

Trabajo Final de Máster
Ingeniería Industrial

Biomimética y sólidos celulares

MEMORIA

Autor: Saloni Ramchandani Chugani

Director: Josep Maria Pons Poblet

Convocatoria: Abril 2020



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resumen

En el presente Trabajo Fin de Máster se tratan los sólidos celulares, estructuras que constan de una celda unitaria de una forma definida que se repite en un volumen, desde el punto de vista de la biomimética, es decir, de la inspiración en la naturaleza.

En primer lugar, se realiza una introducción al término de la biomimética, su definición, clasificación, y se recogen ejemplos en diversos campos como la ingeniería, arquitectura o el análisis de datos.

A continuación, el trabajo se adentra en los sólidos celulares, presentando su definición, los distintos tipos que hay y sus propiedades generales. Posteriormente, se realiza un análisis exhaustivo de las propiedades de los tres tipos de estructuras celulares más utilizados en la ingeniería mecánica: Los panales, las espumas y las estructuras reticulares. Inicialmente, se estudia de forma general su comportamiento ante el esfuerzo, principalmente ante esfuerzos axiales, para después calcular para cada estructura, de forma principalmente analítica, sus principales propiedades mecánicas. Asimismo, se presentan una serie de herramientas para facilitar la elección del sólido celular idóneo para una aplicación concreta.

En el siguiente capítulo, se unifican los dos anteriores conceptos, la biomimética y los sólidos celulares, utilizando la naturaleza como fuente de inspiración para la selección de estructuras celulares para distintas aplicaciones. Se presentan distintos tipos de estructuras, y la funcionalidad que realizan en los elementos naturales de los que forman parte.

Por último, se añade un apartado experimental al trabajo. Se diseñan en 3D cuatro tipos de estructuras celulares inspiradas en la naturaleza utilizando la plataforma nTopology: Un panal, una espuma de Voronoi, una estructura reticular basada en la del diamante, y una estructura reticular formada por octaedros y decaedros muy utilizada en la arquitectura. Estos cuatro tipos de estructuras se imprimen en forma de cupón mediante fabricación aditiva, se realiza un ensayo de compresión-deformación de cada uno y se comparan los resultados obtenidos con su curva teórica y entre ellos.

Índice

Índice	4
1. Prefacio	11
1.1. Origen del proyecto	11
2. Introducción	12
2.1. Objetivos del proyecto	12
2.2. Alcance del proyecto	12
3. Biomimética	15
3.1. Introducción	15
3.2. Clasificación	15
3.3. Campos de aplicación	18
3.3.1. Arquitectura	18
3.3.2. Análisis de datos	19
3.3.3. Ingeniería sostenible – Energías renovables	20
3.3.4. Ingeniería de materiales	23
3.3.5. Diseño mecánico	24
4. Sólidos celulares	32
4.1. Introducción	32
4.2. Definición	32
4.3. Clasificación	33
4.3.1. Teselado	34
4.3.2. Elementos	35
4.3.3. Conectividad	36
4.4. Propiedades generales	36
4.4.1. Densidad relativa	36
4.4.2. Conectividad, topología y geometría de la celda (factores geométricos)	37
4.5. Propiedades de panales, espumas y estructuras reticulares	39
4.5.1. Estructuras dominadas por deformaciones axiales o flexión	40
4.5.2. Análisis de estructuras dominadas por flexión	42
4.5.3. Análisis de estructuras dominadas por deformaciones axiales	44
4.5.4. Panales	45
4.5.5. Espumas	59
4.5.6. Estructuras Reticulares	67
4.5.7. Comparación entre panales, espumas y retículas	68
4.5.8. Diseño interno de las estructuras celulares	70
4.6. Selección de materiales celulares	71

4.6.1. Parámetros de comparación	71
4.6.2. Criterios de selección	73
5. Materiales celulares y biomimética	76
5.1. Teselado y elementos	76
5.1.1. Teselado	76
5.1.2. Elementos	79
5.2. Funcionalidad en la naturaleza	80
6. Resultados experimentales	85
6.1. Diseño 3D y fabricación	85
6.1.1. nTopology	85
6.1.2. Modelos 3D	87
6.1.3. Fabricación aditiva	88
6.2. Ensayo de compresión y resultados	89
6.2.1. Curva σ/ε	90
6.2.2. Módulo de Young	96
6.2.3. Densificación	97
7. Análisis económico	99
7.1. Coste del estudio	99
7.2. Coste del estudio para una empresa	100
8. Impacto ambiental	102
9. Conclusiones	103
10. Bibliografía	105
10.1. Referencias bibliográficas	105
11. Agradecimientos	109

Índice de ilustraciones

Ilustración 1. Termitero de 6m de altura en Otjiwarango, Namibia. (Fuente: A.Surovek [3].)	18
Ilustración 2. Termitero en forma de cúpula en Agombe, India. (Fuente: P. Bardunias [3].)	18
Ilustración 3. Diseño del China World Trade Centre. (Fuente: SOM [6]).....	19
Ilustración 4. Imagen del World Trade Centre. (Fuente: Desconocida).....	19
Ilustración 5. Diagrama de flujo del sistema de control reactivo. (Fuente: R.C.Ebehart [7].).....	20
Ilustración 6. Variación de temperatura en el interior y exterior del East Gate Centre. (Fuente: M. Pearce [11])	21
Ilustración 7. Sistema de ventilación natural del East Gate Centre. (Fuente: M. Pearce [11]) ..	22
Ilustración 8. Detalle del funcionamiento del sistema de ventilación natural de las oficinas del East Gate Centre, y su comparación con un termitero. (Fuente: M. Pearce [11])	23
Ilustración 9. Enfoques de diseño mecánico desde el punto de vista biomimético. (Fuente: A. du Plessis [15])	25
Ilustración 10. Tubérculos en las aletas de una ballena jorobada. (Fuente: Desconocida).....	26
Ilustración 11. Simulación del flujo de aire en una aleta con filo de tubérculos. (Fuente: F. E. Fish [54]).....	26
Ilustración 12. Helicóptero de investigación con el que la DLR investigó el concepto de aspas con tubérculos. (Fuente: DLR).....	27
Ilustración 13. Respuesta de un hueso ante el esfuerzo. (Fuente: O. M. Pearson y D. I. E. Lieberman).....	28
Ilustración 14. Ejemplos de diseños biomiméticos obtenidos mediante la optimización topológica. (Fuente: Altair)	28
Ilustración 15. Esquema de la perforación recíproca llevada a cabo por las avispas de la madera. (Fuente: Y Gao [20])	30
Ilustración 16. Esquema de la sección de un ovipositor típico. (Fuente: Y Gao [20]).....	30
Ilustración 17. Aplicaciones de las estructuras celulares en distintos campos de la ingeniería. (Fuente: D. Bhate [27])	33

Ilustración 18. Clasificación de los materiales celulares. (Fuente: D. Bhate [27])	34
Ilustración 19. Tipos de teselado: Periódico en 2D, periódico en 3D, estocástico y jerárquico. (Fuente: D. Bhate [27])	35
Ilustración 20. Tipos de elementos: Tipo viga y tipo superficie. (Fuente: D. Bhate [27])	36
Ilustración 21. Tipos de conectividad. (Fuente: D. Bhate [27])	36
Ilustración 22. Esquema que ilustra la conectividad de los panales. (Fuente: Propia)	38
Ilustración 23. Apariencia física de estructuras metálicas de a.Panal; b.Espuma; c.Reticular. (Fuente: M. S. Azmi. [28])	40
Ilustración 24. Curva de compresión-deformación de una estructura celular dominada por flexión. (Fuente: M. F. Ashby [29])	42
Ilustración 25. Curvas de compresión-deformación de estructuras celulares dominadas por flexión. (Fuente: M. F. Ashby. [23])	43
Ilustración 26. Curva de tracción-deformación de estructuras dominadas por flexión. (Fuente: M. F. Ashby. [23])	44
Ilustración 27. Curva de compresión-deformación de estructuras dominadas por la deformación axial. (Fuente: M. F. Ashby [29])	44
Ilustración 28. Tipos de estructuras de panal (Hexagonal, cuadrado y triangular). (Fuente: S. Iyer [30])	45
Ilustración 29. Celda unitaria de un panal hexagonal. (Fuente: Propia)	45
Ilustración 30. Propiedades de panales en el plano y normales al plano. (Fuente: Propia)	46
Ilustración 31. Relación de la curva σ/ε y t/l . (Fuente: M. F. Ashby. [23])	46
Ilustración 32. Panal hexagonal sometido a una carga de dirección x. (Fuente: Propia)	49
Ilustración 33. Esfuerzos sobre la arista inclinada de un panal hexagonal. (Fuente: Propia)	49
Ilustración 34. Fuerzas perpendiculares a la arista inclinada de un panal hexagonal. (Fuente: Propia)	49
Ilustración 35. Panal hexagonal sometido a una carga de dirección y. (Fuente: Propia)	51
Ilustración 36. Fases del colapso por deformación plástica de un panal. (Fuente: Propia)	53

Ilustración 37. Panal hexagonal sometido a una carga de dirección normal al plano (z). (Fuente: Propia)	56
Ilustración 38. Pared de un panal hexagonal sometida a pandeo. (Fuente: Propia)	57
Ilustración 39. Colapso por pandeo plástico de las paredes de un panal. (Fuente: Propia)	58
Ilustración 40. Diferentes tipos de espumas: (a) Poliuretano, de celda abierta; (b) Polietileno, de celda cerrada; (c) Níquel; (d) Cobre; (e) Zirconia; (f) Mullita; (g) Vidrio; (h) (Fuente: M. F. Ashby. [23]).....	59
Ilustración 41. Modelo de una espuma. (Fuente: Propia).....	61
Ilustración 42. Deformación elástica de una espuma. (Fuente: M. F. Ashby. [29]).....	62
Ilustración 43. Colapso por pandeo de una espuma. (Fuente: M. F. Ashby. [29]).....	64
Ilustración 44. Colapso por deformación plástica de una espuma. (Fuente: M. F. Ashby. [29])	65
Ilustración 45. Colapso por rotura frágil de una espuma. (Fuente: M. F. Ashby. [29]).....	66
Ilustración 46. Tipos de estructuras reticulares. (Fuente: N. Jin. [55]).....	67
Ilustración 47. Gráfica de Ashby del módulo de Young relativo frente a la densidad relativa. (Fuente: M. F. Ashby [29])	69
Ilustración 48. Aristas huecas. (Fuente: Propia).....	70
Ilustración 49. Espumas con estructura microsandwich. (Fuente: Propia)	71
Ilustración 50. Ejemplo de gráfico de Ashby. (Fuente: D. Bhate [27])	72
Ilustración 51. Gráficas que representan las leyes de escala en una estructura reticular cúbica. (Fuente: M. E. Lynch. [31]).....	74
Ilustración 52. Dependencia de las propiedades mecánicas de distintas estructuras celulares a la densidad relativa. (Fuente: D. Bhate [27])	74
Ilustración 53. Panal de abeja. (Fuente: Desconocida).....	76
Ilustración 54. Radiolarios. (Fuente: M. Spaw).....	77
Ilustración 55. (a) Escamas de un salmón; (b) Distribución de las escamas; (c)(d) escamas envueltas el material blando. (Fuente: P. Fratzl [34])	77
Ilustración 56. Detalle de la estructura del hueso trabecular. (Fuente: D. Kytir. [36])	78

Ilustración 57. Estructura celular del corcho, (a) Sección tangencial; (b) Sección transversal; (c) Sección radial. (Fuente: Pereira)	78
Ilustración 58. Gradiente del grosor de las venas y membranas en un ala de libélula. (Fuente: S. R. Jongerius [36])	79
Ilustración 59. Elementos tipo viga y tipo superficie en los elementos naturales. (Fuente: Desconocida)	79
Ilustración 60. Tipos de carga a los que están sometidos los elementos naturales. (Fuente: T. McNulty [39])	80
Ilustración 61. Estructura reticular de la canasta de flores de Venus. (Fuente: Fernandes. [40])	81
Ilustración 62. Esquema de la sección del pico de un tucán. (Fuente: Seki. [36])	82
Ilustración 63. Estructura interna de la piel del pomelo. (Fuente: Harrington. [38])	82
Ilustración 64. Estructura del nácar. (Fuente: Barthelat. [38])	83
Ilustración 65. Sección de una espina de erizo (Erinaceus Europacus). (Fuente: G. Karam [39])	84
Ilustración 66. Estructura reticular inspirada en la estructura cristalina cúbica denominada red del diamante. (Fuente: B. Jetté. [40])	84
Ilustración 67. Interfaz del programa nTopology. (Fuente: Propia)	86
Ilustración 68. Cupones de estructuras celulares diseñados con nTopology. (Fuente: Propia)	87
Ilustración 69. Solución de fabricación aditiva HP JetFusion 5200 (Fuente: HP web)	88
Ilustración 70. Proceso de impresión Multi Jet Fusion. (Fuente: Materialise)	88
Ilustración 71. Cupones resultantes de la impresión 3D. (Fuente: Propia)	89
Ilustración 72. Curva de compresión-deformación de estructuras dominadas por la deformación axial. (Fuente: M. F. Ashby [29])	91
Ilustración 73. Curva de σ/ϵ del cupón de estructura tipo panel. (Fuente: Propia)	91
Ilustración 74. Curva de compresión-deformación de estructuras de elastómeros dominadas por flexión. (Fuente: M. F. Ashby. [23])	92

Ilustración 75. Curva de σ/ε del cupón de espuma Voronoi. (Fuente: Propia)	93
Ilustración 76. Curva de compresión-deformación de estructuras de elastómeros dominadas por flexión. (Fuente: M. F. Ashby. [23])	94
Ilustración 77. Curva de σ/ε del cupón de estructura tipo diamante. (Fuente: Propia)	94
Ilustración 78. Curva de compresión-deformación de estructuras dominadas por el esfuerzo axial. (Fuente: M. F. Ashby [29])	95
Ilustración 79. Curva de σ/ε del cupón de estructura tipo octeto. (Fuente: Propia)	95
Ilustración 80. Gráfica de Ashby con los valores de módulo de Young relativo obtenidos en los ensayos experimentales. (Fuente: M. F. Ashby [29])	97

Índice de tablas

Tabla 1. Clasificación de la biomimética. Aplicación en la inspiración en las termitas para el diseño de viviendas.....	16
Tabla 2. Constante de pandeo de las aristas de un panel hexagonal.....	52
Tabla 3. Dependencia de las propiedades mecánicas de panales, espumas y retículas a la densidad relativa.....	69
Tabla 4. Medida de masa de los cupones a ensayar	90
Tabla 5. Módulo de Young relativo de las estructuras celulares ensayadas.....	96
Tabla 6. Deformación de densificación de los cupones.	98
Tabla 7. Tabla del costes del estudio.....	99
Tabla 8. Tabla de costes de la aplicación de estructuras celulares a una pieza determinada.	101

1. Prefacio

1.1. Origen del proyecto

En la actualidad, hay herramientas de fabricación, como la fabricación aditiva, que proporcionan una gran flexibilidad al diseñador mecánico. Gracias a ellas, se pueden fabricar piezas de formas complejas, orgánicas, e incluso modificar la estructura interna de las piezas, adaptándolas a los requerimientos mecánicos, y otorgándole, en algunos casos, un carácter multifuncional al diseño.

Las estructuras celulares han estado siempre limitadas por su manufactura, y la fabricación aditiva ha descubierto un sinfín de posibilidades de diseño de este tipo de estructuras, pudiendo modificar las celdas unitarias, su distribución en el espacio y otras variables de diseño. Esto podría conllevar un impacto muy positivo en campos como la automoción, la aeronáutica, la aeroespacial o a bioingeniería.

Por otro lado, la naturaleza siempre ha sido fuente de inspiración para profesionales de todos los campos, y la ingeniería mecánica no es una excepción. Hay una gran cantidad de estudios que respaldan el carácter optimizador de la naturaleza, de como la forma, estructura, materiales etc. de los elementos naturales están optimizados para su funcionalidad y condiciones de contorno. Y son muchos los elementos naturales que presentan estructuras celulares, que pueden ser utilizadas como fuente de inspiración para el diseño de componentes que las utilicen.

2. Introducción

2.1. Objetivos del proyecto

El presente trabajo tiene como objetivo dar una base teórica y estructurada, complementada con un apartado experimental, de dos conceptos que ganarán cada vez más importancia en la ingeniería mecánica con la aparición de la fabricación aditiva: La biomimética y los sólidos celulares.

La biomimética es un enfoque de diseño mecánico que se lleva utilizando desde hace muchos años, pero son muy pocos los artículos que presentan una visión general del concepto y la manera de aplicarlo, centrándose la gran mayoría de ellos en casos muy concretos. La creación de este marco teórico tiene como objetivo mostrar, en el momento de buscar ideas para un diseño o solución a un problema, de qué manera podría la naturaleza ayudarnos, como debemos observarla y buscar inspiración en ella.

En el caso de los sólidos celulares, la información encontrada en los distintos artículos publicados es también muy específica a los casos estudiados. En este proyecto se pretende presentar una visión general de los tipos existentes o que podrían existir. Es fundamental, a la hora de diseñar la estructura celular para una aplicación determinada, conocer todos los aspectos que se podrían variar, todas las decisiones que se podrían tomar.

Asimismo, se presenta un marco teórico muy detallado desde el punto de vista de las propiedades y comportamiento mecánico de las estructuras. El objetivo de ello es el dar las herramientas para poder prever y conocer el comportamiento y propiedades mecánicas de casi cualquier tipo de estructuras celulares, facilitando así su diseño y/o selección. Es para esto último también que se presentan herramientas para facilitar la selección, una de ellas desde el punto de vista biomimético.

Mediante la parte experimental, se pretende, en primer lugar, mostrar una herramienta de software con la que diseñar estructuras celulares, además de comprobar en la realidad lo estudiado teóricamente.

2.2. Alcance del proyecto

En este trabajo se realiza un estudio de los sólidos celulares desde el punto de vista biomimético.

Para ello, se presenta en primer lugar un marco teórico de la biomimética, su definición y clasificación. A continuación, se elabora un estudio de los sólidos celulares, sus tipologías, sus propiedades y comportamiento mecánico, y se explican herramientas para facilitar su selección. Posteriormente, se desarrolla con más detalle una de estas herramientas, la selección por

inspiración en la naturaleza y, por último, se presenta una parte experimental en la que se diseñan cuatro tipos de estructuras, que se ensayan a compresión.

3. Biomimética

3.1. Introducción

La naturaleza y su belleza ha sido a lo largo de los años fuente de inspiración para artistas, arquitectos y profesionales de todos los ámbitos, entre ellos los ingenieros. No solamente por su belleza visual, sus formas orgánicas y redondeadas, sino también en un sentido más funcional. Durante más de 3.8 billones de años, las distintas estructuras presentes en la naturaleza se han ido optimizando gradualmente para cumplir con su función en un entorno dado, bajo ciertas condiciones de contorno, como veremos en diferentes ejemplos a continuación. Los ingenieros, científicos y biólogos utilizan de forma práctica funciones o mecanismos encontrados en ella para llegar a soluciones novedosas y eficientes. Este concepto se denomina biomimética, también denominada biomímesis o biomimetismo.

Este no se trata de un concepto novedoso y actual, Da Vinci se fijó en el vuelo de las aves para diseñar sus máquinas voladoras (aunque nunca montó alguna); el velcro se trata de una invención que imita los ganchos de los abrojos; y en 1904, Ignaz e Igo Etrich, pioneros en la aviación, inventaron un ala autoestable inspirado en el ala de una semilla de un tipo de liana que crece en islas del pacífico. Como estos, hay muchos ejemplos de biomimética a lo largo de los años [1].

3.2. Clasificación

Para facilitar el entendimiento y posterior aplicación de la biomimética, la hemos dividido en tres niveles: Organismo, comportamiento y ecosistema, y estos se han dividido a su vez en distintas dimensiones que veremos a continuación, cada una con su respectivo ejemplo [2].

Esta se trata de una de las muchas formas de clasificar la biomimética que hemos encontrado en los artículos analizados, y se ha elegido por la forma de reflejar de forma clara y bien estructurada la amplitud del concepto.

Los tres niveles reflejan la parte del elemento biológico que se está imitando:

1. Organismo.
2. Comportamiento.
3. Ecosistema.

El nivel del organismo refleja la imitación al propio elemento (planta o animal) o a una parte de este. El segundo nivel se refiere al comportamiento del organismo con el exterior, y el tercero al ecosistema completo y a los principios que posibilitan su funcionamiento y equilibrio.

Dentro de cada nivel, se podría volver a escalar todo el concepto, en función de si lo que se imita es:

- Forma: Imitación del aspecto.
- Material: Imitación del material del que está formado.
- Construcción: Imitación de la manera de la está construido o formado.
- Proceso: Imitación de la manera de funcionar.
- Función: Imitación de lo que es capaz de realizar.

En la siguiente tabla se aplica dicho sistema de clasificación en el caso de la inspiración en las termitas para la creación de viviendas. Como se verá, en algunos casos el ejemplo carecerá de mucho sentido en cuanto a una aplicación real, pero logra reflejar y explicar claramente el sistema de clasificación.

Tabla 1. Clasificación de la biomimética. Aplicación en la inspiración en las termitas para el diseño de viviendas

Niveles	Dimensiones	
Organismo	Forma	La vivienda se inspira en la forma física de una termita.
	Material	La vivienda está hecha con el mismo material que la propia termita, o que imita la estructura interna de dicho material.
	Construcción	La vivienda está construida de la misma forma o con el mismo proceso que las propias termitas, con ciclos de crecimiento..
	Proceso	La vivienda funciona internamente o realiza los mismos procesos internos que una termita. (Ej. Produce hidrógeno eficientemente).
	Función	La vivienda funciona con el exterior de la misma forma que la termita. (Ej. Recicla desperdicios de celulosa o remueve tierras poco fértiles y favorece el crecimiento de plantas).
Comportamiento	Forma	La vivienda se parece al nido de una termita.
	Material	La vivienda está formada por el mismo material del que está formado un nido de termitas (Arcilla que resulta de una mezcla de saliva, tierra y excrementos).
	Construcción	La vivienda está construida con el mismo procedimiento, de la misma forma que lo haría una termita. (Apilando tierra de cierta forma en distintas fases).
	Proceso	La vivienda funciona internamente, se mantiene, no se destruye de la misma forma que los nidos de las termitas.

	Función	La vivienda actúa con el exterior, o tiene las mismas propiedades funcionales que un nido de termitas (Ej: Las condiciones internas están reguladas para ser estables y óptimas).
Ecosistema	Forma	La vivienda se parece al ecosistema donde la termita viviría.
	Material	La vivienda utiliza los mismos materiales de los que se compone el ecosistema de la termita (Utilización de tierra y componentes comunes y agua).
	Construcción	La vivienda está construida o formada imitando el ecosistema de la termita (principios de secuencia y aumento de complejidad).
	Proceso	La vivienda funciona internamente de la misma forma que el ecosistema de las termitas (Captura energía del sol, almacena agua, etc.).
	Función	La vivienda es capaz de funcionar e interactuar con el exterior de la misma forma que el ecosistema de las termitas (Ej: Participa en el ciclo hidrológico, del carbón o del nitrógeno).

En este caso, naturalmente, el nivel que tiene más sentido en cuanto a biomimética es el de comportamiento, la construcción de viviendas que imiten los nidos de las termitas (en alguna de las dimensiones). Y en efecto, esto ya ha sido estudiado e incluso aplicado varias ocasiones.

Los termiteros, especialmente los de tipo catedral, son estructuras muy llamativas al ojo humano, y de las más complejas construidas por animales en la naturaleza. Los hay de diferentes formas y tamaños, grandes, pequeños, cónicos o tipo catedral, dependiendo del tipo de termita que habite en ellos. Dichos insectos los construyen para protegerse de las adversidades del entorno como temperaturas extremas, ya que, a diferencia de muchos otros insectos, no cuentan con una capa de quitina, que les protege de la desecación y las fluctuaciones extremas de temperatura. Los nidos tienen naturalmente otras funciones, como la protección frente a depredadores, el almacenamiento de alimento, y principalmente, hacer que la parte en al que se encuentra el nido tenga las condiciones ideales de temperatura, humedad etc. Esto último lleva a que los termiteros varíen tanto de forma y materiales según el lugar donde se encuentren, ya que han de adaptar su estructura a las condiciones locales. Por ejemplo, se ha observado que, en las sabanas, que presentan temperaturas más altas, los termiteros tienen una estructura de montículos compleja, con paredes finas y mucha superficie expuesta al exterior [3].



Ilustración 1. Termitero de 6m de altura en Otjiwarango, Namibia. (Fuente: A.Surovek [3].)



Ilustración 2. Termitero en forma de cúpula en Agombe, India. (Fuente: P. Bardunias [3].)

El aspecto más estudiado de los nidos de las termitas para su aplicación a viviendas es la forma que tienen estos en crear o permitir ventilación natural. El Eastgate Centre de Harare, en Zimbawe, es capaz de refrigerar su interior sin necesidad de aire acondicionado, inspirándose en la forma de ventilación natural de los termiteros. Dicho caso se estudiará en el apartado 3.3.3.

3.3. Campos de aplicación

Como ya observamos en el apartado anterior, la biomimética es muy complicada de encasillar o definir de una única forma, al englobar conceptos tan distintos entre sí, referentes a disciplinas sin apenas nada que ver entre ellas, con el único punto en común de imitación o aplicación de la naturaleza.

Para poder reflejar la riqueza de este concepto, antes de centrarnos únicamente en el campo que nos aplica en este trabajo, que es el de ingeniería o diseño mecánico, se ha querido realizar una breve reseña de ejemplos de biomimética en distintos campos técnicos o científicos: Arquitectura, análisis de datos, ingeniería sostenible/energías renovables, ciencia de materiales y finalmente, ingeniería mecánica.

3.3.1. Arquitectura

En la arquitectura, la naturaleza siempre ha servido de inspiración, primero en forma de “bioformismo”, que se trata del uso de formas naturales más por motivos estéticos o simbólicos (Le Corbusier es un gran ejemplo de ello), y más adelante, de forma biomimética, al inspirarse en elementos de la naturaleza desde el punto de vista más funcional. Utilizar tubos huecos como los de los tallos de las plantas, las espinas de los erizos o el bambú o formas de árboles es una

manera de hacer estructuras más eficientes.

El bambú presenta un concepto muy interesante, ya que se trata de un tubo hueco que puede llegar a medir 40 metros de alto que responde de forma muy efectiva y eficiente a los esfuerzos laterales. Se trata de un tallo alto que ha de soportar las hojas, además de esfuerzos del viento etc., lo que consigue gracias a las propiedades estructurales naturales de sus fibras y a la proporción geométrica de su forma. Además, presenta una serie de nodos, espaciados entre ellos de forma clave en cuanto a su funcionalidad (más juntos en la parte superior y en la base, y más espaciados en la parte central) que previenen el pandeo del tallo, ya que evitan la ovalización de la sección, dado el bajo espesor del tallo. Asimismo, la relación entre dicho espesor y el diámetro evitan el pandeo. Es una estructura muy eficiente debido a dichas propiedades, y ha sido fuente de inspiración de varios proyectos arquitectónicos, como el China World Trade Center (Pekín, China). En la siguiente imagen se pueden observar los paralelismos entre la estructura arquitectónica y la estructura natural [4][5][6].

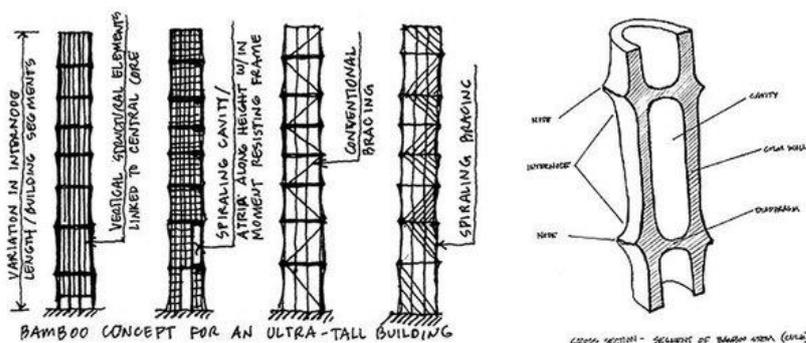


Ilustración 3. Diseño del China World Trade Centre. (Fuente: SOM [6])



Ilustración 4. Imagen del World Trade Centre. (Fuente: Desconocida)

3.3.2. Análisis de datos

Aunque parezca menos intuitivo y directo, en el campo de la ciencia computacional, del análisis de datos y su procesamiento también hay proyectos inspirados en la naturaleza, en procesos e interacciones de sistemas biológicos. Un ejemplo es la PSO (Particle Swarm Optimization), la llamada Optimización por Enjambres de Partículas, desarrollada por Kennedy y Eberhart en el año 1995 [7]. Se trata de una técnica de optimización y búsqueda ya arraigada en el campo, que se inspira en el comportamiento de los enjambres de insectos en la naturaleza. Es una metaheurística (no asume apenas hipótesis sobre el problema a optimizar) que se basa en la

transmisión del suceso de cada individuo a los demás individuos del grupo, para acabar llegando a la mejor solución posible.

El método parte de una población de soluciones candidatas o partículas, que se van moviendo por el espacio de búsqueda siguiendo unas reglas matemáticas que tienen en cuenta la posición y velocidad suya propia y de las demás. El movimiento de cada una de ellas responde a la mejor posición propia lograda hasta el momento, al igual que la mejor posición global lograda por sus compañeras. De esta forma, es posible converger a la solución óptima sin muchos recursos computacionales.

En el algoritmo se refleja el comportamiento de un enjambre de abejas, que necesita encontrar la región del espacio donde hay más densidad de flores porque habrá mayor cantidad de polen. Cada abeja vuela de modo errático para encontrar las flores, sabiendo en todo momento en qué región vió más flores y dónde colectivamente se han visto más. Con dichos datos, varía su movimiento hacia un lugar intermedio. De esta forma, llegará un momento en el que todas las abejas se orienten hacia el lugar donde haya más flores, convergiendo al valor óptimo [8].

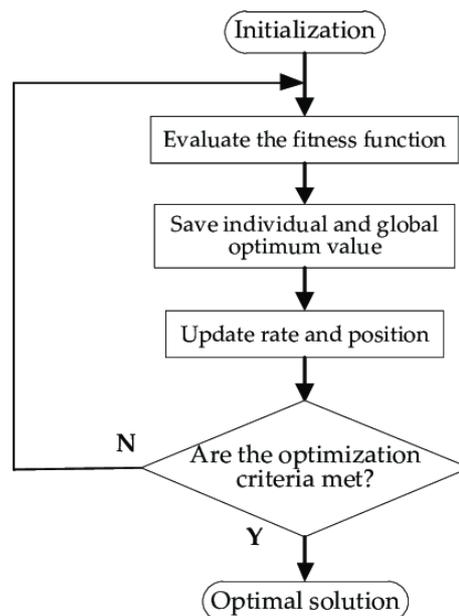


Ilustración 5. Diagrama de flujo del sistema de control reactivo. (Fuente: R.C.Ebehart [7].)

3.3.3. Ingeniería sostenible – Energías renovables

En la actualidad, con un planeta cada vez más dañado, contaminado y menos recursos disponibles, la ingeniería sostenible va adquiriendo más y más importancia. Consiste en el desarrollo de soluciones, tecnologías, proyectos, que estén en equilibrio con su entorno, que no agoten los recursos existentes ni pongan en peligro el medio ambiente. Requiere de un enfoque interdisciplinario en todas sus fases, desde el diseño y construcción a la utilización, e incluso desmantelamiento y reutilización. Para llegar a esta sostenibilidad, hay muchos estudios y

aplicaciones que encuentran su inspiración en la naturaleza.

Un ejemplo es el edificio East Gate Centre de Harare, Zimbabwe, que cuenta con un sistema de ventilación natural inspirado en el de los termiteros de los que se habló en el apartado 3.2. Gracias a dicho sistema, la temperatura interior del edificio se mantiene regulada con un consumo de energía notablemente menor (menos del 50%) de lo que consumiría si utilizase sistemas mecánicos convencionales, siendo un ahorro de energía considerable. Teniendo en cuenta que los edificios suponen el 36% del consumo final de energía, y el 39% de las emisiones de CO₂ relacionadas con el consumo de energía (28% servicio y 11% materiales y construcción), conseguir edificios cada vez más eficientes es esencial para el sector [9][10].

