



***GRAĐEVINSKI FAKULTET
ZAVOD ZA KONSTRUKCIJE
KATEDRA ZA MOSTOVE***

Ovješeni mostovi





OVJEŠENI MOSTOVI

- Kabeli od visokovrijednog čelika osnovni konstrukcijski element
 - Zatege (kosi kabeli) koji su direktno vezani za gredu

Most preko rijeke Jangce u Anqing Anhui. Kina - By Joe [CC BY 2.0]



Most Golden Gate u San Franciscu, SAD



1. Uvod

- U toku posljednjih tridesetak godina mostovi sa kosim zategama doživljavaju spektakularan razvoj u cijelom svijetu.
- **Ekonomičnost** ovih mostova ne leži samo u odličnom iskorištenju materijala kod eksploatacije već i u jednostavnoj izvedbi konzolnom gradnjom bez pomoćnih skela, stupova i zatega.
- I ovi su sklopovi kao i mnogi drugi **u čeličnim konstrukcijama bili ranije poznati**, pa su i za betonske mostove većih raspona postali vrlo prihvatljiv sustav.





- **Oblikovanju** mostova sa kosim zategama valja posvetiti osobitu pozornost, jer su to nesvakidašnje konstrukcije, koje se jako ističu u prostoru.
- Dok su prvi veliki mostovi sa kosim zategama bili s niskom niveletom, jer je takva bila topografija terena, (Njemačka je ravničarska zemlja), danas je izveden i veliki broj mostova sa visokom niveletom.
- Zbog atraktivnosti i male konstruktivne visine ovi se sustavi često koriste i kod većih pješačkih prijelaza.
- Zavješeni most sa najvećim rasponom danas je most **Russky** u Rusiji raspona $L=1.104\text{m}$ - to je most sa čeličnom gredom
- Najveći most sa spregnutom gredom je **Yangpu** u Kini raspona 602m , dok je najveći betonski most **Skarnsundet** u Norveškoj raspona 530m .

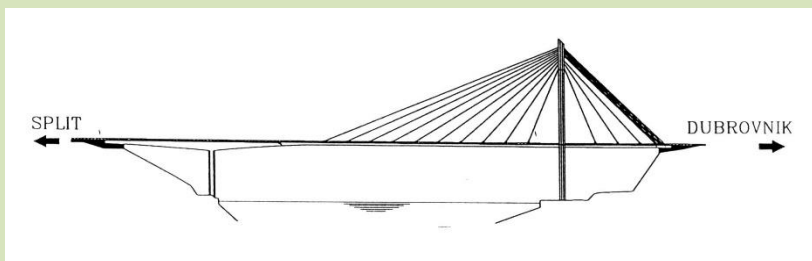
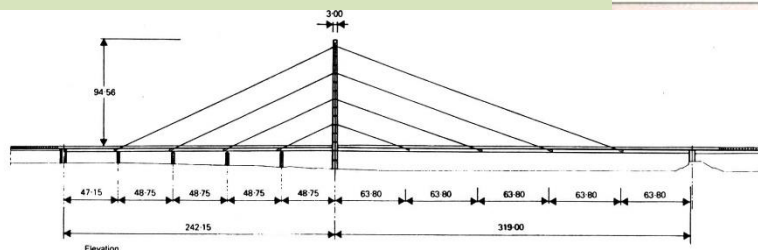


2. Opći podatci

2.1 Uzdužna dispozicija

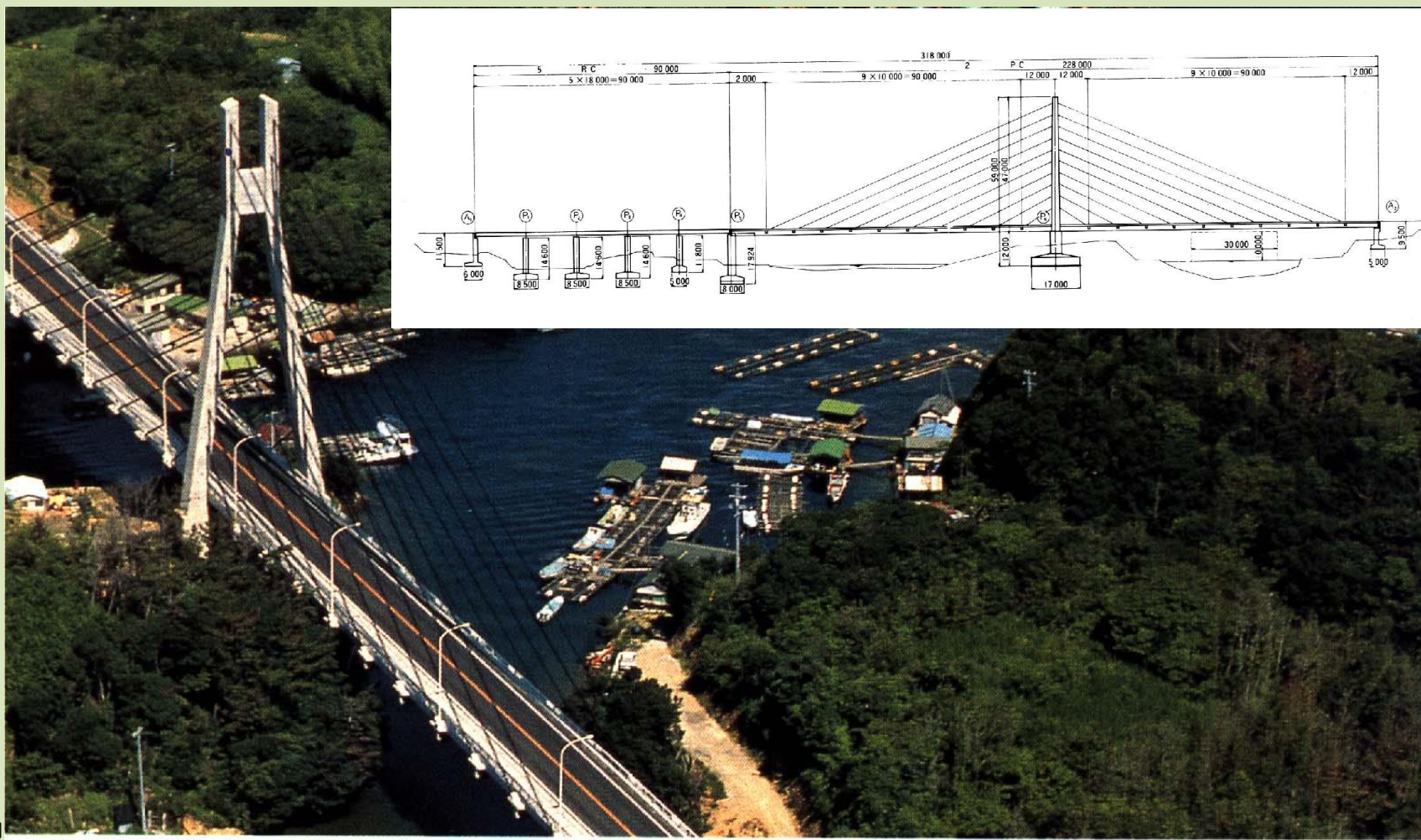
Uzdužna dispozicija mostova sa kosim zategama ovisi o vrsti i obliku prepreke, dopuštenim gabaritima, ekonomiji, estetici itd.

- Na temelju uvida u izvedene ovješene mostove može se zaključiti da postoje **tri osnovna sustava**. Kad se radi o nesimetričnoj prepreci projektant obično predviđa most sa kosim zategama sa **ekscentričnim pilonom** npr. *Knie Brücke*, i most *Franja Tuđmana u Dubrovniku*.



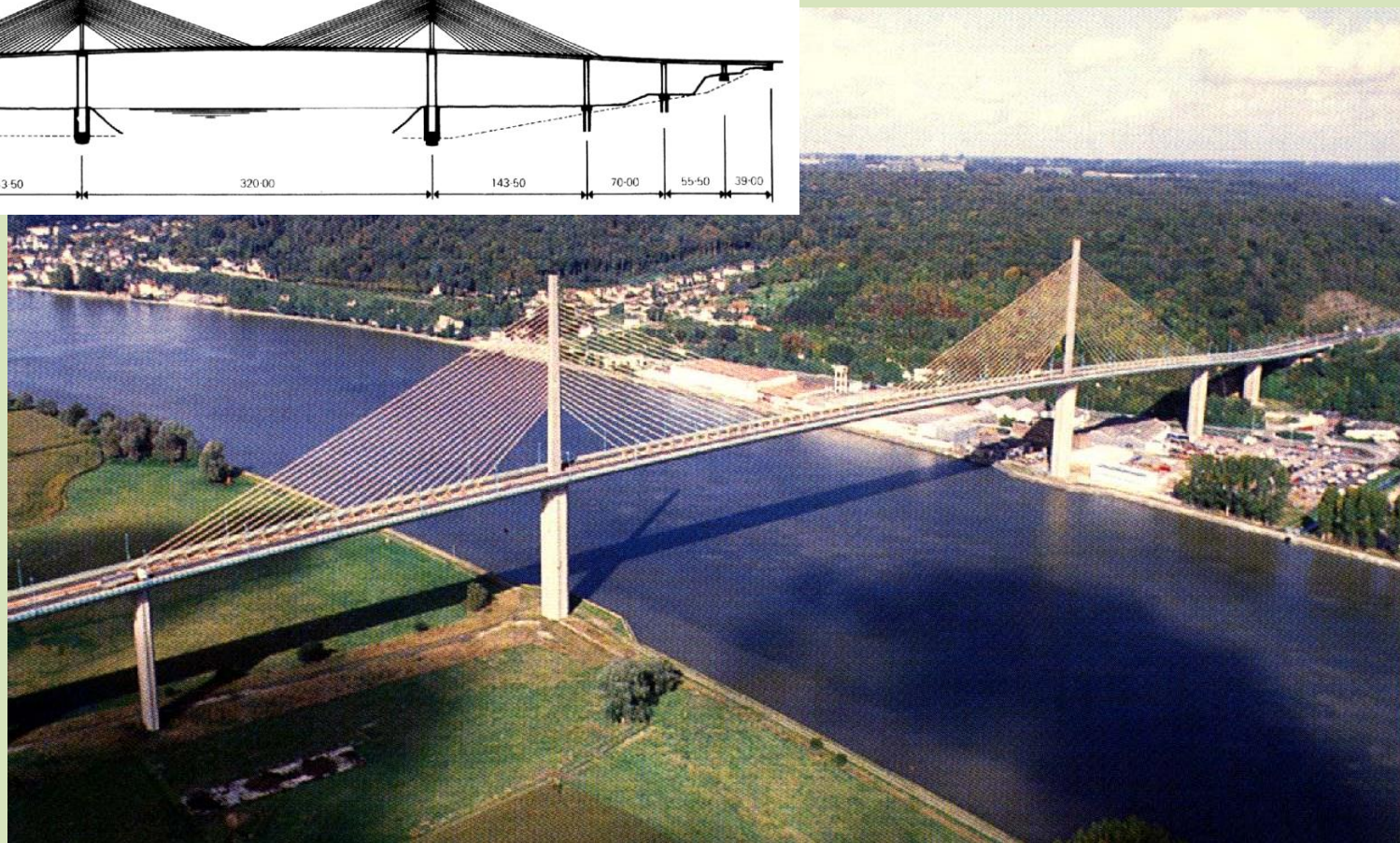
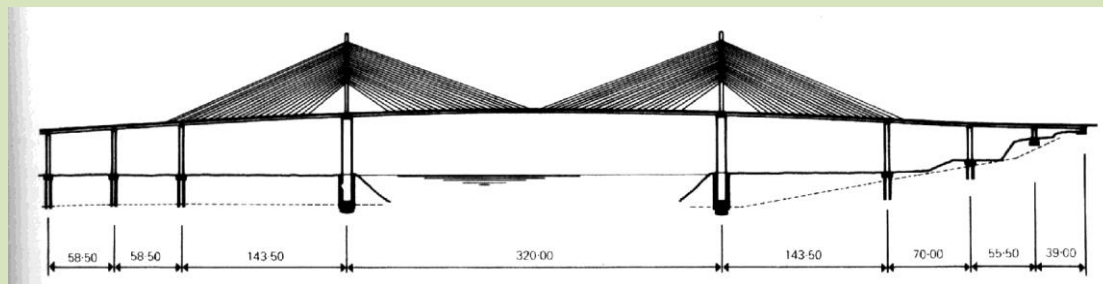


Ako treba premostiti dva približno jednaka otvora može se odabrati **simetričan most** sa kosim zategama preko dva raspona sa pilonom u sredini npr. most *Shima-Maruyama*.



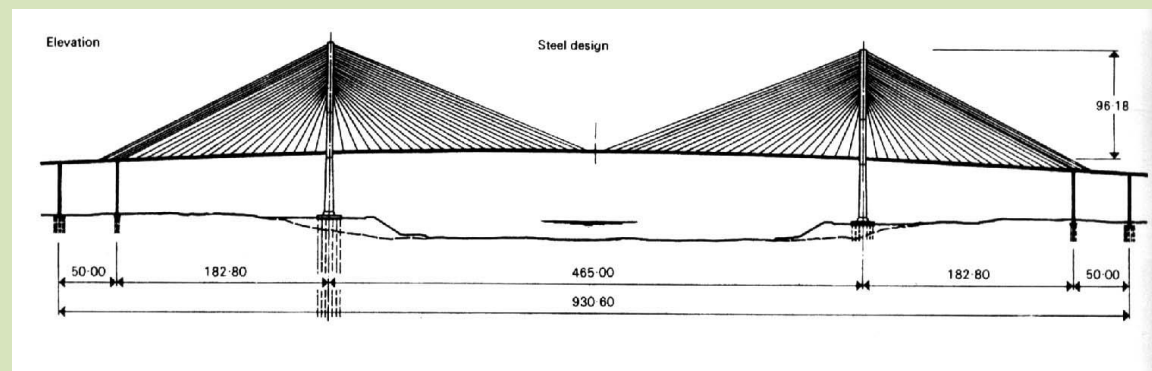


Mostovi sa kosim zategama preko tri raspona sa dva pilona čine treći osnovni sustav, u pravilu je **centralni otvor mnogo veći od bočnih** i takva rješenja se najčešće koriste (primjer most *Brotonne*).

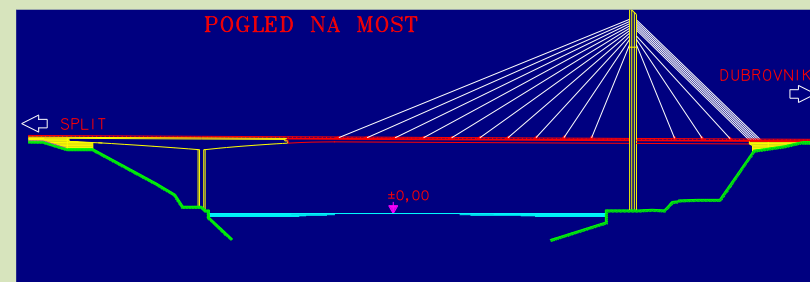




- Odnos bočnog raspona prema centralnom rasponu l/L kod ovog se standardnog sustava obično odabire 0,4 do 0,5.
- Što su bočni rasponi kraći to je manja varijacija momenata savijanja grede u njima i veća efikasnost stražnjih zatega uslijed povećane krutosti. Čini se povoljno daljnje smanjenje l/L ispod vrijednosti 0,4 no u tom slučaju dolazi do odizanja oslonaca na krajevima grede što stvara nove probleme.



- Kod asimetričnih mostova sa jednim pilonom odnos l/L je reda veličine 0,3 do 0,5.

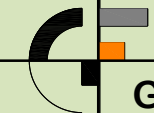




Kako treba voditi računa i o umornosti zatega bočnih otvora koje su u tom pogledu najnepovoljnije napregnute odabir optimalnog odnosa l/L ovisi o primijenjenom materijalu grede i o namjeni mosta.

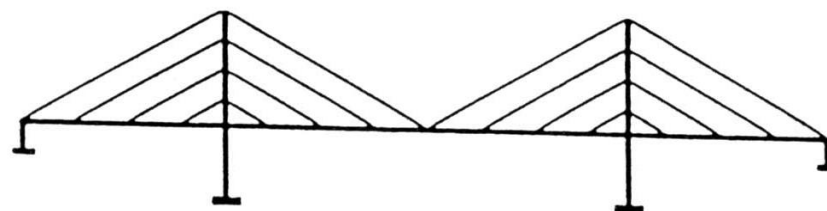
Za čelične mostove odnos pokretnog i stalnog opterećenja iznosi oko 0,4, a za betonske cca. 0,2, dok za željezničke mostove iznosi oko 1,1 za čelične mostove, odnosno 0,6 za betonske mostove.

Slijedi da za realizaciju optimalnog stanja napona bočne otvore čeličnih mostova treba odabirati manje nego betonskih mostova.

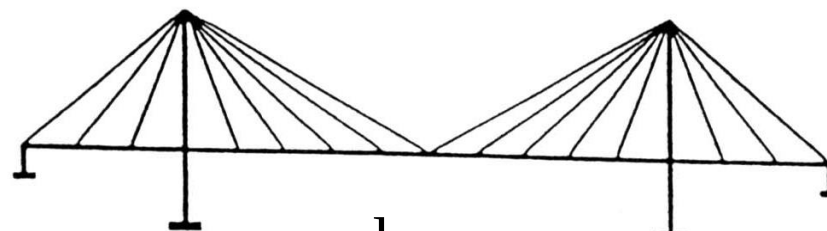




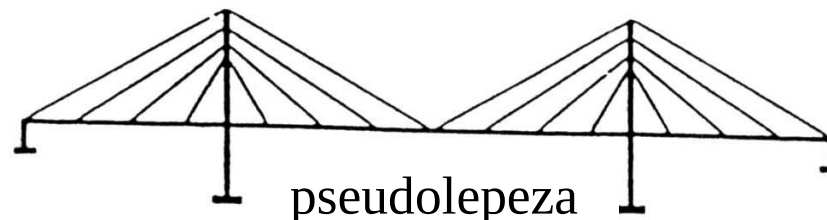
- Odabir **dispozicije zatega** je od primarnog značaja. Za ilustraciju troškovi za zatege su od mosta **Brotonne** iznosili 29 % ukupnih troškova mosta, a za pilon samo 4 %.
- Razlikujemo tri različite uzdužne dispozicije zatega: harfa, lepeza i pseudo-lepeza



harfa



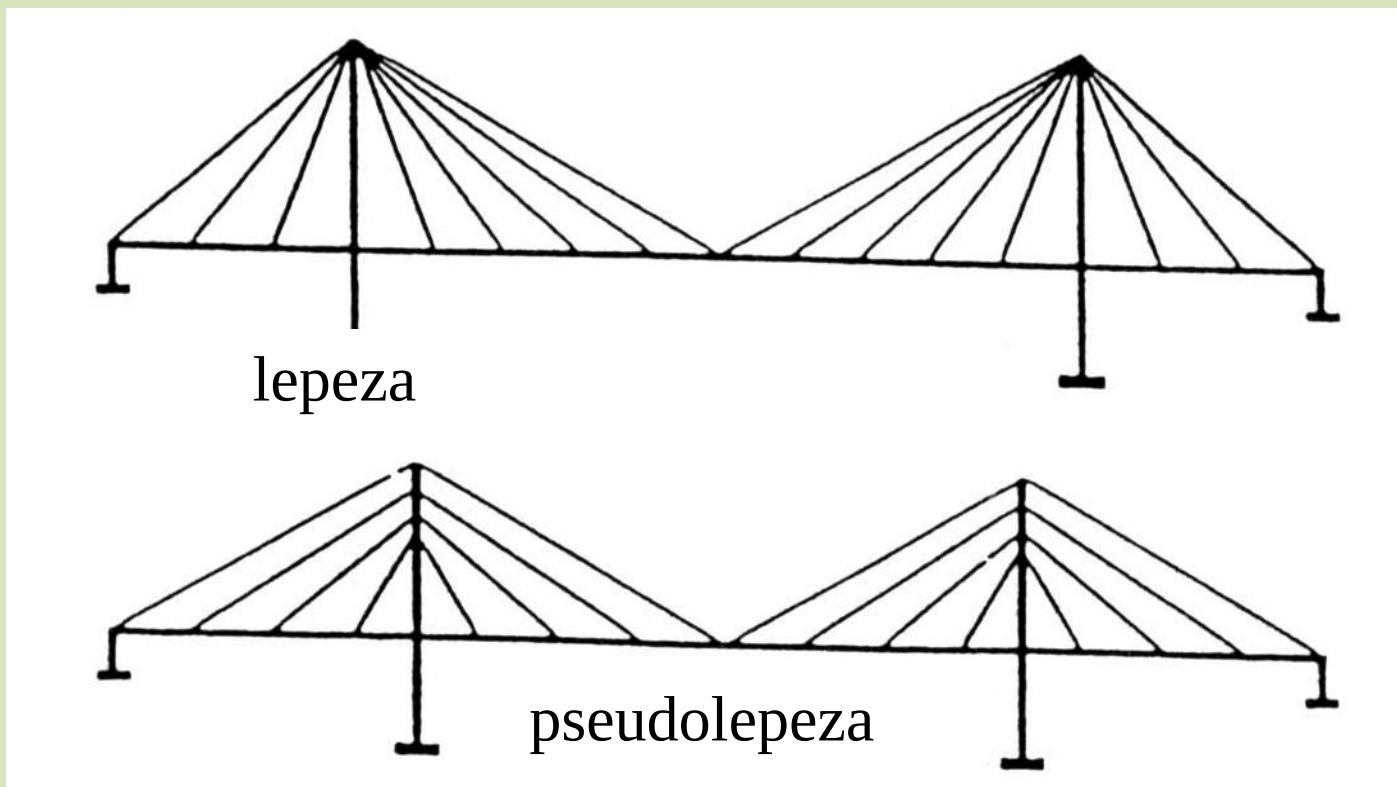
lepeza



pseudolepeza

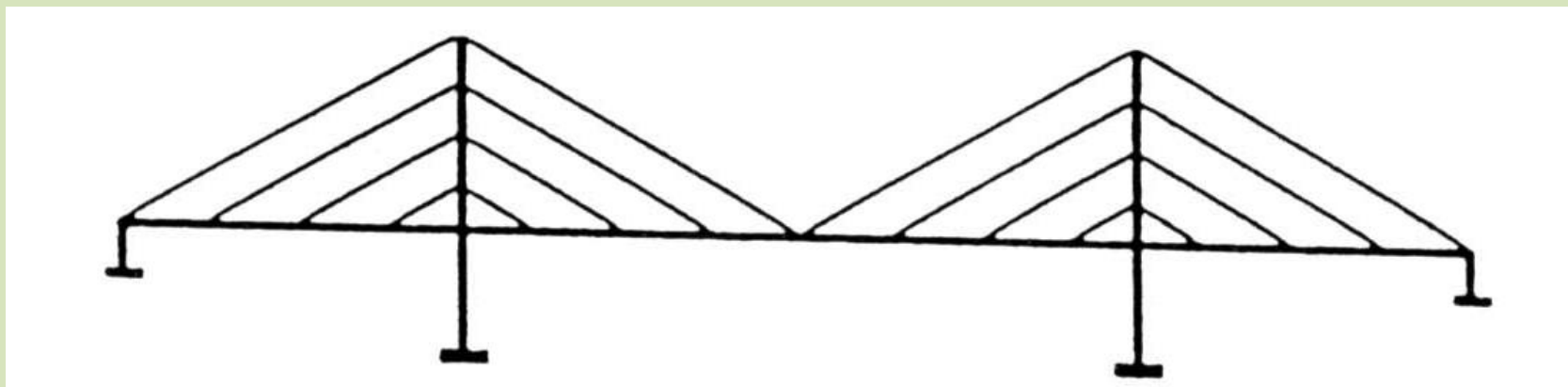


- Kod lepezaste dispozicije sve zatege konvergiraju na vrhu pilona, što stvara probleme kod usidrenja i stoga se rjeđe izvodi.
- Kod pseudo-lepezaste dispozicije su zatege kontinuirano rasprostrte po gornjem dijelu pilona, čime se olakšava sidrenje. Ova dispozicija se zbog ekonomičnosti najčešće izvodi.





Raspored u obliku harfe sa estetskog stanovišta predstavlja najelegantnije rješenje za dvije ravnine zatega, jer zatege ostaju paralelne bez obzira na kut gledanja. Priključci zatega pod istim kutom olakšavaju izvedbu, a i stabilnost pilona se povećava jer se zatege hvataju na cijeloj visini. Međutim u konstruktivnom pogledu ovaj sustav zahtjeva veću količinu zatega, proizvodi veće tlačne sile u gredi i daje zamjetne momente u pilonu.



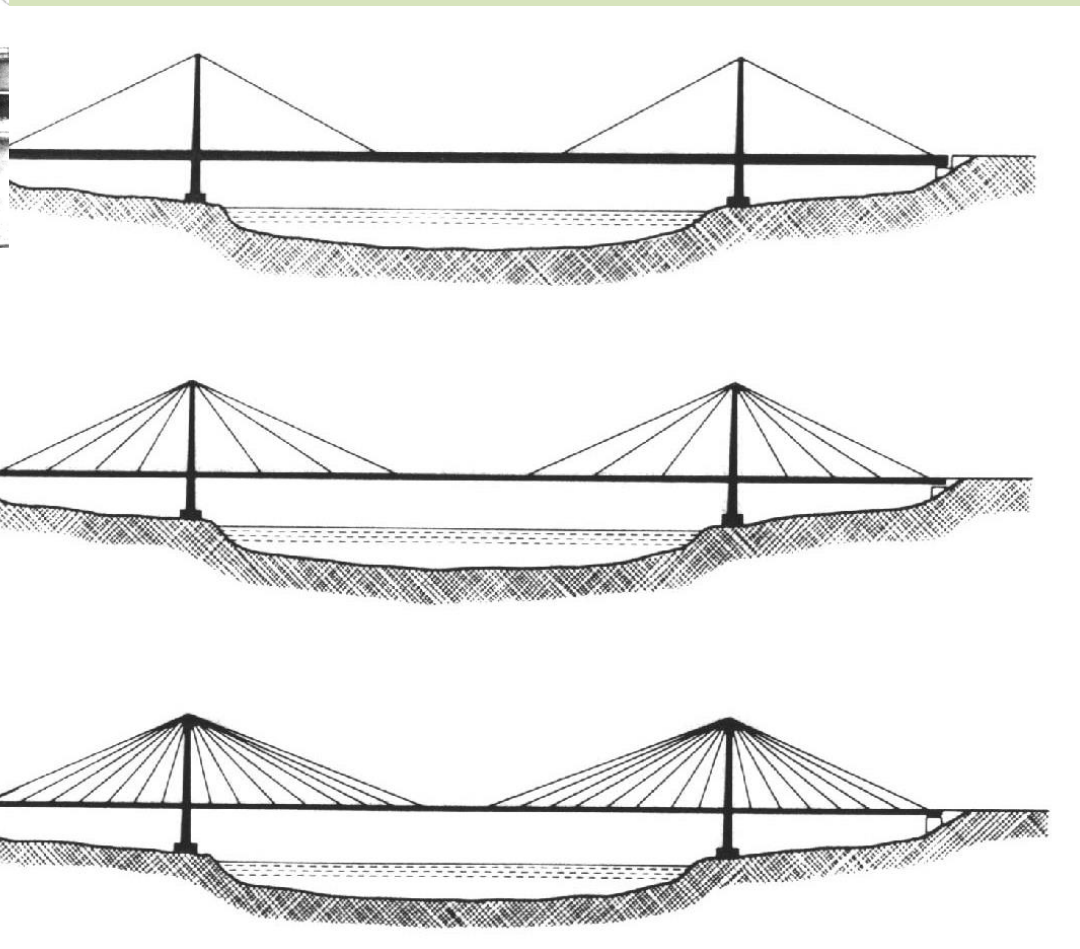


- Prvi moderni mostovi sa kosim zategama su izvedeni sa 2 do 6 sidrišta zatega u centralnom otvoru i međurazmacima između zatega 30 do 70 m. To je iziskivalo veliku krutost grede i komplicirana usidrenja zatega na gredi i pilonima, a i montaža je bila složena sa primjenom velikog broja pomoćnih konstrukcija.
- Visina grede prema rasponu h/L iznosila je oko $1/70$ i više.
- Danas se najvećim dijelom grade mostovi druge generacije sa mnogo zatega. Međurazmaci zatega na gredi iznose 5 do 15 m za betonske grede odnosno 10 do 20 m za čelične grede. Što je prije bila greda na elastičnim osloncima, kod ovog sustava postaje tlačni pojas konstruktivnog sistema obješenog na pilone (prostorne rešetke).





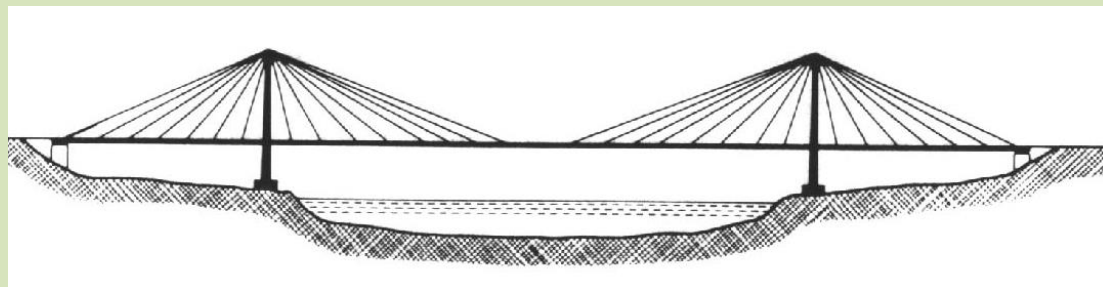
Razvoj dispozicije mostova sa kosim zategama:



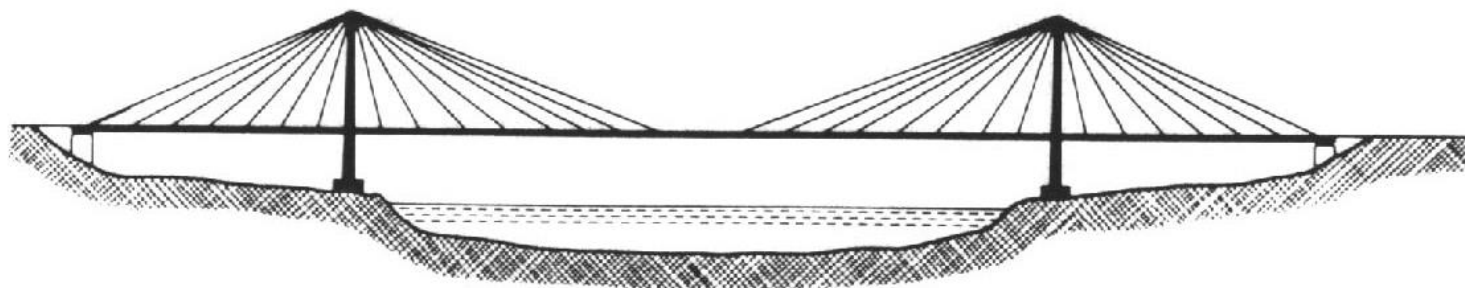


Prednosti sustava sa mnogo zatega su:

- jednostavnost montaže koja sukcesivno napreduje uz ugradbu slijedećih zatega
- pojednostavnjenje prijenosa sila uslijed smanjenja koncentriranih sila kod usidrenja i momenata savijanja kod grede
- jednostavnost zamjene zatega ako se za to ukaže potreba, bez prekida prometa, jer se uklanjanjem pojedine zatege vrlo malo mijenja distribucija unutarnjih sila
- odlične aerodinamičke karakteristike uvjetovane velikim sustavnim prigušenjem od velikog broja zatega različite duljine i frekvencije oscilacija

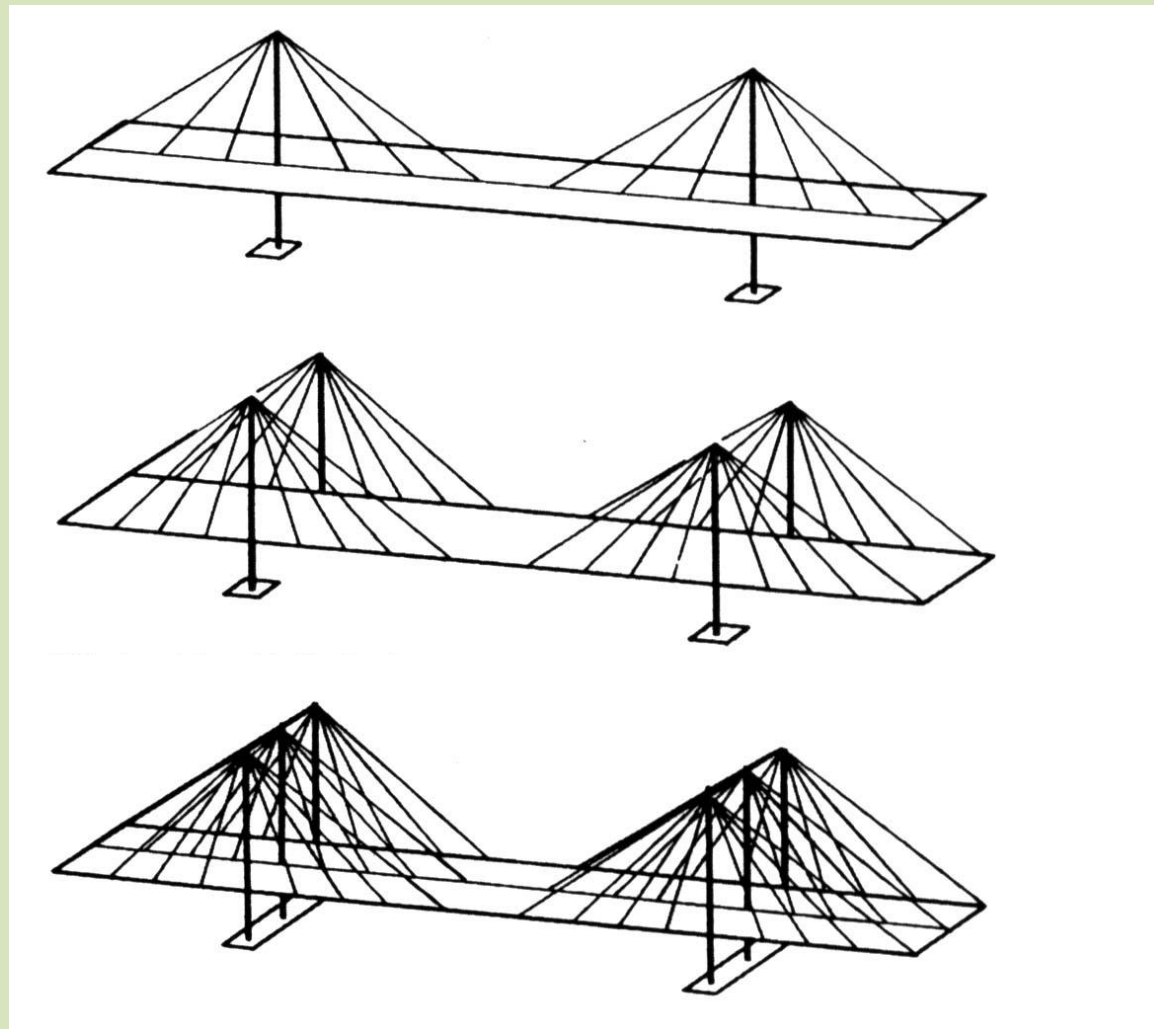


U statičkom pogledu ovaj se sustav može shvatiti kao konzolna rešetka, a krutost grede mora biti samo tolika da se osigura sigurnost na izvijanje i da deformacije od prometnog opterećenja ne budu velike.



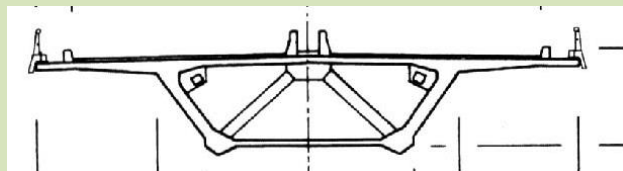
2.2. Poprečna dispozicija

Osnovna dilema je u odabiru **rasporeda zatega u jednoj ravni (aksijalno)** ili u **dvije ravnine (lateralno)**, jer o tome direktno ovisi oblikovanje poprečnog presjeka grede i pilona kao i statički i dinamički odgovor konstrukcije mosta

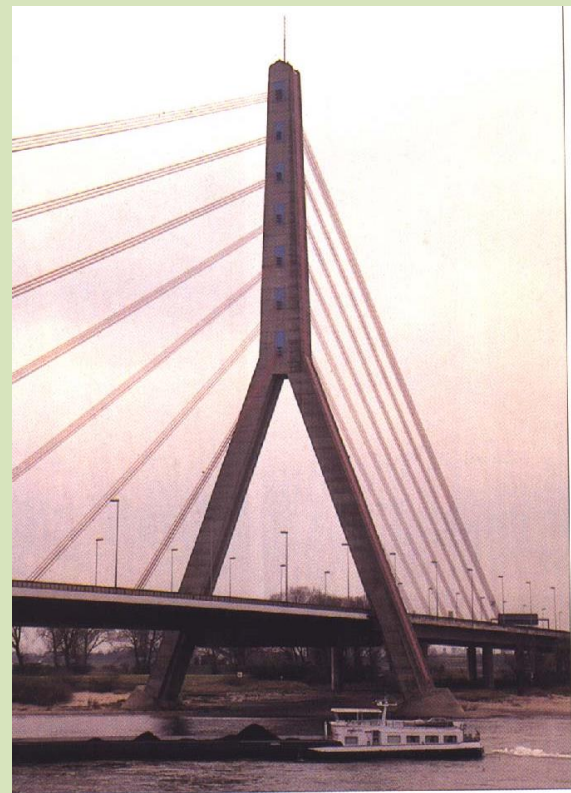


• *Aksijalno ovješeno* u jednoj centralnoj ravnini mosta koristi se kod cestovnog prometa u dva smjera odijeljenih zaštitnim pojasom (presjek autoceste). Naravno da taj zaštitni pojas mora biti dovoljno širok, ako se pilon želi locirati unutar njega, a na cijeloj duljini se mora predvidjeti i osiguranje od udara vozila u sidra zatega u vidu jakih odbojnika na dovoljnoj udaljenosti do sidara.

• Poprečni presjek grede nužno se mora oblikovati kao torzijski vrlo kruti sanduk, da bi se mogla preuzeti nesimetrična opterećenja.

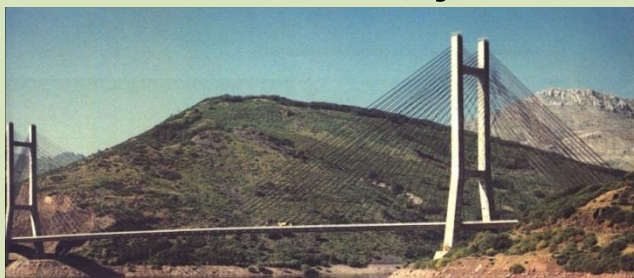


• Leonhardt smatra da aksijalno ovješeno dolazi u obzir za raspone do oko 300 m, iako su tehnički moguća rješenja sa daleko većim rasponima (Flehe, Brotonne, Dao Kanong), ali na uštrb ekonomije.



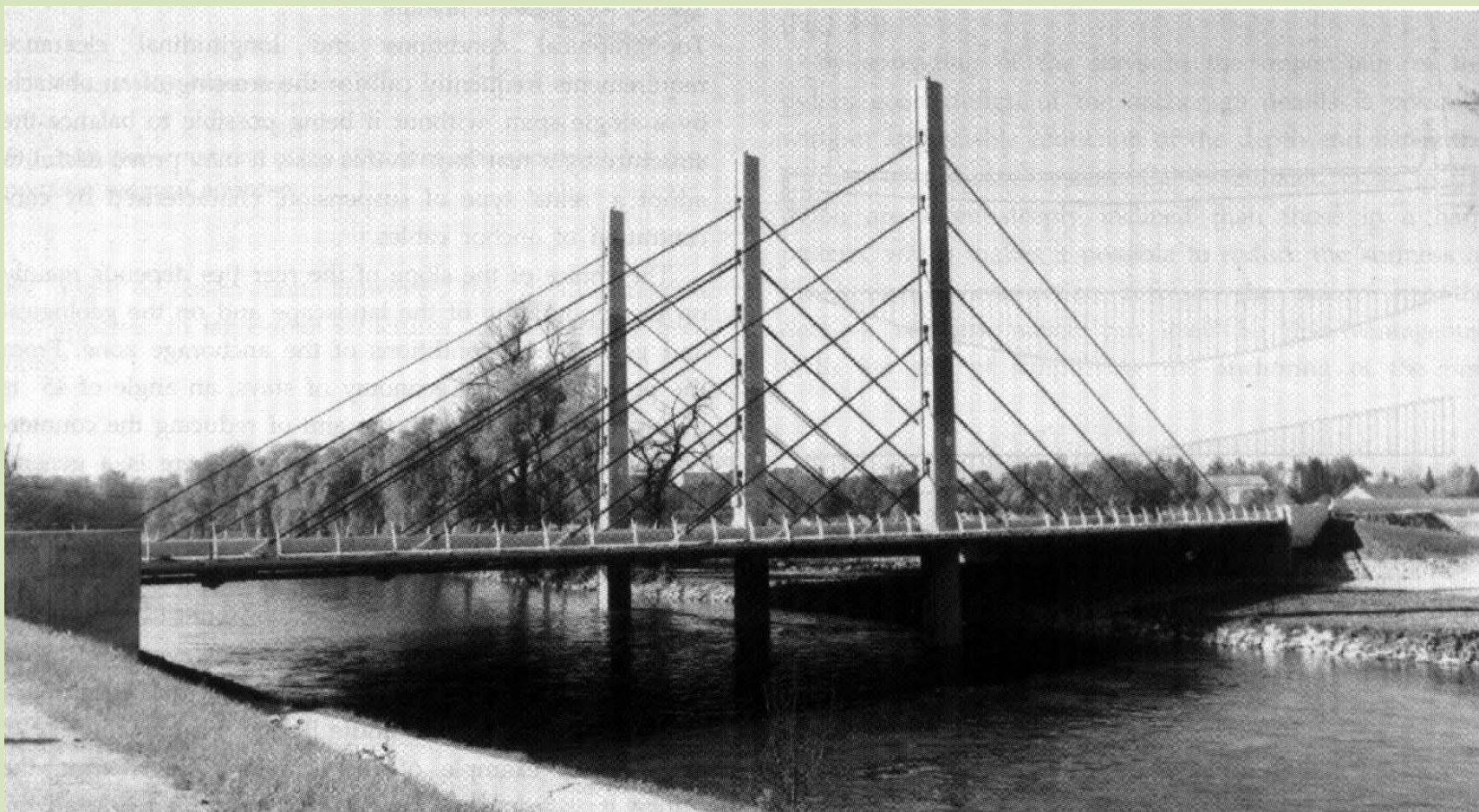


- Dvije ravnine zatega mogu biti vertikalne ili nagnute jedna prema drugoj sa sjecištem iznad uzdužne osi mosta
- Druga konfiguracija predstavlja optimalno rješenje.
- Piloni, greda i zatege u tom slučaju čine prostornu rešetku i nemogući su diferencijalni pomaci usidrenja dviju zatega.
- Poprečni presjeci grede se pojednostavljaju i kod mostova sa mnogo zatega mogu biti vrlo vitki ($d/L=150-400$).
- Torzijska krutost se realizira konstruktivnim sustavom i u načelu nije potrebna za samu gredu, iako se kod velikih raspona ipak koristi za dodatno povećanje aerodinamičke stabilnosti grede gotovog mosta i naročito montažnih stanja.





Sagrađeni su i neki mostovi sa tri ravnine ovješnja kao npr. most u Ljubljani.

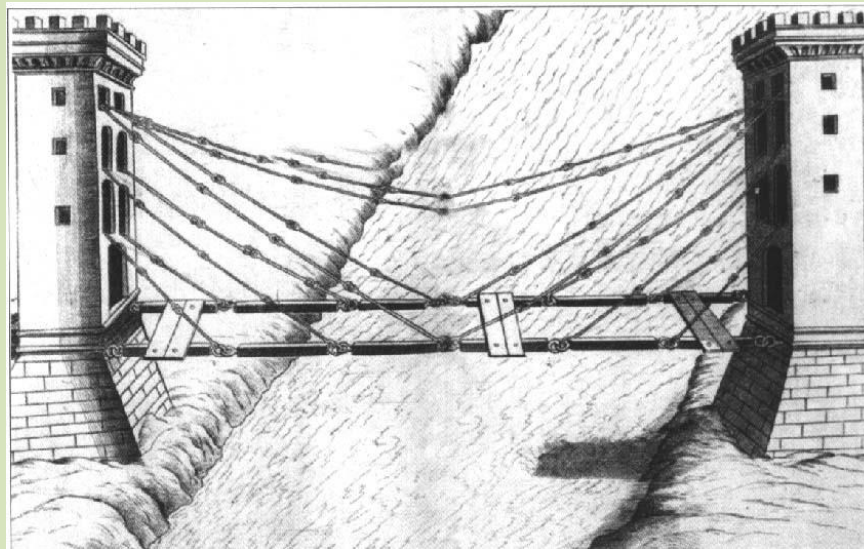




3. Povijesni razvitak

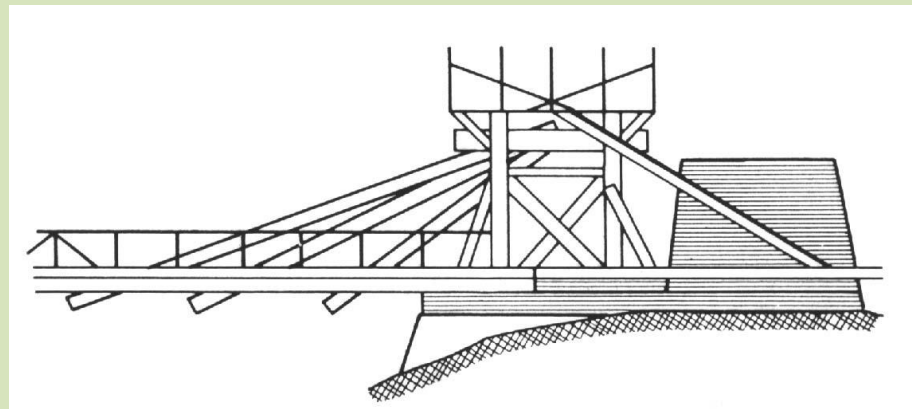
Već su stari Egipćani koristili ideju ovješnja kod projektiranja brodova vješajući jedra na jarbol.

Skica za prvi lančani most sa mnoštvom kosih lanaca venecijanskog graditelja Faustusa Verantiusa (Fausta Vrančića) rodom iz Dalmacije nastala je tek 1617.

