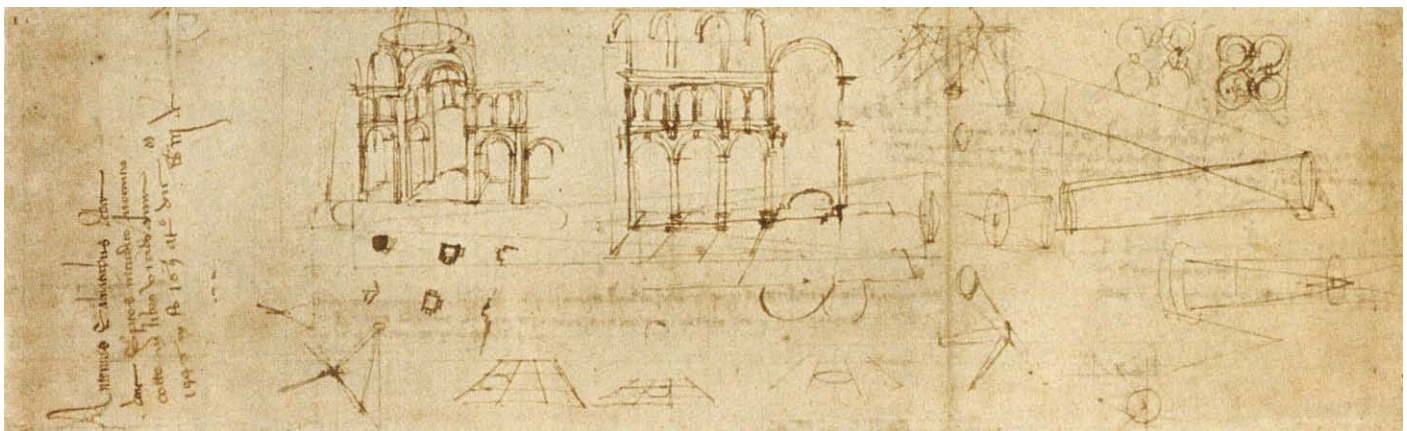


Las lesiones estructurales en los manuscritos de Leonardo da Vinci

Structural damages in the manuscripts of Leonardo da Vinci

David Hidalgo García

Universidad de Granada (España / Spain).



1. Primeras propuestas arquitectónicas de Leonardo. Fuente: Códice Atlántico, folios 42v-c y 362v-b.
1. Leonardo's first architectural proposals. Source: Codex Atlanticus, folios 42v-c and 362v-b.

Palabras clave: Renacimiento, Leonardo, restauración, arquitectura, lesiones estructurales

Leonardo da Vinci está considerado como uno de los mayores genios y artistas del Renacimiento. Sus estudios se han adoptado como referencia en posteriores descubrimientos de la ciencia moderna. Menos estudiadas resultan sus aportaciones a los campos de la arquitectura y su restauración, pero no por ello de menor calidad e importancia. Su interés por ellos se aprecia claramente en sus manuscritos. Dentro de este campo, reflejó estudios relacionados con las causas de rotura de muros, grietas, asentamientos diferenciales y sus posibles soluciones. Estas propuestas son consideradas por algunos autores como un tratado en la materia. El presente artículo realiza un análisis de los estudios de lesiones estructurales desarrollados por Leonardo y la contribución que pudieron hacer otros artistas en su proceso de aprendizaje.

Keywords: Renaissance, Leonardo, restoration, architecture and structural damage

Leonardo da Vinci is considered one of the great geniuses and artists of the Renaissance. His studies have been referenced in subsequent modern science discoveries. However, less studied are his contributions to the fields of architecture and its conservation, even when they are of no less importance. His interest in building pathology can be clearly seen in his manuscripts. Within this field, he studied the causes of structural wall damage, cracks, differential settlement and their possible solutions. These proposals are considered by some authors as a treatise on architecture. This article analyses Leonardo's studies on structural damages and the influence that other artists could have had in his learning process.

Las primeras intervenciones de Leonardo relacionadas con el mundo de la arquitectura, se encuentran reflejadas en el Códice Atlántico, folios 42v-c y 362v-b (figs. 1 y 2) y Códice Windsor, láminas 12560r y 12609v. Todas ellas están datadas entre los años 1488-1490, cuando Leonardo se encontraba residiendo en la ciudad de Milán a las órdenes de Ludovico Sforza. En ellas, se puede apreciar una serie de monografías de ábsides y torres que, aunque relacionadas solo con la arquitectura eclesiástica, no dejan de ser pequeños estudios que son considerados como sus primeros pasos en el campo de la arquitectura¹.

Tiene sentido que estas primeras láminas arquitectónicas de Leonardo tengan un carácter eclesiástico, puesto que en Milán coincidió con su amigo Bramante², donde ambos tuvieron la oportunidad de compartir algunos proyectos como el cimborrio del Duomo de Milán, el Duomo de Pavía, o la restauración de Santa María delle Grazie, donde Leonardo desarrolló los trabajos de su famoso cuadro *La última Cena*. Esta circunstancia generó una influencia entre ambos artistas derivada del intercambio de conocimiento en los campos de la geometría, la estática, la dinámica y la restauración arquitectónica, todos ellos considerados como fundamentales durante el Renacimiento para el correcto desempeño profesional del arquitecto³.

Leonardo's first contributions to the world of architecture are recorded in the Codex Atlanticus, folios 42v-c and 362v-b (fig. 1, 2) and the Codex Windsor, prints 12560r and 12609v. These are all dated between 1488 and 1490, when Leonardo resided in the city of Milan working under Ludovico Sforza. In these interventions, we can observe a series of monographs on apses and towers. Despite being only related to ecclesiastical architecture, these small studies are considered to be the first contributions to the field of architecture¹.

These architectural prints being of ecclesiastical nature is consistent with Leonardo's experience, as he was in Milan at the same time as his friend Bramante² and they worked together on some projects, such as the lantern tower of the Milan Cathedral, the Pavia Cathedral, or the restoration of the Santa Maria Della Grazie convent, this last one being where Leonardo worked on his famous painting *The Last Supper*. This collaboration generated an influence between both artists that was driven by the sharing of knowledge in the fields of geometry, statics, dynamics and architectural restoration, all of these disciplines considered essential for architects in the Renaissance³.

