

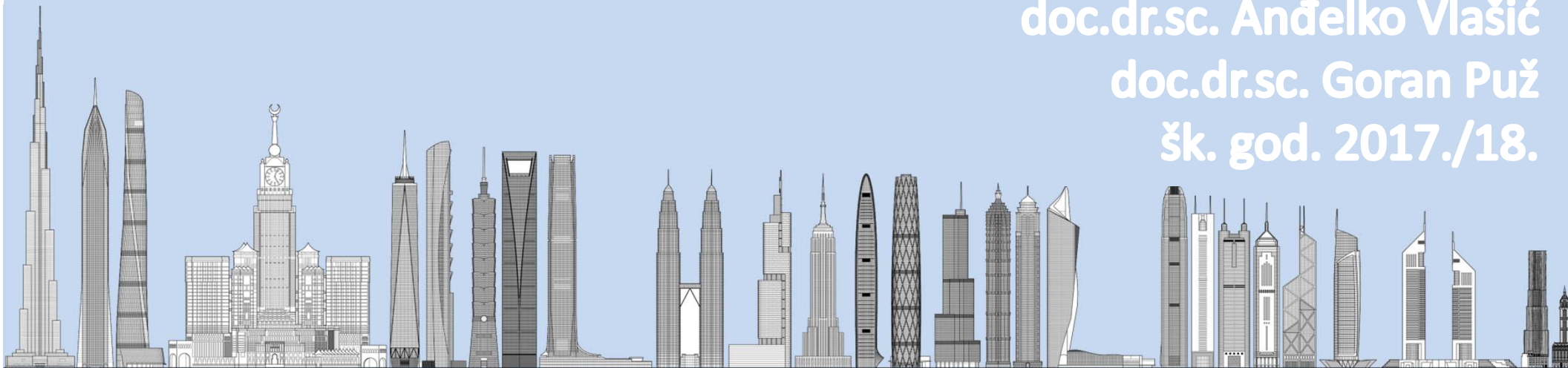
Građevinski Fakultet
Sveučilište u Zagrebu

VISOKE GRAĐEVINE

9. Predavanje

Cijevni konstrukcijski sustavi

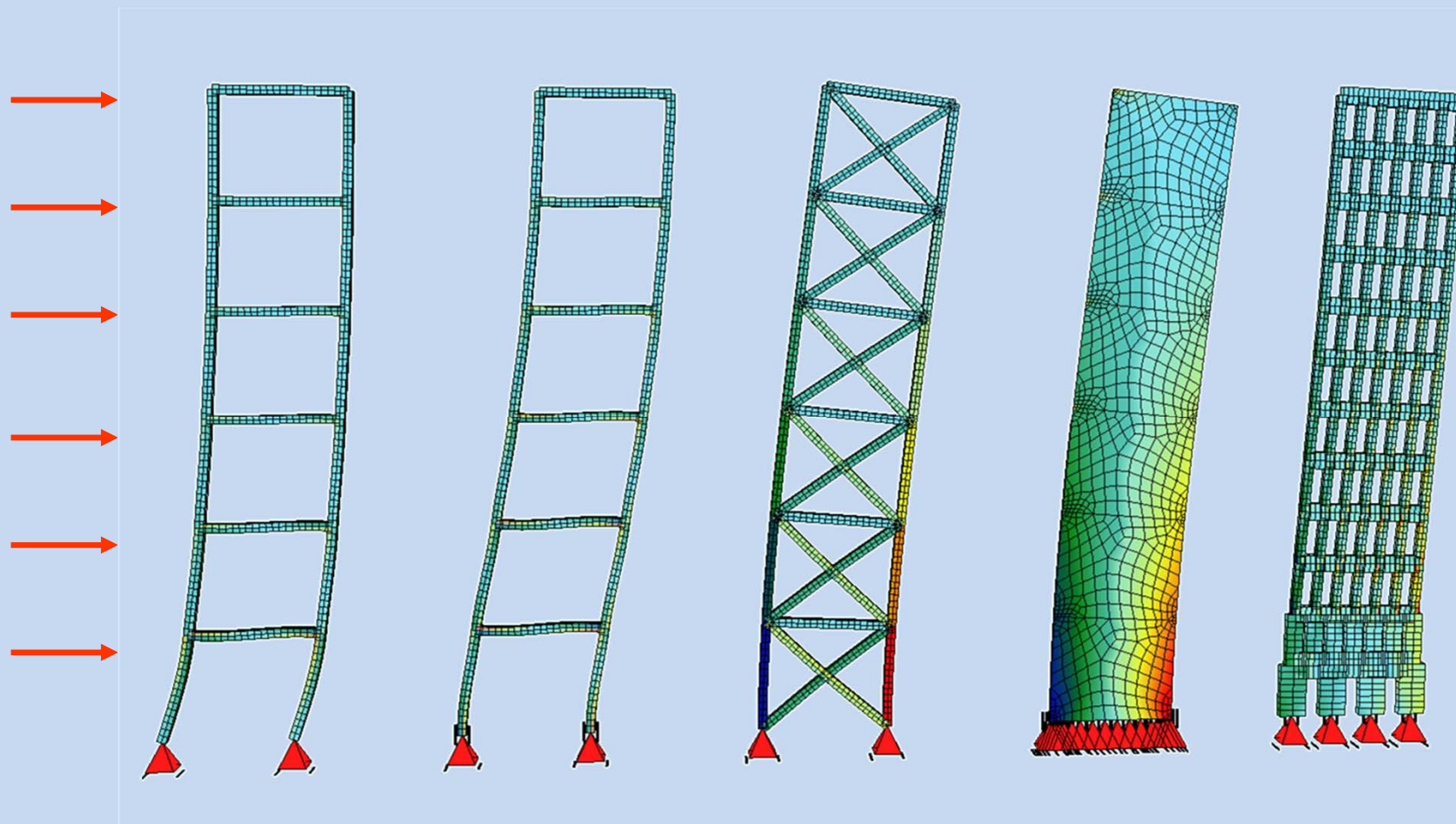
doc.dr.sc. Anđelko Vlašić
doc.dr.sc. Goran Puž
šk. god. 2017./18.



1. Uvod
2. Okvirne cijevi
3. Shear lag efekt
4. Povezane okvirne cijevi
5. Cijevi s dijagonalama
6. Cijev u cijevi
7. Diagrid sustavi

Uvod

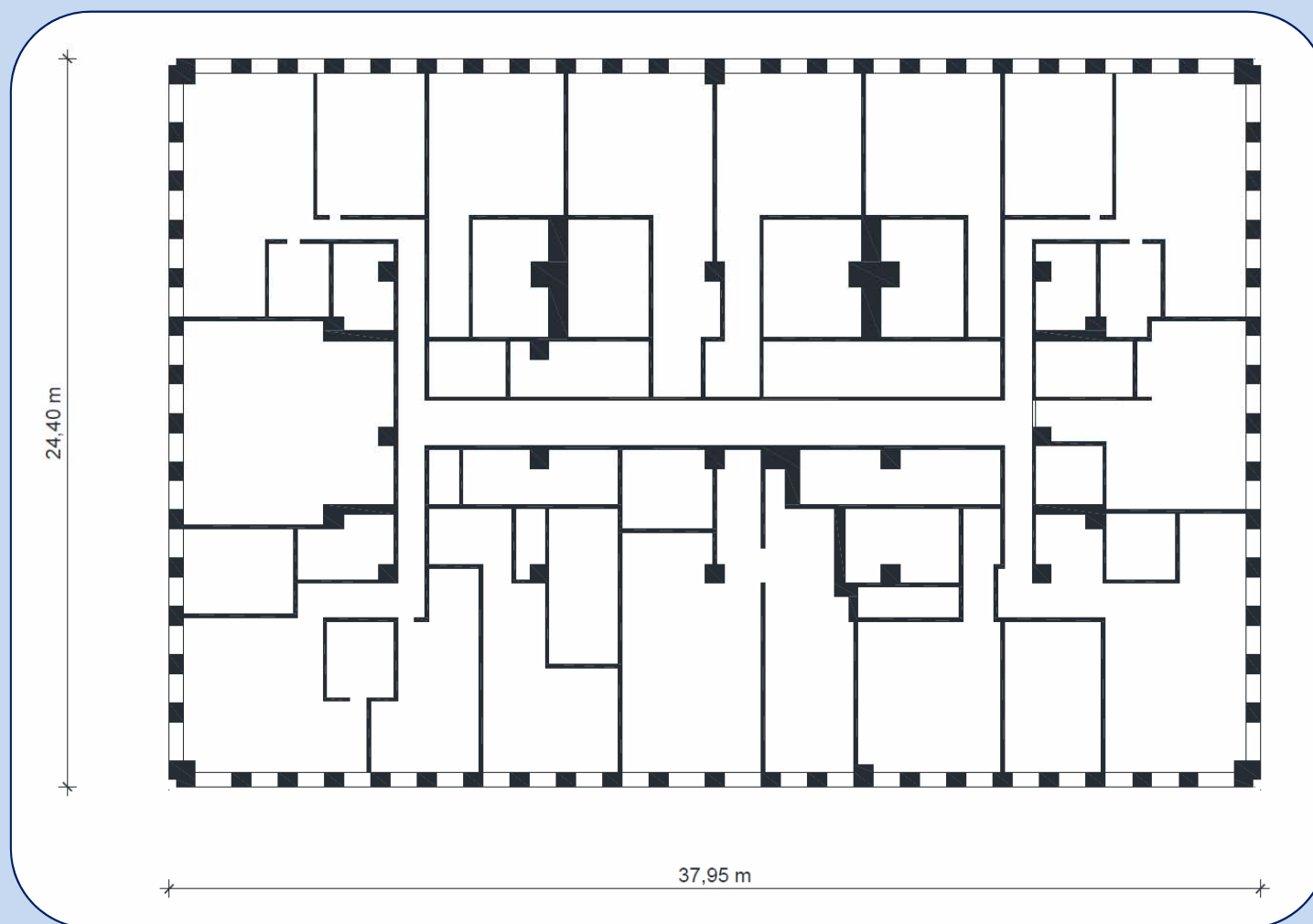
- **razvitak konstrukcijskih sustava potaknut je nastojanjem da se grade više zgrade uz ekonomičan utrošak gradiva**



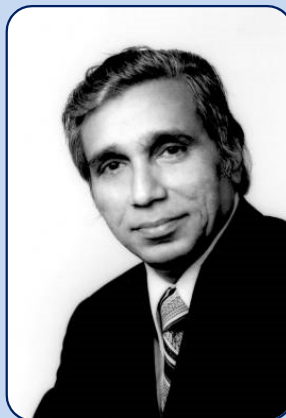
- šezdesetih godina 20. stoljeća inženjer Fazlur Khan, porijeklom iz Bangladeša, otkriva novi konstrukcijski sistem kao izvedenicu iz krutih okvira – cijevni sistem – i time počinje novo doba u gradnji nebodera
- Fazlur Rahman Khan: prva zgrada ovog sustava je 43-katna DeWitt-Chestnut Apartment Building izvedena u Chicagu (SAD, Illinois) i dovršena 1963. godine
- Najveći broj građevina s preko 40 katova od tog vremena je cijevnog sustava
- Ovaj sustav postaje jedno od najvažnijih modernih dostignuća u projektiranju i gradnji visokih zgrada



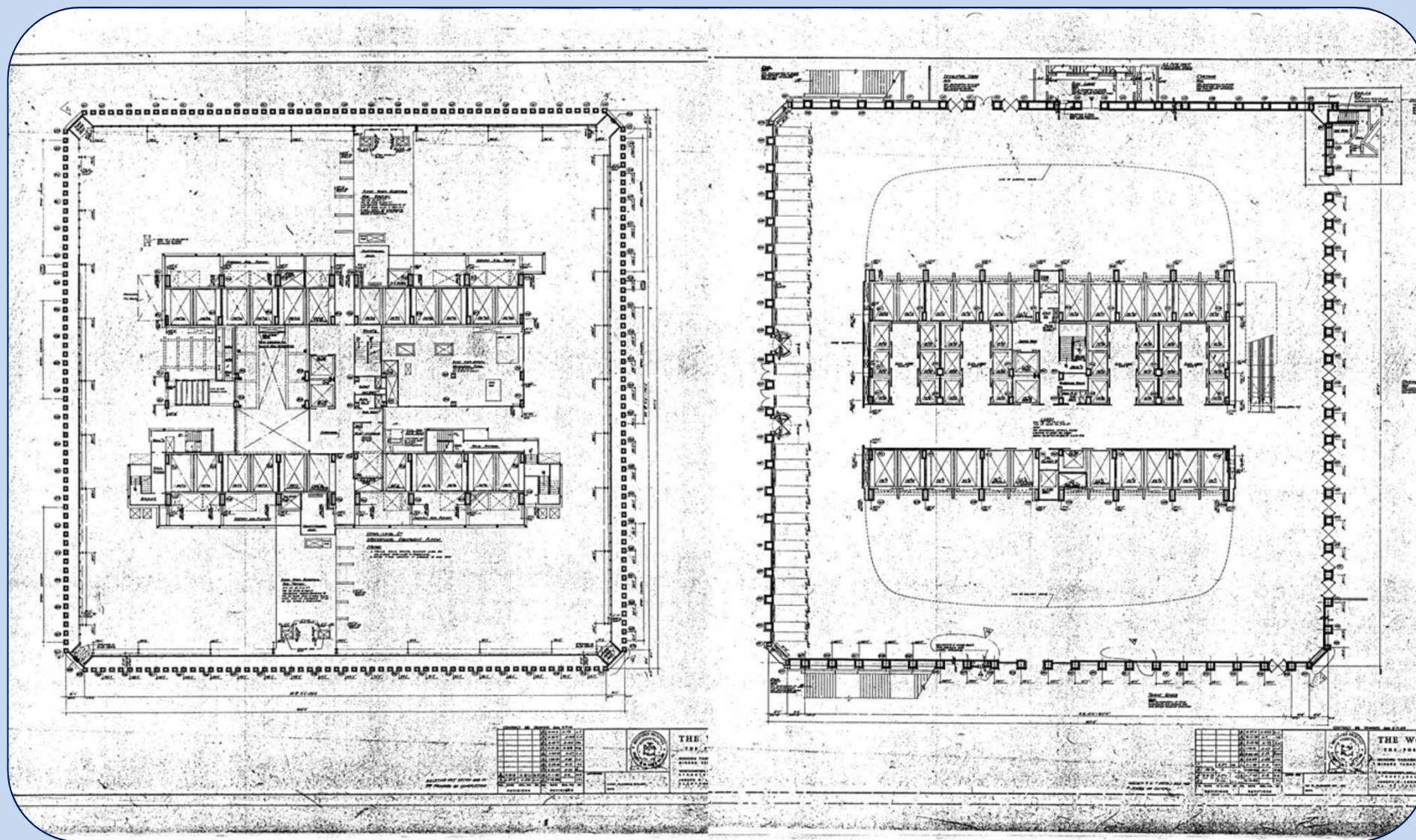
- Nosivi sustav ove građevine sastoji se obodne okvirne cijevi koja preuzima opterećenja od vjetra, unutarnjih stupova koji preuzimaju vertikalna opterećenja te od pune armiranobetonske međukatne ploče.
- Stupovi obodne cijevi postavljeni su na međusobnom osnom razmaku od približno 1,70 metara.



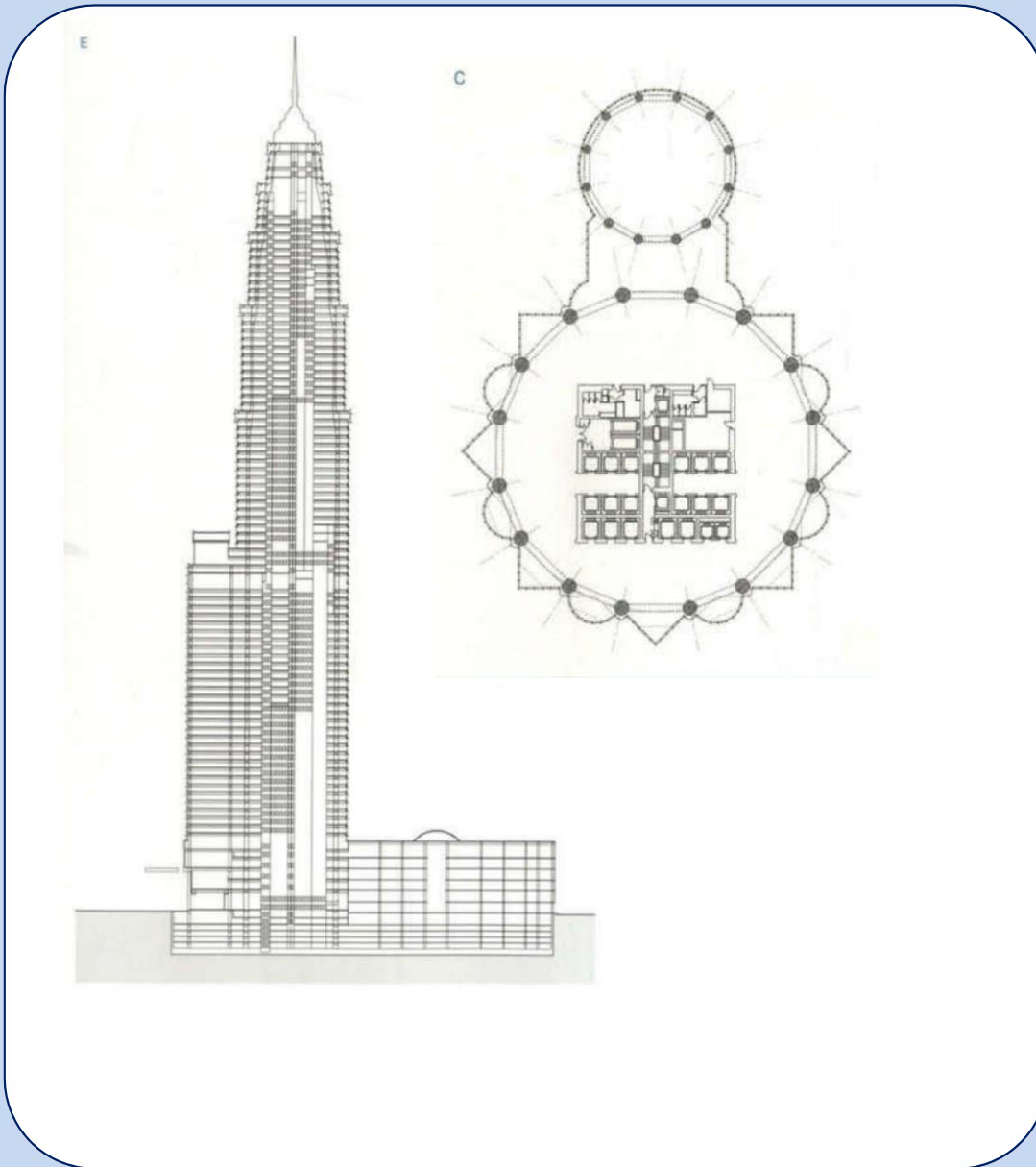
- povoljno okruženje (klijenti i narudžbe u gradu koji se razvija) i tvrtka koja je prepoznavala značaj inovacije (SOM) utječu na daljnji razvitak sustava, kojim rukovodi Khan
- sudjelovao i u konstruiranju **čelične cijevi sa spregovima** – John Hancock center, Chicago 1970.
- još jedan iskorak istog konstruktora je **sustav povezanih okvirnih cijevi** - prva primjena: Sears (Willis) Tower u Chicagu 1974.



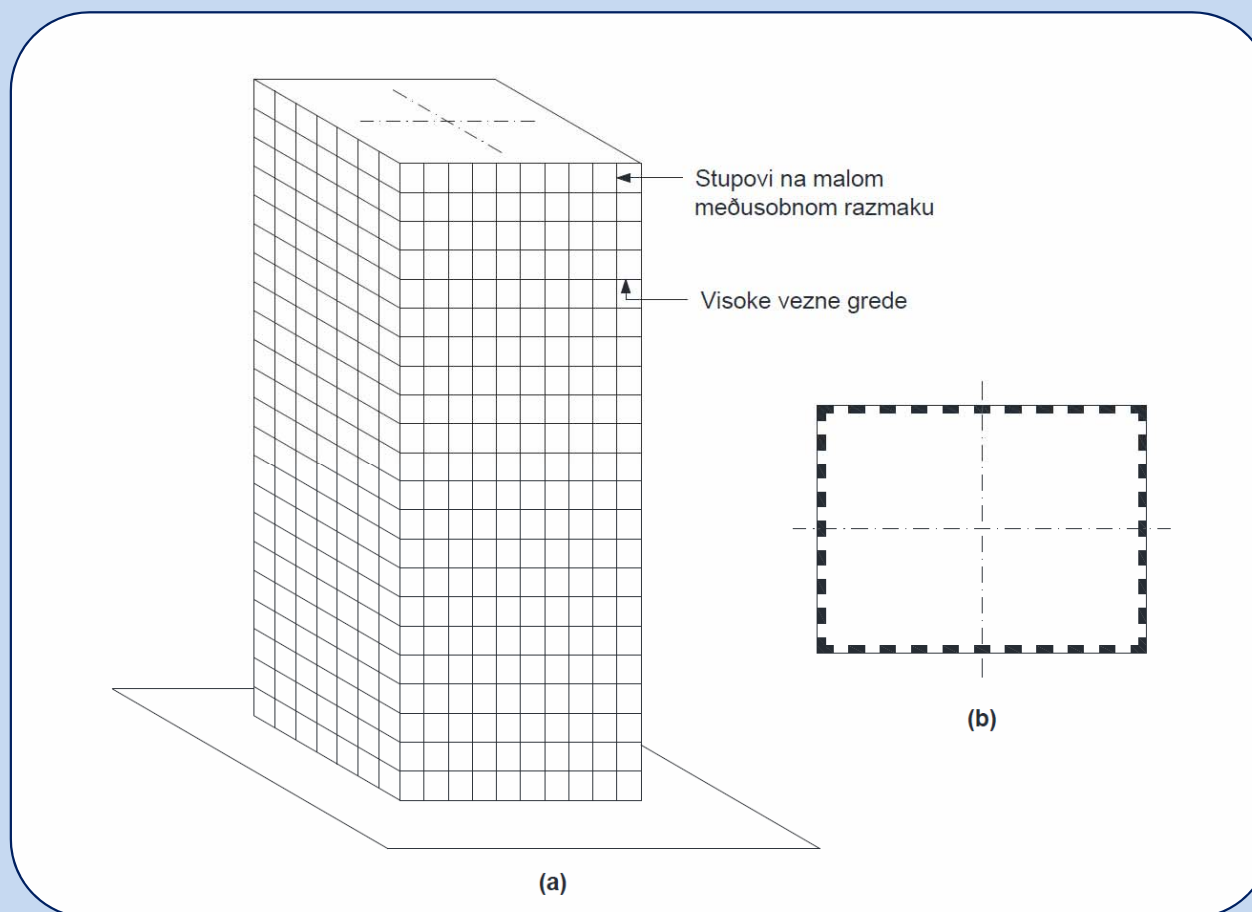
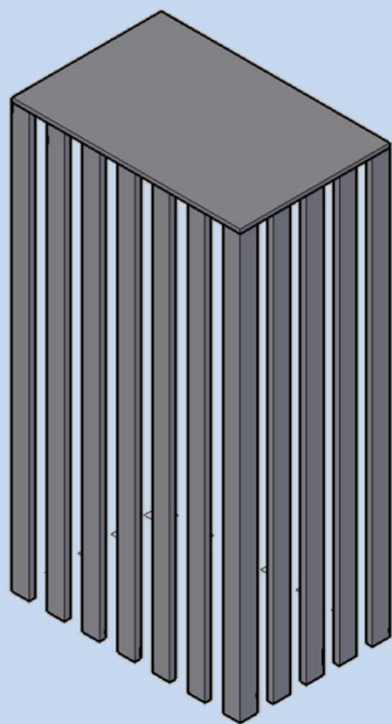
- World Trade Center, 1973, 109 katova, srušen 2001. u terorističkim napadima
- razmaci stupova svega 1 m
- 1. kat (desno) i jedan od viših katova (lijevo)



➤ Petronas Towers, Kuala Lumpur – primjer okvirne cijevne konstrukcije



- Sustav cijevi nastaje kada se stupovi i grede iz okvira rasporede samo po obodu zgrade i tvore vanjsku ovojniciu
- Na ovaj način se drastično povećava moment tromosti čitave zgrade i povećava se njen Indeks krutosti na savijanje (BRI)
- Svi elementi djeluju zajedno kao dio jednog presjeka

