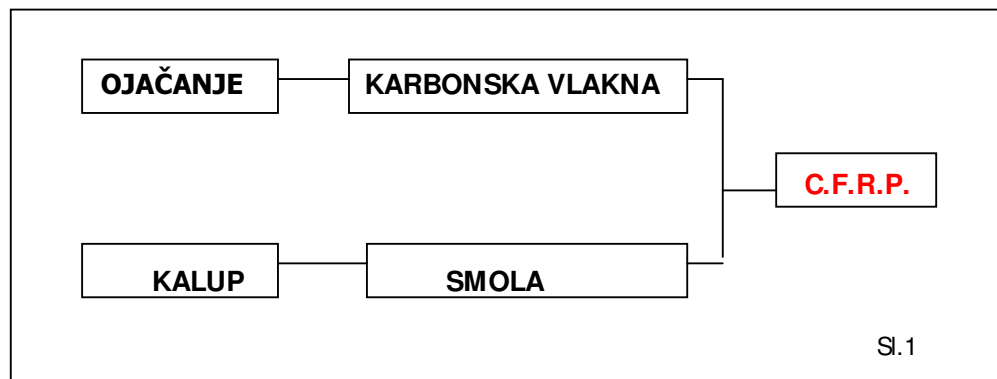


## 1.0 Kompozitni materijali općenito

Pojam "kompozitni" predstavlja svaki materijal u kojemu se jedan ili više nestalnih oblika, općenito sastavljeni od materijala izvanrednih mehaničkih karakteristika, stapaju u jedan stalni oblik.

Stari Egipćani su izrađivali kompozitne cigle miješajući glinu i slamu.

Kompoziti, s kojima ćemo se sresti, su plastični materijali ojačani karbonskim vlaknima, poznati kao CFRP (Carbon Fibers Reinforced Polymers). Vlakna su ojačavajuća komponenta, a smola redistribuira sile uzrokovane vanjskim naponom. Rezultat je materijal koji sjedinjuje veliku čvrstoću i krutost sa iznimnom lakoćom i trajnošću, a CFRP je zaista otporan na koroziju.



CFRP je u uporabi u avio industriji više od 30 godina, a u građevinarstvu zadnjih 10.

U građevinarstvu, najčešća upotreba je kod strukturalnog ojačanja postojećih građevina, gdje se CFRP poželjno uspoređuje sa čelikom u ojačanju uglavnom svijenih djelova, kao što su podovi i grede, u ograničavanju stupova omatanjem te u ojačavanju zidanih objekata (sl.2).

Karbonska vlakna su su grupa neprekidnih slojeva ugljičnih kristala dobivenih, serijom visokih temperatura, iz nusprodukta naftne industrije poznatih kao poliakrilonitril (PAN).

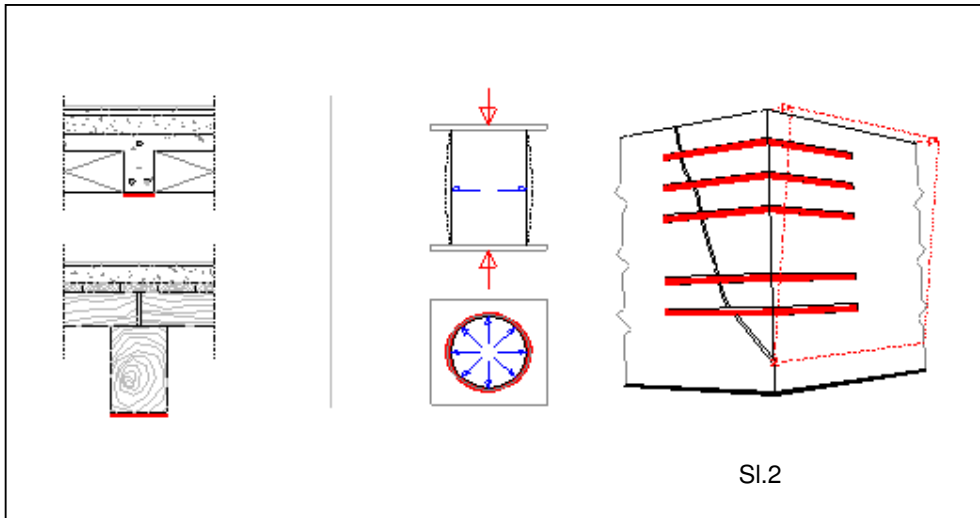
Takva vlakna predstavljaju nekoliko iznimnih karakteristika :

