

W POSZUKIWANIU FORMY – ANTONI GAUDI I DOŚWIADCZALNE MODELOWANIE KONSTRUKCJI

Milena Liżewska

Politechnika Białostocka, Wydział Architektury, ul. O. Sosnowskiego 11, 15-893 Białystok
E-mail: m.lizewska@pb.edu.pl

DOI: 10.24427/aea-2019-vol11-no1-02

EXPERIMENTAL MODELING IN THE SEARCH FOR A FORM BASED ON THE WORK OF GAUDI

Abstract

The article describes the design solutions developed by Antoni Gaudi on the basis of physical spatial models built by the architect, in which he focuses on the search of the optimum form in the form of the principle of “honesty of architecture”. The current computer modelling techniques are discussed, referring back to the past capabilities of an architect and to the current techniques employed in continuations of Gaudi’s works. The results of an experiment that compared schematic physical models of a chain loaded with self-weight and forces concentrated with digital models created in a software dedicated to the analysis of simple bar systems are presented. An analysis of the current methods of design used, among others, in the construction of the Sagrada Familia, a respect for Gaudi’s principles can be observed. There is a consistency in the use of the philosophy of the search for a form, with modern tool being employed. The obtained test results concerning the certainty prove the validity of using traditional methods of construction of physical models at the stage of preliminary design of a form consistent with the construction’s action.

Streszczenie

W artykule omówiono rozwiązania konstrukcyjne, opracowane przez Antoniego Gaudiego na podstawie fizycznych modeli przestrzennych wykonanych przez architekta, w których skupia się on na poszukiwaniu formy optymalnej, w imię zasady „szczerości architektury”. Omówiono dzisiejsze techniki modelowania komputerowego, odnosząc się do dawnych możliwości architekta oraz dzisiejszych technik stosowanych w kontynuacji prac Gaudiego. Zaprezentowano wyniki przeprowadzonego eksperymentu, w którym porównane zostały schematyczne modele fizyczne łańcucha obciążonego ciężarem własnym i siłami skupionymi do modeli cyfrowych w programie do analizy prostych układów prętowych. Analizując współczesne metody projektowania, stosowane m.in. przy kontynuacji budowy Kościoła Sagrada Familia, da się zauważyć poszanowanie założeń Gaudiego. Wyraźna jest konsekwencja w stosowaniu filozofii poszukiwania formy, przy zastosowaniu współczesnych narzędzi. Otrzymane rezultaty eksperymentu dotyczące krzywej łańcuchowej dowodzą zasadności stosowania tradycyjnych metod budowania modeli fizycznych na etapie projektowania wstępnego formy zgodnej z pracą konstrukcji.

Keywords: prototype; form finding; truth of architecture; construction of architecture; Antoni Gaudi

Słowa kluczowe: prototyp; poszukiwanie formy; szczerść konstrukcji; architektura konstrukcji; Antoni Gaudi

WPROWADZENIE

Witruwiusz w swojej triadzie wymienia trzy pożądanymi cechy architektury: trwałość, użyteczność i piękno. Wszystkie te dziedziny powinny się ze sobą wiązać. Nie da się zapewnić budowlom trwałości bez zastosowania odpowiedniego typu konstrukcji. Warto więc znajdować takie jej rodzaje, które obok użyteczności będą piękne w swojej formie, a także idei. Celem

pracy jest analiza wybranych przykładów twórczości (Sagrada Familia oraz Colonia Güell) Antoniego Gaudiego w kontekście odnajdowania formy architektonicznej zgodnej z pracą konstrukcji, a także zbadanie aktualności założeń oraz metod projektowania wstępnego stosowanych przez architekta w postaci modeli fizycznych.

Największy zawód spotyka projektanta wtedy, gdy nie może doprowadzić do dokładnej realizacji swojej wizji. Dzieje się tak często, kiedy elementy składowe budynku wymagają zastosowania innych wymiarów przekroju i długości niż te, które zostały zawarte w koncepcji. Rozwiązaniem często okazuje się możliwość tworzenia i badania prototypów, zarówno w kontekście konstrukcyjnym, jak i architektonicznym. Na rozwój tradycyjnych technik wykonywania prototypów architektonicznych niewątpliwie miała wpływ rewolucja przemysłowa. Rozwój przemysłu doprowadził do zwiększenia dostępności narzędzi oraz urządzeń służących obróbce mechanicznej. Dało to wszystkim projektantom i wykonawcom więcej możliwości. Przed powstaniem pierwszych komputerów architekci posługiwali się prostymi narzędziami manualnymi, jak prawdziwi rzemieślnicy [M. Burry, J. Burry 2016, s. 23]. Jednym z najsłynniejszych zwolenników prototypowania manualnego był Antoni Gaudi. Dzisiejsi projektanci mają wybór między tworzeniem prototypów fizycznych i komputerowych. Część projektantów łączy obydwie formy. Każda z nich daje nam inne możliwości, jednak idea ich stosowania jest wciąż taka sama.

1. INSPIRACJE GAUDIEGO

Na twórczość Gaudiego ogromny wpływ warty idee postulowane przez Johna Ruskina i Augustusa Welby'ego Pugina. Pierwszy z nich głosił: „*Jeśli budynek jest naturalny i nie ma w nim kłamstwa ani jakichkolwiek fałszowań, to dzięki temu właśnie jest on piękny*” [Á. Moravánszky 1983 s. 9]. Zamiłowanie do badania pracy konstrukcji pozwoliło Gaudiemu na wcielenie w życie idei Pugina, które do tej pory znalazły miejsca jedynie w słowie pisanim¹. U Antoniego Gaudiego można zauważyć dwa powody formowania charakterystycznej dla twórcy architektury: inspirację naturą² – widoczną w sposób dosłowny w detalu architektonicznym – oraz szczerłość architektury. Zgodnie z „Siedmioma latarniami” architektury Johna Ruskina jest to tworzenie form zgodnych z pracą konstrukcji. Siłą rzeczy również ma to ogromny związek z naturą, której praw nie da się oszukać. Podczas gdy inni architekci epoki romantyzmu i secesji wprowadzali nowy styl jedynie do ornamentyki, Gaudi szukał natury także w kształtowaniu całych przestrzeni. Architekt nie ogra-

niczał się do stosowania organicznych form. Doświadczalnie badał optymalne kształty dla danego typu konstrukcji, pozwalając, aby natura rozwiązywała za niego skomplikowane równania matematyczne³.

