



Diseño Bio-inspirado enfocado a aislamientos térmicos para construcciones habitacionales.

Anderson Guerrero Acosta

Trabajo de grado presentado para optar al título de Ingeniero Mecánico

Asesor

PhD. Junes Abdul Villarraga Ossa, Doctor

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Mecánica
Medellín, Antioquia, Colombia
2024

Cita	Guerrero Acosta, Anderson, 2024 [1]
Referencia	[1] A. Guerrero Acosta, 2024. “Diseño Bio-inspirado enfocado a aislamientos térmicos para construcciones habitacionales”. Trabajo de grado profesional, Ingeniería Mecánica, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2024.

Estilo IEEE (2020)



Grupo de Investigación Grupo de Diseño Mecánico (G.D.M)



Centro Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: Jhon Jairo Arboleda.

Decano/director: Julio Cesar Saldarriaga Molina.

Jefe departamento: Pedro León Simanca.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

A mi padre, Aunque ya no esté a mi lado, su presencia vive en cada paso que doy.

Él forjó las raíces profundas que sostienen al hombre que soy hoy,
y su legado me guía en cada decisión, en cada sueño, en cada logro.

A mi madre, tu voz, siempre firme ha sido el aliento en los días oscuros y
el refugio en los momentos difíciles. Gracias por ser la fuerza silenciosa que me impulsa, el
abrazo constante que nunca me deja caer.

A mi hermanita, Refugio de paz en medio de la tormenta,
cómplice en mis alegrías y tristezas, mi amiga incondicional, siempre a mi lado.
Gracias por ser ese rincón sereno donde siempre puedo descansar.

A mi profe, Nilcia, gracias infinitas por ver en mí lo que en su momento ni mis ojos alcanzaban.

Gracias por creer, cuando ni yo sabía qué encontrar.
Tu fe en mi camino iluminó senderos que aún no sabía que podía recorrer.

Agradecimientos

Agradezco profundamente a mi madre y hermanos, por su amor que siempre me sostiene, por su apoyo incondicional en cada paso de este camino. Han sido la fuerza y la base firme sobre la que se levanta este logro, el pilar que me ha permitido llegar hasta aquí.

A mi asesor, el PhD. Junes Abdul Villarraga Ossa, por su invaluable orientación y por compartir su vasto conocimiento. Gracias por acogerme como un hijo, por ofrecerme no solo su guía, sino también su apoyo y amistad incondicional. Su sabiduría y generosidad han sido faros que iluminaron mi camino.

A Juan Gustavo Diosa, por estar a mi lado en los momentos más difíciles, por ser más que un profesor, un amigo. Gracias por tu apoyo incondicional, por ofrecerme siempre tu amistad cuando más lo necesitaba.

A Juan Fardando Cucuyame, gracias por brindarme la oportunidad de formar parte de este proyecto, por confiar en mí y abrirme las puertas a este desafío.

Finalmente, al Grupo de Investigación de Diseño Mecánico, que no solo me abrió sus puertas, sino que me ofreció un hogar, un lugar donde encontré una segunda familia. Allí, más allá del conocimiento, descubrí el valor de la colaboración y el apoyo mutuo, construyendo lazos que quedarán en mi corazón por siempre.

TABLA DE CONTENIDO

CONTENIDO

I. RESUMEN	10
II. ABSTRACT	11
III. INTRODUCCIÓN	12
IV. OBJETIVOS	14
A. OBJETIVO GENERAL	14
B. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
V. MARCO TEÓRICO	15
A. PROPIEDADES TÉRMICAS:	19
B. TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDUCCIÓN	20
C. TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN	20
VI. METODOLOGIA	24
A. MODELOS	24
a. SIMULACIÓN	31
B. TIPOS DE SIMULACIONES	32
1) Análisis de transferencia de calor estacionario (Steady-State Thermal Analysis)	32
2) Análisis de transferencia de calor transitorio (Transient Thermal Analysis):	32
3) Análisis de flujo de calor (Heat Flow Analysis):	32
4) Análisis de sistemas de refrigeración (Refrigeration Systems Analysis)	32
5) Análisis de sistemas de calefacción y ventilación (HVAC Analysis):	33
6) Análisis de procesos de manufactura (Manufacturing Process Analysis)	33
A. CONDICIONES DE FRONTERA EN LA SIMULACIÓN:	34
VII. RESULTADOS	37
A. RESULTADOS TÉRMICOS:	37

B.	RESULTADOS ESTÁTICOS:	46
1).	Geometrías cargas Verticales	47
2).	Geometrías cargas horizontales	51
VIII.	DISCUSIÓN	54
A.	CUMPLIMIENTO DE LOS OBJETIVOS DEL ESTUDIO	55
B.	ANÁLISIS DE LAS PRUEBAS TÉRMICAS	55
1).	Modelo cuadrado	55
2).	Modelo elíptico	56
3).	Modelo slot	56
•	Resultados térmicos:	56
•	Discusión:	56
4).	Modelo tradicional (ladrillo).....	56
•	Resultados térmicos:	56
•	Discusión:	56
5).	Modelo original del Balanus	57
•	Resultados térmicos:	57
C.	ANÁLISIS DE LAS PRUEBAS ESTÁTICAS	57
1).	Geometría Cuadrada.....	57
2).	Geometría Elíptica.....	58
D.	COMPARACIÓN ENTRE PRUEBAS TÉRMICAS Y ESTRUCTURALES	58
1).	IMPLICACIONES PRÁCTICAS.....	59
2).	LIMITACIONES Y FUTUROS ESTUDIOS.....	59
IX.	CONCLUSIONES	60
X.	REFERENCIAS	61

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Distribución de medidas del espécimen.....	27
Tabla 2. Distribución de temperaturas internas en las diferentes geometrías con núcleo de concreto y aire como material de relleno.	43
Tabla 3. Distribución de temperaturas internas en las diferentes geometrías con núcleo de arcilla y aire como material de relleno.	43
Tabla 4. Distribución de temperaturas internas en las diferentes geometrías con núcleo de espuma de poliestireno (foam) y aire como material de relleno.	43
Tabla 5. Distribución de temperaturas internas en las diferentes geometrías con núcleo de concreto y agua como material de relleno.	44
Tabla 6. Distribución de temperaturas internas en las diferentes geometrías con núcleo de arcilla y agua como material de relleno.	44
Tabla 7. Distribución de temperaturas internas en las diferentes geometrías con núcleo de espuma de poliestireno (foam) y agua como material de relleno.	45
Tabla 8. Distribución de temperaturas internas en las diferentes geometrías con núcleo de concreto y espuma de poliestireno (foam) como material de relleno.	45
Tabla 9. Distribución de temperaturas internas en las diferentes geometrías con núcleo de arcilla y espuma de poliestireno (foam) como material de relleno.	46
Tabla 10. Distribución de temperaturas internas en las diferentes geometrías con núcleo de espuma de poliestireno (foam) y espuma de poliestireno (foam) como material de relleno.....	46
Tabla 11. resultados estéticos geometría ladrillo tradicional vertical.	47
Tabla 12. resultados estéticos geometría elíptica vertical.	48
Tabla 13. resultados estéticos geometría cuadrada vertical.	49
Tabla 14. resultados estéticos geometría slot vertical.	50
Tabla 15. resultados estéticos geometría ladrillo horizontal.	51
Tabla 16. resultados estéticos geometría elíptico horizontal.....	52
Tabla 17. resultados estéticos geometría cuadrado horizontal.....	53
Tabla 18. resultados estéticos geometría slot horizontal.....	54

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. percebe del género balanus. fuente: https://ecuador.inaturalist.org/taxa/49129-Balanus	15
Figura 2. Fibra de vidrio. Fuente: https://www.suimte.com/lana-fibra-de-vidrio-aluminio	21
Figura 3. Lana de roca. Fuente: https://www.suimte.com/lana-mineral-de-roca-con-aluminio ..	21
Figura 4. Espuma de poliestireno. Fuente: https://www.danosa.com/es-co/producto/danopren-tr/	22
Figura 5. Poliuretano. Fuente: https://aislaconpoliuretano.com/aislar-una-pared-interior-planchas-poliuretano/	22
Figura 6. Bloque de Celulosa. Fuente: https://aislahome.es/aislamiento-con-celulosa/	22
Figura 7. Bloque de Celulosa. Fuente: https://www.autodeskjournal.com/aerogel-el-mejor-aislante/	23
Figura 8. parte posterior del espécimen.	24
Figura 9. acercamiento de la geometría de interés.	24
Figura 10. Modelado de pieza.	25
Figura 11. Modelo 3d.	26
Figura 12. Modelo 2d definición zonas primarias.....	27
Figura 13. Modelo 2d definición zonas de transición.	27
Figura 14. Primer modelo impreso en 3d.	28
Figura 15. Modelo impreso 3d con factor de escala de 3.....	29
Figura 16. Modelo Cuadrado	30
Figura 17. Modelo elíptico.	30
Figura 18. Modelo slot.	30
Figura 19. Modelo ladrillo tradicional.	31
Figura 20. Modelo original.....	31
Figura 21. Modelo.	34
Figura 22. Materiales.....	35
Figura 23. Modelo cuadrado mallado.	36
Figura 24. Modelo cuadrado condiciones de frontera.	37

Figura 25. Resultados simulaciones modelo cuadrado, concreto-aire, arcilla-aire, foam-aire	38
Figura 26. Resultados simulaciones modelo cuadrado, concreto-agua, arcilla-agua, foam-agua..	38
Figura 27. Resultados simulaciones modelo cuadrado, concreto-foam, arcilla-foam, foam-foam.	38
Figura 28. Resultados simulaciones modelo elíptico, concreto-aire, arcilla-aire, foam-aire.	39
Figura 29. Resultados simulaciones modelo elíptico, concreto-agua, arcilla-agua, foam-agua	39
Figura 30. Resultados simulaciones modelo elíptico, concreto-foam, arcilla-foam, foam-foam. .	39
Figura 31. Resultados simulaciones modelo slot, concreto-aire, arcilla-aire, foam-aire.	40
Figura 32. Resultados simulaciones modelo slot, concreto-agua, arcilla-agua, foam-agua.....	40
Figura 33. Resultados simulaciones modelo slot, concreto-foam, arcilla-foam, foam-foam.....	40
Figura 34. Resultados simulaciones modelo ladrillo tradicional, concreto-aire, arcilla-aire, foam- aire.....	41
Figura 35. Resultados simulaciones modelo ladrillo tradicional, concreto-agua, arcilla-agua, foam- agua.	41
Figura 36. Resultados simulaciones modelo ladrillo tradicional, concreto-foam, arcilla-foam, foam- foam.....	41
Figura 37. Resultados simulaciones modelo original, concreto-aire, arcilla-aire, foam-aire.....	42
Figura 38. Resultados simulaciones modelo original, concreto-agua, arcilla-agua, foam-agua. ...	42
Figura 39. Resultados simulaciones modelo original, concreto-foam, arcilla-foam, foam-foam. .	42
Figura 40. Posicionamiento de carga geometría ladrillo carga vertical.	47
Figura 41. Posicionamiento cargas geometría elíptica carga vertical.	48
Figura 42. Posicionamiento cargas geometría cuadrada carga vertical.	49
Figura 43. Posicionamiento cargas geometría slot carga vertical.	50
Figura 44. Posicionamiento cargas geometría ladrillo carga horizontal.	51
Figura 45. Posicionamiento cargas geometría elíptico carga horizontal.....	52
Figura 46. Posicionamiento cargas geometría cuadrado carga horizontal.	53
Figura 47. Posicionamiento cargas geometría slot carga horizontal.	54

I. RESUMEN

Este estudio presenta el diseño de un material bio-inspirado basado en la estructura del Balanus, con el objetivo de mejorar el aislamiento térmico en construcciones habitacionales. La investigación se enfocó en caracterizar las propiedades térmicas de la geometría del Balanus mediante simulaciones numéricas y experimentos, empleando diversos materiales, como concreto, arcilla y espuma de poliestireno, tanto en el núcleo como en el relleno de los modelos los cuales se simularon bajo cargas estáticas y térmicas para evaluar su comportamiento bajo diferentes condiciones de carga y temperaturas.

Los resultados indicaron que las geometrías bio-inspiradas, especialmente el modelo basado en el Balanus, presentaron una mayor eficiencia térmica en comparación con ladrillos tradicionales. En particular, el uso de espuma de poliestireno como material de núcleo proporcionó un mejor rendimiento térmico, mientras que el concreto ofreció una mayor resistencia estructural. Sin embargo, se observó que las combinaciones de geometría y material juegan un papel crucial para equilibrar las propiedades térmicas y estructurales de un material.

Se concluye que las geometrías bio-inspiradas tienen un gran potencial para mejorar el aislamiento térmico en construcciones habitacionales, lo que podría contribuir significativamente a la eficiencia energética y a la sostenibilidad en la industria de la construcción.

Palabras clave — Bio-inspiración, aislamiento térmico, construcción, Balanus, simulaciones numéricas.

II. ABSTRACT

This study presents the design of a bio-inspired material based on the structure of the Balanus, aimed at improving thermal insulation in residential buildings. The research focused on characterizing the thermal properties of the Balanus geometry through numerical simulations and experiments, using various materials such as concrete, clay, and expanded polystyrene foam, both in the core and filling of the models. 3D-printed prototypes were developed and subjected to static and thermal tests to evaluate their behavior under different load and temperature conditions.

The results indicated that bio-inspired geometries, particularly the model based on the Balanus, exhibited greater thermal efficiency compared to traditional bricks. Specifically, the use of polystyrene foam as the core material provided better thermal performance, while concrete offered greater structural resistance. However, it was observed that the combination of geometry and material plays a crucial role in balancing thermal and structural properties.

It is concluded that bio-inspired geometries have great potential to enhance thermal insulation in residential buildings, which could significantly contribute to energy efficiency and sustainability in the construction industry.

Keywords — Bio-inspiration, thermal insulation, construction, Balanus, numerical simulations

I. INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia la humanidad ha desarrollado artefactos, tomando como inspiración su entorno más cercano (la naturaleza), para desarrollar armas, escudos, casas e incluso objetos para navegar. Los cuales han sido de vital importancia y trascendencia para la historia del ser humano [1][2][3][4].

La bio-inspiración también conocida como bio-mimética, es una rama de la ciencia que se basa en el estudio de la naturaleza para diseñar soluciones innovadoras, etimológicamente hablando es “Imitar la vida”. Viene de “Bios” que es Vida y “Mimesis” que es Imitar. Imitar la naturaleza para vivir mejor. Consiste en estudiar los modelos, sistemas, procesos y elementos de esta y aplicar esos conocimientos en el diseño de productos, tecnologías y sistemas que sean más eficientes, sostenibles y respetuosos con el medio ambiente [5][6][7].

La bio-mimética busca imitar las soluciones que la naturaleza ha desarrollado a lo largo de millones de años de evolución, aprovechando la eficiencia y la elegancia de los diseños biológicos para resolver problemas humanos en áreas como la ingeniería, la arquitectura, la medicina, entre otros [8][9][10][11][12].

Desde hace millones de años todas las especies han venido evolucionando de manera constante y progresiva, logrando así poder sobrevivir las diferentes adversidades que se han presentado, todas las especies han adquirido una habilidad en específico para cazar y otras han desarrollado alguna especie de protección contra los depredadores. Algunas de estas habilidades son muy notorias en ámbitos como la aerodinámica, armaduras de protección, impermeabilidad, mimetismo y capacidad de construcción de estructuras. Dichas estructuras brindan propiedades específicas para que el sistema responda de la mejor manera según la necesidad mostrada.

