

THEORIES, METHODS AND TECHNIQUES FOR THE DESIGN OF TECHNICAL SYSTEMS IN THE WORK OF LEONARDO DA VINCI.

Cerveró Meliá, Ernesto; Ferrer Gisbert, Pablo S.; Capuz-Rizo, Salvador F.
Universitat Politècnica de València

In the evolution of the Engineering Design theories in the last 50 years, it is possible to highlight the influence of the Systems Theory, the Scientific method, the analogies utilization, and others project oriented methods and techniques.

This paper discusses how Leonardo applies in his work the Scientific method and the systemic approach, while considered environmental factors by introducing ecological, ergonomic and even health and safety principles.

Keywords: Leonardo Da Vinci; Technical systems design; Design theories and methods; Conceptual design

TEORÍAS, MÉTODOS Y TÉCNICAS PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS TÉCNICOS EN LA OBRA DE LEONARDO DA VINCI.

En la evolución de las teorías de diseño en ingeniería en los últimos 50 años es posible destacar la influencia de la Teoría de Sistemas, el método científico y el uso de analogías, así como otros métodos y técnicas proyectuales

Esta comunicación analiza cómo Leonardo aplicaba en su obra el método científico y el enfoque sistémico, a la vez que consideraba los factores del entorno, introduciendo principios ecológicos, ergonómicos e incluso de seguridad en el trabajo.

Palabras clave: Leonardo Da Vinci; Diseño de sistemas técnicos; Teorías y métodos de diseño; Diseño conceptual

1. Introducción

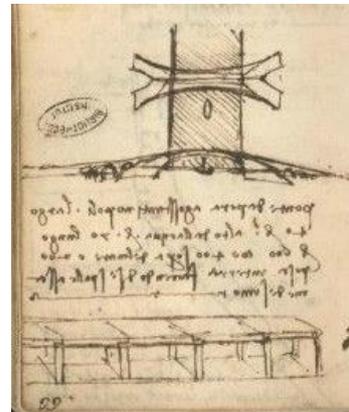
Leonardo (Vinci 1452 - Amboise 1519), aunque más conocido como artista y pintor, fue un genio multidisciplinar capaz de destacar en la mayoría de áreas del conocimiento; la ingeniería, la arquitectura, la zoología, la medicina, la botánica, etc. incluso la música, no escaparon a su voraz interés por dominar todo lo conocido.

En el campo de la ingeniería de producto, fue capaz de diseñar o proyectar barcos con cascos acorazados y con movimiento a palas, puentes móviles, esculturas de bronce de más de 7 m de altura, escafandras y submarinos, bicicletas, vehículos autopropulsados precursores del automóvil, instrumentos musicales, etc., incluso autómatas humanoides. Mientras que en el de la arquitectura e ingeniería civil diseñó, fortalezas y defensas de ciudades, canales de saneamiento, desvío de ríos, y hasta proyectó una “ciudad ideal”.

Sólo unos pocos de esos diseños o proyectos fueron hechos realidad en aquel entonces, por lo que algunos de sus contemporáneos no tomaron en serio varios de sus trabajos. Debido a ello, gran cantidad de los mismos se quedaron en lo que hoy denominamos Diseño Conceptual, otros alcanzaron el Diseño Preliminar, mientras que sólo unos pocos llegaron al Diseño Detallado, atendiendo como tales denominaciones a lo dispuesto por Martínez-Val (1993) en referencia al proceso de diseño de sistemas técnicos.

Hoy el puente que Leonardo diseñó a nivel conceptual en 1502 para el Sultán Otomano Beyazid II en el Cuerno del Oro (Estambul), es una realidad similar en la ciudad de Aas, Noruega. El Caballo Sforcesco de 7,30 m de altura, que diseñó a nivel de detalle, puede contemplarse en la plaza del hipódromo de Milán (“Il Cavallo”), y en la ciudad Grand Rapids de Michigan (“American Horse”). Mientras que su diseño de detalle del Barco de Palas, fue copiado y materializado en el siglo XVIII por el Ingeniero Robert Fulton, en sus barcos a vapor.

Figura 1: puente ideado por Leonardo y construido en Noruega por Vebjorn August Sand.