Aunque la construcción del cimborrio del Duomo de Milán se considere como una intervención de nueva planta, la carta de Fancelli a Lorenzo de Medici, fechada en agosto de 1487, indica que dicha intervención debía ser estudiada como una restauración, debido a los problemas arquitectónicos que se estaban derivando del proceso de ejecución: "La principal razón es que la cúpula del Duomo aquí parece que se cae, se ha desmontado y se investiga como reconstruirla"⁴. Esta circunstancia es confirmada por el propio Leonardo, quien en la carta que envía a la Venerable Fábrica del Duomo, reflejada en el Códice Atlántico, folio 270r-c, parte de un Duomo enfermo⁵ y explica en detalle el procedimiento adoptado para curarlo. La transcripción de la carta es la siguiente:

Señores padres diputados, de la misma forma que los médicos, tutores, curanderos de enfermos necesitan entender qué es el hombre [...] Vosotros conocéis las medicinas, que bien empleadas restituyen la salud a los enfermos y quien bien las conoce bien las usará [...]. Y con lo que demostraré cuál es la causa de la carga, y cuáles y cuántas son las causas que producen ruina en los edificios, y cuál es el modo de lograr su estabilidad y permanencia. Pero para no ser prolijo, a Vuestra Excelencia le explicaré primero la invención del primer

Although the lantern tower of the Milan Cathedral is generally considered to have been newly built by Leonardo, Fancelli's letter to Lorenzo de Medici in August 1487 shows that the intervention was to be considered a restoration process, due to the architectural problems that arose from the construction: "The main reason is that the Cathedral's dome seemed that falls, has been dismantled, so it has been taken apart and they are studying how to rebuild it"⁴. This situation was confirmed by Leonardo himself, who clearly details the solution to the problems in the Cathedral⁵ in a letter to the Venerable Factory of the Milan Cathedral. This letter can be seen in the Codex Atlanticus, folio 270r-c, with the following transcription:

Dear fathers of the Factory: just as doctors, tutors and healers need to understand that man is [...] you understand medicine, and are proficient at it, providing health to the sick, and whoever knows health will provide it well [...]. And with this I will show what is causing the excessive weight, and which and how many causes there are for the collapse in buildings, and how achieve to maintain their stability and continuity. However, to avoid becoming wordy, I will explain to your excellencies the work of the first architect of the Cathedral, and I will clearly demonstrate which his intention,

*arquitecto del Duomo, y claramente os demostraré cuál fue su intención, desarrollándola con el edificio iniciado, y haciéndoos comprender esto, claramente podréis entender la maqueta hecha por mí teniendo esa simetría, correspondencia y conformidad que la cual responde al inicio edificado*⁶.

Mediante un estudio metódico, Leonardo planificó las cargas del nuevo cimborrio y formalizó una propuesta de intervención que dejó dispersa entre el Códice Atlántico, (folios 266r, 310r-b, 310v-b, 850r, 850v, 851r y 851v), el Manuscrito B, (folio 10v) y el Códice Trivulziano, (folios 3v-4r, 2v-3r, 7v-8r, 11v-12r, 8v-9r, 20v-21r y 22v-23r)⁷. En las figuras 3 y 4 se pueden observar algunos de los folios donde estudió la configuración de los arcos y los muros de descarga que utilizaría en su proyecto.

El sistema propuesto consistía en la ejecución de cuatro pilares independientes a la estructura del Duomo, que soportarían el peso del cimborrio, evitando de esta forma cargar aún más la estructura existente.

Esta situación permitía eliminar posibles desplazamientos de los elementos constructivos y la aparición de grietas en la cúpula por sobrecarga en la cimentación. A su vez y para obtener una mayor estabilidad entre ambos elementos, propuso el anclaje por medio de cadenas de la estructura de la cúpula al

*supporting the reasoning with the building which is already under construction, and, when you have understood this, you will clearly understand the miniature I have made considering the symmetry, correspondence and conformity which answers to the already built parts*⁶.

Leonardo, using a exploration procedure, planned the structural loads of the new building, and he carried out an intervention proposal that is scattered throughout the Codex Atlanticus (folios 266r, 310r-b, 310v-b, 850r, 850v, 851r and 851v), Manuscript B (folio 10v) and the Codex Trivulzianus (folios 3v-4r, 2v-3r, 7v-8r, 11v-12r, 8v-9r, 20v-21r and 22v-23r)⁷. In figures 3 and 4 we can see some of the folios where da Vinci studied the setup of the load-bearing arches and walls that he would use in his proposal.

In this way, the proposed system involves building four pillars independent to the rest of the structure of the Cathedral, that would support the load of the lantern tower, thus avoiding possible shifts and cracks in the dome. This situation allows eliminate possible displacements of the constructive elements and the appearance of cracks in the dome by overload in the foundation. In turn, and to achieve more stability between both elements, he suggests binding the structure of the dome and the

resto del Duomo⁸. Esta solución fue adoptada posteriormente por Bramante para su propuesta de construcción de la cúpula de la Basílica de San Pedro en Roma.

No es hasta el año 1500, y durante su segunda estancia en Florencia, cuando Leonardo comienza sus estudios en solitario sobre lesiones arquitectónicas al hilo de las consultas realizadas sobre las iglesias de San Salvatore y San Miniato. En la primera, la cimentación de la iglesia se encontraba amenazada por un problema de inestabilidad del terreno ocasionado por la realización de unas excavaciones cercanas⁹. Leonardo investigó con rigor¹⁰ las causas que originaban aquella situación, y trasladó a los monjes franciscanos la solución, que consistía en la reparación y restitución de los elementos constructivos dañados y, con el objetivo de prevenir futuros desperfectos, establecía la necesidad de eliminar el agua del subsuelo y mantener limpia la red de saneamiento con el objetivo de que no se produzcan roturas por atranques.

Leonardo da Vinci dijo cuanto a San Salvatore [...] y tiene remedio, para ello según ha dado el diseño y los fallos del edificio y del agua [...] en esa parte del edificio donde están, se separan y reparan las taras y se reponen las faltas, y rehaciendo y reparando las taras se restituirá. Y tener limpios

structure of the rest of the Cathedral with chains⁸. This solution was subsequently suggested by Bramante for his construction proposal the dome of Saint Peter's Basilica in Rome.

It was not until 1500, during his second stay in Florence, when Leonardo truly began working alone in projects studying building pathology. These were carried out based on the exploration of the San Salvatore and San Miniato churches. San Salvatore's foundation was threatened by soil instability due to nearby excavation sites⁹. Leonardo carried out in-depth research¹⁰ on the causes of this and proposed a solution to counteract the problem to the Franciscan monks. This solution involved repairing and restoring the damaged building elements, and, to avoid future damage, he also recommended the water in the subsoil to be drained and keep the sanitation network clean so that there is no breakage by obstacles. *Leonardo da Vinci said about San Salvatore [...] and it has its solution in the drawing given and [...] that the defects must be separated and that part of the building they affect must have its defects and faults repaired, and after remaking and repairing the defects it would be restored. And moreover, the sewers have to be cleaned*¹¹.

*los alcantarillado*¹¹. Por su parte, el campanario de la iglesia de San Miniato se estaba construyendo según el proyecto del arquitecto Baccio d'Agnolo, aunque durante su proceso de ejecución, se derrumbó. En esta consulta, además de Leonardo, participaron otros arquitectos como Jacopo Pollaiolo y Giuliano da Sangallo¹². La intervención se inició en el año 1499, pero en 1523 se decidió no continuar con ella, por lo que quedó inconclusa.