El *Balanus* también conocido como percebe, barnacle o bellota de mar, ha despertado un gran interés en el campo de la bio-mimética, especialmente en relación con el diseño de materiales con propiedades novedosas y avanzadas, incluido el aislamiento térmico ya que es muy común

encontrarlo en zonas intermareales en donde queda expuesto a la intemperie del sol por alrededor de 5 a 6 horas diarias.

La estructura externa de los barnacles posee características únicas que pueden ser explotadas para desarrollar materiales con propiedades de aislamiento térmico altamente eficientes. Esta especie posee un aislamiento térmico sorprendente comparado con otras especies marinas las cuales no son capaces de soportar tiempos tan prolongados bajo estas condiciones características de las zonas costeras.

El aporte de este estudio está enfocado en la caracterización geométrica de la estructura externa de los barnacles, que permita el desarrollo de un material innovador, que pueda servir como sistema de aislamiento térmico, promoviendo la eficiencia energética y contribuyendo en la lucha del cambio climático y la mejora en la calidad de vida en las próximas generaciones.

III. OBJETIVOS

A. OBJETIVO GENERAL

- Diseñar un material bio-inspirado con las características geométricas del Balanus que permitan su uso en el aislamiento térmico de aplicaciones habitacionales.

B. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar el aislamiento térmico del Balanus mediante experimentación y simulaciones numéricas computacionales.
- Proponer una geometría para un aislante térmico con base en los resultados obtenidos en la caracterización geométrica.
- Fabricar y evaluar prototipos impresos en 3D del material obtenido.

IV. MARCO TEÓRICO

El Balanus, comúnmente conocido como el "barnacle", es un organismo marino que ha evolucionado para adaptarse a condiciones ambientales extremas, su cuerpo totalmente cubierto por una concha o caparazón de color blanco-grisáceo que le protege no solo de los cambios bruscos de temperatura sino también de los depredadores tienen un radio aproximado de 8 cm y una altura promedio de 20 cm, Los percebes se alimentan mediante unos apéndices en forma de pluma llamados cirros que sobresalen por el opérculo (apertura en la parte superior), su cuerpo posee una forma cónica, los percebes les gustan los lugares con mucha actividad, como volcanes submarinos y zonas intermareales, donde residen sobre objetos resistentes como rocas, pilotes y boyas. Particularmente se adhieren a algunos animales marinos que mantienen en constante migración de su hábitat, lo cual conlleva a cambios de temperatura significativos. Su capacidad para regular la temperatura corporal en entornos marinos hostiles sugiere la presencia de mecanismos biológicos eficaces que podrían servir como modelo para el diseño de materiales con propiedades de aislamiento térmico mejoradas en comparación con materiales tradicionalmente usados [1].



Figura 1. percebe del género balanus. fuente: <https://ecuador.inaturalist.org/taxa/49129-Balanus>

El Balanus presenta características anatómicas y fisiológicas únicas que contribuyen a su capacidad para resistir fluctuaciones térmicas que oscilan entre los 4°C y los 50°C. Su caparazón calcáreo, compuesto por múltiples capas de material bio-mineralizado, proporciona aislamiento térmico al reducir la transferencia de calor entre el organismo y su entorno. Además, la disposición

estructural de estos materiales biológicos juega un papel crucial en la modulación de la conductividad térmica [1].

Para entender y replicar estos mecanismos en la síntesis de materiales es muy cotidiano y fundamental analizar la estructura y composición del caparazón del *Balanus* a nivel microscópico y nanométrico. Generalmente se hace uso de técnicas de microscopía de alta resolución, como la microscopía electrónica de barrido (SEM) y la microscopía de fuerza atómica (AFM), las cuales permiten examinar la arquitectura a nano escala de estos materiales bio-mineralizados y revelar patrones de organización que contribuyen a su eficacia como aislantes térmicos.

Además, el análisis de la composición química de los componentes del caparazón del *Balanus* mediante espectroscopía de energía dispersiva de rayos X (EDX) y espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR) proporcionan información crucial sobre los materiales y compuestos presentes, así como sobre las interacciones moleculares que influyen en sus propiedades térmicas.

Una vez comprendidos los principios subyacentes a la capacidad de aislamiento térmico del *Balanus*, se puede proceder al diseño y síntesis de materiales bio-inspirados que imiten o emulen estas características. La fabricación de estos materiales puede basarse en técnicas de bio-fabricación, como la bio-mineralización controlada o la impresión 3D de andamios bio-miméticos, que permiten replicar la estructura y composición del caparazón del *Balanus* a escala macroscópica.

El desarrollo de materiales bio-inspirados en el *Balanus* con propiedades mejoradas de aislamiento térmico podría tener aplicaciones significativas en diversas industrias, incluyendo la construcción, la manufactura de ropa técnica y el diseño de dispositivos electrónicos sensibles a la temperatura. Estos materiales no solo podrían contribuir a mejorar la eficiencia energética de los sistemas de acondicionamiento térmico, sino también a reducir el impacto ambiental asociado con el consumo excesivo de energía.

A lo largo del tiempo, se han concebido innumerables diseños inspirados en la naturaleza. Estos diseños, a menudo pasan desapercibidos debido a su integración en nuestro paisaje cotidiano o a su asociación con la rutina diaria. Sin embargo, muchos de ellos poseen una relevancia trascendental en diversos ámbitos, abarcando desde la arquitectura hasta la medicina, la ingeniería, la robótica, la óptica y la nanotecnología, entre otros.

Figuras representativas de la historia, como Leonardo da Vinci, han sido pioneras en la promoción de esta tecnología. A través de una observación meticulosa de la naturaleza, Da Vinci diseñó elementos voladores inspirados en el vuelo de las aves, imitando la forma de sus alas. Asimismo, desarrolló sistemas hidráulicos basados en el flujo de los ríos, e incluso se aventuró a concebir ciudades donde concebía el flujo de personas como si fueran insectos en una colmena.

En el contexto actual, marcado por la crisis climática y la urgente necesidad de sostenibilidad en nuestro sistema productivo, surge un consenso global sobre la importancia de esta evolución tecnológica. El mundo se encuentra en un punto crucial de la historia, donde se ve obligado a plantear interrogantes fundamentales: ¿Cómo se puede coexistir sin causar daño irreversible al planeta? ¿Cómo se puede optimizar la eficiencia energética?

Es en este contexto que el biomimetismo se erige como una senda prometedora para la humanidad. Ofrece la posibilidad de asegurar la supervivencia y forjar un futuro más sostenible, donde se aprenda a emular las estrategias y soluciones ingeniosas que la naturaleza ha perfeccionado a lo largo de millones de años de evolución.

Existen varios ejemplos de aislantes térmicos bio-inspirados que se han desarrollado tomando como modelo estructuras y mecanismos presentes en la naturaleza. Algunos de estos aislantes térmicos bio-inspirados son:

- **Abrigos inspirados en el pelaje de animales polares:** los animales polares, como los osos polares y los pingüinos, han evolucionado con pelajes densos y estructuras especiales que les permiten conservar el calor corporal en condiciones extremadamente frías. Estas

estructuras se han utilizado como inspiración para el desarrollo de materiales aislantes térmicos en textiles y prendas de vestir [14].

- **Los nidos de algunas especies de aves:** como por ejemplo el hornero en América del Sur, están contruidos con materiales naturales que proporcionan aislamiento térmico para proteger los huevos y las crías del frío. La estructura de estos nidos, compuesta por capas de materiales aislantes, ha servido como modelo para el diseño de materiales bio-inspirados en arquitectura y construcción como lo fue el estadio nacional de Pekín [15].
- **Carcasas protectoras de huevo:** también llamadas cáscaras, son estructuras microscópicas únicas que combinan resistencia mecánica con propiedades de aislamiento térmico. Esta estructura ha sido estudiada y replicada en el diseño de materiales bio-inspirados para aplicaciones de aislamiento térmico en la industria de la construcción [16].
- **La corteza de algunos árboles:** como el corcho de alcornoque, presenta propiedades térmicas excepcionales debido a su estructura porosa y la presencia de sustancias naturales que actúan como aislantes. Estas características han sido imitadas en el desarrollo de materiales para aplicaciones de aislamiento térmico en la construcción y la fabricación aislantes para envases [17].
- **El caparazón de algunas especies de tortugas marinas:** presentan una estructura laminar que proporciona protección térmica, ya que algunas especies de tortugas nadan en corrientes marinas procedentes de los árticos y protección mecánica la cual las protege de fuertes mordeduras de algunas especies de tiburones. Esta estructura ha inspirado el diseño de materiales para aplicaciones de aislamiento térmico en la industria aeroespacial y la fabricación de materiales compuestos [18].

Los anteriores ejemplos ilustran cómo la bio-mimética no solo puede conducir a soluciones innovadoras, sino también a un enfoque más sostenible y eficiente para abordar desafíos tecnológicos. Al comprender y aplicar los principios de diseño encontrados en la naturaleza,

podemos avanzar hacia un futuro donde la ciencia y la ingeniería se fusionen armoniosamente con el mundo natural.

A. PROPIEDADES TÉRMICAS:

Las propiedades térmicas de los materiales son fundamentales para comprender su comportamiento en diversas aplicaciones industriales y tecnológicas. Estas propiedades están intrínsecamente relacionadas con la estructura molecular del material y la manera en el que las moléculas interactúan entre sí. La estructura cristalina desempeña un papel crucial en este aspecto, dado que determina la disposición ordenada de los átomos en el material. Se ha observado que los materiales con una estructura cristalina ordenada tienden a exhibir una conductividad térmica más alta en comparación con los materiales amorfos. [19]

Además, los diferentes tipos de enlaces químicos presentes en un material, como los enlaces covalentes, iónicos y metálicos, influyen significativamente en su capacidad para transferir calor. Por ejemplo, los materiales con enlaces químicos fuertes tienden a exhibir una mayor conductividad térmica. La densidad del material también juega un papel importante en sus propiedades térmicas. Los materiales más densos suelen tener una mayor conductividad térmica debido a una mayor cantidad de partículas que pueden transferir calor. [19]

Otro aspecto relevante es la capacidad de un material para almacenar calor, que está estrechamente relacionada con su masa y su capacidad para absorber energía térmica sin experimentar un aumento significativo en la temperatura. Por lo tanto, es crucial considerar estos aspectos al diseñar y seleccionar materiales para aplicaciones específicas donde las propiedades térmicas son de vital importancia. [19]

Las anteriores propiedades son descritas a mayor profundidad a continuación mediante la Ecuación 1 y Ecuación 2, las cuales rigen el fenómeno descrito.

1) Transferencia de calor por conducción

La conducción es la transferencia de calor entre objetos en contacto directo. Durante este proceso, la energía térmica se desplaza del objeto más caliente al más frío debido a las colisiones entre sus moléculas, átomos o electrones. Los aislantes térmicos, fabricados con materiales de baja conductividad térmica, se colocan entre objetos calientes y fríos para impedir el flujo de calor. La conducción ocurre cuando dos sustancias con diferentes niveles de energía térmica, o temperaturas distintas, se tocan. La energía térmica del objeto más caliente incrementa el movimiento molecular del más frío, como se define en la ecuación de flujo de calor de régimen transitorio unidimensional a continuación.

$$Q_{calor} = -K * A * \frac{dT}{dX} \quad (1)$$

Donde:

- Q es el flujo de calor.
- k es la conductividad térmica del material, que es una medida de la capacidad del material para conducir el calor entre más bajo sea mejor aislante.
- A es el área transversal de la sección por donde fluye el calor.
- dT es el cambio de temperatura el final y el inicial.
- dX es el espesor de la sección.

2) Transferencia de calor por convección

La convección es la transferencia de calor a través del movimiento de un gas o líquido. Los aislantes térmicos que previenen la convección se utilizan para evitar que el gas o líquido caliente disperse el calor hacia otras áreas, en este caso el objeto de estudio también está sujeto a la transferencia de calor por convección debido a que está en contacto directo con el ambiente.

En la actualidad los principales materiales usados en el aislamiento térmico en habitas habitacionales son:

- **Fibra de vidrio:** es uno de los materiales aislantes más populares y ampliamente utilizado. Se compone de finas fibras de vidrio unidas mediante resinas.



Figura 2. Fibra de vidrio. Fuente: <https://www.suimtec.com/lana-fibra-de-vidrio-aluminio>

- **Lana de roca:** fabricada a partir de rocas naturales, como basalto o dolomita, la lana de roca es resistente al fuego y proporciona un buen aislamiento térmico y acústico.

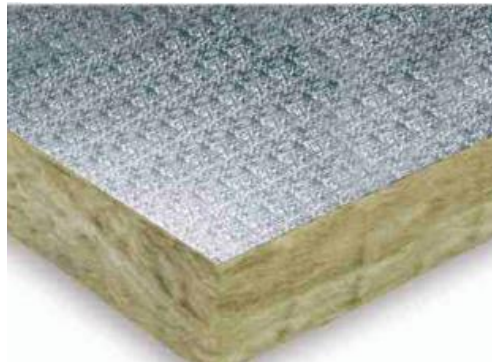


Figura 3. Lana de roca. Fuente: <https://www.suimtec.com/lana-mineral-de-roca-con-aluminio>

- **Espuma de poliestireno:** disponible en forma de paneles rígidos o espuma expandida, la espuma de poliestireno es liviana y tiene una buena resistencia al agua.



Figura 4. Espuma de poliestireno. Fuente: <https://www.danosa.com/es-co/producto/danopren-tr/>

- **Poliuretano:** el poliuretano es un material plástico que se utiliza comúnmente en forma de espuma para el aislamiento térmico.

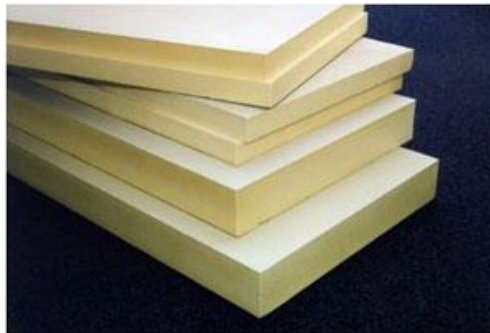


Figura 5. Poliuretano. Fuente: <https://aislaconpoliuretano.com/aislar-una-pared-interior-planchas-poliuretano/>

- **Celulosa:** fabricada a partir de papel reciclado tratado con productos químicos ignífugos, la celulosa es un material aislante ecológico.



Figura 6. Bloque de Celulosa. Fuente: <https://aislahome.es/aislamiento-con-celulosa/>

- **Aerogel:** este material es conocido por ser extremadamente ligero y tener una alta capacidad de aislamiento térmico.



Figura 7. Bloque de Celulosa. Fuente: <https://www.autodeskjournal.com/aerogel-el-mejor-aislante/>

Los anteriormente mencionados son los principales materiales utilizados en el aislamiento térmico en habitaciones residenciales, abarcan desde fibras de vidrio hasta aerogel, cada uno con sus propias ventajas y aplicaciones específicas. Sin embargo, a medida que se avanza hacia un enfoque más sostenible y eco-amigable en la construcción y diseño de viviendas, surge un interés creciente en explorar soluciones inspiradas en la naturaleza para el aislamiento térmico, El estudio bio-inspirado en el Balanus para el aislamiento térmico en habitaciones residenciales representa una emocionante área de investigación con el potencial de transformar la forma en que se diseña y construyen los hogares. Al aprovechar la sabiduría de la naturaleza, se puede avanzar hacia soluciones más eficientes, sostenibles y resilientes, beneficiando tanto a las personas como al medio ambiente.

V. METODOLOGIA

El espécimen objeto de este estudio fue obtenido como parte de una expedición científica al Pacífico colombiano, realizada en el contexto de una investigación más amplia titulada "Caracterización mecánica de dos tipos de tubos construidos por gusanos marinos (Annelida: Polychaeta)". [20] Durante esta campaña de muestreo, se recolectaron diversos organismos que exhibían características morfológicas y funcionales de particular interés para la biomimética. Entre estos especímenes, el *Balanus* destacó por sus propiedades de aislamiento térmico, presentando un potencial significativo para investigaciones posteriores en el campo de los materiales bio-inspirados.