2 El método científico en Leonardo

El método científico se basa en observar un fenómeno, elaborar unas hipótesis, llevar a cabo los experimentos correspondientes y confirmar o descartar dicha hipótesis. Si los experimentos confirman las hipótesis, se establece el vínculo de certeza (ley) y si no lo confirman, se vuelve al inicio. Leonardo, como precursor del mismo, lo hacía de manera similar, optando en sus investigaciones por el sistema experimental o indagatorio de raigambre aristotélica. Así escribe “*las Matemáticas nos brindan la certeza suprema*”; “*ninguna investigación humana puede llamarse verdadera ciencia si no pasa por la demostración*”

matemática” o “ninguna certeza existe allí donde no puede aplicarse alguna de las ciencias matemáticas o de las que están unidas con ellas” (Nicholl, 2005).

Sus investigaciones aúnan ética (poseía un carácter humanista al tiempo que inconformista) junto con estética (su gran formación en dibujo y pintura le daban una visión tanto del conjunto como de las partes). Algunas de sus propias citas sobre su manera de realizar investigación científica son (García de Zúñiga, 2005):

“Antes de avanzar en una investigación haré alguna experiencia, pues mi intención es alegar ante todo la experiencia y demostrar luego, con el razonamiento, porque tal experiencia ha de operar de tal modo”.

“Y ésta es la regla verdadera según la cual han de proceder los observadores de los efectos naturales. Por más que la naturaleza empiece por la razón y termine en la experiencia, nosotros debemos seguir la marcha contraria, es decir, empezar, como lo expresé antes, por la experiencia, y con ella investigar la razón.”

“La experiencia no se equivoca jamás, solo se equivocan vuestros juicios, que se prometen resultados extraños a la experimentación personal” (Vezzosi, 2011).

Así por ejemplo, se preocupó por la solidez de las vigas, y llegó a realizar formulaciones matemáticas sobre su flexión. Consiguió definir leyes, aunque imperfectas, en relación a la línea elástica en el caso de las secciones diferentes (para vigas cuadradas, horizontales y apoyadas en sus extremos) llegando a observar que la resistencia varía en relación al cuadrado de su longitud.

3. La teoría de sistemas en Leonardo

En el proyecto de sistemas técnicos (equipos, máquinas, artefactos, etc.), por ser considerados estos complejos, las partes no pueden ser diseñadas de manera individual, sin ser afectadas por las de su entorno, es decir, tienen carácter sistémico. Por ello, es necesario observar la relación de cada una de las partes con el todo u objetivo global a alcanzar (sistema objeto), así como entre ellas. De ahí la conveniencia, para el estudio del objeto, de considerar la división en subsistemas y componentes, aprovechando las zonas con menores interferencias. Es decir, deben estudiarse a la vez con una visión interdisciplinar, al menos en las etapas iniciales.

Leonardo, no sólo fue capaz de crear sistemas complejos como relojes, mecanismos, y máquinas, sino que aprovechando los conocimientos alcanzados en todos estos campos, y en el de fisonomía humana (adquirido de joven en el taller del escultor y pintor florentino Andrea Verrocchio) y en la anatomía forense (realizados con Marcantonio della Torre, profesor de anatomía de la Universidad de Pavía), los relaciona todos, y los observa desde la globalidad e interdependencia. Así, identifica al cuerpo humano como un sistema complejo (considera que así funciona la Naturaleza) y es capaz de extrapolar esos conocimientos metabólicos y orgánicos a sus diseños. Proyecta y hace funcionar incluso un autómatas humanoide.

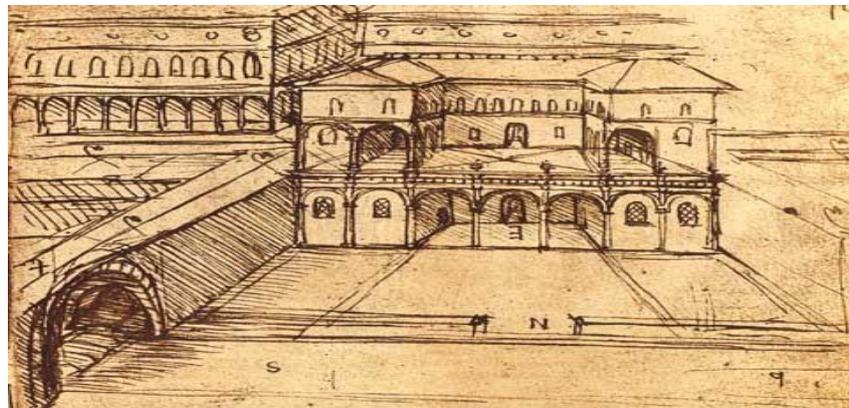
Constituye así un claro anticipo de las estrategias actuales de diseño, partiendo de la consideración de su objeto como un sistema global e interdependiente. Y también de los principios del diseño sostenible o ecológico, consciente de las influencias sobre el clima, el paisaje, los seres vivos y el conjunto de la Naturaleza. En relación a esto escribe *“Nunca se encontrará invento más bello, más sencillo o más económico que los de la naturaleza, pues en sus inventos nada falta y nada es superfluo”; “El mundo está regido, no por Dios, sino por la incesante creatividad de la naturaleza” (García de Zúñiga, 2005).*