2. KONSTRUKCJE GAUDIEGO NA PODSTAWIE MODELI TRADYCYJNYCH

Zdaniem węgierskiego architekta Zoltana Farkasdy „*Nie jest architektem ten, kto nie zna podstawowych praw mechaniki budowli. Jest to tylko projektant formy*” [T. Kolendowicz 1993, s. 12]. Jednym z architektów, którego dzieła silnie wyrażają zrozumienie natury konstrukcji był Antoni Gaudi. Jednak nie tylko ze względów praktycznych hiszpański architekt poświęcił uwagę badaniu praw mechaniki budowli. Z jego dziełami wiąże się głęboka idea, która być może stanowi granicę pomiędzy byciem konstruktorem a architektem.

2.1. Łuki i krzywa łańcuchowa

Charakterystyczną metodą projektowania wstępnego, którą posługiwał się Antoni Gaudi, jest zastosowanie właściwości krzywej łańcuchowej. Z praktycznego punktu widzenia krzywa ta ma formę liny (łańcucha), która przyjmuje kształt wymuszony przez obciążenie. Lina sama znajduje kształt równowagi, w którym jest w stanie przenieść dane obciążenie. Układ liny obciążonej ciężarem własnym wynika z parametrów dotyczących samej liny: właściwości materiału (może to być lina o gęstym splocie lub łańcuch o sztywnych przęsłach połączonych w sposób przegubowy), długości liny i rozpiętości, w jakiej zostanie zawieszona. Inne czynniki to rozkład oraz wielkość sił skupionych lub obciążenia ciągłego. W dziedzinie konstrukcji, gdzie abstrakcyjny czynnik jest wykluczony, nie możemy pominąć podstawowego parametru, jakim jest działanie grawitacji. Gaudi wykorzystywał prawa fizyki w sposób doświadczalny, wykonując modele przestrzenne, których badanie wpływało na ewolucję jego koncepcji projektowych. Proporcje liny, która przyjęła dany kształt pod ciężarem własnym, zastosowane dla łuku stanowiącego jej lustrzane odbicie, stanowią idealną formę konstrukcji. Głównymi przykładami zastosowania tej metody są niedokończony kościół w Colonia Güell oraz najwybitniejsze dzieło architekta – Sagrada Família.

¹ Obiekty projektowane przez Pugina nie różniły się w znaczący sposób od pałaców i kościołów „ubranych w neogotycki płaszcz”, a więc inspirowanych gotyką, w których stosowano imitacje i ozdoby [Moravánszky Á. 1983, s. 9].

² Styl Gaudiego został ukształtowany również przez jego długotrwałe obcowanie z naturą w latach młodości [Barnas J. 2010, s. 14].

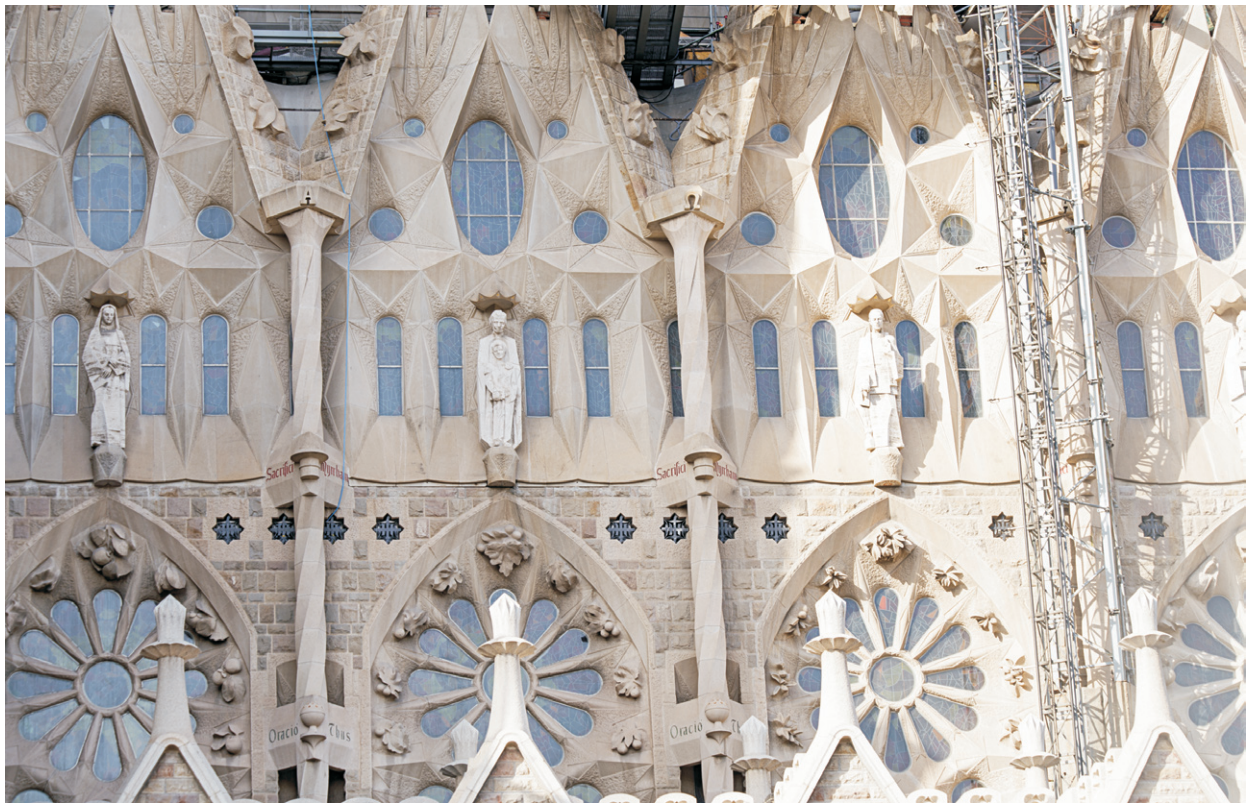
³ Zamiast ręcznie obliczać wyniki z parametrycznego wzoru krzywej łańcuchowej, Gaudi mógł doświadczalnie określić kształt krzywej łańcuchowej dzięki sile grawitacji działającej na sznurki.