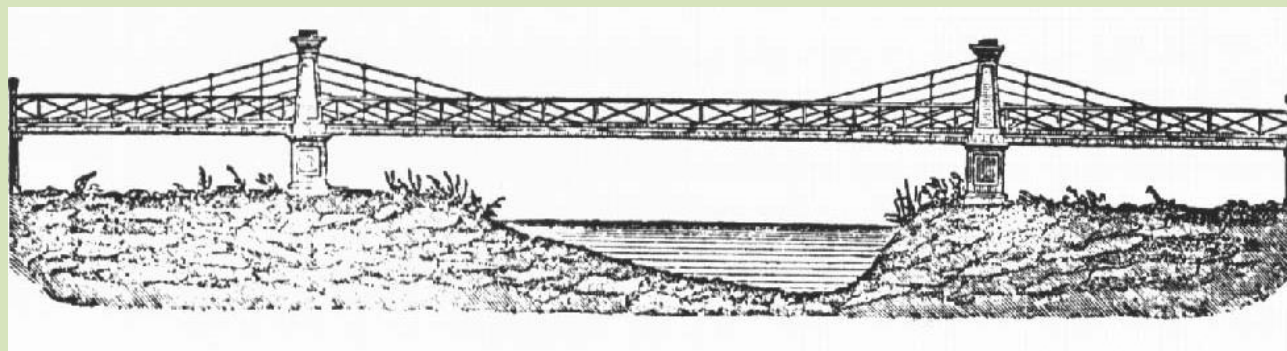




Immanuel Löescher iz Freiburga - teorijski rad za most sa kosim zategama izveden od drva (1784.).



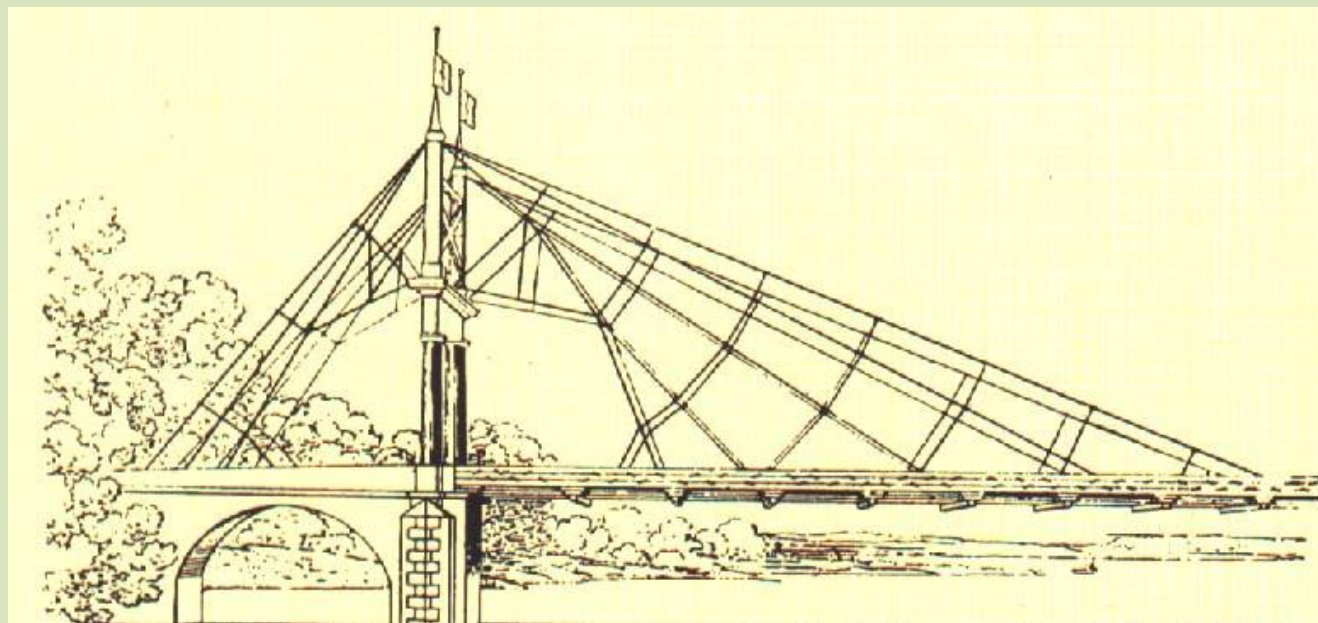
Prvi autentični uspješni most sa kosim zategama postaje **Twerton** most preko rijeke Avon raspona 36,6m iz godine 1838., projektant T. Motley.





Početak XIX. stoljeća izvedeno je još nekoliko mostova sa kosim zategama, ali su se neki od njih srušili kao most preko rijeke Saale kod Nienburga.

Most je sagrađen 1824., a srušio se 1825., uzrok rušenja nikad nije bio službeno objavljen, no vidljivo da zatege slijede neobične linije što je uzrokovalo velike momente drugog reda na koje konstrukcija nije bila dimenzionirana.





- To je prouzročilo nepovjerenje prema takvim konstrukcijama, naročito nakon Navier-ovog zaključka da treba prednost dati visećim mostovima.
- Stvarne uzroke rušenja treba međutim tražiti u neshvaćanju kompliciranog *hiperstatičkog sustava* naročito obzirom na djelovanja temperature i konstruktivne nedostatke i neprikladnosti ondašnjih materijala za zatege.
- Viseći mostovi tako preuzimaju primat za veće raspone, a *kose zatege se ponekad koriste kao dodatni elementi za povećanje krutosti i povećanje aerodinamičke stabilnosti grede za ukrućenje.*



Tako je J. Roebling koncipirao svoje remekdjelo most **Brooklyn** u New Yorku (1869.-1883.), ne na bazi proračuna nego intuitivno.



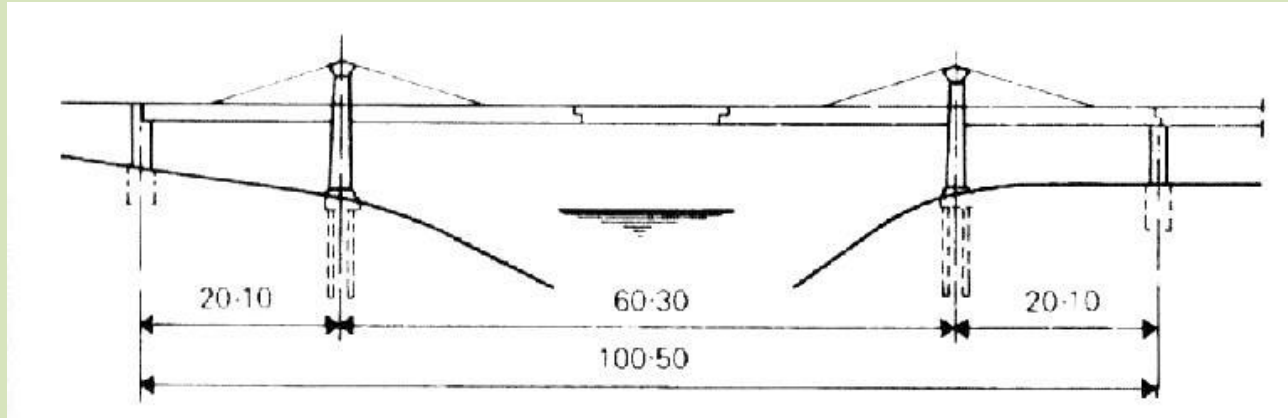


Slično konstruktivno oblikovanje zajedničkog djelovanja standardnih kablova visećih mostova i kosih zatega primijenjeno je kod mostova preko Moldave u Pragu (1868.) i **Albert** mosta preko Temze u Londonu (1868.).



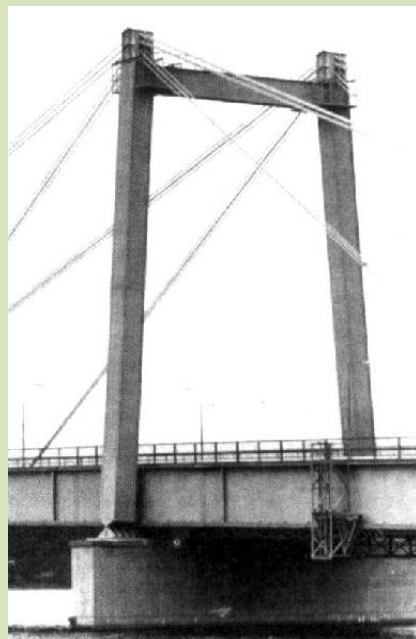


Vrlo značajno ostvarenje je prvi armirano-betonski most sa kosim zategama, akvadukt **Tempul** kod Jereza de la Frontera u Španjolskoj, koji je projektirao poznati španjolski profesor Eduardo Torroja.





- Evoluciju modernih mostova sa kosim zategama od pedesetih godina ovog stoljeća omogućili su postupci numeričke analize uz primjenu računala.
- Te metode omogućuju proračun unutarnjih sila u konstruktivnim elementima za konačno stanje i za stanje montaže, a prvi puta su sustavno provedene za montažu prvog modernog mosta sa kosim zategama ***Strómsund*** u Švedskoj (1956.).





- Prvi veliki njemački most je **Theodor Heuss** most preko Rajne u Düsseldorfu (1957.).
- Njegovom je uspješnom izgradnjom iniciran fascinantni razvoj ovog konstruktivnog sustava u početku gotovo isključivo u Njemačkoj gdje je trebalo obnoviti cijeli niz mostova porušenih tijekom II. svjetskog rata.





Slijedi *Severins* (1959.) koji je prvi izvedeni asimetrični most preko dva raspona sa A-pilonom.





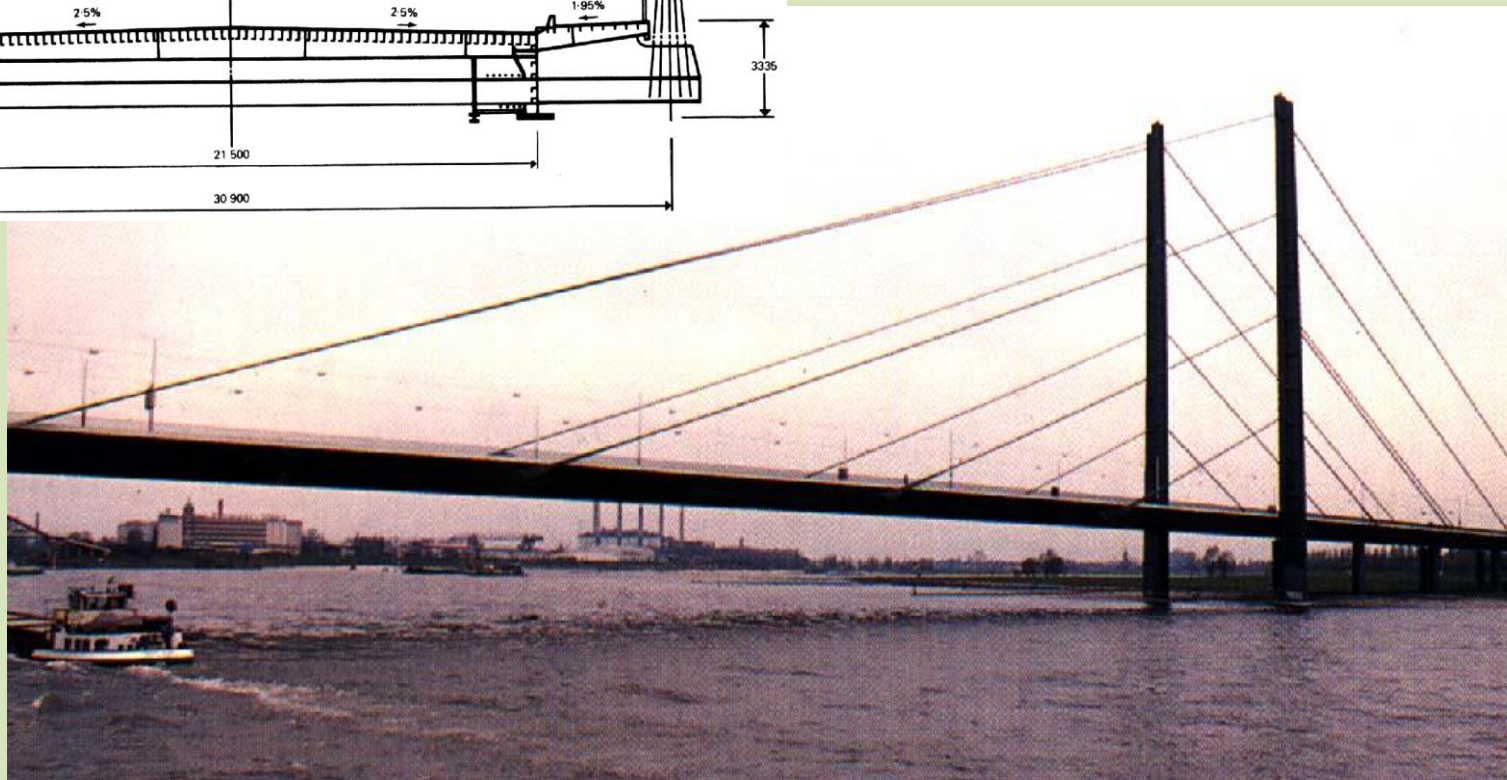
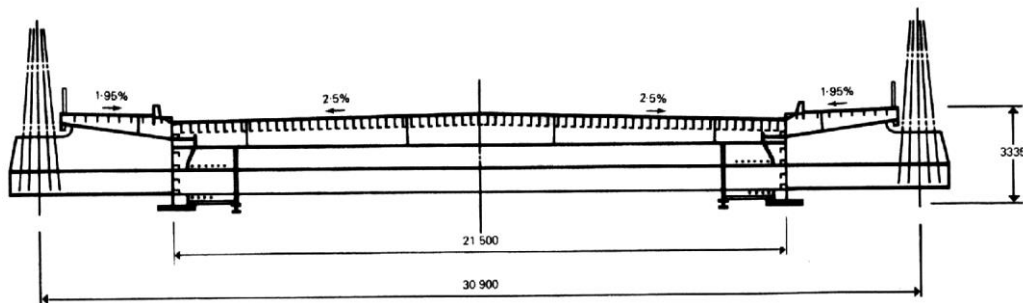
Nordelbe Brücke je prvi most sa zategama u jednoj ravnini (aksijalno).

Friedrich Ebert Brücke (1967., Bonn) je prvi izvedeni objekt druge generacije mostova sa kosim zategama sa mnogo zatega. Implikacije ovog statičkog sustava čije je ponašanje slično gredi na elastičnoj podlozi za razliku od ponašanja sličnog kontinuiranom nosaču (koja je važno za prvu generaciju mostova sa malo zatega) nisu odmah bile shvaćene.





Knie Brücke (1969.) je asimetrični most sa zategama u obliku harfe u dvije ravnine, sa stupovima ispod svih priključaka zatega na gredu u postranom otvoru čime je učinkovitost dvostrukog sistema harfe povećana do te mjere da je poprečni presjek bilo moguće oblikovati sa vrlo vitkim punostijenim nosačima bez torzijske krutosti.





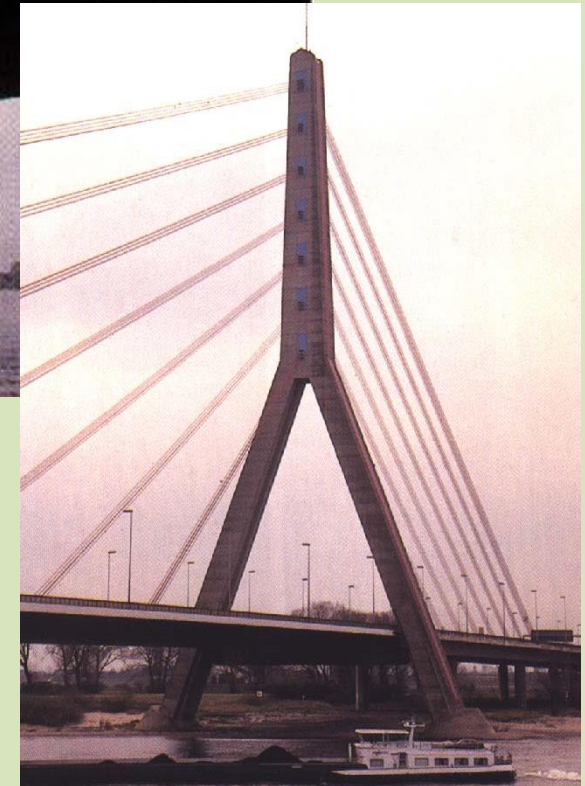
Sedamdesetih godina se u Njemačkoj gradi još desetak mostova sa kosim zategama.

Most *Höchst* (1972.) – betonska greda:





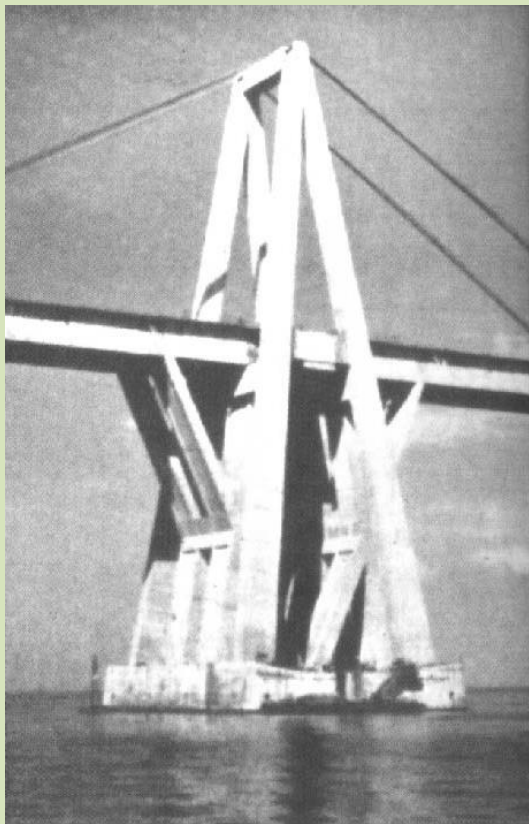
Most ***Flehe*** (1979.) – betonski pilon:





Nešto kasnije od prvih njemačkih mostova sa kosim zategama Riccardo Morandi projektira nekoliko mostova sa kosim zategama sa gredom i pilonima u betonu - most **Maracaibo** (1962.).

To su inženjerski zanimljivi mostovi, ali u estetskom smislu nisu osobito uspjeli:



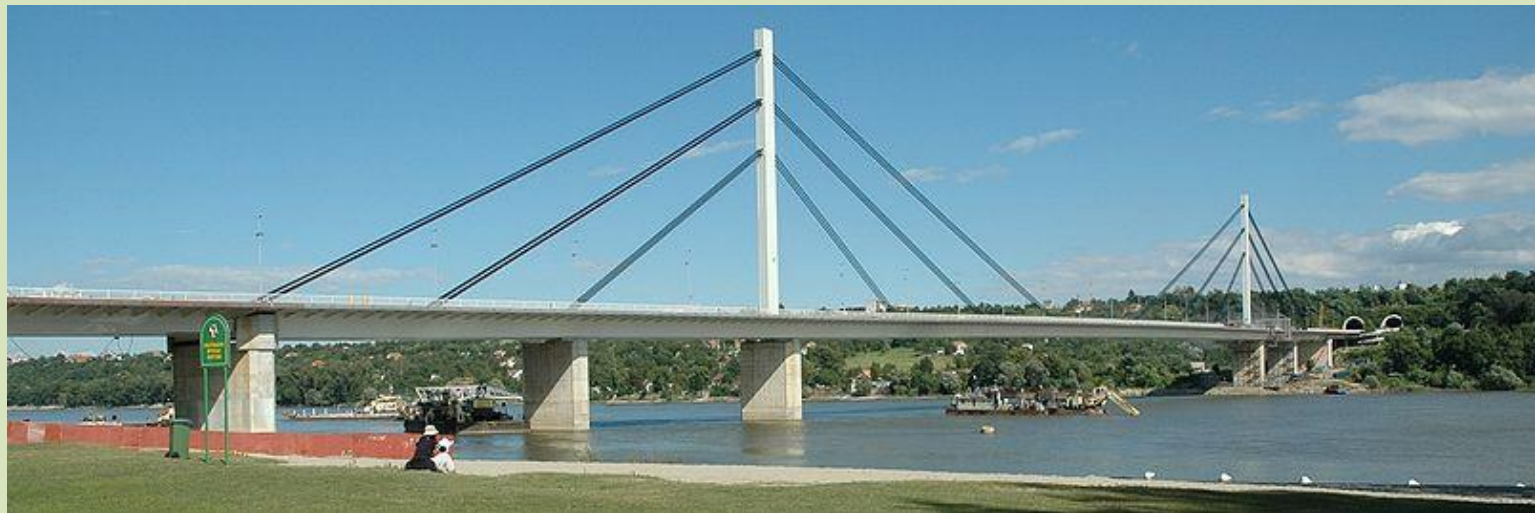


Kasnih sedamdesetih godina i ostali svijet prihvaća ove mostove, naročito Japan - topografija terena koja zahtijeva mostove velikih raspona.

Japanski mostovi sa kosim zategama su kao i njemački skoro isključivo izvedeni u čeliku.

Ovješeni mostovi sa čeličnom gredom dalje se grade u Velikoj Britaniji, Belgiji, Slovačkoj, Španjolskoj, Nizozemskoj, Švedskoj, SAD, Tajlandu...

U Novom Sadu sagrađen je 1981. most sa središnjim ovješanjem raspona $L=351\text{m}$, projektant N. Hajdin sa suradnicima:



Dok prvi francuski mostovi sa kosim zategama kao *St. Nazaire* (1975.) nastavljaju njemačku tradiciju čelične grede sa ortotropnom pločom, most *Brottone* (1977.) s betonskim sandukom i gusto raspoređenim zategama u centralnoj ravnini predstavlja sasvim novo originalno rješenje.



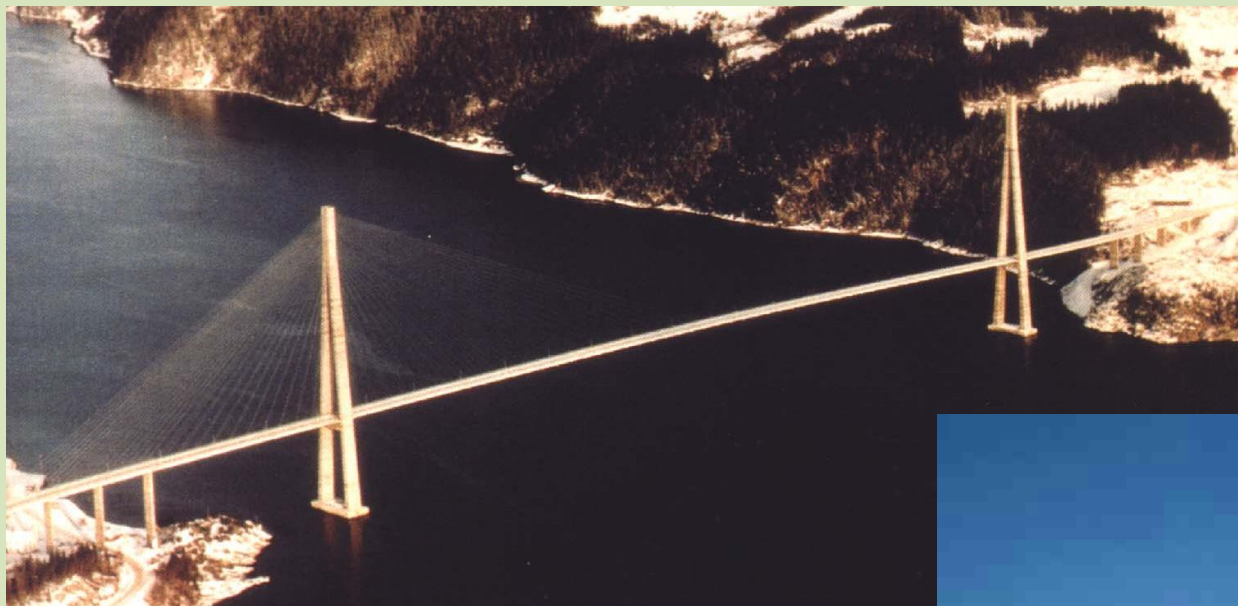


Kod kasnijih Morandijevih mostova zatege su obučene u betonsku oblogu, a isto je napravio C. Menn na mostu ***Ganter*** (1980.).





U Norveškoj je 1991. napravljen most *Skarnsundet* raspona 530 m s betonskom gredom. Do danas je to najveći betonski most sa kosim zategama.



Peti po veličini raspona je most *Tatara* u Japanu raspona 890 m, a ukupne duljine 2.000 m izveden 1999. godine u čeličnoj izvedbi.



4. Oblikovanje

4.1 Rasponski sklop

Postojanje svih velikih mostova, pa i mostova sa kosim zategama omogućeno je prvenstveno razvitkom:

- pogodnih materijala.
- tehnologijom izvedbe
- boljim poznavanjem teorije konstrukcija, uključivo probleme stabilnosti i aerodinamičko ponašanje



Za određivanje podobnosti jednog materijala za velike raspone bitna su četiri svojstva materijala:

- čvrstoća
- specifična težina
- krutost
- troškovi

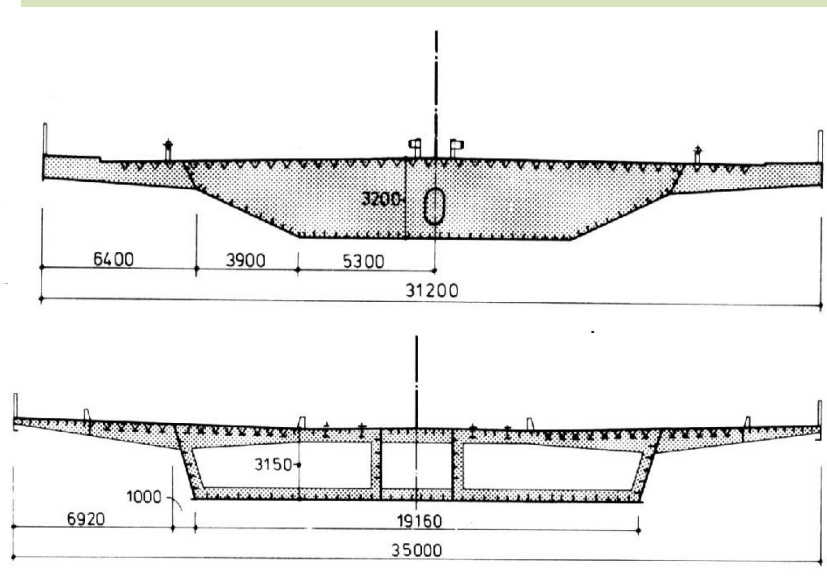
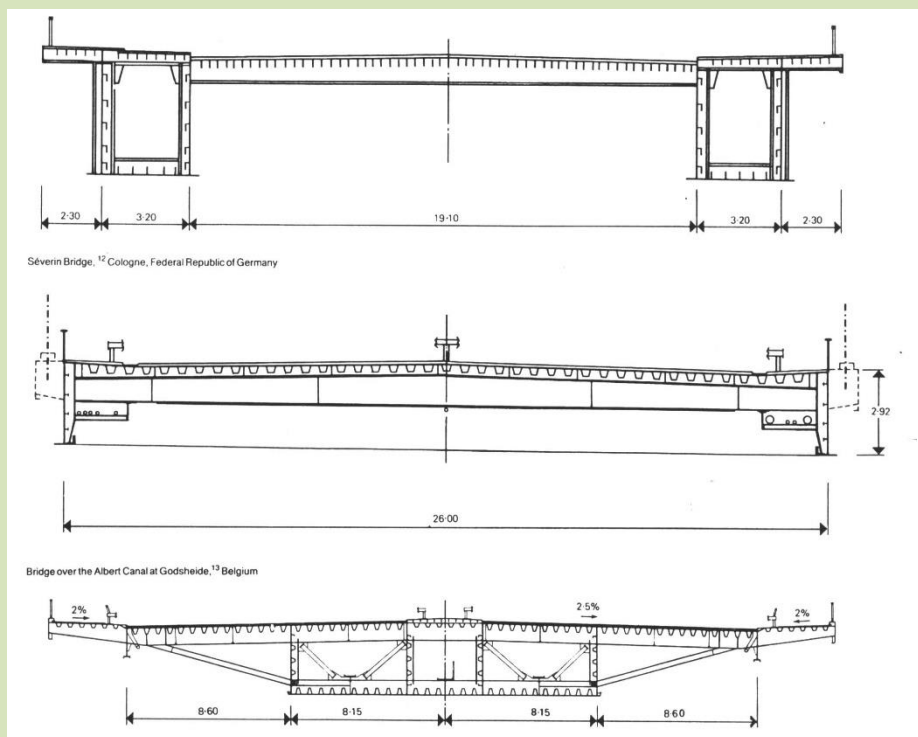
Jedini materijali koji dolaze u obzir za izvedbu su beton i čelik. Ako ih usporedimo ustanovit ćemo da tlačna čvrstoća betona iznosi cca. 10 % čvrstoće čelika.



- Mnogo više pokazuje nam odnos čvrstoća/specifična težina koji su u analizu prvi uveli aeronautički stručnjaci, a koji ima dimenziju jedinice duljine.
- Taj odnos za beton iznosi svega cca. 30 % vrijednosti za čelik, što je mana masivnih konstrukcija, jer za preuzimanje korisnih opterećenja preostaje daleko manje ukupne čvrstoće nego kod čelika.
- S druge strane progibi od prometnog opterećenja kod masivnih mostova su mnogo manji nego kod čeličnih mostova, odnosno krutost je mnogo veća.
- Kod troškova, ako cijena za preuzimanje neke tlačne sile čelikom iznosi 100 %, onda cijena za preuzimanje iste sile betonom iznosi samo 33 % od čega samo 5 % otpada na čisti beton, a ostalo otprilike popola na oplatu i ubetoniranu armaturu.

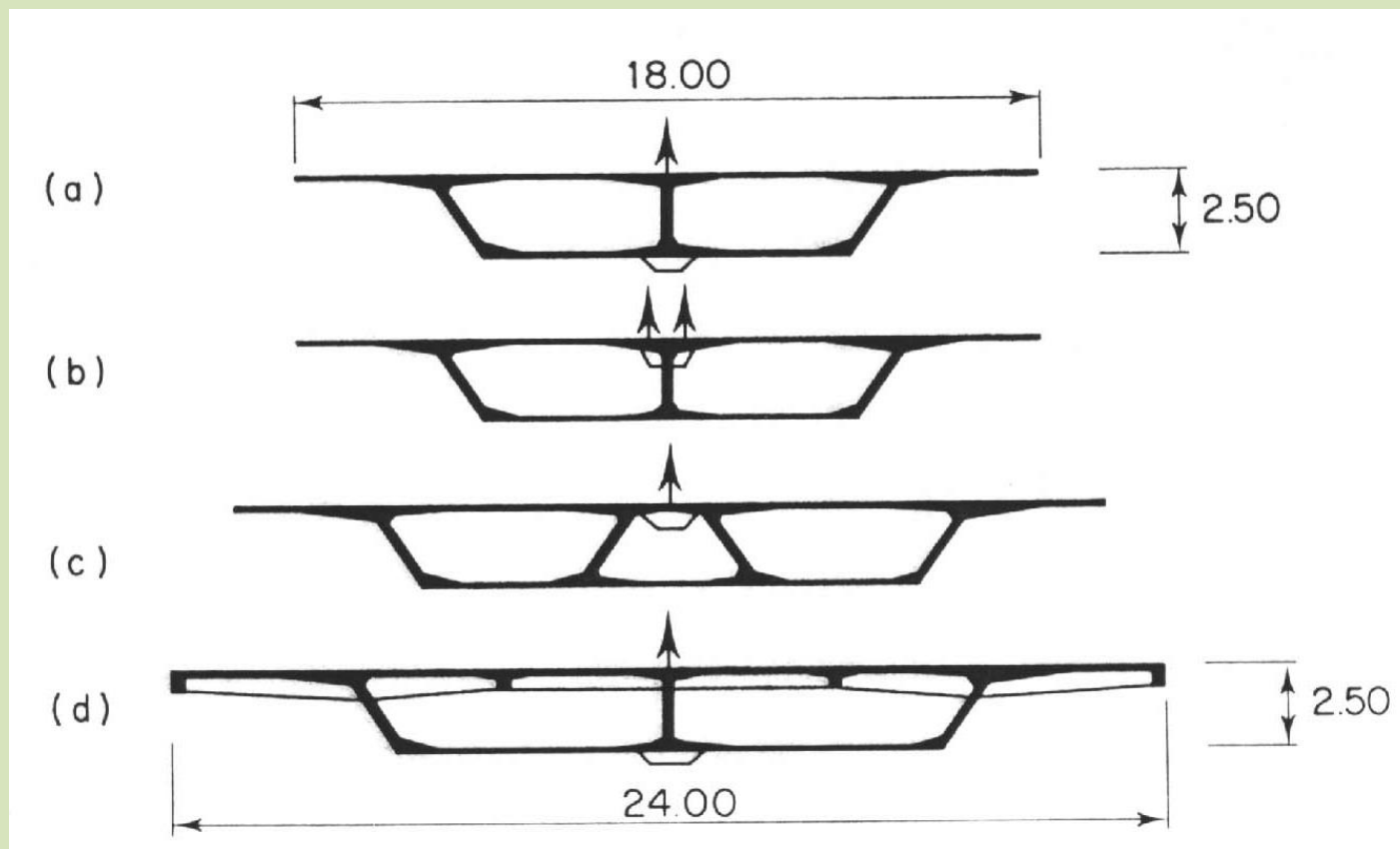
Iz svega toga možemo zaključiti:

- Kod mostova s kosim zategama najvećih raspona kao materijal za gredu dolazi u obzir samo čelik zbog daleko povoljnijeg odnosa čvrstoće prema vlastitoj težini.
- Kod ostalih raspona odabir materijala je često uvjetovan lokalnim uvjetima, a mogući su čelični, betonski i spregnuti poprečni presjeci.



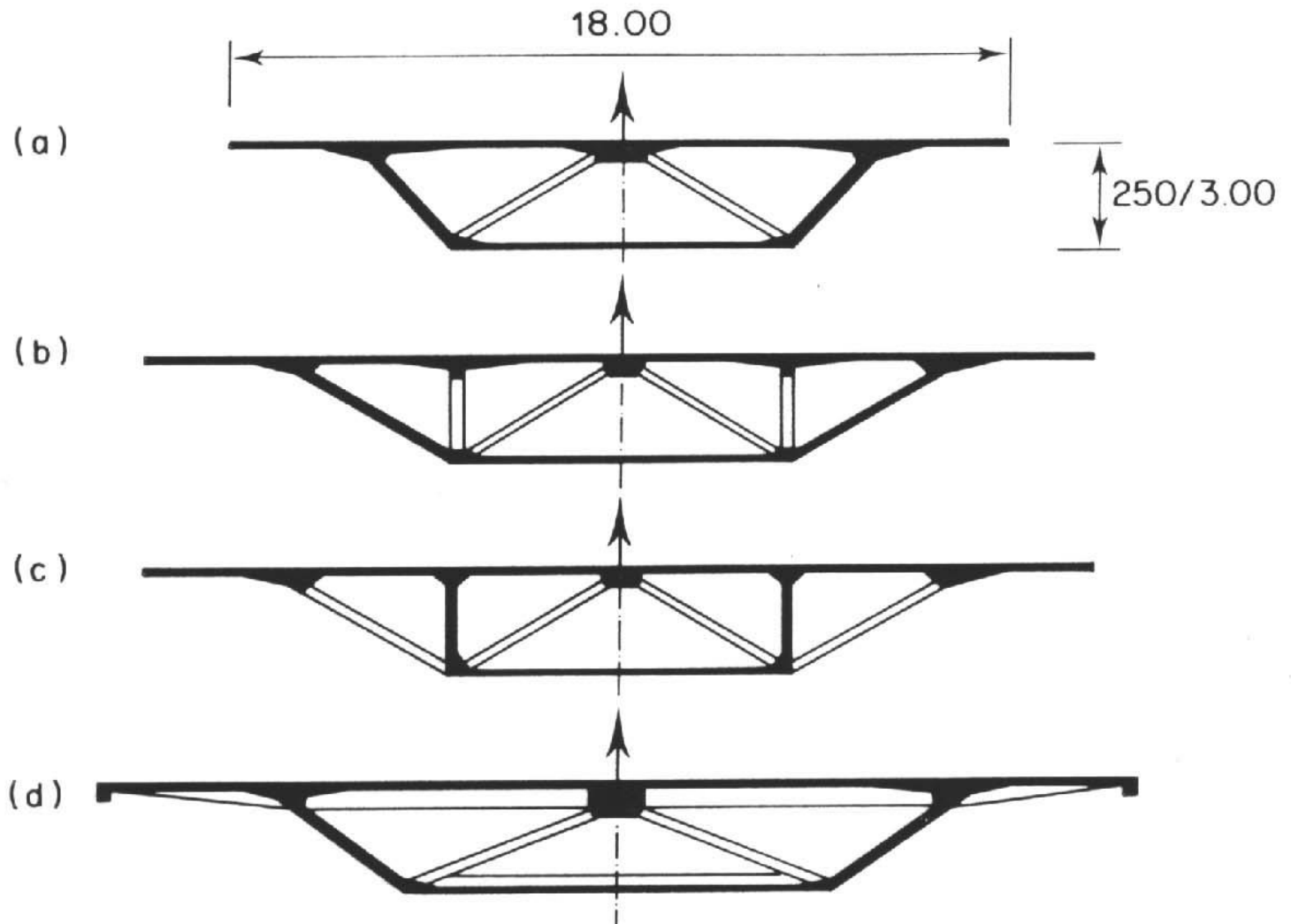
Prednosti betonske grede leže u većoj krutosti, boljim karakteristikama prigušenja i manjim varijacijama napona u zategama uslijed manjeg utjecaja prometnog opterećenja i time povoljnijem ponašanju obzirom na umornost.

Betonski sandučasti poprečni presjeci sa 3 ili 4 hrpta

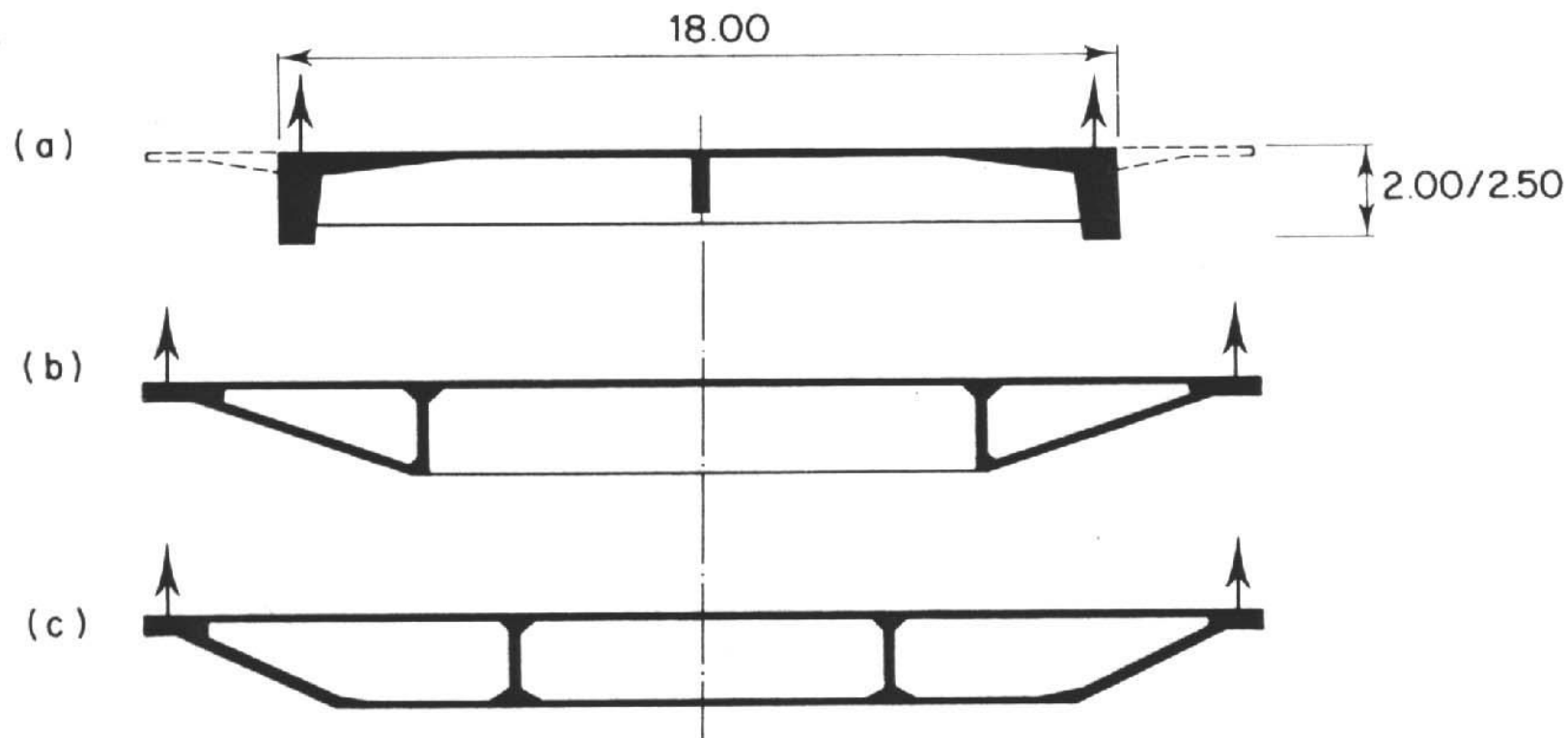




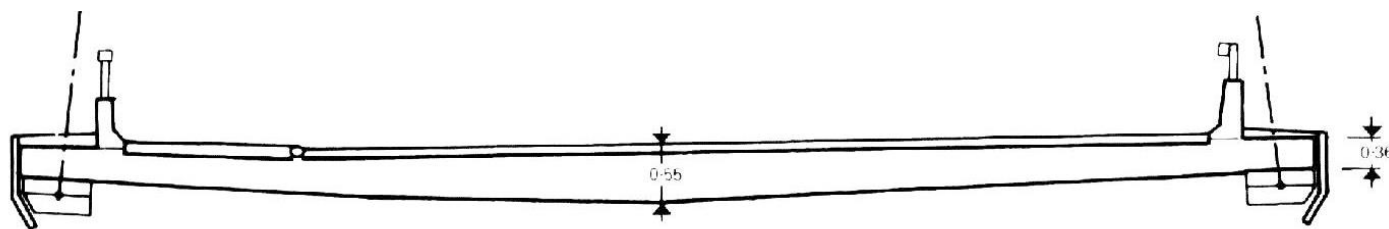
Betonski sandučasti poprečni presjeci sa 2 hrpta



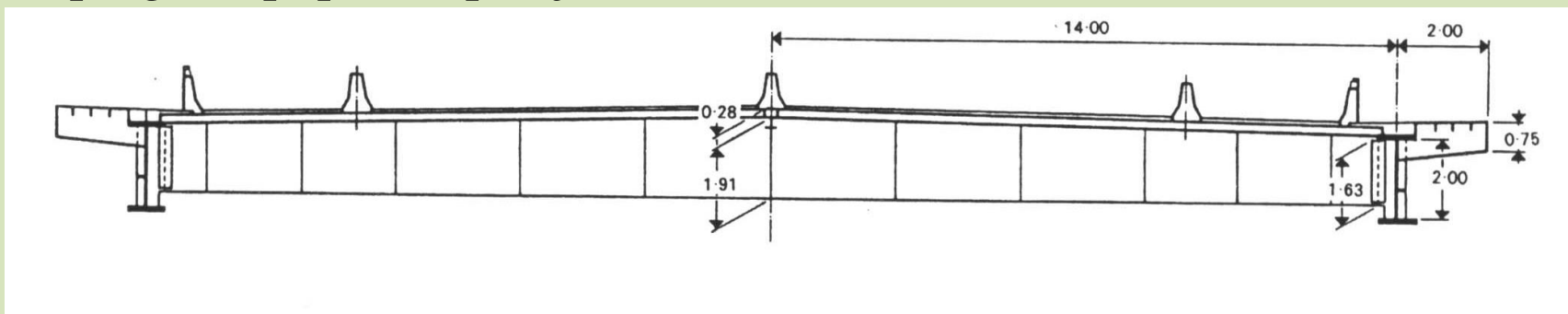
Betonski presjeci za lateralno ovješnje



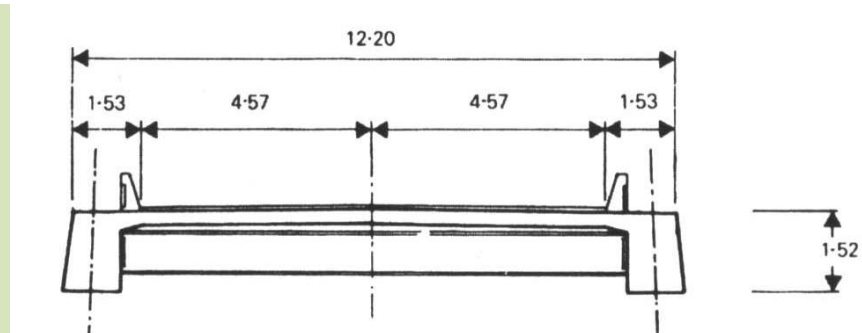
Betonska ploča – novije rješenje



- Spregnuti presjeci su vrlo povoljni zbog jednostavnosti montaže, naročito kod mostova sa mnogo zatega kod kojih su momenti savijanja mali te su mogući vrlo vitki presjeci.
- Kombinacijom čelika i betona eliminira se nepovoljni utjecaj vlastite težine čiste betonske konstrukcije, a postiže se veća krutost u odnosu na čelične presjeke.
- Spregnuti poprečni presjek:



- Novi oblik poprečnog presjeka – betonski uzdužni nosači i ploča sa čeličnim poprečnim nosačima:





4.2. Piloni

- Visina pilona ima veliki utjecaj na količinu materijala za zatege i uzdužne tlačne sile u gredi.
- Optimalna visina pilona ovisi o uzdužnoj dispoziciji zatega.