En 1493, para el posible proyecto de expansión de Milán después de un largo periodo de peste, diseña la ciudad ideal (su *“ciudad nueva”*) gracias a sus conocimientos de urbanismo,

arquitectura e hidráulica y utilizando de manera precursora criterios de organización racional, funcional y ecológica. Dispone los cursos de agua, el alcantarillado y distintas vías de circulación interior (a ser posible una superior para las personas y otra inferior para carros y caballerías) todo ello en busca de criterios de belleza y salubridad. Incluso impone a los establos aberturas para ventilación natural. Escribe al respecto “*Los suministros como la madera, el vino y otras similares se llevarán por una puerta, mientras que los retretes, establos y otras materias fétidas deberán vaciarse subterráneamente*”. Unos pocos años antes de su muerte, repetirá otro diseño conceptual con dichos principios racionales y ecológicos para Francisco I rey de Francia, en la denominada ciudad geométrica de Romorantin.

Leonardo admiraba y dominaba la geometría, pero para él la complejidad de la naturaleza no podía reducirse a cifras y análisis mecánicos. Su atención especial a las cualidades, al dinamismo, y a la visión de conjunto son una parte esencial de su ciencia, presentes hoy en los actuales enfoques sistémicos y en la teoría de la complejidad (Pigem, 2013)]

Figura 2: boceto de su “ciudad nueva” (Manuscritos del Instituto de París)



4. Los ensayos

Para sus proyectos y diseños, Leonardo precisaba conocer los esfuerzos que podían realizar tanto los medios materiales a utilizar, como los recursos humanos empleados. Por ello realiza sus propios estudios de resistencia de materiales y sobre la naturaleza humana. Así, estudia el comportamiento a pandeo en vigas según se van aplicando cargas en su centro. Igualmente lo hace con cuerdas y cables cuando son sometidas a esfuerzos, tanto de manera directa como a través de poleas (Jaramillo, 2011). También hace estudios sobre el rozamiento entre distintos cuerpos y sobre elementos rodantes en distintas superficies. Todo ello para establecer posibles estimaciones trasladables con posterioridad a cada uno de sus proyectos.

Los Códices de Madrid I y II se titulan respectivamente “Tratado de estática y mecánica” y “Tratado de fortificación, estática y geometría”. Los Manuscritos del Instituto Francés de París, en concreto el Manuscrito “E”, es un tratado de física y mecánica, y el “M”, uno de geometría. Mientras que en el Códice Forster de Londres existen temas de geometría, hidráulica y física. Finalmente el Códice Atlántico (Biblioteca Ambrosiana de Milán), también dispone de folios con temas de mecánica, física y matemáticas.

Aunque sus estudios de mecánica adolecen de algunos errores, también se le reconocen algunos aportes a la ciencia y resistencia de materiales, como ser el primero en dibujar la catenaria y proponer su estudio mediante un modelo discreto aún hoy en uso (Truesdell, 1975).

Figura 3: Códice Foster II, c.89v. Códice de Madrid I, f 137r. Códice Foster II. c.86v
(<http://www.museogalileo.it/>)

