



Centro de Investigación Científica de Yucatán A.C.

Posgrado en Materiales Poliméricos

**Generación de un material compuesto biomimético usando
simulaciones computacionales con el método de los
elementos finitos**

Tesis que presenta:

I.F. Danny Gonzalo Chan Collí

En opción al título de:

Maestro en Ciencias

(Materiales Poliméricos)

Mérida, Yucatán, México a mayo de 2022

DECLARACIÓN DE PROPIEDAD

Declaro que la información contenida en la sección de Materiales y Métodos, los Resultados y Discusión de este documento proviene de las actividades de investigación realizadas durante el período que se me asignó para desarrollar mi trabajo de tesis, en las Unidades y Laboratorios del Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., y que a razón de lo anterior y en contraprestación de los servicios educativos o de apoyo que me fueron brindados, dicha información, en términos de la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley de la Propiedad Industrial, le pertenece patrimonialmente a dicho Centro de Investigación. Por otra parte, en virtud de lo ya manifestado, reconozco que de igual manera los productos intelectuales o desarrollos tecnológicos que deriven o pudieran derivar de lo correspondiente a dicha información, le pertenecen patrimonialmente al Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., y en el mismo tenor, reconozco que si derivaren de este trabajo productos intelectuales o desarrollos tecnológicos, en lo especial, estos se registrarán en todo caso por lo dispuesto por la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley de la Propiedad Industrial, en el tenor de lo expuesto en la presente Declaración.



Danny Gonzalo Chan Collí



RECONOCIMIENTO

Por medio de la presente, hago constar que el trabajo de tesis de **Danny Gonzalo Chan Collí** titulado “**Generación de un material compuesto biomimético usando simulaciones computacionales con el método de los elementos finitos**” fue realizado en la Unidad de Materiales, línea de investigación en Materiales Compuestos y Nanomateriales, del Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., bajo la dirección del **Dr. Pedro Jesús Herrera Franco** así como la codirección del **Dr. Adrián Hernández Pérez**, y pertenece al Programa de Posgrado en Materiales Poliméricos de este Centro.

Atentamente

Dra. Cecilia Hernández Zepeda
Directora de Docencia

Mérida, Yucatán, México, a 25 de mayo de 2022.

Agradecimientos

Esta investigación fue posible gracias al financiamiento del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) con el proyecto para Ciencia Básica (2017-2018) No. A1-S-8864 y la beca de maestría que recibí No. 1035692.

Un gran agradecimiento al CICY como institución por la formación profesional recibida. Se agradece de forma especial al Laboratorio de Cómputo Avanzado de la Unidad de Materiales del CICY por el espacio y equipos facilitados.

Agradezco infinitamente a mis directores de tesis todo el apoyo que recibí de su parte durante mi estancia en el CICY, en particular al Dr. Emmanuel Alejandro Flores Johnson por la orientación y todo el conocimiento transmitido para el desarrollo de la investigación. De igual manera, al Dr. Pedro Jesús Herrera Franco por su guía e instrucciones provechosas. Un agradecimiento a mi co-director de tesis, el Dr. Adrián Hernández Pérez por sus correcciones y comentarios oportunos.

Agradezco enormemente a cada uno de los que conformaron el comité de revisión por sus comentarios y aportaciones específicas al proyecto. En particular, a mi tutor interno, el Dr. Carlos Rolando Ríos Soberanis y a mi tutor externo, el Dr. Juan Vicente Méndez Méndez. Igualmente agradezco al Dr. José Gonzalo Carrillo Baeza quien fue mi revisor interno y de nueva cuenta al Dr. Emmanuel Alejandro Flores Johnson como revisor externo.

Un agradecimiento muy especial a mi Papá Honorio Chan Collí y a mi Mamá María Martina Collí Chan por su apoyo personal invaluable e incondicional en todos los días de la maestría y la vida.

Un agradecimiento más a mis hermanas Rocío y Rebeca, y a mi hermano Rogelio por su apoyo en cada una de mis decisiones.

Un último agradecimiento a Cindy, Baltazar, Jesús y Helbert por su muestra de compañerismo y amistad en los dos años de maestría.

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mi Papá quien ha sido el mejor maestro de filosofía, y a mi Mamá quien ha sido la mejor maestra de desarrollo personal de mi vida. Con la compañía de Dios esto es por ustedes y sus nietos Ailton, Alexa, Yuno, Tadeo, Matías, ..., en el futuro.

Índice

Lista de Figuras	iv
Lista de Tablas	vii
Resumen	viii
Abstract	ix
Introducción	1
1 Antecedentes	2
1.1 Biomimetismo	2
1.2 Estructura jerárquica de la concha nácar	3
1.3 Biomimetismo de la concha nácar y su modelado por FEM	5
Justificación.....	11
2 Marco teórico	12
2.1 Biomimetismo	12
2.2 Materiales compuestos multicapa.....	13
2.3 Mecanismos de la concha nácar	15
2.3.1 Cualidades de interés.....	15
2.3.2 Mecanismo de deformación	17
2.3.3 Mecanismo de endurecimiento.....	18
2.3.4 Mecanismo de fractura	20
2.4 Diagramas Voronoi.....	21
2.5 El Método de los Elementos Finitos.....	23
2.6 Ecuación constitutiva del FEM.....	24
2.6.1 Definición de modelos constitutivos de materiales.....	24
2.6.1.1 Plasticidad de Johnson-Cook	25
2.6.1.2 Modelado de daño y falla.....	27
2.6.2 Elementos cohesivos	28
2.6.2.1 Modelo de Tracción-Separación	28
2.6.2.2 Modelado de daño y falla del elemento cohesivo	29
2.7 Prueba de flexión	30
2.7.1 Flexión a tres puntos	31
2.7.2 Flexión a cuatro puntos	33
2.8 Impacto dinámico	35

2.8.1	Impacto transversal en cuerpos flexibles	36
	Hipótesis.....	37
	Objetivo.....	37
	General:	37
	Específicos:.....	37
3	Metodología	38
3.1	Determinación de los parámetros de entrada.....	39
3.2	Validación de las propiedades de los materiales usados en los modelos FEM	41
3.3	Generación de plaquetas tipo Voronoi y dimensiones de viga para los modelos FEM de los materiales compuestos biomiméticos.	43
3.4	Análisis de los materiales compuestos biomiméticos usando simulaciones FEM	46
3.4.1	Simulación FEM de la prueba de flexión a tres puntos.....	47
3.4.2	Simulación FEM de la prueba de flexión a cuatro puntos	48
3.4.3	Simulación FEM de la prueba de impacto	49
3.5	Análisis de convergencia	50
3.6	Estudio paramétrico de las vigas biomiméticas.....	51
3.7	Análisis de los resultados	52
4	Resultados	53
4.1	Validación de las simulaciones FEM	53
4.1.1	Validación del Aluminio 7075	53
4.1.2	Validación de la resina epóxica y los elementos cohesivos	54
4.2	Diagramas Voronoi.....	57
4.3	Análisis de convergencia de malla del modelo FEM	59
4.4	Resultados de la simulación FEM de la prueba de flexión a tres puntos	60
4.4.1	Discusión de los resultados de flexión a 3 puntos.....	64
4.5	Flexión a cuatro puntos.....	66
4.5.1	Comparación de los resultados de flexión a tres puntos con los de flexión a cuatro puntos	68
4.6	Impacto dinámico	72
4.6.1	Discusión de las pruebas de impacto.....	76
4.6.2	Impacto a distintas velocidades.....	78
	Conclusiones	79
	Perspectivas a Futuro	81

Referencias	82
Anexo A. Código generador de diagramas Voronoi en Mathematica.	86
Anexo B. Evolución de daño a 10 m/s velocidad de impacto.	87

Lista de Figuras

Figura 1. Principales características estructurales del nácar. (a) Nácar iridiscente en la parte interna de la concha, (b) corte transversal de la concha, (c) SEM de plaquetas poligonales dispuestas en forma de ladrillo y mortero, (d) traslape entre plaquetas, (e) ondulación presente en las plaquetas. Imagen adaptada de [11].	4
Figura 2. (a) Nácar tipo laminar presente en los bivalvos y (b) columnar en los gasterópodos [12].	4
Figura 3. SEM a color del nácar de la concha del <i>Nautillus</i> : (a) porosidad en la superficie de una plaqueta de aragonita y (b) biopolímero en la superficie de las plaquetas [13].	5
Figura 4. (a) Modelado de un material bioinspirado en la concha nácar sometido a impacto; (b) resultado experimental y (c) análisis por FEM [21].	7
Figura 5. Modelo de elemento finito del nácar con plaquetas hexagonales [18].	7
Figura 6. Modelo micromecánico tipo concha nácar evaluado por FEM [26].	8
Figura 7. Modelo micromecánico tipo concha nácar sometido a flexión de cuatro puntos [27].	9
Figura 8. Modelos de impacto dinámico por medio del FEM. (a) Placas poliméricas [17] y (b) placas metálicas [20].	10
Figura 9. Organismos de la naturaleza y su funcionalidad destacada, adaptado de Bhushan [1].	13
Figura 10. Desplazamientos y esfuerzos transversales de una estructura multicapa [29].	15
Figura 11. Energía de fractura de materiales compuestos naturales (hueso, nácar, nácar artificial Al/PMMA) y el de sus constituyentes individuales. Adaptado de Wegst [32].	16
Figura 12. Desacoplamiento acumulativo de plaquetas por tensión [33].	17
Figura 13. Mecanismos de disipación de energía en el nácar [34].	19
Figura 14. Propagación y desviación de una grieta en el nácar [35].	20
Figura 15. (a) Trazado de las bisectrices para la generación de un diagrama Voronoi y (b) triangulación de Delaunay. Tomado de [37].	21
Figura 16. Ejemplos de patrones Voronoi en la naturaleza, adaptada de Dierking et al. [36].	22
Figura 17. Discretización en elementos finitos de un medio continuo [39].	23
Figura 18. Curva típica de un esfuerzo uniaxial y deformación en un espécimen metálico [42].	25
Figura 19. Modelo de respuesta T-S en elementos cohesivos [42].	30
Figura 20. (a) Configuración de flexión a tres puntos, (b) distribución longitudinal del momento flector y su valor máximo y (c) distribución longitudinal del esfuerzo cortante. Tomado de Carlsson et al. [46].	31
Figura 21. Esfuerzos existentes en una viga bajo flexión de tres puntos [46].	32
Figura 22. (a) Configuración de flexión a cuatro puntos con carga a un medio, (b) la distribución y valor máximo del momento flector y (c) distribución del esfuerzo cortante [46].	33
Figura 23. (a) Configuración de flexión a cuatro puntos con carga a un tercio, (b) la distribución y valor máximo del momento flector y (c) la distribución del esfuerzo cortante [46].	34
Figura 24. Proceso metodológico del diseño y simulaciones FEM del material compuesto biomimético.	38
Figura 25. Dimensiones del modelo de la probeta para la prueba de tensión del aluminio y condiciones de frontera aplicadas.	41
Figura 26. Junta T evaluada por Carneiro y Campilho [53]. (a) Arreglo experimental, (b) simulación de una parte seccional con las condiciones de frontera utilizadas.	42

Figura 27. Procedimiento para la generación de diagramas 2D Voronoi. (a) Arreglo de cuadrados, (b) traslado de puntos generadores a una distancia aleatoria, (c) diagrama Voronoi resultante y (d) micrografía de Barthelat et al. [5]de la superficie del nácar.	43
Figura 28. Proceso de extrusión de los diagramas 2D Voronoi usando un software CAD.	44
Figura 29. Aspecto de la viga biomimética para las simulaciones de las pruebas de flexión e impacto.	45
Figura 30. Restricción tipo Tie entre nodos de la capa cohesiva y partes sólidas [42].	46
Figura 31. Modelo FEM de la prueba de flexión a tres puntos de la viga biomimética.	47
Figura 32. Modelo FEM de la prueba de flexión a cuatro puntos de la viga biomimética.	48
Figura 33. Modelo FEM y condiciones de frontera de la prueba de impacto dinámico.	49
Figura 34. Aspecto de la malla del modelo FEM de las vigas monolíticas según el número de elementos, tamaño global y número de elementos.	50
Figura 35. (a) Curva Esfuerzo-Deformación de la prueba de tensión experimental y la simulación numérica por FEM. (b) Espécimen del Aluminio después de la fractura en la simulación.	53
Figura 36. (a) Fuerza máxima de la prueba de delaminación experimental y numérica por medio del FEM. (b) Junta T simulada y proceso de eliminación (desprendimiento) de los elementos cohesivos.	55
Figura 37. (a) Curva esfuerzo-deformación de las resinas epóxicas simuladas, (b1) esfuerzo normal de Araldite 2015 y (b2) esfuerzo normal de Betamate 1045.	56
Figura 38. Distribución de las áreas de los polígonos Voronoi según la dispersión de los puntos generadores.	57
Figura 39. (a) Aspecto de los diagramas Voronoi con distintos valores de dispersión “d” de los puntos generadores. Conforme “d” aumenta de 0.1 a 0.5 los polígonos son más visualmente aproximados a (b) la micrografía de la superficie del nácar obtenida por Barthelat et al. [5].	58
Figura 40. Fuerza máxima y tiempo de simulación obtenidos según el tamaño y el número de elementos en la simulación FEM de prueba de flexión de tres puntos de una viga monolítica.	59
Figura 41. (a) Curvas fuerza-desplazamiento de la viga monolítica (VM) y las vigas biomiméticas (VB1A y VB2A) unidas por el adhesivo Araldite y (b) distribución de esfuerzos a los 10 mm de desplazamiento.	61
Figura 42. (a) Curvas fuerza-desplazamiento de las vigas biomiméticas unidas por el adhesivo Betamate y su (b) concentración de esfuerzos a los 10 mm de desplazamiento.	62
Figura 43. Comparación de las curvas fuerza-desplazamiento de las vigas biomiméticas según el adhesivo utilizado en las vigas de (a) capas continuas (VB1) y (b) Voronoi (VB2).	63
Figura 44. Absorción de energía acumulada en las vigas hasta los 10 mm de desplazamiento sometidas a flexión a tres puntos.	65
Figura 45. Concentración de esfuerzos en las capas cohesivas del Araldite en la viga de capas continuas a (a) 1.66 mm y (b) 1.83 mm de desplazamiento.	66
Figura 46. Curva fuerza-desplazamiento de las vigas sometidas a flexión a cuatro puntos.	67
Figura 47. Curva esfuerzo-deformación de la VM en flexión a tres y cuatro puntos.	68
Figura 48. Concentración de esfuerzos en la VM en flexión a (a) cuatro y (b) tres puntos.	69
Figura 49. Curvas esfuerzo deformación de la (a) VB1A y (b) VB1B, en flexión a cuatro y tres puntos.	70

Figura 50. Concentración de esfuerzos de la VB1A (a) en el aluminio y (b) en el adhesivo, en flexión a cuatro y tres puntos.	70
Figura 51. Curva esfuerzo-deformación de la (a) VB2A y (b) VB2B, en flexión de cuatro y tres puntos.	71
Figura 52. Concentración de esfuerzos de la VB2A en flexión de (a) cuatro y (b) tres puntos.....	71
Figura 53. (a) Curvas fuerza-desplazamiento de las vigas biomiméticas unidas por Araldite sometidas a impacto (10 m/s) y (b) distribución de esfuerzos a los 10 mm.	73
Figura 54. (a) Curvas fuerza-desplazamiento de las vigas biomiméticas unidas por Betamate sometidas a impacto (10 m/s) y (b) distribución de esfuerzos a los 10 mm.	74
Figura 55. Comparación de las curvas fuerza-desplazamiento de las vigas biomiméticas con diferentes adhesivos: (a) vigas de capas continuas y (b) vigas con plaquetas voronoi.	75
Figura 56. Desplazamiento de las vigas biomiméticas y monolítica a los 2 ms, sometidas a un impacto de 10 m/s.	76
Figura 57. Energía absorbida contra desplazamiento sufrido por las vigas biomiméticas y monolítica en un tiempo de 2 ms, sujetos a un impacto de 10 m/s.	77
Figura 58. Velocidad del impactador contra tiempo en las vigas sometidas a impacto.	77
Figura 59. Velocidades residuales de las pruebas de impacto a 10 y 20 m/s de la viga monolítica y las vigas biomiméticas unidas con (a) Araldite y (b) Betamate, a tiempo de 1 ms.	78

Lista de Tablas

Tabla 1. Clasificación de los mecanismos de endurecimiento presentes en el nácar. Adaptado de Kakisawa y Sumitomo [8].	19
Tabla 2. Propiedades y parámetros del modelo Johnson-Cook para la aleación de Aluminio 7075-T651 [16, 55-57].	39
Tabla 3. Propiedades y parámetros para la resina epóxica Araldite 2015 [53].	40
Tabla 4. Propiedades y parámetros para la resina epóxica Betamate 1044 [54].	40
Tabla 5. Dimensiones de la viga para pruebas de flexión e impacto.	45
Tabla 6. Dimensiones geométricas de la Viga biomimética y el nácar natural.	45
Tabla 7. Características de las vigas evaluadas en las simulaciones FEM.	51
Tabla 8. Valores numéricos de las propiedades a tensión del Aluminio 7075-T651.	54
Tabla 9. Fuerza máxima y energía absorbida por las vigas sometidas a flexión a tres puntos.	64
Tabla 10. Fuerza máxima y energía absorbida por las vigas sometidas a flexión a cuatro puntos.	67
Tabla 11. Fuerza máxima y energía absorbida por las vigas sometidas a impacto de 10 m/s.	74

Resumen

El nácar presente en la concha de algunos moluscos es un material compuesto multicapa conformado en un 95% en volumen de plaquetas poligonales con lados desiguales (teselación de Voronoi) hechas del mineral aragonita, unidas por medio de un biopolímero orgánico (5% en volumen). La arquitectura interna de los componentes, así como sus propiedades físicas y químicas individuales dan lugar a múltiples mecanismos que actúan de manera sinérgica para la disipación de energía mecánica de deformación. Con el objetivo de comprender los valores altos de tenacidad que presenta este material y diseñar un nuevo material compuesto de ingeniería (biomimético) se ha desarrollado una metodología capaz de crear nácar artificial hecho de aluminio y resina polimérica y evaluar su desempeño mecánico usando simulaciones computacionales con el Método de los Elementos Finitos (FEM por sus siglas en inglés). Se modelaron dos tipos diferentes de vigas biomiméticas: con capas onduladas continuas (VB1) y con capas onduladas de plaquetas poligonales tipo Voronoi (VB2). La fase rígida de aluminio AA7075-T651 fue modelada con el modelo plástico de Johnson-Cook. Para el adhesivo, se modelaron dos adhesivos epoxi por separado, el Araldite 2015 y el Betamate 1044, cuya respuesta se basó en un elemento cohesivo bilineal con un criterio de tracción-separación. Los resultados numéricos generados en el programa FEM Abaqus/Explicit de las vigas biomiméticas ante esfuerzos de flexión a tres puntos e impacto dinámico se compararon con los de una viga monolítica (VM).

El resultado más destacable en flexión fue que las VB1 unidas con Araldite (VB1A) y Betamate (VB1B) fueron capaces de mantener una mayor carga que la VM después de los 7 mm de desplazamiento. Las VB2 con ambos adhesivos mostraron un desempeño deficiente tanto en retención de carga como en tenacidad. Por otra parte, en pruebas de impacto, la VB1B fue capaz de reducir en un 66% la velocidad de impacto (10 m/s) de un indentador cilíndrico de acero en comparación con la reducción causada por la VM que fue de un 59%. Tanto en flexión como en impacto, la falla de la VB1A y VB1B fue por un proceso de delaminación en las capas intermedias debido a la degradación continua del adhesivo, en contraste a lo ocurrido en la VM que falló por fractura del aluminio bajo el punto de aplicación de la carga. Se puede concluir que las VB1 con ambos adhesivos mostraron una menor tenacidad que la VM en flexión, sin embargo, bajo condiciones de impacto a baja velocidad sus absorciones de energía fueron equiparables a los de la VM.

Abstract

Nacre, in the seashell of some molluscs, is a multilayer composite material made of polygonal platelets (Voronoi tessellation) of the brittle mineral aragonite (95% in volume). The platelets are joined together by an organic biopolymer (5%). The hierarchical structure of the material and its physical and chemical properties produce multiple mechanisms acting synergistically to generate mechanical energy dissipation. To understand the superior toughness of the nacre, a new biomimetic composite material inspired by the natural material is studied here. A methodology was developed to create and analyse an artificial nacre made of aluminium and epoxy resin using computational simulations with the Finite Element Method (FEM). Multilayer biomimetic composite beams were modelled with two different types of wavy layers: continuous layers (VB1) and layers with Voronoi-like polygonal platelets (VB2). The rigid aluminium AA7075-T651 layers were modelled using Johnson-Cook plasticity, and the adhesive was modelled with two types of epoxy resin, Araldite 2015 and Betamate 1044, using cohesive elements with a traction-separation response. From the FEM software Abaqus/Explicit, the numerical results of the biomimetic beams subjected to three-point bending and impact were compared with the results of a monolithic beam (VM).

The main result in bending was that the beams VB1 bonded with Araldite (VB1A) and Betamate (VB1B) could carry more load than the VM beyond 7 mm displacement. VB2 showed poor load-bearing capacity and flexural behaviour with both adhesives. On the other hand, in impact, VB1B was able to reduce by 66% the impact velocity (10 m/s) of a cylindrical steel indenter compared to a reduction of 59% by the VM. In both bending and impact, the observed failure of the VB1A and VB1B was a delamination process in the intermediate layers due to the continuous degradation of the adhesive layer. This is in contrast with the failure observed in the VM, in which aluminium fracture under the loading point was observed. It can be concluded that the VB1 with both adhesives showed lower toughness than the VM in bending. However, under low-velocity impact, the energy absorption of the VB1 was similar to that of the VM.

Introducción

La naturaleza es muy organizada y efectiva para afrontar dificultades propias de su evolución. Por ejemplo, organismos de tipo biológico han desarrollado a través del tiempo sistemas de protección contra depredadores y daños físicos generados por su interacción con otros objetos de su entorno, el cual está en cambio constante debido al viento, corrientes marinas, temperatura y factores climáticos. Es de esperarse que los organismos biológicos sean fuentes de inspiración (biomimetismo) para la creación de materiales compuestos de ingeniería que puedan satisfacer las necesidades de las industrias que cada día requieren nuevos y mejores materiales que den lugar a vivienda, productos de uso diario y transporte más seguros. Uno de los casos más promisorios para crear materiales bioinspirados es la concha nácar, la cual presenta una organización compleja con elementos estructurales a diferentes escalas de magnitud (estructura jerárquica) y que, a través de estudios reportados, se sabe que son sus características estructurales, las que le confieren una alta tenacidad.

Los estudios mecánicos de compresión, flexión, tensión, impacto, entre otros, se pueden realizar de forma física por medio de experimentos de laboratorio o de forma virtual por medio de simulaciones computacionales. La forma experimental convencional es tener una muestra física y someterla, por ejemplo, a prueba en una máquina de pruebas universales o torre de impacto. Por otra parte, la forma virtual requiere que el diseño geométrico y la realización de las pruebas sea mediante herramientas computacionales como es el caso del Método de los Elementos Finitos (FEM por sus siglas en inglés), el cual es un análisis numérico muy utilizado para evaluar el comportamiento mecánico de medios continuos. En los últimos años se han hecho muchos estudios a la concha nácar relacionados a su caracterización física y mecánica, y a partir de ello, se han realizado estudios para imitar sus características y generar nuevos materiales compuestos. Hasta hace unos años era muy difícil trabajar arquitecturas complejas, como el nácar, para el diseño de nuevos materiales y su correspondiente evaluación mecánica de forma computacional. Con el avance tecnológico y la capacidad de cómputo de la actualidad es posible llevar a cabo un estudio fiable, amplio y económico para estudiar los mecanismos de estas estructuras complejas y proponer nuevos materiales compuestos bioinspirados para aplicaciones ingenieriles.

1 Antecedentes

1.1 Biomimetismo

Biomimetismo proviene de la palabra griega *biomimesis*, compuesta de “*bios*”, vida y “*mimesis*”, imitar. Su definición elemental es: imitación de la vida o naturaleza [1]. Una definición actual que se le da es: innovación inspirada por la naturaleza [2]. Las palabras bioinspiración, biomimetismo y biomimética son usadas comúnmente como sinónimos, pero tienen diferencias sutiles. El término inspiración hace referencia a un proceso nativo de observación de ciertos diseños y funcionalidades que estimulan la creatividad para el desarrollo de algo similar. Biomimetismo implica un paso adicional que involucra la utilización de tecnología para explorar ciertas funcionalidades observadas en la naturaleza, mientras que la biomimética es la forma más avanzada de inspiración e involucra la aplicación de herramientas tecnológicas y de ingeniería para desarrollar materiales similares a la naturaleza con el objetivo primordial de resolver problemas humanos de manera sostenible [3].

Es probable que la imitación de la naturaleza, para resolver problemas antropológicos, haya surgido desde la aparición del propio ser humano, pero lo que sí es seguro es que nunca en la historia se ha tenido un interés creciente en el biomimetismo y las tecnologías derivadas como el que se tiene ahora. Como evento destacable, a finales de 1940 George de Mestral inventó el velcro luego de observar detenidamente el sistema que permitía adherir las semillas de cardo en el pelaje de su perro [2]. Años después, la palabra biomimética fue acuñada por el matemático Otto Schmitt en 1957 dentro de su investigación doctoral centrado en el desarrollo de un dispositivo físico que imitaba la acción eléctrica de un nervio [1]. En los 90's, el ingeniero japonés Eiji Nakatsu quien era aficionado al avistamiento de aves, rediseñó el tren de alta velocidad con un frente aerodinámico similar al pico del martín pescador: “*Alcedo atthis*” [2]. Hoy en día, la biomimética como ciencia se ha encargado de imitar diseños, procesos y materiales, lo que ha permitido el desarrollo de una diversidad de productos comerciales con propiedades eléctricas, biológicas, químicas y mecánicas mejoradas. Por ejemplo, existen materiales basados en la naturaleza con propiedades mecánicas mejoradas en su resistencia, tenacidad, dureza y durabilidad en comparación con los materiales comerciales que los antecedieron [3].

1.2 Estructura jerárquica de la concha nácar

En el campo del biomimetismo en los últimos años, se han hecho muchos estudios para entender la estructura y propiedades mecánicas en las conchas de mar; en particular, la concha nácar ha sido ampliamente estudiada. Diversos autores exponen que las propiedades mecánicas sobresalientes del nácar son debido al diseño estructural interno que posee características especiales a distintas escalas de magnitud (de la nano a la microescala), es decir, por su estructura jerárquica definida. Los primeros estudios realizados sobre la concha nácar son referentes a su caracterización mecánica experimental, como los hechos por Currey [4] y Barthelat y colaboradores [5] donde reportan su alta tenacidad y comportamiento distinto a sus componentes individuales. La concha del abulón rojo "*Haliotis rufences*" está conformada por cristales de calcita (CaCO_3) en su capa exterior la cual es dura y presenta un comportamiento mecánico frágil. En el interior (Figura 1a-b) está conformada por nácar de estructura laminada, la cual está compuesta en un 95% de aragonita (en volumen), la cual es una variación cristalina polimórfica del carbonato de calcio, y en un 5% de materia orgánica formada por proteínas y polisacáridos. Los cristales de calcita forman estructuras romboédricas y los de aragonita ortorrómbicas [6].

Las micrografías obtenidas por Barthelat y Espinosa [7] mediante microscopía electrónica de barrido (SEM por sus siglas en inglés) muestran a los cristales de aragonita en forma de plaquetas de lados poligonales desiguales, una geometría conocida como teselación de Voronoi (ver Figura 1c y Figura 2). El diámetro de las plaquetas es de 5 μm aproximadamente y su grosor puede estar entre los 0.2 a 0.9 μm según el reporte de Kakisawa y Sumitomo [8] en estudios realizados al abulón "*Haliotis gigantea*". Las imágenes de SEM también revelan que las plaquetas tienen un traslape entre capas consecutivas, están dispuestas en un arreglo similar al de ladrillos y mortero (Figura 1c, d) y son onduladas en vez de planas (Figura 1e) [7]. El número de capas verticales puede alcanzar hasta 2000 según Heinemann et al. [9] o hasta 0.3 mm de espesor según Meyers et al. [10].

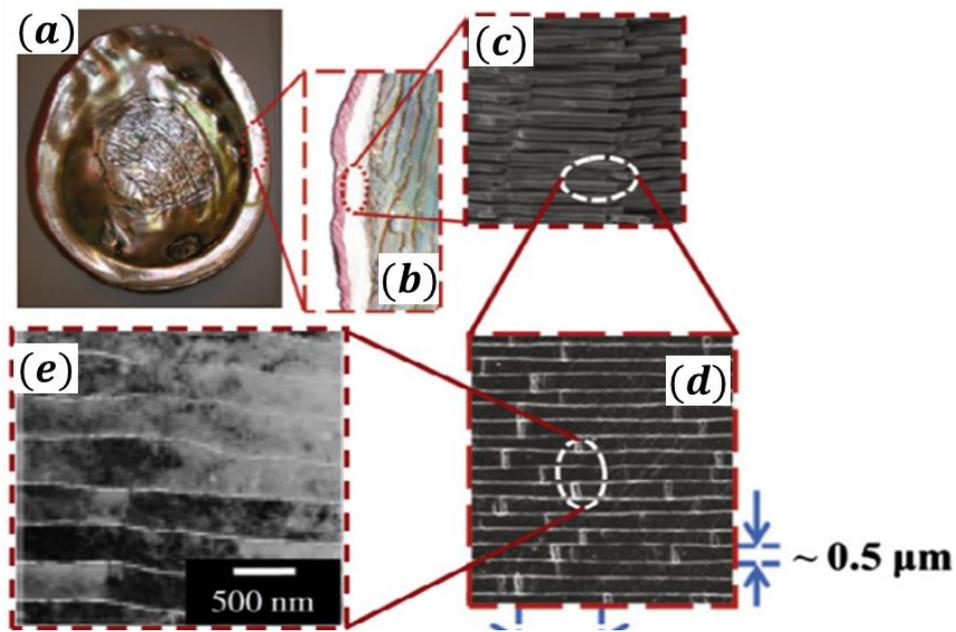


Figura 1. Principales características estructurales del nácar. (a) Nácar iridiscente en la parte interna de la concha, (b) corte transversal de la concha, (c) SEM de plaquetas poligonales dispuestas en forma de ladrillo y mortero, (d) traslape entre plaquetas, (e) ondulación presente en las plaquetas. Imagen adaptada de [11].

Existen dos procesos identificados de la mineralización de la concha nácar, uno que produce nácar de tipo laminar en los bivalvos (Figura 2a) y otro que produce nácar de tipo columnar en los gasterópodos (Figura 2b). En el tipo laminar, las plaquetas se traslapan 1/2 de su área entre capas contiguas y en el tipo columnar 1/3 de su área [12].