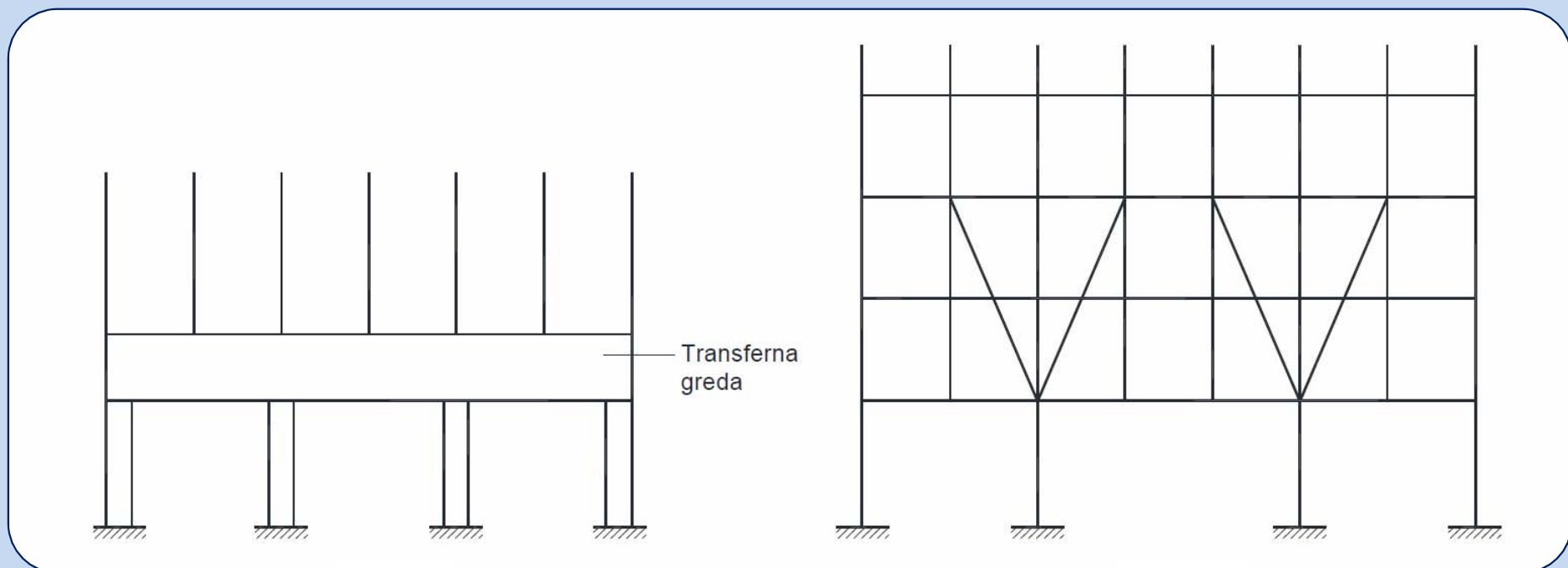


➤ Cijevni sustav ima slijedeće prednosti:

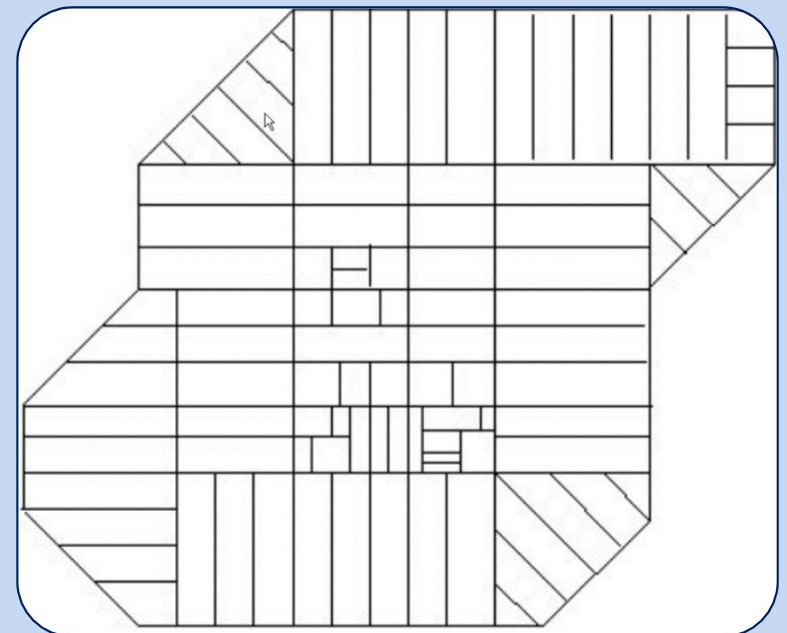
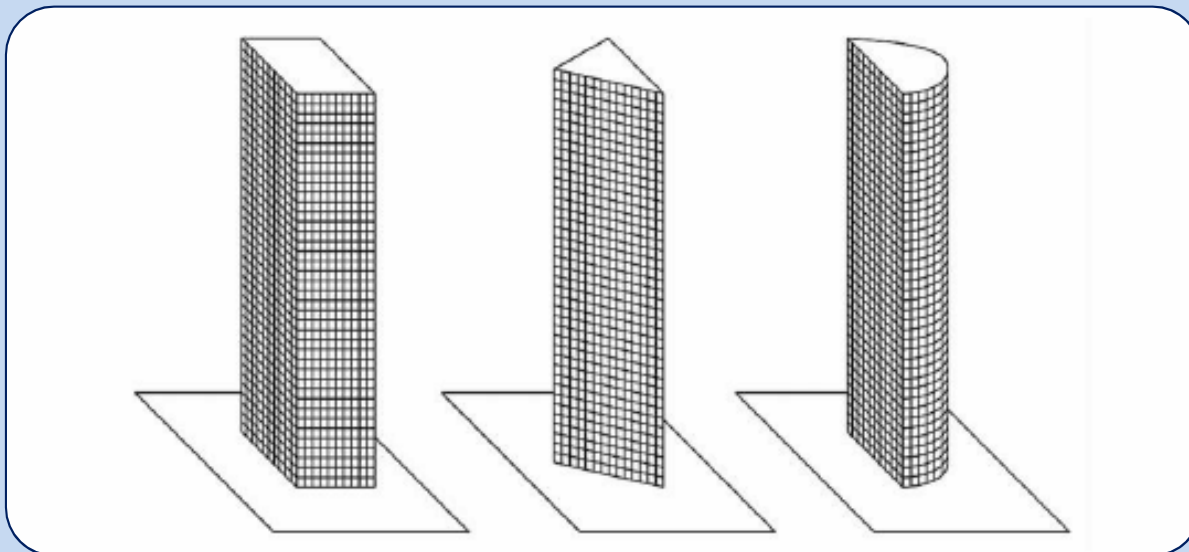
- ostvarive visine do 90 katova, u slučaju povezanih cijevi i do 130 katova
- omogućava razvoj efikasnijeg i jednostavnijeg postupka izvedbe u odnosu na okvir
- sustav prikladan za armirani beton i čelik
- ponavljanje tlocrta kroz katove omogućuje korištenje predgotovljenih elemenata i bolju prilagodbu skele i oplata za betoniranje na mjestu
- formira se čista i jasno izražena struktura
- modularan, visoko iskoristivi unutarnji prostor slobodan od zidova i stupova – pogodno za poslovne prostore

➤ Cijevni sustav ima slijedeće nedostatke:

- utjecaj shear laga
- mrežasto pročelje s istim, malim i uskim prozorima, i jednoličnim ponavljanjem katova
- u prizemlju je potrebno imati veće otvore za ulaze pa se izvode visoke transfer grede ili zakošeni stupovi gdje se reducira broj stupova prema prizemlju

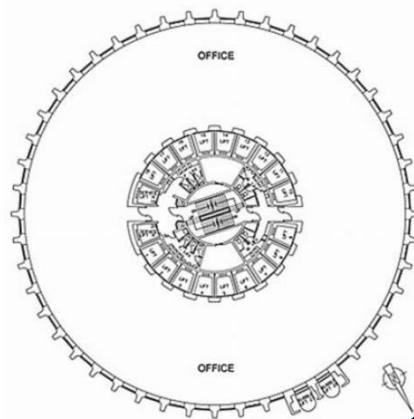


- sustav se može prilagoditi različitim tlocrtnim oblicima, pa se danas grade i zgrade cijevnog sustava koje nemaju pravokutni tlocrt
- Cijevni sustavi mogu se formirati u različitim geometrijskim oblicima kao npr. pravokutnik, kvadrat, trokut, krug i dr.
- ako su elementi (stranice cijevi) proporcionalnih dimenzija, svaka zatvorena forma je ostvariva
- problem: ako se presjek mijenja po visini ili zgrada ima značajne istake (moderna arhitektura) diskontinuitet panela koji čine cijev izaziva značajne probleme

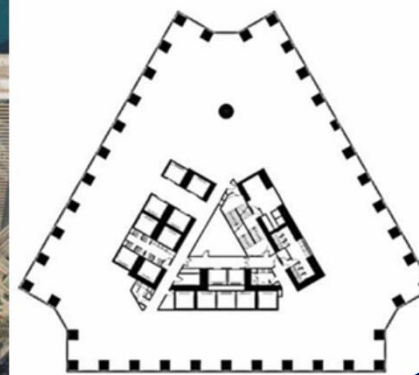




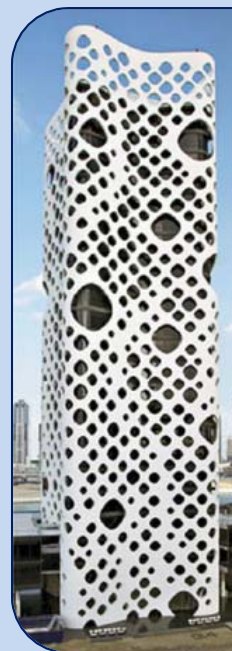
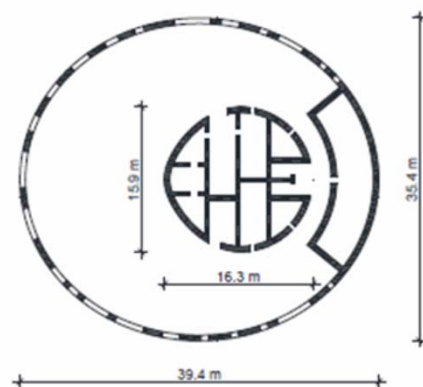
Hopewell Centre,
Hong Kong, 1980.
64 katova
216 m



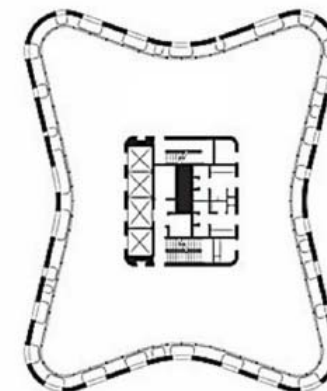
Central Plaza,
Hong Kong, 1992.
78 katova
374 m



Torre Agbar,
Barcelona, 2005.
34 katova
142 m

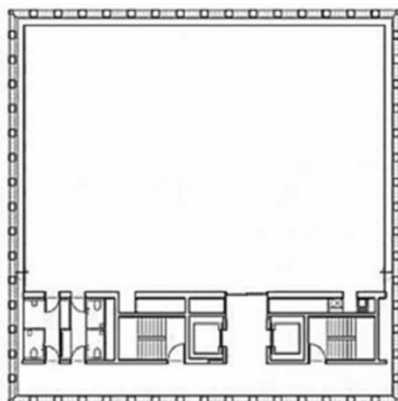


Toranj 0-14, Dubai
2010.
24 katova
106 m

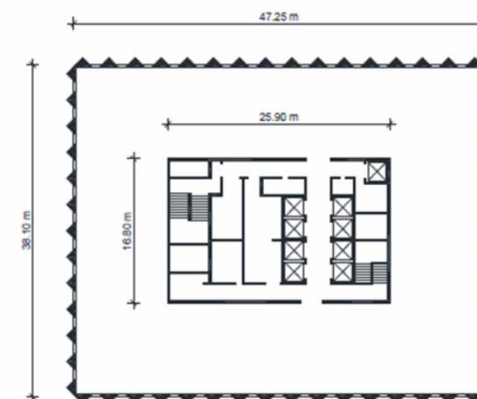




Urban Hive, Seul
2008.
17 katova
70 m

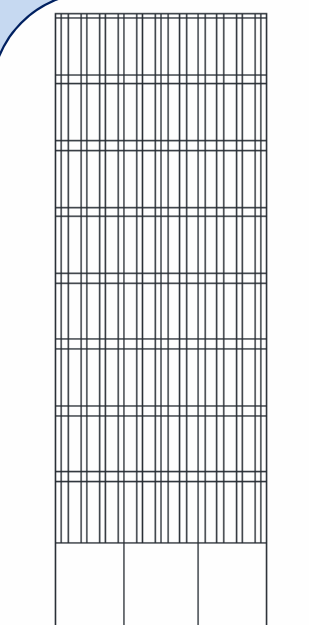


CBS Tower, New York
1965.
38 katova
150 m

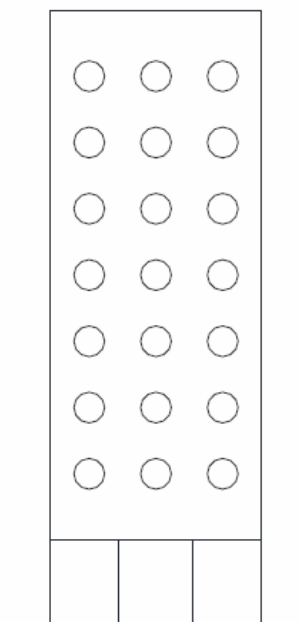


- **Podvrste cijevnih sustava razvile su se zbog težnje da se poveća krutost sustava na horizontalna opterećenja**
- **Krutost se može povećati na sljedeće načine:**
 - smanjivanjem razmaka između obodnih stupova cijevi
 - povećavanjem visine veznih greda koje povezuju obodne stupove
 - dodavanjem rešetki/stabilizacijskih vezova ili posmičnih zidova jezgri
 - dodavanjem unutarnje cijevi na mjesto jezgre (sustav „cijev u cijevi“)
 - dodavanjem dijagonala na obod zgrade(okvirne cijevi s dijagonalama)
 - kombiniranjem više cijevi (sustav povezanih cijevi):
- **Podvrste sustava:**
 1. Povezane cijevi
 2. Cijevi sa dijagonalama
 3. Cijev u cijevi (ili cijev s jezgrom)
 4. Diagrid
 5. Hibridni mješoviti sustavi

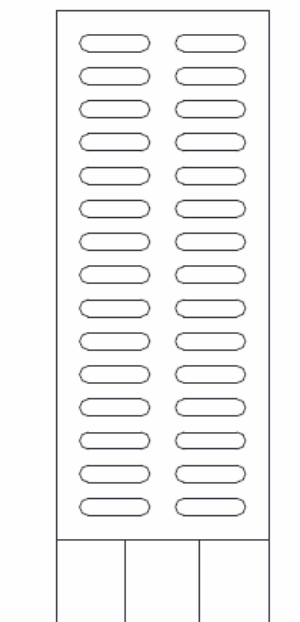
Podvrste sustava s obzirom na oblike vanjske cijevi:



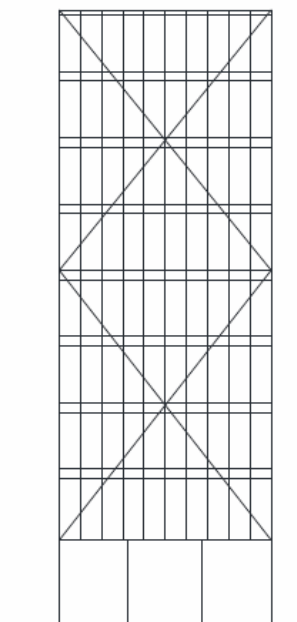
Okvirna cijev



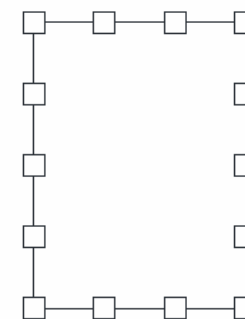
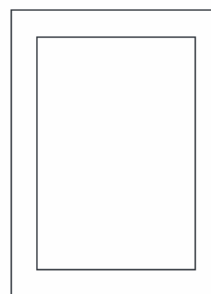
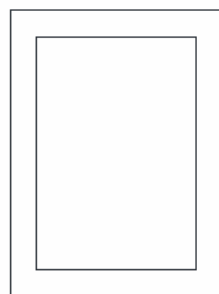
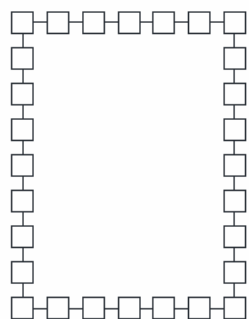
Perforirana cijev



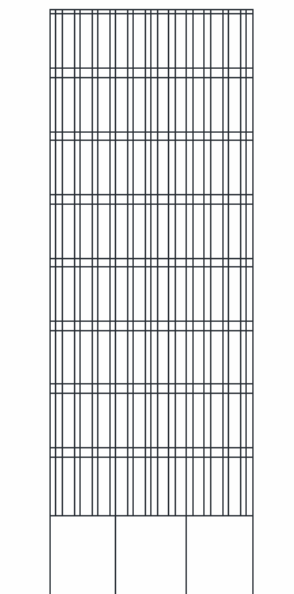
Cijev s visokim
veznim gredama



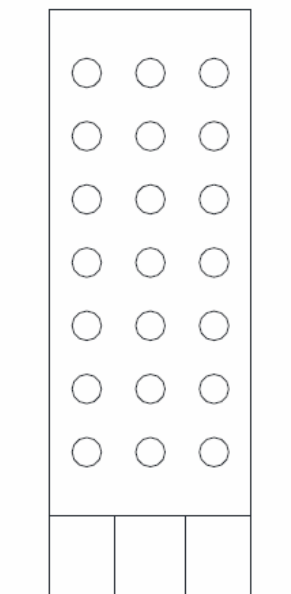
Rešetkasta cijev



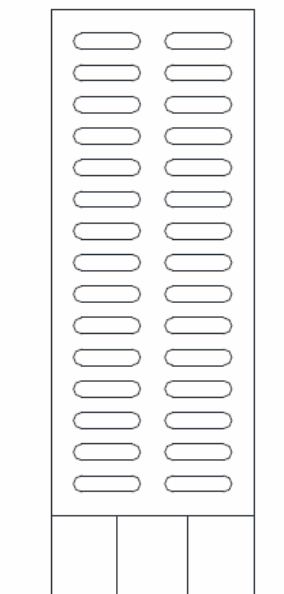
Podvrste sustava s obzirom na broj cijevi:



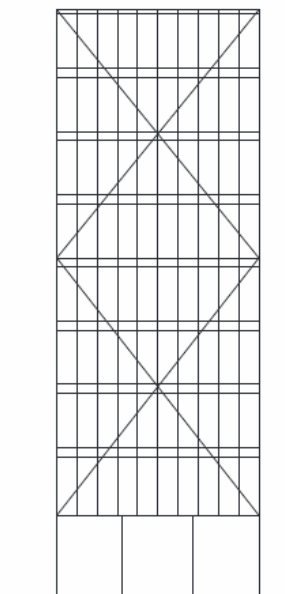
Okvirna cijev
u cijevi



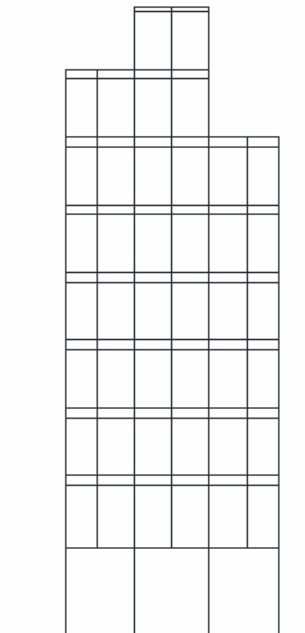
Perforirana cijev
u cijevi



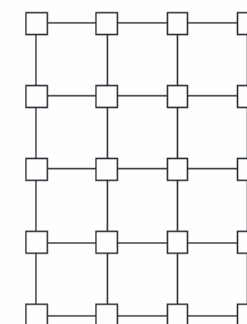
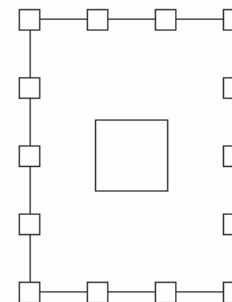
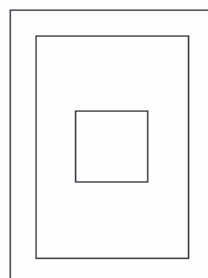
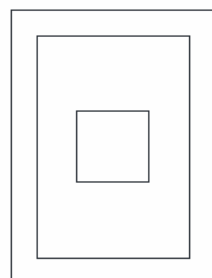
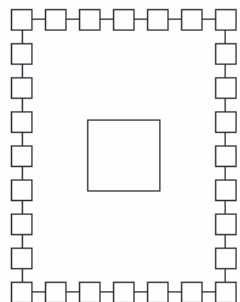
Cijev s visokim
veznim gredama i
unutrašnjim
stupovima