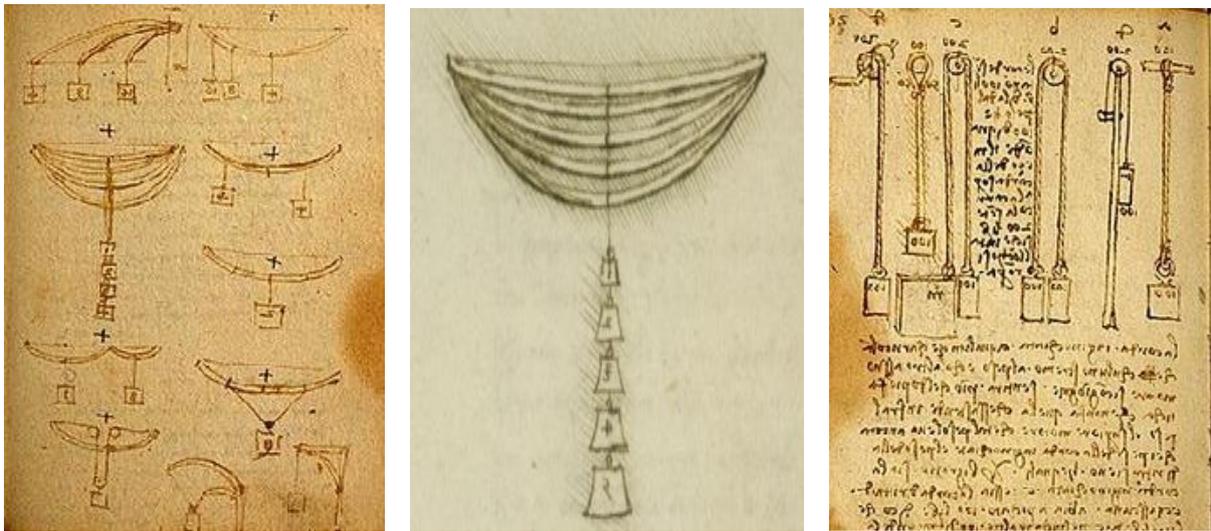
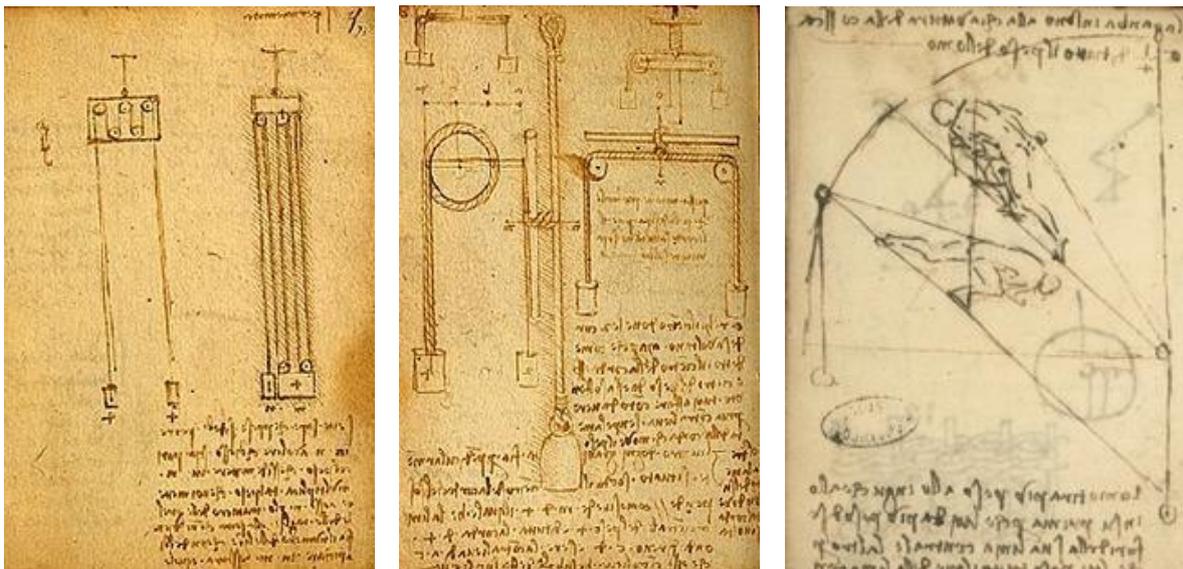


Figura 4: Códice Foster II, c.73r. Códice Foster II, c.77v. Manuscrito L, folio 28r
(<http://www.museogalileo.it/>)



5. El estudio del trabajo, la ergonomía, y la seguridad y salud.

Igualmente, tanto para el Proyecto de Desvío del Río Arno, como para el del Barco de Palas y otros, Leonardo establece conceptos para racionalizar el trabajo humano, observar y medir sus esfuerzos, encontrar sus rendimientos, sus mejores posturas, etc. Puede por lo tanto identificarse como un precursor en el Estudio del Trabajo, la Ergonomía y los Estudios de Seguridad y Salud.

En manuscritos del Instituto Francés de Paris, del Códice Forster (Victoria and Albert Museum de Londres), y de la Royal Collection de Windsor, se pueden encontrar dibujos de gran calidad de los obreros trabajando o adoptando las posiciones que él creía más adecuadas, constituyendo un espléndido estudio del movimiento.