Motivado posiblemente por estos estudios, en 1506 dejó constancia en el Códice Arundel, folios 138r, 141v, 157v y 157r de un estudio completo de las causas por las que se producen las lesiones de los muros en las edificaciones. Estas aportaciones y sus estudios sobre las causas de fractura, son consideradas por algunos autores como los primeros estudios completos en esta materia conocidos en la historia¹³.

Los primeros experimentos en fractura se deben a Leonardo [...] quien proporcionó varias reglas que establecían los indicios de la causa de la fractura. Leonardo midió la resistencia de alambres de hierro que fabricaba en su trefiladora (Códice Madrid I, folio 84v) y encontró que la resistencia variaba de forma inversa a la longitud de los alambres¹⁴.

Por tanto, sus estudios en este campo son considerados como

Moreover San Miniato's church's bell tower was being built according to the architect Baccio d'Agnolo's building project, but during its construction, it collapsed. Other architects, apart from Leonardo, took part in the exploration, such as Jacopo Pollaiolo and Giuliano da Sangallo¹². The intervention started in 1499, but it was stopped in 1523 and was never finished.

Probably motivated by this exploration, in 1506 Leonardo put forward a whole study on the causes of building walls cracking in the Codex Arundel, folios 138r, 141v, 157v, 157r. This contribution and his studies about the causes of fractures are considered by some authors as the first complete building pathology studies in the history¹³.

The first experiments on fractures exist thanks to Leonardo [...] as he provided some rules that established the signs for the cause of a fracture. Leonardo measured the resistance of iron wire that he made with his wire drawing machine (Codex Madrid I, folio 84v) and found that resistance varied in an inverse proportion to the length of the wires¹⁴.

Therefore, it is clear that if buildings from before the Renaissance have survived until our time it is because they have undergone a process of preservation and mainte-

los más completos a modo de tratado, aunque este término y Leonardo parecen incompatibles, ya que él expuso sus ideas, teorías e inventos a modo de apuntes "desordenados"¹⁵ entre sus diferentes Códices y Manuscritos, circunstancia por la que no todos los autores los consideran como un tratado en la materia.

En primer lugar Leonardo estudió las causas por las que aparecen las grietas en las edificaciones y, a continuación, explicó cuáles podían ser los remedios a emplear para solucionar dichos problemas. En palabras del propio artista: "Primero escriba un tratado sobre las causas por las que ceden las paredes y, a continuación, por separado, trate los remedios"¹⁶. Su investigación reunió las causas en tres grandes grupos: problemas de deficiencia de cimentación, presiones excesivas en fachadas que presentan grandes ventanas o huecos y, por último, deficiencias en el proceso constructivo. En la parte superior del folio 141v, (fig. 5), Leonardo explica qué ocurre cuando una pared o bóveda que presenta huecos está sometida a una gran presión:

La ventana "a" es la causa de la grieta en "b"; y esta grieta aumenta por la presión de "n" y "m", que se hunden o penetran en el suelo en el que están contruidos los cimientos

nance efforts. Therefore, although there is evidence of building restoration previous to Leonardo's work, his studies in this area are considered the most comprehensive treatise, although the term treatise and Leonardo seem incompatible, as he presented his ideas, theories and inventions on "disorganised"¹⁵ notes on all his codices and manuscripts, circumstance that is why not all authors consider his work as a treatise on this area.

Leonardo first studied the reasons why cracks appear on buildings and then explained what could be some of the solutions to mend these defects. In his own words: "First write a treatise about the reasons that make walls collapse, and then, deal with the solutions separately"¹⁶. His research gathered the causes into three large groups: problems with foundation defects, excessive weight on façades with large windows or gaps, and, lastly, deficiencies in the construction process.

In the upper part of folio 141v (fig. 5), Leonardo explains what happens when a wall or vault with gaps is under a great load: Window A is the cause of the crack in B; this crack grows due to the pressure of N and M, which sink or penetrate *into the soil whereon the foundations are built to a greater extent than the lighter part in B. Moreover, the old foundations under B have already settled, while the pillars N and M have not.*

más que la parte más ligera de “b”. Además, los antiguos cimientos bajo “b” ya se han asentado, cosa que aún no han hecho los pilares “n” y “m”. De ahí que la parte de “b” no se asiente perpendicularmente, sino que sale hacia fuera oblicuamente; por el contrario, no puede inclinarse hacia dentro, porque una parte con ésta, separada de la pared principal, es más grande por fuera que por dentro, y la pared principal, es más grande por fuera que por dentro, y la pared principal, donde está fracturada, es de la misma forma y también es más grande por fuera que por dentro; por lo tanto, si esta parte separada cayese hacia dentro, la parte más grande tendría que pasar por la más pequeña, lo cual es imposible.

Por ello, es evidente que la parte de la pared semicircular que se separa de la pared principal se desplazará hacia fuera, y no hacia dentro como dice el adversario. Cuando un exceso de peso aplasta desde arriba una cúpula o semicúpula, la bóveda cederá, creándose una grieta que disminuye cuanto más arriba y se ensancha cuanto más abajo, estrecha por la cara interna y ancha por la externa [...]. Por esta razón, los arcos de las bóvedas de un ábside nunca deben tener más carga que los arcos del edificio principal, porque lo que pesa más y ejerce más presión sobre las partes inferiores, que se hundan en los cimientos; pero esto no puede ocurrir a estructuras más ligeras, como las de los ábsides¹⁷.

That is why the B part does not settle perpendicularly, but comes out obliquely. It cannot, on the contrary, bend inwards, because part of it, which is separated from the main wall, is larger on the outside than on the inside; and the main wall is larger on the outside than the inside, and this main wall, where the crack is, has the same shape and is also larger on the outside than the inside; therefore, if this separated part collapsed inwards, the larger part would have to go through the smaller one, which is impossible. Hence it is evident that the part of the semi-circular wall which when separated from the main wall will be thrust outwards, and not inwards as the adversary says. When a half-dome is crushed from above by an excess of weight, the vault will give way, forming a crack that becomes narrow towards the top and wider at the bottom, narrow on the inner side and wide on the outer one [...]. That is why the arches of the vaults of an apse should never be under more weight than the arches of the main building, because that which weights most and exerts more pressure on the parts below, which sink into the foundations; but this cannot happen in lighter structures, such as apses¹⁷.

En la parte superior derecha de la misma imagen, y como complemento a la descripción escrita, Leonardo describió gráficamente el problema indicado. Para ello, utilizó su famosa perspectiva a vista de pájaro con el objetivo de elevar el punto de vista por encima del nivel del suelo, y así permitir obtener una mejor proyección y, por tanto, comprensión del problema. Leonardo concluye que esas grietas son motivadas por las tensiones a las que está sometido el paramento como consecuencia del asiento de los pilares laterales (fig. 7). Este tipo de grietas son las que en la actualidad se denominan “arcos de descarga”, por la forma que presentan y tienen su causa en los asientos producidos al fallar el cimiento del muro¹⁸. Leonardo ya había establecido esa hipótesis al indicar que la cimentación del muro había asentado previamente, mientras que la de los pilares, no. Por este motivo, se produce la rotura del muro y el cerramiento tiende a inclinarse hacia la zona exterior. Por lo tanto, Leonardo no solo se centró en realizar una descripción de las posibles grietas que pueden observarse en los paramentos de las edificaciones que inspeccionó, sino que realizó un análisis de sus causas estableciendo pequeños problemas para su comprensión.

