCIÓN DE
ELEMENTOS FRÁGILES**

AUTORES:

SIMÓN BEDOYA FLÓREZ

LUISA MONTOYA HENAO

NICOLÁS PAREJA BETANCUR

Trabajo de grado para optar al título de Diseñador Industrial

ASESORES:

ELSIE MARÍA ÁLVAREZ OCHOA

ANDRÉS HERNANDO VALENCIA ESCOBAR

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

ESCUELA DE ARQUITECTURA Y DISEÑO

FACULTAD DE DISEÑO INDUSTRIAL

MEDELLÍN / COLOMBIA

2019

TABLA DE CONTENIDO

Introducción.....	6
1. Planteamiento del problema	7
1.1. Tema general del proyecto.....	7
1.2. Características generales del proyecto de investigación.....	7
1.3. Problema de investigación identificado.....	7
1.4. Pregunta o hipótesis de investigación.....	8
1.5. Elementos del problema de investigación.....	8
1.6. Limitaciones de la investigación: alcances y riesgos.....	8
2. Justificación.....	9
3. Marco de referencia	10
3.1. Marco teórico.....	10
3.1.2. Estructuras neumáticas	18
3.1.2. Módulos, características	12
3.1.3. Teselado	13
3.2. Estado del arte.....	15
4. Objetivos	18
4.1. Objetivo general.....	18
4.2. Objetivos específicos.	18
5. Metodología.....	19
5.1 Parámetros de los objetos de estudio	19
5.3. Selección de los patrones modulares	20
5.4 Definición de las materias primas.....	20
5.5 Pruebas mecánicas de las probetas	21
6. Resultados y discusión	22
6.1. Definición del material.....	22
6.2 Experimentación de método de unión	23
6.3 Experimentación y elaboración de probetas iniciales de redes neumática...	24
6.4 Ensayo de compresión	24
6.5 Ensayo de impacto.....	26
6.6 Ensayo de impacto con el elemento frágil	28
6.7 Ensayo de compresión con el elemento frágil.....	29
7. Conclusiones.....	31
8. Recomendaciones.....	32
9. Referencias	33
10. Anexos.....	34

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Estructura neumática.....	11
Figura 2. Tipos de estructuras neumáticas.....	12
Figura 3. Estructura agrupada	12
Figura 4. Yorkshire Pavilion, vista de modelo.....	13
Figura 5. Tipos de módulo.....	14
Figura 6. Tipos de redes.....	14
Figura 7. Tipos de teselación.....	15
Figura 8. Patrones modulares en madera pino.....	21
Figura 9. Ensayos de termoformado.....	23
Figura 10. Resultado de las probetas termoformadas con lámina de PVC.....	26
Figura 11. Tipos de pegamento.....	26
Figura 12. Gráfica relación carga / Extensión de tracción	25
Figura 13. Apariencia superficial.....	26
Figura 14. Gráficas ensayo de ensayo de compresión.....	26
Figura 15. Altura de rotura en cada probeta.....	28
Figura 16. Ensayo de impacto con objeto frágil a diferentes alturas.....	29
Figura 17. Relación carga extensión.....	30

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Selección y análisis de los objetos de estudio.....	20
Tabla 2. Resultados y promedios.....	27
Tabla 3. Segundo resultado obtenido del ensayo de impacto.....	28
Tabla 4. Resultados del impacto con el objeto frágil.	30
Tabla 5. Resultados ensayo de compresión con el elemento frágil..	31

Resumen

Este proyecto de investigación buscó desarrollar una alternativa para un sistema de embalaje neumático que permita proteger objetos frágiles durante su transporte y que tenga la resistencia mecánica adecuada para mantener su integridad. Para esto se desarrollaron tres tipologías diferentes de texturas infladas a partir de termoformados con el fin de evaluar su comportamiento en el momento de entrar en un proceso de embalaje. Posteriormente se realizaron ensayos mecánicos de tracción con el fin de determinar el método de sellado más adecuado para su construcción. Finalmente se sometieron las probetas a ensayos de compresión e impacto para comprobar y definir los resultados del proyecto. Se encontró como factor importante que, durante el proceso de producción de los elementos de estudio, la alternativa piramidal presentó menor deformación del material en el termoformado, generando una mayor eficiencia en términos de su comportamiento mecánico debido a que no altera de manera significativa el calibre del material en comparación a las alternativas cúbicas y semiesféricas.

Introducción

Este proyecto de investigación busca dar una solución funcional y práctica para la protección y conservación de objetos, generalmente en el ámbito de empaques y embalajes, ya que las opciones existentes en el mercado como el poliestireno expandido, film plástico, film espuma, generan mayores volúmenes de desecho posterior a su uso, es por esto que se propone resolver con las estructuras inflables, el uso de un material que genera menor volumen de desperdicios al finalizar su vida útil como lo es el PVC, permitiendo además adaptarse a la morfología del objeto para su protección, buscando que se pueda desinflar y plegar ocupando menor espacio cuando el elemento ya haya cumplido su función.

En algunas de las investigaciones que se realizaron en el estado del arte, se encontró que los estudios realizados sobre estructuras neumáticas se han desarrollado especialmente para el ámbito arquitectónico y muy poco en cuanto al desarrollo de estructuras hinchables que brinden protección. Como ejemplo de estos desarrollos pueden ser el estudio de sistemas que se articulan mediante la graduación de la presión del aire para aplicarse en estructuras que se abren y se cierran (F.Melendez, M.Gannon, Z.Jacobson y V. Toulkerido 2014). Otro ejemplo se debe a un recinto creado para los Juegos Panamericanos en Toronto, se trata de una estructura neumática a modo de pabellón que se diseñó adaptándola a las necesidades del contexto desde su forma y estructura (H.Junkjohann y W.Woodington, 2016). Por último se puede ejemplificar un desarrollo hecho en impresión 3D, a las cuales se les altera su forma inicial pasando de ser bidimensional a tridimensional por medio de presión de aire con el objetivo de crear nuevas formas y distribuciones espaciales en el interior de los automóviles (Sabina, 2018).

El objetivo del proyecto consiste en la elaboración de una red modular para la protección de objetos frente a impactos y caídas por medio del uso de teselaciones, mosaicos formados por una o más figuras de patrones que calzan entre sí, con el fin de comprobar la resistencia mecánica que generan a la hora de soportar cargas externas. Adicionalmente, estudiar la morfología de dichas estructuras para la obtención de resultados cuantitativos y alternativas que se adapten a la morfología del objeto sin generar grandes volúmenes de materia prima posteriores a su uso.

1. Planteamiento del problema

1.1 Tema general del proyecto

Redes neumáticas alternativas para la protección de elementos frágiles

1.2 Características generales del proyecto de investigación

Este proyecto se enmarca en una investigación de tipo experimental, en la cual se identifica un potencial de desarrollo de un elemento neumático amortiguante que reduzca la pérdida de materia prima en las empresas al momento de empacar y distribuir productos frágiles, generando al mismo tiempo menos impacto ambiental en comparación con los elementos que ya se usan actualmente. Se evaluaron las propiedades mecánicas de estos elementos inflados por medio de ensayos de tracción, compresión e impacto con el fin de estudiar la eficiencia y aplicabilidad de esta alternativa neumática en el ámbito industrial.

1.3 Problema de investigación identificado

Como bien se conoce, actualmente las industrias han venido implementando procesos de educación y transformación enfocados al desarrollo de producciones sostenibles en pro al mejoramiento del medio ambiente. Si bien esto es un factor esencial para la industria, también ha de resaltarse la importancia que se tiene por la pérdida de materia prima ocasionada por procesos de embalaje y transporte de productos, puesto que, objetos que presentan daños o están en mal estado son considerados no aptos para el mercado y por ende pasan a convertirse en desechos.

Para la solución de esta problemática, las industrias optan por materiales complementarios que aporten estructuralmente al momento del embalaje para mantener la integridad de los productos contenidos. Dichas soluciones, aunque efectivas, presentan ciertas falencias ya sea por la carencia de estudios sistémicos que comprueben su comportamiento mecánico o por el impacto negativo al medio ambiente.

Soluciones como el corrugado *single face* o la viruta de madera, aunque ecológicamente sostenibles, son materiales complementarios con los cuales no se logran corroborar su comportamiento mecánico, adicionalmente son pocas las tipologías de productos que hacen uso de dicha alternativa. Por otro lado, se observan soluciones como el polietileno expandido, las cuales, estructuralmente permiten ser evaluadas, pero al momento de ser

desecharse terminan considerándose basura debido a los grandes volúmenes de material que se generan y la poca rentabilidad que se obtiene al reciclarlos. Finalmente se observan en el mercado el uso de films alveolares como alternativa de protección; dicha solución suele ser funcional pero la carencia de estudios sistemáticos en relación a la morfología de la superficie de este tipo de elementos ocasiona un vacío en el sustento teórico de dichas estructuras infladas que permitan una distribución de cargas eficiente, mejorando la integridad de los productos frágiles exportados.

La finalidad de esta investigación es realizar un estudio morfológico de algunas tipologías de texturas infladas, observando los efectos generados al momento de evaluar su comportamiento mecánico, buscando de esta manera una óptima distribución de cargas que permitan ser usadas posteriormente como elementos de protección para productos frágiles y así asegurar su integridad durante el proceso de embalaje y transporte.

1.4 Pregunta o hipótesis de investigación

¿Cuál estructura, presente en la textura superficial del elemento neumático, es más eficiente para la protección de productos de mediana y pequeña escala?

1.5 Elementos del problema de investigación

Estructuras neumáticas, resistencia al impacto, redes modulares, comportamiento mecánico.

1.6 Limitaciones de la investigación: alcance y riesgos

El proyecto busca verificar cuál de las alternativas de red modular brindan mejor comportamiento, en términos de protección, a un elemento frágil que esté contenido en dicha estructura, para poder llevar a la práctica la creación de un patrón el cual se adapte a la función de amortiguar y proteger objetos de mediana escala. Para esto se busca entender cómo estas estructuras pueden soportar diferentes fuerzas sin verse afectadas, cómo su forma permite adaptarse a diferentes objetos, y cumplir su función en el marco del diseño. Después de entender las nociones básicas de las estructuras neumáticas, es entonces cuando se debe llevar a la práctica las bases adquiridas para crear las estructuras deseadas con los requerimientos y especificaciones necesarias. Es por esto que no se pretendió el diseño y propuesta de un producto ya que el proyecto se limita a la fase de experimentación de pruebas de compresión o impacto como un estudio de alternativas a modo de elemento que aplicado a modo de componente adicional brinda seguridad y adaptación en el transporte.

