

## Selección de materiales para el diseño de ingeniería

### Selection of materials for engineering design

**Iván Alonso Lira Hernández\*** Estudiante del Doctorado en Diseño y Desarrollo de Productos de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, CDMX. Actualmente trabaja en la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Área Académica de Ingeniería y Arquitectura, Laboratorio de Manufactura.

**Rodrigo Ramírez Ramírez\*\*** Doctor en Diseño, Líneas de Nuevas Tecnologías. Actualmente labora en la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, CDMX. Profesor Asociado "D" de Tiempo Completo. Profesor del Posgrado en Diseño en los niveles de Especialización, Maestría y Doctorado en la línea de Nuevas Tecnologías, opciones CAD/CAM e Hipermédicos.

#### Resumen

Los materiales están directamente relacionados con el diseño, estas dos áreas de conocimiento son fundamentales para el desarrollo e innovación de productos. La ciencia de los materiales tiene como principal función el estudio y la descripción de las características o propiedades de los diversos tipos de materiales que existen y la búsqueda o descubrimiento de nuevos materiales que cuenten con mejores propiedades químicas, estructurales, físicas y mecánicas, además de asistir en la selección de los materiales durante el diseño. En lo que respecta al diseño, su principal cometido consiste en crear y desarrollar partes y/o productos que sean capaces de cautivar y convencer al cliente. Es importante resaltar que los dos campos de conocimiento están completamente interrelacionados y su relación es bidireccional, constante

y permanente, debido a que siempre que se desee desarrollar una idea en algo tangible será imprescindible contemplar el empleo de un material para poder materializarla. La presente investigación tiene como propósito principal dar a conocer una descripción concisa y precisa de cada área del saber, su respectiva función y la complementación entre ellas, además de que podamos identificar el orden, la relación y la jerarquía a partir de conocer con claridad la selección de materiales para algunos tipos de diseño que existen y proponer una metodología sobre la selección de materiales para el diseño de ingeniería.

**Palabras clave:** Materiales, proceso, diseño, diseño de ingeniería, método de elemento finito.

\*Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Área Académica de Ingeniería y Arquitectura, Laboratorio de Manufactura. [ilira@uaeh.edu.mx](mailto:ilira@uaeh.edu.mx)

\*\*Universidad Autónoma Metropolitana, unidad Azcapotzalco [xurod@yahoo.com](mailto:xurod@yahoo.com)

## Abstract

The materials are directly related to the design, these two fields of knowledge are fundamental for the development and innovation of products, the material's science main function is the study, characteristics and its properties of diverse types of materials that exist, the search and discovery of new chemical, structure, physical and mechanical properties to further assist in the selection of materials during design.

Regarding the design, its main task is to create and develop parts and/or products that are able to captivate and to convince the client. It is important to highlight that the two fields of knowledge are completely interrelated and their relationship is bidirectional, constant and permanent, because whenever you want to develop an idea into something tangible, it will be essential to contemplate the use of a material to be able to materialize it. The main purpose of this research is to present a concise and accurate description of each area of knowledge, its respective function and complementation that exist between them, as well as to identify the order, the relationship and hierarchy among them, starting from knowing with clarity the material selection for some types of design that exist and propose a methodology on selection of materials for engineering design.

**Keywords:** Materials, Process, Design, Engineering Design, Finite Element Method.

# Introducción

Frecuentemente se conoce y es sabido que para poder manufacturar un producto se requiere emplear un material, y aunque muchas veces se generan nuevos productos no necesariamente van acompañados de nuevos materiales. Estos materiales van desde, por ejemplo, cobre, hierro fundido, latón, que han estado disponibles durante miles de años, hasta los materiales avanzados, recientemente desarrollados, por ejemplo, materiales compuestos, cerámicos y aceros de alto rendimiento, entre otros. Después de definir los materiales o el material a utilizar para manufacturar un componente, y antes de pasar a la manufactura del mismo, se requiere de un diseño, el cual se hace frecuentemente mediante algún software, mejor conocido como CAD, de acuerdo a sus siglas en inglés, que en español es Diseño Asistido por Computadora.

Actualmente, una vez que se tiene un modelo en 3D es posible realizar simulaciones sobre el mismo para conocer determinados comportamientos; de esta manera, y en algunos casos, no es necesario fabricar el prototipo físico para someterlo a determinadas fuerzas para su análisis, lo anterior es posible a través del CAE, mejor conocido por sus siglas en inglés, que quiere decir Ingeniería Asistida por Computadora.

Si la simulación virtual del modelo 3D cumple con lo requerido, se puede pasar al CAM para su fabricación en caso de requerir la parte o componente, que no es otra cosa que la Manufactura Asistida por Computadora. Por otro lado, la manufactura aditiva es un tipo de sistema de fabricación no convencional, donde los modelos físicos se fabrican automáticamente con la ayuda de datos CAD. Estos procesos también se conocen como RP (Rapid Prototyping) o impresión 3D, ya que pueden construir partes complejas rápidamente utilizando datos CAD en 2D.