Rešetkasta cijev
u cijevi



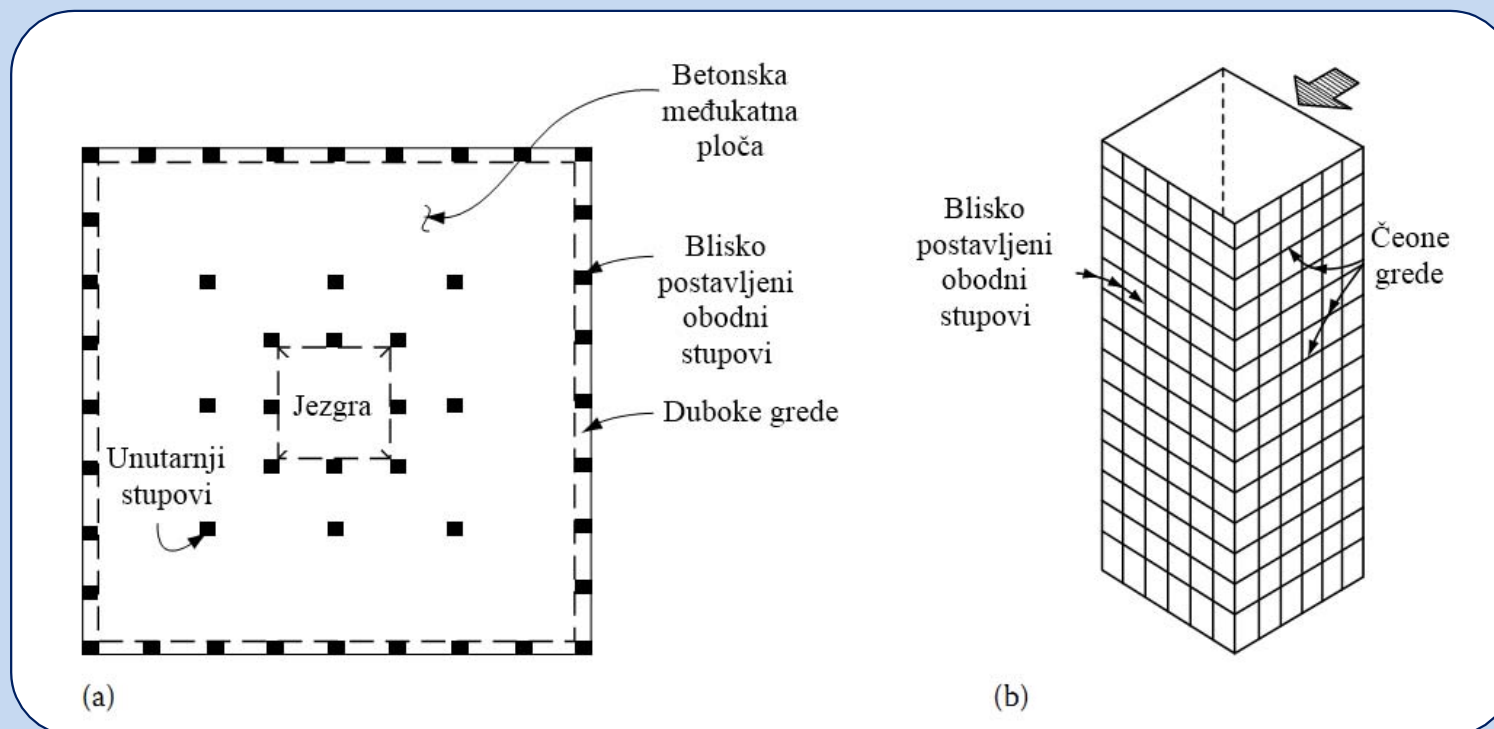
Povezane cijevi



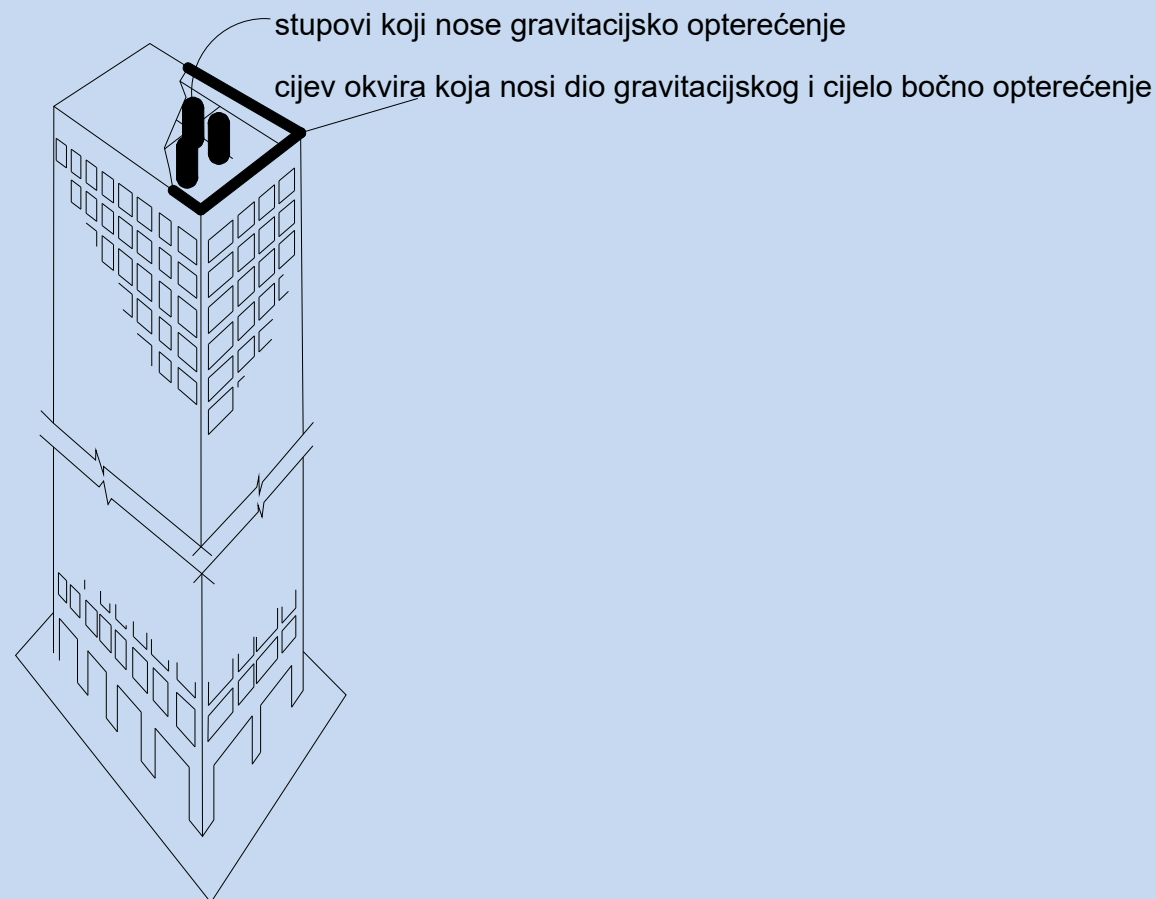
Vrsta cijevnog sustava	Materijal	Max. broj katova za učinkovitost sustava	Prednosti	Nedostaci	Primjeri Građevina
Okvirne cijevi	Čelik	80	Slobodan prostor	Visoki shear lag	Aon Center, Chicago, SAD 83 kata, 345 m
	Beton	60			Water Tower Place, Chicago, SAD, 74 kata, 262 m
Cijevi s dijagonalama	Čelik	150	Veći razmaci između obodnih stupova, smanjen shear lag	Dijagonale zatvaraju vanjsku fasadu, složeni spojevi dijagonala	John Hancock Center, Chicago, SAD, 100 katova, 344 m
	Beton	100			Onterie Center, Chicago, SAD, 58 katova, 174 m
Povezane okvirne cijevi	Čelik	110	Smanjen shear lag, lakše promjene u tlocrtu izostavljanjem pojedinih cijevi po visini	Smanjene mogućnosti planiranja prostora	Sears Tower, Chicago, SAD 108 katova, 442 m
	Beton	110			Carnegie Hall Tower, New York, SAD, 62 kata, 230 m
Cijev u cijevi	Čelik ili beton	80	Jezgra preuzima posmične utjecaje	Potreba za krutim međukatnih konstrukcijama za povezivanje jezgre i cijevi	181 West Madison Street, Chicago, SAD, 50 katova, 207 m

Okvirne cijevi

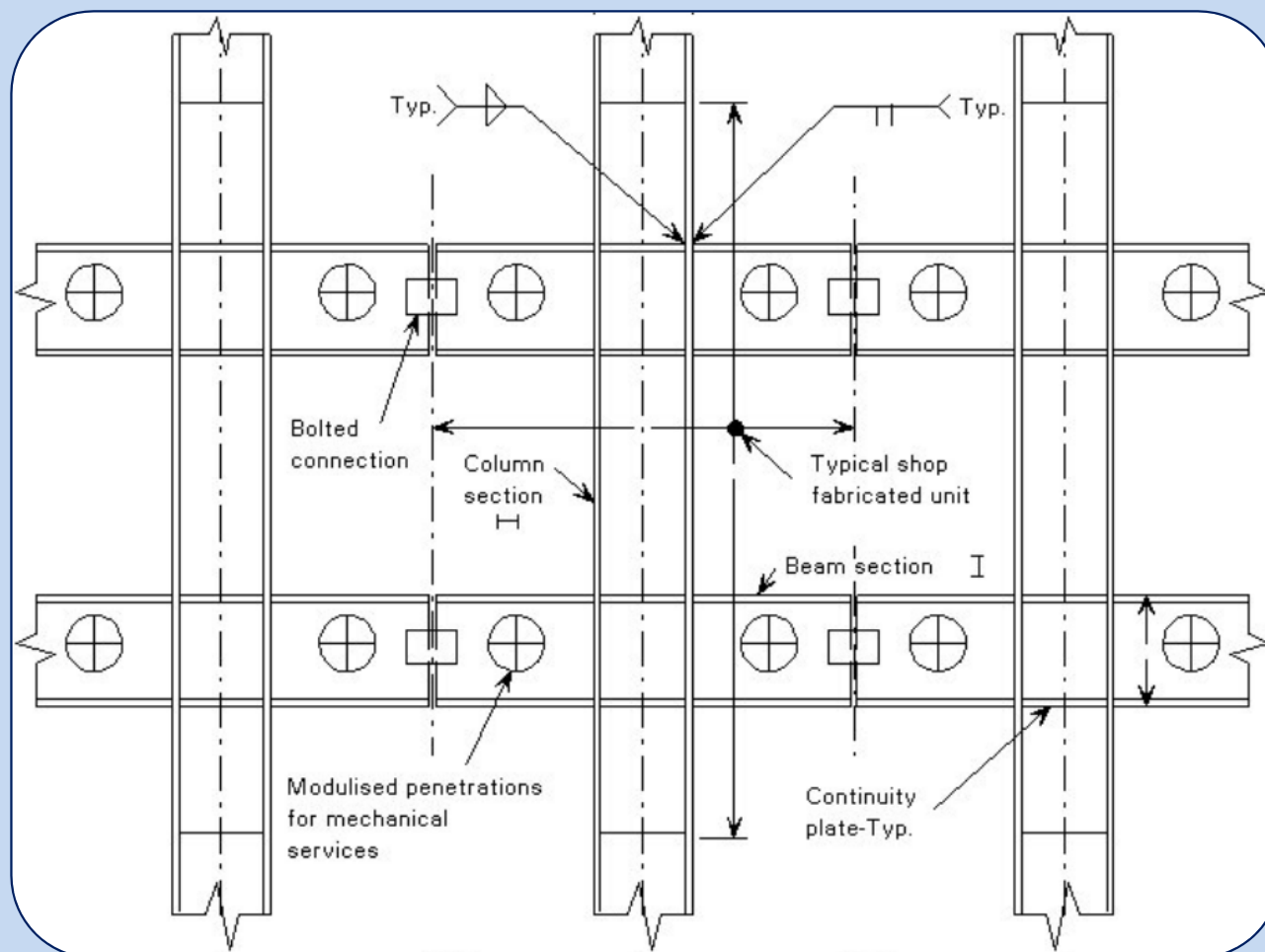
- Okvirne cijevne konstrukcije konstruirane su od četiri vrlo kruta okvira (panela), koji su kruto spojeni u uglovima i zajedno oblikuju cijev po obodu zgrade
- Okviri su sastavljeni od stupova postavljenih na malom razmaku (tipično 1,5 do 5 m), međusobno povezanih krutim visokim prečkama
- Promatrajući sustav kao konzolu, vidimo da horizontalna opterećenja preuzimaju okviri u stranicama položenim u smjeru djelovanja opterećenja, kao hrptovi.
- Preostala dva okvira, okomita na smjer horizontalnog opterećenja, djeluju kao pojasnice



- Vanjska cijev preuzima 100% horizontalnog djelovanja i 75-90% vertikalnih djelovanja.
- Preostala vertikalna djelovanja preuzimaju stupovi
- sustav je najracionalniji za zgrade kvadratnog tlocrta
- za pravokutne tlocrte sa omjerom stranica većim od 1:2.5 potrebno uzeti u obzir dodatna ukrućenja u obliku spregova.

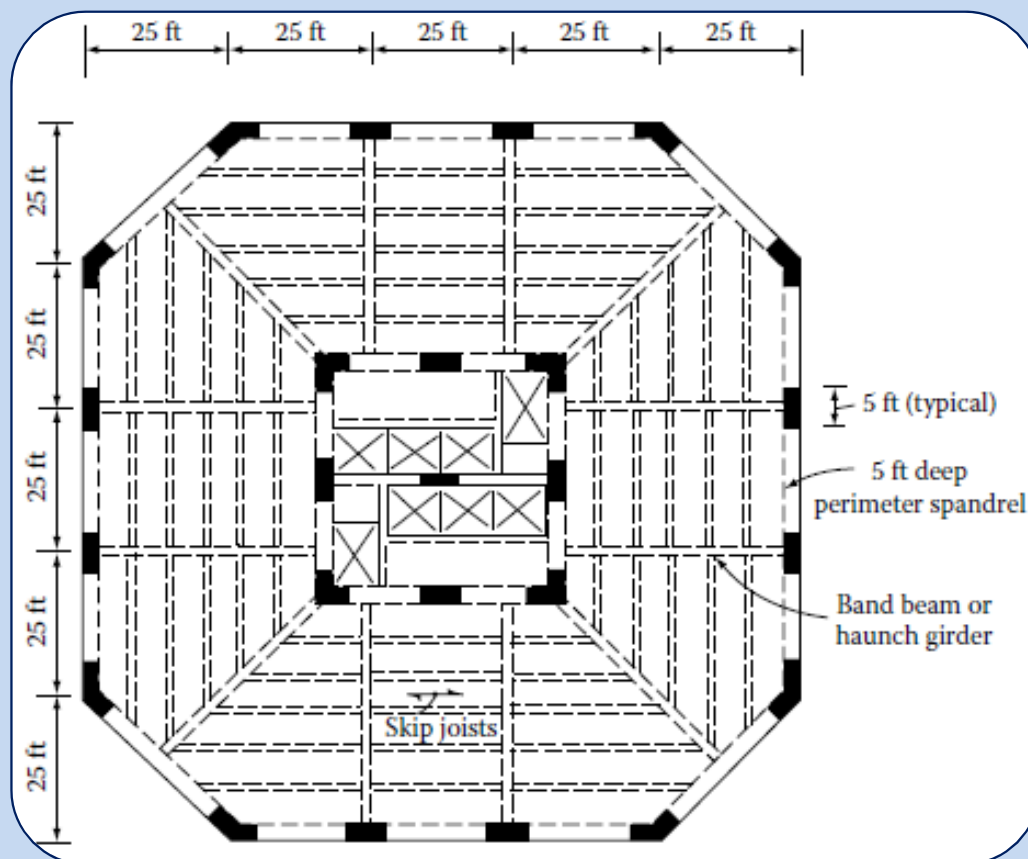


- Čelične konstrukcije: čvorovi u zavarenoj izvedbi, stupovi i grede većih izmjera
- jedno rješenje za čelične elemente: uporaba prefabriciranih elemenata okvira, spojevi u polju
- razmak stupova 1,5m do 5m, u prizemnim etažama transfer na veće raspone zbog potrebe za većim otvorima



Sustav sa većim razmakom stupova (Tube system with widely spaced columns)

- moguće je postići učinak cijevi i sa relativno dužim razmakom stupova, ali vrlo krutim prečkama i stupovima velikih dimenzija
- armirani beton: 28-katni neboder u New Orleansu sa stupovima širine 1,5 m postavljenim na međusobnom razmaku od 7,5 m, te povezanih gredama visine 1,5 m



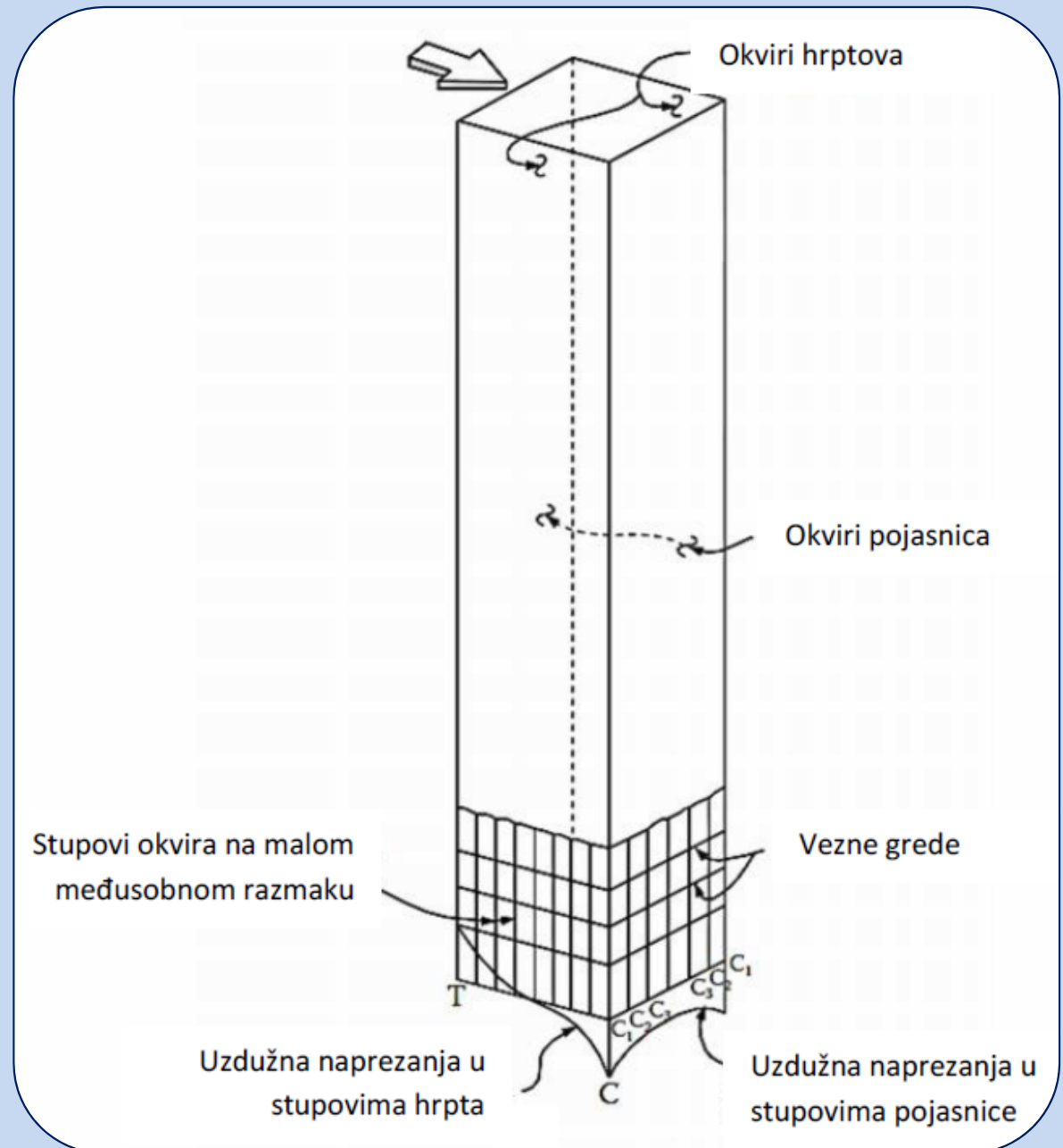
Proračun cijevnih sustava

- pretpostavlja se da je krutost međukatne konstrukcije velika pa se ploče ponašaju kao **krute dijafragme**
- stropne ploče tako **održavaju oblik presjeka** cijevi pri njenom savijanju i torziji
- stropna konstrukcija ne može osigurati vezu cijevnih okvira okomitih na djelovanje vjetra (pojasnica cijevi) i usporednih sa djelovanjem vjetra (hrptovi cijevi)
- okviri cijevi su zato izloženi djelovanjima u svojoj ravnini, dok su djelovanja izvan ravnine zanemariva
- kada je zgrada izložena horizontalnim opterećenjima, svrha stropne konstrukcije je uglavnom **prenijeti horizontalne sile na različite vertikalne elemente** (primjerice cijev u cijevi).
- iz ovih razloga međukatna konstrukcija može biti ista na svim katovima
- kod okvirnih cijevnih sustava čest je slučaj dvostruke simetrije obzirom na glavne osi u tlocrtu pa se ta simetrija može iskoristiti za pojednostavljenje proračunskog modela

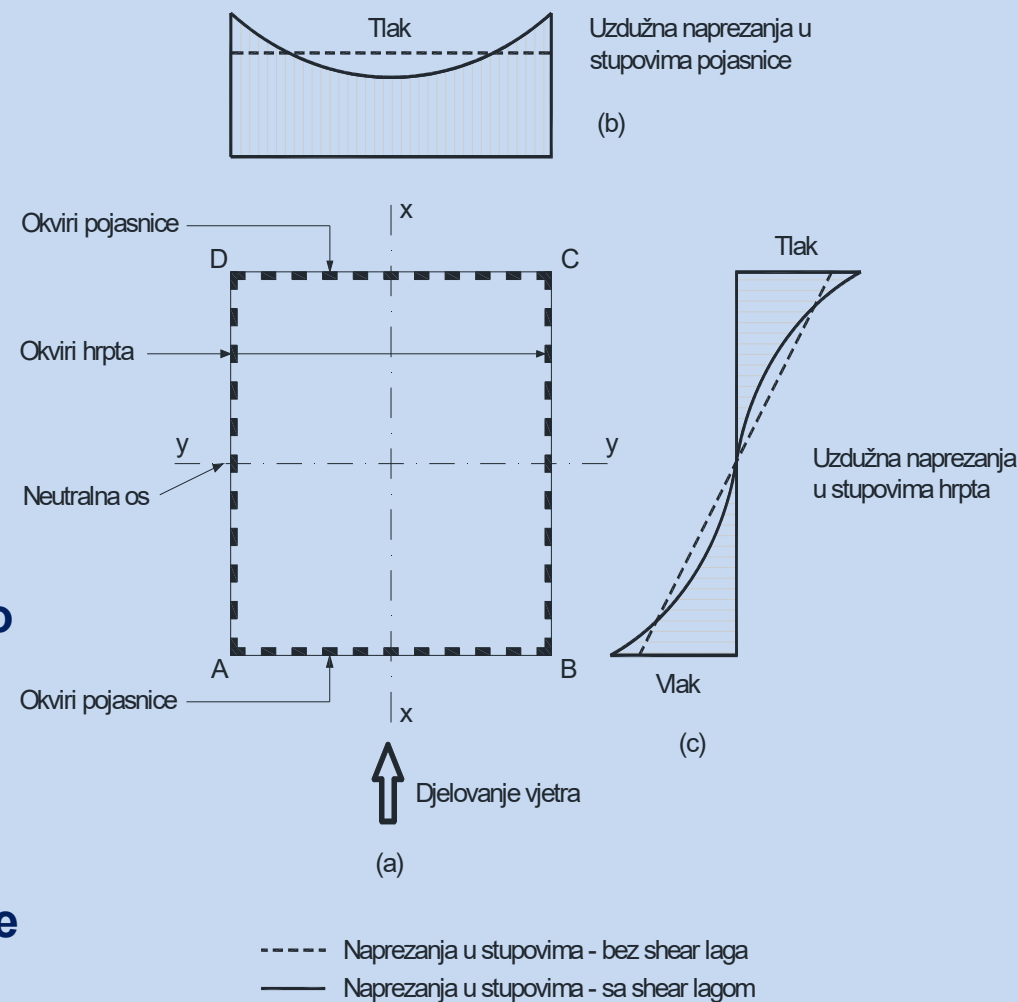
Shear lag efekt

- Učinak shear laga otkriven je još 1930-ih kod ispitivanja cijevnih nosača.
- Shear lag efekt javlja se kod mnogih vitkih cijevnih elementa izloženih horizontalnim djelovanjima (npr. kod krila zrakoplova ili kod sandučastih nosača mostova).
- Javlja se također u konstrukcijskim elementima zgrada kao što su zidovi ili okviri cijevnih sustava.
- Prema Bernoullijevoj hipotezi pri savijanju nosača ravni poprečni presjeci ostaju ravni i okomiti na savijenu os nosača.
- Ova pretpostavka može biti točna samo u slučaju ako je posmična krutost poprečnog presjeka šupljeg nosača beskonačno velika ili u slučaju da na nosač ne djeluje posmična sila.
- Ako posmična sila postoji, javlja se posmični tok duž pojasnica i hrptova, a time i efekt shear laga.