Figura 5: Manuscrito B, folio 51v. Codice Foster II, c. 45v. (<http://www.museogalileo.it/>)

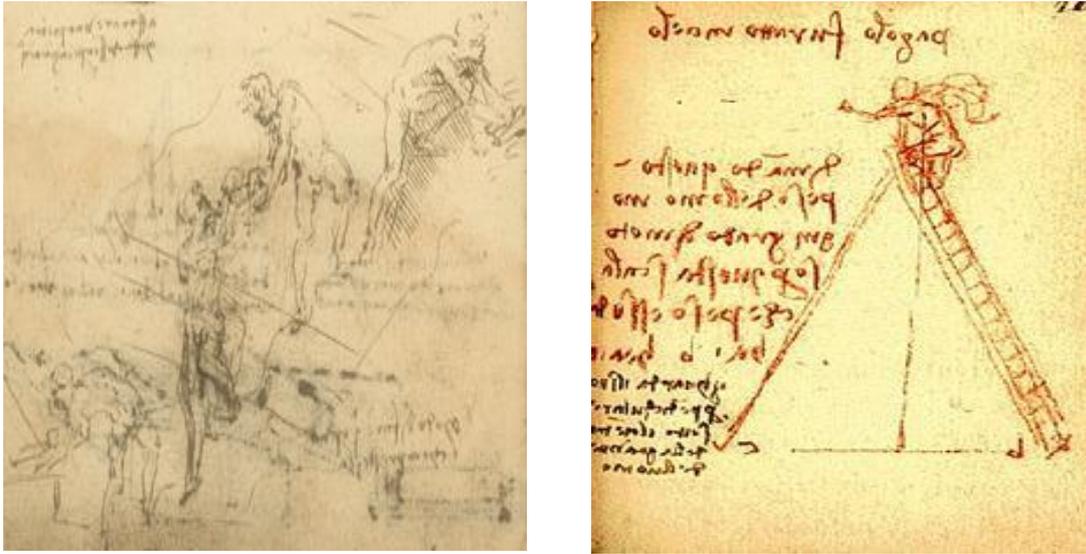


Figura 6: Royal Collection, Windsor, f 19149 K/P 118va. Royal Collection, Windsor, f 12644v



6. Las analogías

El uso de analogías también fue un instrumento utilizado por Leonardo en muchos de sus proyectos. En los manuscritos de la figura 7, analiza el movimiento de un brazo humano realizando un esfuerzo, lo dibuja y genera un mecanismo artificial que lo emula. Una analogía clara entre la Naturaleza, que era su principal fuente de inspiración, y la máquina proyectada. Se supone que este mecanismo fue utilizado en la construcción de su proyecto de "Autómata".

Igualmente realizó analogías para sus dispositivos con los que pretendía hacer volar al hombre, asimilando las alas de su prototipos a las de sus detallados "Estudios sobre el vuelo de los pájaros" existentes en el Códice de Turín, así como de los murciélagos. Las analogías, son también herramientas utilizadas en los diseños de hoy en día.

Figura 7: Manuscrito H folios 43v-44r. Códice de Madrid I, folio 90 v.
(<http://www.museogalileo.it/>)



7. Métodos, técnicas y herramientas proyectuales

En los proyectos del Barco de Palas, el Desvío del Río Arno, el Traje de Buceo, el Autómata, etc. Leonardo también resulta precursor en el empleo de muchos conceptos, métodos, técnicas y herramientas proyectuales.

7.1 El Barco de Palas

Hacia 1490, Leonardo arranca con el proyecto, y toma como base diseños de barcos preexistentes como el de Taccola o Francesco di Gorgio, que ya incorporaban la solución de las palas. Pero, junto a otras mejoras, diseña un mecanismo de engranes de ruedas dentadas, “*el multiplicador*”, para que el barco navegue a más velocidad. Mediante la fuerza humana, moviendo unas manivelas o pedaleando, se conseguían hasta 50 vueltas/minuto alcanzando la embarcación una velocidad de 50 millas/hora.

Leonardo describe hasta el detalle los engranajes, los calcula, y los dibuja (en sección, en perspectiva y descompuestos) tal y como se realizaría en un plano de taller actual.

Descompone el sistema según sus funciones, estudiando cada subsistema con sus componentes. En el “subsistema primario” los hombres aplicarán la fuerza o energía para el movimiento. Dos “subsistemas intermedios” contienen a la “*carraca*”. Y dos subsistemas de “*coronas exteriores*” y dos “*conjuntos de palas*”, uno para cada lado de la embarcación.

