

# Forma, estructura y movimiento

307961

La función técnica mecánica se hace presente en una gran cantidad de objetos cotidianos, por ello, el diseñador industrial debe ser competente para afrontar con la suficiente profundidad este tema e involucrarlo de manera real y exitosa en sus técnicas de proyectación. Conceptos como la forma, la estructura y el movimiento, se convierten en la base para su entendimiento, análisis y aplicación. Conocer su origen, identificar sus elementos básicos y establecer las relaciones entre ellos, se convierte en una ruta de trabajo efectiva para introducir esta temática en el diseño industrial de objetos. Se trata en este texto el origen de los conceptos y con él, la evolución de los sistemas funcionales que el hombre ha desarrollado a lo largo de su historia; permitiéndole al diseñador abstraer la importancia que tiene para la proyectación, dominar los principios básicos que rigen el comportamiento mecánico de los objetos.

**E**l desarrollo de un producto industrial exitoso, enfocado al desempeño de una función técnica mecánica, entendida esta última como la ejecución de acciones destinadas específicamente a soportar estructuralmente cargas externas o la generación, transformación o la transmisión de movimiento, requiere inicialmente identificar los parámetros que fundamentan esta función, las variables que en cada uno de ellos podrían llegar a afectar el funcionamiento y la manera en que ellas se relacionan entre sí. Luego, encontrar un equilibrio que domine esta relación y le brinde al diseñador las herramientas para afrontar su proceso de diseño. Este artículo hace parte de una serie de tres textos destinados a la exploración de cada uno de estos elementos orientados a la comprensión de las interacciones que los conceptos de forma, estructura y movimiento tienen en la proyectación de objetos industriales. Puntualmente se busca recorrer la historia del hombre, inmerso en una cultural social específica que ha definido en gran medida el porcentaje de desarrollo puntal en los tres elementos de estudio.

1- Di Bartolo, Carmelo. NATURALEZA COMO MODELO, NATURALEZA COMO SISTEMA. En: Experimenta. Nº 31. Oct 2000. p 43.  
 2- Williams C. LOS ORÍGENES DE LA FORMA. Editorial Gustavo Gili. 1984. P 9-31.

Los elementos conceptuales constituyentes del componente funcional técnico mecánico son la forma (morfolo-gía), la estructura y el movimiento. Cada uno de ellos posee una serie de variables que determinan los aspectos que el diseñador deberá tener en cuenta para su control en el proceso de análisis y que podrán estar relacionadas de diversas maneras. El proyectista deberá identificarlas, traducirlas y aplicarlas en un desafío de diseño concreto<sup>1</sup>. Comprender el detalle individual y la interrelación entre estos tres elementos requiere del diseñador una asimilación profunda de las implicaciones que tiene para el mundo actual el origen de cada uno de ellos, los elementos básicos que los componen y las relaciones que dominan estos elementos.

Tomar el desarrollo de objetos industriales como un proceso evolutivo es sensato y coherente con las ideas que muchos autores han desarrollado durante la historia de la disciplina del diseño industrial y más aún, cuando se hace una referencia detallada a lo que el ser humano ha hecho con su experiencia de materialización de ideas mentales en objetos físicos,

El origen se basa en el **nacimiento** de las **ideas** que en el ser humano se gestaron para tener en cuenta los conceptos de la **forma**, la **estructura** y el **movimiento**.

Figura 1 | Andrés Valencia

Hongo. Las estructuras naturales se han desarrollado a lo largo de millones de años para alcanzar una geometría óptima en cuanto a todos sus elementos funcionales.



con la cual se evidencia que a lo largo del tiempo, un objeto evoluciona tal como lo han hecho las especies animales y vegetales en el planeta Tierra. Para entender la evolución, es imprescindible abordar el origen del objeto de estudio, en este caso, los tres elementos conceptuales básicos de los objetos cuya función técnico-mecánica es prioritaria en la globalidad de su desempeño.

El origen se basa en el nacimiento de las ideas que en el ser humano se gestaron para tener en cuenta los conceptos de la forma, la estructura y el movimiento. El entorno que ha rodeado al hombre, incide también en la manera en que ha sido capaz de traducir los mensajes que leía en la naturaleza y aplicarlos al desarrollo de objetos donde estos tres elementos eran tenidos en cuenta. En este artículo se abordarán inicialmente los tres elementos por separado a partir de una reflexión alrededor de su origen y de las implicaciones que este camino de desarrollo histórico ha tenido para el ser humano y el diseño industrial.

## Orígenes del concepto de forma

Una de las estrategias más complejas, pero a la vez más estructuradas para visualizar el origen del concepto de forma, consiste en la observación de la naturaleza y de la manera en que ella ha desarrollado sus morfologías (ver figura 1). Esta observación puede tener dos visiones; la primera encaminada hacia el estudio de los parámetros que dieron origen a una determinada

configuración física para un elemento o un conjunto de elementos que se integran entre sí (sistema) y la segunda, enfocada al análisis de cómo estas configuraciones cambiaron en el tiempo y se adaptaron al entorno haciéndose cada vez más exitosas, es decir, la evolución.

Williams<sup>2</sup>, plantea que entender cómo la evolución natural ha llegado a optimizar la forma, es una de las mejores claves para que un diseñador se apropie de lo natural y lo aplique en lo artificial. De hecho, la naturaleza constantemente evoluciona y cambia, buscando con ello, hacerse cada vez más exitosa. Por otro lado, se hace referencia también a la diferencia radical que se presenta entre lo orgánico o vivo y lo inorgánico o inerte, a partir del estudio de su crecimiento. Las formas orgánicas generalmente crecen desde la parte interna como un globo que se llena de aire y por ello se habla de que las superficies de este tipo de "objetos" vivos es siempre empujada hacia afuera por algún tipo de fuerza natural, mientras que el interior será siempre comprimido. Cuando este proceso de crecimiento se presenta se originan con él formas redondeadas y suaves (figura 2).

En contraste con lo anterior, se puede decir que el crecimiento mineral o inerte de la naturaleza es angular y se da desde el exterior hacia el interior, semejando una superposición de capas sucesivas. Toda la actividad se sucede en el exterior sin afectar para nada el interior que no cambia una vez ha sido formado. Sin embargo, es importante mencionar que se podrían encontrar minerales tan redondeados como cualquier forma viva, que han logrado esta morfología por acción de un desgaste superficial continuo con los elementos de la atmósfera y la misma tierra, la figura 3 muestra una pared forrada con piedras de río que han sido pulidas por la corriente del agua, lo que les da su aspecto orgánico externo. Lo anterior no refuta la teoría del

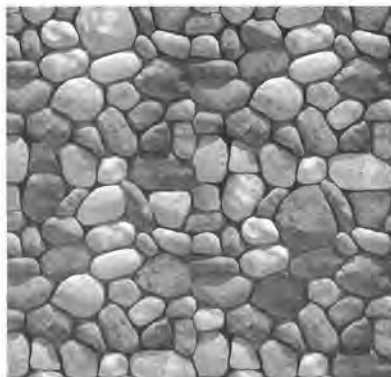


Figura 2 | simple-thai.com

Coco. El crecimiento diseccionado de los vegetales ocasiona, en este caso, que la morfología final obtenida sea muy orgánica y limpia.