Ryc. 1. Geometryczne powierzchnie we wnętrzu świątyni Sagrada Família w Barcelonie; źródło: © matteocozzi – stock.adobe.com
Fig. 1. Geometric surfaces in the interior of the Sagrada Família in Barcelona; source: © matteocozzi – stock.adobe.com



Ryc. 3. Pochylone kolumny świątyni Sagrada Família w Barcelonie; źródło: © sergiyuzhko – stock.adobe.com
Fig. 3. Diagonal columns of the Sagrada Família in Barcelona; source: © sergiyuzhko – stock.adobe.com



Ryc. 2. Geometryczny kształt fasady Sagrada Família; źródło: © images and videos – stock.adobe.com
Fig. 2. The geometric shape of the Sagrada Família facade; source: © images and videos - stock.adobe.com



2.2. Zakrzywione powierzchnie geometryczne

Podobne do lin narzędzie pozwalające na znajdowanie optymalnej formy stanowiła dla Gaudiego mokra tkanina. Dzięki zastosowaniu gipsu architekt mógł utrwalić otrzymany kształt stanu równowagi tkaniny, a po odwróceniu wykonanej makiety otrzymać prototyp sklepienia. W projektach architekta pojawia się wiele elementów, które podobnie jak krzywa łańcuchowa mogą zostać zdefiniowane w kontekście matematycznym. Są to głównie powierzchnie, takie jak: stożki, paraboloidy hiperboliczne, paraboloidy, hiperboloidy oraz helikoidy [F. Nassery 2015, s. 133]. Pomimo doświadczalnego odnajdywania takich kształtów matematyczny kontekst nie był obcy Gaudiemu. Precyzyjnie potrafił nazywać otrzymane kształty powierzchni i zauważał je w otaczającym go świecie: w przyrodzie („*W sitowiu, trzcinie, czy kościach*” [F. Nassery 2015, s. 134]) oraz w skrzyśonej sylwetce człowieka, nazywając ją helokoidą [Á. Moravánszky 1983, s. 9].

Nie tylko tkanina pozwalała architektowi na wykonywanie modeli sklepień. Nitki czy łańcuchy mogą pozornie nie kojarzyć się z konstrukcjami powierzchniowymi. Gaudi w swoich modelach szukał schematu działania, nie zawsze perfekcyjnego odzwierciedlenia. Potrafił w szkieletowej makiecie widzieć więcej niż

przeciętny obserwator. Powierzchnie zakrzywione, które analizował nie tylko z użyciem tkanin, ale także nici, mają swoje odpowiedniki w matematyce. Podstawowe rodzaje powłok w konstrukcjach składają się z linii, wśród których możemy wyróżnić grupy podobne pod względem kształtu oraz sposobu pracy. Grupy te tworzą rodziny linii.

Powierzchnia walcowa to prostopadle przecinająca się rodzina linii prostych i rodzina linii zakrzywionych (pracujących jak łuki) [T. Kolendowicz 1993, s. 50]. Powierzchnia hiperboloidy parabolicznej to z jednej strony rodzina linii łukowych i rodzina linii linowych. Z drugiej strony powierzchnię taką da się wymodelować z użyciem jedynie linii prostych. Choć modele przestrzenne Gaudiego wiążą się z działaniem doświadczalnym, testowym i częściowo intuicyjnym, w pracach architekta da się zauważyć wysokie zrozumienie możliwości, jakie daje nam matematyka, a w dużej mierze jej dziedzina, jaką jest geometria. Widoczne jest to w projektowanych wnętrzach (ryc. 1) i fasadach (ryc. 2).

2.3. Nietypowe słupy i przenoszenie sił

Obok krzywej łańcuchowej jednym z najbardziej popularnych przykładów konstrukcji stosowanych przez architekta, które wynikały z jego badań, są łuki oraz pochyle słupy (ryc. 3 oraz 4).



Ryc. 4. Pochyle słupy w Parku Güell; źródło: © Yury Zap – stock.adobe.com
Fig. 4. Sloped posts in Park Güell; source: © Yury Zap - stock.adobe.com



Ryc. 5. Geometryczna bryła z pochylonymi słupami w Colonia Güell; źródło: © alzamu79 – stock.adobe.com
Fig. 5. Geometric solid with inclined pillars in Colonia Güell; source: © alzamu79 – stock.adobe.com

Poszukiwania Gaudí rozpoczął od wcześniej przez niego podziwianych konstrukcji gotyckich. Kiedy przeanalizował średniowieczne budowle, zauważył nadmiar łuków podporowych. Podążając za ideą szczerości architektury, postanowił odnaleźć lepszy sposób przeniesienia obciążeń łuku, tak aby wyeliminować wszystkie zbędne elementy. Nie chcąc rezygnować z przyjętej wysokości łuków, należało znacznie zwiększyć grubość ścian w celu wyeliminowania siły nacisku bocznego. Po wielu próbach Gaudí odkrył, że rozwiązanie kryje się w przeniesieniu wypadkowej siły, wynikających z pracy łuku: rozporu (siła pozioma) oraz ściskania (siła pionowa). Kąt nachylenia siły wypadkowej zależy od wyniosłości łuku, który ją generuje. Gaudí zastosował pochyłe słupy, wizualnie stanowiące przedłużenie łuku.

Taki rodzaj konstrukcji architekt wprowadził w projekcie krypty w Colonia Güell (ryc. 5). Wykonał przedtem model przestrzenny w skali 1:25 (wysokości 4 m) [Á. Moravánszky 1983, s. 27] z nitki przyklejonych do sufitu. Nici pełniły funkcję konstrukcji sklepienia, łuków i filarów. Jako obciążenia zastosował ołowiane ciężarki, których wagę dobierał proporcjonalnie do szacowanego ciężaru i obciążeń. Naciągnięte siłą grawitacji nitki tworzyły przestrzenny model na zasadzie krzywej

łańcuchowej. Sfotografowana siatka z ciężarkami oglądana w pozycji odwróconej prezentowała model szkieletu konstrukcji idealnej, ponieważ osiągnięta forma prezentowała stan równowagi, zbadany dzięki analogii między krzywymi łańcuchowymi a łukami.

