

# Félix Candela. In memoriam (1910-1997). From thin concrete shells to the 21<sup>st</sup> century's lightweight structures

*Félix Candela. En memoria (1910-1997).*

*Del cascarón de hormigón a las estructuras ligeras del s. XXI*

P. Cassinello<sup>(\*)</sup>, M. Schlaich, J.A. Torroja

## SUMMARY

January 27<sup>th</sup> of this year, 2010, was the centenary of the birth of a famous architect of Spanish origin, Félix Candela, one of the most prominent players in *modern architecture's thin shell adventure*. His international fame was based on precisely that, the construction of over 800 thin concrete shells characterized not only by their rationality and optimal strength, but also by their striking sculptural beauty. Architects such as Frei Otto, Ove Arup and David Billington justifiably called his work "structural art".

In addition analyzing Félix Candela's contribution to modern architecture, the present article explores new lightweight structures as the ongoing pursuit of the optimization of structural form with different materials and technologies. That pursuit, both past and present, constitutes the focus of attention of the International Association for Structural Shells, IASS, founded by Eduardo Torroja in 1959 and fully operational today.

109-36

**Keywords:** reinforced concrete, thin shell, hyperbolic paraboloid, lightweight structure, glass.

## RESUMEN

*El 27 de enero de 2010 se cumplió el centenario del nacimiento de célebre arquitecto de origen español Félix Candela, uno de los más destacados protagonistas de la Aventura Laminar de la Arquitectura Moderna. Su fama internacional la adquirió a través de la construcción de más de 800 cascarones de hormigón armado dotados, no sólo de una racional y óptima forma resistente, sino también de una impactante y escultural belleza. No en vano, Frei Otto, Ove Arup y David Billington han descrito su obra como un "Arte Estructural".*

*Al hilo del análisis de las aportaciones realizadas por Félix Candela, el presente artículo analiza también nuevas estructuras ligeras, como continuidad histórica de esa racional búsqueda de la optimización de la forma resistente con diferentes materiales y tecnologías. Evolución y destino contemplado por la Internacional Association for Structural Shells IASS, fundada por Eduardo Torroja en 1959 y que hoy continúa en plena actividad.*

**Palabras clave:** hormigón armado, estructura laminar, paraboloide hiperbólico, estructura ligera, vidrio.

<sup>(\*)</sup> Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid (España)

Persona de contacto/Corresponding author: pepacassinello@yahoo.es (P. Cassinello)

1. Jena, Germany. Dyckerhoff-Widmann (1922-1923).

## 1. INTRODUCTION

Reinforced concrete shells indisputably constituted one of modern architecture's major challenges. What might be termed the "thin shell adventure" actually began in earnest in the second half of the twentieth century, when architects, engineers and builders joined forces to pursue the most efficient, bare, slender, and strongest shell possible. The aim was to conquer the new formal and dimensional freedom afforded by this material, while adhering to the premise that underlay the birth of Modernity in that same decade, the new school of thought perpetually synthesized in Mies van der Rohe's famous assertion that "less is more".

What became internationally known as thin concrete shells, may be defined to be a series of efficient and bare spatial forms built with reinforced and/or prestressed concrete. The habitable space in the resulting buildings is determined by the geometry of the shell itself, which constitutes both the skin and the structure of the architecture it shapes, generating a new and modern cityscape. In their definition of habitable space, these spatial forms complied, clearly and categorically, with the five fundamental elements of modern architecture defined by Le Corbusier. Moreover, as Félix Candela would later point out, it was in these thin shells that reinforced concrete found the most rational expression of its *raison d'être*, optimizing its flexibility of form and adjustability of strength (1).

Seventy years after Monier made his first flower pots and patented reinforced concrete, in 1922-1923 when Félix Candela was still a boy, the Dyckerhoff-Widmann company built the first thin concrete shell: the roof over the Astrophysics Institute Planetarium at Friedrich Schiller University of Jena, Germany (Figure 1). The structure consisted of a geodesic dome 16 m in diameter and 3 cm thick, made



of reinforced concrete gunned onto a stiff node steel lattice frame in parallel rings. This pioneer shell was the result of a cooperative effort between engineers Franz Dischinger (1887-1953) of Dyckerhoff - Widmann and Walter Bauersfeld (1879-1959) of Carl Zeiss on the one hand and architects Hans Schlag and Johannes Schreiter on the other. The construction system was patented (Z-D) and ten years later introduced in the United States by Anton Tedesco, also a Dyckerhoff - Widmann engineer.

From that time on, the Dyckerhoff - Widmann company, which had gained experience with a number of reinforced concrete structures, took the international leader in thin shell development. Generation after generation, the most prominent engineers joined its team where they were trained to use and improve on the most innovative techniques.

But this thin shell adventure, which lasted well into the nineteen seventies, soon attracted other relevant actors who contributed to the development of these structures in many different ways. Some left an innovative legacy of concrete shells that today form part of our cities' built heritage, others developed new analytical methods that simplified the construction of these new structures, while yet others rationalized construction processes or patented the first precast shells. Their combined efforts made concrete shells one of the most venerated landmarks of twentieth century architecture.

Some of the most prominent actors included: Robert Maillart (1872-1940), Simon Bous-siron (1873-1958), Auguste Perret (1874-1954), Eugène Freyssinet (1879-1962), Franz Dischinger (1887-1953), Ove Nyquist Arup (1895-1988), Pier Luigi Nervi (1891-1979), Ulrich Finsterwalder (1897-1988), Eduardo Torroja (1899-1961), Nicolás Esquillan (1902-1989), Antón Tedesco (1903-1994), Oscar Niemeyer (1907), Mario Salvadori (1907-1997), Félix Candela (1910-1997), Matthew Nowitzki (1910-1950), Eero Saarinen (1910-1961), Bernard Louis Zehrfuss (1911-1996), Andre Paduart (1914-1985), Heinz Hossdorf (1925-2006), Heinz Isler (1926-2009), Ulrich Müther (1934-2007), Jörg Schlaich (1934).

After a long period of experimentation and analysis conducted in a number of countries, not only in connection with the works themselves, but also with the then indispensable support of simplified physical models, the problems posed by the change of scale in each specific geometry were brought under control. Finally, reinforced and prestressed concrete could be put to use to build new continuous spaces with spans measuring upward of 200 metres, dwarfing the 40 metres

attained with traditional masonry and the 60 achieved with reinforced masonry panels. By way of comparison, and disregarding the differences in geometry, the reinforced concrete shell over the CNIT in Paris was built to span 280 m between supports, whereas the dome over Agrippa's Pantheon in Rome, the widest span attained with ancient masonry, measures just 43 m in diameter (2).

Candela was also one of the most significant players in this pursuit of slenderness and beauty in reinforced concrete shells, and in a very short time became an international paradigm of their slenderness and sculptural potential. While his shells never covered spans of over 30 m (3), he built them with free edges using a single sheet of reinforced concrete, often with a continuous thickness of just four cm. In all, his legacy comprises more than 800 reinforced concrete shells, the largest number ever built by a single person.

Despite the variety of structural forms in this legacy, 90% of its components are based on the use of a single geometry - the hyperbolic paraboloid - which, intersected and rotated by Candela in any number of ways, generated countless numbers of sculptural shapes.

Candela was also one of the most prominent contributors to *Informes de la Construcción*. Founded by Eduardo Torroja in 1948, in the early nineteen fifties this journal began to publish papers on the Spanish émigré's innovative *oeuvre* (4), regarded to constitute an integral part of the history of modern architecture and specifically of the chapter on reinforced concrete and thin shell development. In 1963, the International Association for Structural Shells, IASS, founded by Eduardo Torroja in 1959 in Madrid, designated Félix Candela and Pier Luigi Nervi honorary members for their relevant contributions to thin shell development (5).

By the time Candela reached the summit of his expertise in the late nineteen sixties, the international prominence of thin concrete shells had vanished. Its place was taken by new types of lightweight steel and, eventually, other new materials. Indeed, in 1969 the IASS, the International Association for Shell Structures decided to change its name, although not its initials, to the International Association for Shell and Spatial Structures, effective in 1970.

From then onward, the association addressed all types of spatial structures, in addition to concrete shells, which continued to be built very sporadically until they finally all but disappeared in the late nineteen seventies.

Hence lightweight structures, especially as explored by Frei Otto beginning in 1964 at the Stuttgart Institut für leichte Flächentragwerke and the avant-garde structures made of glass and new materials, represent both a challenge to twenty-first century architecture and the continuation of the historic pursuit of optimal and rational slenderness in new membrane-like structural forms.

## 2. FÉLIX CANDELA IN THE INTERNATIONAL SCENARIO (1950-1969)

Félix Candela Outeriño was born on 27 January 1910 at Madrid, Spain. In 1927, five years after the first reinforced concrete thin shell had been erected in Jena, he enrolled in the Central University of Madrid's Science Faculty, a pre-requisite to enrolment in the School of Architecture, where he graduated in 1935.

Even while still a student, Candela was intrigued by the potential of reinforced concrete and the generation of new shell-like forms. This is hardly surprising, given his sound training in subjects such as geometry, structural engineering and material strength, but especially because he studied and graduated in the nineteen thirties, at a time when the prominent Spanish engineer Eduardo Torroja (1899-1961) had become an international leader in both fields, thin shell applications and reinforced and prestressed concrete in general.

It was in 1930 in fact, when neither thin concrete shells nor the scientific understanding of reinforced and prestressed concrete had yet been fully developed, that Eduardo Torroja founded Investigaciones de la Construcción S.A., ICON, a company engaging in scale model trials as a method for analyzing the structural behaviour of these new forms.

This enabled him to build large thin shells at a time when no reliable methods for engineering these structures were in place, but also to develop scientific structural analysis on the basis of the findings. His 1:10 scale models of the roofs of the Algeciras Market and the Madrid Jai Alai Court on, both built with micro-concrete, were renowned. He was soon internationally acknowledged to be the "father" of scientific trials with scale models. And indeed, he contributed to solving one of the major problems then facing the design of new reinforced and prestressed concrete thin shells by devising a reliable system for verifying their structural behaviour.

In that decade, Torroja erected some of his most innovative and emblematic shells, two in Madrid. In the *Market at Algeciras* (1934)

2. Algeciras Market (1936). Eduardo Torroja.

3. Zarzuela Racetrack (1935). Eduardo Torroja.

4. Recoletos Jai-Alai Court, Madrid (1936). Eduardo Torroja.

5. Hangar at Orvieto, Italy (1935). Pier Luigi Nervi.

(Figure 2), he designed a shell roof in the shape of a 9-cm thick spherical cap resting on eight perimetric columns. For this structure, which has a 47.62-m span, he invented a technique for removing the formwork by tightening the outer octagonal hoop that joins the eight supports. The roof over *Recoletos Jai-alai Court* (1936) at Madrid comprised a shell just 8 cm thick generated by the intersection of two round cylinders measuring 12.20 m and 6,40 m (two-lobed cross-section), that spanned the 55-m distance between the two end walls. In the *La Zarzuela Race Track* (1935) (Figure 3), the canopy is a very slender, cantilevered shell, formed by a succession of horizontal hyperboloids, intersecting along their axes. The shell was only 5 cm thick along the outer edge, positioned at 12,80 m from the supports. Unfortunately, the Recoletos Jai-Alai Court at Madrid, Figure 4 collapsed due to the damage caused by Spanish Civil War bombings (1936-1939). The common denominator in all of Eduardo Torroja's works was their varied and ingenious innovation, in which he never repeated forms or construction systems (6).

the unmistakable trademark of his entire *oeuvre*, along with the use of "ferrocement", a new material he himself invented, and the rational mix of construction systems, in which certain elements were precast *in situ*. In the late nineteen thirties another of the main characters in this story, Swiss engineer Robert Maillart (1872-1940), who had created a new structural aesthetic for reinforced concrete bridges of a slenderness so audacious that they seemed to float in air, authored the thin shell over the pavilion for the 1939 Swiss National Exhibition (Figure 6). This structure displayed the potential of these new lightweight shells, just as he himself had predicted in 1931 in a famous publication (*Schweizerische Bauzeitung*).

It was against this international backdrop that Félix Candela, who had just graduated from architectural school in 1935, applied for a grant from the San Fernando Royal Academy to continue his studies in Germany, the birthplace of thin shells. Although he was awarded the grant in 1936, the Spanish Civil War broke out that very year and Candela



2



3



4



5

In 1935 Italian architect Pier Luigi Nervi (1891-1979), who like Torroja had begun to practise his profession in 20<sup>th</sup> decade, built his famous hangars at Orvieto, Italy (Figure 5) with ribbed reinforced concrete shells. These structures would soon become

decided to enlist in the Republican army instead of going to Germany. The same war that unfortunately destroyed Eduardo Torroja's Recoletos Jai-Alai Court would initially seem to have crushed Candela's hopes of ever specializing in reinforced concrete thin shells. But that was not ultimately so. When the Civil War was over in 1939, Candela left Spain in exile. Fate was to take him to Mexico, a country with all the characteristics required to build shells economically, with its combination of workers' low salaries and a temperate climate. As Arup rightly noted, however, his extraordinary legacy was due not to those conditions, but to his own creativity (1). Moreover, as he would later discover, the key to acquiring expertise in these new spatial forms was not to be found in the complex and cumbersome calculations based on the theory of elasticity that he had once aspired to learn in Germany (7).