- izvrstno ponašanje pri seizmičkim djelovanjima
- iznimno malen zamor materijala
- izvrstna kemijska otpornost na otapala, kiseline te baze
- elastično linearno ponašanje do loma

CFRP materijali mogu se dobiti kroz dva različita procesa : prvi oblikuje vlakna i smolu u tvornici pod visokim tlakom i vrućim izvlačenjem te nudi uglavnom samo jednosmjerne lamele preko 1mm debljine;

Drugi koristi karbonska vlakna tkana kao trake ili platna, sa jedinom razlikom u njihovoj širini, ne impregnirana sa smolom, stoga suha, što dopušta proizvodnju kompozitnog materijala na mjestu ugradbe, a ne u nekoj udaljenoj tvornici.

Ovaj način tvori osnovu Carboniar sistema, što ga upotrebljava *Akroterij*.

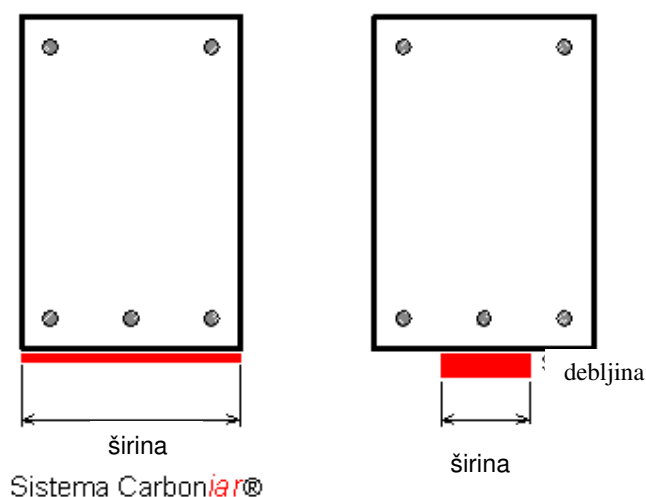


## 2.0 Carboniar sistem

Carboniar je zaštitni znak za kompozitni sistem koji koristi karbonska vlakna kao ojačanje te posebno formuliranu epoksidnu smolu kao kalup.

Ojačavajuća komponenta Carboniar- a je suha traka ili platno karbonskih vlakana, koje drži na okupu minimalni broj transverzalnih staklenih vlakana, savršeno savitljivo, s mogućnošću impregnacije te prilagodljivo bilo kojem obliku.

Carboniar sistem može se prilagoditi širini strukturalnog elementa, smanjujući debljinu ojačanja, a zadržavajući iznos otpora. Na ovaj način moguće je izbjeći prerane i neočekivane pogreške raslojavanjem.



### 2.1 Karakteristike i mehanička svojstva standarda karbonskih vlakana

Sustav ojačanja Carboniar nudi :

- ✓ Minimalno dodavanje težine (obično manje od 1% težine same strukture)
- ✓ Minimalnu debljinu (oko 1mm)
- ✓ Reverzibilnost procesa, budući da je moguće ukloniti ojačanje zračnim postupkom
- ✓ Velika otpornost u vlažnom okruženju, čak do 100% , jer karbonska vlakna , za razliku od drugih sintetičkih vlakana, minimalno apsorbiraju vlagu
- ✓ Kemijski inertna epoksidna smola, koja proizvodi ambijent  $pH > 13$ , pomaže u pasiviranju čeličnih šipki u betonu
- ✓ Znatno smanjeno vrijeme za obnovu te kasniju uporabu
- ✓ mogućnost dozvoljavanja pristupa, u većini slučajeva, još za trajanja poslova
- ✓ izvrsna kemijska otpornost, naročito u lužnatom ambijentu
- ✓ minimalna zavisnost od različitih higroskopskih uvjeta za vrijeme aplikacije

