

DOI: 10.21005/pif.2023.55.B-03

RELATIONSHIP OF FORM AND STRUCTURE IN SANTIAGO CALATRAVA'S PYLON BRIDGES

RELACJA FORMY I KONSTRUKCJI W MOSTACH PYLONOWYCH SANTIAGO CALATRAVY

Milena Wiercińska

mgr inż. arch.

Author's Orcid number: 0000-0003-3354-9780

Białystok University of Technology, Poland
Faculty of Architecture

ABSTRACT

One of the most common bridge solutions is suspended structures, among which the work of Santiago Calatrava stands out. The article analyzes the realized asymmetric pylon bridges designed by the architect, with cables on diagonal supports. The research aims to evaluate the pylons in terms of the relationship between the obtained architectural form and the proportions of the diagrams of the main forces. Compliance of the obtained forms with intuitive methods of preliminary design of the structure by architects was examined. The article can be a starting material for interdisciplinary research on optimizing the amount of material.

Keywords: form finding, preliminary design of the structure, material optimization.

STRESZCZENIE

Jedno z najbardziej powszechnych rozwiązań mostowych stanowią konstrukcje podwieszane, wśród których wyróżnia się twórczość Santiago Calatravy. W artykule przeanalizowano zrealizowane asymetryczne mosty pylonowe projektu architekta, które wykorzystują podwieszenie traktów komunikacyjnych na odchylonych od pionu wspornikach. Cel badań stanowi ocena pylonów pod względem związku otrzymanej formy architektonicznej z proporcjami wykresów głównych sił, w nich występujących. Zbadano zgodność otrzymanych form z intuicyjnymi metodami projektowania wstępnego konstrukcji przez architektów. Pod uwagę wzięto kształty pylonów w kontekście oszczędności materiału. Artykuł może być materiałem wyjściowym do interdyscyplinarnych badań nad optymalizacją ilości zużytego materiału, łączących pracę architekta i konstruktora.

Słowa kluczowe: optymalizacja materiału, poszukiwanie formy, projektowanie wstępne konstrukcji.

1. INTRODUCTION

Architecture (...) often demands more from the designer than he is able to achieve, wrote Sigfried Giedion in the mid-twentieth century (Giedion 1968, p. 10). In the 21st century, there has been a change in the design activity in architecture and construction, which is noticeable mainly thanks to digital tools (Rokicki, Stefańska 2022). Digital parametric tools offered by several modern computer programs are becoming increasingly popular in architectural design (Januszkiewicz 2016, p. 57). They give the possibility of shaping more freeform architecture than those that were limited by Euclidean geometry before the era of digitization (Januszkiewicz 2012, p. 52).

Many computer methods in architectural design are useful, provided that the designer knows what he wants to achieve, and has an idea and tools to implement it (A. Asanowicz 2008, p. 735). The freer the forms, the greater the need for a thorough analysis and cooperation between the architect and the constructor, even if the calculations regarding the dimensioning of the building are carried out by computer. However, it is not the difficulty of calculations that becomes a problem, but the feasibility of execution with proportions as close as possible to the architect's original concept.

For this reason, the architect must know the basic rules related to the mechanics of the building. This allows you to design architecture whose implementation becomes real without compromising the form provided for in the original design. As Auguste Perret claimed, Architecture is the art of organizing space through the construction that defines this space (Kolendowicz 1993, p. 11).

In an interview with 'The Art of Architecture' for Leaders, Santiago Calatrava clearly separates the conceptual process from the technical design. *In terms of the work itself, you have to differentiate the conceptual part and the development of the concept. The conceptual part works today like it did in the time of the Egyptians: you draw out your concept.* (Leaders Magazine 2011). However, he puts emphasis on understanding the combination of applied solutions already at the stage of creating the concept, referring to the concept of art engineering. *If we recognize the unity of engineering and art, which I believe there is, and if we go back to a time when there was no difference between the art of architecture and the art of engineering, then we can assume that engineering art is within us. It is not only our heritage, but also its source, therefore, within our capabilities, we must continue and enrich this heritage* (Dąbrowiecki 2009, cited after Wrana 2016).

An architect should be able to analyze the work of the structure in the designed form so that he could use this knowledge already at the stage of the initial concept (Kozikowska 2010, p. 45). Today's construction is characterized by the efficiency of using natural resources, which minimizes the consumption of materials (Dixit, Stefańska 2023). That is why one of the important design directions is using tools that allow you to shape forms with an optimized amount of material consumption already at the initial design stage.

Taking into account the laws of physics and care for optimizing the structure characterized such designers as Antoni Gaudi (Liżewska 2019, p. 29), Felix Candela, Pier Luigi Nervi, or Buckminster Fuller, who were recognized as outstanding architects (Kolendowicz 1993, p. 12). In the architecture of the turn of the 20th and 21st centuries, projects that combine architectural craftsmanship with engineering knowledge are characteristic of Santiago Calatrava. It undoubtedly contributes to developing the art of building (Cichy-Pazder, Flaga, Hrabiec, Januszkiewicz 2005, p. 131). Particular clarity of the relationship between form and structure characterizes the bridges designed by the architect.

The bridge design process is more complicated the greater the distance to be covered without using intermediate supports or the need to minimize their number. Particularly distinguished against the background of numerous bridge structures are Calatrava's asymmetric pylon bridges, which, thanks to their original form, have become icons of the locations where they were built. Their structures are innovative regarding non-obvious solutions that differ from traditional bridges, often based on solutions using arches.

The article examines the realized bridges designed by Santiago Calatrava with cable-stayed structures, which have one asymmetric pylon. Analyzes consisted of specifying a schematic division into the main structural elements and assigning them the type of dominant work under a given load.

"Material optimisation" was investigated in the context of saving the amount of material in the designed form. This is related to the variability of the cross-section. More material appears where the chart values are larger. Similarly, less material appears where the values in the force diagram are small or zero.

2. PURPOSE OF RESEARCH

The article answers the questions whether the use of intuitive methods of graphical pre-design of forms with optimized material distribution is justified and whether the obtained forms are consistent with Santiago Calatrava's solutions.

The research aims to evaluate the form of the completed pylons in terms of the relationship between the proportions and the forces acting on the pylon. The degree of convergence between the forms of the pylons designed by Calatrava and the shapes being the result of the analysis in the context of the initial optimization of the material without the need for a computer was checked. It was examined whether the main characteristics of the existing forms and those obtained in the analyzes bear the hallmarks of similar proportions of material used. Thus, the usefulness of the traditional method of graphic use of the knowledge of building mechanics by architects in the era of the development of digital tools was assessed. The research results may contribute to the development of the search for the missing link between the conceptual design stage by the architect and complex research on optimizing the material by the constructor.

3. METHODOLOGY

The article presents intuitive methods of preliminary design, based on a graphical analysis of the work of structures with statically determinate schemes. This action is characterized by great simplicity and clarity (Kozikowska 2010). According to Salvadori's theorem, knowledge about the work of the structure can be intuitive and does not require complex mathematical calculations in the initial design phase (Heller, Salvadori 1975, p. 6). Salvadori wrote that it should be based on extensive experience and be subject to careful verification. Therefore, in order to maintain the probability of the reality of the designed forms, intuitive design methods should be based on correct solutions in the field of building mechanics.

The compatibility of the natural shapes of the pylons with the forms obtained by the method of initial optimization of material consumption based on the graphic technique using the principles of building mechanics was examined. This method consists of determining the shape of the diagram of dominant forces and making the proportions of the form shape dependent on the value of the dominant forces without precise dimensioning. Since all tested pylons work as a cantilever beam fixed on one side, bending is the predominant type of work. The principle of perpendicularity of the force to its action arm was used, which results from the definition of bending moments. The direction of action of the forces was determined, and a line perpendicular to it was defined. Moment diagrams were drawn on simple shapes, and the proportions of the moment diagram were transferred from the reference cantilever beams to the target ones, presenting diagrams of pylons designed by Santiago Calatrava using the tangent method. Based on the proportions of the moment diagram values, a conceptual form was proposed for each bracket reflecting the proportions from the force diagram, without dimensioning and selecting the construction material. The effects are presented graphically, and conclusions are described on their basis.

4. ANALYZED OBJECTS

The investigated Santiago Calatrava bridges were selected for discussion as completed objects whose common characteristic is a similar structural topology. Each of them has a horizontal footbridge, which is suspended on diagonally located ropes connected to a bracket tilted from the vertical. This topology can be divided into a group of pylons inclined towards the footbridge and inclined away from it.

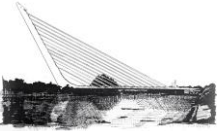



The disadvantages of this unconventional solution include:

- An asymmetric pylon requires a special static analysis at later stages of design, especially in the case of pylons inclined towards the footbridge, which by their form do not counterweight the ropes weighing them down
- And in the case of movable bridges, spatial analysis is important in terms of the displacement of a large-sized form, which is the pylon, which may determine the choice of the side of the pylon's inclination towards the footbridge;
- Material limitations: the bending pylon cannot be made of a brittle material such as stone or brick. Material solutions for pylons are limited to reinforced concrete and steel. Glued wood, however, remains worth further research, as it gives a chance to shape forms resistant to bending.

The advantage of the solutions is:

- innovative solution, contrasting with traditional bridges using common arches placed under or over the communication route;
- the possibility of creating dynamic forms in perception, through the use of asymmetry and directing the axis in a diagonal manner, which allows the creation of sculptural concepts that fit into the context of the place;
- the possibility of "freeing up" space and adding visual lightness in the sphere without pylons, as opposed to the situation when the ropes connect the footbridge with the arch stretched over the entire communication route.

Tab. 1. Basic data of the tested bridges. Source: by author

Drawing	Name, location, year of opening	The height and angle of the pylon	Pylon deflection and loading
	Puente del Alamillo on the Guadalquivir River Seville (Spain), 1992	142 m 58°	tilted away from the footbridge it carries 26 pairs of cables supporting the footbridge
	Puente de La Mujer on the canal of Dock 3 on the Puerto Madero waterfront Buenos Aires (Argentina), 2001	35 m 38.8°	leaning towards the footbridge it carries 19 cables supporting the footbridge
	Sundial Bridge on the Sacramento River Redding (United States), 2004	66 m 42°	tilted away from the footbridge carries 14 cables supporting the footbridge
	Samuel Beckett Bridge on the River Liffey Dublin (Ireland), 2009	46 m variable angle	leaning towards the footbridge it carries 31 cables supporting the footbridge (relieved by 6 opposing cables)

The described advantages are particularly important for the subtlety of the forms used by the architect. Speaking about the bridges he designed, Santiago Calatrava often emphasizes their deep significance for creating infrastructure appropriate for today's times. Especially in European cities, which over the course of history have been inhabited by an increasing number of people. In the era

of changing times, the bridges designed by the architect are not only a literal communication connection, but also a link between the city's past and its contemporary needs. It seems to me that publicly commissioned works related to the construction of bridges and public transport stations, by creating and concentrating urban activity in these places, can become a very significant force in the regeneration of these areas (Dąbrowiecki 2009).

All the discussed pylons were used in asymmetric bridge structures, where a rope suspension of the footbridge constituting a communication route was used. Despite similar operating patterns, Bridges differ in their spans and the way they fit into the surrounding architectural context. Basic technical data are presented in the table (Tab. 1).

4.1. Puente del Alamillo

Puente del Alamillo (Fig. 1), designed by Calatrava, is located in Seville. It was opened in 1992 and is one of the first bridges to use an inclined pylon without guy lines opposing the ropes (Donadei, Tzonis 2005, p. 98). The pylon is 142 meters high and is inclined at an angle of 58° to the horizon. It is connected to the 200-meter span by 26 pairs of steel ropes, which enable the communication route to be freed from the intermediate supports.