By 1949, Candela, like the "innovative" masters of the history of architecture, was of the clear conviction that the most



appropriate way to learn how to design and build thin shells was by experimenting directly with models, based on a knowledge of the unalterable laws of nature (statics, mechanics and material strength). He also felt that the simplest and most immediate path for someone who was in a hurry to learn was to build full-scale models. He drew for his inspiration on the Medieval master builders who had used that method to learn how to erect Gothic cathedrals. With the audacity that stems from mature knowledge, Candela (Figure 7) charted a course for his own self-apprenticeship.

That same year he built his first experimental shell, the so-called "Ctesiphon vault" at San Bartolo de Naucalpan, Mexico (Figure 8). This experimental thin shell was designed to the rather simple geometry of a catenary funicular. Later, whenever he planned to use a new geometry or size, Candela built experimental shells to monitor their structural behaviour and devise ways to optimize construction. Among others, he built a conoid experimental shell at the Fernández factory in San Bartolo, Mexico (1950) (Figure 9) and the prototype for his "umbrella" at Las Aduanas, Mexico (1953) (Figure 10).

Candela first began to participate in the thin shell adventure in 1950, when he founded his own company, *Cubiertas Ala*<sup>6</sup> - with his brother Antonio (a quantities surveyor) and sister Julia. Architects Fernando and Raúl Fernández Rangel, also partners at the outset,



6

sold their shares in 1953. *Cubiertas Ala* was founded to roof industrial buildings with thin concrete shells, but in light of their early popularity, it soon began to build shells for all manner of buildings: housing, churches, restaurants, night clubs, petrol stations... Félix Candela presided *Cubiertas Ala* from its creation in 1950 until 1969 when he surrendered the reins to his brother Antonio, who ran the company until it closed in 1976.



7

When Candela began to take an active role in the thin shell adventure in the nineteen fifties, these structures had indisputably



8



10



9

reached the height of their international development. After three decades of research on reinforced and prestressed concrete which led to the mastery of new structural forms and construction techniques as well as the optimization and simplification of calculation and verification methods, the ten years between 1950 and 1959 witnessed the peak of thin shell popularity and the erection of a fair share of the most venerated landmarks of modern thin shell architecture. At the end of that prolific period, in 1959, the *International Association for Shell Structures, IASS*, was founded at Madrid, Spain, at the Institute for

6. Pavillon for the 1939 National Exhibition (1939). Robert Maillart.

7. Félix Candela.

8. Experimental model for the "Ctesiphon vault". San Bartolo, México, 1949.

9. Experimental model: conoid at the Fernández factory San Bartolo, México, 1950.

10. Experimental model: umbrella, Las Aduanas, México, 1953.

Construction and Cement Engineering under the leadership of Eduardo Torroja. Its stated purpose was to set in order, discuss, regulate and disseminate the know-how acquired, and to monitor the international development and future of this specific field of civil construction and architecture.

In 1950, Candela also began to develop and disseminate the simple calculation methods used in his thin shells, contributing to the internationalization of simpler and more rational calculation alternatives. He published his first article that year under the title “*Cubierta Prismática de Hormigón Armado en la Ciudad de México*”, in which he stressed the relativity of the importance of scale. His article appeared in issue No. 99 of the Spanish journal *La Revista Nacional de Arquitectura*. The following year, 1951, he published his second article in ACI’s journal, titled “*Simple Concrete Shell Structures*” as well as a book that he titled *Hacia una nueva Filosofía de las Estructuras*. In it, as José Calavera Ruiz (8) explained, he not only shared his expertise in structural engineering and design, but contributed to the introduction of substantial change in these fields.

Most of Félix Candela’s extensive legacy was built in Mexico in the nineteen fifties and sixties. In the international context, his most important contributions to “modern architecture’s thin shell adventure” can be viewed from an understanding of the objectives of that adventure. Very few of the professionals involved were able to merge art and technology in a single endeavour, designing rational forms that combined optimal structural strength and ease of

construction with innovative and striking beauty. The significance of Candela’s *oeuvre* is due to the self-training that enabled him to practise as architect, engineer and builder all at the same time, with no need of support from other professionals to build the reinforced concrete shells he felt free to create. He adopted the role of “master builder” in the Medieval sense, in which all the know-how required to create and build was concentrated in a single person. And he reached that goal, as he subsequently admitted (1) by following the example and teachings of the persons he ultimately regarded to be his models: Eduardo Torroja, Robert Maillart and Pier Luigi Nervi.

### 3. STRUCTURAL ART: MATHEMATICAL FORM AND VISUAL FORM

Félix Candela has often been called a “structural artist”. Fortunately, from 1920 to 1970 many architects and engineers pioneered the application of “structural art” to thin shells, seeking forms able to satisfy the Vitruvian canon: utility (*utilitas*), strength (*firmitas*) and beauty (*venustas*). Each of these pioneers made his own use of the geometric forms mathematically available, primarily quadrics, to generate surfaces adapted to laminar and, if possible, membrane behaviour. But these mathematical expressions did not necessarily yield visually gratifying forms. Nonetheless, a number of authors, drawing from structural forms, managed to create visual forms that spawned unprecedented interior spaces, with an overwhelming power of expression that reflected the harmonious combination of *firmitas* and *venustas*. Analyzing how designers obtained such powerful visual forms from simple, stiff geometric shapes is an engaging exercise.

As mentioned above, between 1934 and 1936, Eduardo Torroja designed three concrete shells that made him famous, as much for their aesthetic expressivity as for their technical originality. The market at Algeciras (Figure 2) is a spherical dome supported at eight points, with intersecting cylindrical barrel vaults on each side of the octagonal plant. As in all of Torroja’s shells, neither the inside or outside surface has ribs or other elements that might help to perceive the form. Rather, the peripheral groins and the huge central skylight are what define its form visually, particularly from inside (Figure 11). In the Recoletos Jai-Alai Court (Figure 4), the use of a two lobed cross-section consisting of two intersecting cylinders of different radii, made it possible both to ensure the structural feasibility of the form and to generate a unique interior space, by replacing the solid surface with a lattice of triangular skylights. Indeed, Torroja’s visual

11. Market in Algeciras, Spain. Eduardo Torroja, 1934.



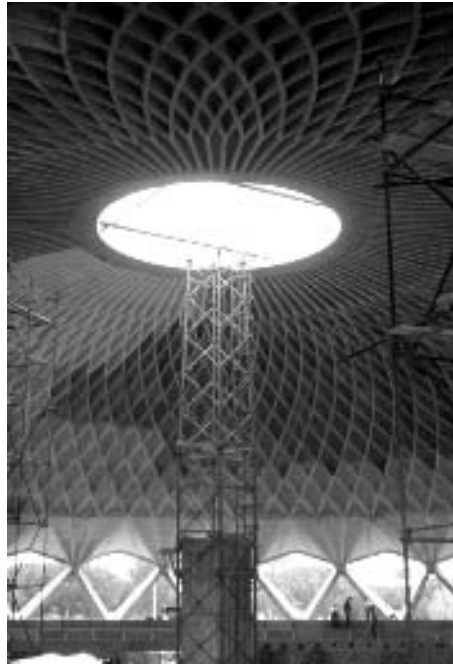
11

forms are distinctive because his geometric forms are equally distinctive: he used spheres, cylinders, hyperbolic hyperboloids with horizontal or vertical axes, toroidal domes and many free forms not liable to formulation in an intrinsic mathematical equation (9).

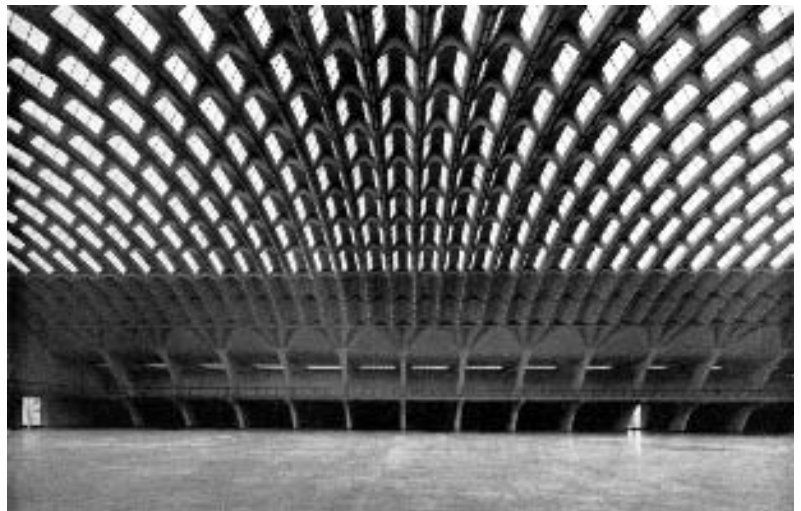
Pier Luigi Nervi, in turn, the most prestigious and influential Italian engineer in Europe throughout his long life (1891-1979), created his own construction company to be able to build his own designs, inventing the "ferrocement" used to precast economical permanent formwork for his shells. His repertoire of geometric forms was narrow, consisting essentially of spherical domes and parabolic vaults, but as a result of either construction-(Figure 12) or structure-(Figure 13) related reasons, their surfaces were always perceptible. The resulting grid of lines forming delicate arabesques, visible particularly from inside, unmistakably distinguish Nervi's works.

As noted above, Félix Candela (1910-1997) was born in Spain and studied architecture in Madrid. Under the curriculum in place at the time, Félix studied mathematics, geometry in particular, in the Faculty of Mathematics before enrolling in the School of Architecture proper, where he took courses on strength of materials and structural engineering. This afforded him a sound theoretical background that would prove to be of great importance in his subsequent approach to the profession. At the end of the Spanish Civil War in 1939, Candela sought exile in Mexico, where he lived and worked for the next thirty years. He founded *Cubiertas Ala*, a construction company from which he busily designed and built more thin shells than any other person or company in the world. In 1968 he relocated in Chicago and later in New York and Madrid. After leaving *Cubiertas Ala* he devoted much of his time to teaching, although he never gave up his design work entirely, acting as adviser to American and Spanish firms. But perhaps his most interesting works, in which he displayed greatest creativity and independence from other prevailing trends, were built in Mexico from the late nineteen forties to the late sixties, the period addressed in the following discussion.

One of Candela's distinguishing characteristics, perhaps shared only with Nervi, was that he was both designer and builder. In other words, he alone, or through other architects, received the commission to design and then build the structure in question. This was of cardinal importance to Candela for whom design and construction itself went hand-in-hand in a single economic package. For him, saving on the steel ratio was as important as saving on design development and structural engineering costs. He felt that being able



12



13

to perform the structural calculations for a building to ensure its safety was requisite to building. Moreover, he was not one to allow structural engineering consume a substantial percentage of the financial resources at his disposal. This belief in the importance of structural design, on the one hand, and the need to perform it economically on the other, was typical of Candela and defined his approach: an architect interested in understanding structural behaviour, interested in mathematics, interested in construction and, therefore, in the economics of building, and no less interested in the aesthetics of his own creations.

Candela used any number of geometric and structural forms in his works: long and

12. Sport Palace. Roma, 1956-57.

13. Exhibition Palace. Turin, Italy. P.L. Nervi, 1947-49.



short catenary-inspired cylindrical shells, cones and conoids, spherical and ellipsoidal domes, folded shells and so on. And while he sometimes repeated these forms, they were always adapted to their functional requirements. In each and every case, the resulting visual form was clearly defined by the geometry involved. Observant visitors with no geometric training would quickly see the similarity of form, for instance, between the Boliches Marsella building and the central nave in the Las Aduanas warehouse. But beyond these more or less classical geometries, Candela sought forms that would be more efficient from a number of perspectives. And the hyperbolic paraboloid seemed to him to be the ideal solution. Here the anticlastic form (negative double curvature) affords the surface enormous structural stiffness, enabling it to transfer loads normal to itself by means of tangential forces, i.e., working like a membrane or thin shell; the fact that its analytical definition is the simplest second degree equation,  $z=kxy$  simplifies not only the geometric but also the structural calculations. Its surface is generated by two families of straight generator lines, which also simplifies construction enormously compared to synclastic double curvature forms such as domes. While the reasons given by Candela for simplifying the structural design of his shells, in which he neglected to calculate the elastic bending moment in their paraboloids, are interesting and very topical, they fall outside the scope of the present analysis of the use he made of this geometry to generate a plethora of different visual forms in his works.

