

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GRAĐEVINSKI FAKULTET

Saša Perko
TEORIJE LUKOVA
(završni rad)

Zagreb, 2012.

SADRŽAJ:

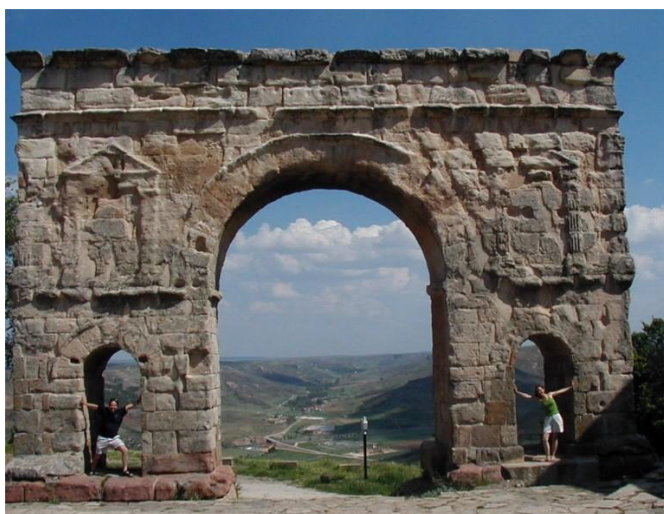
1. UVOD.....	3
1.1. Općenito o lukovima.....	3
1.2. Povijesni pregled primjene lukova u graditeljstvu.....	5
2. PREGLED RAZVOJA TEORIJA PRORAČUNA LUKOVA.....	12
2.1. Starorimski i srednjovjekovni (tradicionalni) pristup.....	12
2.2. Suvremeni pristup.....	14
2.2.1. Robert Hooke.....	15
2.2.2. Philippe de La Hire.....	16
2.2.3. Pierre Couplet.....	18
2.2.4. Charles Augustin de Coulomb.....	19
3. ZIDANI LUK.....	21
3.1. Materijal.....	21
3.2. Tlačna linija.....	21
3.2.1. Primjer određivanja tlačne linije.....	23
3.3. Granično stanje sloma i mehanizmi sloma.....	25
4. UPOTREBA JEDNOSTAVNIH MODELA ZA PRIKAZ TLAČNE LINIJE I PONAŠANJA LUKA U POSEBNIM SLUČAJEVIMA.....	29
5. ZAKLJUČAK.....	35
6. LITERATURA.....	36

1. UVOD

1.1. Općenito o lukovima

Lukovi su specifični graditeljski elementi koji su pretežito opterećeni na tlak. Ono što je specifično kod lukova jest smanjenje momenta savijanja ili njegovo iščezanje (u idealnom slučaju). To je zapravo i konačan cilj kod konstrukcije lukova – kvalitetan luk je onaj kod kojeg moment savijanja ne postoji, već se ravnoteža sila ostvaruje tlačnim potiscima prema osloncima lukova.

Postoji nekoliko podjela lukova, a najvažnije su podjele po materijalu od kojeg su građeni, po obliku luka i po statičkom sustavu luka. Lukovi se prema materijalu od kojeg su izgrađeni dijele na zidane i kamene lukove (najstariji), drvene lukove, betonske lukove i metalne lukove. Prvi su lukovi, uostalom kao i svi ostali građevni elementi, građeni od materijala dostupnih u prirodi. Tako su najvećim dijelom lukovi građeni od kamena i opeke, materijala otpornih na tlak, dok su se razvojem graditeljstva i tehnologije građenja počeli graditi i lukovi od suvremenih materijala koji su otporni i na tlak i na vlak, odnosno od betona i čelika. Podjela lukova prema obliku je sljedeća: *trokutasti*, *polukružni*, *segmentni*, *oštri*, *šiljasti*, *plosnati*, *potkovasti*, *eliptični* i drugi. Najčešće se grade polukružni, segmentni i šiljasti lukovi.



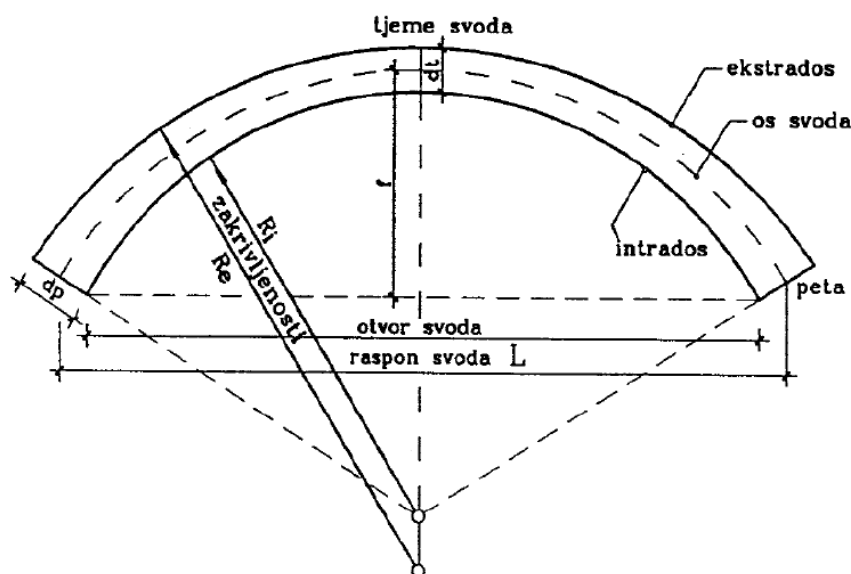
Slika 1. Starorimski luk



Slika 2. Moderan luk (Gateway Arch)

Prema statičkom sustavu, lukovi se dijele na *trozglobne*, *dvozgladne* i *upete* lukove. Kao što sama riječ kaže, trozglobni su lukovi oni koji imaju tri zgloba koji se nalaze se u petama lukova (ili u njihovoj blizini) i u tjemenu luka, te su takvi sustavi statički određeni. Dvozgladni i upeti lukovi spadaju u statički neodređene sustave, a zglobovi se nalaze u petama lukova kod dvozgladnih lukova, dok upeti lukovi nemaju zglobove.

Najviša točka luka naziva se *tjemenom luka*, dok su najniže točke luka one koje dodiruju oslonce i nazivaju se *petama luka*. Vertikalna udaljenost između najniže i najviše točke luka, odnosno udaljenost između pete i tjemena luka naziva se *strelica luka* i u literaturi se najčešće označava slovom *f*. *Intrados* je unutarnja linija luka, dok je *ekstrados* vanjska linija luka. *Raspon luka* je horizontalna udaljenost točaka osne linije u petama luka, dok je *otvor luka* horizontalna udaljenost između točaka intradosa u petama luka. Jedan od najbitnijih parametara kod projektiranja i konstrukcije lukova jest *spljoštenost* ili *plitkost luka*, predstavljena omjerom strelice i raspona luka (f/L).



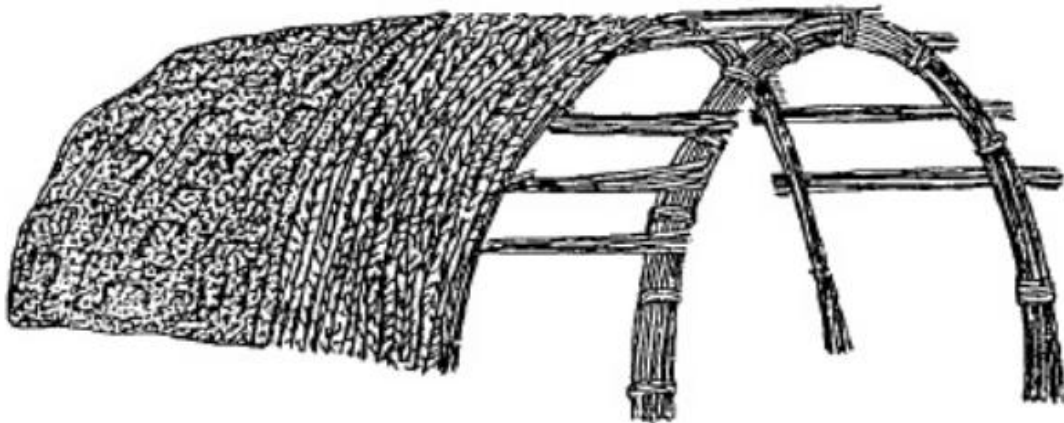
Slika 3. Osnovni dijelovi luka

1.2. Povijesni pregled primjene lukova u graditeljstvu

Razvoj lukova kroz povijest nije bio jednolik, već bi ga se moglo opisati skokovitim. Inovacije u građenju lukova bile se uvjetovane iskoracima velikih graditelja, uvođenju novih tehnologija te primjenom novih i suvremenijih materijala.

Lukovi su svoju primjenu u graditeljstvu imali od ranih početaka građenja nastambi, grobnica, religijskih građevina i spomenika te „primitivnih“ mostova, odnosno građevina koje su imale svrhu premoštenja prepreke.

Pretpostavlja se da su prvi lukovi i svodovi nastali u starom Egiptu i Mezopotamiji oko 3500. god. pr. Kr. na tradiciji građenja trskom i blatom. Stari graditelji bi trske smotali u pravokutne oblike, svezali ih konopom i polako savijali kako bi dobili pravilan polukružni oblik (slika 4.). Nakon toga bi trščane lukove prekrivali blatom i tako stvorili nepropusnu cjelinu koja ih je, kao današnji suvremeni krovovi, štitila od atmosferilija i ostalih vanjskih nepovoljnih utjecaja. Smatra se da su ideju uzeli iz prirode, tj. iz prirodnih lučnih oblika od kojih su najčešće stjenske lučne tvorevine.



Slika 4. Prvi svodovi od trske i blata

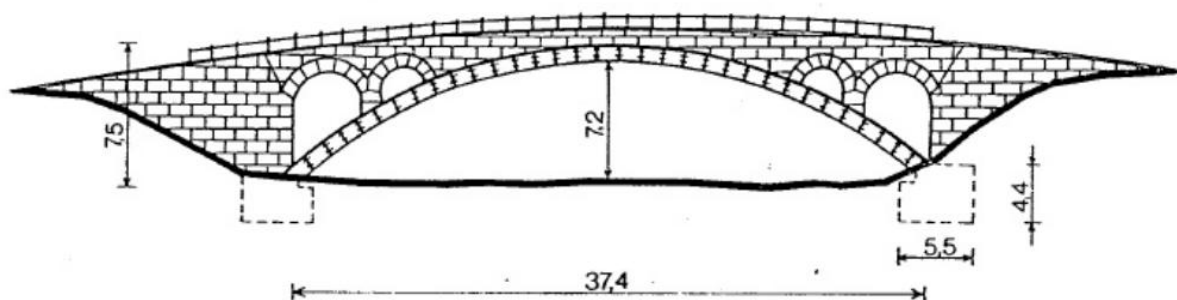
Iako nije njihov izum, Rimljani su proglašeni prvim pravim graditeljima svoda i luka. Umijeće su najvjerojatnije preuzeli od Etruščana, dodatno ga usavršili i izgradili predivne građevine koje i danas prikazuju Rimljane kao vrlo sposobne i umjetnički talentirane

graditelje. Sačuvano je preko 330 masivnih svođenih mostova i 94 akvadukta koji se protežu od najsjevernijih do najjužnijih granica tadašnjeg Rimskog carstva. Svodove su gradili od klinasto oblikovanih klesanaca, spandrilnih zidova i ispune. Najveći broj sačuvanih starorimskih lučnih mostova ima polukružni oblik, no nerijetko su se koristili i segmentnim (kružni isječak). Upotrebljavali su već poznata gradiva poput kamena, opeke i drva, no svemu tome su pridodali i beton kojim su ostvarivali mnogo veću trajnost. Beton su spravljali tako da su prvo načinili mort od većih kamena pucolana (vulkanasti pepeo koji nastaje erupcijom vulkana; ima vezivna svojstva kad ga se pomiješa s vapnom) i vode, kojim su polijevali veće gromade kamenja i stijanja. Umijeće izrade vapnenog morta su preuzeli od starih Grka i dodatno ga usavršili. Drvom su se koristili pri izradi skela, a pomno odabrani otvori govore o racionalnoj primjeni skela. Osim navedenih materijala, koristili su se i metalom, no vrlo rijetko; primjer je olovo koje su upotrebljavali kao spajala u sljubnicima, ali vrlo štedljivo i svrsishodno.