Odnosi visine pilona i raspona mosta:

Minimalna vrijednost količine čelika za zatege slijedi za odnose:

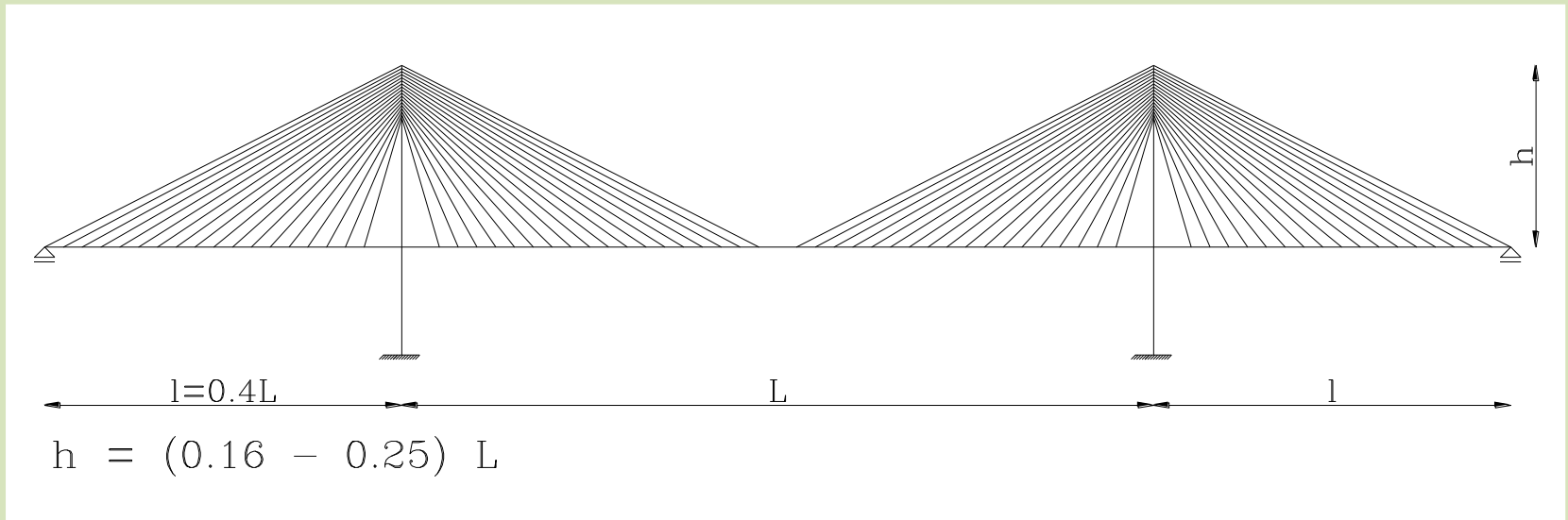
- $h/L=0,29$ lepeza
- $h/L=0,50$ harfa, apsolutni minimum jer su sve zatege pod kutom 45 stupnjeva - teorijski značaj - zbog problema elastične stabilnosti i potencijalnog utjecaja vjetra kod vrlo visokih pilona $h=(0,15-0,25)L$
- Za raspone ispod 200 m može se usvojiti i $h/L=0,3$.
- Za $h/L=0,2$ ušteda u zategama: 14 % za pseudo-lepezu prema harfi, odnosno 18 % za lepezu u odnosu na harfu.



Odnosi visine pilona i raspona mosta

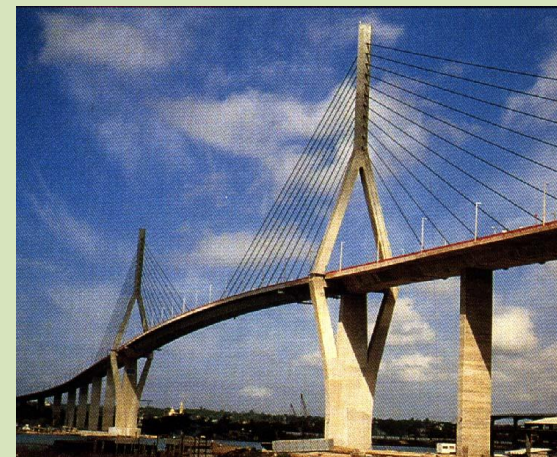
Za asimetrične mostove s jednim pilonom vrijede isti odnosi h/L s time da se L definira kao raspon velikog otvora uvećan s korekcijskim faktorom 1,8.

Odnos h/L za mostove sa tri otvora:

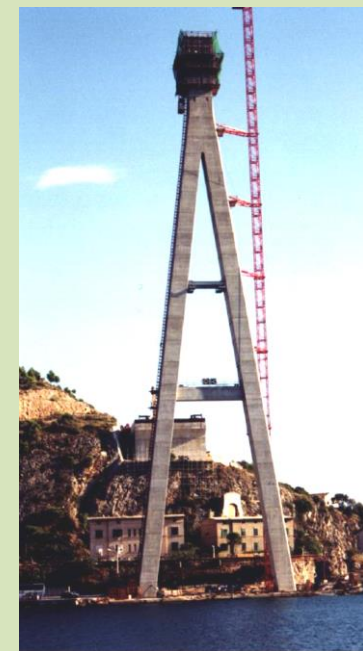


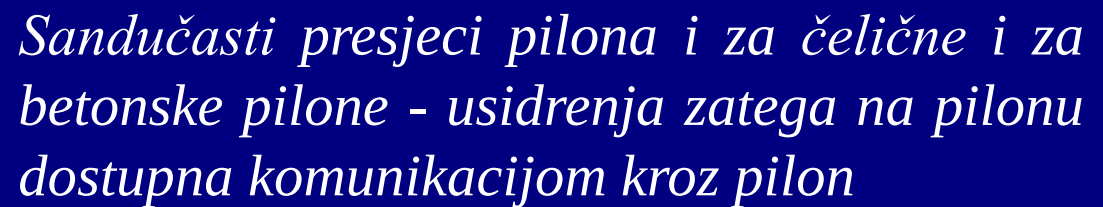


- Piloni su u uzdužnom smjeru stabilizirani tzv. sidrenim zategama bočnih otvora
- Fleksijska krutost pilona u uzdužnom smjeru je mala – utjecaj pokretnog opterećenja se prenosi sidrenim zategama u bočnim otvorima a ne savijanjem pilona.

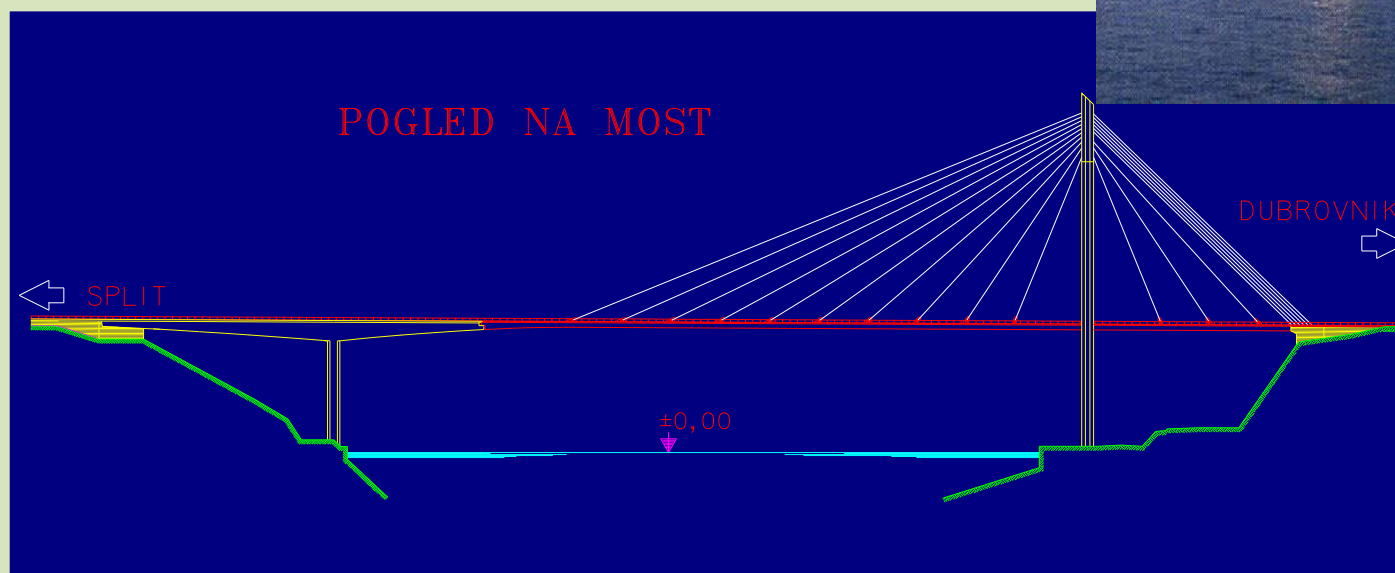
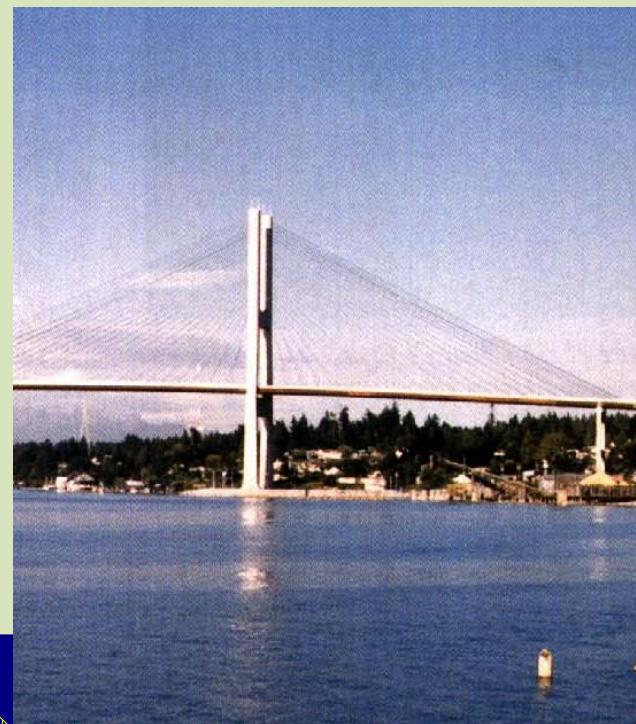


- Minimalna krutost pilona - potrebna sigurnost na izvijanje.
- U poprečnom smjeru se teži velikoj krutosti pilona, jer treba preuzeti horizontalne sile od vjetra i seizmičkog djelovanja.
- Iskustva sa izvedenih mostova pokazuju da su betonski piloni ekonomičniji od čeličnih - razlika troškova raste s veličinom mosta

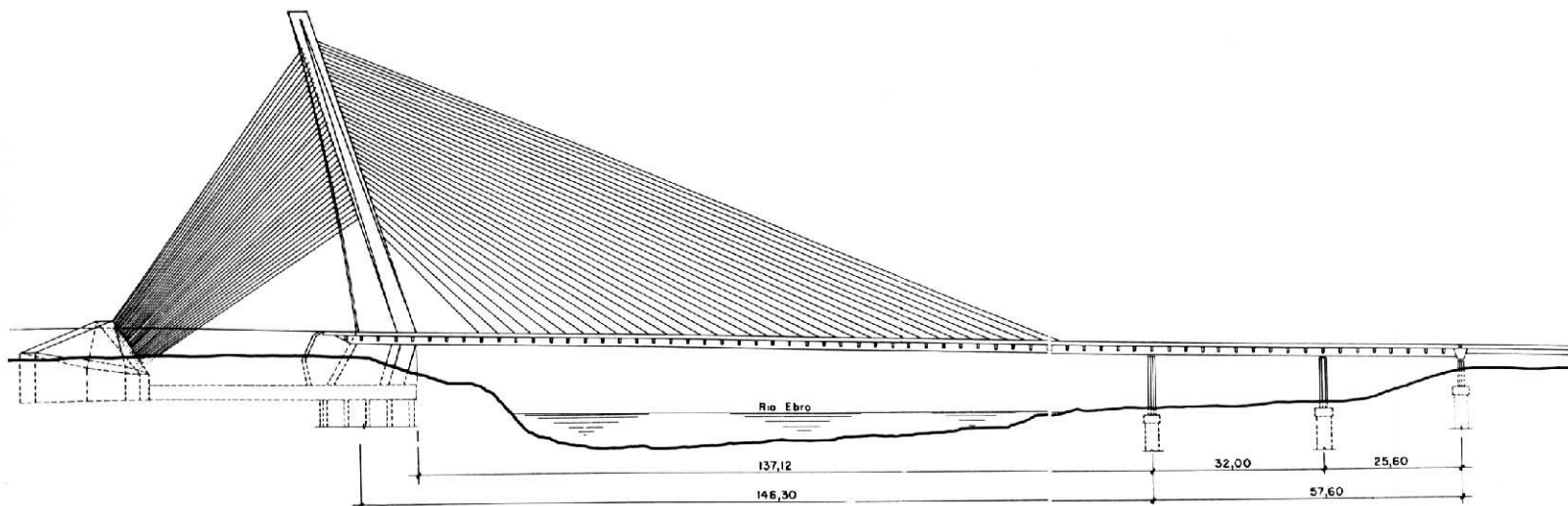




- Najekonomičniji - vertikalni piloni
- Zatege i greda čine konzolni sustav, krak unutarnjih sila neposredno iznad ležaja pilona treba biti najveći, što je kod vertikalnih pilona i slučaj.



U uzdužnom smjeru prema bočnom otvoru nagnuti piloni zahtijevaju kod istog kraka sustava nad osloncem više (dulje) pilone.



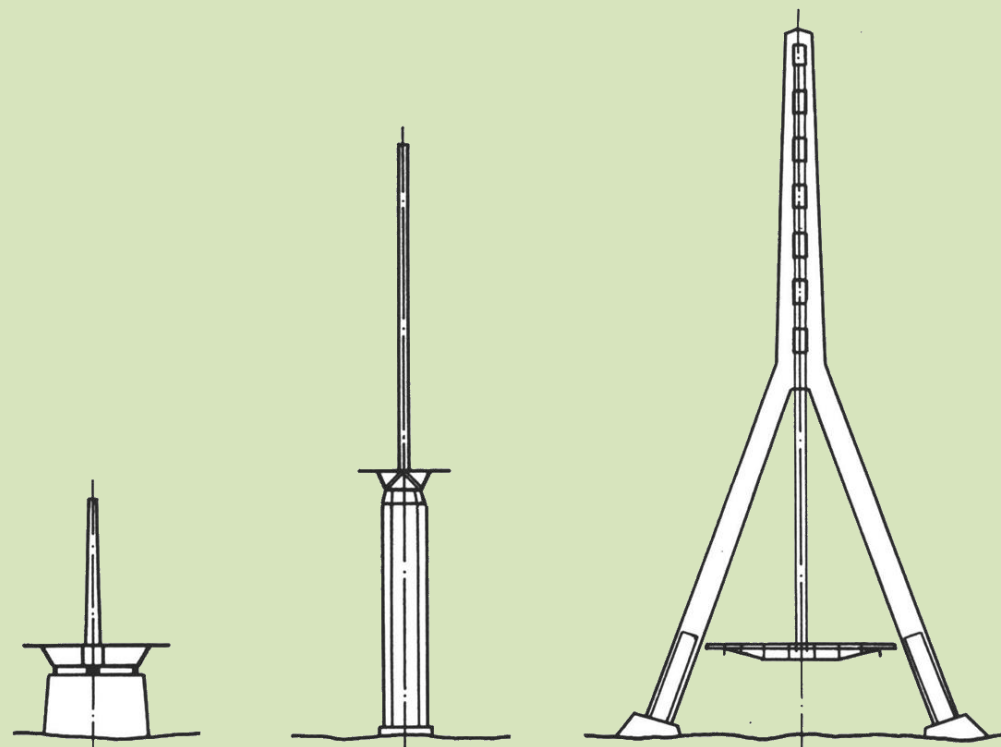


Kod pilona nagnutih prema glavnom otvoru (most ***Batman***) sidrene zatege su jače opterećene nego kod vertikalnih pilona (a da ne spominjemo izvedbene teškoće i estetski dojam).



- Oblikovanje pilona u poprečnom smjeru ovisi o dispoziciji zatega, rasponu, visini nivelete, estetskim kriterijima itd.
- Gotovo svi sustavi pilona mogu se upotrijebiti i kod aksijalnog i kod lateralnog ovješnja.

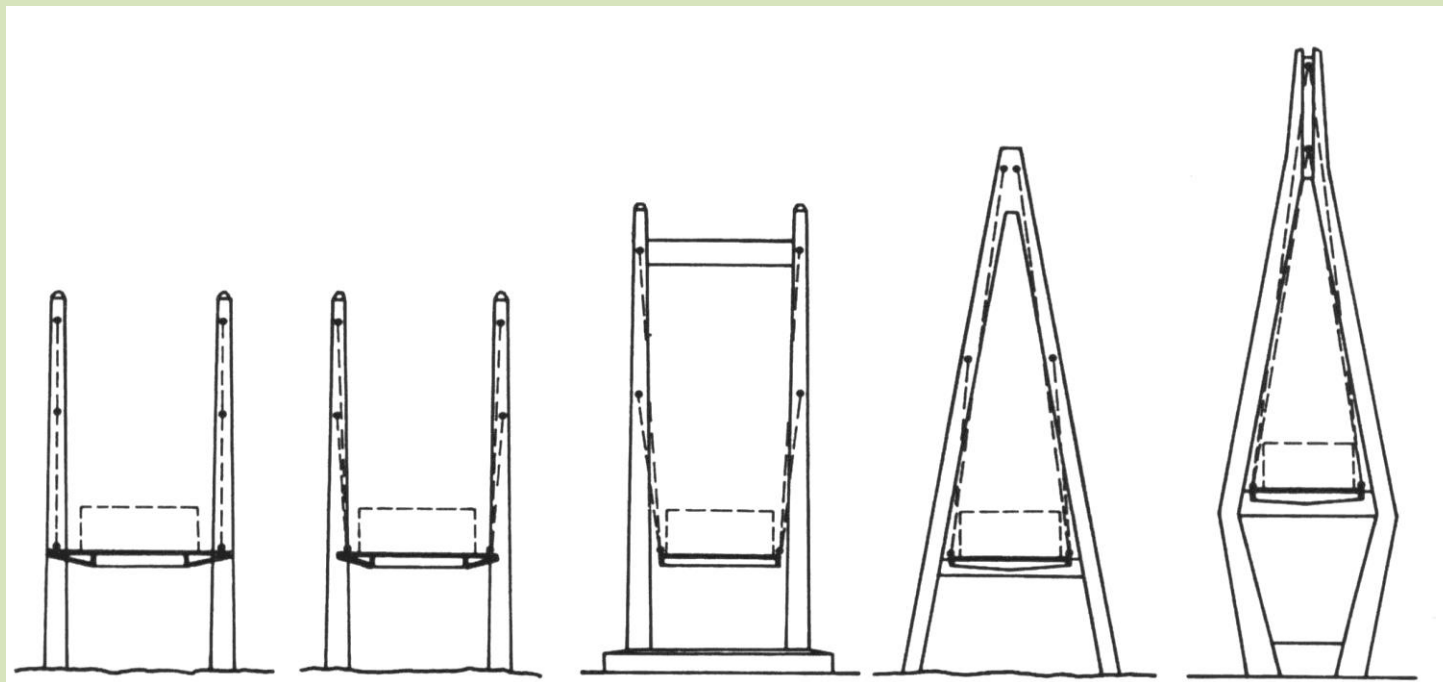
Piloni za ovješnje u jednoj ravnini (aksijalno ovješnje):





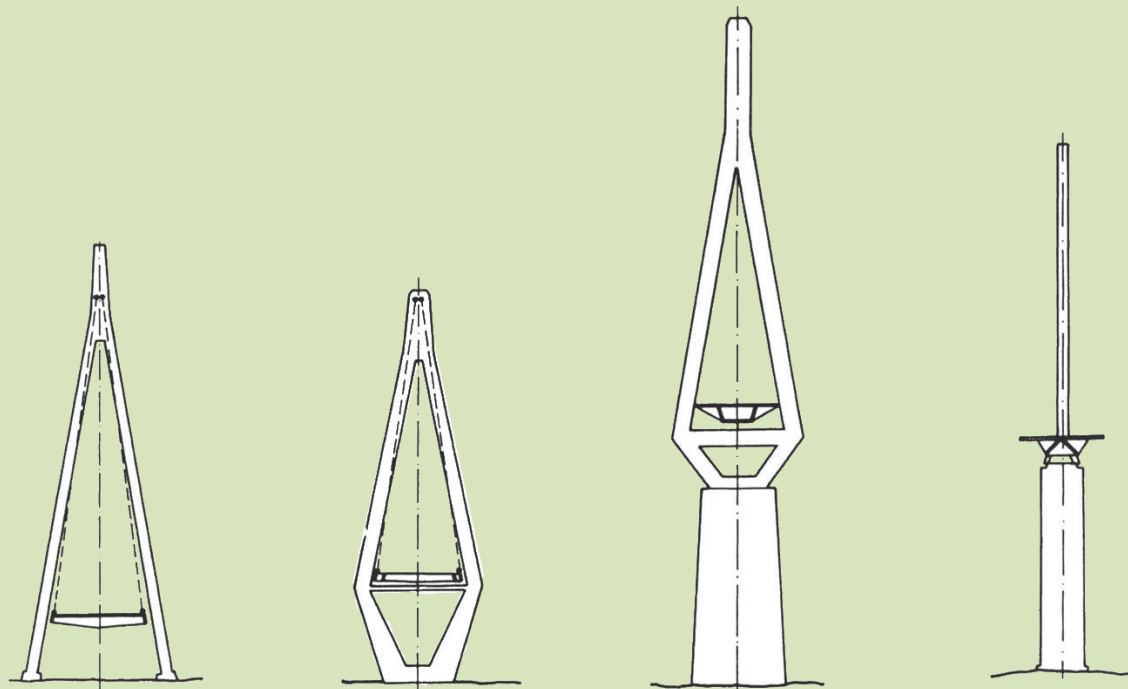
Mostovi sa vitkim gredama i H pilonima su vrlo osjetljivi obzirom na aerodinamičnu nestabilnost “flutter”-a, jer su osnovne frekvencije fleksijskih i torzijskih oscilacija praktički jednake. Ako je visina pilona osjetno veća nego širina mosta koriste se okvirni piloni. Horizontalna greda na vrhu pilona omogućuje blago nagnjanje stupova pilona, te kod lateralnog ovješnja ravnine zatega mogu ostati vertikalne.

Piloni za ovješnje u dvije ravnine (lateralno ovješnje)



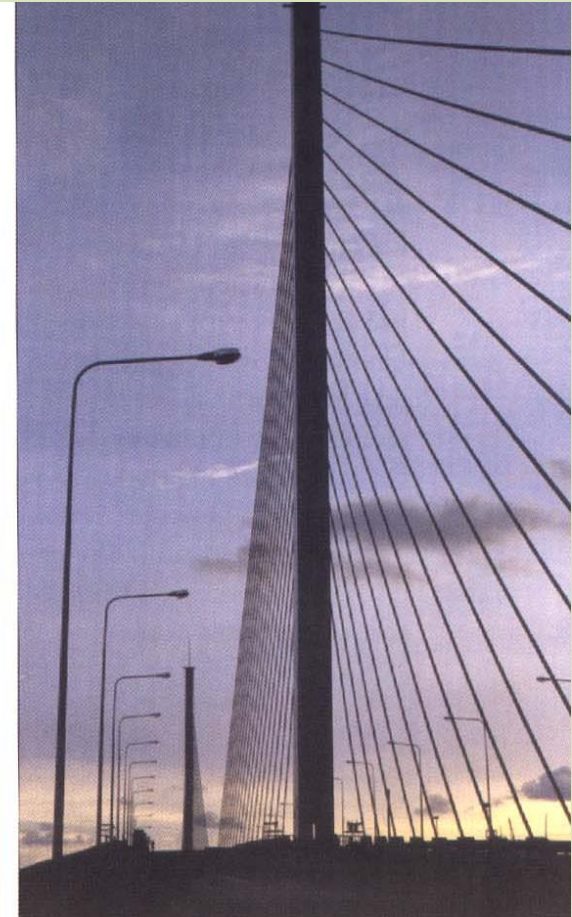
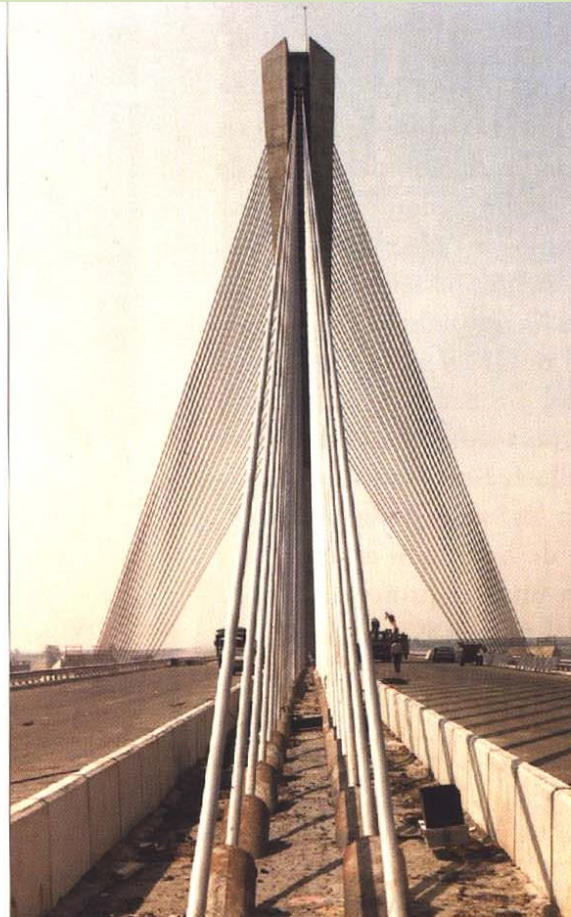
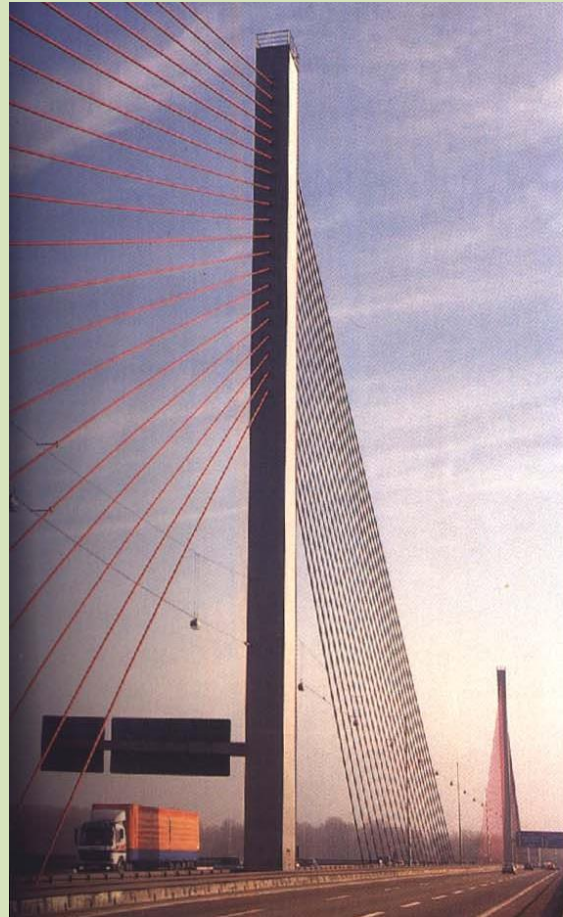


- Za najveće raspone najčešće se rade A piloni zbog velike krutosti u poprečnom smjeru, povećanja torzijske krutosti sustava i povoljnog estetskog dojma.
- Piloni su obično upeti u temelj ili stupove (samo dio iznad grede se često naziva pilonima), iako postoje i izvedbe sa upinjanjem u gredu i sa zglobnim oslanjanjem, kako bi temelji bili centrično opterećeni.





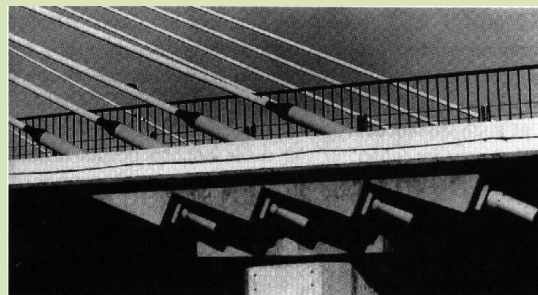
4.3. Zatege



Zatege su osnovni element ovih mostova. Razvitak modernih mostova s kosim zategama omogućen je prvenstveno primjenom visokovrijednog čelika za zatege na što je ukazao već F. Dischinger.

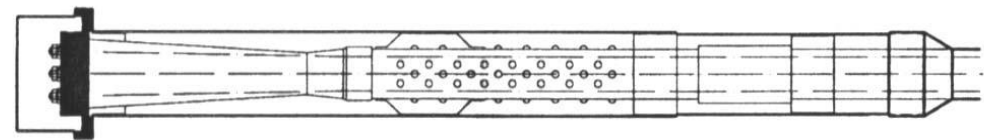
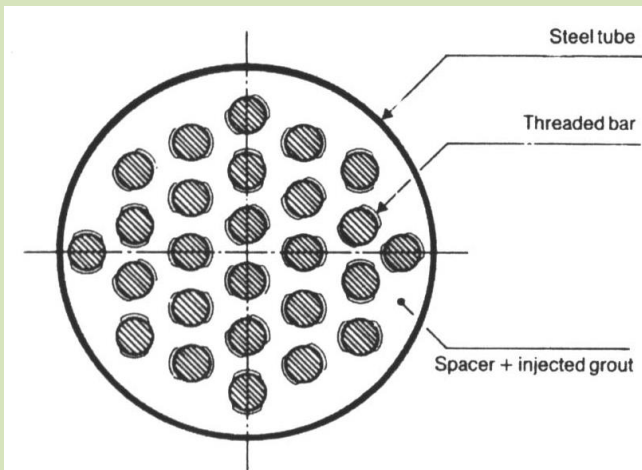


- Bitnu ulogu kod odabira materijala za zatege igraju, osim vlačne čvrstoće i modula elastičnosti antikorozivna zaštita i čvrstoća na zamor, konstruktivno oblikovanje kotvi i montaža.
- Modul elastičnosti vertikalnog ravnog kabela iznosi kod zatvorene spiralne užadi oko 155 kN/mm^2 , a kod paralelnih žica oko 205 kN/mm^2 .
- Koeficijent sigurnosti obzirom na vlačnu čvrstoću kod zatega iznosi tipično 2,2. Do te razine naprezanja može se pretpostaviti elastično ponašanje zatega i mogu se zanemariti efekti relaksacije.
- Sidra zatega moraju omogućiti točan unos projektiranih sila sa silama sloma ne manjim od sila sloma same zatega i tijekom životnog vijeka mosta ne smiju popustiti.

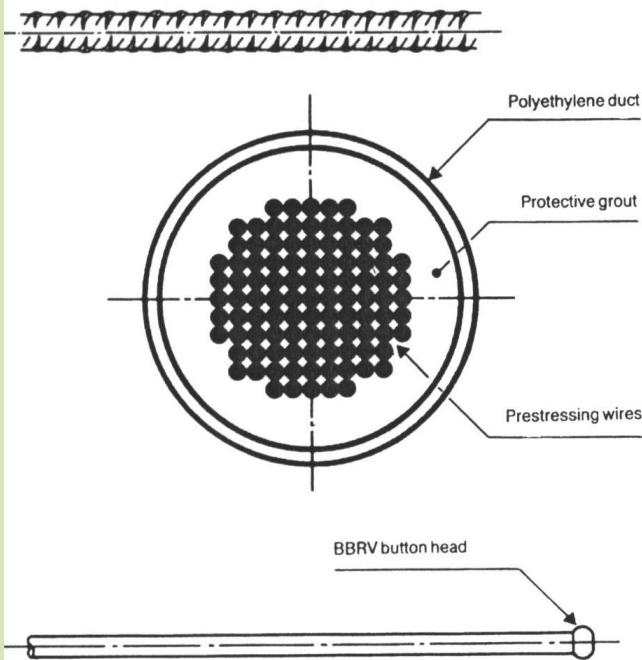




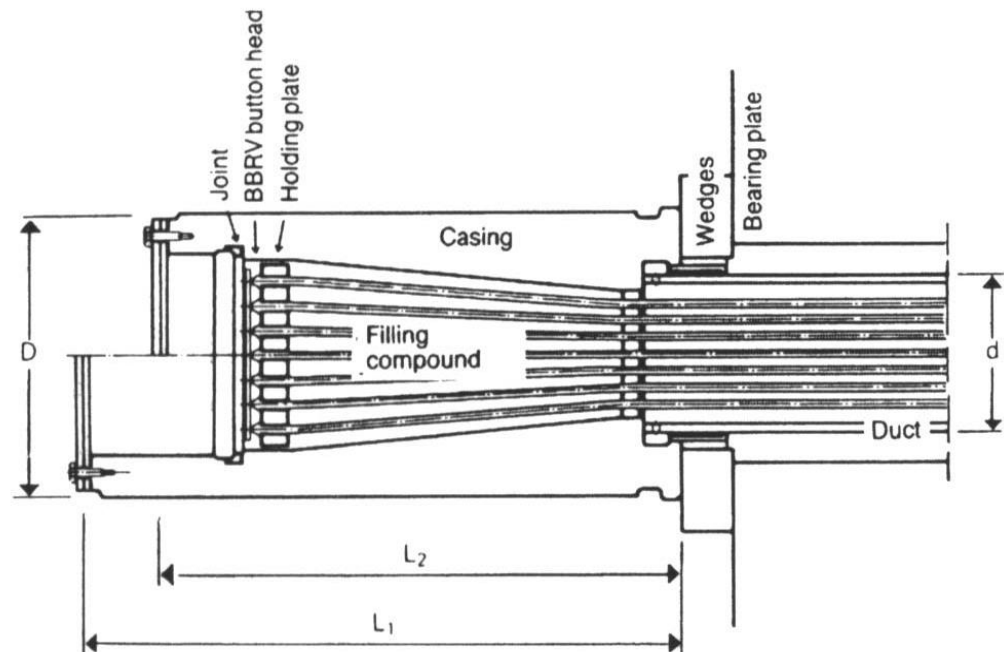
- Za razliku od standardnih kablova za prednapinjanje, smještenih unutar betonskog presjeka, zatege su izložene znatnim fluktuacijama naprezanja od djelovanja pokretnog opterećenja, temperature, vjetra itd. te je njihova čvrstoća na umornost od primarne važnosti.
- Umornost mogu prouzročiti oscilacije zatega uslijed vjetra i pokretno opterećenje.
- Oscilacije zatega se mogu reducirati primjenom raznih prigušivača.
- U konstruktivnom pogledu bitno je da ne dođe do savijanja zatega kod usidrenja pa sidra treba postaviti u smjer tangente a ne sekantne krivulje predmetne zatega.
- Čvrstoća na umornost zatega prvenstveno ovisi o čvrstoći na umornost sidra.
- Zatege su obzirom na trajnost vrlo osjetljive te treba predvidjeti adekvatnu antikorozivnu zaštitu.

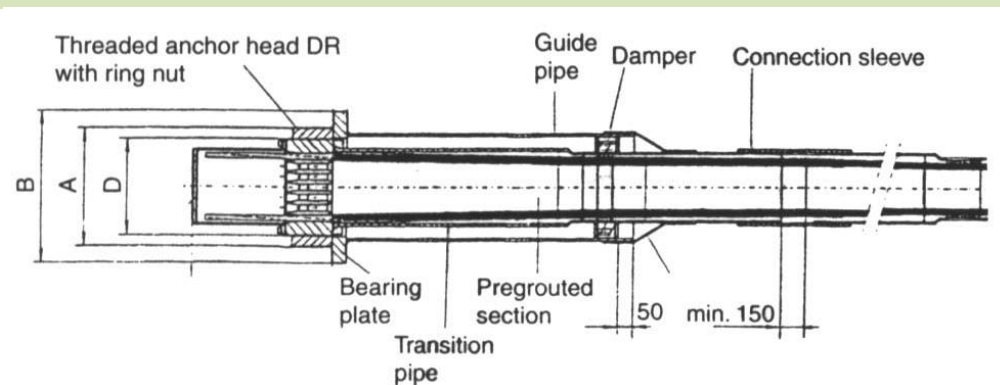
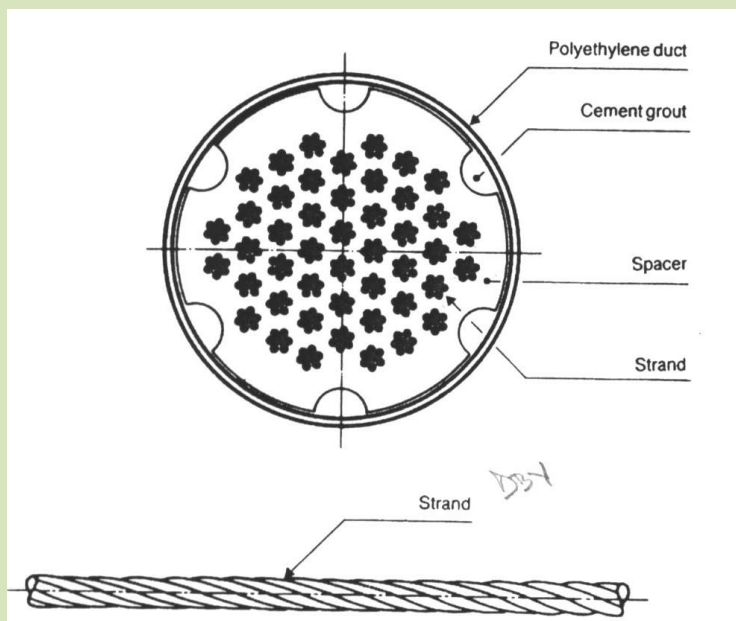


a) Paralelne šipke

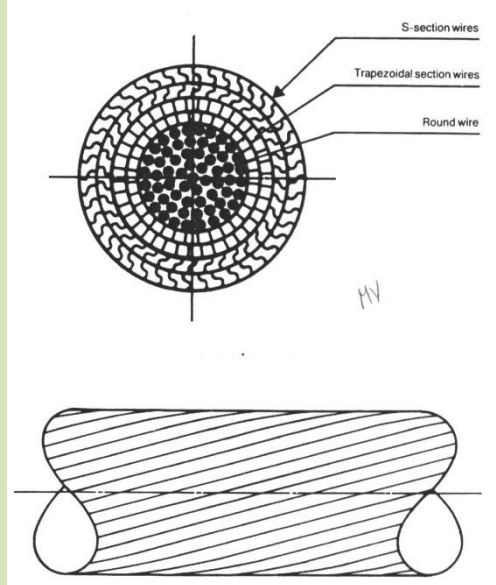


b) Paralelne žice

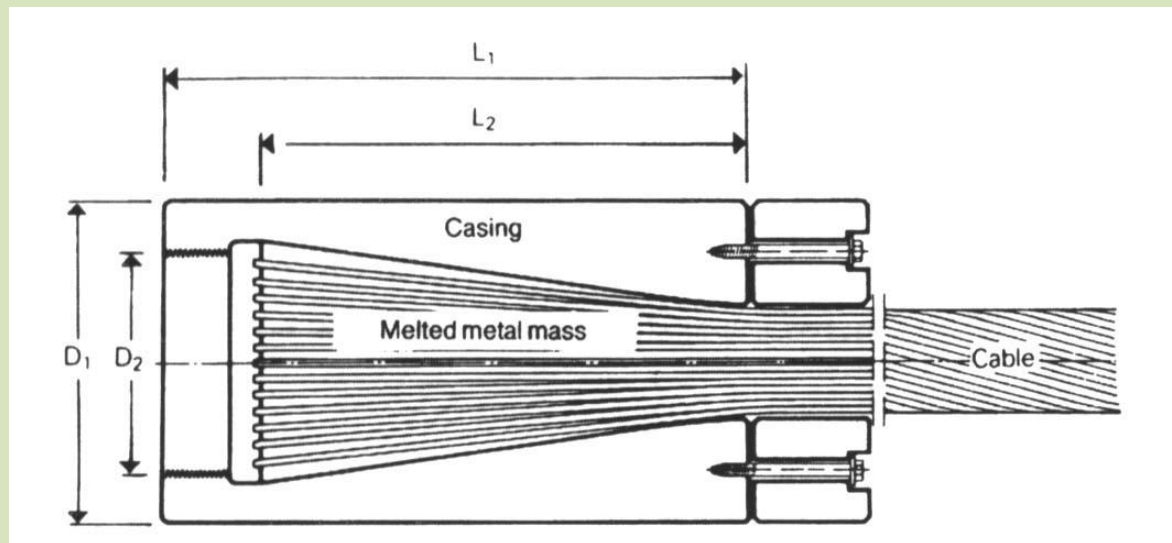


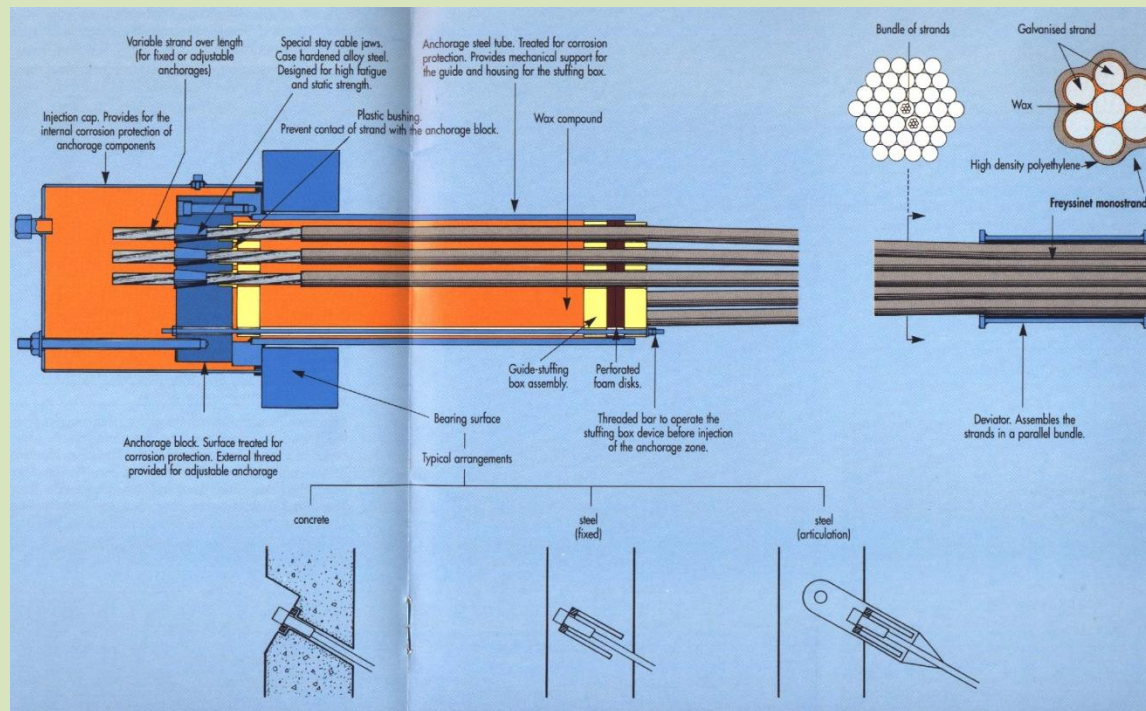
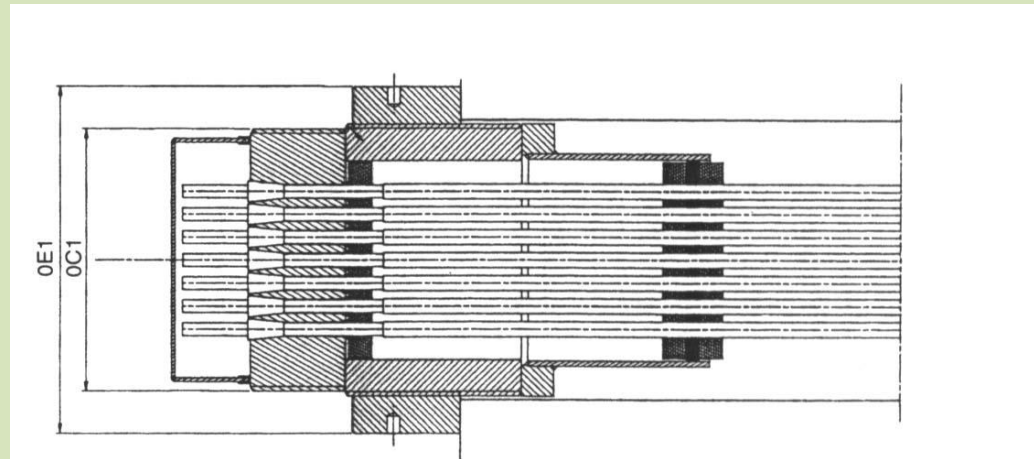
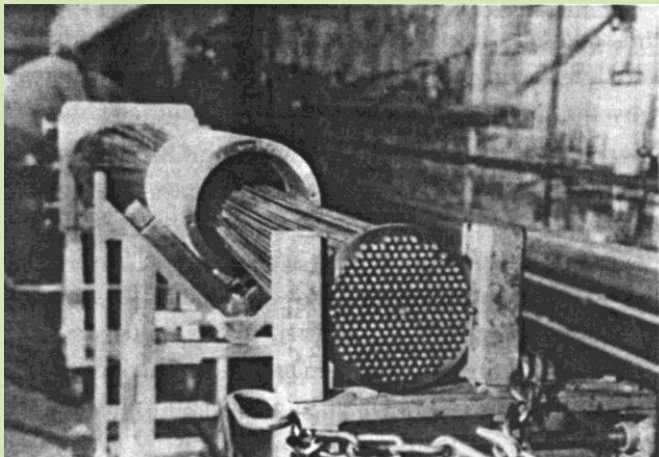


c) Paralelni strukovi



d) Zatvoreno spiralno uže

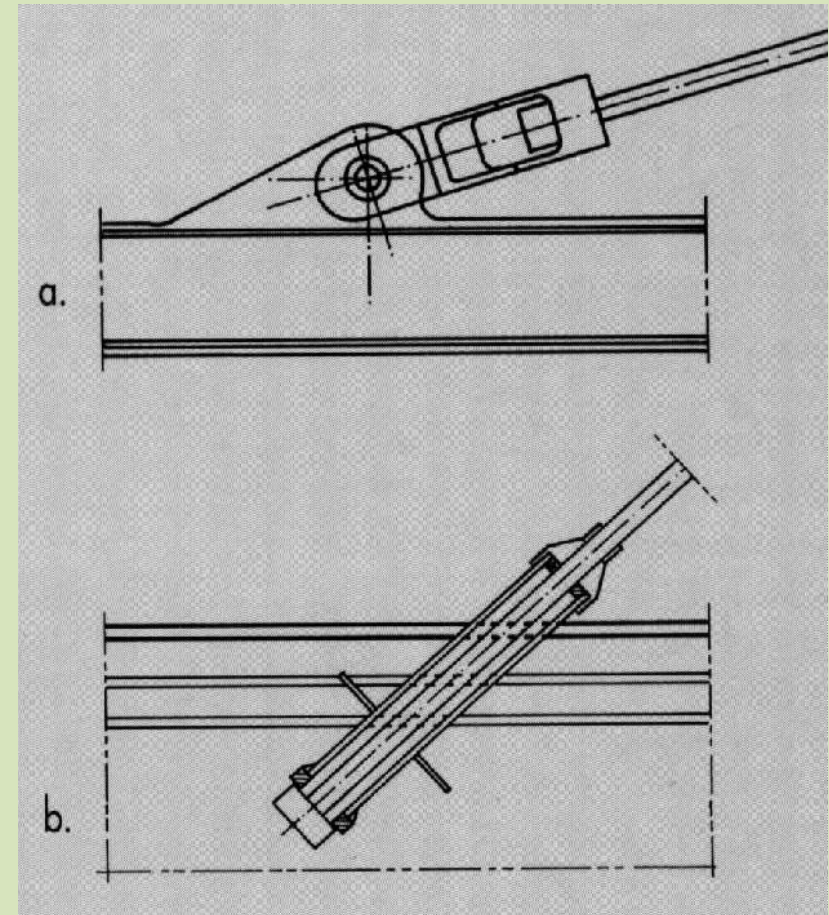
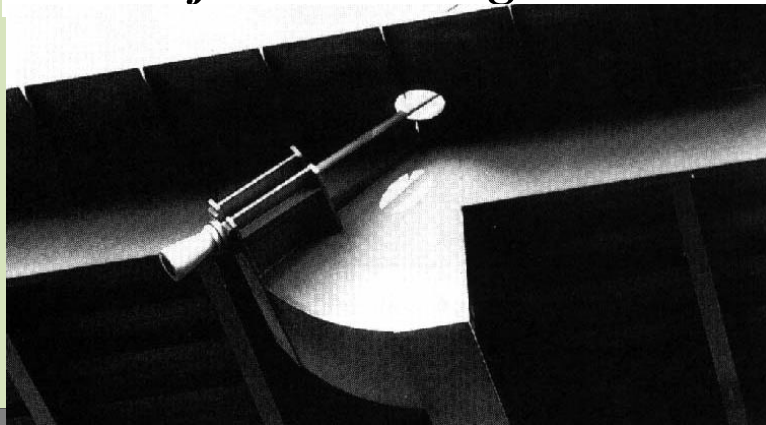
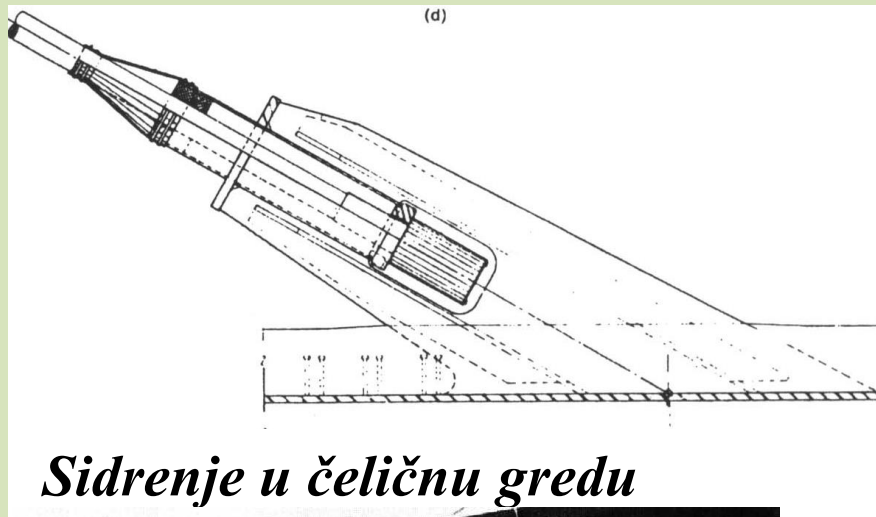


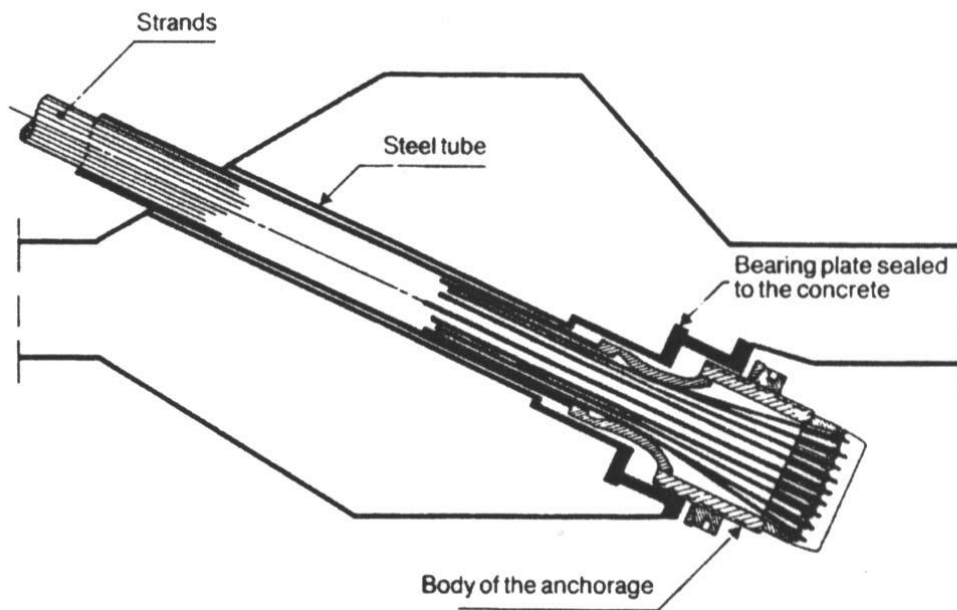




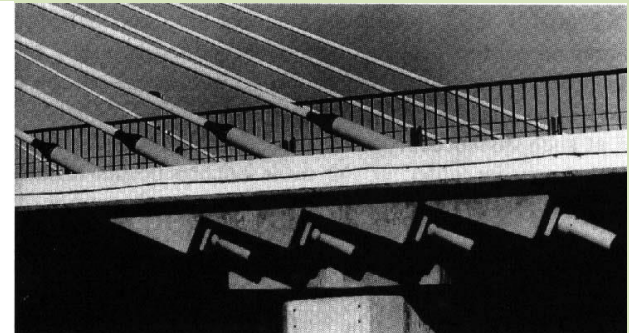
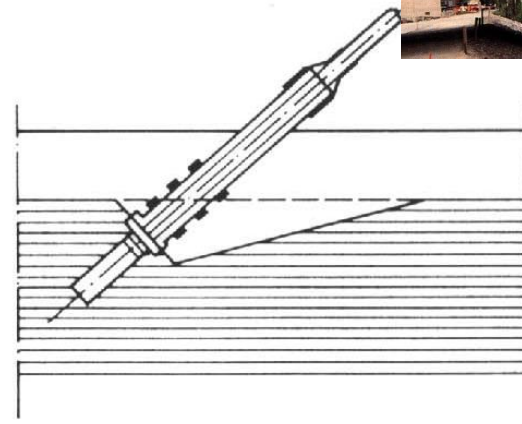
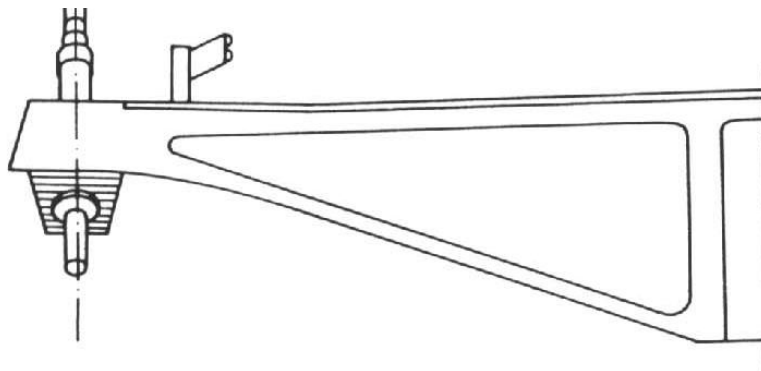
4.3.1. Sidra zatega

Usidrenja zatega na gredu ovise o poprečnom presjeku, materijalu grede i načinu ovješnja.