The first time that Candela used a hyperbolic paraboloid, or hyper, was in the Cosmic Ray Pavilion at the National Autonomous University of Mexico (U.N.A.M.) (Figure 14). At first glance, it appears to be a parabolic-shaped cylindrical vault. But by replacing the cylinder with two "parallel" hyperbolic paraboloids, he imbued the vault with a subtle longitudinal curvature and central fold that not only stiffen the wall structurally, but change its appearance. Candela never

repeated this particular form, but this was the beginning of his pursuit of new visual forms, mutually distinguishable but based on a sole geometry. Perhaps his best known innovation was the "umbrella", consisting of four paraboloids (Figure 15) that transfer their loads to a central column. The economy of these structures brought Candela's company a steady flow of commissions to roof industrial bays (Figure 16). That in turn led him to seek variations, slanting them to form saw tooth shapes (Figure 17), skewing them (Figure 18) or turning them upside down. In these structures, the straight axis clearly prevail in the visual form, and the straight generator lines are highlighted by the formwork. Consequently, their curved forms are less visible. On one occasion, in an attempt to distribute natural light in a textile factory, glass tiles were laid on the roof (Figure 19). Although this solution was never used again due to the technical problems encountered, the position of these tiles along the diagonals of the hyperboloids affords a clearer visual reference to the curvatures on the resulting surface. Nonetheless, these roofs may be perceived to be somewhat severe, with straight-edged axis. Interestingly, Candela himself changed this sensation categorically in Medalla Milagrosa Church (Figure 20). Despite being based on the same umbrellas, some slanted and deformed (Figure 21), the axis, almost more prominent than in previous works, give way to what are clearly perceived to be curved surfaces (Figure 22) and together generate an absolutely different and imposing visible space.

The aforementioned structures differ visually but not in their geometry. Candela's audacious curved edge structures, however, are even more visually distinctive, while still geometrically identical. Particularly noteworthy in this regard are the Lomas de Cuernavaca Chapel (Figure 23) and his cross vaults. The Cuernavaca paraboloid is actually very similar, geometrically speaking, to one of the two modules on the Cosmic Rays Pavilion, making allowance for the differences in scale and the use in the former of a curved

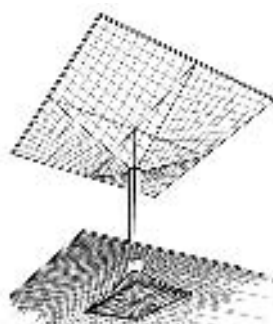
14. Cosmic Rays Pavilion. UNAM, 1951.

15. Umbrella by Félix Candela.

16. Warehouse Celestino Fernández. México, 1955.



14



15



16





17



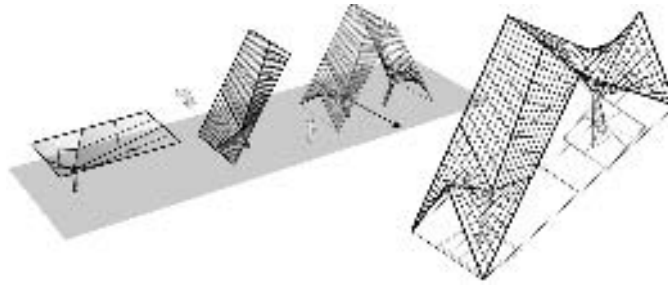
18



19



20



21



22



23



24



25

and cantilevered free edge. And no straight line or arris can be seen in either that would suggest to the non-expert that the surface is made up of straight lines. In the chapel, visual form is as distant as one can get from an umbrella. Candela also built many cross vaults with different plan layouts, ranging from triangular to octagonal, but all were the result of the intersection between hyperbolic paraboloids.

The most important, size-wise, are the six square vaults roofing the Bacardí industrial

bay (Figures 24 and 25) north of Mexico City. But the one that brought him greatest renown as a creator of forms was indisputably the roof over “Los Manantiales” restaurant at Xochimilco (Figure 26). This roof consists in an octagonal cross vault formed by the intersection of four paraboloids (Figure 27), whose parameters were exquisitely chosen to create a strong and at the same time engaging form.

The restaurant, unlike the Cuernavaca chapel, does have arris, but arch-shaped, not straight

17. Warehouse Hernaiz. México, 1956.

18. Warehouse Río. México.

19. High Life Textile Factory. Glass tiles.

20. Medalla Milagrosa Church.

21. Umbrellas. Medalla Milagrosa Church.

22. Curved surfaces.

23. Cuernavaca Chapel. México, 1958.

24. Bacardi Factory. Draw by C. García Reig.

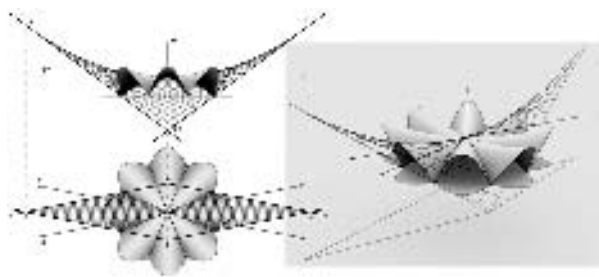
25. Bacardi Factory. México, 1960.

26. Los Manantiales Restaurant. Xochimilco. México, 1958.

27. Los Manantiales. Draw by C. García Reig.



26



27



28. Los Manantiales. Arch-shaped.

(Figure 28). Everything here is curved and readily visible. Taken together with its lush surroundings among the Xochimilco channels, this work is unrivalled in its ability to transmit a sensation of voluptuous leisure.

In summary, Candela, like Nervi, was a shell builder who founded his own company to be able to freely develop his creativity. But his was a much more frugal technological context, both in terms of construction and structural analysis. This led him to seek forms easy to design and build, and to discover the “hypar” which enabled him to build shells in which no ribs were necessary, either for reasons of strength or feasibility of construction. In this regard, Candela resembles Torroja: his surfaces are smooth and bare, in plain sight with no need for supporting elements to enhance their form. But whereas Torroja’s visual forms differ because they have different geometries, and Nervi’s are similar when based on the same geometry, Candela had an uncanny talent for obtaining different visual forms from one and the same geometric form. No other sole shell builder seems to have been so obsessed with a single geometric element and yet able to produce such a wide variety of truly engaging visual forms.

#### 4. THE DECLINE OF CONCRETE SHELLS

Nearly all thin concrete or masonry shells all around the world – and there are hundreds of them – were built in the period from 1925 to 1975. Most of them come from the following nine engineers or architects: Eduardo Torroja (1899-1961) and Félix Candela (1910-1997) from Spain; Robert Maillart (1872-1940) and Heinz Isler (1926-2009) from Switzerland; Franz Dischinger (1887-1953) and Ulrich

Müther (1934-2007) from Germany; and Antón Tedesko (1904-1994) and Eladio Dieste (1917-2000) from the Americas.

All of these great engineers and architects have now passed away and with them the art of concrete shells has disappeared.

In a sense however, this is not entirely true, since concrete cooling towers are really very slender shells and they are still being built today to a height of 200 m. Most concrete silos are composed of cylindrical and conical shells. Still these utilitarian structures and their repetitive shapes represent only a fraction of the range that used by the previous generation of shells. Factories, warehouses, metro stops, grandstands, theatres, cinemas, churches, restaurants, bars and even houses used to be covered by shells.

All this came to an end more than thirty years ago and Félix Candela appears to have been the one whose work was affected the most. Of all the names in this field he was probably the most specialised, concentrating on concrete shells, most of them hyperbolic paraboloids. Candela became the master of concrete shells and he went down with them when shell building declined. At a lecture at the Universidad Nacional Autónoma de México in 1969 he admits with brutal openness [1, p.138]: “...La verdad es que yo estoy tan perdido y desorientado como ustedes. Tengo cerca de 60 años, me he pasado 20 de ellos como constructor y diseñador de estructuras, conozco el oficio de arquitecto tradicional razonablemente bien, y no encuentro mercado ni uso para unas habilidades que me ha costado muchos años conseguir. Soy una persona desplazada en el mundo actual y no sé lo que hacer ni si valgo para algo”<sup>1</sup>. It is sad to hear such a famous and successful man in despair but to me it also proves what a great man Candela really was. He was not afraid of being open about his feelings even though they exposed his weaknesses.

We can imagine that all of the shell builders mentioned above had strong personalities and working with them must have been a real challenge. Still, so many young architects and engineers must have studied and worked with them that they could have easily continued the tradition of building shells. There must have been other reasons for concrete shells to have disappeared so rapidly. The following reasons come to mind:

##### 1. Shells are out of fashion

It was the freedom of shape offered by the new construction material of reinforced concrete that led to new and spectacular forms in the 1920s and 1930s. Curved, natural looking

<sup>1</sup> “As a matter of fact, I am as lost and disorientated as you are. I am around 60 years old and 20 of them I spent as contractor and designer of structures, I know the trade of the traditional architect reasonably well and I neither find market nor use for some capabilities that cost me so much to achieve. I am out of place in today’s world and I do not know what to do nor if I am worth anything.”

shell shapes became fashionable again after WWII during the Fifties and Sixties. Perhaps they were a reaction to the boxes and rectangular shapes pertinent to Modern Architecture as influenced by the Bauhaus, Gropius, Mies van der Rohe, Le Corbusier etc.. Once the hippy era of the Sixties ended polygonal shapes took over again and the demand for shells decreased.

## 2. Shells are expensive

Fashion and technical issues apart, it is cost that determines the feasibility of a building or a structure. The complex, mostly double curved shapes of shells require complex and labour intensive formwork. Even in the developing countries labour became more and more expensive. Thus shells could not be built economically anymore and anywhere. Of course, to a certain extent cost can be reduced by inflatable formwork, repetitive use of the same formwork or, especially in the case of Candela, the use of hypar shells where the formwork can be arranged along the straight generator lines of the shell, i.e. made of straight bars. Nevertheless, the formwork and its supports make shells costly.

## 3. Shells are not practical

Candela, Isler and most of the other shell builders argue that since nature does not create plane structures and hardly any rectangles, double-curved and organically shaped shells are not only efficient but more natural than other structures. But the attribute "natural" is not equivalent to "practical". In terms of partition walls, installations, lighting, furniture, windows etc. plane walls and ceilings are more practical.

## 4. Shells are difficult to analyse

Until recently only selected shell shapes such as rotationally symmetrical shells under symmetrical loading, cylindrical vaults and hypar shells could be analysed "by hand" with certain accuracy. For all other cases the fourth order partial differential equations that needed to be solved made hand calculations too complex and model testing was the only way out. Thin concrete shells in compression are also prone to instabilities. They may buckle if there is not sufficient double curvature and also dynamic effects such as vibrations due to wind can lead to failure. It appears that those who understood the membrane and bending theory of shells were not always able to translate their theory so that it could be understood by practitioners. Candela writes with certain irony: "*es un fenómeno general en la literatura técnica que trata de estos temas que sus autores se muestran excesivamente generosos en lo que se refiere a integrales y*

*ecuaciones diferenciales complicadas, sobre todo cuando su manejo no se halla al alcance de la mayoría y procuren, en cambio, ocultar celosamente los principios mecánicos en que se basan los procedimientos analíticos. De este modo se has mantenido eficazmente, durante muchos años, un velo de misterio sobre estas cuestiones, rodeándolas de una aureola de alta especulación matemática, que contribuye a presentar a los escasos iniciados como sabios eminentes y a ahuyentar a los atrevidos que intentan introducirse en su reducido círculo.*"<sup>2</sup> [1, p. 98].

## 5. Shells are dark

While concrete shells are thin and lightweight, the proper building material is opaque and does not permit light to enter the space below. If natural light is required, openings have to be inserted into the shell, which makes them even more difficult to analyse.

## 6. Shells are not compatible with modern building physics

Good thermal insulation is becoming more and more important. Thin concrete shells provide no thermal insulation and, therefore, in the northern countries they need to be clad with additional insulation material which in turn eliminates their slenderness. This is often the very reason that they were built in the first place.

## 7. Shells are not covered by building codes

Thin shells are uncommon structures with uncommon dimensions and uncommon structural behaviour. The more codes and rules we have, the more difficult it is to prove that a shell is acceptable. To quote Félix Candela again: "*La oposición de la burocracia tecnológica, tanto estatal como la de la gran industria, e inclusive la de muchas sociedades científicas, es una de las más efectivas barreras que el hombre ha ideado contra el progreso*"<sup>3</sup> [1. p.162].

## 8. Shells only make sense for small structures

In terms of size Candela was convinced that spans of more than 30 m are not economical. As a matter of fact, thin concrete shells are rarely seen for stadium covers, a hangar or large expo halls.

Even though some of the items listed above may not be of any great importance, the totality of them certainly prevented concrete shells from evolving any further.

The history of structures is also the history of building materials and in the Sixties, for

<sup>2</sup> "In the technical literature that treats these subjects it is a general phenomena that the authors are excessively generous with complicated integrals and differential equations, especially when dealing with them is not within reach for the majority and on the other side they are jealously hiding the mechanical principles of the analytical procedures on which they are based. For many years these questions were effectively covered by the veil of mystery, surrounded by an aureole of high mathematics that presented the few who understood as scholars and chased away the few brave ones who dared try to enter their narrow circle."

<sup>3</sup> "The opposition of the technocratic bureaucracy be it from the government, from the multinational firms and even from the scientific community is one of the most effective barriers against progress mankind has come up with".



29. German Expo Pavilion by Frei Otto, Montreal, 1967.

30. Roof of the Olympic Stadium, Munich, 1972.

31. Cable-net Cooling tower during construction without cladding. Schmehausen, Germany, 1974 (12).

32. The First Cable-Net Glass Façad, Hotel Kempinski, Munich, 1993.

example, new high-strength steel wires and new membrane materials made of plastic fibres suddenly became available.