Otporna komponenta Carbon<sup>iar</sup> sustava sastoji se od standardnih karbonskih vlakana spojena u suhe trake pokazujući :

- vlačnu čvrstoću ----- 4 900 MPa
- modul elastičnosti -----230 GPa
- lomno produljenje -----2.1%
- koeficijent temperaturnog širenja ----- $0,4 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
- gustoća -----1.8kg/dm<sup>3</sup>

Važno je uočiti odnose vlačne sile i vlačnog modula elastičnosti u odnosu na gustoću : za karbonska vlakna odnosi su 19 te 1.300, mnogo bolje od čelika gdje su vrijednosti 0,7 te 260.

Težina za težinu, karbonska vlakna su uistinu superiorna čak i za čelik namjenjen za prednapregnuti beton.

Sve trake karbonskih vlakana imaju atest dobiven od proizvođača, koje ističu mehanička svojstva proizvoda, koja su, općenito, jednaka ili bolja od gore navedenih.

Trake i platna također predstavljaju indikator ispravne impregnacije, korisno za provjeru sigurnog prijanjanja na podlogu.

Visoko vrednovane karakteristike Carbon<sup>iar</sup> –a su mogućnosti ponuđene projektantima da izaberu između različito usmjerenih vlakana te da selektivno ojačaju krutost u jednom ili više željenih smjerova.

Može se reći da je ojačanje "krojački napravljeno" da zadovolji svaki posao.

## 2.2 Kvalitativni standardi sistema Carbon<sup>iar</sup>

Sistem može garantirati izvrsno ponašanje ako je podržan i sa korektnim projektom i sa striktnim pridržavanjem propisanih ciklusa nanošenja.

Zbog ovih zahtjeva akroterij ne nudi prodaju djelova, već inzistira na obuhvatnoj suradnji, počevši od samog projekta sa adekvatnim proračunskim modelima (analiza graničnih stanja), pa do visoko kvalificiranog osoblja za aplikaciju sistema ojačanja.

akroterij je obučavao svoje radnike u suradnji sa talijanskom tvrtkom I.A.R. iz Roviga, kako na prvim poslovima u Hrvatskoj, tako i na gradilištima u Italiji.

Oboje, projektni kriteriji i proračunski modeli koji se koriste u sistemu Carbon<sup>iar</sup> podržani su znanstvenim i eksperimentalnim istraživanjima, koje je iznio I.A.R. u suradnji sa važnim talijanskim te europskim Sveučilištima.

Izvanredno ponašanje Carbon<sup>iar</sup>-a također zavisi o prodiranju smole kroz vlakna na podlogu za vrijeme procesa polaganja, dok ovo nije moguće sa već impregniranim ojačanjima, kao što su lamelirani ojačivači. Različiti koraci ciklusa polaganja, pažljivo završeni u vremenu propisanom od proizvođača smole, dopuštaju izvedbu homogenog i monolitnog posla zahvaljujući prodoru kroz ojačanje te trodimenzionalnoj povezanosti presjeka matrice(tiksotropičnost – bitno svojstvo epoksidne smole), izbjegavajući bilo kakav rizik nedovršene polimerizacije i posljedičnog zapleta planova.

## 2.3 Trajnost sistema

Po dostupnoj tehničkoj literaturi karonska vlakna ne trpe nikakvo smanjenje mehaničkih svojstava preko perioda od 50 godina. Što se tiče smole, proizvođači ističu da se epoksi sistem koristi apsolutno pouzadano i s povjerenjem, preko 40 godina. Usprkos ovome kao dodatnu mjeru, uputno je planirati, od projektnog stadija periodičke kontrole te ako je potrebno održavanje ili zamjenu.