Figura 3 | Accustudio

Piedras de río. El desgaste continuo puede llegar a generar que una pieza angular mineral tome formas orgánicas en su exterior.



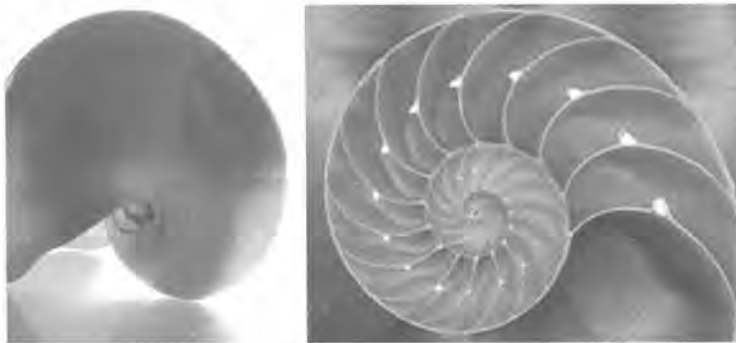


Figura 4 | fotocommunity.de

Nautilus. Este crustáceo posee una estructura interna en espiral que sigue una proporción logarítmica.

crecimiento mineral, ya que estos elementos en su interior conservan el rasgo inherente de lo angular de su evolución.

Otro punto de referencia de análisis es planteado por Thomson<sup>3</sup> en el cual los principios físicos y matemáticos regulan tanto la forma natural en funcionamiento como su crecimiento y desarrollo. Con este trabajo es posible concluir aspectos fundamentales en cuanto a las diferencias que existen entre el crecimiento longitudinal, superficial y volumétrico de la forma, con las cuales el proyectista podrá intuir, por ejemplo, qué pasa cuando se piensa cambiar el tamaño del objeto en ciertas direcciones establecidas o definir al tamaño como una propiedad morfológica relativa y no absoluta que debe ser manejada siempre en relación con respecto a otros elementos y no como aspecto individual. Con lo anterior, el diseño de objetos se convierte en un proceso que involucra un alto nivel de contextualización. Por otro lado, define condiciones de relaciones con base en potencias matemáticas entre diferentes componentes físicos de la morfología (ver figura 4). El estudio de este autor se basa también en el manejo de los sistemas biológicos, vegetales, minerales, animales y humanos a partir de la comprensión de la relación que hay entre el tamaño y la proporción de la forma, con ayuda de un principio que él llamó el principio de similitud.

En su texto *Tamaño y vida*<sup>4</sup>, McMahon y Tyler, abordan también todo un juego matemático que involucra el estudio de las dimensiones de las formas naturales y artificiales desde la física y la biología, utilizando, además, los conceptos de grande y pequeño. Tienen también una base conceptual de la proporción en la cual se manejan diferentes escalas para su estudio. La escala alométrica con la que usan la ecuación  $y=bx^a$ , en donde "y" y "x" representan dimensiones de diferentes elementos de estudio. La isomé-

3- Thompson D. ON GROW AND FORM. Cambridge University Press. 1961.

4- McMahon T. y Tyler B. TAMAÑO Y VIDA. Editorial Labor. 1986.

5- Wagensberg, Jorge. COMPLEJIDAD E INCERTIDUMBRE. En: Mundo Científico 201, Mayo 1999. P 42-60.

trica, en donde el exponente “a” de la anterior ecuación es igual a 1, 2 ó 3. Con lo que analizan longitud, área superficial y volumen.

Desarrollan una interesante discusión alrededor de las herramientas que un observador morfológico debe tener para poder abordar la inmensa variedad de tamaños que se vislumbran en la naturaleza y con ellas definen que el manejo logarítmico de la expresión matemática ya mencionada, es la mejor opción para aplicarla en la comprensión de los porqués en una bacteria y en una ballena azul. Además de esto, utilizan el análisis dimensional y la teoría de los modelos para ilustrar aplicaciones naturales y artificiales del estudio morfológico del tamaño. La figura 5 muestra un modelo de avión Boeing 747 probado en un laboratorio.

Jorge Wagensberg<sup>5</sup> ha estudiado la presencia de ciertos patrones morfológicos bi y tridimensionales en la naturaleza. A partir de una sola palabra (tabla 1) se define la función específica por la cual el mundo natural usa las formas más comunes. Así, menciona que la esfera es una forma muy probable para individuos anclados en el espacio, es decir, en ambientes sin direcciones privilegiadas respecto del movimiento o la gravedad. Lo anterior puede demostrarse retomando el hecho de que esta morfología es la menor superficie que alberga un volumen, además existen varios elementos naturales que no son individuos, los cuales también poseen forma esférica, las burbujas de aire, los planetas y el globo ocular de los humanos, son ejemplo de ellos. De la misma manera analiza los hexágonos, las espirales, las

Figura 5 | Boeing.com

Modelo del Boeing 747. El desarrollo de modelos analíticos funcionales requiere, para ciertas aplicaciones, tener en cuenta la proporción con la cual cambian las dimensiones cuando el tamaño cambia.



Tabla 1 |

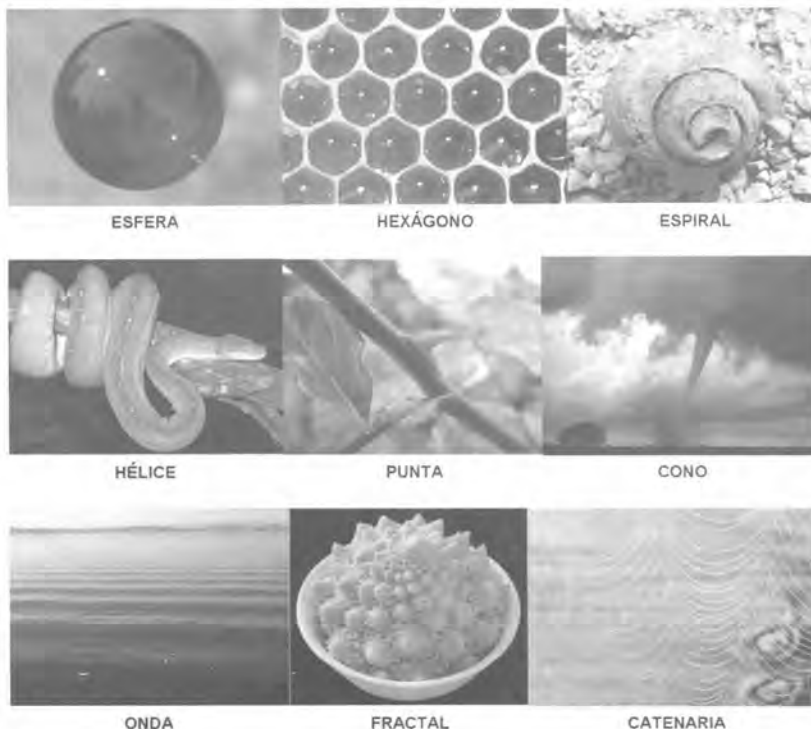
Relación forma función en la naturaleza.