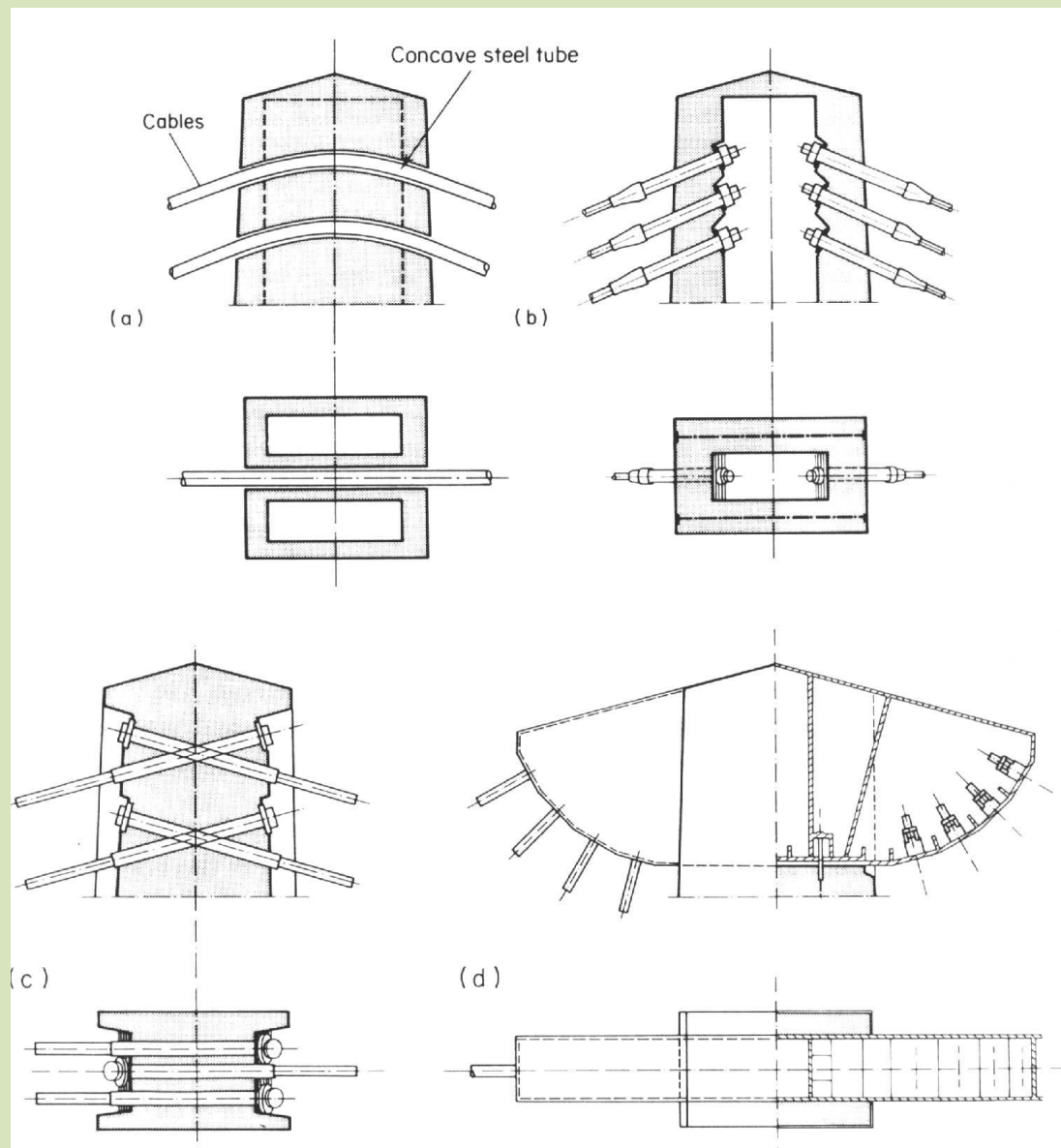


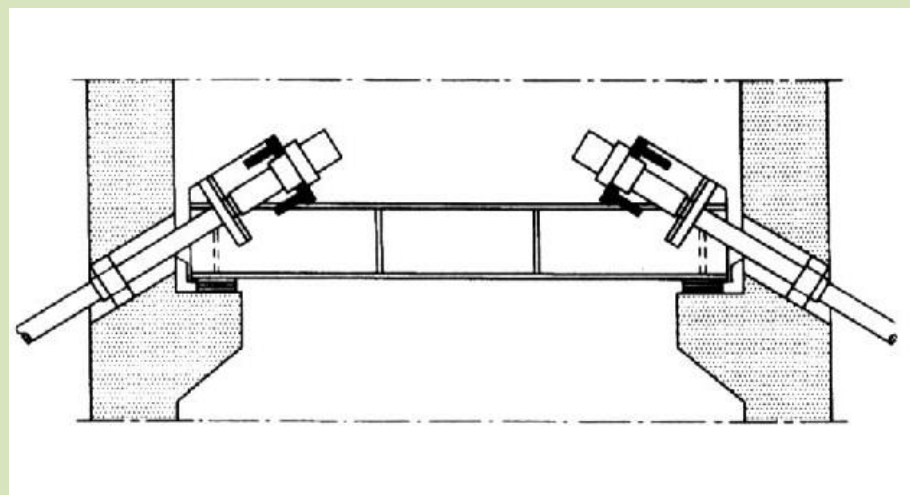
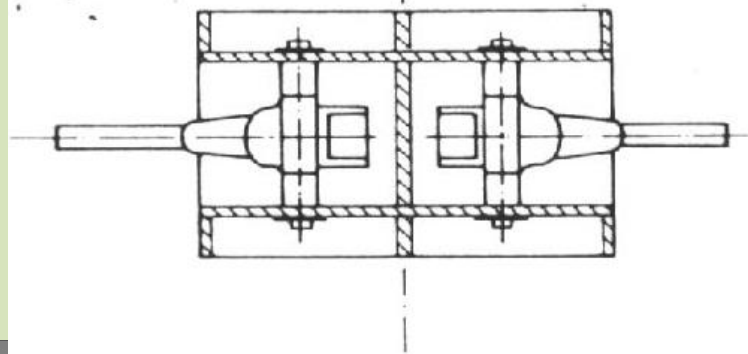
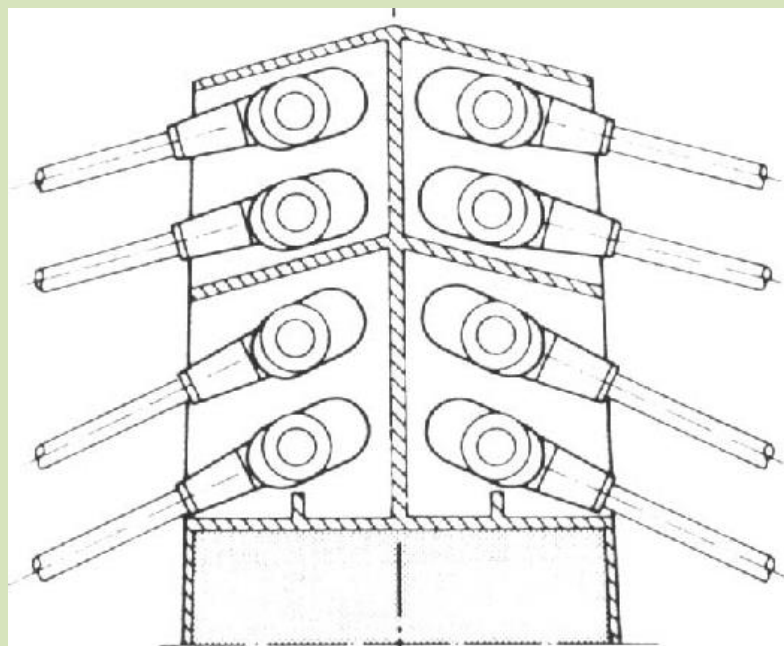
Sidrenje u betonsku gredu



Usidrenja zatega na pylon ovise o poprečnom presjeku i materijalu pilona, te o uzdužnoj i poprečnoj dispoziciji zatega.

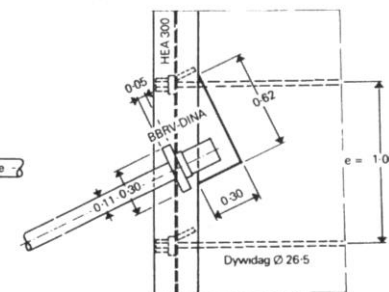
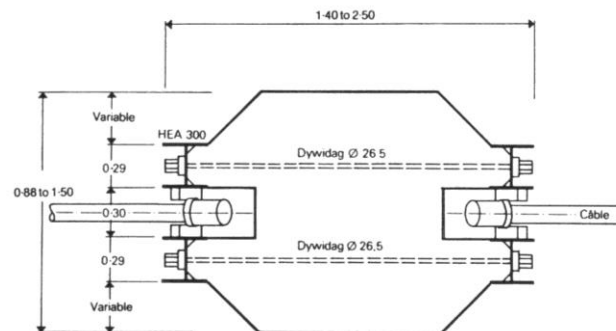
Sidrenje zatega na pylon





Most Normandie

Sidrenje na čelični pilon

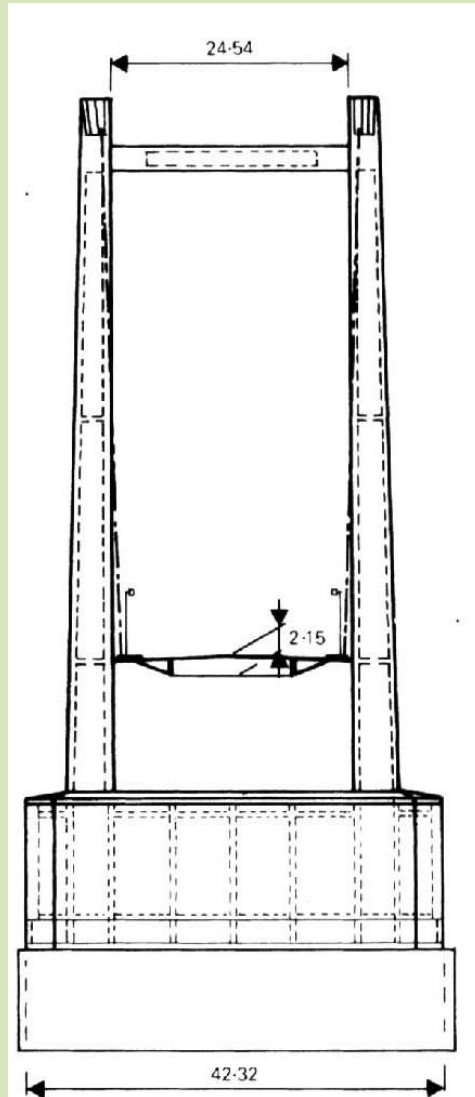




Most Ada Ciganlija – sidrenje u rasponski sklop



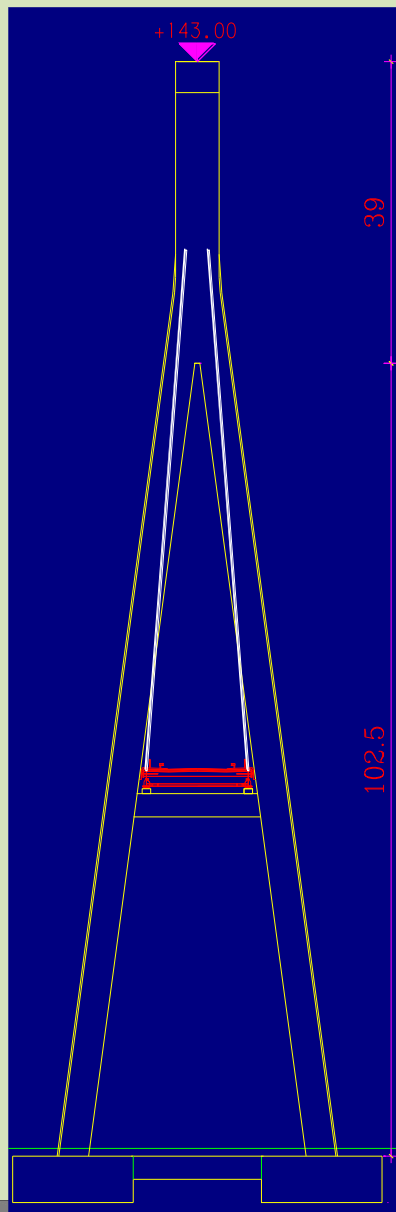
4.4. Ležajevi i dilatacije



Vertikalni ležajevi su kod lateralnog ovješnja u načelu neophodni samo na krajnjim osloncima. Kod pilona se ne moraju predvidjeti pri čemu se greda i tamo vješa na zatege, čime se izbjegavaju veliki negativni momenti savijanja u gredi (totalno ovješnje) ali zato jako rastu u bočnim otvorima.

Most Pasco-Kennewick





- Uobičajena izvedba s tzv. parcijalnim ovješanjem, vertikalni ležajevi postavljaju se i na poprečnom nosaču pilona, ovješanje u okolici pilona se prekida.
- Momenti savijanja grede u bočnim otvorima i kod pilona u velikoj mjeri ovise o načinu oslanjanja grede na pilon.





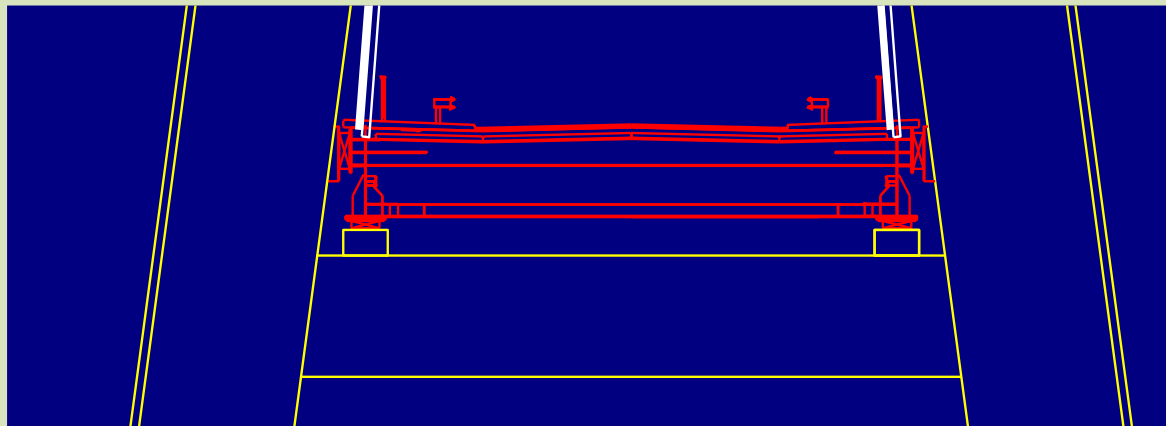
- Greda upete u pilon - momenti se smanjuju u bočnim poljima, a jako rastu nad pilonom.



- Ponekad se primjenjuje i kompromisno rješenje sa djelomičnom upetošću.

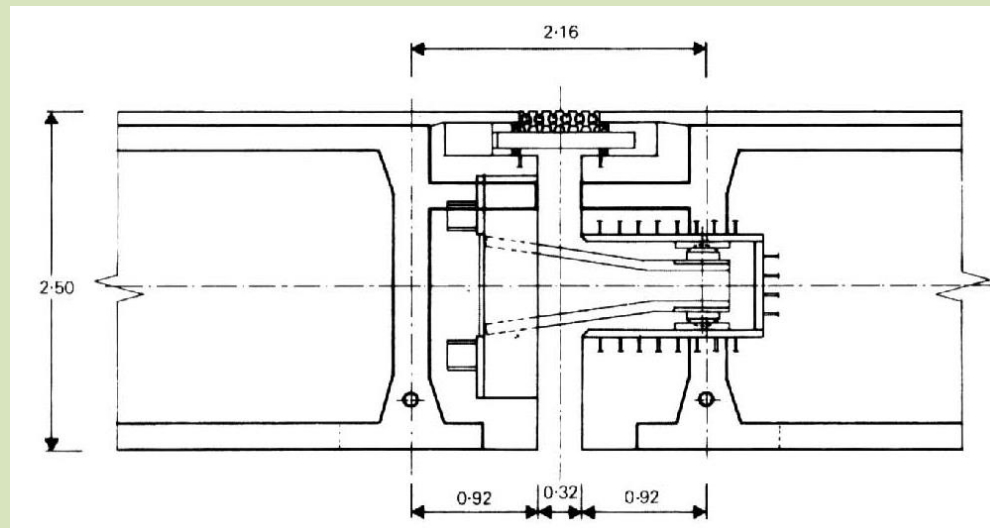


- Stabilnost pilona na izvijanje se bitno poboljšava ako se predvidi nepokretan ležaj za preuzimanje horizontalnih sila u uzdužnom smjeru. Kako je konstruktivni sustav (lepeza i pseudo-lepeza) u uzdužnom smjeru vrlo mekan taj ležaj se može postaviti i na jedan kraj mosta, tako da je potrebna samo jedna velika prijelazna naprava.
- Uzdužno nepokretni ležaj se može smjestiti i na pilonu pa se onda kočne sile predaju temelju pilona savijanjem, što je lako izvedivo jer su u pilonu velike uzdužne sile te dolazi do malog dodatnog ekscentriciteta.
- Ležajevi za horizontalna poprečna opterećenja (vjetar) se stavljaju na svim krutim osloncima.





Kod simetričnih mostova sa kosim zategama preko tri raspona uzdužno nepomični ležajevi se mogu postaviti i na oba kraja mosta ako se u sredini centralnog otvora predvidi zglob sa prijelaznom napravom, čime se kod simetrične slobodne montaže izbjegava potreba za uspostavljanjem fleksijskog kontinuiteta na tom mjestu. Neki autori ipak smatraju da takvo rješenje nije najbolje zbog složenosti konstrukcije zgloba (horizontalno pomičan, vertikalno nepomičan) i zbog neizbježnog loma nivelete, uslijed djelovanja pokretnog opterećenja, a kod betonskih greda i puzanja i skupljanja.

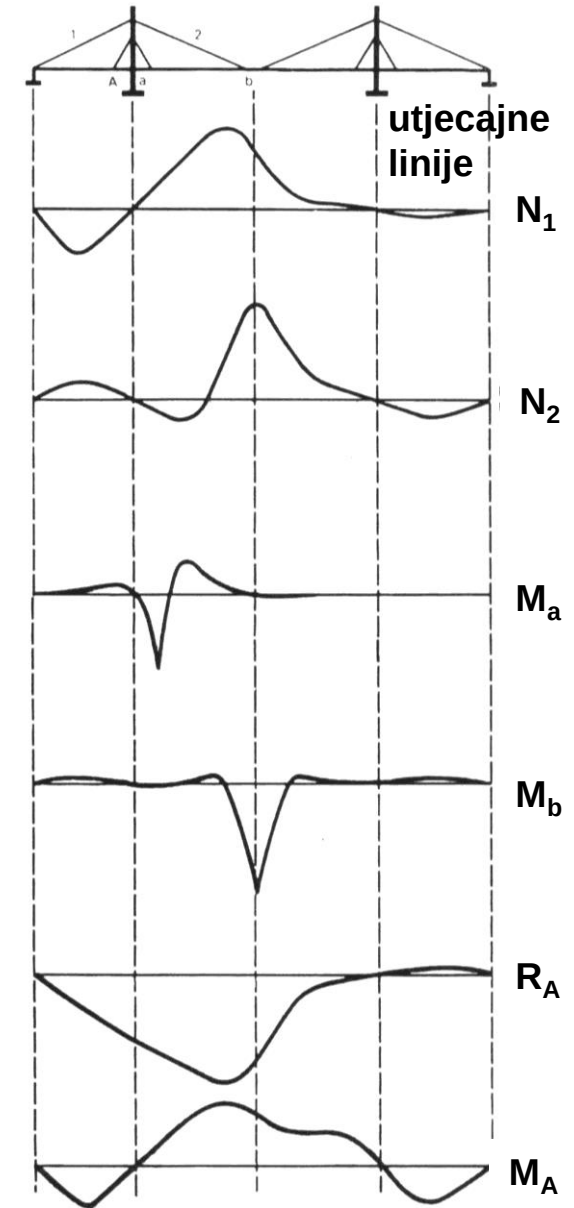




5. Proračuni

- Most sa kosim zategama je višestruko statički neodređeni sustav. Područje (veličina) sile najvećim dijelom je određena odnosom krutosti zatega, pilona i grede.

- Momenti savijanja na gredi približavaju se onima na kontinuiranom nosaču na čvrstim osloncima; ti momenti se smanjuju što se više smanjuje razmak između zatega. Vertikalne komponente sila u zategama su približno jednake ležajnim reakcijama izračunatim na taj način.



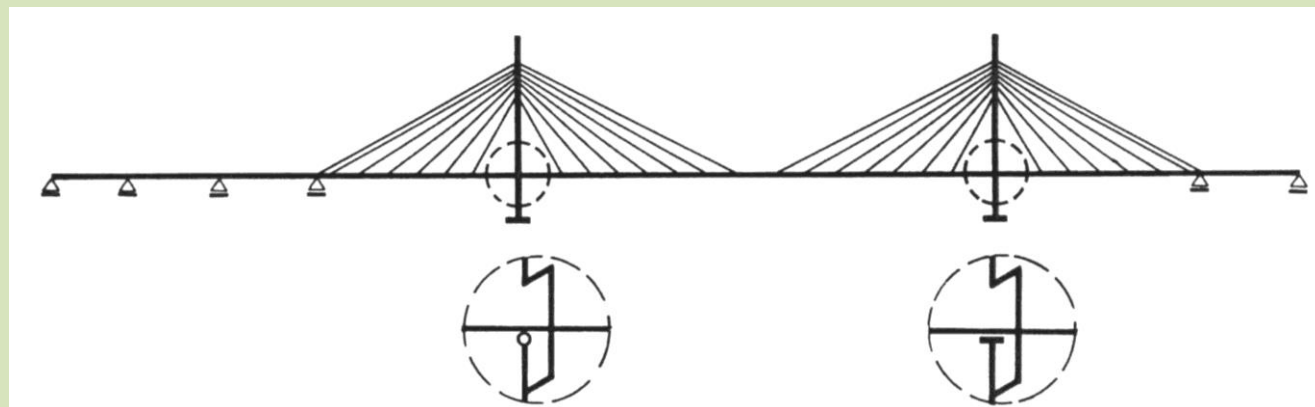


5.2. Modeliranje statičkog sustava

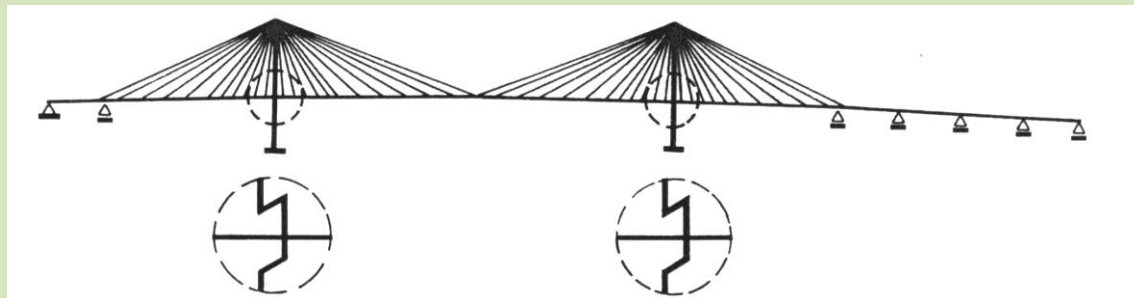
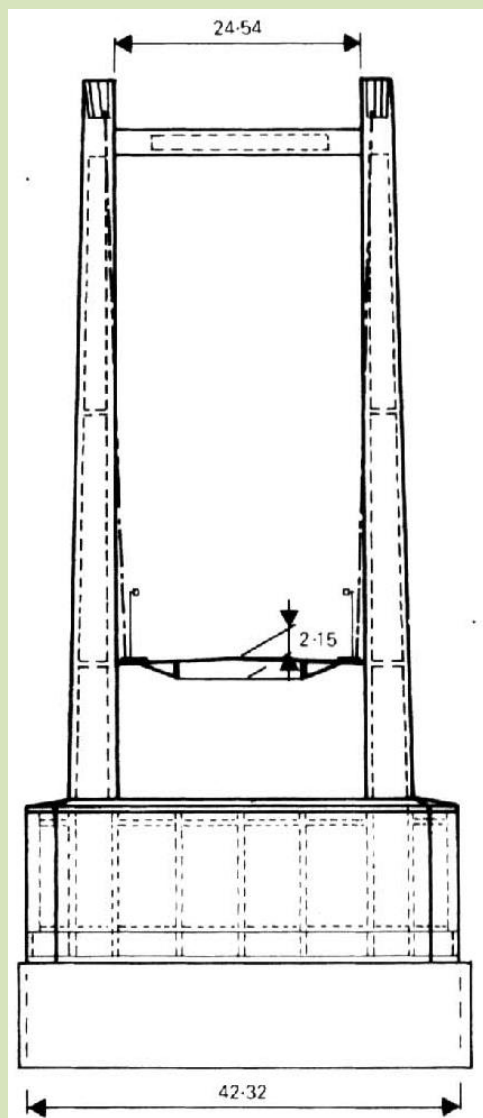
Pojednostavnjenje – dovoljna točnost

5.2.1. Ravninski modeli

Diepoldsau

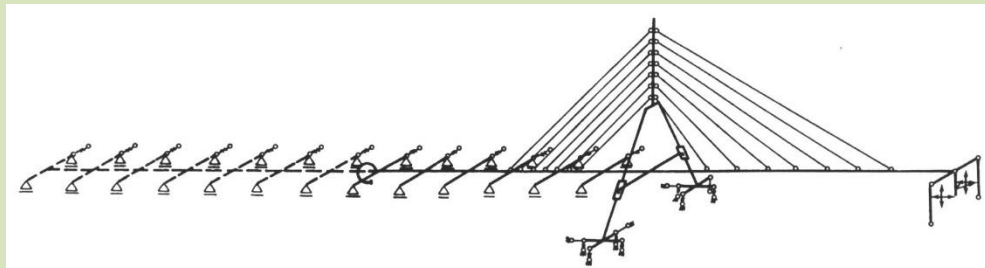


Pasco-Kennewick

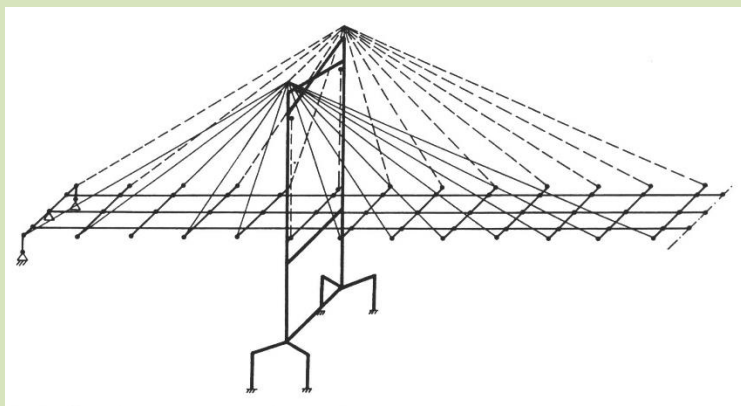


5.2.2. Prostorni modeli

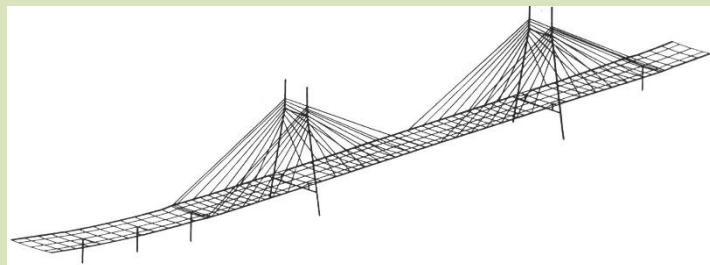
Flehe



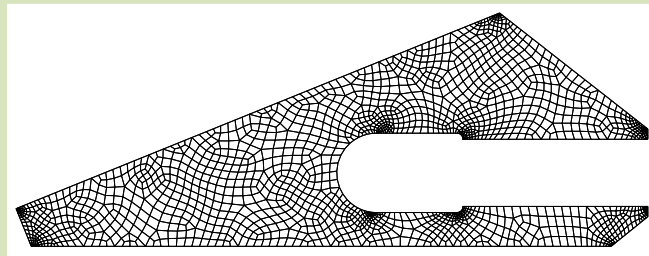
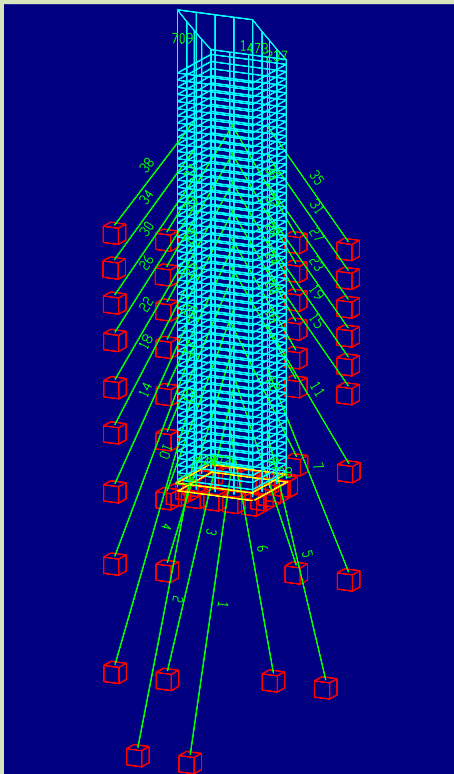
Zarate-Brazo Largo



Diepoldsau

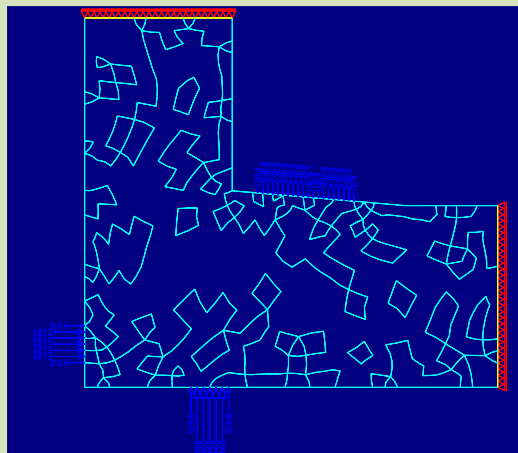


5.2.3. Parcijalni modeli



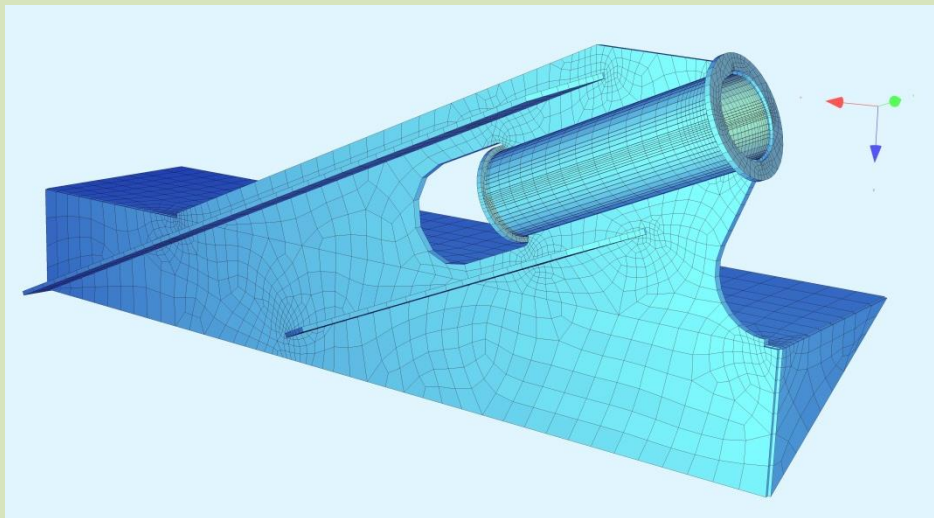
Sidrenje zatege na gredu

Vrh pilona

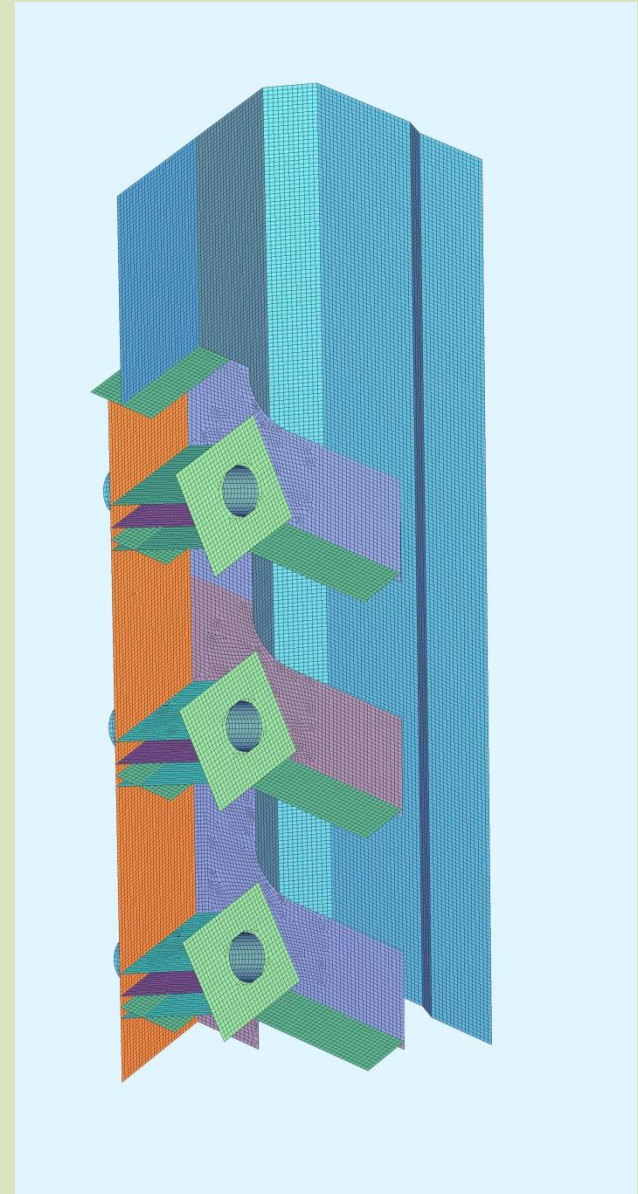


5.2.3. Parcijalni modeli

Sidrenje zatege na gredu



Vrh pilona



5.3. Zatege

Zbog male krutosti na savijanje zatege se deformiranjem uravnotežuju pod utjecajem vlastite težine zauzimajući oblik lančanice.

Da bi se u proračun mogla uvesti idealizirana ravna zatega potrebno je pronaći idealizirani sekantni modul elastičnosti E_i .



5.3. Zatege

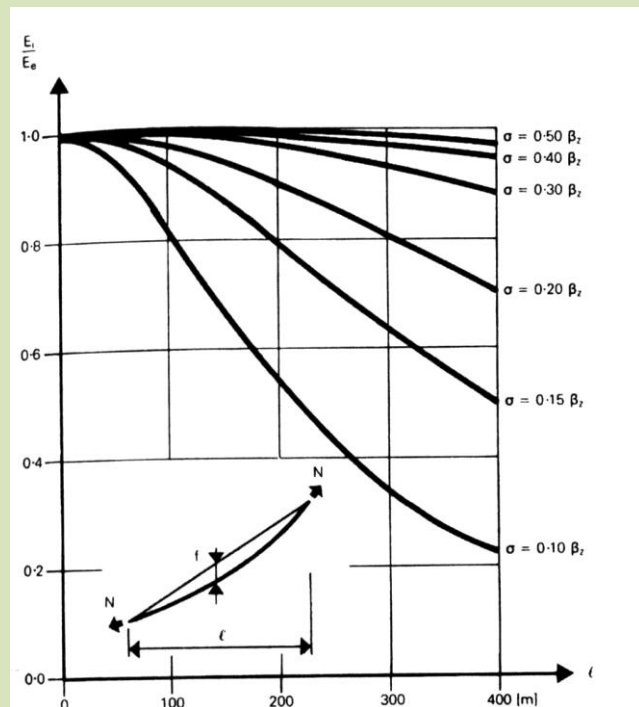
Zbog male krutosti na savijanje zatege se deformiranjem uravnotežuju pod utjecajem vlastite težine zauzimajući oblik lančanice.