La pérdida mínima de material y la ausencia de dispositivos de fijación son la principal ventaja de este proceso de fabricación, que lo hace menos costoso y más rápido (Jyothish, Pandey, & Wimpenny, 2019).

Como se puede observar, la relación de los materiales y el diseño es imprescindible, la ausencia de una de las dos impide la generación de un producto de cualquier ámbito del sector manufacturero. Respecto a la jerarquía que hay entre el diseño y los materiales, esto dependerá del producto a fabricar, así como del uso que se le dará, puesto que en la mayoría de las ocasiones el propósito del mismo justificará la prioridad o jerarquía que se implementará en el diseño y en el material.

Quizá para algunas personas lo más importante radicará en el diseño y no les importa el material con el que se haya fabricado determinado producto, y en algunos otros casos el diseño es lo que menos importa. Algunos otros desearán que el producto les satisfaga en ambos. Sin embargo, no es posible enunciar si una es más importante que otra, pero lo que sí se puede destacar y resaltar es que, indudablemente, están ligadas e interrelacionadas y la valoración o peso que cada persona le pueda dar dependerá no sólo de los factores condicionados por el mismo producto, sino por otro tipo de variables externas, que muchas veces tienen que ver con el propio usuario o consumidor.

Los productos se diferencian no sólo por sus funciones técnicas, sino también por los materiales de los que están hechos y lo que significan para el usuario. Recientemente Elvin Karana y colaboradores, en su libro titulado *Materials Experience Fundamentals of Materials and Design*, hablaron sobre la selección de materiales para el diseño industrial, para el diseño de producto y la selección de materiales en el diseño técnico.

## Diseño

A diferencia de los requisitos de diseño técnico, que se definen en términos cuantitativos como los que pueden evaluarse objetivamente, las características del diseño industrial se expresan en términos cualitativos, que son más subjetivos y difíciles de interpretar (Karana, Pedgley, & Rognoli, 2014).

## Selección de materiales en el diseño del producto

Para una selección efectiva de materiales en el diseño del producto, los diseños técnicos e industriales deben considerarse a fondo. Además, para que el diseño de un producto sea exitoso, se deben realizar diseños técnicos e industriales, idealmente juntos, como se muestra a continuación en la Figura 1. Sin embargo, esto significa que las propiedades y las características divergentes de los materiales entre sí deben conciliarse simultáneamente. Esto no es fácil, porque es difícil combinar las propiedades y características de los materiales con los requisitos de diseño a través de diseños técnicos e industriales, respectivamente.

Lo anterior a menudo genera conflictos cuando se trata de satisfacer los requisitos de diseño con prioridades que se deben dar a los requisitos que se consideran esenciales y restringidos por los materiales que permitirán.

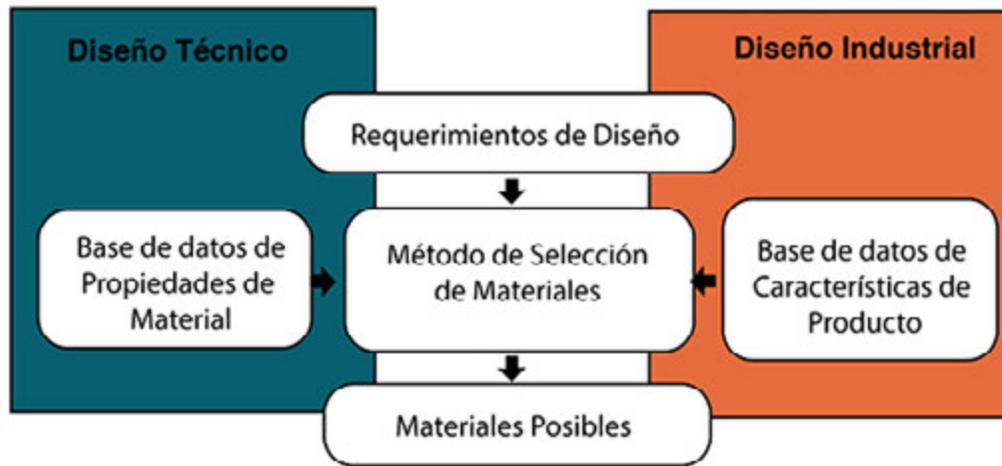


Figura 1. El papel de la selección de materiales en el diseño de productos (Karana, Pedgley, & Rognoli, 2014).

## Diseño

El término diseño se encuentra implícito en muchos campos del conocimiento, y en algunos de ellos tiene su nombre específico y su reconocimiento. El diseño es una palabra omnipresente: a menudo está a la vista y en muchos contextos diferentes. Por ejemplo, en nuestros periódicos diarios leemos acerca de personas que son diseñadores de automóviles, diseñadores de vestuario, diseñadores arquitectónicos, diseñadores de sistemas de sonido, diseñadores de aviones, diseñadores de organizaciones, diseñadores de carreteras, diseñadores de sistemas, y así sucesivamente (Dym & Brown, 2012). Aunque en algunos otros casos se cree que el diseño va implícito en todas las áreas y los diversos tipos de ingeniería. El diseño es una actividad central en ingeniería. De hecho, Herbert A. Simon ha argumentado que el diseño es la actividad central que define la ingeniería, o al menos lo distingue de las ciencias "puras" porque el papel de la ingeniería es la creación de artefactos.