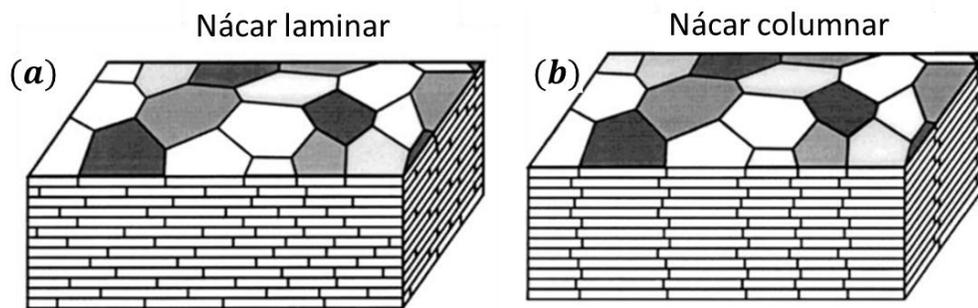


Figura 2. (a) Nácar tipo laminar presente en los bivalvos y (b) columnar en los gasterópodos [12].

Estudios en una escala de longitud más pequeña han permitido conocer que las plaquetas se conectan entre sí por medio de micro puentes, y que además, presentan porosidad en sus superficies [12] (Figura 3a). La capa delgada de biopolímero que une a las plaquetas de aragonita posee un grosor aproximado de 20-30 nm [5] (Figura 3b).



Figura 3. SEM a color del nácar de la concha del Nautilus: (a) porosidad en la superficie de una plaqueta de aragonita y (b) biopolímero en la superficie de las plaquetas [13].

1.3 Biomimetismo de la concha nácar y su modelado por FEM

Con el descubrimiento de materiales biológicos procedentes de diversos organismos con propiedades mecánicas sobresalientes, se ha incrementado el interés en ellos y han sido estudiados por medio del biomimetismo para la generación de nuevos materiales. Lo que se busca es una “transferencia tecnológica” de la naturaleza a los artefactos hechos por el hombre con el propósito de aumentar sus propiedades mecánicas para la generación de nuevos materiales con aplicaciones especializadas [14]. El nácar ha inspirado varios estudios biomiméticos por tres razones principales: (1) su tenacidad es tres órdenes de magnitud mayor que la de su componente principal, (2) su estructura jerárquica está bien definida en comparación con otros materiales biológicos y (3) su diseño interno es factible de optimizar para mejorar las propiedades mecánicas [15]. En años posteriores a los de la caracterización de la concha nácar surgieron estudios sobre cómo la estructura multiescala afecta la resistencia y tenacidad del material en la escala macroscópica con el fin de imitarla, y así desarrollar una nueva generación de materiales compuestos multicapa [8, 14].

El diseño de materiales biomiméticos empieza por identificar la fuente de inspiración y estudiar la funcionalidad de interés. Seguidamente está la selección del material del que estará hecho el material biomimético, el cual no es necesario que contenga la misma composición química del original. En el caso del nácar, para imitar la fase dura o rígida se han utilizado materiales cerámicos [15] y metálicos principalmente [16], pero también algunos polímeros [17]. Por otro lado, el sustituto de la fase orgánica debe ser dúctil y blando de tal manera que pueda soportar grandes deformaciones. Para este propósito se han utilizado polímeros de diferentes tipos como PVA, PC, PEs, PMMA y resinas epóxicas [15, 16]. Continuando con el proceso, es de vital importancia determinar cuáles características controlan el desempeño excepcional con el fin de elegir las principales e implementarlas mediante técnicas innovadoras en el material artificial de interés a desarrollar [14]. El resultado de los procesos biomiméticos es la creación de materiales con una buena combinación de peso, rigidez y tenacidad.

Por medio de simulaciones FEM se ha estudiado el comportamiento de materiales biomiméticos sometidos a pruebas mecánicas complejas, las cuales serían muy difíciles o imposibles de implementar en un laboratorio [18]. De esta manera el FEM ha sido de gran utilidad para realizar estudios paramétricos sobre las características de la concha nácar incluyendo el tipo de plaqueta, grado de ondulación, grosor y el grado de traslape [5, 18] (Figura 4a). También se han evaluado mediante simulaciones FEM, las disposiciones estructurales en tensión [5, 18], compresión [5], flexión [19] e impacto [20, 21]. En años recientes se han hecho pruebas mecánicas a impresiones 3D de materiales con las características de la concha nácar (Figura 4b) obteniendo resultados similares a los obtenidos en las simulaciones (Figura 4c); además se han evaluado los mecanismos de fallo y energía absorbida [21-23]. Una gran parte de estos estudios se han realizado en geometrías planas; sin embargo, algunos trabajos como el de Tran et al. [24] incluyen las características de la concha nácar en diferentes prototipos, tanto planos como curvos.

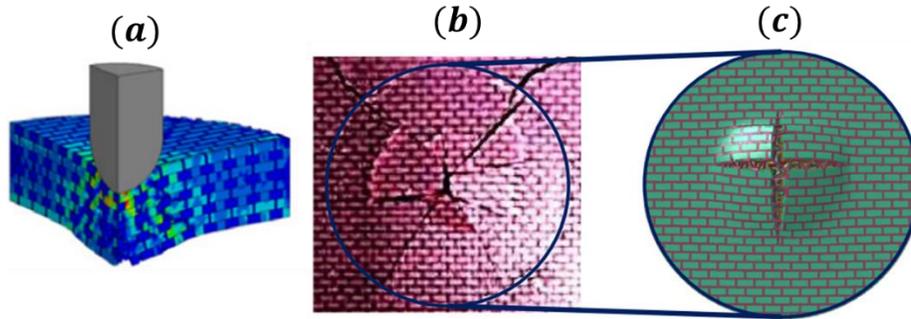


Figura 4. (a) Modelado de un material bioinspirado en la concha nácar sometido a impacto; (b) resultado experimental y (c) análisis por FEM [21].

Los softwares desarrollados para un análisis mecánico por FEM y la capacidad de cómputo actual han incrementado los estudios numéricos sobre los mecanismos que actúan en una estructura tipo concha nácar. La gran mayoría de estos trabajos se centran en estudios paramétricos enfocados en las propiedades mecánicas de la fase orgánica y en la optimización de las dimensiones en las estructuras y sus formas geométricas. Katti et al. [18] realizaron la caracterización de las propiedades elásticas de las plaquetas de aragonita y el biopolímero del nácar con una técnica de nanoindentación, y construyeron un modelo FEM de plaquetas hexagonales (Figura 5). El análisis numérico consistió en ir variando el esfuerzo de fluencia de la fase orgánica hasta encontrar la curva representativa a la obtenida de manera experimental ante pruebas de flexión reportadas por Currey en 1980 [25]. Concluyeron que las propiedades mecánicas de la fase orgánica son fundamentales y que se requieren valores realmente altos del esfuerzo de fluencia (400 MPa) para modelar el comportamiento real de la respuesta mecánica macroscópica.

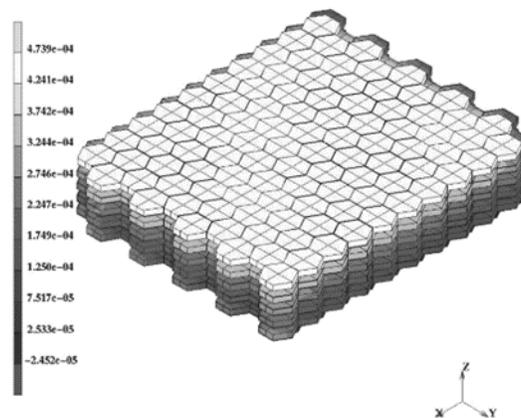


Figura 5. Modelo de elemento finito del nácar con plaquetas hexagonales [18].

Rim et al. [26] construyeron un modelo micromecánico el cual sometieron a tensión. Su análisis se centró en la optimización geométrica involucrando la longitud de traslape L_0 , el ángulo de la superficie de tableta θ que permite el anclaje mecánico, y la conexión por micropuentes (Figura 6). Su modelo mejorado permitió obtener un diseño capaz de disipar energía de fractura 70 veces más que el diseño primario. De manera complementaria, para analizar el mecanismo de endurecimiento, ellos identificaron las zonas de concentración de esfuerzos y los modos de falla.

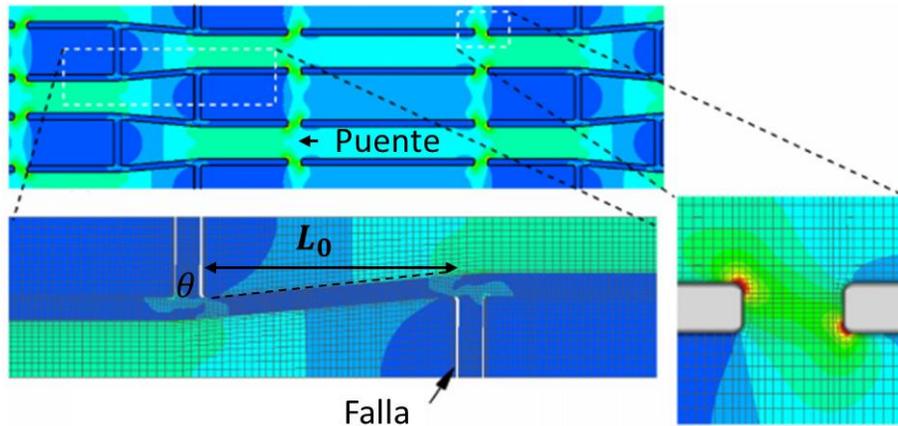


Figura 6. Modelo micromecánico tipo concha nácar evaluado por FEM [26].

Askarinejad y Rahbar [27] construyeron un modelo FEM micromecánico tipo concha nácar de 20 capas y variaron la relación de aspecto de las tabletas para evaluar la respuesta mecánica. Las pruebas realizadas fueron a tensión y flexión de cuatro puntos (Figura 7). Ellos encontraron que la relación de aspecto (relación entre la longitud y grosor) afecta la rigidez del material de tal manera que, a mayor relación de aspecto mayor es la rigidez. Su conclusión fue que la respuesta global de una estructura multicapa como la del nácar depende de tres factores importantes: relación de aspecto de las tabletas, la rugosidad en la superficie que inhibe los esfuerzos de corte y la matriz orgánica que une a las tabletas. De manera sinérgica estas características producen el mecanismo de endurecimiento de la estructura e incrementan su deformación plástica.

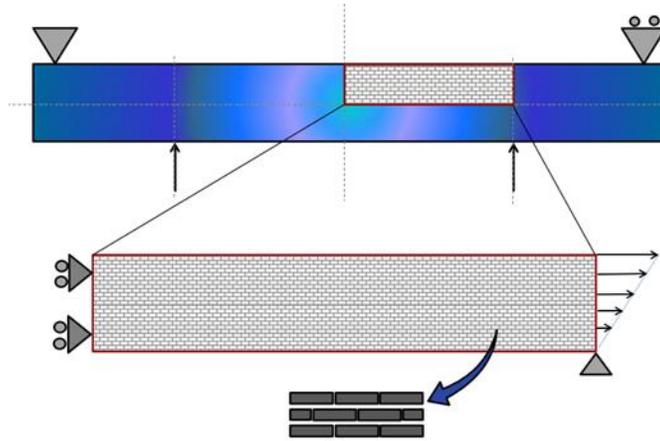


Figura 7. Modelo micromecánico tipo concha nácar sometido a flexión de cuatro puntos [27].

Ko y colaboradores [17] evaluaron el comportamiento mecánico en estructuras tipo concha nácar, variando el tamaño y forma de las tabletas y el espacio existente entre ellas. Ellos realizaron pruebas de impacto dinámico a velocidades de 3.13 m/s en estructuras de tres capas y midieron la fuerza y la energía absorbida (Figura 8a). La fase rígida estuvo compuesta de PLA y para la fase blanda se experimentó con dos polímeros distintos, nylon y poliuretano termoplástico. Los resultados por FEM resultaron ser congruentes con los experimentales y ambos demostraron el desempeño superior de la estructura biomimética en comparación con una estructura monolítica. Por su parte, Flores-Johnson et al. [20] construyeron un modelo FEM de una estructura tipo concha nácar constituida por plaquetas con propiedades del aluminio 7075 unidas por la resina epóxica Betamate 1045 (Figura 8b). El análisis consistió en evaluar la estructura a velocidades de impacto balístico comprendidas entre 350 m/s y 900 m/s. El resultado obtenido fue una reducción mayor de la velocidad residual del proyectil cuando este impactaba a la estructura biomimética que cuando impactaba una estructura monolítica.

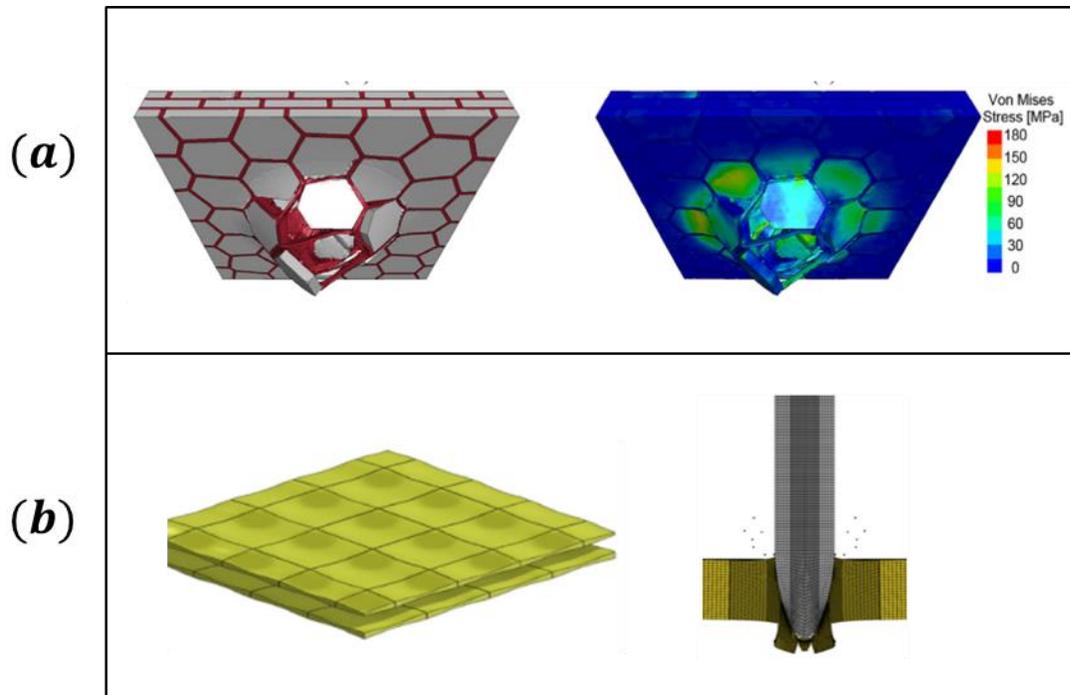


Figura 8. Modelos de impacto dinámico por medio del FEM. (a) Placas poliméricas [17] y (b) placas metálicas [20].

Justificación

En la actualidad hay una demanda creciente de materiales compuestos con un mejor desempeño mecánico y bajo peso para aplicaciones ingenieriles. En este contexto, la naturaleza puede ser utilizada como una fuente de inspiración para crear estos materiales revelando sus mecanismos y sistemas optimizados evolutivamente con las herramientas experimentales y numéricas de la actualidad, y así poder imitarla. En este sentido, con la investigación bibliográfica presentada en los Antecedentes es posible comprender los principios en los que se basa la concha nácar para ser un material resistente y tenaz y con un análisis computacional por FEM se podrán evaluar más rápido los parámetros o elementos de diseño para encontrar una propuesta de material con un desempeño mecánico mejorado.

Para contribuir en el campo del desarrollo de materiales compuestos biomiméticos, en esta investigación se implementarán las principales características de la estructura jerárquica de la concha nácar en un material compuesto propuesto constituido de materiales de uso industrial y de ingeniería como lo es el aluminio y la resina epóxica. En el presente trabajo también se desarrollará una metodología eficiente para la generación de la geometría y modelos FEM de material compuesto biomimético.

La finalidad del trabajo es obtener la propuesta de un material con elementos de diseño que aporten una mayor absorción de energía de deformación. A pesar de existir una gran cantidad de estudios paramétricos que definen las características que más le aportan a un diseño tipo concha nácar en su desempeño, aún se pueden optimizar las dimensiones y las propiedades de los materiales que conforman sus componentes para aplicaciones en la construcción de viviendas y unidades de transporte más seguros y así proteger a los seres humanos ante acciones y fenómenos impredecibles de nuestro alrededor. Comprendiendo los mecanismos que permiten un buen balance de las propiedades mecánicas en el nácar ayudará al desarrollo de un nuevo concepto de diseño para materiales compuestos combinando tenacidad, resistencia, rigidez y dureza [8].

2 Marco teórico

2.1 Biomimetismo

La naturaleza ha desarrollado a través del tiempo, materiales, objetos y procesos funcionales. Lo ha hecho desde que la vida apareció en la Tierra hace unos 3.8 mil millones de años aproximadamente. Los años de evolución le han permitido a la naturaleza utilizar materiales comunes con propiedades mecánicas ordinarias para la generación de materiales con un alto desempeño mecánico [1].

Los materiales biológicos tienen un grado de organización excepcional a nivel molecular, nano, micro y macroscópico. Esta organización se da de manera jerárquica con arquitecturas intrínsecas que dan paso a una diversidad de elementos funcionales. Las propiedades materiales excepcionales resultan del ensamble complejo intercalado de los componentes, la morfología que adquieren, así como de sus propiedades físicas y químicas. Esto da lugar a propiedades encontrados en la naturaleza que son de interés comercial en la actualidad: superhidrofobicidad, autolimpieza, reducción de la resistencia en fluidos, conversión y conservación de la energía, adhesión fuerte y reversible, sustentación aerodinámica, resistencia mecánica superior, autoensamblaje biológico, anti-reflexión, coloración estructural, aislamiento térmico, autocuración y sistemas sensoriales. Algunos de estos organismos y su funcionalidad de interés están resumidos en la Figura 9 por Bhushan [1]:

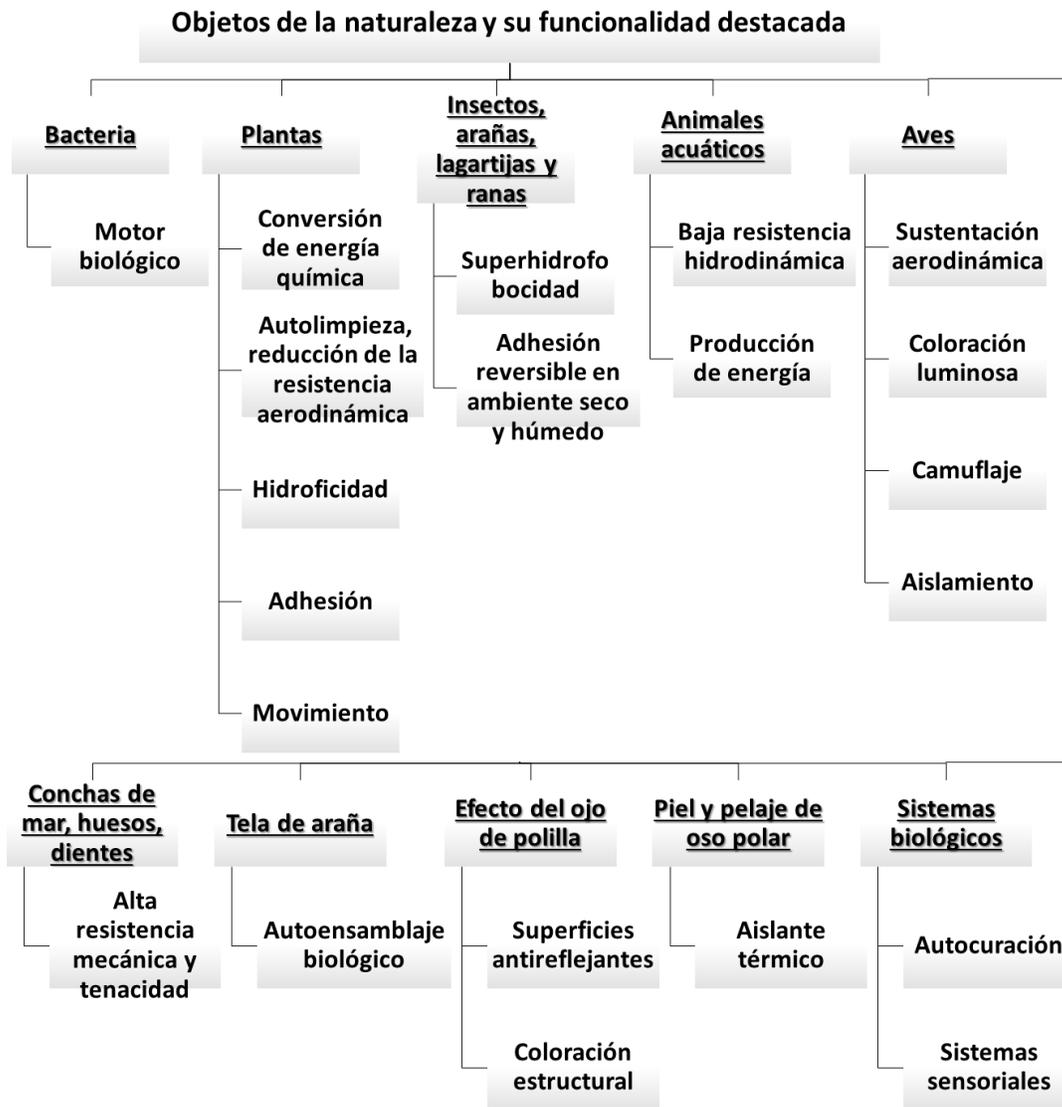


Figura 9. Organismos de la naturaleza y su funcionalidad destacada, adaptado de Bhushan [1].

2.2 Materiales compuestos multicapa

El término de “material compuesto” significa que dos o más materiales son combinados para generar un tercer material con propiedades mejoradas y diferentes a las de sus constituyentes. El fin de formar un material compuesto es mejorar alguna propiedad de los constituyentes como puede ser la resistencia, rigidez, fatiga, entre otras. A grandes rasgos, los compuestos se clasifican en materiales fibroreforzados, particulados, laminados o la combinación de cualquiera de ellos [28].

Los materiales compuestos laminados son estructuras multicapa constituidos por dos o más capas apiladas y unidas entre sí [29]. Las estructuras multicapa son los materiales compuestos más

comunes hoy en día y se utilizan cada vez más en la industria de vehículos aeroespaciales, de transporte y navales. Un ejemplo común son los paneles sándwich que consisten en una estructura de tres capas compuesta de un núcleo blando y dos caras externas rígidas. No obstante, se han desarrollado e introducido otros tipos de materiales avanzados multicapa que son utilizados actualmente en aviones comerciales y productos de uso diario [30].

En los sistemas multicapa es inherente la existencia de interfaces, de las cuales depende el desempeño del material macroscópicamente. Su integridad determina como la carga es transferida entre las capas constituyentes [31].

Las estructuras laminadas son catalogadas como “transversalmente anisotrópicas” porque presentan propiedades físicas y mecánicas distintas en dirección paralela al grosor. Las propiedades mecánicas discontinuas de manera transversal generan un campo de desplazamientos \mathbf{u} que exhibe un cambio repentino en su pendiente en cada interface entre láminas donde las propiedades mecánicas cambian. Tal efecto es conocido como la forma Zig-Zag (ZZ) de los desplazamientos a través del grosor. Los esfuerzos planos $\sigma_p = (\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{xy})$ de manera general son discontinuos entre cada interface. Por el contrario los esfuerzos transversales $\sigma_n = (\sigma_{xz}, \sigma_{yz}, \sigma_{zz})$ suelen ser continuos en cada interface de cada lámina por razones de equilibrio y este fenómeno es conocido como la Continuidad Interlaminar del esfuerzo transversal (IC por sus siglas en inglés). Los fenómenos ZZ e IC son conocidos como los requerimientos C_Z^0 para el desarrollo de cualquier teoría aplicada a estructuras multicapa. La forma extendida de la Teoría Clásica de Laminación (CLT por sus siglas en inglés), Teoría de Deformación por Cortante de Primer Orden (FSDT por sus siglas en inglés) o las Teorías de Orden Superior (HOT por sus siglas en inglés) aplicadas a estructuras multicapa no permiten cumplir con los requerimientos C_Z^0 . En consecuencia, se han desarrollado teorías que cumplan con tales condiciones como las Teorías Zig-Zag y Teorías de Capa por Capa (LW por sus siglas en inglés) que aplican la CLT, FSDT y HOT de manera interlaminar considerando cada capa como independiente y aplicando los componentes del desplazamiento de las interfaces como condiciones de frontera. Dada la complejidad de las distintas configuraciones que puede adoptar una estructura multicapa se siguen desarrollando teorías mixtas o el refinamiento de las ya existentes para su descripción más aproximada. No obstante, por simplicidad es común encontrar la aplicación de Modelos Equivalentes de una Simple Capa (ESLMs por sus siglas en inglés) cuya aproximación de los esfuerzos cortantes y deformaciones

normales resulta de considerar a la estructura como cinemáticamente homogénea [29]. También por simplicidad, se recurre a métodos de aproximación numérica como el FEM. La Figura 10 muestra de manera cualitativa los posibles escenarios de los desplazamientos y esfuerzos transversales de una estructura multicapa según el modelo ESL de una simple capa o el LW capa por capa para el primer y segundo orden (N) de expansión de las variables.

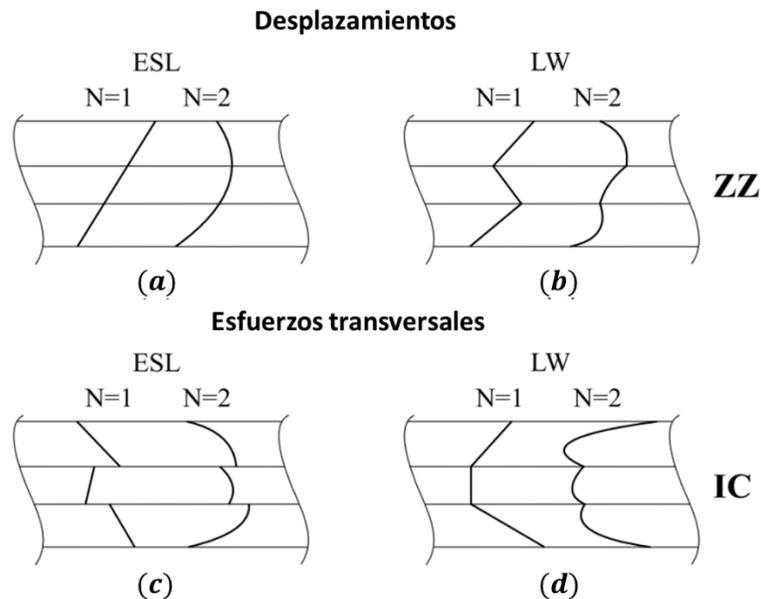


Figura 10. Desplazamientos y esfuerzos transversales de una estructura multicapa [29].

2.3 Mecanismos de la concha nácar

2.3.1 Cualidades de interés

Las conchas de mar son un material compuesto natural en forma de una estructura laminada. El organismo biológico (molusco) es el responsable de producir el material nácar a partir de componentes orgánicos e inorgánicos mediante un proceso de biomineralización. Los minerales inorgánicos (carbonato de calcio, fosfato de calcio y sílice amorfo) del medio circundante quedan embebidos dentro de un conjunto complejo de macromoléculas orgánicas (queratina típica, colágeno y quitina) producidas sobre el epitelio del molusco. El componente mineral (95% en volumen) es el que otorga resistencia mecánica en tanto que los componentes orgánicos (5%) proveen de ductilidad [1]. La estructura básica del nácar está catalogada como un material compuesto de doble fase; plaquetas poligonales cerámicas con capas de una matriz polimérica orgánica.

En su ambiente natural, la principal función del nácar es evitar que la concha se rompa catastróficamente absorbiendo energía de deformación cuando es atacada por depredadores. El nácar, el cual conforma la capa interior de la concha, se distingue de la calcita (capa exterior de la concha) por soportar mayor deformación plástica, lo que le da una mayor capacidad de absorber energía mecánica. Asimismo, la tenacidad del nácar se ha reportado ser tres órdenes de magnitud superior al del mineral puro [8]. En otras palabras, el nácar puede llegar a ser tres mil veces más tenaz que la aragonita que lo conforma.

El nácar exhibe propiedades y comportamientos superiores al de otros materiales debido a su arquitectura y propiedades tanto físicas y químicas de sus componentes. Las dimensiones de los componentes presentes a distintas longitudes de escala brindan mecanismos distintos que ocurren de manera simultánea incrementando su tenacidad. Se han realizado una gran cantidad de estudios sobre cada mecanismo, pero aún no son entendidas del todo las condiciones necesarias para la activación de estos o los efectos de la combinación de ellos [1]. La Figura 11 ilustra como la combinación de un material rígido con uno dúctil, como en el nácar, ayuda a incrementar la energía de fractura.

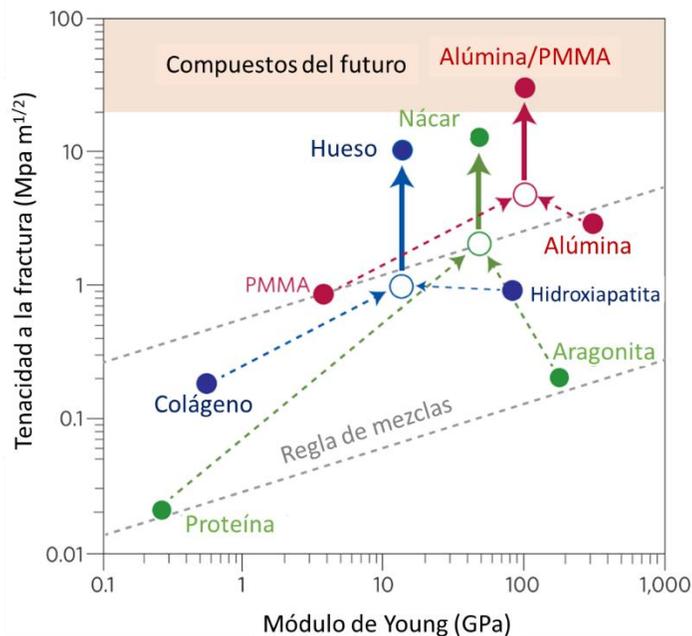


Figura 11. Energía de fractura de materiales compuestos naturales (hueso, nácar, nácar artificial Al/PMMA) y el de sus constituyentes individuales. Adaptado de Wegst [32].

2.3.2 Mecanismo de deformación

Cuando se aplica una fuerza de tensión en el nácar, las plaquetas de aragonita comienzan a deslizarse unas de otras cuando la resistencia de la interface empieza a ceder, lo cual resulta en una elongación macroscópica del nácar. Sin embargo, cuando una plaqueta deslizante se encuentra con un anclaje mecánico debido a la ondulación de las capas, el deslizamiento se detiene y comienza un nuevo deslizamiento en una localización distinta. Este mecanismo causa un endurecimiento por deformación de manera macroscópica y crea la necesidad de una fuerza mayor para seguir deformando al nácar. La extracción acumulativa y anclaje de las plaquetas son los mecanismos dominantes que permiten una mayor deformación y tenacidad. Por otra parte, la resistencia decrece monótonamente cuando decrece el área de contacto por el desacoplamiento entre las plaquetas, al igual que cuando el coeficiente de fricción disminuye por la degradación de la superficie de estas. Finalmente, cuando las plaquetas son desacopladas completamente, se da paso a la fractura macroscópica [8] (Figura 12).