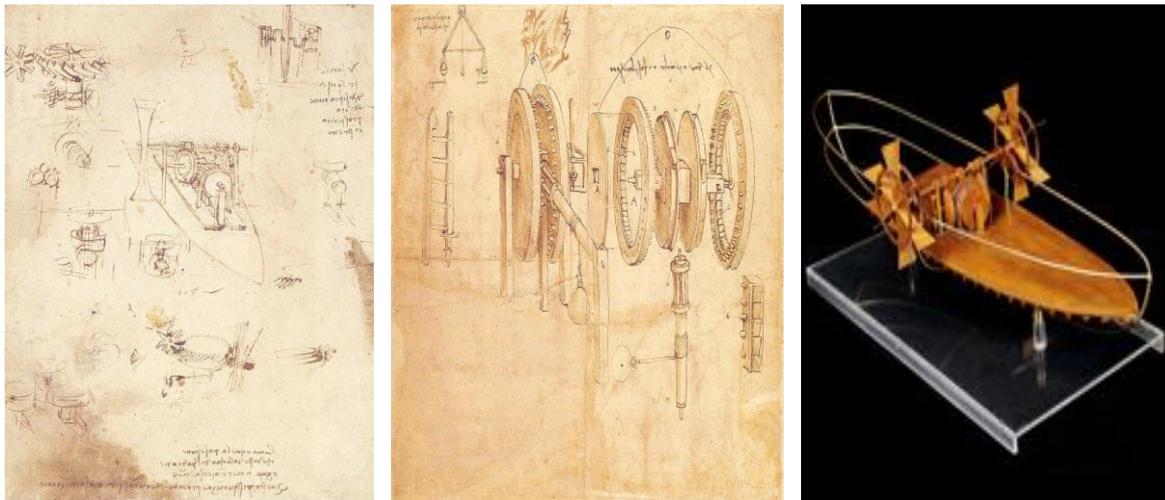
También realiza estudios sobre el número de marineros que deberían aportar fuerza al sistema sin llegar a quedar exhaustos, y su posición más adecuada en la embarcación. Incluso establece protecciones para las piernas de los navegantes, aspectos relacionados con la Ergonomía y la Seguridad y Salud actuales.

En su texto, especifica la conveniencia de que la madera utilizada sea de cedro o roble, lo que verifica su experiencia en ensayos y resistencia de materiales (estanqueidad, fortaleza y duración, resistencia a la humedad, a los incendios, etc.). También establece las características de la tornillería a utilizar, lo que da una idea del nivel de detalle del proyecto.

Lleva a cabo estudios de flotabilidad, de equilibrio, de cálculo del centro de gravedad de la embarcación, de la distancia entre centroides, de la incidencia del viento, etc. lo que correspondería al documento “cálculos” de los proyectos de ingeniería.

La mayoría de los manuscritos de este proyecto se encuentran en el Códice Atlántico de la Biblioteca Ambrosiana de Milán, aunque existen algunos en la Royal Library de Windsor. En 1807 el ingeniero estadounidense Robert Fulton (Pensilvania, 1765 - Nueva York, 1815) utilizó esta idea con gran éxito, utilizando el vapor como fuerza.

Figura 8: Códice Atlántico F945r, Códice Atlántico L30v, maqueta del museo Nacional de Ciencia y Tecnología Leonardo DaVinci, Florencia (www.museoscienza.org)



7.2 El proyecto de desvío del Río Arno.

En 1494 Pisa, bajo el dominio de la Florencia de los Médicis, es cedida a los franceses, pero al año siguiente los franceses se retiran de Italia y los pisanos declaran a su ciudad independiente. Años después, Florencia, quiso forzar la rendición de Pisa para que volviera a sus dominios, y además ganar una salida al mar, lo que justificaba la decisión de alejar el Arno de Pisa. Nicolás Maquiavelo (Florencia, 1469-1527) apoderado por la ciudad, encarga a Leonardo, en 1504, el proyecto de desviarlo y hacerlo navegable.

Éste proyecta un doble canal y el cierre posterior del viejo cauce con un dique. Realiza mapas de la zona, vistas aéreas, diseña esclusas, calcula el volumen de tierra a retirar, etc. Escribe: *“El canal tendrá 20 brazos de ancho en su fondo y 30 en la parte superior, así como 2 o incluso 4 brazos de profundidad para que puedan destinarse 2 brazos de agua a los molinos...”*

Se precisaban 19 km de nuevos cauces, y en una estimación inicial calculó que había que extraer cerca de 1 millón de toneladas de tierra y que se necesitarían 54.000 jornadas de trabajo. Por ello, para acelerar las obras, diseña varias máquinas, entre ellas una grúa-excavadora (Códice Atlántico folio 994r).