2. Justificación

Para este proyecto se establece entonces que hay una falencia en los materiales usados para el embalaje debido a que los que se manejan en el mercado no son de difícil reciclado, u ocupan mucho espacio al terminar su vida útil, es por esto que se busca encontrar una alternativa más práctica, que de una manera más eficiente y ecológica facilite el proceso de desecho y reciclado ante las soluciones genéricas que existen en el mercado. Para esto la investigación se basa en los principios de las estructuras inflables, por sus propiedades mecánicas que pueden ser de gran ayuda para la amortiguación y protección del producto, además de que estas se han usado a escala más grande con un resultado exitoso, pero se carece de poner estas estructuras en práctica a mediana escala.

El segundo factor que pensado en conjunto con el anterior puede ser una tentativa de solución es la morfología, y la teselación aplicada a esta misma, para aplicar la morfología debemos saber qué objeto estamos tratando, como adaptarse más a su forma para poder elaborar la protección adecuada para la misma, es en este momento donde entra la teselación, la necesidad de crear mosaicos o seriados, que se puedan adaptar de manera más eficiente a ciertos objetos o materiales, esta es una falencia que se encuentra en el mercado, ya que existe el film alveolar el cual ha promovido las semiesferas como la mejor teselación pero existen otras que se pueden adaptar mejor y tener mejores propiedades mecánicas apropiadas para la protección.

3. Marco de referencia

3.1 Marco teórico

3.1.1 Estructuras neumáticas

Las estructuras neumáticas son membranas flexibles tensadas previamente con aire a presión, generalmente rigidizadas por cables que frente a la acción de las cargas exteriores, desarrollan esfuerzos de tracción, por lo que constituyen una estructura muy ligera. El material que se usa puede cambiar según la escala del sistema, por ejemplo para elementos a pequeña escala, se utilizan lonas naturales o sintéticas pintadas o revestidas, cuya vida media oscila entre 5 y 10 años. Para estructuras a gran escala se utilizan membranas más fuertes y gruesas como, por ejemplo, nylon, poliéster o fibra de vidrio protegidos con vinilo o teflón (figura 1).

Un referente muy claro de estructura neumática son las pompas de jabón. Suelen ser de forma esférica, tanto las que están flotando como las que están sobre un plano, ya que la membrana esférica representa la superficie mínima bajo la acción de la presión, debido a que las tensiones y la curvatura son constantes en cualquier punto haciendo de la esfera la superficie mínima para un cierto volumen dado. Estas estructuras pueden combinarse formando grupos y en otras formas más complejas. Así mismo desafían la gravedad de una manera que contrariamente a las estructuras comunes cuyo peso debe ser distribuido en el suelo, imponen una carga que actúa en sentido contrario a la gravedad (Salom, 2013).



Figura 1. Estructura neumática (Wouters 2013)

Tipos de estructuras neumáticas:

Estructuras soportadas con aire / tipo cerrada: Son aquellas formadas mediante una única membrana tensada por una pequeña presión interna que puede ser positiva, adoptando formas convexas o negativas, con formas cóncavas. Al igual que las pompas de jabón, tiene una mayor presión en el interior (Figura 2-a).

Estructura hinchada con aire a presión / tipo abiertas: Forman pilares, vigas o pórticos encerrando un volumen, donde se encierra el aire contenido por membranas. Debe utilizarse elevada compresión o un gas distinto (Figura 2-b).

Estructura combinada: combinación de ambas estructuras anteriores o creadas también mediante la combinación de sistemas neumáticos con algún tipo de estructura rígida de soporte (Tinoco, 2018) (Figura 2-c).

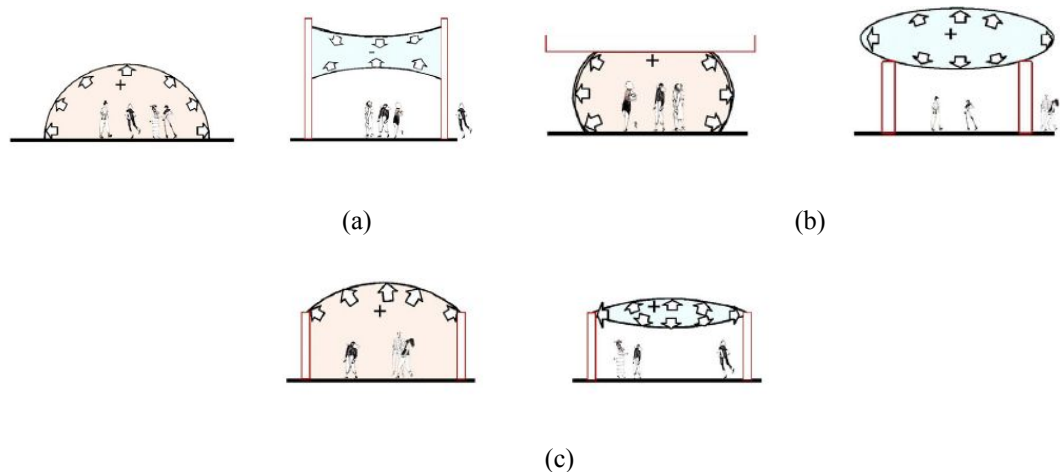


Figura 2. Tipos de estructuras neumáticas (Tinoco, 2018) (a) Estructura abierta, (b) Estructura cerrada (c) Estructura combinada.

Clasificación de estructuras Neumáticas:

Desde el estudio teórico y desde los referentes estudiados, se pudo percibir que las estructuras neumáticas se encuentran generalmente clasificadas en una de las siguientes dos formas estructurales.

Estructuras Agrupadas: Se encontraron diferentes estructuras manejando este tipo de volumetrías como se muestra en la figura 3, con superficies esféricas agrupadas generando texturas, son comúnmente vistas tanto es sistemas estructurales de gran tamaño especialmente en estructuras neumáticas arquitectónicas y en estructuras de menor tamaño como el caso del film alveolar para la protección de contenidos en embalajes.



Figura 3. Estructura agrupada (Tinoco, 2018).

Estructuras entramadas: Se definen como estructuras entramadas aquellas integradas por piezas en planos verticales, horizontales o inclinados (vigas y pilares) constituyendo un conjunto estructural resistente dotando de ligereza y resistencia a la estructura (Figura 6). Las barras verticales soportan esfuerzos de compresión y cizalla o corte, y las piezas horizontales longitudinales se someten a esfuerzos de compresión, flexión o tracción.



Figura 4. Yorkshire Pavilion, vista de modelo (Wouters, 2013)

3.1.2 Módulos, características

Un módulo es una disposición de un elemento en un plano o de manera tridimensional, compuestos por elementos más pequeños que son utilizados en repetición. Está relacionado con el patrón, este se repite varias veces formando un módulo, con este solo elemento (patrón) se pueden crear variaciones interminables de módulos en diferentes combinaciones (Wong, 1991).

El módulo está compuesto por unidades más pequeñas llamadas submódulos (Micromódulos) que son la división exacta y simétrica de un módulo, mientras que si estos módulos se agrupan juntos para convertirse en una forma mayor y luego es utilizada en repetición estaríamos hablando de supermódulos (Macromódulos), es una multiplicación del módulo, con solo variar el módulo también se obtiene gran variedad de supermódulos. Como básico del módulo, es importante resaltar que el diseño se

reproduzca un determinado número de veces para que de esta forma se distribuyan en forma de red.

Tipos de módulos:

Bidimensionales: Son módulos en 2 dimensiones que se generan normalmente a partir de formas básicas como el triángulo, el cuadrado y el círculo. Además, los módulos bidimensionales pueden producir los supermódulos y los submódulos, los cuales son las variaciones y alteraciones que se pueden hacer de un módulo bidimensional inicial, como se puede ver en la figura 7-a. Estos módulos permiten generar formas tridimensionales, mediante la producción de los mismos y dispuestos de una forma ordenada.

Tridimensionales: Parten de las formas tridimensionales sencillas, como los sólidos platónicos, los cuales permiten una fácil agrupación y modulación (Figura 5-b).

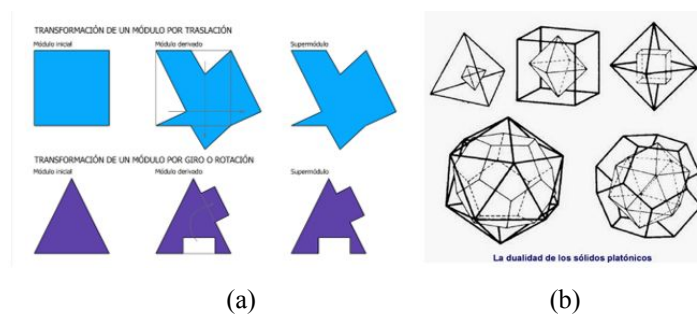


Figura 5. Tipos de módulos, (a) Bidimensionales, (b) Tridimensionales.

Características y Propiedades: Los módulos al ser formas que se repiten pueden formarse por medio de redes simples y complejas, también por medio de las simetrías, las cuales le brindan la posibilidad de crecer o disponerse ordenadamente en un espacio determinado (Figura 6).

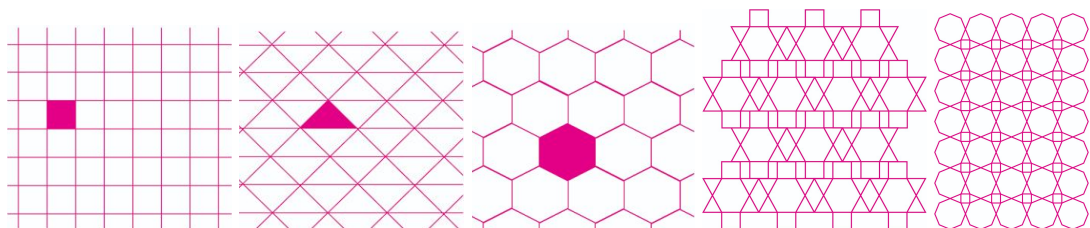


Figura 6. Tipos de redes.

3.1.3 Teselado:

Relacionado a los módulos, una teselación es un mosaico que está formado por una o más figuras de patrones, de modo que calzan unas con otras, sin superponerse ni dejar

espacios vacíos entre ellas. Una teselación se obtiene mediante un movimiento rígido o una combinación de ellos.