Forma	Función
Esfera	Contiene
Hexágono	Pavimenta
Espiral	Crece
Hélice	Agarra
Punta	Penetra
Cono	Concentra
Onda	Transporta
Fractal	Coloniza
Catenaria	Soporta

www.zubbles.com, www.wmconnolley.org.uk, www.cwrl.utexas.edu, www.epa.qld.gov.au, www.nssl.noaa.gov, www.bigfoto.com, www.reed.edu, www.brantacan.org.uk.

Figura 6

Funciones básicas en la naturaleza. Se muestra una burbuja de una sustancia jabonosa pigmentada como esfera, una porción de un panal de abejas como organización hexagonal, un fósil de la concha de un crustáceo como espiral, una serpiente enrollada como hélice, una espina de un rosal como punta, un tornado como cono, una bahía como onda, una coliflor como fractal y una telaraña como catenaria.



hélices, las puntas, los conos, las ondas, los fractales y la catenaria. A partir de ellos establece relaciones simples con su función.

La figura 6 muestra ejemplos de cada una de estas funciones desarrolladas por elementos naturales y artificiales.

Desde el punto de vista artificial, el desarrollo morfológico de los objetos puede visualizarse de alguna manera como una evolución, sobre todo si se parte del hecho de que la artesanía, entendida como la fabricación manual o levemente mecanizada de artículos (ver figura 7), fue el origen morfológico inicial para los primeros objetos industriales, y

luego la presencia de la revolución industrial modificó de manera radical su estructura geométrica. Se puede decir también que con los periodos de diseño se obtuvieron una serie de características en la forma que determinaron el desarrollo general de los objetos que fueron diseñados en dichas épocas.

En el origen de la humanidad se han encontrado los que podrían catalogarse como los primeros objetos útiles fabricados por el hombre, herramientas de caza

Andrés Valencia | Figura 7

Maraca tradicional del Chamán de la etnia Piroa del Orinoco. La utilización de la fibra de tirta tejida en un patrón geodésico, muestra la intuición de los indígenas para generar morfologías.



Accustudio | Figura 8  
Herramienta prehistórica de Silex

obtenidas a partir de rocas que eran golpeadas con otras en direcciones establecidas para obtener bordes planos y filosos (ver figura 8). En estos objetos puede evidenciarse una clave para entender el origen de la forma de lo que el hombre construye, que radica en el hecho de identificar, primero, que estos objetos nacieron como una "secreción del cuerpo y del cerebro" de quienes los crearon y segundo, que responden a un estereotipo o forma constante que no es solamente el producto de una inteligencia coherente, sino el producto de esta inteligencia integrada a una materia para el desempeño de una función<sup>6</sup>. Básicamente la forma que se obtenía en estas herramientas estaba determinada por los mismos cuatro factores que regulan el desarrollo morfológico actual, las posibilidades del material, la capacidad del fabricante de extraer del material el mayor beneficio posible, el proceso de manufactura y la función que se busca desempeñar. Dentro de este último factor, la función y sus componentes<sup>7</sup>, es un hecho que desde el origen del objeto se buscaba al mismo tiempo garantizar una función técnica, cortar sin desgastarse, una función de utilidad, tener el peso adecuado para ser usada y una función de relación hombre/objeto, que se adapte a la forma de la mano. Todos estos elementos funcionales modifican los parámetros que determinan la forma del objeto.

Evolutivamente, los objetos fueron cambiando a medida que la función se hacía cada vez más específica y el hombre tuvo la oportunidad de acceder a tecnologías más avanzadas en cuanto a materiales y procesos de manufactura. Si se permitiera tomar el ejemplo, lo anterior se podría ilustrar observando las piedras de sílex de nuestros antepasados y el cuchillo de un chef de la actualidad. La función técnica primaria es exactamente la misma pero la especialización de las funciones secundarias ya sea estéticas, utilitarias o de relación hombre/objeto y la adaptación del objeto a cada grupo de usuarios, ha generado un cambio radical en la forma de la herramienta.

6- Leroi-Gourhan, André. EL GESTO Y LA PALABRA. Ediciones de la biblioteca Universidad Central de Venezuela. 1971. P. 91-96.

7- Los componentes de la función están fundamentados en el Proyecto Educativo del Programa de Diseño Industrial de la Facultad de Arquitectura y Diseño de la Universidad Pontificia Bolivariana.

Figura 9 | arrowsheads.com y Bresco

Comparación de una herramienta de corte prehistórica y un cuchillo moderno.

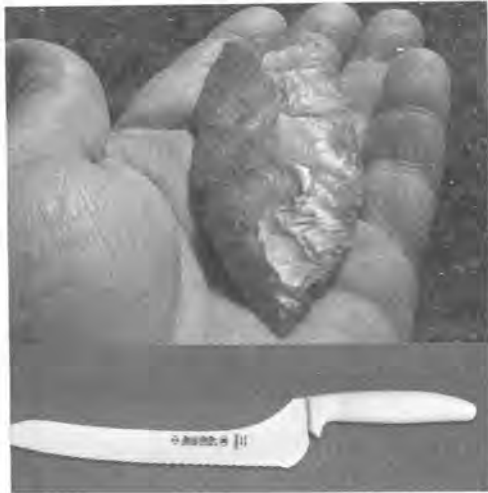


Figura 10 | LJWorld.com

Tetera cuadrada de Christopher Dresser



La concepción de estética, por subjetiva que sea, marcó, marca y marcará la senda del desarrollo morfológico de los objetos. Aunque desde esta óptica se deban separar los objetos meramente decorativos de los multifuncionales, es evidente que el hombre ha generado objetos a partir de simetrías, tamaños, colores y texturas que agraden a sus semejantes, ya sea para que se sientan a gusto con ellos, como ocurría en un principio, o para generar la intención de compra por algo más que la funcionalidad. Christopher Dresser es un excelente exponente del diseño estético, considerado como el padre del diseño moderno, creía, al igual que su contemporáneo William Morris, que el diseño bello debería estar al alcance de todos. Con su tetera cuadrada (figura 10), Dresser abarcó la funcionalidad y la estética en un solo objeto.

Lo anterior obliga necesariamente al análisis de aquellos objetos que poseen un componente altamente técnico en los cuales la estética se relaciona íntimamente con el desempeño de la función y cuya morfología no es más que el resultado de una idea inicial técnicamente eficiente que evoluciona con el tiempo y la tecnología buscando convertirse en soluciones perfectas para los problemas iniciales de diseño. Ejemplo de esto pueden ser los aviones o los automóviles, que aun en un periodo de tiempo muy corto comparado con la escala temporal del mundo natural, han evolucionado morfológicamente a pasos agigantados desde su nacimiento. Sin embargo, es válido anotar que en su momento cada solución planteada era eficiente si se evaluaba desde las capacidades y tecnologías de cada instante histórico. La figura 11 ilustra la evolución dada por los aeroplanos desde la primera versión de los hermanos Wright hasta el último desarrollo de la compañía francesa Airbus con su A-380.