Slika 5. Pons Aelius

Nakon pada Rimskog carstva 476. godine, koja označava početak Srednjeg vijeka, u razdoblju od gotovo 700 godina nemamo značajnijih lučnih mostova, te se taj period graditeljske povijesti naziva „mračnim razdobljem“. Jedino što vrijedi spomenuti jest segmentni lučni most An-Chi iz Kine (slika 6.) građen od 605. do 617. godine. Osim prilično male spljoštenosti (0,192) segmentnog luka, imao je i štedne otvore čija je svrha bila smanjenje vlastite težine mosta, ali ujedno i ušteda gradiva. Na ovom se primjeru vidi da je ekonomičnost građenja bila važan aspekt graditeljstva već u ovome razdoblju graditeljske povijesti.



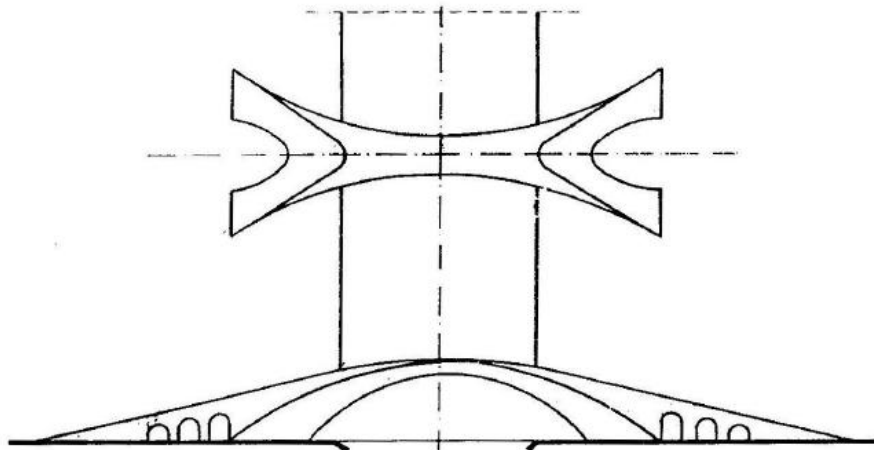
Slika 6. Most An-Chi preko rijeke Chiao, Kina

Gradnja mosta u Avignonu smatra se nastavkom razvitka mostogradnje u Europi. Građen je od 1177. do 1185. godine, ima raspone od 20 do 35 metara, a ukupna duljina mosta je oko 600 metara. Ono što je najznačajnije kod mosta u Avignonu jest njegov „revolucionaran“ luk koji više nije segmentan ili polukružan, već se koristi krivuljom sastavljenom od tri kružna odsječka s različitim središtima, te je mnogo povoljniji od do tada upotrebljavanih lukova. Osim mosta u Avignonu, grade se i ostali veliki lučni mostovi (preko Maine u Wurzburgu, Dunava u Regensburgu, Temze u Londonu i Elbe u Dresdenu).

Svodovi i lukovi mostova srednjeg vijeka građeni su tako da mogu samostalno stajati, mada su kupole i svodovi mnogih gotičkih katedrala građene tako da ne stoje samostalno već imaju „pomoć“ *kontrafora* i *lebdećih upornjaka*. To su konstrukcije koje su smještene na bočnim stranama crkve ili katedrale i zadaća im je prenijeti horizontalno opterećenje sa svodova i kupola u tlo.

Kod masivnih srednjovjekovnih mostova nisu postojale kontrafore i lebdeći upornjaci već su se horizontalni potisci do tla uspješno prenosili vrlo širokim stupovima. Širina stupova je u većini slučajeva bila između 1/4 i 2/3 širine svjetlog otvora mosta. Rasponi su se kretali u granicama od 12 do 22 metara, a najraširenija je bila upotreba polukružnog, segmentnog i bačvastog luka.

U renesansi (15. st.) nije došlo do značajnijeg tehničko–inženjerskog napretka u mostogradnji, već su uvedena neka oblikovna poboljšanja. Povećanje raspona i smjelosti luka individualni su rezultati značajnijih mostograditelja. Među lučnim mostovima može se izdvojiti vrlo zanimljiva i napredna zamisao Leonarda da Vinci koji je 1506. napravio skice paraboličnog lučnog mosta preko Zlatnog roga u Istanbulu raspona oko 300 m (slika 7.). Vrlo je zanimljiva njegova ideja razdovjenih peta koje osiguravaju dodatnu stabilnost luka. Naknadnim proračunom u 20. st. dokazano je da je ovakav most izvediv.



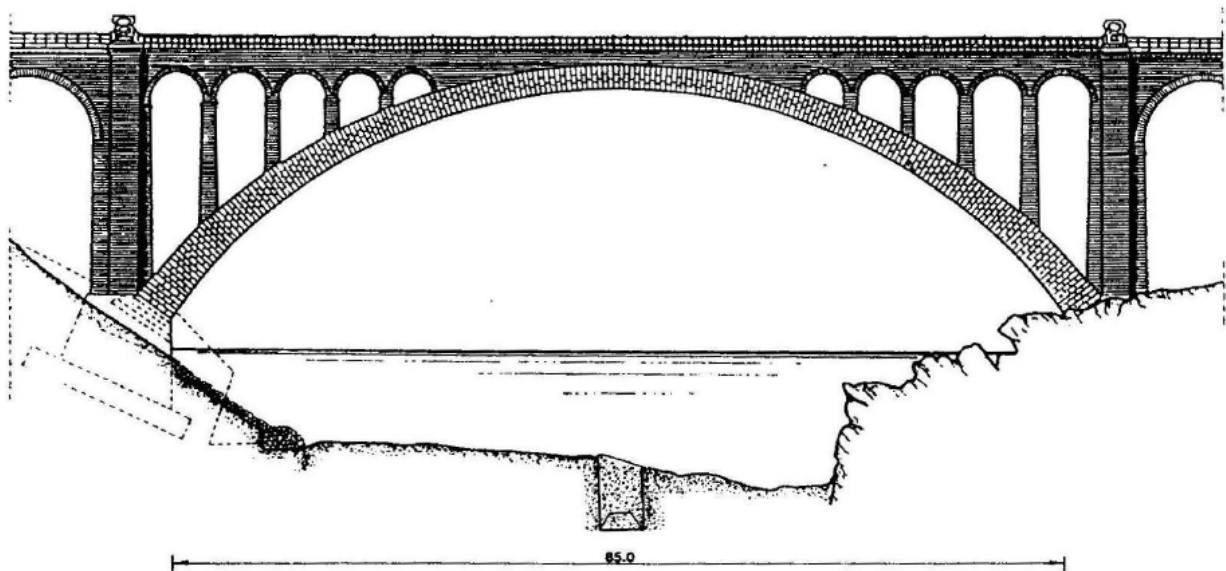
Slika 7. Skica Leonardovog mosta preko Zlatnog roga u Istanbulu

Uz europsko, značajno je i graditeljstvo Otomanskog carstva. Jedan od najljepših mostova bio je lučni most u Mostaru, a izgradio ga je Mimar Hajrudin, jedan od najvećih mostograditelja u povijesti.

Potrebno je spomenuti još jednog velikog graditelja mostova – to je Jean Perronet koji je sagradio 13 značajnih mostova diljem Europe. Među najznačajnijim ostvarenjima spominje

se most Neuilly iz 1789. godine s rasponima od 39 metara, strelice luka 9 m, spljoštenosti 0,23 i debljine stupova 4,3 metra (1/9 otvora).

Kao najbolja ostvarenja kamenih lučnih mostova se spominju most Victoria (Engleska, raspon 48,8 m), most Lavour (Francuska, raspon 61,5 m) te najveći – most u Solkanu preko rijeke Soče u Sloveniji tada rekordnog raspona 85 m (slika 8.).



Slika 8. Most preko Soče u Solkanu

Razvojem željezničkog prometa, dolazi do potrebe izgradnje željezničkih mostova. To predstavlja novo razdoblje u mostogradnji, a započelo je proizvodnjom čelika iz visokih peći. Prvi takav most izgrađen je preko rijeke Severn u mjestu Coalbrookdale 1779. raspona 30 m. Nakon njega su uslijedili mnogi mostovi s većim rasponima, a u mostogradnji su prednjačile Velika Britanija i Francuska. Građeni su mnogi pješački, cestovni i željeznički mostovi, većinom u glavnim gradovima preko najvećih rijeka (Temze i Seine). Značajne inovacije u mostogradnji uvodi James B. Eads gradeći lučni rešetkasti most raspona 153 m. Na tome je mostu prvi puta primijenjen legirani čelik i šuplji profili za štapove rešetke.

Nakon otkrića armiranog betona (Lambot, 1850. godine) počinje era građenja betonskih lučnih mostova, ne samo s tlačnim već i s vlačnim svojstvima koje omogućuje čelik umetnut u beton. Početni su armiranobetonski mostovi zadavali velike probleme gradi-teljima zbog nedovoljnog poznavanja betona i njegovih svojstava, no kako se znanost razvijala, tako

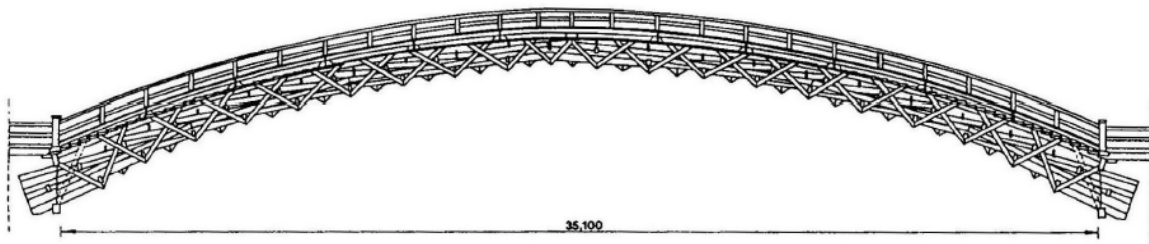
je bilo sve više i više spoznaja o novom materijalu. Tomu su doprinikli i najveći mostograditelji tog vremena – Francois Hennebique, Robert Maillart i Eugene Freyssinet. Osim što su gradili impozantne mostove, bavili su se teorijskim i eksperimentalnim istraživanjima. Freyssinet, po mnogima najveći mostograditelj prošloga stoljeća, već je 1930. izgradio velebni most Albert Louppe (slika 9.). To je dvokatni most na kojem se odvija cestovni i željeznički promet odvojeno. Sagrađen je od tri armiranobetonska luka sandučastog presjeka s tri komore. Lukovi su širine 9,5 m, visine 4,3 m u tjemenu i 9,0 m u petama luka. Intrados luka je izveden kao kontinuirana linija dok je ekstrados izveden s promjenom nagiba na mjestu stupova.



Slika 9. *Albert Louppe*

Iako su najvažniji mostovi bili izvedeni u čeliku i armiranom betonu, ne smijemo zaboraviti još jedan važan materijal, a to je drvo. Iako drveni mostovi nisu tako impresivni kao čelični i betonski, svakako zaslužuju mjesto u povijesti mostogradnje. Počeli su se upotrebljavati tek od vremena renesanse kad su se spoznala konstrukcijska svojstva rešetke. Nakon toga su, do danas, građeni elegantni drveni lučni mostovi, uglavnom pješački i za

lagani cestovni promet. S obzirom da je drvo prirodni materijal, te ga se ne može proizvesti industrijskim putem, za veća mostovna ostvarenja potrebni su značajni drvni resursi, tako da je velika većina mostova građena u zemljama, odnosno u pokrajinama bogatima drvom. Jedan od najstarijih, ali svakako i jedan od najznamenitijih drvenih lučnih mostova jest most Kintai iz Japana iz 1673. (slika 10.).



Slika 10. *Most Kintai, Iwakuma, Japan*

Sklop se sastoji od po pet nosača od smoždenih grada u svakom rasponu koji su međusobno povezani spregovima. Nadlučnog sklopa nema, već se prometuje po lukovima. Raspon mosta je 35,1 m. Značajniji europski drveni lučni mostovi su most preko Seine u Parizu iz 1804., most preko Kokre kod Kranja iz 1938. te nadvožnjak preko autoputa Nancy – Strassbourg sagrađen 1977. raspona 60 m.