Teselación regular: cuando en el recubrimiento se usan sólo un polígono regular, este tipo de teselación es posible solamente si se utilizan triángulos equiláteros, cuadrados o hexágonos regulares (Figura 7-a).

Teselación Semiregular: Una teselación es semiregular cuando el recubrimiento se realiza utilizando combinaciones de polígonos regulares. Para que esto sea posible, los polígonos que se juntan en un vértice deben tener ángulos interiores que sumen exactamente 360 grados (Figura 7-b).

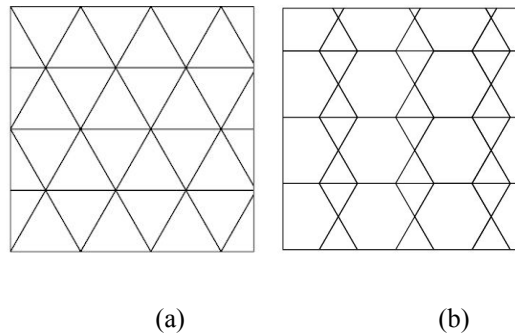


Figura 7. Tipos de teselación, (a) Teselación regular formada por triángulos (b) Teselación semiregular formada por hexágonos y triángulos.

Antecedentes

Los primeros experimentos con estructuras neumáticas se llevaron a cabo durante el desarrollo de globos aerostáticos (J.Yun Chi, M. Pauletti, 2018). El sacerdote brasileño Bartolomeu de Gusmão, en Lisboa, llevó a cabo un experimento desde 1709 como las primeras demostraciones públicas de este tipo de artefactos. Aunque el comienzo efectivo para el desarrollo de globos ocurre a fines del siglo XVIII, cuando los hermanos Montgolfier construyeron un globo de aire caliente de 11 m de diámetro con lino y papel. En el mismo año, Jaques A. C. Charles construyó el primer globo de hidrógeno, comenzando el apogeo de los grandes dirigibles popularizados especialmente en el siglo XIX y principios del siglo XX.

Por otro lado, en la segunda guerra mundial se utilizó la estructura neumática de manera masiva para distintos fines (Rubintein, P, Bustos, V, & Días, F, 2015), principalmente para la confección de refugios para los soldados, artefactos de guerra y lanchas para viajes de largas distancias, lo que comenzó a provocar una constante necesidad por este

sistema constructivo.,Debido a sus propiedades y capacidades, se empezó a utilizar en el ámbito cotidiano luego de terminarse la guerra.

Es hasta el siglo XX que los sistemas neumáticos se vuelven tema de estudio y búsqueda de aplicativos (J.Yun Chi, M. Pauletti 2018). Ingenieros como Bird y Stromeyer fueron los pioneros en las aplicaciones comerciales de los neumáticos y la adquisición de conocimiento empírico, pero fue Frei Otto el primero en realizar investigaciones académicas, especialmente sobre el proceso de búsqueda de formas. A través del Coloquio Neumático IASS (Universidad de Stuttgart, 1967) y varias publicaciones y diseños, Otto amplió el panorama, no solo de la neumática, sino también de las estructuras de tensión en general.

Desde el desarrollo de las redes neumáticas, el film alveolar o más conocido como plástico de burbujas es el referente más conocido en cuanto a la protección de productos que vienen en embalajes (Mohar, s.f). Esta estructura surgió de manera accidental, Alfred Fielding y Marc Chavannes en 1957 estaban tratando de crear un papel tapiz que fuera muy sencillo de limpiar, utilizaron dos cortinas plásticas de baño y con aire hicieron un decorado en 3D, pero el resultado fue el plástico con burbujas. Hoy se pueden encontrar en diversos tamaños, formas y colores, las formas varían en los tamaños y el tipo de producto que se va a transportar.

En la arquitectura también ha habido grandes desarrollos, Ant Farm fue una práctica vanguardista de arquitectura, artes gráficas y diseño ambiental, fundada en San Francisco en 1968 (Wouters, 2013). Dicha compañía preparó un gran número de proyectos alrededor del aire y plástico, incluso crearon un libro “inflatococbook” (Ant corps, 1973) con el objetivo de que cualquier persona pudiera elaborar un inflable creando entornos tomando como guía los libros de Ant Farm. Sin embargo, muchos de los clientes no pudieron llegar más allá de la etapa de prototipo. Los hinchables expresaron los ideales de Ant Farm para la fluidez y la libertad, su objetivo era “desarrollar la percepción del cuerpo en el espacio mientras trabajaba a través de los sentimientos placenteros y ansiosos provocados por la interacción social.”

Otro ejemplo de aplicación arquitectónica es en la exposición Universal de Osaka del año 70 (J.Yun Chi, M. Pauletti 2018), esta fue la primera exposición de la Oficina Internacional de exposiciones que albergó Japón, además el uso de estructuras neumáticas en exposiciones alcanzó un pico para ese año. La estructura neumática de Yutaka Muratase el pabellón de Fuji llamó especialmente la atención. Muratase diseñó una estructura geométrica compuesta por 16 arcos de longitud constante, de esta manera los arcos de los extremos de la estructura alcanzaban mayor altura creciendo desde el centro hacia los extremos.

Por último David Geiger desarrolló varios proyectos que emplean membranas reforzadas con cable, para estadios deportivos en los Estados Unidos y Canadá, desde 1974 hasta 1984 (J.Yun Chi, M. Pauletti 2018). El más grande de estos estadios es el Pontiac Silverdome, en Michigan (1975), el Anfiteatro de Vancouver (1983) y el Metrodome de Minneapolis (1982), con capacidades superiores a 60,000 personas. Estos techos redujeron drásticamente el costo por asiento, en comparación con el estadio convencional y han funcionado satisfactoriamente siendo conocidos como cúpulas neumáticas.

3.2 Estado del arte

A continuación, se presentan diversas investigaciones que se han realizado sobre la temática de estructuras neumáticas. Se evidencia que, aunque se hallan estudios de estructuras neumáticas, se encuentra poco en asuntos particulares como los sistemas hinchables enfocados a la protección y amortiguación.

En una investigación realizada por F.Melendez, M.Gannon, Z.Jacobson y V. Toulkerido (2014), estudiaron posibles métodos para controlar la presión fluidica, en este caso del aire, por medio de movimientos biomórficos y conductas en materiales elásticos. Este desarrollo y prototipo sirve para destacar los posibles métodos para controlar el comportamiento neumático en diseño arquitectónico o el diseño de sistemas neumáticos adaptativos que actúan para abrir o cerrar aberturas. Se utilizaron piezas impresas 3D en ABS como moldes para fundir el caucho de silicona, la forma que adapta es cilíndrica con cavidades en su interior por donde pasa el aire, cada componente está asegurado en un extremo, permitiendo que el extremo opuesto se mueva mientras está conectado a una máquina donde se controla el ingreso de aire. La geometría que se diseñó a la par del material (caucho de silicona), permite que cuando se accionan los cilindros producen movimientos de flexión únicos, la silicona puede estirarse y volver a su forma original sin deformarse permanentemente. Este método puede usarse en estructuras neumáticas que se contraen o se expanden sin que el material se altere.

Por otro lado J.Yun y Chi, M. Pauletti (2018), de la facultad de arquitectura de la universidad de Sao Paulo, diseñaron y construyeron una estructura dodecaedra neumática de doble pared para conocer y evaluar los fundamentos estructurales de sistemas neumáticas sobre pruebas de elementos finitos, proceso de ensamblaje físico, los materiales requeridos y los parámetros operativos. La membrana interna fue mantenida por cables con fijaciones de aluminio, se emplearon cuerdas de poliuretano que conectaron los vértices internos y externos. Durante el inflado del prototipo, la

membrana interna se encogió, lo que resultó una cavidad estrecha con menores dimensiones. La longitud de las cadenas de conexión se redujo, mientras que la membrana externa tuvo una geometría más segmentada. Se desarrolló además un modelo de elementos finitos. Como resultado se obtuvo que, ante una presión interna impuesta, la membrana externa se deforma de manera redondeada, mientras que las caras de la membrana interna se desplazan hacia el centro y sus vértices se desplazan un pequeño porcentaje del radio original. Las tensiones son máximas en el centro de las caras de la capa externa y mínimas en el centro de los bordes de la capa interna. Se pudo concluir que los valores de los desplazamientos y tensiones calculados dependen en gran medida de la intensidad de la presión interna impuesta al modelo.

Así mismo el grupo de arquitectura Hariri Pontarini Architects HPA (H.Junkjohann y W.Woodington, 2016), fue seleccionado para diseñar dos estructuras neumáticas a modo de pabellón de poliéster / PVC ubicadas en la costa este del lago Ontario en Toronto Canadá, se trata de un recinto que sería utilizado en los juegos Panamericanos. Se realizaron varios estudios de búsqueda de formas a medida que el diseño progresaba desde una membrana inicial con soporte de acero a una construcción final totalmente inflable. Los objetivos del estudio de búsqueda formal fueron la expresión arquitectónica, requisitos del evento, y resistencia a la carga de viento y gravedad. Se realizó un modelo de elementos finitos para determinar deformaciones y reacciones ante los efectos del medio. Las cargas de viento se probaron inicialmente con un modelo neumático bidimensional, finalmente, con la introducción de un modelo tridimensional. La geometría del tubo era analizada con múltiples diámetros y presiones de aire para encontrar la combinación más adecuada teniendo en cuenta factores como la desviación y tensiones. Se encontró que definitivamente un enfoque de bóveda era el más indicado para resistir los vientos y a demás variando el calibre de los tubos en puntos específicos para evitar desviaciones y mantener la estructura resistente.

Por último, La *Liquid Printed Pneumatics* ha sido la última investigación realizada por el Instituto Tecnológico de Massachusetts MIT (Sabina, 2018) en la cual se logran observar diversas impresiones 3D a las cuales se les altera su forma inicial por medio de presión de aire con el objetivo de crear nuevas formas y distribuciones espaciales en el interior de los automóviles. Su proceso de elaboración parte de una impresora 3D la cual controla la boquilla por donde es expulsada la silicona que va conformando los módulos de diferentes formas y dimensiones, posteriormente se aplica aire y se modifica su forma inicial. Estas estructuras se elaboran a mediante formas básicas o planas a las cuales se les aplica aire en diferentes presiones logrando pasar de un cuadrado bidimensional a una esfera.

4. Objetivos

4.1 Objetivo general

Desarrollar una red neumática modular que permita la protección de objetos frente al impacto o caídas.