## 2.4 Ponašanje na UV zrakama, radna temperatura, požar i starenje

- 1) Korištenje UV otporne smole ili zaštita žbukom na vanjskim stranama
- 2) Radne temperature su u području od  $-40^{\circ}\text{C}$  do  $+80^{\circ}\text{C}$
- 3) U slučaju očekivanog izlaganja temperaturama iznad  $+80^{\circ}\text{C}$ , nanijeti adekvatnu termo zaštitu
- 4) U slučaju požara, epoksidna smola može doseći otrovnu razinu ispod najviše dopuštene
- 5) Zaštitni efekti produljuju trajnost zaštićene strukture te shodno tome smanjuju i sve troškove održavanja

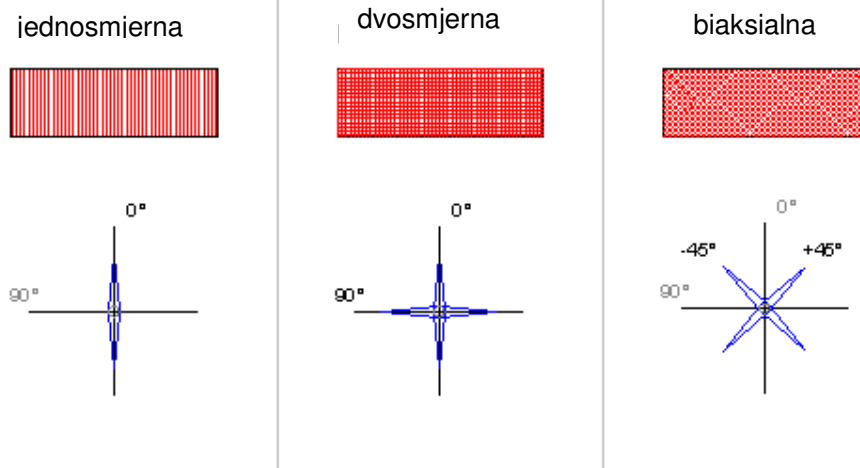
## 2.5 Upute za izbor materijala

Proizvode se različiti tipovi traka karbonskih vlakana i platna.

Karakteristike ojačana mijenjaju se sa uređenjem vlakana ( sl.4 ) :

- 1) Jednosmjerni, sa svim vlaknima u jednom smjeru
- 2) Dvosmjerni, gdje su vlakna usmjerena na  $0^{\circ}$  te na  $90^{\circ}$ ; ako je količina vlakana u oba smjera ista, ojačanje je "balansirano", u suprotnom je "nebalansirano"
- 3) Biaksialni, gdje vlakna idu pod  $45^{\circ}$

Širina ojačanja može varirati od 1,3 do 126 cm.



Težina traka se može birati između 300 i 1.200 gr/m<sup>2</sup> : ovo je parametar za određivanje debljine te, stoga, presjeka otpora. Širok izbor tipova, dimenzija i gustoće su ekskluzivna svojstva Carboniar sistema koja dozvoljavaju definirane prikladne solucije za rješenje svakog problema, izbjegavajući pritom gubitak i složene stadije nanosa. U stvari, korištenje težih ojačanje može smanjiti broj slojeva za masivne obnove ili ih čak smanjiti na jedan sloj.

Unatoč svemu izbor mora biti unutar zahtjeva projekta.

Proizvode se također i lamelirana karbonska vlakna ali s njihovom upotrebom treba biti krajnje oprezan da se izbjegnu mogući problemi, tim veći zbog njihove smanjene fleksibilnosti, zbog načina nanošenja te zbog smanjene kontaktne površine i povećane debljine.

Tipična gradilišta gdje se Carboniar upotrebljava zahtjevaju samo suhu traku karbonskih vlakana, poprečno povezanih minimalnom količinom staklenih vlakana, savršene gipkosti s maksimalnom debljinom 0,6 mm.

Otporni presjek je projektiran i proizveden za svaku aplikaciju posebno, mjenjajući u svim slučajevima širinu, čak i do širine same konstrukcije, umjesto debljine, kako bi dobili najbolju distribuciju naprezanja i spriječili rana i nepredviđena oštećenja.

Ovakav proces je minimalno nametljiv u prostoru, ne zahtjeva zglobove, reverzibilan je jednostavnim zračnim postupkom, ne dodaje značajnu težinu objektu, ne zahtjeva posebnu opremu te ne zauzima koristan prostor.

Moguće je spajati trake odgovarajućim preklapanjem.