Podobne zadanie konstrukcyjne mają słupy przypominające rozgałęzione drzewa (ryc. 6). Wspornikowe końce, na których opierają się fragmenty sklepień, biegnąc jak gałęzie, przenoszą ciężar prosto do „pnia”, którym jest główny słup. Nie zawsze element główny powinien być pionowy – jego oś podłużna jest usytuowana w kierunku wektora wypadkowej siły, której składowe tworzone są przez „gałęzie”.

3. WSPÓŁCZESNE TECHNOLOGIE A TWÓRCZOŚĆ GAUDIĘGO

Antoni Gaudí w latach młodości miał okazję przyglądać się pracy ojca, który był kotlarzem. Być może dzięki temu architekt jeszcze w czasach, kiedy brak było programów komputerowych do projektowania w przestrzeni trójwymiarowej, doskonalił zdolność rozwiązywania problemów w trakcie pracy z modelami. Architekt nie był uzależniony od dwuwymiarowych rysunków stanowiących osobne opracowania. Swoje



Ryc. 6. Słupy we wnętrzu świątyni Sagrada Família w Barcelonie; źródło: © Achim Baqué – stock.adobe.com

Fig. 6. Columns inside the Sagrada Família in Barcelona; source: © Achim Baqué - stock.adobe.com

projekty traktował kompleksowo, co znacząco wpływało na ewolucję każdego składowego elementu. Nie wszystko da się oddać za pomocą rysunku, tak samo jak nie wszystko za jego pomocą da się zbadać. W dzisiejszym świecie ta prawda również ma swoje odbicie. Architekci coraz częściej używają programów komputerowych, w których mogą pracować w przestrzeni trójwymiarowej.

Dla wszelkich prototypów i współczesnych makiet – nie tylko w branży architektonicznej – największe znaczenie ma postęp technologiczny. Można wyróżnić trzy jego znaczące skutki, a każdy z nich odnieść do twórczości Gaudiego oraz jego następców kontynuujących prace nad największym dziełem architekta – świątynią Sagrada Família.

3.1. Bardziej zaawansowane i dokładne modele fizyczne

Znaczącym skutkiem postępu technologicznego jest wprowadzenie i udoskonalanie urządzeń pozwalających wykonywać fizyczne modele przestrzenne: drukarek 3D, frezarek, ploterów, dzięki którym możemy obecnie tworzyć zminiaturyzowane wersje projektowanych obiektów w stopniu wysoce oddającym nie tylko założenie przestrzenne, ale również detal architektoniczny.

Dzisiejsze możliwości nie wykluczają również tworzenia makiet w skali 1:1. Na potrzeby dalszych prac nad ukończeniem budowli kościoła Sagrada Família została wykonana pełnowymiarowa makietka kolumn z pianki poliuretanowej. [M. Burry, J. Burry 2016, s. 28]. Umożliwiło to wykorzystanie modelu w oryginalnym, docelowym miejscu przed ostatecznym zleceniem kolumnady wykonanej z granitu, a więc materiału wysoce bardziej kosztownego zarówno w surowcu jak i obróbce. Model pozwolił nie tylko na przeanalizowanie proporcji, ale też gry światła, co w przestrzeni komputerowej byłoby możliwe w teorii, ale nie dałoby stuprocentowego odzwierciedlenia. Wykorzystanie tej metody pozwoliło na sprawdzenie idei projektowych i odbioru wizualnego kolumnady oraz ocenę estetyki całości obiektu.

3.2. Precyzyjne obliczenia konstrukcyjne

Drugi skutek wielkich możliwości, jakie dają nam komputery, to przeniesienie metody elementów skończonych do środowiska cyfrowego. Nie musimy sami przeprowadzać skomplikowanych obliczeń na macierzach. Komputer, używając funkcji interpolacyjnej, przeprowadza szacunkowe obliczenia w miejscach między węzłami siatki podziału komputerowego modelu [G. Rakowski, Z. Kacprzyk 2016, s. 13]. Im gęstsza

siatkę zakładamy, tym obliczenia są dokładniejsze, ale też dłuższe i pochłaniające więcej mocy obliczeniowej komputera. Możemy sami zdecydować, jak dokładne rozwiązanie będzie dla nas optymalne. MES jest szczególnie ważną i pomocną metodą przy projektowaniu konstrukcji. O ile Gaudi był w stanie za pomocą doświadczenia obserwować zachowanie konstrukcji, nie miał możliwości dokładnego zbadania naprężeń w projektowanych elementach. Architekt w wykonanych modelach mógł zauważyć, w których miejscach liny i sznury są mniej naprężone (np. przyjmując między siłami skupionymi nadal obły od ciężaru własnego kształt), a w których bardziej (naprężona lina między siłami skupionymi przyjmuje kształt linii prostej). Mógł również dotykać elementów modelu jak strun. Bez przeprowadzania obliczeń z uwzględnieniem planowanych do zastosowania materiałów Gaudi nie miał jednak możliwości bardzo dokładnego zbadania pracy konstrukcji. Współcześni architekci i konstruktorzy dzięki programom do analizy konstrukcji wykorzystującym metodę elementów skończonych mogą przeprowadzać precyzyjne symulacje elementów i całych systemów konstrukcyjnych, zmieniając parametry: rodzaj użytego w modelu materiału, jego klasę, przekroje, rodzaj obciążeń itp. Daje to możliwość zweryfikowania skuteczności zastosowanych rozwiązań oraz pozwala w jeszcze dokładniejszym stopniu podążać – jak Antoni Gaudi – za ideą szczeroci architektury, a więc projektowania z optymalnym użyciem materiału. Oczywiście ma to swoją cenę: w tworzeniu modeli komputerowych wymagane jest specjalistyczne, nie zawsze darmowe oprogramowanie oraz wysoki poziom znajomości obsługi tych programów.

3.3. Sprawniejsza realizacja i wielozadaniowość maszyn

Jednym z najnowszych osiągnięć technologicznych są obecnie roboty. Stanowią one platformę do wykonywania wielu operacji. Mogą łączyć funkcje drukarek 3D, frezarek i wycinarek CNC⁴, a nawet fizycznie pracować „za człowieka”. Mark Burry od 1992 zaangażowany jest we wdrażanie robota do prac w kamieniu przy realizacji świątyni Sagrada Familia. Roboty zwiększają wydajność i precyzję realizacji.