4.2 Objetivos específicos

- Determinar parámetros para el desarrollo de redes modulares neumáticas
- Desarrollar tres alternativas de módulo para elaborar una red neumática que cumpla con los parámetros de la selección del elemento a proteger, para la red modular y para el análisis de las probetas.
- Evaluar las propiedades mecánicas de las redes modulares desarrolladas.
- Seleccionar el módulo que mejor comportamiento y resistencia demuestra según los resultados de la experimentación.

5. Metodología

5.1 Parámetros de los objetos de estudio:

En primer lugar, se determinaron una serie de parámetros de los objetos de estudio permitiendo cerciorarse de que los elementos cumplen las particularidades que se buscan y entran en el alcance del proyecto. Primero la selección del elemento que se va a proteger, para estos se definieron una serie de parámetros dimensionales y de material que coincidieran con el tipo de objeto que se quiere proteger, luego la selección de la red modular que configuran los módulos neumáticos que formarán los patrones, y finalmente para el análisis y la evaluación de las probetas a partir de la elección de los ensayos más pertinentes para verificar realmente el comportamiento de las alternativas ante diferentes situaciones (Tabla 1).

Tabla 1. Selección y análisis de los objetos de estudio.

<i>Fase</i>	<i>Parámetros</i>
<i>Selección elemento frágil a proteger.</i>	<i>Dimensiones mínimas: 5x5x2cm. (50cm³) Dimensiones máximas: 20x20x10cm. (4.000cm³) Material: Cerámica o vidrio.</i>
<i>Selección de la red modular.</i>	<i>Debe conformarse por figuras volumétricas básicas inscritas en unas dimensiones de 2x2x1cm y construir una teselación regular.</i>
<i>Análisis y evaluación de las probetas.</i>	<i>Ensayo de tracción para el tipo de unión empleado en la construcción de las probetas. Ensayos de compresión e impacto para la resistencia mecánica de cada red modular. Estado físico: daños o deformaciones generados por los ensayos.</i>

5.2 Selección de los patrones modulares

Una vez determinados los parámetros del proyecto se procedió a realizar una retícula bidimensional que serviría como base para el desarrollo de tres tipologías de teselación. Dichas redes de módulos se elaboraron a partir del uso de tres figuras geométricas básicas a partir de uso de polígonos regulares como el círculo, el triángulo y el cuadrado los cuales fueron tomadas como referencia de teselaciones regulares, esto con el fin de analizar si dicho texturizado aporta favorablemente a la protección de elementos frágiles. Para la construcción de dichos patrones se hizo uso del programa CAD Rhinoceros, construyendo con este los moldes que servirían para la elaboración de los elementos de estudio. Este proceso permitió unificar las tres tipologías modulares con el fin de obtener resultados unificados, logrando de esta manera un análisis detallado de la eficiencia de cada teselación modular. Finalmente se procedió a realizar los patrones en

madera de pino por medio de una máquina de corte CNC (figura 8) buscando una construcción estándar que no modificase la morfología de los módulos.

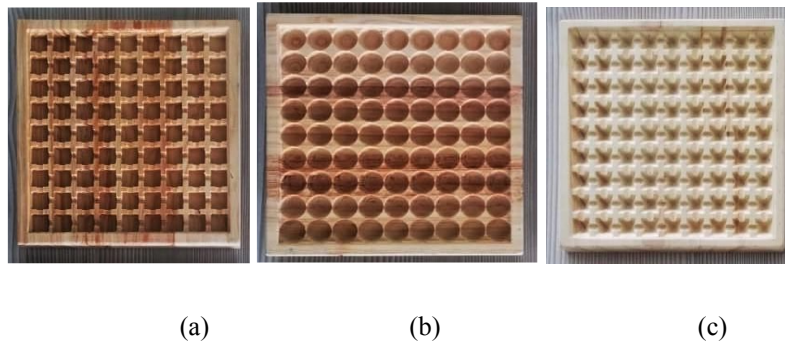


Figura 8. Patrones modulares en madera pino (a) Patrón modular cúbico (b) Patrón modular semiesférico (c) Patrón modular cúbico

5.3 Definición de las materias primas

Se define posteriormente el material a emplear mediante experimentación a partir de dos materiales poliméricos que permitieran una fácil adaptabilidad a la forma de las redes neumática modulares mediante termoformado, el primero se trató de una lona conocida comercialmente como lona verano en este caso de 8mm compuesta de PVC y refuerzo de nylon utilizado generalmente en cubiertas, parasoles y elementos de protección para piscinas, se tuvo en cuenta este material por tener propiedades termoplástica en su componente de PVC. La segunda opción fue una lámina de PVC calibre 10 de 2mm sin ningún tipo de textil o refuerzo de nylon utilizada también en cubiertas, colchonetas o como cortina de baño.

5.4 Evaluación del método de unión

De igual manera se evaluó el tipo de unión que utilizaría para realizar el sellado de la estructura. Esto se hizo mediante la evaluación de cuatro alternativas tales como el PU, XL, termosellado y CPVC los cuales fueron ensayados mediante pruebas de tracción, realizadas en la máquina universal de ensayos. Se eligieron estos ya que representan diferentes variantes de pegamentos distintos al PU que pudieran solucionar mejor el tema del escape de aire y que es generalmente usado en este tipo de láminas de PVC, se escogen entonces el XL ya que funciona en muchos materiales de manera exitosa, el CPVC es usado especialmente como unión de tubería de PVC y el termosellado es una alternativa ecológica de adherencia. Para los ensayos se superpuso dos láminas de 2cm de ancho superpuestas para verificar con un área de pega de 2cm x 2cm su resistencia a la tracción, sujetos a placas una en cada extremo, la superior se va separando hasta lograr la resistencia máxima.

5.4 Pruebas mecánicas de las probetas

Finalmente, las estructuras desarrolladas fueron validadas mediante ensayos primero de compresión realizada en la máquina universal de ensayos, se ubica la probeta sobre una placa y otra encima va aplicando carga de manera gradual hasta que la probeta presente fallas. Se realiza ensayos de impacto dejando caer un material de 3 kg y 1kg posteriormente para determinar su resistencia ante esta situación, luego otro ensayo de impacto que parte de un plato de 12.2 cm de diámetro y 2 cm de altura entre dos probetas y se dejan caer desde varias alturas para identificar las fallas, por último se someten a estos ensanduchados a otro ensayo de compresión en la máquina universal de ensayos. La primera experimentación de impacto se hizo bajo la norma ASTM D562818, aplicando en todos los casos la fórmula designada en la normativa para determinar la energía que absorbió al fallar. Todas las probetas fueron infladas a 20 PSI ya que fue el nivel en el que hubo mejor control para el inflado sin que la probeta sufriera daños y para mantener una constante en la presión del aire en todas las probetas. Los datos numéricos arrojados permiten identificar la alternativa que tuvo mejor resultado, contrarrestados de manera que se concluyen los alcances de las redes como sistemas de protección y amortiguamiento.

6. Resultados y discusión

6.1 Definición del material

La intención de la primera experimentación consistió en la búsqueda de un material que cumpliera las características que se requieren como ser termoformado, resistencia a la compresión y al impacto. Inicialmente se probó con la lona Verano como material termoformable, se buscaba que luego de exponer el material a alta temperatura se deformara y lograra adquirir la forma la rejilla de pino que se usó como molde. Se realizó tanto de forma manual con secador industrial, como con una termoformadora, buscando que esta última herramienta brindara mejores resultados, pero hubo problemas debido a la falta de elasticidad, su porosidad y el refuerzo de nylon interno, estos factores evitaron que el material se adaptara a la forma detallada de la rejilla, por otra parte el sellado de ambas caras no fue posible, debido a que las capas no se unían por un acabado superficial (Figura 9).

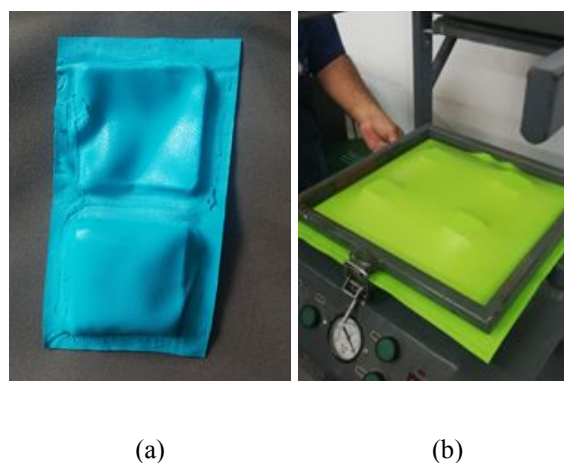


Figura 9. Ensayos de termoformado (a) Resultado con secadora industrial (b) Resultado con máquina termoformadora.

Luego de esto se procedió con la experimentación de una lámina de PVC calibre 10, utilizando como método de unión “P.U” utilizado comúnmente para este material. Como elementos para termoformar se dispuso una red de semiesferas sobre un cuadrado de 20x20 cm de MDF, en otro caso se usó un perfil en balsa para formar una malla para ser termoformada. El proceso de termoformado fue exitoso, aportó buenas propiedades y se dejó termoformar con facilidad así como su sellado fue fácil y efectivo, de esta manera se selecciona como el material más apropiado (Figura 10).



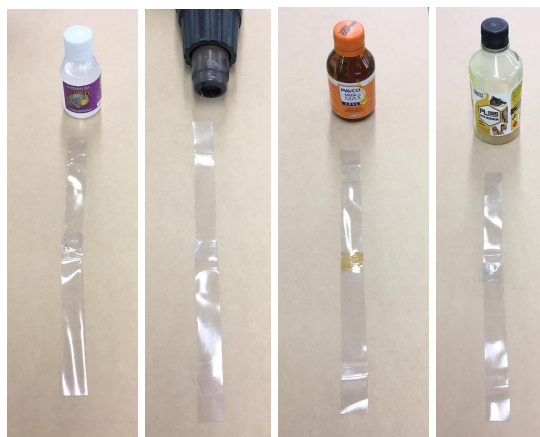
(a)

(b)

Figura 10. Resultado de las probetas termoformadas con lámina de PVC (a) Probeta ensayo 1 (b) Probeta ensayo 2

6.2 Experimentación de método de unión

Se evaluó el comportamiento de diferentes pegamentos en lona de PVC para comprobar su eficacia a condiciones extremas de tracción y de esta manera probar con un pegante que pueda ser más resistente que el PU y que evite la pérdida de aire. Los pegantes seleccionados corresponden a XL, PU, CPVC y Termosellado. Previo al ensayo se recortaron cintas de la lámina y se unieron desde extremo con los pegamentos respectivos (Figura 11).