2. PREGLED RAZVOJA TEORIJA PRORAČUNA LUKOVA

2.1. Starorimski i tradicionalni (srednjovjekovni) pristup

Iz povijesnog pregleda razvoja kamenih, metalnih pa i drvenih mostova dalo bi se zaključiti, kako je i navedeno u uvodu, da se napredak u gradnji lukova ostvarivao skokovito. U počecima gradnje lukova nisu postojali propisi i pravila slični današnjima, već se gradilo na temelju iskustva, slobodne procjene i usmene predaje prekaljenih graditelja. Stoga izvorna pravila rimske i srednjovjekovne gradnje svodova nisu zabilježena, ali su približno rekonstruirana proučavanjem današnjih lukova, svodova i kupola. Podaci nam pokazuju kako su tadašnji graditelji dosegli granice koje im je nametnulo samo gradivo, a potom i tehničke mogućnosti njegova oblikovanja, prijenosa i ugradnje.

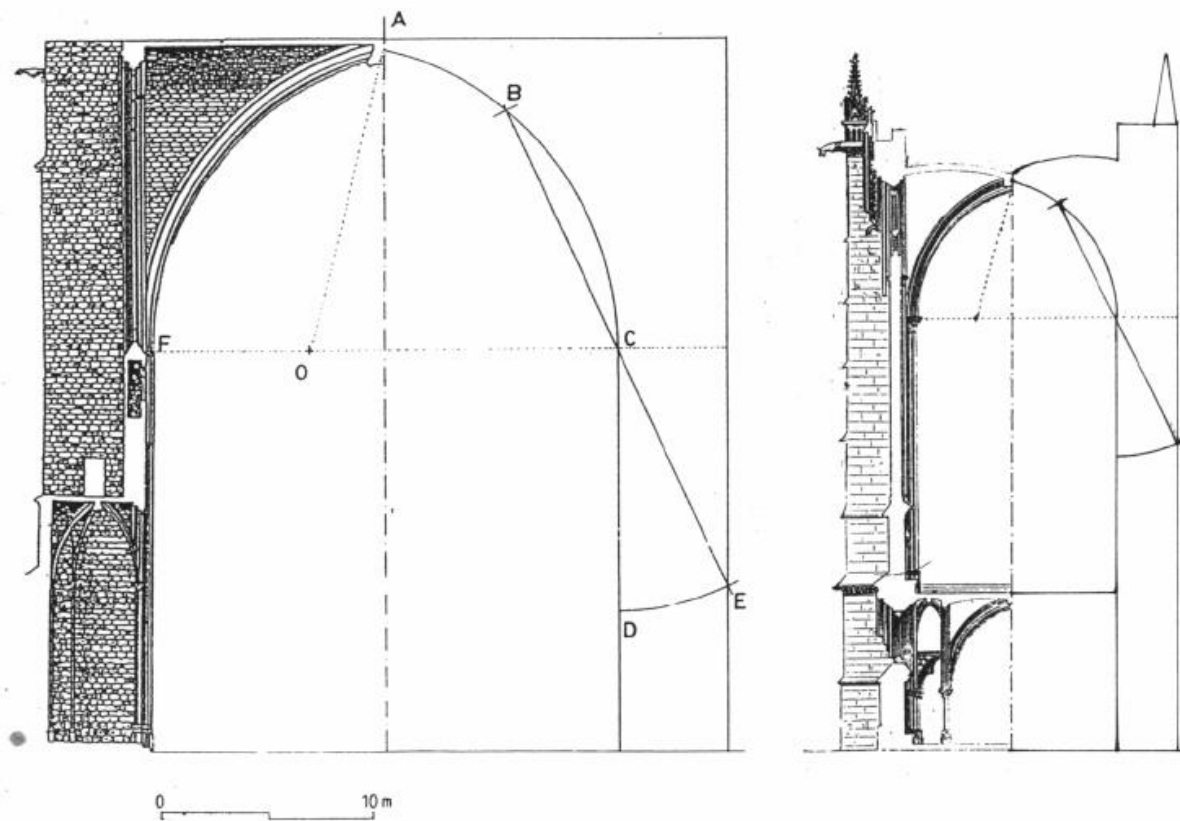
Glavni problem ondašnjih graditelja svodio se na dva temeljna pitanja: 1) kako izgraditi luk koji se neće srušiti; 2) kako izgraditi stupove koji će izdržati njihov potisak. Rimska rješenja su bila mnogo drugačija od, primjerice, gotičkih ili baroknih, no problem ostaje isti: kako održati ravnotežu sila da građevina stoji kroz stoljeća, pa čak i tisućljeća. Neki su antički i srednjovjekovni graditelji pronašli savršenu formulu, po ipak, riječ je o nekoliko desetaka građevina, dok su se tisuće srušile.

Pitanje je kako su uopće izgrađeni lukovi i njihovi stupovi. Moderna znanstvena teorija projektiranja lukova postavljena je tek u 19. st. i ta činjenica povlači mnoga pitanja o konstrukciji starorimskih i srednjovjekovnih lukova bez upotrebe današnje primijenjene mehanike. Ipak, očigledno je da izvanredne povijesne građevine nisu mogle biti izgrađene bez ikakve vrste predznanja: graditelji su se koristili tradicionalnom teorijom utemeljenom na kritičkom opažanju procesa građenja. Ova je „neznanstvena“ metoda bila izrazito kompleksna i sadržajna, jer je ipak trebalo i znanja i umijeća da bi se izgradile građevine poput Pantheona, Aje Sofije ili velebnih gotičkih katedrala.

Tradicionalna srednjovjekovna teorija projektiranja lukova i svodova sastojala se u definiranju geometrijskih odnosa između pojedinih konstrukcijskih elemenata luka, odnosno svoda. Zato je i nazvana proporcionalnom metodom, a činila su je precizno definirana pravila

za svaki konstrukcijski element zasebno. Na primjer, debljina lukova i širina stupova na koje se luk oslanja su u direktnoj ovisnosti o rasponu. Naravno, sva su pravila jedinstvena, tj. svaki luk ima određeno pravilo, ovisno o njegovom obliku (polukružni, segmentni...) i o razdoblju u kojem se gradio. Tako je, primjerice, u gotici debljina stupova polukružnog luka iznosila $1/4$ raspona, dok je u renesansi taj omjer iznosio $1/2$ i/ili $1/3$.

Postojala su različita pravila; tako je u kasnoj renesansi i baroku razvijena geometrijska metoda određivanja debljine stupova. Sastoji se u dijeljenju intradosa luka na tri dijela te spajanju jedne od točaka dobivenih dijeljenjem luka (npr. točka B) s petom luka (točka C). Ista duljina ($CE=BC$) se produlji ispod luka te se tako dobiva debljina stupa ili zida potrebna da podupre luk ili svod (slika 11.)

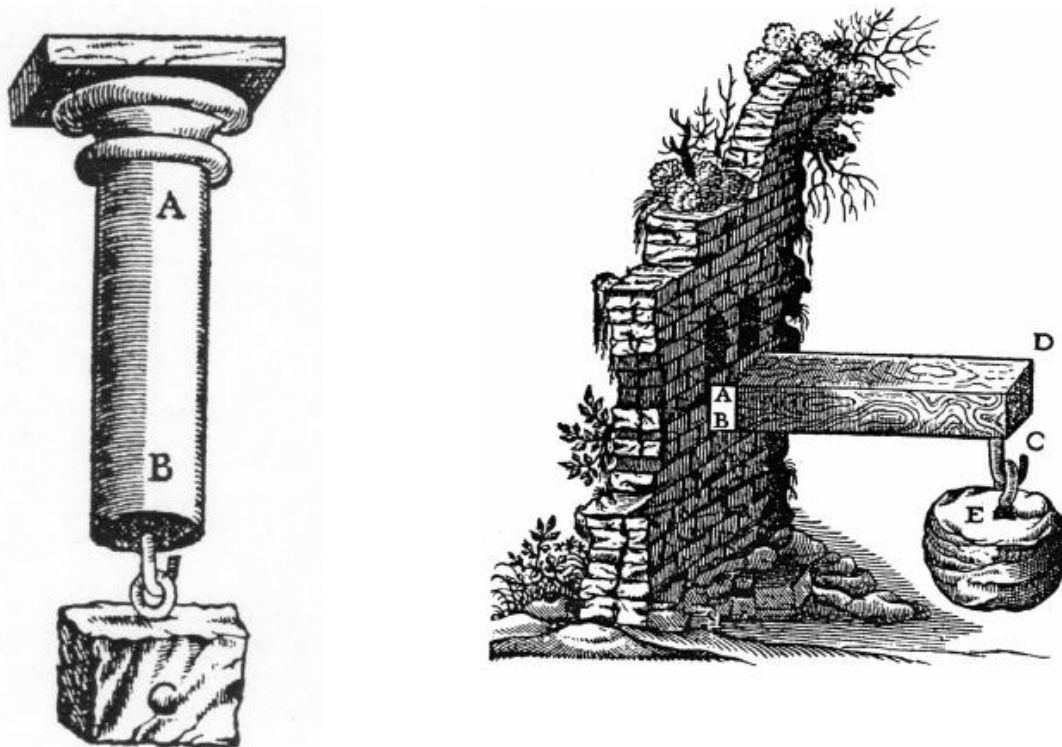


Slika 11. Prikaz geometrijske metode određivanja debljine zida na katedrali u Geroni i Svetoj kapeli u Parizu

2.2. Suvremeni pristup

Antičko i srednjovjekovno vrijeme nam je donijelo mnogo velikih i uspješnih građevina, ali sve su bile izgrađene na nesigurnim i neznanstvenim analizama. Prvi znanstvenik koji se odlučio odmaknuti od takvog tradicionalnog načina projektiranja jest Galileo Galilei. Napisao je knjigu *Discorsi e Dimostrazioni Matematiche intorno a due nuove scienze Attenenti alla Meccanica & i movimenti Locali* (Rasprave o dvjema novim znanostima) u kojoj je objasnio zakone fizike i mehanike u novoj svjetlosti, zbog čega se i smatra osnivačem klasične fizike i mehanike. Dvije znanosti koje spominje su kinematika i čvrstoća materijala. Upravo je znanost o čvrstoći materijala pokrenula lavine novih teorija o projektiranju lukova.

Galileo je pokušao, po prvi puta u povijesti, protumačiti i riješiti problem čvrstoće oslonaca lukova, što je predstavljalo najveću prepreku u dotadašnjem projektiranju. Na početku se bavio pitanjem konzolne grede i stupa, tj. uspoređivao ih je kako bi došao do rješenja problema čvrstoće. Već je tada bilo poznato da čvrstoća stupa ovisi o površini presjeka i sili kojom se stup opterećuje, no što je s konzolnom gredom?



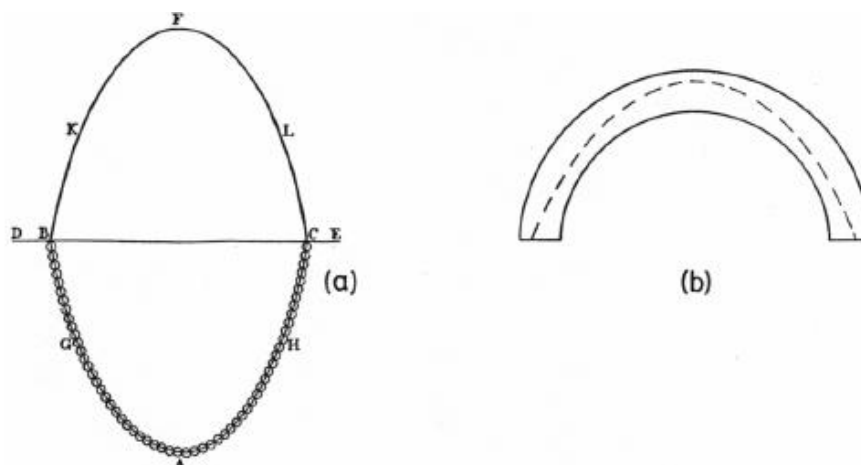
Slika 12. Problem čvrstoće stupa i konzolne grede kod Galilea

Zanimalo ga je da li i kod „konzole“ vrijedi pravilo proporcionalnosti. Dokazao je da to nije tako – čvrstoća konzole ne raste proporcionalno s površinom, već s kvadratom površine, te je time udario temelje suvremenog pristupa.

U isto vrijeme, druga strana građevinarstva, ona koja izučava materijale, došla je do znatnih otkrića u polju čvrstoće materijala koje su dobivene eksperimentalnim putem. Bilo je to prvi puta u povijesti da su graditelji mogli povezati i uspoređivati dvije vrijednosti, na jednoj strani su bila naprezanja, a na drugoj strani čvrstoća materijala. Prvi puta se počinju primjenjivati koeficijenti sigurnosti koji tada nisu bili rezultat pomno analiziranih slučajeva i istraživanja, ali su svakako nešto novo, nešto suvremenije, a uostalom, i temelj današnjeg poimanja građevinarstva.