## 5. THE NEXT GENERATION LIGHT-WEIGHT STRUCTURES

The German Pavilion built for the 1967 World Expo in Montreal by Frei Otto, with the architect Rolf Gutbrodt and the engineers Leonhardt and Andrä, is the iconic building which represents the next generation of light-weight structures (10), Figure 29. With the help of the new materials now available Frei Otto and his team created shapes never seen before. Tent-like tension structures made of cable-nets covered by membranes became



29



30



31



32

possible. With their double curvature they seem to originate directly from Candela's hypar shells. The big difference, however, is that they are pre-tensioned tensile structures and their stiffness and stability is achieved by combining double curvature with a high level of pre-stress. Contrary to their concrete ancestors these new structures were so light that wind suction could carry them away. Therefore, it is important to note that these light-weight structures need bulky and costly foundations in order to anchor wind loads and the pre-stress forces into the ground.

Strongly influenced by the German Pavilion in Montreal the architect Günter Behnisch and the engineers Leonhardt und Andrä, together with Frei Otto, projected this experience on a much larger project. The result turned out to be the still impressive roof covering of the 1972 Munich Olympic stadium (Figure 30). The enormous size and elegance of this structure is the climax of cable-net building (11). To our knowledge no larger roof of this size has been built since. At the same time the Munich roof demonstrates that such structures are very costly not only because the foundations are expensive but also because firstly, the net has to be built and secondly, the cladding has to be attached.

Today pure cable-net constructions are mainly successful as special purpose structures such as covers for aviaries and in cable-net façades. Of particular interest in this case is also a 180 m high cooling tower that was built as a cable-net structure during the Eighties (Figures 31 and 32). Since the 1980s two new tendencies have emerged, opening the way for a whole new generation of light-weight double curved structures:

1. Long-span membrane roofs, often self-anchored, with a minimum of primary steel structure
2. Very transparent steel grid shells covered with glass

Once again it was advances in material technologies, for example, high-strength



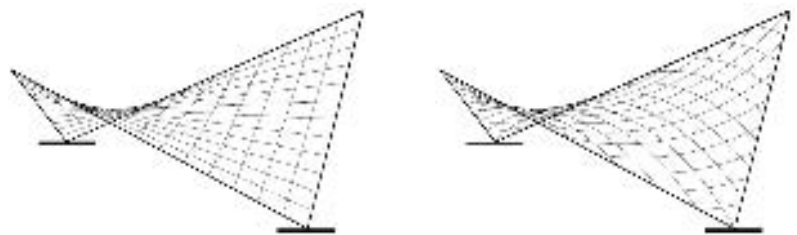
33. Spoked Wheel Roof covering the Gottlieb Daimler Stadium, Stuttgart, Germany, 1993.

34. Membrane canopy, Chancellery, Berlin, Germany, 2001.

35. Hypar Shells made of Straight Generators (for concrete shells) and curved ones (for grid shells covered with plane quadrangular glass panels).



34



35

membranes and affordable tempered safety glass that contributed to progress. However, new structural systems such as spoked-wheel roofs and translational surface grids contributed greatly in paving the way for these advances (12).

Nowadays double curved pre-tensioned membrane structures are amongst the most successful long-span light-weight roof structures. They are surprisingly economic provided they are self-anchored, i.e. the spoked wheel concept is used. Just in Schlaich's office it have been designed more than twenty stadia membrane roofs with a weight

(dead load) of approximately 25 kg/m<sup>2</sup> that span areas of 200 x 300 m without interior supports and that can carry loads of 100 kg/m<sup>2</sup>, i.e. around four times their own weight (Figure 33-Figure 39).

Light-weight steel grid shells covered with glass have the advantage that the lightness of the structure is fully visible. As long as the steel grid is composed of triangles (or rectangles with cable diagonals) the structure behaves exactly as a shell. If translational surfaces are used, plane glass panels can be used on a quadrangular steel grid which leads to rather economic structures. While Candela used to align the formwork for his concrete hypar shells along the straight generator lines, for glass covered shells curved generator lines are used in order to achieve plane glass panels. This interesting subject on its own is too ample to be pursued at this instance any further and the interested reader is referred to the respective publications (13).

When the shape of a shell cannot be represented by translational surfaces as in Fig. 35 – e.g. if a shell designed by Heinz Isler was



to be made of glass – the only way left to develop the surface is to work with triangles. In this case a steel grid made of bars that form

- Ecology: light structures generally require minimum quantities of material, hence they are sustainable.
- Social: light structures are not easy to build. They require qualified manual labour. Therefore, they play a social role as they create jobs.



36

Due to the plethora of choice in light-weight constructions today, they have become once again very fashionable. In contemporary architecture there is a trend towards natural shapes. Parallel to this development the possibilities of 3-D computer graphics have opened the way to more ephemeral designs and virtual structures. They are very convincing on the computer screen and, if at all, can only be transformed into reality with the help of shell type structures. Admittedly there is a danger in such trends. Forty years ago in his essay *“Comentarios acerca de la colaboración entre arquitectos e ingenieros”* (1) Candela



37



38

triangles covered in triangular glass panes works as a shell.

## 6. TODAY'S FREEDOM OF CHOICE

As we have just explored, compared with Candela's age, we have many more options if we want to build light-weight structures:

- Predominantly in compression we can build not only concrete shells but also glass covered steel-grid shells.
- Predominantly in tension we can build cable nets and membrane roofs.

Many agree that generally light-weight structures are very desirable. Not only do they minimise bending, i.e. use the structural sections in a most efficient way, they also convince for several other reasons:

- Beauty: light structures are transparent and show the flow of forces in a natural way. We generally like what we comprehend. We also prefer lightness because we associate with it elegance as lighter structures do not obstruct our view and we feel less threatened.

complains about modern architects who design structures without knowing if they can be built. He equally complains about engineers who calculate everything the architects give them but do not contribute to the concept of the structures. How true is this still today! But we should not carry on complaining. This does not change anything. Rather, we should be optimistic and use the present trend to build light-weight double curved structures –shells– once again! At the same time the evolution of structures in general is continuing thanks to progress in material science. Glass, for instance, is being glued together directly leading to all-glass structures without any supporting steel work. High strength carbon fibre materials are also being used more and more frequently and even in the field of concrete new tendencies appear, such as ultra-high-performance and infra-light-weight concretes as well as new fibre- and textile-reinforced concretes.

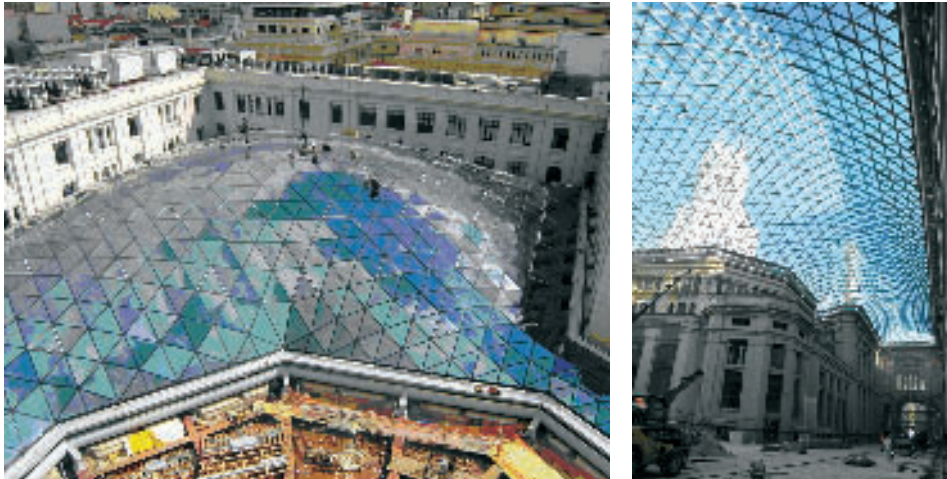
Let us come back to concrete shells as one of the structural options we have today. Do they have a future? Jörg Schlaich comes up with several reasons why we should still work with them today (14):

36. Glass Hypar Roof with plane quadrangular Glass Panels, Schubert Club Band, Minneapolis, USA, 2001.

37. Glass Grid Shells with plane quadrangular Glass Panels, Berlin, Main Station, 2006.

38. Triangular Steel Grid Shell, Roof of DZ Bank, Berlin, 1998.





39

- They are the most honest structures as shape and structure are identical.
- They are natural and beautiful if they are made to work without or almost without bending.
- The material concrete is genuinely used as shells work mainly in compression and use the sculptural formability of concrete to a maximum.

Furthermore, some of the arguments once raised against concrete shells are not valid anymore:

- Structural analysis has become easy.
- With regard to building physics concrete shells can sometimes be even more advantageous than other light-weight structures

- if we consider noise protection and heat storage capacity.
- Thanks to CNC-guided machines organically free-shaped formwork is not prohibitively expensive anymore.

As this essay's argument points out, there seem to be growing opportunities for concrete shells. Once again it seems that light-weight structures, and with them thin concrete shells, have a chance to form an important part in the future of structures. Anyhow, for all future complex structures of quality we need "maestros de obra", well trained engineers who know about architecture and well trained architects who understand how structures work. Then I think we can be full of hope.

39. Triangular Steel Grid Shell, covering the "Palacio de Comunicaciones" in Madrid, Spain, 2009.

## REFERENCES

- (1) Candela, F.: *"En defensa del formalismo y otros escritos"*, Xarait Ediciones, 1985 (in Spanish).
- (2) Cassinello, P.: *"Félix Candela. Centenario/Centenary 2010"*. Topic: *"Félix Candela en el contexto internacional de la Aventura Laminar de la Arquitectura Moderna/Thin concrete Shell"* (pp. 61-109). Universidad Politécnica de Madrid and Fundación Juanelo Turriano. Spain. Editor Pepa Cassinello.
- (3) Faber, C.: *"Las estructuras de Candela"*. Editorial Continental, S.A., 1970 (in Spanish).
- (4) Journal *"Informes de la Construcción"*. Instituto Técnico de la Construcción y del Cemento itcc, Madrid, Spain. n° 76 (1955), n° 80 (1956), n° 86 (1956) (in Spanish).
- (5) Abel, J.: *"Félix Candela and the IASS"*. Article in book *"Félix Candela- Centenario/Centenary" 2010*. U.P.M. and Fundación Juanelo Turriano. Spain. Editor Pepa Cassinello (in English).
- (6) Torroja, E.: *"Las Estructuras de Eduardo Torroja"*. F.W. Dodge Corporation, New York (1958).
- (7) Cassinello, P. and Torroja, J.A.: *"Félix Candela: His vocational training at the university and his subsequent relationship with the Institute founded by Eduardo Torroja"*. Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures, IASS, n° 163, vol. 51 (2010) (in English).
- (8) Calavera Ruiz, J.: *"Félix Candela. Centenario/Centenary 2010"*. Topic: *"La Intuición y el Cálculo en Félix Candela, y algunos recuerdos"* p. 187. Universidad Politécnica de Madrid y Fundación Juanelo Turriano. Edición: Pepa Cassinello, Madrid 2010 (in Spanish).
- (9) Torroja, J.A.: Article *"El genio y el ingenio en la obra de Eduardo Torroja"*. Book/ *"La Vigencia de un Legado"* (pp. 79-93). Universidad Politécnica de Valencia. Vicerrectorado de Cultura. Spain 2002. Edition: Carmen Jordá (in Spanish).
- (10) Nerdinger, W. (ed.): *Frei Otto, Das Gesamtwerk*, Birkhäuser, 2005 (in German).
- (11) Leonhardt F.; Schlaich J.: *Vorgespannte Seilkonstruktion. Das Olympiastadion in München*, Stahlbau, Hefte 9,10 and 12, 1972 (in German).
- (12) Holgate, A.: *The Art of Structural Engineering*, Edition Axel Menges, 1997.
- (13) Schlaich J.; Schober H.: *Glass-covered light-weight spatial Structures*, IASS-ASCE International Symposium, Atlanta, 1994.
- (14) Schlaich J.: *Do concrete shells have a future?*, IASS Bulletin, n° 89, Spain, 1986.

\* \* \*

## TRADUCCIÓN ESPAÑOL

P. Cassinello, M. Schlaich, J.A. Torroja

### Félix Candela. En memoria (1910-1997).

## Del cascarón de hormigón a las estructuras ligeras del s. XXI

### 1. INTRODUCCIÓN

Uno de los mayores retos de la Arquitectura Moderna fueron sin duda las Estructuras Laminadas de hormigón armado. Fue en la segunda década del siglo XX cuando realmente se inició, lo que sin duda podemos llamar, "*La Aventura Laminar*", en la que ingenieros, arquitectos y constructores se unieron como eslabones de una misma cadena, forjada para la búsqueda de la más eficaz, desnuda y esbelta forma laminar resistente, en un intento de conquistar la nueva libertad de forma y tamaño, que este material les ofrecía, unida al nuevo sentir, que en esa misma década, hizo nacer la Modernidad, como un nuevo modelo de pensamiento que será reconocido siempre a través de la posterior y famosa frase atribuida a Mies Van Der Rohe; "*Less is More*".