En el folio 157r, (fig. 6), Leonardo trató de identificar el motivo de las grietas verticales que aparecen en los edificios ubicados en lugares montañosos: *Constantemente aparecen grietas*

On the top right part of the same image, and as a complement to the written description, Leonardo represents the discussed problem graphically. For this, he uses his famous bird's-eye view, to raise the point of view above floor level, and thus achieve better projection and, therefore, comprehension of the problem. Leonardo concluded that these cracks are caused by the stress to which the walls are subjected due to the settling of the side pillars (fig. 7). These “arc-shaped cracks”, so called due to their shape, are caused by settling when the wall foundations fail¹⁸. Leonardo had already established this hypothesis when showing that the wall foundations had previously settled, while the foundation of the pillars had not. That is why the wall breaks and tilts outwards. Therefore, Leonardo did not only focus on describing the possible cracks that he could see on the walls of the buildings he inspected, but also analysed their causes while putting forward small problems to better comprehend these defects.

In folio 157r, (fig. 6), Leonardo tried to identify why buildings in mountainous areas have vertical cracks: *Parallel cracks constantly appear on buildings built on mountainous areas where*

*paralelas en edificios erigidos en lugares montañosos donde las rocas están estratificadas y la estratificación es oblicua, pues, en estas vetas oblicuas a menudo penetra el agua y la humedad [...]. El remedio a esto consiste en construir numerosos pilares bajo la pared que se desliza, con arcos de uno a otro, bien arraigados. Estos pilares deben tener las bases firmemente fijadas en la roca estratificada para que no puedan desprenderse. Para hallar la parte sólida de estos estratos, es necesario cavar un pozo de gran profundidad al pie de la pared que atraviese los diferentes estratos*¹⁹.

Así, concluyó que la aparición de estas grietas en las fachadas y paramentos verticales estaba motivada por el deslizamiento del suelo o del estrato inferior por un exceso de agua y, por tanto, de humedad. Para solucionar dicha deficiencia era necesario trabajar en el plano de cimentación ya que era allí donde se originaba el problema y donde debía iniciarse el proceso de restauración. Para ello, era necesario reforzar la cimentación mediante la ejecución de nuevos pilares que apoyaran en el subsuelo y que se encontraran unidos entre sí por arcos, con el objetivo de mejorar la estabilidad. Este apoyo no podía realizarse en cualquier subsuelo, sino que Leonardo indica claramente la palabra “roca”, es decir, entiende que el problema está motivado por una deformación del relleno, y propone buscar un nuevo firme que cumpla con las características

*rocks are stratified obliquely, as water and humidity often seeps in these oblique veins [...]. The solution to this involves building a large number of pillars under the sliding wall, with arches between each pillar, which are well joined together. These pillars must have their foundations set on the stratified rock so that they cannot detach. To find the solid part of the strata, it is necessary to dig a considerably deep well at the bottom of the wall that goes through the different strata*¹⁹.

In this way, Leonardo reckoned that the appearance of these cracks in façades and vertical walls was caused by the soil or the lower stratum sliding due to an excess of water and, therefore, humidity. To solve this defect, it was necessary to work on the foundations, as foundations were where the problem originated and must be corrected in the restoration process. For that, it was necessary to reinforce the foundations by making new pillars that were built on the subsoil and were joined together with arches, as to improve stability. The pillars could not be built on any kind of subsoil, as Leonardo clearly uses the term “rock”, that is, he understands that the problem is caused by deformation of the soil under the building, and he suggests

de rigidez y seguridad. Su solución permite la corrección de estas lesiones arquitectónicas habituales cuando el grado de humedad en el subsuelo es elevado²⁰.

Resulta evidente que la determinación de un subsuelo seguro y resistente donde apoyar los cimientos de una edificación ha sido un elemento estudiado a lo largo de la historia. Así, en el tratado arquitectónico de mayor antigüedad *De Architectura*, del arquitecto romano Vitruvio, en el libro tercero, capítulo cuatro denominado “Los cimientos de los templos”, indica:

*Si es posible encontrar un terreno sólido, la cimentación de estos edificios se excavará sobre terreno firme [.....] Si, por el contrario, no se encuentra un terreno sólido sino que es de tierra de relleno en gran profundidad, o bien si se trata de un terreno palustre, entonces se excavará, se vaciará y se clavarán estacas endurecidas al fuego, de álamo, de olivo, o de roble y se hundirán como puntales o pilotes en el mayor número posible*²¹.

Según estas indicaciones, el firme es entendido como la capa de suelo que dispone de resistencia suficiente para apoyar los cimientos de un edificio. Vitruvio propone una solución constructiva en caso de no encontrar el firme, mediante la utilización de pilotes, solución que posteriormente adopta Leonardo cuando describe “los pozos de gran profundidad bajo el muro que atraviesen los diferentes estratos”²².

searching for a new surface to set the pillars which meets the necessary rigidity and safety requirements. His solution allows for the correction of these building defects that are common when the humidity in the subsoil is high²⁰.

It is clear that determining which subsoil is safe and durable enough to set the foundations of a building on has been one of the key studied elements throughout history. In this way, we can see that Roman architect Vitruvius, in book three, chapter four (Temple Foundations) of *De Architectura*, the oldest treatise on architecture, points out the following:

*If it is possible to find solid ground, the building foundations must be built on and into it [...]. If, on the other hand, no solid ground can be found, and the ground is loose or marshy, it must be dug out and emptied and as many wood stakes as possible must be driven into the ground to be used as piling. These wood stakes should be charred and from alder, olive or oak trees*²¹.

According to these instructions, solid ground is understood as the ground layer that has enough resistance to support a building's foundations. Vitruvius offers a constructive solution if it is not possible to find solid ground, to obtain a better foundation

La estabilidad y la resistencia de las cimentaciones y de las estructuras también son tratadas por Leonardo en el Códice Madrid I, folio 143v y Códice Arundel, folio 138r, (fig. 8), donde se puede observar en la parte superior derecha una cimentación de dos pilares. Junto a ellos, Leonardo indica: “Lo primero y lo más importante es la estabilidad. En cuanto a los cimientos y otros edificios públicos, la profundidad de los cimientos debe ser proporcional al peso del material que van a tener que soportar”²³. En la zona central de la figura 8 y en relación con las grietas motivadas por deficiencias constructivas (fig. 9), Leonardo establece la necesidad de secado de las paredes de un modo uniforme y el contacto de las dos caras de una pared con el mismo medio con el objetivo de evitar grietas.