Standardne trake koje ugrađujemo:

<i>TRAKE</i>	<i>Gramatura (gr/m<sup>2</sup>)</i>	<i>Visina trake (mm)</i>	<i>Efektivna debljina (mm)</i>	<i>Otporni presjek (mm<sup>2</sup>)</i>	<i>Vlačana čvrtoća (MPa)</i>	<i>Modul elastičnosti (Gpa)</i>
<b>Carboniar jednosmjerni pleten</b>						
<b>FCU 800/ 100</b>	827	100	0,40	40,00	4900,00	240,00
<b>FCU 800/ 200</b>	827	200	0,40	80,00		
<b>FCU 500/ 100</b>	520	100	0,248	24,80		
<b>FCU 300/ 100</b>	300	100	0,167	16,70		
<b>Carboniar dvosmjerni pleten 0° - 90°</b>						
<b>FCB 600/ 1000</b>	656	1000	0,160 0,160	160,00 okom. 160,00 vodor.	4900,00	240,00
<b>Carboniar biaksialni pleten +/- 45°</b>						
<b>FCBX 400/ 1000</b>	400	1000	0,100 (+45°) 0,100 (-45°)	142,00 (+45°) 142,00 (-45°)	4900,00	240,00
<b>FCBX 400/ 1270</b>	400	1270	0,100 (+45°) 0,100 (-45°)	180,00 (+45°) 180,00 (-45°)		
<b>Carboniar jednosmjerni termospojen</b>						
<b>FCUT 300/ 200</b>	300	200	0,177	35,40	4900,00	240,00
<b>FCUT 300/ 1000</b>	300	1000	0,177	177,00		

### 3.0 Tipični popravci sistemom Carboniar

#### Na zidanim konstrukcijama koristi se:

- 1) za spajanje oštećenih objekata ili djelova, za krpanje slomljenih krajeva
- 2) za smanjenje uvjeta nakošenosti
- 3) za apsorpciju vlačnih napona statičkog ili dinamičkog porijekla svodovima, lukovima i kupolama
- 4) za povećanje otpora horizontalom stresu

#### Na drvenim konstrukcijama:

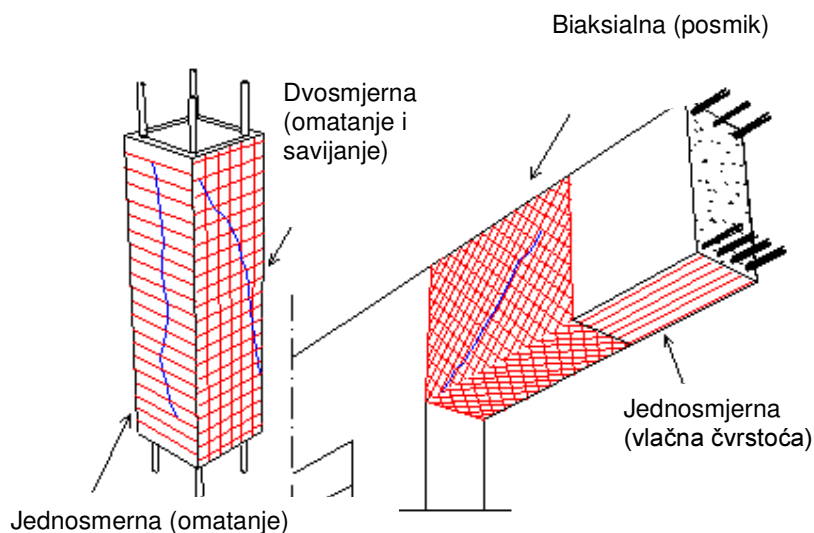
- 1) za povećanje nosivosti i za zadržavanje deformacija u prihvatljivim granicama