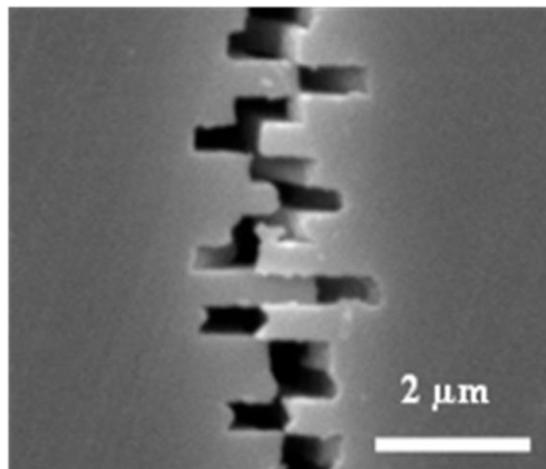


Figura 12. Desacoplamiento acumulativo de plaquetas por tensión [33].

2.3.3 Mecanismo de endurecimiento

El principal mecanismo que contribuye a la tenacidad del nácar es la energía de disipación causada por el deslizamiento entre plaquetas en la escala submicrométrica. Sin embargo, el mecanismo de endurecimiento en el nácar es atribuido a varios procesos distintos presentes a nivel microscópico y nanoscópico. La Tabla 1 los resume de acuerdo con los componentes involucrados y a longitud de escala que operan.

Cuando una fuerza de tensión es aplicada de manera longitudinal sobre la estructura del nácar, la resistencia al deslizamiento aumenta conforme la deformación es mayor. A pesar de no haberse entendido del todo el proceso de deslizamiento en la interface, se han identificado tres factores principales que originan el anclaje mecánico y la resistencia por fricción: las nanoasperezas en la superficie de las plaquetas, los puentes minerales y la ondulación. Las nanoasperezas y puentes minerales son efectivos para promover el anclaje mecánico inicialmente pero no justifican por sí mismos el incremento de la resistencia conforme el deslizamiento continúa (Figura 13a y 13b). Por el contrario, la ondulación si promueve la necesidad de una fuerza mayor para el desacoplamiento de las plaquetas dado que en las fronteras curvas se da una mayor concentración de esfuerzos [8] (Figura 13c). En el supuesto de que las tabletas fueran completamente planas la transferencia de carga entre tabletas sería por medio de esfuerzos cortantes únicamente. En el caso de tabletas onduladas, el deslizamiento genera esfuerzos de tensión y compresión transversales lo que contribuye a la transferencia de carga, incrementa la resistencia al deslizamiento y genera el endurecimiento [15].

La morfología de las fronteras de las plaquetas es insuficiente para explicar el comportamiento de manera completa. Por su parte, la fase orgánica que une las plaquetas disipa energía por la deformación viscoelástica y redistribución de los esfuerzos alrededor de los daños locales. La deformación viscoelástica se le atribuye a la estructura modular de las proteínas que les da una capacidad de desdoblamiento y resiliencia. Por lo tanto, el mecanismo de disipación de energía en la interface de deslizamiento involucra un cambio estructural a nivel macromolecular de la fase orgánica (Figura 13d).

Tabla 1. Clasificación de los mecanismos de endurecimiento presentes en el nácar. Adaptado de Kakisawa y Sumitomo [8].

Mecanismos de endurecimiento del nácar	Interacción submicrométrica de las plaquetas $\sim 1 \mu\text{m}$	<i>Delaminación de la interface y acumulación de microfisuras</i>
		<i>Desviación de grietas</i> <i>Anclaje de las plaquetas</i>
		<i>Puentes minerales</i>
		<i>Deslizamiento de plaquetas</i>
	Mecanismos de disipación de energía de la fase orgánica $\sim 100 \text{ nm}$	<i>Puentes orgánicos entre plaquetas</i>
		<i>Formación de ligamentos en la fase orgánica con propiedades viscoelásticas</i>
		<i>Despliegue de las cadenas moleculares y ruptura de los enlaces cruzados</i>
	Mecanismos de endurecimiento nanoestructural $\sim 10 \text{ nm}$	<i>Rotación y deslizamiento de nanogranos</i>
		<i>Puentes orgánicos entre nanogranos</i>

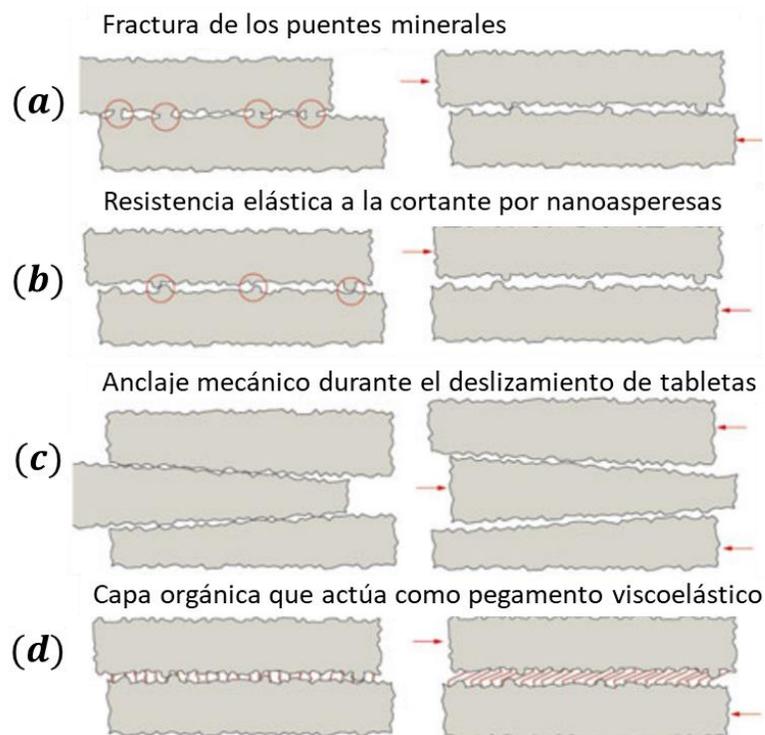


Figura 13. Mecanismos de disipación de energía en el nácar [34].

2.3.4 Mecanismo de fractura

Los mecanismos de disipación de energía característicos de las estructuras laminadas son la acumulación de microgrietas y su propagación, así como por las delaminaciones en la interface por esfuerzos cortantes. El aumento de la extensión de la longitud de las grietas aumenta la resistencia a la fractura. En el caso del nácar, la estructura laminada en forma de ladrillo y mortero previene la propagación de las grietas, pero genera una desviación de la punta de la grieta redistribuyendo los esfuerzos en el contorno y promoviendo la disipación de energía (Figura 14). Esta es la causa del proceso de desacoplamiento múltiple. Por otra parte, la interacción de los nanogranos con la fase orgánica trata de evitar la aparición de grietas y daños locales en las plaquetas. En consecuencia, la combinación de las plaquetas rígidas con las capas delgadas de biopolímeros viscoelásticos inhibe la propagación de la fractura transversal y hace que el material sea fuerte y resiliente [8].

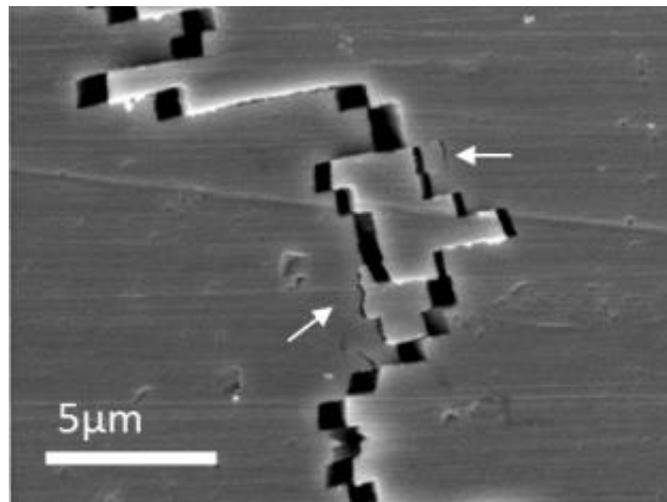


Figura 14. Propagación y desviación de una grieta en el nácar [35].

2.4 Diagramas Voronoi

En las diversas áreas de conocimiento como la física, química y especialmente la biología, se encuentra de manera frecuente la autoorganización de estructuras espacialmente organizadas. Los patrones encontrados generalmente se forman en sistemas no equilibrados y no lineales. Los ejemplos más llamativos son las celdas de Bénard de convección, los cúmulos en la formación de nubes, los patrones de las reacciones químicas oscilatorias y los patrones que forman las colonias bacterianas durante su crecimiento. Uno de interés particular son los diagramas o teselación de Voronoi, también conocido como teselación de Dirichlet, que consiste en un patrón de celdas originadas de un punto central o semilla y crecen de manera radial hasta que sus interfaces se encuentran. Descartes en 1644 las utilizó para el modelado de la distribución de materia en el universo alrededor de estrellas fijas. Dirichlet fue quien las estudió y les dio una formulación matemática para el caso 2D y 3D en el siglo XIX y finalmente Voronoi fue quien hizo la extensión al caso n-dimensional [36]. Matemáticamente, el diagrama Voronoi de un conjunto dado de sitios o puntos distintos $\mathbf{X} = \{\mathbf{x}_i\}_{i=1}^n$, pertenecientes a los números reales \mathbb{R}^d en un espacio de dimensión d , está definido por una colección de celdas Voronoi $\{\Omega_i\}_{i=1}^n$ donde:

$$\Omega_i = \{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^d \mid \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\| \leq \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_j\|, \forall \mathbf{j} \neq \mathbf{i}\} \quad (1)$$

y cada celda Voronoi Ω_i es la intersección de un conjunto de semiespacios delimitados por las bisectrices (Figura 15a) de las aristas de la triangulación de Delaunay (Figura 15b) incidentes en el sitio \mathbf{x}_i . Una característica resultante es que todos los puntos contenidos en una celda están más cerca del punto central de origen propio que del centro de cualquier otra celda [37].

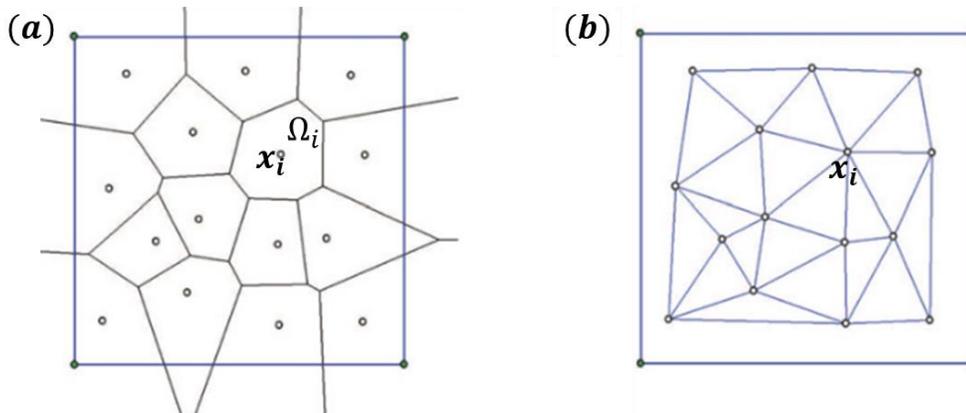


Figura 15. (a) Trazado de las bisectrices para la generación de un diagrama Voronoi y (b) triangulación de Delaunay. Tomado de [37].

Los diagramas Voronoi son empleados en una variedad de áreas de conocimiento, incluyendo astrofísica, ciencia de materiales, minería, meteorología y biología. Pueden utilizarse para modelar y predecir comportamientos poblacionales, la descripción de la estructura de los huesos, modelar células biológicas o para la diagnosis de padecimientos médicos. Algunos patrones Voronoi encontrados en la naturaleza y recopilados por Dierking et al. [36] son: barro seco (Figura 16a), panales de abeja (Figura 16b), piel de las jirafas (Figura 16c), espumas (Figura 16d), alas de las libélulas (Figura 16e), hojas de los árboles (Figura 16f) y el nácar (Figura 16g).

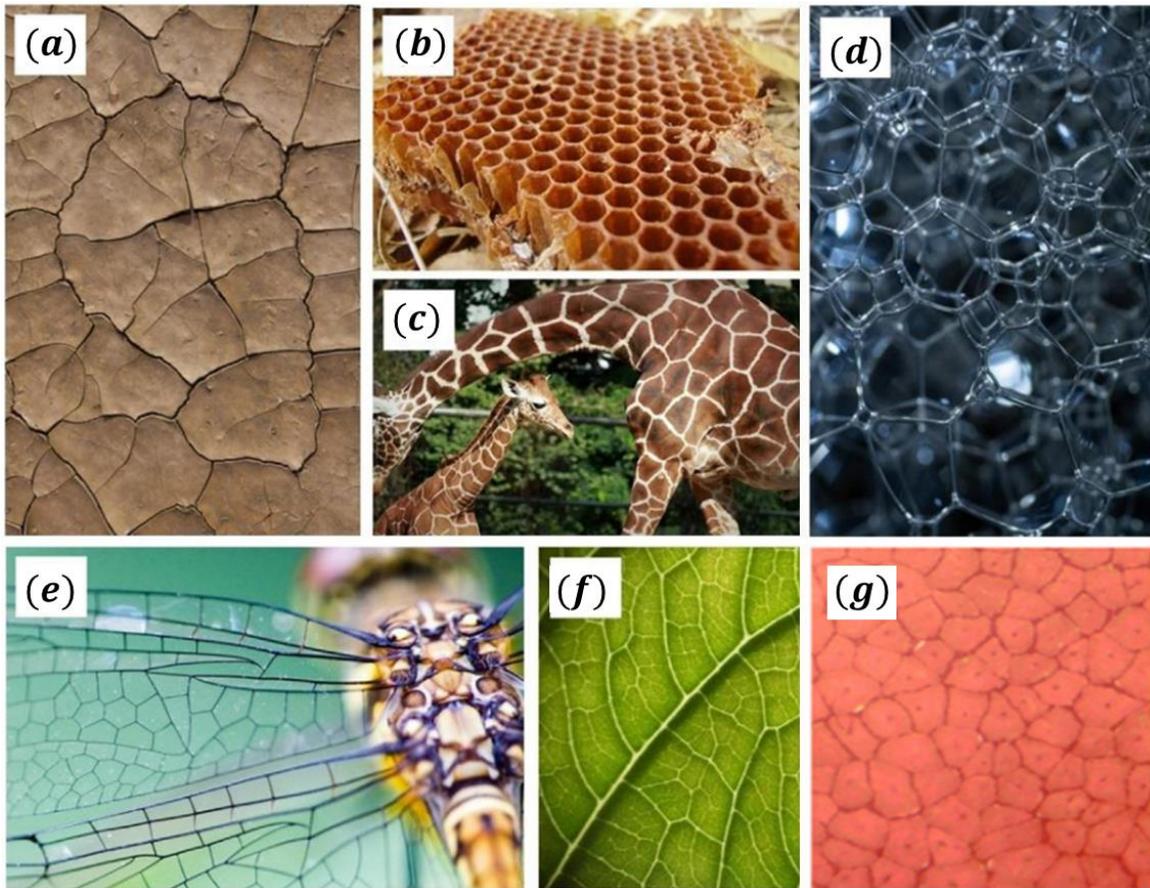


Figura 16. Ejemplos de patrones Voronoi en la naturaleza, adaptada de Dierking et al. [36].

2.5 El Método de los Elementos Finitos

El Análisis de Elemento Finito (FEA por sus siglas en inglés) es la simulación de un fenómeno físico dado utilizando la técnica numérica del FEM. Muchos de estos fenómenos presentes en la naturaleza e ingeniería están descritos en términos de ecuaciones diferenciales parciales y en muchos casos resolverlos con métodos analíticos tradicionales resulta imposible en la práctica. El FEM ofrece una aproximación numérica a esas ecuaciones diferenciales y se propone como un método eficiente para dar solución a problemas de ingeniería relacionados a el análisis de deformaciones en medios continuos sólidos, transferencia de calor, flujo de fluidos y electromagnetismo. El principio del FEM es dividir un cuerpo u objeto de análisis en elementos finitos llamados “elementos” los cuales están conectados por “nodos” formando entre sí un conjunto llamado “malla”. En la actualidad el FEA es una herramienta importante para predecir la respuesta de un material basado en su discretización en “elementos finitos” que intentan simular un entorno real [38] (Figura 17).

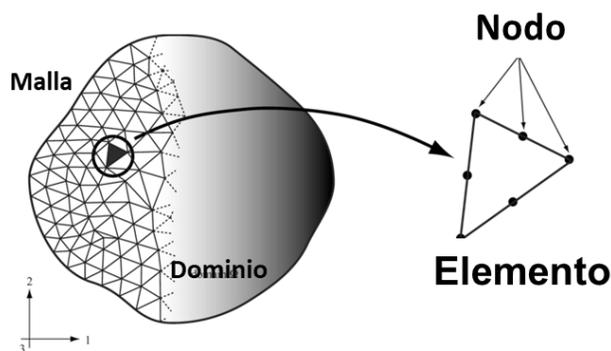


Figura 17. Discretización en elementos finitos de un medio continuo[39].

El proceso del FEM está dado por los siguientes pasos:

1. Proceso: subdivisión del dominio del problema en elementos finitos o discretización.
2. Formulación del elemento: desarrollo de las ecuaciones de los elementos.
3. Ensamble: obtención de las ecuaciones del sistema según las ecuaciones individuales de los elementos y condiciones de frontera.
4. Resolución de las ecuaciones.
5. Postproceso: determinación de los datos de salida (esfuerzos y deformaciones para medios sólidos continuos).

2.6 Ecuación constitutiva del FEM

En el análisis de medios continuos sólidos el FEM se basa en la Ley de Hook y utiliza el cálculo matricial para sus aproximaciones; esto obedeciendo a las reglas de simetría ($\sigma_{ji} = \sigma_{ij}$), el principio de superposición y las condiciones de continuidad. En notación tensorial se tiene lo siguiente:

$$\sigma_{ji} = C_{jilk} \varepsilon_{lk} \quad (2)$$

donde C_{jilk} es el tensor de cuarto orden que representa la rigidez en 3D y que de manera inicial consta de 81 componentes. σ_{ji} son los esfuerzos en función de los desplazamientos ε_{lk} . Para el caso unidimensional (1D) las componentes del esfuerzo se vuelven cero con excepción de las componentes en la dirección 1: $\sigma_{11} = \sigma$, $\varepsilon_{11} = \epsilon$ y $C_{jilk} = E$ quedando:

$$\sigma = E\epsilon \quad (3)$$

La tarea fundamental de los programas de FEM es obtener la ecuación de cada punto nodal, acoplarlas en una matriz global de $N \times N$ (N =número de elementos) que representa la estructura y resolverlas por operaciones matriciales directas. Si el fenómeno no es lineal o es dependiente del tiempo se necesitan cálculos adicionales o iterativos para la determinación de los valores de las variables dependientes [40, 41].

2.6.1 Definición de modelos constitutivos de materiales

Los softwares de FEM tienen modelos para simular no solamente una respuesta elástica de un material sino también la respuesta plástica y la fractura. Por ejemplo, la respuesta típica de un material metálico sometido a una prueba estándar de tensión para obtener sus propiedades se puede estudiar por medio de una curva esfuerzo-deformación, en la cual se tiene primeramente una fase elástica, $a - b$ (Figura 18), donde b el punto de fluencia. De manera seguida se tiene una zona plástica dúctil que presenta un endurecimiento debido a la deformación, $b - c$, siendo c el punto de referencia de la carga máxima antes de la ruptura del material, d , como se muestra en la Figura 18 [42].

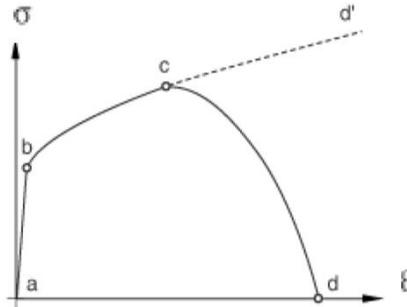


Figura 18. Curva típica de un esfuerzo uniaxial y deformación en un espécimen metálico [42].

En el software FEM Abaqus, el cual se usó en este trabajo, la especificación del mecanismo de falla total consta de cuatro partes:

1. La definición de la respuesta del material sin fallas ($a - b - c - d'$).
2. El criterio de inicio de daño (c).
3. Una ley de evolución del daño ($c - d$)
4. La elección opcional de eliminar los elementos cuando la rigidez ha sido completamente degradada (d).

Existen varios métodos para predecir el daño y la falla de un material entre los que se encuentra el modelo de “daño progresivo y falla para metales dúctiles” que puede ser utilizado en conjunto con modelos de plasticidad tales como el de von Mises, Johnson-Cook, Hill y Drucker-Prager.

2.6.1.1 Plasticidad de Johnson-Cook

El modelo de plasticidad Johnson-Cook disponible en el “solver” explícito Abaqus/Explicit del programa Abaqus [43], es adecuado para el modelado de metales con una alta deformación dependiente de la velocidad de deformación o la temperatura. Este modelo es un caso particular de la plasticidad de von Mises tomando la superficie de fluencia de esta teoría y modificando su forma analítica con una ley de endurecimiento y la dependencia en la velocidad de deformación, así como la temperatura. Es muy utilizado para simulaciones donde se tienen velocidades de deformación altas (impacto balístico, por ejemplo). Este modelo debe ser utilizado en conjunto con el modelo elástico lineal. El endurecimiento de este modelo es de tipo isotrópico donde el esfuerzo de fluencia estático, σ^0 , es de la forma:

$$\sigma^0 = [A + B(\varepsilon^{-pl})^n](1 - \hat{\theta}^m) \quad (4)$$

donde ε^{-pl} es la deformación plástica equivalente mientras que A , B , n y m son parámetros del material medidos experimentalmente por debajo de la temperatura de transición, $\theta_{transición}$. La temperatura adimensional $\hat{\theta}$ se define según las condiciones como:

$$\hat{\theta} \equiv \left\{ \begin{array}{ll} 0 & \text{si } \theta < \theta_{transición} \\ (\theta - \theta_{transición}) / (\theta_{fusión} - \theta_{transición}) & \text{si } \theta_{transición} \leq \theta \leq \theta_{fusión} \\ 1 & \text{si } \theta > \theta_{fusión} \end{array} \right\} \quad (5)$$

donde θ es la temperatura actual, $\theta_{fusión}$ la temperatura de fusión y $\theta_{transición}$ definida como la temperatura bajo la cual el esfuerzo de fluencia ya no tiene dependencia en la temperatura. Para la definición de la plasticidad del material dentro del software Abaqus se deben proporcionar los valores de A , B , n y m , $\theta_{fusión}$ y $\theta_{transición}$.

Por otra parte, la dependencia en la velocidad de deformación para el modelo de Johnson-Cook asume que:

$$\bar{\sigma} = \sigma^0(\varepsilon^{-pl})R(\dot{\varepsilon}^{pl}) \quad (6)$$

y

$$\dot{\varepsilon}^{pl} = \dot{\varepsilon}_0 \exp \left[\frac{1}{C} (R - 1) \right] \text{ para } \bar{\sigma} > \sigma^0 \quad (7)$$

donde

$\bar{\sigma}$ es el esfuerzo de fluencia a una velocidad de deformación distinta de cero;

$\dot{\varepsilon}^{pl}$ es la velocidad de deformación plástica equivalente;

$\dot{\varepsilon}_0$ y C son parámetros del material medidos por debajo de la temperatura de transición;

$\sigma^0(\varepsilon^{-pl}, \theta)$ es el esfuerzo de fluencia estático; y

$R(\dot{\varepsilon}^{pl})$ es la relación entre el esfuerzo de fluencia a una velocidad de deformación distinta de cero con el esfuerzo de fluencia estático. De esta manera $R(\dot{\varepsilon}_0) = 1.0$. Por lo tanto, el esfuerzo de fluencia dependiente tanto de la velocidad de deformación como de la temperatura queda como:

$$\bar{\sigma} = [A + B(\varepsilon^{-pl})^n] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}^{pl}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] (1 - \hat{\theta}^m) \quad (8)$$

Si existe una dependencia en la velocidad de deformación, es necesario ingresar los valores de C y $\dot{\epsilon}_0$ en el software Abaqus para que esta sea tomada en cuenta en la simulación FEM [42].

2.6.1.2 Modelado de daño y falla

El modelo de plasticidad de Johnson-Cook puede ser utilizado con el modelo de falla dinámica Johnson-Cook y demás modelos progresivos de daño y falla. En el software Abaqus existe la posibilidad de elegir alguno de estos criterios para el inicio de falla, los cuales están habilitados para el “solver” explícito debido a que su diseño es adecuado para problemas dinámicos con una alta deformación [42]. El modelo de falla dinámica está basado en el valor de la deformación plástica equivalente en los puntos de integración de los elementos; de esta manera la falla ocurre cuando el parámetro de daño ω excede 1, el cual está definido como:

$$\omega = \sum \left(\frac{\Delta \epsilon^{-pl}}{\epsilon_f^{-pl}} \right) \quad (9)$$

donde $\Delta \epsilon^{-pl}$ es un incremento de la deformación plástica equivalente y ϵ_f^{-pl} es la deformación a la fractura; la suma es realizada a través de todos los incrementos en el análisis. La deformación a la fractura se asume como dependiente de la velocidad de deformación plástica adimensional, $\frac{\dot{\epsilon}^{pl}}{\dot{\epsilon}_0}$; de la relación entre la presión p y esfuerzo de von Mises q , p/q ; y de la temperatura adimensional, $\hat{\theta}$, definida en el modelo de endurecimiento de Johnson-Cook. Por lo tanto, el modo de fallo de Johnson-Cook queda como:

$$\epsilon_f^{-pl} = \left[d_1 + d_2 \exp \left(d_3 \frac{p}{q} \right) \right] \left[1 + d_4 \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}^{pl}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] (1 + d_5 \hat{\theta}) \quad (10)$$

donde d_1, d_2, d_3, d_4 y d_5 son parámetros de falla medidos en la temperatura de transición y $\dot{\epsilon}_0$ es la velocidad de deformación de referencia. De esta manera, para definir el modo de falla dinámico Johnson-Cook es necesario proporcionar los valores de d_1 a d_5 . Cuando este criterio de falla se cumple en un elemento, los componentes del esfuerzo se vuelven cero y permanecen así por el resto del análisis. Existe la opción de eliminar los elementos que han fallado de la simulación, lo cual es útil en el caso de perforación durante una simulación de impacto [42].

2.6.2 Elementos cohesivos

El software Abaqus contiene elementos cohesivos, los cuales sirven para representar capas adhesivas de grosor despreciable o uniones entre dos cuerpos sólidos. Existen tres formas de modelar los elementos cohesivos y estos dependen de la forma como se constituye la respuesta mecánica. La utilización de cada una de estas formas depende del tipo de aplicación que se desee replicar:

- Material continuo.
- Tracción y separación.
- Estado de esfuerzo uniaxial para modelar juntas y/o parches laterales sin restricción.

2.6.2.1 Modelo de Tracción-Separación

El de tipo Tracción-Separación (T-S) permite modelar interfaces y adhesivos, especialmente para capas muy delgadas o de espesor cero. La respuesta constitutiva está definida directamente por la tracción y deformación sufrida por el elemento cohesivo. Con el tipo T-S, la respuesta constitutiva del elemento se puede especificar definiendo los datos del material, como la rigidez, el esfuerzo máximo y la energía de fractura [42].

El modelo T-S asume un comportamiento lineal elástico de manera inicial seguido por el inicio y evolución de daño en los elementos cohesivos (Figura 19). El comportamiento elástico está definido en términos de una matriz constitutiva elástica \mathbf{E} que relaciona los esfuerzos nominales \mathbf{t} con las deformaciones nominales $\boldsymbol{\varepsilon}$ a través de la interface:

$$\mathbf{t} = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{nn} & E_{ns} & E_{nt} \\ E_{ns} & E_{ss} & E_{st} \\ E_{nt} & E_{st} & E_{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \\ \varepsilon_t \end{Bmatrix} = \mathbf{E} \boldsymbol{\varepsilon} \quad (11)$$

El vector \mathbf{t} consiste de un esfuerzo normal en la dirección 3 local, t_n , y de dos esfuerzos cortantes, t_s y t_t , en las direcciones locales 1 y 2, respectivamente. El valor nominal resulta de las componentes de fuerza divididos por el área original en cada punto de integración. Por otro lado, las componentes del vector $\boldsymbol{\varepsilon}$ se definen como:

$$\varepsilon_n = \frac{\delta_n}{T_0}, \varepsilon_s = \frac{\delta_s}{T_0}, \varepsilon_t = \frac{\delta_t}{T_0} \quad (12)$$

donde δ_n , δ_t y δ_s corresponden a la separación normal y cortantes respectivamente. T_0 es el grosor original constitutivo del elemento cohesivo [42].

2.6.2.2 Modelado de daño y falla del elemento cohesivo

El inicio de falla está determinado por un criterio el cual una vez cumplido da paso a la ley de evolución de daño elegido. Para los elementos cohesivos se puede elegir entre un criterio de esfuerzo o uno de deformación. Para ambos casos existe la fijación de límite según un valor máximo nominal o un valor cuadrático nominal. El criterio de esfuerzo nominal cuadrático (QUADS), por ejemplo, establece que si la función de interacción cuadrática entre los esfuerzos alcanza un valor igual a la unidad entonces el daño iniciará:

$$\left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_s}{t_s^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_t}{t_t^0} \right\}^2 = 1 \quad (13)$$

donde t_n^0 , t_s^0 y t_t^0 representan el valor máximo del esfuerzo nominal cuando la deformación sea puramente normal a la interface o puramente cortante en la primera o segunda dirección de corte, respectivamente [42].

Para la evolución del daño hay dos componentes que deben ser definidos. Primero se debe especificar ya sea el desplazamiento efectivo o la energía disipada debido a la falla. El segundo componente es la naturaleza de la evolución del parámetro de daño “D” desde la iniciación del daño hasta la falla final. D puede adoptar un comportamiento lineal, exponencial u otro específico de manera tabular.

En el caso de definir la evolución por medio de la energía disipada se debe ingresar el valor de la energía de fractura, la cual se define como el área bajo la curva T-S (Figura 19). En el software Abaqus se ingresa el valor de la energía de fractura como una propiedad del material y el software se asegura que la respuesta del daño, lineal o exponencial, sea igual a la energía de fractura. Los criterios posibles para elegir son la forma de una ley de potencias o la forma de Benzeggah-Kenane (BK). El criterio BK es de utilidad en el caso de que la energía de fractura durante la deformación sea igual para ambas direcciones cortantes, $G_s^C = G_t^C$, y tiene la forma de:

$$G_n^C + (G_s^C - G_n^C) \left\{ \frac{G_s}{G_T} \right\}^\eta = G^C \quad (14)$$

donde $G_S = G_s + G_t$, $G_T = G_n + G_S$ y η son parámetros del material [42].