2.2.1. Robert Hooke

Robert Hooke bio je britanski fizičar, matematičar i izumitelj. Patentirao je mnoge izume, a za građevinarstvo je najvažniji njegov doprinos u teoriji elastičnosti (*Hookeov zakon*). Između ostaloga, bavio se proučavanjem i konstruiranjem lučnih konstrukcija, te je razvio jednu od teorija lukova. Savršeni oblik luka povezo je s lančanicom, ali nije mogao pronaći matematičku definiciju lančanice kako bi opisao savršeno oblikovani luk. Objavio je mnoga znanstvena dijela na ovom području, no prije smrti nije bila poznata njegova pretpostavka, a koja je, prevedena s latinskog, glasila: „*Onako kako visi savitljiva nit (lančanica), tako će, ali obrnuto, stajati kruti luk*“ (slika 13.).



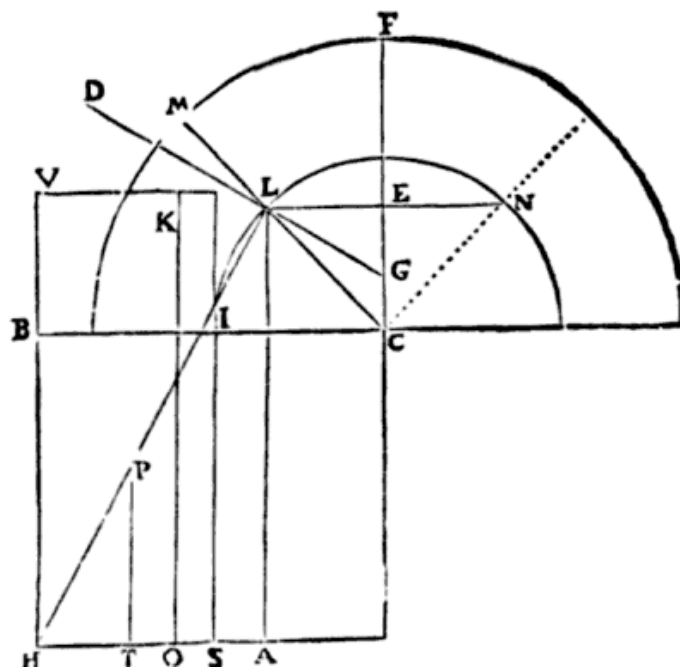
Slika 13. Odnos lančanice i luka

Princip koji je Hooke zastupao temelji se na određivanju matematičke funkcije lančanice i umetanjem te lančanice između gornje i donje konture luka. Na taj bi se način mogao odrediti savršen oblik luka, ali isto tako i debljina stijenke luka koja je potrebna da se odupre određenom opterećenju koje djeluje na nj. Problem lančanice je kasnije riješio David Gregory 1697.

2.2.2. Philippe de La Hire

U Francuskoj je prvi doprinos teoriji lukova dao La Hire u svom djelu *Traite de mecanique*, objavljenom 1695. Problemi kojima se bavio uključivala su istraživanja opterećenja koja može poprimiti polukružan luk sastavljen od klinasto oblikovanih blokova bez trenja tako da sustav bude u statičkoj ravnoteži. Rješenje je ležalo u novom grafičkom načinu proračuna lukova – poligonu sila. Iako to tada nije bilo tako definirano, danas je poznato da se zapravo La Hireov grafički postupak određivanja poligona sila svodi na određivanje tlačne linije. Proučavanjem je došao do spoznaje da za lukove s glatkim blokovima, tlačna linija (poligon sila) mora biti okomita na dodirne površine, a kao ekstremnu situaciju je proučavao luk kod kojeg su ležajne plohe horizontalne. Zaključio je da bi u tom slučaju težina blokova morala biti beskonačno velika, i da je pretpostavka o glatkim blokovima pogrešna. Trenje daje potrebnu stabilnost luku te se stoga ne smije zanemariti.

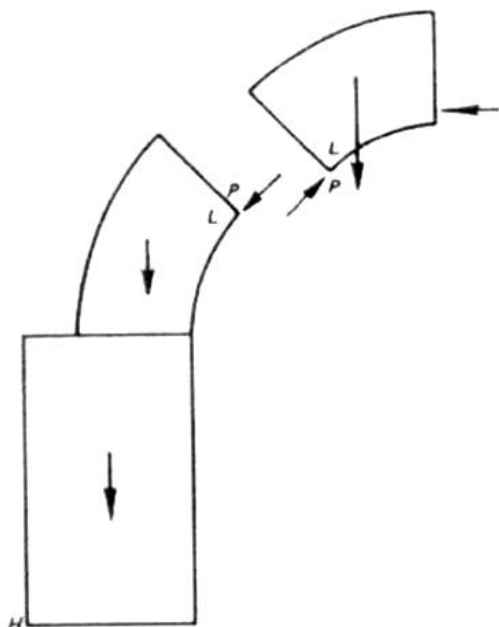
Glavni doprinos teoriji lukova dao je 1712. u drugom izdanju svog djela, gotovo dva desetljeća nakon prvog. Sada je odbacio sve pretpostavke o glatkim blokovima i proračunavao lukove uzimajući trenje u obzir. Zbog trenja tlačna linija više nije morala biti okomita na dodirne površine. Osim tlačne linije, pokušavao je odrediti i optimalnu debljinu stupova, odnosno zidova koji podupiru lukove ili svodove.



Slika 14. Mehanika polukružnog luka

Na slici 14. prikazana je La Hireova skica polukružnog luka. On promatra duljinu LM kao dodirnu plohu dva susjedna bloka koji nisu povezani vezivnim sredstvom. Kod opterećenja i

povećanja raspona dolazi do pojave zgloba u točki L tako da je to jedina zajednička dodirna točka gornjega i donjeg bloka. Kroz tu točku prolaze sve sile iz gornjeg bloka u donji, te u stupove luka.



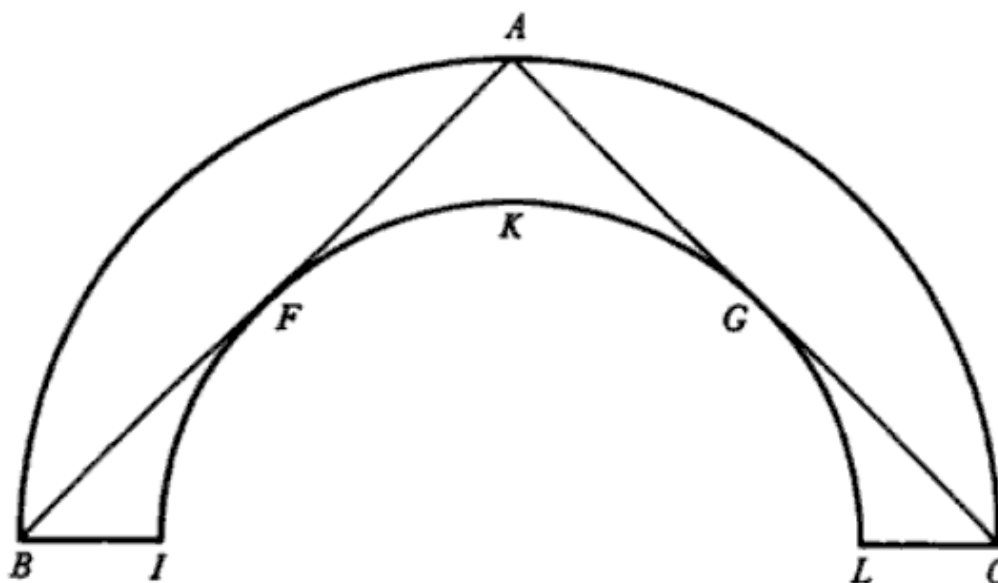
Slika 15. Statika polukružnog luka

Nakon što se proračunaju težine svih blokova, mogu se dobiti sile koje djeluju na točku L, odnosno općenito na cijeli luk. Za provjeru stabilnosti konstrukcije se provjerava moment oko točke H. La Hire nije dao nikakvo pravilo za takav proračun, no samo razmišljanje je mnogo doprionijelo daljnjem razvitku teorija lukova.

2.2.3. Pierre Couplet

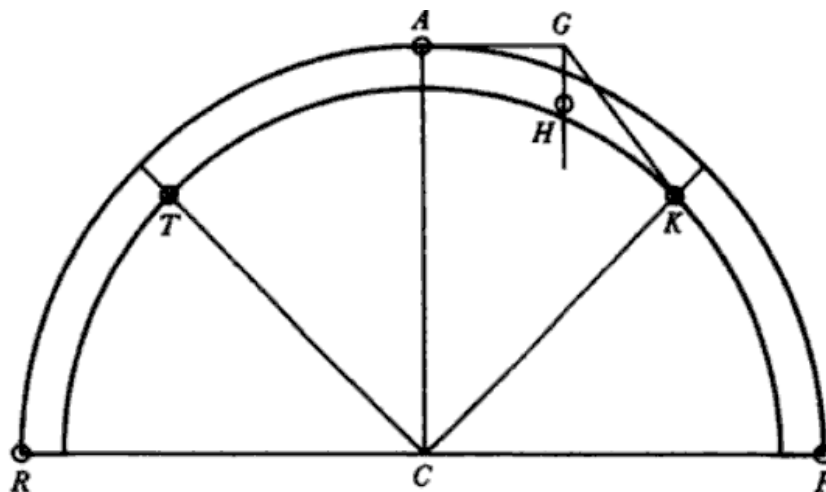
Pierre Couplet je bio francuski inženjer koji se bavio proučavanjem lukova i ostalih građevinskih oblika. Izdaje knjigu *Memoire* koja je izašla u dva izdanja, prvo je bilo 1729., a drugo 1730. U prvom se izdanju koncentrirala na idealizaciju luka, tj. upotrebljava glatke blokove bez trenja kao i La Hire. No ubrzo shvaća kako takvi lukovi nemaju primjenu u graditeljstvu, pa se 1730. odlučuje za istraživanja na realnim lukovima. Na početku uvodi pretpostavke o ponašanju materijala – postoji trenje između blokova što onemogućava klizanje i nema otpora kod odvajanja blokova. Kao zaključke izdvaja: (1) zid nema vlačnu čvrstoću, (2) tlačna čvrstoća je beskonačna i (3) ne može doći do sloma zbog klizanja.

Teorija koju je razvio govori da se konstrukcija neće srušiti pod opterećenjem u točki A ako tetiva povučena iz polovine ekstradosa (najviša točka luka) prema peti luka ne siječe intrados. Razlog tome je nastanak tlačne linije AFB i AGC. Kao što je Hooke ranije otkrio, ako se tlačna linija nalazi unutar luka, on se ne može srušiti.



Slika 16. Luk koji se ne bi mogao srušiti pod opterećenjem u točki A

Sljedeći Coupletov problem je bio pronaći najmanju debljinu luka takvu da luk može nositi sam sebe. Pod vlastitim opterećenjem, luk će se odvojiti u četiri dijela, dodirne točke bit će mu točke R, T, A, K i F i tvorit će zglobove luka (slika 17.)



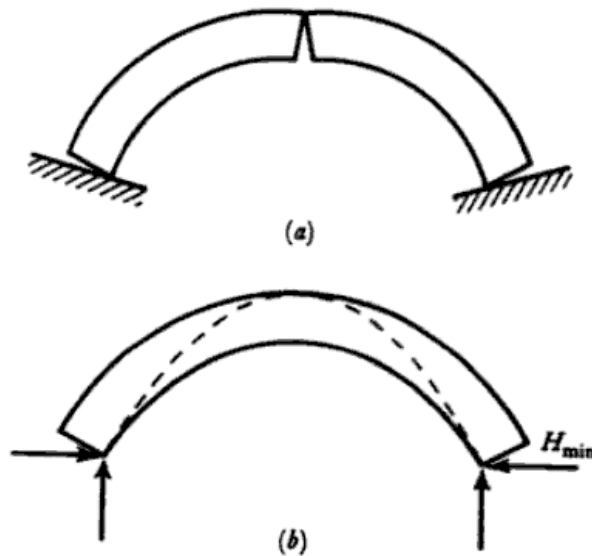
Slika 17. Polukružni luk najmanje debljine

Uvažavajući težinu blokova, uspio je pomoću ravnoteže sila doći do odnosa radijusa i debljine luka koji još uvijek daje dovoljnu čvrstoću i stabilnost polukružnog luka da se ne sruši. Do navedenog odnosa došao je rješavanjem kubne jednadžbe. Izraz koji je pronašao jest sljedeći: $t/R=0.101$, gdje je t debljina stijenke luka, a R polumjer. Isto tako, došao je do zaključka kako je luk u ravnoteži ako su zglobovi F i K smješteni pod kutem od 45° .