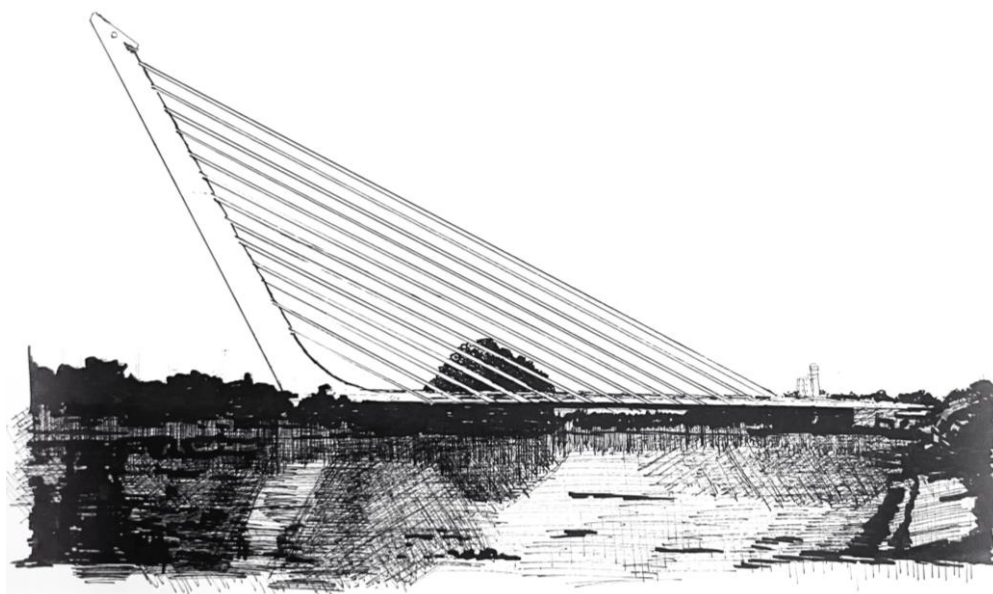


Fig. 1. Puente del Alamillo. Source: author

Ryc. 1. Puente del Alamillo. Źródło: autor

The bridge's opening was mainly associated with Expo 1992, but also with celebrating the 500th anniversary of the discovery of America by Christopher Columbus. The bridge project had been commissioned five years earlier as part of a government initiative to improve road connectivity between Seville and neighbouring cities. Eight new bridges were to be built across the Guadalquivir River. Due to flooding, the river's course was diverted to create an artificial island, which was to be the site of Expo 1992.

Originally, Santiago Calatrava planned two twin bridges built on the principle of what Puente del Alamillo looks like today. The symmetrical design was inspired by the uniqueness of the place where the same river flows twice (Donadei, Tzonis 2005, p. 105). The pylons of the bridges were to lean towards each other, creating a dynamic composition in the shape of a triangle, whose physically non-existent tip was to be imagined in the sky. Due to the costs, the construction of the sec-

ond bridge was abandoned in the later stages of the project. It was decided to build the Puente de la Cartuja Viaduct in its place (Jodidio p. 54), which was used as the northern entrance to the Expo.

Initially, the bridge pylon was to be built by successive construction with the simultaneous suspension of the bridge. Still, in the end, it was decided to use a traditional solution in the form of a comprehensive construction of the pylon. The reinforced concrete structure is filled with fragments of a steel shell welded in place, supported by a huge crane.

Although different from the original concept, the final form has become a special dominant in the local landscape thanks to its asymmetry. The bridge, which in its form resembles a harp, is an iconic hallmark of modern Seville.

4.1. Puente de La Mujer

The Puente de La Mujer pedestrian bridge (Fig. 2), i.e. the Women's Bridge, is located in Buenos Aires, Argentina and is the first implementation of the architect and constructor in South America. It was opened in 2001. It differs from Puente del Alamillo in particular in the orientation of the pylon to the communication route supported by ropes. Although the bridge fits in with the characteristic style of Santiago Calatrava, it also differs in scale from the Spanish construction. The pylon is 35 meters high. The slope relative to the footbridge is 38.5° , and the footbridge has a total length of 160 meters. The pylon does not support the entire footbridge, but its movable part is 102 meters long (Donadei, Tzonis 2005, p. 226). It was designed as a mechanism to rotate 90° to allow the flow of water traffic. A computer system at the bridge's eastern end handles the mechanism's movement as needed. The footbridge is supported by 19 steel cables attached to the pylon. The stationary parts of the footbridge are approximately 25 and 33 meters long. The outer part of the pylon is made of steel, and its inner core is made of reinforced concrete.

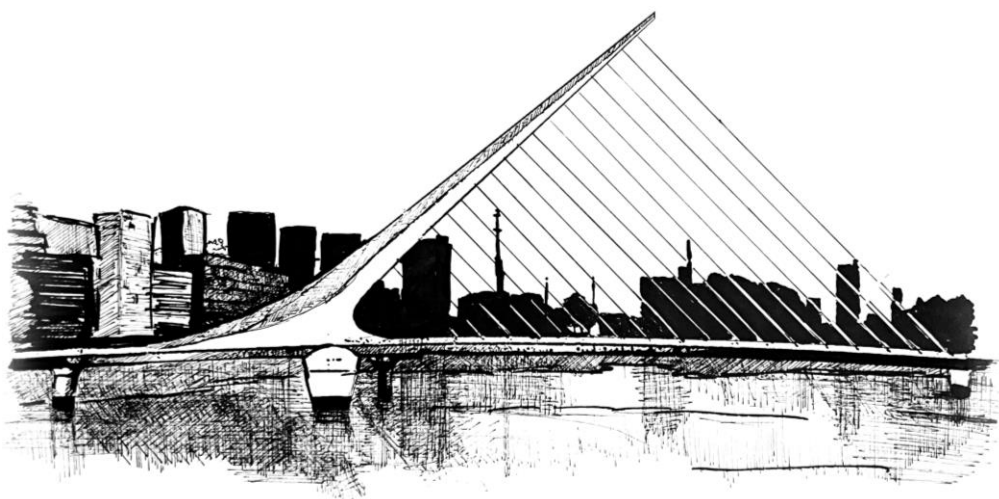


Fig. 2. Puente de La Mujer. Source: author

Ryc. 2. Puente de La Mujer. Źródło: autor

The revolving footbridge is located in Dock 3, in the old port of Puerto Madero. The modern character of the bridge fits in with the new spirit of the revived district, which has changed its functions from typically industrial to residential, commercial and tourist. The bridge was designed not only for communication reasons. Calatrava's design goal was to create a distinctive landmark. The bridge symbolizes renewed economic vitality (Donadei, Tzonis 2005 p. 230).

The diagonal form of the pylon, with its dynamic character, refers to a couple of dancing tango (Wrana 2016). It is a nod to the culture of Buenos Aires, whose characteristic element is the art of dance. The modern bridge symbolizes the revitalization of the port part, and the contrast between it and the buildings emphasizes the combination of local traditions with novelty.

In 2018, Puente de La Mujer received the status of cultural heritage of Buenos Aires, and four years later, the pavement for pedestrian traffic was renovated. The cover was made of panels made of plastic obtained through recycling plastic bottles donated in the city's green spots.

4.3. Sundial Bridge

Sundial Bridge (Fig. 3) is another work of Santiago Calatrava's design, symbolizing the location where it was implemented. The bridge was put into use in 2004. It is located on the Sacramento River in Redding, California. It is designed for pedestrian and bicycle traffic. The bridge connects the Turtle Bay Exploration Park museum building with its large dendrological garden (Donadei, Tzonis 2005, p. 150) McConnell Arboretum and Gardens. Although its form resembles the Spanish Puente del Alamillo, it is distinguished by additional features, thanks to which the modern building pays homage to nature. The bridge pylon acts as the gnomon of a sundial, and its footbridge has been designed in such a way as to shade the river where the salmon spawning ground is located as little as possible. The footbridge also has no intermediate supports, and the communication route is made of non-slip transparent glass. The sundial pylon during construction was the largest sundial in the world. It is located axially in the north-south direction and leans to the opposite side of the footbridge, which also eliminates casting a shadow on the water inhabited by salmon.

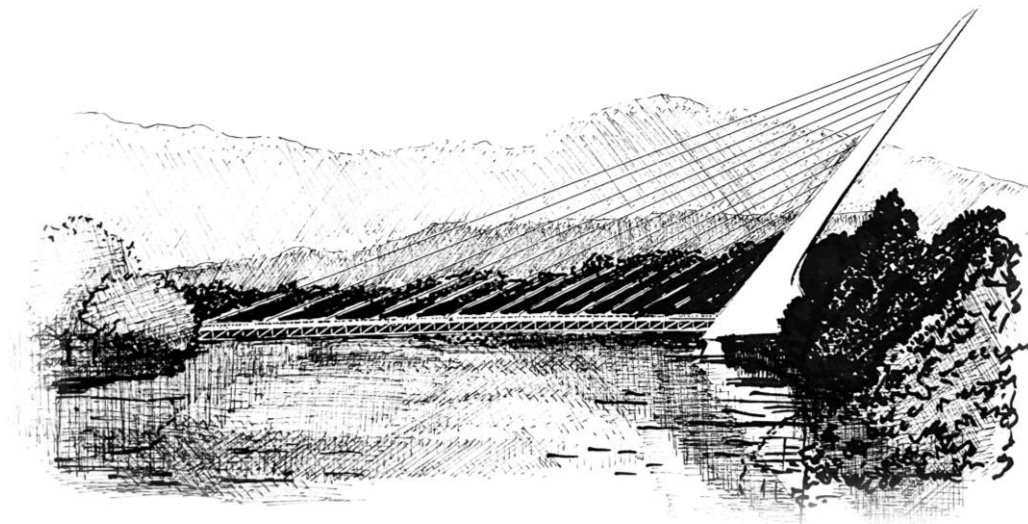


Fig. 3. Sundial Bridge. Source: author
Ryc. 3. Sundial Bridge. Źródło: autor

The total length of the bridge is 210 meters. The Sundial Bridge Pylon is 66 meters high and balances the forces of the 14 ropes supporting the footbridge. The cantilever is inclined at an angle of 42° to the horizon.

What distinguishes the construction of the cantilever from Puente del Alamillo is the fact that the loads are not symmetrically distributed to the axis of the pylon, so it works not only on bending but also on twisting. In the analyses presented below, however, the shape resulting from the diagrams of dominant forces was considered, so the two-dimensional drawings present diagrams of moments without torsion.

Sundial Bridge fits in with the style of other bridges designed by Santiago Calatrava. On the one hand, the purity of whiteness and the dynamics of the form stand out against the background of the natural environment. On the other hand, they are an unobtrusive composition that blends in with the natural environment with its sculptural subtlety.

4.4. Samuel Beckett Bridge

Opened in 2009, the Irish Samuel Beckett Bridge (Fig. 4) is the second, next to the James Joyce Bridge, designed by Santiago Calatrava in Dublin. In contrast, the Samuel Beckett bridge, similar to the examples discussed above, has a structure based on suspending the footbridge on ropes attached to the bracket. What distinguishes this facility is the shape of the pylon, which was interpreted as an arch in the first reception and the use of external lashings that balance the ropes that connect the pylon with the footbridge. However, from the point of view of building mechanics, this pylon is not an arch. They work 'momentless' in compression, and any bending forces threaten the arches with buckling. The pylon can be thought of as a 'crooked' cantilever beam.