El sistema de ventilación del edificio de Zimbabwe funciona de una forma muy similar a la de un termitero. Las termitas van abriendo y cerrando conductos de aire en sus nidos a lo largo del día, y así es como consiguen regular la temperatura interior.

El East Gate Centre está formado por dos edificios separados unidos por un techo acristalado. En este espacio medio se encuentran los ascensores, suspendidos en cables que se cogen en las vigas de acero y puentes que interconectan ambos edificios.

Su sistema de climatización y ventilación hace posible que, con una temperatura exterior que varía entre los 14 y 28°C entre el día y la noche, la interior solamente varíe entre 20-26 °C, estando la mayoría del tiempo sobre los 22°C.

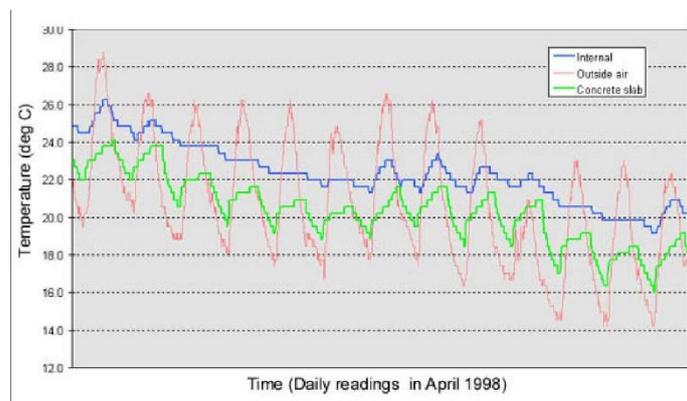


Ilustración 6. Variación de temperatura en el interior y exterior del East Gate Centre. (Fuente: M. Pearce [11])

Esto se consigue mediante los siguiente:

Cada uno de los edificios es una gran estructura de hormigón con un exterior de granito, por lo que tiene una gran masa calorífica. Gracias a ello, el propio edificio es capaz de absorber gran cantidad del calor durante el día, tanto del exterior como del interior. Por la noche, cuando la temperatura del exterior es menor que la del edificio, este se enfría, tanto por intercambio de calor con el exterior como por el aire frío que recorre su interior (explicado más adelante), liberando capacidad de absorción de calor para el día siguiente. Ver Ilustración 6.

Los edificios cuentan con una estructura exterior con muchas protuberancias, que no solamente protegen a las pequeñas ventanas del sol, sino que también incrementan la superficie externa del edificio, mejorando el enfriamiento del edificio por la noche y minimizando la ganancia de calor por el día.

En el tejado del edificio hay 48 chimeneas de ladrillo, que son el escape de los conductos verticales por los que sale el aire de los siete pisos de oficinas que contiene el edificio (método de ventilación stack). En la parte inferior del edificio, debajo de dichas 7 plantas, hay una entre sala que cuenta con 32 bancos de ventiladores que extraen aire del atrio a través de filtros. Este aire es empujado hacia arriba a través de una serie de conductos verticales que pasan por la parte central del edificio, y va fluyendo por los entrepisos construidos entre cada planta. Hay por tanto dos tipos de conductos verticales en la columna vertebral del edificio: Aquellos que evacúan el aire caliente hacia las chimeneas, y aquellos que sirven de alimentación de aire fresco a las entreplantas. Ver Ilustración 7 e Ilustración 8.

La renovación de aire en las oficinas sucede de la siguiente forma: A medida que el aire del interior de las oficinas se va calentando, se va elevando hacia el techo abovedado donde se aspira a través de los puntos de escape y se lleva a los conductos de escape. A la misma vez, el aire de los entresuelos va entrando a la habitación por un conducto que va desde dicho entresuelo a unas rejillas en la parte inferior de las ventanas. [11] Ver Ilustración 8.

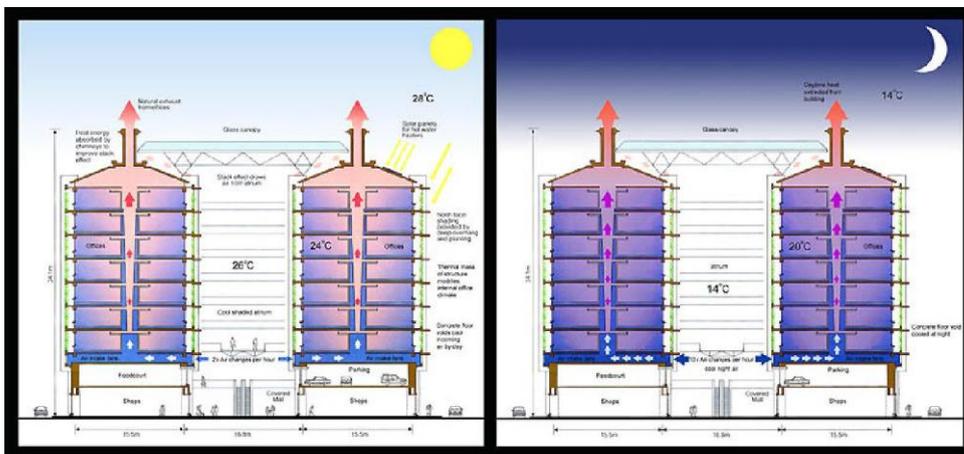


Ilustración 7. Sistema de ventilación natural del East Gate Centre. (Fuente: M. Pearce [11])

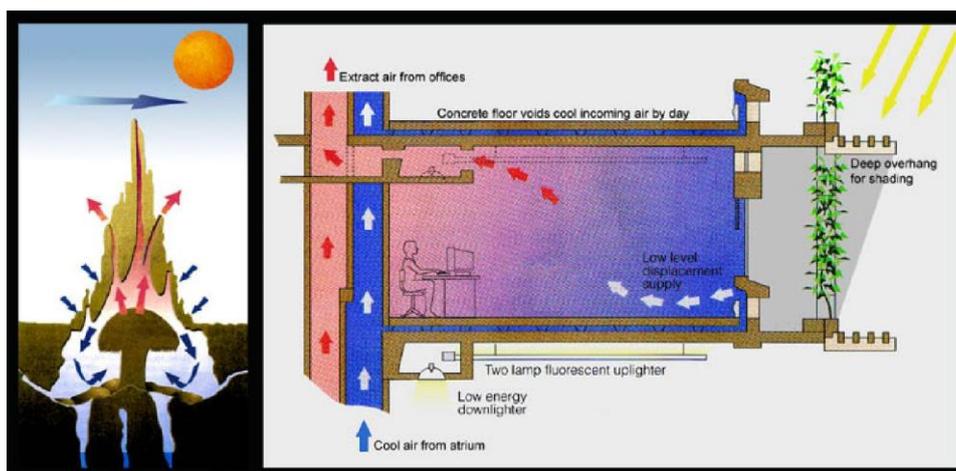


Ilustración 8. Detalle del funcionamiento del sistema de ventilación natural de las oficinas del East Gate Centre, y su comparación con un termitero. (Fuente: M. Pearce [11])

3.3.4. Ingeniería de materiales

En la naturaleza, encontramos muchos tipos de nano-microestructuras, como las de las hojas de la flor de loto, las alas de las mariposas, los pétalos de rosa o la piel del tiburón, que conceden a estos una serie de atributos o funcionalidades especiales. Por ello, son muchos los científicos que se dedican a investigar y producir materiales imitando aquellos encontrados en la naturaleza, para lograr sus propiedades [12]. A continuación, mencionaremos algunos ejemplos:

Hay superficies en la naturaleza que presentan un comportamiento superhidrofóbico, para lo cual han de tener estructuras rugosas con baja energía superficial. Esto significa que sus moléculas son más bien independientes, no presentan atracción hacia las demás moléculas. Un ejemplo en la naturaleza que posee una microestructura hidrofóbica son las hojas de la flor de loto.

Actualmente, este tipo de materiales hidrofóbicos tienen una gran importancia, dado que se utilizan en una gran cantidad de aplicaciones, como la separación entre agua y aceite, anticorrosión, autolimpieza y antibacteriana. Para esta primera aplicación, por ejemplo, los procesos actuales de separación por gravedad, filtración, centrifugación o flotación son complejos y poco eficientes, y un material superhidrofóbico sería una alternativa más eficaz. Para ello, se ha fabricado un nuevo tipo de grafeno, biomimético, que tiene capacidad hidrofóbica, ya que durante su proceso de fabricación se consigue que imite a la estructura superficial de la flor de loto. Se ha desarrollado un método electroquímico que hace que la nano microestructura del grafeno se convierta en dentrítica, aumentando así su capacidad hidrofóbica [13].

Este siguiente ejemplo está orientado a los implantes dentales. Uno de los materiales más utilizados para estos es el titanio, ya que presenta una buena habilidad de osteointegración, resistencia a la corrosión y biocompatibilidad. No obstante, no es resistente a la mucositis, una infección que provoca que el proceso de la osteointegración no se realice correctamente, fallando el implante. Para evitarlo, en la actualidad existen varios procedimientos cuyo fin es aguilizar y

favorecer el proceso de osteointegración, disminuyendo así las probabilidades de desarrollar una infección y que falle. Uno de ellos es una técnica biomimética que consiste en una técnica de recubrimiento del titanio, en la que se sumerge el implante en una solución de SBF (Fluido corporal simulado o plasma humano sintético), que cuenta con una temperatura y un pH muy similar al del plasma humano [12].

Como último ejemplo hablaremos de la ingeniería de tejidos. Cuando hay un tejido dañado, para acelerar su regeneración, se utilizan los llamados andamios, que sustituyen a la ECM (Matriz extracelular), en los que se implantan las células que conformarán el tejido, sirven de base para su crecimiento, y se van degradando hasta que desaparecen [14]. Una estructura con mucho potencial como andamio es el hueso del calamar, ya que se trata de una estructura porosa y homogénea. Se ha fabricado un andamio nanocompuesto formado por un polímero (nylon) y un material cerámico (hidroxiapatita) que imita la estructura de dicho hueso de calamar, es biodegradable y sería una buena opción para utilizar como andamio [12].

3.3.5. Diseño mecánico

Por último, nos centramos en la especialidad que más nos concierne, la ingeniería mecánica. En el proceso de búsqueda de inspiración en la naturaleza para el diseño y desarrollo de una máquina, los principales aspectos de un elemento natural en los que basarse son la forma y la función. Aunque ambas están claramente relacionadas, la interpretación que haremos de cada concepto hará que podamos diferenciarlas claramente:

- Con **inspiración de la forma** nos referimos a la utilización en el diseño de formas o estructuras óptimas para la funcionalidad que necesitamos. (Ej.: Añadir muescas a las alas y turbinas imitando la aleta de una ballena para aumentar su aerodinámica y estabilidad.)
- Con **inspiración de la funcionalidad** nos referimos a la utilización del mecanismo, forma de operar o trabajar de un organismo, que podríamos llegar a reproducir en la máquina a diseñar para lograr un objetivo similar. (Ej.: Diseño de drones con alas batientes, inspirados en moscas.)

3.3.5.1. Diseño basado en la forma

El diseño basado en la forma de los organismos naturales se trata de uno de los aspectos más estudiados y desarrollados de la biomimética, y está adquiriendo cada vez más y más importancia. Esto se debe, en parte, al desarrollo de nuevas técnicas de fabricación, como la fabricación aditiva o impresión 3D, que son capaces de producir formas y estructuras internas antes muy complicadas y costosas de manufacturar.

Hay dos tipos de enfoques de diseño a la hora de desarrollar un producto desde el punto de vista de la biomimética:



- **Biología a diseño** (Orientado a la solución): Se trata de un diseño motivado por la búsqueda de la innovación. El diseñador se inspira por un concepto o modelo biológico para crear un nuevo e innovador diseño.
- **Diseño a biología** (Orientado al problema): Se trata de un diseño motivado por un problema. En este caso, el diseñador tiene un problema a resolver, que soluciona al aplicar algún concepto encontrado en la naturaleza.

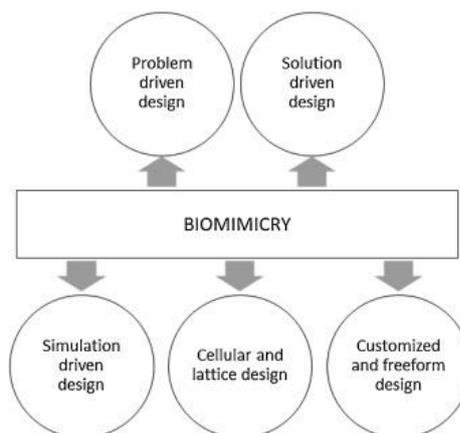


Ilustración 9. Enfoques de diseño mecánico desde el punto de vista biomimético. (Fuente: A. du Plessis [15])

En cuanto al propio proceso de diseño, en la actualidad hay tres formas de llegar a un diseño biomimético: Diseño customizado/de forma libre, diseño mediante simulaciones y diseño de materiales celulares. En un mismo diseño se pueden combinar varios de estos procesos, pero, por simplicidad, los abordaremos por separado. Por otro lado, estos métodos de diseño se pueden aplicar también sin input directo de la naturaleza, o con un input indirecto [15].

3.3.5.1.1 Diseño libre/customizado

Se trata de la forma más directa de diseñar desde el punto de vista biomimético, ya que consiste en imitar la forma encontrada en la naturaleza, o algo muy similar, y utilizarla en una aplicación particular manteniendo su funcionalidad. El ejemplo más claro e ilustrativo es el diseño de prótesis e implantes de huesos, de dientes etc. La forma de estos emula la de los elementos biológicos reales, además de respetarse su funcionalidad. Se ha de aclarar que, aunque dicha funcionalidad es la misma, las condiciones de contorno sí que pueden variar.

Un ejemplo de este tipo de diseño es la imitación de la forma de las aletas de las ballenas jorobadas a la hora de diseñar aviones, turbinas y otras estructuras con alas. Estas ballenas, a pesar de su tamaño, tienen una gran capacidad y facilidad de realizar maniobras acuáticas para captar a sus presas. Cuentan con unas aletas extremadamente móviles, con forma de ala, con las que son capaces de ladearse, dar giros y vueltas. Estas alas presentan una forma única en la naturaleza, tienen a lo largo del borde una serie de tubérculos redondeados. Dichos tubérculos en el borde de ataque actúan como dispositivos de control de flujo pasivo, y mejoran el rendimiento y la maniobrabilidad de la aleta. Esto se consigue de la siguiente manera: A medida

que el ángulo de ataque va aumentando, el punto de pérdida se va acercando al borde de ataque, disminuyendo por lo tanto la capa límite y la fuerza de sustentación. En estos casos de borde de ataque grandes, la capa límite laminar es casi mínima, la sustentación viene dada por esta y el componente principal de la resistencia está definido por la forma. El poner los tubérculos fuerza la aparición de una capa límite turbulenta, aumentando de esta manera la sustentación. Estudios muestran aumentos de la sustentación de un 5% y disminuciones de la resistencia de un 40%. A este fenómeno, que solamente ha sido observado en ballenas, se le denomina efecto tubérculo [16].

La incorporación de tubérculos es considerablemente beneficioso para ángulos de ataque grandes, y, aunque su efecto va perdiendo importancia a medida que el ángulo de ataque disminuye, el tener tubérculos en estos ángulos tampoco presenta ninguna desventaja, por lo que se puede considerar que su efecto es únicamente positivo.



Ilustración 10. Tubérculos en las aletas de una ballena jorobada. (Fuente: Desconocida)

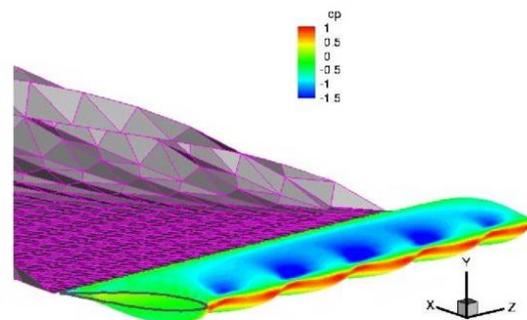


Ilustración 11. Simulación del flujo de aire en una aleta con filo de tubérculos. (Fuente: F. E. Fish [54])

Una de las aplicaciones en la que se está utilizando este efecto son los helicópteros, la DLR (Centro Aeroespacial Alemán) ya lo está incorporando a algunos modelos. Durante el funcionamiento de estos, se produce un fenómeno denominado pérdida del rotor en retroceso. Ocurre cuando la aeronave se desplaza a gran velocidad. La mitad del disco rotor que gira en el sentido contrario del viento, se enfrenta al viento de cara, lo que aumenta la efectividad del ángulo de ataque, pero la otra mitad, que gira a favor del viento, tiene un ángulo de ataque menos eficiente, y pierde fuerza sustentadora. De esta forma, una misma aspa está sometida a una variación cíclica de fuerza sustentadora, es decir, está sometida a fatiga. La utilización de tubérculos reduce esta variación de fuerza sustentadora, aumentando la vida de las aspas [17].



Ilustración 12. Helicóptero de investigación con el que la DLR investigó el concepto de aspas con tubérculos. (Fuente: DLR)

3.3.5.1.2 Diseño mediante simulaciones

El diseño mediante simulación (en el campo de la biomimética) es un método de diseño que está adquiriendo cada vez más importancia en los últimos años, debido al avance de las herramientas de simulación y sus interfaces cada vez más sencillas de utilizar, por el aumento de capacidad de cálculo de los procesadores, y también por el desarrollo de procesos de fabricación como la fabricación aditiva, que son capaces de producir diseños con formas y estructuras internas anteriormente muy complicadas y costosas de manufacturar.

Se basa en el concepto de optimización estructural o topológica, y consiste en simular el prediseño del elemento o elementos a fabricar, con los esfuerzos y condiciones de contorno a los que estará sometido, e ir adaptando su forma o la presencia de material y optimizándola según los mapas de esfuerzo y deformación de las piezas, a los tipos de esfuerzos mecánicos a los que estará sometida teniendo en cuenta además algunas condiciones impuestas por el diseñador. Se trata de un método iterativo que se puede realizar tanto manualmente como con la ayuda de softwares que utilizan los elementos finitos y algoritmos matemáticos preparados para ello. El resultado de esta optimización topológica es un diseño ligero y con el material posicionado ahí donde la pieza tiene más requerimientos.

La razón por la que se le considera un método de diseño biomimético es debido a su gran semejanza al proceso natural de la evolución. En la naturaleza se pueden observar elementos que a lo largo de los años han optimizado su forma, con más material en las partes sometidas a más esfuerzos y menos en las de menos solicitadas [15]. Un ejemplo muy cercano a nosotros en el que podemos observar esta optimización es en los huesos. En el siglo XIX, el anatomista y cirujano Julius Wolff estableció que los huesos, tanto de humanos como de animales, se adaptan a las cargas a las que están sometidas. En primer lugar, es el hueso trabecular (la parte interna de los huesos) el que sufre cambios adaptativos, seguidos de cambios en la parte externa, o hueso cortical. La forma de ambas estructuras varía, aumentando a su vez la densidad

ahí donde la demanda es mayor, y disminuyendo ahí donde la demanda decrece. En la siguiente imagen se puede observar el ciclo que comenta esta ley, aún vigente hoy en día [18].

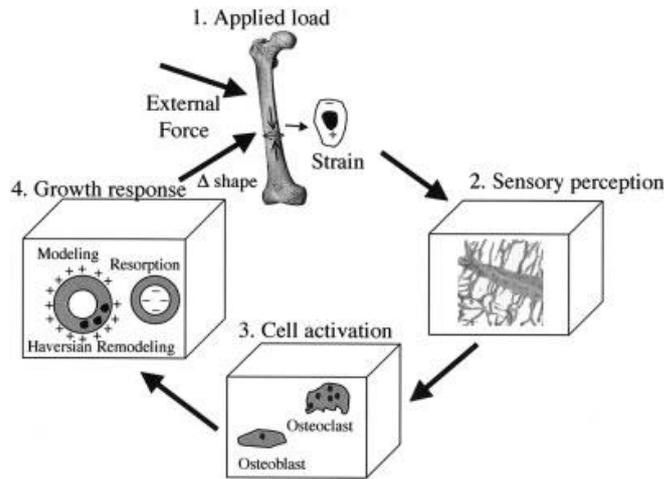


Ilustración 13. Respuesta de un hueso ante el esfuerzo. (Fuente: O. M. Pearson y D. I. E. Lieberman)

En la empresa ALTAIR [19] han diseñado varias piezas utilizando el método de optimización topológica. Para cada uno de los ejemplos, en la Ilustración 14 se puede observar la evolución de su forma y la diferencia entre la masa original y la optimizada, siendo valores muy positivos. El primer ejemplo es un pistón para automoción, de titanio, y optimizado para su fabricación aditiva. El resultado es una pieza un 25% más ligera e igual de resistente que la original, de aluminio. El siguiente ejemplo se trata del soporte del sillín de una bicicleta de montaña, que reemplaza al original fabricado por fundición de aluminio. El tercer ejemplo se trata de un estudio para la industria aeroespacial, la optimización de una bisagra mecánica para el Airbus A320. En este caso, la reducción de masa fue de un 75%. A continuación, se puede observar la optimización realizada en el soporte de una antena para los satélites Sentinel-1, y por último, la optimización del soporte de una cabina de aeronave.



Ilustración 14. Ejemplos de diseños biomiméticos obtenidos mediante la optimización topológica. (Fuente: Altair)

Como se puede observar en estos ejemplos, en la actualidad la optimización topológica está sobre todo orientada al diseño de piezas ligeras para las industrias automotiva y aeroespacial.

3.3.5.1.3 Diseño de materiales celulares

Los materiales o estructuras celulares se pueden encontrar en muchísimos elementos naturales, en gran variedad de tamaños y formas, utilizados para distintas finalidades. La estructura del panel de abeja, la estructura interna de los huesos, la piel de la serpiente o las alas de una libélula son algunos de los ejemplos en los que se pueden observar estas estructuras celulares.

Se suelen utilizar en la ingeniería con el propósito de obtener estructuras ligeras pero con propiedades mecánicas parecidas a sus análogos sólidos, y se pueden encontrar incluso combinadas con un diseño optimizado topológicamente. No obstante, también se pueden utilizar para influir en el comportamiento térmico de la pieza, para aumentar su absorción de energía, o para incrementar el ratio de área/volumen de esta, entre otros.

En este trabajo se profundizará en este tipo de diseño, en el estudio de materiales celulares encontrados en la naturaleza.

3.3.5.2. Diseño basado en la función

Como ya comentamos anteriormente, en la naturaleza podemos encontrar una gran variedad de mecanismos o funcionalidades que se han ido optimizando a lo largo de los años y que se pueden utilizar en aplicaciones actuales, logrando diseños innovadores, multifuncionales o más eficientes.

Un ejemplo fascinante es la avispa de la madera. Esta necesita perforar la madera para poner y proteger sus huevos, y lo hace sin poseer ningún tipo de eje giratorio, el típico mecanismo utilizado para perforar. Mediante su ovipositor, que se trata de un órgano al final de su cuerpo que se encarga de transmitir el huevo, preparar un lugar para este y ubicarlo de forma apropiada, realiza una perforación recíproca. El ovipositor está formado por dos ejes de sección semicircular y una punta cubierta de pequeños dientes. Estos pueden deslizarse uno en relación con el otro, de tal forma que cuando uno de los ejes está entrando en la madera, el otro se está retrayendo y saliendo de ella, y seguidamente este último entra y es el otro el que sale, y así sucesivamente. Cuando el eje primero entra en la madera, sus dientes se quedan encajados en ella, posteriormente rompiendo estas celdas en tensión con la parte del ovipositor que se está retractando.

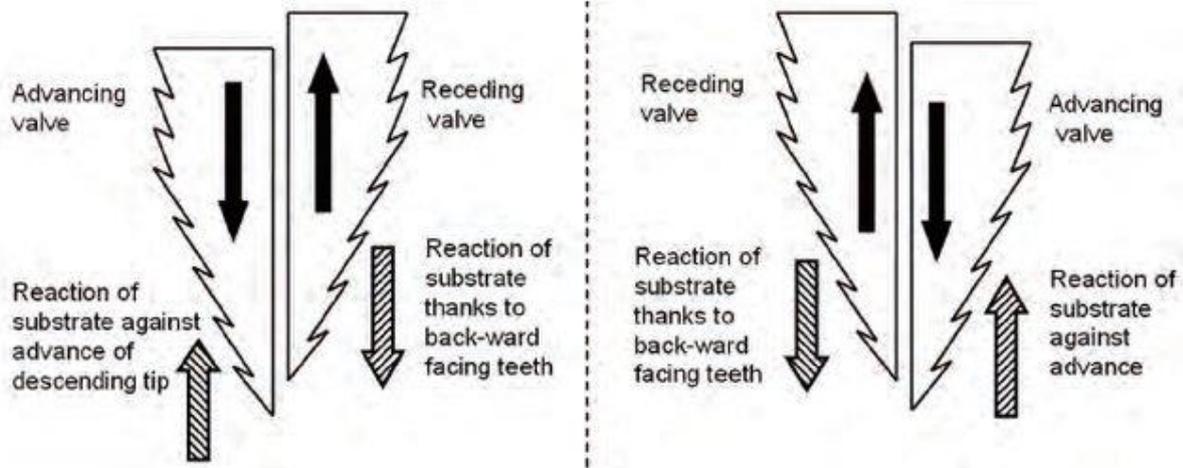


Ilustración 15. Esquema de la perforación recíproca llevada a cabo por las avispas de la madera. (Fuente: Y Gao [20])

El eje que entra en la madera debe de aplicar un esfuerzo suficiente como para penetrar en la madera, y está limitado por la carga crítica de pandeo. Pero estos riesgos de pandeo se minimizan debido a que el eje que ya se encuentra en la madera, al tener los dientes orientados hacia arriba, está sometido a tracción por la reacción de la madera sobre los dientes. Al estar ambos ejes unidos por las partes aulax y rachis (ver Ilustración 16), el eje penetrador no puede desviarse de su posición, es decir, el eje retractor actúa como estructura de soporte para el eje que trata de entrar en la madera, evitando así su pandeo [4][20].

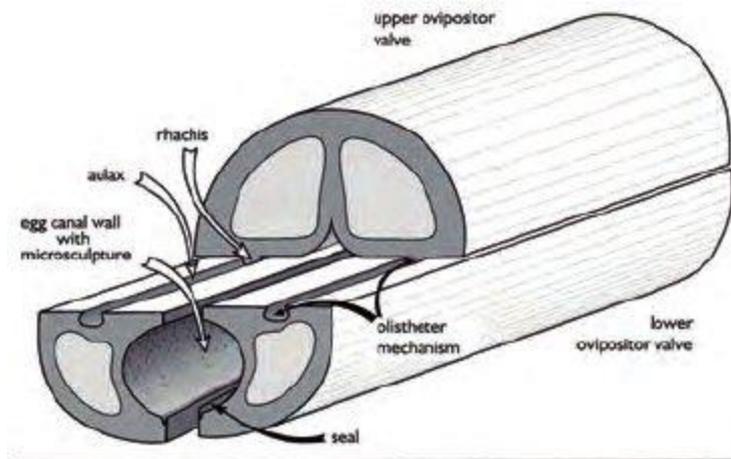


Ilustración 16. Esquema de la sección de un ovipositor típico. (Fuente: Y Gao [20])

Como comentábamos antes, el ser humano utiliza la naturaleza como fuente de inspiración, y este tipo de perforación recíproca no es una excepción. Una de las aplicaciones más interesantes se trata del uso de este tipo de mecanismo para la perforación y toma de muestras en superficies extraterrestres, como luna o marte.

Realizar una perforación en el espacio cuenta con una serie de desafíos que hacen más complicado este tipo de operaciones tan comunes en la tierra. La baja gravedad en la luna o

En Marte se tiene que compensar con un aumento de masa del sistema de perforación rotatorio para poder operar normalmente, traduciéndose esto en un aumento de la carga que hay que llevar al espacio (más coste, más consumo de combustible). La utilización de un sistema eficiente energéticamente y de un peso bajo como la perforación recíproca es ideal para este tipo de aplicaciones, y un grupo de investigadores de la ESA (Agencia Espacial Europea) se encuentra explorando esta opción [21].

4. Sólidos celulares

4.1. Introducción

Como ya se comentó en el apartado anterior, en este trabajo profundizaremos en el diseño mecánico utilizando materiales celulares, concretamente aquellos encontrados en la naturaleza. En esta sección realizaremos una descripción de estos materiales (Tipologías, propiedades etc.), ya que consideramos que, para poder realizar una correcta elección del material celular a utilizar en una aplicación concreta, es esencial contar con el conocimiento básico de estas estructuras, su clasificación, tipologías, propiedades etc.

Para este apartado, gran parte de la información se ha obtenido mediante la realización de un curso de sólidos celulares, Cellular Solids 1: Structures, Properties and Engineering Applications [22], impartido por Lorna J. Gibson, y que se basa en los libros [23][24] que ella misma ha publicado sobre este tema junto a M.F. Ashby, considerados bibliografía de referencia a la hora del estudio de los sólidos celulares. La parte teórica se fundamenta también en un artículo de este último autor [25], Ashby, al que se considera una eminencia en el campo.

4.2. Definición

Un material celular es aquel que está formado por una red interconectada constituida por una serie de aristas y caras que conforman celdas. La dimensión de estas celdas está normalmente entre los 0.1 y 10mm [26]. También se puede entender como un material formado por celdas unitarias que se repiten en el espacio.

- **Celda unitaria:** Se trata de una combinación determinada de material y espacio. Un material homogéneo sería aquel con una celda unitaria de densidad máxima.
- **Repetición:** Esta celda unitaria se repite en el espacio para crear una superficie o una estructura más grande. En patrón resultante no tiene porqué ser regular, y puede contener más de un tipo de celda unitaria.

Este tipo de estructuras ofrecen ventajas respecto a las estructuras homogéneas, como la capacidad de modificar propiedades de forma local o lograr multifuncionalidad [27]. Estas son algunas de sus funcionalidades en los campos estructural, térmico, de fluidos o biomédico:

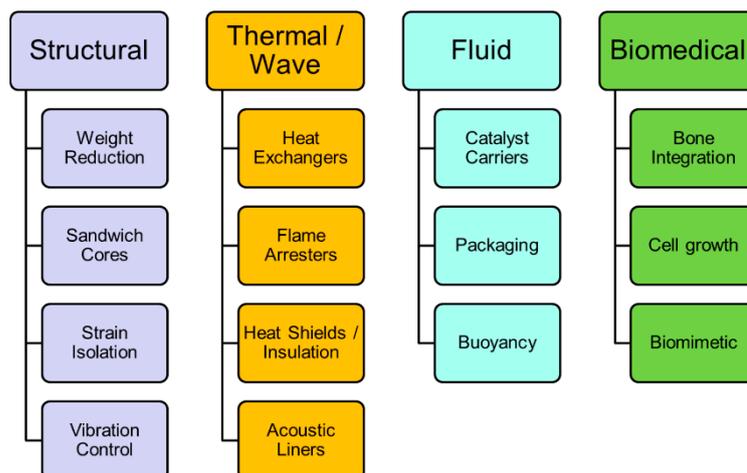


Ilustración 17. Aplicaciones de las estructuras celulares en distintos campos de la ingeniería. (Fuente: D. Bhate [27])

4.3. Clasificación

Considerando que un material celular consiste en una celda unitaria que se repite en un volumen, hay una infinidad de tipos de materiales celulares. Tradicionalmente, gracias a su facilidad de fabricación, en la ingeniería hay dos tipos de materiales celulares que han destacado de entre los demás: Las espumas y los panales. Las espumas se tratan de estructuras estocásticas tridimensionales, y los panales se tratan de estructuras prismáticas, en los que un patrón de polígonos regulares es extruido en la dirección perpendicular.

No obstante, con las tecnologías de fabricación actuales, como la fabricación aditiva, esta clasificación se queda simple para describir todas las diferentes posibilidades de diseños que se podrían conseguir. En el artículo [27] se presenta una nueva forma de clasificación mucho más amplia, que utiliza conceptos de otras dos áreas en las que se trabaja con celdas unitarias: Las matemáticas y la cristalografía.

De esta forma, los materiales celulares se podrían entender desde tres niveles (colocados desde el punto de vista de la toma de decisiones para el diseño del material):

1. **Teselado o patrón.** La división del espacio en volúmenes independientes de una forma determinada .
2. **Elementos.** El uso de aristas o caras en este espacio.
3. **Conectividad.** La disposición de los elementos en este espacio.