Sobre las grietas de las paredes, que son anchas en la base y estrechas en su extremo superior; y sobre sus causas. La pared que no se seca uniformemente al mismo tiempo siempre se agrieta. Aunque una pared sea de grosor uniforme, no se secará con la misma rapidez en todas partes si no está en contacto con el mismo medio. Así, si una cara de la pared está en contacto con una pendiente húmeda y la otra está en contacto con el aire, la cara que se seque al aire se encogerá o reducirá de tamaño, mientras que la que se mantenga húmeda no se

depth through the use of piling. This solution is later used by Leonardo when describing the “considerably deep well at the bottom of the wall that goes through the different strata”²². Stability and endurance of foundations and structures are also considered by Leonardo in Codex Madrid I, folio 143v and Codex Arundel, folio 138r (fig. 5), where we can observe the foundation of two pillars on the top right part of the folio. Next to them, Leonardo points out: “Stability is first and most important. In what pertains to foundations and other public buildings, foundation depth must be proportional to the weight of the materials that they must support”²³. In the central area of figure 5, and pertaining to cracks caused by construction defects (fig.6), Leonardo establishes that walls need to dry uniformly and that both sides of the wall must be in contact with the same conditions to avoid cracks. *Of cracks in walls, which are wide at the bottom and narrow near the top, and their causes. Walls that do not dry uniformly at the same time, crack. Even when the wall has the same thickness all over, it will not dry uniformly if it is not completely in contact with the same medium. Thus, if a side of a wall is in contact with a damp slope and the other with air, the latter will dry faster and will shrink or reduce its size, while the wet one will not dry. The dry part will easily break*

secará. La parte seca se desprenderá fácilmente de la parte húmeda, porque esta no se encoge proporcionalmente, no se adhiere ni sigue el movimiento de la parte que se va secando. Sobre las grietas arqueadas, anchas arriba y estrechas abajo. Las grietas arqueadas, anchas arriba y estrechas abajo, se pueden encontrar en puertas tapiadas, que se encogen más en altura que en anchura, y proporcionalmente cuanto mayor es su altura que su anchura, y cuanto más numerosas son las juntas de mortero en la altura que en la anchura. Toda grieta en una pared cóncava es ancha abajo y estrecha arriba; y se origina, como se muestra aquí, en la base, en la figura lateral: 1º) Lo que se humedece crece proporcionalmente a la humedad que embebe.

2º) Y un objeto húmedo se encoge, al secarse, proporcionalmente a la cantidad de humedad que se evapora. Las grietas de una pared nunca serán paralelas, a no ser que la parte de la pared que se separa del resto no se desprenda²⁴. Leonardo vuelve a citar las grietas con forma de arco, aunque en este caso hace una diferenciación. Las que son anchas en la base y estrechas en la parte superior son producidas por el secado del material que recubre el cerramiento. Para evitar su aparición, es necesario que todas las paredes de una edificación se construyan

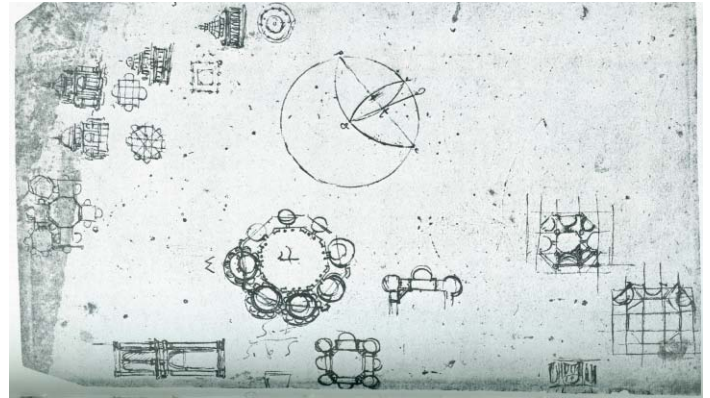
away from the wet part, as the latter does not shrink proportionally, does not stick nor follows the movement of part that dries continuously. Of arched cracks, wide at the top and narrow at the bottom. Arched cracks, which are wide at the top and narrow at the bottom, can be found in walled-up doors, which shrink more in height than in width, and also shrink proportionately the higher they are in relation to their width and depending on how many more joints of mortar there are in the height than in the width. Any crack on a concave wall is wide at the bottom and narrow at the top and is created, at the base, as seen in the figure on the side: 1) Surfaces that get damp grow proportionally to the amount of humidity they absorb.

2) A wet object shrinks, when drying, proportionally to the amount of humidity it loses. Cracks in a wall will never be parallel, unless the part of the wall that cracks and separates does not slip down²⁴.

Leonardo once again mentions arched cracks, although he does so with a difference. Cracks that are wide at the base and narrow at the top are produced by the drying of the material that covers the wall. To avoid the appearance of these cracks, all the walls of a building should be built uniformly, so they should have the same height, thickness and construction

2. Primeras propuestas arquitectónicas de Leonardo. Fuente: Códice Atlántico, folios 42v-c y 362v-b.

2. Leonardo's first architectural proposals. Source: Codex Atlanticus, folios 42v-c and 362v-b.



2

3 / 4. Estudios de arcos del Duomo de Milán. Fuente: Códice Atlántico, folios 850r y 851v.

3 / 4. Study on the arches of the Milan Cathedral. Source: Codex Atlanticus, folios 850r and 851v.

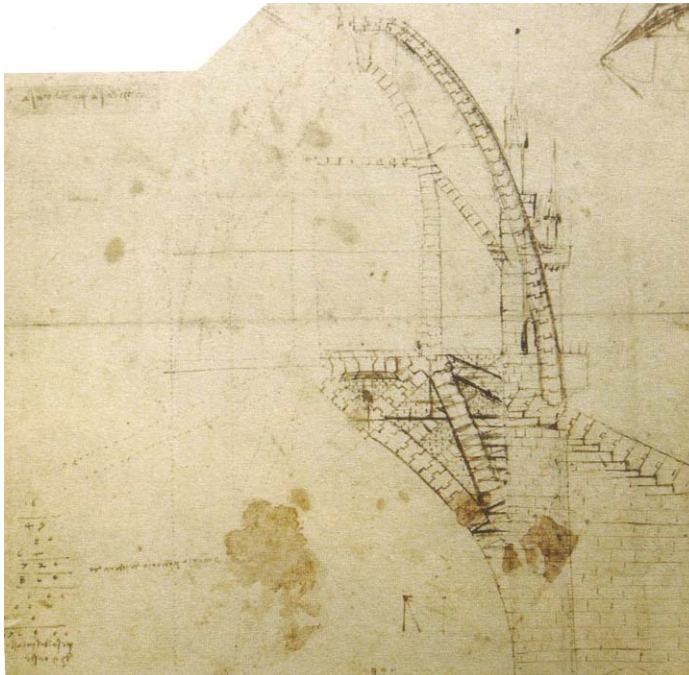
5 / 6. Estudios sobre lesiones arquitectónicas. Fuente: Códice Arundel, folios 141v y 157r.