Dzięki automatyzacji dzisiejsza technologia pozwala na kontynuację systemu pracy Gaudiego, dopełniając jego ideę o przenikaniu się etapu projektowania i realizacji. Pozwala metodą prób i błędów wprowadzać zmiany i udoskonalenia w obydwu z tych faz tworzenia.



Ryc. 7. Fizyczny model przestrzenny Gaudiego, w którym liny dostosowują się kształtem do obciążenia umieszczonego w workach; źródło: © tillnm – <https://www.flickr.com/photos/tillnm/3209875667/in/photostream/> dostęp: 14.02.2019

Fig. 7. Gaudi's physical spatial model, in which the links adapt in shape to the load placed in the bags; source: © tillnm - <https://www.flickr.com/photos/tillnm/3209875667/in/photostream/> [accessed: 14/02/2019]

4. PORÓWNANIE METOD TRADYCYJNYCH I KOMPUTEROWYCH W POSZUKIWANIU FORMY ŁUKU NA PRZYKŁADZIE KRZYWEJ ŁAŃCUCHOWEJ PODCZAS PROJEKTOWANIA WSTĘPNEGO

Ponieważ Antoni Gaudi tworzył projekty w czasie trwania prac, w zależności od etapu, można wyróżnić dwa typy makiet. Pierwszy z nich to tworzenie modeli badających konstrukcję i pozwalających na znalezienie formy wyjściowej (ryc. 7). Drugi to makietki detali. Chcąc porównać wyniki możliwe do otrzymania w tradycyjnych metodach modelowania z wynikami symulacji komputerowej, przeprowadzono proste doświadczenie, odnosząc się do modeli Gaudiego badających konstrukcję. Przeanalizowano zachowanie łańcucha pod obciążeniem w postaci ciężaru własnego oraz sił skupionych. Wyniki porównano z efektami analogicznej symulacji komputerowej. Dla zachowania czytelności zostały one przedstawione w formie grafik prezentujących układ lin, zarówno w przypadku modelu komputerowego, jak i fizycznego.

4.1. Warunki fizyczne i komputerowe

We wszystkich przypadkach fizycznych przyjęto ten sam łańcuch, którego końce znajdują się na jednej

⁴ Computerized Numerical Control (ang.) – komputerowe sterowanie urządzeń numerycznych.

wysokości, a szerokość między ich mocowaniami nie ulega zmianie. Analogicznie wszystkie przykłady cyfrowe analizowane są na jednym rodzaju modelu. W naturze stosowane siły skupione to ołowiane ciężarki o kształcie kuli mocowane za pomocą cienkiego drutu. W przypadku poszukiwania obciążenia o niewielkiej masie w stosunku do łańcucha przyjęto ciężarek wykonany ze srebrnego zaczepu i perły o kulistym kształcie. Ze względu na schematyczny charakter doświadczenia oraz założenie dotyczące projektowania wstępnego analizy komputerowe wykonane zostały w prostym, darmowym programie Bridge Building Game, wykorzystującym metodę elementów skończonych, służącym do przeprowadzania symulacji płaskich układów prętowych. W wybranym programie waga każdego węzła układu jest taka sama. Ciężar całej konstrukcji zawarty jest w węzłach, nie ma na niego wpływu długość poszczególnych prętów. Ze względu na dwuwymiarowe środowisko o kwadratowej siatce lina została wymodelowana jako zbiór prętów połączonych ze sobą przegubowo. Przed uruchomieniem animacji każdy model ma z tego względu kształt trójkąta.

Obciążając łańcuch siłami skupionymi zarówno w programie, jak i w naturze, obrano obciążenia różnione jako: małe i duże.

4.2. Symulacje i porównanie wyników

- Analiza bez wyróżniania proporcji obciążenia

Łańcuch obciążony ciężarem własnym

W pierwszym przypadku łańcuch obciążony ciężarem własnym przybiera obły symetryczny kształt. Kąt nachylenia liny względem poziomu stale wzrasta wraz ze zbliżaniem się do miejsc zaczepów. W analizie komputerowej otrzymujemy analogiczne wyniki. Na rycinie 8 przedstawiono graficznie oznaczenie kątów nachylenia. W modelu komputerowym $\alpha_1 < \beta_1$, podobnie w modelu fizycznym $\alpha_2 < \beta_2$. W kontekście architektonicznym odwrócony model stanowiłby w obydwu przypadkach kształt równowagi łuku pod obciążeniem własnym.

Łańcuch obciążony siłami skupionymi

Łańcuch fizyczny zostaje obciążony pięcioma siłami skupionymi rozmieszczonymi w równych odstępach. Analogicznie obciążony jest łańcuch w modelu komputerowym: między każdym obciążeniem i/lub zaczepem znajduje się tyle samo równych przęseł. Da się zaobserwować analogiczne do poprzedniego przykładu stosunki kątów nachylenia liny (ryc. 9): $\alpha_3 < \beta_3 < \gamma_3$ oraz $\alpha_4 < \beta_4 < \gamma_4$. W modelu fizycznym widoczne jest większe naprężenie liny między ciężarkami – łańcuch przyjmuje kształt prostokreślny. W modelu cyfrowym elementy nie naprężają się aż do wyprostowania prze-

seł, jednak kanty w miejscach obciążenia siłą skupioną są wyraźniejsze niż delikatne zaoblone kształty łańcucha między nimi. Chcąc wykorzystać poniższy przykład podczas projektowania łuku, konstrukcja mogłaby być obciążona pięcioma siłami skupionymi, np. w postaci dodatkowych rzeźb.