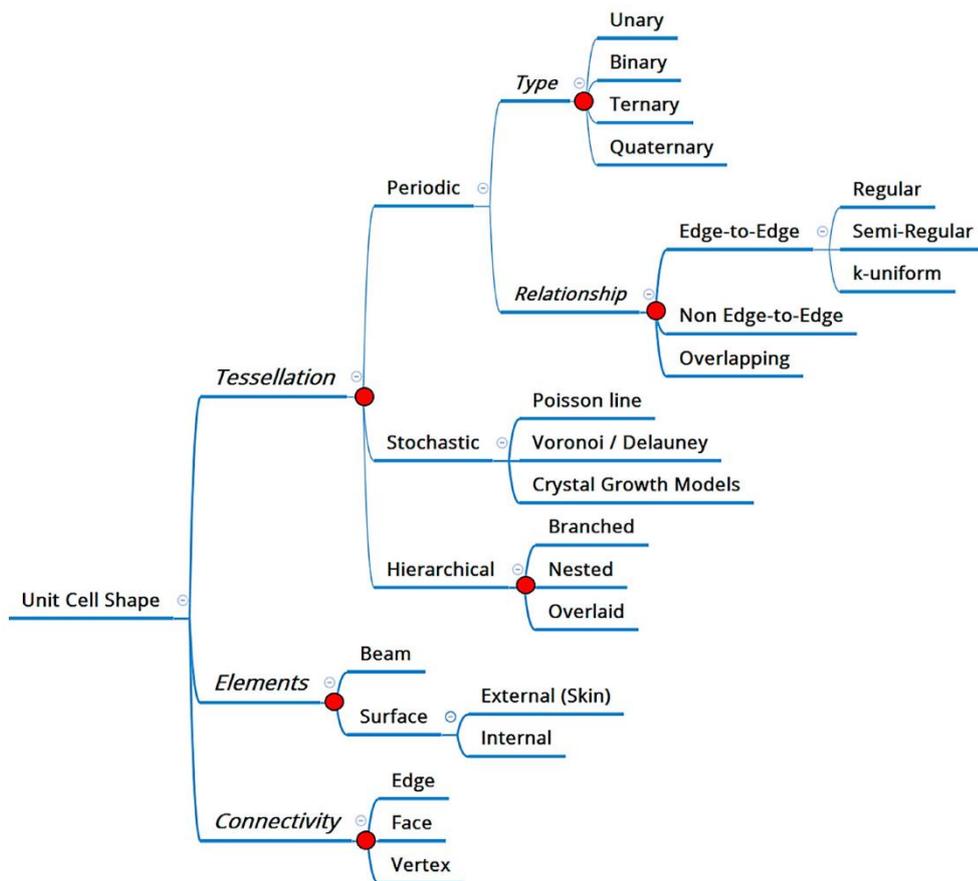


Ilustración 18. Clasificación de los materiales celulares. (Fuente: D. Bhat [27])

4.3.1. Teselado

4.3.1.1. Teselado periódico

Las estructuras celulares consisten en una o más formas poligonales (2D) o poliédricas (3D), conectadas de una determinada manera.

- Las celdas unitarias que se repiten pueden estar conformadas con hasta cuatro tipos de polígonos o poliedros, denominándose respectivamente unitarias, binarias, terciarias o cuaternarias.
- Estas celdas pueden estar conectadas entre sí de diferentes formas (compartiendo arista, compartiendo media arista etc.)

Para llenar un volumen (3D), se han identificado 23 tipos de poliedros capaces de llenar un espacio, tres de ellos prismáticos (el cubo, el prisma triangular y el prisma hexagonal), que presentan una estructura tipo panel, y 20 poliedros varios, como el tetraedro.

4.3.1.2. Teselado estocástico

A diferencia del tipo anterior, este tipo de teselado consiste en una distribución aleatoria de celdas unitarias en el espacio. Las espumas, debido a la forma a la que se fabrican, suelen presentar este tipo de distribución espacial. La forma más común de representar este tipo de teselado es el diagrama de Voronoi.

4.3.1.3. Teselado jerárquico o fractal

Se trata de un teselado muy común en la naturaleza, aunque no en la ingeniería, y suele presentar forma de árbol, forma ramificada. Se trata de una forma básica que se repite a diferentes escalas.

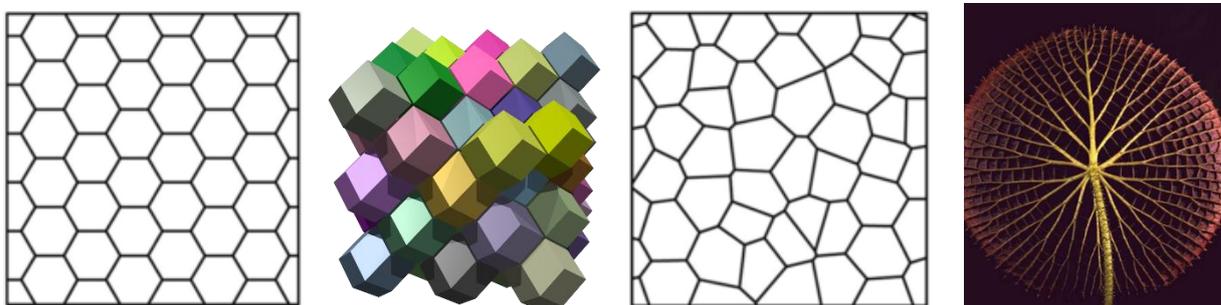


Ilustración 19. Tipos de teselado: Periódico en 2D, periódico en 3D, estocástico y jerárquico. (Fuente: D. Bhate [27])

4.3.2. Elementos

Estos son los elementos físicos que ocuparán el espacio.

4.3.2.1. Elemento tipo viga

Las celdas unitarias están formadas por aristas, cuya sección a su vez puede tomar diferentes formas.

4.3.2.2. Elemento tipo superficie

Las celdas unitarias se pueden formar también con superficies, tanto planas como curvadas. Estas superficies pueden estar optimizadas para gastar el mínimo material posible.

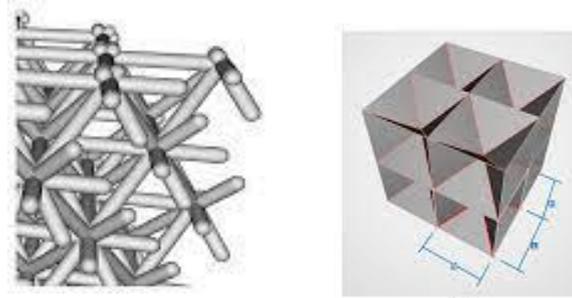


Ilustración 20. Tipos de elementos: Tipo viga y tipo superficie. (Fuente: D. Bhatte [27])

4.3.3. Conectividad

Se trata de la integración entre el teselado y el elemento elegido. En la siguiente imagen se puede observar los diferentes tipos de conectividad para un teselado cúbico con aristas.

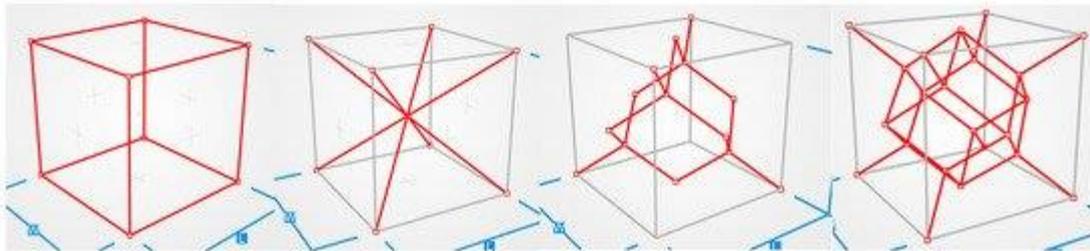


Ilustración 21. Tipos de conectividad. (Fuente: D. Bhatte [27])

4.4. Propiedades generales

Las propiedades de los sólidos celulares dependen de tres características básicas:

- Propiedades del sólido (ρ_s, E_s, σ_{ys}).
- Densidad relativa del sólido celular:
 - o $\frac{\rho^*}{\rho_s} = \frac{\rho_{\text{sólido celular}}}{\rho_{\text{sólido}}} = \text{Fracción volumétrica del sólido}$
- Conectividad, topología y geometría de la celda (factores geométricos):
 - o Forma de la celda: Define la isotropía o anisotropía del sólido
 - o Tamaño de la celda: Se trata de un parámetro que influencia las propiedades térmicas o la relación superficie/volumen del sólido celular, pero no es determinante para las propiedades mecánicas.

4.4.1. Densidad relativa

$$\frac{\rho^*}{\rho_s} = \frac{\rho_{\text{sólido celular}}}{\rho_{\text{sólido}}} = \frac{M_s}{V_T} * \frac{V_s}{M_s} = \frac{V_s}{V_T} = \text{Fracción volumétrica del sólido} = (1 - \text{porosidad})$$

Dependiendo del valor de densidad relativa del sólido, este se puede considerar un sólido celular, un sólido con poros aislados o una transición intermedia. La modelización del sólido dependerá del tipo que sea.

- $\frac{\rho^*}{\rho_s} < 0.3 \rightarrow$ Sólidos celulares.
- $0.3 < \frac{\rho^*}{\rho_s} < 0.8 \rightarrow$ Sólido intermedio.
- $0.8 < \frac{\rho^*}{\rho_s} \rightarrow$ Sólido con poros aislados.

Los valores típicos para la densidad relativa de sólidos celulares son los siguientes:

- Andamios de colágeno $\frac{\rho^*}{\rho_s} = 0.005$
- Espumas de polímeros $0.02 < \frac{\rho^*}{\rho_s} < 0.2$
- Madera blanda $0.15 < \frac{\rho^*}{\rho_s} < 0.4$

4.4.2. Conectividad, topología y geometría de la celda (factores geométricos)

La conectividad entre celdas, la topología y geometría de cada una de ellas, afecta a las propiedades del sólido celular.

4.4.2.1. Conectividad

Estos son los parámetros con los que se describe la conectividad de la mayoría de los sólidos celulares. Considerando que los vértices están conectados por aristas, que a su vez envuelven o rodean las caras, que encierran celdas:

- **Conectividad entre aristas** (z_e): Número de aristas que comparten un mismo vértice. Por ejemplo, para un panel hexagonal, $z_e = 3$, y para un tetrakaidecaedro $z_e = 4$.
- **Conectividad entre caras** (z_f): Número de caras que comparten una misma arista. Por ejemplo, normalmente para una espuma $z_f = 3$.

4.4.2.2. Reglas y leyes topológicas

A continuación, enumeraremos una serie de leyes y reglas que describen la topología de las celdas. Se utilizan tanto para conocer las restricciones o consideraciones a cumplir a la hora de diseñar materiales celulares, como para caracterizar y conocer aquellos materiales aleatorios (como espumas).

4.4.2.2.1 Ley de Euler

Esta ley relaciona el número total de aristas E , vértices V , caras F y celdas C para un gran

conjunto de celdas.

$$2D \rightarrow F - E + V = 1$$

$$3D \rightarrow -C + F - E + V = 1$$

Una conclusión interesante a la que se llega a partir de esta ley es que para una estructura irregular tipo panal con $z_e = 3$ (muy común), el valor promedio de lados por cara es siempre 6. De esta forma, si tenemos un panal con 6 celdas de 5, sabemos que estos se tendrán que compensar con, por ejemplo, 6 celdas de 7. Esto es únicamente válido para conjuntos grandes de celdas. La comprobación de esta afirmación es la siguiente:

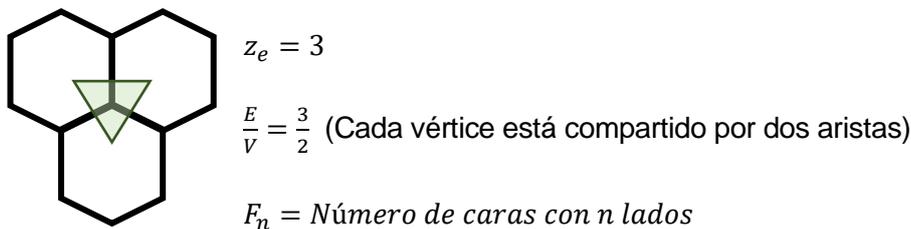


Ilustración 22. Esquema que ilustra la conectividad de los panales. (Fuente: Propia)

Teniendo en cuenta que cada arista está compartida por dos caras:

$$\frac{\sum n \cdot F_n}{2} = E$$

Aplicando la ley de Euler

$$6 - \frac{\sum n \cdot F_n}{F} = \frac{6}{F}$$

Para un gran número de celdas, se puede considerar que $\frac{6}{F} \rightarrow 0$, por lo que

$$\frac{\sum n \cdot F_n}{F} = 6 = \frac{N^\circ \text{ total de lados}}{N^\circ \text{ total de caras}} = 6 = \bar{n} = \text{Número promedio de lados por cara}$$

4.4.2.2.2 Ley de Aboav-Weaire

Esta ley está relacionada con la anterior, y establece lo siguiente:

- Para un panal de $z_e = 3$, la introducción de una celda de 5 caras conlleva la introducción de una de 7.
- Normalmente, las celdas con un mayor número de lados tienen como vecinas celdas con un menor número de lados que la media.

Estas dos afirmaciones fueron observadas por Aboav en una espuma de jabón, y refutadas por

Weaire, que formuló lo siguiente (cierto para celdas 2D):

Si las celdas candidatas tienen n lados, tendrán n vecinas, y el promedio de lados que tendrán estas n vecinas es \bar{m} , tal que:

$$\bar{m} = 5 + \frac{6}{n}$$

4.4.2.2.3 Ecuación de Lewis

Lewis, tras la observación de, entre otras células 2D, células biológicas, observó que el área de una celda varía linealmente con el número de lados. Esta relación es cierta también para panales de Vornoi.

$$\frac{A(n)}{A(\bar{n})} = \frac{n - n_o}{\bar{n} - n_o}$$

Donde:

- $A(n)$: Área de una celda de n lados.
- $A(\bar{n})$: Área de una celda con valor promedio de \bar{n} lados.
- n_o : Se trata de una constante de valor 2.

En 3D se observa esta misma relación lineal, pero entre volumen y número de caras, siendo $f_o = 3$:

$$\frac{V(f)}{V(\bar{f})} = \frac{f - f_o}{\bar{f} - f_o}$$

4.5. Propiedades de panales, espumas y estructuras reticulares

Como ya se ha comentado en los apartados anteriores, a pesar de que se podrían conformar una gran variedad de sólidos celulares, principalmente hay tres tipos de estructuras que se utilizan actualmente en la ingeniería. Profundizaremos en las propiedades mecánicas y el comportamiento ante los esfuerzos de cada una de ellas. Mediante este ejercicio, tendremos en primer lugar las herramientas para predecir el comportamiento de otros sólidos parecidos. Además, podremos compararlos entre ellos, empezando así a tener una idea sobre sus principales diferencias, ventajas y desventajas, lo que nos ayudará a la hora de elegir el material celular idóneo para nuestra aplicación.

- a. **Panales:** Estructuras formadas por un patrón de polígonos regulares extruido en la dirección perpendicular.

- b. **Espumas:** Estructuras estocásticas tridimensionales, que pueden ser de celda abierta o cerrada. Se pueden representar como estructuras reticuladas de baja conectividad, en las que la celda unitaria es un poliedro que puede rellenar el espacio.
- c. **Estructuras celulares reticulares:** Estructuras celulares basadas en aristas unidas rígidamente unas con otras, formando celdas unitarias que se repiten en el espacio.

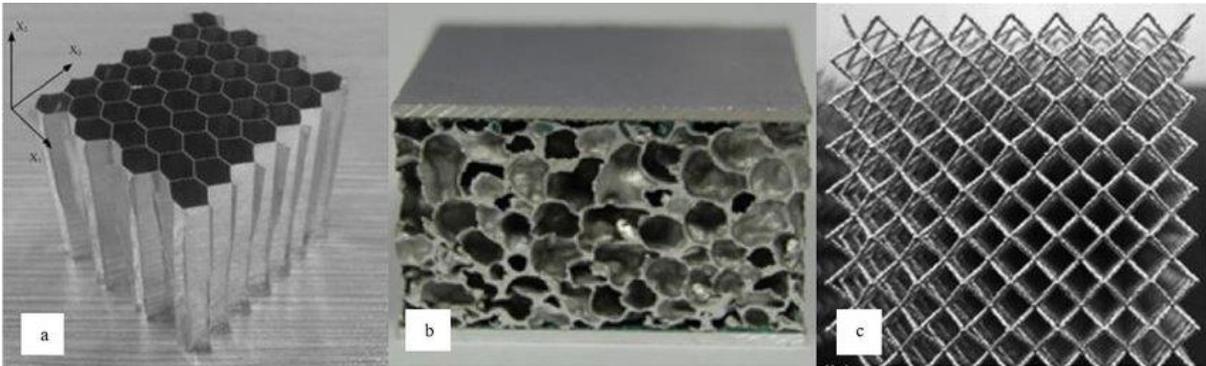


Ilustración 23. Apariencia física de estructuras metálicas de a. Panel; b. Espuma; c. Reticular. (Fuente: M. S. Azmi. [28])

4.5.1. Estructuras dominadas por deformaciones axiales o flexión

M.F. Ashby, en su artículo [29], diferencia entre dos tipos de materiales celulares, según el comportamiento o deformación de sus barras ante un esfuerzo axial a la estructura:

- Estructuras dominadas por deformaciones axiales.
- Estructuras dominadas por flexión.

Sus propiedades mecánicas (rigidez, tensiones máximas, modo de fallo) son consecuencia directa de ello. Por ejemplo, si comparamos una espuma de baja conectividad y densidad relativa del 10%, que se trataría de un tipo de estructura dominada por la flexión, con una estructura reticular triangular con la misma densidad relativa, dominada por deformaciones axiales, esta última tiene una rigidez 10 veces mayor.

De esta forma, a la hora de diseñar, elegir o analizar una estructura celular, es de gran utilidad saber del que tipo es, ya que de esta forma se puede tener una idea aproximada de sus propiedades mecánicas y de sus valores.

Suponiendo que las espumas pueden ser modelizadas como estructuras reticulares, una forma rápida y aproximada de conocer el tipo de deformación que gobierna la estructura es la aplicación del Criterio de Estabilidad de Maxwell. En 1984, Maxwell promulgó una regla algebraica en la que promulga que, para que una estructura reticular compuesta por b barras rígidas y j uniones articuladas esté tanto estática como cinemáticamente definida, tiene que cumplir:

$$M = b - 2j + 3 = 0 \quad (2D)$$

$$M = b - 3j + 6 = 0 \quad (3D)$$

Se trata de una forma de calcular la hiperestaticidad interna de este tipo de estructuras.

De esta forma:

- $M < 0 \rightarrow$ Estructuras dominadas por la flexión. Se trata de estructuras hipostáticas (internamente). La estructura es un mecanismo, ya que hay direcciones en las que permite su desplazamiento y en las que no tiene rigidez. Si convertimos las articulaciones en nudos rígidos (se restringe el giro), como es el caso de las estructuras celulares, las barras se flexionan cuando se aplica una carga a la estructura. Por tanto, la deformación dominante sería la flexión.
- $M = 0 \rightarrow$ Estructuras dominadas por la deformación axial. Se trata de estructuras isostáticas (internamente). Están tanto cinemática como estáticamente determinadas. Cuando se aplica carga sobre estas, los miembros se cargan a tracción o compresión. Si estas articulaciones se convierten en nudos rígidos aparecen momentos flectores, pero despreciables en comparación con los esfuerzos axiales.
- $M > 0 \rightarrow$ La estructura sería estable, pero estáticamente indeterminada (Internamente hiperestática).

Este método tiene una gran utilidad a la hora de predecir de forma rápida el comportamiento de la estructura celular a estudiar. No obstante, tiene una serie de limitaciones que se deben de tener presentes.

- Es solamente válido para predecir el comportamiento frente a esfuerzos axiales.
- Es únicamente aplicable a estructuras basadas en aristas (Estructuras reticulares o espumas).
- El hecho de que se cumpla $M \geq 0$ se trata de una condición necesaria para la garantizar la estabilidad, pero no suficiente. Esto se debe a que no tiene en cuenta la posibilidad de que haya estados de estrés propio s o de mecanismos m . Es por ello que Calladine completó la fórmula de Maxwell:

$$M = b - 3j + 6 = s - m = 0 \quad (3D)$$

Donde s y m pueden obtenerse calculando el rango de la matriz de equilibrio resultante del análisis estructural tal y como describen Calladine y Pellegrino. [30] La estructura solo sería estable estática y cinemáticamente cuando $s = m = 0$.

A pesar de estos puntos, el Criterio de Estabilidad de Maxwell es una buena forma de categorizar de forma rápida si la estructura celular tiene un comportamiento basado en la flexión o deformación axial de sus barras.

Una de las conclusiones de este criterio es que las espumas casi siempre presentan una $M < 0$, y su comportamiento está dominado por la flexión. Es más, no hay poliedro que rellene el espacio

con $M \geq 0$. Sí que se han encontrado combinaciones de poliedros que rellenan el espacio con $M \geq 0$, como la combinación de tetraedros con octaedros.

Las estructuras dominadas por la deformación axial son más rígidas a esfuerzo axial que las dominadas por la flexión. Por ello, si estamos buscando un material celular para una aplicación con altos requerimientos mecánicos y bajo peso, estas primeras son las idóneas. Si, por el contrario, se necesita un elemento capaz de soportar grandes deformaciones, que su función sea la de absorber energía, las dominadas por la flexión son las más indicadas.

En los apartados siguientes analizaremos con más detalle el comportamiento de ambos tipos de estructuras. En primer lugar, para tener una idea general del comportamiento del material, se definirán sus curvas de compresión/deformación y tracción/deformación. Posteriormente, se profundizará en las propiedades mecánicas de retículas, espumas y panales, y finalmente, se comprobará este comportamiento experimentalmente.

La nomenclatura utilizada para diferenciar las propiedades de los sólidos a las de los sólidos celulares será X_s y X^* respectivamente.

4.5.2. Análisis de estructuras dominadas por flexión

4.5.2.1. Curva compresión-deformación

En la siguiente imagen se puede observar la curva de compresión-deformación cuando se somete a un material celular a compresión.

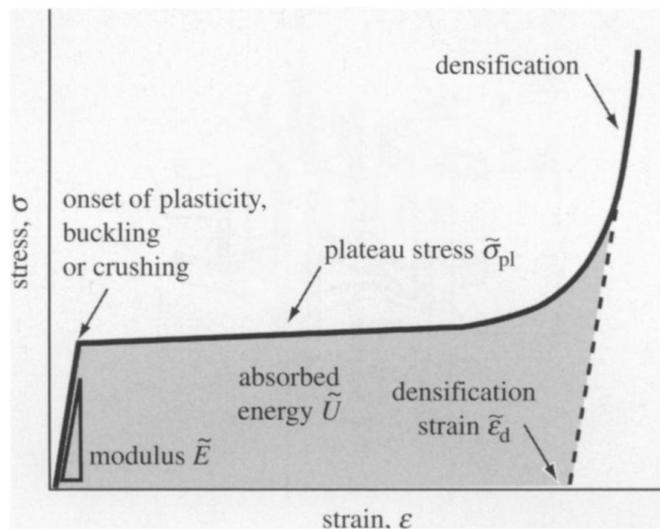


Ilustración 24. Curva de compresión-deformación de una estructura celular dominada por flexión. (Fuente: M. F. Ashby [29])

Se pueden diferenciar tres zonas principales, señaladas en la gráfica:

1. **Linear elástica.** En este régimen, las celdas se están deformando elásticamente. Su comportamiento está definido por el módulo de Young de la estructura celular E^* .
2. **Meseta de presión.** En esta zona sucede el colapso de la estructura. Para una presión casi constante, las deformaciones son elevadas. Hay tres mecanismos de colapso posibles, y dominará aquel con el σ_D^* menor. Esto último depende en gran medida del material del que esté fabricada la estructura.
 - a. **Colapso por pandeo.** Modo de fallo común para los materiales elastómeros.
 - b. **Colapso por deformación plástica.** Modo de fallo común para los materiales plásticos (como metales).
 - c. **Colapso por fractura.** Modo de fallo común para los materiales frágiles (como la cerámica). Esta parte de la curva es muy ruidosa, ya que el colapso va sucediendo pared por pared, consecutivamente.
3. **Densificación.** En este régimen las paredes celulares ya se están tocando, no habiendo casi porosidad. Es necesaria una presión relativamente alta para una deformación relativamente baja.

A continuación, se pueden observar las curvas de compresión-deformación modificadas para cada material o modo de colapso:

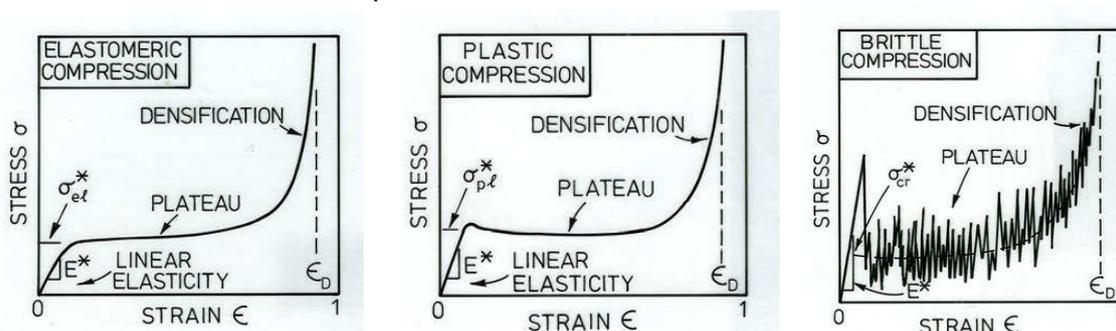


Ilustración 25. Curvas de compresión-deformación de estructuras celulares dominadas por flexión. (Fuente: M. F. Ashby. [23])

4.5.2.2. Curva tracción-deformación

En este caso, se pueden diferenciar dos etapas:

1. **Lineal elástica.** En este régimen, las celdas se están deformando elásticamente. Su comportamiento depende del módulo de Young de la estructura celular E^* .
2. **Fallo.** En esta zona sucede el fallo de la estructura. Hay tres mecanismos de fallo posibles, y dominará aquel con el σ_D^* menor. Esto último depende en gran medida del material del que esté hecha la estructura.
 - a. **Prolongación de la zona elástica.** Modo de fallo común para los materiales elastómeros. No hay pandeo, al no estar aplicando una compresión.

- b. **Fallo por deformación plástica.** Modo de fallo común para los materiales plásticos (como metales). Se observa una pequeña meseta en la que la deformación se incrementa sin apenas un aumento del esfuerzo.
- c. **Fallo por fractura.** Modo de fallo común para los materiales frágiles (como la cerámica). Puede haber una fractura rápida, ocasionada por cualquier defecto de la pieza a tracción. Por ello, se calculará la tenacidad a la fractura.

A continuación, se pueden observar las curvas tensión-deformación modificadas para cada material o modo de colapso:

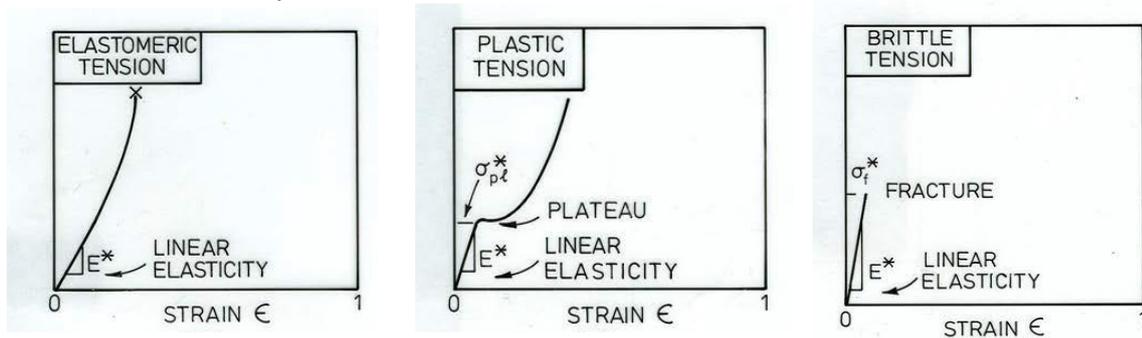


Ilustración 26. Curva de tracción-deformación de estructuras dominadas por flexión. (Fuente: M. F. Ashby. [23])

4.5.3. Análisis de estructuras dominadas por deformaciones axiales

4.5.3.1. Curva compresión-deformación

En la siguiente imagen se puede observar la curva de compresión-deformación cuando se somete al material celular a compresión.

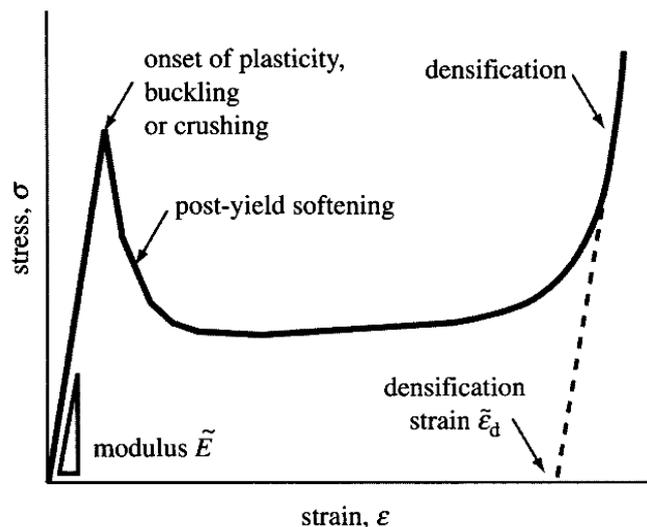


Ilustración 27. Curva de compresión-deformación de estructuras dominadas por la deformación axial. (Fuente: M. F. Ashby [29])

Como se puede observar, este tipo de materiales tiene una curva muy parecida a la de materiales

dominados por la flexión, y también se diferencian claramente las zonas linear elástica, meseta de presión y densificación.

Las principales diferencias son que tanto el módulo elástico como la tensión inicial de colapso son mucho mayores para este tipo de materiales que para los dominados por flexión para la misma densidad relativa. Sin embargo, al llegar a la tensión inicial de colapso, se produce un colapso local por pandeo o fractura que produce un ablandamiento de la estructura, y una discontinuidad en la curva. Es por ello que estas no son las estructuras idóneas para aplicaciones de absorción de energía, ya que lo ideal para este tipo de aplicación es una meseta plana.

4.5.3.2. Curva tracción-deformación

Este tipo de materiales tienen una curva muy parecida a la de las estructuras dominadas por la flexión, siendo las principales diferencias que tanto el módulo elástico como la tensión inicial de fallo son mucho mayores que las de estas últimas.

4.5.4. Panales

El primer sólido celular para analizar en profundidad será la estructura de panal. Esto se debe a que, al tener una geometría fija y definida, es mucho más sencillo deducir las propiedades, relaciones entre ellas, calcular esfuerzos etc. Por ello, en esta primera estructura se mostrarán de forma resumida las deducciones para cada propiedad mecánica, y así presentar las herramientas o la forma de proceder para calcular de forma aproximada las propiedades de casi cualquier sólido celular. En la siguiente imagen se puede observar un panal hexagonal, cuadrado y triangular.

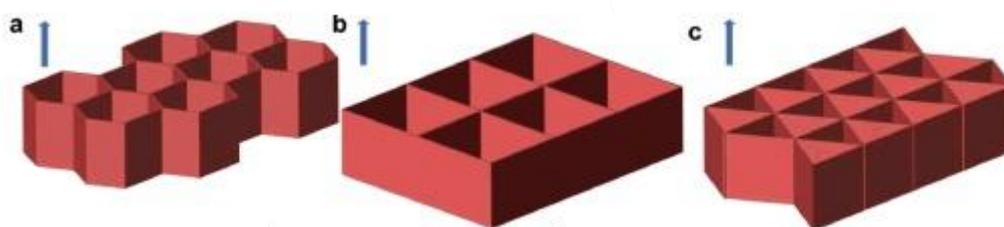


Ilustración 28. Tipos de estructuras de panal (Hexagonal, cuadrado y triangular). (Fuente: S. Iyer [30])

4.5.4.1. Descripción

Son estructuras formadas por un patrón de polígonos regulares extruido en la dirección perpendicular.

La celda unitaria se trata de una forma geométrica 2D (Triángulos, cuadrados y hexágonos), que se une con otras celdas para formar un área. Dependiendo de la forma, las aristas por vértice difieren.