Las internacionalmente conocidas como las "*Thin Concrete Shells*", pueden ser definidas como un conjunto de eficaces y desnudas formas espaciales, construidas en hormigón armado y/o pretensado, en las que el espacio habitable está definido por la propia forma geométrica de la estructura laminar en sí misma, que se constituye, en un solo gesto, en piel, y estructura de la Arquitectura que define, generando una nueva y Moderna imagen escenográfica en la ciudad. Unas formas espaciales que definieron espacios habitables, en los que se cumplían, de forma tajante y rotunda, los cinco puntos fundamentales definidos por Le Corbusier para la Arquitectura Moderna. Y además, tal y como Félix Candela señaló posteriormente, fue en ellas, en las "Estructuras Laminadas", donde el hormigón armado encontró la más racional manifestación de su razón de ser, optimizándose el aprovechamiento de sus características formáneas y adecuadas-resistentes (1).

Cuando Félix Candela era tan solo un niño, y una vez transcurridos más de 70 años desde que Monier construyera sus primeras macetas y patentara el hormigón armado, en 1922-1923 la empresa Dyckerhoff-Widmann construyó la primera "*Thin Concrete Shells*" en la cubierta del Planetario del Instituto de Astrofísica de la Universidad de Jena (Alemania) (Fig.1) Se trataba de una lámina geodésica de unos 16 m de diámetro y 3 cm de espesor, ejecutada en hormigón armado proyectado por anillos paralelos, sobre un armazón espacial reticulado, de nudos rígidos, formado por barras metálicas. Esta pionera estructura laminar fue el resultado de la colaboración entre los ingenieros Franz Dischinger (1887-1953), de la empresa Dyckerhoff y Widmann, y de Walter Bauersfeld (1879-1959), de la empresa de ingeniería Carl Zeiss, y de los arquitectos Hans Schlag y Johannes Schreiter. El sistema de construcción utilizado fue patentado (Z-D) y diez años más tarde

introducido en Estados Unidos por Anton Tedesco, que fue también ingeniero de la empresa Dyckerhoff y Widmann. A partir de este momento, la empresa de ingeniería Dyckerhoff-Widmann, que ya contaba con múltiples experiencias en construcciones de hormigón armado, se convirtió en líder internacional del pionero desarrollo de las estructuras laminadas. En su equipo reunió, generación tras generación, a los más prestigiosos y sobresalientes ingenieros, formándolos en los más innovadores conocimientos.

Pero en esta "Aventura Laminar", que duró hasta los años 70, fueron apareciendo en escena, secuencialmente, relevantes protagonistas que contribuyeron al desarrollo de las Estructuras Laminadas desde muy diferentes aspectos. Algunos construyeron un innovador legado de cascarones de hormigón, que hoy forman parte del Patrimonio Histórico de nuestras ciudades, otros desarrollaron nuevos métodos de cálculo y comprobación que ayudaron a difundir y facilitar el uso de este nuevo tipo de estructuras, otros racionalizaron los procesos de construcción, o patentaron las primeras piezas laminadas prefabricadas, y entre todos consiguieron convertir las Estructuras Laminadas en uno de los más venerados hitos de la Historia de la Arquitectura del siglo XX.

Entre otros muchos destacan, por muy diferentes razones: Robert Maillart (1872-1940), Simon Boussiron (1873-1958), Auguste Perret (1874-1954), Eugène Freyssinet (1879-1962), Franz Dischinger (1887-1953), Ove Nyquist Arup (1895-1988), Pier Luigi Nervi (1891-1979), Ulrich Finsterwalder (1897-1988), Eduardo Torroja (1899-1961), Nicolás Esquillan (1902-1989), Antón Tedesco (1903-1994), Oscar Niemeyer (1907), Mario Salvadori (1907-1997), Félix Candela (1910-1997), Matthew Nowitzki (1910-1950), Eero Saarinen (1910-1961), Bernard Louis Zehrfuss (1911-1996), Andre Paduart (1914-1985), Heinz Hossdorf (1925-2006), Heinz Isler (1926-2009), Ulrich Müther (1934-2007), Jörg Schlaich (1934).

En referencia al tamaño de las Estructuras Laminadas, tras un largo periodo de experimentación y análisis, en diferentes países, no sólo sobre la propia obra construida de diferentes autores, sino sobre el entonces necesario apoyo en los modelos físicos reducidos, consiguieron controlar los problemas surgidos por el cambio de escala en cada forma geométrica específica, y finalmente, el hormigón armado y el pretensado, permitieron construir nuevas

formas espaciales continuas de más de 200 metros de luz entre apoyos, dejando muy atrás los poco más de 40 metros alcanzados con las formas espaciales construidas con fábricas históricas, o los 60 metros alcanzados con láminas ejecutadas con fábricas tabicadas armadas.

En efecto, aunque con diferentes formas geométricas, de los 43 m de diámetro de la cúpula del Panteón de Agripa en Roma, máxima luz de vano libre alcanzada con fábricas antiguas, se llegó a los 280 m de luz de vano entre apoyos en la estructura laminar de hormigón armado y doble hoja del CNIT de París (2).

En cuanto a la perseguida esbeltez y desnuda belleza de los cascarones de hormigón armado, Félix Candela fue uno de los más relevantes protagonistas de esta Historia, convirtiéndose en poco tiempo en paradigma internacional de la delgadez laminar e imagen escultural de las Estructuras Laminadas. Sus cascarones no sobrepasaron nunca una luz de vano mayor de 30 m (3), pero los construyó con bordes libres y una sola hoja laminar de hormigón armado, que en muchos casos, contó con un espesor continuo de tan sólo 4 cm. El conjunto de su legado está formado por más de 800 cascarones de hormigón armado, el mayor patrimonio laminar jamás construido por un solo hombre. Un variado legado de formas resistentes, que sin embargo están basadas en un 90% de los casos, en la utilización de una misma forma geométrica –el paraboloide hiperbólico–, que intersecado, girado o maclado de muy diferentes maneras, en las manos de Félix Candela, genera un inagotable y escultural conjunto de diferentes formas.

Félix Candela fue también uno de los más destacados colaboradores de la revista "Informes de la Construcción", fundada por Eduardo Torroja en 1948, que desde el inicio de la década de los años 50, publicó su innovadora obra (4), como parte integrante de la Historia de la Arquitectura Moderna y del específico desarrollo del hormigón armado y las Estructuras Laminadas. La *Internacional Association for Structural Shells* IASS, fundada por Eduardo Torroja en 1959 en Madrid, nombró en el año 1963 a Félix Candela y a Pier Luigi Nervi socios de honor por sus relevantes aportaciones al desarrollo de las Estructuras Laminadas (5).

Una vez conquistada la cima de su conocimiento, a finales de los años sesenta, el protagonismo internacional de las *Thin Concrete Shells* se había desvanecido. Su lugar lo ocuparon nuevos tipos de estructu-

ras ligeras metálicas, incorporándose también, de forma paulatina, otras estructuras espaciales ejecutadas con nuevos materiales. No en vano, fue precisamente en el año 1969, cuando la iass "*Internacional Association for Shell Structures*", decidió cambiar su nombre, y sin modificar sus siglas, en 1970 pasó a llamarse "*Internacional Association for Shell and Spatial Structures*".

A partir de este momento, se ocupó de todo tipo de estructuras espaciales, no limitándose a las láminas de hormigón, que siguieron construyéndose de forma muy poco generalizada, hasta prácticamente desaparecer al final de los años 70. De esta manera, quedaron también integradas en la iass las estructuras ligeras, sobre las que Frei Otto se ocupó especialmente de su investigación desde 1964, en el Instituto de Estructuras Ligeras de Stuttgart (Institut für leichte Flächentragwerke), y las vanguardistas estructuras ligeras de vidrio y nuevos materiales que hoy protagonizan los retos del siglo XXI, y que sin duda representan la continuidad histórica de un mismo camino hacia la optimización de la racional esbeltez de las nuevas formas laminares resistentes.

## 2. FÉLIX CANDELA EN EL CONTEXTO INTERNACIONAL (1950-1969)

Félix Candela Outeriño nació en Madrid (España) el 27 de enero de 1910. En 1927, cinco años después de que se hubiera construido la primera estructura laminar de hormigón armado en Jena, Félix Candela inició sus estudios en la facultad de Ciencias de la Universidad Central de Madrid, como formación obligatoria previa a su ingreso en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura, perteneciente a la actual Universidad Politécnica, en la cual se licenció como arquitecto en el año 1935.

Desde el inicio de sus estudios de arquitectura, Félix Candela mostró una especial atracción por las posibilidades que el hormigón armado ofrecía para generar nuevas formas espaciales laminares, no en vano, además de recibir una sólida formación en las asignaturas relacionadas con la geometría, la estructura y la resistencia de materiales, se formó y licenció en la década de los años 30, momento en el cual el insigne ingeniero español Eduardo Torroja (1899-1961) empezó a liderar desde Madrid, y de forma internacional, no sólo el desarrollo de las estructuras laminares sino también del hormigón armado y pretensado.

En efecto, en el año 1930, en unos momentos en los cuales todavía estaba pendiente, no ya la conquista de las "*Thin Concrete Shell*", sino también, de la del máximo desarrollo científico del hormigón armado y pretensado, Eduardo Torroja fundó la empresa Investigaciones de la Construcción S. A., ICON, que bajo su dirección se especializó en el ensayo de modelos como método de análisis del comportamiento estructural de nuevas formas resistentes. Ello le permitió, no sólo lanzarse a la realización de importantes estructuras laminares en unos momentos en los que no existían métodos fiables de cálculo para este tipo de estructuras, sino desarrollar un método científico del análisis estructural utilizando modelos físicos. Fueron famosos los modelos que realizó de las cubier-

tas del Mercado de Algeciras y del Frontón Recoletos, ambos construidos a escala 1:10 y construidos en microhormigón. Pronto fue reconocido, a nivel internacional, como el "padre" de los ensayos científicos sobre modelos reducidos, contribuyendo a disipar uno de los mayores problemas que por aquel entonces presentaba el desarrollo proyectual de nuevas formas laminares de hormigón armado y pretensado, ofreciendo un sistema fiable de comprobación de su comportamiento estructural.

En esta década, Eduardo Torroja construyó tres de sus más innovadoras y emblemáticas estructuras laminares, dos de ellas en Madrid; el *Mercado de Algeciras* (1934) (Fig. 2), para el que proyectó una cubierta laminar en forma de casquete esférico de 47,62 metros de luz y 9 cm de espesor, sustentada sobre ocho apoyos perimetrales, inventando la técnica de desencofrar mediante zunchado; el *Frontón Recoletos de Madrid* (1936), cuya cubierta estaba formada por una estructura laminar generada por la intersección de dos sectores de cilindros circulares de 12,20 m y 6,40 m (sección transversal en "gaviota"), salvando una luz de 55 m entre los muros testeros de cierre con un espesor de tan sólo 8 cm; o el *Hipódromo de la Zarzuela de Madrid* (1935), Fig. 3, cuya marquesina es una estructura laminar formada por la sucesión de hiperboloides de eje horizontal secantes entre sí, de 5 cm de espesor en los extremos de sus voladizos de 12,80 m. Lamentablemente, el Frontón Recoletos de Madrid (Fig. 4) se desplomó, debido a los daños sufridos durante los bombardeos de la Guerra Civil española (1936-1939). La característica común a todas las obras de Eduardo Torroja fue sin duda su variada y genial innovación, no repitiendo nunca las mismas formas ni sistemas constructivos (6).

Es también en el año 1935 cuando el italiano Pier Luigi Nervi (1891-1979), que al igual que Eduardo Torroja, había iniciado el ejercicio de su profesión en la década de los años 20, construyó sus famosos hangares de Orvieto (Italia) (Fig. 5), con láminas nervadas de hormigón armado que se convertirían en poco tiempo, en el sello inconfundible del conjunto de su obra, así como el empleo de ese nuevo material que el mismo inventó, "el ferrocemento", y al racional uso de sistemas mixtos de construcción utilizando piezas prefabricadas a pie de obra. Al final de esta década de los años 30, es también cuando otro de los grandes protagonistas de esta historia, el ingeniero suizo Robert Maillart (1872-1940), tras crear una nueva estética estructural en los puentes de hormigón armado, muy audaz esbeltez hacía que pareciese que flotaban en el paisaje, construyó en 1939 la estructura laminar del *Pabellón de la Exposición Nacional Suiza* (Fig. 6), poniendo de manifiesto las posibilidades que ofrecían las nuevas estructuras ligeras, tal y como él mismo había manifestado en su famosa publicación del año 1931 (*Schweizerische Bauzeitung*).

En este contexto internacional es cuando Félix Candela, en 1935, recién licenciado

como arquitecto, solicita una beca a la Real Academia de San Fernando para ir a estudiar a Alemania, la cuna de las Estructuras Laminares. Lamentablemente, en 1936, cuando la beca le es concedida, estalló la Guerra Civil española, y Félix Candela decidió permanecer en España y se alistó en el Ejército Republicano. La misma guerra en la que lamentablemente desapareció "El Frontón Recoletos" de Eduardo Torroja, parecía haber hecho también desaparecer la posibilidad de que Félix Candela se especializara en las Estructuras Laminares de hormigón armado. Sin embargo, no fue así. En 1939, una vez terminada la Guerra Civil española, Félix Candela se exilió de España. El destino le llevó a México, un país que reunía las más propicias características para poder construir, de forma económica, una enorme cantidad de estructuras laminares, dado el bajo salario de los obreros en aquellos momentos, así como su benigna climatología.