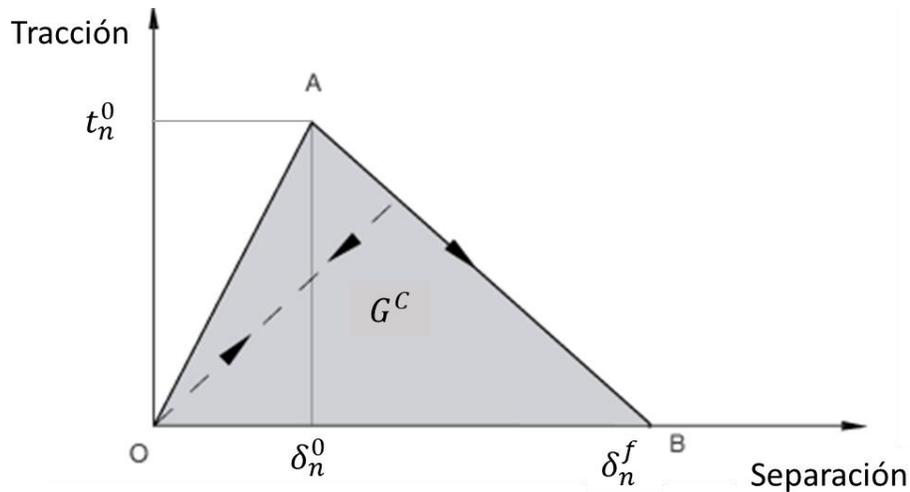


Figura 19. Modelo de respuesta T-S en elementos cohesivos [42].

2.7 Prueba de flexión

La prueba de flexión es un procedimiento de caracterización mecánica comúnmente usado en la industria e investigación de materiales. Un espécimen bajo flexión resiste simultáneamente esfuerzos de compresión (en la superficie donde la carga es aplicada), esfuerzos de tensión (en la superficie opuesta de la muestra) y esfuerzos cortantes o de cizallamiento en el plano central. Las condiciones de carga determinan los esfuerzos predominantes y consecuentemente las formas de falla [44]. Las propiedades que se dan a conocer con esta prueba son el módulo, resistencia y deformación de flexión [45]. Debido a la complejidad del estado de esfuerzos presente en la viga, resulta difícil relacionar directamente las propiedades de flexión a las propiedades fundamentales de tensión, compresión y cortante [46].

La prueba de flexión se puede realizar a tres y cuatro puntos [44], y se llevan a cabo colocando de manera longitudinal la muestra de material (por lo general una viga) sobre dos soportes (claro) y empujando hacia abajo en uno o varios puntos centrales para flexionar el material hasta conseguir su falla [45]. Una de las normas más utilizadas para la realización de esta prueba es la ASTM D7264 que describe ambas configuraciones (flexión a tres y cuatro puntos) para la evaluación de materiales compuestos [46].

2.7.1 Flexión a tres puntos

La prueba de flexión a tres puntos consiste en colocar la muestra del material entre dos soportes y aplicar una carga puntual justo en el centro del claro. El objetivo es flexionar el material hasta la falla mientras se registra la fuerza aplicada y el desplazamiento del indentador. La descripción de tres puntos proviene de los dos soportes en los extremos y el punto de aplicación de la fuerza en el centro [45] (Figura 20a). Cuando solamente es posible realizar la prueba de flexión a tres puntos suele incrementarse la relación de aspecto (longitud/grosor) para minimizar los efectos cortantes [44]. El momento flector es proporcional a la carga aplicada P y tiene un valor máximo igual a $PL/4$ en el centro y cero en los extremos a la altura de los soportes, donde L es la distancia entre los soportes (Figura 20b). Por otra parte, el esfuerzo cortante, además de ser proporcional a P , es constante a través del largo de la viga con un valor de $1/2P$ [46] (Figura 20c).

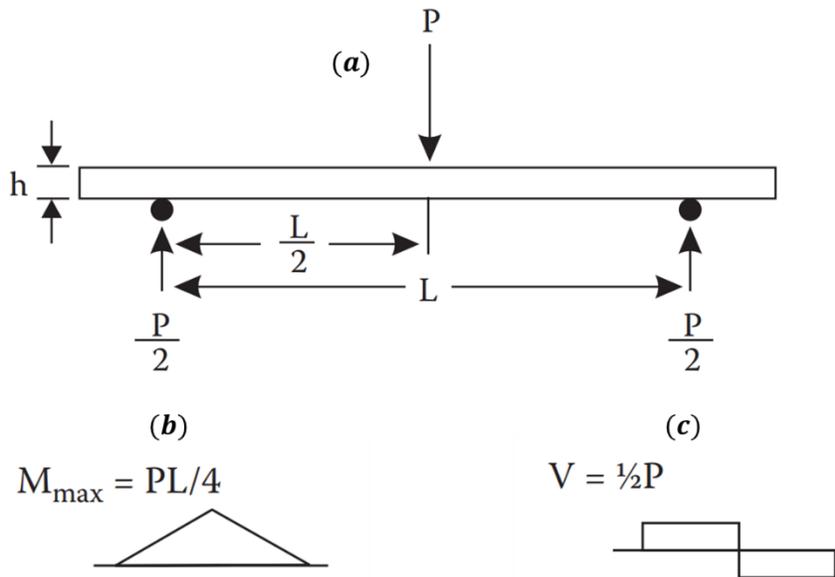


Figura 20. (a) Configuración de flexión a tres puntos, (b) distribución longitudinal del momento flector y su valor máximo y (c) distribución longitudinal del esfuerzo cortante. Tomado de Carlsson et al. [46].

Asumiendo que una viga tiene una sección transversal rectangular, el plano central contiene un eje neutral donde los valores del esfuerzo a flexión son cero. Por su parte, la fuerza de corte es balanceada por la distribución de un esfuerzo cortante interlaminar τ_{xz} que varía parabólicamente, siendo cero en las superficies libres y pasando a un valor máximo en el centro como se muestra en la Figura 21. El estado de esfuerzos es dependiente de la relación existente entre la distancia entre soportes y el grosor de la viga h (L/h). Vigas con valores pequeños de L/h son dominadas por

esfuerzos cortantes. Derivado de esto, vigas cortas ($L/h = 4$) son utilizadas para la determinación de la resistencia cortante interlaminar en flexión. Por otro lado, vigas largas promueven el fallo por flexión, pero producen deflexiones largas o excesivas que permiten la aparición de efectos no lineales que deberían evitarse. Asimismo, las vigas con valores largos del claro se deforman más y usualmente fallan por tensión o compresión. Típicamente, los materiales compuestos son más resistentes en tensión que en compresión. Adicionalmente, la carga aplicada se da en el punto de compresión máxima lo que tiende a introducir concentraciones locales de esfuerzo mayores que en el resto de la viga. Finalmente, todos estos factores producen que la viga falle usualmente por compresión en el centro de la viga bajo el punto de carga [46].

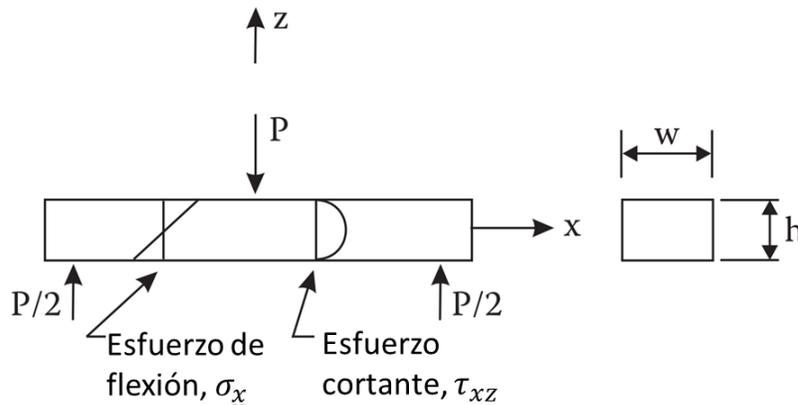


Figura 21. Esfuerzos existentes en una viga bajo flexión de tres puntos [46].

Para cualquier punto de la curva fuerza-desplazamiento bajo flexión de tres puntos, el esfuerzo de flexión puede calcularse con la siguiente fórmula proporcionada por la norma ASTM D7264 [47]:

$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2} \quad (15)$$

donde σ es el esfuerzo de flexión en la superficie y centro de la viga, P es la fuerza aplicada, L es el claro, b es el ancho de viga y h es el grosor de la viga. Por otro lado, la deformación máxima ocurre en el centro y superficie de la viga y puede calcularse con la siguiente fórmula:

$$\epsilon = \frac{6\delta h}{L^2} \quad (16)$$

donde ϵ es la deformación máxima en la superficie de la viga, δ es la deflexión en centro de la viga, L es el claro y h el grosor de la viga. El módulo elástico de flexión E_f está dado por:

$$E_f = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} \quad (17)$$

donde $\Delta\sigma$ es la diferencia de esfuerzo de flexión entre dos puntos de deformación seleccionados en la parte inicial lineal de la curva esfuerzo-deformación y $\Delta\epsilon$ es la diferencia de esos dos puntos de deformación.

2.7.2 Flexión a cuatro puntos

La prueba de flexión a cuatro puntos se realiza de manera similar a la prueba de flexión a tres puntos, con la diferencia que se tienen dos puntos de aplicación de carga ligeramente separados del centro. En general, se recomienda utilizar la prueba de flexión a cuatro puntos en vez de la de tres puntos, ya que una mayor parte de la muestra queda sometida al momento de flexión máximo [44]. Existen dos maneras de llevar cabo la prueba de flexión a cuatro puntos: a un medio y a un tercio del punto de aplicación de la fuerza.

El de un medio consiste en posicionar los puntos de aplicación de fuerza separados por un medio de la distancia del claro y a un cuarto de distancia de los soportes (Figura 22a). Para mantener el mismo valor máximo del momento flector obtenido en una prueba de flexión a tres puntos en la prueba de flexión a cuatro puntos con carga a un medio (Figura 22b), se requiere del doble de fuerza P que la utilizada en la prueba a tres puntos. El esfuerzo cortante transversal V varía de acuerdo con el tipo de carga aplicada. Para el caso de carga a un medio el valor máximo de la fuerza cortante es igual a P y existe solamente en un cuarto de viga en cada extremo (Figura 22c) [46].

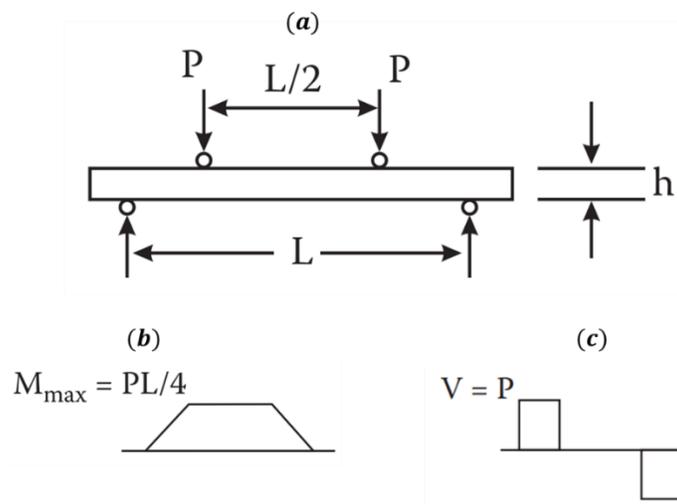


Figura 22. (a) Configuración de flexión a cuatro puntos con carga a un medio, (b) la distribución y valor máximo del momento flector y (c) distribución del esfuerzo cortante [46].

El de un tercio consiste en posicionar los puntos de aplicación de carga separados por una distancia de un tercio del claro y posicionados a una distancia de un tercio del claro de cada soporte [46] (Figura 23a). Para mantener el mismo valor máximo del momento flector obtenido en una prueba de flexión a tres puntos en la prueba de flexión a cuatro puntos con carga a un tercio (Figura 23b) la fuerza necesaria debe ser un 50% mayor. El momento flector es constante entre los puntos de carga para ambos casos y cero sobre los soportes [46] como se muestra en las Figura 22b y 23b, respectivamente. En el caso de carga a un tercio (el más recomendable), el valor máximo de la fuerza cortante es igual a $\frac{3}{4}P$ y existe en un tercio de viga en cada extremo (Figura 23c) [46].

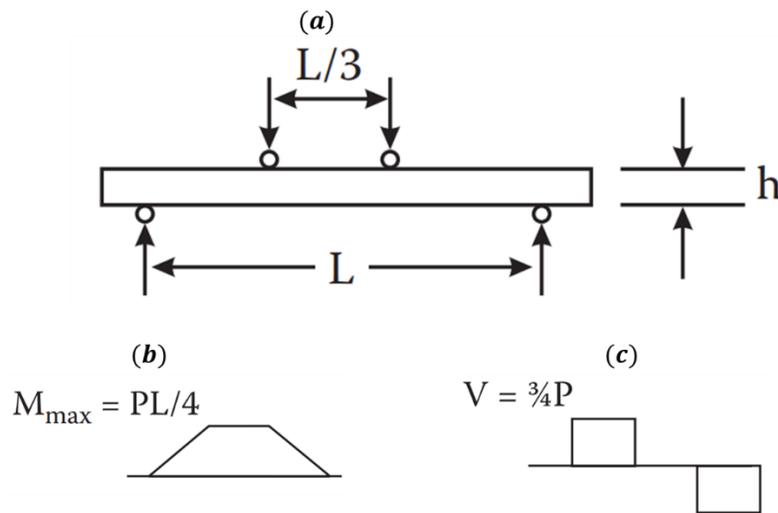


Figura 23. (a) Configuración de flexión a cuatro puntos con carga a un tercio, (b) la distribución y valor máximo del momento flector y (c) la distribución del esfuerzo cortante [46].

El esfuerzo máximo para fuerzas aplicadas a un medio puede calcularse mediante la fórmula proporcionada por la norma ASTM D6272-10 [48]:

$$\sigma = \frac{3PL}{4bh^2} \quad (18)$$

y para un tercio:

$$\sigma = \frac{PL}{bh^2} \quad (19)$$

donde σ , P , b y h son los mismos que para la Ecuación 15. La deformación con carga a un medio se calcula con:

$$\epsilon = \frac{4.36\delta h}{L^2} \quad (20)$$

y para un tercio:

$$\epsilon = \frac{4.70\delta h}{L^2} \quad (21)$$

donde:

ϵ , δ , h y L son los mismos que para la Ecuación 16. Para el módulo elástico de flexión se aplica la Ecuación 17.

2.8 Impacto dinámico

El concepto de impacto alude al choque e impulso de fuerzas existentes cuando dos o más cuerpos colisionan en un periodo de tiempo corto. En mecánica, las cargas se dividen en dos categorías: dinámica y estática. Una carga estática es la aplicación de una fuerza que actúa en una dirección constante con magnitud constante e independiente del tiempo. Por otro lado, una carga dinámica es la aplicación de una fuerza que varía en el tiempo en términos de dirección y magnitud [49]. Los problemas de impacto dinámico usualmente ocurren en periodos de tiempo cortos que van desde los nanosegundos hasta los milisegundos y presentan fenómenos de deformaciones y rotaciones altas, velocidades de deformación elevadas y condiciones de frontera no lineales [50].

La forma fundamental de los principios de dinámica son los descritos en términos de la dinámica de una partícula. Una *partícula* es un cuerpo de tamaño infinitesimal o punto de masa. Una partícula de masa M moviéndose a velocidad V tiene un momento MV . Si una fuerza resultante F actúa sobre la partícula causará un cambio en el momento de acuerdo con la Segunda Ley de Movimiento de Newton [51]:

$$\frac{d(MV)}{dt} = F \quad (22)$$

Comúnmente, la masa de la partícula es constante por lo que la ecuación se puede integrar para obtener los cambios de velocidad como una función continua del impulso $P(t)$:

$$\mathbf{V}(t) - \mathbf{V}(0) = M^{-1} \int_0^t \mathbf{F}(t') dt' \equiv M^{-1} \mathbf{P}(t) \quad (23)$$

La interacción de dos partículas B y B' que colisionan en un tiempo $t = 0$ generan fuerzas activas $\mathbf{F}(t)$ y $\mathbf{F}'(t)$ que actúan en cada partícula respectivamente, durante el periodo de interacción $0 < t < t_f$. Las fuerzas de interacción entre las partículas están relacionadas por la Tercera Ley de Movimiento de Newton la cual dice que dos cuerpos que interactúan generan fuerzas de acción y reacción iguales en magnitud, pero en dirección opuesta y colineales:

$$\mathbf{F}' = -\mathbf{F} \quad (24)$$

Teniendo una partícula B de masa M y otra B' de masa M' la integración de la ecuación 23 resulta en impulsos iguales pero opuestos. Por consiguiente, las ecuaciones de movimiento para una velocidad relativa se pueden tomar como:

$$\mathbf{v}(t) = \mathbf{v}(0) + m^{-1} \mathbf{P}(t), \quad m^{-1} = M^{-1} + M'^{-1} \quad (25)$$

donde m es la masa efectiva. Las segunda y tercera ley de Newton son la base para el análisis de eventos de impacto [51].

2.8.1 Impacto transversal en cuerpos flexibles

Para clasificar los tipos de colisiones se necesita considerar la evolución de las deformaciones, su distribución en los cuerpos involucrados y como afectan el tiempo de contacto. En general, hay cuatro tipos de análisis para colisiones de mediana y rápida velocidad: impacto de partículas, impacto de cuerpos rígidos, impacto transversal en cuerpos flexibles e impacto axial en cuerpos flexibles [51].

El impacto transversal en cuerpos flexibles ocurre cuando al menos uno de los cuerpos experimenta flexión como resultado de las presiones en el área de contacto. El nivel de flexión es significativo en puntos lejanos al área de contacto si la profundidad del cuerpo en dirección normal al plano tangente es pequeña en comparación con las dimensiones paralelas a este plano. Esta flexión reduce la presión en el área de contacto y prolonga el tiempo de la colisión. Una flexión es un origen de disipación de energía durante una colisión, adicional a la energía disipada por las deformaciones locales en los puntos de contacto. La rigidez de la región de contacto depende de la rigidez a flexión de los cuerpos al igual que de las propiedades de continuidad en la región adyacente al área de contacto. Este fenómeno es característico en vigas, placas y membranas [51].

Hipótesis

Un material compuesto multicapa bioinspirado en la concha nácar es más tenaz que un material monolítico de dimensiones y propiedades iguales ante pruebas de flexión e impacto debido a sus características estructurales internas.

Objetivo

General:

Generar por medio de un modelo FEM un material compuesto biomimético basado en la estructura de la concha nácar, el cual tenga una tenacidad mayor que una estructura monolítica de las mismas dimensiones ante cargas de flexión e impacto.

Específicos:

- Definir los elementos estructurales principales que le confieren una mayor tenacidad a la concha nácar para ser utilizados en un modelo FEM de un material compuesto multicapa.
- Desarrollar una metodología para la generación de la geometría de un material compuesto biomimético usando códigos de programación y un software CAD.
- Por medio de simulaciones FEM, comprobar mediante pruebas de flexión e impacto dinámico el aumento en la tenacidad de un material compuesto multicapa basado en la estructura de la concha nácar.
- Cuantificar por medio de simulaciones FEM la variación de la energía de deformación absorbida en un material compuesto biomimético por medio de un estudio paramétrico variando las distintas características de diseño geométrico y las propiedades del adhesivo.
- Analizar los modos de falla de las estructuras biomiméticas sometidas a flexión e impacto en las simulaciones FEM.

3 Metodología

La Figura 24 ilustra la metodología general desarrollada en este trabajo para el cumplimiento de los objetivos planteados. Los pasos de la metodología se encuentran numerados y se realizaron en ese orden. Cabe mencionar que, para llegar a los resultados finales, se hicieron varias iteraciones en la metodología antes mencionada. Cada paso de la metodología se encuentra descrito en detalle en las siguientes secciones.

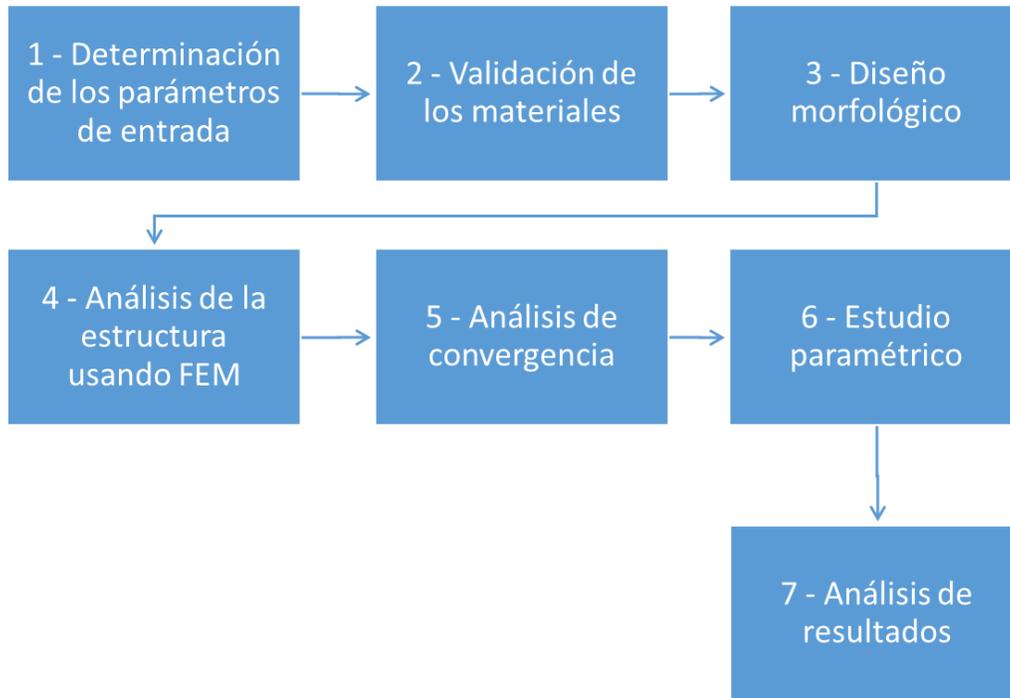


Figura 24. Proceso metodológico del diseño y simulaciones FEM del material compuesto biomimético.

3.1 Determinación de los parámetros de entrada

Para modelar el material compuesto biomimético inspirado en la concha nácar se determinaron los materiales sustitutos para la construcción de un nácar artificial con base en estudios anteriores numéricos [16, 20] y experimentales [52]. Para la fase rígida, la aragonita se sustituyó con el Aluminio 7075-T651 cuyas propiedades y parámetros de falla para el modelo FEM están compilados en el trabajo de Flores-Johnson et al. [16] (Tabla 2). Para la fase dúctil, el biopolímero se sustituyó con las resinas epóxicas Araldite 2015, que es una resina de uso industrial y cuyas propiedades fueron tomadas de Carneiro y Campilho [53] (Tabla 3) y con la resina Betamate 1044 con un módulo elástico mayor que el del Araldite y estudiado por Wang et al. [54] (Tabla 4).

Tabla 2. Propiedades y parámetros del modelo Johnson-Cook para la aleación de Aluminio 7075-T651 [16, 55-57].

<i>Propiedad del material</i>	Valor
Densidad ρ (kg/m ³)	2700
Módulo de Young E (GPa)	70
Razón de Poisson ν	0.3
<i>Endurecimiento por deformación</i>	
A (MPa)	520
B (MPa)	477
N	0.52
<i>Tasa de endurecimiento por deformación</i>	
Referencia de la tasa de deformación $d\varepsilon_0/dt$ (s ⁻¹)	5×10^{-4}
C	0.001
<i>Temperatura de ablandamiento</i>	
Temperatura de transición T_t (K)	293
Temperatura de fusión T_m (K)	893
M	1
<i>Parámetros de daño</i>	
D ₁	0.096
D ₂	0.049
D ₃	-3.465
D ₄	0.016
D ₅	1.099
u_{pl}^f (mm)	0.0009

Tabla 3. Propiedades y parámetros para la resina epóxica Araldite 2015 [53].

Propiedad del material	Valor
Densidad ρ (kg/m ³)	1400
Módulo elástico en la dirección normal E (GPa)	1.85
Módulo cortante G (GPa)	0.56
$K_{CI} = K_{CII} = K_{CIII}$ (N/mm ³)	10^6
Tracción normal máxima t_n (MPa)	12.63
Tracción cortante máximo t_s (MPa)	21.63
Tasa de liberación de energía crítica modo I G_{IC} (N/mm)	0.43
Tasa de liberación de energía crítica modo II G_{IIC} (N/mm)	4.7
Otros parámetros	
Coefficiente de fricción μ	0.2

Tabla 4. Propiedades y parámetros para la resina epóxica Betamate 1044 [54].

Propiedad del material	Valor
Densidad ρ (kg/m ³)	1350
Módulo elástico en la dirección normal E (GPa)	3.1
Módulo cortante G (GPa)	1.55
$K_{CI} = K_{CII} = K_{CIII}$ (N/mm ³)	10^6
Tracción normal máxima t_n (MPa)	85.5
Tracción cortante máximo t_s (MPa)	70
Tasa de liberación de energía crítica modo I G_{IC} (N/mm)	1.68
Tasa de liberación de energía crítica modo II G_{IIC} (N/mm)	3.57
Otros parámetros	
Coefficiente de fricción μ	0.2

Con la información recabada en la revisión bibliográfica se determinaron los elementos de diseño sobresalientes que aportan a la tenacidad de la concha nácar. Uno de los elementos más importantes fue el establecimiento de cierto grado de ondulación en las plaquetas cuya forma estuvo definida por una función sinusoidal:

$$f(x) = A \cos(kx) \quad (26)$$

donde A es la amplitud, $k = 2\pi/\lambda$ es el número de onda y λ es la longitud de onda, los cuales tuvieron los siguientes valores constantes en todos los modelos: $k = 0.2\pi$ y $A = 0.1$. El traslape utilizado en este trabajo fue el observado en el nácar tipo laminar presente en los bivalvos donde las plaquetas entre capas tienen la mitad de su área compartida, es decir, un traslape de un medio que genera una estructura tipo ladrillo y mortero [12] (Sección 1.2).

3.2 Validación de las propiedades de los materiales usados en los modelos FEM

Como parte del proceso de simulación FEM fue preciso realizar previo al estudio de los materiales biomiméticos, la validación de los materiales utilizados en los modelos, es decir, el aluminio y las resinas epóxicas. La validación de la respuesta mecánica del aluminio utilizando los parámetros y propiedades de la Tabla 2, se realizó simulando pruebas de tensión a una probeta con dimensiones idénticas a las utilizadas experimentalmente por Børvik et al. [55] (Figura 25). Para la asignación de las propiedades del aluminio a la probeta, se ingresaron los datos de la Tabla 2 al modelo en el módulo de “propiedades” en el software Abaqus. Los datos ingresados corresponden a las propiedades elásticas, plásticas y de falla. Para la elasticidad se requirió ingresar los valores del módulo de Young, la densidad y la razón de Poisson. La plasticidad fue mediante el modelo de plasticidad de Johnson-Cook y se configuró la ley de endurecimiento con dependencia en la velocidad de deformación. La falla fue simulada con el modelo de falla Johnson-Cook que es adecuado para modelar metales con una alta deformación. Para el mallado del modelo, se utilizaron elementos 3D de tipo hexaédrico C3D8R.

Las condiciones de frontera utilizadas en el modelo de la probeta de tensión se muestran en la Figura 25. La superficie de uno de los extremos fue “encastrada” de modo que no hubiera ni traslaciones ni rotaciones en los nodos durante la simulación. En el otro extremo se estableció un desplazamiento longitudinal máximo de 8 mm hasta alcanzar la ruptura del material mientras que los desplazamientos y rotaciones en las otras direcciones permanecieron en cero (Figura 25). El modelo se envió al “solver” Abaqus/Explicit para su resolución con un tiempo de simulación de 0.002 s.

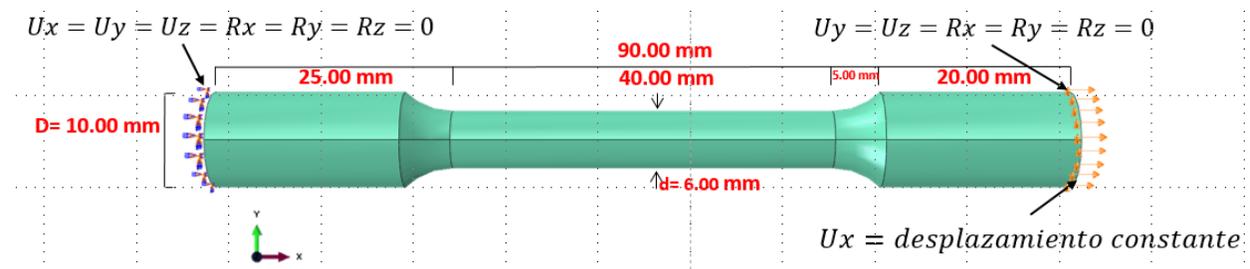


Figura 25. Dimensiones del modelo de la probeta para la prueba de tensión del aluminio y condiciones de frontera aplicadas.

Al igual que con el aluminio fue necesaria la validación de las resinas epóxicas usadas como adhesivo, previo a su uso en las simulaciones de los materiales biomiméticos. Para ello, la evaluación del adhesivo se hizo mediante la simulación de pruebas de delaminación en una junta T de aluminio, tal como lo realizó Carneiro y Campilho [53] de manera experimental utilizando el Araldite 2015 (Figura 26a). La simulación consistió en crear un modelo de una parte seccional del arreglo experimental como se muestra en la Figura 26b. Para ello, en la junta T se restringió el desplazamiento en dirección horizontal de la pared izquierda y se preestableció un desplazamiento constante en dirección vertical hasta conseguir un desprendimiento total (2 mm) del adhesivo que une la junta T. Los datos recabados fueron la fuerza durante la evolución de la tracción usando distintos grosores de lámina de aluminio, es decir, a 1, 2 y 3 mm de espesor. Al aluminio, modelado con elementos C3D8R, se le asignaron los parámetros y propiedades de la Tabla 2 y la unión (el adhesivo) de la junta T fue modelada mediante elementos COH3D8 usando los parámetros de la Tabla 3 y con un grosor de 0 mm de manera geométrica y de 1 mm de manera constitutiva en el modelo T-S.

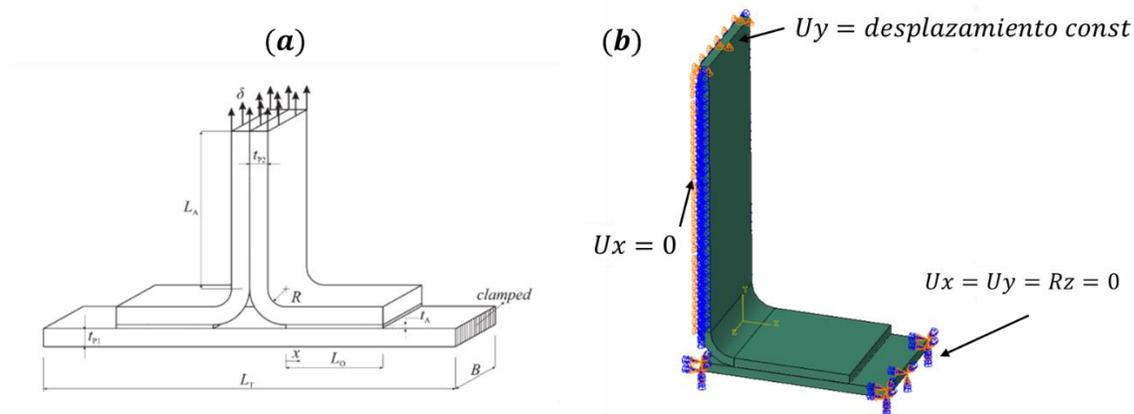


Figura 26. Junta T evaluada por Carneiro y Campilho [53]. (a) Arreglo experimental, (b) simulación de una parte seccional con las condiciones de frontera utilizadas.