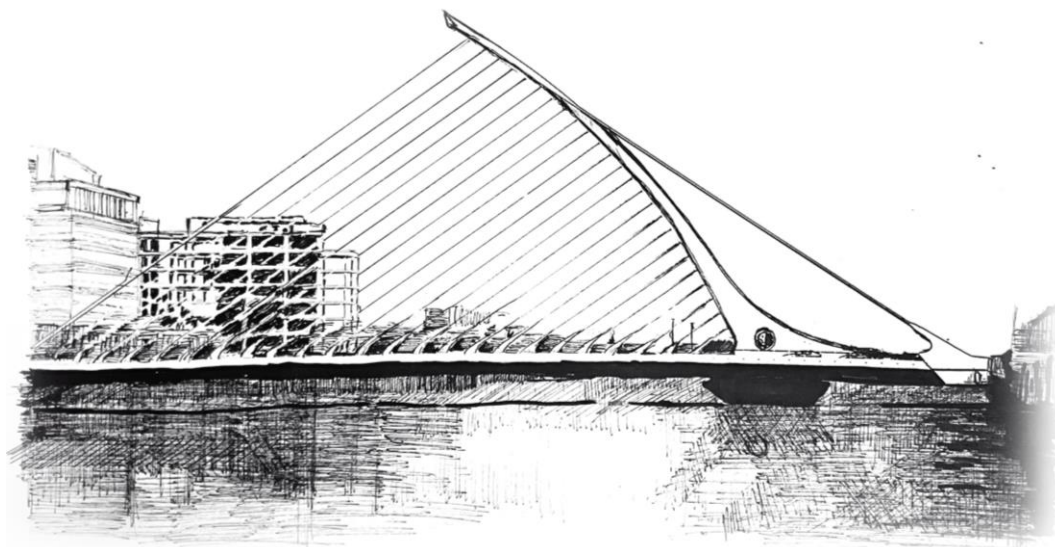


Fig. 4. Samuel Beckett Bridge. Source: author
Ryc. 4. Samuel Beckett Bridge. Źródło: autor

The bridge located over the River Liffey enables pedestrian and car traffic, creating a necessary urban axis in the eastern part of the capital of Ireland (Donadei, Tzonis 2005, p. 236).

It connects two streets near the port: southern Mackerel Street and northern Guild Street. It is also a link between east and west roads to form a link between the Sir John Rogerson Quay and North Wall Quay roads which follow the River Liffey. Like the Argentinian Women's Bridge, it has a rotating mechanism allowing free water movement.

The bridge has a total length of 124 meters, with a clear width of 93 meters. The pylon is 46 meters high and is loaded with 31 ropes. Relief in the form of ropes of a larger cross-section is located on the opposite side in the form of two sets of three ropes.

The shape of the bridge is not accidental - it refers to the harp, a symbol of Ireland. It owes its name to the Irish playwright Samuel Beckett. The bridge is accessible to car traffic, but Calatrava was particularly motivated by restoring the city to pedestrians. Apart from its symbolic form, this project is characterized by a response to a deep communication analysis of Dublin.

5. RESEARCH

All pylons have the shape of a cantilever beam curve with one free end and one fixed end. They mainly work on bending, so in the initial design of the mold, the shape of the bending moment diagram should be examined. The concentrated force acting on the beam generates a graph of moments with a rectangular shape. Continuous load - parabolic shape. Depending on the density, many concentrated forces occurring side by side can be interpreted as a continuous load. The drawing of the diagram of moments on curved beams is facilitated by the force \times arm perpendicular to it. For this purpose, you can draw a straight cantilever under the curved cantilever, located perpendicular to the direction of the forces and transfer the values of the moment diagram from the straight cantilever to the curved cantilever. When the continuous load is along the entire length of the cantilever, we are only talking about a parabola (Fig. 5). If the continuous load is not over the whole tested support, the parabola in the shape of the moment diagram will occur only directly under the load, and then the shape will be ruled (Fig. 6).

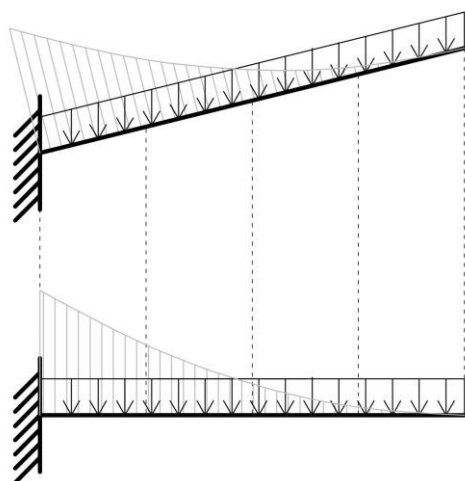


Fig. 5. Transfer of the bending moment diagram from a simple cantilevered beam to a curved beam. Continuous load over the entire span. Source: the author. Source: by author

Ryc. 5. Przenoszenie wykresu momentów z prostej belki wspornikowej na krzywą. Obciążenie ciągłe na całej rozpiętości. Źródło: autorka

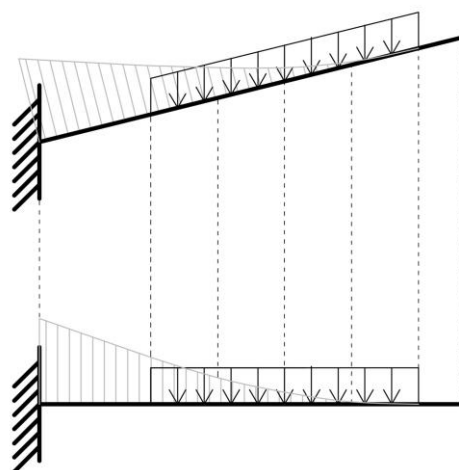


Fig. 6. Transfer of the bending moment diagram from a simple cantilevered beam to a curved beam. Continuous load on the part of the span. Source: by author

Ryc. 6. Przenoszenie wykresu momentów z prostej belki wspornikowej na krzywą. Obciążenie ciągłe na części rozpiętości.

To correctly route the straight section after drawing the parabola, a line should be drawn as an extension of the section connecting the top of the parabolic shape to the point lying on the construction line of the cantilever directly under the resultant force of the continuous load (Fig. 7). These methods were used for all the discussed schemes.

In the static diagrams, the tested pylons were presented in a one-dimensional way - with a line. For this reason, the forces acting on the supports were placed on the opposite side of the pylon axis than the ropes in reality so that the arrowheads symbolizing the loads were directed towards the pylon. The forces act in the same direction as the actual ropes, despite being graphically represented from a different angle. It should be borne in mind that in foreign literature, it is common to present a diagram of moments on the compressed side (Heller, Salvadori 1975 p. 165), (Allen, Michel 2010, p. 437). This article will draw all moment diagrams on the tension side, as in Polish literature (Kolendowicz 1993, p. 254).

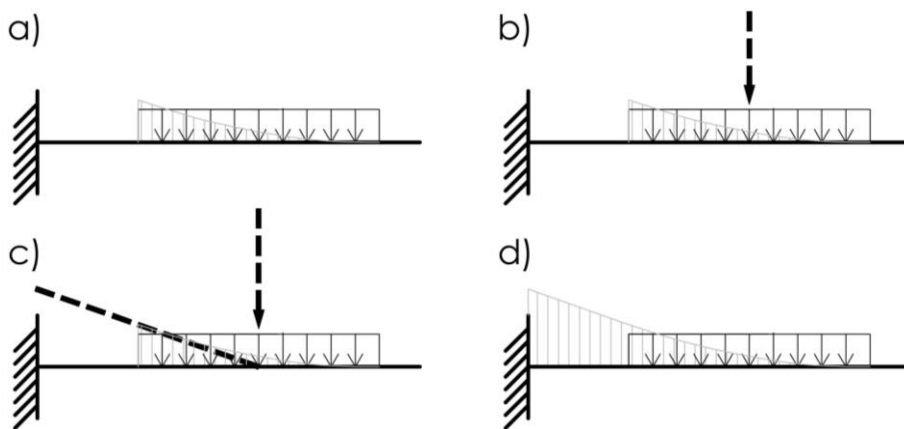


Fig. 7. The method of plotting the shape of the moment diagram in the case of a continuous load on the part of the structure: a) - a diagram in the shape of half of a parabola with a zero value at the end of the load, on the side close to the free end of the beam, b) - resultant of a continuous load, c) direction line connecting the highest value on the half of the parabola with the point of intersection of the resultant force axis with the axis of the cantilever d) overall diagram of straight-line moments in the area where there is no load. Source: by author

Ryc. 7. Sposób wykreślenia kształtu wykresu momentów w przypadku obciążenia ciągłego znajdującego się na części konstrukcji: a) - wykres w kształcie połówki paraboli o wartości zerowej w miejscu zakończenia prowadzenia obciążenia, po stronie zbliżonej swobodnemu końcowi belki, b) - wypadkowa obciążenia ciągłego, c) linia kierunku łączącej największą wartość na połowce paraboli z punktem przecięcia osi siły wypadkowej z osią wspornika d) całokształt wykresu momentów o kształcie prostokreślnym w obszarze, gdzie nie występuje obciążenie. Źródło: autorka

5.1. Puente del Alamillo analysis

The Puente del Alamillo bridge has an outwardly inclined pylon (Fig. 8, on the left), which in the static diagram is a fixed cantilever beam loaded with 26 concentrated forces. They come from ropes that work for stretching. They are point suspensions of the communication footbridge. As an element working on bending, the footbridge is characterized by a low slenderness factor. Using suspensions makes it possible to avoid the use of bottom supports, thus making it possible to relieve the footbridge and minimize the size of its cross-section.

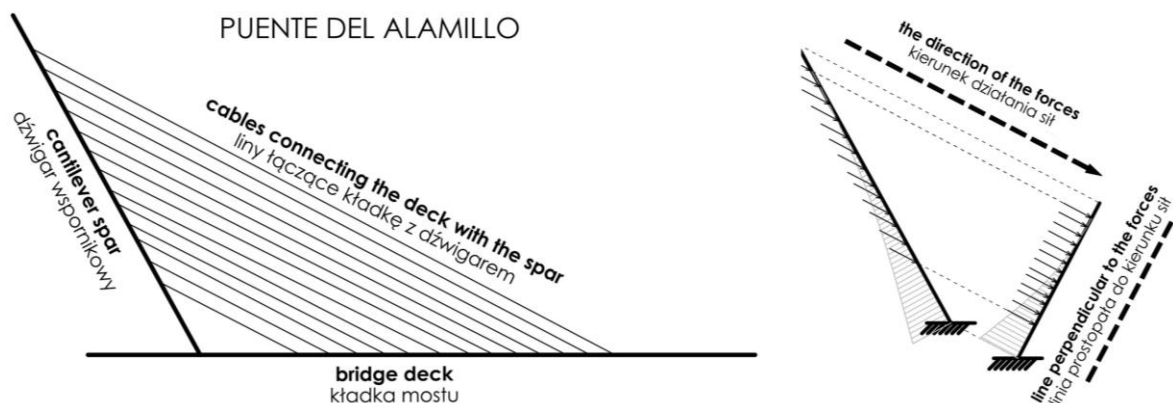


Fig. 8. On the left: Scheme of the Puente del Alamillo bridge presented as a two-dimensional analysis in the drawing plane. On the right: Diagram of moments of the schematic cantilever symbolizing the pylon of the Puente del Alamillo bridge, transferred from the reference cantilever perpendicular to the direction of the forces. Source: by author

Ryc. 8. Po lewej: Schemat mostu Puente del Alamillo przedstawiony w postaci analizy dwuwymiarowej w płaszczyźnie rysunku. Po prawej: Wykres momentów schematycznego wspornika symbolizującego pylon mostu Puente del Alamillo, przeniesiony z referencyjnego wspornika prostopadłego do kierunku działania sił. Źródło: autorka

The moment diagram reaches its greatest value at restraint. Due to the regularly distributed concentrated forces, it assumes a parabolic shape in the place of their occurrence, which is characteristic of a continuous load. It reaches zero value before the free end of the pylon, where Moment = 0 (Fig. 8, on the right).

5.2. Puente de La Mujer analysis

The Puente de La Mujer bridge has a pylon inclined towards the footbridge (Fig. 9, on the right), which in the static diagram is a fixed cantilever beam loaded with 19 concentrated forces. They come from ropes that work for stretching. They are point suspensions of a communication footbridge - in this case, a movable one - which, like in the case of Puente del Alamillo, works like a bent beam.