A. Modelos



Figura 8. parte posterior del espécimen.



Figura 9. acercamiento de la geometría de interés.

La selección de este organismo para el presente estudio se fundamenta en observaciones preliminares in situ, que revelaron su notable capacidad para mantener la homeostasis térmica en un entorno intermareal caracterizado por fluctuaciones extremas de temperatura. Esta adaptación sugiere la presencia de mecanismos de aislamiento térmico altamente eficientes, cuya comprensión y emulación podrían contribuir significativamente al desarrollo de nuevos materiales aislantes para aplicaciones en ingeniería y arquitectura.

La recolección y posterior análisis de estos especímenes ejemplifica la importancia de la observación interdisciplinaria en el campo, donde hallazgos inicialmente periféricos a los objetivos primarios de una investigación pueden conducir a líneas de investigación innovadoras y potencialmente transformadoras en el ámbito de la biomimética y el diseño de materiales avanzados. Es importante señalar y aclarar que no se realizarán estudios basados en técnicas de microscopía avanzada como SEM y AFM, ya que las geometrías de interés en este estudio son visibles a escala macro y este trabajo no se centra en la micro o nanoestructura del espécimen. Sin embargo, existe la posibilidad de que futuros estudios adopten este enfoque.

De los especímenes recolectados se les tomaron fotografías y se les realizaron las respectivas mediciones con el fin de modelarlos lo más detalladamente posible. Para ello, se utilizó el software Inventor, donde se importaron las fotografías y, con las mediciones previas, se procedió a escalarlas a tamaño real. Esto permitió crear un modelo sólido útil para las diferentes simulaciones.



Figura 10. Modelado de pieza.

Como se puede evidenciar en la figura 10. se modeló una porción del Balanus, como su geometría alrededor es muy similar y su composición, se optó por modelar solo una parte del espécimen, esto con el fin de ahorrar tiempo de simulación y gasto computacional.

Una vez se realizó la modelación del espécimen, se procedió a la respectiva extrusión, como se evidencia a continuación.

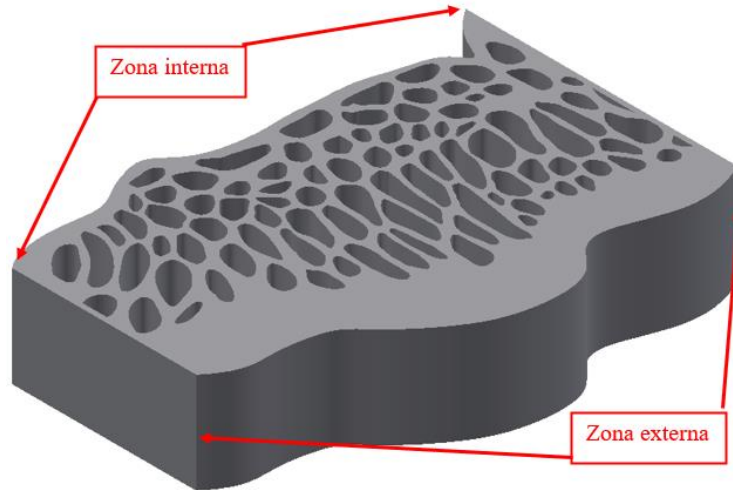


Figura 11. Modelo 3d.

Del anterior modelo se puede evidenciar que se tienen unas transiciones en el modelo, donde las geometrías internas del Balanus, en su parte más periférica o cercana a la superficie externa tiene cavidades alargadas y muy esveltas perpendiculares a la superficie exterior (zona 1), y se puede apreciar cómo va cambiando a medida que se acerca al interior (zona 2), además gradualmente se van volviendo más redondas y menos alargadas hasta llegar a unas geometrías rotadas 180° en comparación con las primeras y sus formas son alargadas y esveltas (zona 3). Para realizar las medidas se tomaron solo las geometrías que estaban por completo dentro de cada zona, y se tomaron dos zonas de transición, entre la zona 1 y 2 y la segunda zona de transición entre la zona 2 y 3, esto con el fin de garantizar un transición más suave entre ellas.

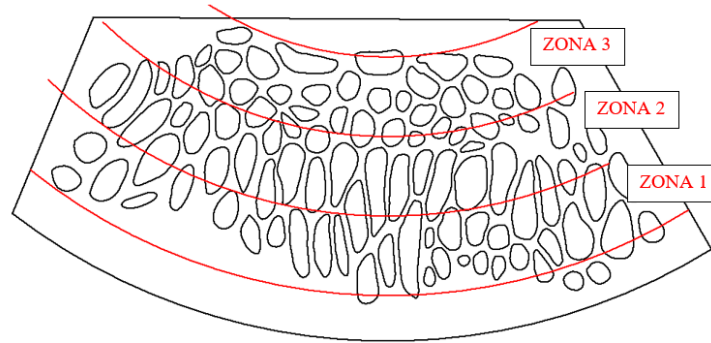


Figura 12. Modelo 2d definición zonas primarias.

Las geometrías de cada zona se tuvieron en cuenta solo cuando quedaban por completo entre la zona demarcada, las que estuvieran interceptadas por las divisiones se clasificaban en la zona de transición, como se puede evidenciar a continuación.

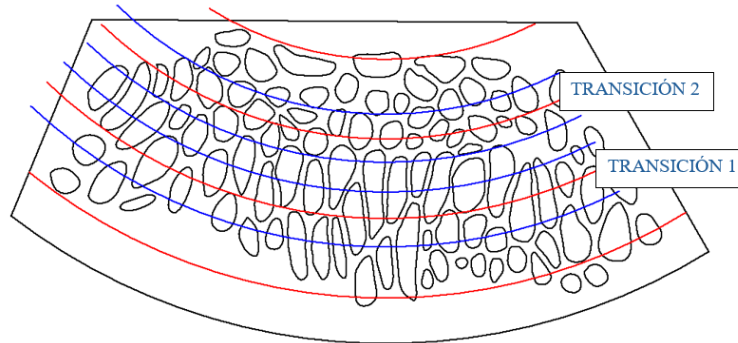


Figura 13. Modelo 2d definición zonas de transición.

En cada una de las zonas demarcadas y de las zonas de transición, se realizaron las mediciones del ancho y largo de cada geometría obteniendo así las relaciones de aspecto y la progresión geométrica que rige el modelo ya que las geometrías del Balanus cambian a medida que se recorre desde el punto externo hasta la parte interna donde este vive. Los resultados obtenidos se evidencian en la siguiente tabla:

Tabla 1. Distribución de medidas del espécimen.

Promedio \ Zona	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Transición 1	Transición 2
Largo	4.72372222	5.4872	2.0879375	2.42682353	4.92890909
Ancho	1.98455556	1.99733333	2.72475	1.81170588	1.95572727
Aspect Ratio (Ancho/Largo)	0.42012537	0.36399864	1.30499596	0.74653384	0.39678704

Se realizó una primera impresión del modelo con algunas simplificaciones en la geometría externa para hacerlo más prolijo, sin alterar las geometrías internas. El objetivo era observar los tamaños reales y obtener una idea más clara de las dimensiones y la escala del modelo inicial. El primer modelo impreso es el siguiente:

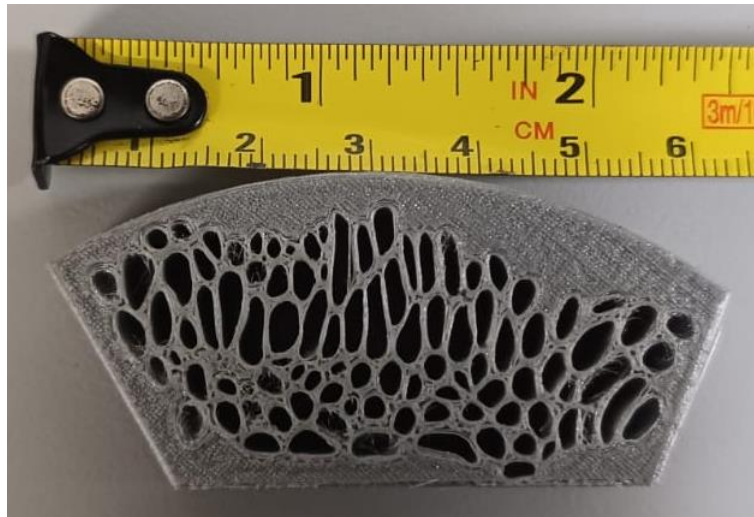


Figura 14. Primer modelo impreso en 3d.

Con el modelo anterior (figura 14), el tamaño era extremadamente pequeño, lo que impedía la entrada o el alojamiento de una termocupla en sus cavidades. Por lo tanto, se decidió aplicar un factor de escala que permitiera el alojamiento de la termocupla, pero que a su vez mantuviera el modelo lo suficientemente pequeño para ahorrar material de impresión y reducir el tiempo en el proceso de fabricación.



Figura 15. Modelo impreso 3d con factor de escala de 3.

En el modelo anterior (figura 15), se pueden apreciar mejor las geometrías del diseño, que se ha escalado a un factor de escala de 3. Este ajuste cumple con los requisitos de espacio, ya que no es demasiado grande, pero permite el alojamiento de las termocuplas en sus cavidades. De esta manera, todos los modelos que se realicen mantendrán este factor de escala, al menos para aquellos que se utilizarán en la validación de las simulaciones.

De acuerdo con la NORMA TÉCNICA NTC COLOMBIANA 296, la cual indica las dimensiones que tienen tener los ladrillos de mampostería, se seleccionaron todas las medidas de los modelos a realizar. A partir de esta norma, se proponen modelos propios que no solo respetan la relación de aspecto del Balanus, sino que además cumplen con la normativa de construcción colombiana. Esta normativa establece los valores aceptados para el uso y validación de ladrillos en construcciones nacionales, garantizando su adecuado desempeño y conformidad con los estándares locales. Los cuales se evidencian a continuación:

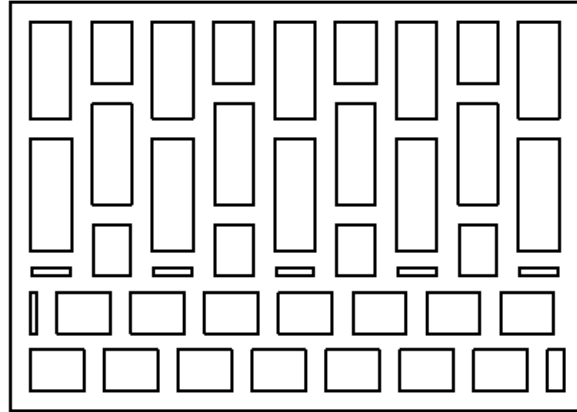


Figura 16. Modelo Cuadrado

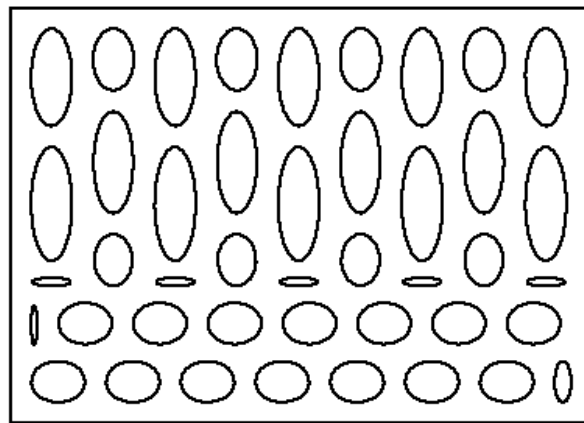


Figura 17. Modelo elíptico.

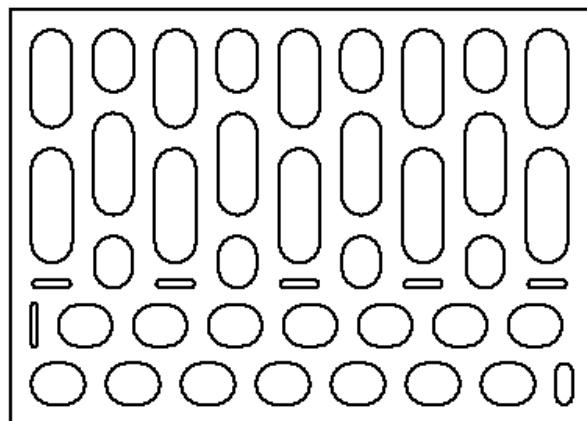


Figura 18. Modelo slot.

A continuación los modelos que se tomaron como referencia:

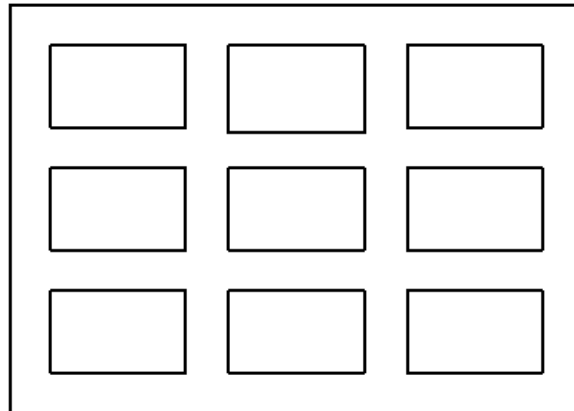


Figura 19. Modelo ladrillo tradicional.

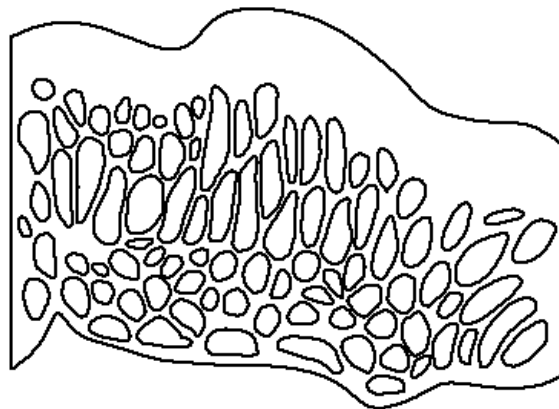


Figura 20. Modelo original.

Las geometrías utilizadas en las simulaciones incluyen, como referencia principal, las dos últimas. Una corresponde al modelo original del Balanus, mientras que la otra representa la geometría de un ladrillo tradicionalmente utilizado en las construcciones colombianas. Estas comparaciones permiten evaluar el comportamiento estructural y térmico en contextos de uso real, alineados con las normativas locales y las características del diseño bio-inspirado.

B. Simulación

Para la medición de la transferencia de calor, existen diversos métodos de simulación y una variedad de softwares especializados. En este estudio, se empleará el software ANSYS, que utiliza el método de elementos finitos. La elección de la técnica de simulación específica depende de los objetivos de la medición y de los resultados esperados, ANSYS ofrece varios tipos de simulaciones

térmicas, cada una diseñada para analizar distintos fenómenos térmicos y adaptarse a las características del sistema en estudio. A continuación, se describen algunos de los principales tipos de simulaciones térmicas disponibles en el software:

- 1) **Análisis de transferencia de calor estacionario (Steady-State Thermal Analysis):** El análisis térmico en estado estacionario tiene como objetivo encontrar la temperatura o la distribución del flujo de calor en los materiales cuando se alcanza un equilibrio térmico y solo necesita conductividad térmica como entrada del material, usualmente se utiliza para analizar la distribución de temperatura y flujos de calor en estado estacionario, es decir, cuando las condiciones térmicas no cambian con el tiempo.