3.3 Generación de plaquetas tipo Voronoi y dimensiones de viga para los modelos FEM de los materiales compuestos biomiméticos.

La complejidad geométrica de las plaquetas que conforman las capas del nácar condujo a la escritura de un código para generar su morfología superficial con las dimensiones y formas deseadas. Para esto se siguió la metodología descrita por Tran et al. [24] el cual utilizó el trazado de mediatrices a partir de la triangulación de Delaunay en unos puntos generadores desplazados de su posición inicial. En el caso particular de este trabajo, primero se generaron diagramas 2D de polígonos tipo Voronoi usando un código escrito en el software “Mathematica”. Los diagramas tipo Voronoi se generaron del trazado de mediatrices entre una serie de puntos equidistantes entre sí, formando entonces polígonos cuadrados después del trazado (Figura 27a). Después, desplazando los puntos de manera aleatoria a una cierta distancia de su posición original (Figura 27b), se obtuvo una dispersión distinta, y entonces se fueron creando polígonos tipo Voronoi cada vez más irregulares (Figura 27c). Algunos autores llaman al cambio de irregularidad de los polígonos como voronocidad [23]. La dispersión (d) de los puntos generadores se definió en este trabajo como los límites de la fracción aleatoria de la separación entre punto y punto dx y dy , que se desplazó una distancia Δx y Δy de su posición inicial P a una segunda posición P' , lo cual se describe matemáticamente de la siguiente forma:

$$P'(x, y) = P(x + \Delta x, y + \Delta y) \quad (27)$$

$$\Delta x = \mathbb{R} | -d \cdot dx < \mathbb{R} < d \cdot dx \quad \forall d \in (0,1) \quad (28)$$

$$\Delta y = \mathbb{R} | -d \cdot dy < \mathbb{R} < d \cdot dy \quad \forall d \in (0,1) \quad (29)$$

Nótese que d solo tomó valores entre 0 y 1.

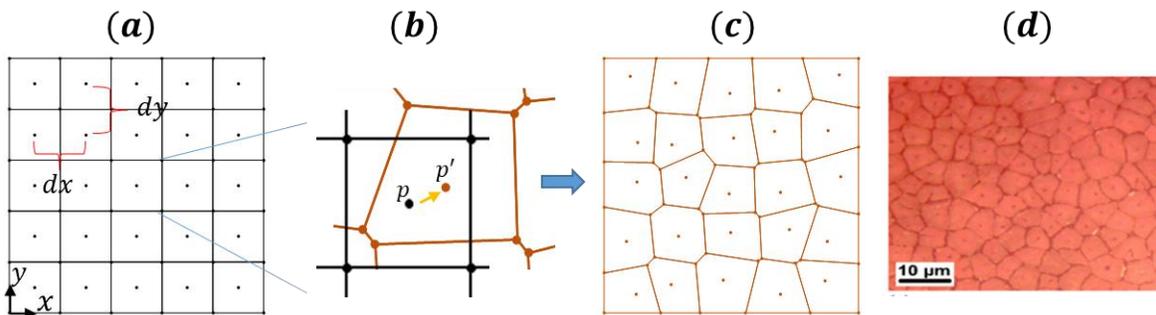


Figura 27. Procedimiento para la generación de diagramas 2D Voronoi. (a) Arreglo de cuadrados, (b) traslado de puntos generadores a una distancia aleatoria, (c) diagrama Voronoi resultante y (d) micrografía de Barthelat et al. [5]de la superficie del nácar.

El código generado en “Mathematica” (ver Anexo A) permitió la creación de los diagramas Voronoi en 2D y exportarlos a un software CAD. Para la generación de los diagramas Voronoi, inicialmente se crearon 178 polígonos en un área cuadrada de 100 x 100 mm de tal manera que las plaquetas tuvieran un área promedio aproximada de 56 mm². Con ayuda del software se pudo calcular la función de distribución de probabilidad para las áreas, el área promedio y la desviación estándar para distintos valores de “d” (0.1, 0.2, 0.3, 0.4 y 0.5). El valor de \mathbb{R} (Ecuaciones 28 y 29) para cada punto se obtuvo con el método de generación de números aleatorios MKL en el software Mathematica buscando cubrir el rango establecido $(-d, d)$ sin repetir valores.

Seguidamente el diagrama 2D de extensión .DXF se exportó al software CAD SolidWorks para realizar una extrusión a cada polígono y obtener así capas de plaquetas en 3D (Figura 28). Mediante un corte de extrusión se le agregó el grado de ondulación de la Ecuación 26 a las capas.

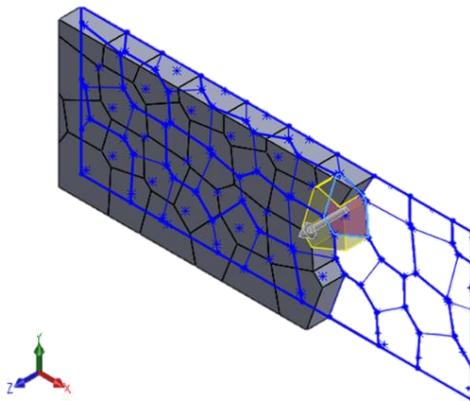


Figura 28. Proceso de extrusión de los diagramas 2D Voronoi usando un software CAD.

Mediante SolidWorks se pudo adecuar y recortar el largo y ancho del diagrama 2D a las dimensiones de la viga que se utilizaría en el modelo FEM (Figura 29). El grosor promedio de cada capa (y de las plaquetas) fue de 0.8 mm (h) de tal manera que en un material compuesto de cinco capas resultara un grosor total de 4 mm (H). La geometría resultante fue una viga con dimensiones de largo (L), ancho (B) y grosor (H) fijos lo que implicó un volumen constante para todos los especímenes modelados (Figura 29). dp es el diámetro promedio de las plaquetas poligonales el cual tuvo un valor de 7.69 mm; este fue el valor de separación inicial de los puntos generadores del diagrama Voronoi. Los valores de estas dimensiones están resumidos en la Tabla 5.

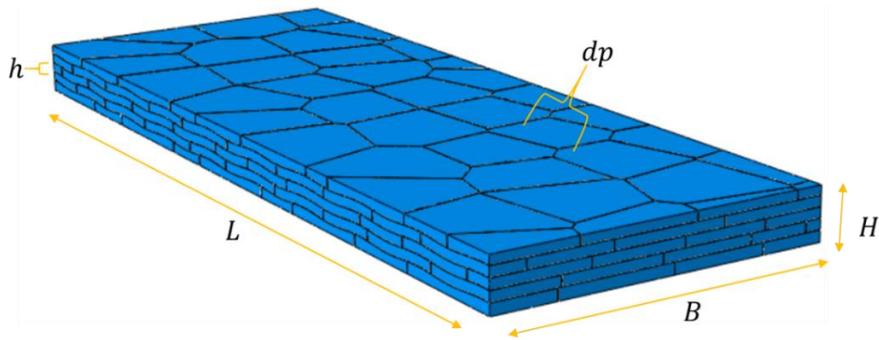


Figura 29. Aspecto de la viga biomimética para las simulaciones de las pruebas de flexión e impacto.

Tabla 5. Dimensiones de la viga para pruebas de flexión e impacto.

Dimensión	Valor (mm)
L	70
B	26
H	4
h	0.8
dp	7.69

La esbeltez de las plaquetas de la viga biomimética definido como el cociente del diámetro promedio entre su grosor fue de 9.61, el cual está dentro del rango encontrado en el nácar natural. Las relaciones geométricas entre la viga biomimética y el nácar natural se encuentran resumidas en la Tabla 6.

Tabla 6. Dimensiones geométricas de la Viga biomimética y el nácar natural.

	Viga biomimética	Nácar
Grosor total, H	4 mm	0.3 mm [10]
Grosor de plaqueta, h	0.8 mm	0.2 – 0.9 μm [8]
Número de capas, N	5	300 - 1500
Diámetro promedio de plaqueta, dp	7.69 mm	5 μm [8]
Esbeltez, dp/h	9.61	5.55 – 25

3.4 Análisis de los materiales compuestos biomiméticos usando simulaciones FEM

Una vez generadas las geometrías 3D de los materiales compuestos en el software CAD, estas se exportaron mediante un archivo con extensión .STEP al software FEM Abaqus para realizar el mallado correspondiente de las geometrías sólidas, asignar las propiedades de los materiales, asignar las condiciones iniciales y de frontera. Las capas de plaquetas tipo Voronoi de este trabajo se simularon con elementos 3D deformables del tipo hexaédrico (C3D8R) y con las propiedades del Aluminio 7075-T651 caracterizado experimentalmente por Børvik et al. [55] (Tabla 2).

Para simular la resina epóxica que fungió como adhesivo entre las plaquetas metálicas se utilizaron elementos cohesivos (COH3D8) de grosor cero con propiedades del Araldite 2015 (Tabla 3) y Betamate 1045 (Tabla 4). La respuesta constitutiva de los elementos cohesivos se definió por medio de la tracción y deformación máxima, usando el modo T-S. El inicio de daño se modeló con el criterio de esfuerzo nominal cuadrático y la evolución del daño por medio de la energía de disipación utilizando el criterio BK.

La unión entre las plaquetas y el adhesivo se configuró con la restricción tipo “Tie”, la cual modela una unión perfecta entre las superficies con lo que el desplazamiento de los nodos de la plaqueta fue el mismo que el de los nodos de la capa cohesiva (Figura 30).

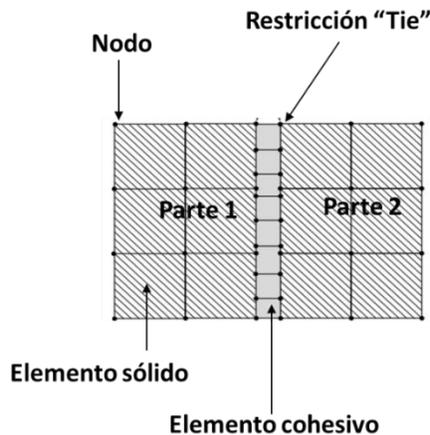


Figura 30. Restricción tipo Tie entre nodos de la capa cohesiva y partes sólidas [42].

3.4.1 Simulación FEM de la prueba de flexión a tres puntos

Para la simulación FEM de la prueba de flexión a tres puntos, se posicionó a la viga sobre un par de soportes y se usó un indentador semiesférico. El claro (distancia entre soportes) fue de 50 mm de distancia. Los soportes fueron geometrías rígidas semiesféricas de grosor cero modeladas con elementos tipo discreto rígido (R3D4) de tal forma que estas no sufrieron deformaciones. Para estos soportes se utilizaron condiciones de frontera de “encastre” para que no sufrieran traslación o rotación alguna. Al indentador semiesférico, posicionado sobre la superficie superior de la viga en la parte central, se le configuró un desplazamiento de 10 mm en la dirección y (transversal a la viga). El indentador también fue modelado como una geometría rígida con las mismas dimensiones que la de los soportes: con un radio de 3 mm y largo de 26 mm (Figura 31).

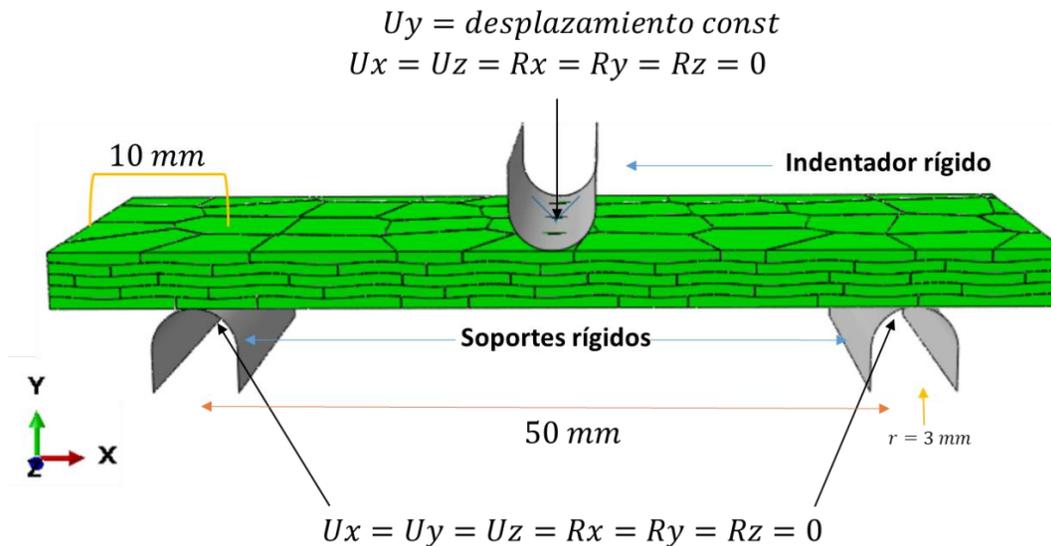


Figura 31. Modelo FEM de la prueba de flexión a tres puntos de la viga biomimética.

3.4.2 Simulación FEM de la prueba de flexión a cuatro puntos

Se realizó una simulación FEM de una prueba de flexión a cuatro puntos posicionando las vigas en dos soportes y definiendo las condiciones de frontera como se muestra en la Figura 32. La distancia del claro fue la misma que en caso de flexión a tres puntos, es decir, 50 mm. Un par de indentadores idénticos se posicionaron sobre la superficie de la viga con una distribución uniforme tal que la distancia entre ellos y respecto a cada soporte fuera de un tercio del claro (ver Sección 2.7.2). Los soportes tuvieron condiciones de frontera de “encastre” y a los indentadores se le configuró un desplazamiento de 10 mm en la dirección y (transversal a la viga). Las dimensiones de indentadores y soportes fueron las mismas que el caso de flexión a tres puntos.

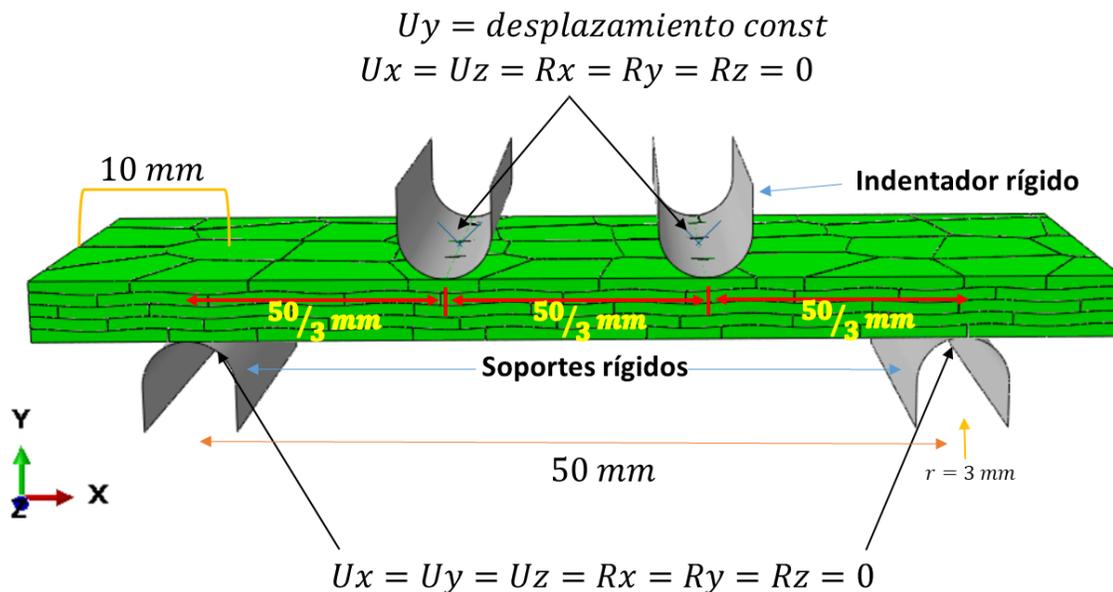


Figura 32. Modelo FEM de la prueba de flexión a cuatro puntos de la viga biomimética.

3.4.3 Simulación FEM de la prueba de impacto

Los modelos de las vigas biomiméticas y monolíticas también fueron evaluados ante eventos de impacto usando una configuración parecida a la prueba de flexión a tres puntos, es decir, con dos soportes en la parte inferior de la viga y un impactador cilíndrico impactando en la superficie superior de la viga. Esto se hizo para estudiar el comportamiento estructural de las vigas y cuantificar la energía absorbida durante el impacto. En la simulación de la prueba de impacto, el indentador semiesférico rígido se sustituyó con uno cilíndrico deformable al cual se le asignaron las constantes elásticas del acero ($\rho = 7900 \text{ k/m}^3$, $\nu = 0.29$ y $E = 200 \text{ GPa}$) y se usó una masa de inercia igual a 1 kg [58]. Los elementos del mallado del modelo de impacto fueron los C3D8R. Las velocidades de impacto evaluadas fueron de 10 m/s y 20 m/s preestablecidas de manera inicial en el impactador cilíndrico, al cual se le restringieron rotaciones y traslaciones en todas las direcciones con excepción de la traslación en la dirección y (dirección transversal a la viga). Ambos soportes rígidos permanecieron con condiciones de frontera de “encastre” (Figura 33). Los datos extraídos de la simulación fueron la fuerza de reacción en el indentador durante la evolución de la prueba, así como la velocidad final después de finalizada esta. Todas las simulaciones tuvieron una duración de 2 ms.

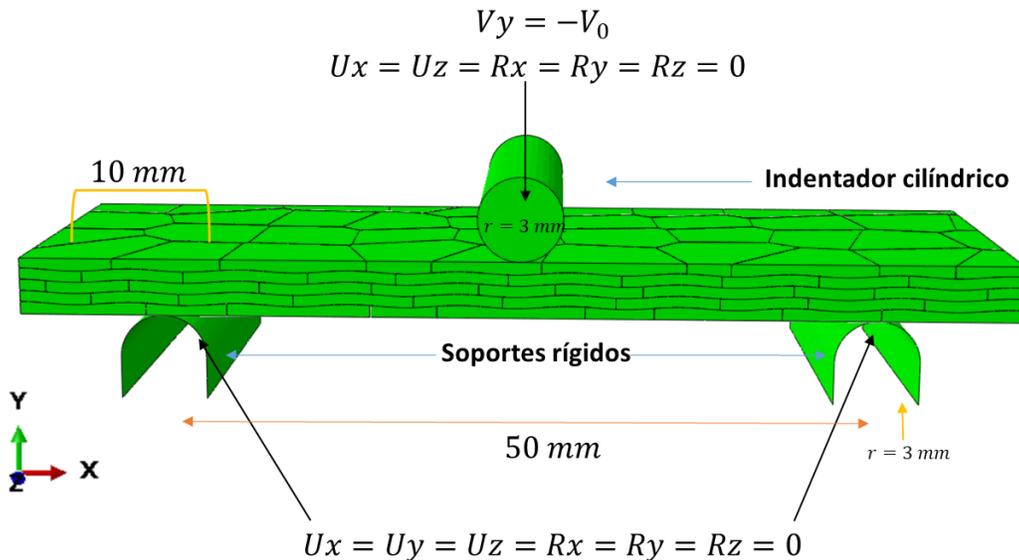


Figura 33. Modelo FEM y condiciones de frontera de la prueba de impacto dinámico.

3.5 Análisis de convergencia

Se realizó un análisis de convergencia variando el tamaño de elementos (TG) y fijando un número mínimo de estos a través del grosor (EAG) de una viga monolítica. El objetivo de este análisis fue el de encontrar una variabilidad menor al 5 % en el resultado de las fuerzas de reacción máximas de la prueba de flexión en función del tamaño de los elementos; esto para eliminar el efecto del tamaño de los elementos de la malla en los resultados de la simulación. El número EAG se fijó a un valor de 10 a través de todo el grosor de viga en tanto que el TG se fue variando con el número total de los elementos en el modelo. La prueba realizada fue la de flexión a tres puntos usando las vigas monolíticas que se muestran en la (Figura 34).

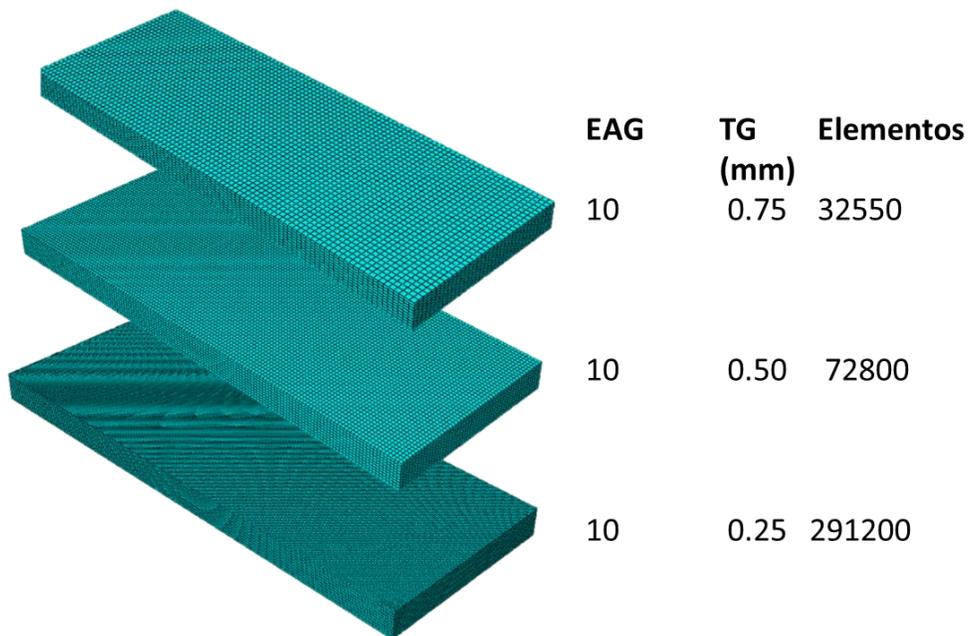
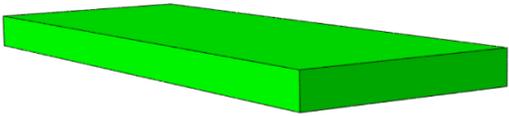
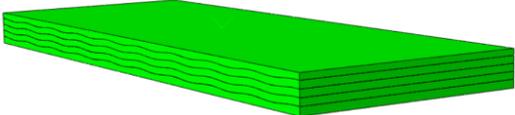
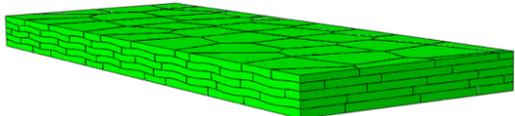


Figura 34. Aspecto de la malla del modelo FEM de las vigas monolíticas según el número de elementos, tamaño global y número de elementos.

3.6 Estudio paramétrico de las vigas biomiméticas

Se construyeron dos tipos de vigas biomiméticas, una que constó de cinco capas continuas con ondulación en sus superficies (VB1) y otra de cinco capas de plaquetas Voronoi con traslape de un medio y con ondulación (VB2). Ambas fueron evaluadas con los dos tipos de resina, Araldite (A) o Betamate (B) y comparadas con una estructura monolítica (VM) (ver Tabla 7). Para el caso de las VB2, las plaquetas correspondieron a un valor de dispersión d igual a 0.3.

Tabla 7. Características de las vigas evaluadas en las simulaciones FEM.

Estructura	Descripción	Adhesivo	Ilustración
VM	Monolítica	---	
VB1A	5 capas continuas onduladas	Araldite	
VB1B	5 capas continuas onduladas	Betamate	
VB2A	5 capas de plaquetas voronoi onduladas	Araldite	
VB2B	5 capas de plaquetas voronoi onduladas	Betamate	

3.7 Análisis de los resultados

Los resultados generados por el software Abaqus correspondientes a las pruebas de flexión e impacto fueron analizados e interpretados. Se hizo un análisis del modo de fallo de las vigas. Los resultados obtenidos de fuerza máxima y absorción de energía para las VB se compararon con la VM.

La energía absorbida en la simulación de la prueba de flexión se estimó con la ecuación del método propuesto por Lu y Yu [59] para determinar la capacidad de retención de carga de una estructura que sufre deformaciones altas. El método es aplicable bajo la condición de que la energía de deformación elástica (W) sea mucho más pequeña que el trabajo externo recibido E_e , es decir, que sea despreciable ($E_e \gg W$). Asumiendo un mecanismo de alta deformación para las vigas sometidas a flexión, el balance de energía tiene la siguiente forma:

$$E_e = \int_0^{\Delta f} P(\Delta) d\Delta = U_i = \int_0^{\Delta f} dU_i \quad (30)$$

Donde Δf es el desplazamiento final en el proceso, y la disipación interna de energía U_i es calculada como la integral de la disipación plástica incremental dU_i durante el proceso de deformación. La energía de entrada E_e es proporcional al trabajo realizado por la fuerza externa $P(\Delta)$, la cual está en función del desplazamiento Δ . Cuando P es una carga concentrada, el desplazamiento se toma justo debajo del punto de aplicación.

Por otro lado, la energía de deformación por unidad de volumen se conoce como la densidad de energía de deformación u y se calcula mediante la siguiente ecuación integral:

$$u = \int_0^{\epsilon_1} \sigma d\epsilon \quad (31)$$

La cual representa el área bajo la curva esfuerzo-deformación. La tenacidad (trabajo a la fractura) se define como el valor de la densidad de energía integrado hasta la deformación a la ruptura ϵ_f del material ($\epsilon_1 = \epsilon_f$), es decir, el área total de la curva hasta la ruptura. Por otra parte, la resiliencia se obtuvo con la integración de la Ecuación 31 hasta la deformación ϵ_Y a la cual el material alcanza el esfuerzo de fluencia ($\epsilon_1 = \epsilon_Y$), lo que es igual al área bajo la curva en la zona elástica. A pesar de que esta ecuación aplica para deformaciones pequeñas se puede utilizar para fines comparativos [60].

4 Resultados

4.1 Validación de las simulaciones FEM

4.1.1 Validación del Aluminio 7075

Para validar los parámetros y propiedades utilizados para modelar la respuesta mecánica del aluminio en las simulaciones FEM (Tabla 2), se realizó una simulación de una prueba de tensión del aluminio, y se comparó la curva esfuerzo verdadero-deformación verdadera obtenida numéricamente con la curva experimental presentada por Børvik et al. [55]. Se observó que ambas curvas tuvieron un comportamiento similar tanto en la zona elástica como en la plástica (Figura 35a). La diferencia de la fuerza máxima registrada entre simulación y el experimento fue de un 0.8%, mientras que la diferencia entre los desplazamientos a los que ocurrió la falla fue de un 2.8%. En la Figura 35b se muestra la probeta de aluminio justo después de la fractura en la simulación. Esta fractura ocurrió en el centro de la probeta después de una ligera formación de un cuello de botella como era de esperarse y que concuerda con lo observado experimentalmente.

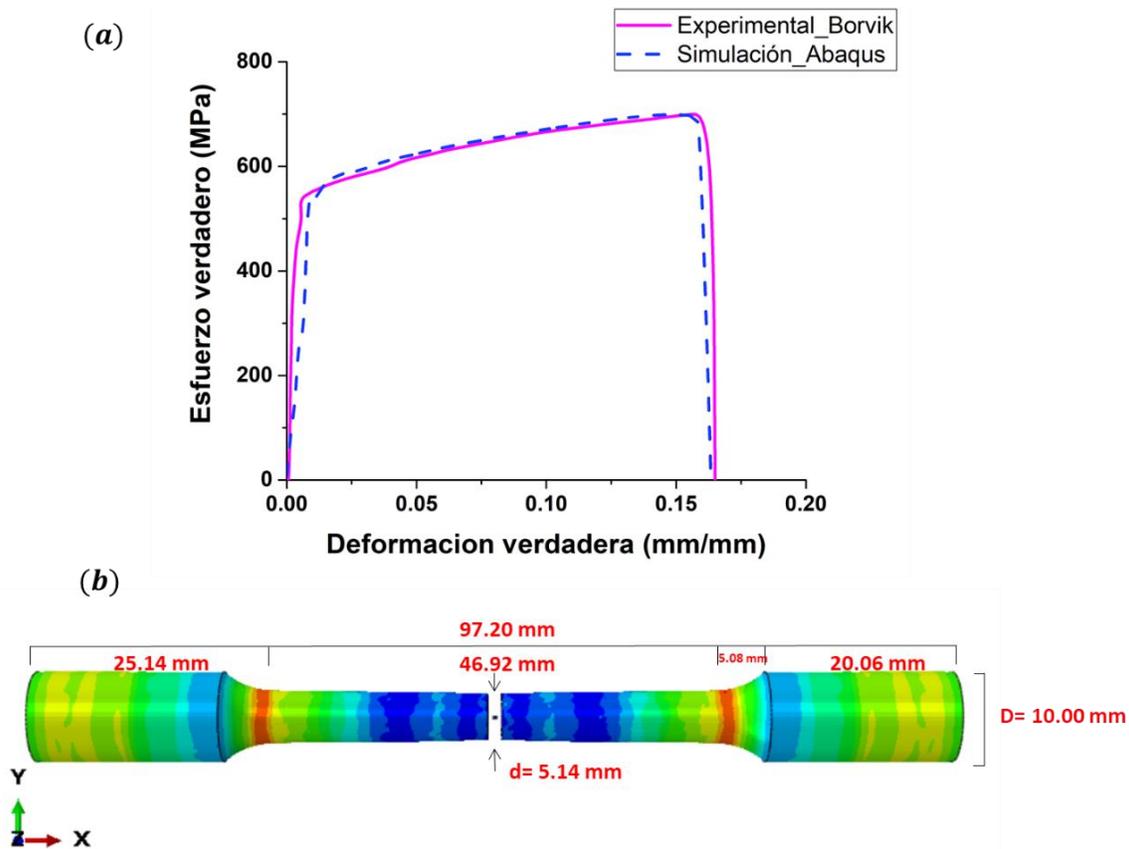


Figura 35. (a) Curva Esfuerzo-Deformación de la prueba de tensión experimental y la simulación numérica por FEM. (b) Especimen del Aluminio después de la fractura en la simulación.

La Tabla 8 muestra los valores de las propiedades mecánicas a tensión calculados a partir de la curva experimental proporcionada por Børvik et al. [55] y los calculados de la simulación numérica, así como la diferencia porcentual entre ambos. El módulo elástico se calculó mediante la Ecuación 17, en tanto que la resiliencia y la tenacidad utilizando la Ecuación 31.

Tabla 8. Valores numéricos de las propiedades a tensión del Aluminio 7075-T651.