As in the previous case - the moment diagram reaches the highest values at restraint. Due to regularly distributed concentrated forces, it assumes a shape similar to a parabolic one in the place of their occurrence. It reaches zero value before the free end of the pylon, where Moment = 0 (Fig. 9, on the right).

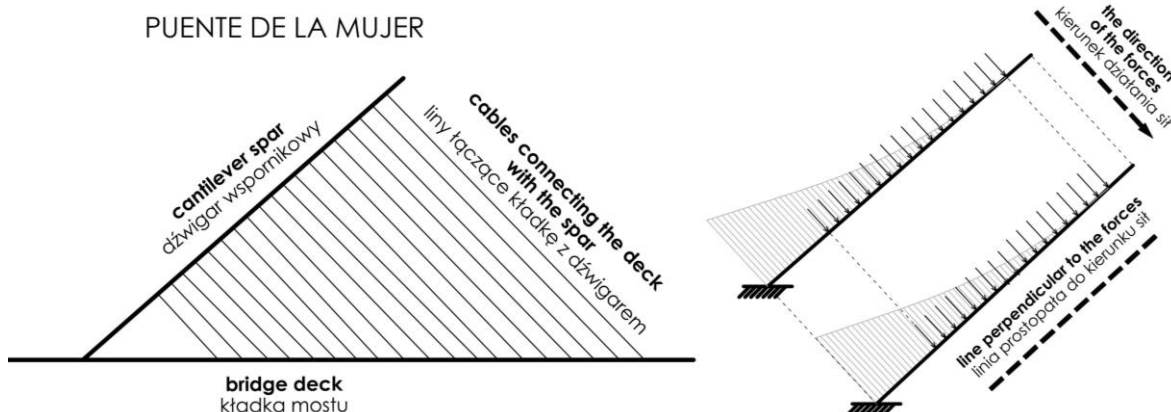


Fig. 9. On the left: Puente de La Mujer bridge scheme presented as a two-dimensional analysis in the drawing plane. On the right: Diagram of moments of the schematic cantilever symbolizing the pylon of the Puente de La Mujer bridge, transferred from the reference cantilever perpendicular to the direction of the forces. Source: by author

Ryc. 9. Po lewej: Schemat mostu Puente de La Mujer przedstawiony w postaci analizy dwuwymiarowej w płaszczyźnie rysunku. Po prawej: Wykres momentów schematycznego wspornika symbolizującego pylon mostu Puente de La Mujer, przeniesiony z referencyjnego wspornika prostopadłego do kierunku działania sił. Źródło: autorka

5.3. Sundial Bridge

The Sundial Bridge, similarly to Puente del Alamillo, has a pylon tilted outwards (Fig. 10, on the left), which in the static diagram has the form of a fixed cantilever beam loaded with 14 concentrated forces. For simplicity, they have been assumed to be arranged in parallel. As mentioned earlier, only dominant types of work are considered, so torsion analysis is omitted for pylon. Concentrated forces come from ropes that work in tension. They are point suspensions of the communication footbridge, which, considered as a whole, works like a bent beam.

Again, in the case of a cantilevered beam, the moment diagram reaches its greatest values at restraint. Due to the regularly distributed concentrated forces, it assumes a parabolic shape in the place of their occurrence, which is characteristic of a continuous load. It reaches zero value before the free end of the pylon, where moment = 0 (Fig. 10, on the right).

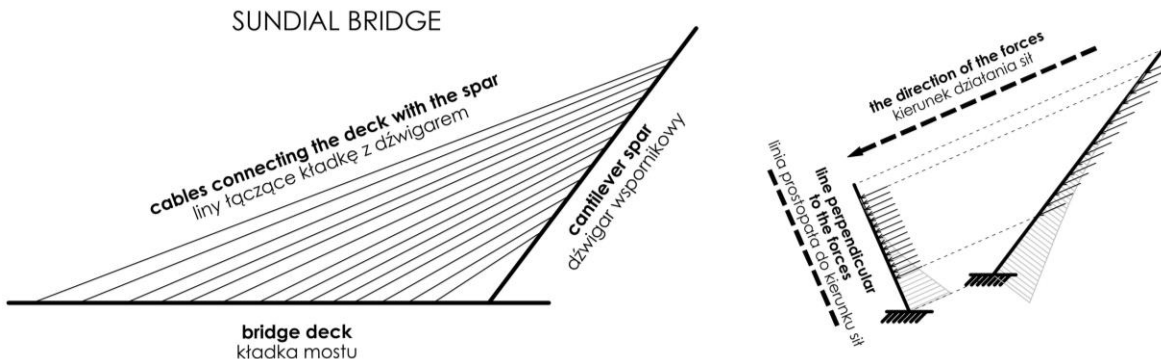


Fig. 10. On the left: Scheme of the Sundial Bridge presented as a two-dimensional analysis in the drawing plane. On the right: - Diagram of moments of the schematic cantilever symbolizing the pylon of the Sundial Bridge, transferred from the reference cantilever perpendicular to the direction of the forces. Source: by author

Ryc. 10. Po lewej: Schemat mostu Sundial Bridge przedstawiony w postaci analizy dwuwymiarowej w płaszczyźnie rysunku. Po prawej: Wykres momentów schematycznego wspornika symbolizującego pylon mostu Sundial Bridge, przeniesiony z referencyjnego wspornika prostopadłego do kierunku działania sił. Źródło: autorka

5.4. Samuel Beckett Bridge

The Samuel Beckett Bridge has a pylon that stands out against the background of the above-described bridges, inclined towards the footbridge (Fig. 11, on the left). Despite describing its shape in the literature as an 'arc' structurally, it does not work on compression, but on bending. From the point of view of structural mechanics, this cantilever is also a curved beam loaded with 31 concentrated forces in the static diagram. They come from ropes that work on stretching and are point suspensions of the communication footbridge. Santiago Calatrava distinguishes this design by the use of tensioning ropes, which, 'suspending' the pylon, were treated in the static diagram as an additional articulated support (Fig. 11, on the right).

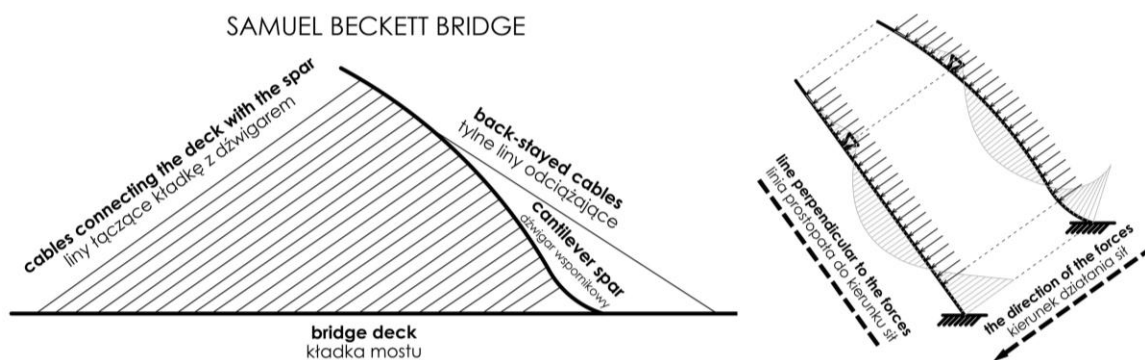


Fig. 11. On the left: The Samuel Beckett Bridge scheme presented as a two-dimensional analysis in the drawing plane. On the right: Diagram of moments of the schematic cantilever symbolizing the pylon of the Samuel Beckett Bridge, transferred from the reference cantilever perpendicular to the direction of the forces. Source: by author

Ryc. 11. Po lewej: Schemat mostu Samuel Beckett Bridge przedstawiony w postaci analizy dwuwymiarowej w płaszczyźnie rysunku. Po prawej: Wykres momentów schematycznego wspornika symbolizującego pylon mostu Samuel Beckett Bridge, przeniesiony z referencyjnego wspornika prostopadłego do kierunku działania sił. Źródło: autorka

The moment diagram reaches the highest values at restraint and increases near the pinned support, where the lashings are attached. Due to regularly distributed concentrated forces, it assumes a parabolic shape in the place of their occurrence, which is characteristic of a continuous load. Still,

in this case, the diagram of moments goes to the other side in two places. It reaches the zero value before the free end of the pylon, where moment = 0, but also where the side of the bending components: tension and compression changes in the bent cantilever beam (Fig. 15).

6. RESULTS

The results of the analysis using intuitive graphical methods allow the creation of concepts based on the bending moment diagrams presented above.

The obtained sketch forms shown in Figures 12-15 result from the initial optimization of the material, which can be estimated thanks to the knowledge of graphical methods of building mechanics. The proportions of the moment diagram used the material - pylons are widest at restraint and narrow towards the end. An exception is the conceptual form of the Irish Samuel Beckett Bridge. By using lashings as additional support, presented as an additional pinned support, we deal with the geometry of the moment diagram, which reaches zero values where the diagram crosses to the other side of the structure axis. This leads to a more complicated form, which increases its cross-section in the place of the lashings. The shape of the moment diagram is also essential. The forms have straight lines with no concentrated loads from suspended ropes and gently rounded edges where ropes are present. Again, the exception is Samuel Beckett Bridge. On a curved (and not rectilinear) cantilever, the parabolic graph's transfer form is unclear due to the curvature of the cantilever axis. Nevertheless, the addition of lashings, and thus additional support, makes the diagram of moments more varied, which results in a much more pronounced difference of the obtained shape to the original designs.

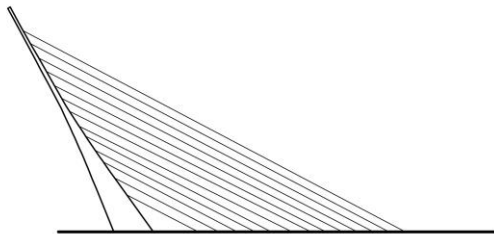


Fig. 12. Concept sketch of the Puente del Alamillo bridge. A pylon with a form obtained by a sketchy method of initial optimization of the material with the use of graphic methods of building mechanics. Source: by author

Ryc. 12. Schemat mostu Puente del Alamillo z pylonem o formie osiągniętej szkicową metodą wstępnej optymalizacji materiału z wykorzystaniem graficznych metod mechaniki budowli. Źródło: autorka

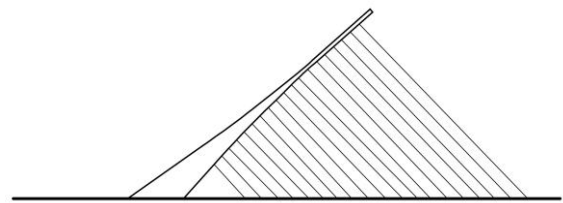


Fig. 13. Concept sketch of the Puente de La Mujer bridge. A pylon with a form obtained by a sketchy method of initial optimization of the material with the use of graphic methods of building mechanics. Source: by author

Ryc. 13. Schemat mostu Puente de La Mujer z pylonem o formie osiągniętej szkicową metodą wstępnej optymalizacji materiału z wykorzystaniem graficznych metod mechaniki budowli. Źródło: autorka

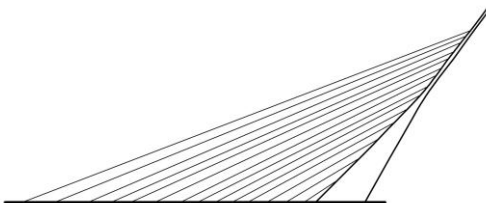


Fig. 14. Concept sketch of the Sundial Bridge. A pylon with a form obtained by a sketchy method of initial optimization of the material with the use of graphic methods of building mechanics. Source: by author

Ryc. 14. Schemat mostu Sundial Bridge z pylonem o formie osiągniętej szkicową metodą wstępnej optymalizacji materiału z wykorzystaniem graficznych metod mechaniki budowli. Źródło: autorka

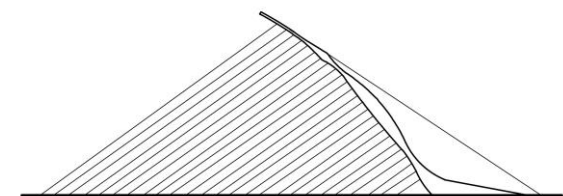


Fig. 15. Concept sketch of the Samuel Beckett Bridge. A pylon with a form obtained by a sketchy method of initial optimization of the material with the use of graphic methods of building mechanics. Source: by author

Ryc. 15. Schemat mostu Samuel Beckett Bridge z pylonem o formie osiągniętej szkicową metodą wstępnej optymalizacji materiału z wykorzystaniem graficznych metod mechaniki budowli. Źródło: autorka

Comparing the results for Puente del Alamillo, it can be seen that the proposed form presents a much higher variation in the amount of material along the entire length of the cantilever (Fig. 12). The original pylon narrows slightly. In the case of Puente de La Mujer, a high similarity of forms can be noticed. The change in the distribution of the material is evident. The proportions are similar to those shown in the figure (Fig. 13). The Sundial Bridge also has a tapered form, at first glance, resembling the shape obtained in the analysis (Fig. 14). The biggest difference between the original and the design form is shown by Samuel Beckett Bridge (Fig. 15). Santiago Calatrava did not introduce material minimization where the graph of moments reaches zero in the analyses. There was also no increase in the amount of material at the place of installation of the lashings.