Cuando se mezclan lo natural y lo artificial se encuentra que mucho de lo que el hombre ha hecho y hará, busca, de alguna manera, la adaptación de los principios y leyes con las cuales la naturaleza funciona y crea su mundo, tanto estética como técnicamente. A partir de esto nace un

término denominado biónica, con el cual se alberga toda aquella actividad encaminada a utilizar como referencia para lo artificial a lo natural, buscando elementos metodológicos, como la evolución y el perfeccionamiento constante y entendiendo que lo importante no es la identificación de la esencia de las reglas naturales, sino la capacidad de aplicarlas en situaciones concretas cuando se está haciendo un proyecto<sup>8</sup>. Además, el hecho de que en la naturaleza es común encontrar la multifuncionalidad especializada, da idea de que las formas perfectas realmente son una utopía y que se evidencia, por el contrario, que un grado de aproximación



Evolución de las  
aeronaves tripuladas.

Figura 11 memory.loc.com y airbus.com



La estructura ósea del estegosaurio se adaptó a partir de la evolución continua de sus huesos para soportar de la mejor manera su propio peso.

Figura 12 animals.timduru.org



más o menos elevado<sup>9</sup> puede ser la base para un diseño exitoso en la medida en que todo lo que hay que hacer se efectúe de la manera más eficiente posible.

## Orígenes del concepto de estructura

La naturaleza ha requerido de una organización física inteligente para que sea capaz de abordar el proceso evolutivo. El hecho de que en el planeta Tierra se tenga la presencia de la gravedad, implicó desde sus orígenes, la necesidad de configurar el mundo físico adaptándose a estas condiciones. Los vientos, las mareas, las colisiones, la tensión superficial y la gravedad, entre otras, han sido fuerzas a las que los sistemas físicos que se iban creando estaban sometidos. Junto a cualquier otra función que pudiera desempeñar el elemento o entidad, el hecho de tener que soportar su propio peso, se convirtió en la tarea primaria que cualquier elemento, viviente o inerte, que se desarrollaba en la tierra debía afrontar (figura 12).

Puede referenciarse aun un periodo anterior al de la aparición del ser humano en la Tierra para validar la presencia de las estructuras en el planeta. Desde el punto de vista orgánico, todos los organismos vivientes por pequeños que hayan sido, poseyeron una configuración tal que les permitiera sobrevivir a las cargas que el entorno les generaba, ya fuera desde una relación entre las fuerzas de flotación y la tensión superficial que actuaba sobre los organismos unicelulares, hasta la gravedad en seres o elementos inanimados más grandes cuyo peso generaba ya un elemento para tener en cuenta. Desde lo inorgánico o mineral, las formaciones presentes evidencian una tarea estructural básica en su configuración morfológica, definida por el tipo de materia presente en su composición y por el entorno en el que se establecían.

El término estructura se define como toda aquella disposición de materiales destinada a soportar cargas<sup>10</sup>. Esto es, cualquier organización, disposición o configuración

8- Di Bartolo, Carmelo. Ibid. pp 41.

9- Leroi-Gourhan, André. Ibid. pp. 293.

10- Gordon, J.L. ESTRUCTURAS O POR QUÉ NO SE CAEN LAS COSAS. Cetele ediciones. 1999. pp 13.

Palmera de coco y turbina eólica.  
Ejemplo de como el hombre copia de estructura de la naturaleza.

Figura 13

york.co.uk



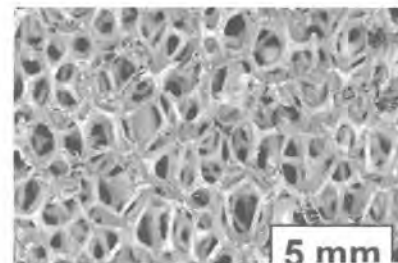
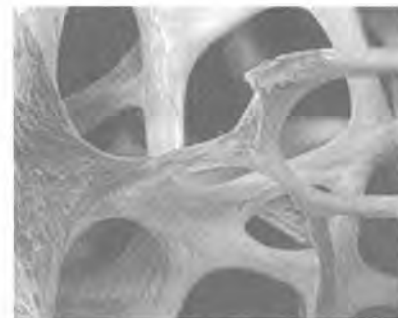
de elementos, natural o artificial, destinada a sobrellevar la presencia de una carga externa de manera segura, controlada y eficiente. Este último término, es evidente en las estructuras naturales, las cuales han evolucionado a partir de una economía energética muy elevada y con ella, desarrollado patrones de agrupación que el hombre y su mundo artificial esperan igualar algún día<sup>11</sup>. La forma cónica circular del tronco de los árboles ha sido copiada por ejemplo para el desarrollo de los soportes de las turbinas eólicas (figura 13) o la estructura interna de un hueso humano que trata de ajustarse con algunas espumas metálicas (figura 14), son ejemplos de este concepto.

Las estructuras han sido usadas prácticamente desde el principio de los tiempos por el ser humano. Las primeras hachas fabricadas por nuestros antepasados ya evidenciaban algo de conocimiento intuitivo acerca de lo que debería tener un objeto para ser capaz de soportar las cargas de impacto, sin que él o el objeto mismo se vieran irremediamente afectados. En este punto vale la pena resaltar que aún en nuestros días, las hachas modernas guardan una inmensa similitud con estos primeros modelos, lo que indica el potencial de la intuición humana en este tipo de tareas (figura 15).

Por otro lado, el hombre salió de las cavernas y tomó la decisión de construir él mismo su vivienda a partir de los materiales (madera, barro, pieles, fibras vegetales y animales y hojas de las plantas) que tenía disponibles y

Comparación entre la estructura de un hueso humano (arriba) y una espuma de aluminio (abajo). Ejemplo de como el hombre copia de estructura de la naturaleza.

Figura 14 Tim Arnet y ERG aerospace Corp.



del conocimiento que había interiorizado desde su observación de la naturaleza, tanto vegetal como animal. Estos espacios estáticos o temporales, requirieron de la aplicación de conceptos estructurales básicos para su fabricación y funcionamiento. Tomando como referencia estos últimos, los espacios de vivienda temporales, es posible vislumbrar desde hace mucho tiempo, casi 30000 años<sup>12</sup>, y en muchas de las culturas de la antigüedad, el uso de lo que

podríamos denominar actualmente carpas (figura 16). Estos elementos son fiel muestra de un conocimiento de las relaciones que rigen el desempeño mecánico de un conjunto de elementos que trabajan simultáneamente al servicio del hombre.

11- Kepes G. STRUCTURE IN ART AND IN SCIENCE. George Braziller, inc. 1965. pp 66-88.  
12- Otto F et al. ARQUITECTURA ADAPTABLE. Editorial Gustavo Gili. 1979. pp 58-63.

Con el término estructura se torna implícito el término carga y por ello, el hombre encontró que para entender las estructuras debía primero comprender las cargas. El origen de las cargas es natural y se podría decir que han estado con el hombre por siempre y estarán mientras exista la gravedad, los fluidos, los cambios térmicos y de presión en el aire, el proceso de ajuste tectónico terrestre o individuos vivos que sean capaces de convertir el alimento que ingieren en fuerza muscular y aplicarla a los objetos.