Sin que esto signifique, tal y como dijo Ove Arup, que por ello, el enorme patrimonio legado por Félix Candela, no sea debido a la singular capacidad creadora de su autor (1). Por otra parte, la clave para poder convertirse en especialista de estas nuevas formas espaciales, no estaba, según descubrió posteriormente, en aprender los farragosos y complejos métodos de cálculo basados en la Teoría de la Elasticidad, que él pretendía aprender en Alemania (7).

En el año 1949, Félix Candela, imitando a los "*innovadores*" maestros de la Historia de la Arquitectura, se había convencido ya, de que el camino más adecuado para capacitarse en el diseño y construcción de cascarones de hormigón armado, era la experimentación directa mediante la construcción de modelos, basándose en el conocimiento de las inmutables Leyes de la Naturaleza (Estática, Mecánica y Resistencia de Materiales). Consideró, además, que lo más sencillo e inmediato para él –tenía prisa por aprender–, era construir modelos a escala natural, tal y como hicieron los maestros de obras medievales, que siguiendo este mismo camino de aprendizaje, se capacitaron para crear las Catedrales Góticas. Félix Candela (Fig. 7), desde la audacia de la madurez de su conocimiento, trazó de esta manera el camino de su autoaprendizaje.

En este mismo año, construyó su primer cascarón experimental. Fue la llamada "Bóveda Ctesiphon" de San Bartolo de Naucalpan en México (Fig. 8). Se trataba de un "cascarón" de carácter experimental, cuya geometría respondía a la de un cañón funicular con directriz catenaria.

Posteriormente, cada vez que quería utilizar una nueva geometría y tamaño, Félix Candela construía cascarones experimentales, para poder comprobar su funcionamiento estructural y desentrañar los diferentes aspectos que le podían permitir optimizar su proceso de construcción, entre otros construyó una lámina experimental con geometría de conoide en la Fábrica de Fernández en San Bartolo en México (1950) (Fig. 9) y el



prototipo de "Paraguas" experimental, en Las Aduanas, México (1953) (Fig. 10).

Tal y como ya hemos reseñado, Félix Candela se incorporó definitivamente a la Aventura Laminar en el año 1950, cuando fundó en México, su propia empresa –"Cubiertas Ala"–, con sus hermanos Antonio (aparejador) y Julia, y con los hermanos arquitectos, Fernando y Raúl Fernández Rangel, quienes abandonaron la empresa en el año 1953. "Cubiertas Ala" nació con la finalidad de construir *casco-nes de hormigón armado*, como cubierta de edificios industriales, pero dado su rápido éxito, se construyeron cubiertas laminares de hormigón para todo tipo de edificios: viviendas, iglesias, restaurantes, club nocturnos, gasolineras, Félix Candela dirigió "Cubiertas Ala" desde su fundación en 1950 hasta 1969, momento en el cual se hizo cargo su hermano Antonio, quien la dirigió hasta su cierre en el año 1976.

La década de los años 50, momento en el cual Félix Candela se incorporó definitivamente a la "Aventura Laminar", fue sin duda la de mayor desarrollo de las "Thin Concrete Shells" a nivel internacional. Tras tres décadas de investigación sobre el hormigón armado y pretensado, en las que se conquistaron paulatinamente nuevas formas resistentes y técnicas constructivas, perfilándose y simplificándose también los métodos de cálculo y comprobación, esta década representó el máximo apogeo de las Estructuras Laminares, surgiendo gran parte de los más venerados hitos de la Arquitectura Laminar de la Modernidad. Al final de estos prolíferos años, en 1959, se fundó en Madrid (España), en el seno del Instituto Técnico de la Construcción y del Cemento, la *Internacional Association for Shell Structures* iass, bajo la presidencia de Eduardo Torroja, con la finalidad de poder ordenar, debatir, reglar y difundir todos los conocimientos alcanzados, así como la evolución y destino internacional de este específico campo de la construcción civil y arquitectónica.

Es en este mismo año, es cuando Félix Candela inicia también el desarrollo y difusión de sencillos métodos de cálculo aplicados a las estructuras laminares, contribuyendo a nivel internacional a que existan alternativas de cálculo analítico más racionales y sencillas. Su primer artículo lo publicó, este mismo año, bajo el título "Cubierta Prismática de Hormigón Armado en la Ciudad de México", en el que resalta la relevante importancia de la escala. Fue precisamente una revista española, "La Revista Nacional de Arquitectura", la que publicó este artículo en su nº 99. Al año siguiente, en 1951, Félix Candela publicó en el *Journal del ACI* su segundo artículo, cuyo título fue "Simple Concrete Shells Structures", así como un libro, posterior, que bajo el título de "Hacia una nueva Filosofía de las Estructuras", pone de manifiesto, tal y como explica José Calavera Ruiz (8), no sólo el conocimiento que Félix Candela tenía sobre el cálculo y diseño estructural, sino cómo fue capaz de contribuir a que se realizaran importantes cambios.

La mayor parte del relevante legado de Félix Candela fue construido en México durante las décadas de los años 50 y 60. Las aporta-

ciones más importantes que Félix Candela realizó en el contexto internacional de la Aventura Laminar de la Arquitectura Moderna, pueden ser entendidas desde el conocimiento de los objetivos de esta Historia, en la que sólo algunos fueron capaces de fundir, en un sólo gesto, Arte y Tecnología, proyectando formas resistentes eficaces, esbeltas, estéticas y fáciles de construir. En primer lugar, la relevancia de la obra de Félix Candela, se debe a que se auto-capacitó para poder actuar a la vez como arquitecto, ingeniero y constructor, no necesitando el apoyo de ningún otro profesional para poder crear libremente sus cascarones de hormigón armado. En definitiva, se convirtió en un "maestro de obras", que a la manera medieval, reunía en una misma persona todos los conocimientos necesarios para crear, meta que alcanzó, según manifestó posteriormente (1), por seguir las pautas y enseñanzas de quienes indirectamente considero como sus verdaderos maestros: Eduardo Torroja, Robert Maillart y Pier Luigi Nervi.

### 3. ARTE ESTRUCTURAL / FORMA RESISTENTE Y FORMA VISUAL

A Félix Candela se le ha llamado con frecuencia "artista estructural". Afortunadamente, fueron muchos los arquitectos e ingenieros que, entre 1920 y 1970, fueron pioneros en el desarrollo del "arte estructural" aplicado a las estructuras laminares, buscando formas capaces de cumplir simultáneamente con los tres requisitos arquitectónicos de Vitruvio: la función (utilitas), la resistencia (firmitas) y la belleza (venustas). Cada uno de aquellos pioneros hizo su propio uso de las formas geométricas matemáticamente disponibles –en general, cuádricas– para generar superficies adaptadas al comportamiento laminar, y, si es posible, al de membrana. Pero estas formas matemáticas no necesariamente conducían a formas visualmente bellas, y diferentes autores lograron extraer de sus formas resistentes, formas visuales conducentes a espacios internos nunca antes experimentados que asombraban por su fuerza expresiva, uniendo, en definitiva, la "firmitas" con la "venustas". Y es interesante analizar cómo diferentes proyectistas consiguieron estas potentes formas visuales a partir de sus simples y rígidas formas.

Eduardo Torroja, como ya se ha comentado, proyectó entre 1934 y 1936 tres estructuras laminares que le hicieron famoso, no sólo por su originalidad técnica, sino también por su expresividad estética. El Mercado de Algeciras (Fig. 2), es una cúpula esférica apoyada en ocho puntos, maclada por ocho cañones cilíndricos. Como todas las láminas de Torroja, su superficie, tanto interna como externa, no presenta nervios ni otros elementos que ayuden a captar su forma; son los lunetos periféricos y el gran lucernario central los que definen visualmente su forma, en particular desde el interior (Fig. 11). En el caso del Frontón Recoletos (Fig. 4), es el hecho de crear la sección en "gaviota" mediante la intersección de dos cilindros

de radios diferentes lo que genera, por una parte, la posibilidad estructural de la forma y, por otra, al sustituir la superficie continua por la triangulación de los lucernarios, lo que genera un espacio interno asombroso. Y como puede apreciarse, las formas visibles de Torroja son diferentes porque las formas geométricas también lo son: Torroja utilizó esferas, cilindros, hiperboloides hiperbólicos de eje horizontal o vertical, cúpulas tóricas, amén de muchas formas libres no expresables matemáticamente mediante una ecuación intrínseca (9). Por otra parte, Pier Luigi Nervi, el ingeniero italiano más prestigioso y más influyente en Europa durante su larga vida (1891-1979), creó su propia empresa constructora para construir sus propios proyectos, inventando el "ferrocemento" con el que prefabricaba interesantes encofrados perdidos para sus láminas. Utilizó pocas formas geométricas, básicamente cúpulas esféricas y bóvedas de directriz parabólica, pero por razones constructivas (Fig. 12) –o estructurales– (Fig. 13) sus superficies quedan siempre perceptibles, en particular desde el interior, por un juego de líneas que se cruzan en delicados arabescos que hacen que sus obras resulten inconfundibles.

Como ya se ha comentado, Félix Candela (1910-1997) nació en España y en Madrid estudió su carrera de Arquitectura. La estructura de la carrera de entonces hizo que Félix estudiase un curso de Matemáticas, principalmente geometría, en la Facultad de Ciencias Exactas de la Complutense, y después, ya en la Escuela de Arquitectura, cursos de Resistencia de Materiales y Cálculo de Estructuras, lo que le proporcionó una seria base teórica que sería de gran importancia en su forma de ejercer la profesión posteriormente. Al terminar la guerra civil española, en 1939, Candela se exilió a México, donde se estableció tanto personal como profesionalmente. Fundó la empresa constructora Cubiertas Ala, desde la que desarrolló una gran actividad, proyectando y construyendo más estructuras laminares que cualquier otra persona o empresa en el mundo. En 1968 trasladó su residencia a Chicago y, más tarde, a Nueva York y Madrid. Dejó su actividad en Cubiertas Ala y dedicó una parte importante de su tiempo a la docencia, sin abandonar por ello su actividad como proyectista, colaborando con firmas americanas y españolas. Pero, a nuestro entender, su obra más interesante y en la que Félix Candela se muestra más creativo e independiente de otras corrientes de la época, es la que desarrolló en México entre finales de los 40 y finales de los 60, y a esta época nos vamos a referir en lo que sigue.

Una característica de Félix Candela, quizá encontrada sólo en Nervi, es la de ser, a la vez, proyectista y constructor de sus propias obras. Quiere esto decir que sólo, o a propuesta de otros arquitectos, recibía el encargo de desarrollar el proyecto estructural y construir la obra en cuestión. Esto tenía gran importancia para Candela, porque el proyecto –y aquí nos referimos a lo que hoy llamamos proyecto de construcción– y la propia construcción iban juntos en un único paquete económico. Para él, tan importante era ahorrar en el coste del acero a colocar en obra, que ahorrar en el desarrollo del proyecto –en particular, el

del cálculo—. Para Candela, el poder calcular la estructura y comprobar que era segura, constituía un requisito indispensable antes de comenzar su construcción; y, además, el cálculo no podía consumir un porcentaje importante de los recursos económicos de que disponía. Este sentido de la importancia del cálculo, por una parte, y de la necesidad de realizarlo de forma económica, por otra, es típico y diferenciador en el arquitecto Félix Candela; un arquitecto interesado por conocer el comportamiento estructural, interesado por las matemáticas, interesado por la construcción —y, por tanto, interesado por la economía— y no menos interesado por la estética de sus propias concepciones.

Félix Candela utilizó para sus estructuras multitud de formas geométricas y estructurales: láminas cilíndricas cortas y largas, de directriz catenaria, conos y conoides, cúpulas esféricas y elípticas, láminas plegadas, etc., algunas de ellas repetidas varias veces, aunque siempre adaptadas a sus requisitos funcionales. En cada una de éstas, la forma visible viene muy marcada por la geométrica. Por ejemplo, creemos que un observador atento, pero lego en geometría, que visitase Boliches Marsella y el Almacén de Las Aduanas sería capaz de intuir que, a pesar de las diferencias visuales, la forma geométrica de la primera y la de la nave central de la segunda es la misma. Pero, aparte de estas formas geométricas más o menos clásicas, Candela iba buscando formas más eficientes desde diferentes puntos de vista. Y el paraboloides hiperbólico apareció a sus ojos como la forma geométrica ideal. Se trata de superficies de doble curvatura negativa, o anticlásticas, lo que confiere a su superficie una gran rigidez estructural, permitiéndole transferir cargas normales a su superficie mediante esfuerzos tangentes a ella misma, trabajando en estados de membrana o de “cascarón”, como acostumbra llamar a estas formas en los países americanos de habla hispana; su definición analítica es la función de segundo grado más simple,  $z=kxy$ , lo que simplifica no sólo los cálculos geométricos sino también los estructurales; su superficie está generada por dos familias de generatrices rectas, lo que simplifica fuertemente su construcción frente a otras formas también de doble curvatura, pero sinclásticas, como las cúpulas. Aunque el análisis de las razones que da Candela para simplificar el cálculo de sus cascarones, despreciando el cálculo elástico de las flexiones en sus paraboloides, es muy interesante y muy actual, interesa aquí analizar sólo el uso que hizo de esta forma geométrica para generar la multitud de formas visuales diferentes de sus obras.