2.2.4. Charles – Augustin de Coulomb

Charles–Augustin de Coulomb je bio francuski fizičar i inženjer koji je iznio mnoge vrijedne teorije o lukovima i o mehanici u građevinarstvu općenito. Najvažnije otkriće vezano uz teoriju lukova jest definiranje veličina horizontalnog potiska u lučnim konstrukcijama H_{\min} i H_{\max} koje se odupiru opterećenju lukova i ne dopuštaju „širenje“ luka. Dokazao je da pojava zglobova u luku ne znači nužno gubitak stabilnosti, ali mora postojati određena sila H u petama lukova koja će luk držati stabilnim.

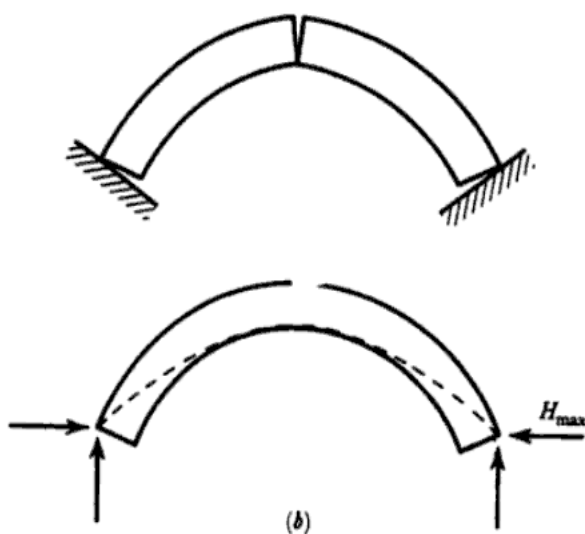
Ako se nanese opterećenje na luk koje je nešto veće od dopuštenog, nastaju zglobovi koji konačno vode do mehanizma i rušenja luka. Zbog tog se opterećenja oslonci luka šire i povećava se raspon. Rezultat toga će biti pojava zglobova u tjemenu ekstradosa luka i na intradosu u petama. Tada je poznato kako izgleda tlačna linija – tangira ekstrados u tjemenu i intrados u petama (slika 18.).



Slika 18. Zglobovi i tlačna linija zbog povećanja raspona

Kako bi ovakav luk mogao stajati, potrebna je minimalna sila H_{\min} koja ostvaruje stabilnost. Analogno tome, ako se raspon luka smanji, opet će doći do pojave tri zgloba na istim mjestima, no ovaj puta oni će se naći na suprotnim strana osi luka, odnosno jedan zglob će biti na intradosu tjemena i ostala dva zgloba na ekstradosu u blizini peta luka (slika 18.). U ovom slučaju je definirao silu H_{\max} koja se javlja kod ovog ekstremnog slučaja, pa sila potiska mora biti manja ako želimo da luk bude stabilan.

Iz prethodnih analiza jasno je da sile horizontalnih potisaka moraju biti između H_{\min} i H_{\max} . Ako sile nisu između ovih vrijednosti, dolazi do pojave četvrtog zgloba, nastaje mehanizam i luk će se srušiti.



Coulomb nije dao izričite vrijednosti sila horizontalnih potisaka, ali je opisao problematiku i objasnio koji se problemi javljaju čime je mnogo doprionio razvitku teorija lukova.

Slika 19. Zglobovi i tlačna linija uslijed smanjenja raspona

3. ZIDANI LUK

3.1. Materijal

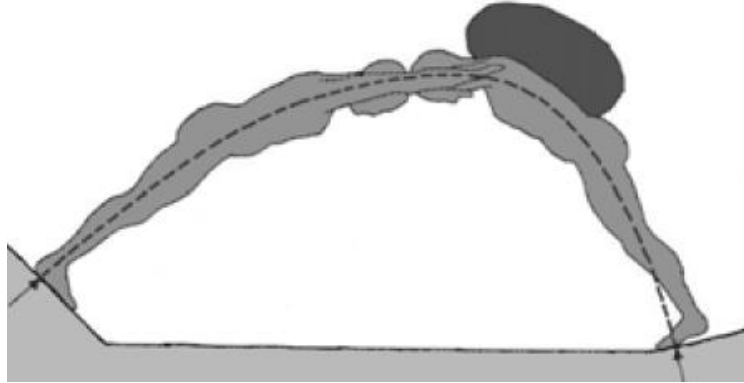
Zidani materijali su bili glavno sredstvo građenja u zapadnom svijetu do početka 20. stoljeća. Nakon tisuća godina, zidani su materijali prepustili tron najzastupljenijih materijala nekim mlađim „kolegama“, no svejedno moramo znati ponešto o njima zbog graditeljskog nasljeđa koje su nam ostavili naši preci.

Iako se čini kako je opeka, odnosno zid općenito, relativno „definiran“ i jednostavan materijal, to u stvarnosti nije tako. Zato je potrebno, kako bismo mogli kvalitetno projektirati zidane svodove i lukove, poznavati osnovna mehanička svojstva ziđa. A bitna su mehanička svojstva sljedeća: ziđe je heterogeni, anizotropan materijal, s velikom tlačnom, a malom vlačnom čvrstoćom i ne postoji problem stabilnosti što se tiče klizanja između zidanih i/ili kamenih blokova (zbog velikog koeficijenta trenja, $\mu \cong 0.5$).

3.2. Tlačna linija

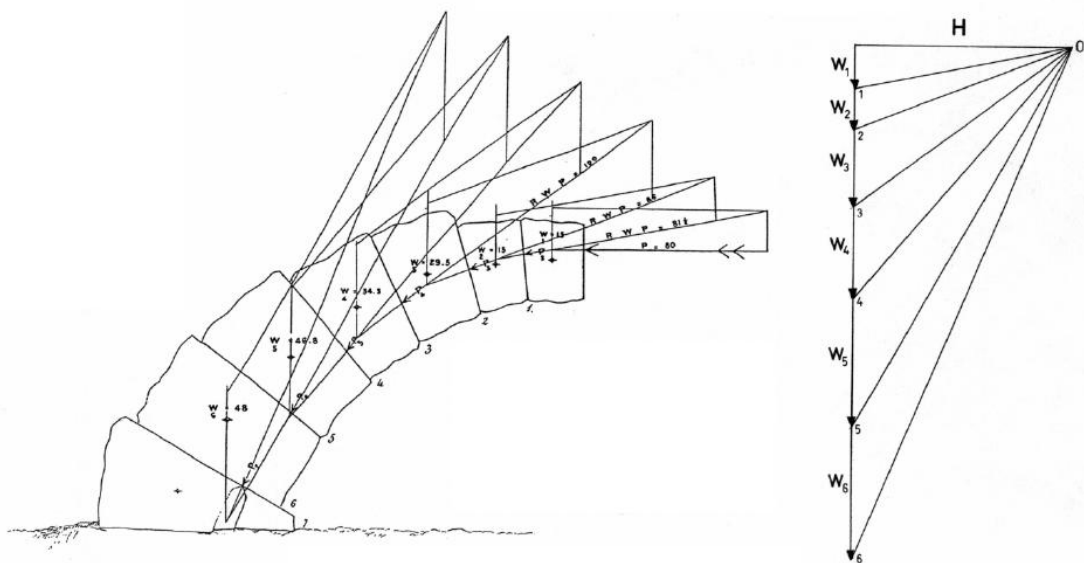
Kao što znamo, lukovi se sastoje od zidanih ili kamenih blokova vezanih mortom ili jednostavno postavljenih jedan na drugi. Da bi takva struktura stajala, potrebno je osigurati mehaničku stabilnost blokova. Kako se blokovi ne bi prevrnuli, iskliznuli ili nešto drugo, tok sila mora biti pravilan, i to tako da se opterećenje prenosi s bloka na blok unutar samog volumena luka. To znači da tlačna sila, koja je rezultanta tlačnih naprezanja na pojedine dodirne plohe blokova, mora prolaziti upravo tim plohama. Točka kojom sila prolazi kroz blok naziva se *centar potiska*. Dva potiska sa svake strane bloka održavaju ravnotežu i osiguravaju stabilnost. Takav tok sila mora se osigurati od tjemena luka pa sve do peta, gdje luk prenosi svo opterećenje na osnonce. Na mjestu dodira pete luka i oslonca javlja se najveća sila u luku, a ona je rezultanta svih prethodnih sila. Ta se sila prenosi s luka na oslonac i zove se *potiskom luka*. Kod projektiranja lukova, naravno, moramo paziti da potisak luka ne bude veći od projektirane sile koju može primiti oslonac, jer će u tom slučaju doći do otkazivanja i rušenja konstrukcije.

Tlačna linija predstavlja rezultatnu krivulju hvatišta tlačne sile u presjecima luka ili svoda. Praktično, to znači da je tlačnom linijom određen položaj, odnosno ekscentricitet, djelovanja tlačne sile u svakom presjeku luka za neko promatrano opterećenje.



Slika 20. Zoran prikaz tlačne linije

Dakle, pomoću tlačne linije može se odrediti veličina momenata savijanja u svim presjecima luka. S druge strane, kod projektiranja lukova od gradiva znatne tlačne, a male vlačne čvrstoće, oblik tlačne linije definira najpovoljniji oblik osi luka ili svoda, odnosno oblik pri kojemu će se u njemu pojaviti minimalna vlačna naprezanja. Kod projektiranja starijih lukova od kamena ili nearmiranog betona postavljao se uvjet da se rezultanta tlačnih sila ni u kojem presjeku i ni za koji slučaj opterećenja ne izađe izvan jezgre poprečnog presjeka, kako se ne bi pojavila vlačna naprezanja. U doba elektroničkih računala ova metoda ima uglavnom povijesnu vrijednost, ali ona jasno pokazuje polazište za racionalan odabir osi luka.



Slika 21. Tlačna linija i poligon sila

Optimalno rješenje kod projektiranja lukova jest podudaranje osi luka i tlačne linije, jer se tada poništava moment savijanja i naprezanje se prenosi isključivo preko tlaka. Pošto su lukovi i svodovi u samim počecima bili građeni od materijala koji su dobro podnosili tlak, a vlak nisu, tada je esencijalni problem bio u konstruiranju osi luka takve da prati tlačnu liniju.

Ako se tlačna linija okrene za 180° , to jest ako se postavi u obrnuti položaj, ona prikazuje lančanicu. Tu je teoriju iznio Hooke u svojim radovima, i detaljnije je objašnjena u poglavlju 2.2.1.

Jasno je da tlačna linija mora biti unutar rubova obrisa samoga luka, no pitanje koje je mučilo inženjere jest koja je „prava“ tlačna linija. Luk je (osim trozglobnoga) statički neodređena konstrukcija, pa jednadžbe ravnoteže nisu dovoljne da se izračuna iznos unutarnjih sila. Isto tako, u luku proizvoljne debljine moguće je pronaći mnogo tlačnih linija, i sve one bi bile pravilne i sve bi zadovoljavale postavljene uvjete.