## Diseño de ingeniería

"Generación sistemática, inteligente para la evaluación de las especificaciones de los artefactos en cuanto a su forma y función para lograr los objetivos y satisfacer las limitaciones o requerimientos establecidos" (Dym & Brown, 2012).

Esta definición incorpora muchas suposiciones de diseños en representaciones que incluyen forma y función, y se puede traducir a partir de estas representaciones en un conjunto de especificaciones de fabricación para la producción del artefacto diseñado.

También está propuesto el siguiente diagrama para la selección de materiales en cada etapa del proceso de diseño, donde se puede apreciar que en primer lugar es necesario considerar la necesidad requerida del mercado, para posteriormente efectuar cada una de las etapas hasta llegar al producto deseado. El diagrama es muy general y no se puede conocer con precisión algún procedimiento de selección en el que se conozca con mayor detalle la relación entre los materiales y el diseño.

**"El diseño es una palabra omnipresente: a menudo está a la vista y en muchos contextos diferentes"**

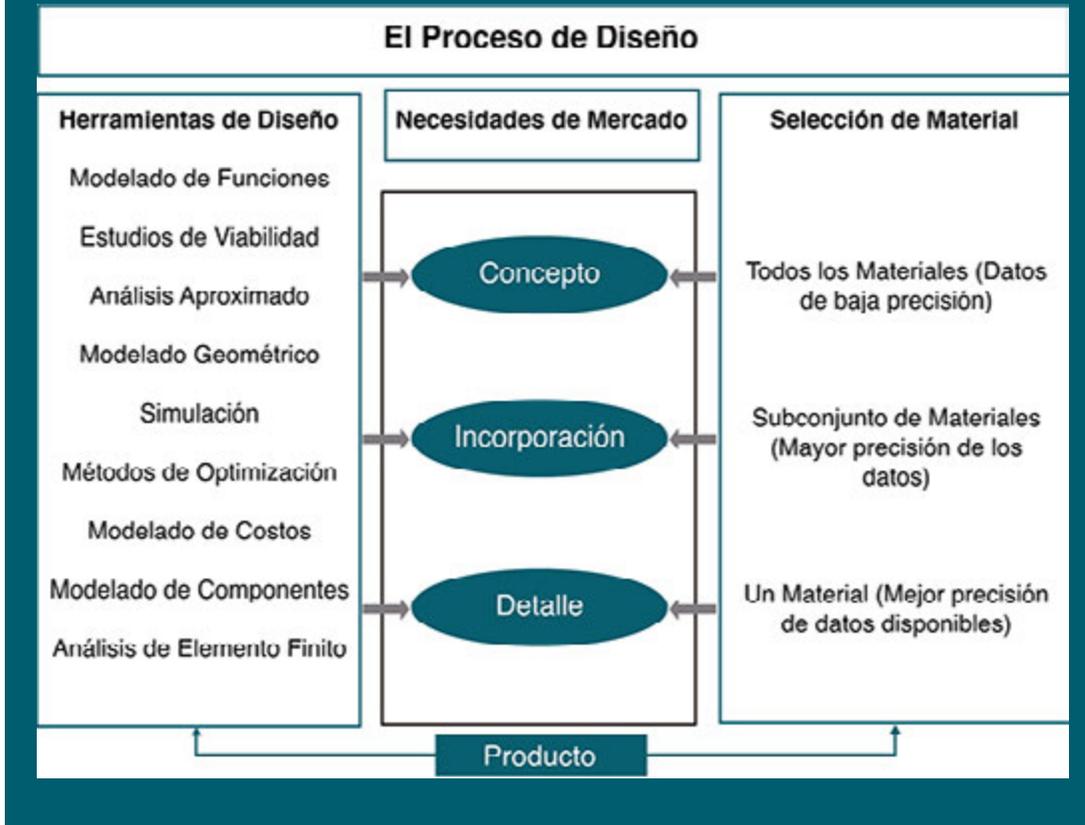


Figura 2. Diagrama de flujo de diseño, que muestra cómo las herramientas de diseño y la selección de materiales ingresan al procedimiento. Se necesita información sobre los materiales en cada etapa, pero a niveles muy diferentes de amplitud y precisión (Ashby, 2011).

El diseño de ingeniería se encarga de convertir una idea en especificaciones técnicas, donde ya se tiene seleccionado el material y el proceso más adecuado para el desarrollo de un producto. En este tipo de diseño están involucrados dos campos muy amplios y similares en algunos aspectos, por lo que en el diseño de ingeniería se deberá buscar fusionar lo mejor de cada uno de ellos para obtener como resultado productos que cumplan al cien por ciento con su propósito. Aunque desde el diseño se hace un esfuerzo por definir no sólo la forma, sino también la función, qué mejor que se tengan la certeza y la garantía de la función, al dejársela al campo que se especializa en ella y que corresponde, en mayor parte, a la ingeniería.