- Analiza z wyróżnieniem proporcji obciążenia

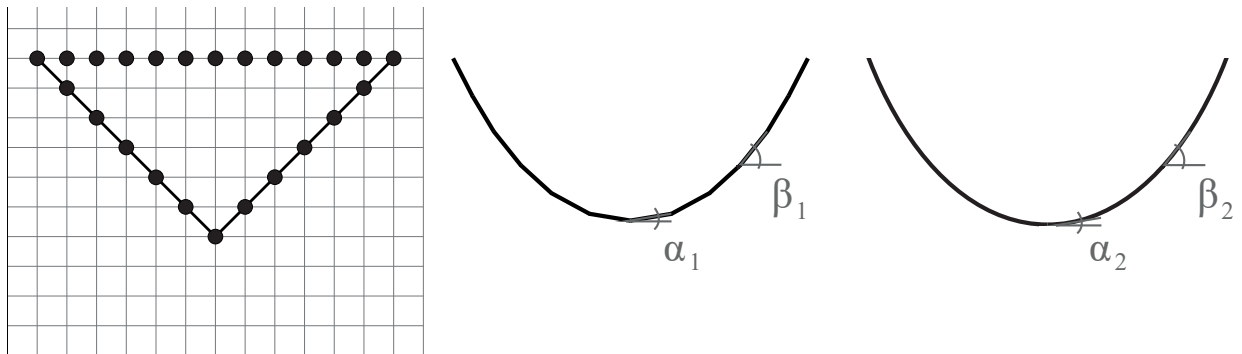
Łańcuch obciążony jedną siłą skupioną: zmiana obciążenia a deformacja

Analizując łańcuch obciążony jedną siłą skupioną, zarówno w przypadku mniejszej siły (ryc. 10), jak i większej (ryc. 11), na modelu fizycznym pod siłą skupioną pojawia się kant. Podobnie dzieje się w przypadku modelu komputerowego. Różnica, jaką widzimy, to ponownie większe naprężenie łańcucha w modelu fizycznym. Pod mniejszą wartością siły (perła w srebrnym okuciu) kształt między ciężarkiem a zaczepami jest obły, pomimo kantu, jaki wywołuje ciężar perły (ryc. 10). W przypadku obciążenia łańcucha fizycznego ołowianą kulką, następuje naprężenie łańcucha, który przyjmuje kształt trójkąta (ryc. 11). W modelu komputerowym również da się zaobserwować większe naprężenie łańcucha przy zastosowaniu większego obciążenia (kształt łańcucha zbliża się do trójkąta: $\alpha_5 < \alpha_7$ oraz $\beta_5 < \beta_7$, ale nie prostuje się tak bardzo jak w modelu fizycznym).

Łańcuch obciążony dwiema siłami skupionymi: zmiana obciążenia a deformacja

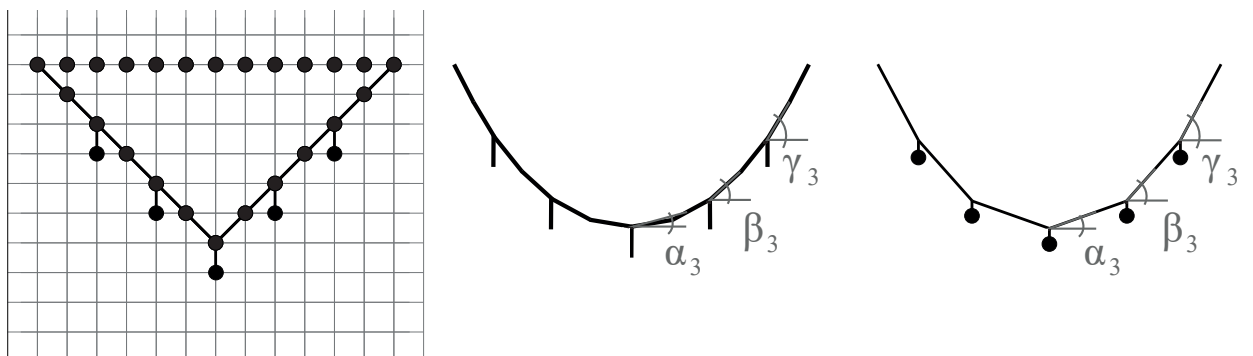
Deformacje modeli fizycznych w przypadku obciążenia dwiema siłami skupionymi: mniejszymi w postaci pereł i większymi w postaci kulek ołowianych w stosunku do poprzedniego przykładu ukazują nam pewną zależność. Przy mniejszym obciążeniu wszystkie trzy przęsła są obłe (najbardziej środkowe, gdzie $\alpha_{10} < \beta_{10}$ – ryc. 12). Przy większym obciążeniu, pomimo kształtu prostokreślnego skrajnych przęseł, środkowe przęsło pozostaje delikatnie zaoblone. Model komputerowy w obydwu przypadkach (ryc. 12, ryc. 13) nie wykazuje elementów naprężonych aż do przyjęcia kształtu linii prostej żadnego z przęseł.

Analogicznie do przykładu z jedną siłą skupioną, projektując łuk stanowiący odbicie lustrzane liny obciążonej dwiema siłami skupionymi, otrzymać możemy konstrukcję z kantami, na których zostaną oparte obciążenia miejscowe. Można wyciągnąć wniosek, że przy bardzo dużym obciążeniu siłami skupionymi łuk powinien mieć formę prostokreślnego trapezu. Wraz ze zmniejszaniem wartości sił skupionych, elementy łuku mogą stawać się zaoblone, przy czym krzywizna będzie większa w środkowym przęsle i bardziej płaska, prędzej dążąca do prostokreślności w przęsłach sąsiadujących z podporami łuku.



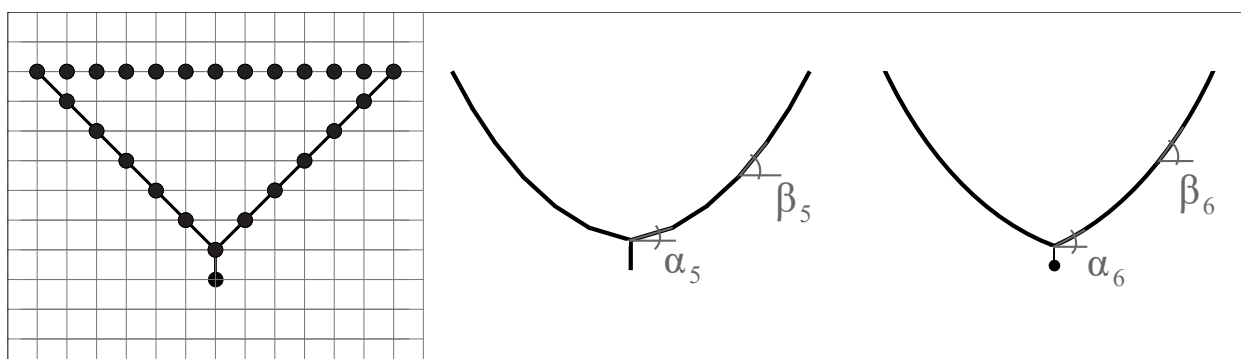
Ryc. 8. Otrzymane kształty łańcucha pod ciężarem własnym, od lewej: w wyjściowym modelu komputerowym, w deformacji komputerowej, w modelu fizycznym; źródło: opr. autorka