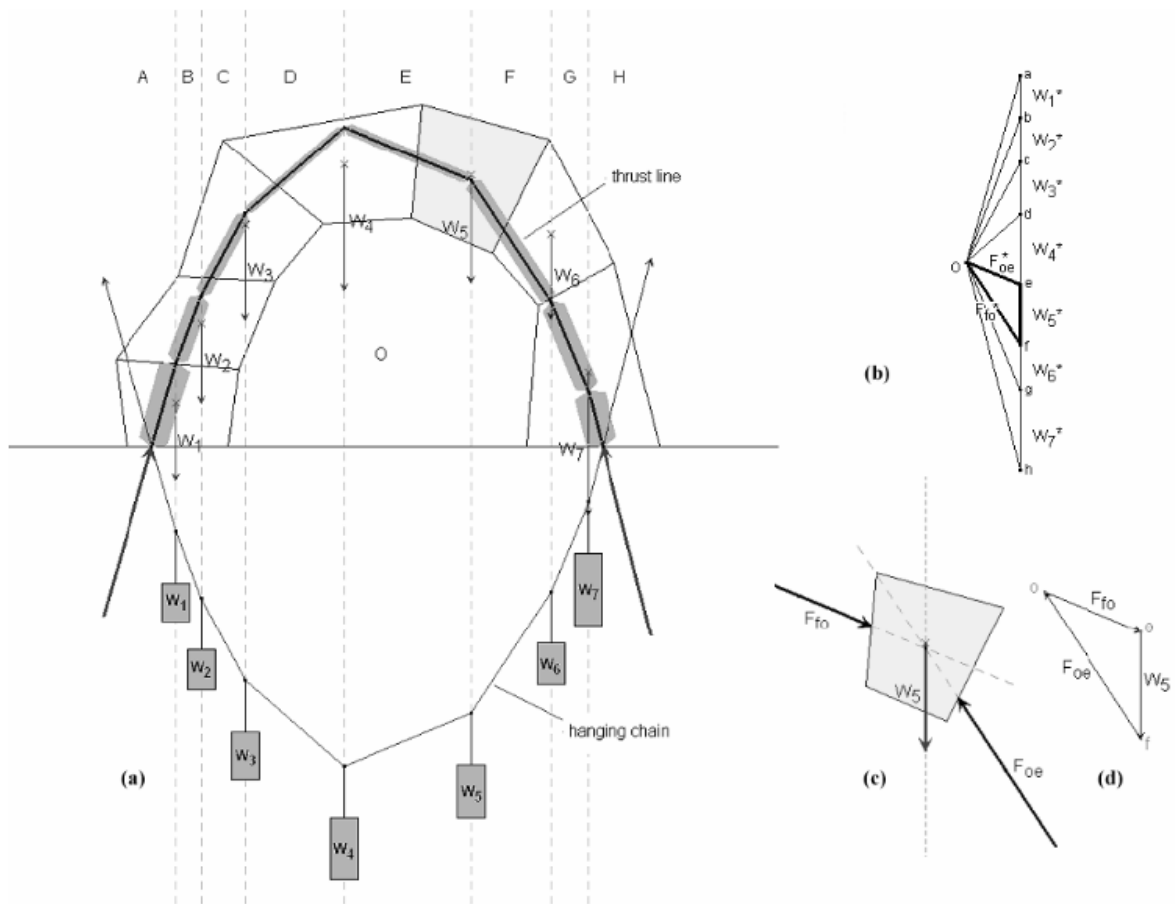
Zato su kroz povijest razvijene različite metode određivanja tlačne linije, a najzastupljenije su bile:

- (1) Moseleyova metoda – prvi je detaljno pojasnio što je tlačna linija, odnosno definirao tlačnu liniju kao liniju otpora (eng. Line of resistance);
- (2) Villarceau-ova metoda – pokušavao je dobiti jedinstvenu tlačnu liniju tako da konstruirao luk koji je statički određen, te je zato umetnuo tri zgloba; težio je konstruiranju osne linije luka prema tlačnoj liniji.

3.2.1. Primjer određivanja tlačne linije

Danas se više ne primjenjuju klasični načini određivanja tlačne linije kao u prošlosti, projektira se pomoću računala, tako da su današnji pristupu konstruiranja lukova mnogo drugačiji nego ranije. Tlačna se linije ranije određivala grafičkim putem, izračunavanjem opterećenja, odnosno sila koje djeluju na luk i njihovim umetanjem u poligon sila, te verižnim poligonom prenošenjem na lučnu konstrukciju. U ovom će se poglavlju ukratko objasniti postupak određivanja tlačne linije.

Primjer 1.



Slika 22. Određivanje tlačne linije

Kao što je već rečeno, tlačna se linija mora nalaziti unutar rubova obrisa lučne konstrukcije. Kako bismo odredili tlačnu liniju, poslužit ćemo se grafičkim postupkom. Prvi korak ka određivanju tlačne linije jest odjeljivanje luka na nekoliko isječaka. Ako je luk građen od zidanih ili kamenih blokova, oni nam mogu poslužiti kao navedeni „isječci“. Treba odrediti njihovu težinu i težište pojedinog kamenog bloka. Nakon što se odrede težine i težišta, treba ih ucrtati u skicu lučne konstrukcije kao što je to napravljeno na slici 22.a). Zatim treba nacrtati poligon sila kao na slici 22.b). Udaljenost između O i linije sila ah predstavlja horizontalni potisak luka. Jasno je vidljivo da se točka O može pomakivati po horizontalnoj liniji kako hoćemo, no time se mijenja horizontalni pritisak u osloncima. Rezultat toga je postojanje mnogo različitih tlačnih linija. Ovo je ujedno i dokaz da ne postoji jedna, već mnogo tlačnih linija za jedinstven lučni oblik.

Daljnja konstrukcija tlačne linije jest sljedeća: zrake iz poligona sila moramo prenijeti na skicu lučne konstrukcije i to tako da se svaka od zraka nalazi između pridruženih pravaca sile težine susjednih blokova. Izlomljena linija koju dobivamo jest tlačna linija luka. Ako opet pogledamo sliku 22.b), vidjet ćemo podebljani trokut. On predstavlja sile koje djeluju na blok 5. Zornije je to prikazano na slikama 22.c) i 22.d) gdje se vidi da su te sile u ravnoteži i da je razlog što taj blok stoji upravo ravnoteža svih sila koje djeluju na njega. Analogno tome, isto pravilo se može upotrijebiti za sve ostale blokove te lučne konstrukcije. Ako se vratimo na sliku 22.a), vidjet ćemo da je tlačna linija identična, ali obrnuta lančanici na koju djeluju sile jednake težinama blokova.

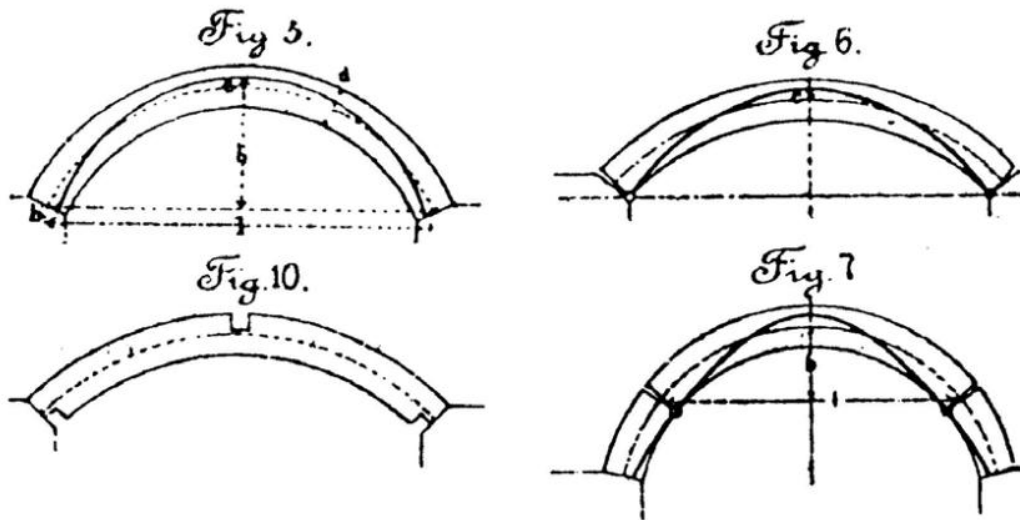
3.3. Elastično rješenje

Srednjovjekovne i antičke metode konstruiranja lukova, gdje se projektira na temelju iskustva i procjene nisu bile kvalitetno rješenje u graditeljstvu. Tog je problema bio svjestan Poncelet (1852) i u svojem je osvrtu o teorijama lukova predložio primjenu elastične teorije kako bi se dobilo jedinstveno rješenje za pojedine oblike i vrste lukova.

Ipak, graditelji i projektanti toga vremena pokazali su svojevrstan otpor prilagodbi ziđa kao heterogenog i anizotropnog materijala elastičnoj teoriji koja se prakticirala za izotropne i homogene materijale. Zapravo su, do prije 1880., lukovi su bili podijeljeni na „elastične“, drvene, čelične i „krute“ (zidane i kamene). Već su 1860. objavljeni neki radovi kojima je glavna tematika bila elastična teorija lukova (npr. španjolskog inženjera i arhitekta Saavedre, 1860). Castigliano (1879) je prakticirao vlastitu elastičnu teoriju na svojim mostovima.

Winkler (1879) je napravio prvi korak ka priznavanju elastične teorije lukova kao napredak u dotadašnjem graditeljstvu. Nakon proučavanja svih dotadašnjih i mnogih suvremenih, shvatio je da je elastična teorija zaista najbolje rješenje. Prvi je u proračun uveo vanjske utjecaje koji mogu utjecati na poziciju tlačne linije. Neki od njih su: popuštanje, odnosno slijeganje oslonaca (upornjaka) pod opterećenjem, temperaturne razlike i

nesavršenost gradnje. Svi navedeni vanjski utjecaji mogu doprinijeti nastanku i razvitku pukotina i Winkler je bio svjestan da će takve pojave znatno utjecati na tlačnu liniju, koja u konačnosti može biti znatno drugačija od izračunane po starijim teorijama. Stoga je preporučio umetanje unutarnjih zglobova tijekom izgradnje kako bi se lakše kontrolirala tlačna linija (slika 23.)



Slika 23. Winklerovi prijedlozi za umetanje unutarnjih zglobova

Nakon 1880. inženjeri su prihvatili elastičnu teoriju i sve se više pokušavalo pojednostaviti naporan račun koji je teorija zahtijevala. Ipak, i nakon mnogo godina usavršavanja teorije, ostale su mnoge nedoumice, pa je stoga Austrijski institut inženjera i arhitekata napravio niz istraživanja i eksperimenata na kamenim, zidanim, betonskim i armiranobetonskim lukovima (neki od njih raspona čak do 23 m). Rezultati su potvrdili kako se zaista radi o novoj, modernoj elastičnoj metodi. Na fotografijama i crtežima ove opsežne studije (napisane na više od 130 stranica) može se lako vidjeti pukotine nastale pomakom oslonaca i formiranjem mehanizama.

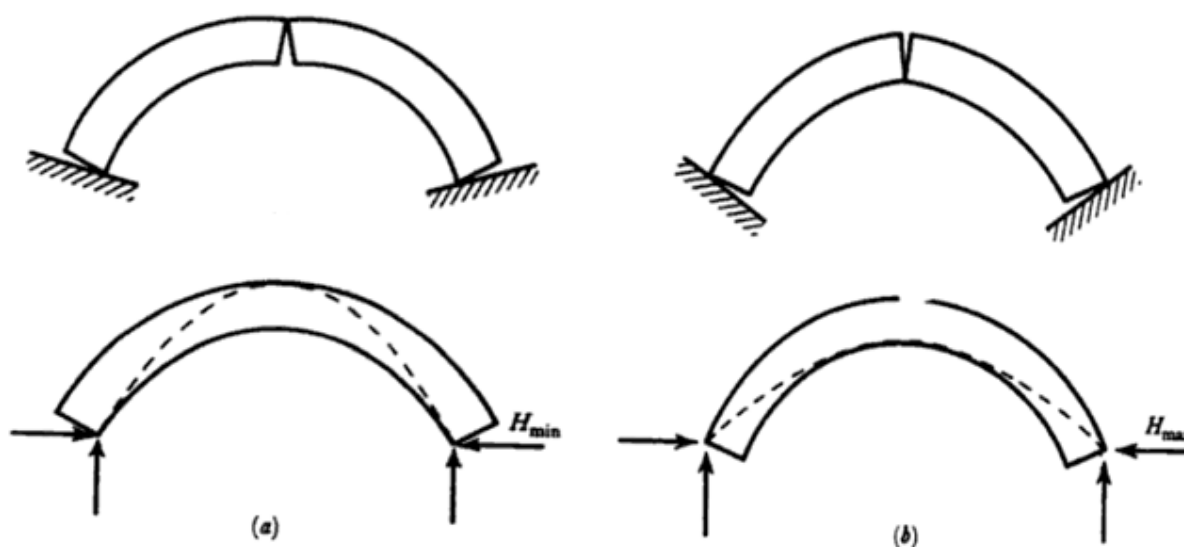
Iako je materijal bio anizotropan i heterogen, iako su se konstrukcije i dalje rušile pod utjecajem vanjskih djelovanja, inženjeri su smatrali da su pronašli pravo rješenje i smatrali su elastičnu teoriju najboljom metodom u projektiranju lukova. Zato je i nazvana „modernom teorijom lukova“, u odnosu na „staru teoriju“.

3.4. Granično stanje sloma i mehanizmi sloma

Da bismo u potpunosti razumijeli ponašanje lukova moramo razumijeti njegove mehanizme sloma. Pritom navire jedno naizgled jednostavno pitanje, kako je moguće da se konstrukcija građena od materijala „beskonačne“ čvrstoće može srušiti. Vidjeli smo da pretjerane deformacije vode do sloma. No, bi li bilo moguće rušenje luka bez deformacija, odnosno bez pomaka oslonaca?