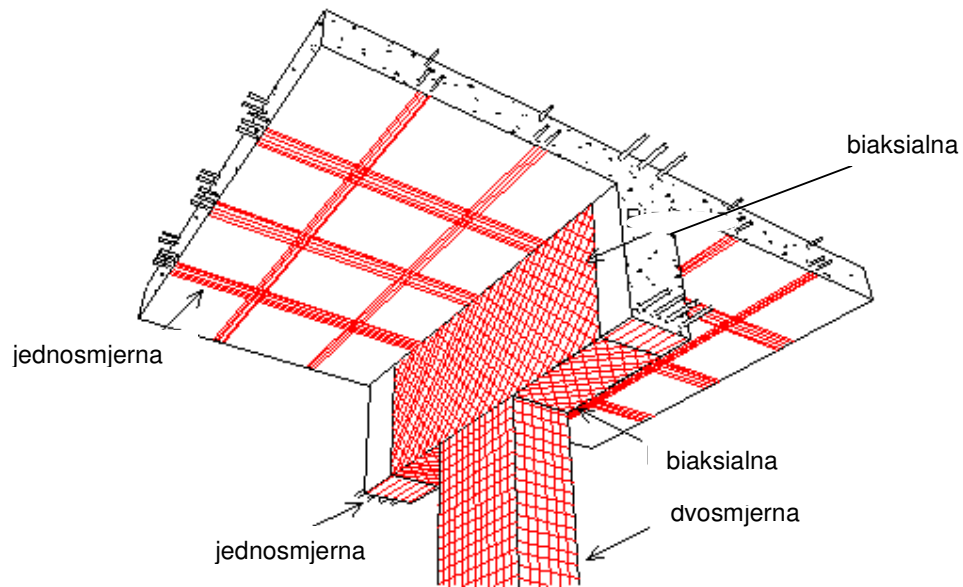
#### Na oštećenim konstrukcijama od šljunka i pijeska( ispuščenja)

za vraćanje sigurnosti

#### Na betonskom konstrukcijama:

- 1) za povećanje vlačne i posmične čvrstoće
- 2) za omatanje stlačenih elemenata i poboljšanje njihove žilavosti, u smislu mogućnosti otpora određenim deformacijama u plastičnom području, uglavnom za vrijeme potresa
- 3) za povećanje otpornosti strukture na zamor pod harmonijski promjenjivim naprezanjem





**Na prednapregnutom betonu:**

1) za nadoknadu opuštenih ili slomljenih šipki

U takvim slučajevima, kad god je moguće, otklon treba smanjiti ili čak vratiti potpuno prije nanošenja ojačanja, koje će potom biti napeto težinom same strukture.



## 4.0 Carboniar za ojačanje armirano betonskih konstrukcija

### 4.1 Vlačna čvrstoća: općenito

Većina savijenih stukturnih elemenata, poput greda i podova, može se efektivno ojačati na vlačnoj strani koristeći jednosmjernu traku, s vlaknima u smjeru postojećih šipki. Ojačanje mora biti nanižeto bez naglih preopterećenja, jer trake počinju djelovati kada savijenost, koja postoji za vrijeme nanošenja bude povećana. Kad god je moguće, nanošenje treba početi nakon ispravljanja savijenosti: u takvim slučajevima, ojačanje će početi djelovati pod težinom same strukture.

Stoga je moguće predvidjeti da kolaps ojačanog nosača ne bude vlačnog tipa, odnosno, da će početi sa tlačne strane betona.

#### 4.1.1 Vlačna čvrstoća: proračunski model

Slijedeća analiza je primjenjena kod projektiranja ojačanja.

Proračun konačnog momenta presjeka betona, ojačanog jednosmjernom CFRP trakom, može pratiti uobičajene modele tektonskih poremećaja. Očito je potrebno uzeti u obzir tri različita materijala, svaki sa svojim osnovnim karakteristikama, dok unutarnji vlačni napon mora biti podjeljen između čelika i CFRPa.

Proračun savijanja je sličan onom klasičnom za AB presjeke, pod pretpostavkom klasične teorije.

Nadalje, idealni presjek otpora sastoji se od tlačne površine betona, površine čeličnih šipki, tlačnih i vlačnih, povećan koeficijentom homogenizacije čelik-beton, te površinom karbonskih traka, povećanom koeficijentom homogenizacije karbon-beton.

Ojačanje nanoseno na vlačnu stranu uzrokuje da se neutralna os pomakne prema ojačanju, povećavajući tako tlačnu površinu presjeka betona sa smanjenjem tlaka po jedinici površine, te smanjenjem vlačnog djelovanja na čelik.

Pravilno dimenzioniranje ima svrhu preuzeti, u dopuštenim granicama, vlak na svakom materijalu.