La primera vez que Candela utiliza el paraboloides hiperbólico, o *hypar*, es en el Pabellón de Rayos Cósmicos de la U.N.A.M. (Fig. 14). La visión general es la de una bóveda cilíndrica de directriz parabólica. Pero al sustituir el cilindro por dos hypars “paralelos”, se produce en la bóveda esa sutil curvatura longitudinal y ese pliegue central que no sólo rigidiza estructuralmente la pared, sino que le confiere una percepción nueva. Candela no repitió esta forma, pero creo que aquí empezó su interés por jugar buscando formas visibles nuevas, y diferentes entre sí, a partir de una única forma geométrica. Quizá su hallazgo más conocido

es el “paraguas”, formado por cuatro paraboloides (Fig. 15), transmitiendo sus cargas a una columna central. La gran economía de estos paraguas hizo que Candela recibiese multitud de encargos para cubrir naves con esta estructura (Fig. 16). Ello le llevó a buscar variantes, como inclinarlos a modo de diente de sierra (Fig. 17), hacerlos disimétricos (Fig. 18), o invertirlos. La forma visible de estas estructuras está muy marcada por las aristas rectas y por el encofrado, que también resalta las generatrices rectas; en consecuencia, sus formas curvas quedan poco visibles. En un intento de generar iluminación natural distribuida en una fábrica textil, se introdujeron en la cubierta unas losetas de vidrio (Fig. 19). Aunque esta solución no volvió a utilizarse por problemas técnicos, estas losetas, al estar dispuestas según las diagonales de los hiperboloides, proporcionan una referencia visual más clara de las curvaturas de las superficies que estamos observando. Pero, en cualquier caso, y a nuestro modo de ver, estas cubiertas producen la sensación de algo duro y con aristas rectas. Es interesante observar cómo el propio Candela da un cambio rotundo a esta situación en la Iglesia de la Medalla Milagrosa (Fig. 20). A pesar de estar formada por los mismos paraguas, aunque inclinados y deformados (Fig. 21), las aristas, casi más resaltadas que antes, dejan paso a unas superficies curvas claramente percibidas (Fig. 22), y que, en conjunto, generan un espacio visible claramente diferente y sobrecogedor.

Pero si diferentes en su forma visible, aunque iguales en la geométrica, son las estructuras antes comentadas, más diferentes aunque iguales son las estructuras con bordes curvos que Candela se atrevió a construir. En particular, son de destacar la Capilla de Lomas de Cuernavaca (Fig. 23) y sus bóvedas por arista. El paraboloides de Cuernavaca, en realidad, es lo más parecido geométricamente a uno de los dos módulos del Pabellón de Rayos Cósmicos, salvando las diferencias de escala y el establecimiento del borde libre curvo y volado. Y aquí, como allí, no se ve ninguna recta o arista que pueda sugerir al no iniciado que la superficie está formada por rectas. Su forma visible es lo más alejado de un paraguas. Por otra parte, Candela construyó muchas bóvedas por arista, con diferentes plantas que van de la triangular a la octogonal, pero todas ellas obtenidas por la intersección de paraboloides hiperbólicos. De ellas, las más importantes, en cuanto a sus dimensiones, son las seis de planta cuadrada que cubren la nave de Bacardí (Figs. 24 y 25), al norte de México D. F. Pero indudablemente, la que le ha proporcionado un mayor reconocimiento como creador de formas es el Restaurante “Los Manantiales” en Xochimilco (Fig. 26). Su cubierta está formada por una bóveda por arista de planta octogonal, formada por la intersección de cuatro paraboloides (Fig. 27), cuyos parámetros fueron exquisitamente elegidos para conseguir una forma al mismo tiempo resistente y cautivadora. Al contrario que en Cuernavaca, aquí sí que existen aristas, pero éstas no son rectas sino curvas en forma de arcos (Fig. 28).

Todo aquí son curvas, y curvas bien perceptibles. Si añadimos a esta obra su entorno

lujurioso de los canales de Xochimilco, es difícil encontrar otra que transmita una mayor sensación de relajada voluptuosidad. En definitiva, Candela fue un constructor de láminas que creó su empresa para tener la libertad de desarrollar sus propias ideas, al igual que lo hiciera Nervi. Pero lo hizo en un contexto tecnológico mucho más pobre, tanto en medios de ejecución como de análisis estructural. Esto le llevó a buscar formas sencillas de calcular y de construir: y encontró el “hypar”, que además le llevó a construir láminas que no necesitaban nervaduras ni por razón resistente ni constructiva. En este aspecto, Candela se parece a Torroja: sus superficies son lisas y desnudas, mostrándose al exterior sin necesidad de ayudas formales. Por otra parte, si las formas visibles de Torroja son diferentes porque las geométricas también lo son, y las de Nervi son parecidas cuando utiliza la misma geometría, Candela es un maestro en conseguir formas visibles diferentes a partir de una misma y única forma geométrica. No creemos que haya existido ningún constructor de láminas que se haya obsesionado tanto con un elemento geométrico único y que haya sido capaz, al mismo tiempo, de ofrecernos tal variedad de formas visibles verdaderamente atrayentes.

#### 4. EL DECLIVE DE LOS CASCARONES DE HORMIGÓN

Casi todos los cascarones de hormigón o fábrica del mundo —y existen cientos de ellos— se construyeron entre 1925 y 1975, y la mayoría son obra de los nueve ingenieros o arquitectos siguientes: Eduardo Torroja (1899-1961) y Félix Candela (1910-1997) de España, Robert Maillart (1872-1940) y Heinz Isler (1926-2009) de Suiza, Franz Dischinger (1887-1953) y Ulrich Müther (1934-2007) de Alemania, y Antón Tedesko (1904-1994) y Eladio Dieste (1917-2000) del continente americano.

Todos estos grandes ingenieros y arquitectos han fallecido ya y, con ellos, ha desaparecido el arte de los cascarones de hormigón. No obstante, esto no es cierto del todo, ya que las torres de refrigeración de hormigón son en realidad láminas muy esbeltas y siguen construyéndose en la actualidad torres de hasta 200 m. La mayoría de los silos constan de cascarones cilíndricos y cónicos. Aun así, estas estructuras utilitarias y sus formas repetitivas apenas suponen una pequeña parte de la variedad manifestada por la generación anterior de cascarones. Antes era normal cubrir con cascarones fábricas, almacenes, estaciones de metro, tribunas, teatros, cines, iglesias, restaurantes, bares e incluso viviendas.

Todo esto terminó hace más de treinta años, y el trabajo de Félix Candela parece haber sido el más afectado. De todos los expertos de este ámbito, probablemente fuera él el más especializado, ya que se dedicaba principalmente a los cascarones de hormigón, la mayoría de ellos paraboloides hiperbólicos. Candela se convirtió en el maestro de los cascarones de hormigón, y

cayó a la par que ellos cuando disminuyó la construcción con cascarones.

En una conferencia que impartió en la Universidad Nacional Autónoma de México en 1969, admitía con cruda franqueza [1, p. 138]: «...La verdad es que yo estoy tan perdido y desorientado como ustedes. Tengo cerca de 60 años, me he pasado 20 de ellos como constructor y diseñador de estructuras, conozco el oficio de arquitecto tradicional razonablemente bien, y no encuentro mercado ni uso para unas habilidades que me ha costado muchos años conseguir. Soy una persona desplazada en el mundo actual y no sé lo que hacer ni si valgo para algo». Entristece oír esta desesperación de la boca de un hombre tan ilustre y próspero, pero para mí demuestra también la talla humana de Candela, que no tenía miedo de mostrar abiertamente sus sentimientos aunque pusieran de manifiesto sus debilidades. Suponemos que todos los constructores de láminas delgadas anteriormente referidos tenían caracteres fuertes y que trabajar con ellos debe de haber sido realmente difícil. Sin embargo, con ellos deben de haber estudiado y trabajado muchísimos arquitectos e ingenieros jóvenes que podrían haber continuado fácilmente con la construcción a base de cascarones. Tiene que haber otros motivos para que los cascarones de hormigón desaparecieran tan rápidamente. Se nos ocurren los siguientes:

#### 1. Los cascarones pasaron de moda

Fue la libertad de formas que ofrecía el hormigón armado lo que dio lugar a formas nuevas y espectaculares durante las décadas de los veinte y los treinta. Tras la Segunda Guerra Mundial, durante las décadas de los cincuenta y los sesenta, volvieron a estar de moda los cascarones de figuras curvas y aspecto natural. Tal vez fuera como reacción a las cajas y figuras rectangulares de la Arquitectura Moderna de la Bauhaus, Gropius, Mies van der Rohe, Le Corbusier, etc. Cuando terminó la época hippy de los sesenta, las formas poligonales tomaron de nuevo el relevo y disminuyó la demanda de cascarones.

#### 2. Los cascarones son caros

Aparte de la moda y de los aspectos técnicos, es el coste lo que determina la viabilidad de un edificio o estructura. Las complejas formas de los cascarones –en su mayoría con una doble curvatura– requieren de una labor de encofrado compleja e intensiva. Incluso en los países en vías de desarrollo, la mano de obra se volvió cada vez más costosa, por lo que ya no era posible construir cascarones de forma económica en ninguna parte. Por supuesto, el coste puede reducirse en cierta medida mediante el encofrado inflable, el uso repetido de un mismo encofrado o, en especial en el caso de Candela, el uso de cascarones paraboloideos hiperbólicos en los que el encofrado pueda ejecutarse siguiendo las generatrices rectas del cascarón (es decir, a base de barras rectas). No obstante, el encofrado y sus soportes hacen que los cascarones resulten costosos.

#### 3. Los cascarones no son prácticos

Candela, Isler y la mayoría de los constructores de cascarones aducen que el hecho de que

la naturaleza no cree estructuras planas y apenas algunos rectángulos significa que los cascarones de doble curvatura y formas armoniosas no sólo resultan eficientes, sino que son más naturales que otras estructuras. Sin embargo, «natural» no es sinónimo de «práctico». En cuanto a los tabiques, instalaciones, iluminación, mobiliario, ventanas, etc., los muros y techos planos resultan más prácticos.

#### 4. Es difícil analizar los cascarones

Hasta hace poco, tan sólo determinadas formas de cascarones como las de simetría de rotación y las sometidas a cargas simétricas, las bóvedas de cañón y los cascarones paraboloideos hiperbólicos podían calcularse «a mano» con cierta precisión. En el resto de casos, las ecuaciones diferenciales parciales de cuarto orden que era necesario resolver complicaban en exceso los cálculos manuales, por lo que la única forma de análisis eran los ensayos con maquetas. Por otra parte, las estructuras laminares de hormigón sometidas a compresión tienden a ser inestables: pueden pandearse si la doble curvatura es insuficiente y, además, los efectos dinámicos –tales como las vibraciones provocadas por el viento– pueden provocar su rotura. Parece que los que conocían bien la teoría de membrana y del momento de flexión de los cascarones no siempre supieron transmitir su teoría de modo que pudiera ser comprendido por quienes debían ponerla en práctica.

Candela escribe con cierta ironía: «es un fenómeno general en la literatura técnica que trata de estos temas que sus autores se muestran excesivamente generosos en lo que se refiere a integrales y ecuaciones diferenciales complicadas, sobre todo cuando su manejo no se halla al alcance de la mayoría y procuren, en cambio, ocultar celosamente los principios mecánicos en que se basan los procedimientos analíticos. De este modo se ha mantenido eficazmente, durante muchos años, un velo de misterio sobre estas cuestiones, rodeándolas de una aureola de alta especulación matemática, que contribuye a presentar a los escasos iniciados como sabios eminentes y a ahuyentar a los atrevidos que intentan introducirse en su reducido círculo» [1, p. 98].

#### 5. Los cascarones son oscuros

A pesar de que los cascarones de hormigón son delgados y ligeros, el material en sí mismo es opaco y no permite que la luz lo atraviese. Si hace falta luz natural, es necesario incluir aberturas en el cascarón, lo que dificulta aún más su análisis.

#### 6. Los cascarones son incompatibles con la física de los edificios modernos

El aislamiento térmico es cada vez más importante. Las estructuras laminares de hormigón no ofrecen ningún aislamiento térmico, por lo que en los países nórdicos deben revestirse con material de aislamiento adicional, con lo que desaparece su esbeltez, que en muchos

casos es precisamente el motivo por el que se construyeron.

#### 7. Los cascarones no se contemplan en la normativa de edificación

Los cascarones son estructuras poco habituales con dimensiones poco habituales y un comportamiento estructural poco habitual. Cuantos más códigos y normas tenemos, más difícil resulta demostrar que un cascarón es aceptable. Citando nuevamente a Félix Candela: «La oposición de la burocracia tecnológica, tanto estatal como la de la gran industria, e inclusive la de muchas sociedades científicas, es una de las más efectivas barreras que el hombre ha ideado contra el progreso» [1, p. 162].