En este trabajo de investigación se hace una propuesta sobre la selección de los materiales para el diseño de ingeniería. Sin embargo, es importante resaltar que no existe algún método o procedimiento de selección único y/o estándar para llevar a cabo la selección de materiales en el diseño, y menos si se maneja únicamente el concepto de diseño, puesto que el mismo término es inmenso. Sin embargo, si se acota el concepto como, por ejemplo, selección de materiales en el diseño de producto o en el diseño industrial, es más factible desarrollar una propuesta de selección de materiales que resulte más específica y óptima.

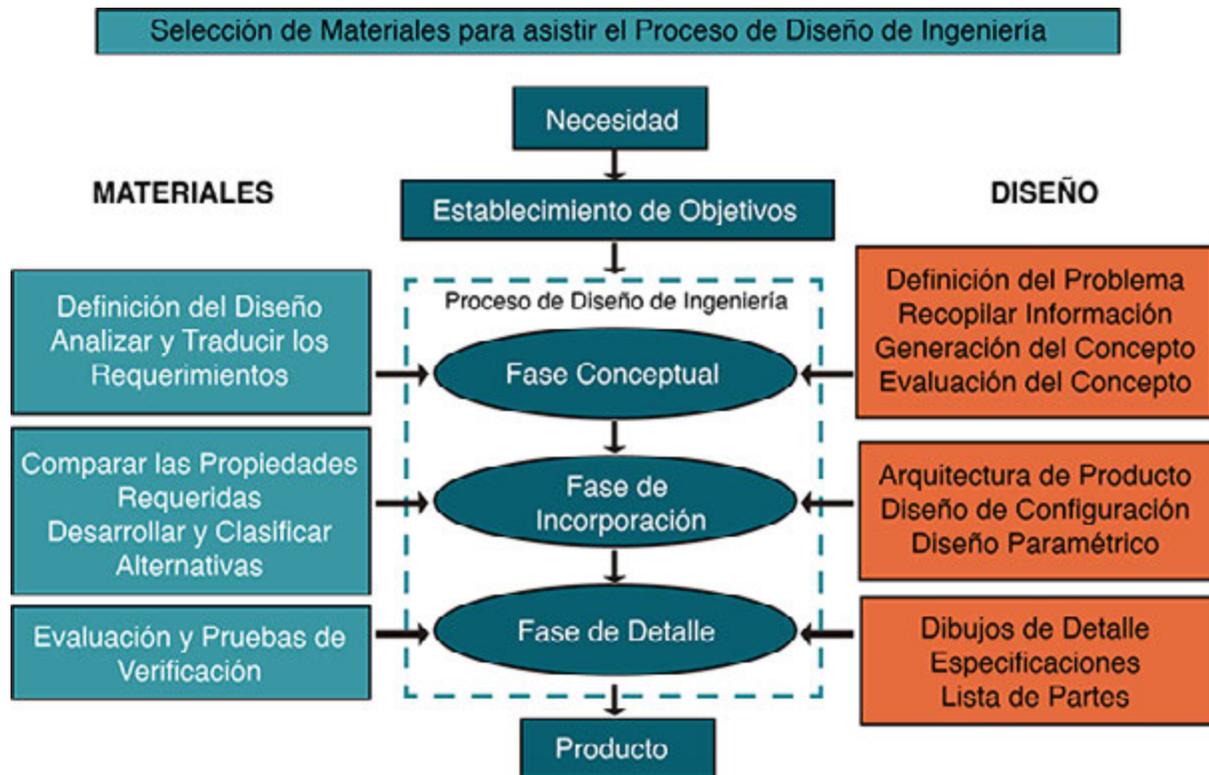


Figura 3. Selección de Materiales en el Proceso de Diseño de Ingeniería. Elaboración propia.

El esquema anterior representa la estructura de las etapas y pasos que deberán de llevarse a cabo para poder diseñar y desarrollar un producto o un componente o parte. La mayoría de los productos surgen de alguna necesidad, aunque algunos otros se generan a partir de buscar satisfacer determinados caprichos o por algunas otras razones, pero sea cual sea la situación, siempre será necesario recurrir a una serie de pasos de forma ordenada y sobre todo a la aplicación de ciertas

disciplinas o áreas de conocimiento de manera interrelacionada, como son los propios materiales, el diseño y la ingeniería. La selección y evaluación de materiales son consideraciones fundamentales en el diseño de ingeniería. Si se hace correctamente, y de una manera sistemática, el tiempo y el costo considerables se pueden ahorrar en el trabajo del diseño, y los errores del diseño pueden ser evitados.