(a)

(b)

(c)

(d)

Figura 11. Tipos de pegamento a) PU (b) Termosellado (c) CPVC (d) XL.

En los resultados se puede observar que tuvieron un comportamiento muy similar ya que 3 de ellos superaron la carga de 60 Newtons y soportando hasta 220 mm de tracción, aunque por poca diferencia el que más resistió fueron las pegadas con CPVC, luego el PU, en tercer lugar el termosellado y finalmente el XL que fue el que menos resistencia demostró, tan solo superó los 30 Newtons de carga y 47 mm de tracción (Figura 12). De esta manera el termosellado se usa como método de adherencia por

rapidez y como alternativa ecológica, es entonces que se recurre a una termoselladora como herramienta de unión.

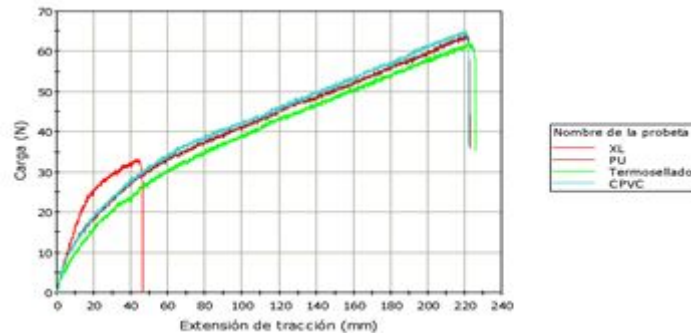


Figura 12. Gráfica relación carga / Extensión

6.3 Experimentación y elaboración de probetas iniciales de redes neumáticas

La elaboración de probetas iniciales de las redes neumáticas partió del uso de la lámina de PVC que funcionó anteriormente, las láminas son sometidas a procesos de termoformado para adquirir la forma de los moldes de dimensiones de 20x20 cm, se juntaron dos superficies una de ellas termoformada y la otra completamente plana sin alteraciones, esto se hizo con cada alternativa de manera que se mantiene el patrón geométrico solo por un lado. Estas probetas fueron pegadas con PU, en primera instancia las probetas no tuvieron un sellado útil, ya que el aire se escapaba de las mismas. Además de esto, todas poseían morfologías diferentes, por estas razones no fueron sometidas a pruebas de compresión.

6.4 Ensayo de compresión

En estas experimentaciones se analizó 3 probetas de cada alternativa de patrones neumáticos con la red por los dos lados y selladas con calor para ser expuestas en la máquina universal de ensayos, de esta manera comprobar su resistencia a la compresión para determinar su estado ante cargas extremas e identificar un comportamiento similar de cada alternativa.

Es preciso mencionar que el proceso de termoformado influyó en cierta manera sobre la resistencia de cada probeta, para el caso de las semiesféricas y cúbicas, en estas se presenta mayor deformación debido al proceso mismo, el cual provoca que debido al estiramiento del material se produzca una disminución en el espesor de la lámina, a comparación del patrón piramidal para adaptarse a la geometría del molde, lo cual obliga al material a sufrir mayor deformación plástica. Igualmente, cuando se inflan las probetas se hace más claro y evidente la apariencia superficial y sobresaliente de los patrones semiesféricos y cúbicos (Figura 13).

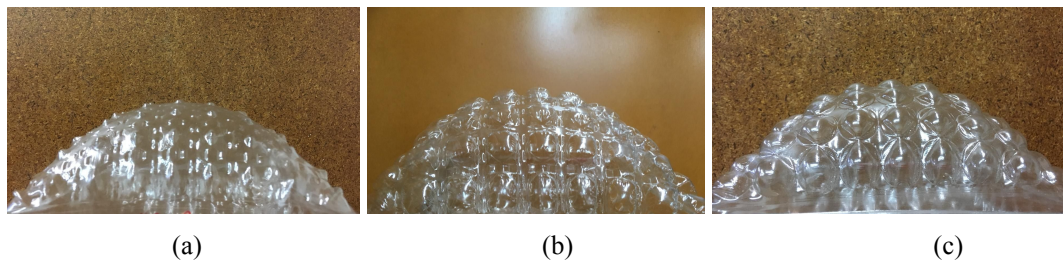
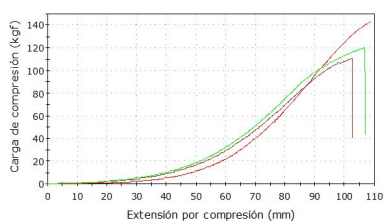
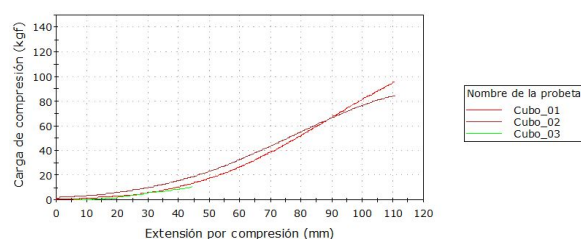


Figura 13. Apariencia superficial. a) Piramidal (b) cúbico (c) Semiesférico.

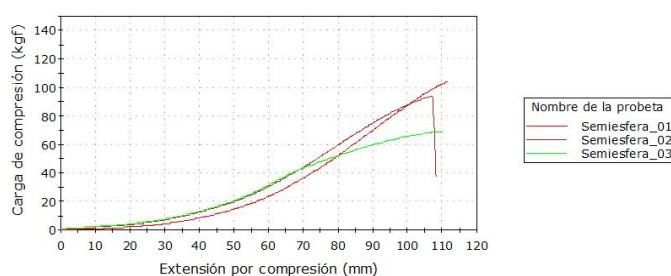
El ensayo de compresión demostró ciertas similitudes de comportamiento en cada alternativa de red modular, por lo menos dos de cada 3 probetas en cada red presentaron la misma conducta. En el caso de las piramidales dos de ellas estallaron al superar los 100 kgf abriéndose justamente por el sellado, mientras que la otra superó los 140 kgf, estallando de igual manera que sus semejantes (Figura 14-a). En el ensayo con el patrón cúbico, dos de las probetas permitieron que ambas placas de la máquina de ensayos se tocaran causando gran deformación, pero sin que la probeta estallara. Es importante señalar que soportaron menor carga ya que ninguna llegó a los 100 kgf, la tercera probeta de estas, presentó una deformación inmediata por una rotura que sufrió en un borde (Figura 14-b). El último ensayo fue hecho a las probetas semiesféricas, ocurrió lo mismo que en el ensayo con el patrón cúbico, en dos de ellas las placas alcanzaron a tocarse sin que la probeta se estallara mientras otra estalló, sólo una logró superar los 100 kgf (Figura 14-c).



(a)



(b)



(c)

Figura 14. Gráficas ensayo de ensayo de compresión. a) Patrón neumático piramidal (b) Patrón neumático cúbico (c) Patrón neumático semiesférico.

Claramente se puede notar cuáles tuvieron mejor o peor resistencia a la compresión (Tabla 2), las piramidales en primer lugar son las que tuvieron mayor resistencia, para la tabla tomamos en cuenta las tres y su promedio se tomó como la máxima de la resistencia (es decir el 100%). En segundo lugar, el patrón cúbico, el cual tuvo un 89.4% respecto a los piramidales y en tercer lugar el patrón semiesférico con un 51.25% respecto a la estructura piramidal. Aunque el patrón piramidal presenta mejor resistencia, son también representativos los resultados con las demás probetas, aunque no tengan una resistencia más alta, en promedio no se estallaron. La mayor deformación que sufre el patrón cúbico y semiesférico en el termoformado hace que su rango plástico y por lo tanto de deformación aumente, esto se pudo ver de manera que la probeta soporta la compresión sin estallar, además al finalizar el ensayo estas probetas mantuvieron aire contenido en su interior.

	Probeta	Carga de compresión al Máximum Comp. load (kgf)	Promedio por Probeta (kgf)	Promedio por Probeta (Pascal)	Porcentaje (%)
1	Piramidal	142.86	124.487	30,499	100
2		110.55			
3		120.05			
4	Cúbica	95.64	63.8	15,631	51.25
5		84.67			
6		11.09			
7	Semiesférica	104.4	89.4	21,903	89.4
8		94.44			
9		68.82			
Media		92.44			
Desviación estándar		3.711.326			
Coeficiente de variación		4.014.894			

Tabla 2. Resultados y promedios.

6.5 Ensayo de impacto

En este proceso se realizaron pruebas de impacto tomando como referencia la normativa ASTM D562818, se trata de un estándar para resistencia al impacto de muestras de plástico planas y rígidas por medio de un dardo que cae. La normativa tuvo que ser adaptada a los alcances que se tienen en el proyecto, la manera como se planteó consistió en dejar caer un elemento pesado sobre las probetas a diferentes alturas para evaluar su resistencia al impacto, variando la altura y dejando fija la masa a la que es sometida.

En el primer momento no se tuvo un resultado significativo, debido a que inicialmente se tomó un balón de plástico y se llenó de arena hasta alcanzar 3kg, se dispusieron las probetas delante de una tabla donde se midieron las alturas a las que sería lanzado el balón. Se inició desde una altura de 200mm con las tres probetas, las cuales resistieron el impacto a esa distancia, posteriormente se aumentó la altura de caída del balón a 400 mm, las tres probetas estallaron inmediatamente cuando el balón impactó en ellas, de manera que ninguna resistió este peso.

Por este motivo se tomó la decisión de reducir el peso del balón a 1 kg, una vez más se dispuso las probetas delante de la tabla y se procede a ensayar. Inicialmente se dispuso la probeta piramidal soltando el balón a una distancia de 200 mm, en esta la pelota rebotó sin que la probeta sufriera daños, el segundo intento fue a 400 mm con la misma probeta y tampoco presentó ningún daño, a 600 mm de altura demostró la misma resistencia y cuando se lanzó a 800 mm la probeta estalló inmediatamente (Figura 15-a). La siguiente corresponde a la probeta cúbica, la primera altura de 200 mm no sufrió daños, luego a 400 mm la probeta estalló (15-b). Y finalmente la probeta semiesférica cuando se lanzó el balón a los 200 mm tampoco sufrió daños, este estalló cuando se alteró la altura a 400 mm (Figura 15-c).