- 2) **Análisis de transferencia de calor transitorio (Transient Thermal Analysis):** el análisis térmico transitorio determina la leyenda temporal de cómo cambia el perfil de temperatura y otros factores térmicos. Las cantidades cambian dentro del tiempo establecido. Las propiedades del material, como la densidad, la conductividad térmica y el calor específico, son necesarias como parámetros de entrada para el análisis térmico transitorio, se utiliza para analizar la distribución de temperatura y flujos de calor desde un tiempo cero y una temperatura inicial hasta un tiempo final con una temperatura dada, por ejemplo, en las técnicas de tratamientos de metales.

- 3). **Análisis de flujo de calor (Heat Flow Analysis):** Se utiliza para calcular las tasas de transferencia de calor y las temperaturas en sistemas complejos que involucran diferentes modos de transferencia de calor (conducción, convección y radiación), usualmente se puede acoplar con análisis estructurales y de fluidos para estudiar los efectos térmicos en otros fenómenos físicos.

- 4). **Análisis de sistemas de refrigeración (Refrigeration Systems Analysis):** es normalmente utilizado para modelar y analizar el comportamiento térmico de sistemas de refrigeración, como aires acondicionados, refrigeradores y sistemas de enfriamiento industriales, dado su versatilidad para permitir las respectivas evaluaciones en el rendimiento y la eficiencia de estos sistemas.

5). Análisis de sistemas de calefacción y ventilación (HVAC Analysis): HVAC significa Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado. El análisis y diseño de HVAC se refiere al proceso de diseño, análisis y optimización de sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado para edificios y otras estructuras. El objetivo del análisis y diseño de HVAC es crear sistemas que proporcionen confort térmico y una calidad de aire interior aceptable y al mismo tiempo sean energéticamente eficientes y rentables.

6). Análisis de procesos de manufactura (Manufacturing Process Analysis): El análisis de procesos de fabricación (MPA) permite un análisis exhaustivo del rendimiento de los procesos de producción, usualmente es utilizado para analizar los efectos térmicos involucrados en procesos de manufactura, como soldadura, fundición, extrusión y tratamientos térmicos y permite evaluar la distribución de temperaturas y los ciclos térmicos en estos procesos.

De acuerdo con lo anterior, la simulación que mejor se ajusta a las necesidades de esta investigación es la Transient Thermal Analysis. Debido que el Balanus está expuesto a cambios térmicos cíclicos en su entorno natural. Un análisis transitorio permite capturar estos cambios temporales en la temperatura y el flujo de calor, lo cual es crucial para entender cómo el organismo maneja las fluctuaciones térmicas.

Las propiedades térmicas de los materiales biológicos pueden variar con el tiempo y la temperatura. El análisis transitorio permite incorporar estas variaciones, proporcionando una representación más precisa del comportamiento térmico real. El ambiente intermareal implica ciclos repetidos de calentamiento y enfriamiento. El análisis transitorio permite simular estos ciclos y evaluar el rendimiento térmico a lo largo de múltiples períodos.

Para realizar esto, se llevan a cabo simulaciones térmicas preliminares con el fin de evaluar diferentes conceptos de diseño y condiciones de frontera. Estas simulaciones iniciales son cruciales para seleccionar la opción más prometedora desde el punto de vista térmico. Además, ayudan a

identificar posibles problemas térmicos en una etapa temprana del diseño, lo que permite implementar mejoras antes de avanzar a fases más avanzadas del desarrollo del estudio.

Para llevar a cabo las simulaciones, se partió de los modelos originales y propuestos. Se utilizaron geometrías en 2D para las simulaciones con el objetivo de reducir costos computacionales innecesarios y optimizar el tiempo de procesamiento. Esta simplificación permitió mantener un balance entre la precisión de los resultados y la eficiencia en términos de recursos, sin comprometer la validez de los análisis realizados.

C. Condiciones de frontera en la simulación:

1). Definir el modelo geométrico del ladrillo:

El ladrillo, como se observa en la Figura 21, tiene una estructura con cavidades internas o huecos que pueden influir en la transferencia térmica. Es importante que en el modelo 2D, se definan todas las regiones que influirán en el comportamiento térmico, como la estructura externa e interna.

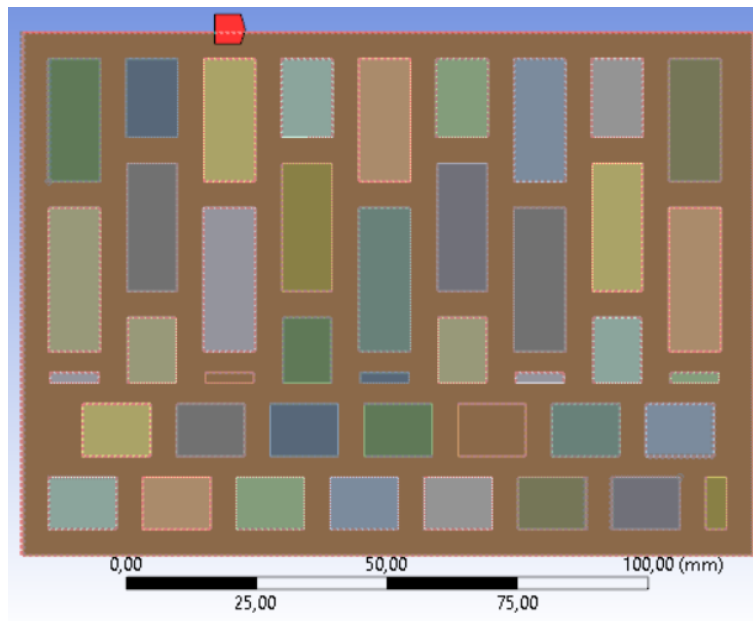


Figura 21. Modelo.

2). Propiedades del material:

Define las propiedades térmicas del ladrillo, como la conductividad térmica (k), la densidad (ρ) y el calor específico (C_p). Las propiedades del material se asignarán a cada una de las zonas sólidas, en las cavidades los materiales de relleno también se asignarán propiedades específicas.

The image shows three overlapping windows from the Engineering Data Sources software. The top window, 'Engineering Data Sources', lists 'Thermal Materials' and 'Fluid Materials'. The middle window, 'Outline of Thermal Materials', shows a list of materials including Air, Alnico5, Alnico9, and Alumina 92%. The bottom window, 'Properties of Outline Row 27: Air', displays the thermal properties for Air.

Engineering Data Sources				
	A	B	C	D
1	Data Source		Location	Description
12	Thermal Materials	<input type="checkbox"/>		Material samples specific for use in a thermal analysis.
13	Fluid Materials	<input type="checkbox"/>		Material samples specific for use in a fluid analysis.
*	Click here to add a new library			

Outline of Thermal Materials					
	A	B	C	D	E
1	Contents of Thermal Materials		Add	source	Description
2	Material				
3	Air				Thermal Properties for Air
4	Alnico5				
5	Alnico9				
6	Alumina 92%				

Properties of Outline Row 27: Air			
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	Density	1,1614	kg m ⁻³
3	Isotropic Thermal Conductivity	0,026	W m ⁻¹ C ⁻¹
4	Specific Heat Constant Pressure, C _p	1007	J kg ⁻¹ C ⁻¹

Figura 22. Materiales.

3). Mallado:

Se trabajaron para crear una malla fina en las áreas críticas (por ejemplo, cerca de los bordes o en áreas con grandes gradientes de temperatura). La malla puede ser refinada automática o manualmente en función de la geometría y el análisis.

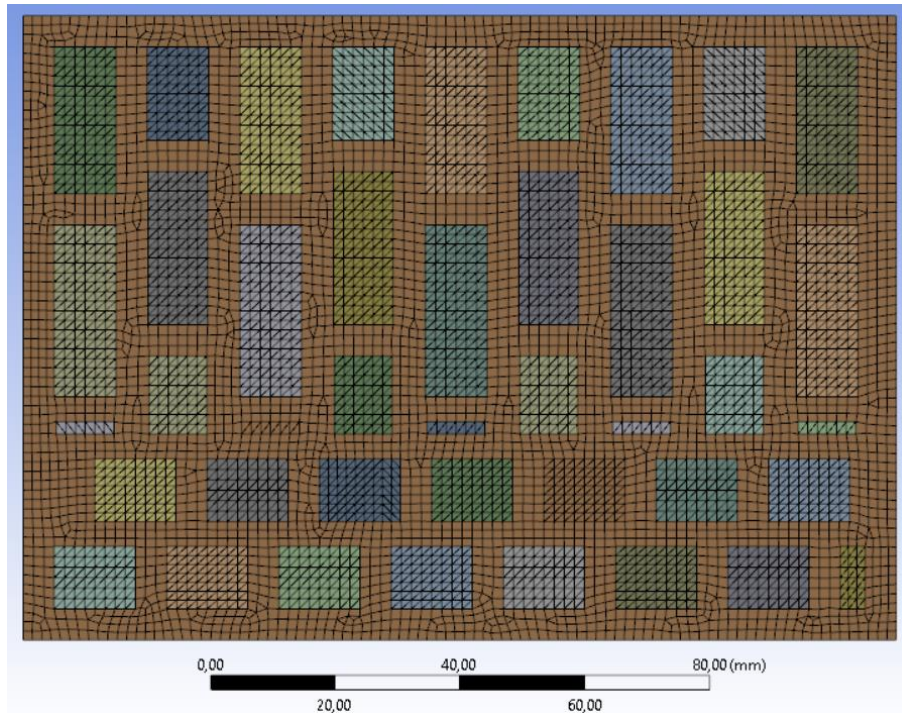


Figura 23. Modelo cuadrado mallado.

4). Aplicar las condiciones de frontera:

Las condiciones de frontera dependen del caso de estudio (puede ser una simulación de un ladrillo expuesto al sol, frío, o sometido a gradientes de temperatura). Aquí hay algunas comunes para un análisis de transferencia de calor:

- **Condición de temperatura fija (Dirichlet):** Se aplica a una o varias caras del ladrillo donde se sabe que la temperatura en esa superficie es fija. Una cara del ladrillo está en contacto con una superficie caliente y en la posterior una temperatura de 22°C.

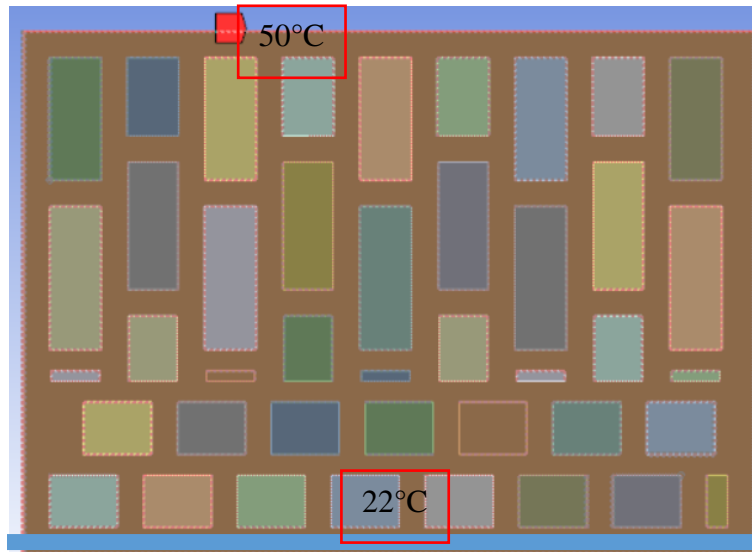


Figura 24. Modelo cuadrado condiciones de frontera.

VI. RESULTADOS

A. Resultados térmicos:

A continuación, se presentan los resultados de las simulaciones realizadas mediante el método de elementos finitos, en las que se analizaron tres geometrías propuestas, las originales y una de referencia basada en la geometría interna de un ladrillo existente. En estas simulaciones, se variaron los materiales base, incluyendo concreto, arcilla y espuma de poliestireno expandido. Además, se evaluó el efecto de diferentes materiales de relleno en las cavidades, tales como agua, aire y espuma de poliestireno, con el objetivo de encontrar la mejor combinación posible para el aislante térmico. Todas las simulaciones se realizaron bajo un tiempo estándar de 21,600 segundos, equivalente a 6 horas, para garantizar condiciones uniformes en la evaluación de todos los materiales.

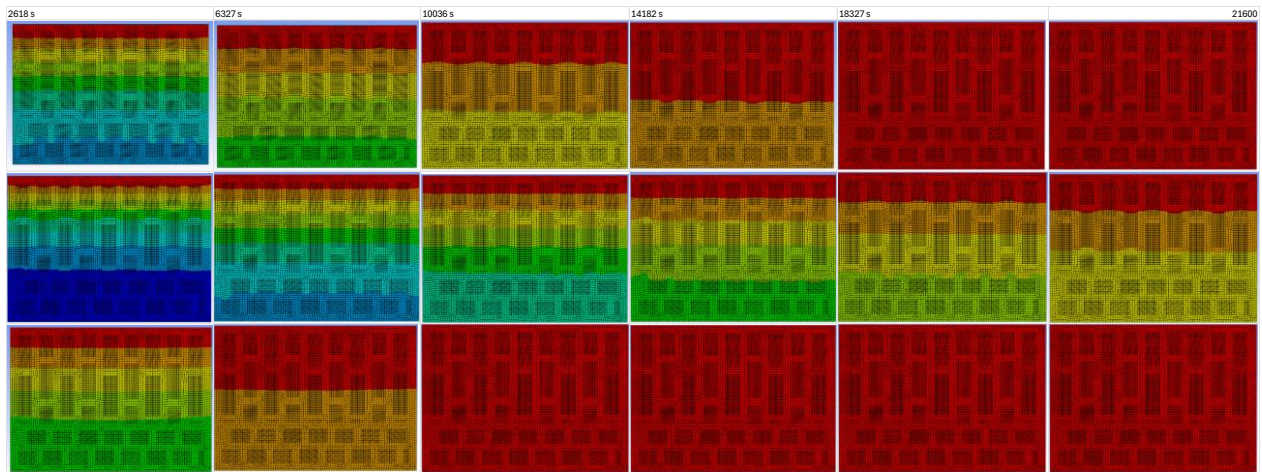


Figura 25. Resultados simulaciones modelo cuadrado, concreto-aire, arcilla-aire, foam-aire

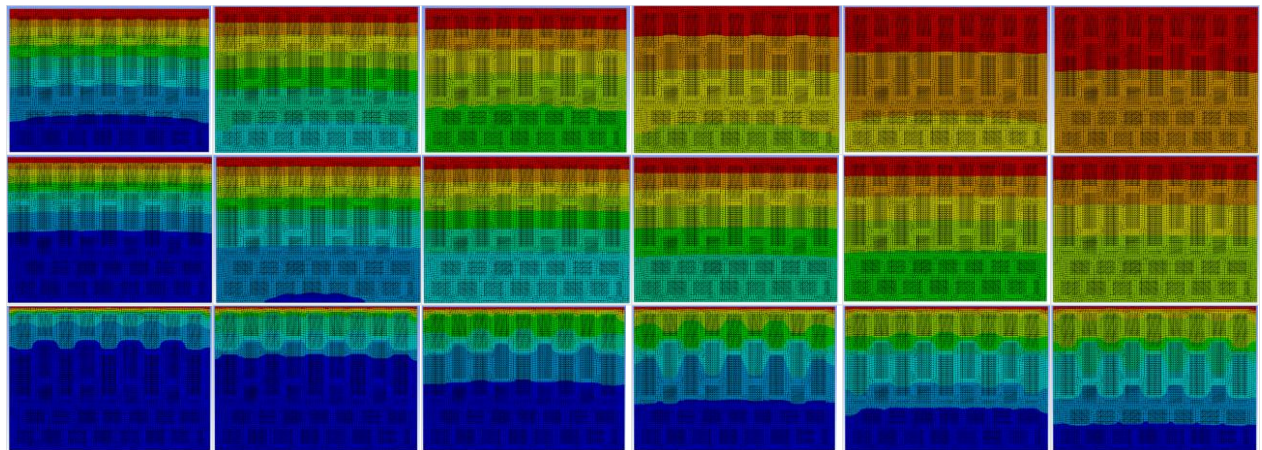


Figura 26. Resultados simulaciones modelo cuadrado, concreto-agua, arcilla-agua, foam-agua.