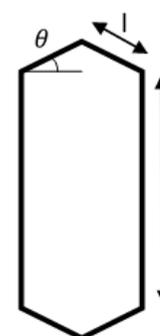


Ilustración 29. Celda unitaria de un panal hexagonal. (Fuente: Propia)

La forma de la celda está definida por la relación entre $\frac{h}{l}$ y θ .

4.5.4.2. Propiedades mecánicas en el plano. Compresión

Para analizar las propiedades mecánicas de los panales, diferenciaremos dos casos o tipos de propiedades: Las propiedades en el plano y las propiedades normales al plano. Si el esfuerzo es en el plano, sus paredes se deformarán por flexión y compresión. Si el esfuerzo es normal al plano, el comportamiento de las paredes estará dominado por la flexión.

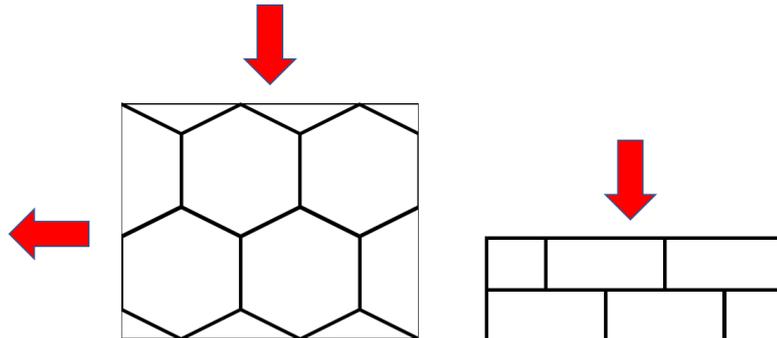


Ilustración 30. Propiedades de panales en el plano y normales al plano. (Fuente: Propia)

Como ya se ha explicado previamente, los panales están formados por celdas prismáticas. Se pueden fabricar de una gran cantidad de materiales, como polímeros, metales y cerámicas, y se pueden utilizar para gran cantidad de aplicaciones, como panales tipo sándwich, como elemento de absorción de energía, catalizadores etc. Se pueden encontrar también en la naturaleza, la madera y el corcho tienen estructuras tipo panal.

Sus mecanismos de deformación y fallo se pueden relacionar con aquellos de otros materiales celulares. La deformación y fallo de un panal hexagonal es extrapolable al de las espumas, y el de un panal triangular a las estructuras reticulares.

4.5.4.2.1 Relación de la curva con t/l

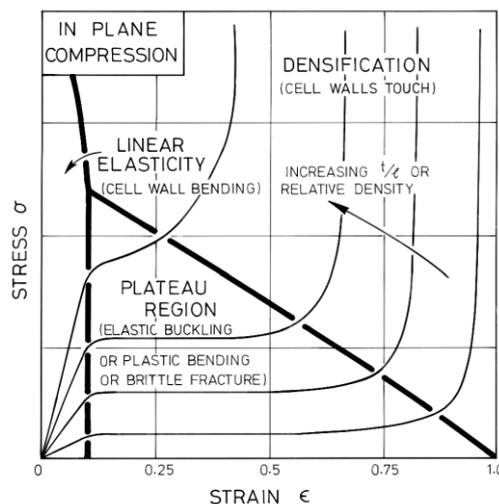


Ilustración 31. Relación de la curva σ/ϵ y t/l . (Fuente: M. F. Ashby. [23])

La curva σ/ε depende de la relación entre el espesor y la longitud de las paredes de las celdas. Cuando aumentamos t/l , rigidizamos la estructura, por lo que aumenta el módulo de Young de la estructura E^* , la tensión a la cual se produce la meseta de presión σ^* y disminuye la deformación a la que ocurre la densificación ε_D , es decir, densifica antes, y su régimen de meseta es menor.

4.5.4.2.2 Variables que afectan a las propiedades mecánicas de los panales

- Densidad relativa ρ^* (también la fracción volumétrica de sólido): La variable más importante. Para panales:

$$\frac{\rho^*}{\rho_s} = \frac{\left(\frac{t}{l}\right) \left(\frac{h}{\rho} + 2\right)}{2 \cos \theta \left(\frac{h}{l} + \sin \theta\right)}$$

h/l se trata de un parámetro que depende directamente de la geometría de la celda. Por ejemplo, en el caso de un panel de celdas hexagonales regulares, $h/l = 1$ y $\theta = 30^\circ$, por lo que $\frac{\rho^*}{\rho_s} = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{t}{l}$, variando la densidad relativa linealmente con t/l .

- Propiedades del sólido que conforma la estructura celular. El módulo de Young E_s , el límite elástico σ_{ys} , la tensión de rotura σ_{us} o la tensión de fractura σ_{fs} son algunos de ellos.
- Geometría de la celda $\left(\frac{h}{l}, \theta\right)$.

4.5.4.2.3 Simplificaciones

A la hora de caracterizar el comportamiento mecánico de las celdas, se llevan a cabo una serie de simplificaciones, que son las siguientes:

- Cuando la relación entre t/l es un valor pequeño, se pueden despreciar las deformaciones axial y cortante. Esto se debe a que en dicho caso la longitud es mucho mayor al espesor, es decir, las paredes son muy finas. En este tipo de paredes, al aplicárseles carga, la deformación predominante es la debida al momento flector, siendo las deformaciones producidas por el esfuerzo axial y cortante pequeñas y por tanto despreciables. Cuanto más fina es la pared de la celda, menores son estas dos últimas deformaciones.
- Las deformaciones son lo suficientemente pequeñas como para negligir cualquier cambio de geometría durante la deformación.
- La pared celular es lineal, elástica e isotrópica.

4.5.4.2.4 Simetría

Para obtener el módulo elástico se utiliza la Ley de Hooke, en la que se establece que el comportamiento elástico de un material depende de una serie de constantes independientes.

Dicho número de constantes depende a su vez de la simetría del sistema.

Un panel se trata de una estructura ortotrópa, ya que es simétrica respecto a tres ejes perpendiculares entre sí.

4.5.4.2.5 Zona elástica

La ley de Hooke establece que:

$$\varepsilon_z = \frac{\sigma_z}{E} \quad \varepsilon_x = -\nu\varepsilon_z \quad \varepsilon_y = -\nu\varepsilon_z$$

Siendo la Ley de Hooke generalizada:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \frac{\gamma_{xy}}{2} \\ \frac{\gamma_{xz}}{2} \\ \frac{\gamma_{yz}}{2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & \frac{-\nu_{yx}}{E_y} & \frac{-\nu_{zx}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{xy}}{E_x} & \frac{1}{E_y} & \frac{-\nu_{zy}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{xz}}{E_x} & \frac{-\nu_{yz}}{E_y} & \frac{1}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xz}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{yz}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \end{bmatrix}$$

Donde, para cumplir con la simetría de la matriz:

$$\frac{\nu_{xy}}{E_x} = \frac{\nu_{yx}}{E_y} \quad \frac{\nu_{yz}}{E_y} = \frac{\nu_{zy}}{E_z} \quad \frac{\nu_{xz}}{E_x} = \frac{\nu_{zx}}{E_z}$$

En el plano x, y hay cuatro constantes elásticas independientes: $E_x, E_y, \nu_{xy}, G_{xy}$. ν_{yx} no es independiente, dado que:

$$\frac{\nu_{xy}}{E_x} = \frac{\nu_{yx}}{E_y} \quad \nu_{xy} = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x}$$

4.5.4.2.5.1 Módulo de Young

Al aplicar carga en dirección x a las celdas, las paredes inclinadas se someten a flexión, deformándose en consecuencia. Para obtener el módulo de Young, se ha de obtener la relación entre la deformación y la carga en la celda.

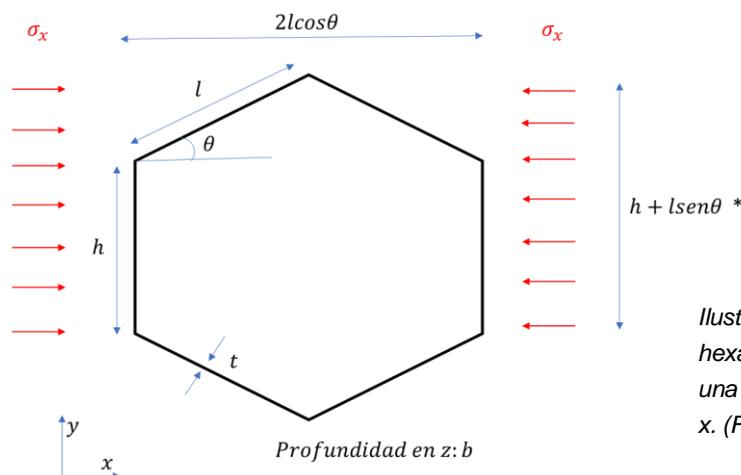


Ilustración 32. Panal hexagonal sometido a una carga de dirección x . (Fuente: Propia)

(*) Se considera esta la altura de la celda, ya que realmente, en y , las aristas inclinadas están compartidas con otra celda.

A la hora estudiar la elasticidad en el plano x, y , la z se cancelará en las ecuaciones, al ser todo uniforme en esta dirección.

Calculando la deformación ϵ_x de la celda y la P aplicada a sus nodos:

$$\sigma_x = \frac{P}{(h+l\sin\theta)*b}$$

$$\epsilon_x = \frac{\Delta L_x}{L_x} = \frac{\delta \sin\theta}{2l \cos\theta}$$

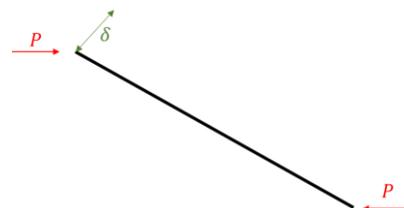


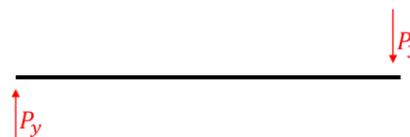
Ilustración 33. Esfuerzos sobre la arista inclinada de un panal hexagonal. (Fuente: Propia)

Teniendo en cuenta que por celda se deforman dos aristas (con una deformación del mismo valor y dirección contraria):

$$\epsilon_{x\text{total}} = \epsilon_x * 2 = \frac{\delta \sin\theta}{l \cos\theta}$$

Para obtener el valor de δ para cada arista, se utilizan las ecuaciones de flecha de un voladizo. Esto se debe a que se puede aproximar el comportamiento y deformación de una arista del panal a dos voladizos con un punto fijo central, de tal forma que:

La flecha para un voladizo es $\frac{FL^3}{3EI}$.



Por lo cual, considerando que una arista del panal está conformada por dos voladizos:

Ilustración 34. Fuerzas perpendiculares a la arista inclinada de un panal hexagonal. (Fuente: Propia)

$$\delta = 2 * \frac{P \cdot \sin\theta \cdot \left(\frac{l}{2}\right)^3}{3 \cdot E_s \cdot I}$$

Combinando las ecuaciones, obtenemos el módulo elástico en la dirección x .

$$E_x^* = E_s \left(\frac{t}{l}\right)^3 \cdot \frac{\cos\theta}{\left(\frac{h}{l} + \sin\theta\right) \sin^2 \theta}$$

En esta ecuación se puede observar lo que se comentó en los apartados anteriores, que las propiedades mecánicas de la estructura dependen de tres aspectos de esta:

$$E_x^* = \boxed{E_s \left(\frac{t}{l}\right)^3 \cdot \frac{\cos\theta}{\left(\frac{h}{l} + \sin\theta\right) \sin^2 \theta}}$$

1 2 3

1. Propiedades del sólido.
2. La densidad relativa (al cubo).
3. La geometría de la celda.

4.5.4.2.5.2 Ratio de Poisson

$$v_{xy}^* = -\frac{\epsilon_y}{\epsilon_x}$$

Siendo

- $\epsilon_x = \frac{\delta_x}{L_x} = \frac{\delta \sin\theta}{L \cos\theta}$ (-) Tiene signo negativo ya que, cuando se aplica la fuerza contra la celda, la arista se empequeñece en esta dirección.
- $\epsilon_y = \frac{\delta_y}{L_y} = \frac{\delta \cos\theta}{L \sin\theta + h}$ (+) Tiene signo positivo ya que, cuando se aplica la fuerza contra la celda, la arista se alarga en esta dirección.

$$v_{xy}^* = -\frac{\epsilon_y}{\epsilon_x} = \frac{\cos^2 \theta}{\left(\frac{h}{l} + \sin\theta\right) \cdot \sin\theta}$$

Como se puede observar en la ecuación, el ratio de Poisson solamente depende de la geometría de la celda.

Para las celdas hexagonales, su valor es de 1. Este se trata de un valor muy alto, normalmente suele estar alrededor de los 0.3. El ratio de Poisson puede ser también 0 o negativo. Cuando



esto ocurre, el material se denomina augénico.

Las otras constantes que describirían el comportamiento de los panales, como E_y^* y G_{xy}^* , se pueden obtener de una forma parecida.

4.5.4.2.6 Meseta de presión

Diferenciaremos los mecanismos de colapso para las dos direcciones de carga posibles:

- Dirección x :
 - Colapso por pandeo: No se dará lugar, ya que no hay aristas en dirección x .
 - Colapso por deformación plástica: Definido por la tensión inicial de colapso $\sigma_{pl\ x}^*$.
 - Colapso frágil: Definido por la tenacidad de fractura K_{IC}^* .
- Dirección y :
 - Colapso por pandeo: Definido por la tensión inicial de colapso $\sigma_{el\ y}^*$.
 - Colapso por deformación plástica: Definido por la tensión inicial de colapso $\sigma_{pl\ y}^*$.
 - Colapso frágil: Definido por la tenacidad de fractura K_{IC}^* .

4.5.4.2.6.1 Colapso por pandeo

Como acabamos de comentar, en los panales hechos de un elastómero, el colapso de las celdas si la carga (a compresión) tiene dirección y se debe al pandeo. Cuando se aplica la carga, en un principio el comportamiento será lineal elástico, hasta que la carga aplicada es lo suficientemente grande como para que las paredes comienzan a pandear.

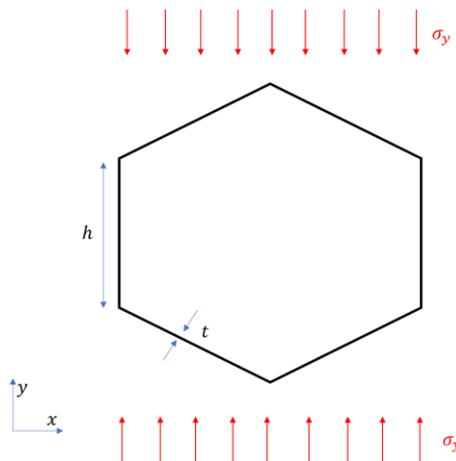


Ilustración 35. Panal hexagonal sometido a una carga de dirección y . (Fuente: Propia)

Para obtener esta carga a la que comienza el pandeo, a la que denominaremos $\sigma_{el\ y}^*$, se la puede relacionar con la carga crítica de pandeo de Euler. La carga de pandeo de Euler, para un pilar vinculado en dos extremos, es $P_{CR} = \frac{\pi^2 E_s I}{(KL)^2}$

La K es una constante que depende del tipo de unión de los extremos del pilar. En el caso de los panales, se puede afirmar que la unión tiene una rigidez rotacional que depende de la rigidez del miembro vertical y de los inclinados adyacentes.

Tras realizar este ejercicio, se ha calculado lo siguiente:

Tabla 2. Constante de pandeo de las aristas de un panal hexagonal.

h/l	1	2	3
k	1/0.686	1/0.76	1/0.806

Por lo que:

$$\sigma_{el y}^* = \frac{P_{CR}}{A} = \frac{\pi^2}{K^2 24} * E_s * \frac{\left(\frac{t}{l}\right)^3}{\left(\frac{h}{l}\right)^2 \cdot \cos\theta}$$

Donde $\sigma_{el y}^*$ depende de:

1. Propiedades del sólido.
2. La densidad relativa (al cubo).
3. La geometría de la celda.

Para panales regulares, calculando la parte geométrica de $\sigma_{el y}^*$, y utilizando la fórmula de E^* obtenida en el apartado anterior:

$$\varepsilon_{el y}^* = \frac{\sigma_{el y}^*}{E_y^*} = \frac{0.22 * E_s * \left(\frac{t}{l}\right)^3}{2.31 * E_s * \left(\frac{t}{l}\right)^3} \sim 0.1$$

Este resultado muestra que la deformación a la que sucede el pandeo es un 10% para los panales regulares, independientemente del material y la densidad relativa.

4.5.4.2.6.2 Colapso por deformación plástica

Cuando se carga el panal:

1. Inicialmente las paredes de las celdas comienzan a deformarse elásticamente.
2. Siguen deformándose hasta llegar al límite elástico σ_{ys} . El estrés máximo aparece primero en las partes superior e inferior de cada pared celular.
3. Si se sigue aplicando carga, la parte central de la celda llega también al límite elástico, deformándose plásticamente toda la sección.

4. Se forman bisagras plásticas, que simplemente rotan al aplicarles carga. Aparecen inicialmente en las uniones entre miembros, al ser los puntos con mayor estrés.

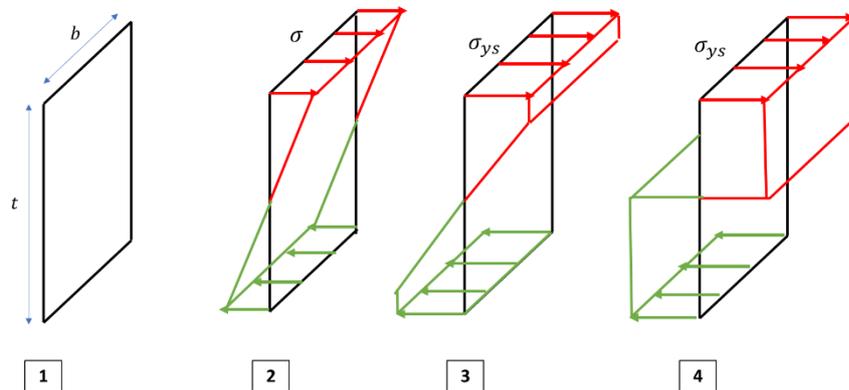


Ilustración 36. Fases del colapso por deformación plástica de un panal. (Fuente: Propia)

Se puede deducir el σ al que ocurre este colapso calculando el momento que está asociado a la formación de la bisagra plástica y equipararlo con el momento aplicado (y la tensión aplicada).

De esta forma, la tensión de colapso plástico de un panal es:

$$\sigma_{plx}^* = \sigma_{ys} * \left(\frac{t}{l}\right)^2 * \frac{1}{2\left(\frac{h}{l} + \sin\theta\right) \sin\theta}$$

$$\sigma_{ply}^* = \sigma_{ys} * \left(\frac{t}{l}\right)^2 * \frac{1}{2 \cos^2 \theta}$$

Donde $\sigma_{plx,y}^*$ depende de:

1. Propiedades del sólido.
2. La densidad relativa (al cubo).
3. La geometría de la celda.

4.5.4.2.6.3 Mecanismo de colapso predominante

Como ya hemos comentado anteriormente, el mecanismo de colapso que ocurra primero será el que marque el colapso de la estructura. En el caso de un esfuerzo en la dirección y , se puede obtener una $\frac{t}{l}$ crítica que marque si el colapso será por pandeo o por deformación plástica.

Igualando las dos tensiones iniciales de colapso:

$$\sigma_{ely}^* = \sigma_{ply}^*$$

$$\frac{\pi^2}{K^2 24} * E_S * \frac{\left(\frac{t}{l}\right)^3}{\left(\frac{h}{l}\right)^2 \cdot \cos\theta} = \sigma_{ys} * \left(\frac{t}{l}\right)^2 * \frac{1}{2 \cos^2 \theta}$$

$$\left(\frac{t}{l}\right)_{critical} = \frac{K^2 12}{\pi^2} * \frac{\left(\frac{h}{l}\right)^2}{\cos\theta} * \frac{\sigma_{ys}}{E_S}$$

La relación entre $\frac{t}{l}$ será la que defina cual será el método de colapso que ocurra primero

- Si $\frac{t}{l} < \left(\frac{t}{l}\right)_{critical}$ → Ocurrirá primero el pandeo.
- Si $\frac{t}{l} > \left(\frac{t}{l}\right)_{critical}$ → Ocurrirá primero la deformación plástica.

Para un panel hexagonal, $\left(\frac{t}{l}\right)_{critical} = 3 * \sigma_{ys}/E_S$, una expresión totalmente dependiente del material de la estructura.

- Si el panel fuese metálico: $\left(\frac{t}{l}\right)_{critical} = 3 * \sigma_{ys}/E_S = 3 * 0.002 = 0.006 \rightarrow 0.6\%$: La mayoría de los paneles tienen una densidad mayor de 0.6%, por lo que, en el caso de ser metálicos, deformarían plásticamente antes de pandear.
- Si el panel fuese hecho por un elastómero: $\left(\frac{t}{l}\right)_{critical} = 3 * \sigma_{ys}/E_S = 3 * 0.04 = 0.12 \rightarrow 12\%$: La mayoría de los paneles hechos de elastómero y de baja densidad sufrirán pandeo antes de deformarse plásticamente como se describió en los apartados anteriores.

4.5.4.2.6.4 Colapso por rotura frágil

El tercer mecanismo de colapso es el de rotura frágil. Este se dará en los paneles de materiales frágiles, como la cerámica. El proceso de colapso es el siguiente:

1. En primer lugar, las celdas se deforman elásticamente.
2. Cuando llegan a la tensión de ruptura del material los miembros comienzan a fracturarse.

Esta tensión de fractura depende del momento de fractura, y, para una carga de dirección x , es:

$$\sigma_{cr x}^* = \sigma_{fs} \left(\frac{t}{l}\right)^2 * \frac{1}{3 \left(\frac{h}{l} + \sin\theta\right) \sin\theta}$$

4.5.4.3. Propiedades mecánicas en el plano. Tracción

Como se comentó en el apartado 4.5.2.2, el único valor que habría que obtener y que difiere sustancialmente con los valores de la curva compresión-deformación es el de tenacidad de

fractura, ya que uno de los modos de fallo podría ser el de fractura rápida, ocasionada por algún defecto en la pieza.

Para calcular la tenacidad de la fractura, se llevarán a cabo una serie de suposiciones:

1. Existencia de una grieta suficientemente grande respecto al tamaño de una celda, que afecta a varias de ellas.
2. La deformación producida en el miembro se debe a la flexión (deformación axial despreciable).
3. Se realizan los cálculos respecto a una de las paredes deformadas de la celda.
4. Un módulo de ruptura constante para la pared celular.

$$K_{IC}^* = cte * \sigma_{fs} \left(\frac{t}{l}\right)^2 \sqrt{\frac{l}{c}}$$

Como se puede observar, este valor depende del tamaño de la celda.

4.5.4.4. Paneles triangulares

En los cálculos superiores se han supuesto los paneles como estructuras dominadas por flexión. No obstante, hay un tipo de paneles, los triangulares, que son estructuras dominadas por las deformaciones axiales. Es por ello por lo que su comportamiento en un plano es paralelo al de una estructura reticular en 3D.

Obteniendo el módulo de Young de forma aproximada:

$$\left. \begin{array}{l} \sigma \propto \frac{P}{l * b} \\ \varepsilon \propto \frac{\delta}{l} \\ \delta \propto \frac{Pl}{E_s bt} \end{array} \right\} E \propto \frac{\sigma}{\varepsilon} \propto \frac{P}{lb} \frac{l}{\delta} \propto \frac{P E_s bt}{b P} = cte * E_s \frac{t}{l}$$

Para triángulos equiláteros, el valor de la constante, que está relacionada con la geometría de la celda, es de 1.15.

Se puede observar que el módulo elástico de los paneles triangulares está en función de t/l , no de $(t/l)^3$. Esto se debe a que a que las deformaciones principales son axiales, no hay deformación por flexión. Debido a esto, los paneles triangulares son mucho más rígidos.

4.5.4.5. Propiedades mecánicas normales al plano. Compresión

4.5.4.5.1 Zona elástica

Los materiales ortótropos, como es el caso de los panales, tienen 9 constantes elásticas (4 en el plano, ya obtenidas en los apartados anteriores, y 5 fuera del plano).

En esta dirección, los panales son mucho más rígidos, ya que las celdas ya no se flexionan, sino que se expanden o contraen.

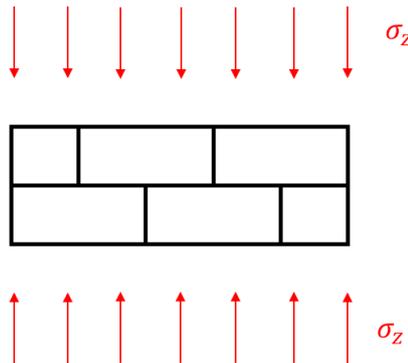


Ilustración 37. Panal hexagonal sometido a una carga de dirección normal al plano (z). (Fuente: Propia)

4.5.4.5.1.1 Módulo de Young

El módulo de Young E_z^x se obtiene de una forma mucho más sencilla, ya que depende de E_s del sólido y la fracción de área que hay en el plano x, y , perpendicular a la carga.

$$E_z^x = E_s \frac{\rho^*}{\rho_s} = E_s * \frac{t}{l} * \frac{\frac{h}{l} + 2}{2 \left(\frac{h}{l} + \sin\theta \right) \cos\theta}$$

Se puede observar la gran anisotropía que tiene una estructura de panal:

- a. El módulo de Young en la dirección x, y es proporcional a $\left(\frac{t}{l}\right)^3$
- b. El módulo de Young en la dirección z es proporcional a $\frac{t}{l}$

Por lo que, para un $\frac{t}{l} = 0.1$, $E_z^* = 0.1$ y $E_{x,y}^* = 0.001$

4.5.4.5.1.2 Ratio de Poisson

Para una carga en z , las paredes celulares se estirarán o contraerán en la dirección x, y un valor $v_s * \varepsilon_z$. Esto significa que:

$$v_{zx}^* = v_{zy}^* = v_s$$

Para obtener v_{xz}^* y v_{yz}^* , se aplican las relaciones de simetría de la matriz de rigidez:

$$\frac{v_{yz}^*}{E_y^*} = \frac{v_{zy}^*}{E_z^*} \quad \frac{v_{xz}^*}{E_x^*} = \frac{v_{zx}^*}{E_z^*}$$

De esta forma:

$$(v_{xz}^*) = (v_{zx}^*) \frac{E_x^*}{E_z^*} = v_s \frac{c_1 E_s \left(\frac{t}{l}\right)^3}{c_2 E_s \left(\frac{t}{l}\right)}$$

$$(v_{yz}^*) = (v_{zy}^*) \frac{E_y^*}{E_z^*} = v_s \frac{c_1 E_s \left(\frac{t}{l}\right)^3}{c_2 E_s \left(\frac{t}{l}\right)}$$

Ambos valores v_{xz}^* y $v_{yz}^* \sim 0$ para t/l pequeños.

4.5.4.5.1.3 Módulo a cortante

Las paredes celulares están sometidas a cortantes, pero están constreñidas por las paredes colindantes, estando sometidas de esta forma a esfuerzos no uniformes.

$$G_{xz}^* = G_s \left(\frac{t}{l}\right) \frac{h \cos\theta}{l + \sin\theta}$$

Se puede observar también la dependencia lineal a $\frac{t}{l}$.

4.5.4.5.2 Meseta de presión

4.5.4.5.2.1 Colapso por pandeo

Principalmente para las estructuras hechas por materiales elastómeros, si las paredes son suficientemente altas, pandearán.

La ley de Euler para placas es:

$$P_{cr} = \frac{KE_s t^3}{(1 - \nu_s^2)h}$$

Donde K es un factor que depende de la rigidez de las paredes adyacentes. Mediante estudios, se ha obtenido un valor de $K = 4$

De esta forma:

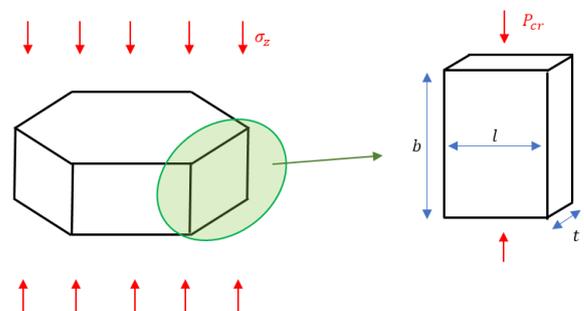


Ilustración 38. Pared de un panal hexagonal sometida a pandeo. (Fuente: Propia)

$$\sigma_{elz}^* \sim \frac{E_s}{1 - \nu_s^2} * \left(\frac{t}{l}\right)^3 * \frac{2\left(\frac{l}{h} + 2\right)}{\left(\frac{h}{l} + \sin\theta\right) \cos\theta}$$

Si comparamos σ_{elz}^* con σ_{ely}^* , cogiendo de referencia los panales hexagonales regulares, podemos observar que es mucho más fácil pandear en la dirección y que en la z . ($\sigma_{elz}^* = 5.2E_s \left(\frac{t}{l}\right)^3$ y $\sigma_{ely}^* = 0.22E_s \left(\frac{t}{l}\right)^3$).

4.5.4.5.3 Colapso por pandeo plástico

Para panales metálicos, si el panel es lo suficientemente denso, su modo de fallo será la deformación axial:

$$\sigma_{plz}^* = \sigma_{ys} \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right).$$

No obstante, normalmente los panales tienen paredes finas, por lo que fallan al pandear en la zona plástica. Esto consiste en lo siguiente:

1. En un principio, las paredes están verticales.
2. Al aplicar una carga de compresión, la pared comienza a pandear.
3. Se forma una bisagra plástica en la zona de mayores esfuerzos,
4. Las partes de pared rotan en torno a esta bisagra.

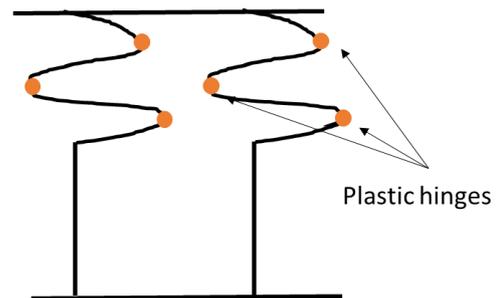


Ilustración 39. Colapso por pandeo plástico de las paredes de un panel. (Fuente: Propia)

La obtención del valor de σ_{plz}^* se trata de un proceso complicado, dado que el comportamiento de cada celda depende de las celdas colindantes.

Con la siguiente ecuación se puede obtener un valor aproximado de la tensión a la que comienza el pandeo plástico;

$$\sigma_{plz}^* \sim \frac{\pi}{4} \sigma_{ys} \left(\frac{t}{l}\right)^2 \frac{\frac{h}{l} + 2}{\left(\frac{h}{l} + \sin\theta\right) \cos\theta}$$

Para los hexágonos regulares, se ha obtenido experimentalmente el valor exacto, que es:

$$\sigma_{plz}^* = 5.6 \sigma_{ys} \left(\frac{t}{l}\right)^{\frac{5}{3}}$$

4.5.4.5.4 Colapso por rotura frágil



En este caso, el valor de σ_{CRZ}^* es proporcional a la tensión de compresión del sólido:

$$\sigma_{cr}^* = \frac{\rho^*}{\rho_s} \sigma_{cs} \sim 12 \frac{\rho^*}{\rho_s} \sigma_{fs}$$

(Esta última aproximación es solamente válida para materiales frágiles).

4.5.4.6. Propiedades mecánicas normales al plano. Tracción

Como en el caso de las propiedades mecánicas en el plano, se ha de obtener la tenacidad de fractura.

En el caso de que el panal esté libre de defectos, las paredes están sometidas a un esfuerzo uniaxial.

$$\sigma_{fz}^* = \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right) \sigma_{fs}$$

Si las celdas tienen algún defecto, y la grieta tiene una longitud mayor a la celda, además de que se propaga en una dirección normal a z.

$$K_{IC}^* = \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right) * K_{ICS}$$

Donde $K_{ICS} = \sqrt{E_S * G_{cs}}$

4.5.5. Espumas

A continuación, se profundizará en las estructuras de las espumas. Se hará una breve descripción, y se obtendrán las propiedades mecánicas que definen el comportamiento de la estructura en cada parte de la curva de tensión-deformación.