El esquema propuesto consta de tres fases importantes, las cuales se encuentran dentro del proceso de diseño de ingeniería, y todo el diagrama que se recomienda es posible utilizar cuando se va a diseñar y desarrollar un componente, desde la idea hasta que la parte o el producto esté en manos del cliente.

Sin embargo, en algunos casos sólo es necesario realizar una parte o un componente de determinado material para utilizarlo posteriormente como parte de un producto o ensamble final, pero primero se deberá saber cuál es el diseño más recomendable, de qué material podría ser conveniente y, finalmente, cómo se fabricará. Es por ello que, como ejemplo de la aplicación de la selección de materiales para asistir el proceso de ingeniería, se propone definir y realizar un diseño, analizar y traducir los requerimientos; en lo que respecta al apartado de materiales, mientras que en la parte de diseño se debe definir el problema, recopilar la información, generar un concepto, realizar su evaluación y definir las especificaciones.

Para ejemplificar la metodología propuesta en la Figura número 3, se propone la elaboración de un soporte para una estructura, la cual podría ser de diferentes formas, sin embargo, como es muy sabido, la forma se relaciona directamente con la función, y para este caso en particular lo más conveniente es la forma circular, por lo que antes de empezar a realizar el diseño, primero es muy importante mencionar que, a través de este pequeño caso de estudio, se podrán identificar con facilidad los pasos a seguir de forma clara y práctica, por ejemplo: en la fase conceptual conocer la necesidad, que es contar con un soporte para una estructura, y el objetivo, que es que pueda soportar una fuerza, sin que se deforme; en lo que se refiere a la parte de materiales se necesita definir el diseño, y en lo que respecta a la parte de diseño se necesita realizar la evaluación del mismo; todo esto es mejor si es demostrado realizándolo directamente de forma aplicada, por lo que se inicia con definir el espesor de dicha estructura, ya que en la parte del proceso de diseño, como definición de problema o más bien como requerimiento, se desea que dicha parte o componente, llamada “soporte para estructura”, resista al menos una carga de 100 N, en otras palabras, que no se deforme o desplace dicho soporte y con el menor peso posible.

La fórmula para determinar la masa de un tubo hueco es (Budynas, 2011):

$$m = \frac{\pi(d_o^2 - d_i^2)l\rho}{4}$$

Donde

m = masa

$d_o$  = diámetro exterior

$d_i$  = diámetro interior

l = longitud

$\rho$  = densidad del material

Como se puede observar, se necesita definir primero el material y después de cuánto debe ser el diámetro a utilizar, sin olvidar que el soporte debe ser resistente y no tan pesado para la estructura a generar.

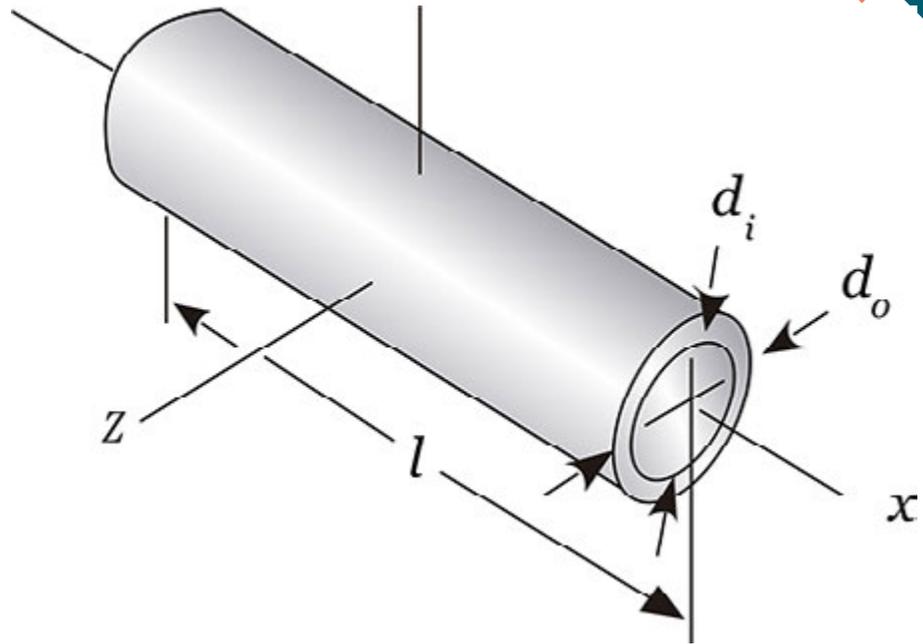


Figura 4. Representación de tubular.