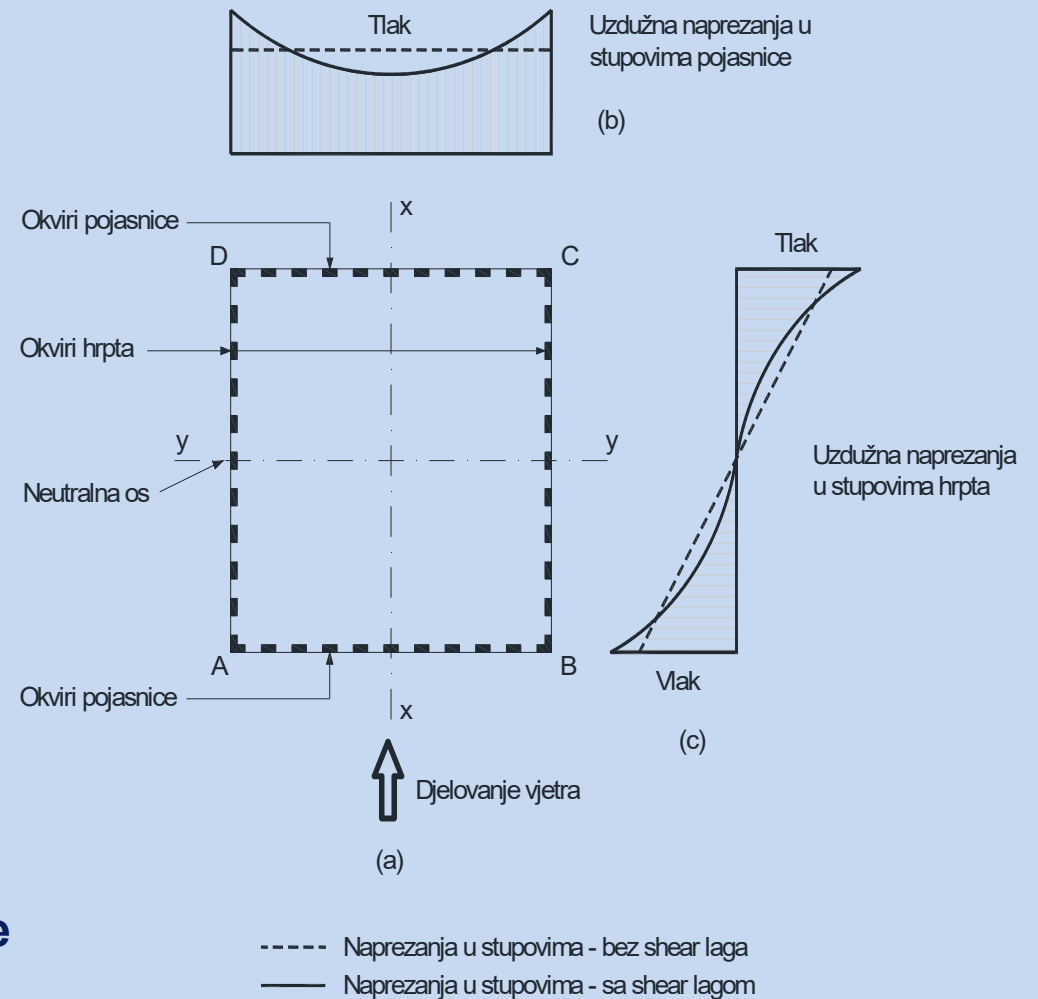
- za okvirnu cijev izloženu horizontalnom opterećenju normalni naponi u kutnim stupovima na dnu su najveći i raspodjela je nelinearna i za okvir koji djeluje kao hrbat (paralelno smjeru opterećenja) i za okvir koji djeluje kao pojas (okomito na smjer opterećenja).
- Razlog je tome što naprezanja u stupovima prema sredini okvira zaostaju za onima prema rubovima jer trpe od deformacija uzrokovanih posmikom u ravnini plohe okvira
- te posmične deformacije rezultiraju manje opterećenim srednjim stupovima



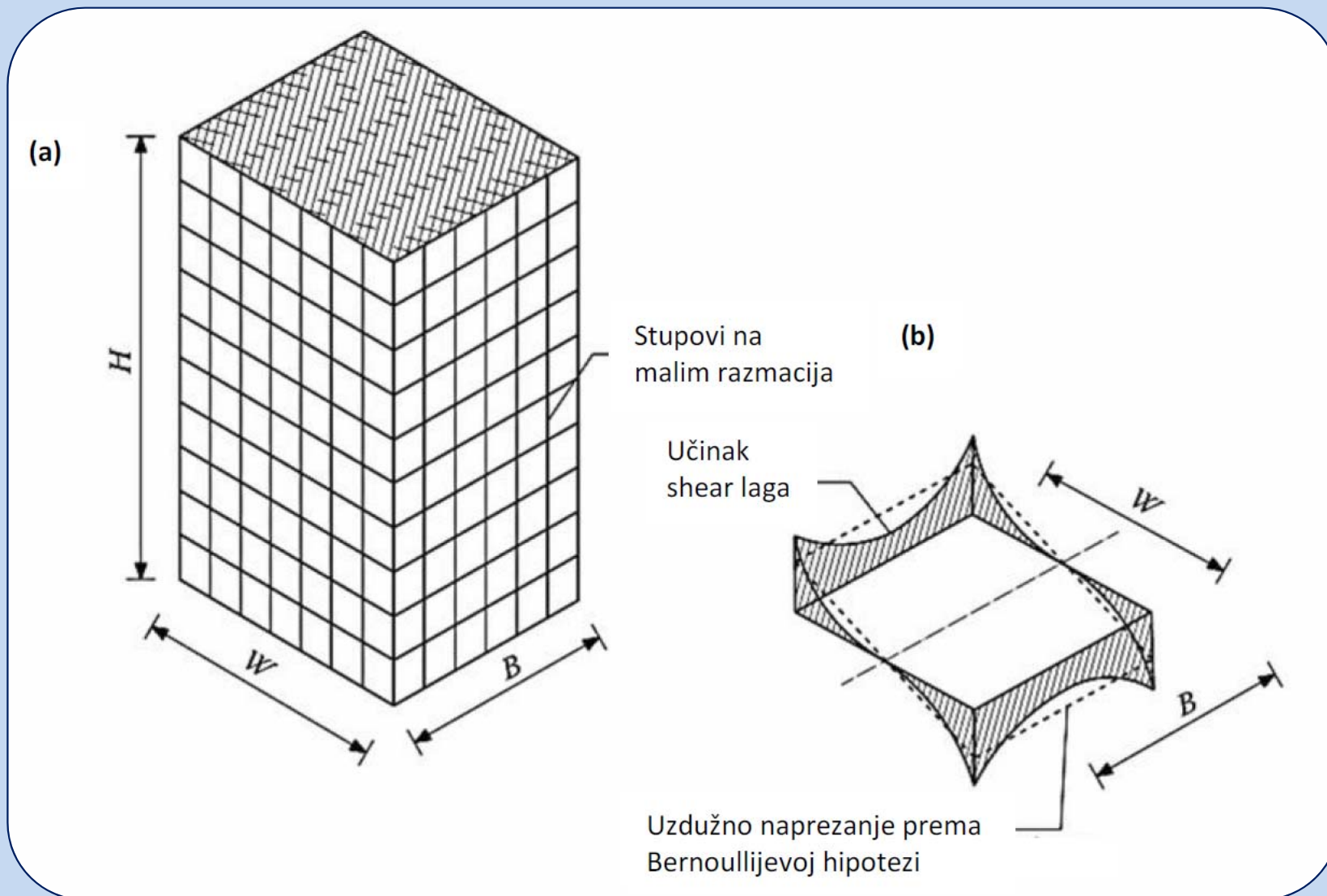
- Promatramo li vertikalnu konzolnu cijev koja se savija zbog djelovanja horizontalnog opterećenja, stupovi na stranama usporednim na neutralnu os izloženi su vlačnim i tlačnim silama kao pojas presjeka
- Okviri paralelni sa smjerom djelovanja horizontalnog opterećenja (okviri AD i BC) izloženi su savijanjima i posmiku u ravnini kao hrbat presjeka
- Vezne grede opterećene posmičnom deformacijom od shear laga se savijaju kao i grede u bilo kojem okviru
- Fleksibilnost i deformacija veznih greda uzrokuje shear lag koji povećava naprezanja u kutnim stupovima te smanjuje naprezanja u unutrašnjim stupovima panela pojasnice (AB i DC) i panela hrptova (AD i BC)



- Osnovna otpornost na horizontalna djelovanja ostvaruje se hrptovima koji se deformiraju tako da su stupovi A i B u vlaku, a stupovi D i C u tlaku.
- Osnovna interakcija između hrpta i pojasnice ostvaruje se preko vertikalnih pomaka kutnih stupova.
- Ovi pomaci uzrokuju vertikalni posmik u gredama pojasnica DC i AB koji one dalje prenose u stupove pojasa prema sredini presjeka kao uzdužnu silu
- Zbog toga što se posmična deformacija greda akumulira prema sredini presjeka, svaka slijedeća uzdužna sila u stupu biti će manja – svaki slijedeći stup manje se uzdužno deformira

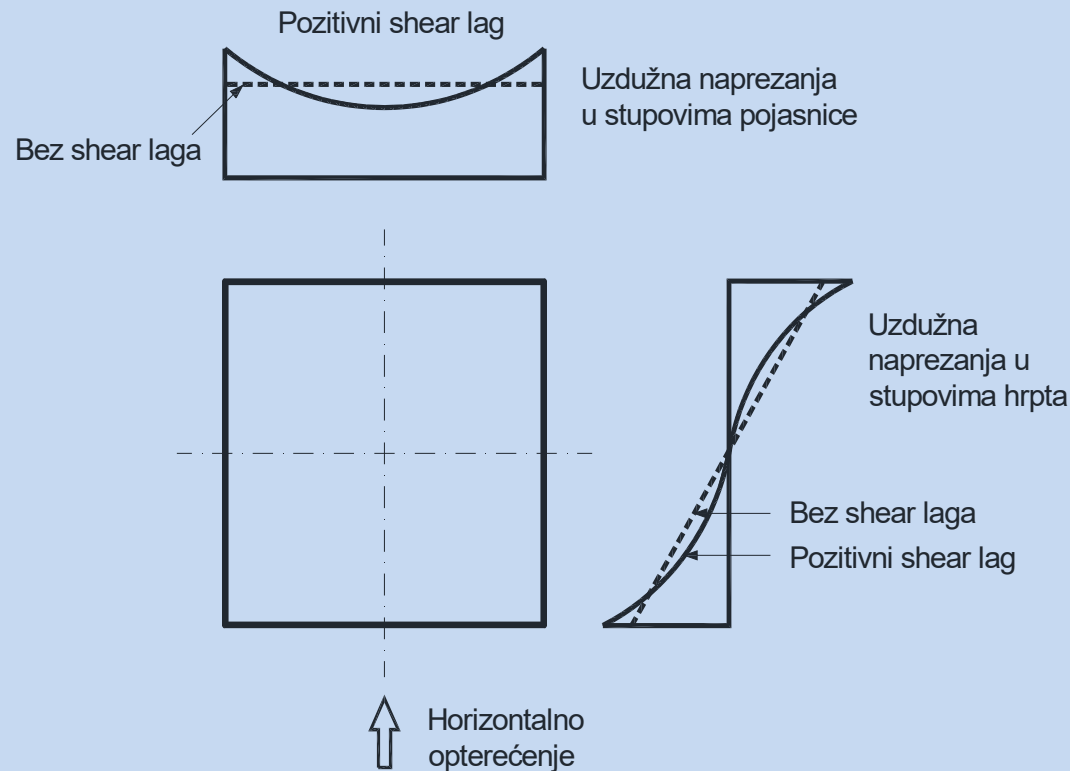


- efekt shear-laga smanjuje učinkovitost sandučastog presjeka povećavajući koncentraciju naprezanja na spojevima pojasnica i hrptova i smanjujući uzdužna naprezanja u sredini pojasnica



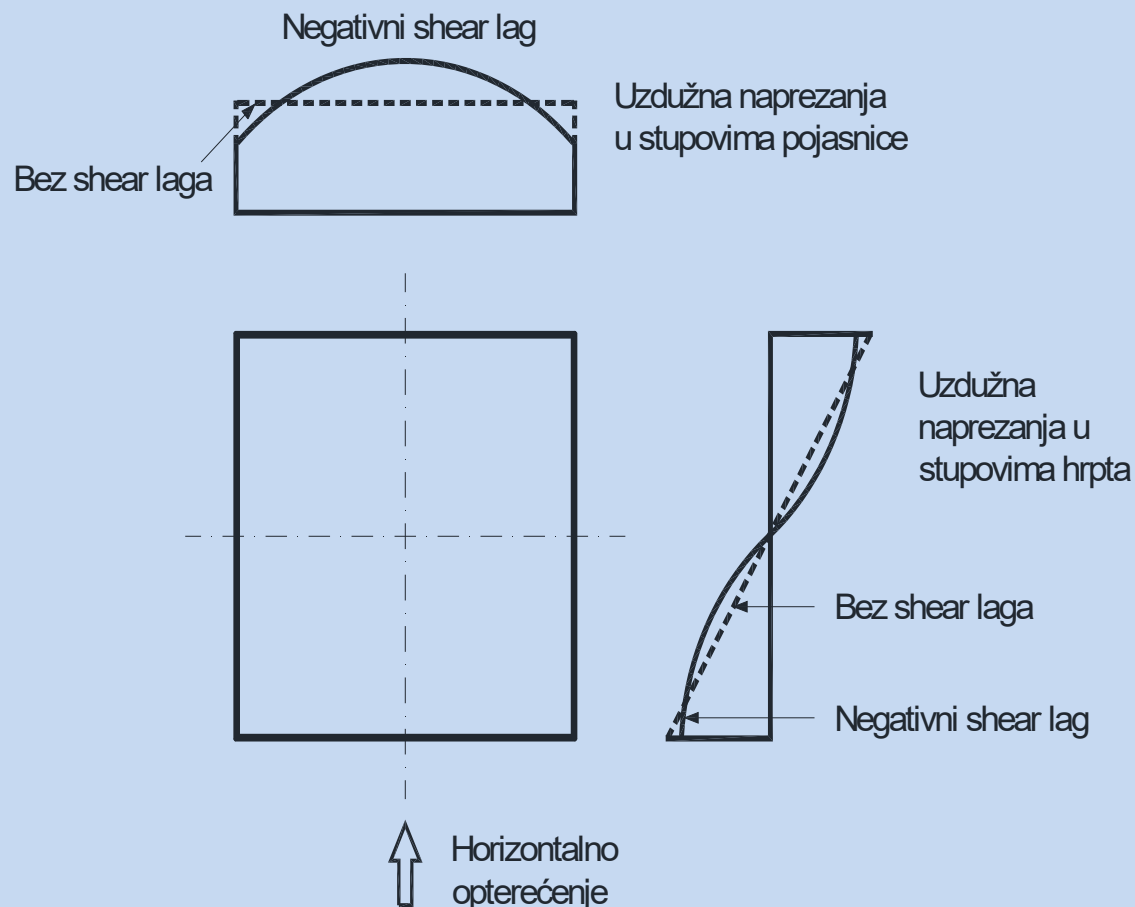
- Efekt shear laga karakterizira nejednolika raspodjela uzdužnih sila ili naprezanja u stupovima pojasnica vanjske cijevi i/ili nejednolika raspodjela naprezanja u hrptovima vanjske cijevi.
- Razlikuju se dva moguća oblika shear laga u cijevnim konstrukcijskim sustavima

(a) pozitivan shear lag



Kod pozitivnog shear laga kutni stupovi cijevi, izloženi savijanju, preuzimaju veće uzdužne sile u odnosu na srednje stupove cijevi.

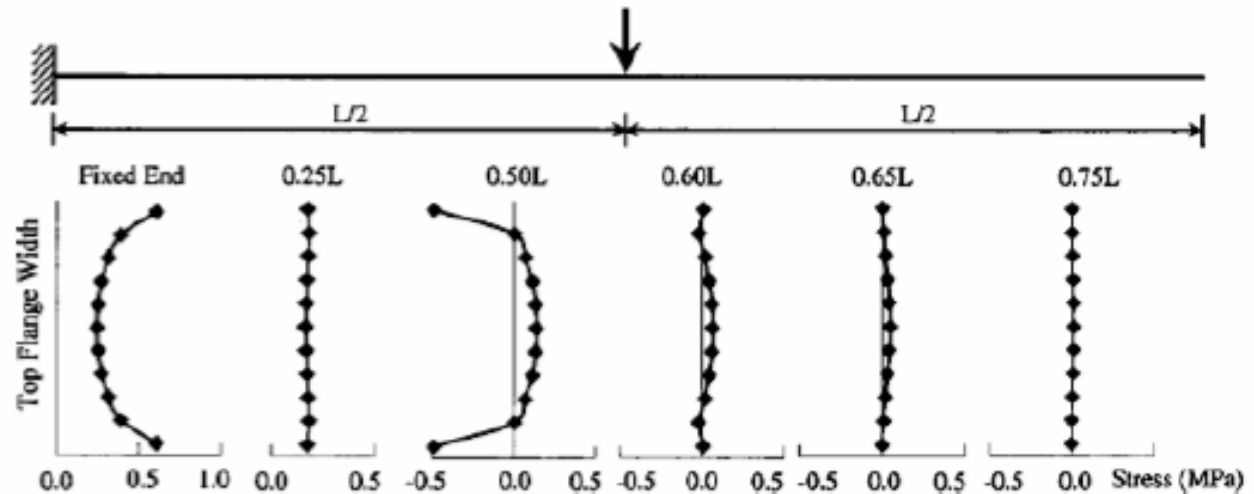
(b) negativan shear lag



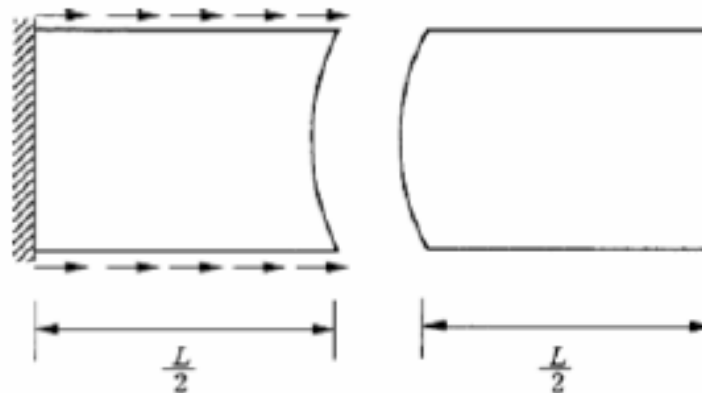
Kod negativnog shear laga veće uzdužne sile preuzimaju stupovi cijevi koji se nalaze u sredini. Negativan shear lag karakterističan je samo za konzole (što visoke zgrade i jesu).

(b) negativan shear lag

naprezanja u gornjem pojasu

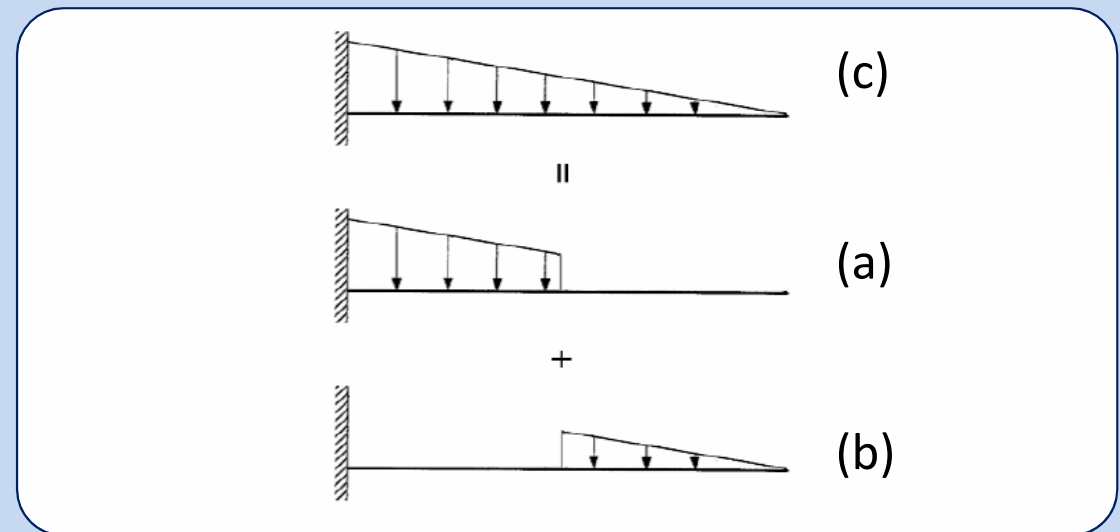


deformacija gornjeg pojasa

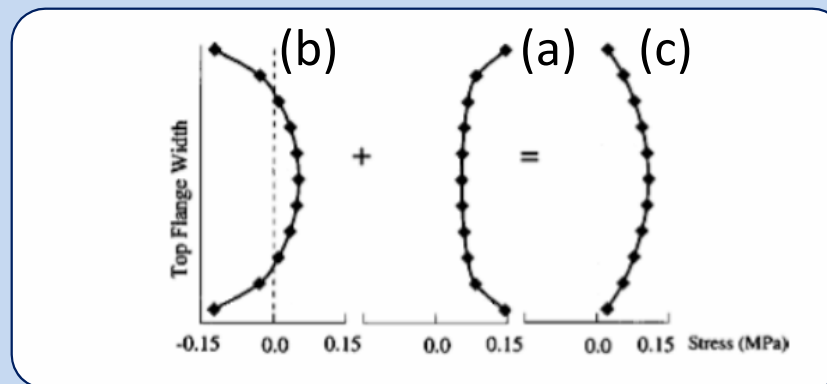


Na udaljenosti većoj od četvrtine dužine nosača mjereno od upetog kraja, naprezanje uzrokovano savijanjem u kutovima poprečnog presjeka izmjereno je manje od naprezanja u sredini pojasnice. Ovo naprezanje javlja se zbog kompatibilnosti pomaka – presjek konzole je na njenom kraju uvijek ravan.

kontinuirano opterećenje se može rastaviti na dio koji uzrokuje pozitivni i dio koji uzrokuje negativni shear lag

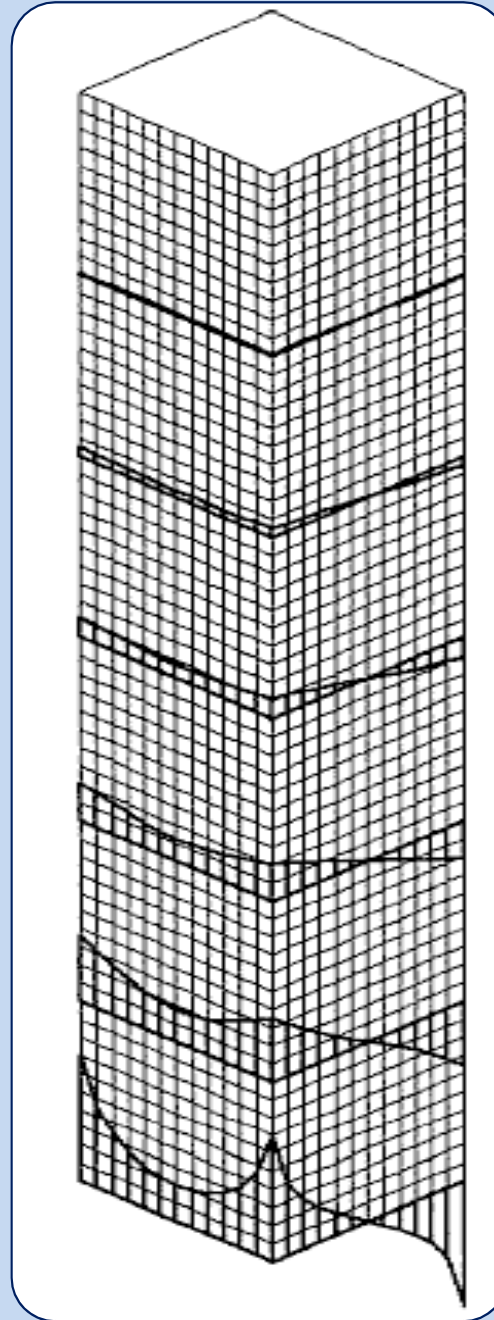


rezultanta naprezanja na sredini konzole



Konačan shear lag (c) će biti negativan samo ako su utjecaji koji ga uzrokuju (b) veći od utjecaja koji uzrokuju pozitivan shear lag (a)

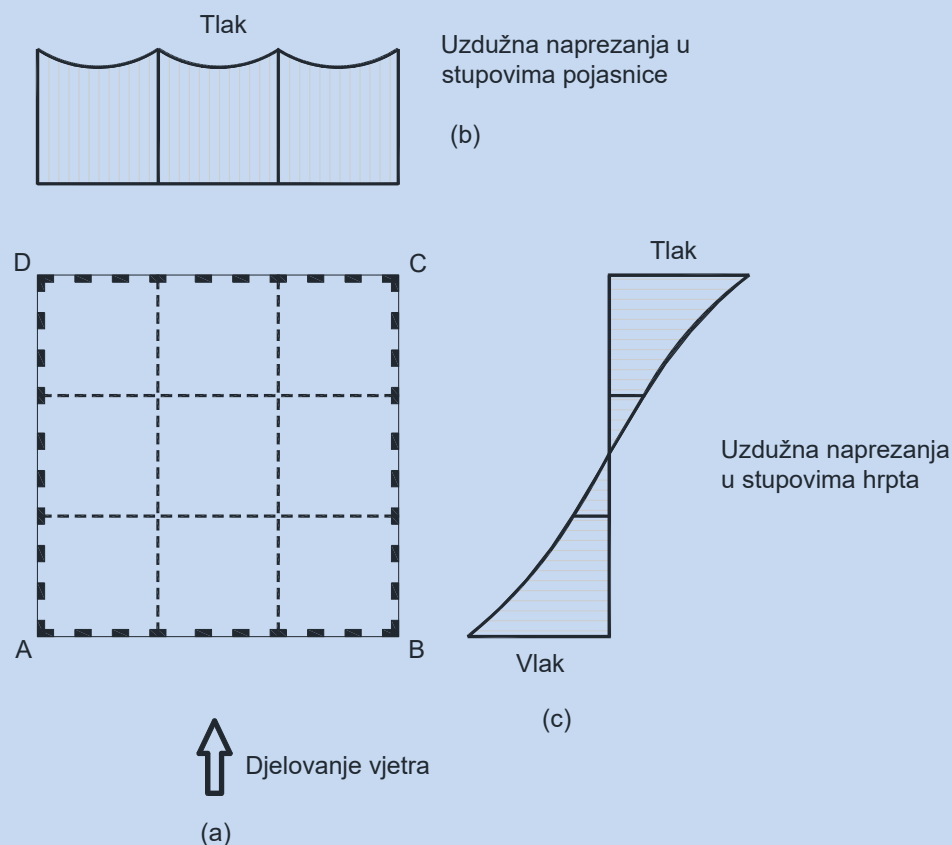
Promjena učinaka shear laga po visini cijevne konstrukcije



- Efekt sheat laga će uzrokovati i savijanje podnih konstrukcija, obzirom da ravni poprečni presjeci više ne ostaju ravni.
- Posljedice su deformacije unutarnjih pregrada i sekundarnih konstrukcijskih elemenata, koje se kumulativno povećavaju s visinom zgrade.
- Zbog toga je od iznimne važnosti predvidjeti točno ponašanje konstrukcijskog sustava kako bi se ostvarila njegova najveća moguća učinkovitost.