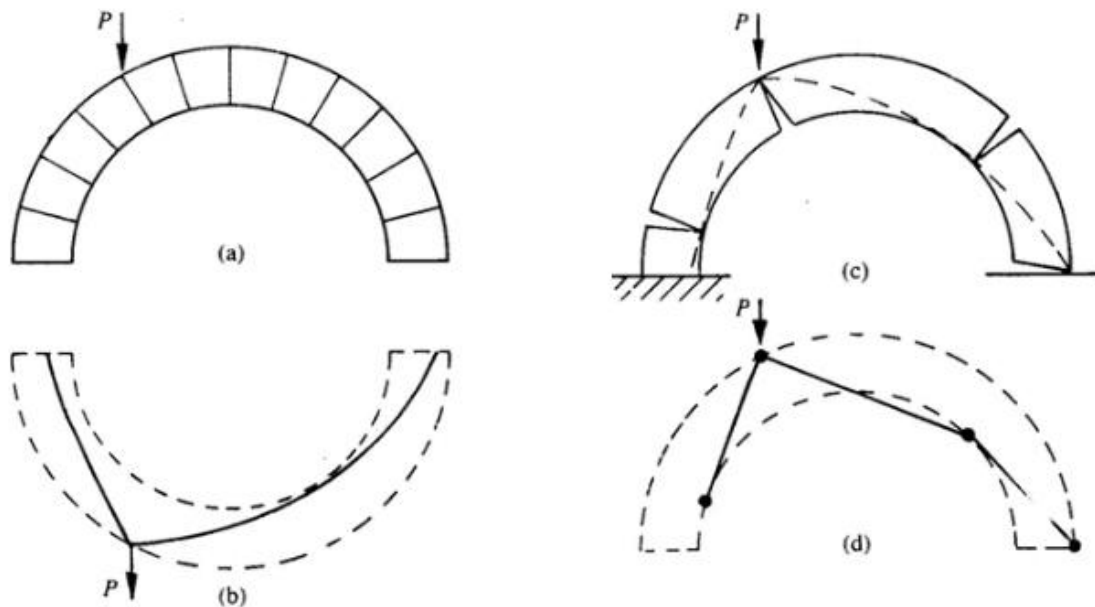
Kao što je poznato, kad tlačna linija dodiruje rubove obrisa luka, formira se zglob koji omogućava rotaciju. Tri zgloba čine luk statički određenim, i kako smo vidjeli, luk je tada stabilna struktura.

No, što se zapravo mora dogoditi kako bi se u luku stvorila tri zgloba? Rješenje je prilično jednostavno, zglobovi će se stvoriti ili pod direktnim utjecajem opterećenja ili zbog deformacija izazvanih slijeganjem, horizontalnim pomacima oslonaca ili promjenama temperature. Razmotrimo najprije nastanak zglobova zbog pomaka oslonaca. Zbog povećanja ili smanjenja raspona luka dolazi do novih raspodjela naprezanja unutar luka, pa analogno tome nastaje i novi oblik tlačne linije. Posljedica navedenog je dodirivanje tlačne linije s rubnim djelovima luka i nastajanja zgloba na tim mjestima. Detaljnije objašnjenje je sadržano u poglavlju 2.2.4.



Slika 24. Zglobovi i tlačna linija zbog: a) povećanja raspona, b) smanjenja raspona

Jedan zglob više će, naime, pretvoriti luk iz sasvim stabilne u labilnu konstrukciju, tj. pretvorit će ga u mehanizam koji u konačnici vodi ka slomu. Stoga, povećanje opterećenja koje vodi formiranju četiriju zglobova dovodi do rušenja konstrukcije bez slamanja materijala. Ovo se može dogoditi luku s prevelikim opterećenjem koji previše deformira tlačnu liniju.



Slika 25. Formiranje zglobova kod koncentriranog opterećenja

Polukružni luk prikazan na slici 25. opterećen je vlastitom težinom i koncentriranom silom P . Dodatno opterećenje (uz stalnu vlastitu težinu) deformira tlačnu liniju i oblikuje je kako je prikazano na slici 25.b). Vidljivo je da tlačna linija dodiruje intrados u blizini pete luka s jedne strane i na polovici između pete luka s druge strane i tjemena te ekstrados u točki djelovanja koncentrirane sile i u jednoj od peta luka. Nastala su četiri zgloba i luk je postao mehanizam. Zbog toga dolazi do sloma i to u točkama gdje tlačna linija dodiruje rubne djelove luka, odnosno u novonastalim zglobovima, kao što se vidi na slikama 25.c) i d).

4. UPOTREBA JEDNOSTAVNIH MODELA ZA PRIKAZ TLAČNE LINIJE I PONAŠANJA LUKA U POSEBNIM SLUČAJEVIMA

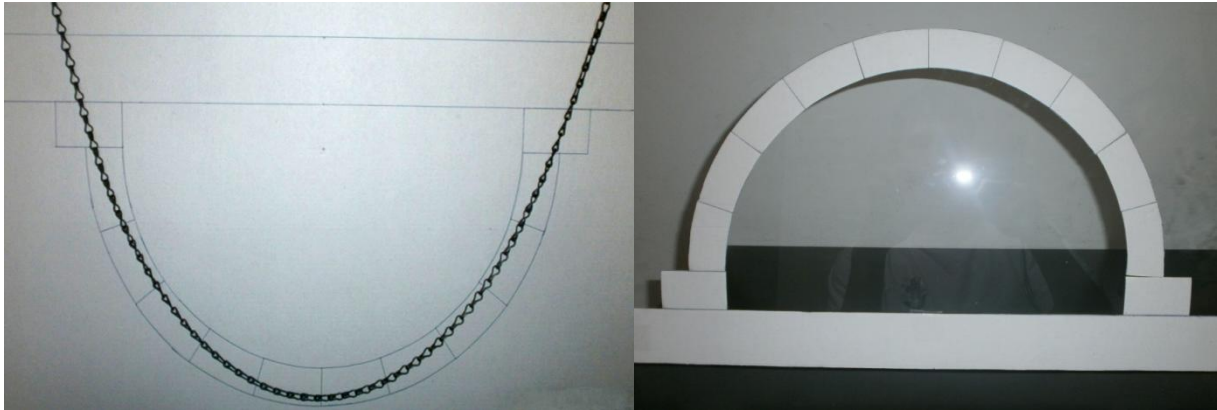
Modeli za prikazivanje lukova i svodova rađeni su od antičkih vremena pa sve do sredine 19. stoljeća kao jednostavan prikaz stabilnosti lukova. Učestala je bila praksa kod svih mostograditelja izrađivati modele od laganog kamena ili gipsa kako bi dokazali postojanost svojih konstrukcija. Naravno, modele nisu činili u stvarnim dimenzijama, već su ih smanjivali za nekoliko desetaka pa do nekoliko stotina puta. Ipak, takvi modeli nisu bili jamstvo da će njihov luk ili svod stajati, a razlog je u nesavršenoj izradi modela. Najčešće su bile greške kod zglobova; tada se konstrukcija ponaša drugačije nego u stvarnosti. Kvalitetne su modele mogli raditi već prekaljeni majstori s kvalitetnim alatom.

Primjer koji će se ovdje prikazati nije složeni prostorni model kakve su radili majstori u davnijim vremenima, već je jednostavan primjer koji prikazuje kako se ponaša luk u pojedinim situacijama i u kakvom je odnosu tlačna linija s oblikom luka.

Za model je upotrijebljen karton debljine oko 1.5 mm iz kojeg je izrađen luk, lančanica koja tvori tlačnu liniju i podloga na koju se stavlja luk, a u ovom primjeru bit će upotrijebljeno staklo (potrebna je što glađa površina zbog malog koeficijenta trenja).

Proces izrade luka jest sljedeći. Iz kartona se izrežu lučni elementi, postolje na koje će se oslanjati luk i mali upornjak (oslonac). Optimalan broj blokova jest 10-12, a u ovom je primjeru korišteno 10 blokova.

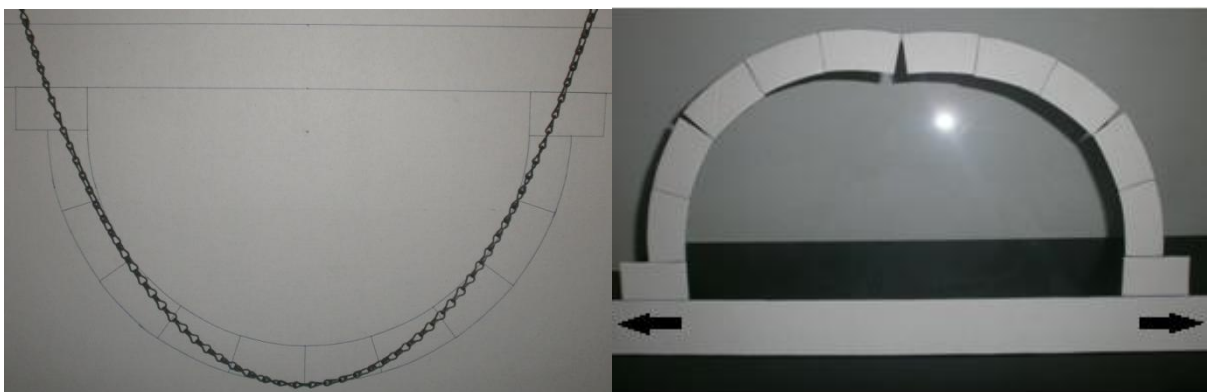
Prije početka izrezivanja blokova kartona, treba provjeriti hoće li takav luk moći stajati. Kao što je Hooke ranije ustvrdio, luk će stajati ako se unutar rubova njegova obrisa, tj. između intradosa i ekstradosa može umetnuti lančanica. Upravo će se tako provjeriti stabilnost luka (slika 26.)



Slika 26. Luk u ravnoteži (tlačna linija nalazi se unutar luka)

Kad se dokaže stabilnost luka, može se krenuti na izradu kartonskih blokova. Nakon što su oni izrezani, slažu se jedan na drugi od peto luka prema tjemenu, a zatim se prenose na podlogu koju treba nakositi do te mjere da se luk ili njegovi elementi ne prevrnu.

Upravo se u ovom trenutku vidi kako blokovi pritišću jedan drugog i kako se prenosi tlačna sila prema „temelju“ ovog modela. Ovakav je luk u ravnoteži, statički je neodređen i postoji mnogo tlačnih linija koje se mogu konstruirati unutar njega. Ako se na njega djeluje horizontalnom silom u osloncima, radijus luka se, ovisno o smislu djelovanja sile, povećava ili smanjuje. Prilikom ekstremne promjene radijusa luka dolazi do stvaranja zglobova, a ovisno o povećanju ili smanjenju, oni se pojavljuju ili na ekstradosu ili intradosu, i to na različitim pozicijama unutar samoga luka. Nastaju tri zgloba i cijeli sustav postaje statički određen, što znači da postoji specifična tlačna linija za taj oblik luka i da je moguće izračunati sve unutrašnje sile koristeći se jednadžama ravnoteže.



Slika 27. Ponašanje luka kod povećanja radijusa

Vidljivo da kod povećanja radijusa dolazi do stvaranju zglobova na ekstradosu u tjemenu i na intradosu u blizini peta luka (slika 27.). Analogno tome, kod smanjenja radijusa dolazi do stvaranja zglobova na intradosu u tjemenu i na ekstradosu u petama luka. Poznato je da tlačna linija prolazi točno kroz novonastale zglobove, što je i vidljivo na slici 28.