#### 8. Los cascarones sólo resultan prácticos para estructuras pequeñas

En relación con el tamaño, Candela estaba convencido de que las distancias entre soportes superiores a 30 m no resultan rentables. De hecho, apenas se han empleado las estructuras laminares de hormigón para cubrir estadios, hangares o grandes pabellones de exposiciones. Aun cuando algunos de los motivos anteriormente citados puedan no ser de gran importancia, fueron todos ellos, en su conjunto, los que impidieron que los cascarones siguieran su desarrollo. La historia de las estructuras es también la historia de los materiales de construcción. Así, en la década de los sesenta, por ejemplo, aparecieron de repente nuevos aceros de altas prestaciones y nuevos materiales laminares compuestos de fibras de plástico.

### 5. LA NUEVA GENERACIÓN DE ESTRUCTURAS LIGERAS

El Pabellón Alemán construido por Frei Otto junto al arquitecto Rolf Gutbrodt y los ingenieros Leonhardt y Andrä para la Expo de Montreal de 1967 es la construcción ícono de la nueva generación de estructuras ligeras (10), Fig. 29. Ayudándose de los nuevos materiales disponibles, Frei Otto y su equipo crearon formas nunca vistas anteriormente. Fue posible crear estructuras tensadas, similares a las tiendas de campaña, que constaban de mallas de cables recubiertas con membranas. Por su doble curvatura, parecían salidas directamente de los cascarones paraboloideos hiperbólicos de Candela. Sin embargo, su principal diferencia respecto a éstos era que se trataba de estructuras pretensadas cuya rigidez y estabilidad se lograba mediante la combinación de la doble curvatura y un alto nivel de pretensado. Al contrario que sus antecesoras de hormigón, las nuevas estructuras eran tan ligeras que la succión del viento podía llevarse.

Por ello es de destacar que estas estructuras ligeras precisan de cimientos voluminosos y costosos para transmitir al suelo las cargas del viento y las fuerzas del pretensado.

Influido en gran medida por el Pabellón Alemán de Montreal, el arquitecto Günter Behnisch, los ingenieros Leonhardt y Andrä, y Frei Otto trasladaron esta experiencia a un



proyecto mucho mayor. El resultado fue la todavía impresionante cubierta del Estadio Olímpico de Múnich (Fig. 30). El gigantesco tamaño y la elegancia de esta estructura es el culmen de la edificación con mallas de cables (11). No tenemos constancia de que se haya construido desde entonces ninguna cubierta que la supere en tamaño. La cubierta de Múnich demuestra asimismo que estas estructuras resultan muy costosas no sólo por sus cimientos sino también porque primero hay que ejecutar la estructura y luego revestirla.

Actualmente, las construcciones puras de mallas de cables se emplean con éxito fundamentalmente en estructuras para fines específicos como cubiertas de pajareras y en fachadas realizadas con estas mallas. También resulta especialmente interesante una torre de refrigeración de 180 m de altura construida con el mismo sistema que el empleado en la década de los ochenta (Figs. 31 y 32).

Desde la década de los ochenta han surgido dos nuevas tendencias que han abierto el camino a una nueva generación de estructuras ligeras de doble curvatura.

1. Cubiertas de membrana para vanos amplios –a menudo con autoanclaje– con una estructura de acero muy reducida.
2. Cascarones muy transparentes, compuestos de entramados metálicos acristalados.

Una vez más fueron los avances en tecnología de los materiales –por ejemplo, las membranas de gran resistencia y el vidrio templado de seguridad a un precio asequible– los que contribuyeron al progreso. Sin embargo, surgieron nuevos sistemas estructurales –como las cubiertas radiales y los entramados con superficie de traslación– que contribuyeron en gran medida a allanar el camino para estos avances (12). En la actualidad, las estructuras de membrana pretensada de doble curvatura se encuentran entre las estructuras ligeras más empleadas para cubiertas con amplios vanos. Resultan sorprendentemente económicas siempre y cuando dispongan de autoanclaje; es decir, cuando se emplea el concepto de estructura radial. Precisamente en el estudio Schlaich se han proyectado más de veinte cubiertas de membrana para estadios con un peso –cargas permanentes– aproximado de 25 kg/m<sup>2</sup> que cubren áreas de 200 x 300 m sin soportes interiores y que pueden soportar cargas totales de hasta 100 kg/m<sup>2</sup> –unas cuatro veces su peso propio– (Fig. 33-Fig. 39).

Los cascarones ligeros de entramados metálicos acristalados tienen la ventaja de que la ligereza de la estructura queda a la vista. Siempre y cuando el entramado conste de triángulos –o de rectángulos con cables en sus diagonales– la estructura se comporta exactamente igual que un cascarón. Si se emplean superficies de traslación, pueden usarse paneles planos de vidrio sobre un entramado metálico cuadrangular, con lo que se consiguen estructuras bastante económicas. Resulta curioso que mientras que Candela solía construir el encofrado de sus cascarones parabólicos hiperbólicos de hormigón siguiendo las generatrices rectas, en el caso de los cascarones acristalados se emplean generatrices curvas con el fin de

conseguir rectángulos planos de vidrio. Este interesante tema es demasiado amplio para adentrarnos ahora en él con más detalle. Si se desea profundizar en él, puede consultarse la literatura al respecto (13).

Cuando no puede representarse la forma de un cascarón mediante superficies de traslación, como ocurre en la Fig. 35 (es decir, si un cascarón proyectado por Heinz Isler fuera a ejecutarse en vidrio) la única forma posible de desarrollar su superficie sería a través de triángulos. En este caso, un entramado metálico compuesto por perfiles que formarían triángulos y se recubrieran con paneles de vidrio triangulares trabajaría del mismo modo que un cascarón.

## 6. LA LIBERTAD DE ELECCIÓN ACTUAL

Como acabamos de ver, en comparación con la época de Candela, actualmente tenemos muchas más opciones para construir estructuras ligeras:

- En el caso de las estructuras que trabajan a compresión, las principales opciones son los cascarones de hormigón y los de entramado metálico acristalado.
- En cuanto a las traccionadas, las principales opciones son las membranas tensadas para cubiertas y las mallas de cables.

Son muchos quienes opinan que las estructuras ligeras suponen por lo general muchas ventajas. Además de porque minimizan la flexión (es decir, emplean las secciones estructurales de forma altamente eficiente), existen otros motivos convincentes para su uso:

- Belleza. Las estructuras ligeras son transparentes y muestran el flujo de las fuerzas de forma natural. Normalmente nos gusta lo que comprendemos. También preferimos la ligereza porque la asociamos a la elegancia, ya que las estructuras más ligeras no tapan nuestra visión y nos sentimos menos amenazados.
- Sostenibilidad. Las estructuras ligeras requieren por lo general cantidades reducidas de material, por lo que contribuyen a la arquitectura y a la construcción sostenibles.
- Sociedad. Las estructuras ligeras no son fáciles de ejecutar y precisan de mano de obra cualificada, por lo que cumplen la función social de creación de empleo.

Debido a la abundancia actual de opciones para la construcción de estructuras ligeras, éstas vuelven a estar de moda. En la arquitectura contemporánea existe una cierta tendencia hacia las formas naturales. En paralelo a esta evolución, los gráficos en 3D generados por ordenador han abierto las puertas a proyectos más efímeros y a estructuras virtuales que resultan muy convincentes en la pantalla del ordenador pero sólo pueden hacerse realidad (si es que son técnicamente viables) mediante estructuras como los cascarones. Hay que reconocer el peligro de estas tendencias. Hace cuarenta años, Candela ya se quejaba en su ensayo «Comentarios acerca de la colaboración entre arquitectos e ingenieros» (1) de los arquitectos modernos que proyectan estructuras sin saber si pueden construirse.

Candela se quejaba asimismo de los ingenieros que calculan todo lo que los arquitectos les pasan pero no contribuyen al concepto de las estructuras. ¡Y cuán cierto sigue siendo hoy día! Pero no deberíamos seguir quejándonos porque no va a cambiar nada. En vez de eso deberíamos ser optimistas y aprovechar la tendencia actual para volver a construir estructuras ligeras de doble curvatura (es decir, cascarones). Al mismo tiempo, continúa la evolución de las estructuras en general gracias a los avances en ciencia de los materiales. Por ejemplo, las piezas de vidrio empiezan a encolarse entre sí directamente, lo que permite conseguir estructuras totalmente de vidrio sin que sea necesario emplear ninguna estructura de acero como soporte. También se usan cada vez con mayor frecuencia materiales de fibra de carbono de alta resistencia y están surgiendo nuevas tendencias incluso en el ámbito del hormigón, como los hormigones de muy altas prestaciones y los hormigones ultraligeros, así como nuevos hormigones con armadura de polímeros reforzados con fibra y textil. Volviendo a los cascarones de hormigón como una de las opciones estructurales actuales... ¿Tienen futuro? Jörg Schlaich propone varios motivos por los que hoy día deberíamos seguir trabajando con ellos (14):

- Son las estructuras más sinceras: la forma y la estructura son idénticas.
- Son naturales y bonitas si se construyen de modo que no presenten flexión o que ésta sea mínima.
- El hormigón se usa en el entorno más adecuado, ya que los cascarones trabajan principalmente en compresión y aprovechan al máximo las posibilidades esculturales del hormigón.

Además, algunos de los argumentos esgrimidos en otros tiempos contra los cascarones de hormigón han perdido su vigencia:

- Actualmente, el análisis estructural resulta fácil.
- En cuanto a la física de los edificios, los cascarones de hormigón pueden en ocasiones presentar incluso más ventajas que otras estructuras ligeras si se tiene en cuenta su capacidad para proteger del ruido y almacenar el calor.
- Gracias a las máquinas con control numérico informatizado, el encofrado de formas libres y naturales ha dejado de tener un coste prohibitivo.

Como ya se ha argumentado en este artículo, parecen existir cada vez mayores oportunidades para los cascarones de hormigón.

Una vez más, parece que las estructuras ligeras –y con ellas los cascarones de hormigón– tienen la oportunidad de ser parte importante del futuro de las estructuras. De todos modos, para todas las futuras estructuras complejas y de calidad necesitamos maestros de obra, ingenieros que sepan de arquitectura y arquitectos con una buena formación y un conocimiento profundo de cómo trabajan las estructuras. Entonces podremos tener grandes esperanzas.

## FIGURAS

1. Jena (Alemania) Dyckerhoff-Widmann (1922-1923).
2. Mercado de Algeciras (1934), Eduardo Torroja.
3. Hipódromo de la Zarzuela (1935), Eduardo Torroja.
4. Frontón Recoletos de Madrid (1936), Eduardo Torroja.
5. Hangar en Orvieto, Italia (1935). Pier Luigi Nervi.
6. Pabellón Exposición Nacional Suiza (1939). Robert Maillart.
7. Félix Candela.
8. Modelo experimental: "Bóveda Ctesiphon", San Bartolo, México, 1949.
9. Modelo experimental: conoide en la Fábrica de Fernández, San Bartolo, México, 1950 .
10. Modelo Experimental: Paraguas, Las Aduanas, México, 1953.
11. Mercado de Algeciras, España. Eduardo Torroja, 1934.
12. Palacio de los Deportes. Roma. 1956-57.
13. Palacio Exhibiciones. Turin, Italia P.L. Nervi. 1947-49.
14. Pabellón de Rayos Cósmicos. UNAM 1951.
15. Paraguas. Félix Candela.
16. Almacén Celestino Fernández. México, 1955.
17. Almacén Hernaiz. Mexico 1956.
18. Almacén Río. México.
19. High Life Fábrica Textil. Losetas de vidrio.
20. Iglesia Medalla Milagrosa.
21. Paraguas. Medalla Milagrosa.
22. Superficies curvas.
23. Capilla de Cuernavaca. México 1958.
24. Fábrica Bacardí. Dibujo: C. García Reig.
25. Bacardí. México, 1960.
26. Restaurante Los Manantiales, Xochimilco. México, 1958.
27. Los Manantiales. Dibujo: C. García Reig.
28. Los Manantiales. Arch-shaped.
29. Pabellón Alemán de la Expo de Montreal de 1967, obra de Frei Otto.
30. Cubierta del Estadio Olímpico de Múnich, 1972.
31. Torre de refrigeración de malla de cables durante la obra, antes de su revestimiento, Schmehausen (Alemania), 1974 (12).
32. Primera fachada de malla de cables en vidrio; Hotel Kempinski, Múnich, 1993.
33. Cubierta radial; Gottlieb Daimler Stadium de Stuttgart (Alemania), 1993.
34. Marquesina de membrana; Cancillería de Berlín (Alemania), 2001.
35. Cascarones paraboloides hiperbólicos basados en generatrices rectas (cascarones de hormigón) y en generatrices curvas (cascarones de entramados metálicos de paneles planos de vidrio cuadrangulares).
36. Cubierta paraboloide hiperbólica de vidrio realizada con paneles planos cuadrangulares; Schubert Club Band, Minneapolis (EE. UU.) 2001.
37. Cascarones de entramados acristalados con paneles planos de vidrio cuadrangulares; Estación Central de Berlín (Alemania), 2006.
38. Cascarón de entramado metálico de configuración triangular; cubierta del DZ Bank, Berlín (Alemania), 1998.
39. Cascarón de entramado metálico de configuración triangular. Palacio de las Comunicaciones, Madrid, 2009.

\* \* \*