➤ Shear lag se može smanjiti na slijedeće načine:

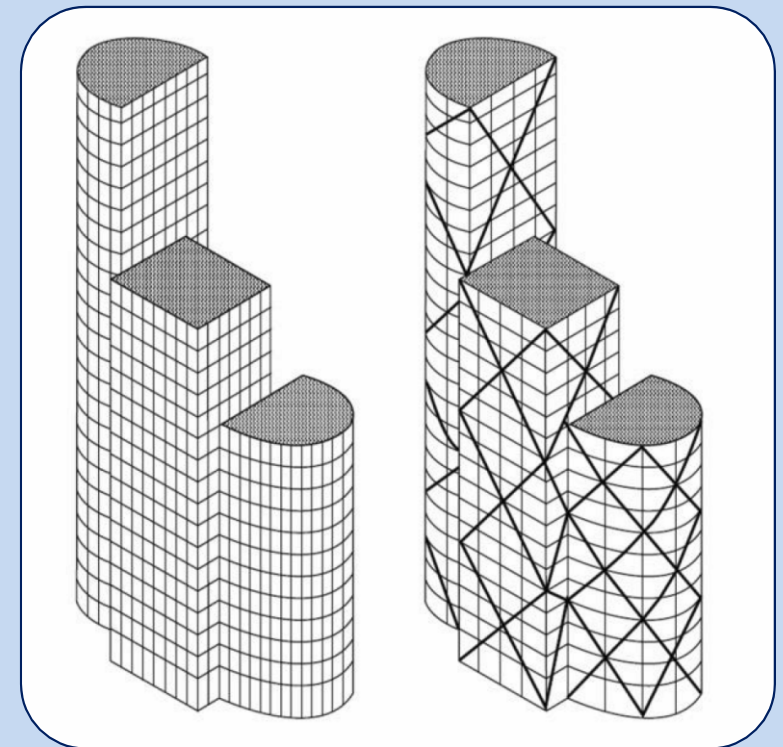
1. tako da se poveća broj polja obodnog okvira cijevi (povećava se krutost okvira)
2. uporabom dodatnog konstrukcijskog sustava uz sustav okvirne cijevi (npr. jezgra)
3. posmična krutost okvirne obodne cijevi može se povećati dodavanjem dijagonala na obodnu okvirnu cijev građevine
4. dodavanjem rešetki (engl. outrigger) po obodu zgrade u razini jednog ili više kata
5. dodavanjem unutarnjih okvirnih panela (povezane cijevi):



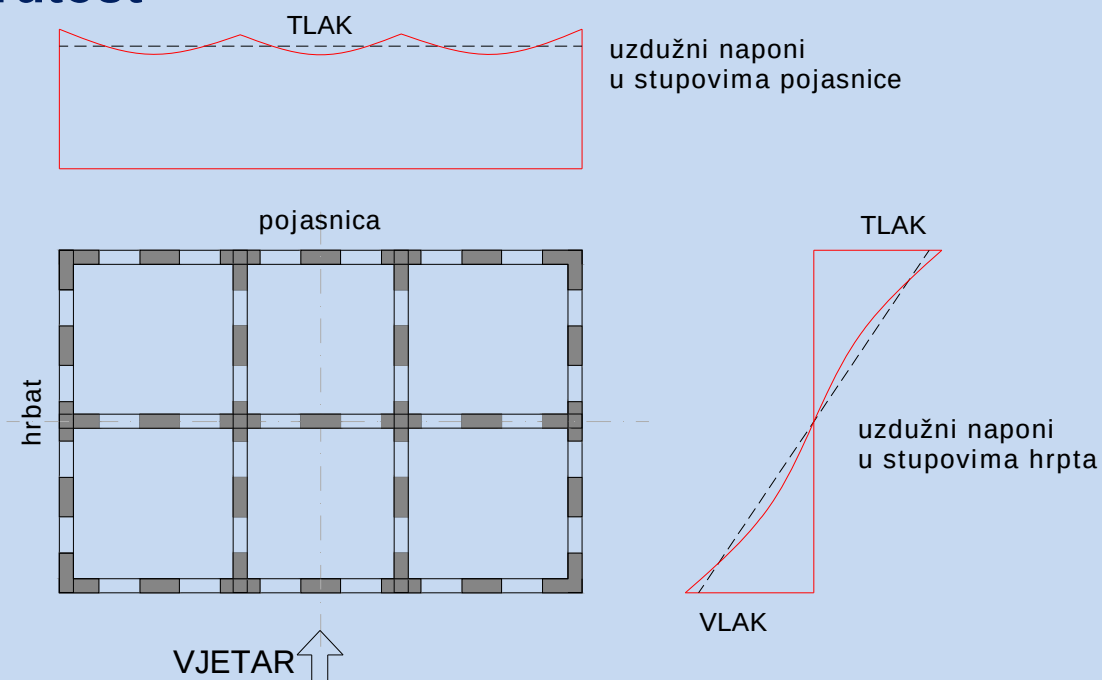
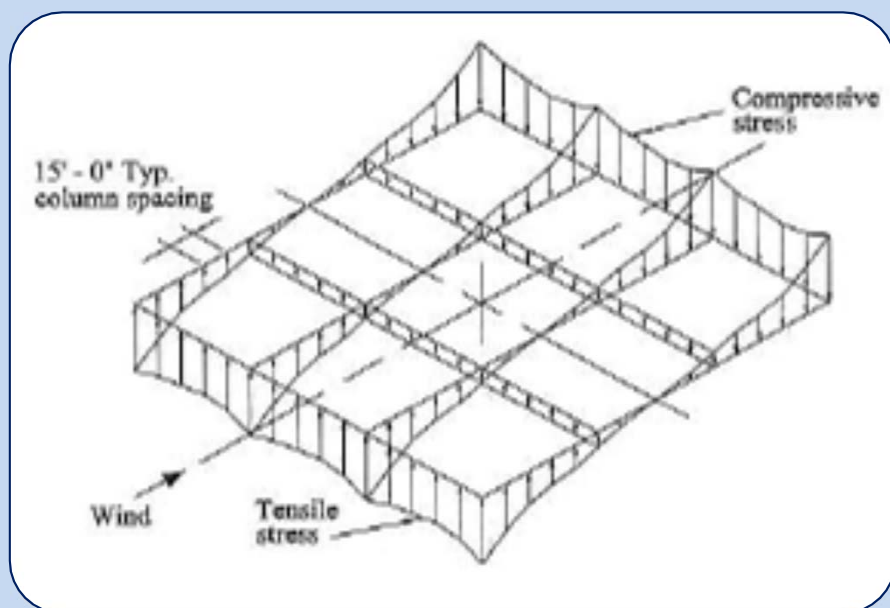
Povezane okvirne cijevi

- sustav međusobno povezanih cijevi nastaje spajanjem dviju ili više pojedinačnih cijevnih struktura
- povezane cijevne konstrukcije ostvaruju veću krutost od pojedinačne cijevi
- glavna prednost u odnosu na pojedinačne okvirne cijevi: smanjivanje efekta shear laga
- velika krutost stropnih ploča u ravninama prisiljava unutarnje okvire hrptova na savijanje jednako onom vanjskih hrptova (raspodjela opterećenja na hrptove)
- Posmično djelovanje koje prenosi svaki hrbat proporcionalno je njegovoj lateralnoj krutosti

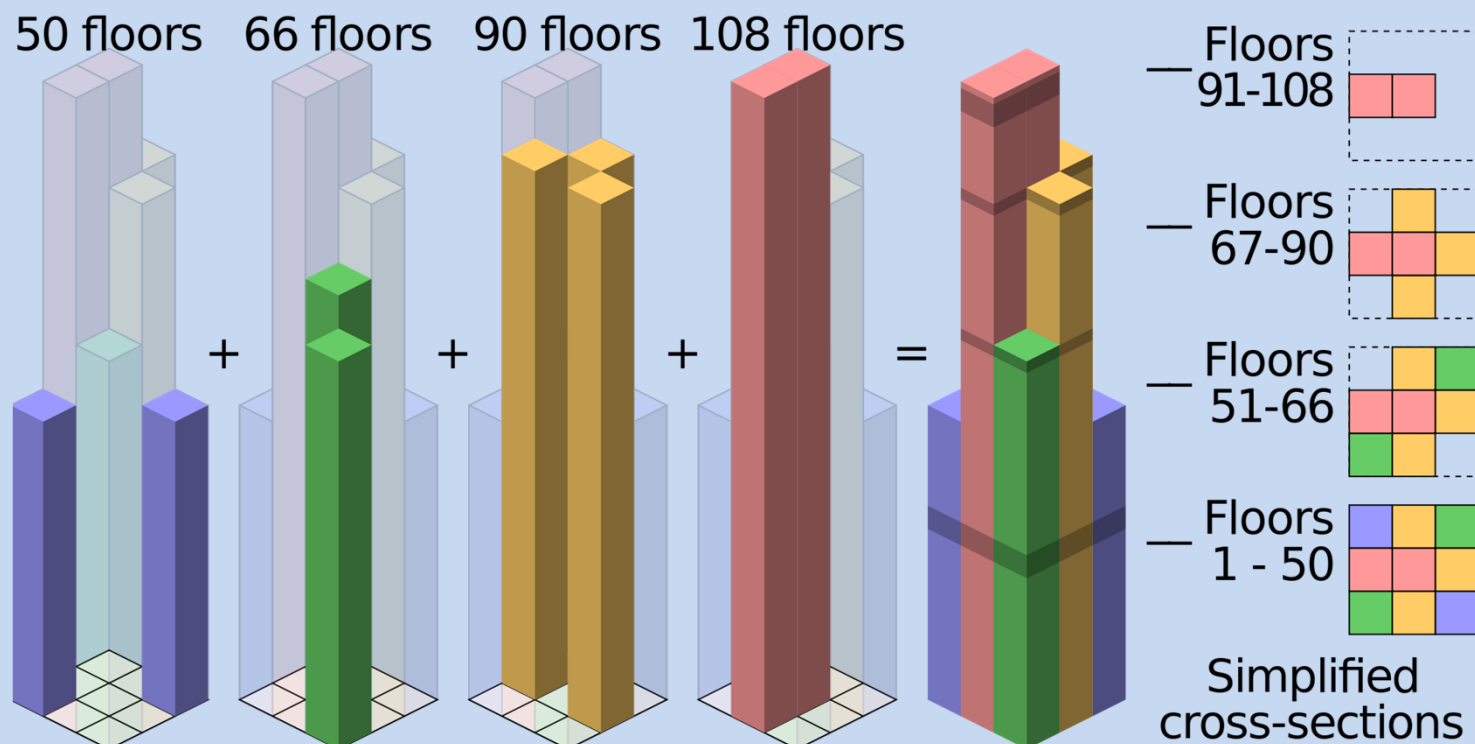
- Obzirom da se krajnji stupovi unutarnjih hrptova pomiču izravno u smjeru hrptova, oni će biti izloženi većem naprezanju u odnosu na stupove kod obične nepovezane okvirne cijevi, kod koje se ti stupovi neizravno pomiču zbog povezanosti sa vanjskim hrptovima preko veznih greda



- unutrašnji hrptovi bitno smanjuju utjecaj posmične deformacije (shear lag) u pojasevima
- naprezanja u stupovima raspoređena su ravnomjernije nego kod konstrukcijskog sustava s jednom cijevi
- ostvaruju mnogo veću fleksijsku krutost nego jedna cijev, međutim na račun ograničenja u unutrašnjem planiranju prostora
- veći razmaci stupova i pliće grede koje su dopuštene efikasnim sustavom povezanih okvirnih cijevi omogućuju veće prozorske otvore nego što je to moguće kod pojedinačnih okvirnih cijevi
- prednost sustava: velika torzijska krutost

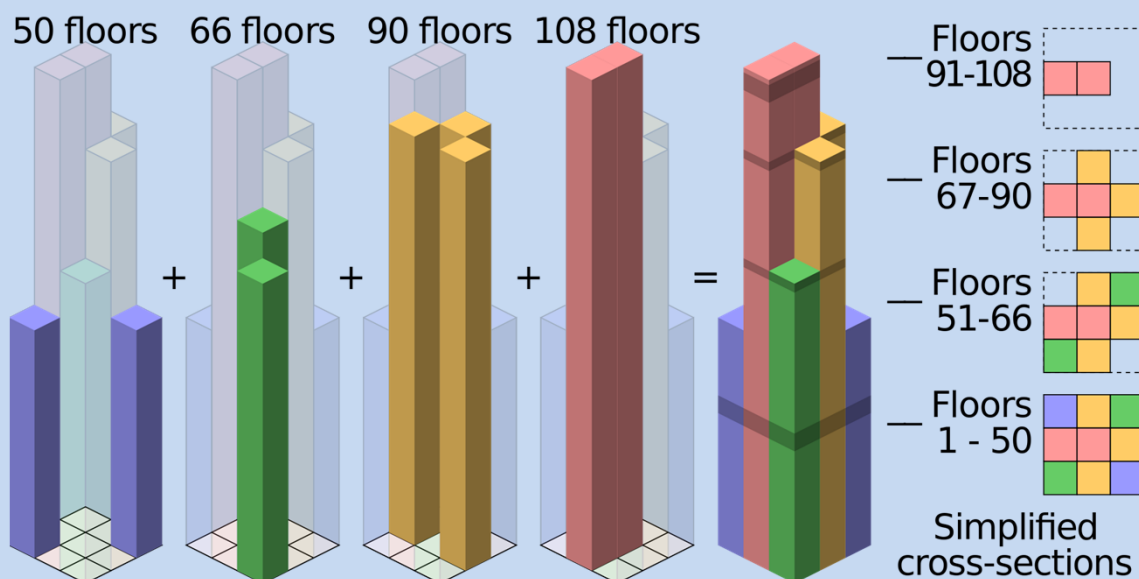


- Kod sustava povezanih cijevi promjene u tlocrtu mogu se izvoditi znatno jednostavnije
- Visina pojedinačne cijevi može biti prekinuta na bilo kojoj razini bez utjecaja na cjelovitost konstrukcijskog sustava.
- Učincima torzije koji se javljaju zbog nesimetričnosti konstrukcije odupiru se zatvoreni presjeci pojedinih modula



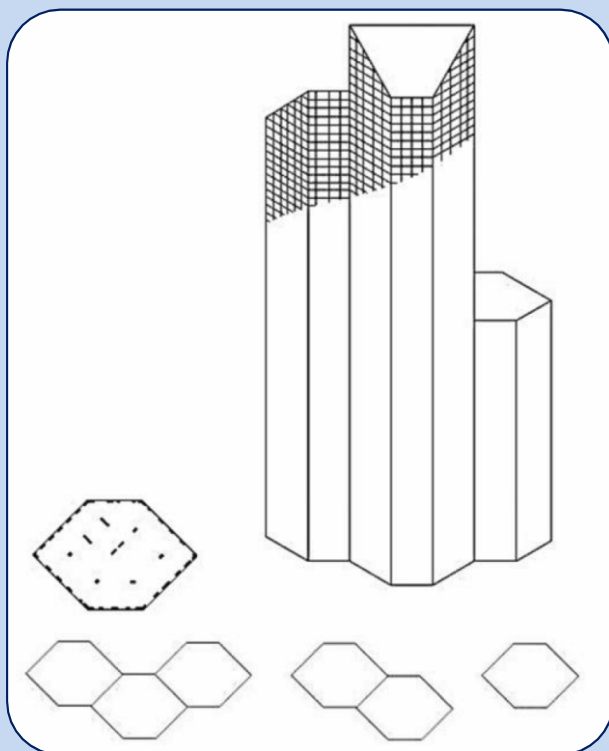
Sears (Willis) Tower

- Sa 108 katova i 442m visine bila je to najviša zgrada svijeta sve do izgradnje 'Petronas Towersa' u Maleziji 1998. g.
- i danas najviši neboder konstruiran 'čistom' čeličnom konstrukcijom, dok svi ostali viši neboderi imaju konstrukciju u kombinaciji sa betonom
- povezano je 9 cijevnih modula kvadratnog tlocrta sa stranicom duljine 22.86 m
- fasadni zidovi – stijenke cijevi formirani od stupova na osnom razmaku od 4,7m i visokih greda u razini svakog kata



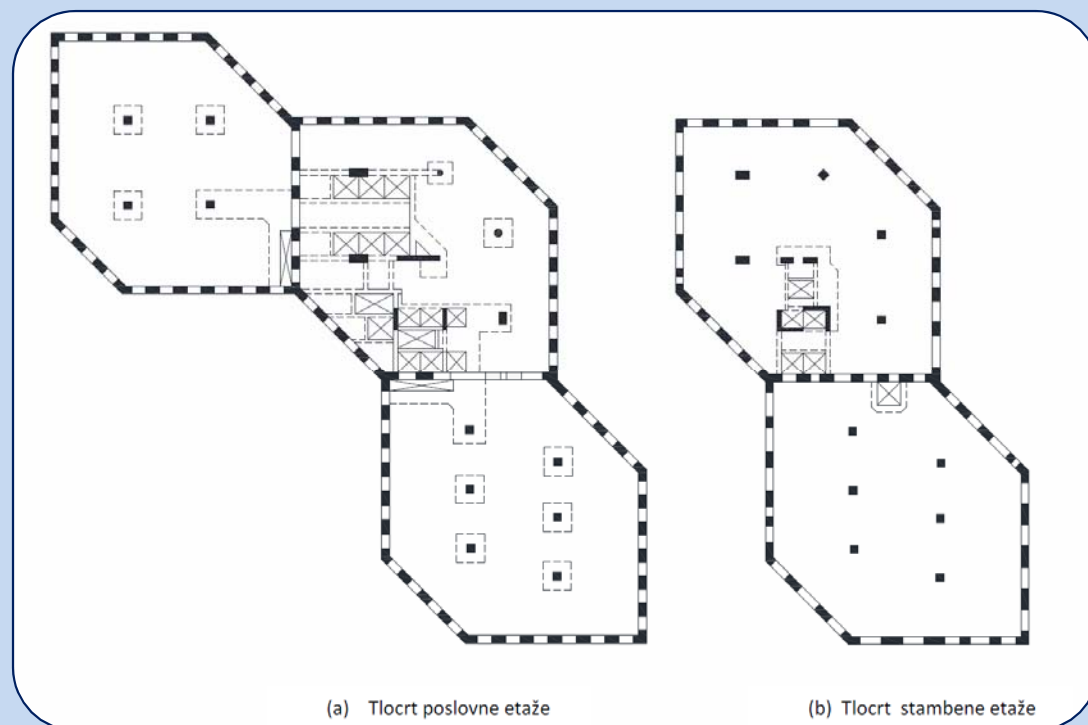
One Magnificent Mile, Chicago, 1978

- višenamjenska građevina, sadrži parkirališta, trgovine, poslovne i stambene prostore
- Niže etaže konstrukcije namijenjene su za parkirna mjesta, dok se stambeni prostori nalaze iznad 22. etaže u sjevernoj i južnoj cijevi.
- Sve tri cijevi namijenjene su za poslovne prostore. Trgovine se protežu kroz 7 etaža i smještene su na sjevernoistočnom dijelu zgrade.



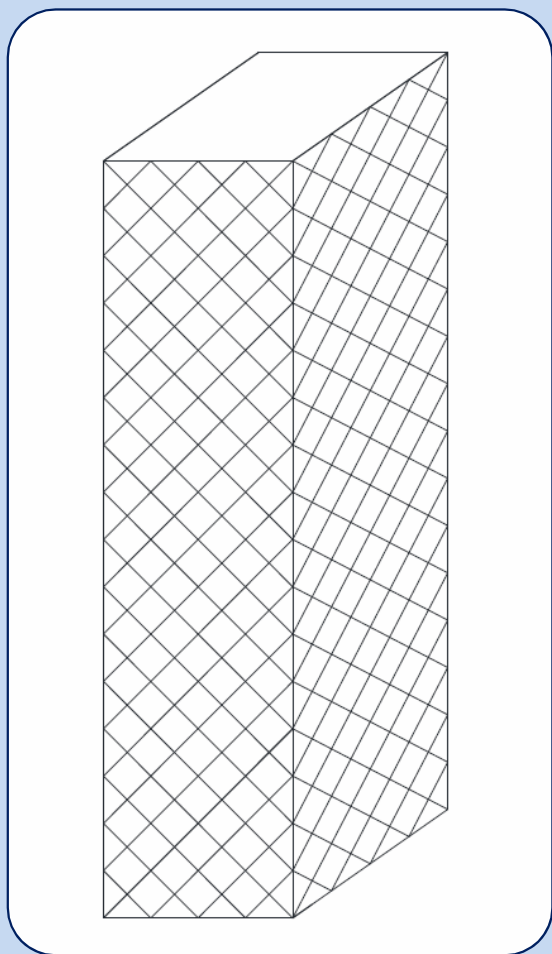
One Magnificent Mile, Chicago, 1978

- Konstrukcijski sustav se sastoji od tri međusobno povezane, približno šesterokutne armiranobetonske okvirne cijevi.
- Najviša cijev ima 57 katova, dok preostale dvije cijevi imaju 22 i 49 katova. Ukupna visina građevine je 205 metara.
- U zapadnoj cijevi razmak unutarnjih stupova iznosi 9,15 m x 9,15 m. U sjevernoj cijevi smještene su vertikalne komunikacije (dizala i stubišta). Kod južne cijevi odabrani su razmaci unutarnjih stupova 6,1 m x 9,15 m.
- Na stambenim etažama razmaci obodnih stupova variraju od 0,76 m do 2,74 m, na poslovnim etažama oni iznose 3,05 m, dok na etažama namjenjenim za parkiranje i trgovinu obično iznose 6,10 m.