El origen de las estructuras artificiales creadas por el hombre ha tenido dos momentos. Inicialmente el ser humano adoptó la intuición como herramienta de trabajo y con ella generó elementos estructurales básicos para poder subsistir en un entorno agreste. Muy seguramente su capacidad

Figura 15 | Daniel Estrade, everquest-station y ox-head  
Evolución de las hachas



Figura 16 | users.telenet.be  
Tienda apache



racional le permitió abstraer de su observación diaria de la naturaleza ideas iniciales para transformar los elementos que lo rodeaban en sistemas estructurales útiles. Las vigas y las cuerdas en tracción, podrían ser las primeras aproximaciones a la aplicación estructural realizadas por el hombre. Esta intuición fue evolucionando y a medida que los materiales descubiertos y/o desarrollados permitían disminuir el tamaño de las estructuras o soportar diferentes tipos de cargas aun con magnitudes mayores, los sistemas constructivos estructurales fueron refinándose.

Un concepto clave en el desarrollo de las estructuras está basado en el hecho de propiciar, en la medida en que sea posible, el mayor valor de capacidad portante con el menor gasto de material. Este elemento también estuvo presente en la mente del hombre desde el comienzo de su racionalidad. Pensar en fabricar herramientas muy pesadas que fueran difíciles de usar, no era una idea que nuestros antepasados tuvieran en mente. La naturaleza siempre es eficiente, nunca pone más material del que debe haber para garantizar la función. Los huesos de los organismos vertebrados y los troncos de los árboles, son ejemplos dicentes de este hecho. Por otro lado, la estética llegó a las estructuras y el hombre, en su afán por agradar a sus semejantes o

13- Salvadori M. y Heller R. ESTRUCTURAS PARA ARQUITECTOS. Kliczkowski Publisher. 1986. pp 13.

14- Timoshenko, Stephen P. THE HISTORY OF STRENGTH OF MATERIALS. Dover. 1982. pp 7-21.

15- Gordon. J.E. LA NUEVA CIENCIA DE LOS MATERIALES FUERTES. Celeste ediciones, 2002. pp 46-47.

Figura 17 | modelshipmaster.com

Modelo de galera romana. El modelo ilustra el complejo sistema estructural de una galera romana y el alto valor agregado estético que se le dio.



de hacerse notar y trascender en su tiempo, involucró conceptos de diseño que en ocasiones pesaban aún más en las decisiones constructivas que se tomaban que aquellas destinadas a la resistencia y a la economía<sup>13</sup>. Las culturas antiguas se encargaron de dar una apariencia realmente importante desde el punto de vista cultural a sus construcciones estructurales, ya sea los edificios, los acueductos o los carruajes, los barcos o el armamento (figura 17).

Con el origen de las herramientas matemáticas para la comprensión de los fenómenos físicos llegó luego el momento de tratar de entender el por qué del funcionamiento de las cosas y de las estructuras con ellas. El ser humano trató de establecer relaciones matemáticas entre lo que veía y los principios físico/naturales que descubría. Y se puede decir que el análisis estructural tal como se conoce actualmente tiene sus orígenes en el siglo XVII con Robert Hooke, Isaac Newton, Leonhard Euler y Galileo Galilei<sup>14</sup>. A partir del trabajo de estos científicos (figura 18) se ha originado todo el concepto actual del estudio y diseño cuantitativo de los sistemas estructurales. Este trabajo analítico representa el segundo momento de las estructuras con el cual el

razonamiento se convierte en la herramienta de origen de las características morfológicas de las estructuras.

A su vez el desarrollo de la forma estructural, es decir, aquella forma cuya función principal sea la estructura, requiere ser analizada desde dos visiones separadas, la forma individual de cada elemento que compone la estructura y la configuración espacial de la misma, entendida como la manera en que están unidos los elementos componentes. La morfología de los elementos individuales se ha caracterizado básicamente por el tamaño y por el manejo de parámetros de simetría en los cuales el estudio de la sección transversal se convirtió en el referente clave para su evolución. Sin embargo, desde ambas visiones se tiene un referente común que consiste en la observación detenida de las cargas a las que va a estar sometida la estructura con el fin de proyectar, la mejor forma individual para un elemento, la mejor configuración espacial para el sistema o ambas.

El uso de estructuras que trabajaran en tensión (situación de carga que genera alargamiento en los miembros de soporte) fue en la antigüedad un hecho que los encargados de proyectar sistemas portantes evitaban a toda costa, más que por la imposibilidad de usar materiales adecuados para este tipo de cargas, ya que de hecho la madera es buena trabajando en tracción, por las dificultades que acarrea unir estos elementos con las tecnologías de la época. Por lo anterior, se observa, comúnmente que los elementos estructurales antiguos trabajan en compresión, (figura 19) que son más fáciles de unir y en apariencia más estables<sup>15</sup>, por lo que sería siempre más segura una estructura de ladrillos que un sistema estructural cableado.

Por el uso de las estructuras en compresión, las formas macizas circulares y rectangulares eran comunes para los elementos de soporte de las edificaciones civiles como los puentes, los sistemas de vivienda y espacios religiosos. Elementos estos que marcaron el progreso de los sistemas estructurales. Estos patrones morfológicos para las secciones transversales están soportados en el hecho de que los materiales estructurales disponibles en esta época, básicamente madera y algunos cerámicos, no permitían fácilmente la gene-

Figura 19 | moravian.edu.

Puente romano del siglo I después de Cristo. Se evidencia cómo los elementos estructurales son dispuestos para que soporten las cargas de compresión de manera segura y eficientemente.



wikipedia.org

Precursores del estudio analítico de las estructuras.

Figura 18



Robert Hooke



Isaac Newton



Leonhard Euler



Galileo Galilei



a: Carlos Ribo, b: moravian.edu, c: villet.com

Figura 20

Estructuras antiguas, a, el Partenon, b, acueducto romano y c, la catedral de Santa Sofía en Estambul.

ración de secciones tubulares o inclusive de geometrías más complejas.

La disposición tridimensional de los componentes se originó a partir de la necesidad de cubrir grandes luces sin columnas intermedias en las construcciones civiles. Los griegos, por ejemplo, usaron los marcos como herramienta básica (figura 20a), un elemento horizontal que actúa como una viga soportado en sus dos extremos sobre elementos verticales que actúan como columnas. Los romanos usaron el arco (figura 20b), y con él se eliminó la necesidad de usar varios elementos separados y se logró un aumento importante en las luces cubiertas por las estructuras. La ventaja del arco es que es capaz de distribuir de manera eficiente las cargas externas y, siendo curvo, ninguno de sus elementos estará sometido a cargas de tipo transversal. Las bóvedas fueron consecuencia de los arcos, ya que se originan a partir de la generación de una superficie de revolución basada en la línea perimetral de un arco que se hace rotar sobre

Figura 21 | transportcafe.co.uk

Puente de acero de Thomas Telford



un eje. Éstas permitieron a los constructores el cubrimiento de espacios inmensos sin soportes intermedios verticales (figura 20c).

Sólo hasta la revolución industrial, en donde por acción del vapor fue técnica y económicamente viable usar las propiedades del acero, que ya para esa época era conocido, se lograron evolucionar los sistemas estructurales espaciales.