5 / 6. Studies on building pathology. Source: Codex Arundel, folios 141v and 157r.

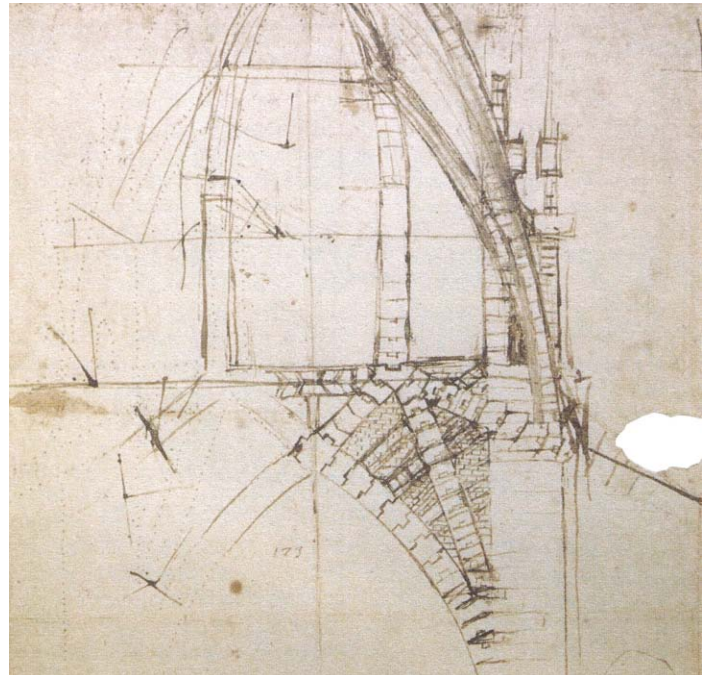
7. Estudio de grietas en paramento vertical. Fuente: Códice Arundel, folios 141v ampliado.

7. Study on cracks in vertical wall. Source: Codex Arundel, enlarged folio 141v.

3



4



5



6



7



8. Estudio estabilidad de cimentaciones y estudio de grietas en paramentos.

Fuente: Códice Arundel, folio 138r.

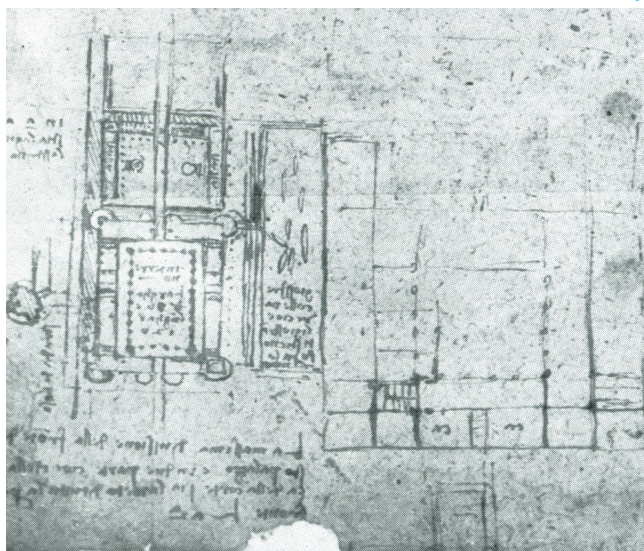
8. Study on the stability of foundations and study on cracks in walls. Source: Codex Arundel, folio 138r.

9. Estudios Palacio Romorantin. Fuente: Códice Atlántico, folio 76v-a.

9. Study on Romorantin Palace. Source: Codex Atlanticus, folio 76v-a.



8



9

de forma uniforme, por lo que deberían tener la misma altura, grosor y proceso de construcción. Esta circunstancia obliga a construir simultáneamente las distintas hojas de un cerramiento. Por otro lado, identifica sobre las puertas tapiadas las que son estrechas en la base y anchas en la parte superior, producidas por asentamientos de los elementos de apoyo. Estas últimas, muy similares a las ya descritas anteriormente y relacionadas con la figura 5.

En 1512 el Rey de Francia quería disponer de uno de los mejores y mayores palacios de Europa, por lo que procedió a reclamar a Leonardo como arquitecto e ingeniero. Este se trasladó a Francia para realizar en los años siguientes un estudio arquitectónico que dejó reflejado en el Códice Atlántico, folio 76v-a, (fig. 9), en el que aparece representada la planta del palacio con un gran patio interior porticado. En este folio, Leonardo realizó las siguientes anotaciones: *Las salas que desee destinar a bailes o realizar diferentes tipos de saltos o movimientos diversos con un grupo numeroso de gente deberán estar en la planta baja, pues he visto derrumbarse algunas y provocar la muerte de muchas personas. Sobre todo, observe que todas las paredes, por muy finas que sean, tengan sus cimientos en el suelo o sobre arcos bien instalados. Los entresuelos de las viviendas deberán estar separados por paredes de ladrillos estrechos y sin vigas, por el riesgo de incendio*²⁵.

process. This circumstance calls for building all the walls of an enclosure at the same time. On the other hand, he refers to cracks that are narrow at the base and wide at the top on walled-up doorways, caused by the settling of the supporting elements. These cracks are quite similar to those previously described in relation to figure 5.

In 1512, the king of France wanted to possess one of the best and largest palaces in Europe, so he requested Leonardo as his architect and engineer. He moved to France to, in the following years, carry out an architectural study that he wrote in the Codex Atlanticus, folio 76v-a, (fig. 9), where we can see the floorplan of the palace with a large inner courtyard surrounded by a gallery. In this folio, Leonardo puts forward the following notes:

*Halls where dance is going to take place, or different types of jumps or movements with a numerous group of people should be on the ground floor, as I have seen some halls collapse and kill people. Above all, it is important that walls, no matter how thin they are, have their foundations in the ground or on well-built arches. Dwelling mezzanines should be separated by thin bricks and have no beams, so as to avoid the risk of fire*²⁵.

Leonardo establece estas directrices para garantizar la estabilidad estructural del palacio teniendo en cuenta el uso al que se destinaba y la posición social de sus ocupantes. Pero el artista va más allá y continúa con otras medidas encaminadas a la ejecución material de la obra.