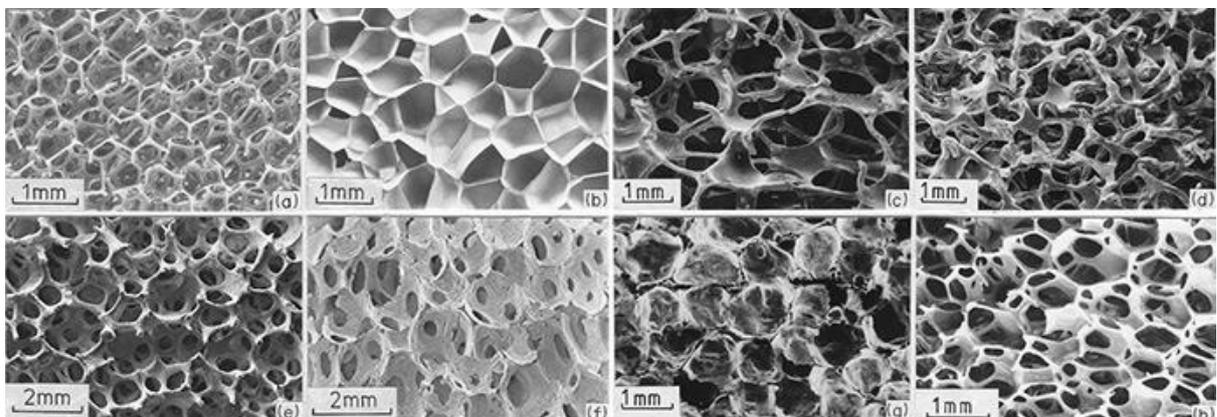


Ilustración 40. Diferentes tipos de espumas: (a) Poliuretano, de celda abierta; (b) Polietileno, de celda cerrada; (c) Níquel; (d) Cobre; (e) Zirconia; (f) Mullita; (g) Vidrio; (h) (Fuente: M. F. Ashby. [23]).

4.5.5.1. Descripción

Las espumas son estructuras estocásticas tridimensionales, que pueden ser de celda abierta o cerrada. Se obtendrán las propiedades mecánicas de ambas. Como ya se ha comentado, son estructuras dominadas por la flexión.

La celda unitaria utilizada para modelizar espumas se trata de una figura geométrica tridimensional formada por caras poligonales planas (poliedro). Se trata de una aproximación poco realista físicamente.

Los poliedros más utilizados en la modelización son los rombododecaedros y tetrakaidecaedros. Esto se debe a que uno de los métodos de fabricación de las espumas es la inyección de gas en un líquido, siendo la tensión superficial un parámetro clave en la definición de la geometría de las celdas. Si esta es isotrópica, se formarán geometrías que minimicen el área superficial por unidad de volumen, es decir, tetrakaidecaedros.

En cuanto al teselado, se puede considerar un teselado estocástico o de Voronoi. En el proceso de fabricación de espumas, al inyectar gas en el líquido y reducir la presión, se forman burbujas esféricas que crecen hasta intersecarse con otras, formando celdas poliédricas. Si se considera el caso ideal en el que todas las burbujas se nuclean de forma aleatoria en el espacio a la misma vez se obtendrían espumas(3D) o panales (2D) con distribuciones de Voronoi.

Para la caracterización y análisis de las espumas, es de gran utilidad saber la medida de las celdas, ya que la geometría es una de las variables de las dependen las propiedades mecánicas, térmicas etc. Para las espumas, la medición de las celdas se trata de un proceso complejo, que se denomina longitud media de intersección (en inglés, Mean Intercept Length). Se trata de un método que se utiliza comúnmente en el campo de los materiales para caracterizar el tamaño de grano de materiales, su orientación y su anisotropía. Si lo llevamos al campo de las espumas, la metodología que se lleva a cabo es la misma, pudiendo caracterizar de esta forma el tamaño, orientación y anisotropía de las espumas.

El proceso llevado a cabo es el siguiente:

1. Se considera una sección de área circular, en la que se aplicará el método.
2. Se dibujan una serie de líneas paralelas con una distancia fija entre ellas.
3. Se cuenta el número de intersecciones entre estas líneas y las celdas, obteniendo N_c (número de celdas por unidad de longitud de la línea).
4. Se calcula la longitud de intersección para la orientación elegida.

$$L(\theta = 0^\circ) = \frac{1.5}{N_c}$$

En el caso de que estuviésemos hablando de celdas bidimensionales, L es el inverso

de N_c . Sin embargo, dado que estamos hablando de celdas tridimensionales, se ha determinado experimentalmente un factor de relación de 1.5.

5. Se repite este mismo proceso para diferentes incrementos de θ . (Ej: 5°, 10°, 15° etc.)
6. Se dibuja un gráfico polar, representando la longitud de intersección en función de θ .
7. Se ajusta una elipse (o un elipsoide si se ha realizado todo este proceso en 3D) en la gráfica polar.
8. Los ejes principales del elipsoide serán las dimensiones principales de las celdas.
9. La orientación de la elipse/del elipsoide será la orientación de las celdas.
10. Obteniendo la ecuación del elipsoide y representando los coeficientes de forma matricial, si D, E, F son nulos, A, B, C son las principales dimensiones de la celda.

$$Ax_1^2 + Bx_2^2 + Cx_3^2 + 2Dx_1x_2 + 2Ex_1x_3 + 2Fx_2x_3 \rightarrow M = \begin{matrix} A & D & E \\ D & B & F \\ E & F & C \end{matrix}$$

4.5.5.2. Propiedades mecánicas. Compresión

En este apartado se presentarán varias ecuaciones que representan el comportamiento mecánico de las espumas. Todas ellas serán aproximaciones, ya que para obtener la ecuación exacta habría que modelizar la geometría exacta de las espumas.

Modelizaremos una celda de espuma como una celda cúbica, con aristas de longitud l y sección t^2 , estando todas las aristas separadas unas de otras.

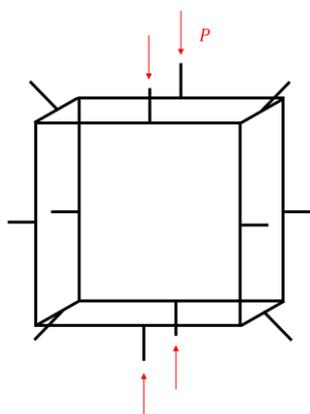


Ilustración 41. Modelo de una espuma. (Fuente: Propia)

$$\frac{\rho^*}{\rho_s} \sim \frac{V_s}{V_T} \sim \frac{t^2 l}{l^3} \sim \left(\frac{t}{l}\right)^2$$

En este parámetro vemos una diferencia significativa con los panales.

- Para las espumas $\frac{\rho^*}{\rho_s} \sim \left(\frac{t}{l}\right)^2$
- Para los panales $\frac{\rho^*}{\rho_s} \sim \left(\frac{t}{l}\right)$

Para las demás propiedades, las espumas presentan las siguientes relaciones:

$$I \sim t^4 \quad \sigma \sim \frac{F}{l^2} \quad \varepsilon \sim \frac{\delta}{l} \quad \delta \sim \frac{Fl^3}{E_s I}$$

4.5.5.2.1 Zona elástica. Espumas de Celda Abierta

El comportamiento elástico lineal inicial es debido a la deformación elástica de las paredes

celulares.

- Si los valores de t/l son pequeños, los esfuerzos de flexión son los que dominarán el comportamiento de la espuma.
- Si los valores de t/l aumentan, la deformación axial comenzará a ganar importancia.

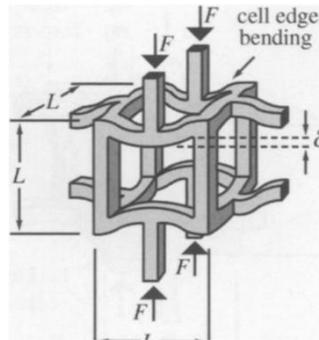


Ilustración 42. Deformación elástica de una espuma. (Fuente: M. F. Ashby. [29])

4.5.5.2.1.1 Módulo de Young

$$E^* \sim \frac{\sigma}{\epsilon} \sim \frac{Fl}{l^2\delta} \sim \frac{FE_s t^4 l}{l^2 F l^3} \sim \frac{E_s t^4}{l^4} \sim E_s \left(\frac{t}{l}\right)^4 \sim E_s \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^2$$

$$E^* = c_1 E_s \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^2$$

El módulo de Young, depende de:

- Las propiedades del sólido.
- La densidad relativa.
- Factores geométricos, recogidos en la constante c_1 . Se han hecho una serie de estudios para los tetrakaidecahedros, para los cuales se ha obtenido un valor $c_1 \sim 0.98$.

Podemos observar la gran similitud que tiene esta ecuación a la que describe el módulo de Young de los panales.

4.5.5.2.1.2 Módulo Cortante

$$G^* = c_2 E_s \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^2$$

Dependiendo c_2 de las características geométricas de la espuma.

Si la espuma es del tipo isotrópico, $\nu^* = 1/3$, por lo que $c_2 = 3/8$. Esto se debe a que, cuando

hay isotropía, $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$.

4.5.5.2.1.3 *Ratio de Poisson*

Para espumas isotrópicas podemos utilizar la misma relación que en el apartado anterior:

$$\nu^* = \frac{E^*}{2G^*} - 1 = \frac{c_1}{2c_2} - 1 = cte$$

Esta constante es independiente del material del que esté hecha la espuma, o de su densidad relativa. Depende únicamente de la geometría de la espuma, tal y como ocurre también en las estructuras de panal.

Esta dependencia única a la geometría puede llevar a, por ejemplo, espumas de ratio de poisson negativo, que se conseguiría invirtiendo los ángulos de sus celdas.

4.5.5.2.2 Zona elástica. Espumas de Celda Cerrada

Para analizar el comportamiento mecánico de las espumas de celda cerrada, debemos de tener en cuenta que el espesor de las aristas no será el mismo que el de las caras, siendo normalmente este último menor. Esto se debe a que, en el proceso de fabricación de las espumas, la tensión superficial lleva a la materia a acumularse en más cantidad en las aristas.

En las espumas de celda cerrada, se observan dos tipos de deformación linear elástica: Deformación de las aristas (como en las de celda abierta) y deformación o estiramiento de las caras. Además, se produce una compresión del gas del interior.

4.5.5.2.2.1 *Módulo de Young*

La ecuación del módulo de Young contiene los tres efectos:

$$\frac{E^*}{E_s} = c_1 \phi^2 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2 + c'_1 (1 - \phi) \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right) + \frac{p_o (1 - 2\nu^*)}{1 - \frac{\rho^*}{\rho_s}}$$

ϕ es la fracción de volumen del sólido en las aristas, y la p_o es la presión inicial dentro de la espuma.

El primer componente de la ecuación responde a la deformación de las aristas, y el segundo al estiramiento de las caras, y el tercero a la compresión del gas.

4.5.5.2.2.2 *Módulo Cortante*

A cortante el volumen interno de las celdas no cambia, por lo que no se daría una compresión del gas interno.

$$\frac{G^*}{E_s} = \frac{3}{8} \left(\phi^2 \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2 + (1 - \phi) \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right) \right)$$

4.5.5.2.2.3 Ratio de Poisson

En este caso, al igual que los anteriores, v^* es función de la geometría.

Para espumas isotrópicas, se cumple que $\nu^* = \frac{E^*}{2G^*} - 1 = \frac{1}{3}$

4.5.5.2.3 Meseta de presión

4.5.5.2.3.1 Colapso por pandeo

El colapso elástico para espumas de celda abierta ocurre cuando las celdas pandean debido a la compresión.

$$\sigma_{el}^* = cte * E_s \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2$$

Donde la constante es 0.05.

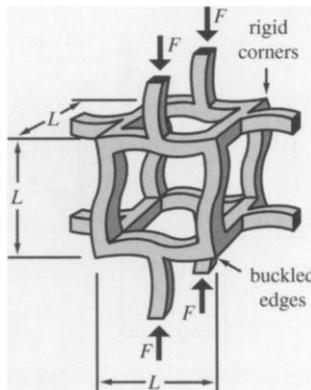


Ilustración 43. Colapso por pandeo de una espuma. (Fuente: M. F. Ashby. [29])

Para espumas de celda cerrada, el pandeo de las caras y su estiramiento no influyen, ya que son más finas que las aristas.

En cuanto al gas encerrado en las celdas, si $p_o > p_{atm}$, las celdas estarán pretensadas y el pandeo tendrá que superar esta precarga.

$$\sigma_{el}^* = cte * E_s \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2 + p_o - p_{atm}$$

En cuanto al comportamiento posterior al colapso, si se trata de una espuma de un elastómero (en la que las paredes no se rompen), la presión comienza a aumentar debido a la compresión

del gas.

$$\sigma_{post-collapse}^* = cte * E_s \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2 + \frac{p_o \varepsilon}{1 - \varepsilon - \frac{\rho^*}{\rho_s}}$$

4.5.5.2.3.2 Colapso por deformación plástica

En el caso de las espumas de celda abierta, el esfuerzo en el que ocurre el colapso es el siguiente:

$$\sigma_{pl}^* = 0.3 * \sigma_{ys} * \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{\frac{3}{2}}$$

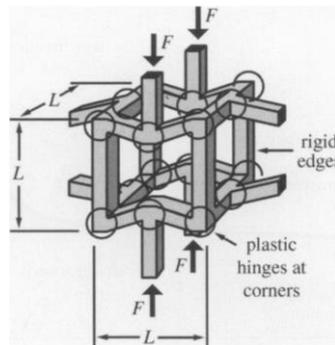


Ilustración 44. Colapso por deformación plástica de una espuma. (Fuente: M. F. Ashby. [29])

De la misma forma que en las demás estructuras celulares, podrá haber un colapso elástico (por pandeo) antes que un colapso plástico, definido por el parámetro $\left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)_{crit}$.

$$\left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)_{crit} = 36 \left(\frac{\sigma_{ys}}{E_s} \right)^2$$

- Si $\frac{\rho^*}{\rho_s} \leq 36 \left(\frac{\sigma_{ys}}{E_s} \right)^2$, el colapso será elástico.
- Si $\frac{\rho^*}{\rho_s} > 36 \left(\frac{\sigma_{ys}}{E_s} \right)^2$, el colapso será plástico.

Para los polímeros rígidos, la relación entre $\frac{\sigma_{ys}}{E_s} \sim \frac{1}{30}$, por lo que para que ocurra un colapso elástico, la densidad relativa de la espuma deberá de ser menor a 0,04, lo que solamente ocurre en espumas de baja densidad. En el caso de las espumas metálicas, la densidad debería de ser menor a 10^{-5} , lo que nunca ocurre, siendo el modo de fallo de las espumas metálicas siempre la deformación plástica.

En el caso de las espumas de celda cerrada, el efecto del estiramiento de las caras es casi

despreciable.

$$\sigma_{pl}^* = cte * \sigma_{ys} * \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^{\frac{3}{2}} + cte(1 - \phi) \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)$$

4.5.5.2.3.3 Colapso por rotura frágil

Las espumas fabricadas con un material frágil normalmente son de celda abierta, y su tensión crítica es la siguiente:

$$\sigma_{cr}^* = 0.2 \sigma_{fs} \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^{3/2}$$

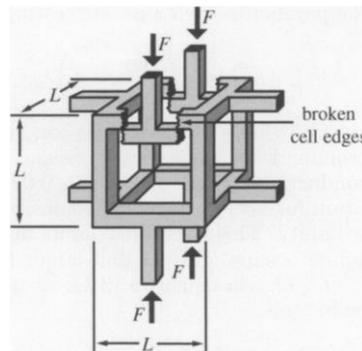


Ilustración 45. Colapso por rotura frágil de una espuma. (Fuente: M. F. Ashby. [29])

4.5.5.2.4 Densificación

Una vez densificada la espuma, el módulo de Young E^* se acerca al del sólido E_s . En cuanto a la deformación de densificación, esta es:

$$\varepsilon_d = 1 - 1.4 \frac{\rho^*}{\rho_s}$$

4.5.5.3. Propiedades mecánicas. Tracción

El único valor que habría que obtener y que difiere sustancialmente con los valores de la curva compresión-deformación es el de tenacidad de fractura, ya que uno de los modos de fallo podría ser el de fractura rápida, ocasionada por algún defecto en la pieza.

En el caso de tener una grieta en la espuma, y ser esta de celda abierta:

$$K_{IC} = 0.65 * \sigma_{fs} * \sqrt{\pi l} * \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^{3/2}$$

4.5.6. Estructuras Reticulares

4.5.6.1. Descripción

Se tratan de estructuras celulares basadas en aristas unidas rígidamente unas con otras, formando celdas unitarias que se repiten en el espacio. Normalmente, se tratan de estructuras dominadas por la deformación axial. En este apartado se analizarán sus propiedades mecánicas suponiendo esto último, ya que, en caso contrario, sus propiedades se podrían obtener siguiendo el mismo procedimiento que las espumas de celda abierta.

Este tipo de estructuras permiten, en lugar de tratar de rigidizar la estructura celular contra la flexión, eliminarla, haciendo que los componentes trabajen a esfuerzos axiales.

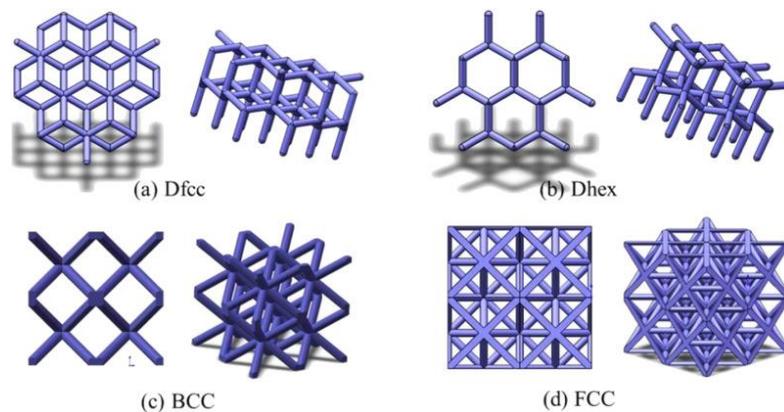


Ilustración 46. Tipos de estructuras reticulares. (Fuente: N. Jin. [55])

En la imagen anterior se observan distintos tipos de estructuras reticuladas, las dos primeras imitan las estructuras cristalinas del diamante y de la lonsdaleíta, y las dos siguientes son estructuras cristalinas cúbicas centradas en el cuerpo y en la cara.

4.5.6.2. Propiedades mecánicas en el plano. Compresión

4.5.6.2.1 Zona elástica

Al comenzar a aplicar la compresión en la estructura, las aristas, que están sometidas a tracción o compresión, comienzan a deformarse elásticamente. De media, un tercio de las aristas están sometidas a este esfuerzo.

$$E^* \propto \frac{\sigma}{\varepsilon} \propto \frac{F l}{l^2 \delta} \rightarrow \delta \propto \frac{F l}{\text{Cross section} * E_s} \propto \frac{F l}{t^2 E_s}$$

$$E^* \propto \frac{F}{l^2} l \frac{t^2 E_s}{F l} \propto E_s \left(\frac{t}{l}\right)^2 \propto E_s \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)$$

$$E^* = \frac{1}{3} E_s \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)$$

4.5.6.2.2 Meseta de presión

Como en los casos anteriores, el mecanismo de colapso vendrá determinado por la tensión de colapso más baja. Normalmente, las retículas fabricadas por materiales elastómeros o con aristas muy esbeltas colapsan por pandeo antes que por deformación plástica. Por otro lado, los materiales plásticos, como los metales, suelen colapsar por deformación plástica. Como referencia, los materiales polímeros colapsan por pandeo si $\frac{\rho^*}{\rho_s} < 0.05$, y los metálicos $\frac{\rho^*}{\rho_s} < 0.01$.

4.5.6.2.2.1 Colapso por pandeo

$$\sigma_{el}^* = cte * E_s \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^2$$

La constante depende de la conectividad de la retícula.

4.5.6.2.2.2 Colapso por deformación plástica

$$\sigma_{pl}^* = \frac{1}{3} * \sigma_{ys} * \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)$$

4.5.6.2.2.3 Colapso por rotura frágil

$$\sigma_{cr}^* = cte * \sigma_{crs} * \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)$$

Las primeras aristas en fallar serán las sometidas a tracción. La obtención de la constante es un proceso complejo, ya que la rotura frágil se trata de un proceso estocástico, que depende de la presencia de defectos en las aristas.

4.5.7. Comparación entre panales, espumas y retículas

Para concluir este análisis de las propiedades mecánicas de los sólidos celulares con más presencia y potencial en la ingeniería, es de gran utilidad compararlos entre ellos para cada propiedad. Al haber tantos tipos de espumas, retículas y panales, se realizará una comparación en función de la densidad relativa, obteniendo así las estructuras más eficaces en cuanto a cantidad de material para cada propiedad. El valor final dependerá de la geometría exacta y del material del sólido.

Tabla 3. Dependencia de las propiedades mecánicas de panales, espumas y retículas a la densidad relativa.

Propiedades	Panales En el plano	Panales Normal al plano	Espumas Estructuras dominadas por la flexión	Retículas Estructuras dominadas por la deformación axial
E^*	$\left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^3$	$\frac{\rho^*}{\rho_s}$	$\left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^2$	$\left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)$
σ_{el}^*	$\left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^3$	$\left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^3$	$\left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^2$	$\left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^2$
σ_{pl}^*	$\left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^2$	$\left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^2$	$\left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^{\frac{3}{2}}$	$\left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)$
σ_{cr}^*	$\left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^2$	$\frac{\rho^*}{\rho_s}$	$\left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^{\frac{3}{2}}$	$\left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)$

En la siguiente gráfica de Ashby, concepto explicado en el apartado 4.6.1.1, se puede observar gráficamente la relación del módulo de Young con la densidad relativa:

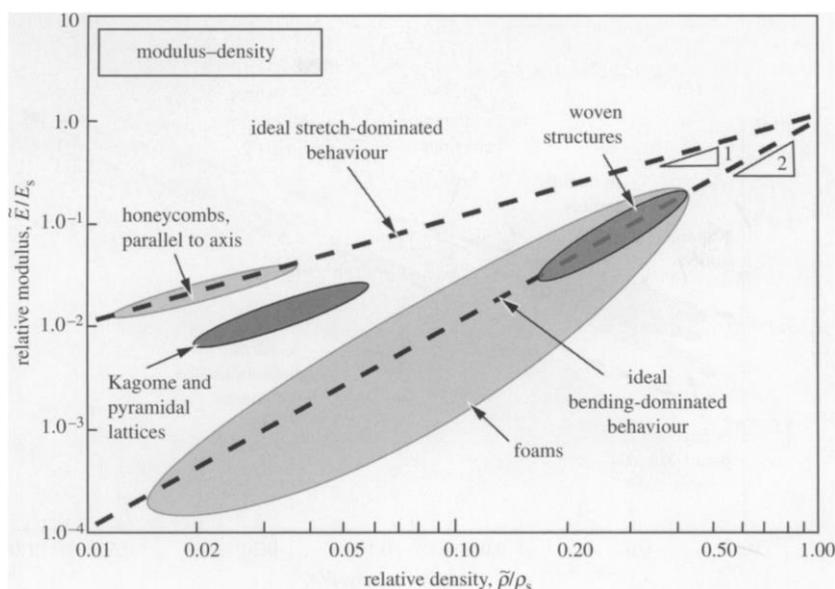


Ilustración 47. Gráfica de Ashby del módulo de Young relativo frente a la densidad relativa. (Fuente: M. F. Ashby [29])

Mediante esta tabla comparativa, se puede observar como aquellas estructuras dominadas las deformaciones axiales, como las retículas, son mucho más rígidas y resistentes que las dominadas por la flexión. Por ello son idóneas para aplicaciones en las que se requiera una estructura sometida a esfuerzo con su peso optimizado.

Los panales, si están cargados en su dirección normal, también se utilizarían para ese tipo de aplicaciones. Uno de sus principales usos es la de formar el núcleo de los panales de sandwich. Además, cuentan con la ventaja de ser más sencillos de fabricar que muchas de las estructuras

reticulares.

El inconveniente de las estructuras dominadas las deformaciones axiales es el hecho de que no presenten una meseta continua desde la tensión inicial de colapso. Es por ello que, para aplicaciones en las que haga falta absorber energía, etc. se utilizan las estructuras dominadas a flexión.

4.5.8. Diseño interno de las estructuras celulares

Existen posibilidades de mejorar las propiedades mecánicas de los sólidos celulares (en relación con la densidad relativa), aunque muchas veces conlleva el hacer el diseño más complejo. Dos ejemplos de ello son las aristas huecas y las espumas con estructura microsándwich.

4.5.8.1. Aristas huecas

En el caso de las espumas de celda abierta, hemos podido observar en los apartados anteriores que su deformación se debe a la deformación de las aristas al verse sometidas a esfuerzos axiales o de flexión. Por ello, sería interesante poder aumentar su rigidez.

Una forma de aumentar la rigidez es hacer las aristas huecas. Esto es una forma de, manteniendo la cantidad de material, aumentar la rigidez de las espumas.

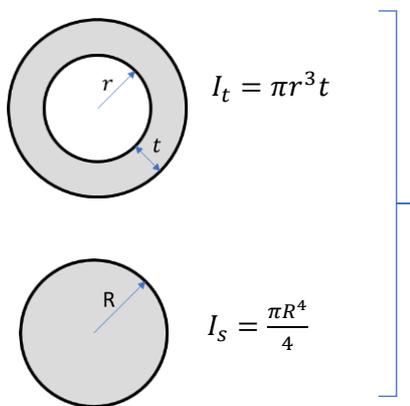


Ilustración 48. Aristas huecas. (Fuente: Propia)

Si las masas de ambas aristas es la misma, el área gris de ambas es también la misma, por lo que:

$$\pi R^2 = 2\pi r t$$

$$R = \sqrt{2rt}$$

Por lo que:

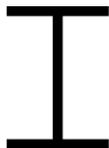
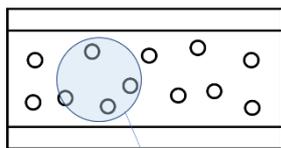
$$\frac{I_t}{I_s} = \frac{\pi r^3 t}{\frac{\pi R^4}{4}} = \frac{\pi r^3 t}{\frac{\pi \sqrt{2rt}^4}{4}} = \frac{r}{t}$$

Esta expresión indica que el momento de inercia de una arista tubular será r/t veces mayor que el de una arista sólida de la misma masa.

4.5.8.2. Espumas con estructura microsándwich

Se trata de estructuras celulares en las que las caras de las celdas son pequeñas estructuras tipo sándwich. Una estructura tipo sándwich consta de dos caras rígidas separadas por un núcleo ligero (de estructura tipo panal o espuma). Se trata de una forma análoga a lo que sería una viga

tipo I.



Es una forma de aumentar el momento de inercia de la estructura aumentando muy poco el peso.



Consiste en insertar en las espumas celdas más grandes, con una pared fina y huecas por dentro. Estas paredes actúan como las placas laterales de una estructura tipo sándwich, y la materia en la que se encuentran (espuma porosa) actuaría como el núcleo.

Ilustración 49. Espumas con estructura microsandwich. (Fuente: Propia)

4.6. Selección de materiales celulares

Hasta ahora, se han estudiado los materiales celulares, sus tipologías, las propiedades mecánicas de los principales y su comportamiento ante la aplicación de carga, para lo cual hemos diferenciado dos tipologías principales, con sus ventajas y desventajas.

Al haber un rango tan amplio de opciones, es necesario tener un procedimiento o contar con herramientas para elegir el sólido celular idóneo para una aplicación en concreto. Se pueden elegir y comparar estructuras de diferentes formas: Analíticamente, mediante modelos matemáticos que representen el comportamiento de la estructura; de forma empírica, utilizando datos experimentales para desarrollar modelos predictivos o comparar modelos entre ellos; y de forma computacional, mediante simulaciones. Otra opción sería la de hacer una combinación de todas ellas.

4.6.1. Parámetros de comparación

No obstante, ¿qué parámetros se compararían? Se ha de acordar una métrica para realizar las comparaciones. Se han identificado tres tipos de métricas que podrían ser interesantes para comparar materiales celulares entre ellos, cada una con sus ventajas y desventajas.

4.6.1.1. Índices de Ashby

Este concepto consiste en, teniendo en cuenta el material del sólido celular, su geometría, aquellos esfuerzos o condiciones de contorno a los que esté sometido en la aplicación y aquel parámetro a optimizar (peso, coste, etc.) establecer un índice y obtener su valor para los distintos materiales celulares existentes.

Por ejemplo, si se quiere obtener aquel material celular más rígido a compresión y de menor peso, el elegido sería aquel que maximizase el índice E^*/ρ . Normalmente, estos datos se suelen

graficar, formando el denominado “gráfico de Ashby”, para visualizar mejor los datos y facilitar una decisión. Los datos utilizados para calcular los índices son normalmente obtenidos experimentalmente.

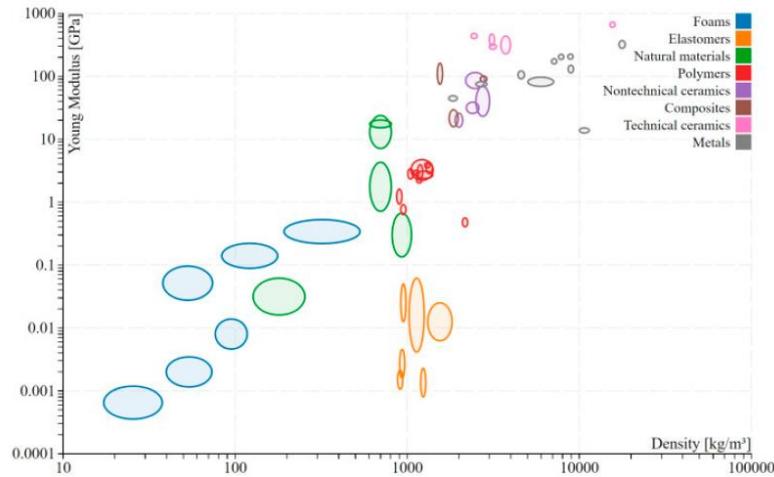


Figure 3. The “Ashby” plot for Young’s modulus (Y-axis) and density (X-axis) is an effective tool in material selection but does not isolate geometry from composition for cellular materials (Attr: Nicoguardo, Wikimedia Commons).

Ilustración 50. Ejemplo de gráfico de Ashby. (Fuente: D. Bhate [27])

Una de las principales desventajas de este tipo de parámetros comparadores es que no permiten la independencia entre el material de composición y la geometría.

4.6.1.2. Propiedades relativas eficaces

Consiste en normalizar las distintas propiedades de los sólidos celulares por el material que los conforma.

$$\frac{\text{Propiedad de interés del sólido celular}}{\text{Propiedad de interés del sólido}}$$

De esta forma, se elimina la contribución de material. Sin embargo, no tiene en cuenta la contribución de la densidad, o lo que es lo mismo, la eficiencia de la utilización del material.

4.6.1.3. Índices de eficiencia geométrica

Se trata de un índice que tiene en cuenta la contribución de la densidad en las propiedades, y ayuda a responder la pregunta, por ejemplo, del diseño celular más rígido a compresión y más eficiente en cuanto a la utilización del material, y es independiente de material del que está hecho.

$$GEE = \frac{\frac{\text{Propiedad del ineterés del sólido celular}}{\text{Propiedad de interés del sólido}}}{\frac{\text{Densidad del sólido celular}}{\text{Densidad del sólido}}}$$

4.6.1.4. Utilización de los parámetros

La elección del parámetro idóneo para comparar los distintos sólidos celulares sería la siguiente:

- Si ya hay un material elegido, y solamente se necesita elegir geometría, los índices de Ashby son la mejor opción.
- Si la elección de material es también libre, las propiedades relativas eficaces serían los parámetros idóneos.
- Si además de lo anterior, se quiere obtener la mejor funcionalidad con el mínimo material, los índices de eficiencia geométrica serían los parámetros a utilizar.

Se ha de tener en cuenta que los valores de estos parámetros o propiedades se tienen que obtener bajo las condiciones de contorno de la aplicación.

4.6.2. Criterios de selección

Para elegir o diseñar el material celular idóneo para una aplicación, existen varios criterios o herramientas que pueden ayudar a tomar la decisión.

4.6.2.1. Gráficas de Ashby

Se trata de un método analítico o empírico, dependiendo del modo de obtención de datos, que consiste en utilizar una gráfica de los índices de Ashby para escoger el material celular que maximice dicho índice. Está más detalladamente explicado en el apartado 4.6.1.1.