Da bi se u proračun mogla uvesti idealizirana ravna zatega potrebno je pronaći idealizirani sekantni modul elastičnosti E_i .

$$E_i = E_e / \left(1 + \frac{(\gamma l)^2}{12 \sigma_m^3} \frac{(1 + \mu)^4}{16 \mu^2} E_e \right)$$

γ - jedinična težina
 l - horizontalni raspon zatege

$$\mu = \frac{\sigma_{low}}{\sigma_{up}} \qquad \sigma_m = (\sigma_{low} + \sigma_{up}) / 2$$



Omjer E_i/E_e – pokazuje utjecaj progiba zatege na njenu krutost

dijagram σ - ε za zategu horizontalne dužine 500m i napona $0.1\beta_z$

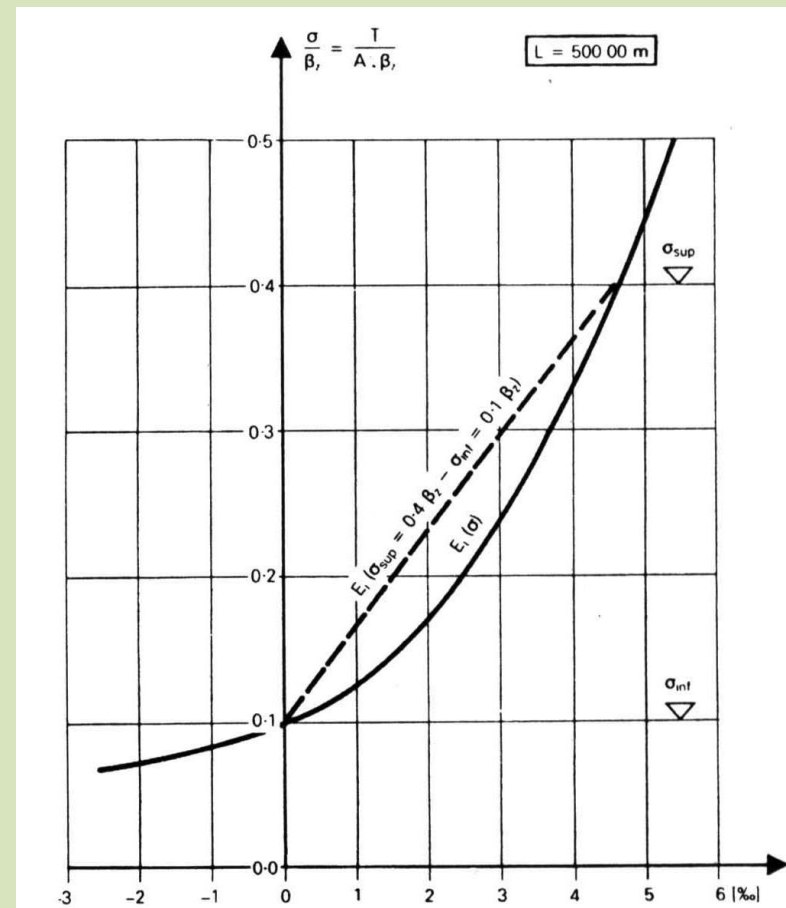
$$E_e = 205\,000 \text{ N/mm}^2$$

$$\beta_z = 1\,700 \text{ N/mm}^2$$

$$\gamma = 80 \text{ kN/m}^3$$

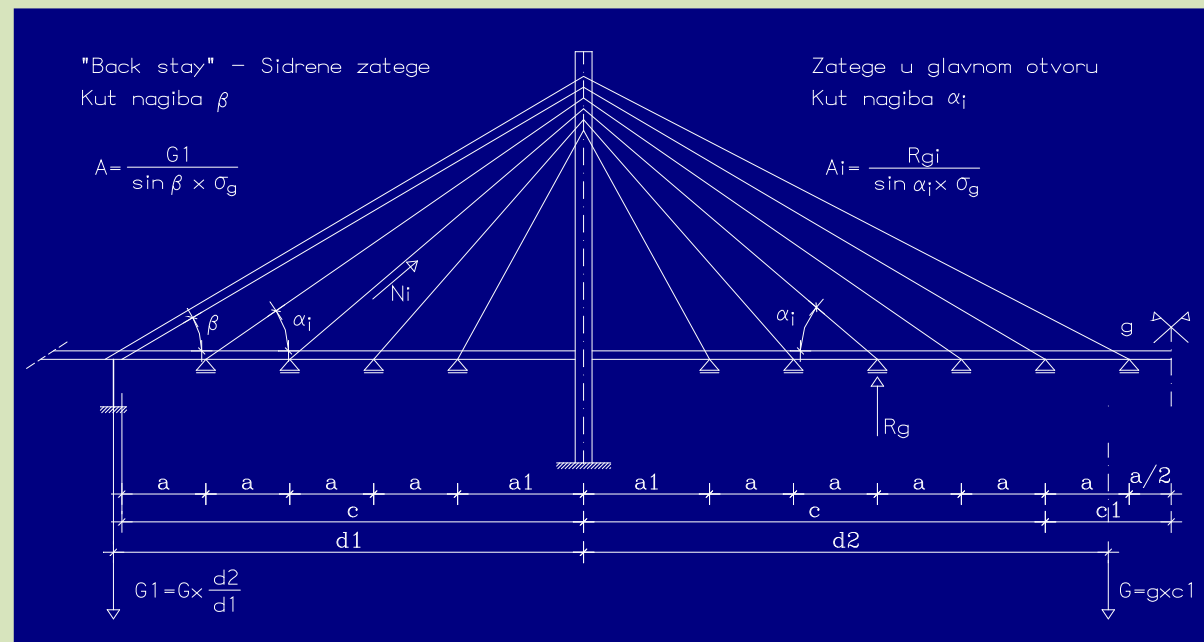
$$\sigma = N/A$$

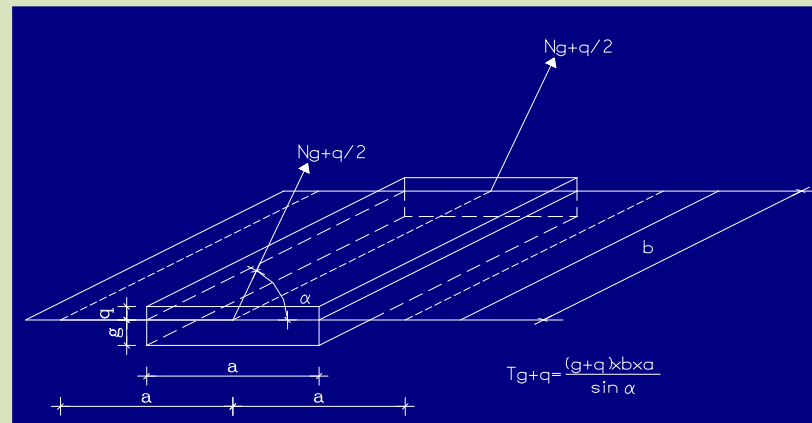
$$\frac{E_i}{E_e} = \frac{1}{1 + \frac{(\gamma \times l)^2 \times E_e}{12 \times \sigma^3}}$$



5.4. Preliminarni proračun

- Pojednostavljeni proračun daje nam vrijednosti za prvu aproksimaciju preliminarnog proračuna sila u zategama. $N_i = R_{g,i} / \sin \alpha_i$
- Gredu promatramo kao kontinuirani nosač na čvrstim osloncima koji se nalaze na mjestima usidrenja zatege u gredu.
- Za “back stay” (sidrene) zatege pretpostavlja se da indirektno podupiru onaj dio srednjeg raspona koji nije uravnotežen sa bočnim rasponom. Sile u tim zategama dobiju se projekcijom sile G_1 u smjeru zatege





Poprečni smjer

- Znamo sile u zategama od stalnog opterećenja - potrebno je definirati granični napon σ_g za djelovanje vlastite težine i dodatnog stalnog opterećenja tako da temeljem tih vrijednosti možemo dimenzionirati tj. usvojiti poprečni presjek zatege.
- Pretpostavimo da zatega od pokretnog opterećenja preuzima silu N_q koja je proporcionalna sa silom N_g

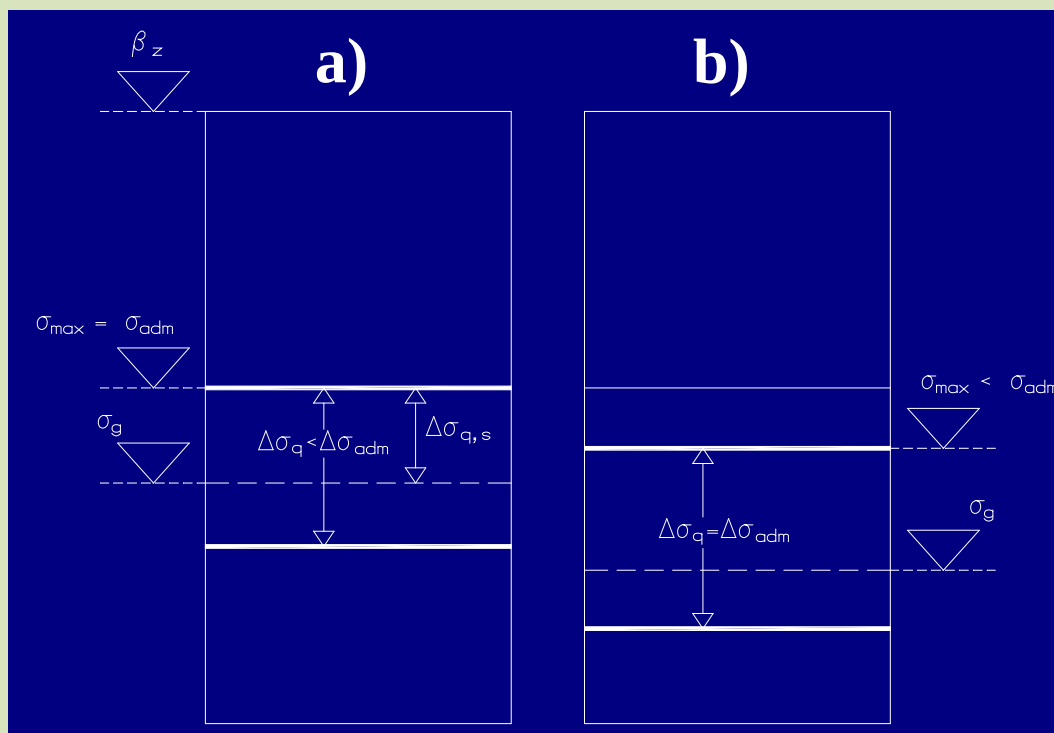
Definiramo parametar $\eta = q/g$;

g – stalno opterećenje

q – prometno opterećenje



- Prometna opterećenja od željezničkog prometa su u pravilu veća od cestovnog, a čelična greda je lakša od betonske, pa parametar η može dosta varirati.
- Taj je parametar relativno mali za betonske cestovne mostove : 0,2-0,3, a veliki za čelične željezničke mostove 1,0-2,0.



→ iskoristivost čelika u zategama za dvije vrijednosti η

→ **ako je vrijednost η mala razlika naprezanja $\Delta\sigma_q$ manja je od granične $\Delta\sigma_{adm}$ pa vrijedi kriterij čvrstoće**

→ **η veliki, razlika napona $\Delta\sigma_q$ postaje velika pa vrijedi kriterij umornosti**

Omjer $\eta=q/g$	a) niski	b) visoki
Uvjeti	$\sigma_g + \Delta\sigma_{q,s} \leq \sigma_{adm}$	$\Delta\sigma_q \leq \Delta\sigma_{adm}$



Za oba ova kriterija može se uspostaviti odnos σ_g i η

- kriterij čvrstoće: $\sigma_g + \sigma_q \leq \sigma_{adm} \Rightarrow \sigma_g \leq \sigma_{adm} - \sigma_q$

$$\sigma_g \leq \sigma_{adm} \left(1 - \frac{\sigma_q}{\sigma_{adm}} \right) = \sigma_{adm} \left(1 - \frac{\sigma_q}{\sigma_g + \sigma_q} \right) = \sigma_{adm} \left(1 - \frac{q}{g + q} \right) = \sigma_{adm} \frac{g}{g + q}$$

$$\sigma_g \leq \frac{g}{g + q} \sigma_{adm} = \left(1 + \frac{q}{g} \right)^{-1} \sigma_{adm} = (1 + \eta)^{-1} \sigma_{adm}$$

- kriterij umornosti:

$$\Delta \sigma_q \leq \Delta \sigma_{adm}$$

$$\Delta \sigma_q = \frac{N_q}{A} = \frac{N_q}{A} \frac{N_g}{N_g} = \frac{q}{g} \sigma_g$$

$$\frac{q}{g} \sigma_g \leq \Delta \sigma_{adm}$$

$$\sigma_g \leq \left(\frac{q}{g} \right)^{-1} \Delta \sigma_{adm} = \eta^{-1} \Delta \sigma_{adm}$$

$\sigma_{adm} = 0,45 \beta_z$ ($0,50 \beta_z$ u posebnim slučajevima) gdje je β_z vlačna čvrstoća čelika pri slomu.

Dopuštene oscilacije naprezanja $\Delta \sigma_q$ garantira proizvođač i obično je temeljeno na eksperimentima od preko dva milijuna ciklusa opterećenja.

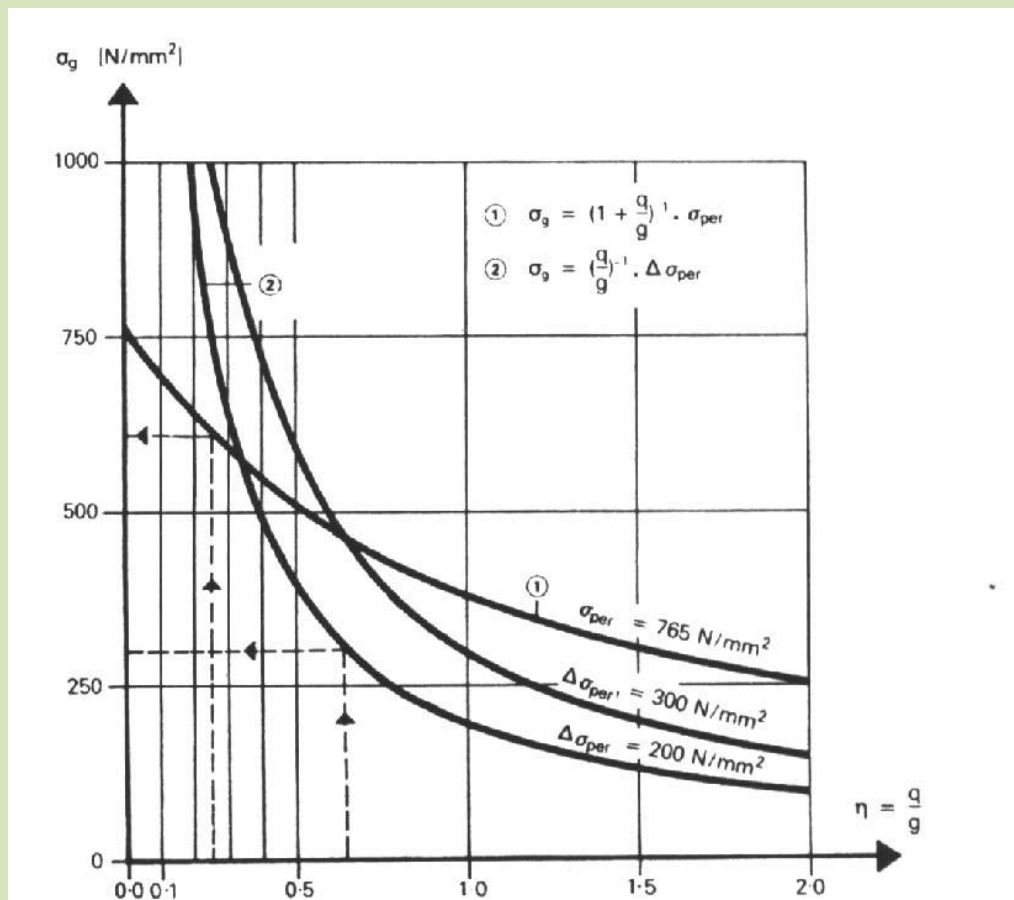


σ_g kao funkcija η za kriterij čvrstoće i kriterij umornosti:

Dopuštena naprezanja su :

$$\sigma_{adm} = 0,45 \times 1700 = 765 \text{ N/mm}^2$$

$$\Delta\sigma_{adm} = 200 \text{ N/mm}^2 \text{ ili } 300 \text{ N/mm}^2$$



površina zatege:

$$A_i = N_{g,i} / \sigma_g$$

NAPOMENA:

slika: indeks (per)=(adm)



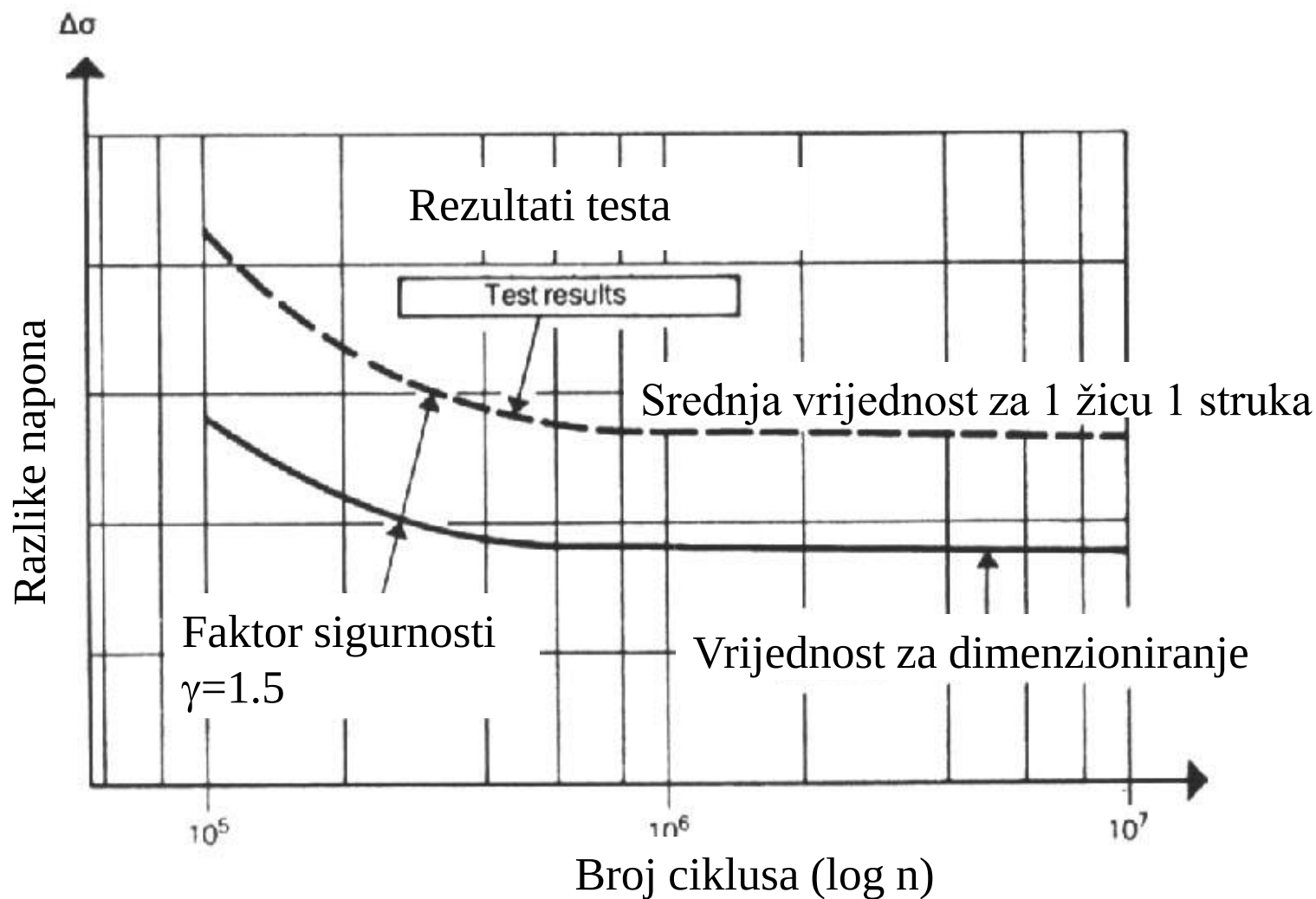
5.5 Dimenzioniranje na umornost

$$\Delta\sigma_{adm} = \frac{\Delta\sigma_{test}}{\gamma_1\gamma_2\gamma_3} = \frac{\Delta\sigma_{test}}{1.5}$$

$\gamma_1=1,15$ parcijalni koeficijent za čelik

$\gamma_2=1,15$ parcijalni koeficijent koji uzima u obzir efekt grupiranja
(ispitivanja se provode na pojedinačnim žicama ili strukovima)

$\gamma_3=1,15$ parcijalni koeficijent koji uzima u obzir prenošenje rezultata
ispitivanja u karakteristične vrijednosti



Prikaz dimenzioniranja na umornost



5.6 Dinamički proračun

- Utjecaj dinamičkih sila na ovješene i viseće mostove je veći nego na bilo koje druge mostove i vrlo je važan za proračun.
- Dinamički proračun podrazumijeva provjeru slijedećih stavki:
 - aerodinamički efekt
 - psihološki efekt
 - seizmičko djelovanje
- Aerodinamička stabilnost točnije nestabilnost bila je uzrok rušenja visećih mostova ranijeg razdoblja, a to je pak uvjetovalo poboljšanje i napredak na tom području.
- Oscilacije uzrokovane vjetrom i prometom koje ne uzrokuju oštećenje mosta mogu vrlo neugodno djelovati na njegove korisnike.

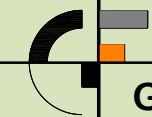


Treba pronaći:

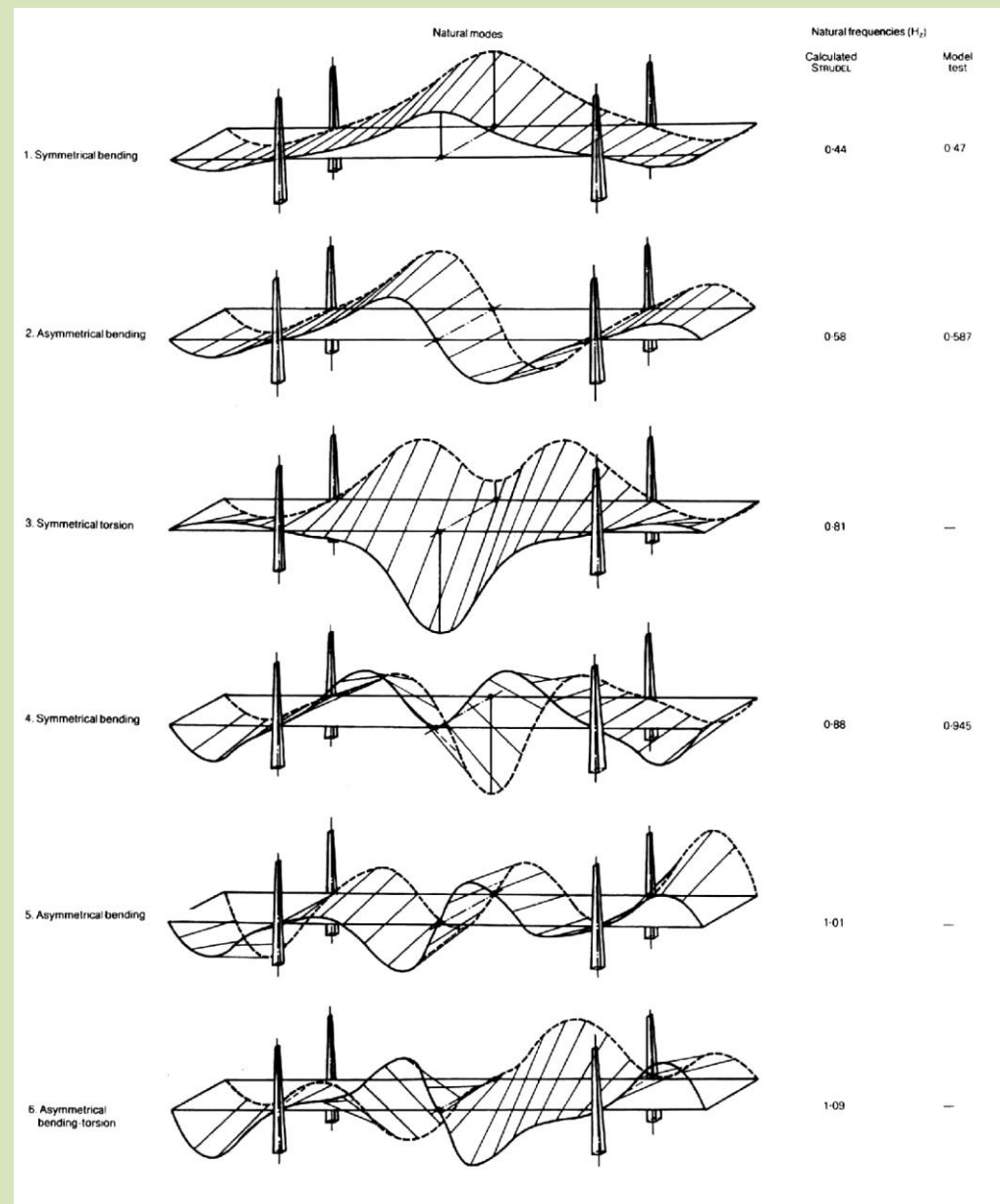
- Vlastite frekvencije i tonove promatrane konstrukcije
- Savojnu (fleksijsku) i torzijsku vlastitu frekvenciju

Obično je odgovor konstrukcije na dinamičko djelovanje sadržan u prvih nekoliko tonova konstrukcije, međutim kod fleksibilnih konstrukcija potrebno je razmatrati veći broj tonova.

- Za most *Franja Tuđmana* uzeto je 50 tonova



most Zarate - Brazo Largo prvih 6 tonova

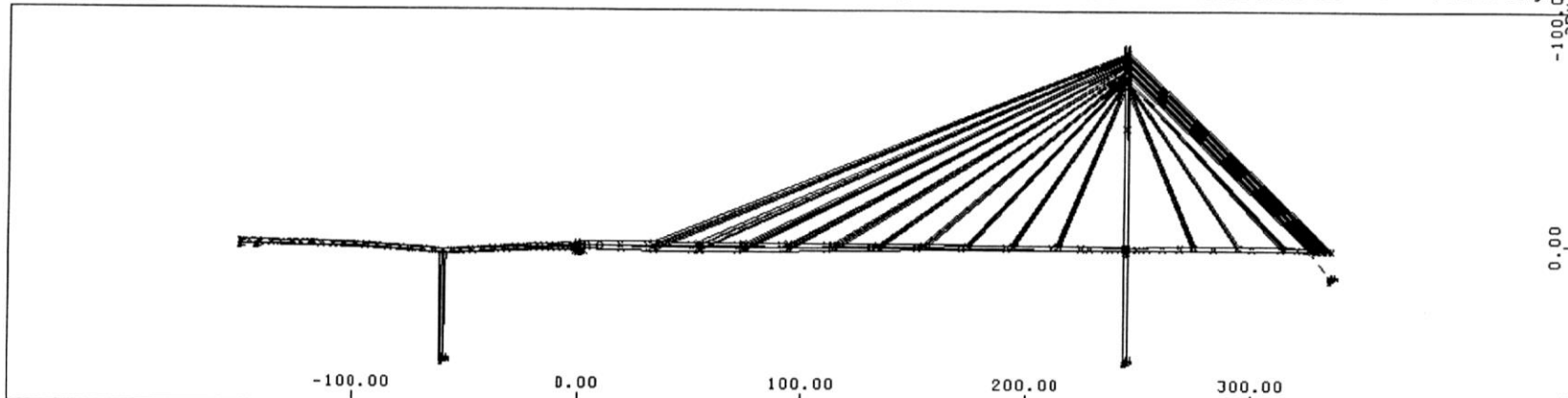




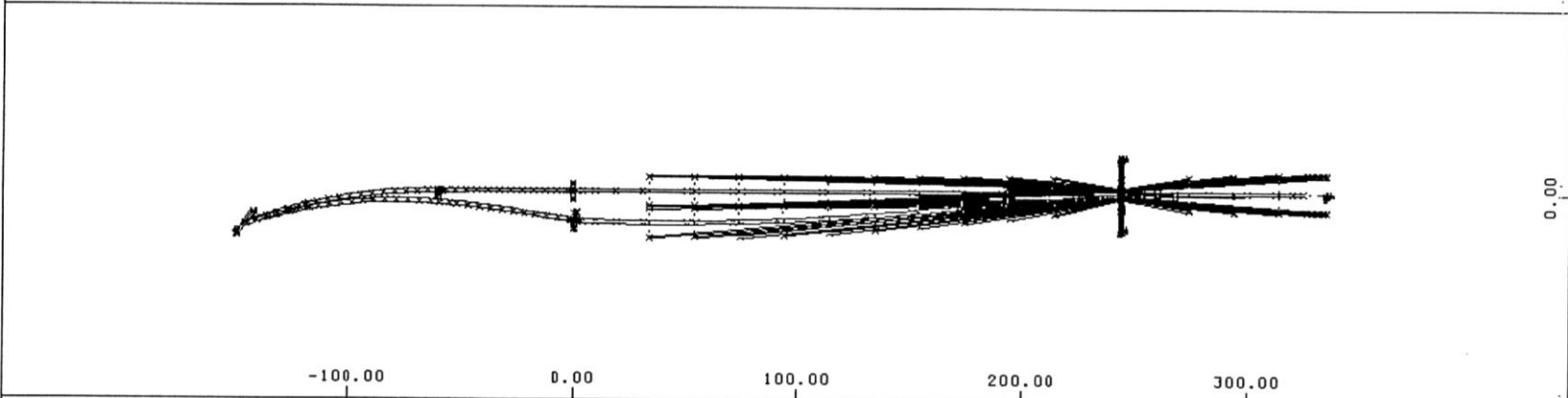
most *Franja Tuđmana* - prvi ton

GRAF 5194 6.01. 0

Gradjevinski Fakultet * Kacloeva 26 * 41000 Zagreb



ELEMENT GROUP 0...12 29 30 255...1023
DEFORMED STRUCTURE FROM LOADCASE 1 ENLARGED BY 900.0 FREQUENCY 0.34 HZ



ELEMENT GROUP 0...12 29 30 255...1023
DEFORMED STRUCTURE FROM LOADCASE 1 ENLARGED BY 900.0 FREQUENCY 0.34 HZ

MOST PREKO RIJEKE DUBROVACKE

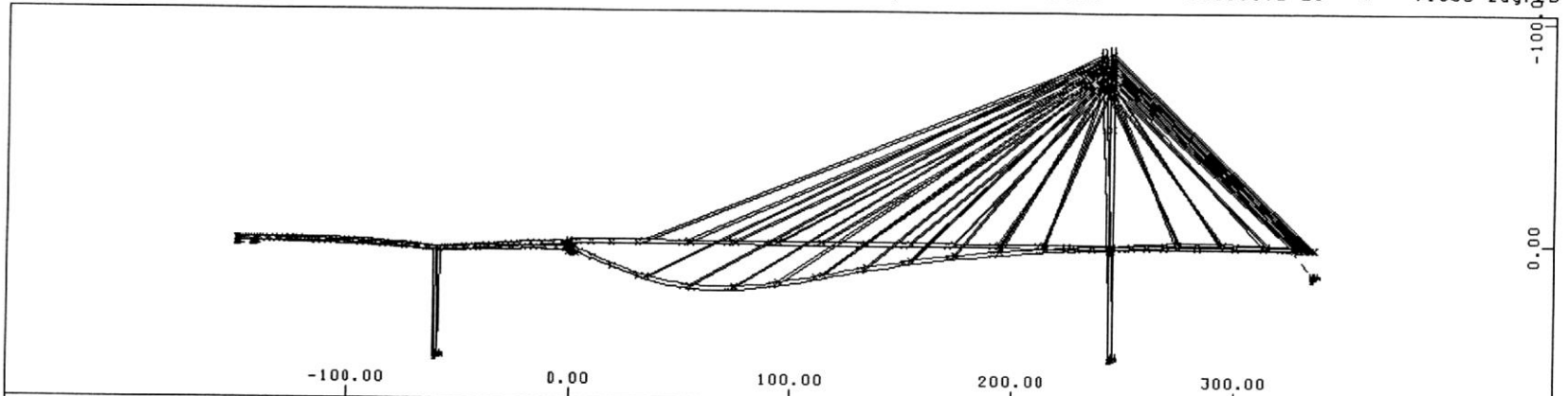
M 1 : 2490



most *Franja Tuđmana* - drugi ton

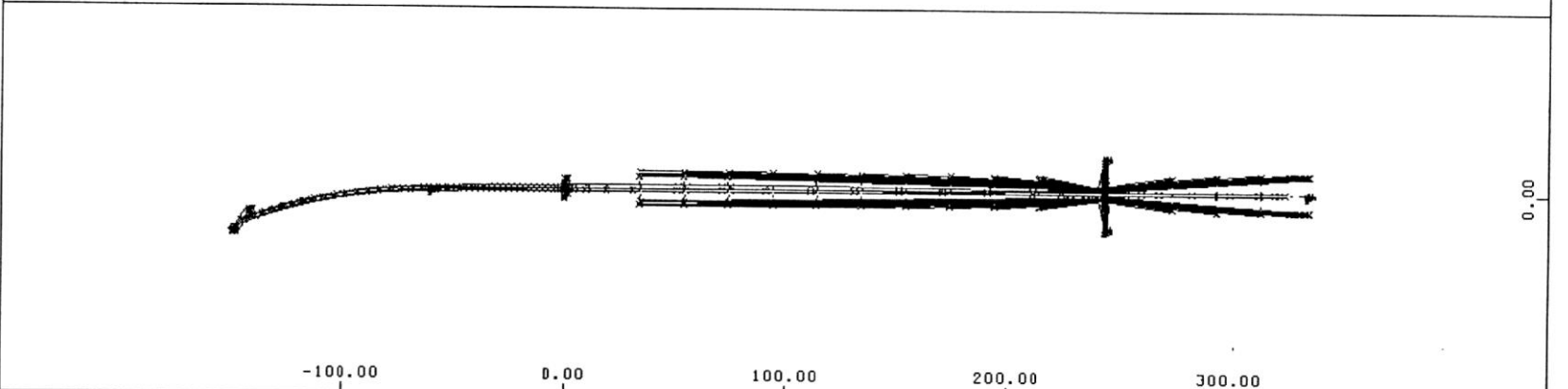
GRAF 5194 6.01. 0

Gradjevinski Fakultet * Kacljeva 26 * 41000 Zagreb



x
z

ELEMENT GROUP 0...12 29 30 255...1023
DEFORMED STRUCTURE FROM LOADCASE 2 ENLARGED BY 900.0 FREQUENCY 0.36 HZ



x
y

ELEMENT GROUP 0...12 29 30 255...1023
DEFORMED STRUCTURE FROM LOADCASE 2 ENLARGED BY 900.0 FREQUENCY 0.36 HZ

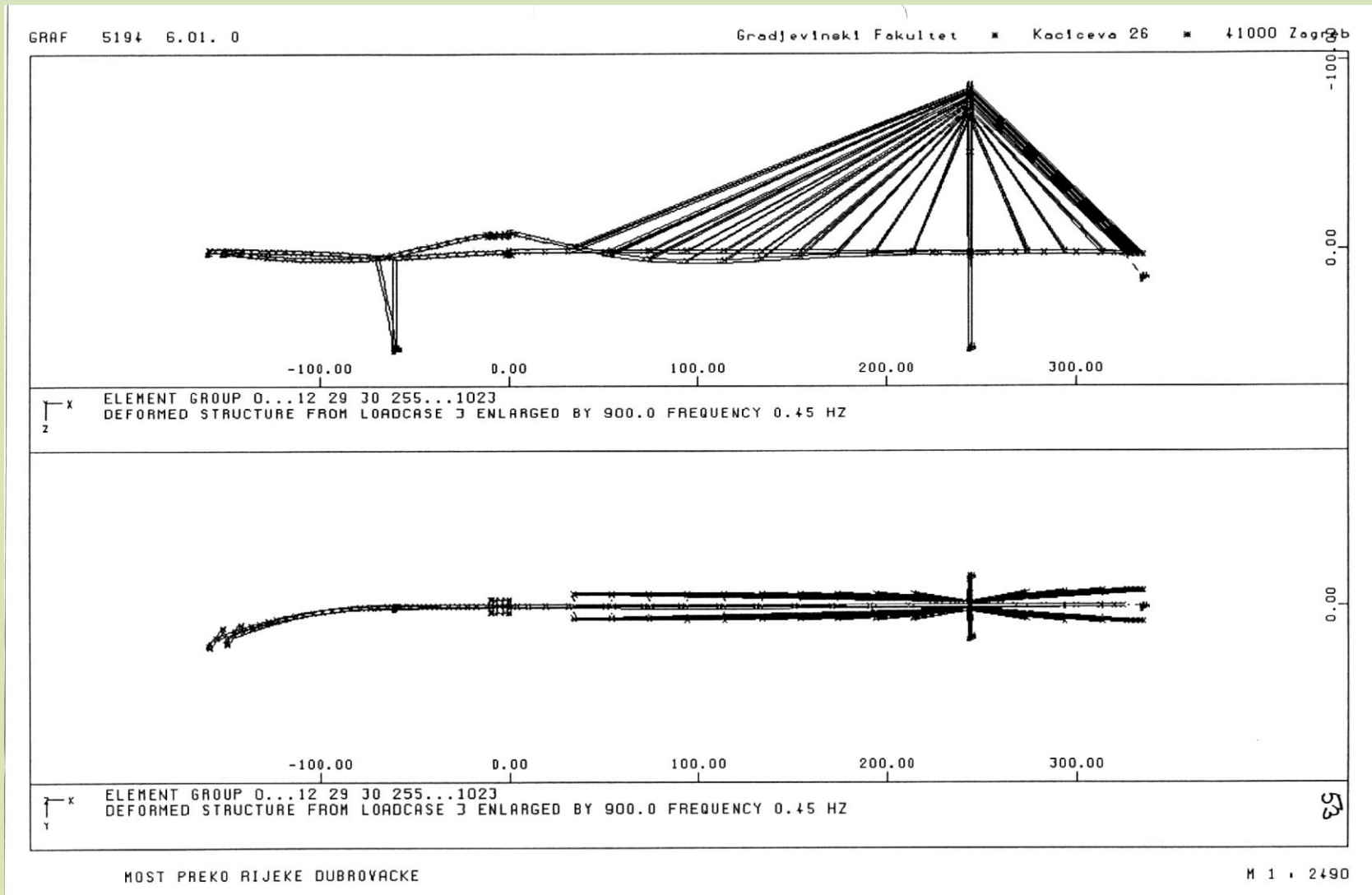
MOST PREKO RIJEKE DUBROVACKE

H 1 : 2490

52



most *Franja Tuđmana* - treći ton

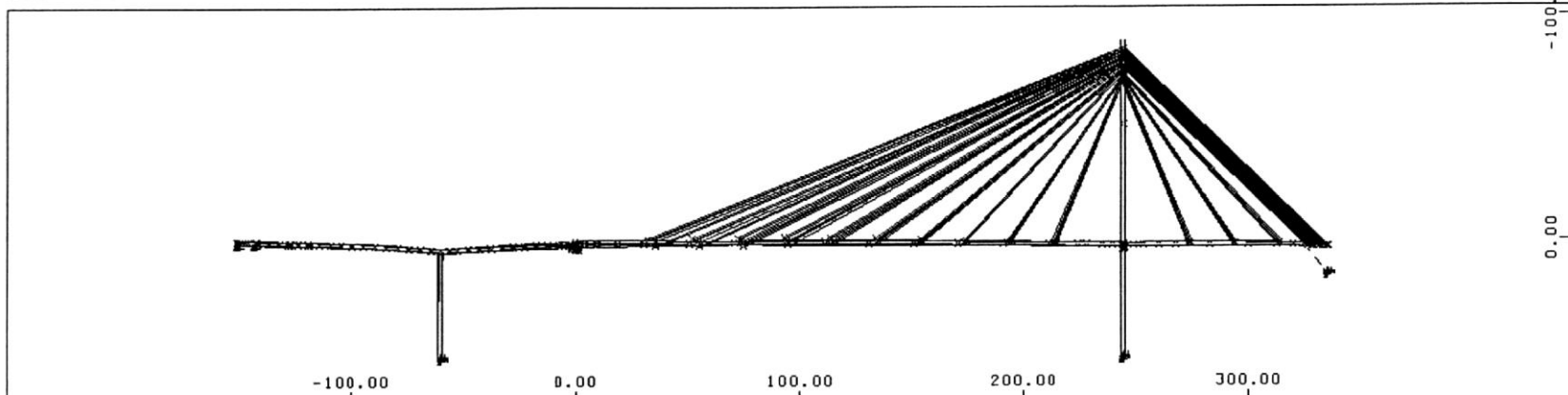




most *Franja Tuđmana* - četvrti ton

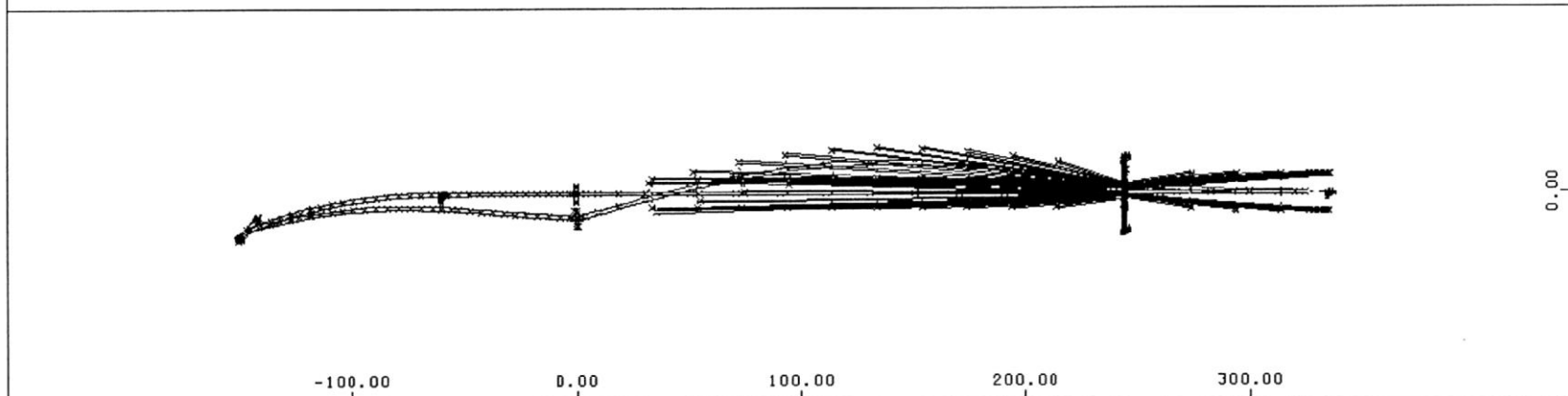
GRAF 5194 6.01. 0

Gradjevinski Fakultet * Kaciceva 26 * 41000 Zagreb



x
z

ELEMENT GROUP 0...12 29 30 255...1023
DEFORMED STRUCTURE FROM LOADCASE 4 ENLARGED BY 900.0 FREQUENCY 0.59 HZ



x
y

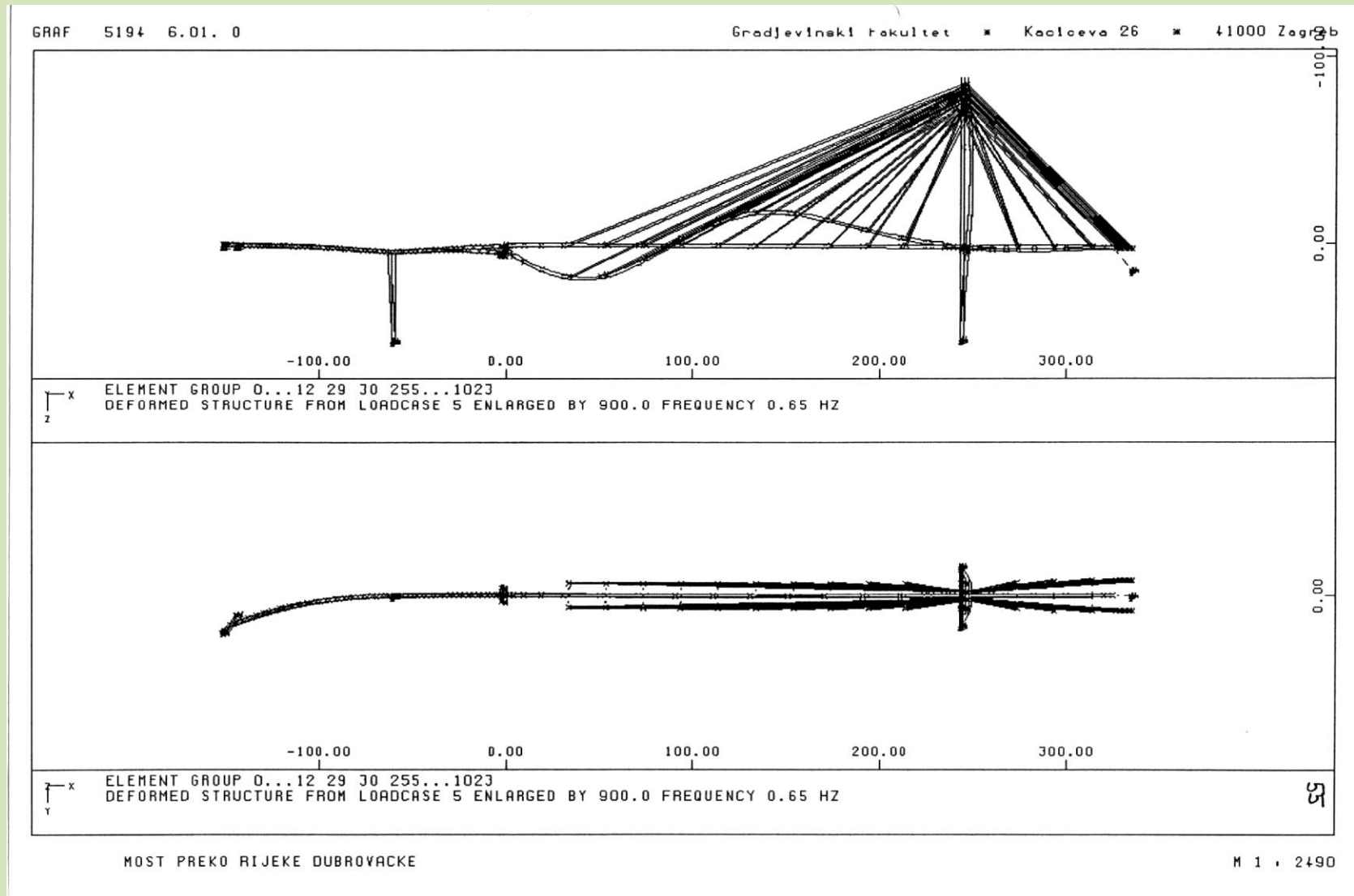
ELEMENT GROUP 0...12 29 30 255...1023
DEFORMED STRUCTURE FROM LOADCASE 4 ENLARGED BY 900.0 FREQUENCY 0.59 HZ

MOST PREKO RIJEKE DUBROVACKE

M 1 : 2490

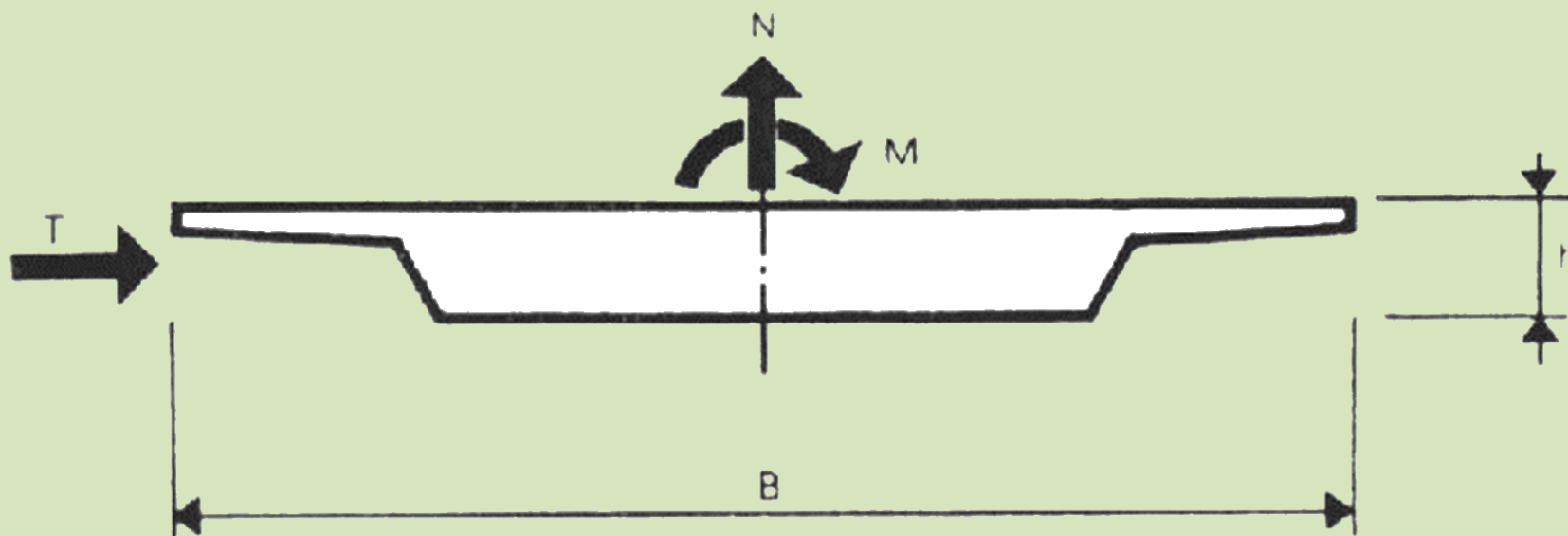


most *Franja Tuđmana* - peti ton

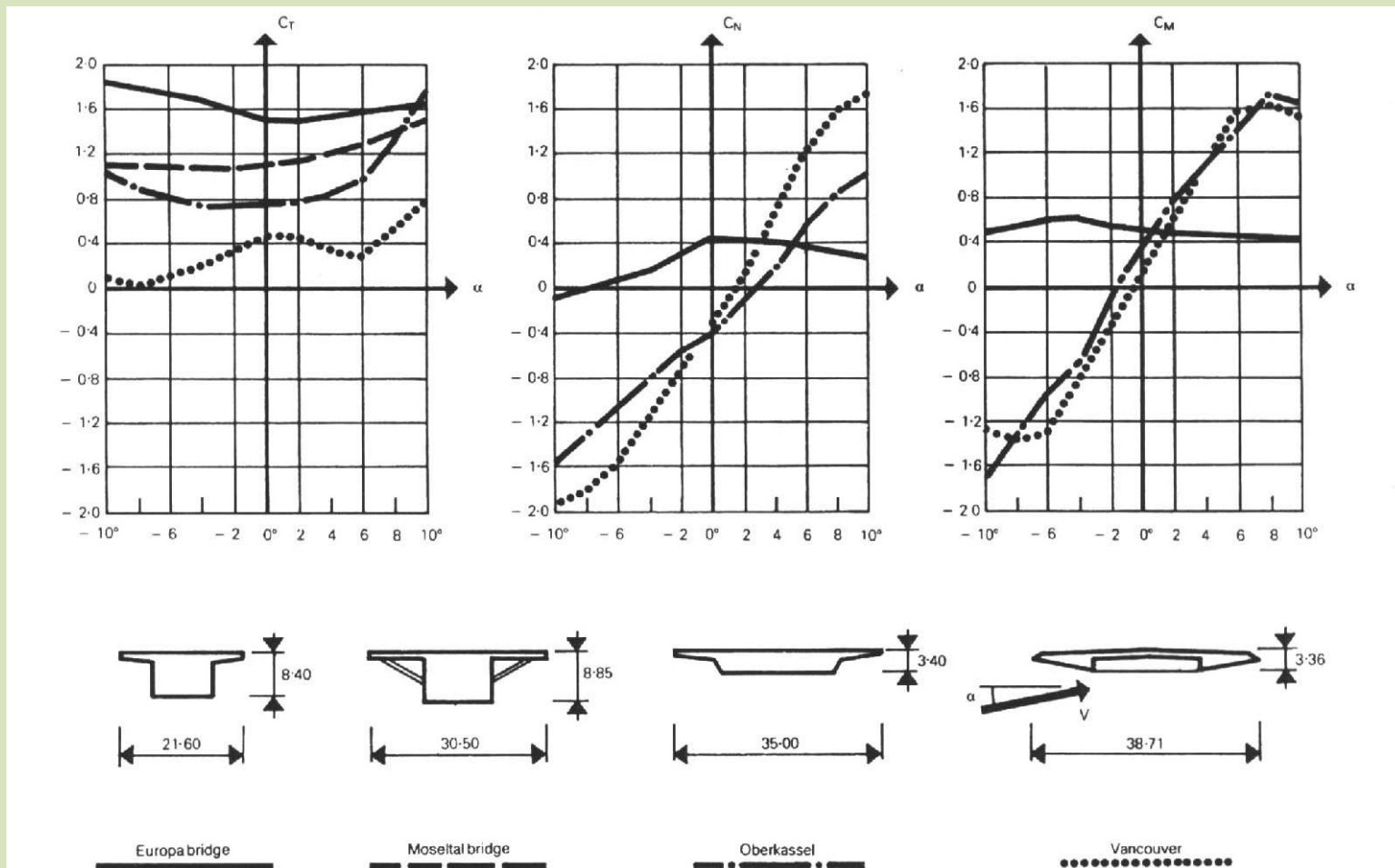


Kod ovješnih mostova glavni raspon je obično vrlo velik, ovisno o položaju mosta on može biti izložen većem ili manjem djelovanju vjetra poprečno na most.