	Módulo elástico (GPa)	Esfuerzo de fluencia (MPa)	Resiliencia (MJ/m ³)	Esfuerzo máximo (MPa)	Deformación a la fractura (%)	Tenacidad (MJ/m ³)
Experimental [55]	70.00	539.87	2.27	704.76	16.43	105.12
Simulación	70.27	560.25	2.03	699.11	15.97	100.72
Δ (%)	0.4	3.8	-10.9	-0.8	-2.8	-4.2

4.1.2 Validación de la resina epóxica y los elementos cohesivos

Con el fin de validar los parámetros utilizados en los elementos cohesivos que simularon el adhesivo de unión entre las capas de aluminio, se simuló la prueba de una junta T con grosores de lámina de aluminio de 1, 2 y 3 mm. Los resultados de la fuerza máxima de la junta T obtenidos tanto numérica como experimentalmente utilizando la resina Araldite se muestra en la Figura 36a. La fuerza máxima en la simulación fue siempre menor respecto a lo obtenido de manera experimental, la diferencia entre láminas de un 1 mm de grosor fue de 5% mientras que para el grosor de 2 mm fue de un 3%. La diferencia mayor se obtuvo para el grosor de 3 mm, la cual fue de 11% (Figura 36a). Estos porcentajes se pueden considerar despreciables para fines prácticos y la tendencia del aumento de la fuerza máxima con el aumento del grosor de lámina es indicio de una buena funcionalidad de los elementos cohesivos y una buena representación del fenómeno físico. En la Figura 36a se observa que tanto en la simulación como en el experimento se tienen rectas con pendiente similar entre punto y punto al pasar de 1 a 2 mm de grosor. Al pasar de 2 a 3 mm de grosor, la simulación sigue un comportamiento lineal y el experimental aumenta ligeramente. Este comportamiento es suficiente para llevar a cabo estudios paramétricos en los materiales biomiméticos usando los elementos cohesivos dado que los resultados deben ser relativos mas no necesariamente exactos. El desprendimiento de la junta T conforme esta se desplaza hacia arriba propicia el rompimiento y eliminación de los elementos cohesivos de la capa adhesiva que une la junta. El proceso de desprendimiento es similar al que se da de manera experimental (Figura 36b).

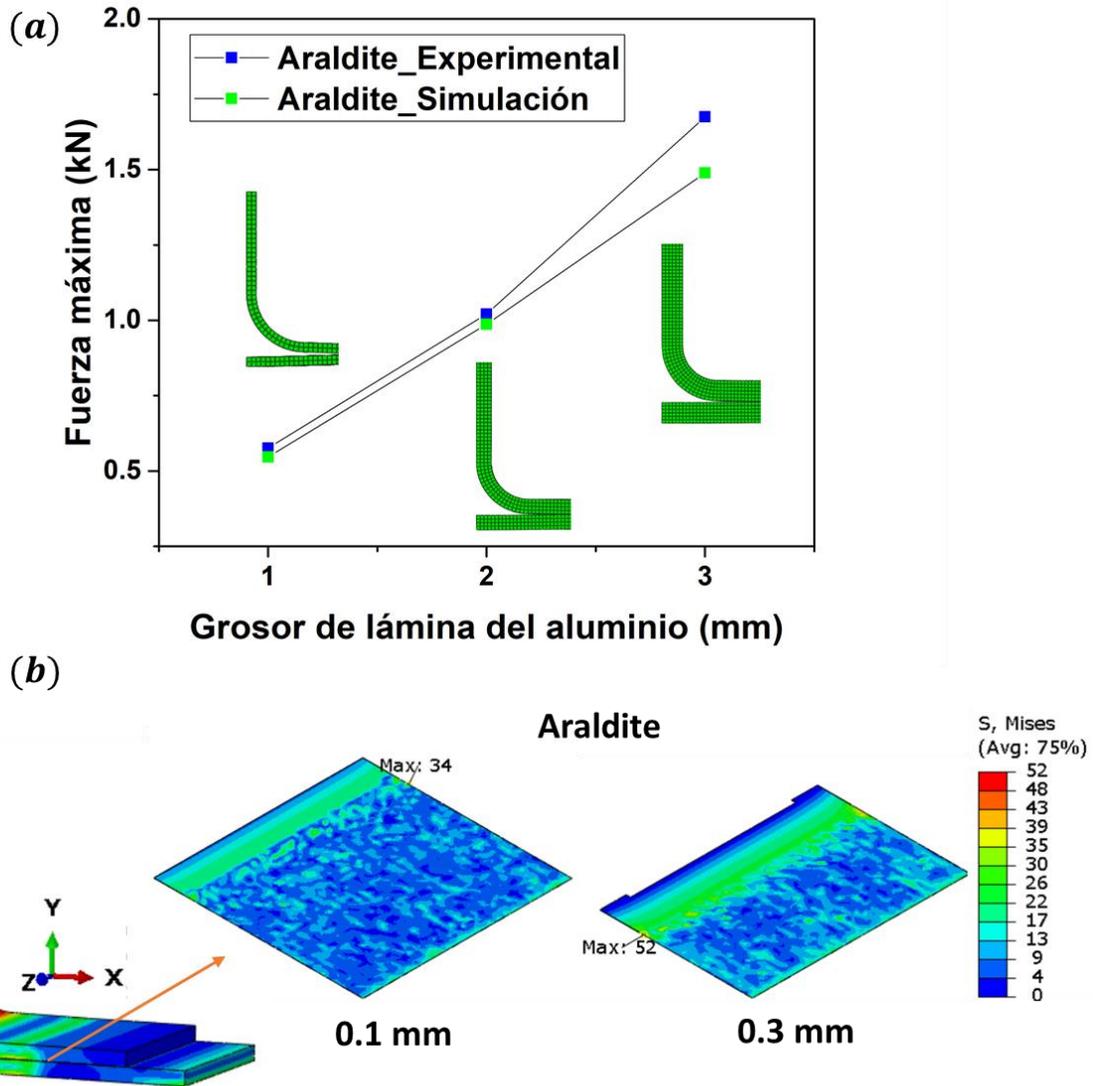


Figura 36. (a) Fuerza máxima de la prueba de delaminación experimental y numérica por medio del FEM. (b) Junta T simulada y proceso de eliminación (desprendimiento) de los elementos cohesivos.

La Figura 37a muestra la curva esfuerzo-deformación de los puntos nodales en la capa cohesiva en dirección normal. Se observa un comportamiento lineal de acuerdo con el modelo T-S para elementos cohesivos. Ambas resinas se modelaron con una misma rigidez K_{CI} igual a 10^6 N/mm^3 de manera isotrópica, valor que fue utilizado para representar el comportamiento del Araldite según investigaciones anteriores [61, 62]. Seguido de la zona elástica se observa el punto máximo de retención de carga que estuvo definido según el criterio de esfuerzo nominal cuadrático, de tal

forma que el Araldite solo alcanzó 21 MPa (Figura 37b-1) a una deformación de 0.005 mm/mm y el Betamate 85 MPa (Figura 37b-2) a 0.02 mm/mm, en la dirección normal. Después de este punto se observa el comportamiento de la evolución del daño de cada resina según la ley B-K. El área bajo las curvas representa la energía de fractura de cada resina.

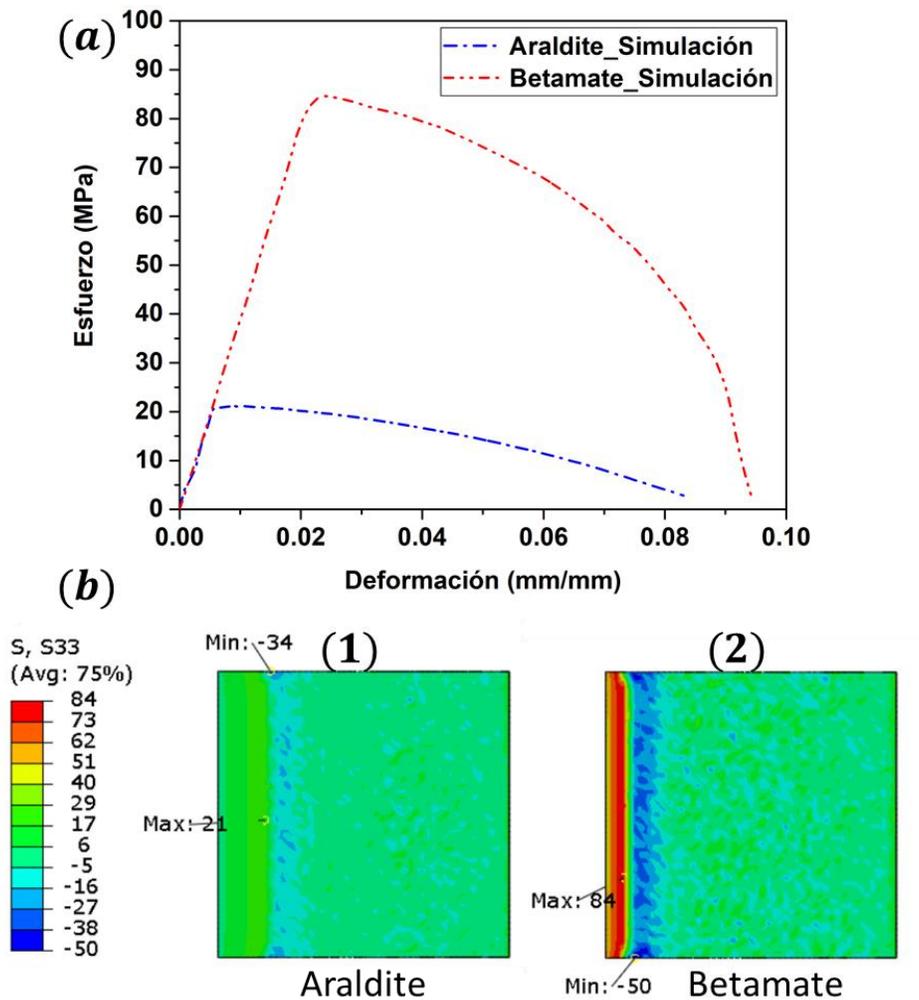


Figura 37. (a) Curva esfuerzo-deformación de las resinas epóxicas simuladas, (b1) esfuerzo normal de Araldite 2015 y (b2) esfuerzo normal de Betamate 1045.

4.2 Diagramas Voronoi

Con el fin de imitar la morfología de la superficie del nácar se escribió un código en Mathematica capaz de generar plaquetas poligonales tipo Voronoi con distintos grados de dispersión de sus puntos generadores (Anexo A). Se puede ver en la Figura 38 que con la variación del parámetro “d” se van creando curvas de dispersión de áreas distintas; conforme el valor de “d” aumenta, la curva se vuelve más ancha y dispersa. Con un valor de “d” igual a 0.58 se consiguió una distribución normal con un promedio de área igual a 56 mm^2 y una desviación estándar de 16 lo cual corresponde a un 28% del valor de la media. Esta proporción es similar a la de la distribución normal de áreas presente en el nácar reportado por Barthelat et al. [5], donde el promedio de áreas fue igual a $35 \mu\text{m}^2$ con una desviación estándar de 10. Debido a la dificultad de obtener un mallado uniforme en el modelo FEM con plaquetas con una dispersión igual a la del nácar ($d = 0.58$), se utilizó $d = 0.3$ para la viga biomimética “VB2” evaluada en este trabajo.

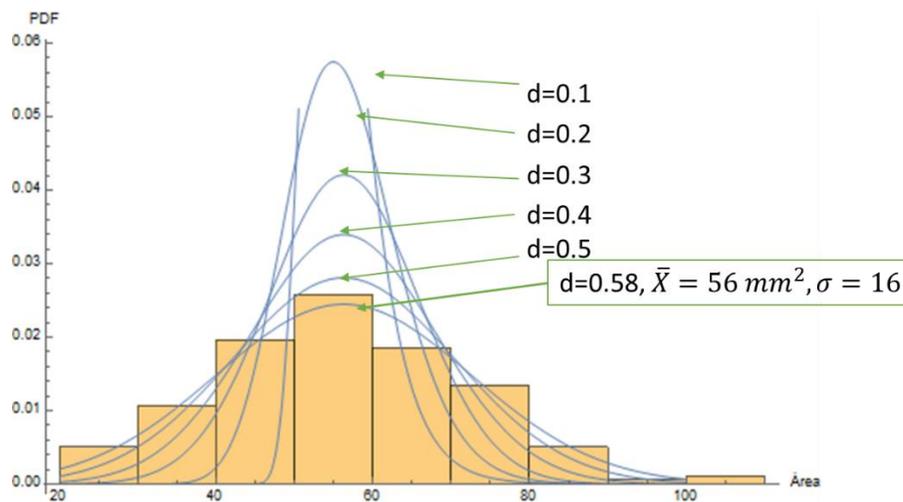


Figura 38. Distribución de las áreas de los polígonos Voronoi según la dispersión de los puntos generadores.

La Figura 39 muestra los diagramas tipo Voronoi generados para diferentes valores del parámetro “d”. Para los valores de 0.5 y 0.58 (Figura 39a) ya es visualmente apreciable que los polígonos son cualitativamente aproximados en forma a lo revelado por la micrografía de la superficie del nácar en la Figura 39b.

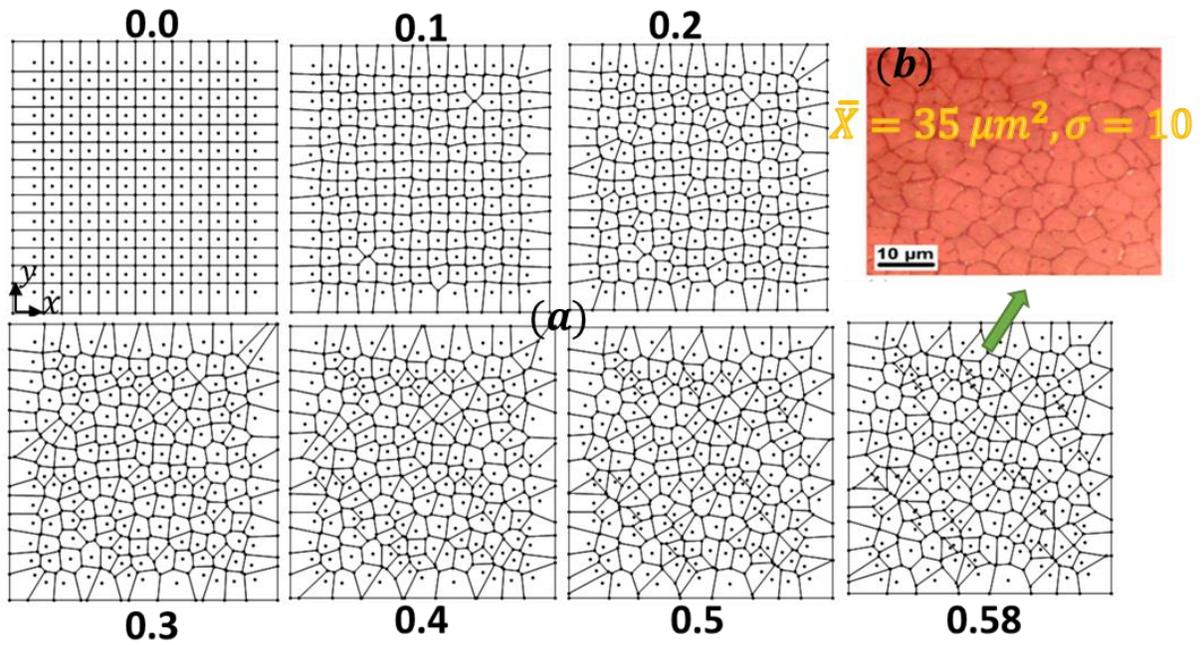


Figura 39. (a) Aspecto de los diagramas Voronoi con distintos valores de dispersión “d” de los puntos generadores. Conforme “d” aumenta de 0.1 a 0.5 los polígonos son más visualmente aproximados a (b) la micrografía de la superficie del nácar obtenida por Barthelat et al. [5].

4.3 Análisis de convergencia de malla del modelo FEM

Se realizó un análisis de convergencia para encontrar un tamaño de malla adecuado para las simulaciones FEM. Se simuló la prueba de flexión a tres puntos de una viga monolítica con las dimensiones resumidas en la Tabla 5. Se observó que un desplazamiento de 10 mm resultó en una fuerza máxima de 6.53 kN para un tamaño global de elemento igual a 0.75 mm con 10 elementos a través del grosor de la viga (32550 elementos totales). Para el caso de un tamaño de elemento igual a 0.5 mm con 10 elementos en el grosor (72800 elementos totales), la fuerza máxima fue de 6.55 kN representando un aumento del 1% en comparación con el caso anterior. En la prueba con elementos de tamaño de 0.25 mm (291200 elementos totales) la fuerza máxima fue de 6.47 kN difiriendo del segundo caso en un 1.2% solamente. Según este análisis de convergencia, el tamaño de elemento adecuado para este estudio es el de 0.5 mm con 10 elementos en el grosor total de la viga. Esta selección se respalda por el hecho de que el tiempo de simulación para el caso de un tamaño de elemento de 0.25 mm aumentó seis veces respecto al tiempo observado con un tamaño de elemento de 0.5 mm (Figura 40) pero la diferencia de resultados entre ambos tamaños de elemento fue aproximada al 1%. Es decir, el seguir aumentando el número de elementos aumenta el tiempo de simulación drásticamente sin que esto resulte en resultados significativamente más precisos. Diferencias del 2% o menores son despreciables para fines prácticos en este estudio.

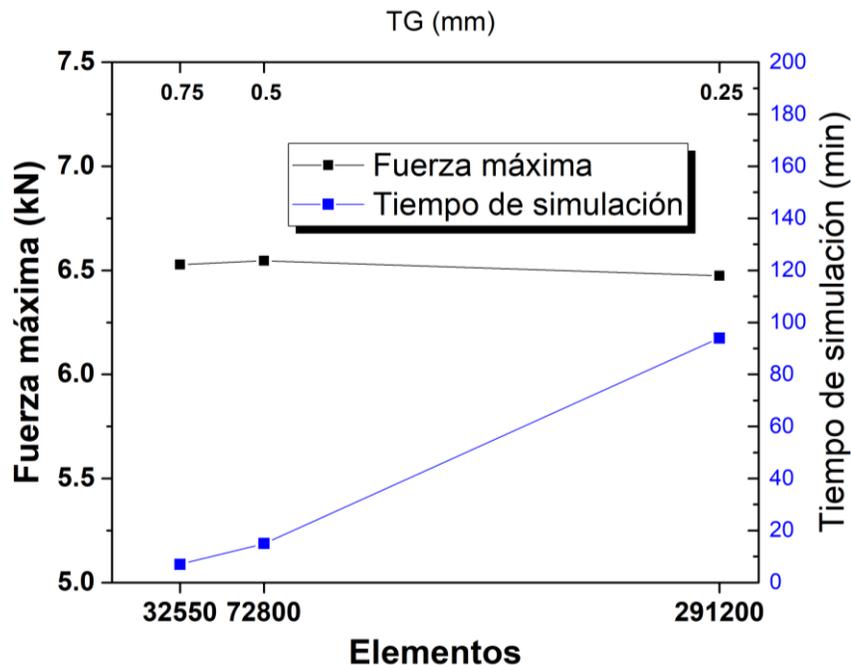


Figura 40. Fuerza máxima y tiempo de simulación obtenidos según el tamaño y el número de elementos en la simulación FEM de prueba de flexión de tres puntos de una viga monolítica.

4.4 Resultados de la simulación FEM de la prueba de flexión a tres puntos

La Figura 41a muestra los resultados de las pruebas de flexión a tres puntos de las vigas monolítica (VM) y biomiméticas con capas unidas por el adhesivo Araldite. La VM presentó el comportamiento clásico experimental de una viga metálica sometida a una prueba de flexión, lo cual incluye una zona elástica, un punto de fluencia y una zona de daño o colapso por fractura [63, 64]. La VM presentó una fuerza máxima de 6.55 kN, la cual fue mayor que la fuerza observada en las vigas biomiméticas (VB), y su energía absorbida hasta un desplazamiento de 10 mm fue de 39.60 J. El modo de fallo fue por fractura catastrófica del aluminio ocurrido aproximadamente a los 6 mm mostrando una caída súbita de la fuerza de reacción en el indentador semiesférico (Figura 41b-1). La curva de comportamiento de la VB1A (ver nomenclatura en la Tabla 7) resultó muy distinta a la VM, es decir, solamente alcanzó una fuerza máxima de 3.90 kN y una absorción de energía de 27.45 J; durante su evolución se observaron múltiples picos y tres principales caídas de fuerza correspondientes a los 2, 6 y 9 mm de desplazamiento lo cual se debió a la fractura de los elementos de la capa cohesiva (Figura 41b-2). Es notable que, pasado los 7 mm de desplazamiento, la resistencia fue mayor en la VB1A que en la VM mostrando indicios de un ligero incremento en la ductilidad. La VB2A presentó una fuerza máxima y energía absorbida mucho menor que la de la VB1A y la VM, sin embargo, contrario a lo observado en la VB1A y VM, durante la evolución de la curva fuerza-desplazamiento de la VB2A no se encontraron caídas súbitas de la fuerza. Para la VB2A el valor máximo de la fuerza fue de 1.33 kN y el de la energía absorbida fue de 6.52 J (Figura 41b-3).

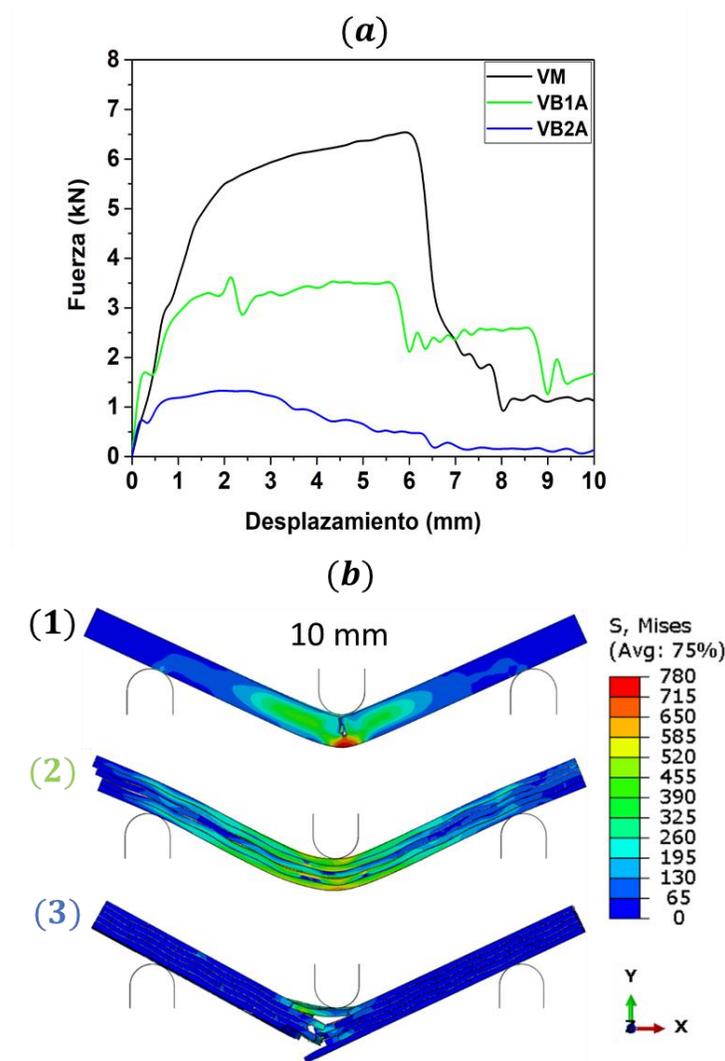


Figura 41. (a) Curvas fuerza-desplazamiento de la viga monolítica (VM) y las vigas biomiméticas (VB1A y VB2A) unidas por el adhesivo Araldite y (b) distribución de esfuerzos a los 10 mm de desplazamiento.

En la Figura 42a se presenta la evolución de las curvas correspondientes a las vigas biomiméticas unidas por el adhesivo Betamate, el cual es más resistente y absorbe más energía que el Araldite. Entre lo más destacable se encuentra que la VB1B obtuvo un desempeño similar al de la VM dentro de la zona elástica. Pasando el punto de fluencia, llegó a un valor máximo de 5.89 kN en fuerza máxima, y posteriormente se observó una caída súbita a los 4.5 mm de desplazamiento. Esta caída se debió a la delaminación ocurrida en la capa intermedia por la degradación de los elementos cohesivos (Figura 42b-2). Posterior a este evento, la viga fue capaz de seguir resistiendo incluso valores mayores que la VM después de su fractura. En el caso de la VB2B se obtuvo un desempeño bajo comparado con la VB1B tanto en la fuerza máxima alcanzada (2.14 kN) como en la energía

absorbida (7.20 J). Lo destacable es la evolución de su curva, que presentó ligeras fluctuaciones en la fuerza con amplitudes casi imperceptibles, muy distinto a lo observado con las vigas anteriores. El fallo se concentró en la delaminación y desacoplamiento de las plaquetas de una misma capa justo debajo del punto de aplicación de la fuerza (Figura 42b-3).

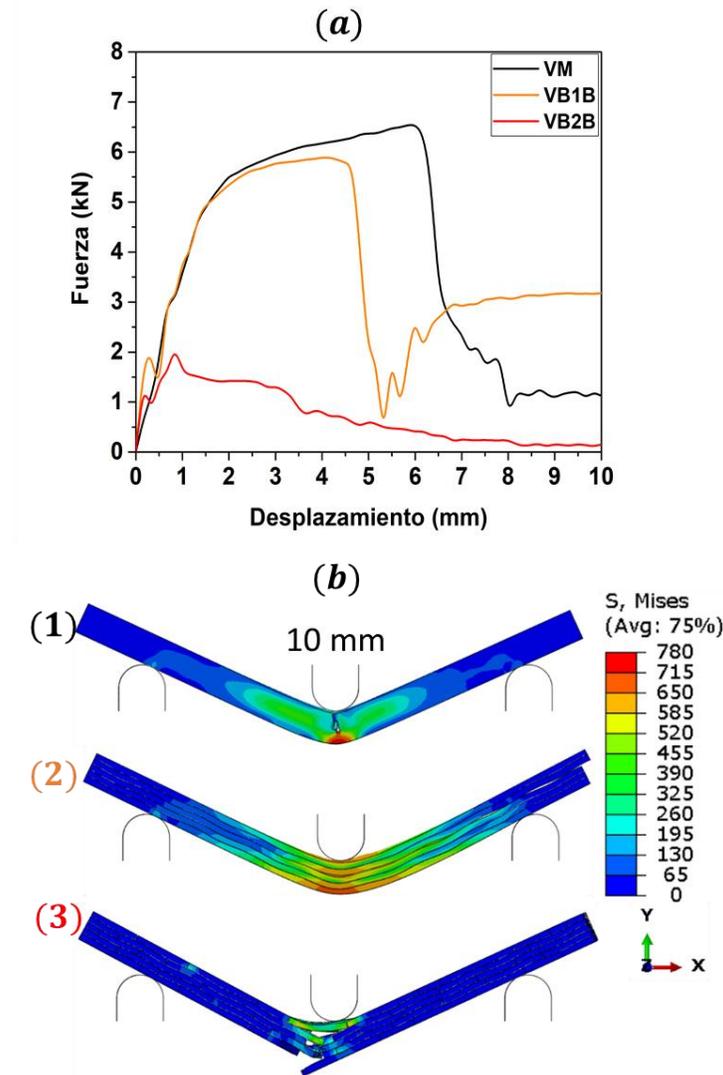


Figura 42. (a) Curvas fuerza-desplazamiento de las vigas biomiméticas unidas por el adhesivo Betamate y su (b) concentración de esfuerzos a los 10 mm de desplazamiento.

Si se comparan las vigas biomiméticas con características geométricas iguales, pero con distinto adhesivo se observan comportamientos muy diferentes. La VB1A, por ejemplo, presentó tres puntos de falla marcados en la curva de fuerza-desplazamiento mientras que la VB1B, solo mostró un punto de falla a los 4.5 mm de desplazamiento (Figura 43a). La falla en ambos casos estuvo ligada a una delaminación por degradación del adhesivo (ver Figuras 41b-2 y 42b-2). La diferencia

entre la fuerza máxima alcanzada por la VB1A y la VB1B fue de un 33.7% y la diferencia entre la absorción de energía fue de un 26.2%. Si se compara la VB2A con la VB2B, se observó un comportamiento mecánico similar, con la excepción de que la VB2B con el adhesivo Betamate presentó un pico de fuerza más elevado (Figura 43b); la diferencia entre la fuerza máxima fue de un 37.9% mientras que la diferencia en la absorción de energía fue de un 9.4%. La Tabla 9 contiene los valores de fuerza máxima y energía absorbida a los 10 mm de desplazamiento para cada una de las vigas estudiadas, así como los porcentajes de la fuerza máxima y de la energía absorbida con respecto a los valores obtenidos con la VM.

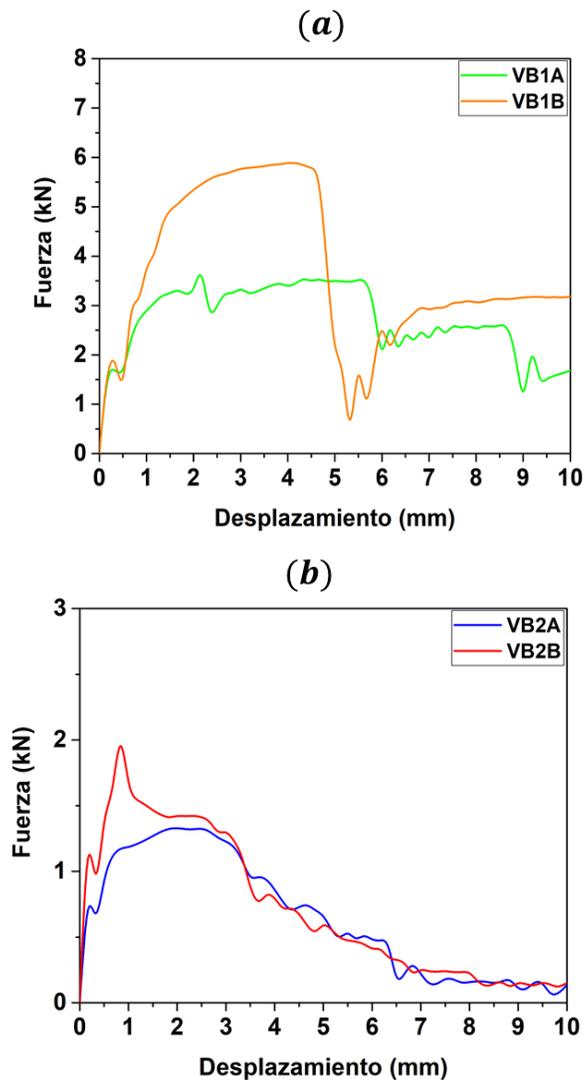


Figura 43. Comparación de las curvas fuerza-desplazamiento de las vigas biomiméticas según el adhesivo utilizado en las vigas de (a) capas continuas (VB1) y (b) Voronoi (VB2).

Tabla 9. Fuerza máxima y energía absorbida por las vigas sometidas a flexión a tres puntos.