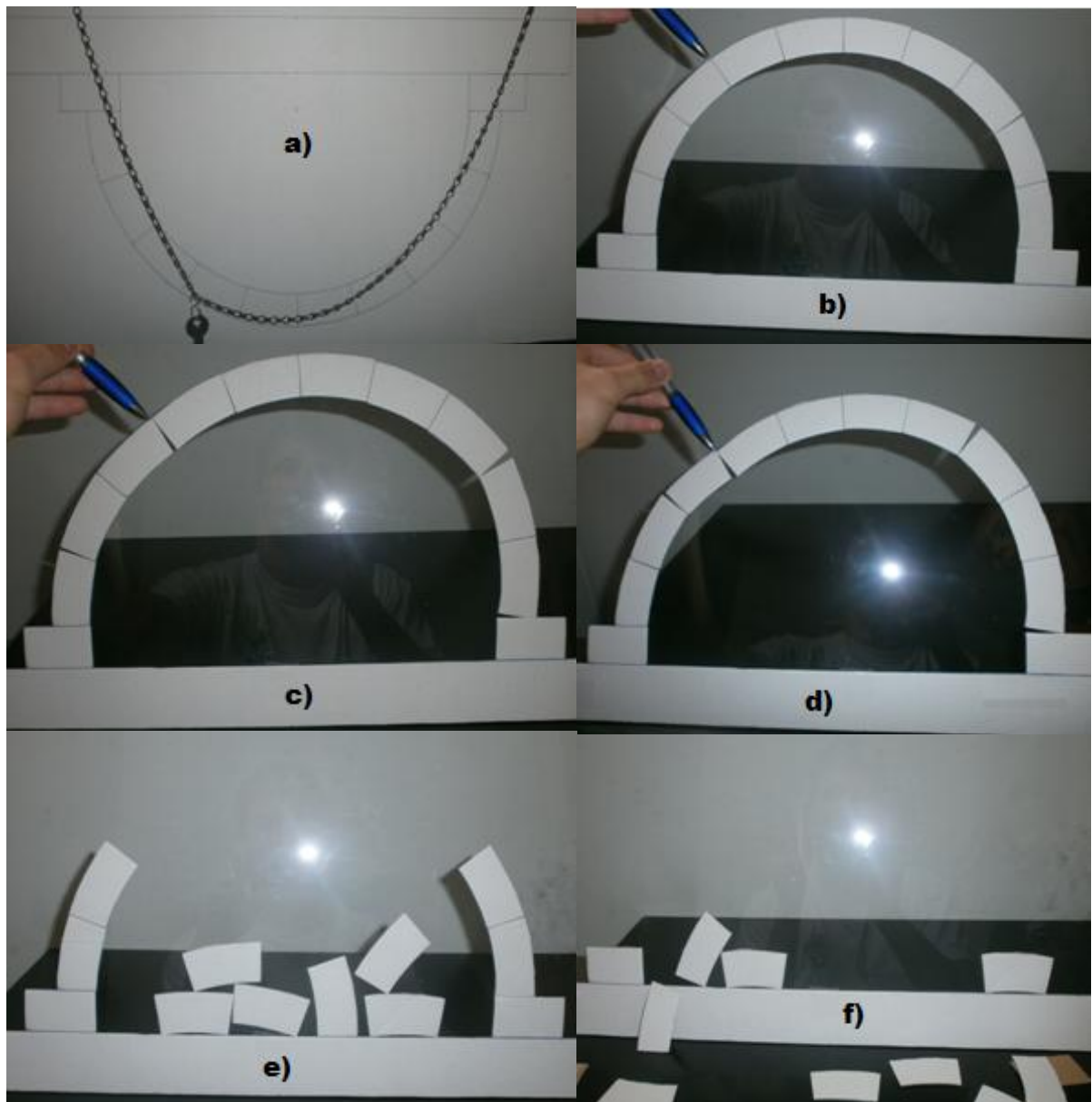


Slika 28. Ponašanje luka kod smanjenja radijusa

Na zadnjem će primjeru biti objašnjeno i prikazano ponašanje, ali i rušenje luka opterećenog koncentriranom silom. Na slici 29.a) vidi se oblik tlačne linije prikazane pomoću lančanice i privjeska koji predstavlja koncentrirano opterećenje. Mjesta na kojima lančanica dodiruje intrados bit će mjesta na kojima će se stvoriti pukotina, odnosno zglob kod tlačnog opterećenja luka.

Na slikama 29.b) do d) vidljivo je postupno opterećenje luka i razvitak pukotina. Nakon određene vrijednosti tlačnog opterećenja, razvijaju se prevelike pukotine i stabilnost luka se narušava te dolazi do rušenja. Upravo je ovo primjer rušenja konstrukcije i prikaz nastanka pukotina koji je istovjetan kao kod realnih lučnih konstrukcija.

Postoji mnogo tlačnih linija za luk koji je statički neodređen. No, smanjujemo li debljinu luka, sve više smanjujemo broj tlačnih linija koje se mogu iscrtati između ekstradosa i intradosa. Nakon određenog smanjenja, dolazimo do stanja u kojem se može umetnuti samo jedna tlačna linija. U pitanju je granično stanje luka, kod njega dolazi do pojave zglobova bez dodatnih opterećenja i pri svakom novom opterećivanju luka dolazi do destabilizacije i konstrukcija će se srušiti. Takav se luk naziva *minimalnim lukom*.



Slika 29. Ponašanje luka prilikom koncentriranog opterećenja

Tvrdnje koje se mogu potvrditi nakon pokusa na ovim modelima su sljedeće:

Ravnoteža:

- (1) Lančanica predstavlja određeno ravnotežno stanje za dano opterećenje.
- (2) Postoji beskonačno mnogo oblika lančanica koje se mogu umetnuti u luk.
- (3) Varijacije u opterećenju mijenjaju oblik lančanice, odnosno tlačne linije.

Materijal

- (4) Zidani luk mora biti u tlaku; to implicira da se lančanica mora nalaziti unutar luka.
- (5) Lančanica unutar luka garantira da model nikad neće biti u stanju vlačnog naprezanja.

Ravnoteža + materijal

- (6) Postoje dvije ekstremne pozicije lančanice, koje odgovaraju maksimalnoj i minimalnoj visini lančanice, a analogno tome i maksimalnom i minimalnom potisku luka.
- (7) Nije moguće izračunati stvarni, ali je moguće izračunati minimalan i maksimalan potisak luka.

Pukotine i zglobovi

- (8) Kad lančanica dodiruje rubne dijelove luka (linije intradosa ili ekstradosa), stvara se zglob. U realnom luku to se manifestira pojavom pukotine.

Odgovor na pomake oslonaca

- (9) Zbog nanošenja opterećenja postupno se povećava polumjer luka. Rezultat je prilagodba luka novonastaloj situaciji i razvitak zglobova. Nastaju tri zglobova, jedan u tjemenu, a dva u svakoj od peta luka.
- (10) Pukotine određuju poziciju lančanice (tlačne linije), koja mora prolaziti kroz zglobove. U spomenutom slučaju, lančanica se prilagođava poziciji u kojoj je potisak luka minimalan. Luk je sada statički određen i unutarne se sile mogu proračunati jednostavnim jednadžbama ravnoteže.
- (11) Kad se oslonci približe i radijus se smanji, ponovno se pojavljuju pukotine, a lančanica zauzima položaj u kojem je potisak luka maksimalan. Stvaraju se tri zglobova i luk je opet statički određen.
- (12) Bilo koji drukčiji pokret oslonaca će rezultirati sasvim novim stanjem pukotina. Kako kraj svakog luka, u blizini oslonca ima tri stupnja slobode (horizontalni, vertikalni pomak i moment savijanja), broj mogućih kombinacija je poprilično velik.

Rušenje lukova

- (13) Dodatna koncentrirana sila na stabilnom luku deformirat će tlačnu liniju. Za određenu vrijednost koncentrirane sile, tlačna linija će ostati unutar rubova obrisa luka, no kod granične situacije tlačna linija će dodirivati intrados, odnosno ekstrados u četiri zgloba, nastat će mehanizam i konstrukcija će se srušiti.

Minimalni luk

- (14) Luk u kojem se debljina ne može smanjiti, odnosno može se iscrtati samo jedna tlačna linija, zove se minimalan luk.
- (15) Kod polukružnog luka, minimalni luk je okarakteriziran odnosom raspona i debljine luka. Za takav je polukružni minimalan luk karakterističan odnos $s/t \cong 18$.

Geometrijski koeficijent sigurnosti

- (16) Minimalan nam luk daje vrlo važnu informaciju o sigurnosti luka istog oblika. Geometrijski koeficijent sigurnosti (Heyman) se može definirati kao: odnos između debljina realnog luka i minimalnog luka istog oblika.
- (17) Za prikaz geometrijskog koeficijenta sigurnosti koji je jednak ili veći od određene vrijednosti n , potrebno je nacrtati tlačnu liniju unutar luka istog oblika debljina t/n . Primjerice, za koeficijent 2, tlačnu liniju je moguće nacrtati u jednoj od polovica debljine luka; za koeficijent 3, tlačnu liniju je moguće nacrtati u jednoj od trećina debljine luka.

Dva jednostavna modela, Hookeova lančanica i kartonski luk mogu se upotrijebiti kao predodžba glavnih karakteristika teorije lukova. Modeli mogu pomoći pri shvaćanju ponašanja ove vrste konstrukcije koja se danas vrlo rijetko rabi u modernom graditeljstvu. „Igrajući“ se njima, učenik, student pa čak i iskusni graditelj može naučiti mnogo toga, od potvrde već naučenih znanja do istraživanja novih mogućnosti.

5. ZAKLJUČAK

Lučne se konstrukcije grade od samih početaka graditeljske povijesti, a mnoge su se održale do danas. U počecima su građene po iskustvenoj teoriji, osjećaju graditelja, a s naraštaja u naraštaj su češće prenošene usmenim, a rjeđe pismenim putem. Kako bismo lakše razumijeli kako su stari graditelji uopće zamislili, a zatim i izgradili mnoge velebne lučne konstrukcije, potrebno je bilo razviti teoriju projektiranja lukova.

Iako je tokom povijesti nastajalo mnogo teorija, mnoge su se i proturiječile, no čak ni danas ne postoji sasvim moderna, suvremena metoda projektiranja zidanih i/ili kamenih lukova. Razlog tome je prestanak upotreba zidanih i kamenih lučnih konstrukcija u modernom graditeljstvu i arhitekturi. No, za današnje potrebe, korisna je i prva, Hookeova teorija, koja je najjednostavnija, ali i najupotrebljivija. Upotpunio ju je profesor Heyman, dodajući nove pojmove, koeficijente i vrijednosti te je tako približio inženjerskoj struci.

Najvažnije je otkriće tlačne linije; ona ustvari predstavlja težnju graditelja da izgradi luk čija se os poklapa s tlačnom linijom i tako samim oblikom konstrukcije poništi sve unutrašnje sile osim tlačnih naprezanja. U tome i jest bit luka, kod korištenog materijala poput kamenog ziđa koji imaju vrlo malu vlačnu čvrstoću, opterećenje prenijeti tlačnim putem.

Da bi slika o projektiranju lukova bila upotpunjena, pobrinuli su se inženjeri s kraja 19. stoljeća. Shvatili su da je najbolje rješenje pronaći metodu kod koje će biti moguća samo jedna tlačna linija za pojedini oblik i zato su istražili elastičnu teoriju lukova. Po njoj su građeni lukovi s već umetnutim zglobovima u tijeku izgradnje što daje samo jednu tlačnu liniju koja je detaljno izračunata, ovaj puta uključujući i vanjska opterećenja.

Teorije lukova dale su nam uvid u jednu drugačiju, klasičnu dimenziju projektiranja konstrukcija koja seže u davna vremena dok računala nisu obavljala pola inženjerskog posla, već su vladali iskustvo i procjena. S ovim spoznajama možemo proniknuti u srž mnogih velebnih građevina antičkog i srednjovjekovnog graditeljstva, shvaćajući pritom sve probleme i komplikacije na koje su naišli stari graditelji.

6. LITERATURA

- [1] Philippe Block, Matt DeJong, John Ochsendorf: *As hangs the Flexible Line: Equilibrium of Masonry Arches*. Nexus Network Journal, Vol. 8, No. 2, 2006., str. 13 – 24.
- [2] Santiago Huerta, *Galileo was Wrong: The Geometrical Design of Masonry Arches*. Nexus Network Journal, Vol. 8, No. 2, 2006., str. 25 – 51.
- [3] Santiago Huerta: *The Analysis of Masonry Architecture: A Historical Approach*. Architectural Science Review, Volume 51.4., str. 297 – 328.
- [4] Santiago Huerta: *Mechanics of Masonry vaults: The equilibrium approach*. Historical Constructions, P.B. Lourenco, P. Roca (Eds.), Guimaraes, 2001., str. 47 – 69.
- [5] Karl–Eugen Kurrer: *The History of the Theory of Structures: From Arch Analysis to Computational Mechanics*, GmbH & Co. KG, Berlin, 2008.
- [6] Skripta uz predavanja, *Lučni mostovi*. Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, veljača 2003.
- [7] Jacques Heyman: *Coulomb's Memoir on Statics: An Essay in the History of Civil Engineering*. Imperial College Press, London, 1997.
- [8] Santiago Huerta: *The use of simple models in the teaching of the essentials of masonry arch behaviour*. Fondazione Flaminia, Ravenna, 2005.