Figura 15. Altura de rotura en cada probeta, (a) Piramidal, (b) Cúbica, (c) Semiesférica.

Para determinar la energía absorbida por la probeta, se desarrolla el modelo de cálculo que indica la normativa, $MFE=h_{wf}$ hallando el resultado en Joules (Tabla 3).

Probeta	Altura (mm)	Comportamiento	Peso (kg)	Resultado (Joules)
Piramidal	200	Resiste	1	1.96133
	400	Resiste	1	3.92262
	600	Resiste	1	5.88393
Cúbica	200	Resiste	1	1.96133
	400	Falla	1	3.92262
Semiesférica	200	Resiste	1	1.96133
	400	Falla	1	3.92262

Tabla 3. Segundo resultado obtenido del ensayo de impacto.

El mejor resultado lo arrojó la probeta piramidal resistiendo hasta 3 veces más que la morfología cúbica y semiesférica, en este caso como la superficie de la probeta piramidal es más tensa debido a que el material tuvo menor deformación en el termoformado, esto hace que cuando el balón impacta sobre esta superficie tensa genera poco hundimiento evitando haciendo rebotar la pelota, de esta manera la superficie sufre menos deformación. En el caso de las probetas cúbica y semiesférica tienen una red más pronunciada, al impactar sobre esta superficie genera mayor apoyo y mayor hundimiento de manera que el balón se apoya más sobre la probeta. Es posible que este resultado se deba a que al requerir mayor deformación durante el termoformado, queda también menos material, ya que el espesor de la lámina se hace más delgado permitiendo que la probeta se deforme más al recibir el impacto.

6.6 Ensayo de impacto con el elemento frágil

Para este ensayo luego de que se realizara un ensanduchado de dos probetas de cada alternativa con un plato en medio de 12.2 cm de diámetro y 2 cm de altura, se procedió a la caída libre desde diferentes alturas comenzando con 200 mm hasta llegar a los 3000 mm. La primera probeta sometida al ensayo se realizó con la propuesta piramidal, luego de probar con cada una de las alturas se pudo comprobar que llegó hasta los 3000 mmm sin sufrir ningún daño en ninguna de las alturas, la probeta evidentemente rebota al impactar con el suelo pero no sufre ninguna rotura. El plato también quedó intacto luego de efectuar las 3 pruebas (Figura 16).

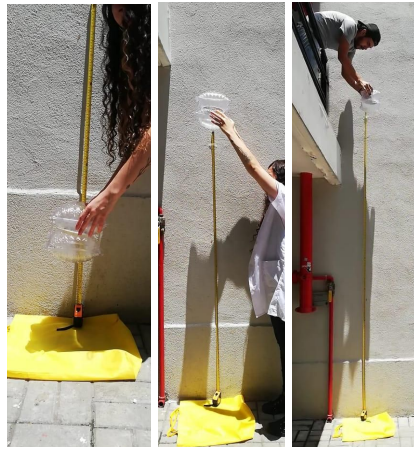


Figura 16. Ensayo de impacto con objeto frágil a diferentes alturas.

Las otras dos probetas tuvieron el mismo comportamiento luego de ser sometidas a las mismas alturas, es decir, rebotaban pero no sufrieron ningún daño, esto se muestra en la tabla a continuación evidencia los resultados de las caídas calculando la energía que absorbe, para simplificar la tabla se tomó 3 alturas, la menor, la media y la máxima demostrando la similitud de los resultados (Tabla 4), el material demostró ser lo suficientemente resistente para soportar el impacto incluso hasta los 3 metros.

Probeta	Altura (mm)	Comportamiento	Peso Probeta (kg)	Resultado (Joules)
Piramidal	200	Resiste	0,170	0,333
	1500	Resiste	0,170	2,500
	3000	Resiste	0,170	5,001
Cúbica	200	Resiste	0,167	0,327
	1500	Resiste	0,167	2,456
	3000	Resiste	0,167	4,913
Semiesférica	200	Resiste	0,173	0,339
	1500	Resiste	0,173	2,544
	3000	Resiste	0,173	5,089

Tabla 4. Resultados del impacto con el objeto frágil.

6.7 Ensayo de compresión con el elemento frágil

Luego de que las probetas fueron sometidas al ensayo de impacto se llevó a cabo los ensayos de compresión a estas probetas. Primero se realizó con la probeta piramidal, esta soportó hasta 121 kgf, ambas probetas que cubrían el plato se estallaron al mismo tiempo, esta presión causó que el plato se fracturara. La siguiente probeta expuesta al ensayo fue la cúbica, en esta la placa superior llegó hasta el punto de tocar el plato por lo tanto no se llegó a estallar, se suspendió la prueba ya que si se proseguía la máquina fracturaría el plato, soportó entonces 110 kgf. Para el ensayo de la probeta de las semiesferas, soportó 67 kgf y se estalló a este punto fracturando también el plato

(Figura 17). Las roturas de las probetas se generaron en los bordes que fueron termosellados, la fractura de los platos no fueron el motivo del estallido de las probetas, estas ocurrieron al momento de la probeta estallar.

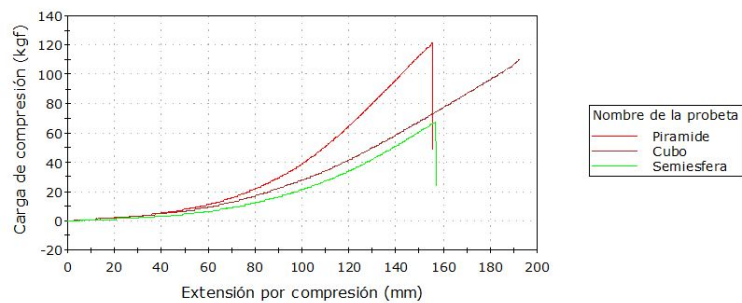


Figura 17. Relación carga /extensión.

Para establecer la comparación entre los resultados, se tomó la piramidal como el 100% de la máxima resistencia, esta probeta nuevamente demuestra que el éxito de su resistencia con respecto a los otros resultados se debe a que sufrió menor deformación en el proceso de termoformado. El ensayo de la probeta cúbica obtuvo el segundo lugar en cuanto a su resistencia con un 90.4% con respecto a la propuesta piramidal, al igual que en el primer ensayo de compresión la probeta no estalló sino que el material alcanzó un alto nivel de deformación. El tercer lugar sería la probeta semiesférica que se estalló con un porcentaje del 55.39. Es notorio en la tabla 5 que estos resultados fueron similares al primer ensayo de compresión con similares patrones de resistencia, igualmente la pirámide queda en primer lugar, seguido la cúbica y por último la semiesférica, esto corrobora aún más que la deformación del PVC en el termoformado influye completamente en la resistencia de las probetas.

	Probeta	Carga de compresión al Máximo Comp. load (kgf)	Carga por Probeta (Pascal)	Porcentaje (%)
1	Piramidal	121.92	29	100
2	Cúbica	110.26	26.950	90.4
3	Semiesférica	67.56	16	55.39
Media		99.91		
Desviación estándar		2.861.975		
Coeficiente de variación		2.864.528		

Tabla 5. Resultados ensayo de compresión con el elemento frágil.

7. Conclusiones

- Luego de realizar la investigación se pudo evidenciar la oportunidad de elaborar una alternativa que sea más eficiente con el espacio, ya que los elementos de protección que se encuentran en el mercado suelen ocupar más volumen luego de cumplir su ciclo de vida dificultando su proceso de desecho.
- Ante las cargas impuestas de manera gradual como en el ensayo de compresión, las probetas cúbicas y semiesférica responden de una manera positiva por el hecho de que se aumenta su capacidad de deformación luego de que el termoformado disminuyera el espesor de la lámina.
- El uso de las diferentes pegas para el laminado PVC tuvo resultados homogéneos, con un buen agarre y con una fácil aplicación. Pero es la falencia de retener el aire de la pega, que se opta por el termosellado para el aislamiento de la teselación y poder crear la estructura inflable.
- El factor de la deformación parece determinar la resistencia de las diferentes probetas. Por los experimentos de compresión desarrollados al igual que los de impacto se observó un patrón similar de comportamiento, las probetas piramidales fueron las que más resistieron a los ensayos, las probetas cúbicas y semiesféricas se comportan igual o quedaban en segundo o tercer lugar. Esto se debe a que la probeta piramidal requiere menor deformación para adaptarse al molde por su tipo de geometría, las probetas cúbicas y semiesféricas requieren de mayor deformación haciendo que el material se haga más delgado aumentando su rango plástico, es por esto que en los ensayos de compresión estas probetas alcanzaron gran deformación sin estallar independientemente de que fuera la piramidal la que obtuviera mayor resistencia al peso.

8. Recomendaciones

- Para el primer ensayo de impacto realizado con el objeto pesado, es preferible realizarse con distancias de altura menores, de manera que se puedan obtener intervalos de resultado más precisos.
- El material ideal para realizar los moldes, es el pino ya que el triplex deja gran cantidad de rebaba en la superficie que cuesta eliminar, esto afectaría los resultados del termoformado.
- Es importante que el material utilizado en la experimentación no tenga ningún tipo de textil o refuerzo para un termoformado exitoso.
- Independiente del método de pegado que se use, es ideal usar el termosellado en el momento de sellar la probeta luego de ser inflada en la abertura por donde pasa el aire, ya que de esta manera se sella de manera más rápida y se evita el escape de aire.

9. Referencias

- Pérez, J & Steegmann, C (s.f.). Transformaciones geométricas. Universitat Oberta de Catalunya.
- Salom, L. B. (s.f.). Estructuras neumáticas . Universidad Politécnica de Valencia.
- Wong, W. (1991). Fundamentos del diseño bi y tri-dimensional. Editorial Gustavo Gili.
- Casas, I. G. (2006). Estructura de entramado: composición y orígenes. Editorial Iberia.
- Wouters, N. (2013). Pneumatic Structures, a revival of formal experiments.
- Tinoco, M. V. (2018). Estructuras neumáticas, habitar en situaciones de emergencia. Universidad Politécnica de Madrid.
- Chi, J. Y., & Pauletti, M. (2018). An outline of the evolution of pneumatic structures. Faculty of Architecture and Urban Planning of the University of São Paulo.
- Jungjohann, H., & Woodington, W. (2016). Ontario Celebration Zone pavilion: a large pneumatic structure_. Elsevier Ltd.
- Melendez, F., Gannon, M., Jacobson, Z., & Toulkeridou, V. (2014). Adaptive pneumatic frameworks. acadia design agency_.
- Pauletti, M. (2008). Design and Analysis of Pneumatic Structures. Faculty of Architecture and Urban Design of the University of São Paulo_.
- Shimoda, M., & Yamane, K. (2013). A Non-parametric Form-Finding Method for Designing Membrane Structure. APCOM & ISCM.
- International, A. S. (2018). Standard Test Method for Impact Resistance of Flat, Rigid Plastic Specimens by Means of a Falling Dart. Universidad Pontificia Bolivariana.
- Cadena, I. M., Vergel, M., & Alfredo, J. (2018). Patrones en mosaicos Y Teselados desde Composiciones Geométricas. Universidad Francisco De Paula Santander.