Viga	Fuerza máxima (kN)	Porcentaje de la fuerza máxima con respecto a la VM (%)	Energía absorbida (J)	Tenacidad a 10 mm (MJ/m ³)	Porcentaje de la energía absorbida con respecto a la VM (%)
VM	6.55	100.0	39.60	5.44	100.0
VB1A	3.90	59.6	27.45	3.77	69.3
VB1B	5.89	89.9	37.18	5.11	93.9
VB2A	1.33	20.3	6.52	0.86	16.6
VB2B	2.14	32.7	7.20	0.99	18.2

4.4.1 Discusión de los resultados de flexión a 3 puntos

Es claro que el comportamiento de las estructuras biomiméticas es distinto entre ellas y distinto al observado en la viga monolítica. La VM por su continuidad como un sólido unicapa presentó la mayor absorción de energía de todas las simulaciones realizadas a los 10 mm de desplazamiento. Las vigas biomiméticas de cinco capas continuas con ondulación unidas por un adhesivo fueron mejores en absorción de energía comparadas con las vigas de plaquetas Voronoi, pero sin superar a la VM. La discontinuidad a través de la sección transversal de la VB1A y VB1B influyó en el desempeño a flexión a tres puntos dado que redujo la rigidez. Para estas vigas la fuerza máxima estuvo en función de la capacidad de carga del adhesivo; una vez alcanzada la resistencia de los elementos cohesivos, estos se degradaron causando fallas por delaminación entre las capas intermedias. Bajo el supuesto de que la absorción de energía se maximiza con una buena combinación entre rigidez y ductilidad, la tenacidad de la VB1A y la VB1B se debió principalmente al esfuerzo máximo que fue capaz de resistir el adhesivo. El utilizar un adhesivo dúctil y menos resistente como el Araldite (VB1A) permitió la visualización de fallas múltiples, a diferencia de la VB1B con el Betamate, en la que se observó una única falla catastrófica bien marcada.

El desempeño mecánico inferior de las vigas tipo Voronoi en comparación con la VM fue por las discontinuidades adicionales agregadas en sentido longitudinal de las capas de aluminio. En ese caso, la resistencia global de la viga recayó en la capacidad de las capas de adhesivo para retener las fuerzas de tensión en la parte inferior de la viga y las de compresión en la zona superior, así

como las paralelas al plano de corte debajo del indentador. Un aspecto importante de las vigas con plaquetas Voronoi es la absorción controlada y gradual que presentan. En la Figura 44 se presenta la energía absorbida acumulada a diferentes desplazamientos donde, por ejemplo, no se observan escalones en la curva de absorción para la VB2A y VB2B como los que se observan en la VM a los 6 mm, en la VB1A a los 5.5 mm y 8.5 mm y en la VB1B a los 4.5 mm.

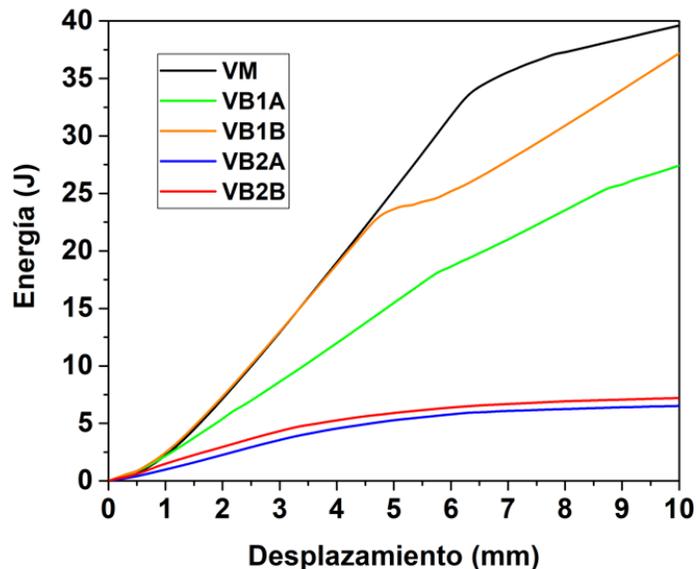


Figura 44. Absorción de energía acumulada en las vigas hasta los 10 mm de desplazamiento sometidas a flexión a tres puntos.

La Figura 45a muestra la concentración de esfuerzos en las capas cohesivas del Araldite en la VB1A a los 1.66 mm de desplazamiento antes de ocurrir la primera falla. Se observa una concentración máxima justo en el centro de la viga debajo del punto de aplicación de la fuerza del indentador. Posterior a la falla ocurre la degradación de algunos elementos en esa zona y aparecen múltiples puntos máximos de esfuerzo distribuidos por toda la capa cohesiva a los 1.83 mm de desplazamiento (ver Figura 45b). Esta redistribución de los esfuerzos máximos en múltiples zonas es un mecanismo de endurecimiento característico en la concha nácar. Este proceso repetitivo de máximos, degradación y relajamiento es lo que le confiere al material una mayor ductilidad sin caídas súbitas de la curva fuerza-desplazamiento.

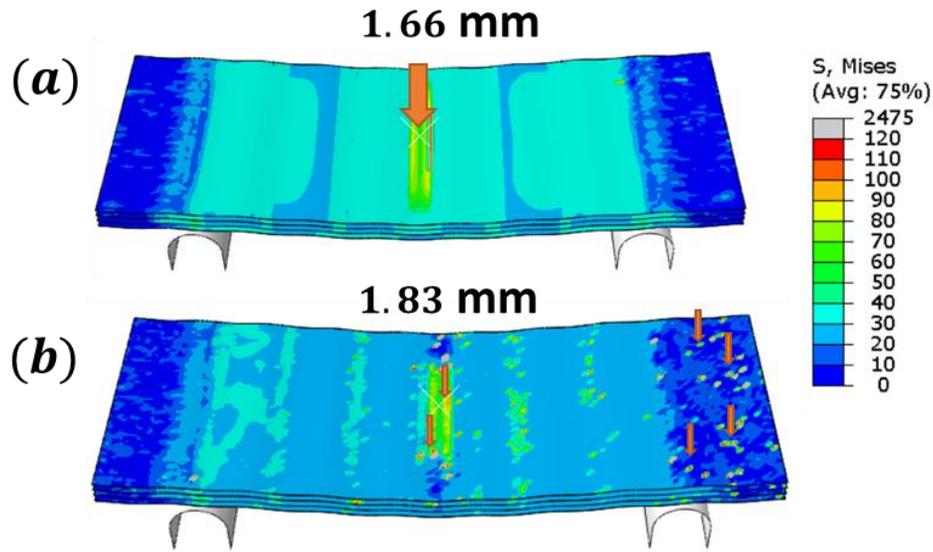


Figura 45. Concentración de esfuerzos en las capas cohesivas del Araldite en la viga de capas continuas a (a) 1.66 mm y (b) 1.83 mm de desplazamiento.

4.5 Flexión a cuatro puntos

Con el fin de obtener un estado de esfuerzos en flexión pura en la mayor parte de las vigas estudiadas se simuló pruebas de flexión a cuatro puntos con cargas a un tercio de la distancia entre soportes. El valor más alto de la fuerza máxima lo obtuvo la VM con 12.88 kN, seguido de las estructuras de capas continuas VB1A y VB1B que alcanzaron un 40.1% y un 69.5% de lo que alcanzó la VM, respectivamente. La fuerza máxima alcanzada por las vigas de plaquetas Voronoi fueron menores en porcentaje respecto la VM, la VB2A un 15.1% y la VB2B un 23.1%. Por otro lado, la energía absorbida se calculó con la integración de la curva fuerza-desplazamiento a los 10 mm de desplazamiento (Figura 46). La viga que mayor energía absorbió fue la VM con 95.22 J, seguido de la VB1A y VB1B con el 42.2% y 58.1% de lo que absorbió la VM. Por su parte, la VB2A absorbió únicamente el 10.8% y la VB2B el 11.5% con respecto a lo absorbido por la VM. En flexión a cuatro puntos, las vigas biomiméticas que mejor destacaron fueron las vigas de capas continuas unidas con el adhesivo más rígido (Betamate). Las propiedades de las vigas a flexión a cuatro puntos obtenidas de las curvas fuerza-desplazamiento se presentan en la Tabla 10.

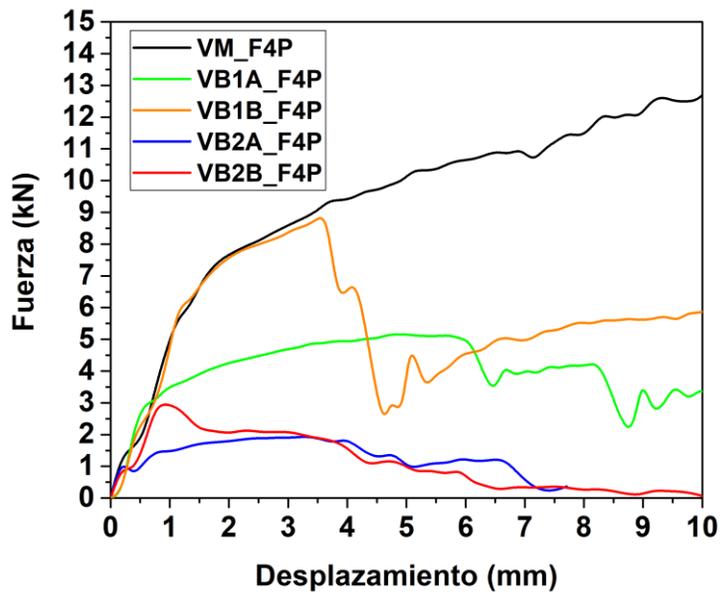


Figura 46. Curva fuerza-desplazamiento de las vigas sometidas a flexión a cuatro puntos.

Tabla 10. Fuerza máxima y energía absorbida por las vigas sometidas a flexión a cuatro puntos.

Viga	Fuerza máxima (kN)	Porcentaje de fuerza máxima respecto a la VM (%)	Energía absorbida (J)	Tenacidad a los 10 mm (MJ/m ³)	Porcentaje de energía absorbida respecto a la VM (%)
VM	12.88	100.0	95.22	13.08	100.0
VB1A	5.17	40.1	40.21	5.52	42.2
VB1B	8.95	69.5	55.37	7.61	58.1
VB2A	1.94	15.1	10.25	1.41	10.8
VB2B	2.98	23.1	10.98	1.51	11.5

4.5.1 Comparación de los resultados de flexión a tres puntos con los de flexión a cuatro puntos

Con el fin de comparar los resultados de las pruebas de flexión a tres puntos (F3P) con los de flexión a cuatro puntos (F4P) se procedió a calcular el esfuerzo y la deformación para cada una de las vigas con la formulas correspondientes, es decir, con las Ecuaciones 15 y 16 para F3P, y con las Ecuaciones 19 y 21 para F4P. Aunque dichas ecuaciones son específicas para pequeñas deformaciones, pueden utilizarse para fines comparativos.

La VM, bajo la condición de F4P (línea negra), no presentó ninguna fractura visible, lo cual contrasta con la fractura visible en F3P (línea punteada) a una deformación de 0.06 mm/mm (ver Figura 47). Por esta razón el esfuerzo máximo es mayor en la F4P. En F4P los esfuerzos máximos estuvieron distribuidos en un mayor volumen comprendido entre los dos indentadores (Figura 48a), en comparación con F3P donde los esfuerzos máximos estuvieron concentrados en la zona central (Figura 48b). La causa de la falla de la VM en F3P fue una concentración de esfuerzos en los elementos que estuvieron justo debajo el indentador.

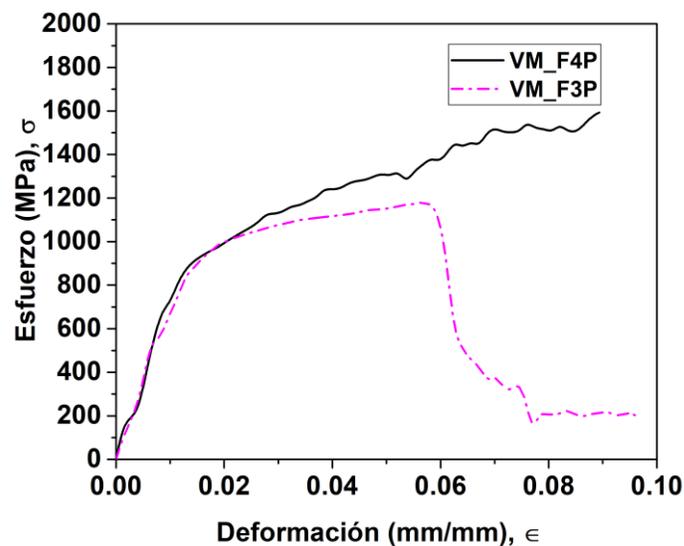


Figura 47. Curva esfuerzo-deformación de la VM en flexión a tres y cuatro puntos.

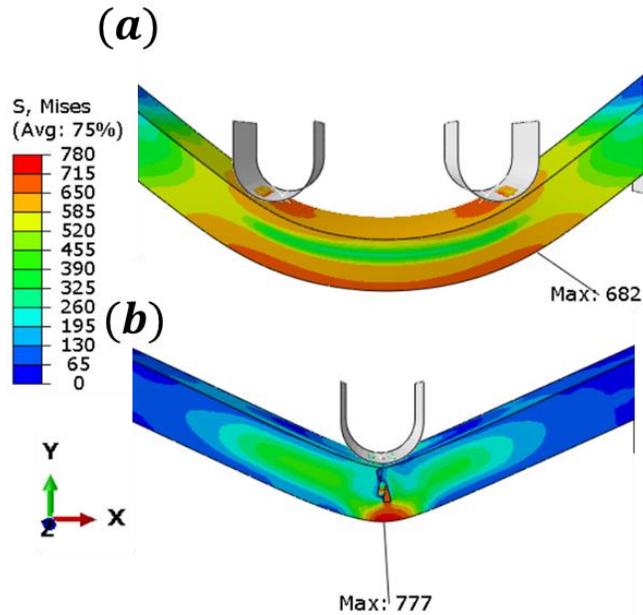


Figura 48. Concentración de esfuerzos en la VM en flexión a (a) cuatro y (b) tres puntos.

En cuanto a las vigas biomiméticas de capas continuas, la VB1A en F4P sufrió la primera falla por delaminación a los 0.045 mm/mm, la cual fue una deformación mayor a la observada en F3P (0.02 mm/mm) a la primera falla (Figura 49a). Durante la simulación de F4P, la VB1A sufrió dos caídas súbitas en el esfuerzo, mientras que en F3P se observaron tres. Por su parte la VB1B mostró un comportamiento inicial similar tanto en F3P como en F4P, con la diferencia de que se observó una caída en el esfuerzo en F4P a los 0.028 mm/mm mientras que F3P se observó de forma posterior a los 0.045 mm/mm (Figura 49b). En F4P los valores máximos de concentración de esfuerzo en las capas de aluminio se dieron debajo de cada indentador y en la superficie de las capas exteriores mientras que la capa central permaneció con un nivel bajo de esfuerzos (Figura 50a-1). Este efecto causó una mayor distribución de esfuerzos en las capas cohesivas que transfieren la carga entre las capas de aluminio, donde los esfuerzos cortantes son mayores según las teorías de laminación (ver Figura 50b-1). Por el contrario, en F3P el esfuerzo solo se concentró por debajo del indentador tanto en el aluminio como en el adhesivo (Figuras 50a-2 y 50b-2). Las diferencias en la distribución de los esfuerzos causaron una mayor ductilidad macroscópica en F4P para el caso de la VB1A. El adhesivo mostró fallas múltiples en distintas zonas activando un mecanismo de endurecimiento por deformación (Figura 45b).

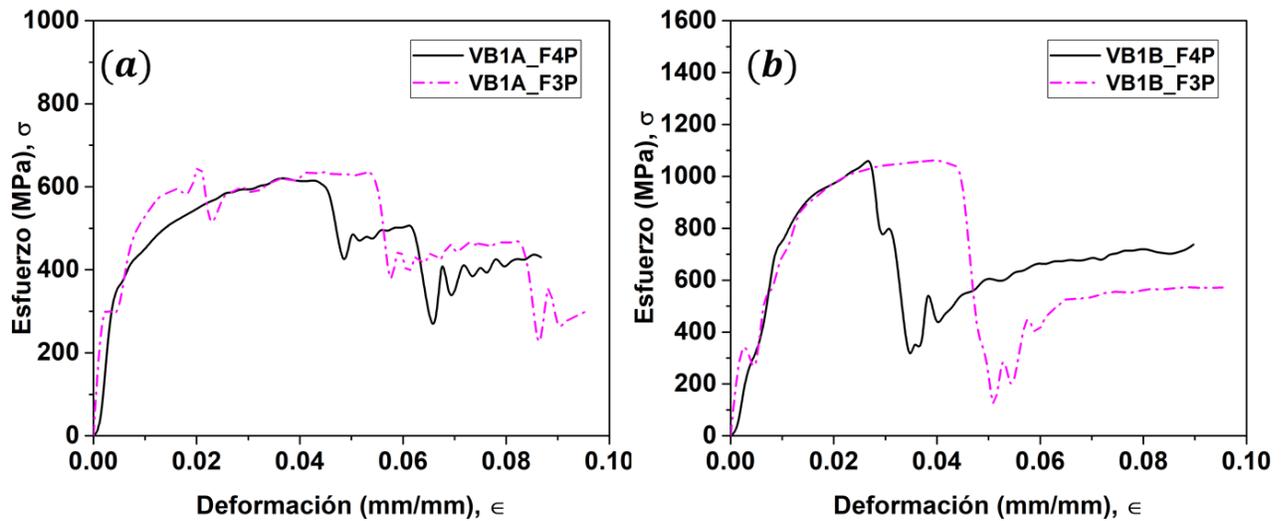


Figura 49. Curvas esfuerzo deformación de la (a) VB1A y (b) VB1B, en flexión a cuatro y tres puntos.

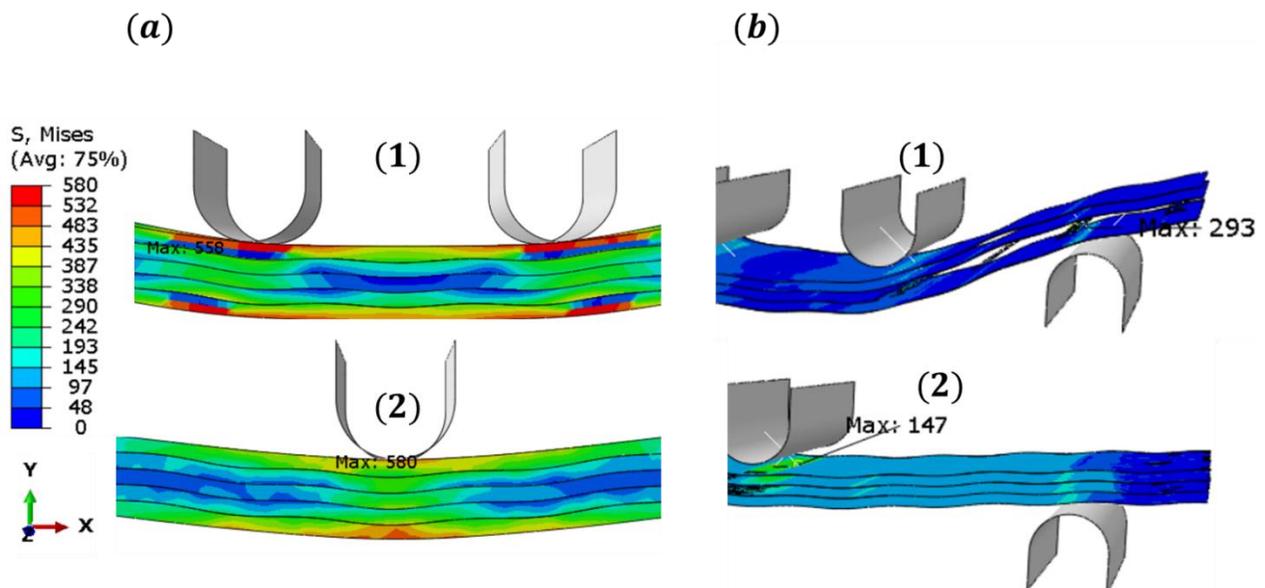


Figura 50. Concentración de esfuerzos de la VB1A (a) en el aluminio y (b) en el adhesivo, en flexión a cuatro y tres puntos.

Las vigas biomiméticas de plaquetas Voronoi no mostraron cambios significativos entre la prueba de F3P y la de F4P. La curva de VB2A en F4P fue similar a la observada en F3P con un decaimiento prolongado a partir de una deformación de 0.03 mm/mm (Figura 51a). En el caso de la VB2B las curvas fueron similares en ambas pruebas; en la parte inicial se observó un pico de esfuerzo máximo a una deformación de 0.008 mm/mm, seguido de un decaimiento prolongado hasta el colapso total de la viga a los 10 mm de desplazamiento (Figura 51b). En cuanto a la concentración

de esfuerzos, se observó que en F4P existe una mayor interacción entre plaquetas en la zona central entre indentadores (Figura 52a) mientras que F3P (Figura 52b), esto se observó debajo del indentador. Debido a la baja cohesión entre plaquetas de un misma capa y falta de una mayor cantidad de capas totales no se observaron diferencias substanciales.

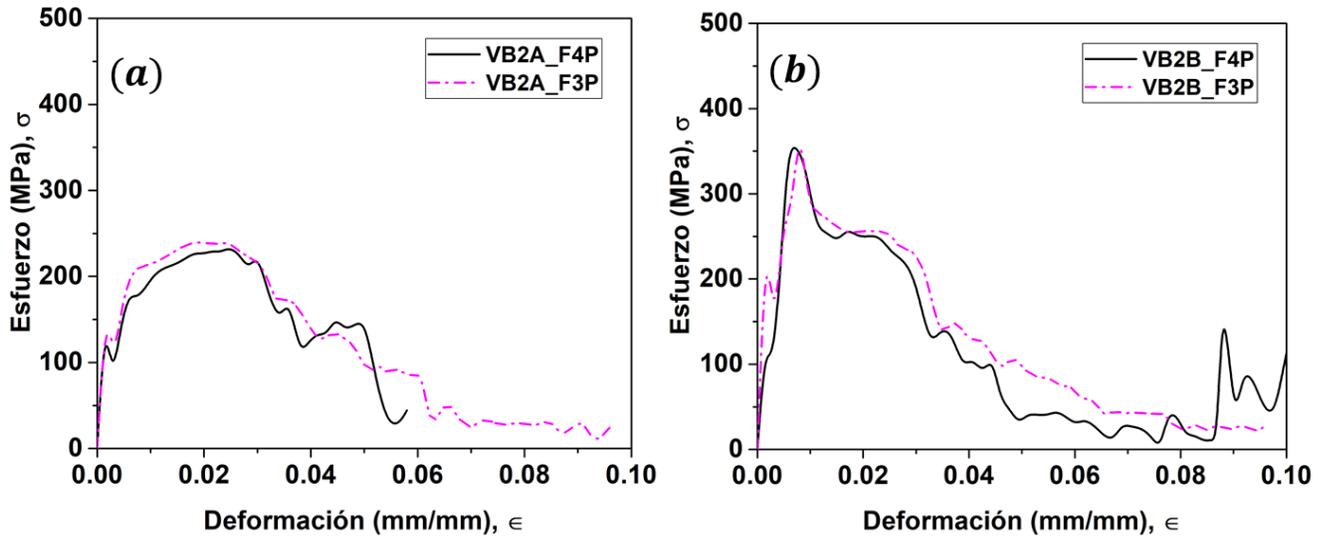


Figura 51. Curva esfuerzo-deformación de la (a) VB2A y (b) VB2B, en flexión de cuatro y tres puntos.

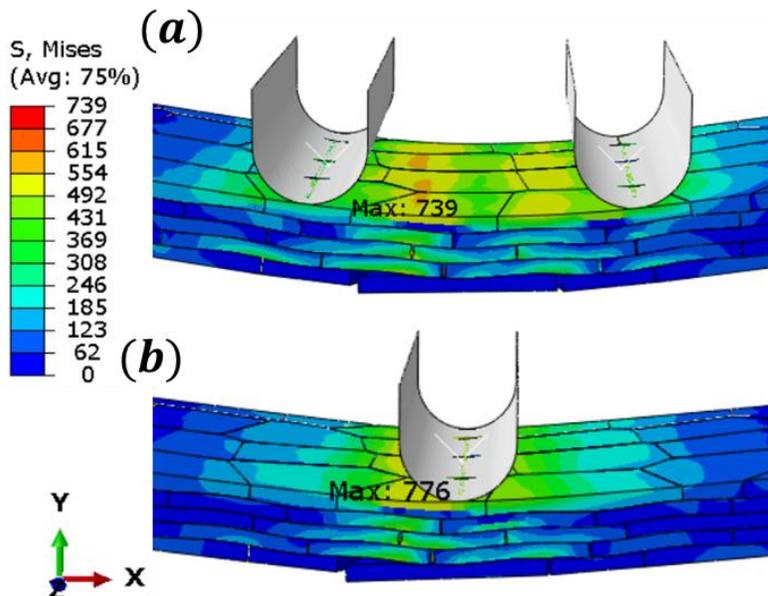


Figura 52. Concentración de esfuerzos de la VB2A en flexión de (a) cuatro y (b) tres puntos.

4.6 Impacto dinámico

La Figura 53a muestra los resultados de las simulaciones FEM de las pruebas de impacto de las vigas monolítica y biomiméticas, unidas con Araldite, usando una configuración similar a la de flexión a tres puntos con velocidad inicial de 10 m/s. La parte inicial de las curvas fuerza-desplazamiento de las VM, VB1A y VB2A es similar hasta alcanzar un punto máximo lo cual ocurrió a 1.5 mm de desplazamiento para la VM y a los 0.5 mm para las VB, aproximadamente. La fuerza máxima observada en la VM fue de 44.62 kN, en la VB1A fue de 23.75 kN y en la VB2A fue de 35.56 kN. Después de alcanzada la fuerza máxima, el nivel de retención de carga en cada una de las curvas fue disminuyendo (Figura 53a). La VM presentó mayor número de fluctuaciones y con mayor amplitud que las observadas en las vigas biomiméticas. La VB2A tipo Voronoi obtuvo una fuerza máxima mayor que la VB1A de capas continuas, no obstante, la energía absorbida fue menor. La fuerza máxima resistida y la energía absorbida en las pruebas de impacto de las vigas están resumidas en la Tabla 11.

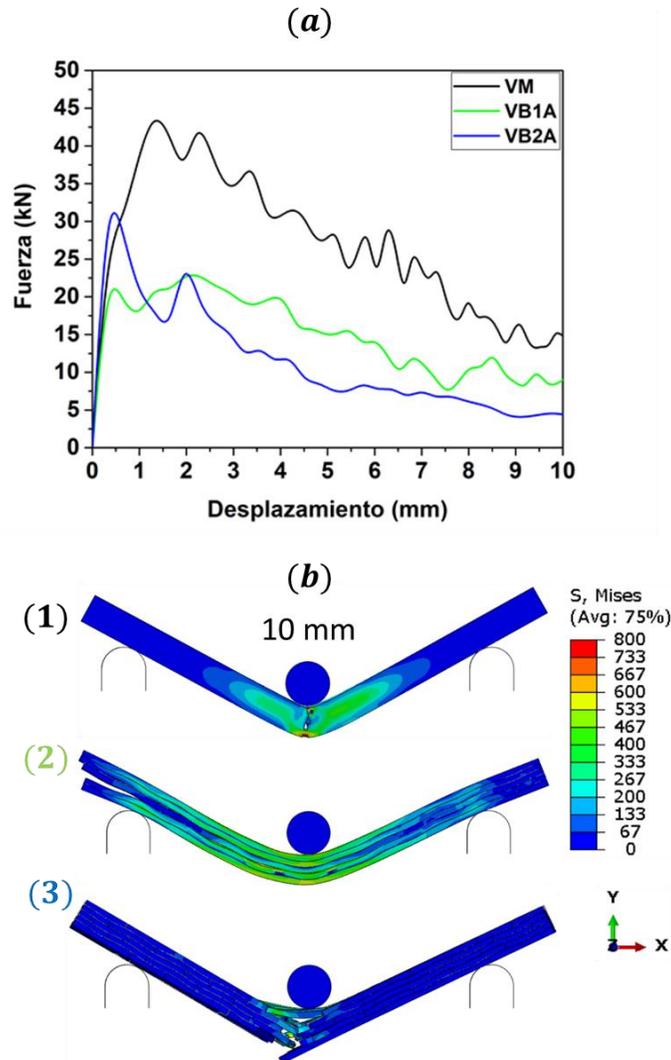


Figura 53. (a) Curvas fuerza-desplazamiento de las vigas biomiméticas unidas por Araldite sometidas a impacto (10 m/s) y (b) distribución de esfuerzos a los 10 mm.

En el caso de las vigas biomiméticas unidas por Betamate la fuerza máxima alcanzada fue similar a la que se observó en la VM (Figura 54a). La fuerza máxima alcanzada en la VB1B y VB2B fue de 47.46 kN y 41.42 kN, respectivamente. Esto representa para la VB1B y VB2B, respectivamente, un 103.4% y un 92.8% de la fuerza máxima alcanzada por la VM. Por otro lado, la VB1B obtuvo un 99.4% de la energía absorbida por la VM mientras que la VB2B un 84.2%. La VB1B obtuvo el mejor desempeño con una energía absorbida similar a la de la VM, e incluso superando en la fuerza máxima alcanzada a la VM. Es de notarse que las fluctuaciones en la curva fuerza-desplazamiento de la VB1B y la VM son mayores que las que se presentan en la VB2B. La fuerza máxima y energía absorbida hasta los 10 mm de desplazamiento para cada una de las vigas se muestran en la Tabla 11.

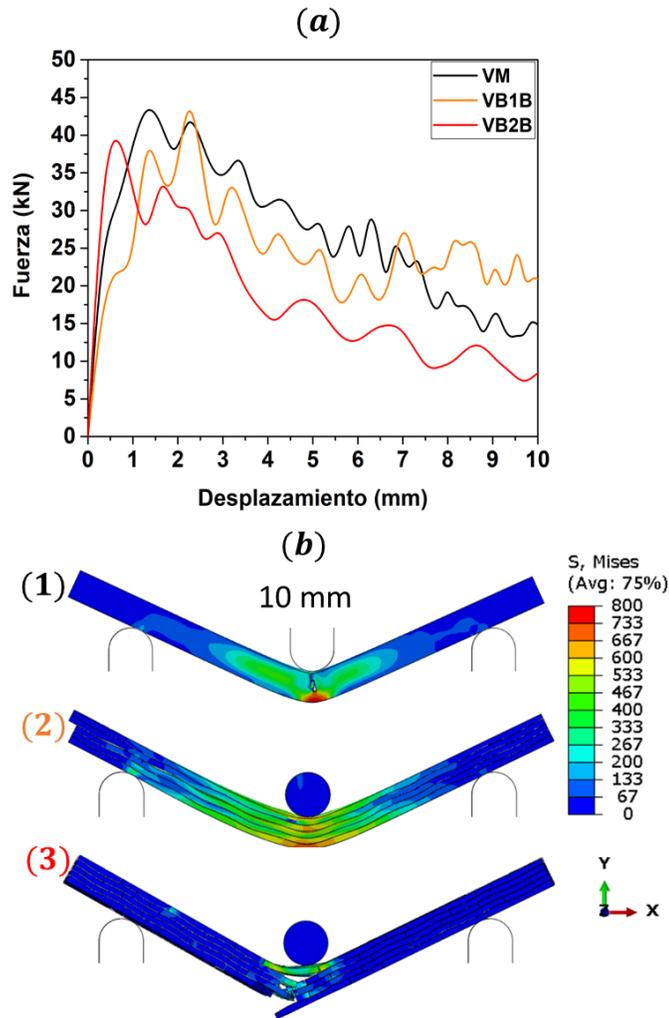


Figura 54. (a) Curvas fuerza-desplazamiento de las vigas biomiméticas unidas por Betamate sometidas a impacto (10 m/s) y (b) distribución de esfuerzos a los 10 mm.