El material que se propone es *nylon* o bambú, por su resistencia y peso ligero. Sin embargo, es necesario realizar los primeros cálculos sobre su masa, partiendo de un diámetro definido de 25.4 mm y un diámetro menor de 21.4 mm, con una longitud de 50 mm, para el caso del *nylon* tiene una densidad de:

$$0.001139/\text{mm}^3$$

$$m = \frac{\pi(d_o^2 - d_i^2)l\rho}{4} = \frac{3.1416(25.40^2 - 21.40^2)50 * 0.00113}{4} = \frac{33.2280}{4} = 8.3070\text{g}$$

Para calcular la masa del bambú se utilizan los mismos valores, con la única diferencia de su densidad, que es de:

$$0.0007\text{g}/\text{mm}^3$$

Como se puede visualizar, la masa es menor en el bambú, pero aún falta conocer la rigidez, para lo cual primero es necesario determinar el momento de inercia, que para una sección tubular se calcula con la siguiente fórmula:

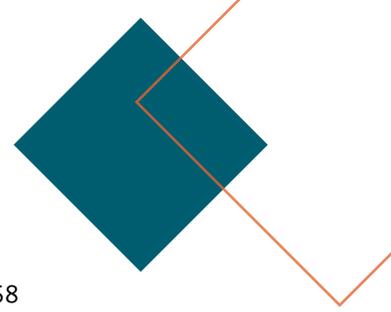
$$I_x = \frac{\pi}{8}(d_o^2 - d_i^2)^2$$

Para el *nylon*:

$$I_x = \frac{8.3070\text{g}}{8} (25.40\text{mm}^2 - (21.40\text{mm})^2) = 194.38\text{gmm}^2$$

Para el bambú:

$$I_x = \frac{5.1459\text{g}}{8} (d_o^2 - d_i^2) = 120.41$$



Para determinar la deflexión la fórmula es la siguiente (Pytel, 2012):

$$\delta = \frac{FL^3}{C_1 E}$$

El módulo de Young para el *nylon* es de 2930 MPa

$$\delta = \frac{PL^3}{3EI} = \frac{100 \cdot (50\text{mm})^3}{3 \cdot 2930 \cdot 194.38} = \frac{12500000}{1708424.4} = 7.315\text{mm}$$

Mientras  $E$  = módulo de Young (N/m<sup>2</sup>) y para el bambú es el siguiente,  $E=15\text{-}20\text{GPa} = 17,500\text{ MPa}$ .

$$\delta = \frac{FL^3}{C_1 EI} = \frac{100 \cdot 50\text{mm}^3}{3 \cdot 17500\text{MPa} \cdot 120.41} = \frac{12500000}{6321525} = 1.977\text{mm}$$

Finalmente, la rigidez se obtiene mediante la siguiente fórmula:

$$S = \frac{F}{\delta}$$

Se observa a continuación el resultado para rigidez en el caso del *nylon*:

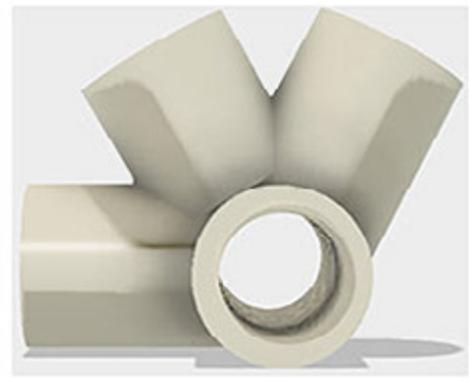
$$S = \frac{F}{\delta} = \frac{100\text{N}}{7.315} = 13.67$$

$$\text{Rigidez para el bambú: } S = \frac{F}{\delta} = \frac{100\text{N}}{1.977} = 50.58$$

Hasta este momento, y de acuerdo con los cálculos, se puede verificar que el bambú es el material que presenta mejores resultados para un espesor de 2 mm, si se desea que tenga un espesor de más de 2 mm los valores de masa, deformación y rigidez se mantendrán proporcionalmente, con la ventaja nuevamente para el material de bambú, sin lugar a dudas.

Sin embargo, existen dos problemas si se realiza el soporte con bambú, el primero es que no se puede utilizar para realizar la simulación a través del método de elemento finito, y el segundo problema que existe es que hasta este momento no existe alguna impresora de 3D con la posibilidad de realizar alguna pieza a partir de la inyección de bambú. Por lo tanto, a continuación se presenta en primer lugar el diseño del soporte en material de *nylon*, el cual sí es posible analizar y simular, además de imprimir en 3D.

Figura 5. Soporte para estructura en nylon, generado a partir del software Fusión 360, con un espesor de 2 mm.



Una vez creado el soporte del diseño en 3D con sus respectivas dimensiones, se ingresó al módulo de simulación dentro del software Fusion 360 de la compañía Autodesk, en donde se hizo el análisis estático correspondiente, partiendo de la asignación del material, que en este caso correspondió al material de nylon 6/6, con un Módulo de Young de 2.93 GPa.

Posteriormente se asignaron las cargas y restricciones, para finalmente llegar al mallado y a los resultados a través del método de elemento finito, mejor conocido como FEM, por sus siglas en inglés (Okereje & Keates, 2018).

El diseño y análisis de estructuras ha sido posible gracias al uso frecuente de técnicas de simulación numérica basadas en computadora, como es el caso del presente trabajo. En la parte interna tiene una cuerda, debido a que en cada orificio se ensamblarán otros tubos para ir formando una estructura a través de rosado.