7. CONCLUSIONS

Santiago Calatrava's described bridge pylons are discussed in chronological order. In the case of bridges with a pylon in the shape of a diagonal but rectilinear cantilever, it can be concluded that the designer, despite the similarities of the bridges, developed the design idea. In the case of Puente del Alamillo from 1992, the form of the rope-retraction bracket is intuitive. Still, the bracket itself has not systematically optimized the material used. It is different in the case of the next project - Puente de La Mujer. The Sundial Bridge combines the idea of balancing forces by tilting the cantilever and optimizing the material by tapering the pylon towards the free end. A special case is the Samuel Beckett Bridge, which, although also narrows towards the end and widens towards the base, differs in shape from the proposed form. This may be related to Calatrava's new direction of bridge design - it departs from straight-line pylons. Perhaps subsequent bridges with a curved beam structure will be optimized in terms of material consumption. It can also be assumed that Calatrava did not undertake advanced optimization of the material since the variability of the cross-section could result in a form that would be different from the association with the Irish harp.

Puente de La Mujer and Samuel Becett Bridge have a pylon inclined towards the footbridge. This solution is not an intuitive form, because the ropes 'pull' the bracket towards the footbridge. It would seem that the natural form would be a pylon tilted away from the footbridge as a counterbalance to gravity acting on the pylon against the ropes. While in the case of Samuel Beckett's bridge, the form of the harp can be considered an inspiration, in the case of the Puente de La Mujer, the inward-sloping form may be mainly related to practical considerations. The rotating footbridge moves with the pylon, instead of tracing additional radii in space when the pylon is tilted outwards. The Dublin bridge has an apparent solution to the problem of pulling down the cantilever by cables - in the form of external lashings that balance the forces. Puente de La Mujer, in turn, required a 'tail' to balance the cantilever loaded with ropes, which can be considered an exemplary reflection of the shape of the proportions in the diagram of the moments of the bent cantilever.

8. SUMMARY

The designer's style, although very recognizable, blends in with the surrounding environment, both urban and natural. The discussed bridges occur on three different continents. Although the forms are similar at first glance, they adapt aesthetically to the context of the location, despite their diversity, thanks to the nuances. The transparency of structural solutions in bridges designed by the architect may contribute to further research for more complex structures designed by Santiago Calatrava.

The conducted analyzes confirm the importance of the architect's understanding of the structure's operation. Although traditional and not requiring modern digital tools, the methods used are in line with the modern idea of saving material. In the era of advanced digital tools that enable architects to search for new forms, and in the face of the high complexity of software designed for constructors, traditional drafting methods have great potential.

Graphical analysis using structural mechanics to optimize the material's initial optimization can be the first step in finding the missing link between creating a viable concept and structural analysis.

In further research, the author plans interdisciplinary cooperation on analyzing the convergence of sketchy forms obtained with computer models using FEM design tools.

RELACJA FORMY I KONSTRUKCJI W MOSTACH PYLONOWYCH SANTIAGO CALATRAVY

1. WSTĘP

Architektura (...) często żąda od konstruktora więcej niż jest on w stanie osiągnąć - pisał już w połowie XX w. Sigfried Giedion (Giedion 1968, s. 10). W XXI wieku nastąpiła zmiana w działalności projektowej w dziedzinie architektury i budownictwa, co jest zauważalne, głównie dzięki narzędziom cyfrowym (Rokicki, Stefańska 2022). Oferowane przez szereg współczesnych programów komputerowych cyfrowe narzędzia parametryczne stają się coraz bardziej popularne w projektowaniu architektonicznym (Januszkiewicz 2016, s. 57). Dają możliwości kształtowania architektury o dużo swobodniej szych formach niż te, które przed erą cyfryzacji były ograniczone geometrią euklidesową (Januszkiewicz 2012, s. 52).

Wiele metod komputerowych w projektowaniu architektonicznym jest przydatnych, pod warunkiem, że projektant wie co chce uzyskać, ma pomysł i narzędzia do jego realizacji (Asanowicz 2008, s. 735). Im bardziej swobodne formy tym większa konieczność dokładnej analizy i współpracy architekta z konstruktorem, nawet jeśli obliczenia dotyczące wymiarowania budowli przeprowadzane są komputerowo. Jednak to nie trudność obliczeń staje się problemem, a realność wykonania z oddaniem proporcji jak najbardziej zbliżonych do pierwotnej koncepcji architekta.

Z tego względu szczególnie ważna jest znajomość przez architekta podstawowych zasad związanych z mechaniką budowli. Pozwala to na projektowanie architektury której realizacja staje się realna bez uszczerbku dla formy przewidzianej w pierwotnym projekcie. Jak twierdził Auguste Perret *Architektura jest sztuką organizowania przestrzeni, mianowicie poprzez konstrukcję, która tę przestrzeń określa* (Kolendowicz 1993, s. 11).

W wywiadzie "The Art of Architecture", dla portalu Leaders Santiago Calatrava wyraźnie oddziela proces koncepcyjny od projektu technicznego. *Jeśli chodzi o samą pracę, trzeba rozróżnić część koncepcyjną i rozwinięcie koncepcji. Część koncepcyjna działa dzisiaj tak samo, jak w czasach Egipcjan: rysujesz swoją koncepcję.* (Leaders Magazine 2011). Kładzie jednak nacisk na rozumienie połączenia stosowanych rozwiązań już na etapie tworzenia koncepcji, odnosząc się do pojęcia inżynierii sztuki. *Jeśli uznamy jedność inżynierii i sztuki, a ja uważam, że taka istnieje i jeśli wrócimy do czasu, kiedy nie było różnicy między sztuką architektury i sztuką inżynierii, wtedy możemy przyjąć, że inżynieria sztuki jest w nas samych. Jest ona nie tylko naszym dziedzictwem, ale również jego źródłem, dlatego w ramach naszych zdolności musimy to dziedzictwo kontynuować i wzbogacać* (Dąbrowiecki 2009, cyt. za Wrana 2016).

Architekt powinien posiadać umiejętność analizy pracy konstrukcji w projektowanej formie, tak by mógł tę wiedzę wykorzystać już na etapie wstępnej koncepcji (Kozikowska 2010, s. 45). Dzisiejsze budownictwo charakteryzuje efektywność wykorzystania zasobów naturalnych, co minimalizuje zużycie materiałów (Dixit, Stefańska 2023). Dlatego jako jeden z istotnych kierunków projektowania jawi się wykorzystanie narzędzi, które już na etapie projektowania wstępnego pozwalają kształtować formy o zoptymalizowanej ilości zużycia materiału.

Uwzględnianie praw fizyki oraz dbałość o optymalizację konstrukcji cechowały takich projektantów jak Antoni Gaudi (Liżewska 2019, s. 29), Felix Candela, Pier Luigi Nervi, czy Buckminster Fuller, którzy uznani zostali za wybitnych architektów (Kolendowicz 1993, s. 12). W architekturze przełomu XX i XXI wieku realizacje dające wyraz połączenia architektonicznego kunsztu z wiedzą inży-

nierską cechują Santiago Calatravę. Wnosi on niewątpliwy wkład w rozwój sztuki budowania (Cichy-Pazder, Flaga, Hrabiec, Januszkiewicz 2005, s.131). Szczególna klarowność relacji między formą a konstrukcją cechuje mosty zaprojektowane przez architekta.

Proces projektowania mostu jest tym bardziej skomplikowany im większa do pokonania jest odległość bez zastosowania podpór pośrednich lub konieczność minimalizowania ich liczby. Szczególnie wyróżniające się na tle licznych konstrukcji mostowych, są asymetryczne mosty pylonowe Calatravy, które dzięki oryginalnej formie stały się ikonami lokalizacji, w których powstały. Ich konstrukcje są nowatorskie pod względem nieoczywistych rozwiązań, które odbiegają od tradycyjnych mostów, często opartych na rozwiązaniach z wykorzystaniem łuków.

W artykule zbadano zrealizowane mosty projektu Santiago Calatravy konstrukcji wantowej, które posiadają jeden asymetryczny pylon. Przeprowadzono analizy polegające na wyszczególnieniu schematycznego podziału na główne elementy konstrukcyjne oraz przypisano im rodzaj dominującej pracy pod zadaniem obciążeniem. Zbadano "optymalizację materiału", w kontekście oszczędzania ilości materiału w projektowanej formie. Wiąże się to ze zmiennością przekroju poprzecznego. Więcej materiału pojawia się w miejscach, gdzie wartości na wykresie są większe. Analogicznie: mniej materiału pojawia się tam, gdzie wartości na wykresie sił są małe lub zerowe.

2. CEL BADAŃ

Artykuł odpowiada na pytania czy wykorzystanie intuicyjnych metod graficznego projektowania wstępnego form o zoptymalizowanym rozkładzie materiału jest zasadne oraz czy otrzymane formy są zbieżne z rozwiązaniami Santiago Calatravy.

Celem badań jest ocena formy zrealizowanych pylonów pod względem związku proporcji z działającymi na pylon siłami. Sprawdzone stopień zbieżności pomiędzy formami pylonów projektowanymi przez Calatravę, a kształtami stanowiącymi wynik analizy w kontekście wstępnej optymalizacji materiału bez konieczności użycia komputera. Zbadano, czy główne cechy charakterystyczne form istniejących i otrzymanych w analizach noszą znamiona podobnych proporcji wykorzystania materiału. Tym samym oceniono przydatność tradycyjnej metody graficznego wykorzystania znajomości mechaniki budowli przez architektów, w dobie rozwoju narzędzi cyfrowych. Wyniki badań mogą przyczynić się do rozwinięcia poszukiwań brakującego ogniwa pomiędzy etapem projektowania koncepcyjnego przez architekta, a skomplikowanymi badaniami nad optymalizacją materiału przez konstruktora.

3. METODOLOGIA

W artykule przedstawiono intuicyjne metody projektowania wstępnego, oparte na graficznej analizie pracy konstrukcji o statycznie wyznaczalnych schematach. Działanie to charakteryzuje duża prostota i poglądowość (Kozikowska 2010). Zgodnie z twierdzeniem Salvadoriego, wiedza o pracy konstrukcji może być intuicyjna i we wstępnej fazie projektowania nie wymaga złożonych obliczeń matematycznych (Heller, Salvadori 1975, s. 6). Salvadori pisał, że powinna być oparta na dużym doświadczeniu i podlegać ostrożnej weryfikacji. Dlatego aby zachować prawdopodobieństwo realności projektowanych form, intuicyjne metody projektowania powinny opierać się na poprawnych rozwiązaniach z dziedziny mechaniki budowli.