La industria ferroviaria fue la impulsora del desarrollo de las estructuras espaciales de acero, la construcción de puentes para salvar los ríos y acantilados obligó a los ingenieros del siglo XVIII a sacar provecho tanto de los perfiles estructurales como de los cables de acero. En la figura 21 se muestra un puente proyectado por Thomas Telford, que se convirtió en la primera estructura de acero destinada para esa función en el mundo.

Dentro del ámbito del diseño industrial se puede decir que fueron el mobiliario y el diseño de vehículos, los factores que comenzaron a requerir que el proyectista utilizara los conocimientos estructurales desarrollados por los ingenieros y, en algunos casos, por los arquitectos de una manera organizada y concurrente buscando con ellos la optimización de los objetos. Aun en la antigüedad, los barcos, los carruajes, los sistemas de transporte de los monarcas y el mobiliario requería de elementos estructurales para su correcto funcionamiento. Aunque en esa época no se puede hablar de diseño industrial, sí se puede evidenciar el hecho de que una persona que pensaba volver una idea en realidad tenía que mezclar requerimientos de tipo estético y estructural en su proceso de generación de productos. La figura 22 muestra una silla veneciana plegable del siglo XV conocida como silla *Glastonbury*.

Por último, se ha venido dando, desde mediados del siglo XX, una tendencia por explorar sistemas estructurales no convencionales en aplicaciones cotidianas. Frei Otto y Buckminster Fuller, fueron los encargados de emprender un camino que en la actualidad representa uno de los campos de más desarrollo de los sistemas estructurales.

Ambos, tomaron como referencia los principios naturales que regían los sistemas para aplicarlos a elementos artificiales. Las estructuras de membrana, los sistemas inflables, el *tensegrity* y las cúpulas geodésicas, son ejemplos de este grupo de esquemas estructurales que se propusieron para ser usados de manera innovadora, como elementos adaptables, inicialmente utilizados en la arquitectura y propuestos en los últimos años en objetos de diseño industrial.

Figura 22 | [medievalwoodworking.com](http://medievalwoodworking.com)

Silla plegable Glastonbury



© Victoria's Journal - Furniture

16- Pappas A. A HISTORY OF MECHANICAL INVENTIONS, Dover. 1988. pp 86.  
 17- Dugas R. A HISTORY OF THE MECHANICS, Dover. 1988. pp. 19-21.

En la figura 23 se muestra una carpa cuyos soportes estructurales son en su totalidad elementos inflados con aire, una mesa soportada en una estructura de tensegridad de 3 elementos rígidos y una cúpula geodésica con marco de magnesio diseñada por Fuller.

## Orígenes del concepto de movimiento

Cuando se habla de movimiento y se quiere relacionarlo con el diseño, se pueden identificar dos puntos de estudio. El primero establece al movimiento como fenómeno físico por separado de los elementos que lo experimentan y el segundo, plantea la relación entre los dispositivos o sistemas encaminados a generar, controlar o transformar el movimiento. Además, es importante tener claro que el movimiento está relacionado de manera directa con la energía y específicamente con procesos de transformación energética, (la figura 24 muestra un objeto cuyo funcionamiento depende enteramente de una acción dinámica).

El movimiento puede entenderse como un fenómeno físico que experimentan los cuerpos, consistente en el desplazamiento o cambio de posición de éstos a través de un espacio, a una velocidad y por un tiempo específicos, por su interacción con elementos externos que eliminan el estado de equilibrio. Este equilibrio es el concepto que diferencia lo estático de lo dinámico, o podríamos decir, las estructuras estáticas de los mecanismos dinámicos.

El estudio del movimiento exige analizar el fenómeno desde una visión física que brinde las herramientas analíticas suficientes para que pueda ser usado de manera controlada en un proceso de diseño. Para su estudio se requiere la ayuda de la física como ciencia, entendiendo a ésta como una serie de herramientas analíticas que fundamentan el comportamiento de la naturaleza y los fenómenos que con ella se involucran. La figura 25 muestra un mecanismo 4 barras con algunas de las variables dimensionales para la ejecución de una síntesis de posición.

El hombre hace mucho tiempo ha tratado de establecer las relaciones entre las causas y las consecuencias del movimiento. Los primeros científicos usaron metodologías experimentales casuales y basadas en el tanteo y el error para identificar las circunstancias que regían lo que podían ver y no fue sino hasta la edad media con la revolución científica que se pudo aproximar la experiencia a un fundamento verificable derivada de una experimentación sistemática

airzonetents, Bill Guilford y Buckminster Fuller institute

Figura 23

Estructuras inflables, tensegrity y geodésicas



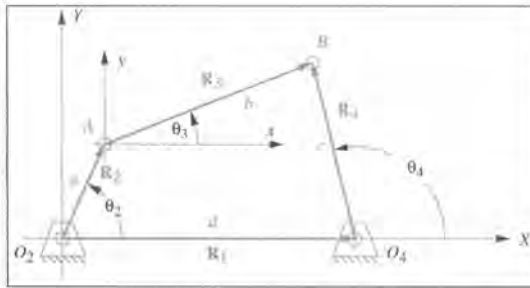
Figura 24 Koziol

Sacacorchos Sancho



Norton, Robert L. Diseño de Maquinaria. Mc Graw Hill. 1995.

Figura 25

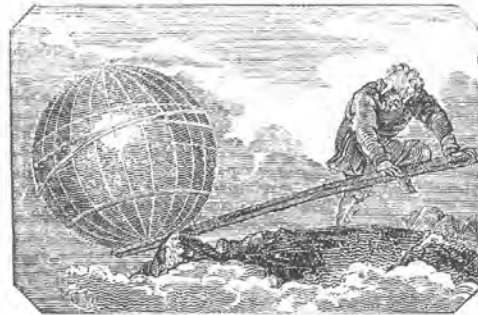


Variabes de diseño para un mecanismo 4 barras .

y progresiva, acompañada de una teoría matemática que se derivaba del razonamiento puro<sup>16</sup>.

El primer indicio escrito que se tiene de un estudio argumentado de estos elementos se remonta a Aristóteles, el cual con su Tratado de Mecánica evidencia ya una serie de términos clave que aún hoy son la base del estudio de este fenómeno físico. Cuando Aristóteles estudiaba el movimiento de los cuerpos evidenció que la potencia, la masa, el peso y la velocidad, eran parámetros de análisis físico para entender el comportamiento dinámico de un cuerpo. Tanto así que propuso que la potencia de un cuerpo en movimiento era proporcional a la masa o el peso del mismo y a la velocidad que éste alcanzaba. También exploró el comportamiento de la palanca, sus condiciones de equilibrio y movimiento, y propuso una ley de potencias en su libro Física, en la que regulaba el funcionamiento de las palancas. Llegó inclusive a dilucidar la diferencia entre lo que llamó movimiento natural y movimiento violento, con lo cual explicó las características del movimiento de los cuerpos en caída libre y los proyectiles lanzados con algún mecanismo<sup>17</sup>. En la misma época Arquímedes trabajó de manera exhaustiva con las máquinas simples y dijo su famosa frase, “denme un punto de apoyo y moveré el mundo”. (figura 26).