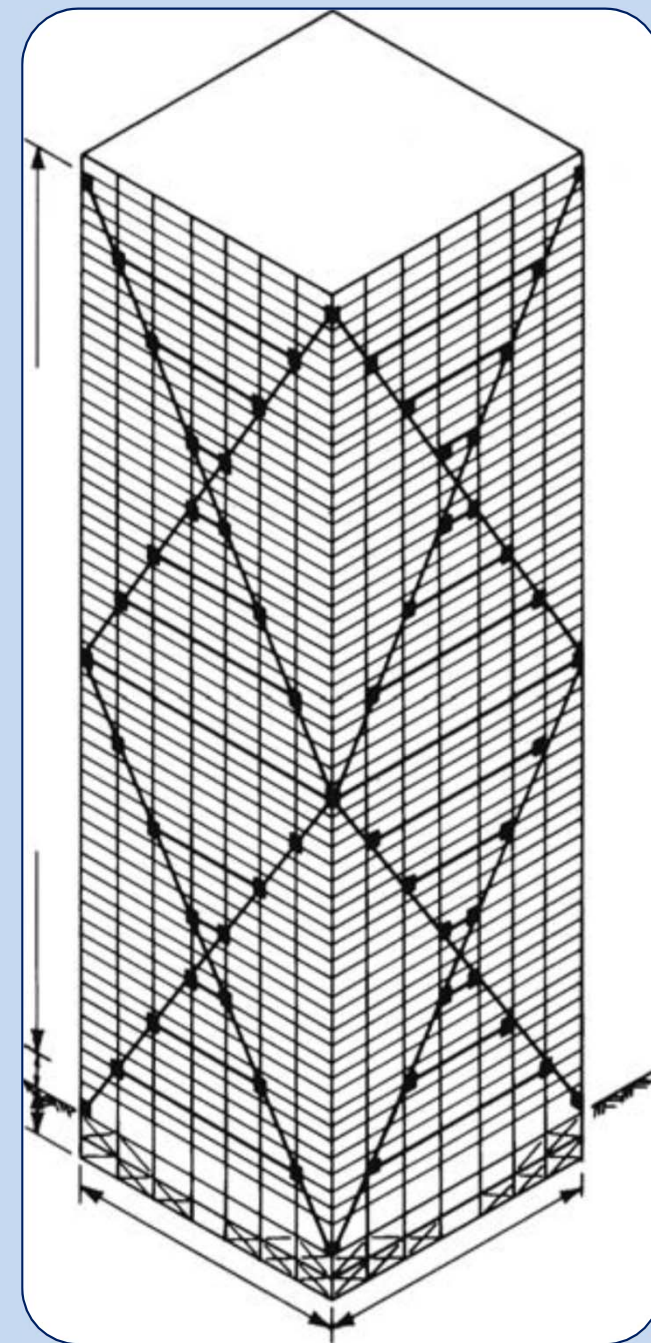
Cijevi sa dijagonalama

- **Konstruktivski sustav koji se ponaša vrlo slično savršenoj konzolnoj cijevi može se dobiti uklanjanjem svih vanjskih stupova okvira te dodavanjem dijagonala u dva smjera postavljenih na dovoljno malim razmacima kako bi predstavljale nosive zidove.**
- **Povezivanjem dijagonala u njihovim sjecištima te u sva četiri kuta zgrade, konstrukcija će se ponašati kao kruta cijev pri djelovanju horizontalnih sila.**

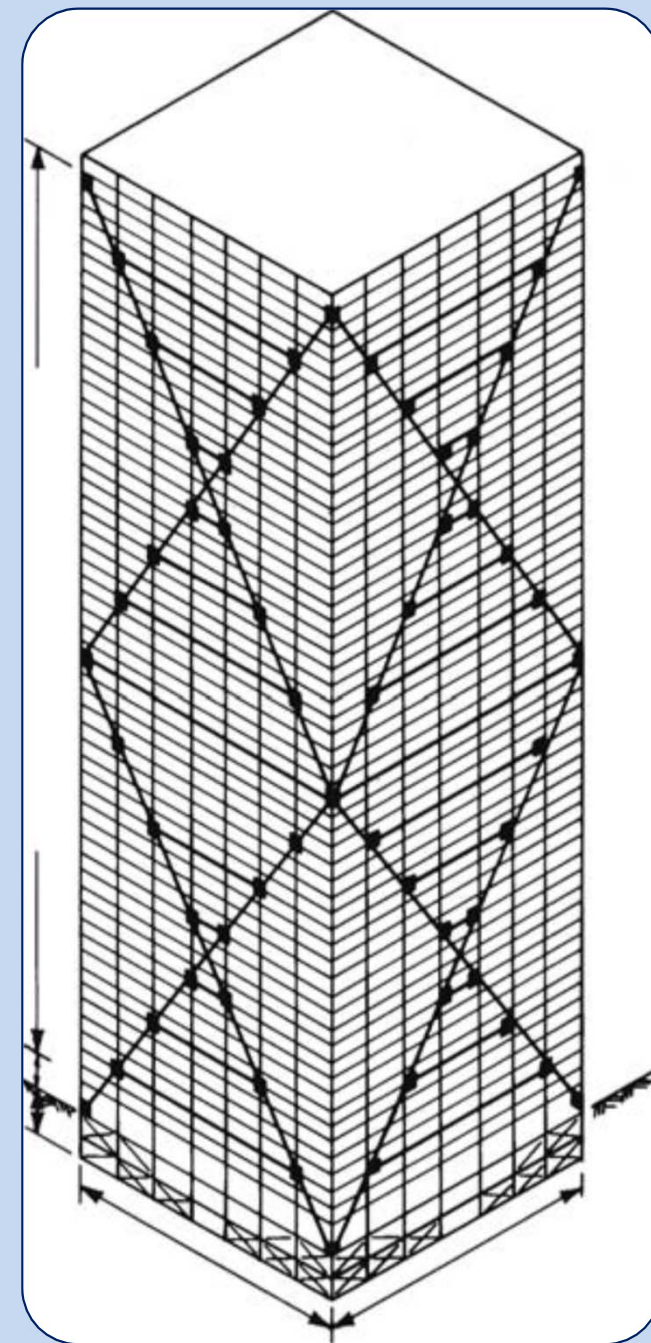


- **Želja da što većom krutosti cijevne konzole i manjim utjecajem shear laga daje ovakav sustav**

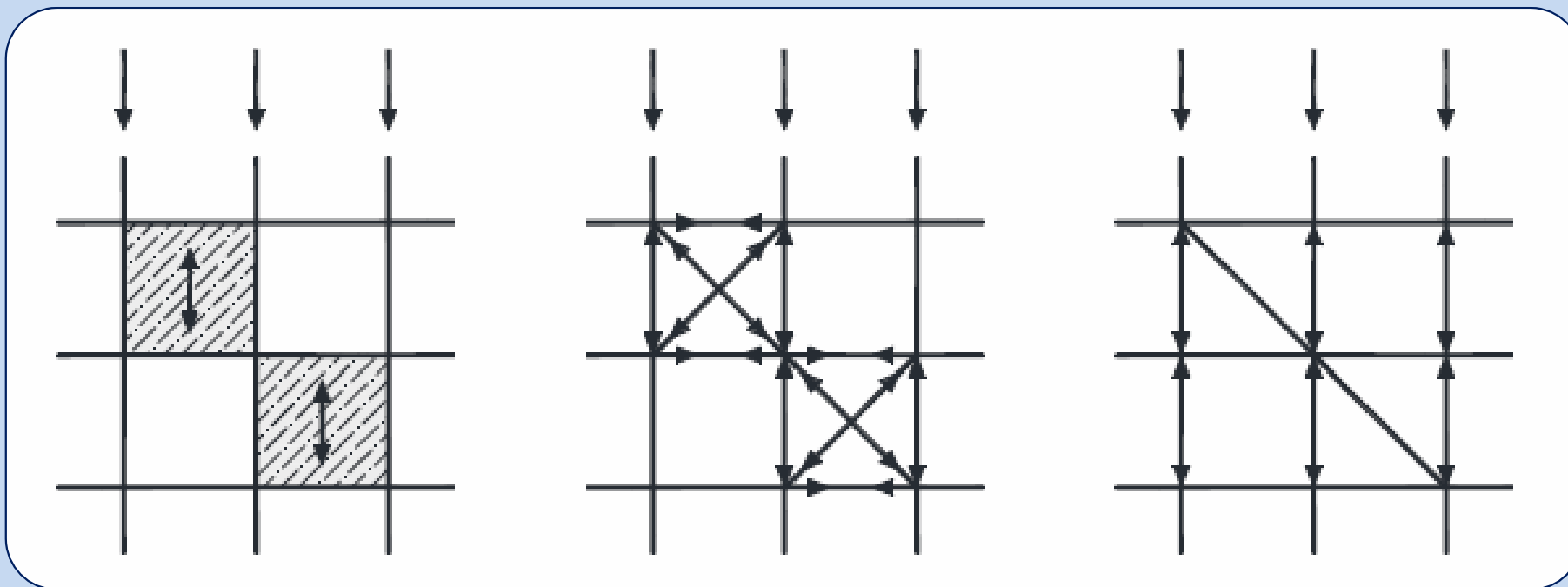
- Međutim, kod takvog sustava, zbog velikog broja čvorova dijagonala, javlja se konstrukcijski nedostatak da se kod vertikalnog opterećenja povećava komponente sila u elementima dijagonala, što zahtjeva veće poprečne presjeke dijagonala u odnosu na sustave s vertikalnim elementima.
- Zbog toga je bolje rješenje za povećanje učinkovitosti okvirne cijevne konstrukcije dodavanje dijagonalnih elemenata na stupove i grede vanjske cijevi.
- Vanjski stupovi tada će biti na većem međusobnom razmaku, a dijagonale, obično nagnute pod 45° , povezuju stupove i vezne grede te zajedno formiraju okvirnu cijev sa spregovima.
- Spregovi osiguravaju zajedničko djelovanje vanjskih stupova pri pružanju otpornosti gravitacijskim i horizontalnim silama.



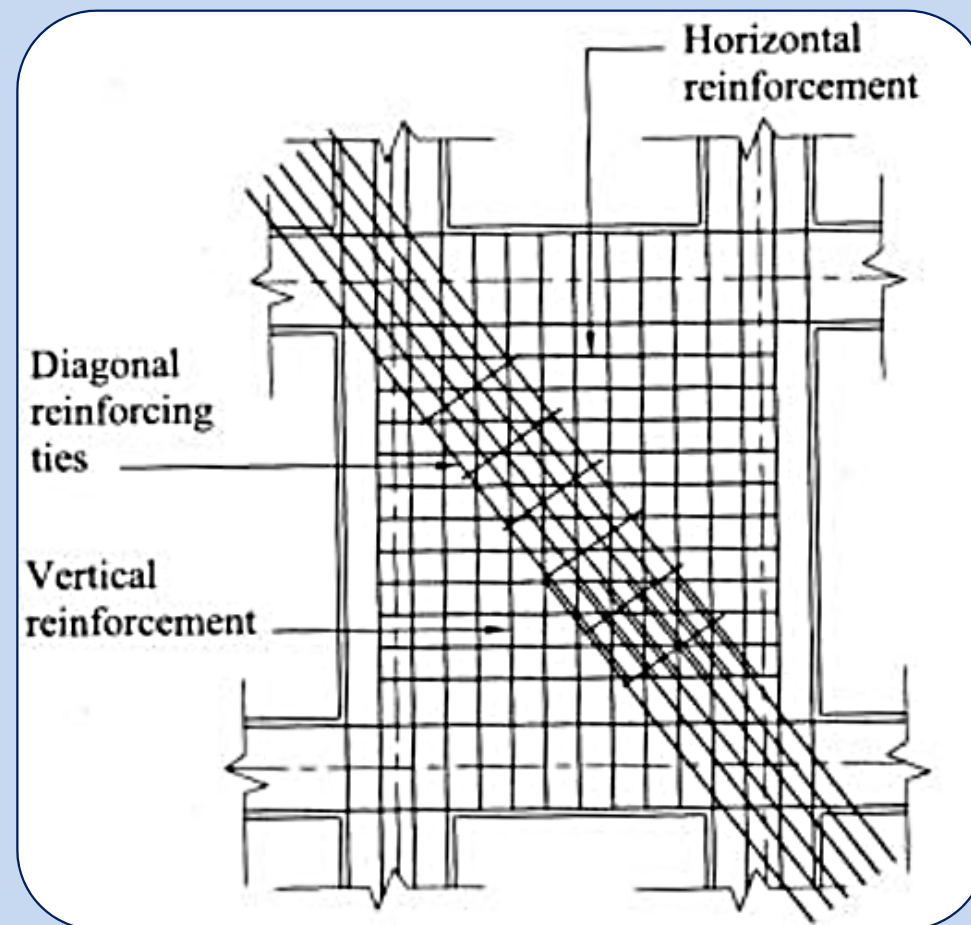
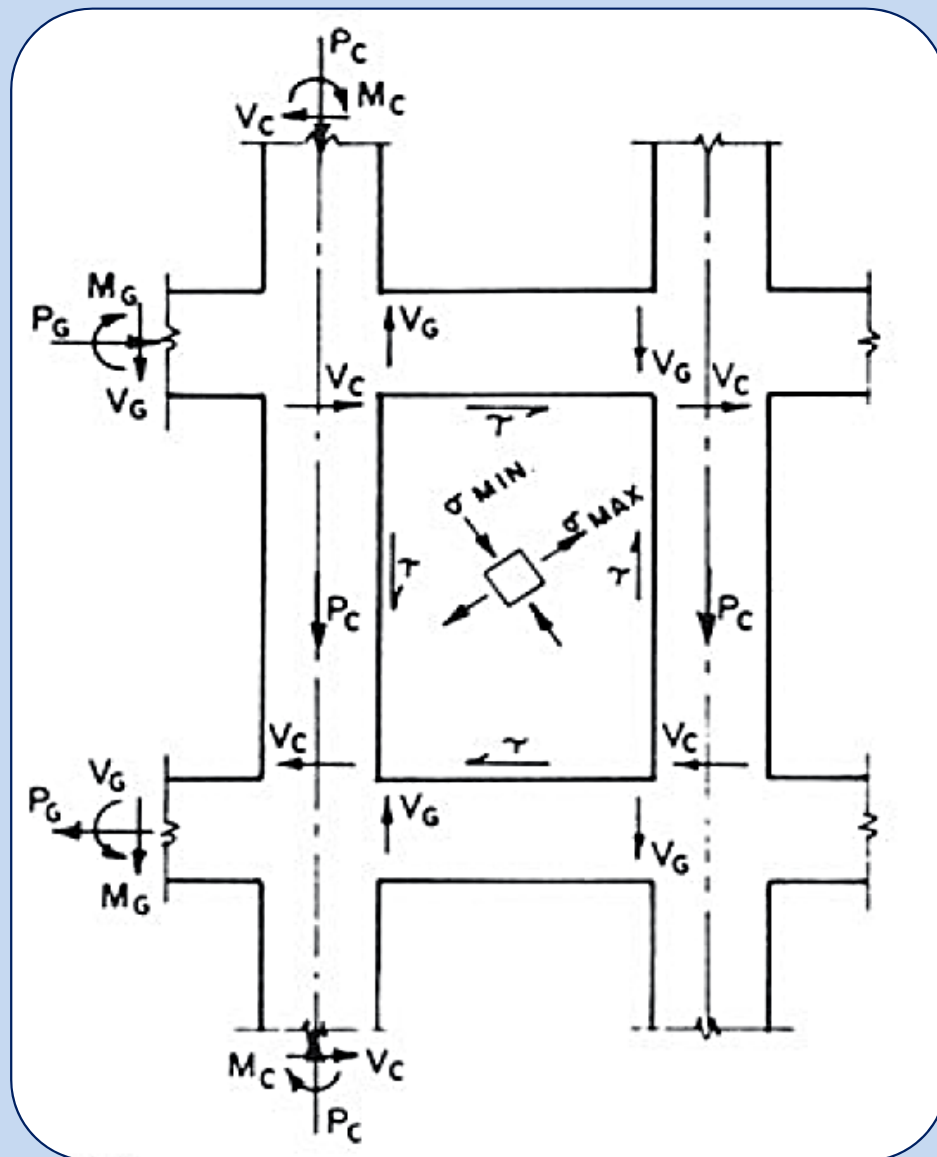
- dijagonale su spojene su na stupove na svakom križanju
- često se koristi za pravokutne tlocrte sa omjerom stranica većim od 1:2.5
- poboljšavaju učinkovitost običnih okvirnih cijevi
- omogućuju konstruiranje viših zgrada s većim razmacima stupova okvira



- Kod ovirnih cijevi s dijagonalama, sve četiri strane građevine značajno doprinose horizontalnoj otpornosti zgrade.
- Kod čeličnih cijevnih sustava, dijagonale su sastavljene od dodatnih čeličnih elemenata pričvršćenih na stupove i vezne grede.
- Kod armiranobetonskih cijevnih sustava, dijagonale se formiraju betonskom ispunom prozorskih otvora između stupova i veznih greda.
- U proračunskom modelu, paneli dijagonala modeliraju se kao membrane pločastih konačnih elemenata ili kao dijagonale unutar jednog polja okvira



- Sile koje se javljaju u ispuni cijevnog okvira uzrokovane horizontalnim opterećenjem i armatura



- dijagonale preuzimaju dio horizontalnog bočnog opterećenja, sudjeluju u prijenosu gravitacijskog opterećenja, prenose aksijalno opterećenje sa više na manje opterećene stupove pa pospješuju efikasnost srednjih stupova
- smanjuju ili eliminiraju utjecaj shear laga pojasnim okvirima,
- povećavaju krutost hrptenih okvira za prijenos posmika
- konstrukcijski sklop se za bočna (horizontalna) djelovanja ponaša slično kao okvir sa spregovima
- stupovi mogu biti postavljeni na većem razmaku, što omogućuje mnogo veće prozore nego kod konvencionalnih cijevi (John Hancock zgrada: razmak stupova na široj fasadi 12.2m, na užoj 7.62m)

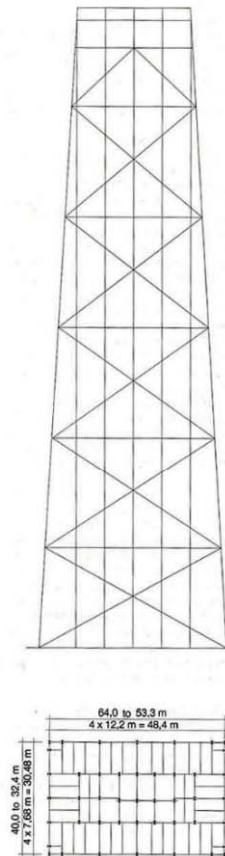


Prva čelična cijev sa spregovima:

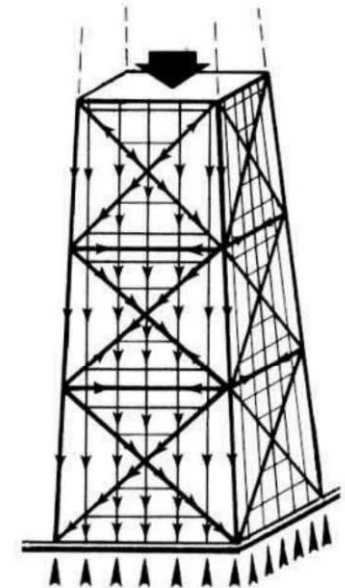
zgrada John Hancock,
97 katova, Chicago



John Hancock Center



SOM / Bruce Graham / Fazlur Khan

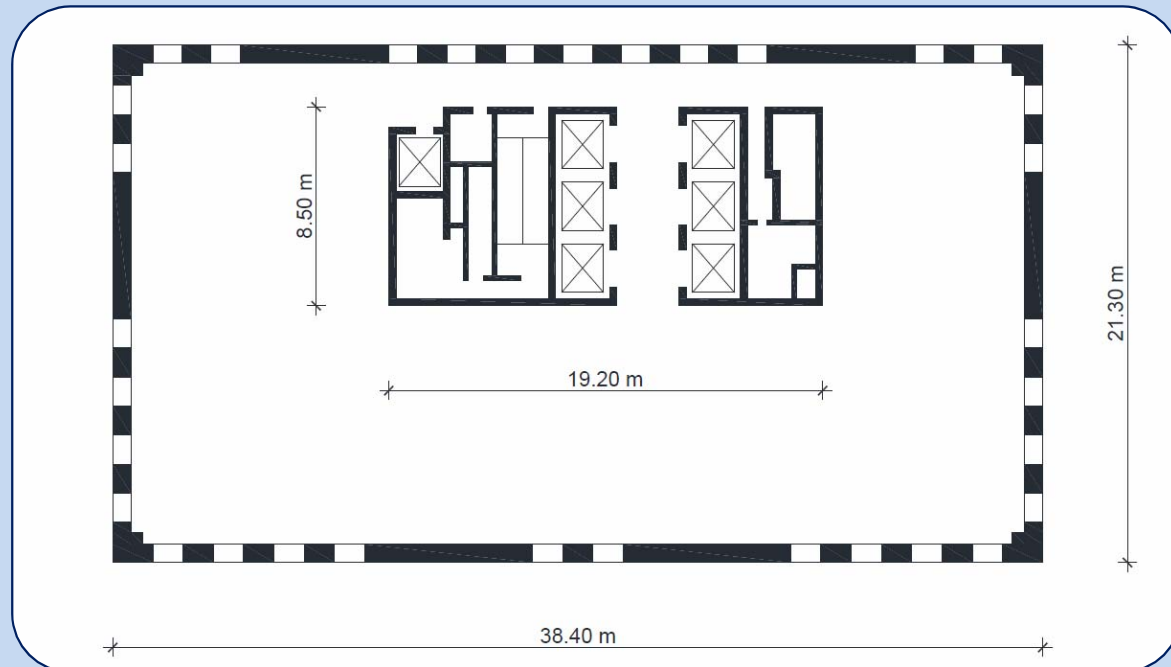


Chicago

1970

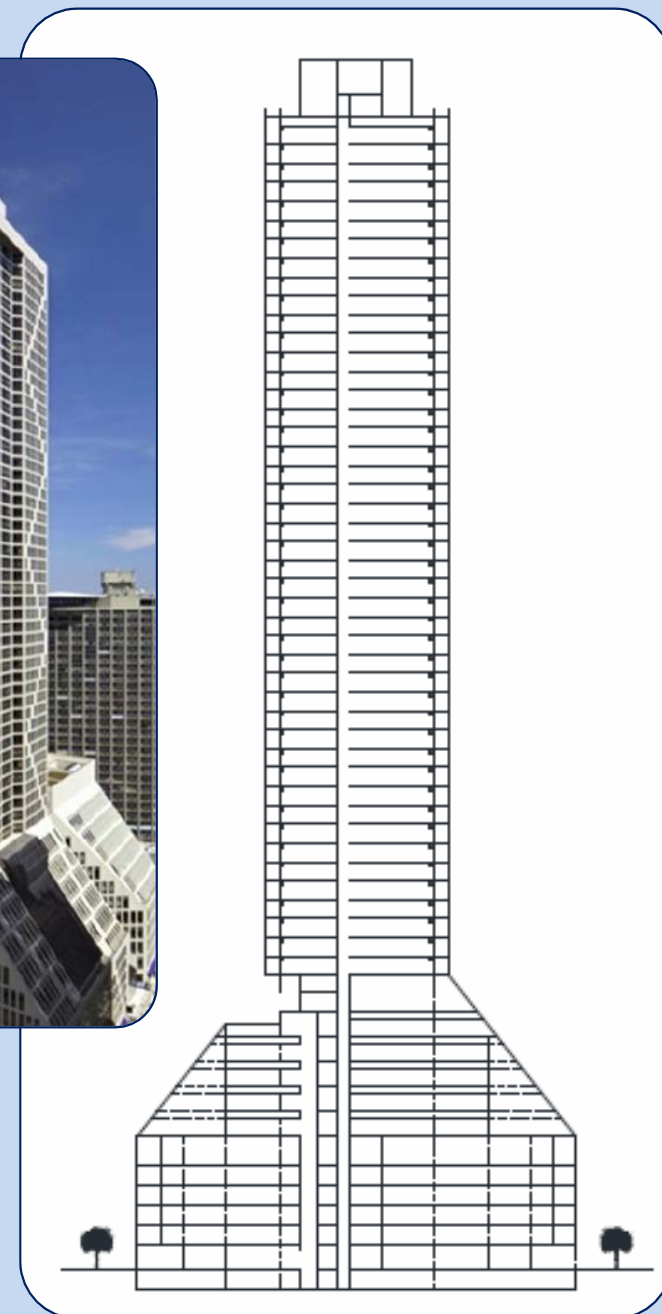
780 Third Avenue, New York, 1983.

- prva je cijevna konstrukcija sa betonskim dijagonalama koje se nalaze na obodu
- Sastoji se od 48 etaža, a ukupne je visine oko 174 metra. Tlocrno je pravokutnog oblika, dimenzija 21,30 m x 38,40 m.
- Zatvarajući prozorske otvore cijevi, inženjer Falzur Kahn, kreirao je dijagonalne spregove u ravnini vanjskih panela.



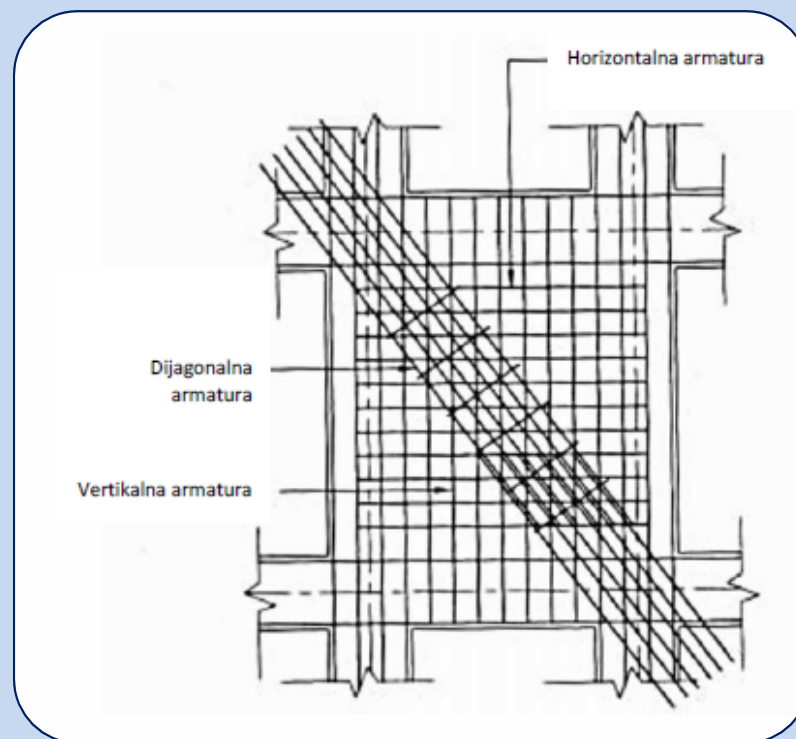
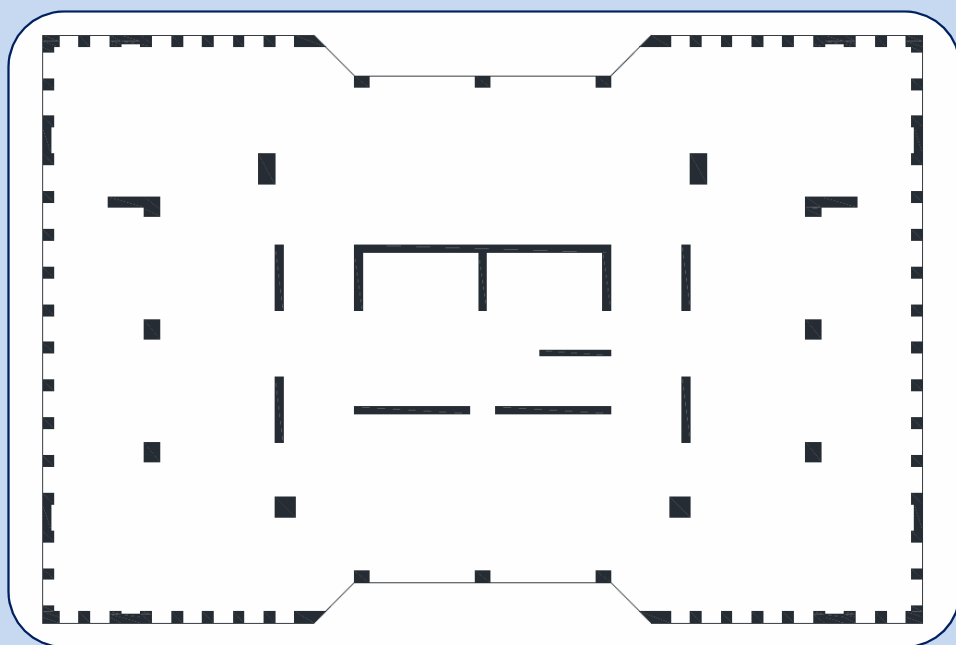
Onterie Center, Chicago

- armiranobetonski sustav okvirnih cijevi s dijagonalama.
- dva dijela – glavni tornj od 58 katova i donji zakošeni dio čiji se tlocrt smanjuje s visinom i koji ima 12 katova.
- Zgrada je podijeljena na pet različitih područja ovisno o namjeni prostora.
- Različita namjena prostora po visini zahtjeva fleksibilnost u rasporedu stupova i jezgre.
- Maksimalna učinkovitost konstrukcije i fleksibilnost prostora može se postići primjenom vanjskog okvira zgrade.
- Dodatna horizontalna krutost dobivena je ispunom prozorskih otvora betonom formirajući tako dijagonale na obodu zgrade.