Tabla 11. Fuerza máxima y energía absorbida por las vigas sometidas a impacto de 10 m/s.

Estructura	Fuerza máxima (kN)	Porcentaje de fuerza máxima respecto a VM (%)	Energía absorbida (J)	Porcentaje de energía absorbida respecto a la VM (%)	Velocidad final (m/s)
VM	44.62	100.0	299.82	100.0	4.07
VB1A	23.75	53.2	192.55	64.2	5.34
VB1B	47.46	103.4	298.05	99.4	3.43
VB2A	35.56	79.7	148.50	49.5	9.11
VB2B	41.42	92.8	252.30	84.2	9.00

En la Figura 55a se muestran las curvas de las VB1 con diferentes adhesivos. La VB1A con un adhesivo dúctil y menos resistente presentó una fuerza máxima menor respecto a la VB1B unida con el adhesivo de mayor resistencia; se observó una diferencia del 50% entre ambas. La VB1B además de haber absorbido una mayor energía (1.5 veces más que la VB1A) presentó fluctuaciones en la curva fuerza-desplazamiento mucho más prominentes. En las curvas de las vigas tipo Voronoi (Figura 55b) el comportamiento fue similar al observado en las vigas de capas continuas (Figura 55a). La diferencia entre la fuerza máxima de la VB2A y la VB2B fue de un 14.1%. La VB2B presentó una energía absorbida 1.6 mayor que la de la VB2A.

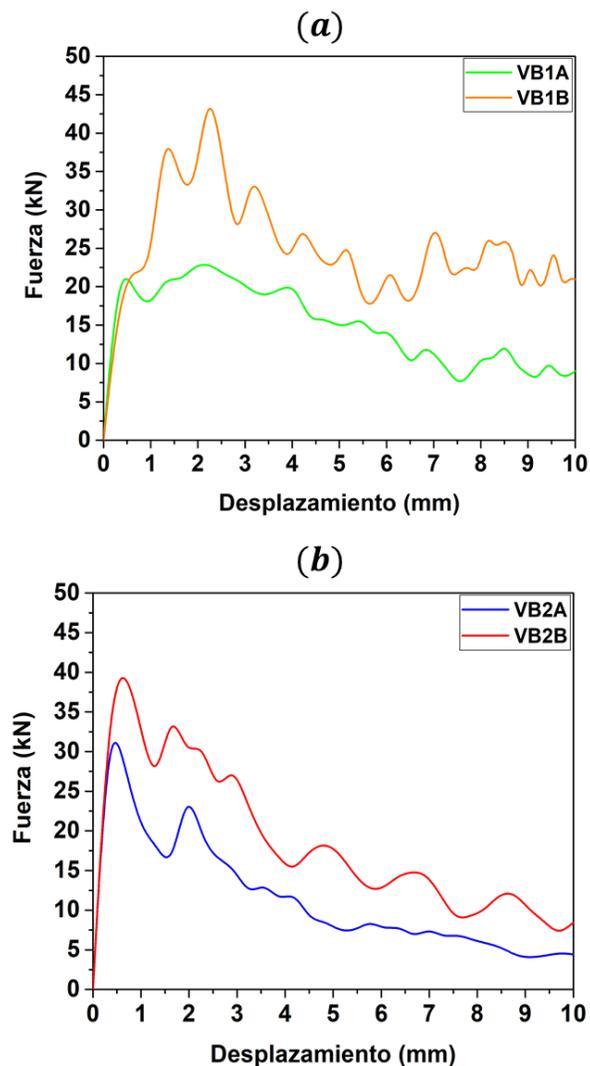


Figura 55. Comparación de las curvas fuerza-desplazamiento de las vigas biomiméticas con diferentes adhesivos: (a) vigas de capas continuas y (b) vigas con plaquetas voronoi.

4.6.1 Discusión de las pruebas de impacto

La Figura 56 muestra el desplazamiento (deflexión) sufrido por las vigas debido al impacto para un tiempo de 2 ms, es decir, se midió la deflexión de las vigas a los 2 ms. Se puede ver en esta Figura que las que mayor desplazamiento tuvieron fueron las vigas tipo Voronoi (VB2A y VB2B) alcanzando los 18 mm de desplazamiento, mientras que las vigas VB1A y VB1B alcanzaron los 14.7 y 12.3 mm de desplazamiento, respectivamente. La VM tuvo el menor desplazamiento (12 mm).

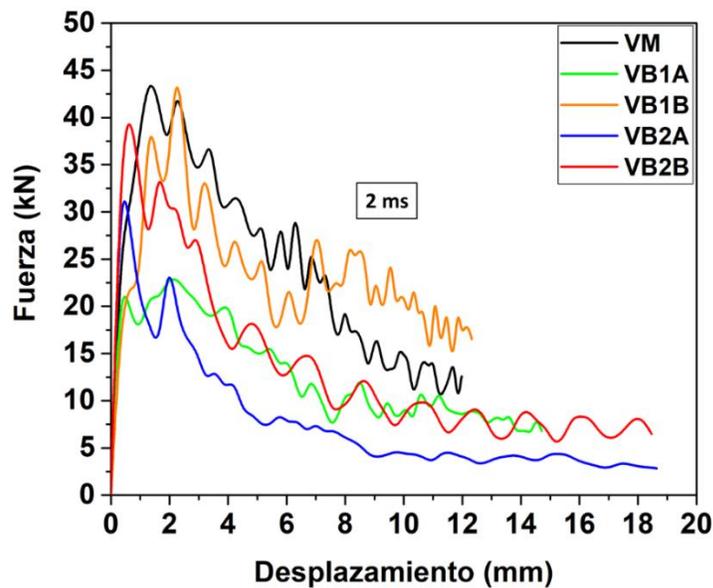


Figura 56. Desplazamiento de las vigas biomiméticas y monolítica a los 2 ms, sometidas a un impacto de 10 m/s.

La estructura biomimética que tuvo una mayor absorción de energía fue la VB1B con un valor casi igual al de la VM (Figura 57). Es importante notar que la VB2B constituida de plaquetas Voronoi unidas por Betamate absorbió un 23.6% más energía que la VB1A de capas continuas unidas por Araldite, en tiempo de 2 ms.

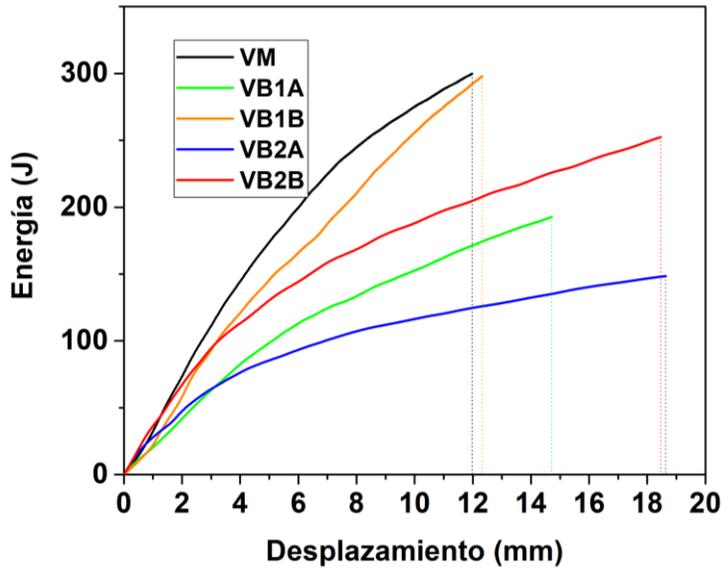


Figura 57. Energía absorbida contra desplazamiento sufrido por las vigas biomiméticas y monolítica en un tiempo de 2 ms, sujetos a un impacto de 10 m/s.

Si se compara la reducción de velocidad del impactador a los 2 ms, se puede observar que en la VB1B hubo una menor reducción de la velocidad en comparación con la VM; con esto se puede decir que la VB1B superó a la VM en cuanto a absorción de energía en ese tiempo en particular (Figura 58).

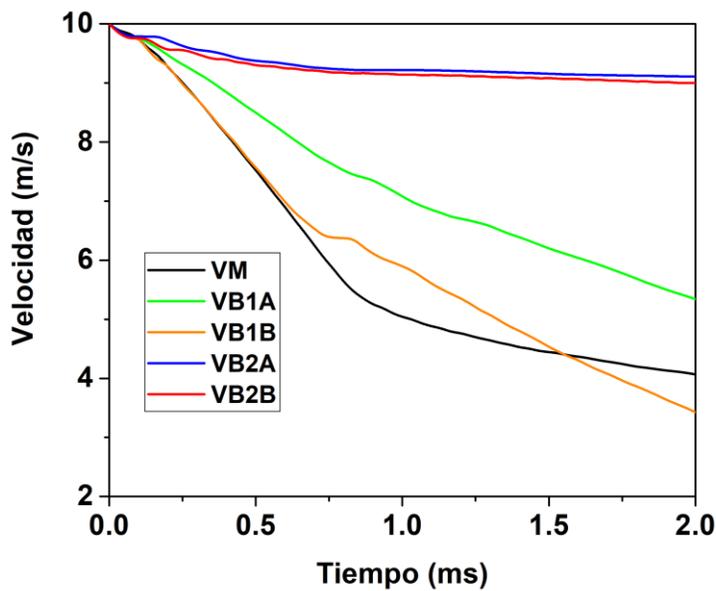


Figura 58. Velocidad del impactador contra tiempo en las vigas sometidas a impacto.

4.6.2 Impacto a distintas velocidades

Se realizaron pruebas de impacto a 10 y 20 m/s con un indentador cilíndrico de acero con masa inercial de 1 kg. Con un impacto de 10 m/s, la velocidad residual a 1 ms fue menor en la VM respecto a las vigas biomiméticas unidas con Araldite (Figura 59a) y con Betamate (Figura 59b). Para una velocidad de impacto de 20 m/s, se observó a 1ms que la VB1A y VB1B tuvieron una velocidad residual más cercana a la velocidad residual de la VM (Figura 59a y 59b). Por otra parte, la VB2A y VB2B tuvieron una velocidad residual menos cercana a la de VM que las vigas VB1. La evolución de daño fue similar en ambas velocidades de impacto. La VM presentó deformaciones plásticas y fractura del aluminio, la VB1B presentó una pequeña fractura en la capa superior al final de la prueba y un proceso de delaminación entre capas por fractura de los elementos cohesivos, mientras que la VB2B de plaquetas Voronoi solo presento desacoplamiento de las plaquetas por la degradación de los elementos cohesivos debajo del punto de aplicación de fuerza (ver Anexo B).

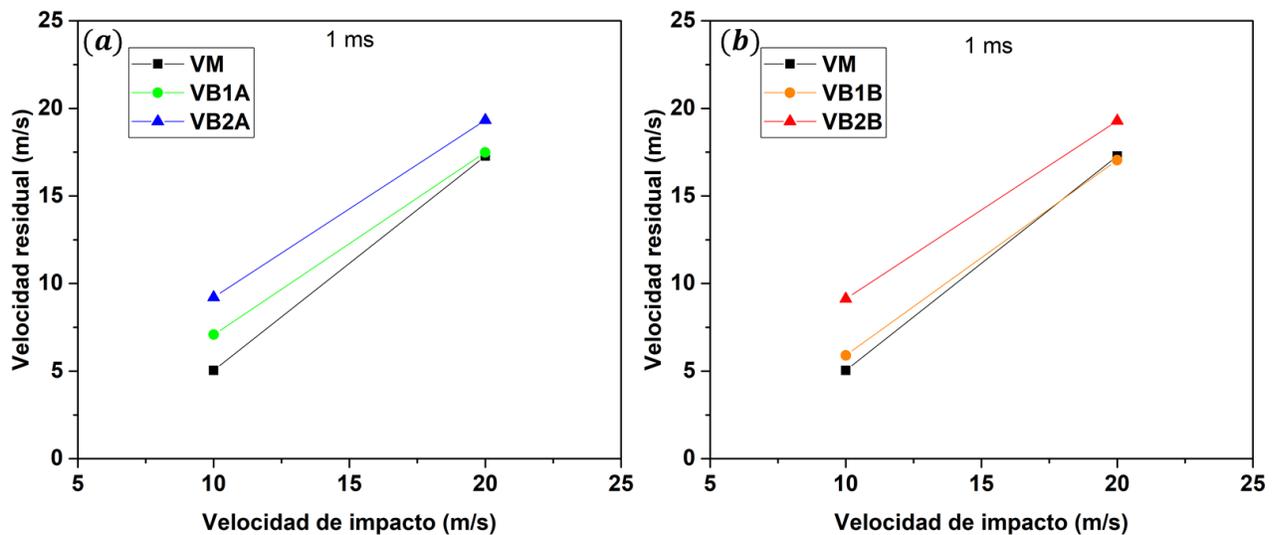


Figura 59. Velocidades residuales de las pruebas de impacto a 10 y 20 m/s de la viga monolítica y las vigas biomiméticas unidas con (a) Araldite y (b) Betamate, a tiempo de 1 ms.

Conclusiones

Con este estudio se desarrolló una metodología para el diseño de un material biomimético bioinspirado en la estructura interna de la concha nácar con la utilización de tres softwares de diseño e ingeniería. Con el software de análisis matemático (Mathematica) fue posible la obtención de diagramas tipo Voronoi con una distribución de áreas proporcional a la encontrada en la superficie del nácar natural. El código escrito en este trabajo permite un mayor control sobre la morfología de las plaquetas pudiendo tomar formas cuadradas o mosaicos Voronoi con distintos grados de dispersión y tamaño.

Por otra parte, pudo validarse el comportamiento de la aleación de aluminio 7075-T651 con la simulación de una prueba de tensión comparando los resultados con pruebas experimentales. Así mismo, la resistencia de una capa cohesiva con las propiedades de la resina epóxica Araldite 2015 fue validada con la simulación de la prueba de una junta T. Con los resultados obtenidos y observados de la validación de los materiales se puede decir que los materiales constitutivos utilizados (Johnson-Cook para el aluminio y el de Tracción-Separación para el adhesivo) fueron funcionales para los modelos FEM de los materiales compuestos biomiméticos. Se encontró por medio de un análisis de convergencia que un tamaño global de elemento de 0.5 mm fue suficiente para las simulaciones de este trabajo; con este tamaño de elemento se observó una variabilidad en los resultados menor al 2%.

Con la revisión bibliográfica se encontraron las características principales que aportan al alto desempeño de la concha nácar incluyendo una estructura laminar tipo ladrillo y mortero y el uso de capas onduladas para la activación del anclaje mecánico. Otro rasgo distintivo fue la conformación del material compuesto laminar de doble fase, con un componente rígido y otro dúctil. No obstante, se recomienda la implementación de otras características importantes en trabajos futuros para que el sistema de endurecimiento sea más evidente.

Según los resultados de flexión a tres puntos, las vigas biomiméticas y sus características de diseño aquí propuestas son insuficientes para superar a la viga monolítica en la capacidad de retención de carga y tenacidad. A pesar de ello existen características aprovechables para aplicaciones específicas como es la absorción de energía controlada. Las vigas biomiméticas de capas continuas demostraron una mayor ductilidad en flexión a tres puntos. Cuando se comparó el desempeño de una misma viga, pero con distinto adhesivo se demostró que un diseño tipo concha nácar no

depende únicamente de sus características geométricas sino también de las propiedades de los materiales utilizados para su fabricación.

Otro aspecto importante encontrado fue que el desempeño de las vigas biomiméticas mejoró en gran proporción cuando se someten a impacto en comparación con su desempeño en una prueba de flexión cuasiestática, tanto en la retención de carga como en la tenacidad.

De manera general se puede concluir que las vigas biomiméticas según su nivel de complejidad tienen una capacidad de deformación macroscópica distintita ante esfuerzos de flexión, siendo mayor para la estructura más compleja, es decir, la viga conformada de plaquetas tipo Voronoi. Finalmente, según los fenómenos observados y descritos en flexión a tres puntos e impacto dinámico, la hipótesis planteada se cumple solamente para ciertas condiciones.

Perspectivas a Futuro

En los modelos FEM de esta investigación se hicieron varias idealizaciones, por lo que es pertinente implementar en un futuro otras características geométricas y estructurales que permitan una mayor sinergia entre las diferentes características para activar un mecanismo múltiple de disipación de energía mecánica con resultados mejorados. Por ejemplo, se recomienda implementar la rugosidad en las superficies de plaquetas para inhibir los esfuerzos de corte en las capas de adhesivo y aumentar la ductilidad de las vigas biomiméticas. También se recomienda una continuación de este estudio explorando otros materiales, es decir, sustituir el aluminio, por ejemplo, con un material más rígido como un material cerámico o utilizar un adhesivo más dúctil.

Dado que el proceso de disipación de energía involucra cambios moleculares del biopolímero presente en el nácar natural, es justo y necesario modelar los adhesivos con modelos constitutivos más complejos como, por ejemplo, un modelo viscoelástico.

En el caso de la prueba de flexión cuasiestática, se observaron diferencias importantes en las vigas de capas continuas al comparar los resultados numéricos obtenidos con flexión a tres y cuatro puntos. Por esta razón, se propone realizar pruebas de impacto con la configuración de flexión a cuatro puntos. Otra recomendación importante es la de continuar el estudio con un análisis paramétrico a distintas velocidades de impacto y reduciendo la masa inercial del impactador para observar una amplificación de las diferencias de la velocidad residual en las diferentes vigas.

En este estudio el FEM demostró ser un método eficiente para la caracterización de un material compuesto idealizado, y para la predicción de las propiedades y características necesarias para una propuesta de diseño de un material biomimético. Por último y no menos importante, la metodología desarrollada en este trabajo puede ser extendida para explorar otras fuentes de bioinspiración distintas a la concha nácar.

Referencias

1. Bhushan, B., *Biomimetics: Lessons from Nature - an overview*. Phil. Trans. R. Soc. A, 2009. **367**(1893): p. 1445-1486.
2. Snell-Rood, E., *Interdisciplinarity: Bring biologists into biomimetics*. Nature 2016 529:7586, 2016. **529**(7586): p. 277-278.
3. Rowley, T., *Science imitates life*. Lab Animal, 2013. **42**(8): p. 271-272.
4. Currey, J.D., *Mechanical properties of mother of pearl in tension*. Proceedings of the Royal Society of London - Biological Sciences, 1977. **196**(1125): p. 443-463.
5. Barthelat, F., et al., *On the mechanics of mother-of-pearl: A key feature in the material hierarchical structure*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2007. **55**(2): p. 306-337.
6. Meyers, M.A., et al., *Biological materials: Structure and mechanical properties*. Progress in Materials Science, 2008. **53**(1): p. 1-206.
7. Barthelat, F. and H.D. Espinosa, *An Experimental Investigation of Deformation and Fracture of Nacre–Mother of Pearl*. Experimental Mechanics, 2007. **47**(3): p. 311-324.
8. Kakisawa, H. and T. Sumitomo, *The toughening mechanism of nacre and structural materials inspired by nacre*. Science and Technology of Advanced Materials, 2011. **12**(6): p. 064710-064710.
9. Heinemann, F., et al., *Gastropod nacre: Structure, properties and growth - Biological, chemical and physical basics*. Biophysical Chemistry, 2011. **153**(2-3): p. 126-153.
10. Meyers, M.A., et al., *Structural biological composites: An overview*. JOM, 2006. **58**(7): p. 35-41.
11. Tran, P., T.D. Ngo, and P. Mendis, *Bio-inspired composite structures subjected to underwater impulsive loading*. Computational Materials Science, 2014. **82**: p. 134-139.
12. Sun, J. and B. Bhushan, *Hierarchical structure and mechanical properties of nacre: a review*. RSC Advances, 2012. **2**(20): p. 7617-7617.
13. *Nacre crystal layers, SEM - Stock Image - C035/8982 - Science Photo Library*. 2021; Available from: <https://www.sciencephoto.com/media/851330/view>.
14. Barthelat, F., *Biomimetics for next generation materials*. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2007. **365**(1861): p. 2907-2919.
15. Mirkhalaf, M., D. Zhu, and F. Barthelat, *Biomimetic Hard Materials*, in *Engineered Biomimicry*. 2013, Elsevier. p. 59-79.
16. Flores-Johnson, E.A., et al., *A numerical study of bioinspired nacre-like composite plates under blast loading*. Composite Structures, 2015. **126**: p. 329-336.
17. Ko, K., et al., *Impact resistance of nacre-like composites diversely patterned by 3D printing*. Composite Structures, 2020. **238**(January): p. 111951-111951.
18. Katti, D.R., et al., *3D finite element modeling of mechanical response in nacre-based hybrid nanocomposites*. Computational and Theoretical Polymer Science, 2001. **11**(5): p. 397-404.
19. Malkin, R., et al., *Bio-inspired laminate design exhibiting pseudo-ductile (graceful) failure during flexural loading*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2013. **54**: p. 107-116.
20. Flores-Johnson, E.A., et al., *Numerical investigation of the impact behaviour of bioinspired nacre-like aluminium composite plates*. Composites Science and Technology, 2014. **96**: p. 13-22.

21. Gu, G.X., et al., *Biomimetic additive manufactured polymer composites for improved impact resistance*. Extreme Mechanics Letters, 2016. **9**: p. 317-323.
22. Gu, G.X., et al., *Printing nature: Unraveling the role of nacre's mineral bridges*. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2017. **76**: p. 135-144.
23. Frølich, S., et al., *Uncovering Nature's Design Strategies through Parametric Modeling, Multi-Material 3D Printing, and Mechanical Testing* Advanced Engineering Materials, 2017. **19**(6): p. e201600848.
24. Tran, P., et al., *Bimaterial 3D printing and numerical analysis of bio-inspired composite structures under in-plane and transverse loadings*. Composites Part B: Engineering, 2017. **108**: p. 210-223.
25. Currey, J.D. and J.F.V. Vincent, *The mechanical properties of biological materials*. 1980, London: Cambridge University Press. 75-75.
26. Rim, J.E., et al., *Dimensional analysis and parametric studies for designing artificial nacre*. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2011. **4**(2): p. 190-211.
27. Askarinejad, S. and N. Rahbar, *Toughening mechanisms in bioinspired multilayered materials*. Journal of the Royal Society Interface, 2015. **12**(102).
28. Jones, R.M., *Mechanics of composite materials*. 1999, United States of America: Taylor & Francis, Inc.
29. Carrera, E., F.A. Fazzolari, and M. Cinefra, *Advanced theories for composite beams, plates and shells*, in *Thermal Stress Analysis of Beams, Plates and Shells*. 2017, Elsevier. p. 117-217.
30. Carrera, E., *Theories and finite elements for multilayered, anisotropic, composite plates and shells*. Archives of Computational Methods in Engineering, 2002. **9**: p. 87-140.
31. Torrelli, V. and E. Paroissien, *Simplified stress analysis of multilayered bonded structure under 1D-bar kinematics*. Composite Structures, 2020. **251**: p. 112641-112641.
32. Wegst, U.G.K., et al., *Bioinspired structural materials*. Nature Materials, 2015. **14**(1): p. 23-36.
33. McKittrick, J., M.A. Meyers, and S. Jin, *Synthesis of Nacre-Like Structures using Novel Fabrication Techniques*. 2009: University of California - San Diego.
34. Bouville, F., *Strong and tough nacre-like aluminas: Process-structure-performance relationships and position within the nacre-inspired composite landscape*. Journal of Materials Research, 2020. **35**(8): p. 1076-1094.
35. Song, J., et al., *Crack deflection occurs by constrained microcracking in nacre*. Acta Mechanica Sinica, 2018. **34**(1): p. 143-150.
36. Dierking, I., A. Flatley, and D. Greenhalgh, *Voronoi patterns in liquid crystal textures*. Journal of Molecular Liquids, 2021. **335**: p. 116553-116553.
37. Yan, D.M., et al., *Efficient computation of clipped Voronoi diagram for mesh generation*. CAD Computer Aided Design, 2013. **45**(4): p. 843-852.
38. Desai, C.S. and J.F. Abel, *Introduction to the finite element method; a numerical method for engineering analysis*. 1971: Van Nostrand Reinhold Company.
39. Bobet, A., et al., *Numerical models in discontinuous media: review of advances for rock mechanics applications*. 2009. **135**(11): p. 1547-1561.
40. Barbero, E.J., *Finite Element Analysis of Composite Materials Using Abaqus*. 2013: CRC Press.
41. Cook, R.D., et al., *Concepts and applications of finite element analysis*. 2002, University of Wisconsin - Madison: Jhon Wiley & Sons, Inc.

42. Simulia, *Abaqus Analysis User's Guide*. 2016.
43. Simulia, *Abaqus Theory Guide*. 2016.
44. Mahieux, C.A., *Environmental impact on micromechanical and macromechanical calculations*. Environmental Degradation of Industrial Composites, 2006: p. 175-232.
45. Khan, Y., *Characterizing the properties of tissue constructs for regenerative engineering*. Encyclopedia of Biomedical Engineering, 2019. **1-3**: p. 537-545.
46. Adams, D.F., L.A. Carlsson, and R.B. Pipes, *Experimental characterization of advanced composite materials, third edition*. 2002: Taylor & Francis Group. 1-240.
47. *Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials*. 2007. p. 1-11.
48. *Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials by Four-Point Bending*. 2010.
49. Hejazi, F. and T.K. Chun, *Conceptual Theories in Structural Dynamics*. Vol. 135. 2020: Springer. 1-219.
50. Benson, D.J. and J. Hallquist, *Computation for Transient and Impact Dynamics*. Encyclopedia of Vibration, 2001: p. 278-286.
51. Stronge, W.J., *Introduction to Analysis of Low-Speed Impact*. Impact Mechanics, 2018: p. 1-20.
52. Miao, T., et al., *Ballistic performance of bioinspired nacre-like aluminium composite plates*. Composites Part B: Engineering, 2019. **177**: p. 107382.
53. Carneiro, M.A.S. and R.D.S.G. Campilho, *Analysis of adhesively-bonded T-joints by experimentation and cohesive zone models*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2017. **31**(18): p. 1998-2014.
54. Wang, R.X., et al., *Analytical peel load prediction as a function of adhesive stress concentration*. Journal of Adhesion, 2006. **82**(1): p. 39-61.
55. Børvik, T., O.S. Hopperstad, and K.O. Pedersen, *Quasi-brittle fracture during structural impact of AA7075-T651 aluminium plates*. International Journal of Impact Engineering, 2010. **37**(5): p. 537-551.
56. Brar, N.S., V.S. Joshi, and B.W. Harris, *Constitutive model constants for Al7075-T651 and Al7075-T6*. Shock Compression of Condensed Matter, 2009. **1195**: p. 945-948.
57. Dorogoy, A., B. Karp, and D. Rittel, *A Shear Compression Disk Specimen with Controlled Stress Triaxiality under Quasi-Static Loading*. Experimental Mechanics, 2011. **51**(9): p. 1545-1557.
58. Zhang, Y., et al., *Predicting mechanical properties of 316L stainless steel subjected to SMAT: A sequential DEM-FEM investigation*. International Journal of Mechanical Sciences, 2021. **193**(October 2020): p. 106173-106173.
59. Lu, G. and T. Yu, *Methodology of analysing energy-absorption capacities*. Energy Absorption of Structures and Materials, 2003: p. 25-67.
60. Beer, F.P., et al., *Mecánica de materiales*. Quinta ed. 2010, Impreso en México: McGraw-Hill.
61. Campilho, R.D.S.G., et al., *Buckling Behaviour of Carbon-Epoxy Adhesively-Bonded Scarf Repairs*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2009. **23**(10-11): p. 1493-1513.
62. Frias Bastar, D., *Estudio de un material compuesto bioinspirado en la estructura jerárquica de la concha nácar mediante el método de los elementos finitos*. 2020, CICY.

63. Xing, M.z., Y.g. Wang, and Z.x. Jiang, *Dynamic Fracture Behaviors of Selected Aluminum Alloys Under Three-point Bending*. Defence Technology, 2013. **9**(4): p. 193-200.
64. Westermann, I., et al., *Three-point bending of heat-treatable aluminum alloys: Influence of microstructure and texture on bendability and fracture behavior*. Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science, 2011. **42**(11): p. 3386-3398.

Anexo A. Código generador de diagramas Voronoi en Mathematica.

```
<< ComputationalGeometry`
Clear[ranumx, ranumy, xmax, ymax, x, y, z, w, n]
xmax = 100; "Dimensión del largo";
ymax = 100; "Dimensión del ancho";
n = 182; "n:número de plaquetas";
l =  $\sqrt{n}$ ;
li = IntegerPart[l];
dx = xmax / li;
dy = ymax / (li + 1);
setvalx = Range[dx / 2, xmax, dx];
setvaly = Range[dy / 2, (ymax), dy];
x = Flatten[ConstantArray[setvalx, {li + 1}]];
y = Sort[Flatten[ConstantArray[setvaly, {li}]]];
p = 0.58; "dispersión d";
SeedRandom[1, Method -> {"MKL"}]; ranumx = RandomReal[{-dx (p), dx (p)}, {li * (li + 1)}];
SeedRandom[1, Method -> {"MKL"}]; ranumy = RandomReal[{-dy (p), dy (p)}, {li * (li + 1)}];
z = N[Riffle[x + ranumx, y + ranumy]]; w = Partition[z, 2]; w // Length
pts = w;
SeedRandom[1, Method -> {"MKL"}]; For[i = 0, i < 0, i++, pts = Drop[pts, {RandomInteger[{1, li * (li + 1) - i}]}]];
pts // Length
pts;
mesh = VoronoiMesh[pts, {{0, 100}, {0, 100}}, MeshCellHighlight -> {1, All} -> Red, Axes -> True]
vor = MeshPrimitives[mesh, 2];
vor // Length
areas = Area /@ vor;
hist = Histogram[areas, Automatic, "PDF", PlotTheme -> "Lines"]
dis = FindDistribution[areas]
Show[hist, Plot[PDF[dis, x], {x, 20, 100}]]
P58 = Plot[PDF[dis, x], {x, 20, 100}]
{Mean[dis], StandardDeviation[dis], Kurtosis[dis]}
bound = {{-5, -5}, {xmax + 5, -5}, {xmax + 5, ymax + 5}, {-5, ymax + 5}};
{diagvert3, diagval3} = BoundedDiagram[bound, pts];
first = First[BoundedDiagram[bound, pts]];
last = Last[BoundedDiagram[bound, pts]];
Mean[TileAreas[pts, first, last]];
diagram = DiagramPlot[pts, first, last, LabelPoints -> False, Axes -> False]
Export["voronoi110x110C.DXF", diagram]
```

Anexo B. Evolución de daño a 10 m/s velocidad de impacto.