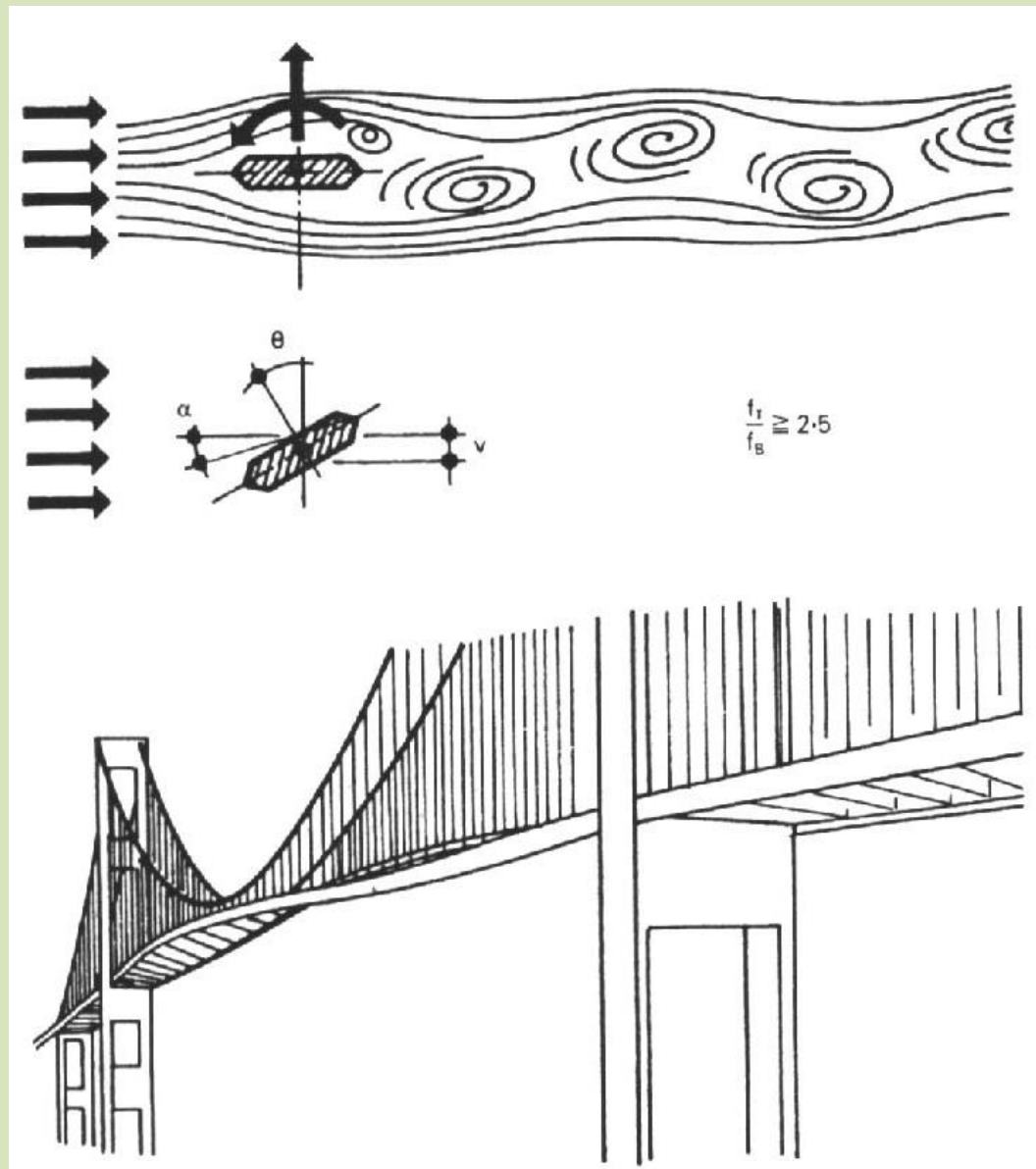
- horizontalno opterećenje T
- vertikalno opterećenje N
- moment torzije M



Oblik poprečnog presjeka definira koeficijente oblika popr. presjeka C_T , C_N , C_M potrebne za proračun djelovanja vjetra. Oni također ovise o kutu napada vjetra na konstrukciju α .



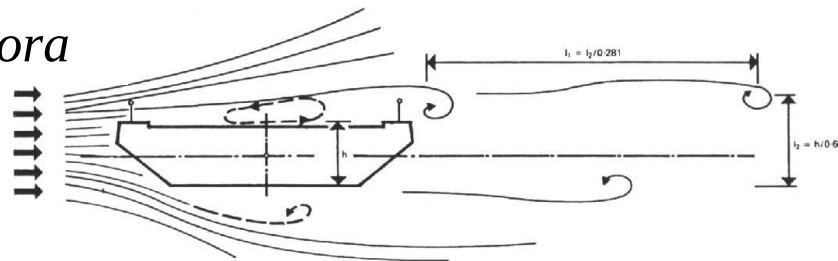
- Strujanje zraka uzrokuje savijajuće i torzijske oscilacije konstrukcije
- Male promjene kuta djelovanja vjetra mogu uzrokovati odižuće djelovanje.
- Ova pojava poznata kao “flutter” uzrokovala je rušenje mosta Tacoma 1940 godine



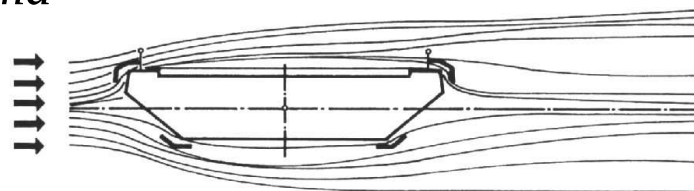


- Nakon ove katastrofe uslijedila su ispitivanja koja su pokazala da “flutter” nastaje kada su savijajuća i torzijska vlastita frekvencija preniske, kada su preblizu jedna drugoj po vrijednosti ili kada se podudare oba ova slučaja.
- Mathivat smatra da zadovoljavajući omjer te dvije frekvencije iznosi 2.5
- "Flutter" može biti uzrokovan i odvajanjem vrtloga na rubovima poprečnog presjeka što je posljedica neadekvatnog oblikovanja poprečnog presjeka.

djelovanje vjetra na gredu bez deflektora

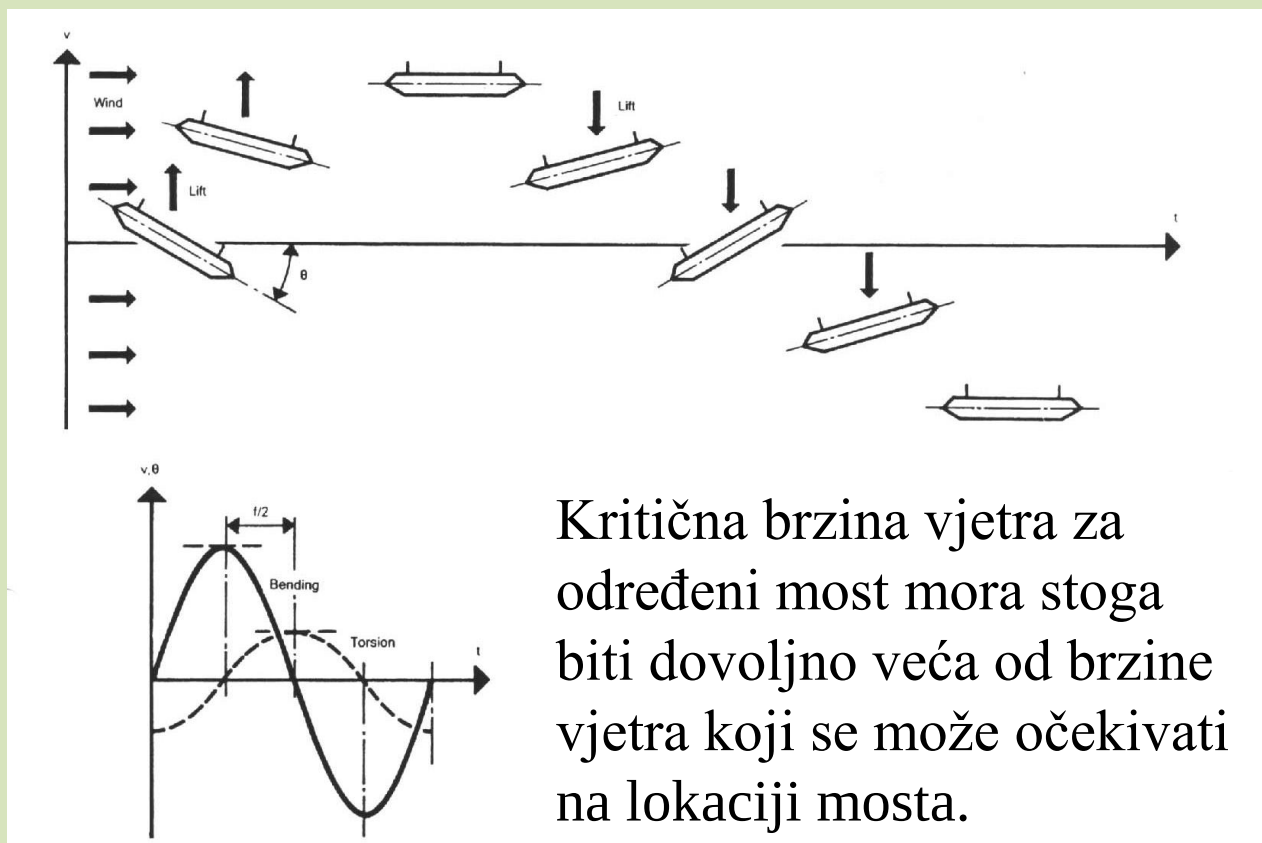


djelovanje vjetra na gredu sa deflektorima





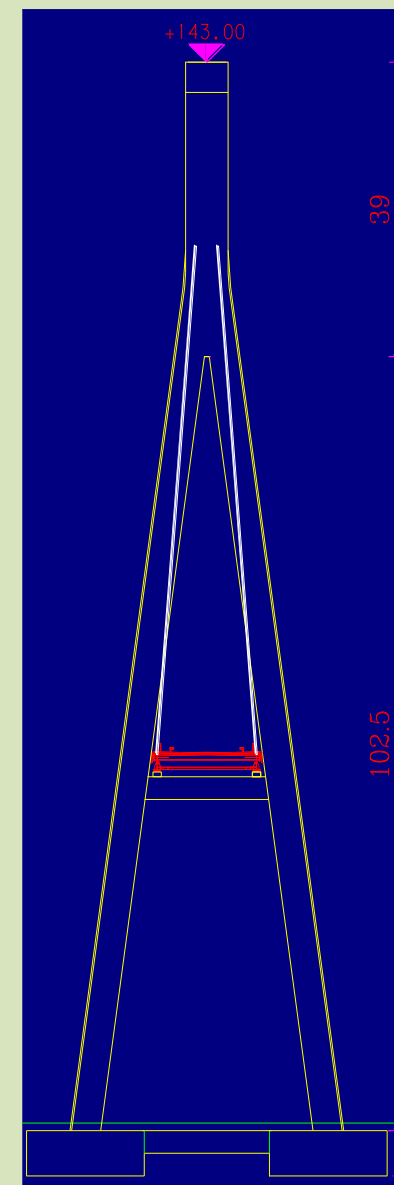
Iznad određene brzine vjetra – kritična brzina vjetra – greda počne primati veću energiju od one koju može disipirati prigušenjem. Rezultat je pojava savijajućih i torzijskih pomaka, uzrokovanih aerodinamičkim silama, sa rapidnim povećavanjem amplituda sve do kolapsa konstrukcije





Da bi se flutter izbjegao treba:

- Oblikovati aerodinamički i torzijski kruti poprečni presjek, pogotovo ako imamo jednu ravninu ovješnja ili dvije vertikalne paralelne ravnine ovješnja sa “H” pilonom,
- Ovješnje bi trebalo biti u dvije ravnine i to tako da su dvije ravnine zatega nagnute jedna prema drugoj sa “A” pilonom, time dobijemo prostorni sustav koji je torzijski krut pa krutost same grede ne mora biti velika.





- Također su bitni geometrijski odnosi širine rasponskog sklopa (B), visine rasponskog sklopa (D) i duljine glavnog raspona (L).

Prema dosadašnjim iskustvima možemo tako zaključiti da će betonski mostovi sa dvije ravnine ovješnja biti sigurni od pojave flutter-a ako su zadovoljeni sljedeći odnosi:

$$B \geq 10D \quad \text{ili} \quad B \geq L/30$$

- Čelični mostovi sa rasponom većim od 400m su mnogo osjetljiviji na oscilacije, pa bi uz ovješnje na “A” pilon trebao biti zadovoljen odnos:

$$B \geq L/25$$



6. Izvedba

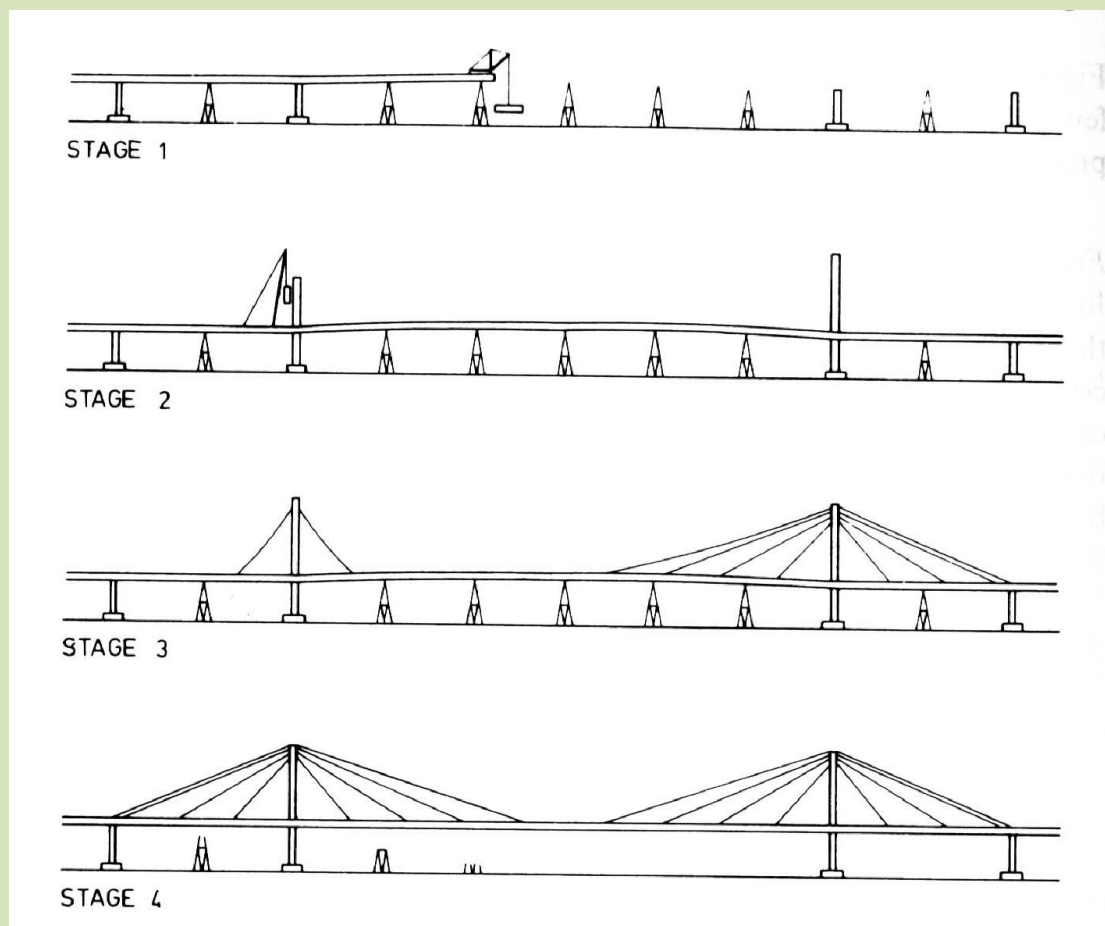


- Izvedba mosta s kosim zategama je čimbenik koji djeluje na koncepciju i projektiranje. Stoga će izbor konstrukcijskog sustava i materijala, kao i izvedba detalja konstrukcije biti u uskoj vezi s načinom izvedbe.
- Kod mosta s kosim zategama nosivost pojedinačne zatege ovisi o prijenosu horizontalne komponente sile iz zatege u gredu, a ona se ne može aktivirati ako prethodno nije ugrađen dio grede u koji se kosa zatega sidri.



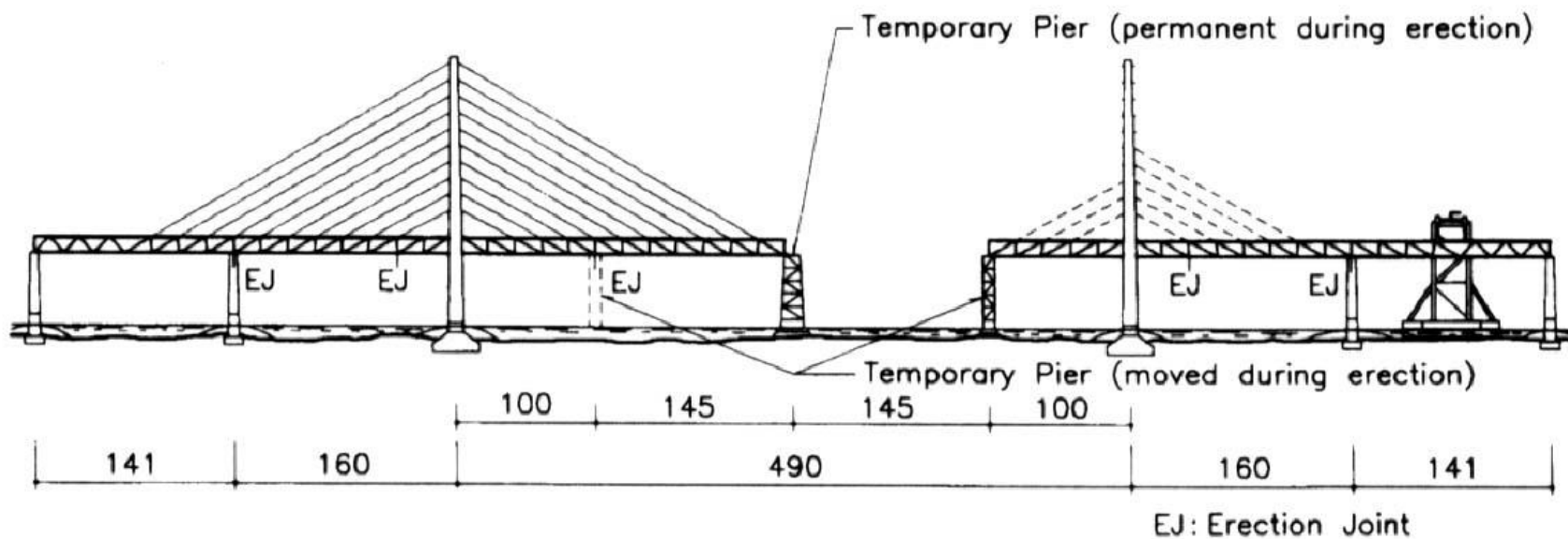
6.2. Gradnja na privremenim osloncima

- Jedan od načina izvedbe mosta sa kosim zategama je izvedba grede na skeli, na privremenim osloncima, a potom dodavanje i pritezanje zatega. Redoslijed izvedbe slijedi u četiri osnovne faze

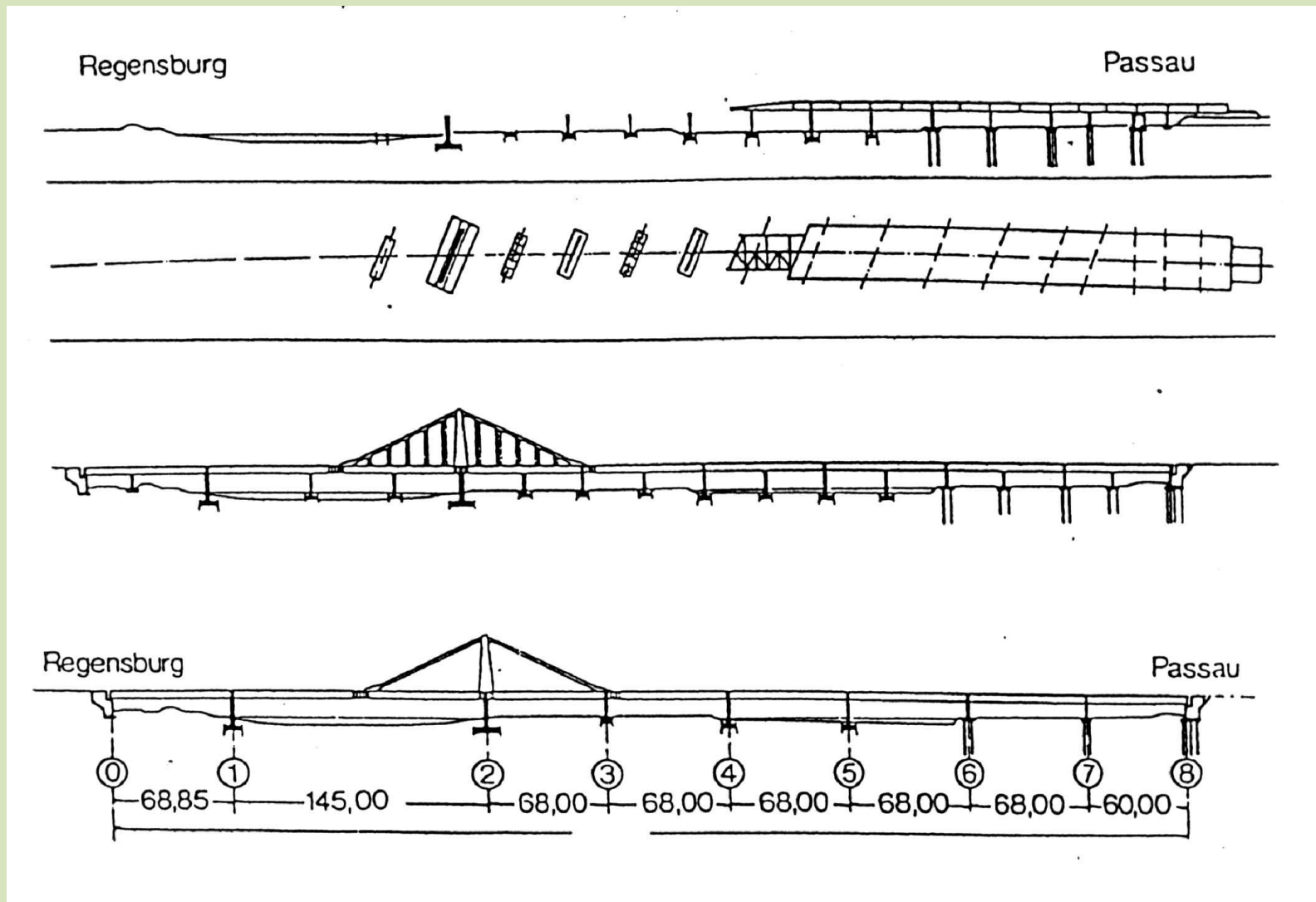




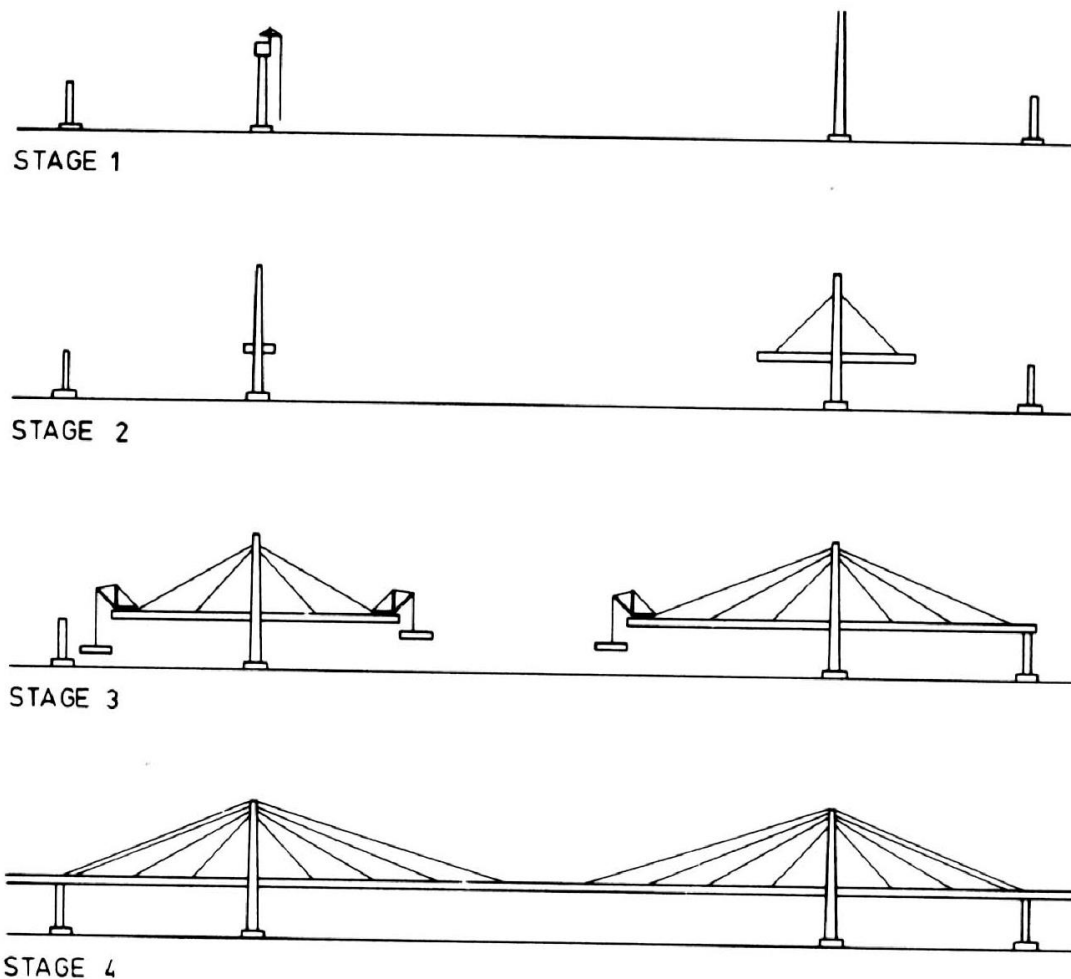
most ØRESUND



6.3. Postupno uzdužno potiskivanje

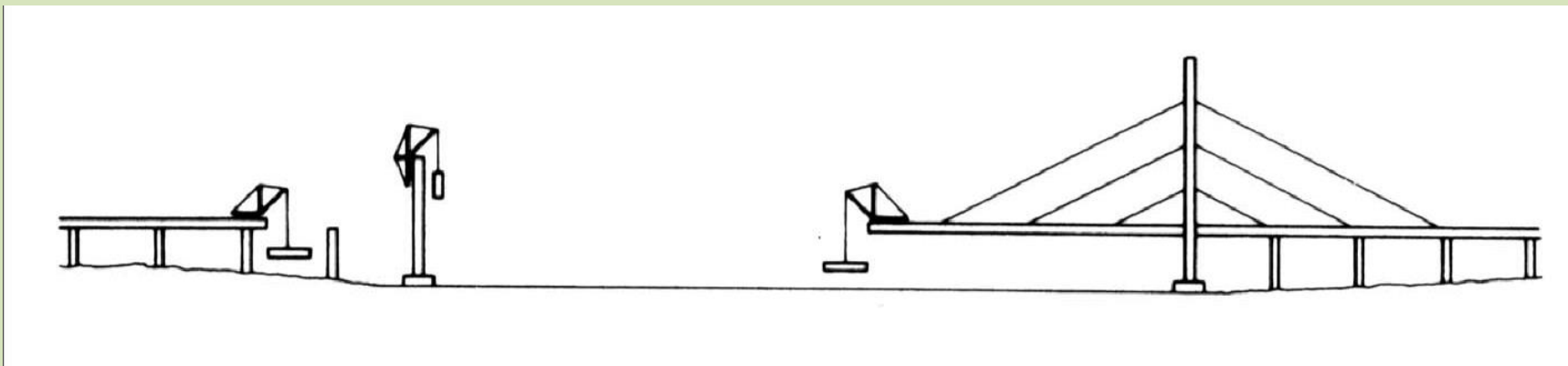


6.4. Slobodna konzolna gradnja





- privremeni oslonci u bočnim otvorima





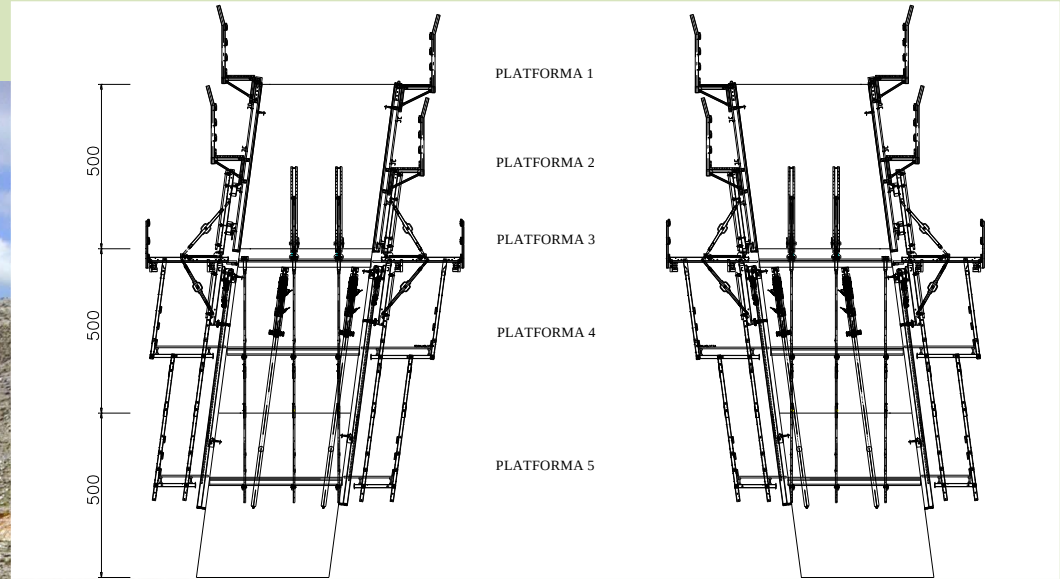












- podizna oplata



Pregled značajnijih izvedenih mostova sa kosim zategama



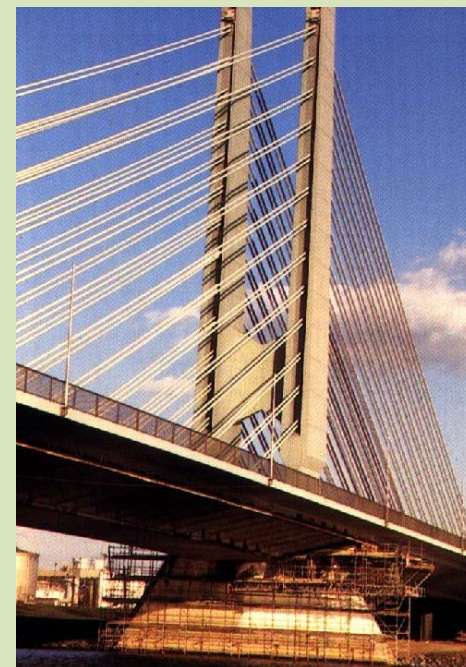
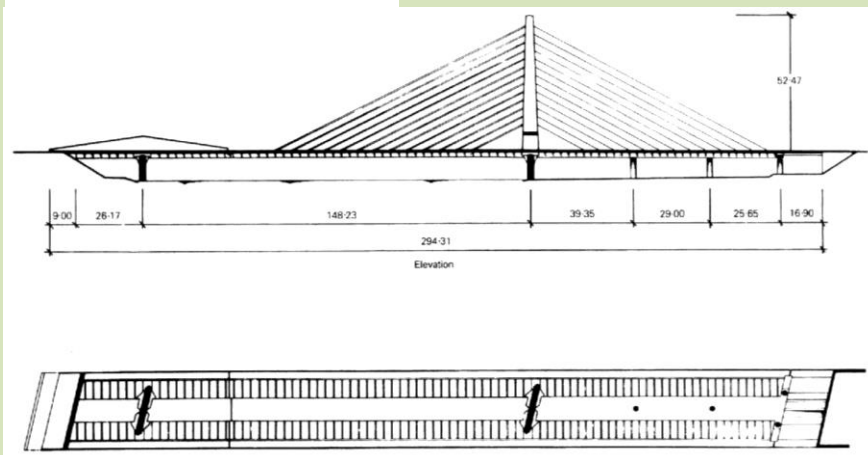
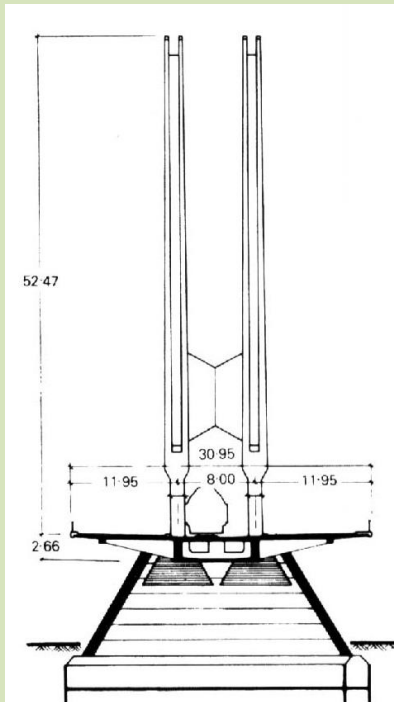
Rekordni rasponi ovješnih mostova

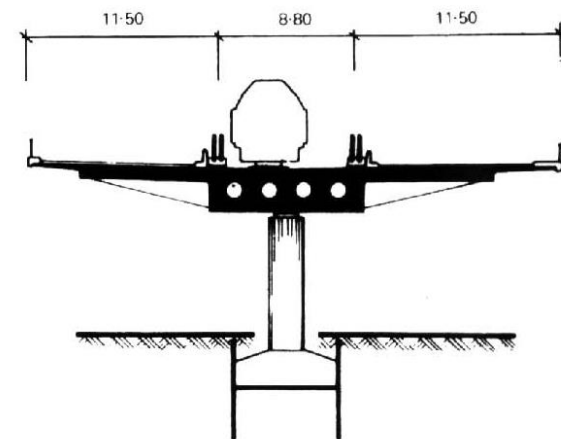
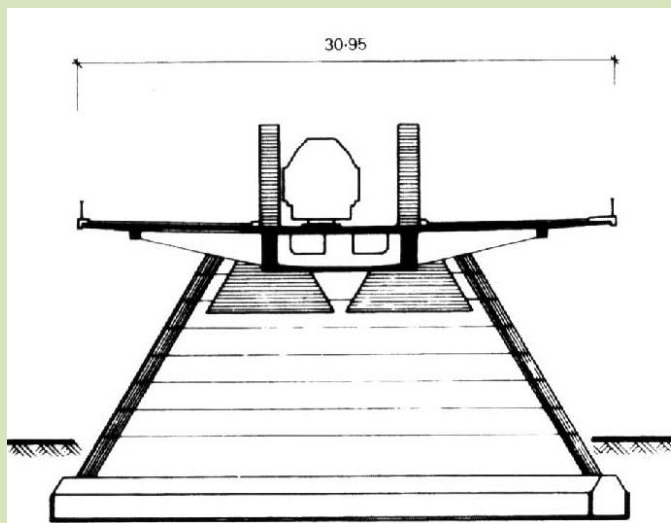
Redni broj	Godina izgradnje	Naziv mosta	Država	Lokacija	Raspon (m)
1.	2012.	Rusky	Rusija	Vladivostok	1104
2.	2008.	Sutong	Kina	Suzhou-Nantong	1088
3.	2008.	Stonecutters	Kina	Hong Kong	1018
4.	2010.	Edong	Kina	Huangshi	926
5.	1999.	Tatara	Japan	Onomichi-Imabari	890
6.	1995.	Pont de Normandie	Francuska	Le Havre	856
8.	2010.	Jingyue	Kina	Jingzhou	816
9.	2009.	Incheon	Koreja	Incheon	800
12.	2009.	Shanghai Yangtze	Kina	Shanghai	730
13.	2010.	Minpu	Kina	Shanghai	708

Većina izvedena u Kini i to u manje od posljednjih deset godina!

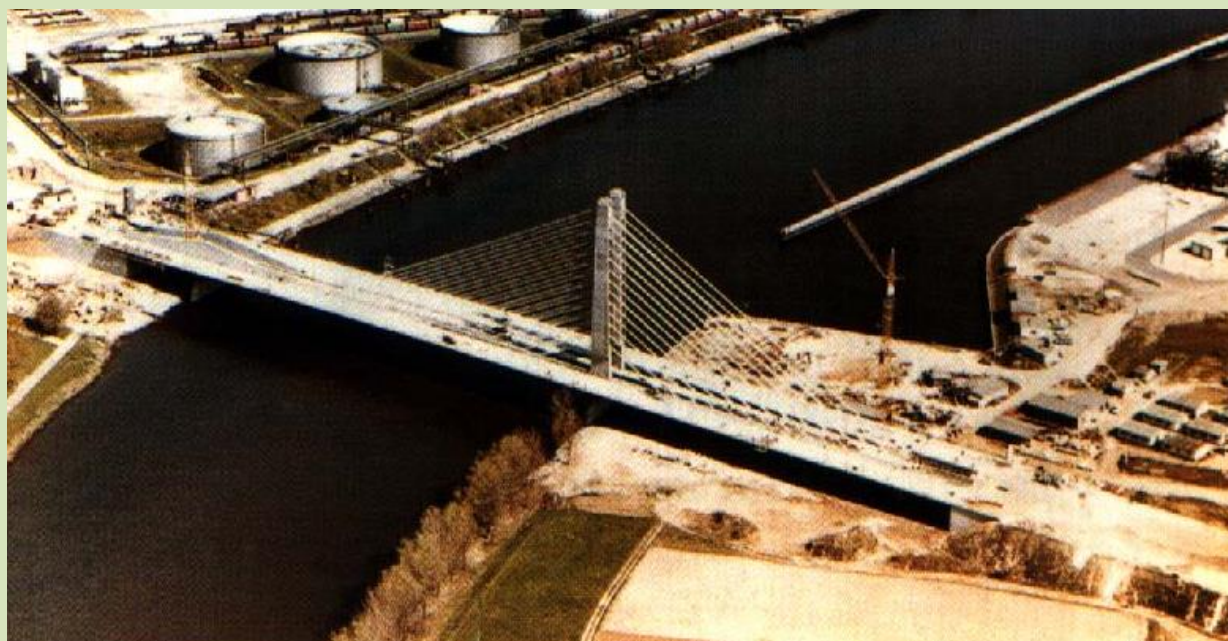


Höchst, 1972., Njemačka



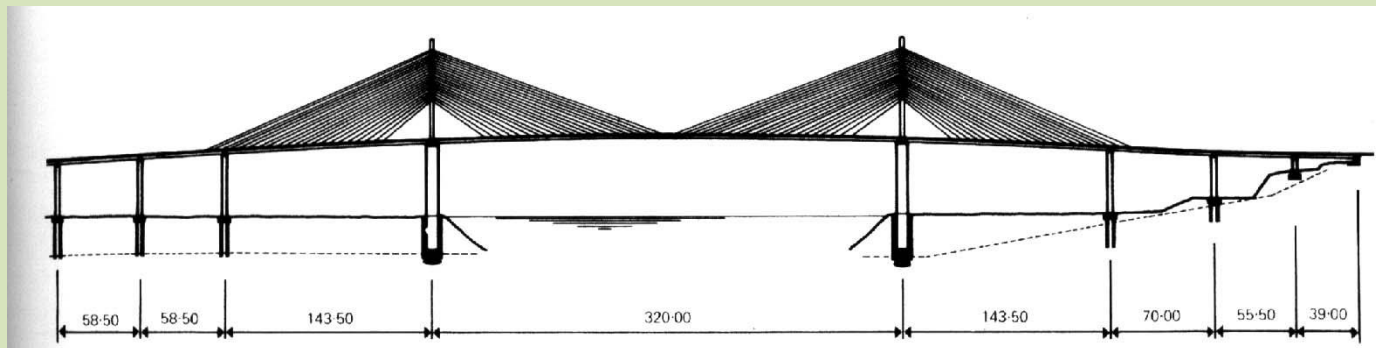


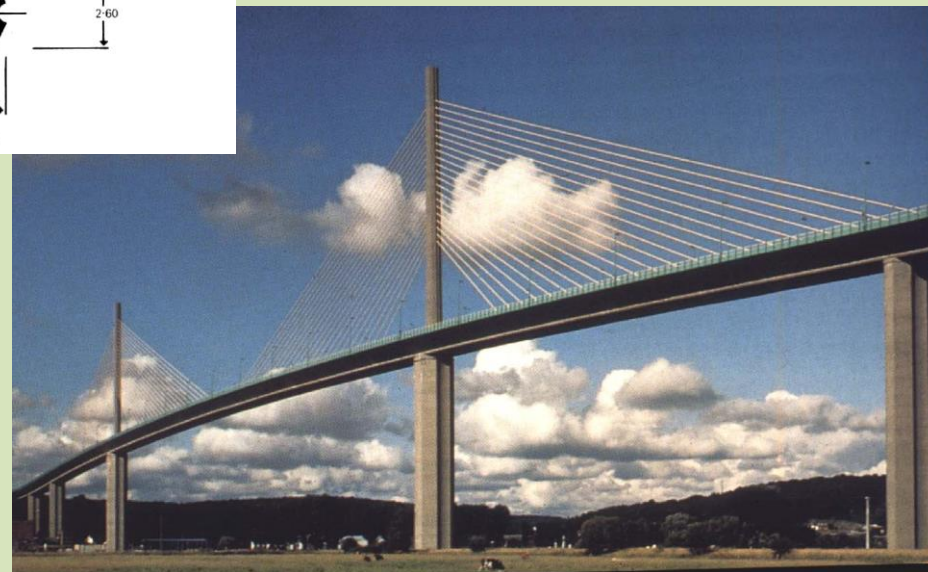
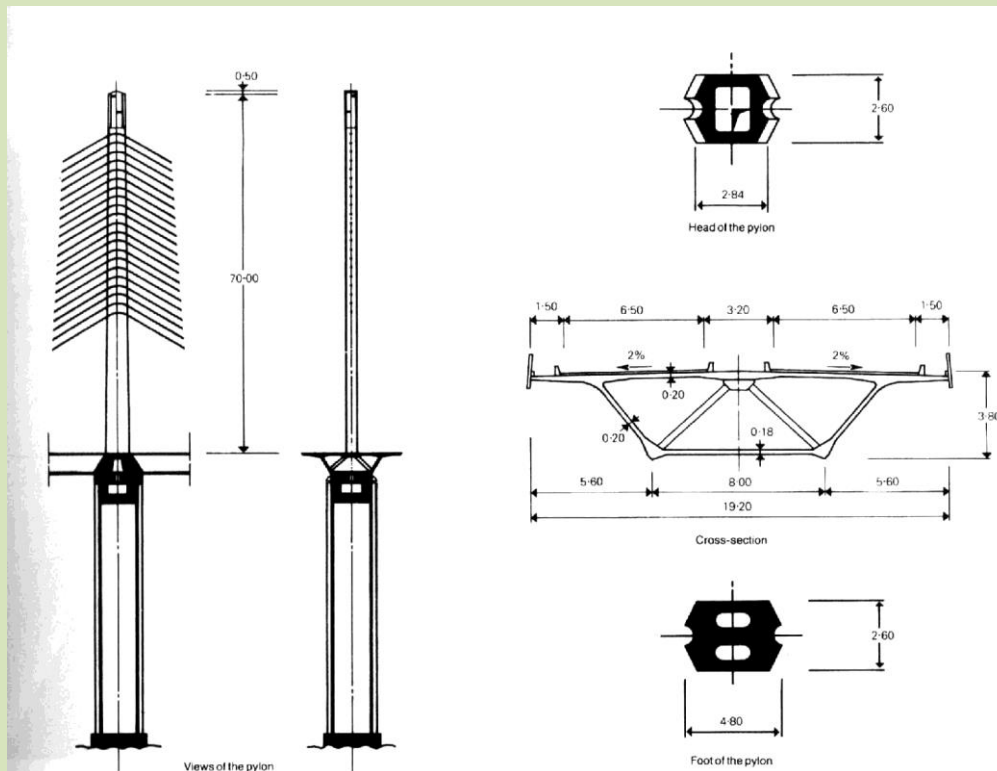
Cross-sections