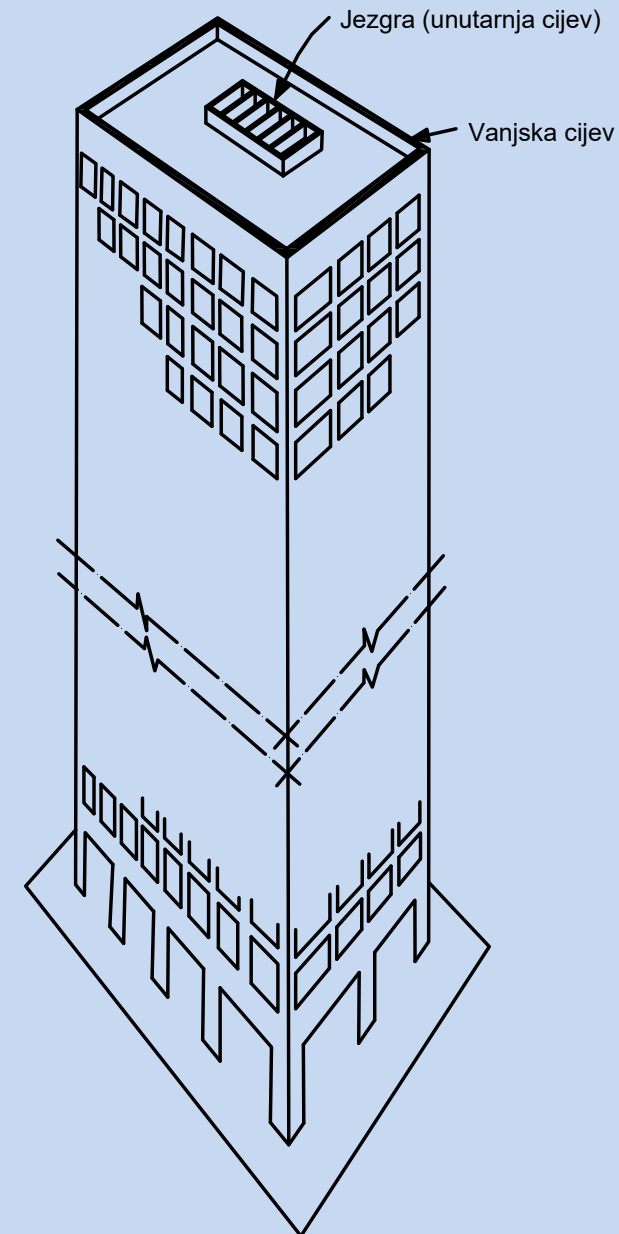
Onterie Center, Chicago

- Dijagonalni raspored ispuna duž konstrukcije povezuje stupove i grede te omogućava jednoliku preraspodjelu gravitacijskog opterećenja na susjedne stupove čime se smanjuje utjecaj shear laga
- Unutarnji stupovi projektirani su tako da prenose samo gravitacijska opterećenja, čime je ostvarena fleksibilnost u planiranju unutarnjeg prostora.
- Obodni stupovi postavljeni su na osnom razmaku od 1,68 m, a dimenzije im iznose 48 cm x 51 cm. Paneli ispune debljine su 51 cm te su armirani horizontalnim, vertikalnim i dijagonalnim armaturnim šipkama.



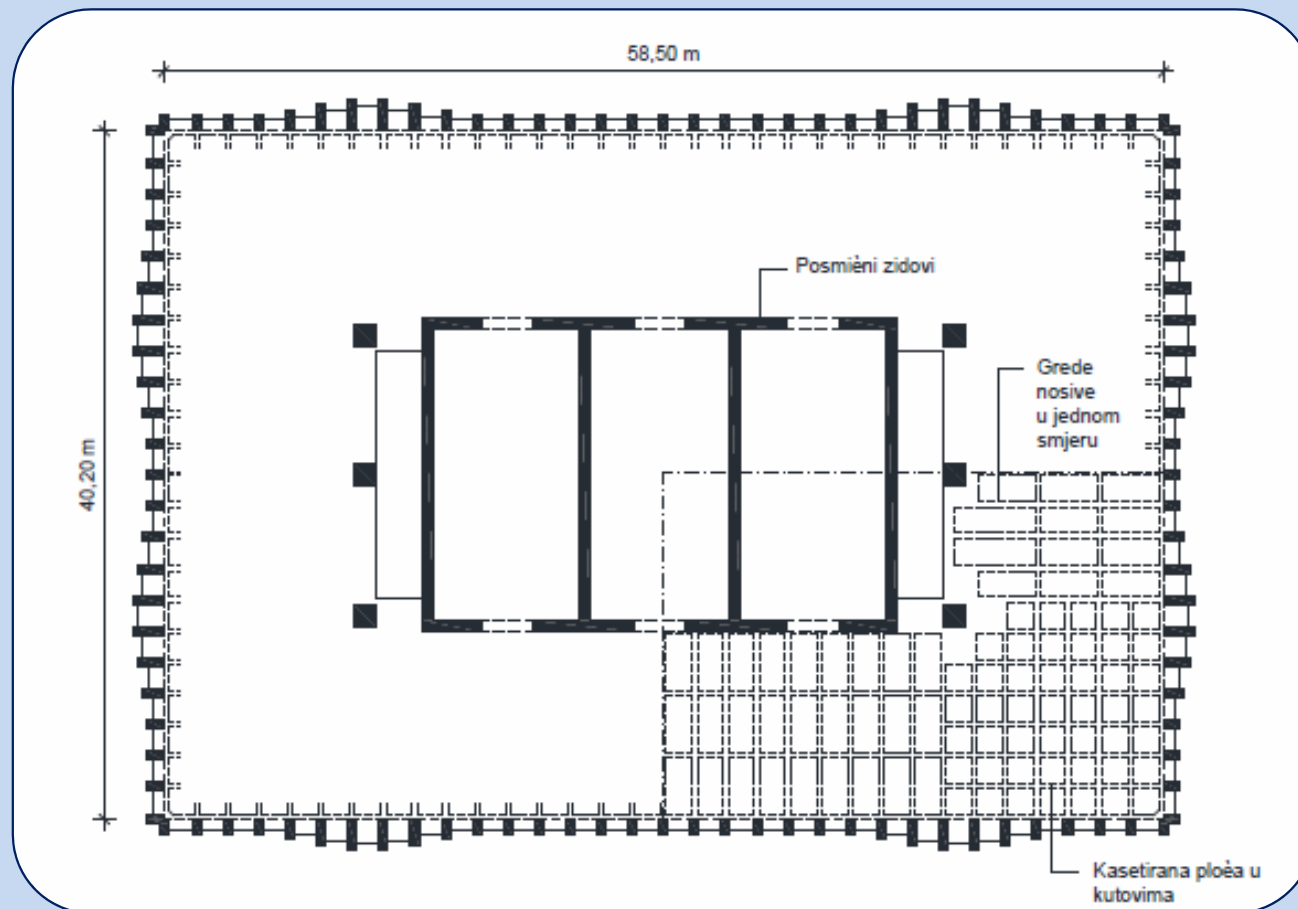
Cijev u cijevi

- **vanjska i unutarnja cijev djeluju zajedno**
- **unutrašnja cijev je vitka i proračunata je i da preuzima posmične utjecaje, dok je vanjska proračunata da preuzima utjecaje uslijed savijanja**
- **kod čeličnih zgrada: unutrašnja cijev jezgre može se formirati od okvira sa spregovima**
- **kod armirano betonskih zgrada jezgru čine posmični zidovi**
- **vanjska i unutarnja cijev povezane su međuetajnom konstrukcijom – zajedničko djelovanje**
- **prednost: bitno povećana bočna krutost**
- **vanjska cijev (trup) dominira zbog svoje veće konstrukcijske visine**
- **pretpostavka: sustav je ekonomičan za građevine do 120 katova**



One Shell Plaza, Houston, 1971, 52 etaže, 218 m

- prva zgrada projektirana na principu sustava „cijev u cijevi“
- izvedena od laganog betona
- Građevina je tlocrtnog oblika pravokutnika dimenzija 40,20 m x 58,50 m.
- Vanjsku cijev formira mreža blisko postavljenih stupova i greda, dok unutarnju cijev tvore posmični zidovi jezgre. Slobodan prostor između vanjske i unutarnje cijevi iznosi oko 12,20 m.

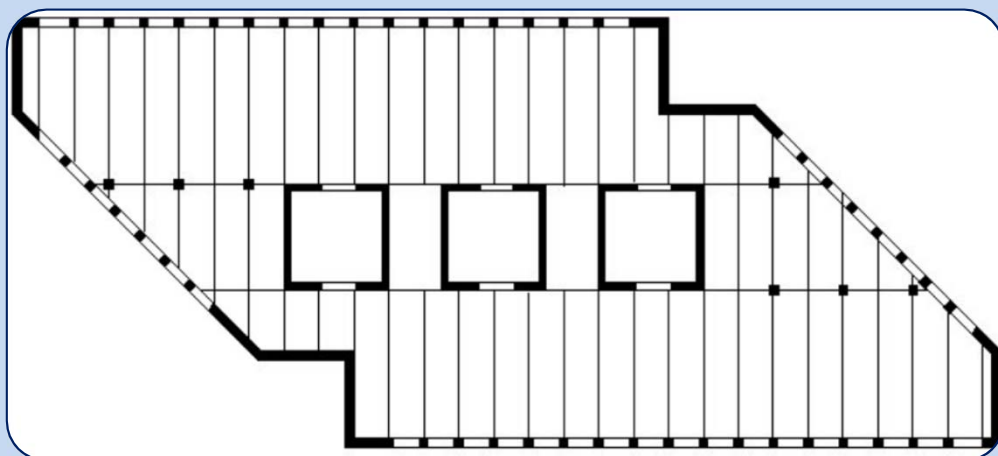


One Shell Plaza, Houston

- vanjski okvir je perforirani zid, cijev tvore 60 cm široki stupovi na malom međusobnom razmaku od 1,8 m i 1,2 m visoke grede
- Vanjska i unutarnja cijev povezane su betonskim gredama i kasetiranom međukatnom konstrukcijom
- Unutarnje grede oslanjaju se vanjske stupove pa njihov osni razmak također iznosi 1,8 m
- Na područjima u blizini kutova zgrade dubina stupova je povećana što stvara efekt valovitosti pročelja.
- Transfer greda visine 2,90 m nalazi se iznad prizemlja kako bi se omogućili veliki otvori na razini samog prizemlja.
- Debljina posmičnog zida jezgre smanjuje se sa visinom zgrade. U podnožju građevine iznosi 60,0 cm, dok na posljednjem katu iznosi 25,0 cm.



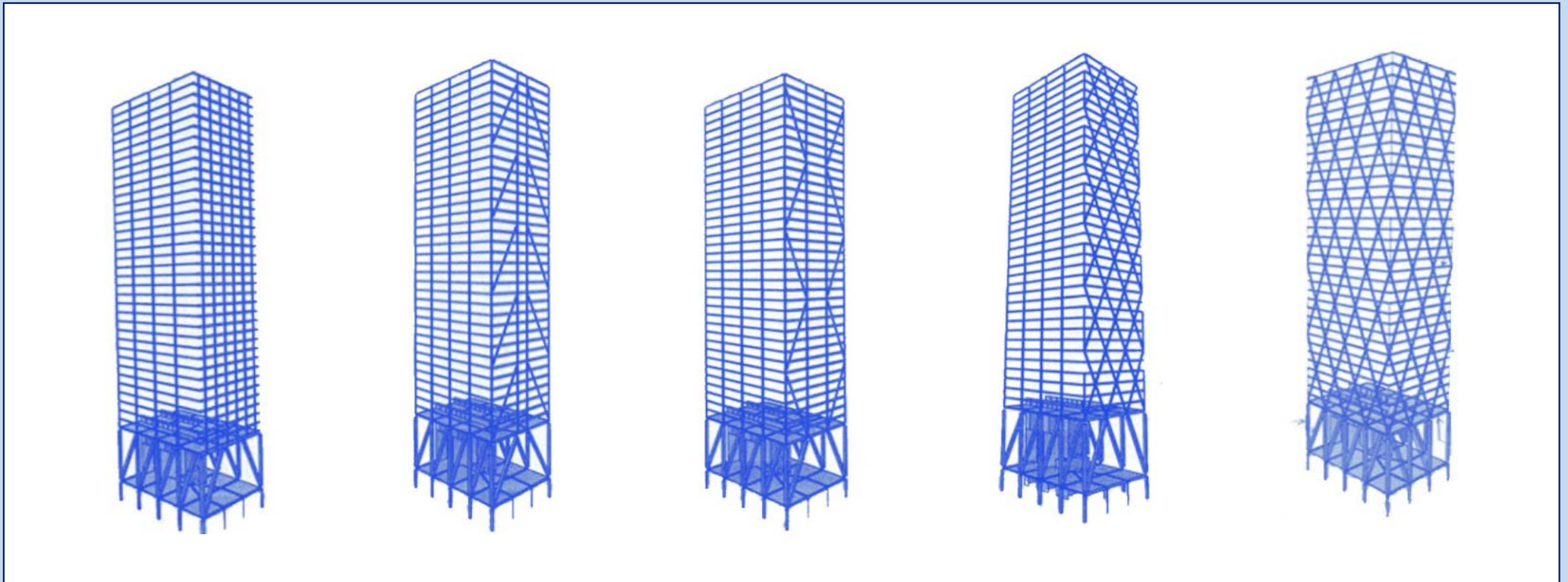
- **First Canadian Centre, Calgary, Canada:** cijevni sustav, vanjska cijev u kombinaciji okvira sastavljenog od stupova i greda sa zidovima koji formiraju uglove
- **unutarnje cijevi:** posmični zidovi
- **povezivanje vanjske i unutarnje cijevi ostvareno spregnutom stropnom konstrukcijom**



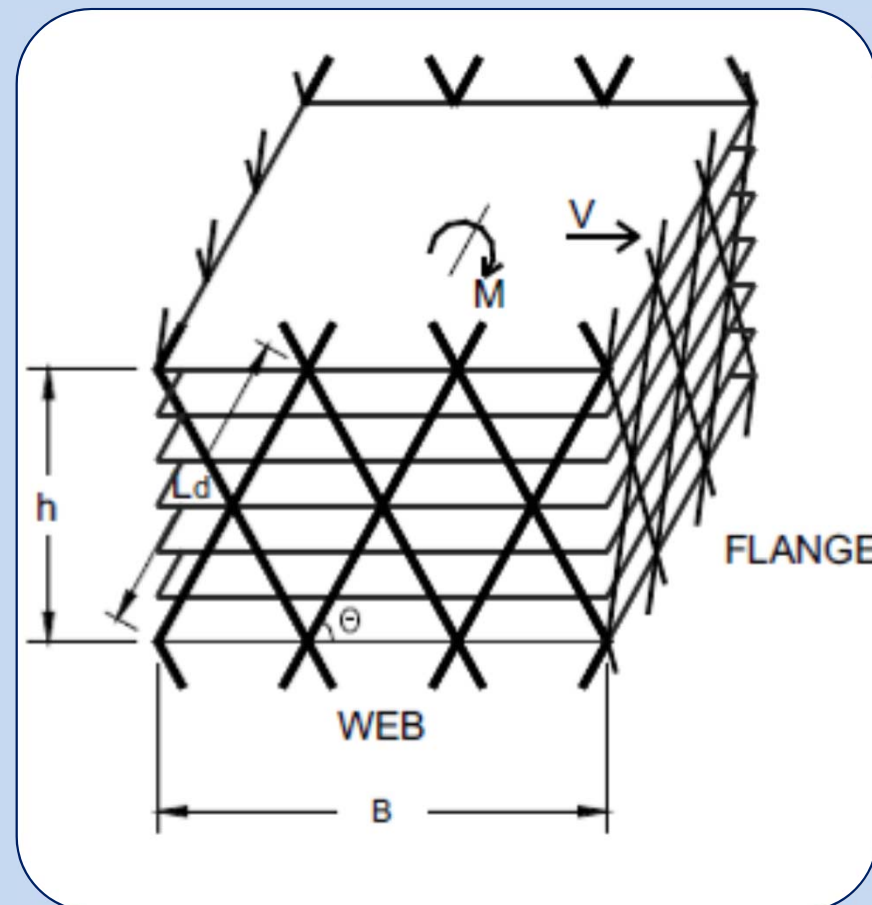
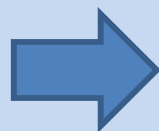
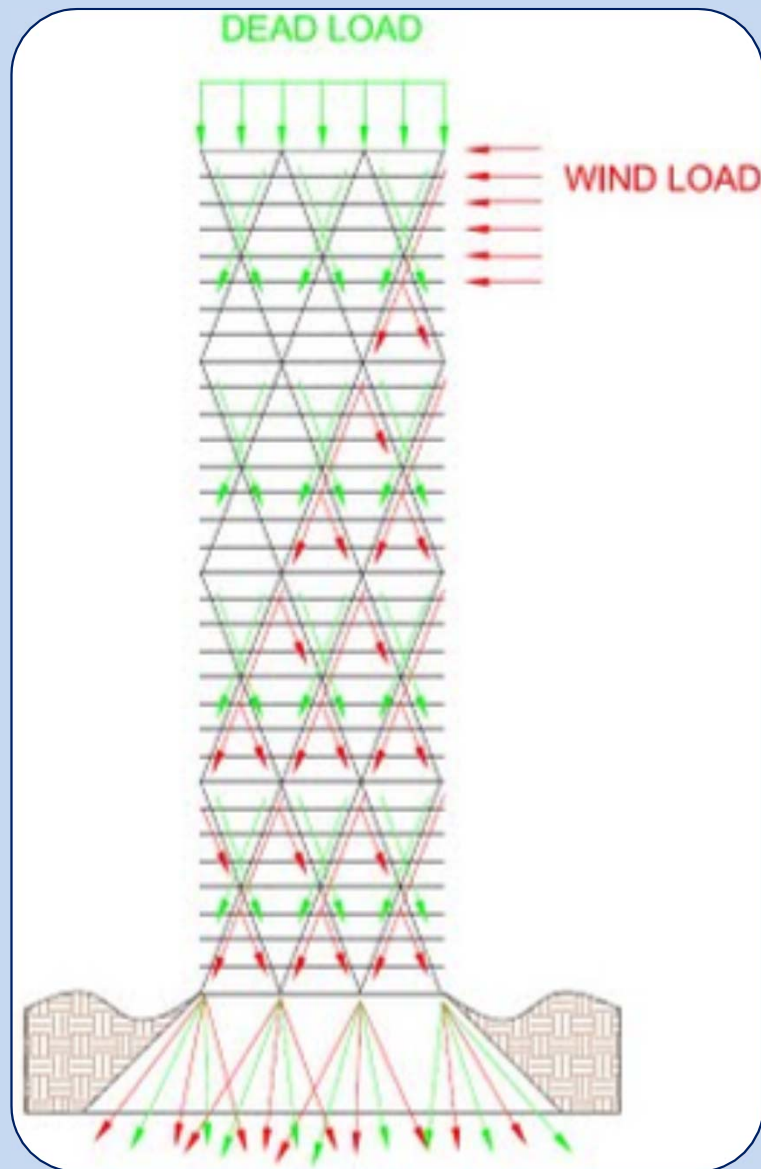
Diagrid sustavi

Evolucija cijevnog sustava: Diagrid konstrukcije (DiaGrid = Diagonal Grid, mreža dijagonalnih elemenata)

- dodavanje spregova = povećanje učinkovitosti
- Prijenos opterećenja u diagrid sustavu: dijagonale prenose istovremeno vertikalno i horizontalno opterećenje
- u elementima se uglavnom javljaju uzdužne sile



- niz trokuta čini stabilnu prostornu konstrukciju koja se ponaša poput ljuske



Hrptovi – ravnine paralelne smjeru vjetra

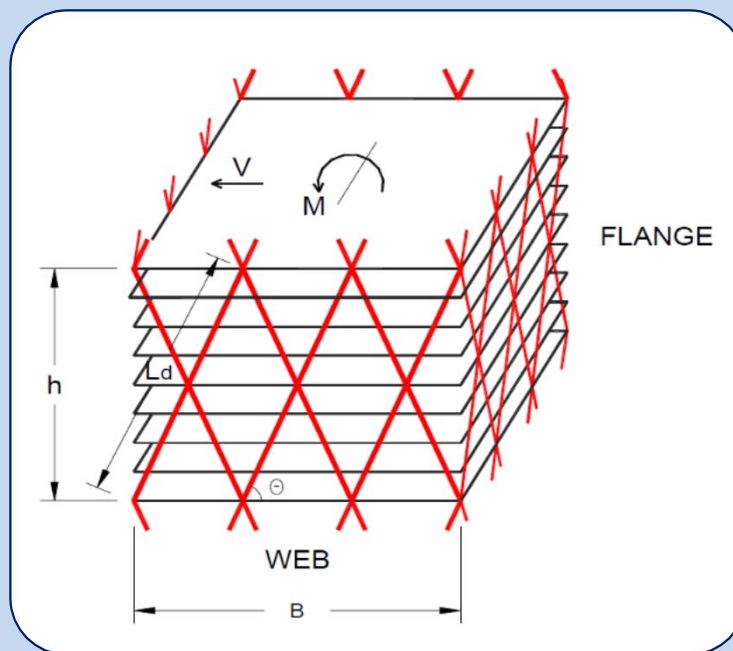
Pojasnice – ravnine okomite na smjer vjetra

➤ Geometrija:

Visina modula: ovisno o broju katova koji obuhvaća 1 modul
uobičajeno 2 – 6 katova