4.6.2.2. Criterio de Maxwell

Se trata de un criterio analítico que, en la mayoría de los casos, predice si la estructura celular se deformará por flexión o axialmente, lo que afecta directamente a su comportamiento y sus propiedades mecánicas. Está explicado con más detalle en el apartado 4.5.1. Se puede aplicar a la mayoría de las estructuras mediante un cálculo simple y rápido.

4.6.2.3. Leyes de escala respecto a la densidad relativa

Las leyes de escala consisten en buscar relaciones entre propiedades de la estructura celular. Una propiedad muy común respecto a la que se suelen formular estas leyes es la densidad relativa, ya que la mayoría de las propiedades son proporcionales a este parámetro. Por ejemplo, E^*/E_s en función de la densidad relativa ρ^*/ρ_s :

$$\frac{E^*}{E_s} = cte * \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^n$$

Estas constantes pueden ser definidas tanto analíticamente, como se ha hecho para los paneles

en este trabajo, o empíricamente, utilizando una base de datos de materiales celulares para encontrar relaciones entre propiedades determinadas y la densidad relativa.

Estas leyes de escala son útiles en dos aspectos, para elegir la geometría idónea para una aplicación donde el peso o la eficiencia de utilización del material es importante, y para predecir el comportamiento mecánico de las estructuras.

En la siguiente imagen se puede observar la ley de escala de una estructura reticular cúbica, en la que se calcula la relación entre σ_y/σ_s y la densidad relativa. De esta forma, se puede elegir la densidad relativa idónea según la resistencia deseada, o se puede comparar esta relación con otros tipos de estructuras.

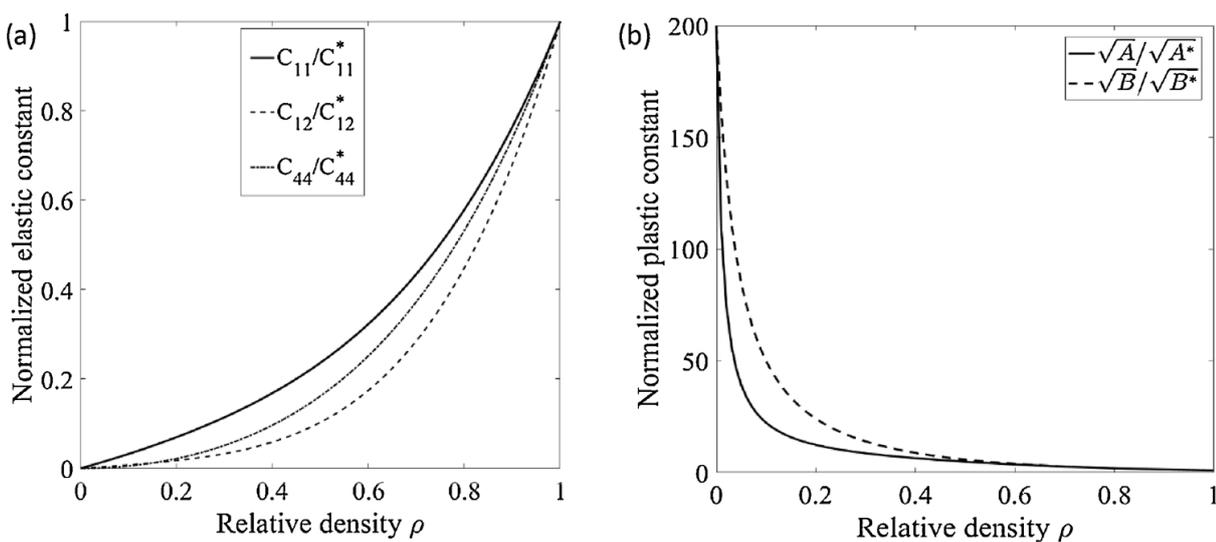


Ilustración 51. Gráficas que representan las leyes de escala en una estructura reticular cúbica. (Fuente: M. E. Lynch. [31])

Otro ejemplo es la siguiente imagen, ya que con estos datos se puede predecir cómo se comportará cada una de las estructuras, además de compararlas entre sí.

	Relative Density ρ^*/ρ_s	Young's Modulus E^*/E_s	Compressive Strength σ^*/σ_s	Fracture Toughness $K_{Ic}/(\sigma_s\sqrt{l})$
Triangular honeycomb—out-of-plane	$\frac{2}{\sqrt{3}} \frac{t}{l}$	$\frac{1}{3} \frac{\rho^*}{\rho_s}$	$\frac{1}{3} \frac{\rho^*}{\rho_s}$	$\sim \frac{1}{2} \frac{\rho^*}{\rho_s}$
Octet truss lattice	$6\sqrt{2}(\frac{t}{l})^2$	$\frac{1}{9} \frac{\rho^*}{\rho_s}$	$\frac{1}{3} \frac{\rho^*}{\rho_s}$	$0.32 \frac{\rho^*}{\rho_s}$

Ilustración 52. Dependencia de las propiedades mecánicas de distintas estructuras celulares a la densidad relativa. (Fuente: D. Bhatte [27])

4.6.2.4. Experimentalmente

Otra forma de llegar al sólido celular idóneo sería el ensayo de diferentes estructuras. Este



método es de mucha utilidad cuando ya se ha acotado la selección a un valor pequeño de variantes de estructuras.

A su vez, mediante este tipo de ensayos, se puede crear una base de datos de gran utilidad para los diferentes métodos ya mencionados, y así no depender exclusivamente de resultados precedidos y calculados matemáticamente, principalmente para estructuras más complejas.

4.6.2.5. Simulaciones

Actualmente, existen herramientas computacionales, más o menos complejas, capaces de simular el comportamiento de estructuras celulares bajo diferentes esfuerzos. Esto nos da la posibilidad de realizar cálculos con mucha más rapidez que los métodos anteriores. Además, se pueden realizar optimizaciones de las celdas, utilizando el análisis de elementos finitos, combinaciones de estructuras etc. No obstante, como en cualquiera de los casos en los que se realiza un diseño basado en simulaciones, es necesario tener una idea previa sobre el comportamiento mecánico de las estructuras a analizar, pudiendo así identificar errores en la simulación.

4.6.2.6. Inspiración en la naturaleza

Como ya se ha observado a lo largo de todo el trabajo, hay un gran número de tipos y variaciones de materiales celulares. El decidir el teselado, el tipo de elementos y la conectividad no es una tarea fácil, aun teniendo los métodos ya comentados, dado el gran volumen de posibilidades. Es por ello que, una forma de predefinir la estructura celular para una aplicación es buscar inspiración en la naturaleza, en algún elemento con condiciones de contorno similares.

Al principio de este trabajo se definió el término de biomimética o inspiración en la naturaleza, y cómo muchos de los elementos naturales están optimizados para realizar una función concreta bajo unas condiciones definidas. Por ello, nos gustaría centrarnos en esta estrategia de diseño, en la imitación o inspiración de materiales celulares encontrados en la naturaleza. Naturalmente, esto se puede combinar con otros métodos de selección, como el criterio de Maxwell o las simulaciones, para obtener una mejor solución.

5. Materiales celulares y biomimética

Para elegir el material celular idóneo para una aplicación, hay que tomar tres decisiones: El teselado, los elementos y la conectividad (Ver apartado 4.3). La naturaleza nos puede inspirar y guiar, en ello, principalmente en las dos primeras. Otra forma de diseño inspirado en la naturaleza es buscar directamente aquel elemento natural que, gracias a su estructura celular, cumpla la función requerida en nuestra aplicación. En nuestro caso, abordaremos ambas estrategias, la que se centra en el teselado y los elementos, y la que se centra en la funcionalidad en la naturaleza. Naturalmente, ambas son combinables.

5.1. Teselado y elementos

A continuación, enumeraremos algunos de los materiales celulares que se encuentran en la naturaleza, según su tipo de teselado y elementos [27].

5.1.1. Teselado

En la naturaleza se encuentran las tres tipologías de teselado descritas en el apartado 4.3.1, el periódico, el estocástico y el jerárquico.

5.1.1.1. Teselado periódico

Este tipo de teselado se encuentra, entre otros, en los siguientes elementos de la naturaleza:

- **Panales de abeja y avispa.** Los panales de abeja y avispa están formados por una estructura de panal hexagonal, donde todas celdas son iguales. Esto puede deberse a la función de almacenamiento que tienen, además de que, cualquier división de un plano en regiones de la misma área tiene un perímetro como mínimo de un teselado tipo panal hexagonal regular. Esto último, un teorema probado por el matemático T.C.Hales, lleva a que la estructura del panal de abeja es el teselado en 2D regular más eficiente, ya que presenta un perímetro menor para el mismo área, lo que lleva a un menor gasto de material [32].



Ilustración 53. Panal de abeja. (Fuente: Desconocida)

- **Radiolarios.** Son un grupo de organismos eucariontes (formados por células) de tipo ameba que se encuentran como zooplacton en el océano. Cuentan con un exosqueleto de sílice que suele presentar estructuras celulares de teselado regular, como en el caso de la imagen. De esta forma, cuentan con un exosqueleto de bajo peso que presenta una resistencia alta a la presión hidrostática. Este tipo de estructuras presenta una simetría radial, lo que no ocurriría si el teselado fuera estocástico. La simetría es probable que sea, entre otras cosas, un requisito para la movilidad del elemento [33].

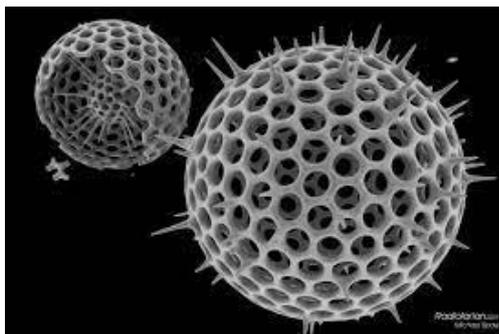


Ilustración 54. Radiolarios. (Fuente: M. Spaw)

- **Piel de serpiente, peces, y otros reptiles.** Este tipo de superficies están también formadas por una celda unitaria que se repite, y presentan una simetría bilateral. En este caso, se trata de un patrón tipo teja, en el que cada elemento se sobrepone levemente al anterior. Además, presentan un elemento más blando que envuelve estas tejas. Esto hace que la estructura permita pequeñas deformaciones, pero presente una rigidez mayor cuando se le aplican esfuerzos más grandes, especialmente de compresión, actuando como una armadura [34].

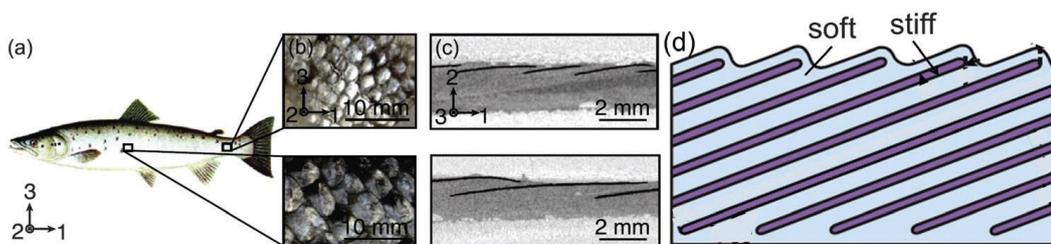


Ilustración 55. (a) Escamas de un salmón; (b) Distribución de las escamas; (c)(d) escamas envueltas el material blando. (Fuente: P. Fratzl [34])

5.1.1.2. Teselado estocástico

En la naturaleza se encuentran también estructuras celulares estocásticas, algunas que pueden explicarse mediante modelos matemáticos (como el diagrama de Voronoi) y otras que no. A continuación, podemos observar algunos ejemplos:

- **Hueso trabecular.** Se trata de la parte interna del hueso, que presenta una estructura celular tipo espuma de celda abierta. Esta estructura ayuda a dar más resistencia a la

estructura del hueso, además de proporcionar un volumen en el que se produce un intercambio de nutrientes, y otras funciones biológicas. Debido a esta multifuncionalidad, su estructura ha de adaptarse a los requerimientos de cada función, y de ahí su no simetría o regular. Por ejemplo, es más densa en las zonas que están sometidas a un mayor esfuerzo [35].

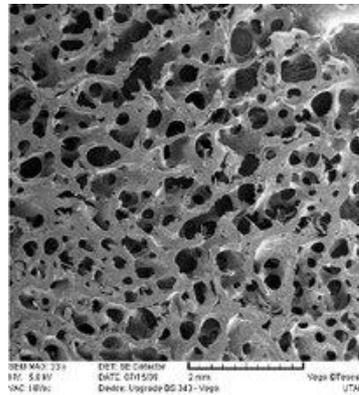


Ilustración 56. Detalle de la estructura del hueso trabecular. (Fuente: D. Kytir. [36])

- **Corcho.** Presenta también una estructura celular, de tipo panal irregular. Cuenta con una característica muy interesante, ya que las paredes de sus celdas están corrugadas, lo que provoca que su ratio de Poisson sea nulo, debido a que cuando se someten las celdas a tracción en la dirección del plano, la sección no cambia.

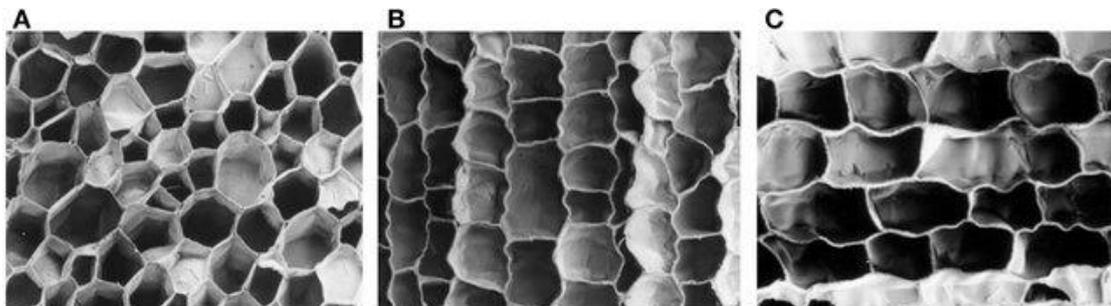


Ilustración 57. Estructura celular del corcho, (a) Sección tangencial; (b) Sección transversal; (c) Sección radial. (Fuente: Pereira)

5.1.1.3. Teselado jerárquico

En la naturaleza se encuentran también estructuras celulares distribuidas jerárquicamente. Hay distintas formas de distribución jerárquica, los dos ejemplos siguientes muestran la jerarquía por ramales y por gradientes radiales.

- **Alas de la libélula.** Se trata de un ejemplo de jerarquía por ramal. Las venas distribuidas en el ala, y que forman la estructura celular, aumentan su grosor a medida que se acercan al origen, al igual que la membrana. Esto mejora la resistencia del ala a las fuerzas inercial y aerodinámica a las que está sometida. Además, la partición en celdas permite la

combinación de la rigidez del ala con la flexibilidad necesaria durante su movimiento[36], [37].

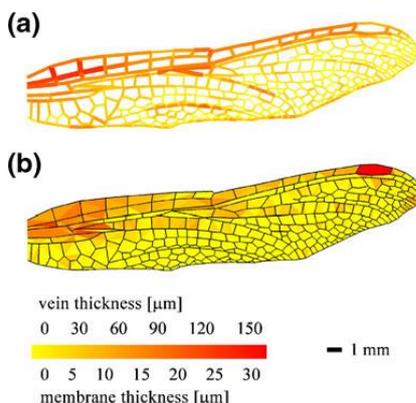


Ilustración 58. Gradiante del grosor de las venas y membranas en un ala de libélula. (Fuente: S. R. Jongerius [36])

- **Tallo de palmas.** La estructura del tallo de las palmas es un ejemplo de estructura jerárquica que presenta un gradiente radial. Está conformado por conjunto de conductos tipo panal, que conducen la savia, y un material tipo espuma, denominado parénquima. A medida que el tallo crece, en lugar de aumentar su radio exterior en la base, como pasa en muchos árboles, es la densidad del material celular tipo panal el que aumenta en la base, aumentando su resistencia. Además, la sección de tallo presenta un gradiente de densidad (más denso en la periferia) [38].

5.1.2. Elementos

En la naturaleza se encuentran elementos tipo viga, como en el caso de la canasta de las flores de Venus, y que utilizan superficies, como los panales de abeja, la madera o la piel de serpiente. Tanto los panales como la madera presentan una estructura celular interna, mientras que la piel de la serpiente solo se encuentra en la parte externa, como una capa.



Ilustración 59. Elementos tipo viga y tipo superficie en los elementos naturales. (Fuente: Desconocida)

Tras observar estos elementos en la naturaleza, una conclusión posible es que los elementos tipo superficie se suelen encontrar en aplicaciones donde hace falta un almacenamiento o una protección física hacia el exterior, mientras que aquellos que no tienen estas funcionalidades, sino otras más orientadas a la resistencia, presentan elementos tipo viga.

5.2. Funcionalidad en la naturaleza

Otra manera de clasificar los materiales celulares es según su función, según su aportación al elemento del que forman parte. Nos gustaría analizar la respuesta de la naturaleza, su forma de diseñar para soportar ciertos esfuerzos [39].

Los elementos de la naturaleza están sometidos a esfuerzos de distintos tipos, como el de gravedad, compresión, tracción, cortante, flexión o torsión (a); en dirección uniaxial, biaxial o incluso hidrostática, entre otras (b) y periodos de aplicación distintos, impactos, cargas constantes, variables con el tiempo etc. (c).

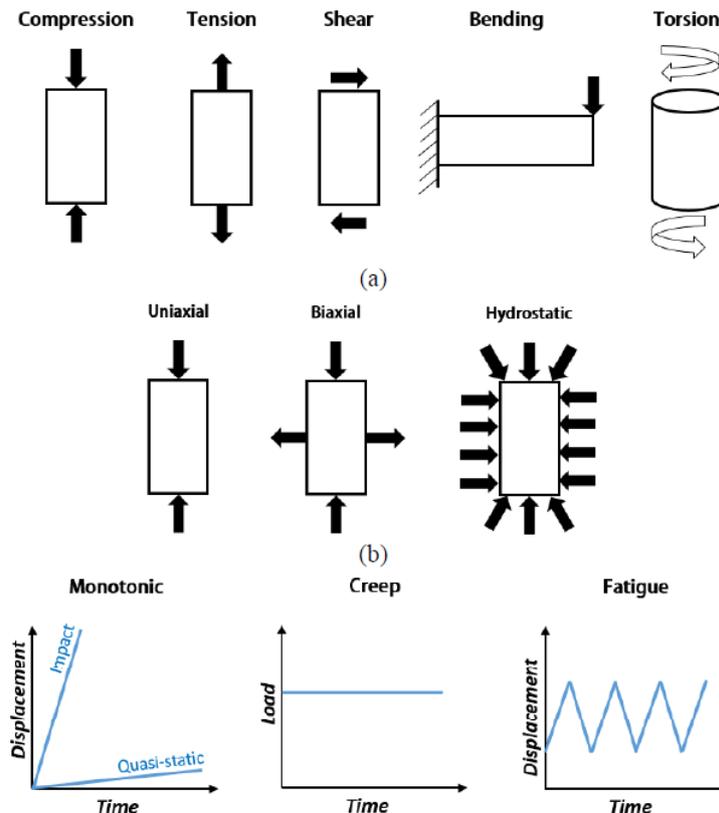


Ilustración 60. Tipos de carga a los que están sometidos los elementos naturales. (Fuente: T. McNulty [39])

Para poder vencer estos esfuerzos, muchas veces los elementos presentan una estructura, ya sea en su superficie, localmente o en todo su volumen, conformada por un material celular, con propiedades definidas de rigidez, resistencia, tenacidad, capacidad de absorción de energía, entre otras.

A continuación, estudiaremos distintos elementos naturales, que presentan estructuras celulares varias para soportar esfuerzos distintos. Para cada elemento, se especificará la estructura celular que lo conforma y los beneficios que esta le aporta.

- Panal de abeja

- Estructura celular: Patrón de hexágonos regulares extruido en la dirección perpendicular.
- Función:
 - Creación de volúmenes iguales para el almacenamiento de miel etc.
 - Elevada rigidez para soportar el peso propio.
- En el apartado 5.1.1.1 se define la función de esta estructura en la naturaleza, y en el apartado 4.5.4 se estudian con detalle las propiedades mecánicas de esta.

- Canasta de flores de Venus

- Estructura celular: Estructura reticular de sílice formando un tubo hueco. La estructura reticular está formada por celdas cuadradas combinadas con un conjunto de reforzadores diagonales [40].
- Función:
 - Resistencia a la fuerza hidrostática a la que está sometida, además de resistencia al pandeo gracias a los reforzadores diagonales.
 - Los agujeros dejan penetrar placton para su alimentación, y larvas de gambas que las limpian.

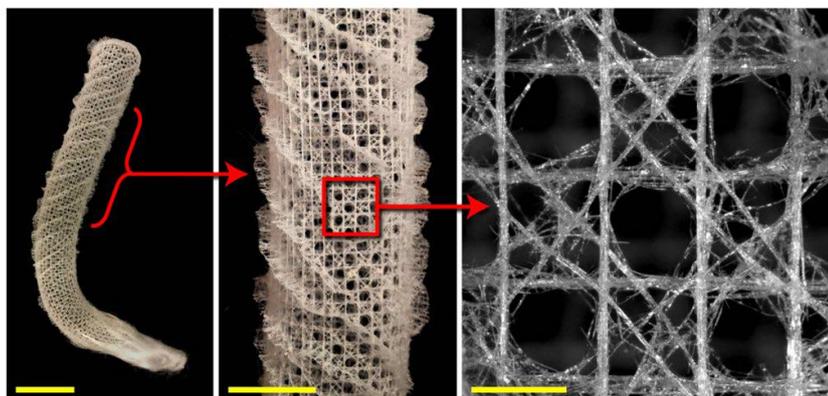


Ilustración 61. Estructura reticular de la canasta de flores de Venus. (Fuente: Fernandes. [40])

- Pico de Tucán

- Estructura celular: Estructura tipo sándwich. Su superficie está conformada por escamas de queratina hexagonales superpuestas ligeramente unas sobre otras. El interior del pico está formado por una espuma de celda cerrada de colágeno, de una densidad relativa aproximada de 0.1 [41].
- Función: Alta rigidez a flexión.

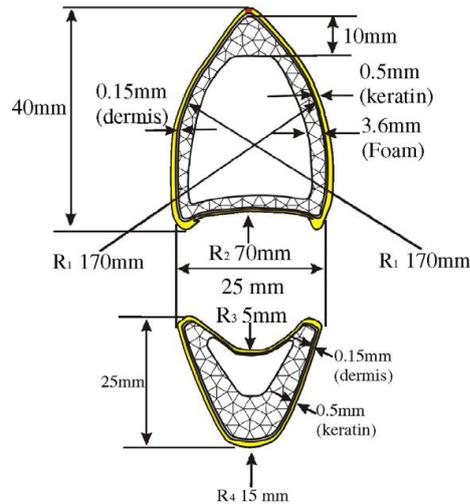


Ilustración 62. Esquema de la sección del pico de un tucán. (Fuente: Seki. [36])

- **Piel del pomelo**

- o Estructura celular: Espuma de celda abierta, cuyas celdas son mayores cuanto más se aproximan al centro, radialmente.
- o Función: Resistencia a impacto. La razón por la que la resistencia de impacto es un factor crítico para esta fruta es que no se rompa al caer del árbol. El pomelo se trata del cítrico más grande, pudiendo pesar hasta 6kg, y llega a estar a una altura de hasta 15 metros antes de caer del árbol. Si no contase con una estructura de alta resistencia al impacto, se abriría al caerse y se pudriría rápidamente considerando el calor de su lugar de origen, el suroeste de Asia [42].

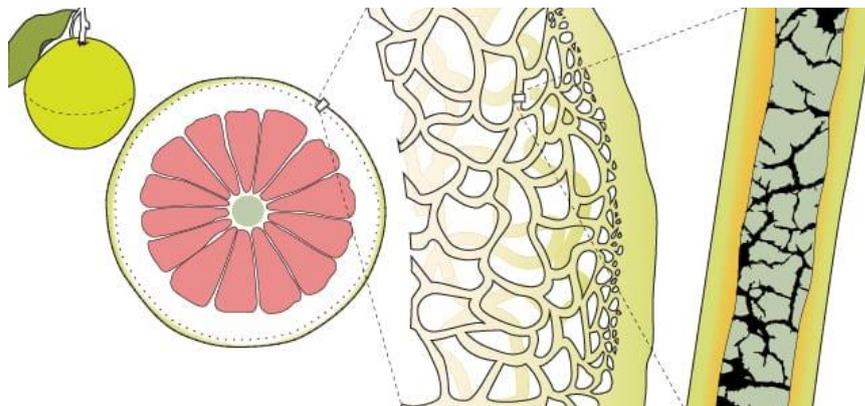


Ilustración 63. Estructura interna de la piel del pomelo. (Fuente: Harrington. [38])

- **Piel de serpiente y peces**

- o Estructura celular: Estructura tipo sándwich, formada por un teselado de celdas tipo tejas, superpuestas levemente sobre la anteriores, sobre un material más blando.
- o Función: Permite deformaciones para bajos esfuerzos de compresión, pero

rigidez frente a grandes esfuerzos.

- En el apartado 5.1.1.1 se define con más detalle.

- Concha de abulones

- Estructura celular: La concha de los abulones, al igual que muchas otras, está conformada por nácar. Y el nácar se trata de una estructura tipo sándwich, formada por superficies teseladas de plaquetas hexagonales de aragonita, paralelas unas a otras, separadas y compactadas por un material más blando y orgánico (biopolímeros elásticos de conquiolina).
- Función: Tenacidad a la fractura a tracción [43].

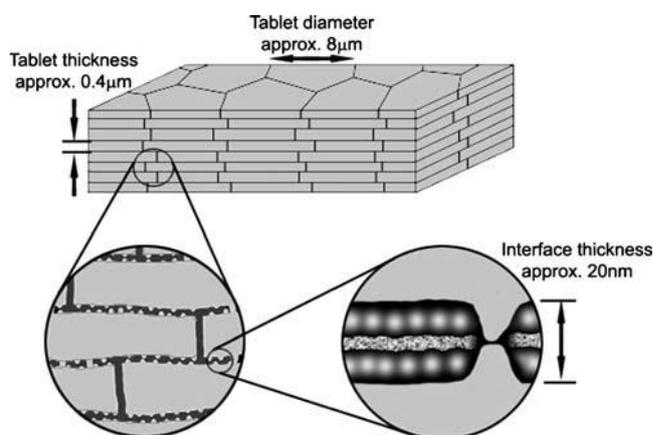


Ilustración 64. Estructura del nácar. (Fuente: Barthelat. [38])

- Tallo de palma

- Estructura celular: Estructura tipo sándwich formada por conjunto de conductos tipo panal, que conducen la savia, y un material tipo espuma, denominado parénquima.
- Función: Resistencia ante flexión y pandeo.
- En el apartado 5.1.1.3 se define con más detalle.

- Espina de erizo

- Estructura celular: Estructura tubular hueca con rigidizadores.
- Función: Rigidez a flexión, prevención de ovalización y resistencia a pandeo [44].

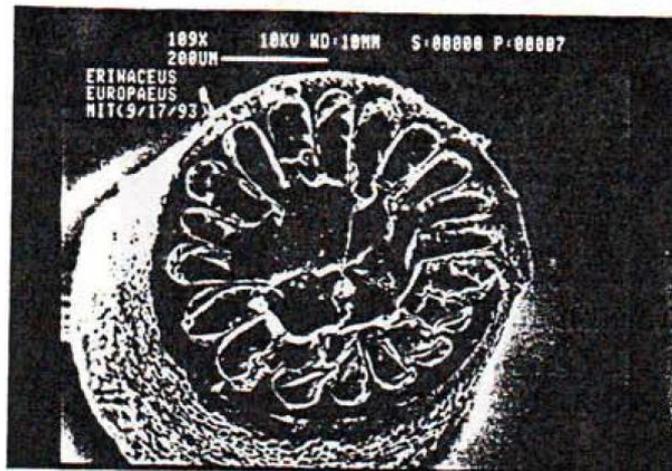


Ilustración 65. Sección de una espina de erizo (*Erinaceus Europacus*). (Fuente: G. Karam [39])

- **Materiales cristalinos**

- o Estructura celular: Modelización de estructuras reticulares
- o Función: Los materiales cristalinos son aquellos cuyos elementos constitutivos se estructuran de manera periódica en las tres direcciones del espacio. Esta estructura afecta a las propiedades del material.
- o En este último caso, el hecho de inspirar una estructura celular reticular en la estructura cristalina de un material no es para conseguir ciertas propiedades que este tiene. Se trata de coger inspiración de las distintas estructuras cristalinas existentes a bajo nivel en la naturaleza, analizarlos y elegir el que se ajuste mejor a los requerimientos. Este es el caso del artículo [45] que elige la estructura del diamante para diseñar un tallo femoral (una parte de la prótesis de cadera).

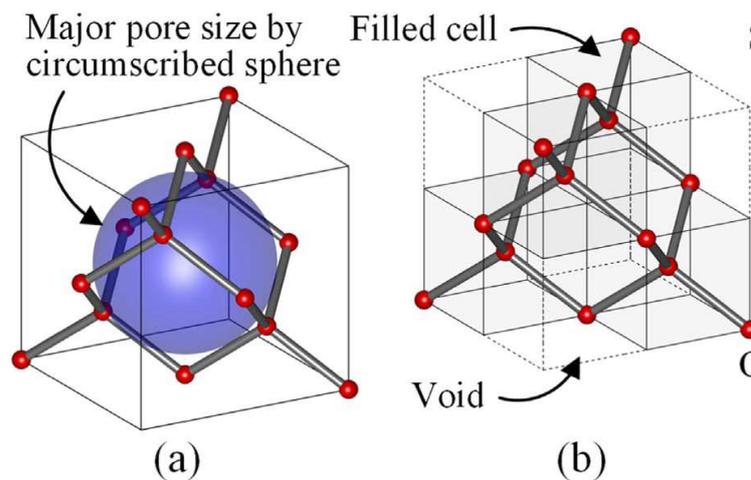


Ilustración 66. Estructura reticular inspirada en la estructura cristalina cúbica denominada red del diamante. (Fuente: B. Jetté. [40])

6. Resultados experimentales

En los apartados anteriores, se ha realizado una descripción de los materiales celulares, un análisis de su comportamiento frente al esfuerzo dependiendo del tipo de estructura y se han analizado varios ejemplos de estructuras celulares encontradas en la naturaleza.

En este apartado, se comprobará si somos capaces de reproducir experimentalmente las curvas de compresión-deformación para cada tipo de estructuras, que compararemos con las teóricas.

Para ello, se han diseñado 4 tipos de estructuras celulares en 3D, se han impreso mediante fabricación aditiva y ensayado para obtener la curva de compresión-deformación

Se han elegido 4 estructuras celulares encontradas en la naturaleza, cada una de un tipo distinto de los estudiados en el apartado 4.5.

- Estructura tipo panal: Representa la estructura de tipo panal de abeja en la naturaleza.
- Estructura de espuma de celda abierta tipo Voronoi: Representa la estructura de la piel del pomelo.
- Estructura reticular dominada por esfuerzos flectores: Representa la estructura reticular del diamante.
- Estructura reticular dominada por esfuerzos axiales: Similar a la estructura interna del hueso trabecular, se trata de una estructura denominada en inglés “octet truss”, que consta de una combinación de octaedros y tetraedros.

Para el ensayo se han diseñado 4 cupones de 100x100x60 mm cada uno, cada uno formado por un tipo de estructura celular, siendo todos ellos de la misma densidad, para facilitar su comparación.

6.1. Diseño 3D y fabricación

6.1.1. nTopology

Para diseñar estas estructuras en 3D, se ha utilizado el programa nTopology [46]. Se trata de un software novedoso que permite hacer diseños y operaciones complejas, como la optimización topológica o estructuras reticulares, además de simularlas. Actualmente ofrece licencias de prueba gratis, formaciones y trabaja con empresas que se dedican a la fabricación aditiva. Este trabajo se realizó con la licencia de estudiantes del programa.