Figura 9: Plano de Pisa y el río Arno (Codex Madrid II, f 52v, 53 r). Diques para Florencia (Royal Collection)



Los mapas de la zona (en planta, en perspectiva y a vuelo de pájaro), y de los montes a cruzar (en planta y alzado), están realizados al detalle y se encuentran principalmente en el Códice II de Madrid, en el Codex Atlántico de Milán y en la Royal Collection Trust.

La ejecución del proyecto fue iniciada pero su gestión no fue otorgada a Leonardo sino a un ingeniero hidráulico llamado Colombino. Al parecer, la profundidad que éste otorgó al cauce, no fue la dispuesta por Leonardo. Tras superarse las previsiones económicas iniciales con creces (nótese que se precisaba tener una parte del ejército vigilando constantemente las obras, para evitar que los pisanos las destruyeran), y habiéndose construido menos de la mitad del desvío, llegó una fuerte tempestad que destruyó gran parte de lo desarrollado. Florencia optó por abandonar el proyecto y el Arno siguió en sus viejos cauces.

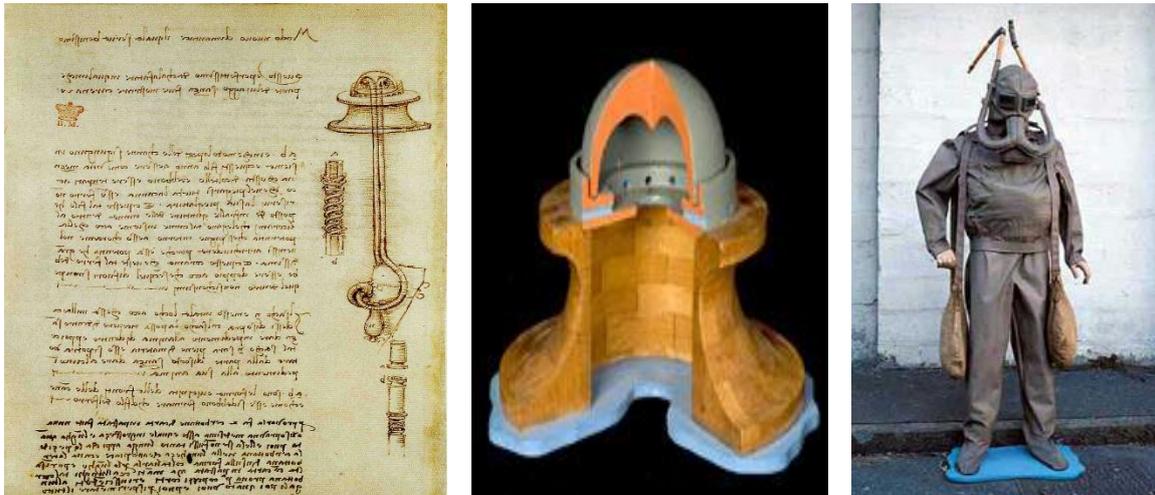
7.3 El traje de buceo o escafandra.

Este proyecto le fue encargado por la Republica de Venecia durante su corta estancia en ella, hacia 1502. Pretendía ser una novedad en cuanto a la defensa contra barcos turcos en la bahía veneciana, para alcanzarlos de manera submarina, sin ser descubierto, así como poder ser utilizado para exploraciones acuáticas. Y hoy puede afirmarse que su idea, que ha sido probada con éxito, supuso la base de las escafandras y trajes de buceo posteriores.

El proyecto, que podría considerarse un estudio preliminar, está compuesto por memorias manuscritas y dibujos, existentes en el Códice Arundel (British Museum, Londres). Describe que el traje estará hecho de cuero (piel de cerdo tratada con aceite de pescado para repeler el agua) y a él se conectarán dos mangas de aire fabricadas con cañas y muelles metálicos para que eviten ser aplastadas por la presión y mantener la flexibilidad. También una campana de madera y corcho que flotará en la superficie y mantendrá la comunicación con el aire exterior. La forma de campana aseguraba la imposibilidad de entrada de agua al interior de los tubos de respiración en su parte exterior y además minimizaba su visión exterior.

Leonardo, previsor en todo, proyecta dos tubos, uno para la entrada de aire fresco y otro tubo para la expulsión del aire ya consumido, para de esta manera no contaminar el aire entrante, y que la persona pudiera estar con seguridad más tiempo bajo las aguas. Además proyecta una bolsa de aire intermedia, atada al pecho para garantizar una rápida flotabilidad. El buceador llevaría inicialmente dos pequeños sacos de arena que facilitarían su bajada y la bolsa de aire facilitarían su rápida subida. Implementó una máscara para la cabeza que llevaba incorporadas unas gafas de cristal. Además, el diseño del traje incluía otra pequeña bolsa anexa para facilitar que el submarinista pudiera orinar en ella. Todas ellas constituyen características pertenecientes a las actuales áreas de Ergonomía y de Seguridad y Salud.