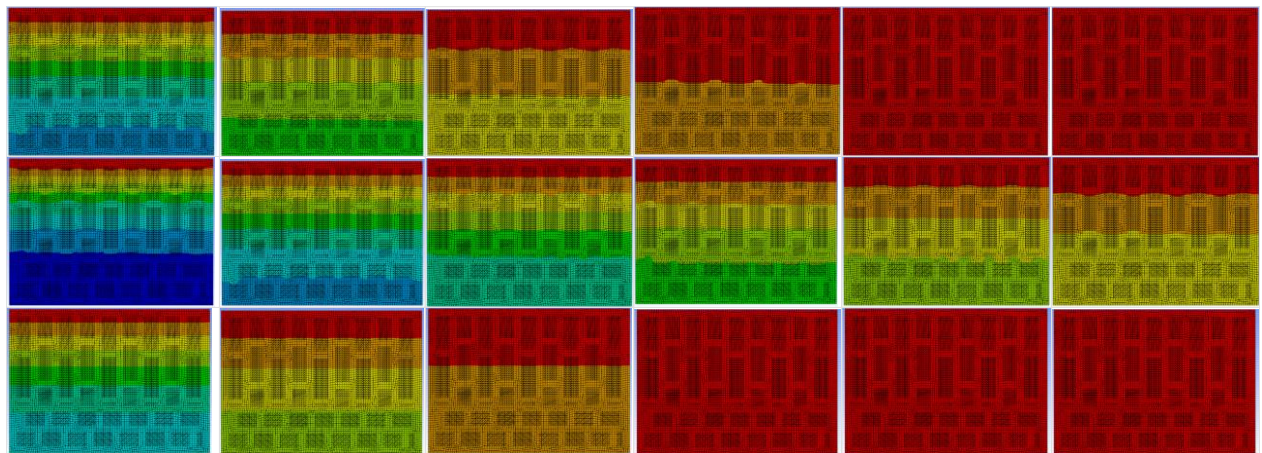


Figura 27. Resultados simulaciones modelo cuadrado, concreto-foam, arcilla-foam, foam-foam.

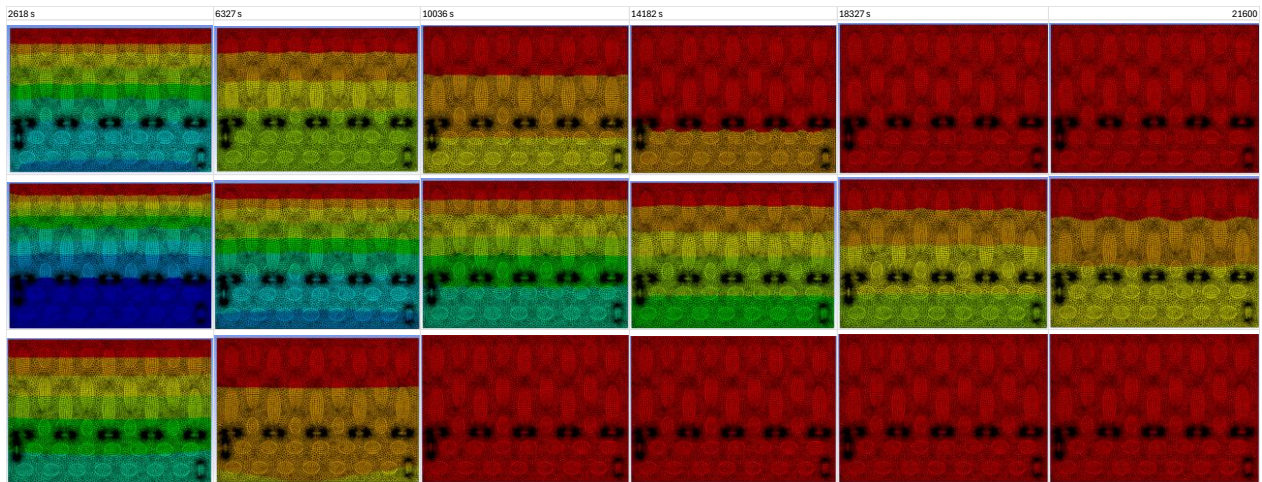


Figura 28. Resultados simulaciones modelo elíptico, concreto-aire, arcilla-aire, foam-aire.

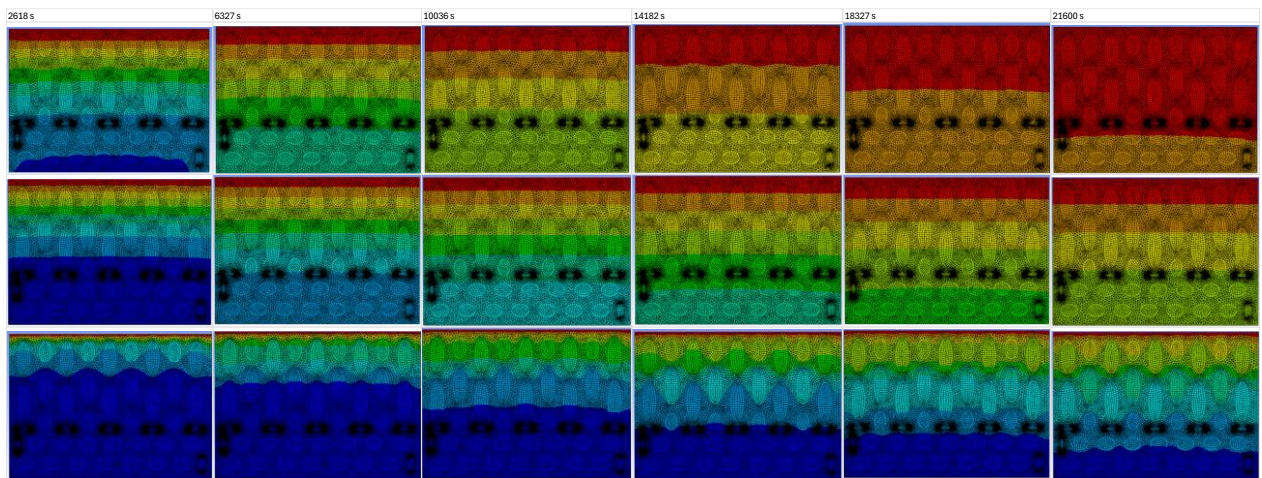


Figura 29. Resultados simulaciones modelo elíptico, concreto-agua, arcilla-agua, foam-agua

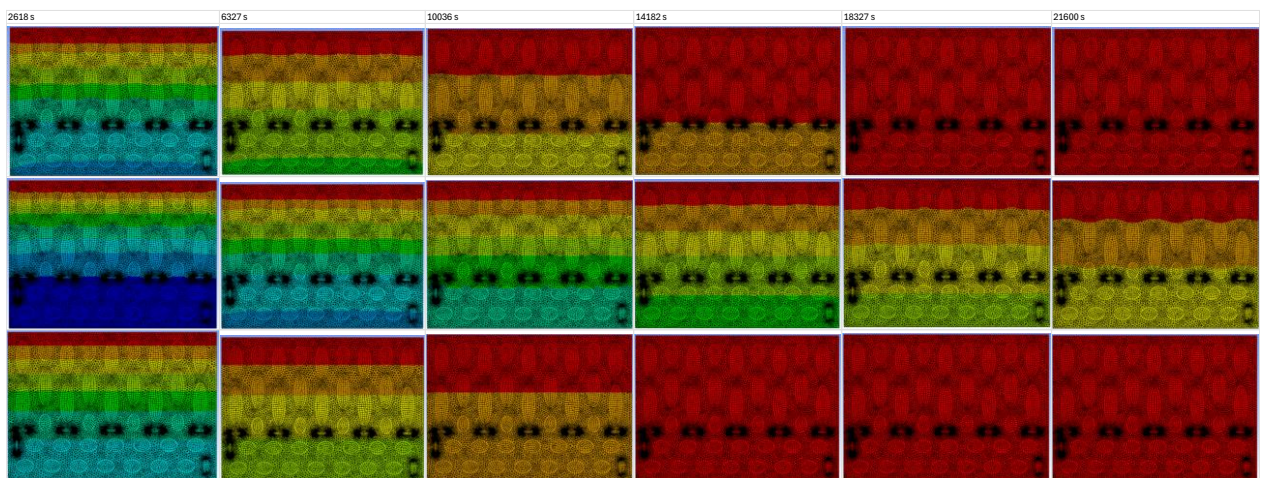


Figura 30. Resultados simulaciones modelo elíptico, concreto-foam, arcilla-foam, foam-foam.

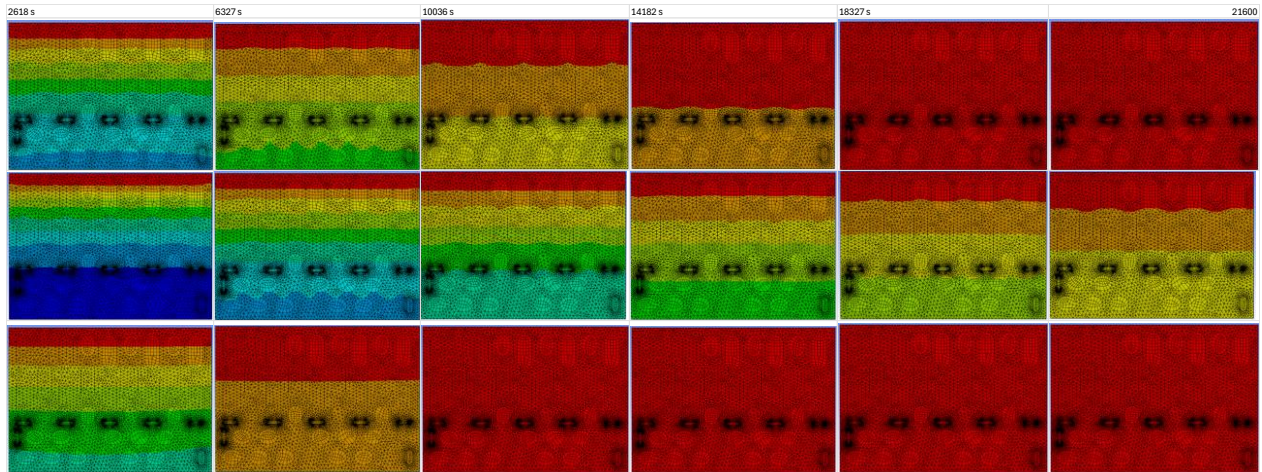


Figura 31. Resultados simulaciones modelo slot, concreto-aire, arcilla-aire, foam-aire.

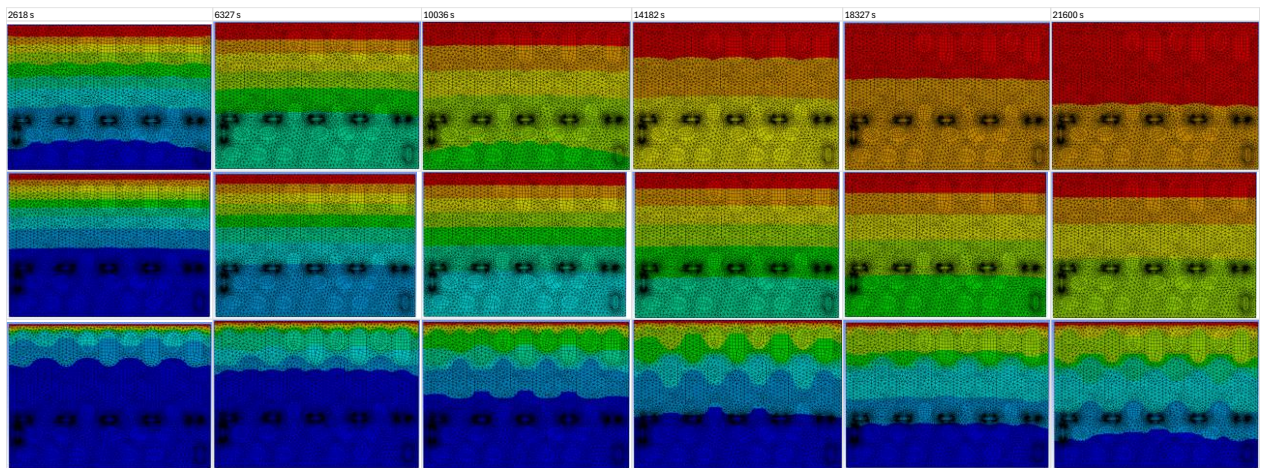


Figura 32. Resultados simulaciones modelo slot, concreto-agua, arcilla-agua, foam-agua.

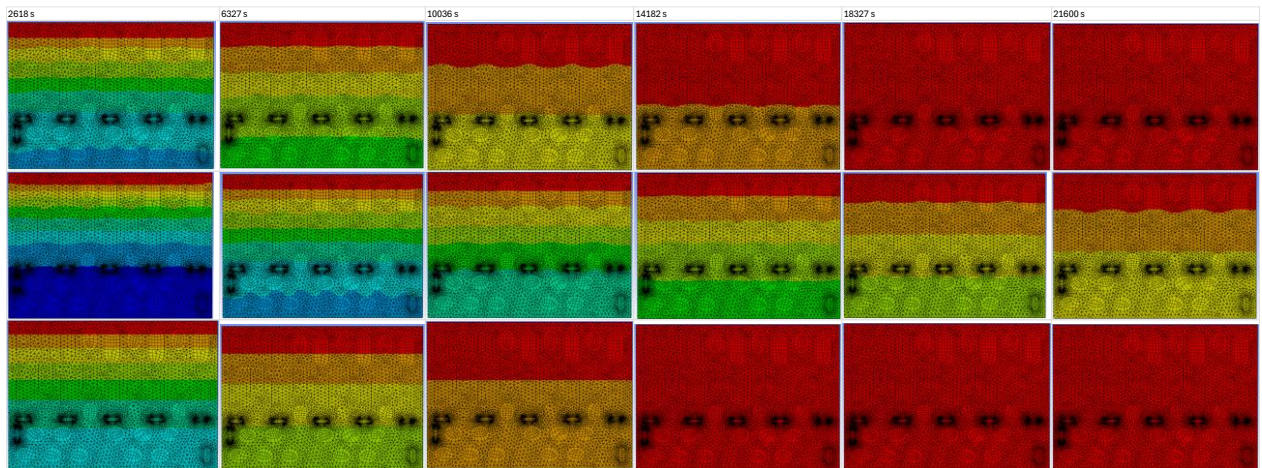


Figura 33. Resultados simulaciones modelo slot, concreto-foam, arcilla-foam, foam-foam.