Fig. 8. Obtained shapes of the chain under its own weight, from the left: in the original computer model, in computer deformation, in the physical model; source: prepared by the author



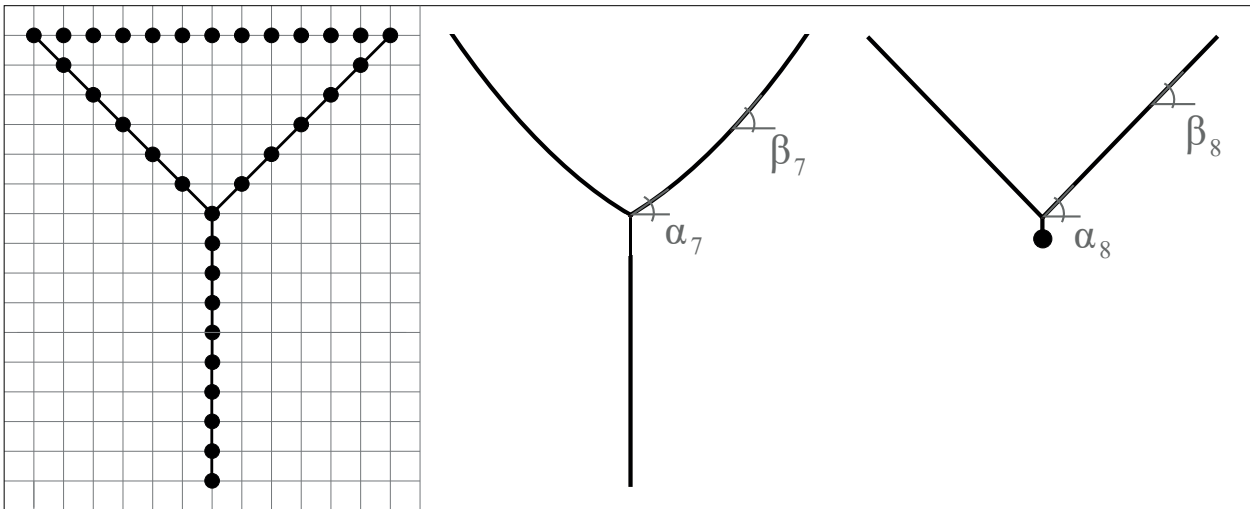
Ryc. 9. Otrzymane kształty łańcucha pod ciężarem własnym i pięcioma siłami skupionymi, od lewej: w wyjściowym modelu komputerowym, w deformacji komputerowej, w modelu fizycznym; źródło: opr. autorka

Fig. 9. Obtained shapes of the chain under its own weight and five concentrated forces, from the left: in the original computer model, in computer deformation, in the physical model; source: prepared by the author



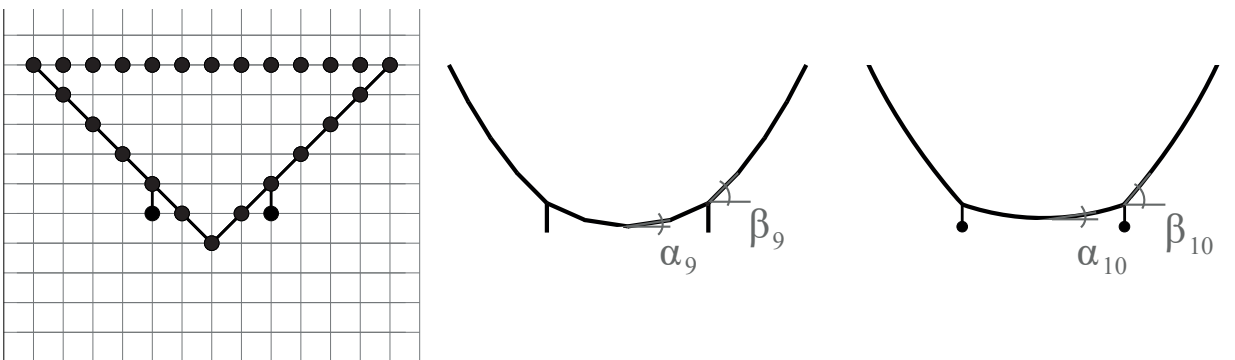
Ryc. 10. Otrzymane kształty łańcucha pod ciężarem własnym i jedną małą siłą skupioną, od lewej: w wyjściowym modelu komputerowym, w deformacji komputerowej, w modelu fizycznym; źródło: opr. autorka

Fig. 10. Obtained shapes of the chain under its own weight and one small concentrated force, from the left: in the original computer model, in computer deformation, in the physical model; source: prepared by the author



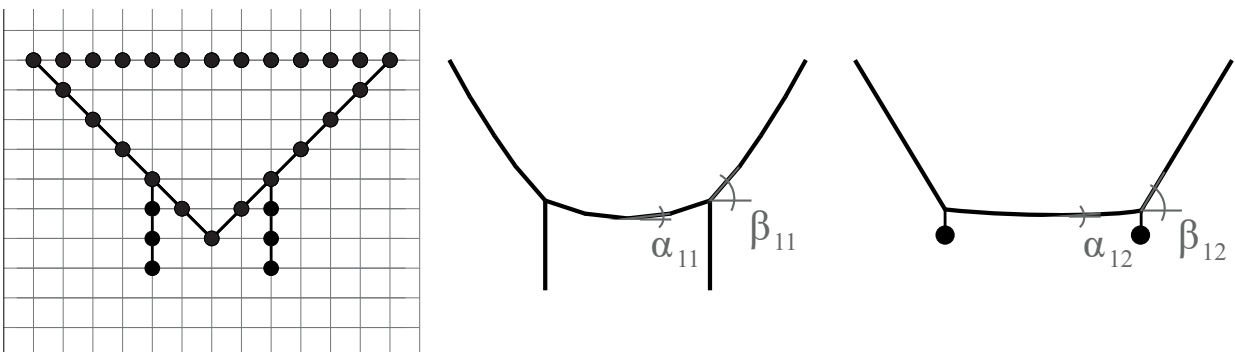
Ryc. 11. Otrzymane kształty łańcucha pod ciężarem własnym i jedną dużą siłą skupioną, od lewej: w wyjściowym modelu komputerowym, w deformacji komputerowej, w modelu fizycznym; źródło: opr. autorka