La principal diferencia de este programa respecto a los utilizados normalmente para diseñar, como el SolidWorks, PTC Creo, etc. es su forma de tratar las condiciones de contorno. En lugar de definir al sólido con una serie de vértices, aristas y superficies, comúnmente definido como BREP, trabaja de forma implícita. Esto significa que define las condiciones de contorno como

una ecuación matemática, que describe el volumen del sólido y su posición respecto al sistema de coordenadas. De esta forma, simplifica en gran medida el sólido, y es capaz de procesar de forma muy rápida sólidos complejos como las estructuras reticulares, que conllevarían un coste computacional mucho más alto en programas tipo BREP.

Además, el propio programa, al estar diseñado para este tipo de funcionalidades, ofrece un gran número de estructuras reticulares ya predefinidas, como la estructura del diamante, facilitando mucho el proceso de diseño de las estructuras celulares.

No obstante, el software no está pensado para realizar diseños de piezas desde cero, y no se ofrecen las herramientas para ello. Su objetivo es el de optimizar topológicamente estas piezas ya diseñadas, o rellenarlas de una estructura celular, e incluso simularlas. El flujo de trabajo ideal para, por ejemplo, el diseño de un casco de bicicleta sería:

1. Diseño del casco en un software de diseño CAD que utiliza BREP.
2. Exportación al nTopology.
3. Conversión de una parte del casco, diseñado como sólido, en una estructura celular.
4. Simulación e iteración para encontrar la perfecta estructura celular y conseguir un valor de absorción de energía determinado.

Se trata de un programa poco intuitivo y complejo a la hora de su manejo, por lo que es necesario hacer alguna de las formaciones que ofrecen gratuitamente. Además, se trata de un software muy joven, aún en fase de desarrollo, con muchas de sus funcionalidades en fase beta, y con nuevas herramientas añadiéndose en cada actualización.

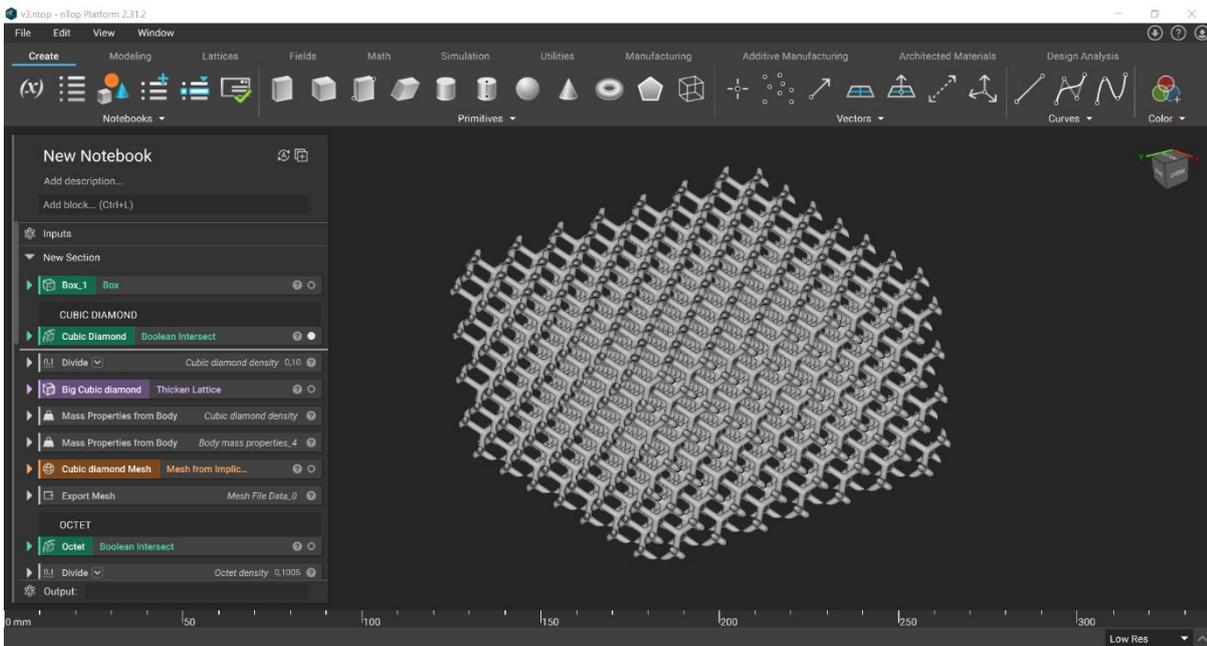


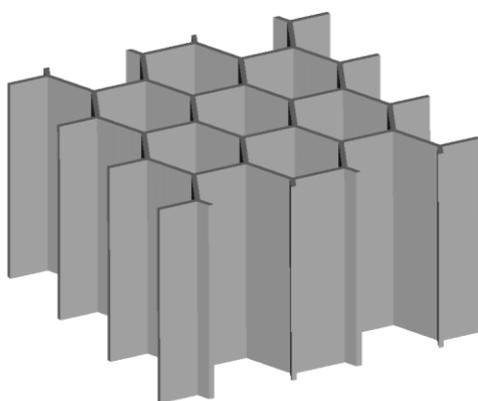
Ilustración 67. Interfaz del programa nTopology. (Fuente: Propia)

6.1.2. Modelos 3D

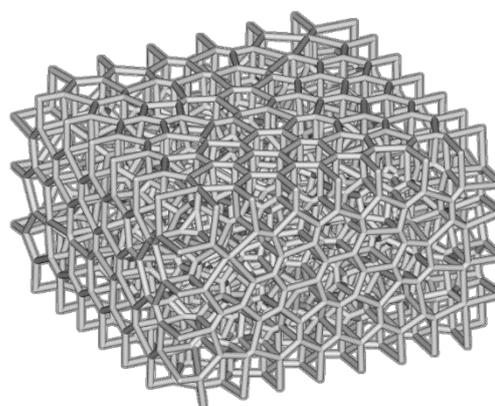
Como ya se ha comentado, para realizar el ensayo, se han modelizado 4 cupones iguales de 100x100x60mm, con una densidad relativa igual de 0.1, cada uno de un tipo de estructura celular.

Para conseguir la misma densidad relativa en cada cupón, al estar ya definido el volumen, se variaron los tamaños de celda y espesor de aristas y superficies. Es por ello que, como se verá en las siguientes ilustraciones, el tamaño de celda de la estructura de panal es tan grande comparada con la del octeto. Para asegurar una correcta fabricación, los espesores de las aristas son de 2mm para la estructura de diamante, la del octeto y la espuma de Voronoi, y de 1,5mm para las superficies del panal.

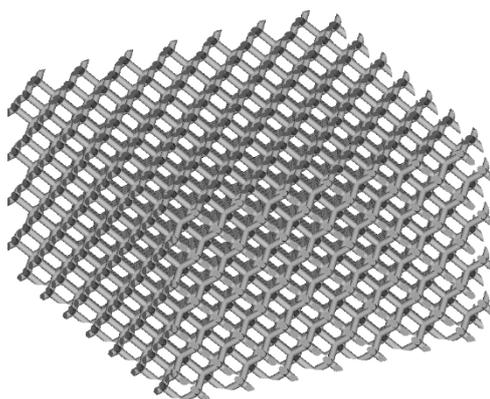
Estos son los diseños de cupones resultantes, diseñados con nTopology:



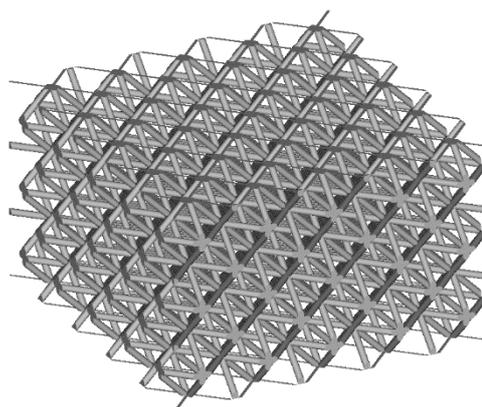
1. Estructura de panal



2. Espuma de Voronoi



3. Estructura cúbica de diamante



4. Estructura del octeto

Ilustración 68. Cupones de estructuras celulares diseñados con nTopology. (Fuente: Propia)

6.1.3. Fabricación aditiva

Estos cupones se han fabricado con una impresora HP JetFusion serie 5200 [47]. Estas impresoras utilizan una tecnología denominada MultiJet Fusion, que se trata de un método de fabricación aditiva parecido al de sinterizado selectivo por láser, pero sin láser.



Ilustración 69. Solución de fabricación aditiva HP JetFusion 5200 (Fuente: HP web)

El proceso de fabricación consiste en los siguiente [48]:

1. Se forma una capa de polvo de plástico, sobre la que se pulveriza un agente fusor y un agente de detalle. El agente fusor se añade en aquellos puntos en los que las partículas tienen que fundirse de forma selectiva, y el de detalle sobre los contornos, para mejorar la resolución de la pieza.
2. Las lámparas pasan por la superficie, fundiéndose el polvo que contiene el agente fusor.
3. Se añade otra capa por encima.
4. Se repite el proceso.

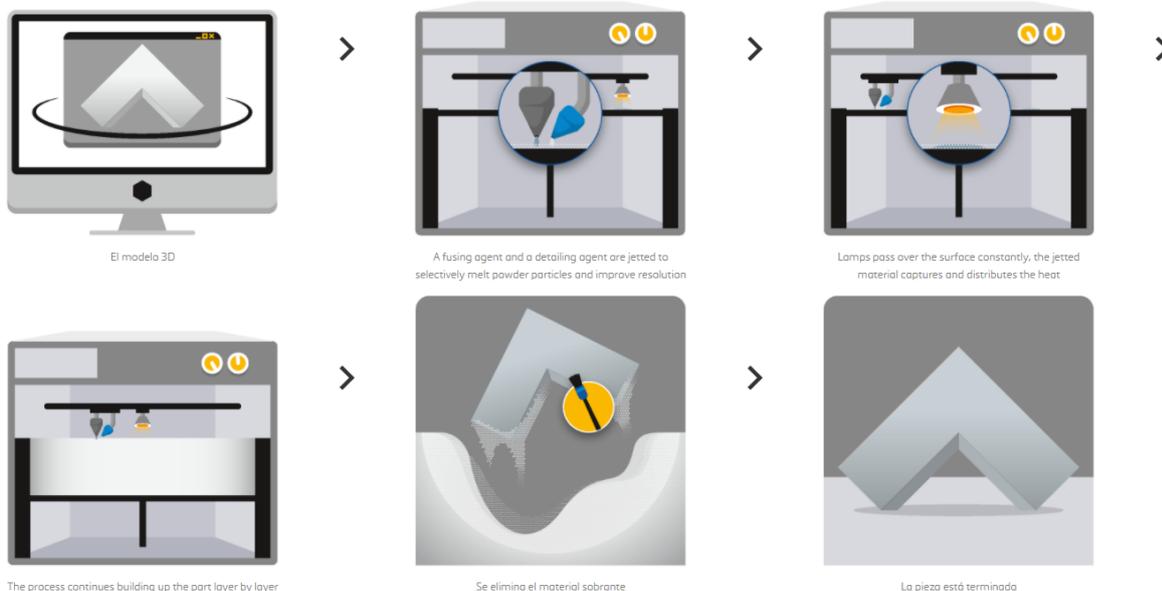


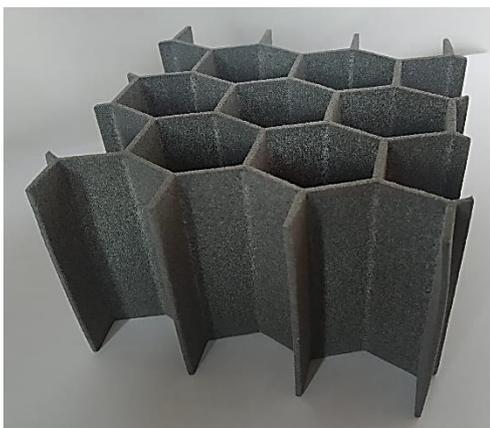
Ilustración 70. Proceso de impresión Multi Jet Fusion. (Fuente: Materialise)

El material elegido para la impresión es el TPU 90A-01 [49], que es un poliuretano termoplástico, un polímero elástico con gran elongación de ruptura.

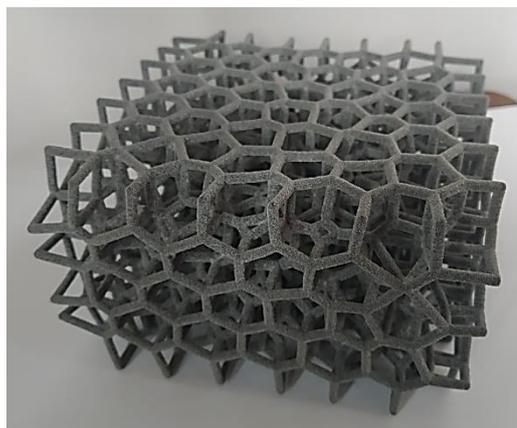
Las propiedades principales que se utilizarán en este estudio son:

- Densidad: 1.1 g/cm³.
- Módulo de Young: 75 MPa.

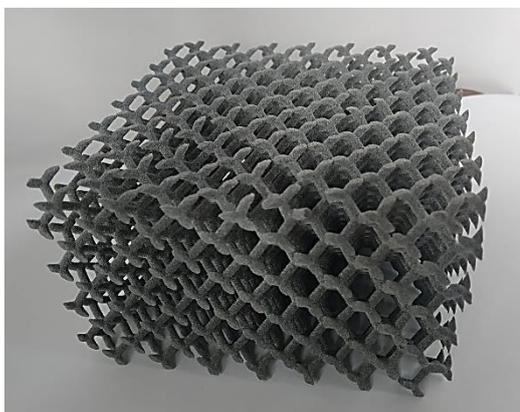
A continuación, se pueden observar imágenes de los cupones resultantes de la impresión. Todos ellos presentan un buen acabado, y no se ha podido identificar de forma visual ningún defecto.



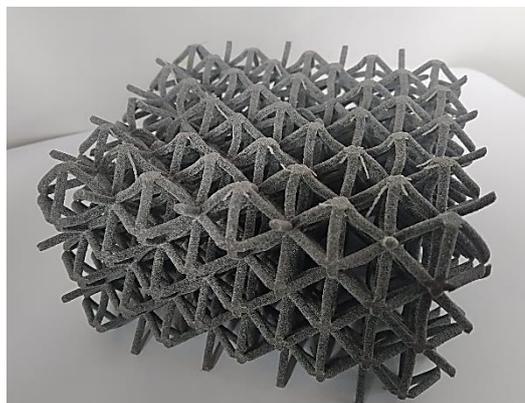
1. Estructura de panal



2. Espuma de Voronoi



3. Estructura cúbica de diamante



4. Estructura del octeto

Ilustración 71. Cupones resultantes de la impresión 3D. (Fuente: Propia)

6.2. Ensayo de compresión y resultados

Previamente al ensayo de los cupones, se pesaron para asegurar que las masas, y por tanto la

densidad relativa (ya que el volumen del cupón es fijo) fuesen iguales.

Tabla 4. Medida de masa de los cupones a ensayar

Cupón	Masa (g)
Panal	73.3
Voronoi	76.4
Diamante	76.9
Octeto	78.9

Estas pequeñas variaciones de masa, que se pueden considerar despreciables, se deben al propio diseño de los cupones, ya que las densidades relativas de las estructuras modelizadas no eran exactamente 0.1, si no 0.1 ± 0.0018 , y a errores propios de la fabricación.

A continuación, se realizó el ensayo de compresión de cada uno de los cupones, aplicando una fuerza de 0 a 9kN a una velocidad de 20mm/min, y monitorizando los valores de fuerza aplicada (N) contra desplazamiento del cupón (mm).

Con los resultados obtenidos, se han realizado los siguientes análisis:

- Comparación de la curva σ/ε teórica y práctica, para cada tipo de estructura celular. Este apartado, por razones de confidencialidad del material por parte de HP, se ha podido hacer únicamente comparando la propia forma de la curva, y no se han incluido los valores de tensión obtenidos.
- Obtención del módulo de Young de cada estructura, y comparación entre los cuatro tipos ensayados. Se ha verificado si los resultados obtenidos cumplen lo definido en las gráficas de Ashby.
- Obtención del valor de deformación de densificación, y corroboración de la expresión teórica.

Al ser el material elastómero, se puede predecir que el colapso de las estructuras, estén dominadas por flexión o deformación axial, será debido al pandeo. Ver apartado 4.5.1.

6.2.1. Curva σ/ε

6.2.1.1. Estructura de panal

Se trata de una estructura cuyo comportamiento se encuentra dominado por la deformación axial de sus paredes (Ver apartado 4.5.3). Debido a ello, su curva ha de ser parecida a:

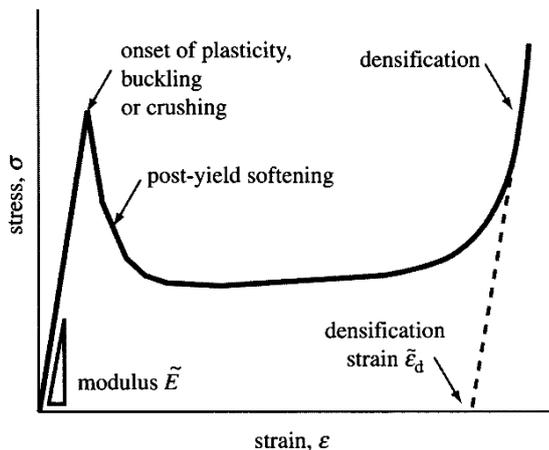


Ilustración 72. Curva de compresión-deformación de estructuras dominadas por la deformación axial. (Fuente: M. F. Ashby [29])

La curva obtenida es la siguiente:

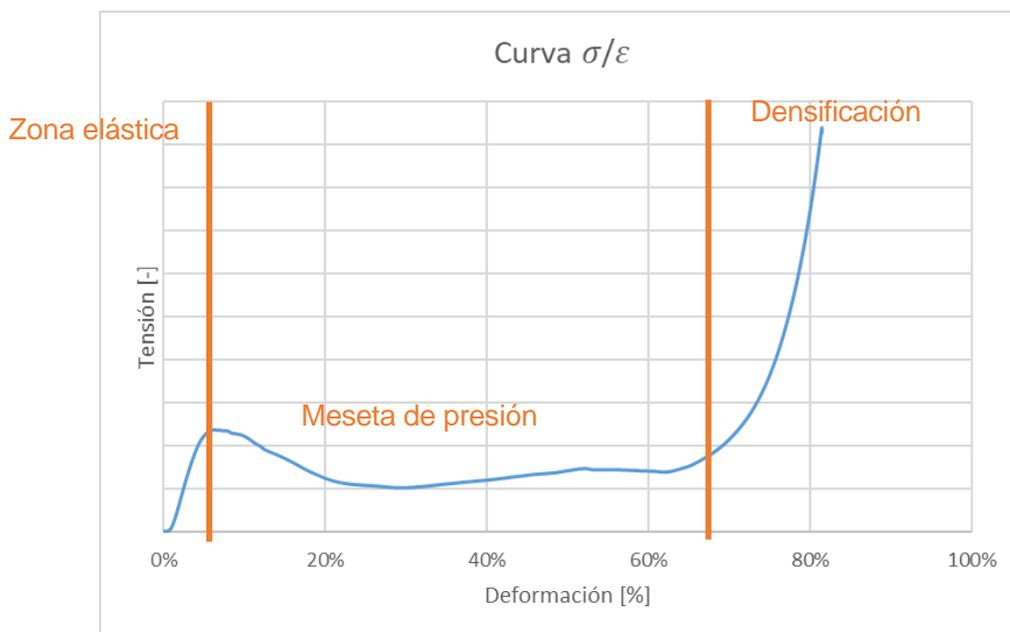


Ilustración 73. Curva de σ/ϵ del cupón de estructura tipo panal. (Fuente: Propia)

Se trata de una curva muy parecida a la teórica, en la que se pueden diferenciar claramente las tres zonas, además del ablandamiento post-deformación.

Mediante la observación del ensayo, se ha podido confirmar que el método de colapso ha sido el de pandeo de las paredes de las celdas.

Además, al finalizar el ensayo la estructura se ha recuperado casi por completo, presentando una deformación plástica aproximada del 7%. Entre todas las estructuras, es la que presenta una deformación plástica más visible.

La baja altura de la zona elástica respecto a la de densificación se debe a la baja densidad relativa de la estructura. El valor relativo de la tensión de colapso por pandeo depende de la densidad relativa del material celular. A medida de este último parámetro aumenta, aumenta el módulo de Young de la estructura E^* , la tensión a la cual se produce la meseta de presión σ^* y disminuye la deformación a la que ocurre la densificación ϵ_D , es decir, densifica antes, y su régimen de meseta es menor.

6.2.1.2. Estructura de espuma de Voronoi

Este tipo de estructuras, de espuma de Voronoi de celda abierta, son estructuras cuya deformación está dominada por la flexión. (Ver apartado 4.5.2). Teniendo en cuenta que el material del cupón es un elastómero, la curva de compresión-deformación tendría que tomar la siguiente forma:

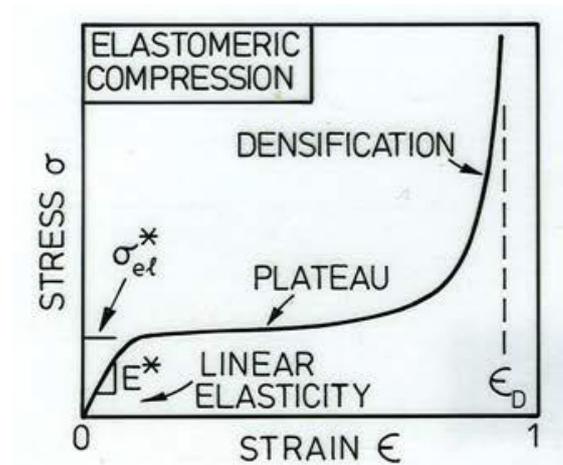


Ilustración 74. Curva de compresión-deformación de estructuras de elastómeros dominadas por flexión. (Fuente: M. F. Ashby. [23])

La curva obtenida es:

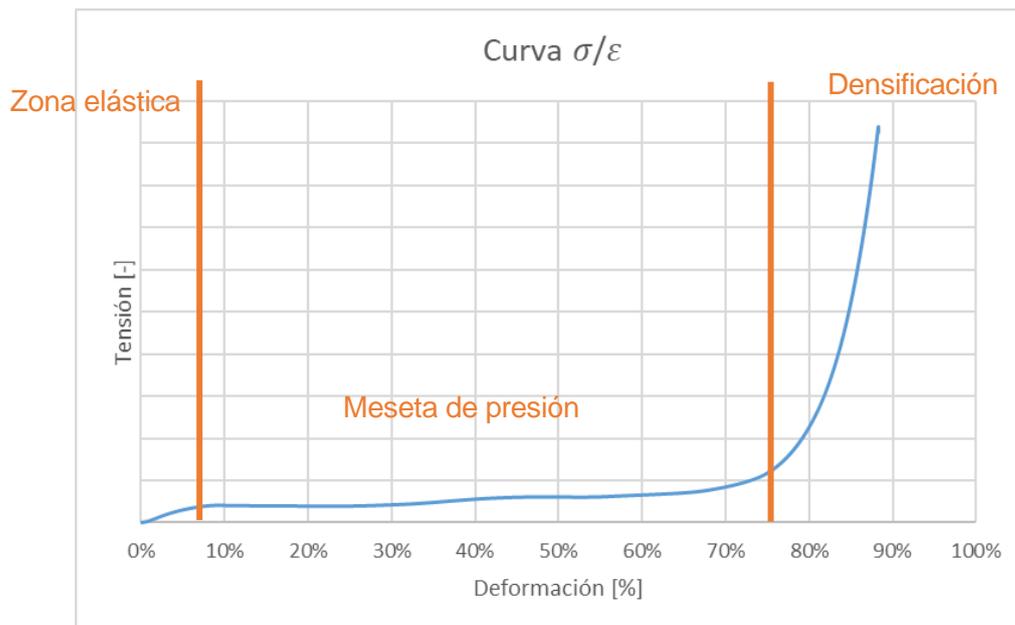


Ilustración 75. Curva de σ/ε del cupón de espuma Voronoi. (Fuente: Propia)

Al igual que en el caso anterior, se diferencian muy bien las tres zonas, la elástica, la meseta de presión y la densificación. La progresión suave desde la zona elástica a la meseta de presión es característica de las estructuras dominadas por la flexión, lo que las hace ideales para aplicaciones de absorción de energía.

En este caso, fue más complicado corroborar visualmente que el colapso de la estructura se debió al pandeo de las aristas y no a la deformación plástica. No obstante, al acabar el ensayo el cupón volvió a recuperarse hasta un 95% de su altura anterior, por lo que se puede afirmar que su colapso fue por pandeo elástico.

En este caso se puede observar aún más claramente el bajo valor de la tensión de colapso y la gran meseta de presión, características de las estructuras celulares de baja densidad.

6.2.1.3. Estructura reticular de diamante

Las estructuras reticulares denominadas cúbicas de diamante son estructuras cuya deformación está dominada por la flexión. (Ver apartado 4.5.2). Teniendo en cuenta que el material del cupón es un elastómero, la curva de compresión-deformación tendría que tomar la siguiente forma:

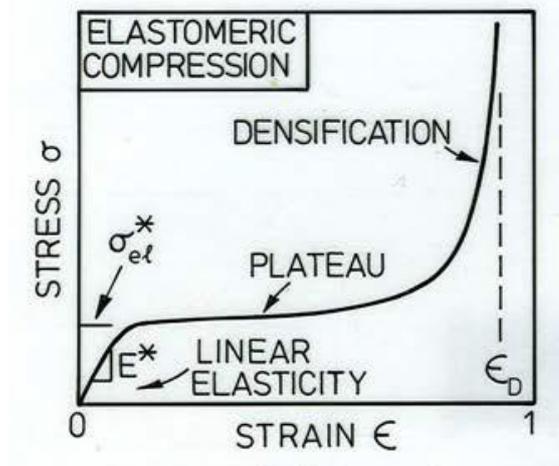


Ilustración 76. Curva de compresión-deformación de estructuras de elastómeros dominadas por flexión. (Fuente: M. F. Ashby. [23])

La curva obtenida es:

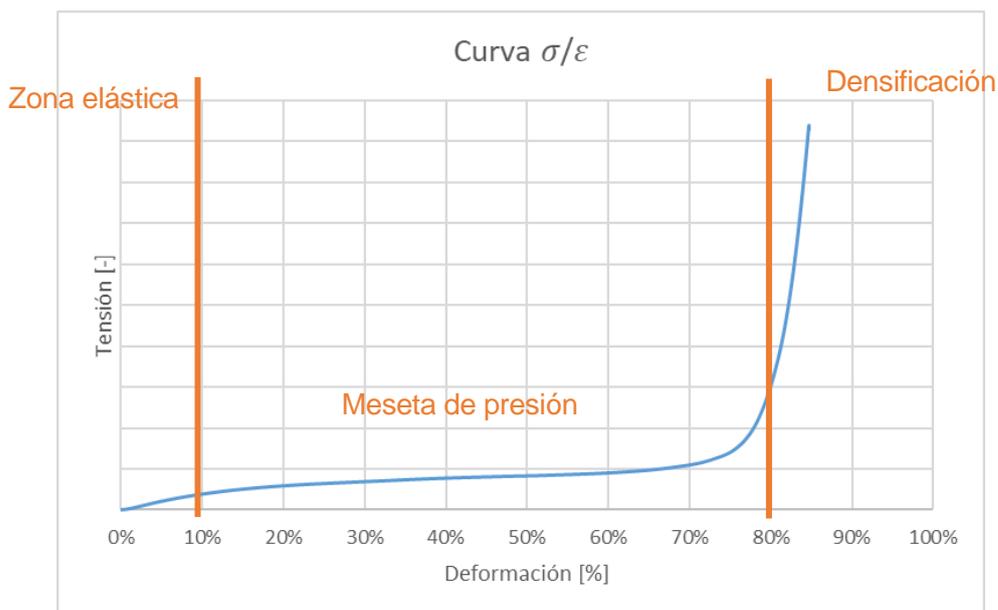


Ilustración 77. Curva de σ/ϵ del cupón de estructura tipo diamante. (Fuente: Propia)

En este caso, la zona de transición entre la zona elástica y la meseta es más difícil de diferenciar que en las estructuras anteriores. Una posible explicación es la baja densidad relativa, es posible que para este tipo de estructuras sea necesaria una densidad relativa mayor para poder distinguir claramente el momento en el que termina la zona elástica y comienza la meseta.

En este caso, fue también complicado corroborar visualmente que el colapso de la estructura se debió al pandeo de las aristas y no a la deformación plástica. Sin embargo, la recuperación de la

estructura hasta llegar a un 97% de su altura inicial lo confirma.

6.2.1.4. Estructura reticular de octeto

Este tipo de estructuras está dominada por la deformación axial de sus aristas, ya que tiene un valor de hiperestaticidad interna $M > 0$ (Ver apartado 4.5.1), por lo que su comportamiento debería de ser semejante al de la siguiente curva:

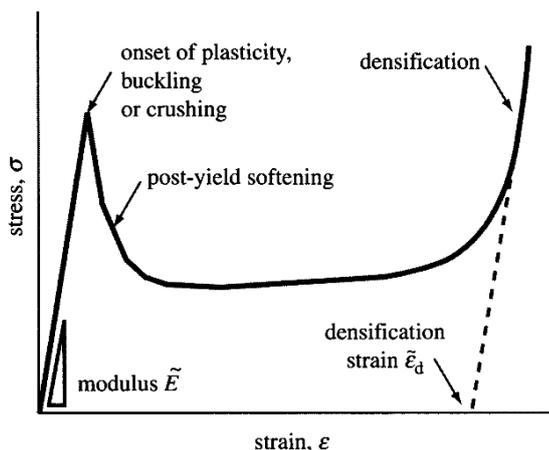


Ilustración 78. Curva de compresión-deformación de estructuras dominadas por el esfuerzo axial. (Fuente: M. F. Ashby [29])

La curva experimental obtenida es:

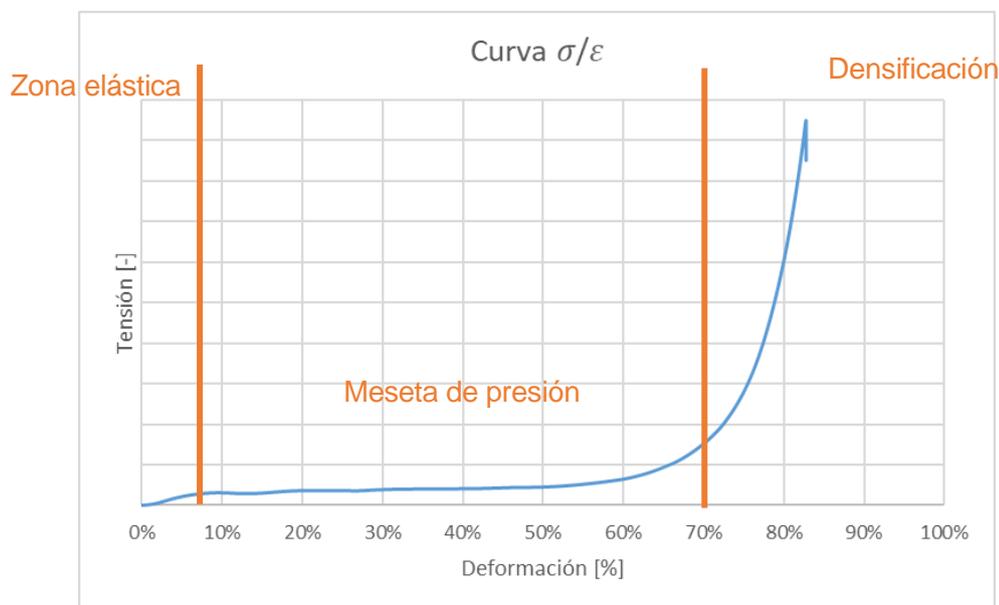


Ilustración 79. Curva de σ/ϵ del cupón de estructura tipo octeto. (Fuente: Propia)

En este caso, las zonas se diferencian algo más que en el caso anterior, pero no se diferencia este suavizamiento post-deformación. Presenta un comportamiento de estructura dominada por

esfuerzos de flexión, aunque, según el estudio teórico, no lo es. Esto puede deberse a distintas razones:

- La baja densidad del cupón, que resulta en una curva donde la zona lineal elástica y la de pandeo tienen tensiones muy bajas y transiciones muy suaves.
- Los análisis teóricos se han llevado a cabo suponiendo estructuras de celdas sin fin. El hecho de tener un cupón delimitado con celdas relativamente grandes puede haber afectado a su comportamiento.