A partir de Aristóteles, varios personajes han desarrollado y evolucionado las teorías del movimiento a lo largo de la historia, modificando lo que él dijo y planteando nuevos elementos en los desarrollos teórico-prácticos. Herón de Alejandría, por ejemplo, fue el primero en desarrollar un motor de vapor, al cual no le fue asignada la suficiente atención y figuró como un simple juguete y como él, pueden encontrarse múltiples ejemplos (figura 27). El movimiento se convirtió en sinónimo de máquina y con él se desarrollaron infinidad de elementos útiles para el hombre, desde máquinas de guerra hasta sistemas de transporte y con esto la idea



Mechanics Magazine (www.mcs.drexel.edu)

Figura 26

Grabado que muestra a Arquímedes moviendo el mundo.



library.thinkquest.org

Figura 27

Motor de vapor de Herón de Alejandría.

Figura 28 | knipex

Aplicación moderna de la palanca como máquina simple.



fue entonces identificar la forma en que se pueden conectar entre sí diferentes elementos para que generen un movimiento de manera útil y controlada.

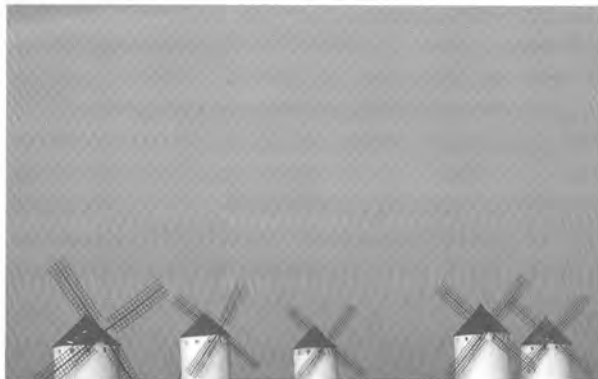
El concepto de máquina simple<sup>18</sup> se ajusta perfectamente a una serie de mecanismos que desde la antigüedad nos acompañan, la palanca, las poleas, el tornillo, las cuñas, la rueda y el plano inclinado (figura 28). Con ellos, se lograron construir máquinas asombrosas como el reloj de agua, las ruedas impulsadas con agua o los molinos de viento. Estos mecanismos se convirtieron en la base constructiva de la mayoría de los objetos que tengan el movimiento dentro de su desempeño funcional.

Dentro del origen de los objetos que se mueven se identifican básicamente dos aspectos clave, las fuentes energéticas primarias y los mecanismos encargados de convertir la energía primaria en energía útil. En las primeras, el hombre ha explorado fuentes naturales que le brinden fuerzas de impulso; los vientos, las corrientes de aire, los animales, la combustión, la expansión del vapor de agua y los mismos seres humanos fueron los primeros iniciadores de la actividad mecánica de las

18- Souza S. y Shortell J. SIMPLE MACHINES. Watch publishing. 2001.

Figura 29 | Nacional Geographic Society

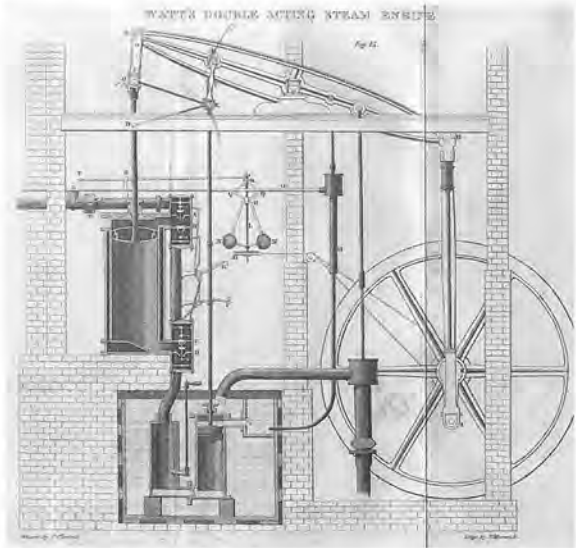
Molinos de viento



National Geographic Society

Figura 30

Motor de vapor de James Watts



máquinas. La figura 29 muestra un campo de molinos de viento en Toledo (España), con los cuales se molían granos para hacer harina a partir de la energía cinética obtenida del viento. Con el paso del tiempo se descubrieron fuentes adicionales y se optimizó el uso de las ya conocidas. Así, por ejemplo, la llegada de la electricidad, marcó un punto de quiebre en la historia de la mecánica, ya que con ella y los principios del electro magnetismo, se desarrollaron los, actualmente imprescindibles, motores eléctricos.

El manejo del vapor de agua en la revolución industrial, fue otro hecho que cambió el rumbo de la historia del movimiento, ya que con él se disparó el desarrollo de los sistemas de transporte humano y de carga y se propició el desarrollo de maquinaria industrial más rápida y productiva. Fue James Watts el que impulsó de manera industrialmente optimizada la máquina de vapor (figura 30) y con ella el progreso de la tecnología. El motor de combustión, desarrollado de manera práctica y eficiente por Otto en 1796 generó el aumento de la potencia de la maquinaria e influyó sobre todo en los medios de transporte. Y, como último ejemplo, las turbinas eólicas actuales no son más que la copia optimizada de los molinos de viento desarrollados en el siglo primero de nuestra era.

El estudio del movimiento se ve influenciado por el medio en el cual el sistema proyectado desempeñará sus funciones. Con base en esto es posible identificar tres tipos de conceptos de análisis para los objetos dinámicos. Cuando un objeto dependa de su interacción con un medio fluido líquido para funcionar, se dice que es necesario estudiarlo desde las leyes de la hidrúlica. Si ese medio es un fluido gaseoso, se referencia a la neumática como la rama de la mecánica que rige su comportamiento. Y, si no, depende del medio que lo rodea, el sistema funcional se cataloga simplemente



Figura 31 | [www.neilpryde.com](http://www.neilpryde.com) y [www.wrapables.com](http://www.wrapables.com)

como un mecanismo. La figura 31 muestra un ejemplo de cada aplicación. Un nuevo desarrollo de tabla de windsurf en el cual se ven aplicados principios neumáticos e hidráulicos y un exprimidor de cítricos con un mecanismo de conversión de movimiento.

Aplicaciones hidráulicas, neumáticas y mecanismos.

Cada uno de estos elementos puede ser fácilmente ejemplificado. La hidráulica puede verse representada en el diseño de las embarcaciones como dispositivos de navegación marítima o fluvial, en ellos, la interacción objeto agua se convierte en la base del éxito funcional. La neumática y la aviación han estado unidas desde el origen de esta última, la dinámica del aire y su naturaleza determinan la estabilidad y funcionamiento de las aeronaves. Y el sistema de transmisión de potencia de una bicicleta es un mecanismo que no depende del fluido que lo rodea para ejercer su función y sólo el análisis biomecánico permitirá abordar este diseño con seguridad.

Figura 32 | Análisis computacional de mecanismos.

[www.ugs.com](http://www.ugs.com)



Con el siglo XX y el desarrollo de los computadores, el uso de las herramientas dinámicas por parte de los diseñadores en sus proyectos amplió sus espectros. Conquistar el espacio es una muestra fehaciente de la interacción entre la física, los computadores y los principios del movimiento. Además, se abrió con esto la posibilidad de trabajar con mecanismos más complejos interconectados entre sí, ya que su síntesis y análisis se facilitaba en la medida en que las herramientas de cómputo se hacían más asequibles y poderosas. La figura 32 muestra una modelación computacional del tren de transmisión de potencia de una batidora eléctrica con ayuda de análisis por el método de elementos finitos.