Después de que se realizó el diseño, se dará paso a la aplicación de la fuerza de 100 N en el tubo que se encuentra en la posición horizontal, para verificar si el soporte resistirá, para poder llegar al mallado; como se muestra en la Figura 6, primero es necesario asignar la fuerza en la posición deseada y sus respectivos elementos de fijación.

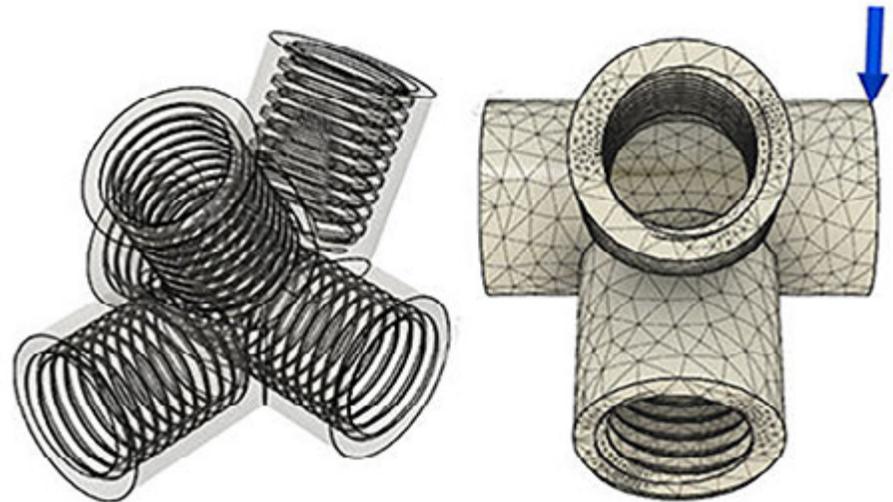


Figura 6. Representación de las fuerzas y del mallado que permitirá dar paso al análisis de elemento finito.

Una vez que se realiza lo anterior, el siguiente paso consiste en la solución para ver cuál es el comportamiento que tendrá dicho soporte al momento de aplicarle la fuerza, sin olvidar que lo que se pretende es que la deformación o desplazamiento sea la mínima posible.

Figura 7. Representación de la simulación “desplazamiento”.

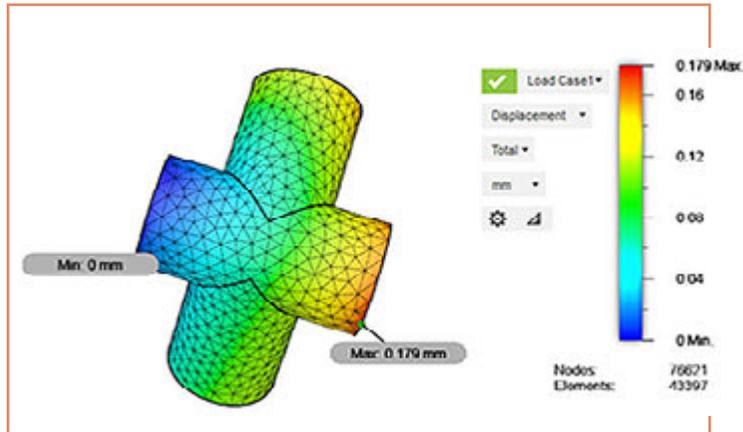
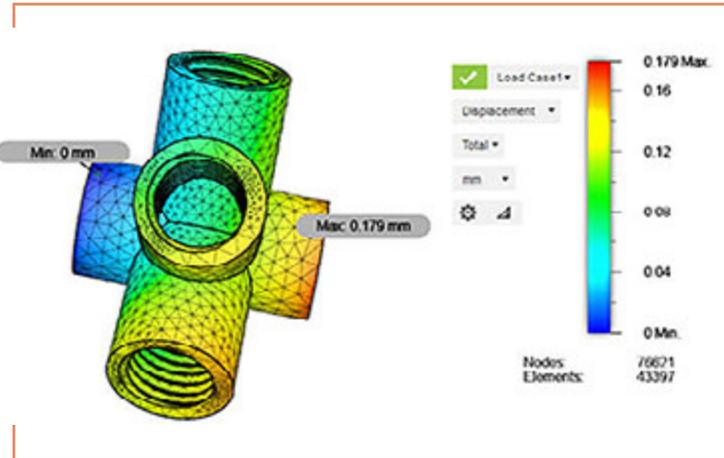


Figura 8. Otra vista del lugar o zona donde se desplaza en mayor cantidad el soporte.

En la figura anterior se pudo observar que existe un desplazamiento máximo de 0.179 mm, dicho valor es mucho más pequeño del que se había calculado, que era de alrededor de 7.3 mm; la razón por la cual no se puede comprobar el mismo resultado es porque el cálculo teórico se hizo considerando solamente el tubo, y en este caso el resultado se generó ya de la pieza o soporte que se desea.