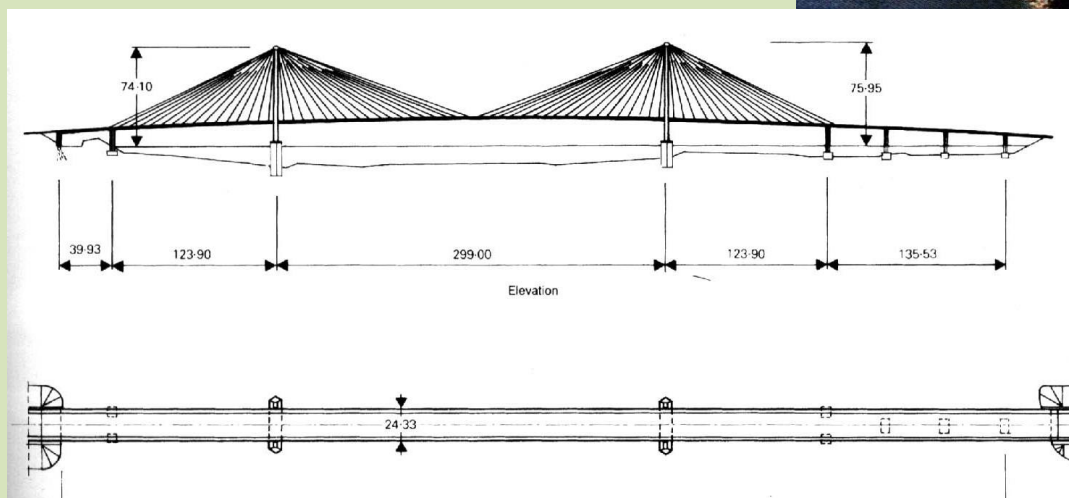
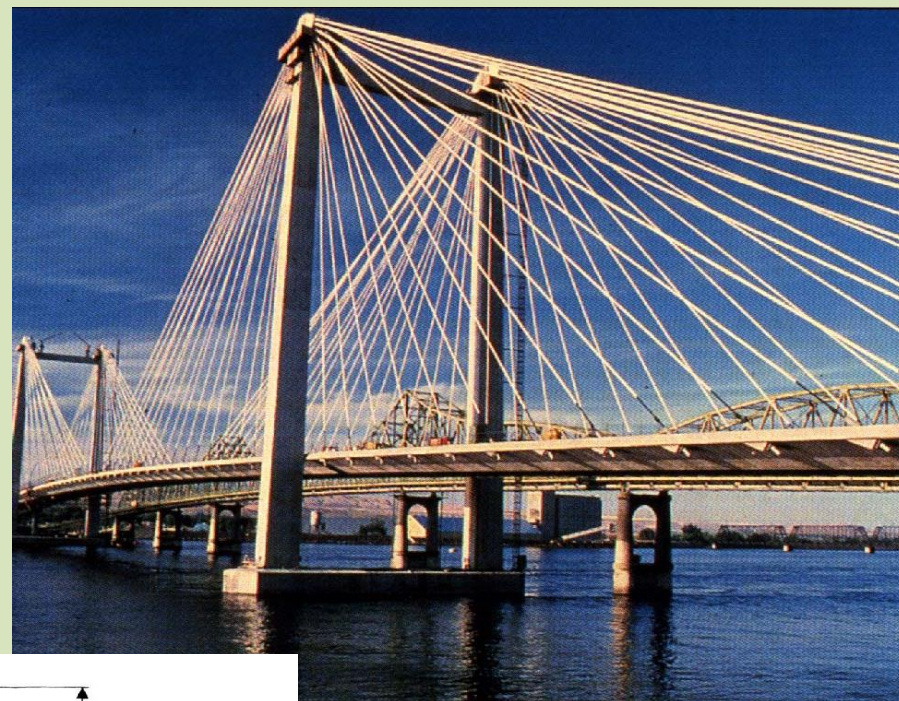


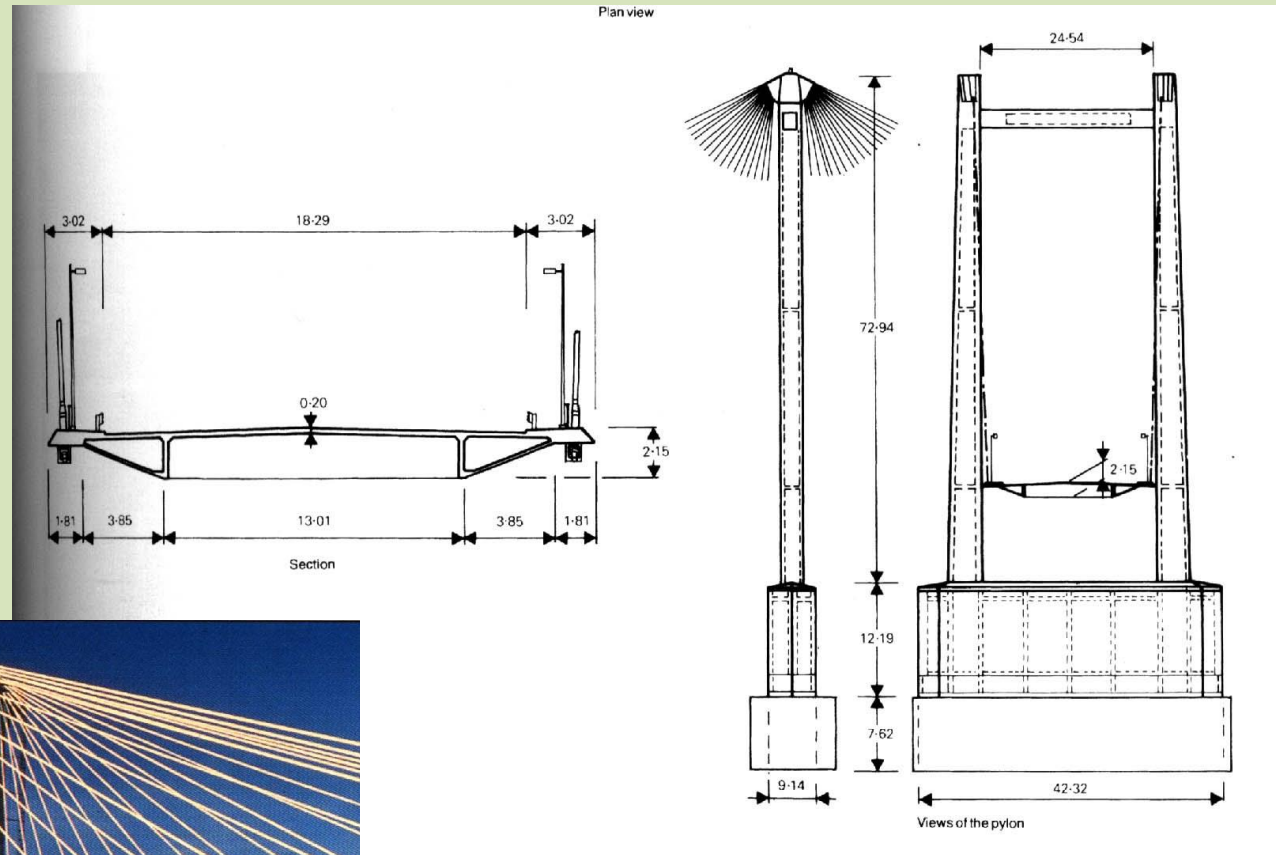
Brotonne, 1977., Francuska



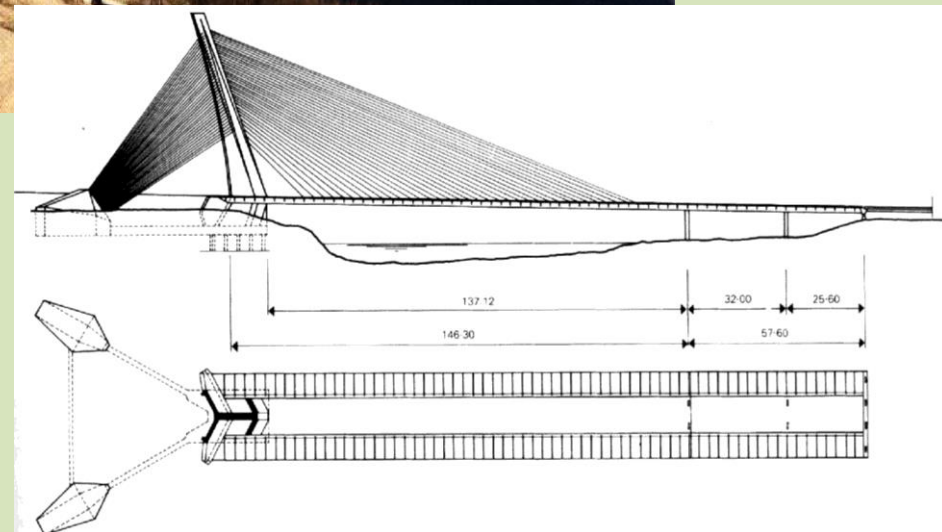
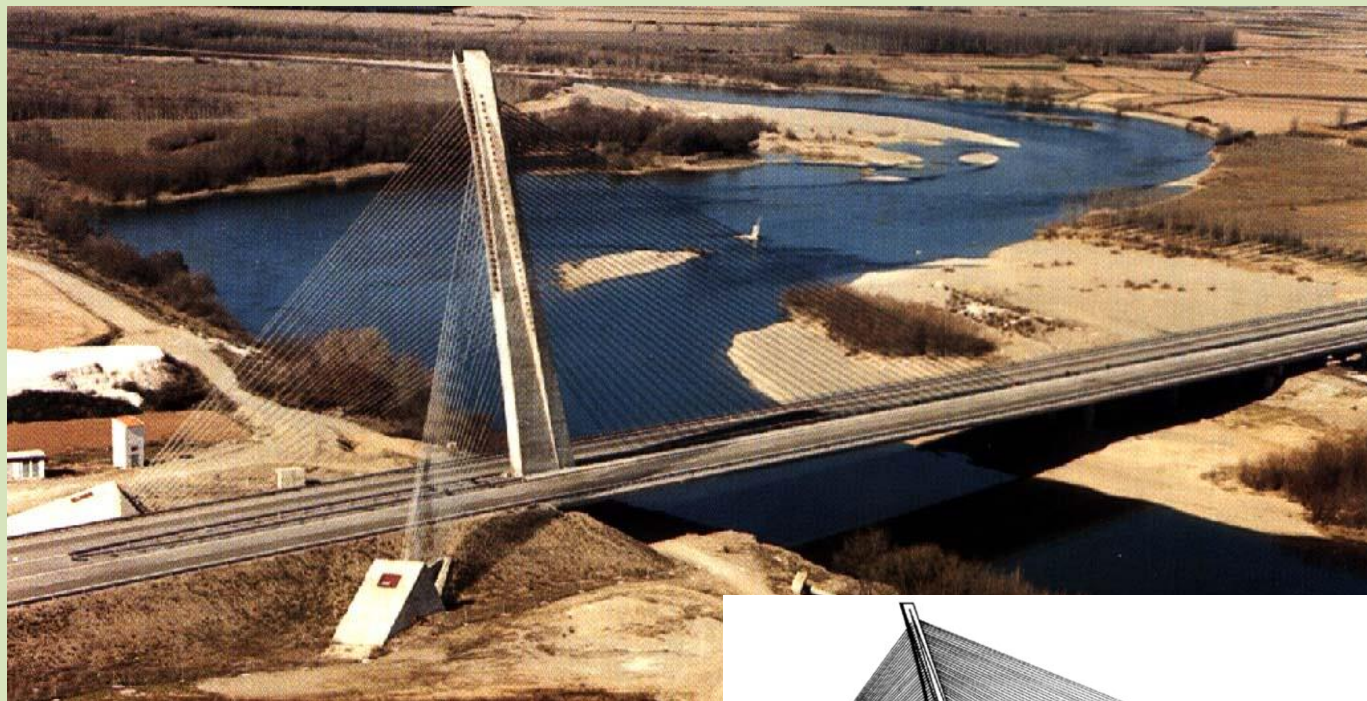


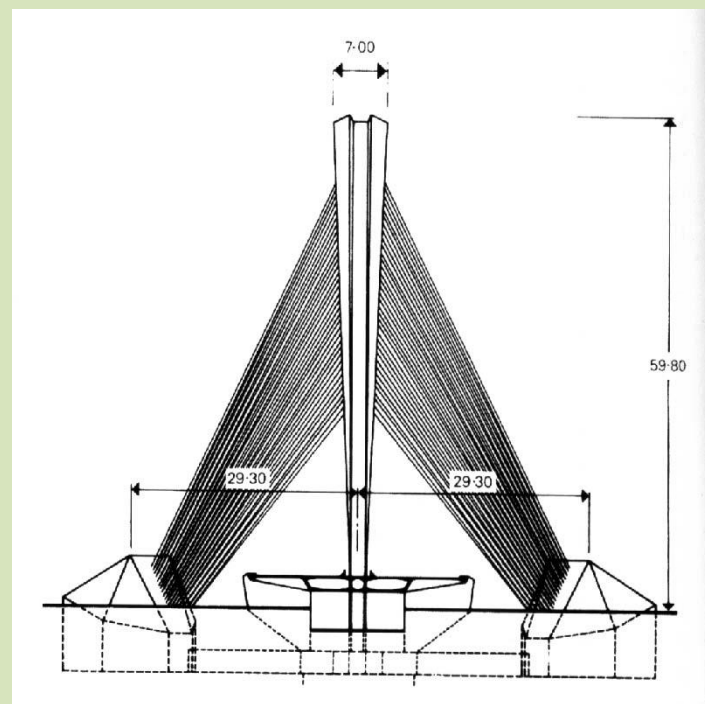
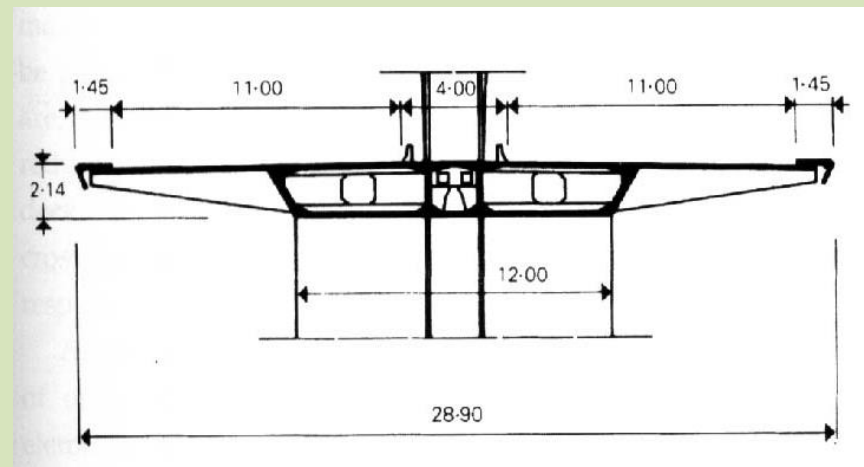
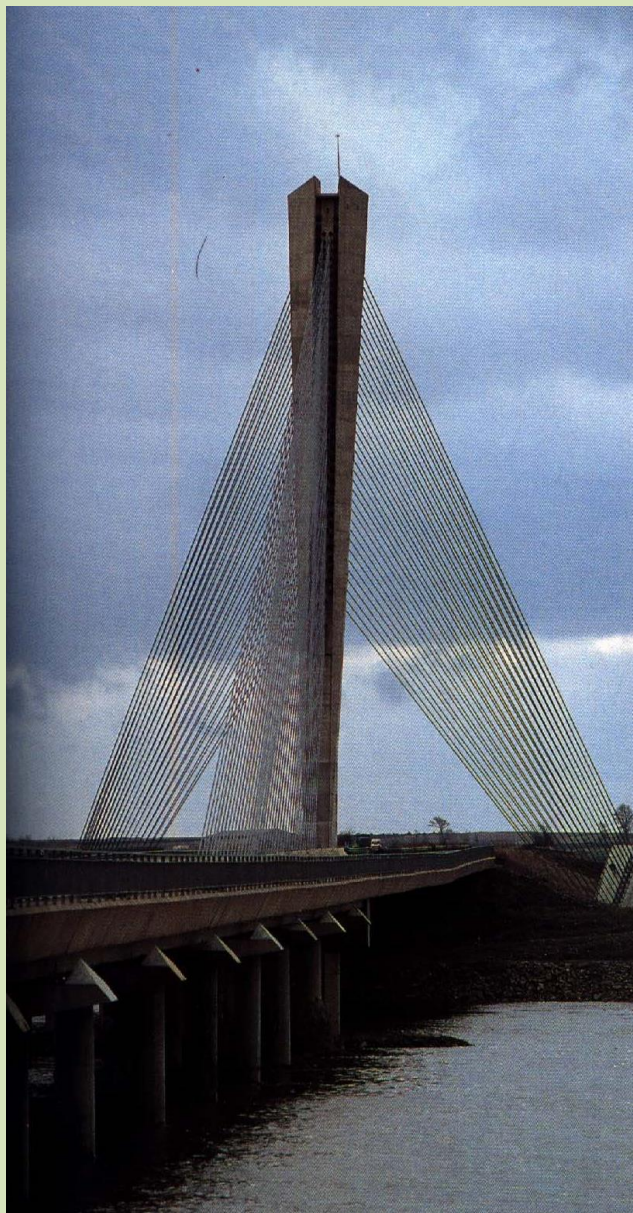
Pasco - Kennewick, 1978., USA



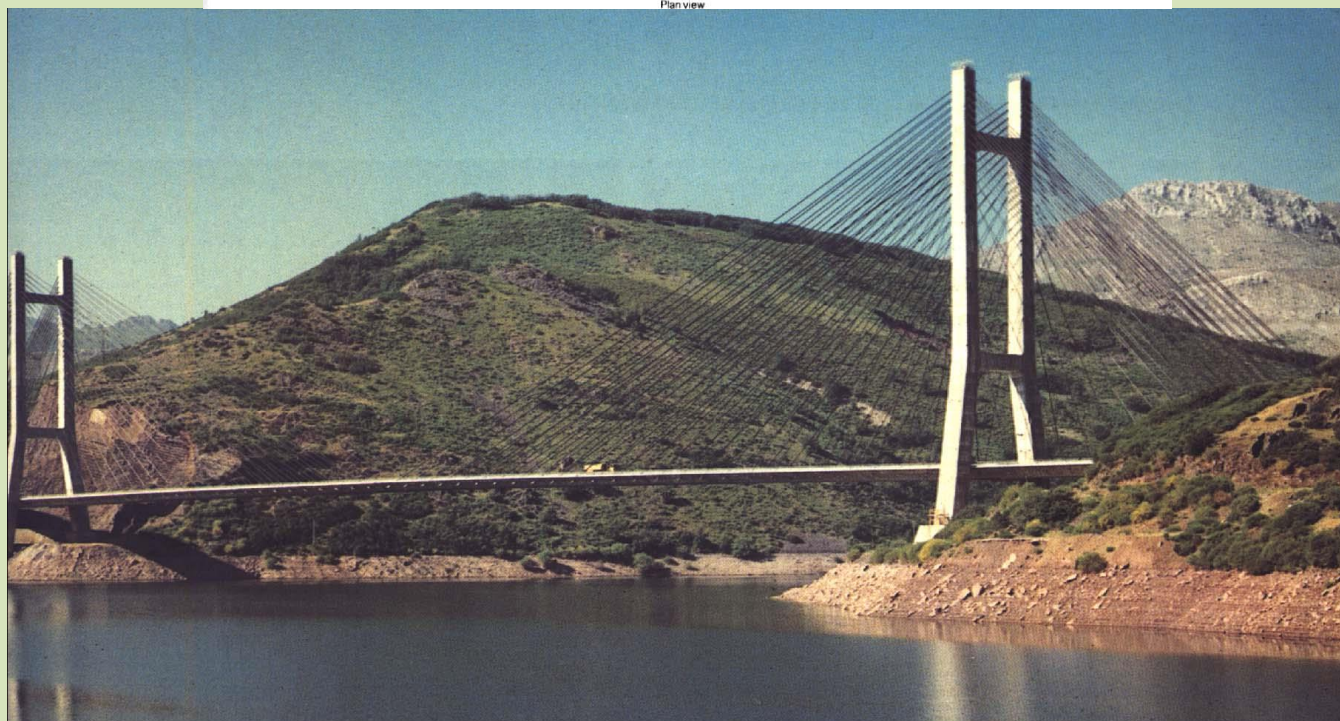
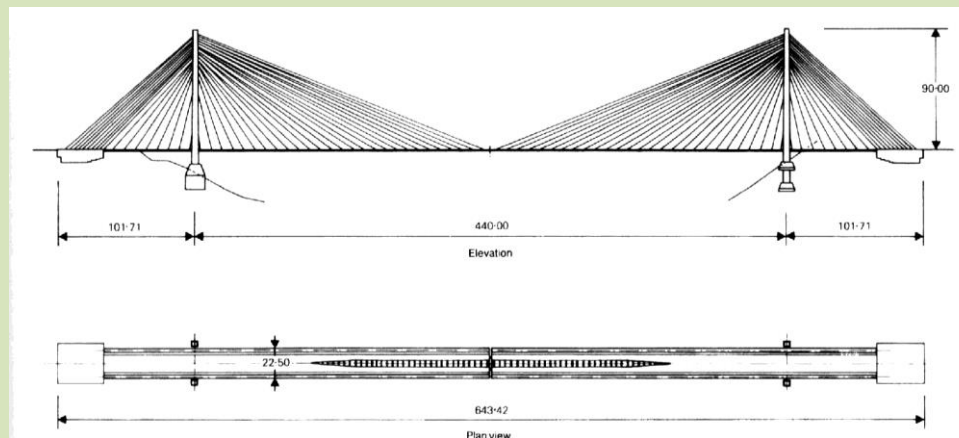


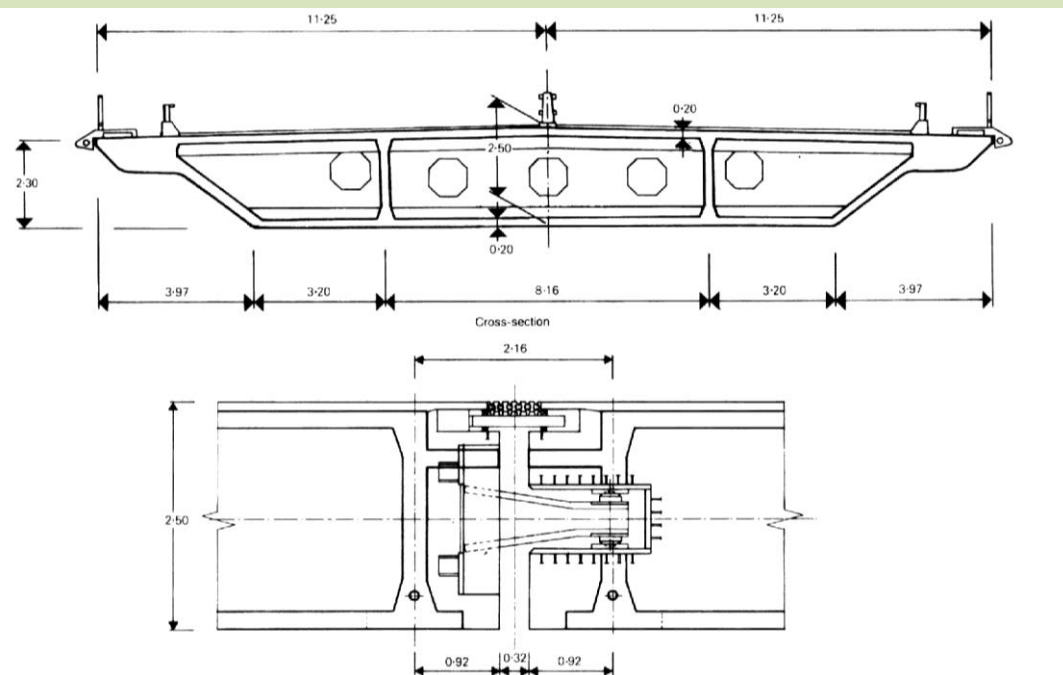
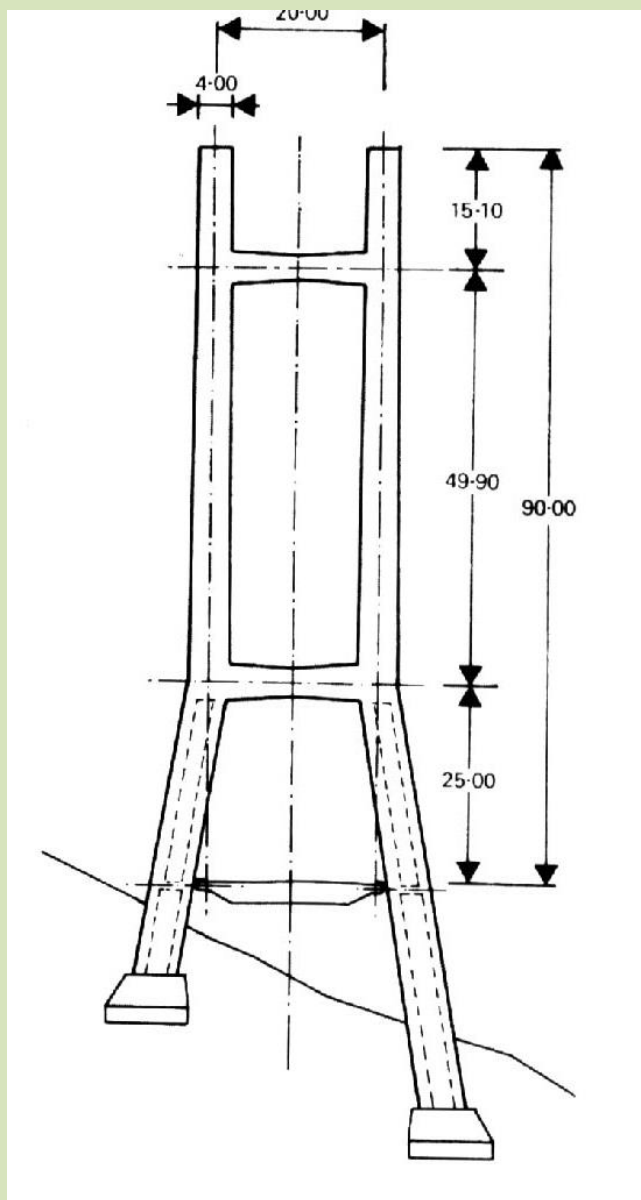
Sancho El Mayor, 1978., Španjolska



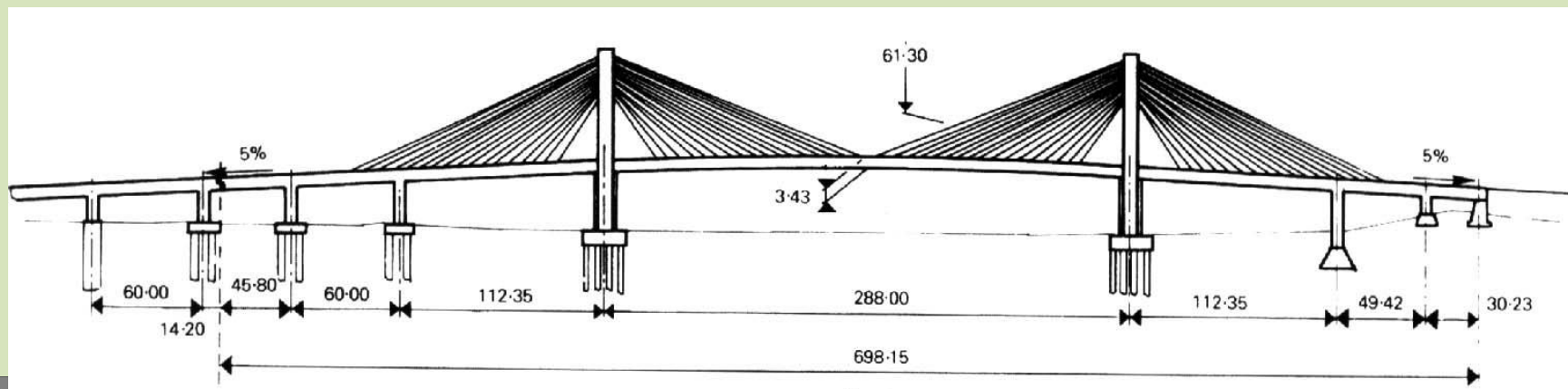
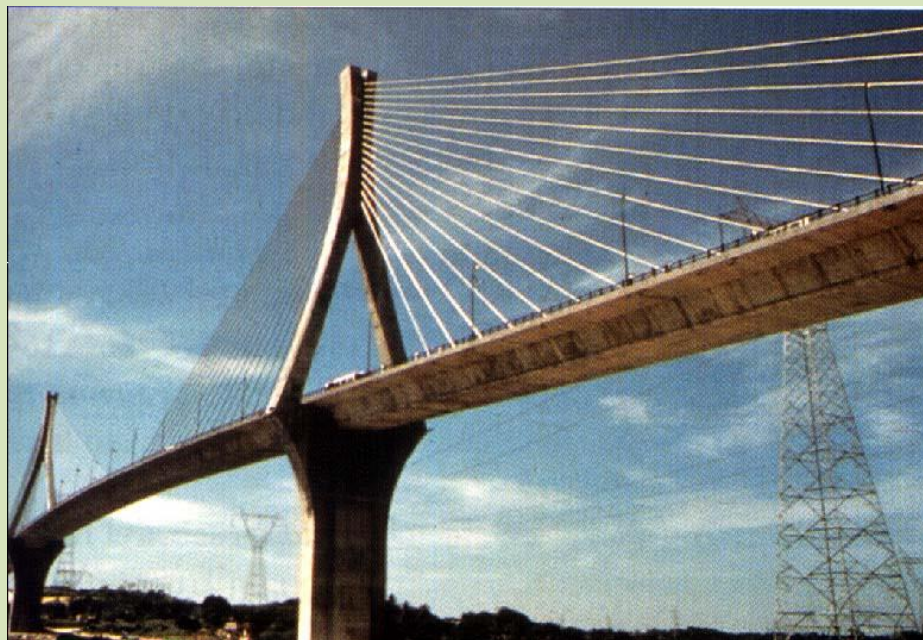


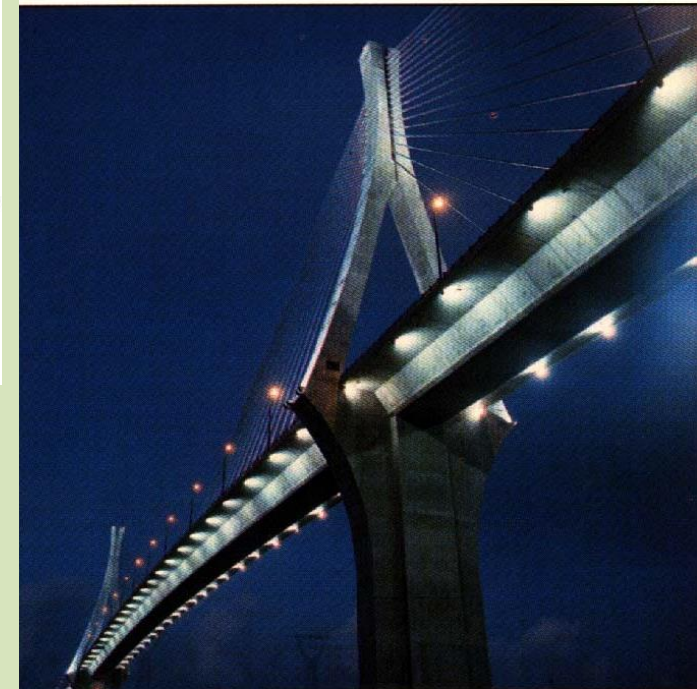
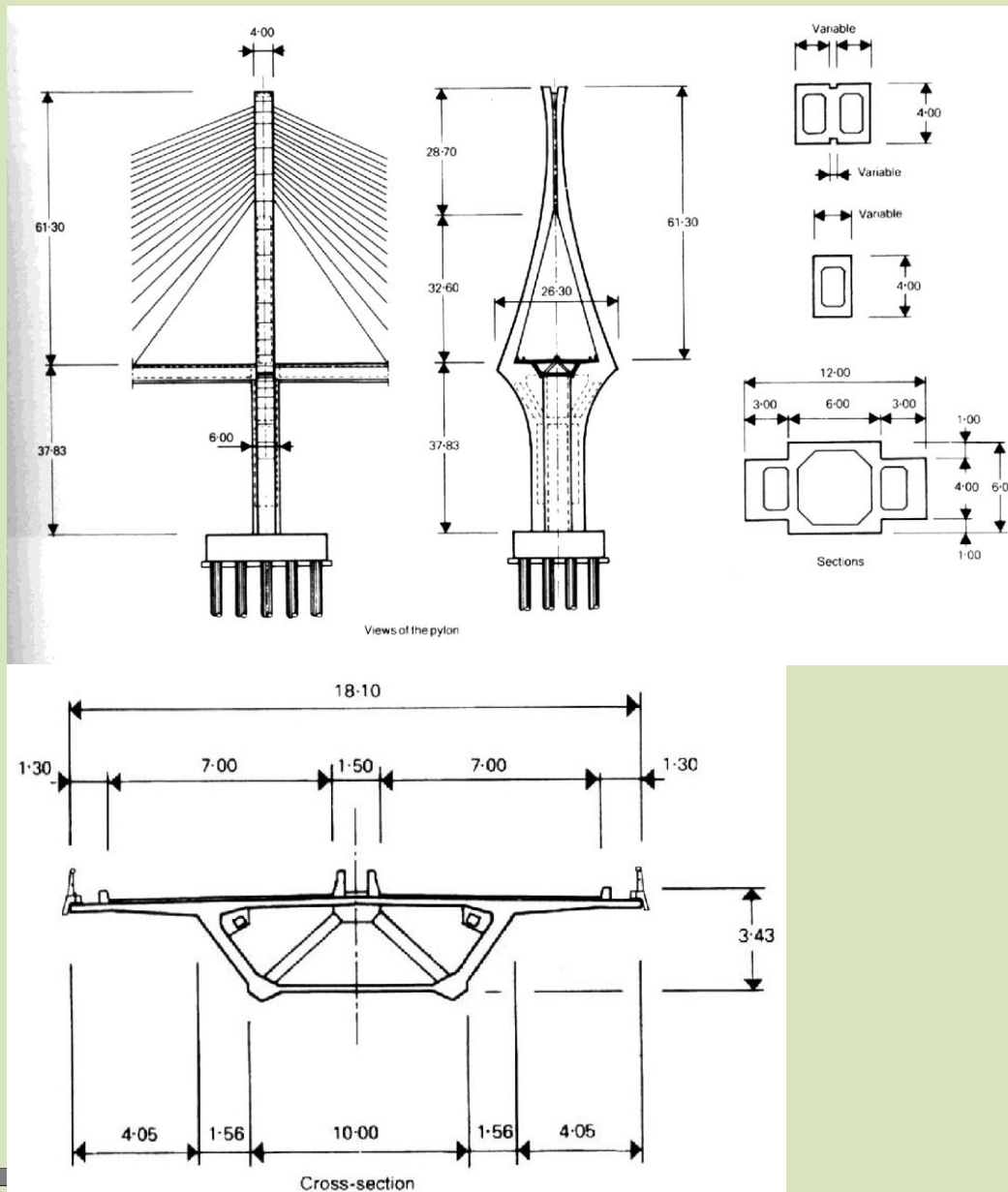
Barrios de Luna, 1984., Španjolska



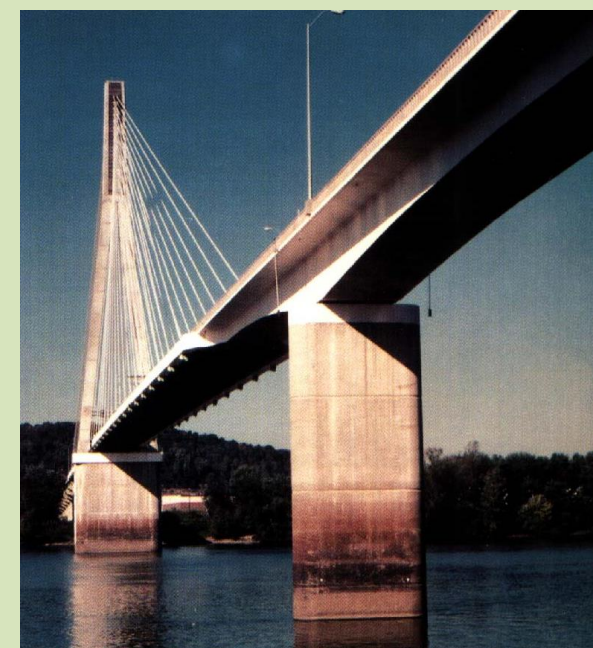
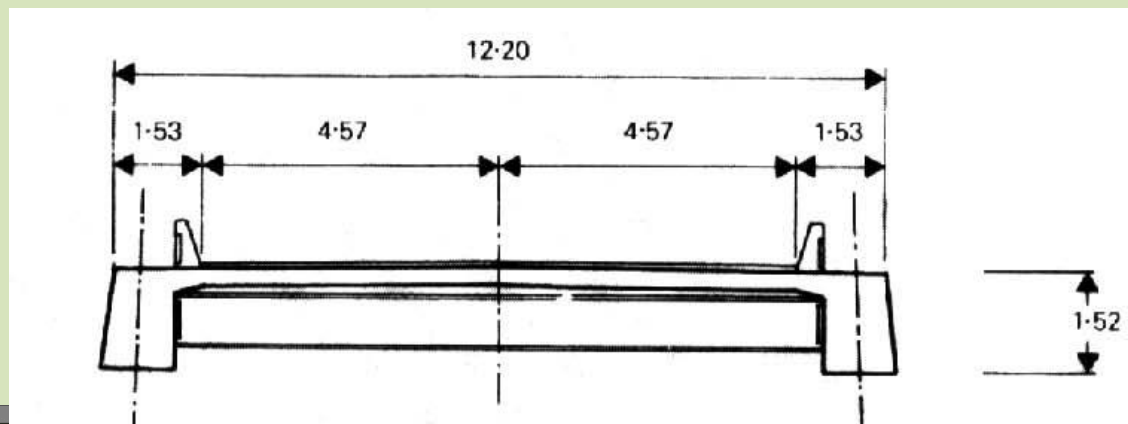
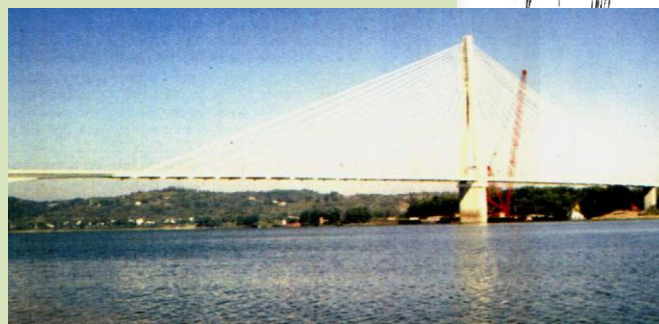
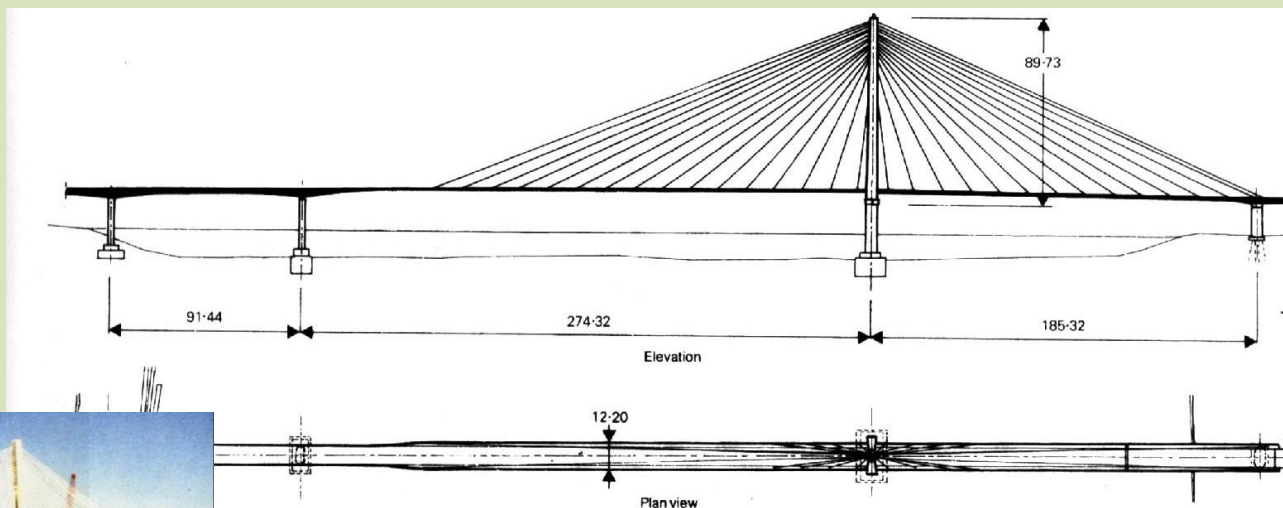


Coatzacoalcos, 1984., Meksiko

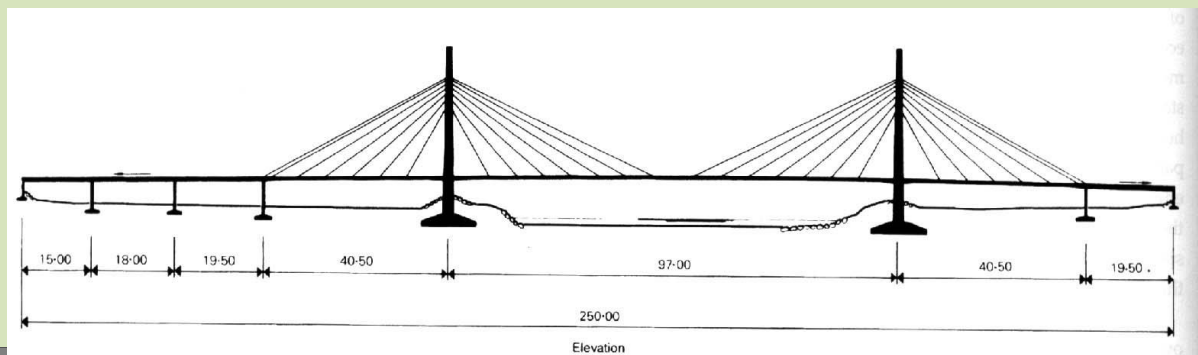
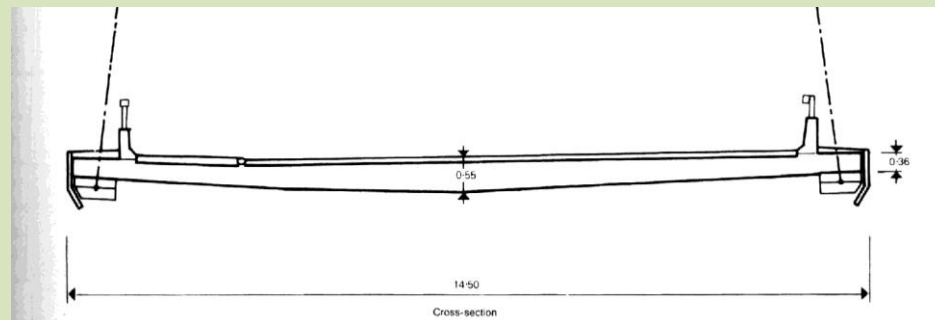




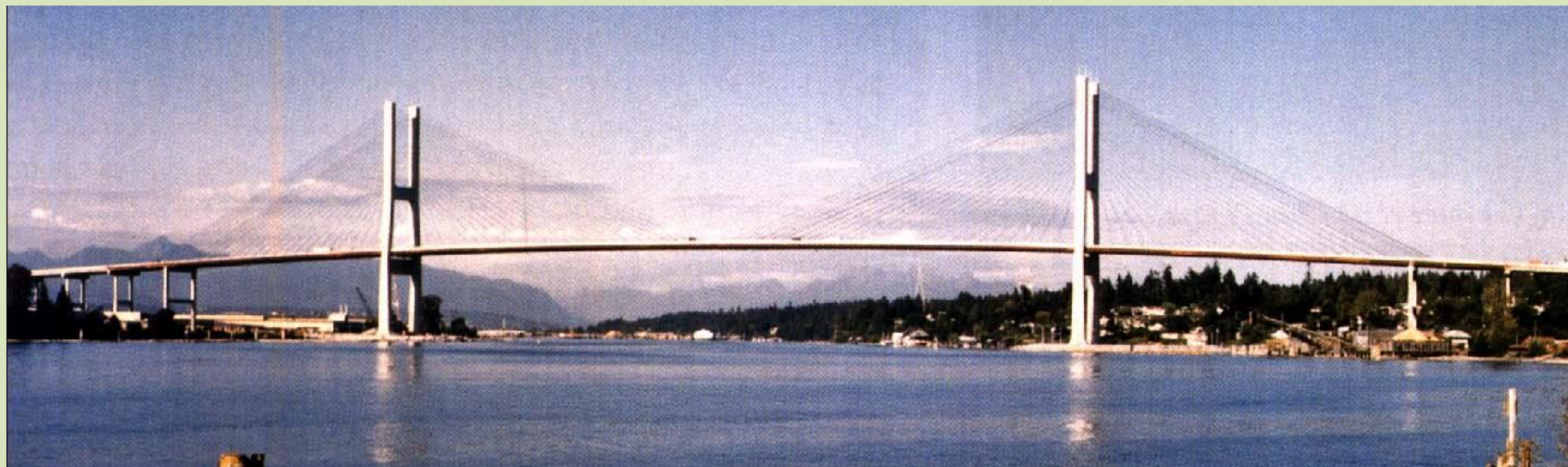
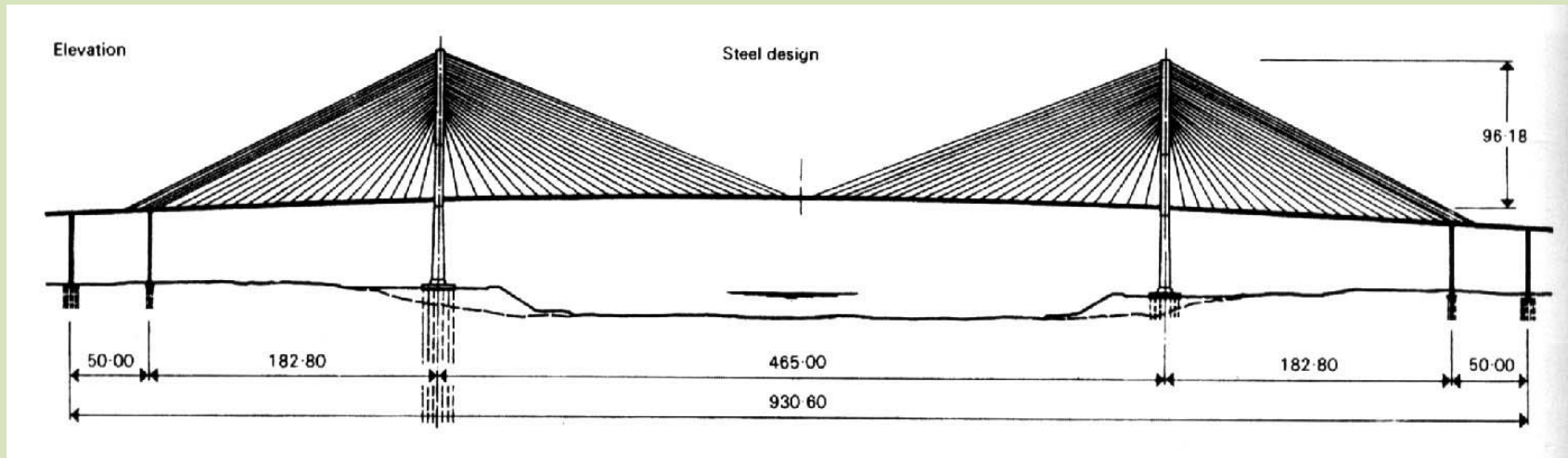
East Huntington, 1985., SAD