Badaniu poddano zgodność realnych kształtów pylonów z formami otrzymanymi metodą wstępnej optymalizacji zużycia materiału na podstawie graficznej techniki z wykorzystaniem zasad mechaniki budowli. Metoda ta polega na określeniu kształtu wykresu dominujących sił i uzależnieniu proporcji kształtu formy od wartości wykresu dominujących sił, bez dokładnego wymiarowania. Ponieważ wszystkie badane pylony pracują jak utwierdzona z jednej strony belka wspornikowa, dominującym rodzajem pracy jest zginanie. Wykorzystano zasadę prostopadłości siły do ramienia jej działania, co wynika z definicji momentów zginających. Określono kierunek działania sił oraz wyznaczono linię do niego prostopadłą. Wykreślono wykresy momentów na prostych kształtach i metodą stycznych przeniesiono proporcje wykresu momentów z belek wspornikowych referencyjnych na

docelowe, prezentujące schematy pylonów zaprojektowanych przez Santiago Calatravę. Wzorując się na proporcjach wartości wykresu momentu, dla każdego wspornika zaproponowano koncepcyjną formę oddającą proporcje z wykresu sił, bez wymiarowania i dobierania materiału konstrukcji. Efekty przedstawiono graficznie, a na ich podstawie opisano wnioski.

4. OBIEKTY PODDANE ANALIZIE

Badane mosty Santiago Calatravy zostały wybrane do omówienia, jako zrealizowane obiekty, których wspólną cechą charakterystyczną stanowi podobna topologia strukturalna. Każdy z nich posiada poziomą kładkę, która zawieszona jest na diagonalnie usytuowanych linach połączonych ze wspornikiem odchylonym od pionu. Topologię tę można podzielić na grupę pylonów nachylonych do kładki oraz odchylonej od niej.

Do wad tego niekonwencjonalnego rozwiązania zaliczyć możemy:

- Asymetryczny pylon wymaga szczególnej analizy statycznej na dalszych etapach projektowania, zwłaszcza w przypadku pylonów nachylonych w stronę kładki, które swoją formą nie stanowią przeciwwagi dla obciążających je lin
- A przypadku ruchomych mostów istotna jest analiza przestrzenna pod względem przemieszczania pokażnej gabarytowo formy jaką jest pylon, co może determinować wybór strony nachylenia pylonu w stronę kładki;
- Ograniczenia materiałowe: pylon pracujący na zginanie nie może być wykonany z materiału kruchego takiego jak np. kamień, lub cegła. Rozwiązania materiałowe pylonów ograniczają się do żelbetu i stali. Warte dalszych badań pozostaje jednak drewno klejone, które daje szanse kształtowania form wytrzymałych na zginanie.

Zaletę rozwiązań stanowi:

- nowatorstwo rozwiązania, kontrastujące z tradycyjnymi mostami wykorzystującymi powszechne łuki umieszczone pod lub nad traktem komunikacyjnym;
- możliwości kreowania form dynamicznych w odbiorze, poprzez stosowanie asymetrii i kierowania osi w sposób diagonalny, co pozwala na tworzenie rzeźbiarskich koncepcji wpisujących się w kontekst miejsca;
- możliwość “uwolnienia” przestrzeni i dodania lekkości wizualnej w sferze pozbawionej pylony, w przeciwieństwie do sytuacji kiedy liny łączy kładkę z łukiem rozpiętym nad całością traktu komunikacyjnego.

Opisane zalety są szczególnie istotne dla subtelności stosowanych przez architekta form. Santiago Calatrava wypowiadając się o zaprojektowanych przez siebie mostach często kładzie nacisk na ich głębokie znaczenie dla stworzenia odpowiedniej dla dzisiejszych czasów infrastruktury. Zławszcza w miastach europejskich, które z biegiem historii zostały zamieszkałe przez coraz większą liczbę osób. *W dobie zmieniających się czasów projektowane przez architekta mosty stanowią nie tylko dosłowne połączenie komunikacyjne, lecz również łącznik pomiędzy przeszłością miasta a jego współczesnymi potrzebami. Wydaje mi się, że prace stworzone na zamówienie publiczne, związane z budową mostów, stacji transportu publicznego, przez kreowanie i skupienie wielkomięjskiej aktywności w tych miejscach mogą stać się bardzo znaczącą siłą w regeneracji tych terenów* (Dąbrowiecki 2009).

Wszystkie omawiane pylony zostały zastosowane w asymetrycznych konstrukcjach mostowych, gdzie wykorzystano linowe podwieszenie kładki stanowiącej trakt komunikacyjny. Mosty pomimo podobnych schematów działania, różnią się od siebie rozpiętościami oraz sposobem wpisywania się w otaczający kontekst architektoniczny. Podstawowe dane techniczne prezentuje tabela (tab. 1).

4.1. Puente del Alamillo

Most Puente del Alamillo (ryc. 1) zaprojektowany przez Calatravę mieści się w Sewilii. Otwarty został w 1992 i stanowi jeden z pierwszych mostów, w których wykorzystano pochylony pylon bez

przeciwstawnych wobec lin odciągów (Donadei, Tzonis 2005, s. 98). Pylon wysokości 142 metrów nachylony jest pod kątem 58° do horyzontu. Z dwustumetrowym przęsłem łączy go 26 par stalowych lin, które umożliwiają uwolnienie traktu komunikacyjnego od podpór pośrednich.

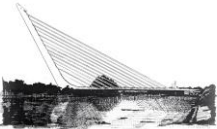



Otwarcie mostu wiązało się głównie z Expo 1992, ale też z obchodami pięćsetnej rocznicy odkrycia Ameryki przez Krzysztofa Kolumba. Projekt mostu został zlecony pięć lat wcześniej w ramach rządowej inicjatywy mającej na celu poprawę komunikacji drogowej pomiędzy Sewillą i sąsiednimi miastami. Na rzece Gwadalkiwir miało powstać osiem nowych mostów. Ze względu na powodzie bieg rzeki został przekierowany tworząc sztuczna wyspę, która miała stanowić miejsce Expo 1992.

Pierwotnie Santiago Calatrava planował dwa bliźniacze mosty zbudowane na takiej zasadzie jak obecnie wygląda Puente del Alamillo. Symetryczny projekt zainspirowany był wyjątkowością miejsca, w którym ta sama rzeka przepływa dwukrotnie (Donadei, Tzonis 2005, s. 105). Pylony mostów miały pochylać się w swoją stronę tworząc dynamiczną kompozycję w kształcie trójkąta, którego fizycznie nieistniejący wierzchołek miał być wyobrażony w przestworzach. Ze względu na koszty, w późniejszych etapach projektu zrezygnowano z realizacji drugiego mostu. Zdecydowano się na wybudowaniu w jego miejscu wiaduktu Puente de la Cartuja, który (Jodidio s. 54), który był używany jako północne wejście na Expo.

Pierwotnie pylon mostu miał powstać poprzez sukcesywną budowę z jednoczesnym podwieszaniem mostu, jednak finalnie zdecydowano się na tradycyjne rozwiązanie w postaci całościowej budowy pylonu. Żelbetowa konstrukcja wypełniła zespawane na miejscu fragmenty stalowej powłoki podtrzymywanej przez potężny dźwig.

Ostateczna forma, choć odmienna od pierwotnej koncepcji, dzięki swojej asymetrii stała się szczególnie dominantą w lokalnym krajobrazie. Most, który w formie przypomina harfę stanowi ikoniczny znak rozpoznawczy współczesnej Sewilii.

Tab. 1 - Podstawowe dane badanych mostów. Źródło: autorka

Rysunek	Nazwa, lokalizacja, rok otwarcia	Wysokość i kąt nachylenia pylonu	Odchylenie pylonu i obciążenie
	Puente del Alamillo nad rzeką Gwadalkiwir Sewilla (Hiszpania), 1992	142 m 58°	odchylony od kładki dźwiga 26 par lin podtrzymujących kładkę
	Puente de La Mujer nad kanałem doku nr 3 na nabrzeżu dzielnicy Puerto Madero Buenos Aires (Argentyna), 2001	35 m 38.8°	pochylony w stronę kładki dźwiga 19 lin podtrzymujących kładkę
	Sundial Bridge nad rzeką Sacramento Redding (Stany Zjednoczone), 2004	66 m 42°	odchylony od kładki dźwiga 14 lin podtrzymujących kładkę
	Samuel Beckett Bridge nad rzeką Liffey Dublin (Irlandia), 2009	46 m kąt zmienny	pochylony w stronę kładki dźwiga 31 lin podtrzymujących kładkę (odciążony 6 przeciwstawnymi

4.2. Puente de La Mujer

Most pieszy Puente de La Mujer (ryc. 2), czyli Most Kobiet, znajduje się w argentyńskim Buenos Aires i stanowi pierwszą realizację architekta i konstruktora w Ameryce Południowej. Otwarty został w 2001 roku. Względem Puente del Alamillo różni się w szczególności zorientowaniem pylonu w stosunku do podtrzymywanego na linach ciągu komunikacyjnego. Choć most wyraźnie wpisuje się w charakterystyczny styl Santiago Calatravy, względem hiszpańskiej konstrukcji różni się także skalą. Pylon ma 35 metrów wysokości. Nachylenie względem kładki wynosi 38.5° , a sama kładka ma długość całkowitą 160 metrów. Pylon nie podtrzymuje całej kładki, lecz jej ruchomą część, która mierzy 102 metry (Donadei, Tzonis 2005, s. 226). Została zaprojektowana jako mechanizm, by obracając się o 90° umożliwić przepływ ruchu wodnego. W razie potrzeby komputerowy system na wschodnim krańcu mostu obsługuje ruch mechanizmu. Kładkę podtrzymuje 19 stalowych lin zamocowanych do pylonu. Nieruchome części kładki mają około 25 i 33 metry długości. Zewnętrzna część pylonu wykonana jest ze stali, a jego wewnętrzny rdzeń z żelbetu.

Obrotowa kładka znajduje się w doku nr 3, na terenie starego portu Puerto Madero. Współczesny charakter mostu wpisuje się w nowego ducha odrodzonej dzielnicy, która zmieniła funkcję z typowo przemysłowej na mieszkalno-handlową i turystyczną. Most zaprojektowany został nie tylko ze względów komunikacyjnych. Celem projektu Calatravy było stworzenie charakterystycznego punktu orientacyjnego. Most stanowi symbol odrodzonej żywotności gospodarczej (Donadei, Tzonis 2005 s. 230). Diagonalna forma pylonu swoim dynamicznym charakterem nawiązywać ma do pary tańczącej tango (Wrana 2016). Jest to ukłon w stronę kultury Buenos Aires, której elementem charakterystycznym jest sztuka tańca. Współczesny most symbolizuje rewitalizację portowej części, a kontrast pomiędzy nim a zabudową podkreśla połączenie lokalnych tradycji z nowością.

W 2018 roku Puente de La Mujer otrzymał status dziedzictwa kulturowego Buenos Aires, a cztery lata później została przeprowadzona renowacja nawierzchni dla ruchu pieszego. Do wykonania pokrycia wykorzystano panele wykonane z tworzywa otrzymanego dzięki recyklingowi plastikowych butelek przekazanych w zielonych punktach miasta.