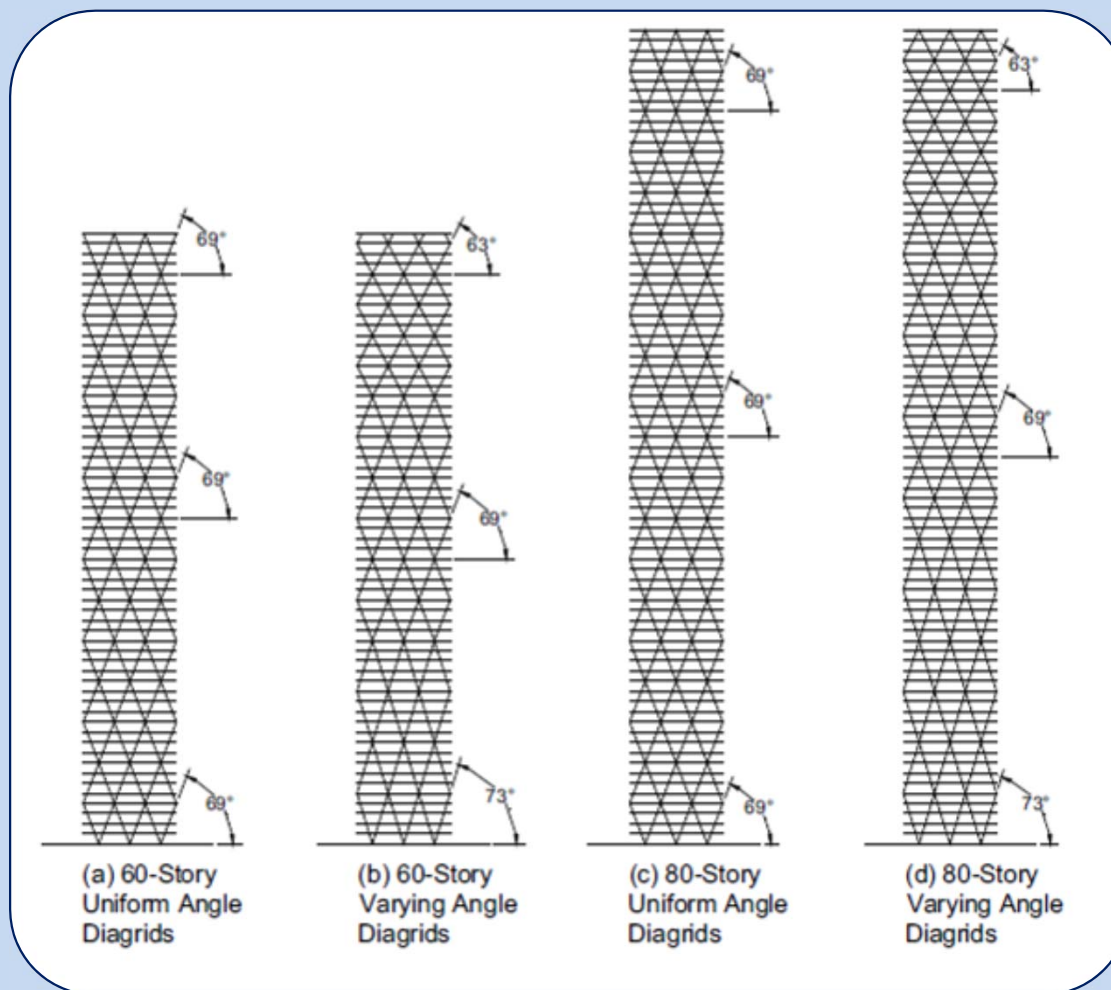
prosječna visina kata 3,5 m – 4,15 m

Optimalan kut: ovisno o visini zgrade, ovisno o vitkosti
stupovi - 90°max. krutost na savijanje
spregovi - 35°max. posmičnu krutost
dijagonale diagrida – 60 do 70°



Osnovni modul preko 8 katova sa kutom dijagonala od 69 stupnjeva

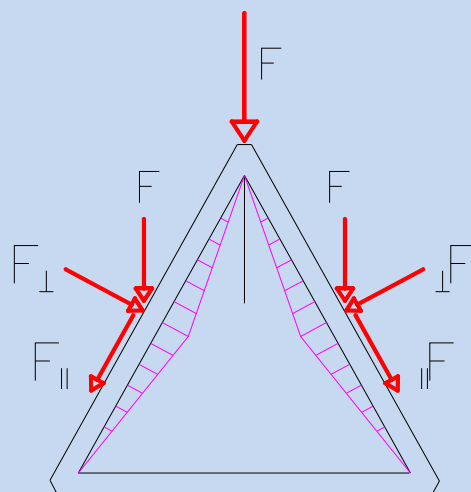
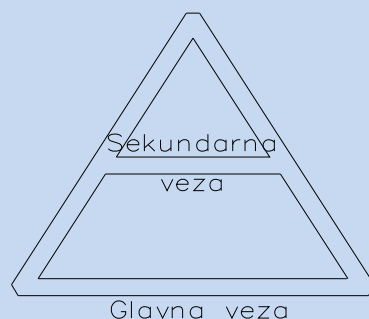
- Kutevi dijagonala mogu biti konstantni ili promjenjivi duž visine zgrade



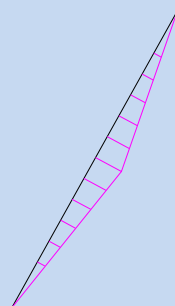
Visina zgrade	Visina diagrida	Konfiguracija kuteva	Masa čelika (t)
60 etaža	6,5	Jednoliki (69°)	3820
		Promjenjivi (73°, 69° i 63°)	4104
80 etaža	8,7	Jednoliki (69°)	15611
		Promjenjivi (73°, 69° i 63°)	11574

Pretpostavka:

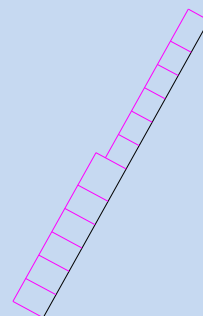
- vanjsko opterećenje prenosi se na modul samo preko gornjeg čvora
- modul se proteže preko više katova → prijenos opterećenja na svakoj razini kata
- koncentrirana opterećenja uzduž dužine dijagonala



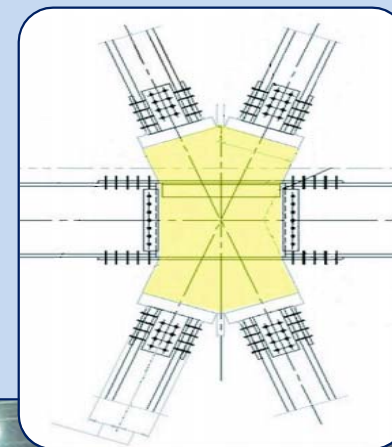
Moment savijanja



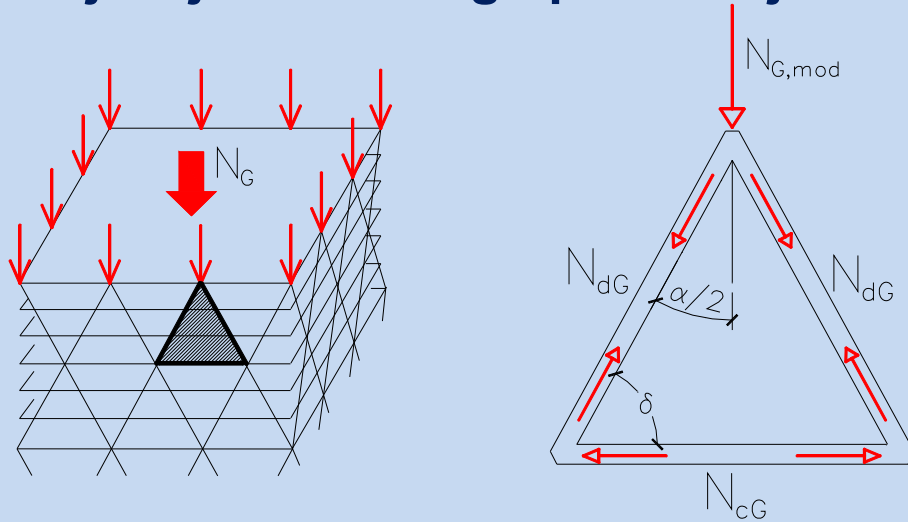
Uzdužna sila



problem: projektiranje čvorova

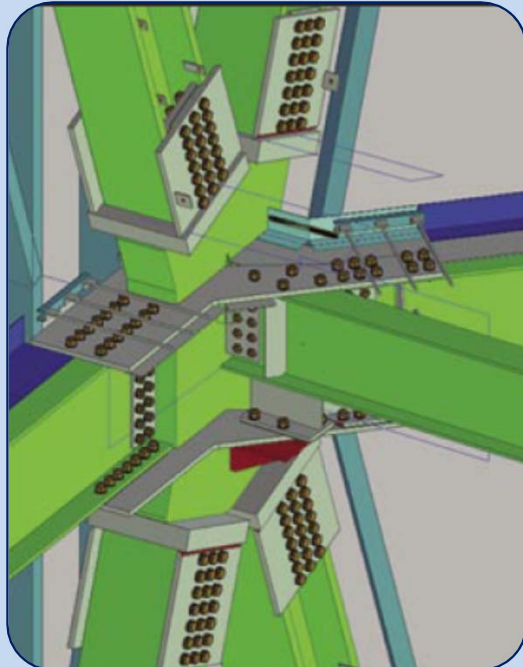


➤ Utjecaj vertikalnog opterećenja na osnovnu jedinicu modula:

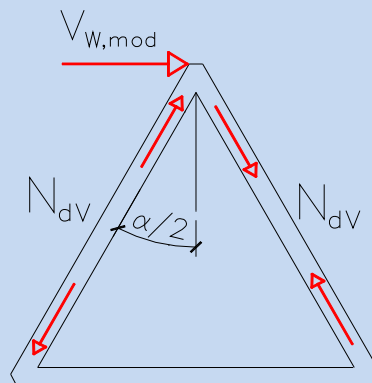
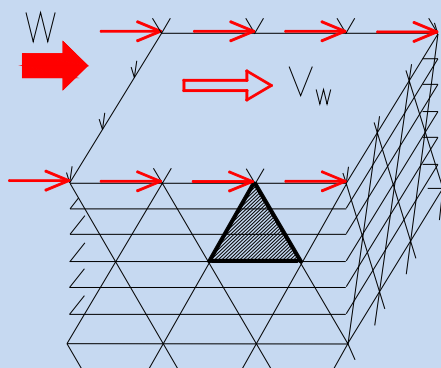
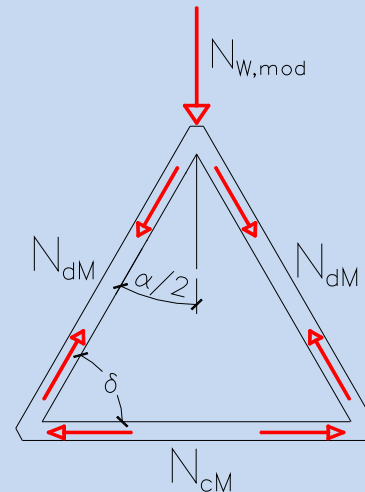
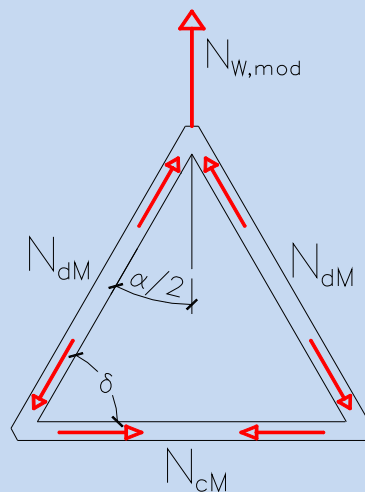
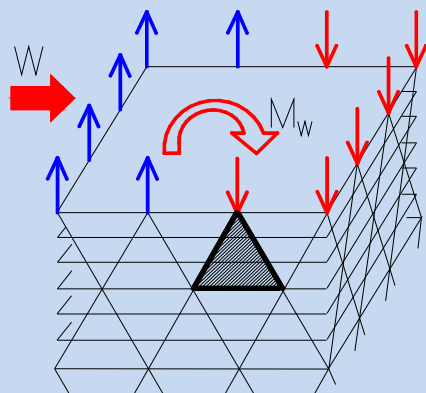


$$N_{dG} = \frac{N_{G,mod}}{2 \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)}$$

$$N_{cG} = N_{dG} \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)$$



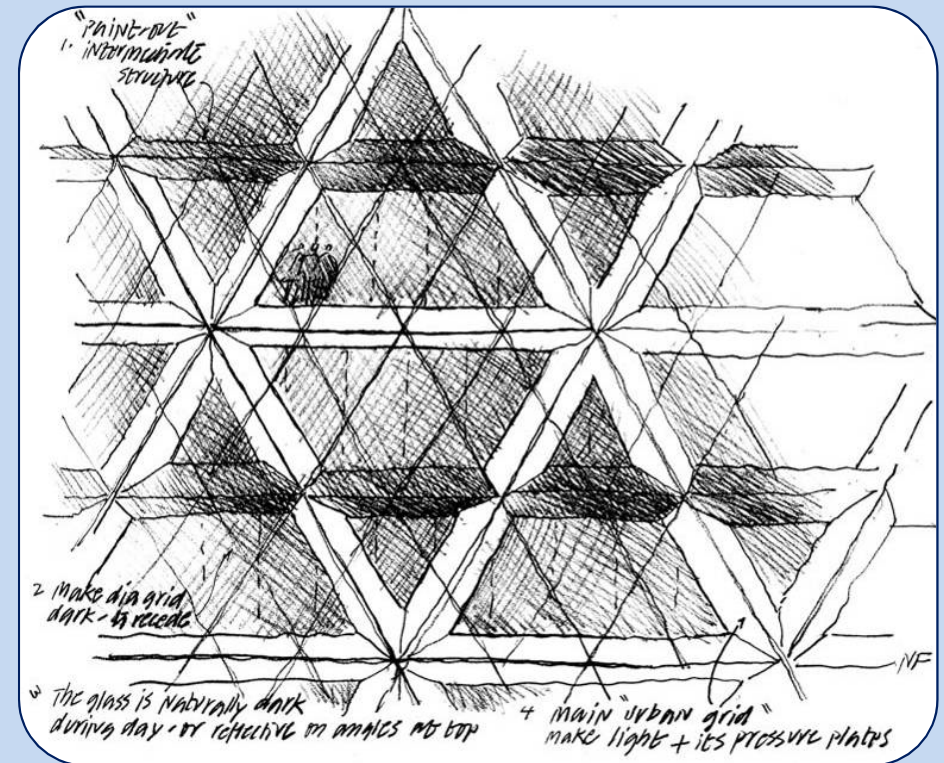
➤ Utjecaj horizontalnog opterećenja na osnovnu jedinicu modula:



$$N_{dM} = \frac{N_{w,mod}}{2 \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \quad N_{cM} = N_{dM} \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)$$

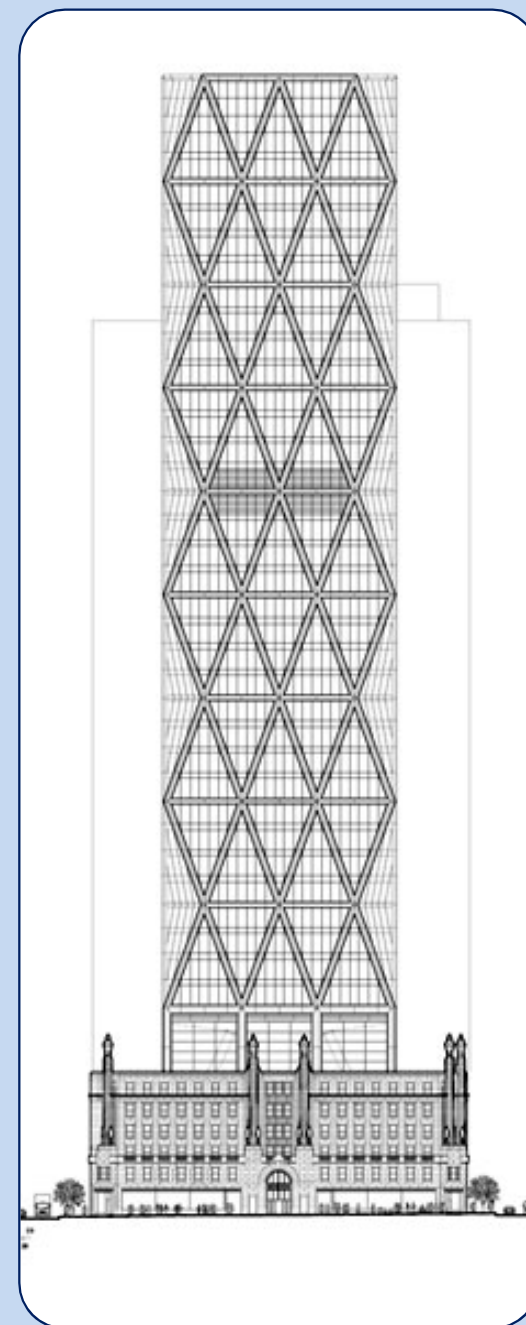
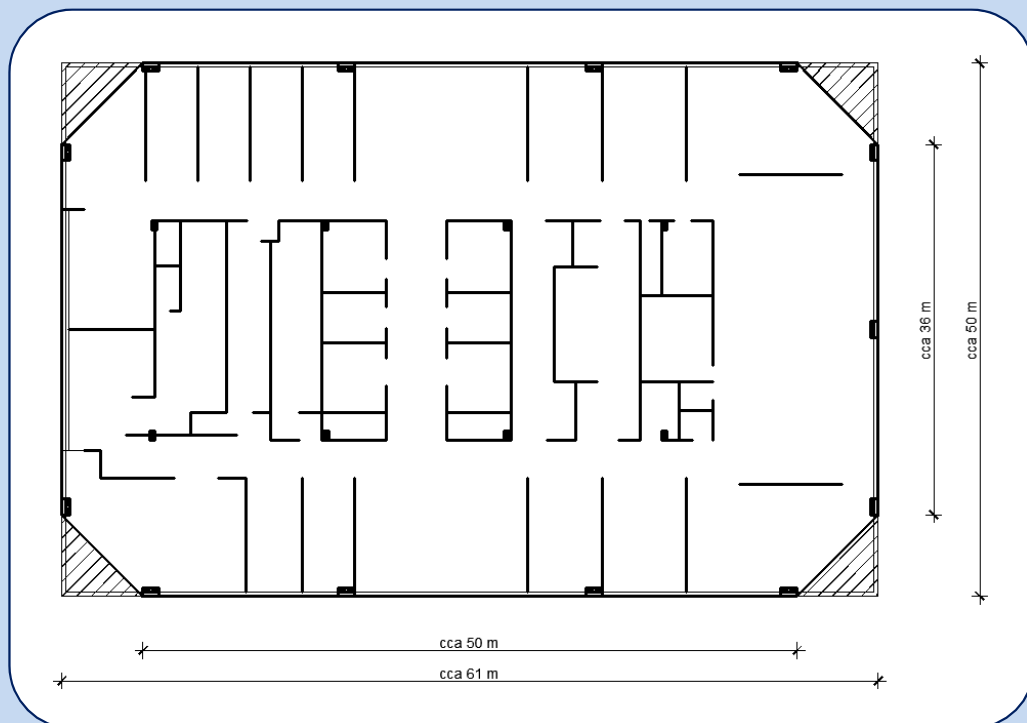
$$N_{dV} = \frac{V_{w,mod}}{2 \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}$$

➤ IBM Building, Pittsburgh, 1960. (Norman Foster)

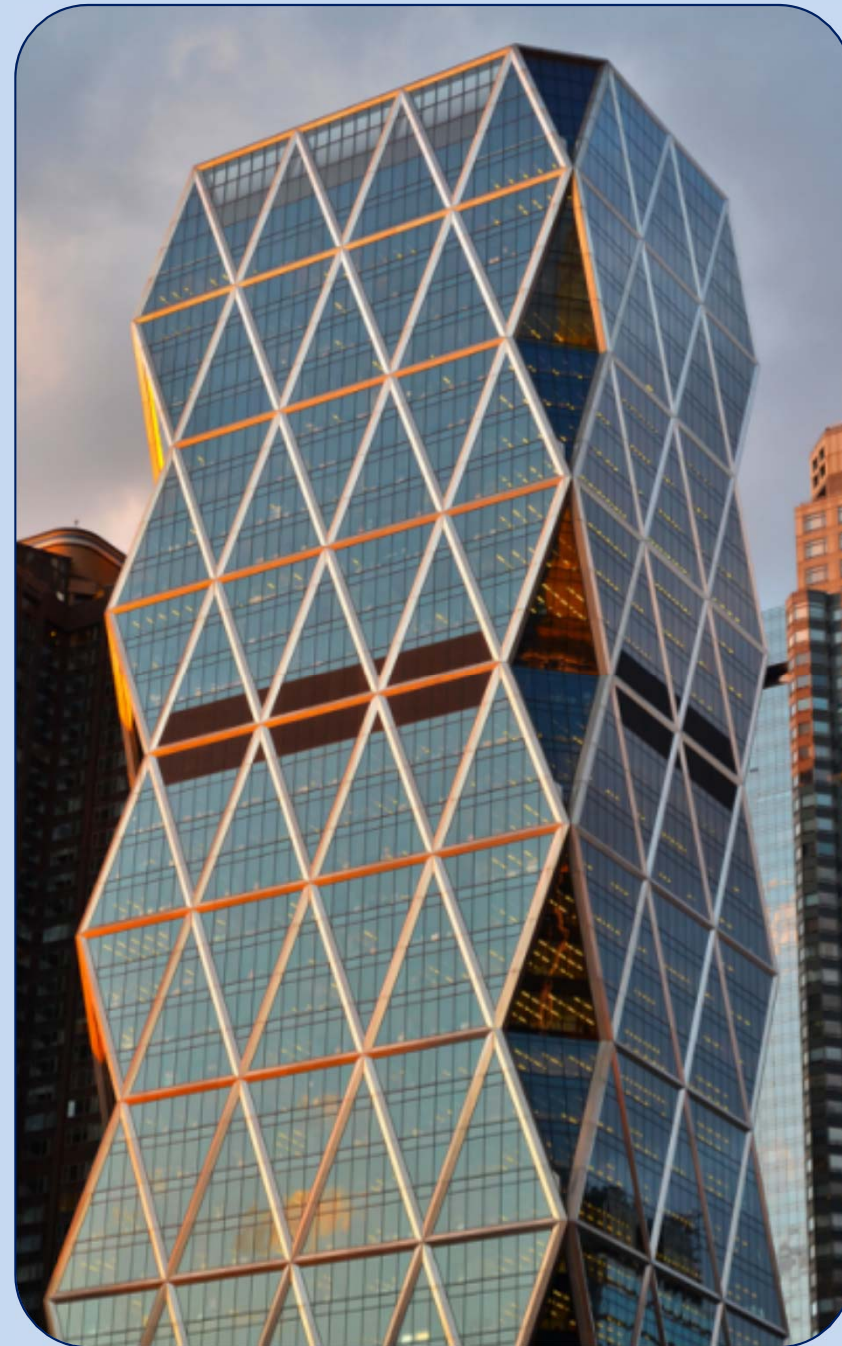


Hearst Tower, New York, 2006.

- Glavna nosiva konstrukcija leži na postojećoj građevini iz 1928. godine.
- Zgrada ima ukupno 47 katova, s ukupnom površinom oko 80000 m²
- 80-95 % prostora iskorišteno za urede.
- Arhitekti su Foster+Partners, Gensler, Adamson Associates Architects.

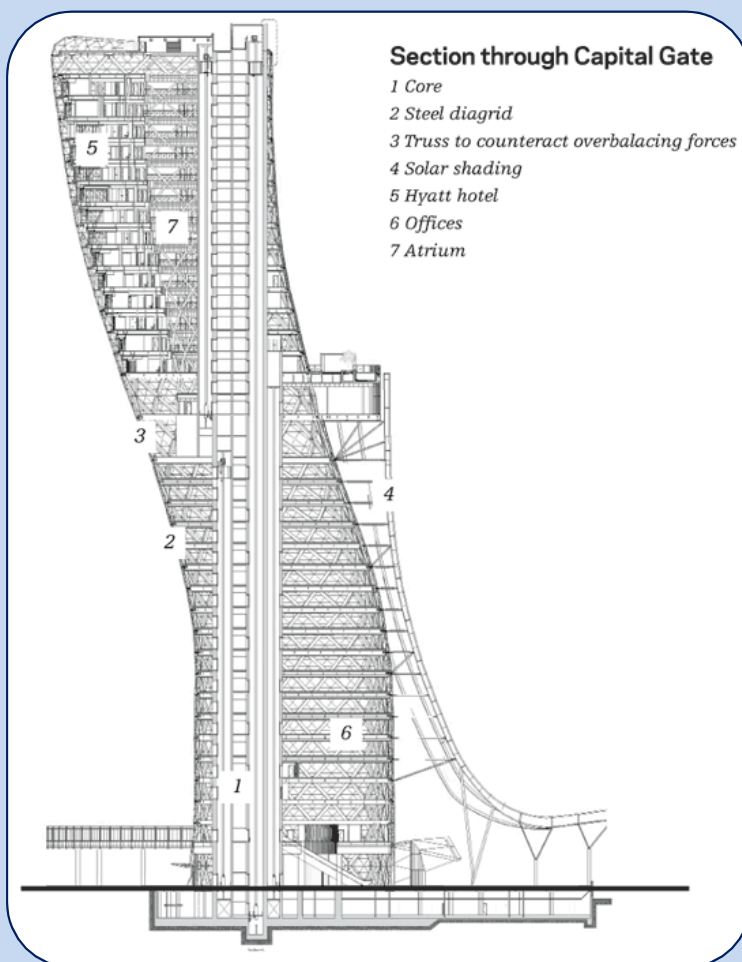


Hearst Tower, New York, 2006.



Kosi toranj Abu Dhabija

- 18 stupnjeva nagib
- 35 katova, 160 m
- Inspiracija – pješčane dine i morski valovi
- Pješčano tlo, 490 pilota ubušenih 30 m, povezani gusto armiranom betonskom pločom $d = 2\text{m}$



Aldar HQ, Abu Dahbi, 23 kata, 110 m, 2010.

- Diagrid konstrukcija ove zgrade oslobađa unutrašnji prostor od stupova
- Konstrukciju čine čelični luk koji je spregnut betonom, čelični diagrid i spregnute ploče kao međukatne konstrukcije