Una viga que tenga una longitud de más de 20 veces su máxima anchura tendrá una duración breve y se partirá en dos; recuerde que la parte empotrada en el muro debe estar impregnada de brea caliente y fileteada con tablas de roble impregnadas del mismo modo. Cada viga debe atravesar los muros y estar asegurada al otro lado del muro con cadenas suficientes, pues, como consecuencia de los terremotos, a menudo se ven vigas que salen de los muros y provocan el derrumbamiento de muros y pisos; mientras que, si están bien encadenadas, sujetarán los muros con fuerza y los muros sostendrán los pisos. Asimismo, le recuerdo que nunca hay que poner yeso encima de la madera, pues, por la expansión y la contracción de la madera a causa de la humedad y la sequedad, los suelos suelen agrietarse y, una vez agrietados, sus divisiones producen gradualmente polvo y un efecto feo²⁶. Resulta interesante la solución constructiva que establece Leonardo para evitar el derrumbamiento de los forjados en caso de terremotos. La estabilidad de la estructura en casos de movimientos sísmicos es fundamental. Por ello, la

Leonardo establishes these guidelines to guarantee the structural stability of the palace, considering what use it had and the social standing of the people living there. The artist even goes further and continues with other measures dealing with the materials and execution of the project. *A beam that is 20 times longer than its maximum width will not last long and snap in two; remember that the part of the beam that is set into the wall must be coated in hot tar and filleted with oak boards coated in the same way. Each beam must go through the walls and be secured on the other side of the wall with sufficient chaining, because, as a consequence of earthquakes, we can often see beams that come out of walls and cause walls and floors to collapse; whereas, if the beams are chained appropriately, they will hold the walls strongly together and the walls will support the floors. Additionally, let me remind you that plaster should never be applied on wood, as, due to the expansion and contraction of wood due to humidity and dryness, floors often crack and, once cracked, their divisions will gradually produce dust and an unpleasant effect²⁶.*

Leonardo's constructive solution to avoid the collapse of floor slabs in case of earthquakes is quite interesting. Struc-

tural stability is essential in order to withstand seismic disturbances. That is why the beam is fully set into the wall and, to it, we attach an oak board of greater strength than coated in hot tar. This way, not only do we protect the beam from outside humidity, but if there are structural movements due to tremors, the beam will remain static and avoid their exit from the enclosure and the collapse of the structure.

Therefore, we can see in this article how Leonardo studied topics related to the stability of the construction elements of a building, both in foundations and floor slabs. These studies are far from superficial, as Leonardo even establishes measures, proportions, incompatibility of building materials, structural deformations and safeguards to improve the endurance of construction systems. That is why, inside Codex Arundel, he puts forward some guidelines dealing with the development of construction projects: "do not mix wood and plaster", "beams should go through walls", "the part of the beam set into the wall should be coated in hot tar". These are very specific suggestions and instructions dealing with the process of building construction and they do not come from a simplistic study on the topic, but quite a comprehensive one. Therefore, we can

tural stability is essential in order to withstand seismic disturbances. That is why the beam is fully set into the wall and, to it, we attach an oak board of greater strength than coated in hot tar. This way, not only do we protect the beam from outside humidity, but if there are structural movements due to tremors, the beam will remain static and avoid their exit from the enclosure and the collapse of the structure.

Therefore, we can see in this article how Leonardo studied topics related to the stability of the construction elements of a building, both in foundations and floor slabs. These studies are far from superficial, as Leonardo even establishes measures, proportions, incompatibility of building materials, structural deformations and safeguards to improve the endurance of construction systems. That is why, inside Codex Arundel, he puts forward some guidelines dealing with the development of construction projects: "do not mix wood and plaster", "beams should go through walls", "the part of the beam set into the wall should be coated in hot tar". These are very specific suggestions and instructions dealing with the process of building construction and they do not come from a simplistic study on the topic, but quite a comprehensive one. Therefore, we can

comprende el motivo por el cual, el anteriormente citado autor Tafuri²⁷, describe el rigor llevado a cabo por Leonardo tanto en sus estudios arquitectónicos, como de lesiones.

Leonardo destacó en pintura, óptica, mecánica, botánica, medicina y como inventor. Sus propuestas en estas áreas han sido consideradas posteriormente por la ciencia moderna como ideas adelantadas a su tiempo. El volumen de referencias bibliográficas de Leonardo relacionadas con la arquitectura y sus lesiones es menor que para el resto de sus facetas. Durante el desarrollo del presente artículo se ha podido comprobar que estos campos fueron tratados por Leonardo con gran profundidad, rigor y disciplina. Sin embargo, no le ha supuesto históricamente el reconocimiento como arquitecto. Posiblemente, el motivo principal de dicha situación, sea la carencia de obras reales donde se verificaran sus estudios arquitectónicos y patológicos. No obstante, es necesario indicar que, en la actualidad, tan solo se dispone del 40% de los 15.000 folios que Leonardo pudo escribir a lo largo de su vida. Por tanto, es difícil garantizar la inexistencia de evidencias reales dentro de estos campos.


No cursó estudios como fue el caso de otros arquitectos renacentistas, tales como León Battista Alberti²⁸ o Girolamo Maggi²⁹. Al igual que Francesco di Giorgio y Baldassarre


understand the reason why, the aforementioned author Tafuri²⁷ (10) discusses the accuracy and rigour followed by Leonardo both in his architectural and building pathology studies.

Leonardo stood out in fields such as painting, optics, mechanics, botany, medicine and as an inventor. His proposals in these areas have been subsequently considered by modern science to be advanced for his time. The number of bibliographical references to Leonardo's work in architecture and building pathology is smaller than in his other fields of expertise. Throughout this article we can see how these topics were dealt with by Leonardo in depth and with great rigour and discipline. However, he has not historically been recognised as an architect. Possibly, the main reason behind this is the lack of built evidence supporting his architectural and pathology studies. Nevertheless, it is important to note that, currently, only 40% of the 15.000 folios that Leonardo could have written in his life have been found. Therefore, it is difficult to guarantee that real proof of his work in this disciplines does not exist.

He did not attend formal education as other Renaissance architects, such as Leon Battista Alberti²⁸ o Girolamo Maggi²⁹. But, as Francesco di Giorgio and Baldassarre Peruzzi, he acquired knowledge and learnt about the profession through the learning system of that time: the guild system.

Peruzzi, adquirió los conocimientos y el oficio mediante el sistema de aprendizaje de la época: el sistema gremial. Estos conocimientos, teorías, propuestas y proyectos quedaron reflejados en sus códices y manuscritos pero, por diversas circunstancias, no quedaron pruebas de su ejecución. Lo que sí ha llegado hasta nuestros días son las innumerables referencias escritas de otros autores o personajes históricos, en los que se nombra a Leonardo con el calificativo de arquitecto. Por ejemplo, Francisco I lo trató como el “primer pintor, arquitecto y mecánico de la corte”²⁹ o en el manuscrito anónimo Magliabechiano de 1755, se le describe como “architetto e pittore”³⁰.

Leonardo, sin ser considerado como un profesional de la arquitectura o de las lesiones arquitectónicas, disponía de conocimientos relacionados con el diseño, el cálculo estructural, los materiales de construcción y los sistemas constructivos, lo que le permitió proponer actuaciones y proyectos de intervención. Sus apreciaciones dentro de estos campos, y en concreto sus estudios de las lesiones y sus posibles soluciones pueden ser considerados de gran importancia en un campo en el que no es hasta finales del siglo XVIII, cuando se inició lo que se conoce con el término “restauración consciente”³¹ de las edificaciones. 