Figura 10: Códice Arundel folio 24v (British Museum, Londres). Maquetas pertenecientes al Museo Nacional de Ciencia y Tecnología Leonardo Da Vinci (Milán) (www.museosciencia.org)



7.4 El autómat

El proyecto y realidad del “cavaliere meccanica”, exhibido en Milán en 1495 para impresionar en los actos lúdicos de Ludovico Sforza (Duque de Milán), era un caballero con armadura capaz de moverse por sí solo. Podía flexionar las piernas, mover las manos y los brazos, e incluso girar el cuello. Cuando abría la boca un tambor giratorio automático en su interior le permitía simular que hablaba. Un conjunto de engranajes, muelles y árboles de levas, efectuaban el movimiento de manera previamente programada. Piezas dentadas modificables en los engranajes, así como motores accionados por un eje y compactados de una forma ingeniosa, hacían la función de mandos programables del robot. Este arquetipo mecánico causó un gran impacto en su época (Nichol, 2005) (Escrig, 2004).

Figura 11: Dispositivo mecánico (Códice Atlántico folio 388v-a). Robot de Mario Taddei (Wikipedia). Robot de la Web del “Istituto e Museo di Storia della Scienza” de Florencia



En los folios del Códice Forster (Victoria and Albert Museum, Londres) existen bocetos de su cabeza y cuello, y escritos aclaratorios; mientras que en el Códice de Madrid I se muestran dibujos de sus partes móviles.

El historiador italiano Carlo Pedretti (Bologna 1928) redescubrió las notas y bocetos referentes al autómeta en 1957. En 2002, Marc Rosheim, ingeniero mecánico, construyó un modelo físico completo del robot para un documental de la BBC. Finalmente, en 2007, el diseñador y profesor Mario Taddei (Bologna 1972) reconstruyó el autómeta en el Politécnico de Milán, siguiendo los planos de los códices Atlántico, de Forster y de Madrid I, y éste funcionó perfectamente para las funciones que tenía asignadas (Taddei, 2007).

8. Conclusiones

No es correcto decir que eran los proyectos y diseños de Leonardo los que tenían defectos o carencias, e impedían su construcción, sino que la tecnología del momento y la mente de los restantes actores que participaban en sus proyectos, no estaban aún preparados para soportar la creatividad y visión de futuro del genio del Renacimiento.

Su visión y forma de trabajar en el mundo del proyecto y del diseño, sus teorías, métodos o técnicas, pueden ser útiles aun hoy en día. De hecho, si se analizan sus proyectos y sus teorías y metodologías, se puede afirmar que gran parte de lo utilizado y manifestado por Leonardo hace más de 500 años es coherente y compatible con los objetos y técnicas utilizados hoy en día en los ámbitos en los que él trabajó.

No solo fue un precursor en numerosos objetos proyectados (las propias invenciones), sino que lo fue también de la utilización de técnicas y herramientas para diseñarlos, dimensionarlos, proyectarlos, e incluso ejecutarlos.

Referencias

- Charles Nicholl. (2005). Leonardo el vuelo de la mente. Santillana Ed. Generales S. L.
- Escrig, A. (2004). El reloj milagroso. Grupo Almuzara, Divulgación científica.
- García de Zuñiga, E. (2005). Leonardo da Vinci. Aforismos. Ed. Espasa Calpe S.A.
- Jaramillo H.E. (2011). Un análisis de la Resistencia de Materiales a partir de los postulados de “Consideraciones y Demostraciones Matemáticas sobre dos Nuevas Ciencias” de Galileo Galilei. Lámpsakos. No. 5, pp. 53-59.
- Martínez-Val, R. (1993). Diseño industrial. Anales de Ingeniería Gráfica. Vol. 2, Nº 2.
- Pigem, J. (2013). Leonardo Da Vinci El visionario de la ciencia. Revista “Historia” National Geographic, nº 113.
- Taddei, M. (2007). Il robot di Leonardo da Vinci. www.leonardo3.net.
- Truesdell, C. (1975). Ensayos de la Historia de la Mecánica. Editorial Tecnos S.A.
- Vezzosi A. (2011). Leonardo Da Vinci, ciencia y arte del universo. Ed. Blume.
- <http://estructurando.net/>

Nota: Las referencias “v” y “r” existentes junto a la denominación de los números de folio del manuscrito o códice significan verso y reverso.