Si se volviese a realizar el ensayo, se propondría utilizar cupones más grandes, con una densidad mayor.

En este caso, como en los anteriores, la estructura recuperó casi el 98% de su altura inicial, estando dominado su colapso por el pandeo de las aristas.

6.2.2. Módulo de Young

Con los valores resultantes del ensayo se ha calculado el módulo de Young relativo de cada una de las estructuras. En primer lugar, para cada uno de los cupones, se ha graficado con ayuda del excel únicamente la zona elástica de la curva, y se ha realizado una regresión lineal de los puntos, obteniendo una expresión de recta en la que la pendiente es el valor del módulo de Young del cupón E^* . Para obtener el valor relativo, se ha dividido E^* entre el módulo elástico del material. Los resultados son los siguientes:

Tabla 5. Módulo de Young relativo de las estructuras celulares ensayadas.

Cupón	E^*/E_s
Panal	0.0735
Voronoi	0.0080
Diamante	0.0053
Octeto	0.0061

Se puede observar que la estructura más rígida es el panal, seguido por la espuma de Voronoi, el octeto y el diamante.

Para una misma densidad relativa, la rigidez de las estructuras dominadas por deformaciones axiales, como el panal, es mayor que la de las dominadas por flexión. Esto se cumple para la estructura del panal, pero no para el octeto.

Representando los valores obtenidos en la gráfica de Ashby, para comprobar si los módulos

resultantes son similares a los ahí mostrados:

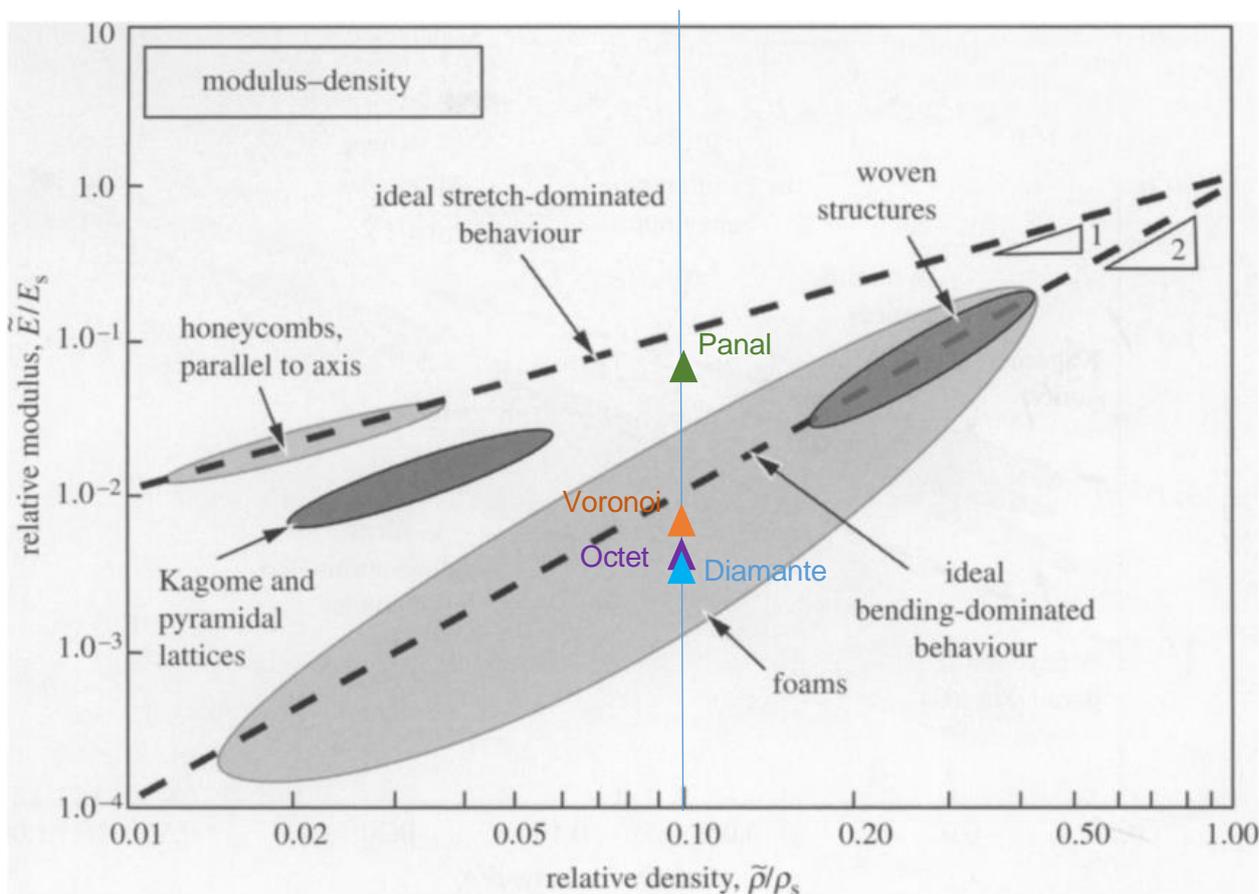


Ilustración 80. Gráfica de Ashby con los valores de módulo de Young relativo obtenidos en los ensayos experimentales. (Fuente: M. F. Ashby [29])

Se puede observar que los resultados del panel, la espuma de Voronoi y la estructura del diamante se asemejan mucho a los valores definidos por Ashby.

La estructura del octeto, sin embargo, presenta un valor más parecido al de una estructura dominada por flexión que por deformación axial, tal y como se observa también en la curva de compresión-deformación. Ello podría deberse a las razones ya comentadas.

6.2.3. Densificación

La deformación de densificación se puede obtener mediante la siguiente expresión:

$$\epsilon_d = 1 - 1.4 \frac{\rho^*}{\rho_s}$$

Para una densidad relativa $\frac{\rho^*}{\rho_s} = 0.1$, $\epsilon_d = 0.86$, es decir, la estructura densifica cuando llega a una deformación del 86%.

Se ha de destacar que este valor es único independientemente del tipo de estructura celular.

El valor de ε_d de cada uno de los cupones es, aproximadamente, el siguiente:

Tabla 6. Deformación de densificación de los cupones.

Cupón	ε_d [%]
Panal	78%
Voronoi	85%
Diamante	83%
Octeto	79%

Se tratan de valores muy próximos al 86% teórico calculado.

La pequeña diferencia se debe a que los ensayos de compresión realizados estaban limitados por la fuerza máxima que la máquina de ensayo era capaz de aplicar (9kN). De haber podido proseguir los ensayos hasta valores de fuerza mayores, probablemente se hubiera llegado a resultados de densificación incluso más cercanos al valor teórico.

7. Análisis económico

7.1. Coste del estudio

El coste de este trabajo de fin de máster, al tratarse de un estudio mayoritariamente teórico, se traduce principalmente en las horas del ingeniero, licencias de programas utilizados, amortización de los equipos y el coste de impresión de las cuatro piezas testeadas.

- Horas del ingeniero: El trabajo de fin de máster consta de 12 créditos, y si cada crédito equivale a 25 horas, corresponde a un total de 300 horas trabajadas. Esto supondría a una empresa un coste de 6100€, considerando un coste de ingeniero de 16€/hora y la seguridad social correspondiente.
- Licencias de programas utilizados:
 - o Para realizar este estudio, se ha utilizado una licencia de Microsoft 365, con valor de 69.00€ anuales. Considerando que el TFM se realiza en un cuatrimestre, el valor proporcional de esta licencia sería de 23€ [50].
 - o Se ha utilizado el software nTopology para el modelaje en 3D. Se ha utilizado la licencia de estudiantes, que es gratuita durante 9 meses.
- Amortización de los equipos: Se ha utilizado un ordenador valorado en 979.00€. Considerando un coeficiente lineal de amortización anual máximo del 25% [51], el coste proporcional sería de 81.58€.
- Coste de impresión de las cuatro piezas: En el caso de este trabajo, se han podido imprimir las piezas sin coste alguno con la tecnología de JetFusion. No obstante, si se hubieran fabricado en una empresa de prototipaje que contase con esta impresora, el coste hubiera sido de 395.87 € por pieza. Al calcularse por volumen y cantidad de polvo (y no por complejidad), el coste es el mismo para los cuatro cupones. Para obtener este valor se ha solicitado un presupuesto a ShapeWays [52].

Tabla 7. Tabla del costes del estudio.

Elementos	Coste unitario	Unidades	Coste asociado
Ingeniero	16.00 €/hora	300 horas	6100.00 € (inc. SS)
Licencia Microsoft 365	69.00 €/año	4/12 años	23.00 €
Ordenador	979.00 €	$\frac{4}{12} \cdot 979 \cdot 0.25$	81.58 €
Piezas impresas	395.87 €	4 uds.	1583.48 €
COSTE TOTAL			7788.06 €

7.2. Coste del estudio para una empresa

Se ha realizado otro estudio de costes, considerando una situación más realista: Una empresa dedica a uno de sus trabajadores a estudiar la incorporación de una estructura celular a una pieza determinada para disminuir su peso sin sacrificar ciertas prestaciones mecánicas.

En este caso, los costes asociados serían:

- Horas del ingeniero: Suponiendo que el trabajador no conociera las estructuras celulares y su comportamiento, este debería de hacer un estudio parecido al del presente proyecto, es decir, 300 horas. Además, el trabajador debería de aprender a utilizar el programa nTopology en profundidad, tanto la parte de diseño como de simulación. Una vez adquirido el conocimiento, el trabajador tendría que encontrar la estructura celular que mejor se adaptase a su pieza, diseñarla, realizar simulaciones, iterar, imprimirla y testarla. Todo ello conllevaría aproximadamente 600h (casi cuatro meses). A un coste de 16€ la hora, incluyendo la Seguridad Social, el coste del trabajador sería de 12037.50€. No obstante, para la siguiente pieza de este tipo a diseñar, el coste sería mucho menor, al estar la mayoría del conocimiento ya adquirido.
- Licencias de programas utilizados: El Microsoft 365 no es indispensable para el estudio, por lo que no se contará como coste. La licencia del nTopology sí sería necesaria, pero el coste total de esta no está publicado en su web. Leyendo experiencias previas y comentarios de usuarios, se ha encontrado que el precio ronda los 10000€ (licencia fija). Si este programa se utilizase durante 6 años (años máximos de amortización [51]), el coste proporcional sería de 520.83€.
- Amortización de los equipos: Se considera la utilización de un ordenador valorado en 979.00€. Considerando un coeficiente lineal de amortización anual máximo del 25%, el coste proporcional sería de 76.48€.
- Coste de impresión de las piezas: Se considera que, para llegar a la pieza final, el ingeniero imprime 3 tipos de estructuras, elige una y realiza dos iteraciones de mejora, el total de piezas impresas es de 5. Si su volumen y densidad fuese similar a las del presente estudio, y eligiese la misma tecnología de impresión, el coste sería de 395.87€ por pieza.

Tabla 8. Tabla de costes de la aplicación de estructuras celulares a una pieza determinada.

Elementos	Coste unitario	Unidades	Coste asociado
Ingeniero	16.00 €/hora	600 horas	12037.50 € (inc. SS)
Licencia nTopology	10.000	$\frac{3.75}{12} \cdot \frac{10000}{6}$	520.83 €
Ordenador	979.00 €	$\frac{3.75}{12} \cdot 979 \cdot 0.25$	76.48 €
Piezas impresas	395.87 €	5 uds.	1979.35 €
COSTE TOTAL	14613.33 €		

8. Impacto ambiental

Al tratarse este trabajo de fin de máster de un estudio mayoritariamente teórico, no tiene un impacto ambiental claramente definible. No obstante, la aplicación de lo estudiado, es decir, el diseño y utilización de sólidos celulares inspirados en la naturaleza, requiere la manufactura mediante fabricación aditiva. Por ello, se ha analizado el impacto ambiental que conlleva la fabricación mediante tecnologías de fabricación aditiva en comparación con la fabricación de piezas mediante métodos tradicionales como la inyección de plástico o el mecanizado.

En el artículo [53] se compara el consumo de energía en la fabricación aditiva con la fabricación con métodos comunes. Para ello, tiene en cuenta todo el ciclo de procesos para llegar a la pieza final, desde la fabricación del polvo, el propio procedimiento de fabricación y los procesos de postratamiento.

El consumo de energía varía mucho dependiendo del tipo de tecnología a utilizar. Tecnologías como el SLS, que produce piezas de uso final con propiedades mecánicas aceptables, tiene un consumo específico de energía de 83 a 588MJ/kg, dependiendo este valor de variables del proceso como el espesor de capa. La parte del proceso dominante en cuanto al consumo de energía es el propio proceso de fabricación (66-75%), seguido por la producción de polvo (10-12%) y el post procesado, negligible. En resumen, los métodos de fabricación aditiva consumen casi diez veces más por kg producido que un método de fabricación usual, lo que conllevaría un impacto ambiental negativo.

No obstante, este tipo de fabricación aporta otra serie de valores que podrían compensar esta diferencia en el consumo. La posibilidad de disminuir el peso de piezas, con impacto directo en el consumo de combustible de automóviles, aeronaves o vehículos espaciales es un ejemplo de ello. Otro sería la posibilidad de fabricar con esta tecnología piezas originales, únicas y personalizadas, que podrían sustituir con una vida útil mayor a piezas producidas en serie. Además, dada esta producción reducida, el stock de productos estaría más equilibrado con la demanda.

Sin embargo, aun teniendo en cuenta estos puntos, creemos que es necesario que en el sector de la fabricación aditiva se trabaje en dirección a la sostenibilidad y la eficiencia energética.

9. Conclusiones

Este trabajo comenzó con una curiosidad, el conocer qué podría aportar la naturaleza a la ingeniería mecánica, y se han encontrado una gran cantidad de formas en las que se podría utilizar la inspiración en los elementos naturales como forma de innovar o solucionar desafíos. Además, la clasificación realizada de la biomimética y los ejemplos ayudan, a la hora de buscar inspiración, a saber la manera de encontrarla, saber dónde mirar.

Esta búsqueda de elementos biomiméticos para utilizar en la ingeniería nos llevó a los sólidos celulares, y a todas las opciones de diseño que habilitan. Estos pueden ser utilizados para una gran cantidad de aplicaciones, como el aligeramiento de peso, la absorción de energía, el aislamiento térmico o su utilización en catalizadores. Ofrecen opciones, como la modificación de propiedades de forma local o su carácter multifuncional, que pueden ser muy interesantes a la hora de diseñar piezas. Actualmente, se están diseñando cascos personalizados, suelas de zapato, asientos de automóviles y piezas aligeradas para la industria aeronáutica, entre otros ejemplos, con estructuras celulares personalizadas para la aplicación.

Para poder realizar un diseño o selección de estructuras celulares, en primer lugar, se han de conocer todas las variables de diseño, todas las elecciones que se pueden tomar en el proceso de creación de una (teselado, elementos, conectividad). Por otro lado, es importante conocer, aunque sea de forma aproximada, sus principales propiedades mecánicas, su comportamiento ante el esfuerzo. Las estructuras celulares se pueden clasificar en dos tipos principales: En aquellas dominadas por deformaciones axiales y las dominadas por flexión. Hemos podido observar cómo difieren las propiedades y el comportamiento de cada clase de estructura, para poder utilizarlas para las aplicaciones. Hemos deducido las propiedades mecánicas de las tres estructuras más utilizadas en la ingeniería actualmente: Los panales, las espumas (que representan a las estructuras dominadas por flexión) y las estructuras reticulares (dependiendo de su conectividad y geometría, pertenecerán a uno u otro grupo, pero para el análisis suponemos que están dominadas por la deformación axial, y representan a este último tipo. Si no es así, se comportarán como una espuma). Hemos incluido el proceso de deducción de las expresiones, ya que tiene mucha utilidad como guía a la hora de deducir las propiedades de otros sólidos, para saber cómo proceder a la hora de calcularlas.

En este estudio teórico, por ejemplo, se ha podido observar como aquellas estructuras dominadas por las deformaciones axiales presentan, para la misma densidad relativa, una rigidez 10 veces mayor que las dominadas por flexión, y por la forma de su curva, son más adecuadas para aplicaciones como la aligeración de peso, con requisitos mecánicos mayores. El segundo tipo es más adecuado para la absorción de energía. Hay que tener en cuenta que únicamente hemos estudiado el comportamiento de ellas a compresión y tracción, analizando su curva y su forma de colapsar. Como continuación al proyecto, sería interesante ampliar este análisis a otro tipo de esfuerzos, como la flexión, la torsión o esfuerzos repetitivos (fatiga), ya que son pocas las

aplicaciones cuyo único esfuerzo sea axial.

Una vez conocido el comportamiento mecánico de las estructuras, se han propuesto varias herramientas para facilitar la elección. El gráfico de Ashby y las leyes de escala de la densidad relativa son algunas de ellas, que permiten comparar estructuras de distintos tipos teniendo en cuenta aquellos parámetros que se consideren relevantes para el diseño.

Otra de las herramientas de selección es la de la biomimética, la inspiración en los sólidos celulares de la naturaleza. Hemos podido encontrar sólidos celulares de teselados distintos, de distintos elementos, y con funcionalidades diversas. Algunos de los elementos naturales cuentan con estructuras celulares para aumentar su resistencia ante el pandeo, rigidez ante la flexión, resistencia a impacto, entre otras, que en ciertos casos se combinan con otras funcionalidades como el almacenamiento en el caso de los panales. Este enfoque nos permite utilizar en nuestros diseños estructuras celulares o combinaciones de ellas que ya en la naturaleza han sido optimizadas para esa funcionalidad.

Por último, hemos realizado un ensayo de compresión de cuatro tipos de estructuras celulares naturales distintas, para poder compararlas con su modelo teórico. Para ello, hemos tenido que familiarizarnos con un software de diseño de este tipo de estructuras, que opinamos que, gracias a las herramientas que ofrece, podría ganar más y más relevancia en el campo del diseño en los próximos años. Los resultados de estos ensayos han corroborado, en tres de los cuatro casos, el modelo teórico propuesto. Esto refleja que esta modelización teórica nos puede dar una idea fiable del comportamiento mecánico de las estructuras sin necesidad de ensayarlas todas, lo que supone un ahorro de coste. Además, demuestra la accesibilidad de este tipo de diseños. Para una continuación del proyecto, sería interesante, además de repetir el ensayo con la estructura reticular del octeto con un cupón más denso, ensayar una estructura celular concreta con densidades distintas, y obtener su ley de escala respecto a la densidad relativa.

El estudio económico muestra que, con una inversión de casi 15000€, una empresa puede dedicar a un trabajador al diseño de este tipo de estructuras para una pieza, disminuyendo este coste para las siguientes, al tener gran parte del conocimiento adquirido y tener que dedicar menos horas. Se trata de una inversión cuantiosa, pero que podría compensar si con ello se ganase funcionalidad en la pieza final.

Por otro lado, se muestra el impacto ambiental de la industria aditiva, mucho mayor al de otros tipos de fabricación. Se trata de una industria relativamente joven que ha de trabajar hacia la sostenibilidad.

En resumen, se trata de un trabajo con un marco teórico muy amplio, que ofrece las herramientas para poder realizar un diseño con estructuras celulares, y dotar a la pieza de multifuncionalidad, y de otros aspectos hasta ahora inexplorados en el campo del diseño.

10. Bibliografía

10.1. Referencias bibliográficas

- [1] J. F. . Vincent, O. A. Bogatyreva, N. R. Bogatyrev, A. Bowyer, and A.-K. Pahl, "Biomimetics: its practice and theory," *J. R. Soc. Interface*, vol. 3, no. 9, pp. 471–482, Aug. 2006, doi: 10.1098/rsif.2006.0127.
- [2] M. Zari, "Regenerative urban design and ecosystem biomimicry," 2018.
- [3] N. Claggett, A. Surovek, W. Capehart, and K. Shahbazi, "Termite Mounds: Bioinspired Examination of the Role of Material and Environment in Multifunctional Structural Forms," *J. Struct. Eng. (United States)*, vol. 144, no. 7, pp. 1–8, 2018, doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002043.
- [4] M. Pawlyn, *Biomimicry in Architecture*. Riba Publishing, 2011.
- [5] R. Kappel, C. Mattheck, K. Bethge, and I. Tesari, "Bamboo as a composite structure and its mechanical failure behaviour," 2004.
- [6] M. Yacubov and D. Smith, "Nature Does it Better: Biomimicry in Structural and Architectural Design," 2020.
- [7] R. C. Eberhart, "Particle Swarm Optimization."
- [8] Lima M, J. Q. ; Barán, and Benjamín, "Inteligencia Artificial. Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial Asociación Española para la Inteligencia Artificial España," *Rev. Iberoam. Intel. Artif.*, vol. 10, no. 32, pp. 67–76, 2006.
- [9] G. Nalcaci and G. Nalcaci, "Modeling and Implementation of an Adaptive Facade Design for Energy Efficiently Buildings Based Biomimicry," in *8th International Conference on Smart Grid, icSmartGrid 2020*, 2020, pp. 140–145, doi: 10.1109/icSmartGrid49881.2020.9144954.
- [10] I. Silva Cruz and T. Katz-Gerro, "Urban public transport companies and strategies to promote sustainable consumption practices," *J. Clean. Prod.*, vol. 123, pp. 28–33, Jun. 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.12.007.
- [11] "EASTGATE. Mick Pearce." [Online]. Available: <https://www.mickpearce.com/Eastgate.html>. [Accessed: 14-Feb-2021].
- [12] N. S. Kumar, R. P. S.-A. P. A, and undefined 2020, "A review on biological and biomimetic materials and their applications," *Springer*.
- [13] W. Tang *et al.*, "One step electrochemical fabricating of the biomimetic graphene skins with superhydrophobicity and superoleophilicity for highly efficient oil-water separation," *Elsevier*, 2019, doi: 10.1016/j.seppur.2019.116293.
- [14] P. X. Ma, "Scaffolds for tissue fabrication," *Mater. Today*, vol. 7, no. 5, pp. 30–40, May 2004, doi: 10.1016/S1369-7021(04)00233-0.

- [15] A. du Plessis *et al.*, “Beautiful and Functional: A Review of Biomimetic Design in Additive Manufacturing,” *Addit. Manuf.*, vol. 27, pp. 408–427, 2019, doi: 10.1016/j.addma.2019.03.033.
- [16] F. Fish, P. Weber, M. Murray, and L. Howle, “The tubercles on humpback whales’ flippers: application of bio-inspired technology,” 2011.
- [17] M. D. Bolzon, R. M. Kelso, and M. Arjomandi, “Tubercles and Their Applications,” *J. Aerosp. Eng.*, vol. 29, no. 1, p. 04015013, Jan. 2016, doi: 10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0000491.
- [18] M. Nowak, J. Sokołowski, and A. Żochowski, “Biomimetic Approach to Compliance Optimization and Multiple Load Cases,” *J. Optim. Theory Appl.*, vol. 184, no. 1, pp. 210–225, Jan. 2020, doi: 10.1007/s10957-019-01502-1.
- [19] “Lightweighting Solutions | Altair.” [Online]. Available: <https://www.altair.com/lightweighting/>. [Accessed: 17-Apr-2021].
- [20] Y. Gao, A. Ellery, M. N. Sweeting, and J. Vincent, “Bioinspired Drill for Planetary Sampling: Literature Survey, Conceptual Design, and Feasibility Study,” *arc.aiaa.org*, vol. 44, no. 3, pp. 703–709, 2006, doi: 10.2514/1.23025.
- [21] M. G. Alkalla, Y. Gao, and A. Bouton, “Customizable and optimized drill bits bio-inspired from wood-wasp ovipositor morphology for extraterrestrial surfaces,” in *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, AIM*, 2019, vol. 2019-July, doi: 10.1109/AIM.2019.8868816.
- [22] “Cellular Solids 1: Structures, Properties and Engineering Applications | edX.” [Online]. Available: <https://www.edx.org/course/cellular-solids-1-structures-properties-and-engine>. [Accessed: 21-Mar-2021].
- [23] L. J. Gibson and M. F. Ashby, *Cellular solids: Structure and properties, second edition*. Cambridge University Press, 2014.
- [24] L. J. Gibson, M. F. Ashby, and B. A. Harley, *Cellular Materials in Nature and Medicine*. 210AD.
- [25] A. Velasco-Hogan, J. Xu, and M. A. Meyers, “Additive Manufacturing as a Method to Design and Optimize Bioinspired Structures,” *Advanced Materials*, vol. 30, no. 52. Wiley-VCH Verlag, p. 1800940, 22-Dec-2018, doi: 10.1002/adma.201800940.
- [26] G. Savio, S. Rosso, R. Meneghello, and G. Concheri, “Geometric modeling of cellular materials for additive manufacturing in biomedical field: A review,” *Appl. Bionics Biomech.*, vol. 2018, 2018, doi: 10.1155/2018/1654782.
- [27] D. Bhate, C. A. Penick, L. A. Ferry, and C. Lee, “Classification and selection of cellular materials in mechanical design: Engineering and biomimetic approaches,” *Designs*, vol. 3, no. 1. MDPI AG, pp. 1–31, 19-Mar-2019, doi: 10.3390/designs3010019.
- [28] M. S. Azmi, R. Ismail, R. Hasan, and M. R. Alkahari, “Vibration analysis of fused deposition modelling printed lattice structure bar for application in automated device,” *Int. J. Eng. Technol.*, vol. 7, no. 3, pp. 21–24, 2018, doi: 10.14419/ijet.v7i3.17.16614.

- [29] M. F. Ashby, "The properties of foams and lattices," *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 364, no. 1838, pp. 15–30, Jan. 2006, doi: 10.1098/rsta.2005.1678.
- [30] S. Pellegrino and C. R. Calladine, "Matrix analysis of statically and kinematically indeterminate frameworks," *Int. J. Solids Struct.*, vol. 22, no. 4, pp. 409–428, Jan. 1986, doi: 10.1016/0020-7683(86)90014-4.
- [31] M. E. Lynch, M. Mordasky, L. Cheng, and A. To, "Design, testing, and mechanical behavior of additively manufactured casing with optimized lattice structure," *Addit. Manuf.*, vol. 22, pp. 462–471, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.addma.2018.05.021.
- [32] T. C. Hales, "The Honeycomb Conjecture," *Discret. Comput Geom*, vol. 25, pp. 1–22, 2001, doi: 10.1007/s004540010071.
- [33] M. du Sautoy, *Symmetry: A Journey into the Patterns of Nature*. HarperCollins, 2008.
- [34] P. Fratzl, O. Kolednik, F. D. Fischer, and M. N. Dean, "The mechanics of tessellations-bioinspired strategies for fracture resistance," *Chemical Society Reviews*, vol. 45, no. 2. Royal Society of Chemistry, pp. 252–267, 21-Jan-2016, doi: 10.1039/c5cs00598a.
- [35] R. Huiskes, R. Rulmerman, G. H. Van Lenthe, and J. D. Janssen, "Effects of mechanical forces on maintenance and adaptation of form in trabecular bone," *Nature*, vol. 405, no. 6787, pp. 704–706, Jun. 2000, doi: 10.1038/35015116.
- [36] S. R. Jongerius and D. Lentink, "Structural Analysis of a Dragonfly Wing," *Springer*, doi: 10.1007/s11340-010-9411-x.
- [37] J.-H. Dirks and D. Taylor, "Veins Improve Fracture Toughness of Insect Wings," *PLoS One*, vol. 7, no. 8, p. e43411, Aug. 2012, doi: 10.1371/journal.pone.0043411.
- [38] L. J. Gibson, "The hierarchical structure and mechanics of plant materials," *Journal of the Royal Society Interface*, vol. 9, no. 76. Royal Society, pp. 2749–2766, 07-Nov-2012, doi: 10.1098/rsif.2012.0341.
- [39] T. McNulty *et al.*, "A Framework for the Design of Biomimetic Cellular Materials for Additive Manufacturing."
- [40] M. C. Fernandes, J. Aizenberg, J. C. Weaver, and K. Bertoldi, "Mechanically robust lattices inspired by deep-sea glass sponges," *Nat. Mater.*, vol. 20, no. 2, pp. 237–241, Feb. 2021, doi: 10.1038/s41563-020-0798-1.
- [41] Y. Seki, B. Kad, D. Benson, and M. A. Meyers, "The toucan beak: Structure and mechanical response," *Mater. Sci. Eng. C*, vol. 26, no. 8, pp. 1412–1420, Sep. 2006, doi: 10.1016/j.msec.2005.08.025.
- [42] S. F. Fischer *et al.*, "Pummelos as Concept Generators for Biomimetically Inspired Low Weight Structures with Excellent Damping Properties," *Adv. Eng. Mater.*, vol. 12, no. 12, pp. B658–B663, Dec. 2010, doi: 10.1002/adem.201080065.
- [43] F. Barthelat and H. D. Espinosa, "An experimental investigation of deformation and fracture of nacre-mother of pearl," *Exp. Mech.*, vol. 47, no. 3, pp. 311–324, Jun. 2007, doi: 10.1007/s11340-007-9040-1.

- [44] G. N. Karam and L. J. Gibson, "Biomimicking of animal quills and plant stems: natural cylindrical shells with foam cores," *Mater. Sci. Eng. C*, vol. 2, no. 1–2, pp. 113–132, Dec. 1994, doi: 10.1016/0928-4931(94)90039-6.
- [45] B. Jetté, V. Brailovski, M. Dumas, C. Simoneau, and P. Terriault, "Femoral stem incorporating a diamond cubic lattice structure: Design, manufacture and testing," *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.*, vol. 77, pp. 58–72, 2018, doi: 10.1016/j.jmbbm.2017.08.034.
- [46] "Next-Generation Design & Engineering Software | nTopology." [Online]. Available: <https://ntopology.com/>. [Accessed: 11-Apr-2021].
- [47] "HP 3D Jet Fusion 5200 - Impresora 3D comercial e industrial | HP® España." [Online]. Available: <https://www8.hp.com/es/es/printers/3d-printers/products/multi-jet-fusion-5200.html>. [Accessed: 18-Apr-2021].
- [48] "Multi Jet Fusion | Materialise - Innovators you can count on." [Online]. Available: <https://www.materialise.com/es/manufacturing/tecnologia-de-impresion-3d/multi-jet-fusion>. [Accessed: 18-Apr-2021].
- [49] "Ultrasint TPU 90A-01 | Materialise - Innovators you can count on." [Online]. Available: <https://www.materialise.com/es/manufacturing/materiales/ultrasint-tpu-90a-01>. [Accessed: 18-Apr-2021].
- [50] "Comparar todos los planes de Microsoft 365 (anteriormente Office 365): Microsoft Store." [Online]. Available: <https://www.microsoft.com/es-es/microsoft-365/buy/compare-all-microsoft-365-products-b>. [Accessed: 20-Apr-2021].
- [51] "Tabla de coeficientes de amortización lineal. - Agencia Tributaria." [Online]. Available: https://www.agenciatributaria.es/AEAT.internet/Inicio/_Segmentos_/Empresas_y_profesionales/Empresas/Impuesto_sobre_Sociedades/Periodos_impositivos_a_partir_de_1_1_2015/Base_imponible/Amortizacion/Tabla_de_coeficientes_de_amortizacion_lineal_.shtml. [Accessed: 21-Apr-2021].
- [52] "Shapeways: 3D Printing Service." [Online]. Available: <https://www.shapeways.com/>. [Accessed: 21-Apr-2021].
- [53] K. Kellens, R. Mertens, D. Paraskevas, W. Dewulf, and J. R. Duflou, "Environmental Impact of Additive Manufacturing Processes: Does AM Contribute to a More Sustainable Way of Part Manufacturing?," in *Procedia CIRP*, 2017, vol. 61, pp. 582–587, doi: 10.1016/j.procir.2016.11.153.
- [54] P. Watts and F. E. Fish, "THE INFLUENCE OF PASSIVE, LEADING EDGE TUBERCLES ON WING PERFORMANCE."
- [55] N. Jin, F. Wang, Y. Wang, B. Zhang, H. Cheng, and H. Zhang, "Failure and energy absorption characteristics of four lattice structures under dynamic loading," *Mater. Des.*, vol. 169, p. 107655, May 2019, doi: 10.1016/j.matdes.2019.107655.

11. Agradecimientos

Me gustaría agradecer a mi tutor Josep Maria Pons su disposición y sus consejos a lo largo de todo el proyecto. Asimismo, me gustaría dar las gracias a mi familia y amigos, en Las Palmas y en Barcelona, por su apoyo durante todo este año. También me gustaría agradecer a mis compañeros de HP, por sus ánimos y consejos.

Gracias a todos.