4.3. Sundial Bridge

Sundial Bridge (ryc. 3) to kolejne dzieło projektu Santiago Calatravy, które stało się symbolem lokalizacji, w której zostało zrealizowane. Most został oddany do użytku w 2004 roku. Mieści się on nad rzeką Sacramento w kalifornijskim Redding. Przeznaczony jest do ruchu pieszo-rowerowego. Most łączy budynek muzeum Turtle Bay Exploration Park z jego okazałym ogrodem dendrologicznym (Donadei, Tzonis 2005, s. 150) McConnell Arboretum and Gardens. Choć formą przypomina hiszpański Puente del Alamillo, wyróżniają go dodatkowe cechy, dzięki którym współczesna budowla oddaje hołd naturze. Pylon mostu działa jak gnomon zegara słonecznego, a jego kładka została zaprojektowana w taki sposób aby jak najmniej zacieniać rzekę, w której znajduje się tarlisko łososi. Kładka nie posiada również podpór pośrednich, a trakt komunikacyjny wykonano z antypoślizgowego przeziernego szkła. Pylon pełniący funkcję zegara słonecznego w czasie budowy stanowił największy na świecie zegar słoneczny. Usytuowany jest osiowo dokładnie w kierunku północ-południe i odchyła się w przeciwną do traktu kładki stronę co również eliminuje rzucanie cienia na wodę zamieszkałą przez łososie.

Całkowita długość mostu wynosi 210 metrów. Pylon Sundial Bridge ma wysokość 66 metrów i równoważy siły 14 lin podtrzymujących kładkę. Wspornik względem horyzontu nachylony jest pod kątem 42° . To co wyróżnia konstrukcję wspornika względem Puente del Alamillo, to fakt, że obciążenia nie są rozmieszczone symetrycznie względem osi pylonu, w związku z czym pracuje on nie tylko na zginanie, ale też skręcenia. W niżej przedstawionych analizach pod uwagę wzięto jednak kształt wynikający z wykresów sił dominujących, a więc dwuwymiarowe rysunki przedstawiają wykresy momentów z pominięciem skręcania.

Sundial Bridge wpisuje się w stylistykę innych mostów projektu Santiago Calatravy. Czystość bieli i dynamika formy z jednej strony wyraźnie wybijają się na tle środowiska naturalnego, z drugiej jednak stanowią kompozycję nienachalną, która rzeźbiarską subtelnością wkomponowuje się w środowisko naturalne.

4.4. Samuel Beckett Bridge

Otwarty w 2009 roku irlandzki most Samuel Beckett Bridge (ryc. 4) stanowi drugi obok mostu Jamesa Joyce'a zrealizowany w Dublinie obiekt projektu Santiago Calatravy. W przeciwieństwie do niego, most Samuela Becketta podobnie jak omówione wyżej przykłady posiada konstrukcję opartą na zasadzie podwieszenia kładki na linach zamocowanych do wspornika. To, co wyróżnia ten obiekt, to zarówno kształt pylonu w pierwszym odbiorze odczytywano jako łuk jak i zastosowanie odciągów zewnętrznych równoważących działanie lin, które łączą pylon z kładką. Z punktu widzenia mechaniki budowli pylon ten nie jest jednak łukiem. Pracują one "bezmomentowo" na ściskanie, a wszelkie siły zginające zagrażają łukom wybočeniem. Pylon można potraktować jak "krzywą" belkę wspornikową.

Most znajdujący się nad rzeką Liffey, umożliwia ruch pieszy i samochodowy tworząc niezbędną oś miejską we wschodniej części stolicy Irlandii (Donadei, Tzonis 2005, s. 236).

Łączy dwie istniejące w pobliżu portu ulice: południową Macken Street oraz północną Guild Street. Stanowi także połączenie pomiędzy drogami łącząc część wschodnią i zachodnią tworząc połączenie dróg Sir John Rogerson Quay i North Wall Quay, które biegną wzdłuż rzeki Liffey. Podobnie do argentyńskiego Mostu Kobiet posiada mechanizm obrotowy pozwalający na swobodny ruch wodny.

Most posiada całkowitą długość 124 metrów, przy czym w świetle są to 93 metry. Pylon ma wysokość 46 metrów i obciąża go 31 lin. Odciążenie w formie lin większego przekroju poprzecznego znajduje się po przeciwnej stronie w formie dwóch zespołów skupiających po trzy liny.

Kształt mostu nie jest przypadkowy - nawiązuje do harfy, która stanowi symbol Irlandii. Swoją nazwę zawdzięcza irlandzkiemu dramaturgowi Samuelowi Beckettowi. Most dostępny jest dla ruchu samochodowego, jednak szczególnie mocno Calatravie przyświecała idea przywrócenia miasta pieszym. Projekt ten oprócz symbolicznej formy charakteryzuje odpowiedź na głęboką analizę komunikacyjną Dublina.

5. BADANIA

Wszystkie pylony mają kształt krzywej belki wspornikowej o jednym końcu swobodnym i jednym utwierdzonym. Pracują one głównie na zginanie, dlatego w projektowaniu wstępnym formy należy zbadać kształt wykresu momentów zginających. Siła skupiona działająca na belkę generuje wykres momentów o kształcie prostokreślnym. Obciążenie ciągłe - o kształcie parabolicznym. Wiele sił skupionych występujących obok siebie, w zależności od zagęszczenia może być interpretowanych jak obciążenie ciągłe. Rysunek wykresu momentów na krzywych belkach ułatwia zasada siła x prostopadłe do niej ramię. W tym celu można pod krzywym wspornikiem narysować wspornik prosty, usytuowany prostopadłe do kierunku działania sił i przenieść wartości wykresu momentów ze wspornika prostego na krzywy. W przypadku gdy obciążenie ciągłe znajduje się na całej długości wspornika, mówimy jedynie o paraboli (ryc. 5). Jeśli obciążenie ciągłe nie znajduje się na całości badanego wspornika, parabola w kształcie wykresu momentów wystąpi jedynie bezpośrednio pod obciążeniem, a następnie kształt będzie prostokreślny (ryc. 6).

Aby odpowiednio poprowadzić odcinek prosty po narysowaniu paraboli, należy poprowadzić linię stanowiącą przedłużenie odcinka łączącego szczyt kształtu parabolicznego z punktem leżącym na linii konstrukcyjnej wspornika bezpośrednio pod siłą wypadkową obciążenia ciągłego (ryc. 7). Metody te zostały wykorzystane w przypadku wszystkich omawianych schematów.

Na schematach statycznych badane pylony zostały przedstawione w sposób jednowymiarowy – linią. Z tego względu siły działające na wsporniki zostały umieszczone po przeciwnej stronie osi pylonu niż liny występujące w rzeczywistości, tak aby groty strzałek symbolizujących obciążenia skierowane były w stronę pylonu. Siły pomimo graficznego przedstawienia z innej strony, działają w tym samym kierunku, w którym rzeczywiste liny. Należy mieć na uwadze, że w literaturze zagranicznej często spotyka się przedstawianie wykresu momentów po stronie ściskanej (Heller, Salvadori 1975 s. 165), (Allen, Michel 2010, s. 437). W niniejszym artykule wszystkie wykresy mo-

mentów rysowane będą po stronie rozciąganej, tak jak występuje to w polskiej literaturze (Kolen-dowicz 1993, s. 254).

5.1. Analiza Puente del Alamillo

Most Puente del Alamillo posiada pylon wychylony na zewnątrz (ryc. 8, po lewej), który na sche-macie statycznym ma formę utwierdzonej belki wspornikowej obciążonej 26 siłami skupionymi. Pochodzą one od lin, które pracują na rozciąganie. Stanowią punktowe podwieszenia kładki komu-nikacyjnej. Kładka jako element pracujący na zginanie, charakteryzuje się małym współczynnikiem smukłości. Zastosowanie podwieszów pozwala na uniknięcie stosowania podpór dolnych, tym sa-mym umożliwiając odciążenie kładki i zminimalizowanie wymiaru jej przekroju poprzecznego.

Wykres momentów osiąga największe wartości przy utwierdzeniu. Przez regularnie rozmieszczone siły skupione, przybiera w miejscu ich występowania kształt zbliżony do parabolicznego, który jest charakterystyczny dla obciążenia ciągłego. Wartość zerową osiąga przed końcem swobodnym pylonu, na którym Moment = 0 (ryc. 8, po prawej).

5.2. Analiza Puente de La Mujer

Most Puente de La Mujer posiada pylon nachylony w stronę kładki (ryc. 9, po lewej), który na schemacie statycznym ma formę utwierdzonej belki wspornikowej obciążonej 19 siłami skupionymi. Pochodzą one od lin, które pracują na rozciąganie. Stanowią punktowe podwieszenia kładki komu-nikacyjnej - w tym przypadku ruchomej -, która podobnie jak przypadku Puente del Alamillo pracuje jak zginana belka.

Podobnie jak poprzednim przypadku - wykres momentów osiąga największe wartości przy utwier-dzeniu. Przez regularnie rozmieszczone siły skupione, przybiera w miejscu ich występowania kształt zbliżony do parabolicznego. Wartość zerową osiąga przed końcem swobodnym pylonu, na którym Moment = 0 (ryc. 9, po prawej).

5.3. Sundial Bridge

Most Sundial Bridge podobnie jak Puente del Alamillo posiada pylon wychylony na zewnątrz (ryc. 10, po lewej), który na schemacie statycznym ma formę utwierdzonej belki wspornikowej ob-ciążonej 14 siłami skupionymi. Dla uproszczenia przyjęto je jako równoległe rozmieszczone. Jak wspomniano wcześniej, rozpatrywane są tylko dominujące rodzaje pracy, więc w przypadku Pylonu pominięto analizę skręcania. Siły skupione pochodzą od lin, które pracują na rozciąganie. Stanowią punktowe podwieszenia kładki komunikacyjnej, która rozpatrywana całościowo pracuje jak zginana belka.

Ponownie w przypadku belki wspornikowej wykres momentów osiąga największe wartości przy utwierdzeniu. Przez regularnie rozmieszczone siły skupione, przybiera w miejscu ich występowania kształt zbliżony do parabolicznego, który jest charakterystyczny dla obciążenia ciągłego. Wartość zerową osiąga przed końcem swobodnym pylonu, na którym Moment = 0 (ryc. 10, po prawej).

5.4. Analiza Samuel Beckett Bridge

Samuel Beckett Bridge posiada wyróżniający się na tle wyżej opisanych mostów pylon, nachylony w stronę kładki (ryc. 12). Mimo opisywania jego kształtu w literaturze jako "łuk", konstrukcyjnie nie pracuje na ściskanie, a na zginanie. Z punktu widzenia mechaniki budowli, również ten wspornik jest krzywą belką, na schemacie statycznym obciążoną 31 siłami skupionymi. Pochodzą one od lin, które pracują na rozciąganie i stanowią punktowe podwieszenia kładki komunikacyjnej. To co wy-różnia ten projekt Santiago Calatravy, to zastosowanie odciągających lin, które "podwieszając" pylon, zostały na schemacie statycznym potraktowane jako dodatkowa podpora przegubowa (ryc. 11, po lewej).

Wykres momentów osiąga największe wartości przy utwierdzeniu i wzrasta w okolicach podpory przegubowej, gdzie zamocowane są odciążki. Przez regularnie rozmieszczone siły skupione, przy-biera w miejscu ich występowania kształt zbliżony do parabolicznego, który jest charakterystyczny

dla obciążenia ciągłego, jednak w tym wypadku wykres momentów przechodzi w dwóch miejscach na drugą stronę. Wartość zerową osiąga przed końcem swobodnym pylonu, na którym $M = 0$, ale również tam gdzie w zginanej belce wspornikowej zmienia się strona składowych zginania: rozciągania i ściskania (ryc. 11, po prawej).

6. WYNIKI

Wyniki przeprowadzonych analiz z użyciem intuicyjnych metod graficznych, pozwalają na stworzenie koncepcji opartych na przedstawionych wyżej wykresach momentów zginających.