Whitney, M. O. (2014). *Pneumatic Decoys: Blowing Up Architecture*.
University of Wisconsin—Milwaukee.

Mazo, E. p., & Ochoa, E. M. (2009). *Generación y transformación de la forma, morfología, geometría, naturaleza y experimentación*. Universidad Pontificia Bolivariana.

10. Anexos

- **Artículo**

REDES NEUMÁTICAS ALTERNATIVAS PARA LA PROTECCIÓN DE ELEMENTOS FRÁGILES

Simón Bedoya¹, Luisa Montoya², Nicolás Pareja³

Facultad de Diseño Industrial, Universidad Pontificia Bolivariana. Medellín, Colombia

¹simon.bedoyaf@upb.edu.co, ²luisa.montoyah@upb.edu.co, ³nicolas.pareja@upb.edu.co

Resumen

Este proyecto de investigación buscó desarrollar una alternativa para un sistema de embalaje neumático que permita proteger objetos frágiles durante su transporte y que tenga la resistencia mecánica adecuada para mantener su integridad. Para esto se desarrollaron tres tipologías diferentes de texturas infladas a partir de termoformados con el fin de evaluar su comportamiento en el momento de entrar en un proceso de embalaje. Posteriormente se realizaron ensayos mecánicos de tracción con el fin de determinar el método de sellado más adecuado para su construcción. Finalmente se sometieron las probetas a ensayos de compresión e impacto para comprobar y definir los resultados del proyecto. Se encontró como factor importante que, durante el proceso de producción de los elementos de estudio, la alternativa piramidal presentó menor deformación del material en el termoformado, generando una mayor eficiencia en términos de su comportamiento mecánico debido a que no altera de manera significativa el calibre del material en comparación a las alternativas cúbicas y semiesféricas.

Abstract

This research project sought to develop an alternative for a pneumatic packaging system that allows fragile objects to be protected during transport and that has adequate mechanical strength to maintain its integrity. For this, three different types of inflated textures were developed from thermoforming in order to assess their behavior at the time of entering a packaging process. Subsequently, mechanical tensile tests were carried out in order to determine the most appropriate sealing method for its construction. Finally, the specimens were subjected to compression and impact tests to check and define the results of the project. It was found as an important factor that, during the production process of the study elements, the pyramidal alternative showed less deformation of the material in the thermoforming, generating greater efficiency in terms of its mechanical behavior because it does not significantly alter the caliber of the material in comparison to the cubic and hemispherical alternatives.

Palabras Clave: Estructuras neumáticas, resistencia al impacto, redes modulares, comportamiento mecánico.

1 INTRODUCCIÓN

Este proyecto de investigación busca dar una solución funcional y práctica para la protección y conservación de objetos, generalmente en el ámbito de empaques y embalajes, ya que las opciones existentes en el mercado como el poliestireno expandido, film plástico, film espuma, generan mayores volúmenes de desecho posterior a su uso, es por esto que se propone resolver con las estructuras inflables, el uso de un material que genera menor volumen de desperdicios al finalizar su vida útil como lo es el PVC, permitiendo además adaptarse a la morfología del objeto para su protección, buscando que se pueda desinflar y plegar ocupando menor espacio cuando el elemento ya haya cumplido su función.

En algunas de las investigaciones que se realizaron en el estado del arte, se encontró que los estudios realizados sobre estructuras neumáticas se han desarrollado especialmente para el ámbito arquitectónico y muy poco en cuanto al desarrollo de estructuras hinchables que brinden protección. Como ejemplo de estos desarrollos pueden ser el estudio de sistemas que se articulan mediante la graduación de la presión del aire para aplicarse en estructuras que se abren y se cierran (F.Melendez, M.Gannon, Z.Jacobson y V. Toulkerido 2014). Otro ejemplo se debe a un recinto creado para los Juegos Panamericanos en Toronto, se trata de una estructura neumática a modo de pabellón que se diseñó adaptándola a las necesidades del contexto desde su forma y estructura (H.Junkjohann y W.Woodington, 2016). Por último se puede ejemplificar un desarrollo hecho en impresión 3D, a las cuales se les altera su forma inicial pasando de ser bidimensional a tridimensional por medio de presión de aire con el objetivo de crear nuevas formas y distribuciones espaciales en el interior de los automóviles (Sabina, 2018).

El objetivo del proyecto consiste en la elaboración de una red modular para la protección de objetos frente a impactos y caídas por medio del uso de teselaciones, mosaicos formados por una o más figuras de patrones que calzan entre sí, con el fin de comprobar la resistencia mecánica que generan a la hora de soportar cargas externas. Adicionalmente, estudiar la morfología de dichas estructuras para la obtención de resultados cuantitativos y alternativas que se adapten a la morfología del objeto sin generar grandes volúmenes de materia prima posteriores a su uso.

2. METODOLOGÍA

En primer lugar, se determinaron una serie de parámetros de estudio con el fin de delimitar la investigación y obtener resultados más homogéneos. Para esto se definieron las dimensiones del objeto frágil a proteger, la proporción y conformación de las redes modulares y los ensayos a los

cuales se someterán las probetas de estudio, buscando las mismas condiciones morfológicas que generen resultados similares (*Tabla 1*).

Tabla 1. Selección y análisis de los objetos de estudio.

<i>Fase</i>	<i>Parámetros</i>
<i>Selección elemento frágil a proteger.</i>	<i>Dimensiones mínimas: 50x50x20mm. Dimensiones máximas: 200x200x100mm. Material: Cerámica o vidrio.</i>
<i>Selección de la red modular.</i>	<i>Debe conformarse por figuras volumétricas básicas inscritas en unas dimensiones de 20x20x10mm y construir una teselación regular.</i>
<i>Análisis y evaluación de las probetas.</i>	<i>Ensayo de tracción para el tipo de unión empleado en la construcción de las probetas. Ensayos de compresión e impacto para la resistencia mecánica de cada red modular. Estado físico: daños o deformaciones generados por los ensayos.</i>

Luego de lo anterior, se procedió a realizar una retícula bidimensional (*Figura 1. a*) que sirve como base para mantener las proporciones de las redes modulares. Estas, construidas a partir de polígonos regulares tales como el triángulo, el cuadrado y el círculo, seleccionados con el fin de conocer si los ángulos que generan al construirse o la ausencia de estos lograrían cambios favorables al momento de distribuir cargas para mejorar la eficiencia al proteger elementos frágiles. Dichas redes se elaboraron en madera de pino por medio de una máquina de corte CNC (*Figura 1. b*) para la obtención de los moldes con los cuales se elaborarán los objetos de estudio o probetas de ensayo.

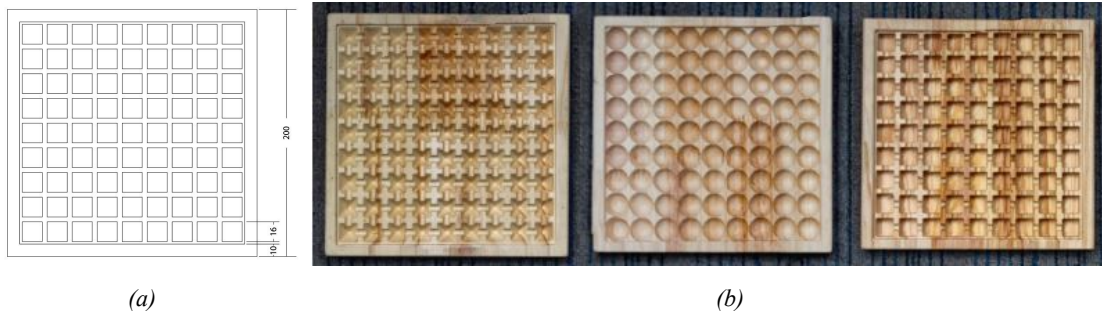


Figura 1. Redes modulares. (a) retícula bidimensional. (b) Moldes de madera

Posteriormente, se realizó una comparación entre dos materiales poliméricos con el objetivo de conocer cuál alternativa posee mayor adaptabilidad a la morfología de los moldes por medio de un termoformado y como estas generan menor volumen de desechos al finalizar su vida útil. Para esto se evaluaron una lámina de PVC con refuerzo de nylon de 8mm de espesor y otra sin refuerzo con 2mm de espesor.

De igual manera, se evaluó el tipo de unión a emplear en las probetas de estudio para realizar el sellado de las estructuras. Esto se hizo mediante la evaluación de cuatro alternativas tales como: pegamento de poliuretano (PU) usado en materiales poliméricos, policloruro de vinilo clorado

(CPVC) usado para tuberías de PVC, pegamento XL como alternativa común comercial y termosellado como alternativa ecológica. Estos fueron sometidos a pruebas de tracción, realizadas en una máquina universal de ensayos marca Instron.

Asimismo, se elaboraron tres probetas de estudio por cada morfología seleccionada anteriormente y se inflaron a una presión interna de 20 PSI. Dichas probetas fueron sometidas a ensayos de compresión en la máquina universal Instron y ensayos de impacto bajo la norma ASTM D562818 con un peso de 1 kg. para conocer su comportamiento mecánico. Finalmente, se realizaron las mismas pruebas con el elemento frágil contenido para poner a prueba los resultados obtenidos anteriormente y comprobar si se mantiene la integridad de objeto.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Definición del material

Dentro de esta fase exploratoria se evaluó el comportamiento de dos láminas de PVC en un proceso de termoformado, considerando como requerimiento su adaptabilidad a la morfología generada en los moldes. Se inició el proceso con la lámina de PVC de 8mm con refuerzo de nylon, la cual no presentó mayor deformación en comparación con la lámina de PVC de 2mm sin refuerzo. Se encontró que la primera alternativa arrojó resultados negativos debido a que el refuerzo interno no permitió al material tomar un estado suficientemente plástico para adaptarse a la superficie, además se observó que su porosidad generaba escapes de aire al momento de contenerlo. Por otro lado, la lámina de 2mm sin refuerzo logró una buena adaptabilidad al molde, siendo la alternativa más eficiente para el proyecto.