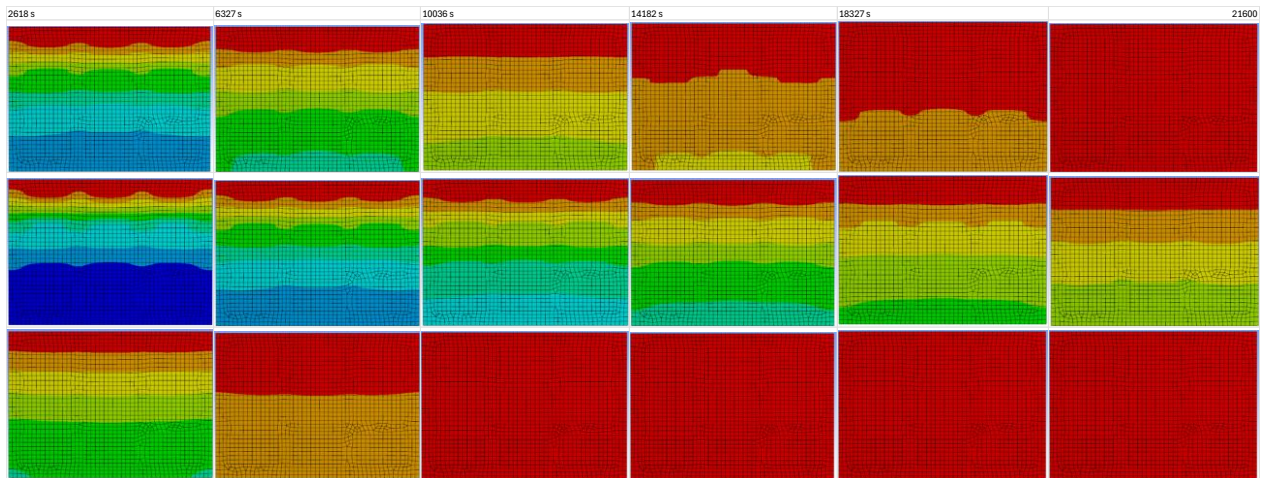


Figura 34. Resultados simulaciones modelo ladrillo tradicional, concreto-aire, arcilla-aire, foam-aire.

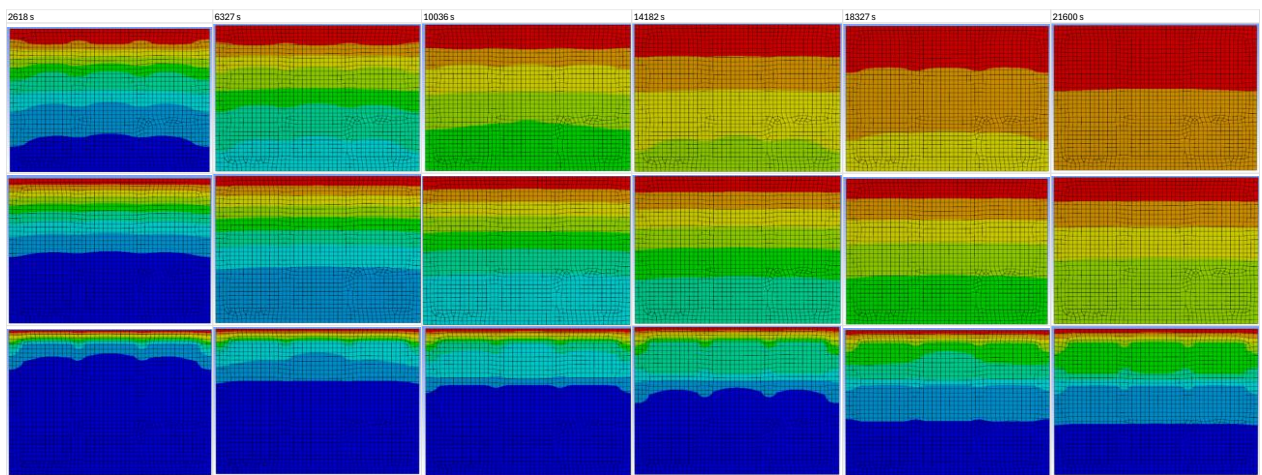


Figura 35. Resultados simulaciones modelo ladrillo tradicional, concreto-agua, arcilla-agua, foam-agua.

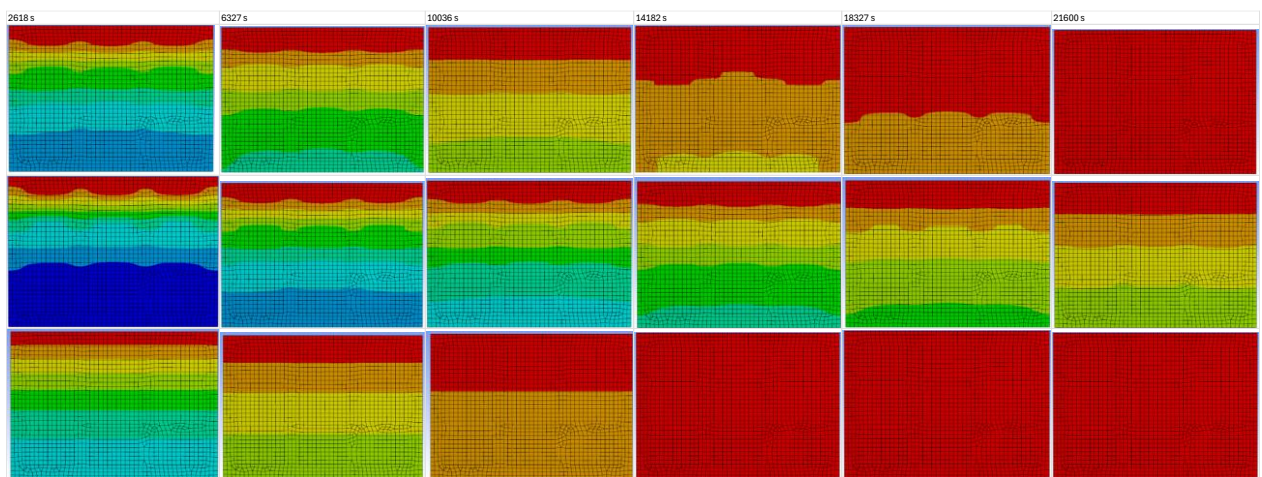


Figura 36. Resultados simulaciones modelo ladrillo tradicional, concreto-foam, arcilla-foam, foam-foam.

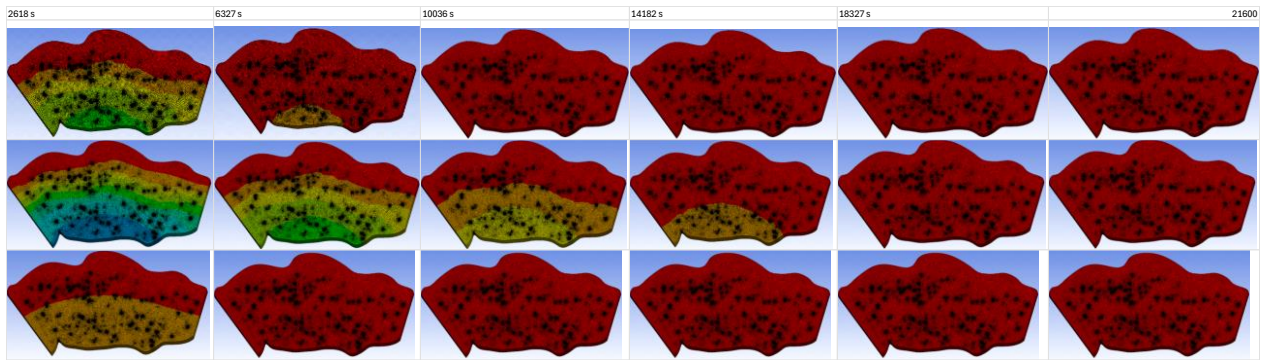


Figura 37. Resultados simulaciones modelo original, concreto-aire, arcilla-aire, foam-aire.

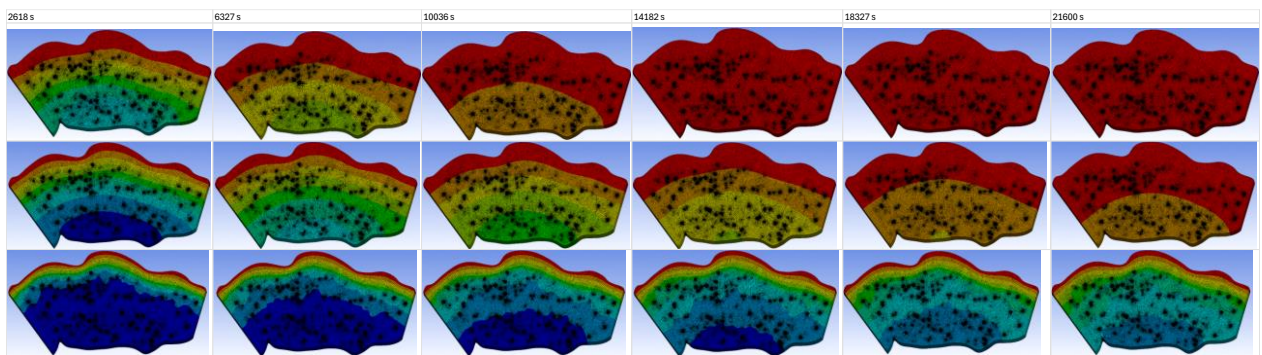


Figura 38. Resultados simulaciones modelo original, concreto-agua, arcilla-agua, foam-agua.

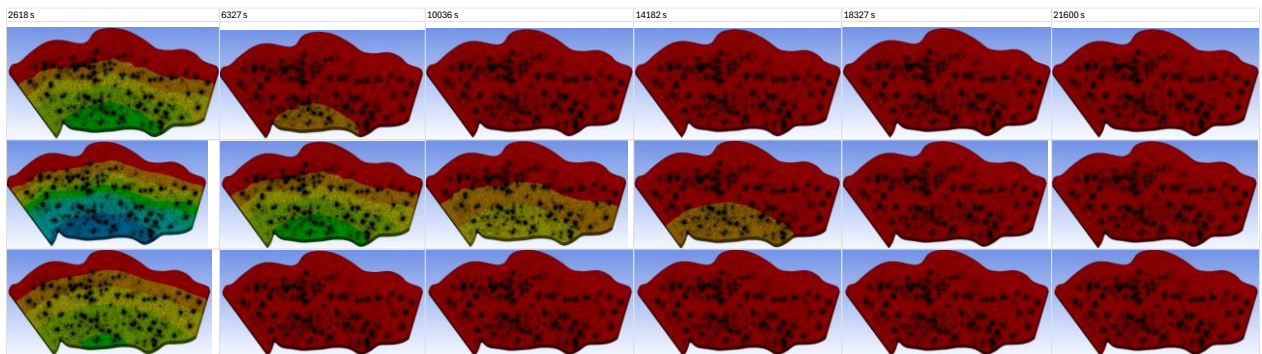


Figura 39. Resultados simulaciones modelo original, concreto-foam, arcilla-foam, foam-foam.

Tabla 2. Distribución de temperaturas internas en las diferentes geometrías con núcleo de concreto y aire como material de relleno.

MODELO	MATERIAL CORE	MATERIAL INTERNO	TEMPERATURA INTERNA	TIEMPO (S)
CUADRADO	CONCRETO	AIRE	48,549	21600
ELÍPTICO	CONCRETO	AIRE	48,904	21600
SLOT	CONCRETO	AIRE	48,7	21600
ORIGINAL	CONCRETO	AIRE	49,9	21600
LADRILLO TRADICIONAL	CONCRETO	AIRE	47,539	21600

Tabla 2: Distribución de temperaturas internas en las diferentes geometrías con núcleo de concreto y aire como material de relleno. Esta tabla muestra las temperaturas internas finales alcanzadas en las simulaciones térmicas de las geometrías cuadrada, elíptica, slot, ladrillo tradicional y modelo bio-inspirado (Balanus), con núcleo de concreto y aire como material interno de relleno.

Tabla 3. Distribución de temperaturas internas en las diferentes geometrías con núcleo de arcilla y aire como material de relleno.

MODELO	MATERIAL CORE	MATERIAL INTERNO	TEMPERATURA INTERNA	TIEMPO (S)
CUADRADO	ARCILLA	AIRE	41,147	21600
ELÍPTICO	ARCILLA	AIRE	42,011	21600
SLOT	ARCILLA	AIRE	41,537	21600
ORIGINAL	ARCILLA	AIRE	49,3	21600
LADRILLO TRADICIONAL	ARCILLA	AIRE	39,337	21600

Tabla 3: Distribución de temperaturas internas en las diferentes geometrías con núcleo de arcilla y aire como material de relleno. Presenta las temperaturas internas finales obtenidas en las simulaciones térmicas de las geometrías cuadrada, elíptica, slot, ladrillo tradicional y modelo bio-inspirado, con núcleo de arcilla y aire como relleno.

Tabla 4. Distribución de temperaturas internas en las diferentes geometrías con núcleo de espuma de poliestireno (foam) y aire como material de relleno.

MODELO	MATERIAL CORE	MATERIAL INTERNO	TEMPERATURA INTERNA	TIEMPO (S)
CUADRADO	ESPUMA POLIESTIRENO	AIRE	49,943	21600
ELÍPTICO	ESPUMA POLIESTIRENO	AIRE	49,879	21600

SLOT	ESPUMA POLIESTIRENO	AIRE	49,9	21600
ORIGINAL	ESPUMA POLIESTIRENO	AIRE	50	21600
LADRILLO TRADICIONAL	ESPUMA POLIESTIRENO	AIRE	49,9	21600

Tabla 4: Distribución de temperaturas internas en las diferentes geometrías con núcleo de espuma de poliestireno (foam) y aire como material de relleno. Muestra los resultados térmicos obtenidos para las geometrías cuadrada, elíptica, slot, ladrillo tradicional y modelo bio-inspirado, con núcleo de foam y aire como material interno de relleno.

Tabla 5. Distribución de temperaturas internas en las diferentes geometrías con núcleo de concreto y agua como material de relleno.

MODELO	MATERIAL CORE	MATERIAL INTERNO	TEMPERATURA INTERNA	TIEMPO (S)
CUADRADO	CONCRETO	AGUA	45,211	21600
ELÍPTICO	CONCRETO	AGUA	46,693	21600
SLOT	CONCRETO	AGUA	46	21600
ORIGINAL	CONCRETO	AGUA	49,7	21600
LADRILLO TRADICIONAL	CONCRETO	AGUA	45,124	21600

Tabla 5: Distribución de temperaturas internas en las diferentes geometrías con núcleo de concreto y agua como material de relleno. Esta tabla presenta los resultados de las simulaciones térmicas para las geometrías cuadrada, elíptica, slot, ladrillo tradicional y modelo bio-inspirado, con núcleo de concreto y agua como material interno.

Tabla 6. Distribución de temperaturas internas en las diferentes geometrías con núcleo de arcilla y agua como material de relleno.

MODELO	MATERIAL CORE	MATERIAL INTERNO	TEMPERATURA INTERNA	TIEMPO (S)
CUADRADO	CONCRETO	FOAM	48,494	21600
ELÍPTICO	CONCRETO	FOAM	48,857	21600
SLOT	CONCRETO	FOAM	48,653	21600
ORIGINAL	CONCRETO	FOAM	49,900	21600
LADRILLO TRADICIONAL	CONCRETO	FOAM	47,485	21600

Tabla 6: Distribución de temperaturas internas en las diferentes geometrías con núcleo de arcilla y agua como material de relleno. Muestra las temperaturas internas finales alcanzadas en las simulaciones térmicas de las geometrías cuadrada, elíptica, slot, ladrillo tradicional y modelo bio-inspirado, con núcleo de arcilla y agua como relleno.

Tabla 7. Distribución de temperaturas internas en las diferentes geometrías con núcleo de espuma de poliestireno (foam) y agua como material de relleno.

MODELO	MATERIAL CORE	MATERIAL INTERNO	TEMPERATURA INTERNA	TIEMPO (S)
CUADRADO	ARCILLA	AGUA	37,893	21600
ELÍPTICO	ARCILLA	AGUA	39,003	21600
SLOT	ARCILLA	AGUA	38,592	21600
ORIGINAL	ARCILLA	AGUA	47,083	21600
LADRILLO TRADICIONAL	ARCILLA	AGUA	38,138	21600

Tabla 7: Distribución de temperaturas internas en las diferentes geometrías con núcleo de espuma de poliestireno (foam) y agua como material de relleno. Presenta los resultados térmicos para las geometrías cuadrada, elíptica, slot, ladrillo tradicional y modelo bio-inspirado, con núcleo de foam y agua como material interno de relleno.