Fig. 11. Obtained shapes of the chain under its own weight and one high concentrated force, from the left: in the original computer model, in computer deformation, in the physical model; source: prepared by the author



Ryc. 12. Otrzymane kształty łańcucha pod ciężarem własnym i dwoma małymi siłami skupionymi: w wyjściowym modelu komputerowym, w deformacji komputerowej, w modelu fizycznym; źródło: opr. autorka

Fig. 12. Obtained chain shapes under their own weight and two small concentrated forces: in the original computer model, in computer deformation, in the physical model; source: prepared by the author



Ryc. 13. Otrzymane kształty łańcucha pod ciężarem własnym i dwoma dużymi siłami skupionymi: w wyjściowym modelu komputerowym, w deformacji komputerowej, w modelu fizycznym; źródło: opr. autorka

Fig. 13. Obtained chain shapes under their own weight and two high concentrated forces: in the original computer model, in computer deformation, in the physical model; source: prepared by the author

4.3. Wnioski

W przypadku podstawowego zachowania prostego układu łańcucha zawieszono na dwóch końcach wyniki są zbliżone, ale nie identyczne. Zgadniają się poniższe cechy modeli:

- kształt pod obciążeniem ciągłym od ciężaru własnego jest obły, jego kąty nachylenia względem poziomu wzrastają wraz ze zbliżaniem się łańcucha do zaczepów,
- siły skupione powodują powstawanie kantów w kształcie łańcucha,
- małe wartości sił skupionych powodują niewielkie naprężenie łańcucha między występowaniem tych sił, a więc pozwalają na zachowanie obłości wynikającej z kształtu przyjmowanego pod obciążeniem własnym,
- większe wartości sił skupionych powodują zmniejszenie obłości, a wraz z dalszym wzrostem wartości sił skupionych kształt dąży do przyjęcia linii prostych między siłami.

Nie zgadzają się szczegółowe wyniki: obciążenie przyjęte w modelu komputerowym nie jest tak duże, jak w modelu manualnym i nie spowodowało naprężenia łańcucha. Różnica uzależniona jest od pominięcia dobru identycznych obciążeń fizycznie i komputerowo. Jednakże wymodelowanie bliźniaczego łańcucha i ołowianych ciężarków komputerowo miałyby się z celem, ponieważ stanowiłoby test dokładności oprogramowania komputerowego zamiast testu modelu analogowego. Usprawiedliwieniem dla modeli fizycznych może być fakt, że szacowane obciążenia okazały się większe niż szacowane cyfrowo. W związku z tym, projektując łuki na bazie krzywych łańcuchowych otrzymanych w rzeczywistym modelu – zachowana zostałaby wyższa odporność konstrukcji na zadane obciążenia.

Przykład wykorzystany w doświadczeniu dowodzi, że na etapie projektowania wstępnego wykonywanie schematycznych modeli fizycznych może być przydatne przy początkowych analizach działania konstrukcji i odzwierciedla jej zachowanie pod wpływem zadanych parametrów.

PODSUMOWANIE

Antoni Gaudi wpisał się w historię architektury nie tylko dzięki oryginalnemu stylowi architektonicznemu, lecz również poprzez respektowanie nadal aktualnych w swych wartościach postulatów. Wyjątkową cechą jego prac jest uwzględnianie praw fizyki oraz dbałość o optymalizację konstrukcji. Współczesne technologie dają nowe możliwości osobom wykonującym

zawód architekta oraz specjalistom odpowiedzialnym za kontynuację dzieła Gaudiego. Pomimo dostępności zaawansowanych narzędzi komputerowych, na etapie projektowania wstępnego modele tradycyjne mogą dawać porównywalne wyniki w analizie konstrukcji względem narzędzi komputerowych wykorzystujących MES. Zastosowany przykład w postaci porównania zachowania liny w modelu cyfrowym oraz fizycznym dowodzi, że przy spełnieniu warunków (głównie doborze odpowiednich proporcji obciążenia i rozstawu podpór lub zaczepów) kluczowe cechy konstrukcji w zadanych warunkach są takie same, jak w przypadku modelu cyfrowego. Im bardziej dokładne odwzorowanie proporcji realnego obciążenia oraz właściwości materiału obciążanego zastosujemy w testowym modelu fizycznym, tym dokładniejsze wyniki otrzymamy. Projektant, na etapie projektowania wstępnego, chcąc ukazać koncepcję założenia projektowego, może posługiwać się modelami fizycznymi z rezultatem analogicznym do tych, które otrzyma w komputerowym programie do przeprowadzania symulacji zachowania konstrukcji. Brak perfekcyjności istoty modeli fizycznych oraz margines błędu pozostawiają miejsce na artyzm w pracy architekta. To właśnie bycie artystą odróżnia go od konstruktora.

LITERATURA

1. **Barnaś J., (2010),** *Fenomen architektury Gaudiego*, „Czasopismo Techniczne. Architektura” z. 7-A/2
2. **Berkós J., (2004),** *Gaudi, człowiek i jego dzieło*, Arkady, Warszawa
3. **Burry J., Burry M., (2010),** *The new mathematics of architecture*, Thames & Hudson, Londyn
4. **Burry J., Burry M., (2016),** *Prototyping for architects*, Thames & Hudson, Londyn
5. **Davis D.,** *Historia parametryczności*, <https://slides.tips/download/historia-parametrycznoci> [dostęp: 14.02.2019]
6. **Kolendowicz T., (1993),** *Mechanika budowli dla architektów*, Arkady, Warszawa
7. **Moravánszky Á., (1993),** *Architektura i architekci świata współczesnego. Antoni Gaudi*, Arkady, Warszawa
8. **Nassery F., (2015),** *Dzieła architektoniczne Antonio Gaudiego w aspekcie wybranych powierzchni geometrycznych*, „Czasopismo Techniczne. Architektura” z. 3-A (3)
9. **Rakowski G., Kacprzyk Z. (2016),** *Metoda elementów skończonych w mechanice konstrukcji*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa
10. **Vitruvius M., (2004),** *O architekturze ksiąg dziesięć*, Prószyński i S-ka, Warszawa