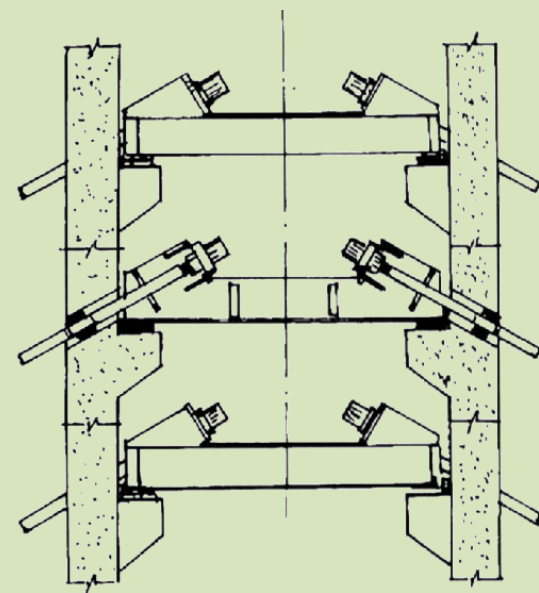
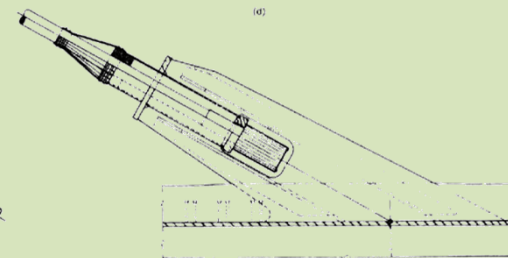
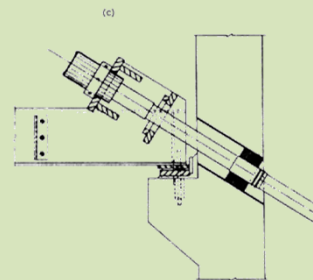
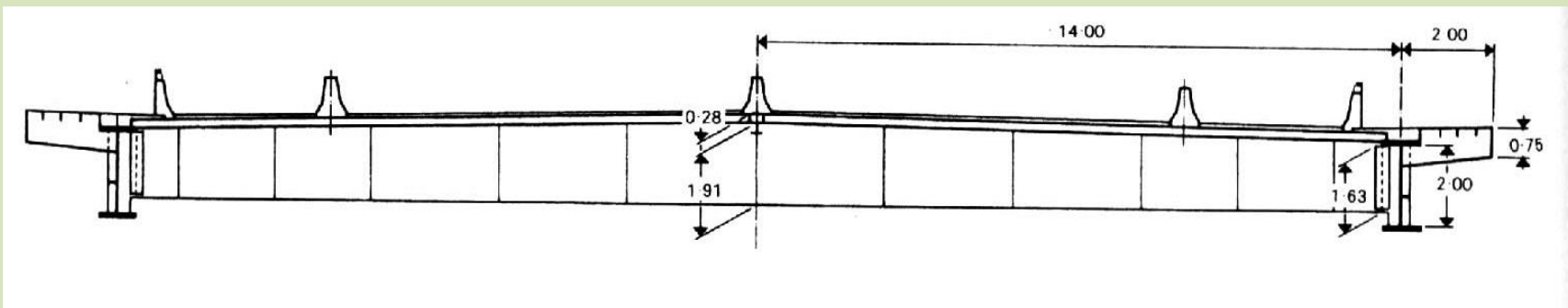


Diepoldsau, 1985., Švicarska



Annacis, 1986., Kanada

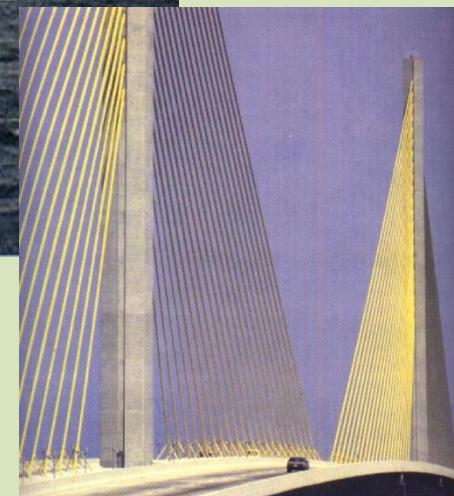
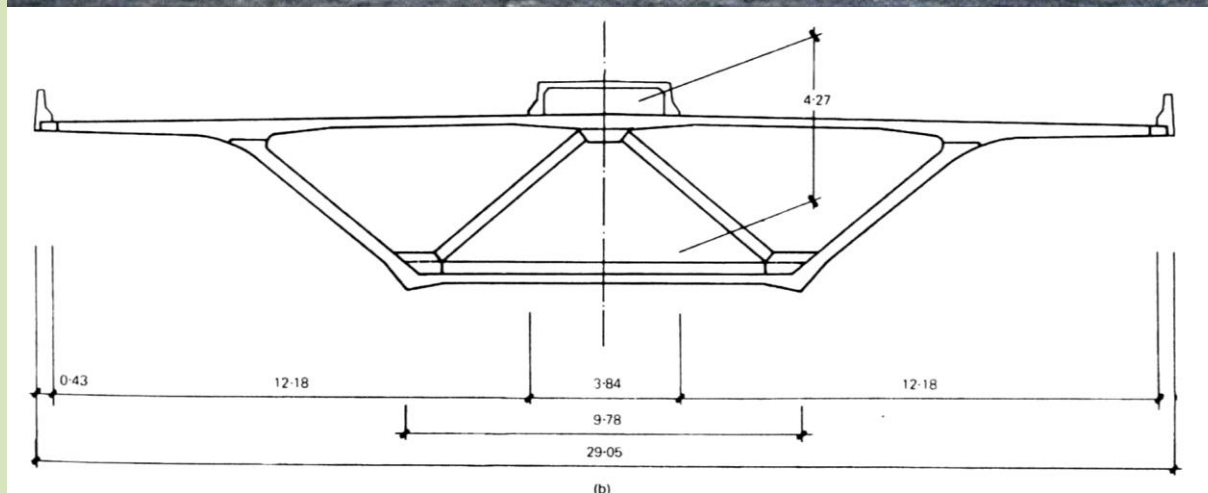




Sunshine Skyway, 1987., SAD



$L=360$ m





Tampico, 1988., Meksiko

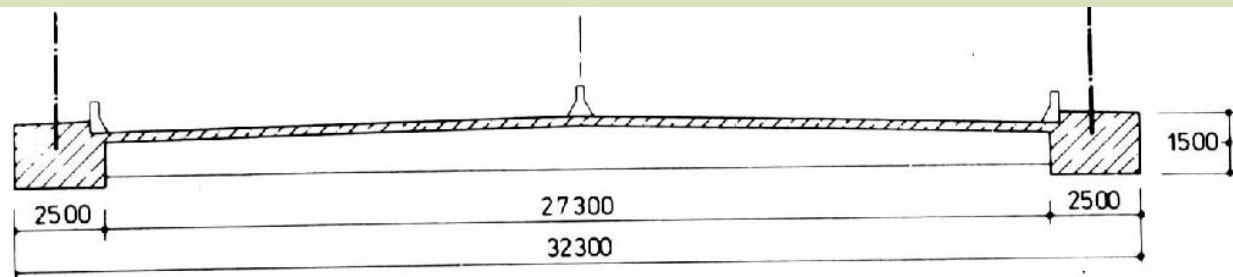
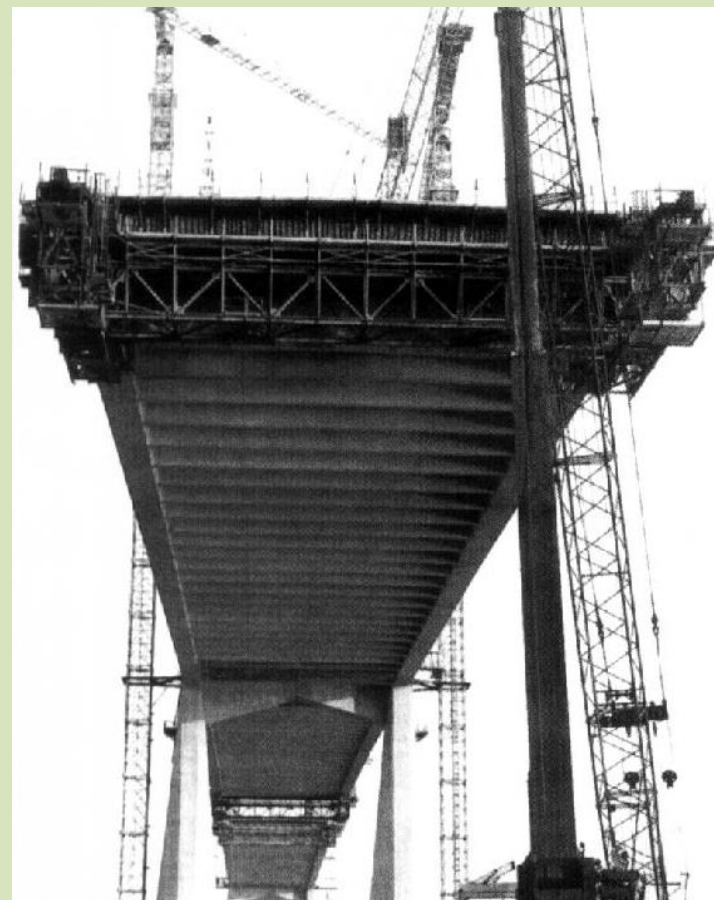


L=360 m

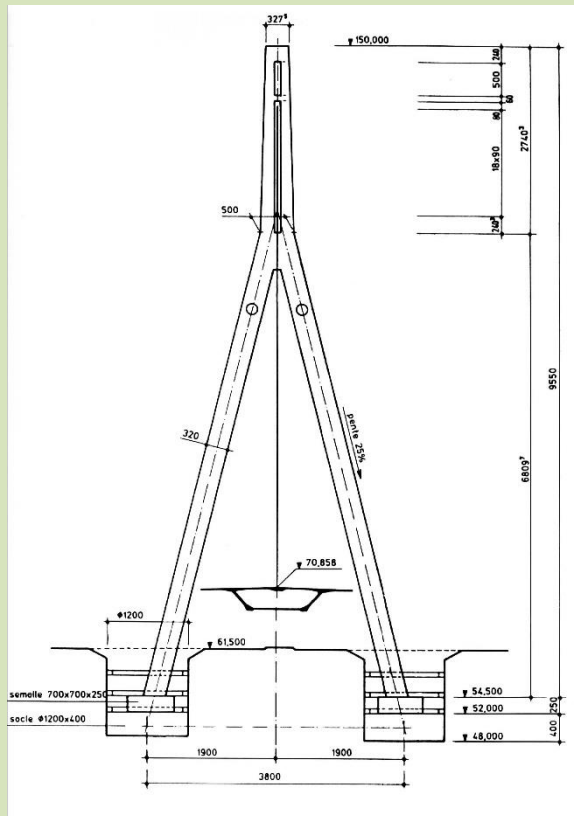
Dames Point, 1989., SAD

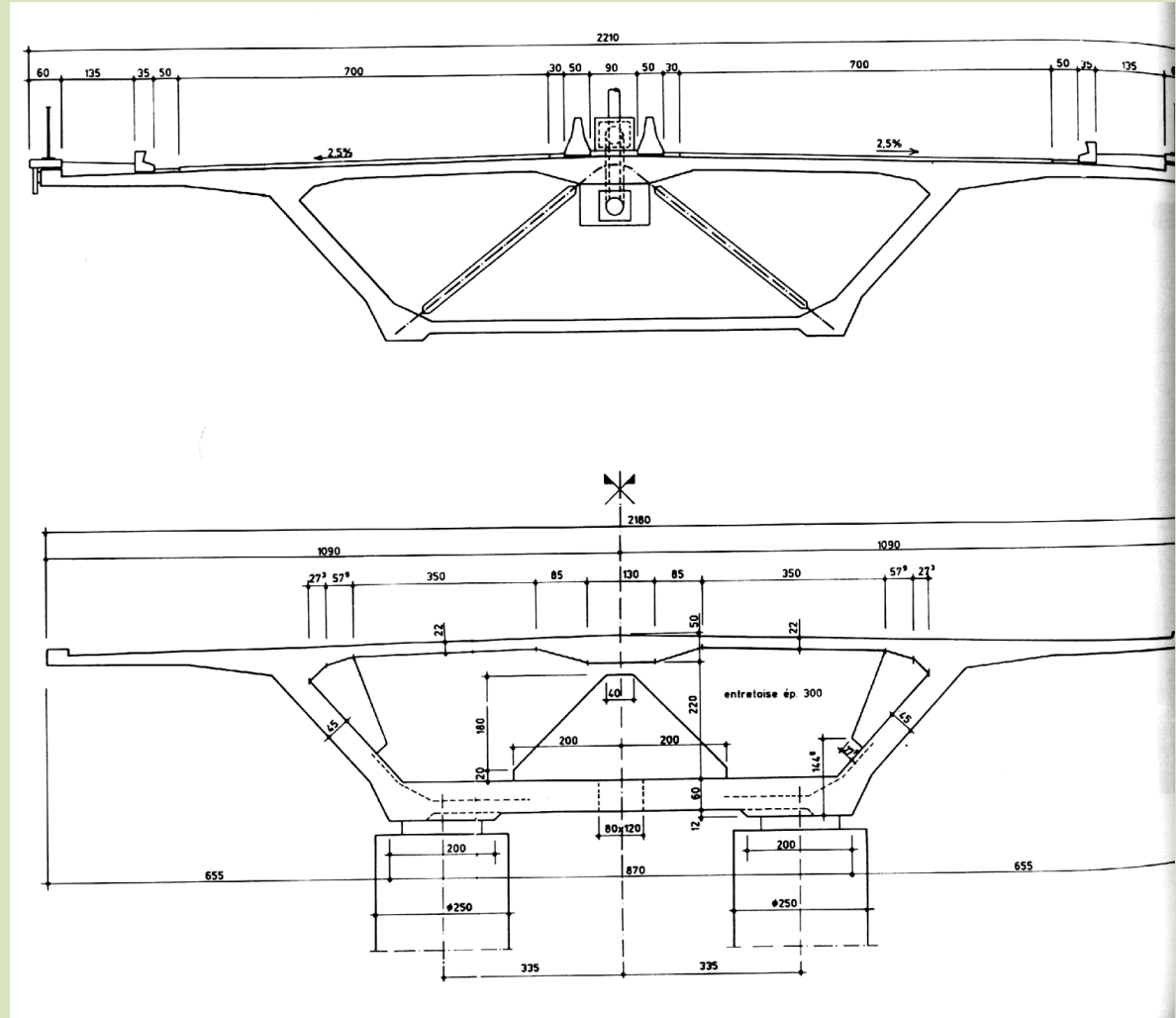


$L=396,2 \text{ m}$

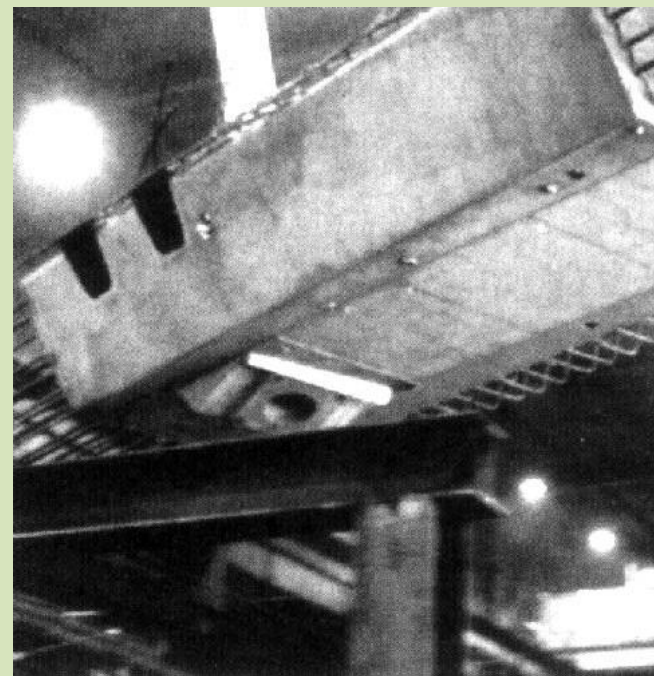
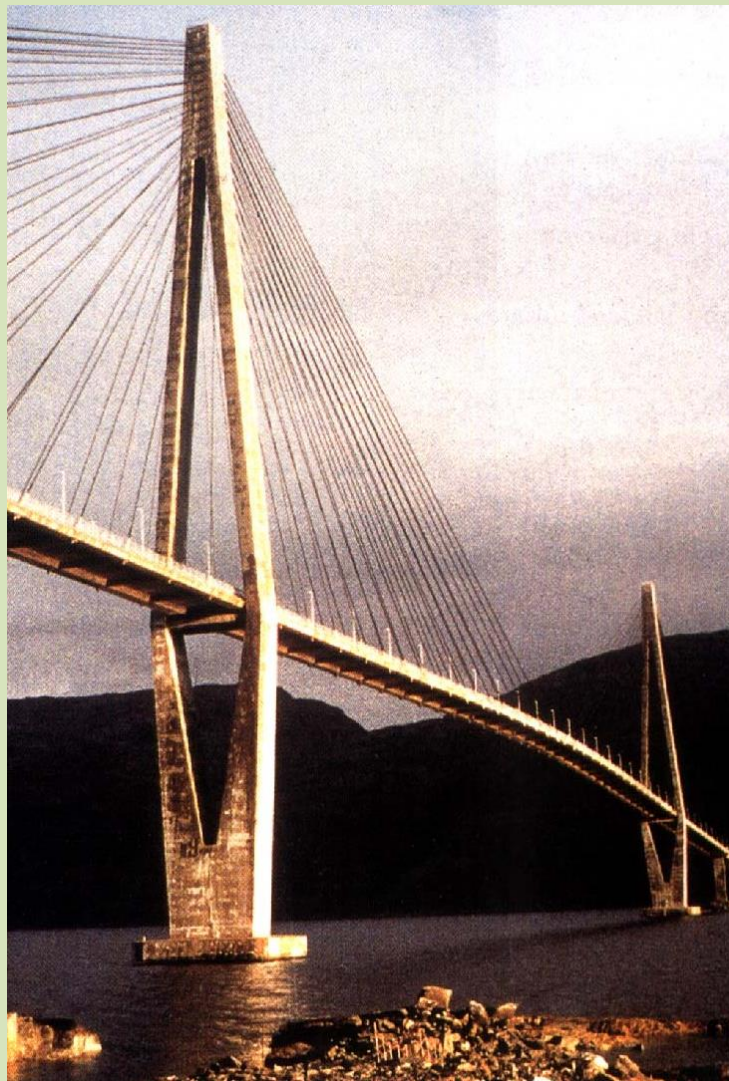


Wandre, 1989., Belgija





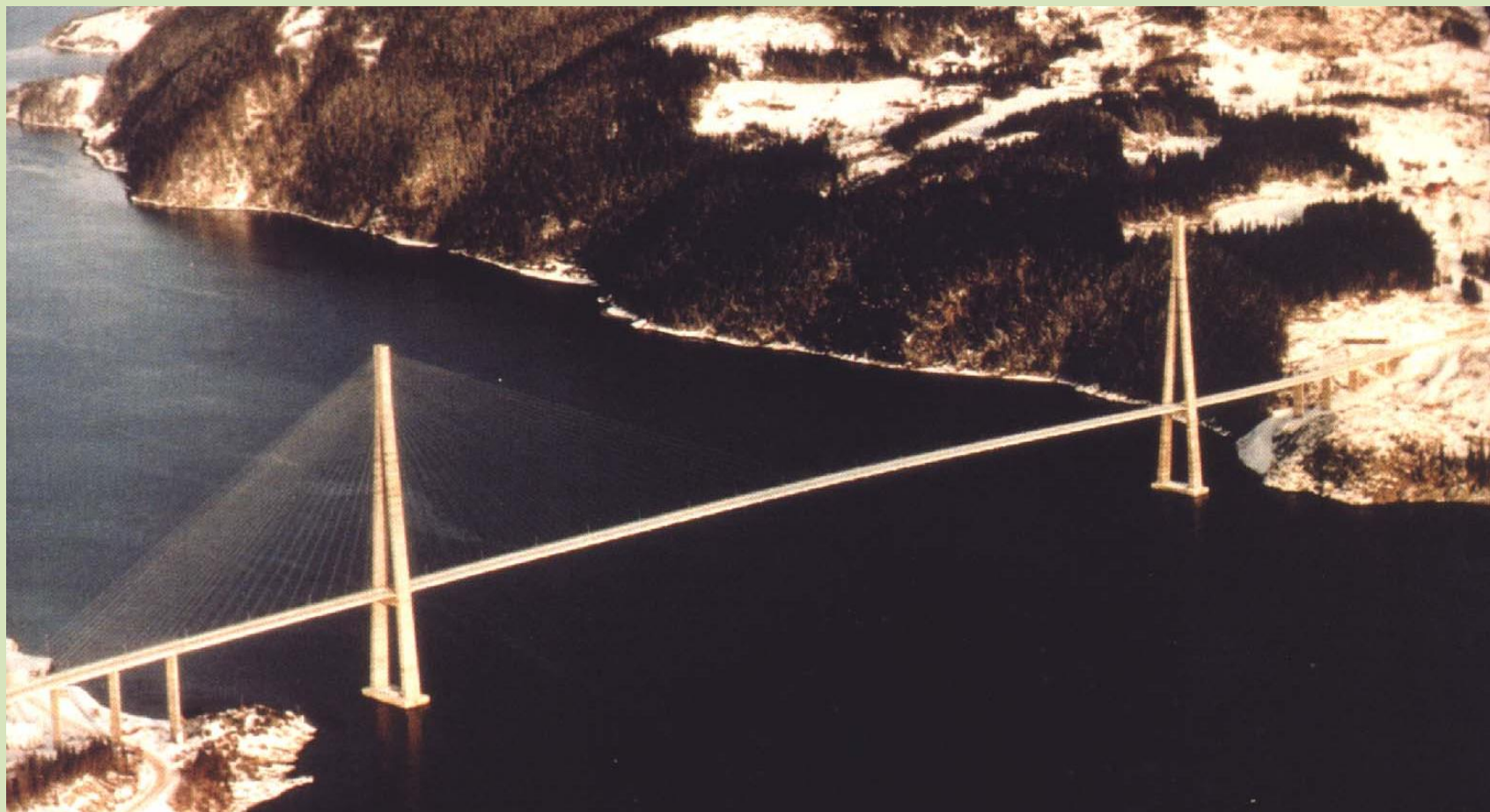
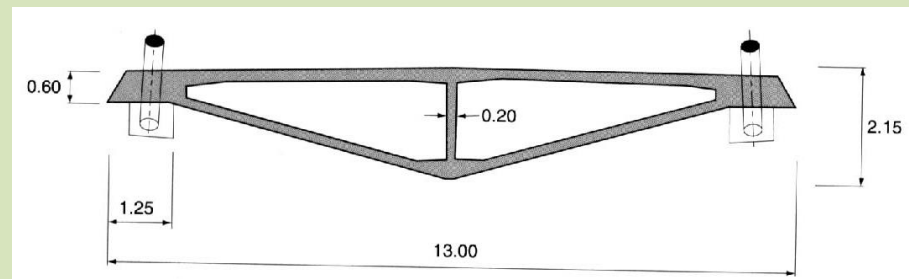
Helgeland, 1991., Norveška



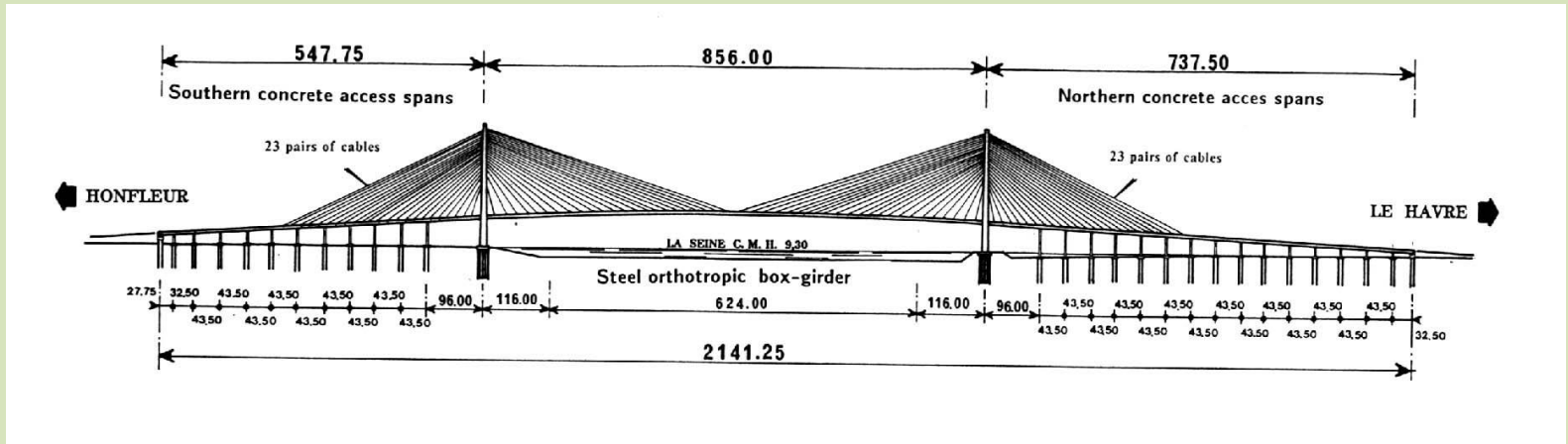


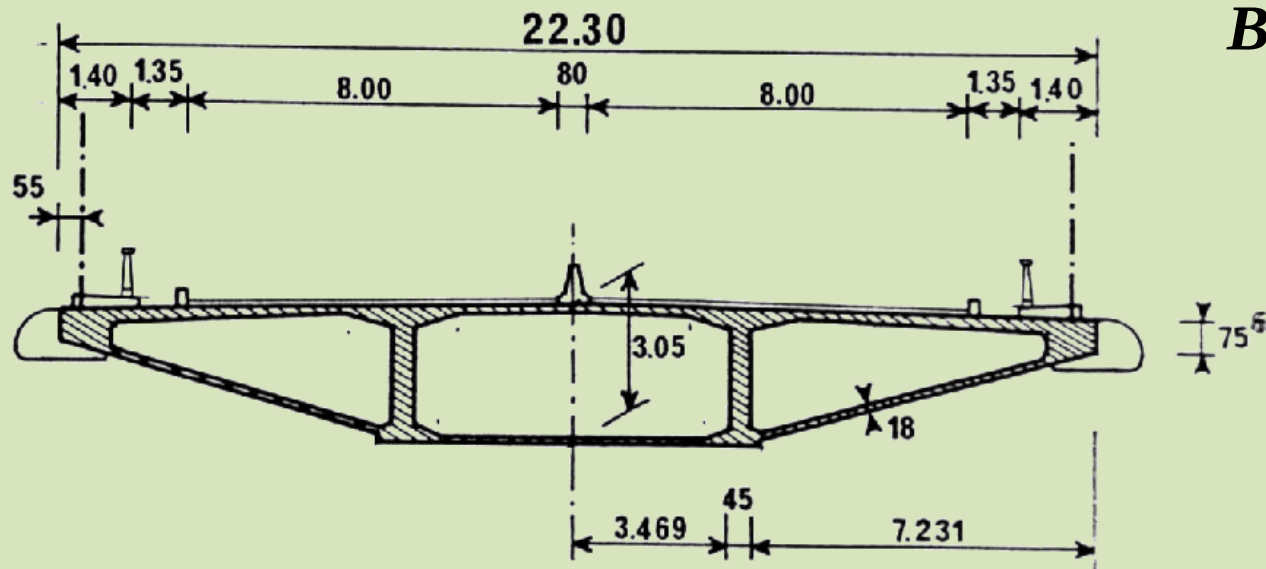
Skarnsundet, 1991., Norveška

$L=530$ m

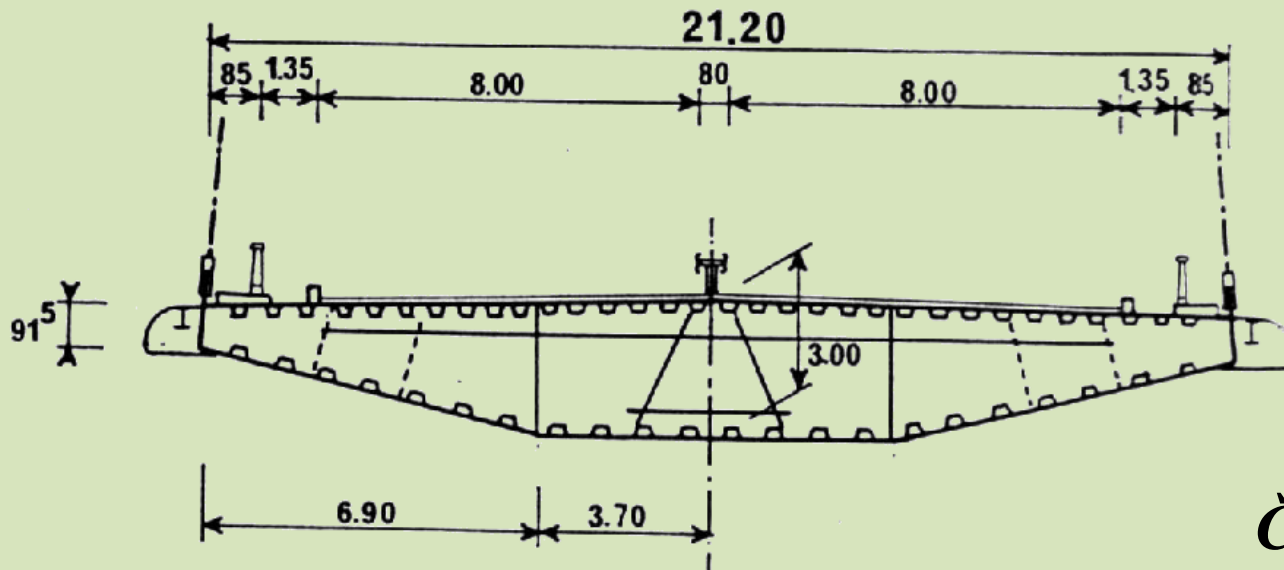


Normandie, 1994., Francuska





Betonska greda



Čelična greda

Sidrenje zatega na pilon

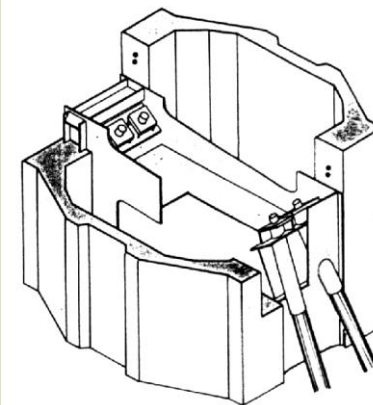
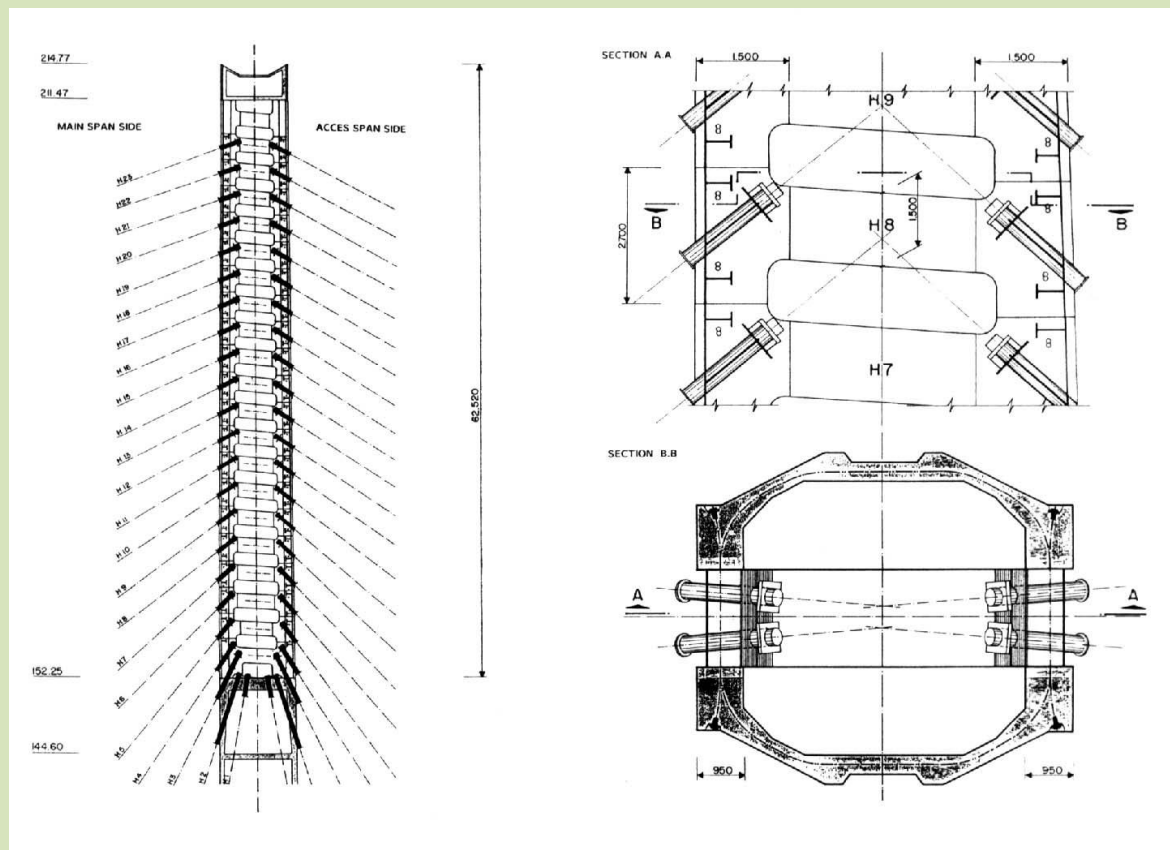
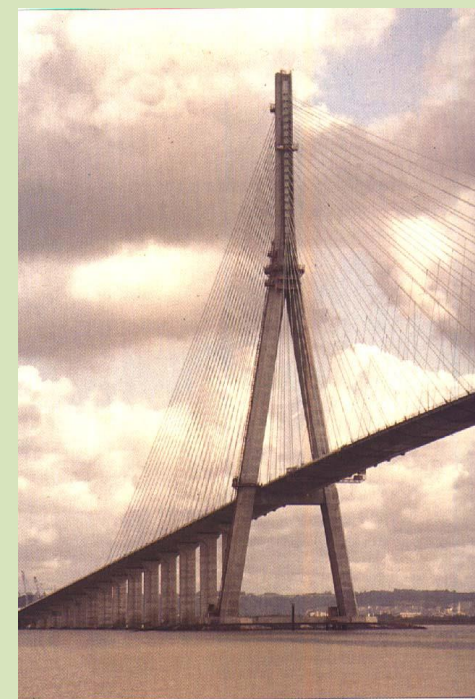
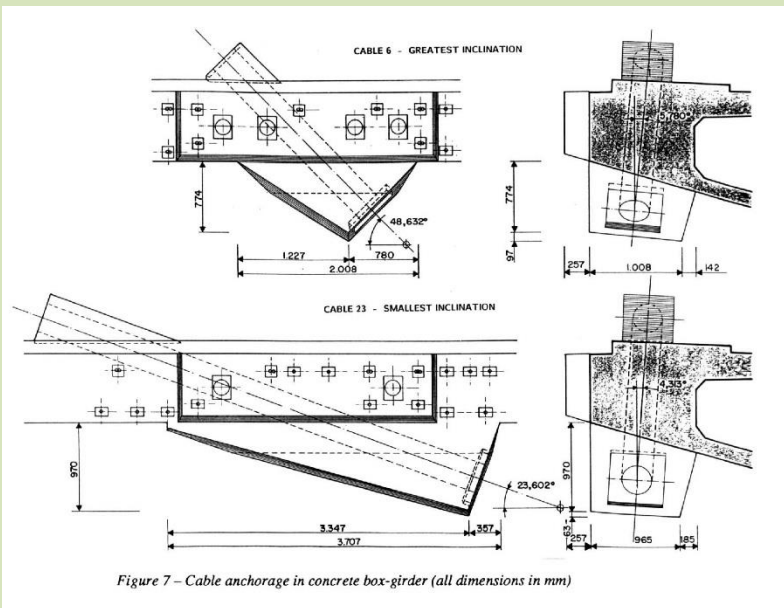
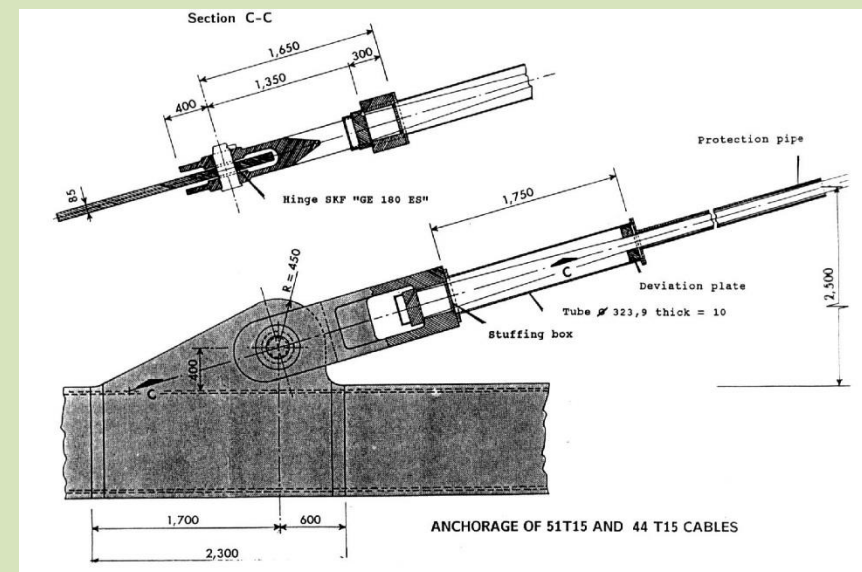


Figure 15 – Perspective view of pylon crest

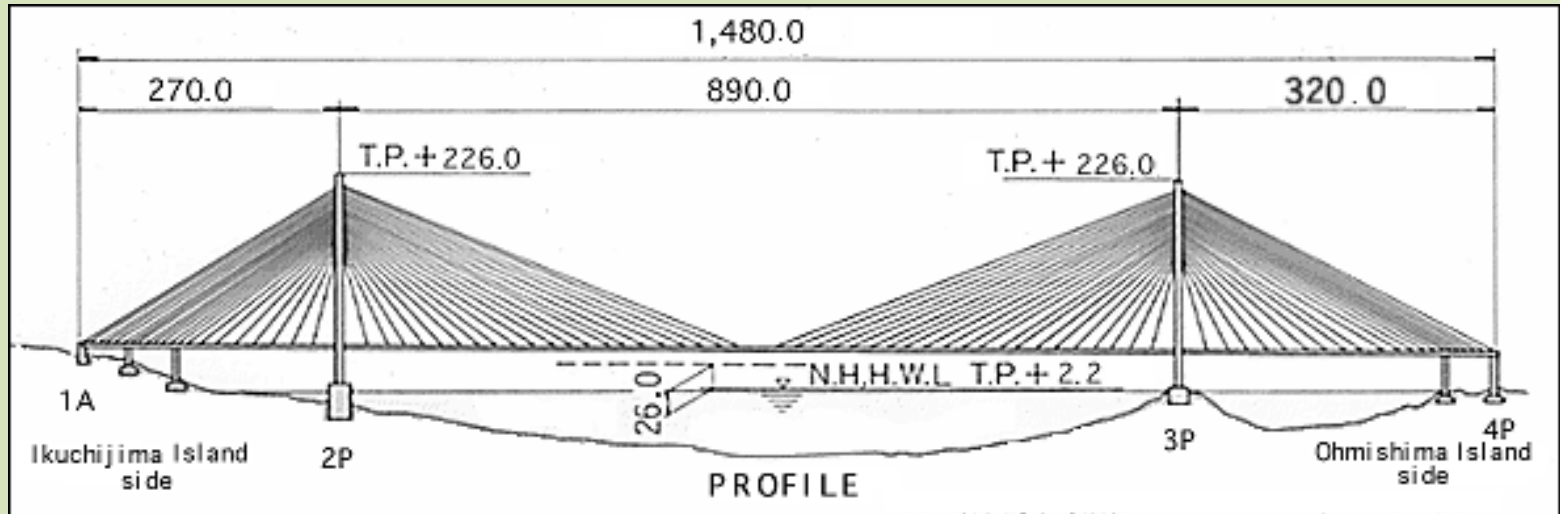


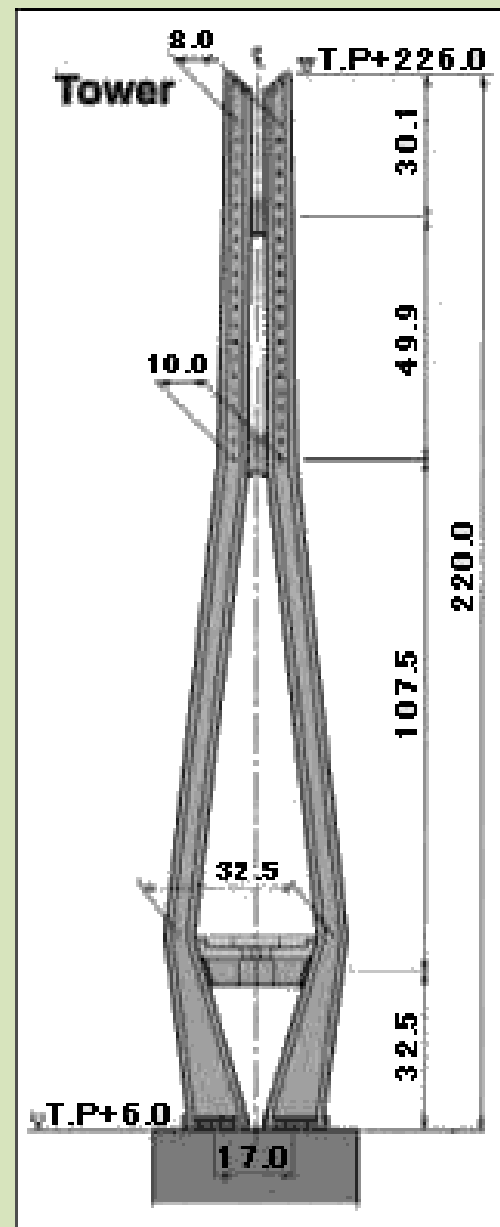
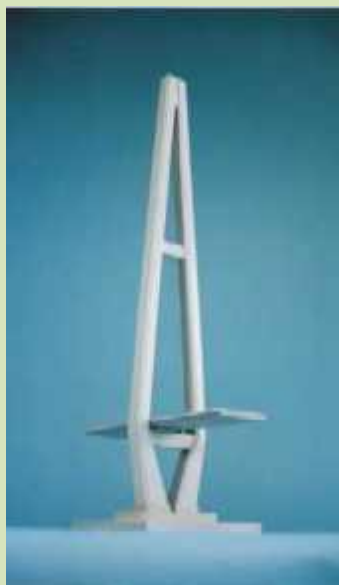
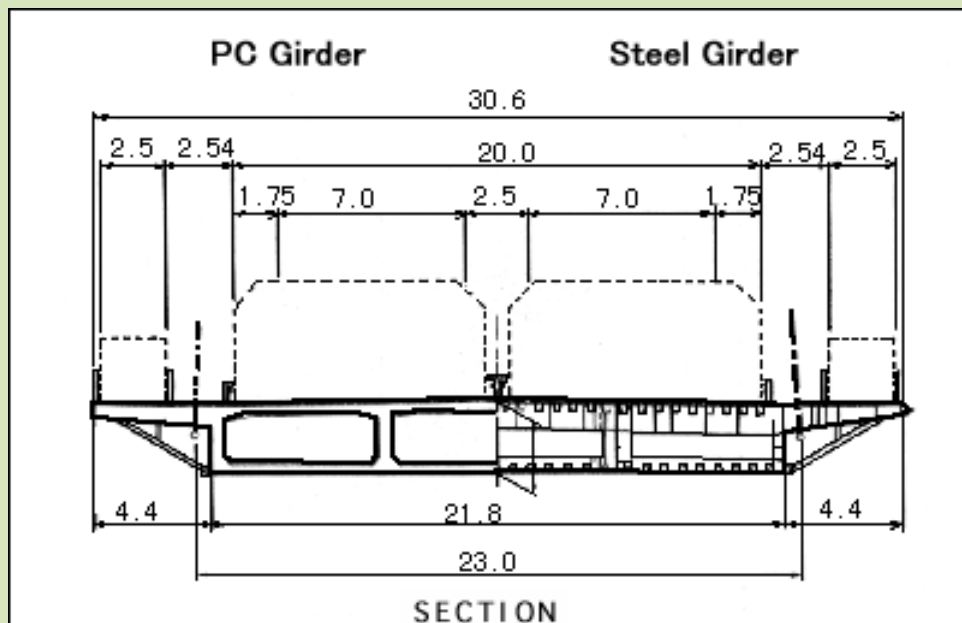


Sidrenje zatega na betonsku i čeličnu gredu



Tatara, 1999., Japan





Alamillo, Španjolska





Arena, 1992., Španjolska