Tabla 8. Distribución de temperaturas internas en las diferentes geometrías con núcleo de concreto y espuma de poliestireno (foam) como material de relleno.

MODELO	MATERIAL CORE	MATERIAL INTERNO	TEMPERATURA INTERNA	TIEMPO (S)
cuadrado	espuma poliestireno	agua	24,538	21600
elíptico	espuma poliestireno	agua	24,513	21600
slot	espuma poliestireno	agua	24,074	21600
original	espuma poliestireno	agua	30,003	21600
ladrillo tradicional	espuma poliestireno	agua	23,593	21600

Tabla 8: Distribución de temperaturas internas en las diferentes geometrías con núcleo de concreto y espuma de poliestireno (foam) como material de relleno. Esta tabla muestra las temperaturas internas alcanzadas en las simulaciones térmicas de las geometrías cuadrada, elíptica, slot, ladrillo tradicional y modelo bio-inspirado, con núcleo de concreto y foam como material de relleno.

Tabla 9. Distribución de temperaturas internas en las diferentes geometrías con núcleo de arcilla y espuma de poliestireno (foam) como material de relleno.

MODELO	MATERIAL CORE	MATERIAL INTERNO	TEMPERATURA INTERNA	TIEMPO (S)
cuadrado	arcilla	foam	41,251	21600
elíptico	arcilla	foam	42,029	21600
slot	arcilla	foam	41,409	21600
original	arcilla	foam	49,331	21600
ladrillo tradicional	arcilla	foam	39,456	21600

Tabla 9: Distribución de temperaturas internas en las diferentes geometrías con núcleo de arcilla y espuma de poliestireno (foam) como material de relleno. Muestra las temperaturas internas finales obtenidas en las simulaciones térmicas de las geometrías cuadrada, elíptica, slot, ladrillo tradicional y modelo bio-inspirado, con núcleo de arcilla y foam como material de relleno.

Tabla 10. Distribución de temperaturas internas en las diferentes geometrías con núcleo de espuma de poliestireno (foam) y espuma de poliestireno (foam) como material de relleno.

MODELO	MATERIAL CORE	MATERIAL INTERNO	TEMPERATURA INTERNA	TIEMPO (S)
cuadrado	espuma poliestireno	foam	49,374	21600
elíptico	espuma poliestireno	foam	49,374	21600
slot	espuma poliestireno	foam	49,375	21600
original	espuma poliestireno	foam	49,9	21600
ladrillo tradicional	espuma poliestireno	foam	49,375	21600

Tabla 10: Distribución de temperaturas internas en las diferentes geometrías con núcleo de espuma de poliestireno (foam) y espuma de poliestireno (foam) como material de relleno. Presenta los resultados térmicos para las geometrías cuadrada, elíptica, slot, ladrillo tradicional y modelo bio-inspirado, con núcleo y material interno de foam.

B. Resultados estáticos:

A continuación, se presentan los resultados de las simulaciones estáticas realizadas mediante el método de elementos finitos, en las que se analizaron cuatro geometrías propuestas: ladrillo, elíptico, cuadrado y slot. Estas simulaciones tenían como objetivo afianzar las geometrías propuestas y evaluar su desempeño estructural bajo una carga de 10 MPa. Se variaron los materiales base, incluyendo concreto, arcilla y espuma de poliestireno expandido (foam), con el fin de

identificar las combinaciones más efectivas en términos de deformación y factor de seguridad. Los resultados permiten identificar las configuraciones que proporcionan la mejor resistencia estructural y estabilidad para cada geometría, considerando tanto la rigidez como la seguridad ante cargas estáticas.

1). Geometrías cargas verticales

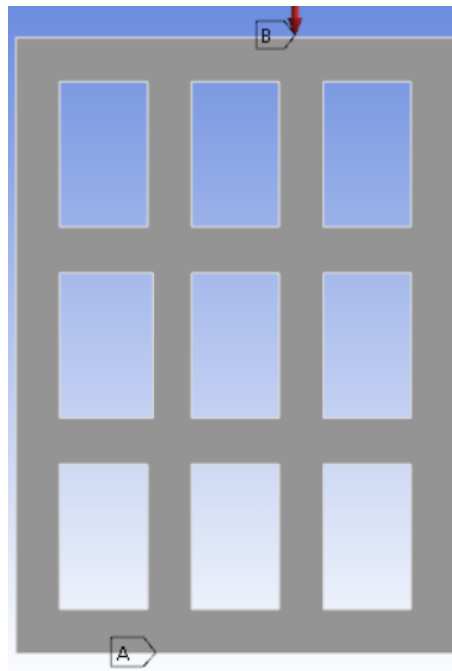


Figura 40. Posicionamiento de carga geometría ladrillo carga vertical.

Tabla 11. resultados estáticos geometría ladrillo tradicional vertical.

GEOMETRÍA	MATERIAL	CARGA	DEFORMACIÓN mm	FACTOR DE SEGURIDAD
LADRILLO	CONCRETO	10 Mpa	0.20474	2.6556
	ARCILLA	10 Mpa	0.17561	0.24825
	FOAM	10 Mpa	416.35	0.36158

Tabla 11: Resultados de deformación y factor de seguridad para la geometría cuadrada bajo carga estática. Esta tabla muestra los resultados de las simulaciones estáticas para la geometría cuadrada

con diferentes materiales de núcleo (concreto, arcilla, foam), mostrando la deformación en milímetros y el factor de seguridad bajo una carga de 10 MPa.

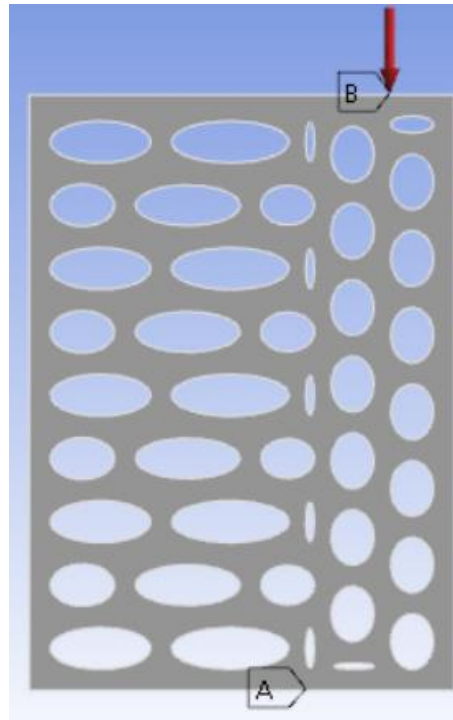


Figura 41. Posicionamiento cargas geometría elíptica carga vertical.

Tabla 12. resultados estáticos geometría elíptica vertical.

GEOMETRÍA	MATERIAL	CARGA	DEFORMACIÓN mm	FACTOR DE SEGURIDAD
ELÍPTICO	CONCRETO	10 Mpa	0.38629	4.8371
	ARCILLA	10 Mpa	0.33091	0.072974
	FOAM	10 Mpa	782.97	0.96698

Tabla 12: Resultados de deformación y factor de seguridad para la geometría elíptica bajo carga estática. Presenta los resultados de las simulaciones estáticas para la geometría elíptica con distintos materiales de núcleo, mostrando la deformación en milímetros y el factor de seguridad bajo carga de 10 MPa.

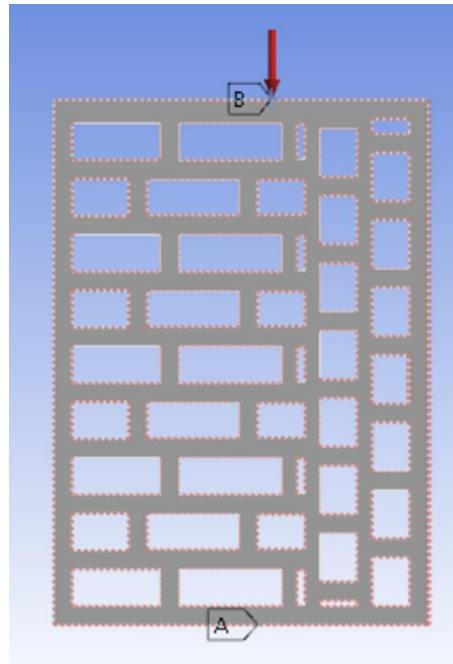


Figura 42. Posicionamiento cargas geometría cuadrada carga vertical.

Tabla 13. resultados estáticos geometría cuadrada vertical.

GEOMETRÍA A	MATERIAL	CARGA	DEFORMACIÓN mm	FACTOR DE SEGURIDAD
CUADRADO	CONCRETO	10 Mpa	0.62181	1.1751
	ARCILLA	10 Mpa	0.53442	1.3942
	FOAM	10 Mpa	1267	0.33916

Tabla 13: Resultados de deformación y factor de seguridad para la geometría slot bajo carga estática. Esta tabla muestra los resultados de las simulaciones estáticas de la geometría slot con diferentes materiales de núcleo (concreto, arcilla, foam), incluyendo la deformación y el factor de seguridad bajo una carga aplicada de 10 MPa.

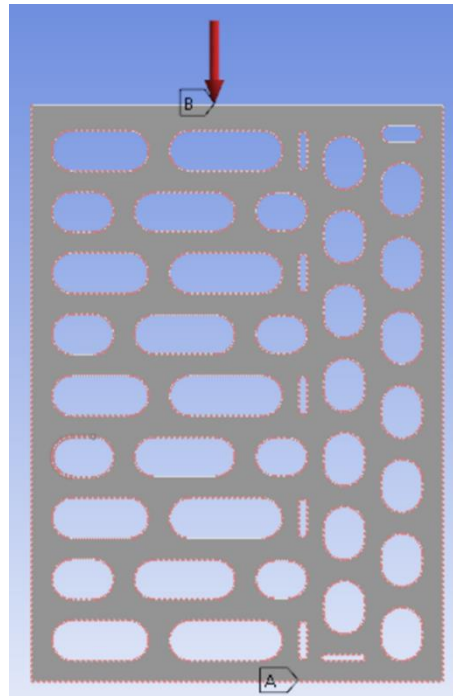


Figura 43. Posicionamiento cargas geometría slot carga vertical.

Tabla 14. resultados estáticos geometría slot vertical.

GEOMETRÍA	MATERIAL	CARGA	DEFORMACIÓN mm	FACTOR DE SEGURIDAD
SLOT	CONCRETO	10 Mpa	4.1442	0.3693
	ARCILLA	10 Mpa	3.5566	2.7236
	FOAM	10 Mpa	8420.1	0.049477

Tabla 14: Resultados de deformación y factor de seguridad para el ladrillo tradicional bajo carga estática. Muestra los resultados de las simulaciones estáticas para el ladrillo tradicional, presentando la deformación en milímetros y el factor de seguridad para diferentes materiales de núcleo bajo una carga de 10 MPa.

2). Geometrías cargas horizontales

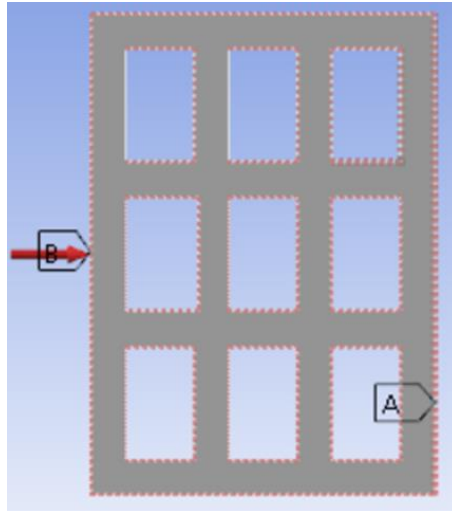


Figura 44. Posicionamiento cargas geometría ladrillo carga horizontal.

Tabla 15. resultados estáticos geometría ladrillo horizontal.

GEOMETRÍA	MATERIAL	CARGA	DEFORMACIÓN mm	FACTOR DE SEGURIDAD
LADRILLO	CONCRETO	10 Mpa	0.23944	3.9165
	ARCILLA	10 Mpa	0.20709	0.14952
	FOAM	10 Mpa	494.56	0.31394

Tabla 15: Resultados de deformación y factor de seguridad para la geometría cuadrada en posición acostada bajo carga estática. Esta tabla presenta los resultados de las simulaciones estáticas para la geometría cuadrada en posición acostada, mostrando la deformación y el factor de seguridad con diferentes materiales de núcleo (concreto, arcilla, foam) bajo una carga de 10 MPa.

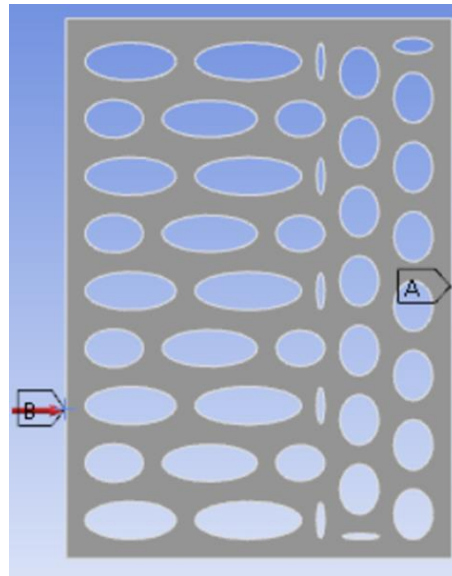


Figura 45. Posicionamiento cargas geometría elíptico carga horizontal.

Tabla 16. resultados estáticos geometría elíptico horizontal.

GEOMETRÍA	MATERIAL	CARGA	DEFORMACIÓN mm	FACTOR DE SEGURIDAD
ELÍPTICO	CONCRETO	10 Mpa	0.1269	2.9557
	ARCILLA	10 Mpa	0.10838	1.3274
	FOAM	10 Mpa	255.96	0.28649

Tabla 16: Resultados de deformación y factor de seguridad para la geometría elíptica en posición acostada bajo carga estática. Muestra los resultados de las simulaciones estáticas para la geometría elíptica en posición acostada, con diferentes materiales de núcleo, mostrando la deformación y el factor de seguridad bajo una carga de 10 MPa.

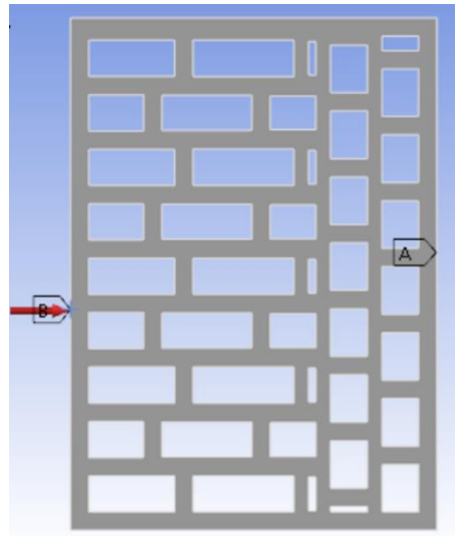


Figura 46. Posicionamiento cargas geometría cuadrado carga horizontal.

Tabla 17. resultados estáticos geometría cuadrado horizontal.

GEOMETRÍA	MATERIAL	CARGA	DEFORMACIÓN mm	FACTOR DE SEGURIDAD
CUADRADO	CONCRETO	10 Mpa	0.18424	1.2446
	ARCILLA	10 Mpa	0.15767	0.14545
	FOAM	10 Mpa	372.74	0.19308

Tabla 17: Resultados de deformación y factor de seguridad para la geometría slot en posición acostada bajo carga estática. Presenta los resultados de las simulaciones estáticas para la geometría slot en posición acostada, con diferentes materiales de núcleo (concreto, arcilla, foam), mostrando la deformación y el factor de seguridad bajo una carga de 10 MPa.