3.2 Evaluación del método de unión

Una vez realizadas las pruebas de tracción para cada tipo de unión, se observó que la alternativa menos óptima fue el XL ya que no superó los 30 Newton de carga, fallando con una elongación de 47mm. Por otro lado, se observó que las tres alternativas restantes presentaron mejores resultados al soportar cargas mayores a 60 Newtons con una elongación de 220 mm (*Figura 2*). Según lo anterior, se postula en primer lugar el policloruro de vinilo clorado (CPVC) con una carga de 65N, descartado posteriormente debido a que la zona de pega cristaliza el material. En segundo y tercer lugar se presentan el pegamento de poliuretano (PU) con una carga de 63N y el termosellado con una carga de 61N. Por consiguiente, se determina el termosellado como tipo de unión debido a que es una alternativa más ecológica con resultados similares a los pegamentos.

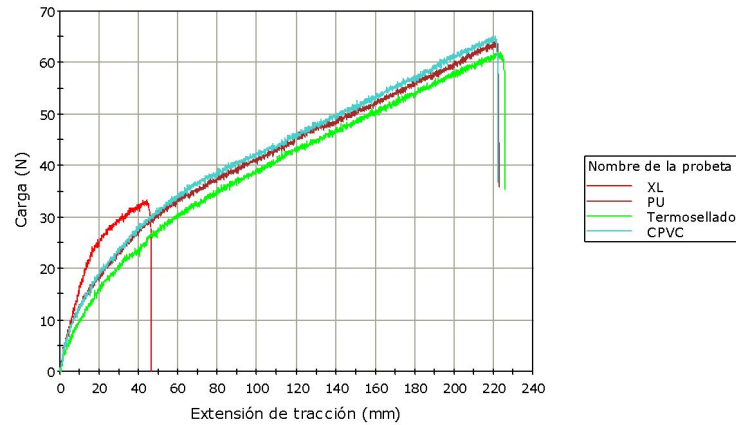


Figura 2. Gráfica relación carga / Extensión

Una vez definido el material a emplear y el tipo de unión, se procedió a la construcción de las probetas de estudio uniendo dos láminas termoformadas de cada una de las tipologías de redes e inflándose a una presión interna de 20 PSI (*Figura 3*).



Figura 3. Tipologías probetas de estudio.

3.3 Ensayos de compresión

Se sometieron 3 probetas por cada una de las tipologías desarrolladas a ensayos de compresión con el objetivo de conocer su comportamiento mecánico. En el primer caso, se sometieron las probetas piramidales, las cuales soportaron un rango de compresión entre los 110 - 143 kgf deformándose hasta estallar. Por otro lado se observó que, aunque las probetas cúbicas y semiesféricas soportan menor carga (*Tabla 2*), tienden a presentar mayor deformación sin reventar, dando como resultado menor comportamiento mecánico. Por consiguiente se plantea que dichas morfologías evidencian condiciones más plásticas debido a que en su proceso de termoformado, el material requiere mayor elongación para adquirir la forma de estas superficies, creando espesores más delgados en ciertas zonas, ocasionando consigo escapes de aire en comparación con la tipología piramidal, la cual, según los ángulos que genera su morfología, evita dicha variación de calibres en su producción.

Tabla 2. *Tabla de resultados y promedios*

Probeta	Carga de compresión al Máximo Comp. load (kgf)	Promedio por Probeta (kgf)	Promedio por Probeta (Pascal)	Porcentaje (%)
1	142.86	124.487	30,499	100
2	110.55			
3	120.05			
4	95.64	63.8	15,631	51.25
5	84.67			
6	11.09			
7	104.4	89.4	21,903	89.4
8	94.44			
9	68.82			
Media	92.44			
Desviación estándar	3.711.326			
Coefficiente de variación	4.014.894			

3.5 Ensayos de impacto

Se realizaron pruebas de impacto a partir de la normativa ASTM D562818. Para ello se tomó como punto de partida un peso de 1 kg y se soltó a diferentes alturas sobre cada una de las estructuras infladas, verificando así deformaciones o roturas del material ocasionadas por el impacto. Se comenzó con la estructura piramidal, dejando caer el peso sobre ella cada 200mm de altura hasta estallar a los 80mm. Posteriormente se realizaron las mismas pruebas para las estructuras cúbica y semiesférica fallando a una altura de 400 mm (*Tabla 3*).

Tabla 3. *Segundo Resultado obtenido del ensayo de impacto*

Probeta	Altura (mm)	Comportamiento	Peso (kg)	Resultado (Joules)
Piramidal	200	Resiste	1	1.96133
	400	Resiste	1	3.92262
	600	Resiste	1	5.88393
	800	Falla	1	784.532
Cúbica	200	Resiste	1	1.96133
	400	Falla	1	3.92262
Semiesférica	200	Resiste	1	1.96133
	400	Falla	1	3.92262

Como resultado se evidencia que la probeta piramidal logra absorber alrededor de 780 Joules antes de fallar; casi el doble de absorción en comparación con la alternativa cúbica y semiesférica, las cuales soportan impactos menores a 400 Joules, demostrando de esta manera que dicha estructura, al tener menor alteración en su momento de producción, logra disipar mejor la energía evitando daños en el material.

3.6 Validación

Se realizó la validación de las probetas con un ensanduchado de dos probetas de cada alternativa con un plato en medio de 12.2 cm de diámetro y 2 cm de altura, se procedió a la caída libre desde diferentes alturas comenzando con 200 mm hasta llegar a los 3000 mm. La primera probeta sometida al ensayo fue la piramidal, luego de probar con cada una de las alturas se pudo comprobar que llegó hasta los 3000 mm sin sufrir ningún daño en ninguna de las alturas. El plato también quedó intacto luego de efectuar las 3 pruebas. Las otras dos probetas tuvieron el mismo comportamiento luego de ser sometidas a las mismas alturas, la tabla a continuación evidencia los resultados de las caídas calculando la energía que absorbe, el material demostró ser los suficientemente resistente para soportar el impacto incluso hasta los 3 metros.

Luego se llevó a cabo los ensayos de compresión a estas probetas. Primero con la probeta piramidal, esta soportó hasta 121 kgf indicada en la tabla 5 como el 100% de la máxima resistencia, ambas probetas que cubrían el plato se estallaron al mismo tiempo, esta presión causó que el plato se fracturara. La siguiente probeta fue la cúbica, en esta la placa superior llegó hasta el punto de tocar el plato por lo tanto no se llegó a estallar, se suspendió la prueba ya que si se proseguía la máquina fracturaría el plato, soportó entonces 110 kgf, obtuvo el segundo lugar en cuanto a su resistencia con un 90.4% con respecto a la propuesta piramidal. Para el ensayo de la probeta de las semiesferas, soportó 67 kgf y se estalló a este punto fracturando también el plato quedando en tercer lugar con un porcentaje del 55.39. La fractura de los platos no fueron el motivo del estallido de las probetas, estas ocurrieron al momento de la probeta estallar. Es notorio en la tabla 5 que estos resultados fueron similares al primer ensayo de compresión con similares patrones de resistencia, igualmente la pirámide queda en primer lugar, seguido la cúbica y por último la semiesférica, esto corrobora aún más que la deformación del PVC en el termoformado influye completamente en la resistencia de las probetas.

Tabla 5. Resultados ensayo de compresión con el elemento frágil.

	Probeta	Carga de compresión al Máximo Comp. load (kgf)	Carga por Probeta (Pascal)	Porcentaje (%)
1	Piramidal	121.92	29	100
2	Cúbica	110.26	26.950	90.4
3	Semiesférica	67.56	16	55.39
Media		99.91		
Desviación estándar		2.861.975		
Coeficiente de variación		2.864.528		

4. CONCLUSIONES

- Se pudo evidenciar la oportunidad de elaborar una alternativa que sea más eficiente con el espacio, ya que los elementos de protección que se encuentran en el mercado suelen ocupar más volumen luego de cumplir su ciclo de vida dificultando su proceso de desecho.
- Ante las cargas impuestas de manera gradual como en el ensayo de compresión, las probetas cúbicas y semiesférica responden de una manera positiva por el hecho de que se aumenta su capacidad de deformación luego de que el termoformado disminuyera el espesor de la lámina.
- El uso de las diferentes pegas para el laminado PVC tuvo resultados homogéneos, con un buen agarre, con una fácil aplicación. Pero es la falencia de retener el aire de la pega, que se opta por el termosellado para el aislamiento de la teselación y poder crear la estructura inflable.
- Por los ensayos realizados se observó un patrón similar de comportamiento, las probetas piramidales fueron las que más resistieron a los ensayos, las probetas cúbicas y semiesféricas se comportan igual o quedaban en segundo o tercer lugar. Se debe a que la probeta piramidal requiere menor deformación para adaptarse al molde por su tipo de geometría, las probetas cúbicas y semiesféricas requieren de mayor deformación haciendo que el material se haga más delgado aumentando su rango plástico, es por esto que en los ensayos de compresión estas probetas alcanzaron gran deformación sin estallar independientemente de que fuera la piramidal la que obtuviera mayor resistencia al peso.

5. REFERENCIAS

- International, A. S. (2018). Standard Test Method for Impact Resistance of Flat, Rigid Plastic Specimens by Means of a Falling Dart. Universidad
- Pérez, J & Steegmann, C (s.f.). Transformaciones geométricas. Universitat Oberta de Catalunya.
- Tinoco, M. V. (2018). Estructuras neumáticas, habitar en situaciones de emergencia. Universidad Politécnica de Madrid.
- Wouters, N. (2013). Pneumatic Structures, a revival of formal experiments.
- Pauletti, M. (2008). Design and Analysis of Pneumatic Structures. Faculty of Architecture and Urban Design of the University of São Paulo_.
- Shimoda, M., & Yamane, K. (2013). A Non-parametric Form-Finding Method for Designing Membrane Structure. APCOM & ISCM.
- Wong, W. (1991). Fundamentos del diseño bi y tri-dimensional. Editorial Gustavo Gili.
- Casas, I. G. (2006). Estructura de entramado: composición y orígenes. Editorial Iberia.