Otrzymane formy szkicowe przedstawione na rysunkach 12-15, wynikają ze wstępnej optymalizacji materiału, możliwej do oszacowania dzięki znajomości graficznych metod mechaniki budowli. Wykorzystano materiał zgodnie z proporcjami wykresu momentów - pylony są najszersze przy utwierdzeniu i zwężają się ku końcowi. Wyjątek stanowi forma koncepcyjna irlandzkiego mostu Samuel Beckett Bridge. Poprzez zastosowanie odciągów stanowiących dodatkowo wsparcie przedstawione, jako dodatkowa podpora przegubowa, mamy do czynienia z geometrią wykresu momentów, który osiąga wartości zerowe, tam gdzie wykres przechodzi na drugą stronę osi konstrukcji. Prowadzi to do bardziej skomplikowanej formy, która w miejscu odciągów zwiększa swój przekrój. Istotny jest również kształt wykresu momentów. Formy posiadają linie proste tam, gdzie nie występują obciążenia siłami skupionymi od podwieszonych lin oraz łagodnie zaokrąglone krawędzie tam, gdzie liny występują. Ponownie, wyjątek stanowi Samuel Beckett Bridge. Na zakrzywionym (a nie prostokreślnym) wsporniku nie jest wyraźna forma przeniesienia wykresu parabolicznego, ze względu na krzywiznę osi wspornika. Mimo to, dodanie odciągów, a więc dodatkowej podpory, sprawia że wykres momentów staje się bardziej urozmaicony co wpływa na dużo bardziej wyraźną różnicę otrzymanego kształtu, względem oryginalnych projektów.

Porównując wyniki dotyczące Puente del Alamillo da się zauważyć, że zaproponowana forma prezentuje dużo wyższy poziom zróżnicowania ilości materiału na całej długości wspornika (ryc. 12). Oryginalny pylon zwęża się w sposób nieznaczny. W przypadku Puente de La Mujer da się zauważyć wysokie podobieństwo form. Zmiana rozłożenia materiału jest bardzo widoczna, a proporcje zbliżone do przedstawionych na rysunku (ryc. 13). Sundial Bridge również posiada zwężającą się formę, już na pierwszy rzut oka przypominającą otrzymaną w analizie kształt (ryc. 14). Największą różnicę pomiędzy oryginałem, a zaprojektowaną formą pokazuje przykład Samuel Beckett Bridge (ryc. 15). Santiago Calatrava nie wprowadził minimalizacji materiału tam, gdzie w analizach wykres momentów osiąga wartość zerową. Nie wprowadzono również zwiększenia ilości materiału w miejscu montażu odciągów.

7. WNIOSKI

Opisane pylony mostowe Santiaga Calatravy zostały omówione w sposób chronologiczny. W przypadku mostów o pylonie w kształcie diagonalnego lecz prostokreślnego wspornika, można wyciągnąć wniosek, że projektant pomimo podobieństw mostów, rozwinął myśl projektową. W przypadku Puente del Alamillo z 1992 roku forma wspornika odciągającego liny jest intuicyjna, jednak sam wspornik nie został poddany wyraźnej optymalizacji zużytego materiału. Inaczej jest w przypadku kolejnego projektu - Puente de La Mujer. Sundial Bridge łączy w sobie ideę równoważenia sił poprzez odchylenie wspornika jak również optymalizację materiału poprzez zwężanie się pylonu w stronę swobodnego końca. Bardzo szczególnym przypadkiem jest Samuel Beckett Bridge, który choć również zwęża się ku końcowi i rozszerza ku podstawie, zdecydowanie odbiega kształtem od zaproponowanej formy. Może być to związane zarówno z nowym kierunkiem projektowania mostów przez Calatravę - odchodzi bowiem od pylonów prostokreślnych. Być może kolejne mosty o konstrukcji zakrzywionej belki, będą optymalizowane pod względem zużycia materiału. Można też przypuszczać, że Calatrava nie podjął się zaawansowanej optymalizacji materiału ze względu to, że zmienność przekroju poprzecznego mogłaby w rezultacie doprowadzić do otrzymania formy, która odbiegałaby skojarzenia z harfą stanowiącą irlandzki symbol.

Zarówno Puente de La Mujer jak i Samuel Beckett Bridge posiadają pylon nachylony w stronę kładki. Takie rozwiązanie nie jest formą intuicyjną, bowiem liny "ściągają" wspornik w stronę kładki. Wydawać by się mogło, że naturalną formą byłby pylon odchylony od kładki w formie przeciwwagi grawitacji działającej na pylon względem lin. O ile w przypadku mostu Samuela Becketta można uznać inspirację formą harfy, o tyle w przypadku Puente de La Mujer forma nachylona do wewnątrz może wiązać się głównie ze względami praktycznymi. Obrotowa kładka przemieszcza się wraz z pylonem, zamiast zakreślać dodatkowe promienie w przestrzeni, w sytuacji gdy pylon byłby wychylony na zewnątrz. Most w Dublinie posiada widoczne rozwiązanie problemu ściągnięcia wspornika poprzez liny - w formie zewnętrznych odciągów, które równoważą siły. Puente de La Mujer wymagało z kolei "ogona" równoważącego wspornik obciążony linami, który można uznać za wzorowe odzwierciedlenie kształtu proporcji w wykresie momentów zginanego wspornika.

8. KONKLUZJA

Styl projektanta choć bardzo rozpoznawalny, wkomponowuje się w środowisko otoczenia, zarówno miejskie, jak również naturalne. Omówione mosty występują na trzech różnych kontynentach. Formy choć na pierwszy rzut oka są do siebie podobne, dzięki niuansom dopasowują się estetyką do kontekstu lokalizacji mimo ich różnorodności. Przejrzystość rozwiązań konstrukcyjnych w mostach projektu architekta może być przyczynkiem do dalszych badań w przypadku bardziej skomplikowanych obiektów projektowanych przez Santiago Calatravę.

Przeprowadzone analizy potwierdzają wagę rozumienia działania konstrukcji przez architekta. Wykorzystane metody choć tradycyjne i niewymagające użycia współczesnych narzędzi cyfrowych, wpisują się we współczesną ideę oszczędności materiału. W dobie zaawansowanych narzędzi cyfrowych umożliwiających architektom poszukiwania nowych form oraz w obliczu wysokiego poziomu skomplikowania oprogramowania przeznaczonego dla konstruktorów, tradycyjne metody szkicowe noszą ogromny potencjał.

Analiza graficzna z użyciem mechaniki budowli, dotycząca wstępnej optymalizacji materiału może stanowić pierwszy krok w odnalezieniu brakującego ogniwa pomiędzy kreowaniem możliwej do zrealizowania koncepcji, a analizą konstrukcyjną.

W dalszych badaniach autorka planuje interdyscyplinarną współpracę nad analizą zbieżności otrzymanych szkicowo form z modelami komputerowymi wykorzystującymi konstruktorskie narzędzia MES.

BIBLIOGRAPHY

- Allen, E., Michel, N. (2010) *Form and forces : designing efficient, expressive structures*. Hoboken: John Wiley a. Sons, ISBN : 978-0-470-17465-4.
- Asanowicz, A. (2008) 'How to Find an Idea? - Computer Aided Creativity' In *Architecture in Computro (26th ECAADe Conference Proceedings)* (pp. 735-742).
- Blaser, W., Frampton, K. and Nicolini, P. (1990) *Santiago Calatrava : Ingenieur-Architektur. 2.*, überarb. u. erw. Aufl. Basel: Birkhäuser Verlag, ISBN : 3-7643-2460-0.
- Borusiewicz, W. (1978) *Konstrukcje budowlane dla architektów*. Wyd. 3 zm. i uzup. Warszawa: "Arkady".
- Cichy-Pazder, E., Flaga, K., Hrabiec, A., Januszkiewicz, K. (2005) 'Estetyka konstrukcji mostowych'. Kraków: Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, ISBN 83-7242-372-5.
- Dąbrowiecki K., Santiago Calatrava- poeta szkła i stali, „Nowoczesne budownictwo inżynierskie”, maj-czerwiec 2009, s. 40-43.
- Dixit, S., Stefańska, A. (2023), 'Bio-logic, a review on the biomimetic application in architectural and structural design', *Ain Shams Engineering Journal*, 14, 101822, DOI: 10.1016/j.asej.2022.101822.
- Giedion, S. (1968) *Przestrzeń, czas i architektura, Narodziny nowej tradycji*. Warszawa: PWN.
- Holgate, A. (1986) *The art in structural design : an introduction and sourcebook*. Oxford: Clarendon Press, ISBN : 0-19-856167-9.

- Januskiewicz, K. (2012) 'O przestrzeni cyfrowej i nie tylko', *Archivolta*, 2/2012, pp. 48-55.
- Januskiewicz, K. (2016) 'Projektowanie parametryczne oraz parametryczne narzędzia cyfrowe w projektowaniu architektonicznym', *ARCHITECTURAE et ARTIBUS*, 3/2016, pp. 43-60.
- Jodidio, P. (2003) *Santiago Calatrava*. Köln: Taschen, ISBN : 978-3-8228-4711-4.
- Jodidio, P. (2009) *Calatrava : Santiago Calatrava : complete works 1979-2009*. Impr. Hong Kong: Taschen, ISBN : 978-3-8365-1023-3.
- Kolendowicz, T. (1993) *Mechanika budowy dla architektów*. Warszawa: Arkady, ISBN: 83-213-3608-6.
- Kozikowska, A. (2010) *Forma a konstrukcja mebli. Meble o konstrukcji wspornikowej*, *ARCHITECTURAE et ARTIBUS*, 4/2010, pp. 45-55.
- Leaders Magazine (2011), VOLUME 34, Number 3,
https://www.leadersmag.com/issues/2011.3_Jul/Defining%20Luxury/LEADERS-Santiago%20Calatrava.html (Accessed: 24-08-2023).
- Liżewska, M. (2019) 'W poszukiwaniu formy – Antoni Gaudi i doświadczalne modelowanie konstrukcji', *ARCHITECTURAE et ARTIBUS*, 1/2019, pp. 18--29, DOI: [10.24427/aea-2019-vol11-no1-02](https://doi.org/10.24427/aea-2019-vol11-no1-02)
- Salvadori, M.G. (2001) *Dlaczego budynki stoją : siła architektury*. Warszawa: MURATOR (Biblioteka Architekta), ISBN : 83-912841-4-X.
- Salvadori, M.G., Heller, R. (1975) *Structure in architecture : the building of buildings*. 2nd edn. Englewood Cliffs: Prentice-Hall (Prentice-Hall international series in architecture), ISBN : 0-13-854109-4.
- Stefańska, A., Rokicki, W. (2022) 'Architectural Design Optimisation in Reticulated Free-Form Canopies', *Buildings*, 12, 1068, DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings12081068>
- Tzonis, A. Caso Donadei, R. (2005) *Calatrava bridges*. London: Thames and Hudson, ISBN : 978-0-500-28579-4.
- Wrana, J. (2016) 'Estetyka rozwiązań mostowych Santiago Calatravy', *Budownictwo i Architektura*, 15 2016, pp. 169-176.

AUTHOR'S NOTE

Milena Wiercińska is an employee of the Faculty of Architecture at the Białystok University of Technology. The author's scientific interests concern the relationship of architectural form with construction and methods of preliminary design for architects. He pays special attention to conducting didactic classes in technical subjects in a way that develops creativity and courage in intuitive methods of searching for architectural form.

O AUTORZE

Milena Wiercińska jest pracownikiem Wydziału Architektury Politechniki Białostockiej. Zainteresowania naukowe autorki dotyczą relacji formy architektonicznej z konstrukcją oraz metod projektowania wstępnego przeznaczonych dla architektów. Szczególną uwagę poświęca prowadzeniu zajęć dydaktycznych z przedmiotów technicznych, w sposób rozwijający kreatywność oraz odwagę w intuicyjnych metodach poszukiwania formy architektonicznej.

Contact | Kontakt: m.wiercinska@pb.edu.pl