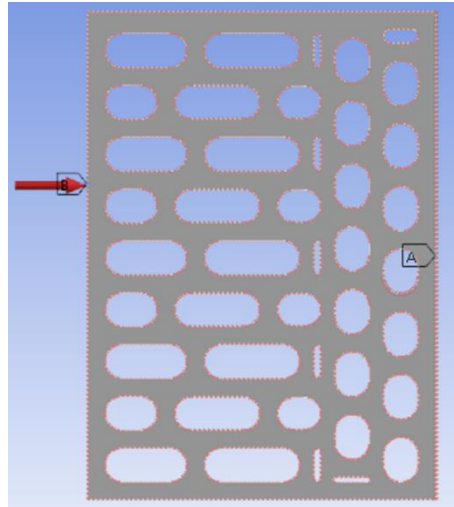


Figura 47. Posicionamiento cargas geometría slot carga horizontal.

Tabla 18. resultados estáticos geometría slot horizontal.

GEOMETRÍA	MATERIAL	CARGA	DEFORMACIÓN mm	FACTOR DE SEGURIDAD
SLOT	CONCRETO	10 Mpa	1.3507	0.27091
	ARCILLA	10 Mpa	1.1555	1.8213
	FOAM	10 Mpa	2733	0.03055

Tabla 18: Resultados de deformación y factor de seguridad para el ladrillo tradicional en posición acostada bajo carga estática. Esta tabla muestra los resultados de las simulaciones estáticas para el ladrillo tradicional en posición acostada, presentando la deformación y el factor de seguridad para diferentes materiales de núcleo bajo una carga de 10 MPa.

VII. DISCUSIÓN

En este trabajo, se evaluó la capacidad de aislamiento térmico y la resistencia estructural de geometrías bio-inspiradas en el Balanus mediante simulaciones térmicas y pruebas estáticas. A continuación, se discuten los resultados obtenidos, centrándose en cómo las propiedades térmicas y estructurales de las geometrías propuestas pueden influir en su viabilidad para aplicaciones prácticas, especialmente en el contexto de construcciones habitacionales.

A. Cumplimiento de los objetivos del estudio

El objetivo general de diseñar un material bio-inspirado con las características geométricas del Balanus fue cumplido. Las simulaciones numéricas y los prototipos impresos en 3D demostraron que las cavidades geométricas del Balanus favorecen la disminución de la transferencia térmica, especialmente cuando se emplean materiales con baja conductividad térmica, como la espuma de poliestireno. Además, las pruebas estructurales revelaron la capacidad de estas geometrías para soportar cargas moderadas, cumpliendo con los requisitos estructurales básicos para su implementación en construcciones.

B. Análisis de las pruebas térmicas

Las simulaciones térmicas fueron fundamentales para analizar la capacidad de retención de calor de las geometrías bio-inspiradas y cómo estas comparan con los ladrillos tradicionales. Los resultados se obtuvieron para distintos materiales de núcleo, incluyendo concreto, arcilla, y espuma de poliestireno expandido (foam), y se evaluaron en combinación con distintos materiales de relleno (aire, agua, foam). Las simulaciones se realizaron en un periodo de 6 horas para garantizar condiciones uniformes.

1). Modelo cuadrado

- **Resultados térmicos:** El modelo cuadrado con núcleo de arcilla y relleno de aire presentó una temperatura interna final de $41,147^{\circ}\text{C}$, mientras que el mismo modelo con espuma de poliestireno como núcleo alcanzó los 49.943°C .
- **Discusión:** Estos resultados muestran que el núcleo de espuma de poliestireno tiene un mejor rendimiento térmico en términos de aislamiento, al mantener una mayor temperatura interna. Esto indica que, aunque el concreto ofrece mayor resistencia estructural, el foam es más eficiente para aplicaciones de aislamiento térmico. La

combinación de geometrías cuadradas con materiales aislantes podría resultar en un balance entre rigidez y capacidad de retención de calor.

2). Modelo elíptico

- **Resultados térmicos:** El modelo elíptico con núcleo de foam y agua alcanzó los 24,513°C, mientras que con foam, la temperatura final fue de 49.879°C.
- **Discusión:** Este modelo mostró un comportamiento similar al cuadrado, donde el foam resultó ser más efectivo en términos de aislamiento térmico. La geometría elíptica, al ofrecer un área de contacto más amplia con el ambiente, favorece la dispersión del calor, pero cuando se combina con un buen material aislante, como el foam, se mejora considerablemente la capacidad de retención térmica.

3). Modelo slot

- **Resultados térmicos:** El modelo slot, con núcleo de concreto y aire, presentó una temperatura interna de 48.7°C. Con foam, alcanzó los 49.9°C.
- **Discusión:** Aunque la geometría slot tiene una mayor superficie de exposición, el foam nuevamente demostró su capacidad superior para mantener el calor en su interior. Sin embargo, es importante tener en cuenta que, debido a su alta deformación bajo cargas estáticas, el uso de esta geometría debe evaluarse cuidadosamente en términos de resistencia estructural.

4). Modelo tradicional (ladrillo)

- **Resultados térmicos:** El ladrillo tradicional con núcleo de concreto y aire mostró una temperatura interna final de 47.539°C, ligeramente inferior a las geometrías bio-inspiradas.
- **Discusión:** Los ladrillos tradicionales demostraron un buen comportamiento térmico, pero inferior a las geometrías inspiradas en el Balanus. Esto sugiere que la adopción de

geometrías más complejas podría mejorar el aislamiento térmico sin necesidad de alterar drásticamente los materiales constructivos convencionales.

5). Modelo original del Balanus

- **Resultados térmicos:** El modelo basado en la geometría del Balanus con núcleo de concreto y relleno de aire alcanzó una temperatura de 49.9°C, lo que lo posiciona como la opción más eficiente para el aislamiento térmico.
- **Discusión:** El modelo del Balanus demostró ser el más efectivo en términos de aislamiento térmico, especialmente cuando se utiliza con espuma de poliestireno. La disposición de sus cavidades internas favorece una mayor retención de calor en comparación con las geometrías convencionales, lo que sugiere que la naturaleza bio-inspirada de este diseño tiene un gran potencial para aplicaciones en la construcción.

C. Análisis de las pruebas estáticas

Las pruebas estáticas evaluaron la resistencia estructural de las distintas geometrías bajo una carga de 10 MPa. Los resultados revelaron que el concreto es el material que mejor balancea rigidez y estabilidad estructural en la mayoría de las geometrías evaluadas.

1). Geometría Cuadrada

- **Resultados estructurales:** El concreto presentó una deformación de 0.62181 mm con un factor de seguridad de 1.1751, mientras que la arcilla, aunque con menor deformación, tuvo un factor de seguridad insuficiente.
- **Discusión:** La geometría cuadrada mostró un buen desempeño en términos estructurales cuando se utilizó concreto. Este equilibrio entre resistencia y estabilidad térmica sugiere que esta geometría podría ser adecuada para aplicaciones donde se requiera tanto soporte de carga como aislamiento térmico moderado.

2). Geometría Elíptica

- **Resultados estructurales:** La arcilla destacó con una deformación baja (0.33091 mm) y un buen factor de seguridad (0.072974), aunque inferior al concreto.
- **Discusión:** Esta geometría podría ser especialmente útil en aplicaciones ligeras o en combinaciones de materiales donde el aislamiento térmico sea la prioridad. La baja deformación y el buen desempeño de la arcilla sugieren que es una opción viable para construcciones más estilizadas.

3). Geometría Slot

- **Resultados estructurales:** El concreto presentó una deformación mayor (4.1442 mm), mientras que el foam resultó inadecuado con una alta deformación.
- **Discusión:** La geometría slot, aunque es efectiva en la retención de calor, presenta una alta deformación bajo carga, lo que sugiere que debe ser utilizada en aplicaciones donde el aislamiento térmico sea la prioridad, pero las cargas estructurales sean mínimas.

4). Modelo tradicional (ladrillo)

- **Resultados estructurales:** El ladrillo tradicional con concreto presentó una deformación de 0.20474 mm, lo que lo posiciona como una opción sólida en términos de estabilidad estructural.
- **Discusión:** Aunque las geometrías bio-inspiradas mostraron mejores resultados térmicos, el ladrillo tradicional sigue siendo una opción robusta en términos estructurales, especialmente para construcciones donde la prioridad sea la resistencia y no el aislamiento térmico avanzado.

D. Comparación entre pruebas térmicas y estructurales

Los resultados de las pruebas térmicas y estáticas sugieren que existe un equilibrio entre el aislamiento térmico y la resistencia estructural. Si bien las geometrías bio-inspiradas, especialmente la del Balanus, ofrecen un mejor rendimiento en términos de aislamiento térmico, el concreto es necesario para garantizar la estabilidad estructural en la mayoría de los casos.

Las simulaciones revelan que la espuma de poliestireno es el material que ofrece el mejor aislamiento, pero presenta problemas significativos en términos de resistencia a las cargas, lo que limita su uso en aplicaciones estructurales. Por otro lado, el concreto, aunque tiene una menor capacidad de aislamiento, sigue siendo el material más versátil cuando se busca un balance entre aislamiento y resistencia.

E. Implicaciones prácticas

La adopción de estas geometrías bio-inspiradas en aplicaciones de aislamiento térmico podría representar un avance significativo en la eficiencia energética de las construcciones habitacionales. Las pruebas térmicas y estructurales muestran que es posible mejorar el aislamiento térmico utilizando geometrías bio-inspiradas sin comprometer la estabilidad estructural, siempre que se seleccione el material adecuado.

F. Limitaciones y futuros estudios

El estudio presenta algunas limitaciones, principalmente relacionadas con el uso de condiciones controladas en las simulaciones térmicas y estructurales. Sería recomendable realizar experimentos en condiciones climáticas reales para evaluar el rendimiento a largo plazo de los materiales bio-inspirados. Además, explorar otros materiales y combinaciones, como nuevos polímeros y bio-materiales, podrían ofrecer soluciones aún más eficientes.

VIII.CONCLUSIONES

- El concreto demostró ser la mejor opción en términos de balance entre deformación y resistencia estructural en geometría como el cuadrado, mientras que la arcilla sobresalió en geometrías elípticas, mostrando una menor deformación y un factor de seguridad superior.
- Si bien el foam ofrece un excelente rendimiento térmico, mostró una alta deformación y un bajo factor de seguridad, descartándolo como material adecuado para aplicaciones estructurales que requieren soportar cargas. Sin embargo, su capacidad de aislamiento lo hace ideal para mejorar la eficiencia energética en construcciones.
- Las geometrías inspiradas en el Balanus, en combinación con espuma de poliestireno, demostraron ser más eficientes térmicamente que los ladrillos tradicionales, lo que resalta su potencial para reducir la transferencia de calor en construcciones habitacionales.
- La geometría del Balanus mostró el mejor desempeño en términos de aislamiento térmico, especialmente al emplear espuma de poliestireno. Su combinación con concreto proporciona un balance entre resistencia estructural y eficiencia térmica, haciéndola una opción versátil para aplicaciones en la construcción.
- La selección adecuada de materiales es clave para optimizar tanto el rendimiento térmico como la resistencia estructural. El concreto destaca por su durabilidad y capacidad de carga, mientras que el foam es más eficiente para reducir la transferencia de calor, aunque requiere soporte adicional para resistir cargas.
- Las geometrías bio-inspiradas tienen el potencial de revolucionar el diseño de materiales de construcción, no solo por su capacidad de aislamiento térmico, sino también por la optimización en el uso de materiales y la distribución de cargas, y mejorando la eficiencia en calefacción y refrigeración en climas extremos, lo que también contribuye a la sostenibilidad ambiental a largo plazo.

IX. REFERENCIAS

- [1] Vogel, S. (2003). *Nature's Designs and the Future of Technology*. En M. Beleña (Ed.), *Technology and Culture* (pp. 29-36). Greenwood Press.
- [2] *Biomimetics: Biologically Inspired Technologies*. (2005). En N. Muñoz (Ed.), *Biomimetics* (pp. 1-8).
- [3] Vincent, J. F. V. (2009). *Biomimetic Patterns in Architectural Design*. *Architectural Design*, 79(6), 74-81.
- [4] Forbes, P. (2005). *The Biomimetic Imperative*. En Y. Bar-Cohen (Ed.), *Biomimetics: Biologically Inspired Technologies* (pp. 9-16).
- [5] Benyus, J. M. (1997). *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*. HarperCollins Publishers.
- [6] Lepora, N. F., Verschure, P., & Prescott, T. J. (2013). The state of the art in biomimetics. *Bioinspiration & Biomimetics*, 8(1), 013001.
- [7] Vincent, J. F., Bogatyreva, O. A., Bogatyrev, N. R., Bowyer, A., & Pahl, A. K. (2006). *Biomimetics: Its Practice and Theory*. *Journal of the Royal Society Interface*, 3(9), 471-482.
- [8] Benyus, J. M. (1997). *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*. HarperCollins Publishers.
- [9] Bar-Cohen, Y. (Ed.). (2011). *Biomimetics: Nature-Based Innovation*.
- [10] Gebeshuber, I. C., Gruber, P., & Drack, M. (2009). A Grim Eternity: Perpetuity in Biomimetics. *International Journal of Design & Nature and Ecodynamics*, 4(1), 47-57.
- [11] Vincent, J. F., Bogatyreva, O. A., Bogatyrev, N. R., Bowyer, A., & Pahl, A. K. (2006). *Biomimetics: Its Practice and Theory*. *Journal of the Royal Society Interface*, 3(9), 471-482.
- [12] Pawlyn, M. (2016). *Biomimicry in Architecture*. RIBA Publishing.
- [13] Anderson, D. (1994). *Barnacles: Structure, Function, Development and Evolution*. Países Bajos: Springer Netherlands.
- [14] Xiao M, Li Y, Allen MC, Deheyn DD, Yue X, Zhao J, Gianneschi NC, Shawkey MD, Dhinojwala A. Bio-Inspired Structural Colors Produced via Self-Assembly of Synthetic Melanin Nanoparticles. *ACS Nano*. 2015 May 26;9(5):5454-60. doi: 10.1021/acsnano.5b01298. Epub 2015 May 12. PMID: 25938924.
- [15] Wegst UG, Schecter M, Donius AE, Hunger PM. Biomaterials by freeze casting. *Philos Trans A Math Phys Eng Sci*. 2010 Apr 28;368(1917):2099-121. doi: 10.1098/rsta.2010.0014. PMID: 20308117.
- [16] Shi Y, Zhou K, Li D, Guyonnet V, Hincke MT, Mine Y. Avian Eggshell Membrane as a Novel Biomaterial: A Review. *Foods*. 2021 Sep 14;10(9):2178. doi: 10.3390/foods10092178. PMID: 34574286; PMCID: PMC8466381.
- [17] Qu, Changqing, et al. "A bioinspired sandwiched polymer membrane with superior thermal

- insulating and flame-retardant performances." *ACS applied materials & interfaces* 8.17 (2016): 10948-10955.
- [18] Doineau, E.; Cathala, B.; Benezet, J.-C.; Bras, J.; Le Moigne, N. Development of Bio-Inspired Hierarchical Fibres to Tailor the Fibre/Matrix Interphase in (Bio)composites. *Polymers* 2021, 13, 804. <https://doi.org/10.3390/polym13050804>.
- [19] Cengel, Y. A., Ghajar, A. J. (2020) *Transferencia de calor y masa: fundamentos y aplicaciones*. McGraw-Hill.
- [20] J. Cucuyame Morales, "Caracterización mecánica de dos tipos de tubos construidos por gusanos marinos (Annelida: Polychaeta)", Trabajo de grado profesional, Ingeniería Mecánica, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2022.