Knowledge, theories, proposals and projects were recorded in his Codices and manuscripts, but, due to a variety circumstances, there is no proof of their execution. What has reached our time are the innumerable written references from other authors and historical characters, where Leonardo is referred to as an architect. To quote some examples of this, we are aware of the case of François I, who referred to Leonardo as “first painter, architect and mechanic of the court”²⁹ or the case of Anonimo Magliabechiano, who describes him in a 1755 manuscript as “architetto e pittore”³⁰. Leonardo, even without being considered a professional in architecture or building pathology, was knowledgeable in design, structural calculation, construction materials and construction systems, which allowed him to propose architectural actions and projects. His ideas in these areas, and, particularly, his studies on cracks and their possible solutions, can be considered of great importance in a field of expertise that still would take some time to consider these problems. In fact, it was not until the 18th century when the “conscious restoration”³¹ of buildings began. This process included the reparation, consolidation and restoration of buildings without considering its use or purpose, something which was not decisive up until that moment. 

NOTAS / NOTES

1. Pedretti, C. *Leonardo Architetto*. Milán: Ediciones Electa, 1988, p. 137.
2. Para saber más sobre la estancia de Bramante en Milán, consultar / To know more about Bramante's stay in Milan, see: Bramante, D. *Bramante e la sua cerchia a Milano e in Lombardia 1480-1500*. Skira. Madrid. 2001, p. 13-38.
3. Pedretti, C. *Leonardo Architetto*. Milán: Ediciones Electa, 1988, p. 137.
4. Traducción del autor. Original en / Author's translation. Original in: Pedretti, C. *Leonardo Architetto*. Milán: Ediciones Electa, 1988, p. 34.
5. Cantone, G. *La città di Marmo: Da Alberti a Serlio. La storia tra progettazione e restauro*. Roma: Officina Edizioni, 1978, p. 65.
6. Traducción del autor. Original en / Author's translation. Original in: Pedretti, C. *Leonardo Architetto*. Milán: Ediciones Electa. 1988, p.35. "Signori Padri diputati, sí come ai medici, tutori, curatori de li ammalati, bisogna intendere che cosa è omo [...] Voi sapete le medicine, essendo bene adoperate, rendono sanità ai malati, e quello che bene le conosce, ben l' adopererà [...] E con quelle dimostrerò qual è la cagione prima del carico, e queale e quante sieno le cagioni che danno ruina a li edifizii, e quale è il modo della loro stabilità e permanenza. Ma, per non essere prolioso, a Vostre Eccellenze dirò prima la invenzione del primo architetto del domo. E chiaramente vi dimostrerò qual fussi sua intenzione, a_ermando quella collo principiato edificio; e facendovi questo intendere, chiaramente potrete conoscere el modello da me fatto avere in sé quella simetria, quella corrispondenzia, quella conformità, la quale s' appartiene al principiato edificio".
7. No debe sorprendernos esta situación aparentemente desordenada. Tal y como indica Pedretti: "Leonardo era despistado e iba estudiando varias cuestiones a la vez [...] y todo este proceso lo dejaba reflejado en los diversos códices con los que se encontraba trabajando en ese momento" (Pedretti, 1988, 35) / We should not be surprised by this apparently messy situation. As Pedretti points out: "Leonardo was easily distracted and studied different topics at the same time [...] and all this process he put to paper in the different codices he was working on at the moment" (Pedretti, 1985, 35).
8. Ibidem, p. 37.
9. Ibidem, p. 39.
10. "El obstinado rigor de Leonardo es la única herramienta que le permite identificar la forma correcta de la investigación experimental en las disciplinas de la arquitectura" / "Leonardo's obstinate exactitude was the only tool that allowed him to identify the correct form of experimental research for the architectural disciplines" Traducción del autor. Original en / Author's translation. Original in: Tafuri, M. *L'architettura dell'Umanesimo*. Bari: Editorial Laterza, 1972, p. 25.
11. Traducción del autor. Original en / Author's translation. Original in: Pedretti, C. *Leonardo Architetto*. Milán: Ediciones Electa, 1988, p. 137. "Leonardo da Vinci disse quanto a S. Salvatore [...] et à rimedi di quello secondo ha dato il disegno e per quello si uede dai mancamenti dell' edifitio, e dall'acque [...] che uanno trà le falde delle pietre in sino doue si fanno i mattoni, e quiui in parte sono tagliate le falde, e quella parte dell' edifitio doue sono tagliate le falde et il mancamento, e che riferendo, e tagliando le falde si rimetterebbe. E hanno fogne pulite"
12. Tagliagalamba, S. *Leonardo & L'Architettura*. Poggio a Caiano: CB Edizioni, 2010.
13. AA.VV. *Leonardo da Vinci: vida y obra*. Ediciones Tikal, Milán, 2009.
14. AA.VV. *Mecánica de fractura*. Editorial Universidad País Vasco, Bilbao, 2002, p. 20.
15. Pedretti, C. *Leonardo Architetto*. Milán: Ediciones Electa, 1988, p. 137..
16. Anna Suh, H. *Leonardo da Vinci, cuadernos*. Barcelona: Ediciones Parragón, 2006, p. 232.
17. Ibidem, p. 232.
18. Serrano, F. *Patología de la edificación. El lenguaje de las grietas*. Madrid: Fundación escuela de la edificación, 2005.
19. Anna Suh, H. *Leonardo da Vinci, cuadernos*. Barcelona: Ediciones Parragón, 2006, p. 233.
20. AA.VV. *Teoría e historia de la rehabilitación*. Madrid: Editorial Munilla-Lería, 1999.
21. Vitruvio, *De architectura*. 1521. (Versión utilizada: *X Libros de Arquitectura*. Cáceres: Cicon Ediciones, 1999, p. 15 y 22).
22. Anna Suh, H. *Leonardo da Vinci, cuadernos*. Barcelona: Ediciones Parragón, 2006, p. 233
23. Ibidem, p. 235.
24. Ibidem, p. 237.
25. Ibidem, p. 231.
26. Ibidem, p.237.
27. Tafuri, M. Op. cit., p.25.
28. Título en Derecho Canónico en 1428 / Degree in Canon Law in 1428. Battista Alberti, L. *De re Aedificatoria*. (Edición consultada / Consulted edition *De re Aedificatoria* (traducción de / translation by Javier Fresnillo Nuñez). Madrid: Ediciones AKAL, 1991, p. 8.
29. Cursó estudios en las Universidades de Perugia, Bolonia y Pisa. En esta última obtuvo un Doctorado. Para saber más en relación a la biografía de Girolamo, consultar / He attended education in the Perugia, Bologna and Pisa Universities. He obtained his doctorate in the latter. To know more about Girolamo's biography, see: Promis. C. "Vita di Girolamo Maggi d Anghiari ingegnere militare, poeta, filologo, archeologo, giurisperito del secolo XVI" en *Miscellanea di Storia Italiana*. Tomo I. 1862, p. 105-143.
30. Pedretti, C. *Leonardo Architetto*. Milán: Ediciones Electa, 1988, p. 137
31. AA.VV. *Teoría e historia de la rehabilitación*. Madrid: Editorial Munilla-Lería, 1999.