La robótica ha sido una de las expresiones contemporáneas del entendimiento complejo de las leyes más innovadoras que rigen el movimiento y que demuestra las inmensas posibilidades que para un diseñador tiene manejar este fenómeno desde una óptica utilitaria y

Figura 33 | en.red-dot.org

Robots de manufactura



no como una barrera intelectual. Aunque las máquinas autónomas existen hace mucho tiempo, la presencia de la electrónica dentro de los sistemas de control generó que los dispositivos pudieran trabajar de manera más precisa y continua, buscando con ello dos elementos, la comodidad de los usuarios de estos dispositivos y la eliminación del error humano cuando se aplicaban a maquinaria industrial de medición, manipulación o manufactura. La figura 33 muestra 3 robots de manufactura fabricados por la compañía KUKA Roboter. Con ellos se ilustra la intervención tecnológica y de diseño en aplicaciones dinámicas de alta complejidad.

Funcionalmente hablando, el diseño industrial también se ha apropiado del movimiento en la medida en que comenzó, específicamente hablando en la Segunda Guerra Mundial, al evidenciar que el hombre es un ser dinámico que utiliza su energía para operar los objetos con los cuales interactúa. La biomecánica ha dado cuenta y razón de esa interacción entre el movimiento del cuerpo humano y su relación con los objetos a partir de variables como la fuerza, la velocidad, la aceleración y la trayectoria. La figura 34 ilustra la modelación de una parte del cuerpo humano y sus elementos de análisis. Hace parte del origen del concepto de movimiento en la medida en que

la ergonomía se ha apropiado de este estudio y lo ha sabido involucrar de manera sistémica en los procesos de diseño buscando siempre una mejor adecuación de los productos a los usuarios.

Por otro lado, un poco más antiguo que el de la biomecánica analítica, los diseñadores han visto el movimiento como herramienta de transformación para los objetos. La plegabilidad de los sistemas ha permitido adecuar objetos industriales a funciones de utilidad donde el valor de uso de transformación era primordial. El diseño de objetos que se muevan para cambiar su configuración, en tamaño, forma o dimensiones, ya sea para ser usados en etapas intermedias del proceso o sólo en las instancias inicial y final, es parte de lo que el hombre ha tenido que hacer para lograr que el mundo artificial pueda adaptarse mejor a su mundo sensorial.

Figura 34 | www.utmb.edu

Análisis biomecánico del cuerpo



La silla mariposa, diseñada por el Grupo Austral en 1938, es un fiel ejemplo de este tipo de aplicaciones en el diseño. (figura 35).

Actualmente el desarrollo de sistemas dinámicos innovadores se basa en materiales de última generación que sean capaces de interactuar con su medio ambiente. Los materiales astutos, especialmente las aleaciones con memoria de forma, permiten crear mecanismos que son autónomos y capaces de contraerse o expandirse ante la presencia de un impulso eléctrico, térmico o magnético.

## Conclusiones

El hombre encontró una relación controlable entre la forma y la función de los objetos que se diseñan y fabrican para facilitar su diario vivir a través de su interacción histórica con el proceso de la creación material. Muchos de estos objetos requieren de un análisis de su configuración estructural y la síntesis de los sistemas dinámicos para que puedan funcionar. En este punto, en donde se han explorado por separado los orígenes de los tres elementos básicos que componen la función técnica mecánica (la forma, las estructuras y el movimiento), se evidencia un gran conjunto de elementos que deberán ser tratados de manera conjunta si se busca obtener eficacia y optimización funcional en los objetos cuya función técnica mecánica sea prioritaria.

La complejidad con la que las estructuras y los mecanismos dinámicos actuales son generados, parte de una base conceptual casi tan antigua como el hombre mismo, definida a partir de la comprensión del mundo que nos rodea y la materialización de los fenómenos físicos que observamos. Entender y conocer los orígenes de los elementos individuales de un complejo engranaje de conceptos concurrentes y su relación con los patrones que la naturaleza utiliza de manera sutil para funcionar, le da al diseñador la claridad mental para abordar el proceso de la proyectación de una manera segura.

Figura 35 | www.ragoarts.com

Silla mariposa



- Di Bartolo, Carmelo. NATURALEZA COMO MODELO, NATURALEZA COMO SISTEMA. En: Experimenta. N° 31. Oct 2000.
- Williams C. LOS ORÍGENES DE LA FORMA. Editorial Gustavo Gili. 1984.
- Thompson D. ON GROW AND FORM. Cambridge University Press. 1961.
- McMahon T. y Tyler B. TAMAÑO Y VIDA. Editorial Labor. 1986.
- Wagensberg, Jorge. COMPLEJIDAD E INCERTIDUMBRE. En: Mundo Científico 201. Mayo 1999.
- Leroi-Gourhan, André. EL GESTO Y LA PALABRA. Ediciones de la biblioteca Universidad Central de Venezuela. 1971.
- Comité de Autoevaluación del Programa de Diseño Industrial. Proyecto Educativo. Universidad Pontificia Bolivariana. 2005
- Gordon, J.L. ESTRUCTURAS O POR QUÉ NO SE CAEN LAS COSAS. Celeste ediciones. 1999.
- Kepes G. STRUCTURE IN ART AND IN SCIENCE. George Braziller, inc. 1965.
- Otto F et al. ARQUITECTURA ADAPTABLE. Editorial Gustavo Gili. 1979.
- Salvadori M. y Heller R. ESTRUCTURAS PARA ARQUITECTOS. Kliczkowski Publisher. 1986.
- Timoshenko, Stephen P. THE HISTORY OF STRENGTH OF MATERIALS. Dover. 1982.
- Gordon, J.E. LA NUEVA CIENCIA DE LOS MATERIALES FUERTES. Celeste ediciones. 2002.
- Paisson A. A HISTORY OF MECHANICAL INVENTIONS. Dover. 1988.
- Dugas R. A HISTORY OF THE MECHANICS. Dover. 1988.
- Souza S. y Shortell J. SIMPLE MACHINES. Watch publishing. 2001.
- Manzini E. LA MATERIA DE LA INVENCION. Ediciones CEAC. 1993.
- Norton R. DISEÑO DE MÁQUINAS. Prentice Hall. 1A edición. 1999.
- Dromer P. EL DISEÑO DESDE 1945. Ediciones Destino. 1995.
- Moisset de Espanés D. INTUICIÓN Y RAZONAMIENTO EN EL DISEÑO ESTRUCTURAL. Escala. 2a ed. 2003.
- STEVENS, Peter S. PATRONES Y PAUTAS EN LA NATURALEZA. Salvat Editores, S.A. Barcelona. 1987. 293p.
- ALEXANDER, Christopher. "Ensayo sobre la síntesis de la forma". Ediciones Infinito, Argentina. 1976.
- ENGEL, Heino. "Sistemas de Estructuras". Editorial Gustavo Gili S.A. Barcelona. 2001.