Donde fue evidente que los tubos que se encuentran en la parte central, superior y posterior, apoyan para que el desplazamiento sea mucho menor, observando que el mayor desplazamiento se tiene en la esquina inferior, situación lógica y entendible puesto que fue en el extremo donde se aplicó la carga.

los análisis correspondientes y de recopilar la información obtenida de forma teórica, y mediante la parte del análisis y simulación, se puede tener una evaluación más objetiva sobre cuál será el comportamiento de dicho soporte y determinar si cumplirá o no con los requerimientos establecidos, que en este caso particular se puede concluir que la pieza con ese espesor no es suficiente para cumplir con lo requerido. Por lo tanto, se podrían realizar cambios en el material o sobre el diseño, cambiando las dimensiones, para aumentar el espesor del tubo y realizar los mismos estudios y análisis presentados.

## Conclusiones

En primer lugar, se puede concluir que fue posible proponer una metodología a través de un esquema o diagrama en donde se mencionan las actividades que le corresponden a cada una de las disciplinas involucradas, las cuales están vinculadas por medio del proceso de diseño de ingeniería. Con la metodología es posible identificar con claridad las funciones para el área de materiales y la disciplina de diseño, donde ambas se encuentran en la misma jerarquía, y a través de las etapas que forman parte del proceso de diseño de ingeniería se establecen las fusiones, como por ejemplo en lo que fue la fase conceptual; en lo que respecta a los materiales se definen los requerimientos, y por parte del diseño se generó el concepto, mientras que la segunda etapa se encarga de conocer las propiedades de los materiales requeridas y la configuración del diseño, para finalmente pasar a la evaluación de los materiales y lograr establecer las especificaciones del producto y/o parte.

La metodología se aplicó partiendo de la necesidad de buscar diseñar y fabricar un soporte central con algún tipo de material, para lo cual se llevaron a cabo diferentes actividades o etapas, mencionadas anteriormente, empezando con la fase conceptual al momento de diseñar la forma que debería tener la pieza, la cual se realizó en un software de Diseño

Asistido por Computadora, mejor conocido como CAD; la siguiente fase fue la de incorporación, y aquí es el momento para realizar el diseño de configuración, debido a que dicho soporte era más conveniente desarrollarlo en material de bambú, puesto que el cálculo de rigidez obtenido fue mucho mayor que el de material de nylon, pero el inconveniente presentado es que no era posible realizar el CAE que corresponde a la Ingeniería Asistida por Computadora, por sus siglas en inglés; en otras palabras, no se puede generar el método de elemento finito, al menos en el software Fusion 360 utilizado hasta este momento, por la única y simple razón de que no existen las propiedades mecánicas en la base de datos del software antes señalado.

Finalmente, en lo que respecta a la fase de detalle, que son las especificaciones, se puede comentar que fue posible definir un diseño y realizar su evaluación, llegando a la conclusión de que el soporte de nylon para una estructura con un espesor de 2 mm no es suficiente para resistir una carga de 100 N, por lo tanto deberá realizarse una modificación en

el espesor hasta lograr obtener el mínimo desplazamiento para que pueda ser utilizada de forma real en la integración o conformación de una estructura para una aplicación específica.

Sin duda alguna, este tipo de investigación es fundamental para el diseño y desarrollo de productos, puesto que a partir de lo realizado se pueden empezar a generar otras investigaciones para dar continuidad, por ejemplo, buscar algún otro programa o software que permita realizar el análisis de elemento finito usando como material el bambú. La otra investigación consistiría en fabricar el soporte sin que necesariamente se haga en una impresora 3D y optar por maquinar el soporte diseñado en material de bambú y de esta manera materializar el producto para demostrar la última fase o etapa de la metodología.

# Agradecimientos

El presente trabajo de investigación ha sido gracias al apoyo de la Universidad Autónoma Metropolitana, unidad Azcapotzalco, CyAD, y a la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Área Académica de Ingeniería y Arquitectura.

## Referencias

Ashby, M. F. (2011). *Materials Selection in Mechanical Design*. Burlington, Estados Unidos de América: Elsevier.

Budynas, R. G. (2011). *Shigle's Mechanical Engineering Design*. Nueva York: McGrawHill Connect Learn Succeed.

Dym, C. L., & Brown, D. C. (2012). *Engineering Design*. Nueva York, : Cambridge University Press.

Jyothish, L., Pandey, P. M., & Wimpenny, D. I. (2019). *3D Printing and Additive Manufacturing Technologies*. Gateway, Singapur: Springer.

Karana, E., Pedgley, O., & Rognoli, V. (2014). *Materials Experience Fundamentals of Materials and Design*. Amsterdam, Reino Unido: Butterworth-Heinemann Elsevier.

Okereje, M., & Keates, S. (2018). *Finite Element Applications*. Gewerbestrasse, Suiza: Springer.

Pytel, A. (2012). *Mechanics of Materials*. Stamford, United State of America: Cengage Learning.