Strukturalna potvrda zahtjeva proračun udaljenosti neutralne osi od tlačnog ruba (izjednačavanjem statičkih momenata), koji, u obratu, dozvoljava proračun momenta inercije presjeka prema istoj neutralnoj osi.

Kad su nam poznati ovi podatci, pomoću Navierovih izraza možemo odrediti napone na svakom materijalu na idealnom presjeku, te ih provjeriti prema dopuštenim vrijednostima (odnos između karakteristične vrijednosti i sigurnosnog koeficijenta).

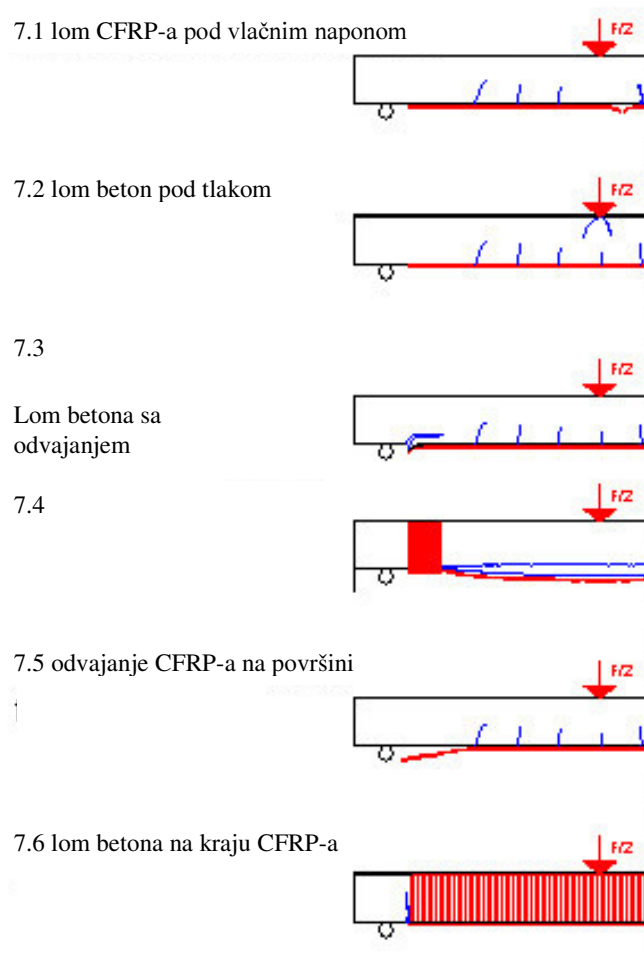
#### 4.1.2 Ojačanje protiv savijanja : mehanizmi kolapsa greda sa CFRP ojačanjima

U nastojanju da pravilno odredimo ojačanje, esencijalno je razumjeti mehanizme kolapsa CFRP pletiva.

U stvari, bilo koja varijacija u karakteristikama ojačanja modificira balans duž mogućih uzroka, ali, u svim slučajima, kolaps je potaknut uzrokom koji ima najmanje opterećenje kolapsa.

Prema uobičajenim testovima savijanja (na četiri točke) AB grede, ojačanih jednosmjernim CFRP trakama s donje strane, moguće je prepoznati 5 osnovnih slučaja mehanizma kolapsa (sl. 7.) :

- 1) lom CFRP-a u području maksimalnog momenta pod opterećenjem (sl.7.1)
- 2) lom betona na gornjem rubu pod tlakom u području maksimalnog momenta(7.2)
- 3) lom betona prema kraju ojačanja sa posljedičnim odvajanjem ojačanja ,odnosno uslojavanje betona (7.3) ovisi o najslabije zaljepljenom mjestu i dostiže najbliži kraj omotane grede. Ova točka se ne može odrediti unaprijed (7.3)
- 4) lom betona i posljedično odvajanje ojačanja : startna točka ovisi o najslabije zaljepljenom mjestu i dostiže najbliži kraj omotane grede. Ova točka se ne može odrediti unaprijed (7.4)
- 5) kolaps na površini i posljedično odvajanje ojačanja (7.5)
- 6) lom betona od posmičnih napona na kraju ojačanja, odnosno pored oslonca (7.6).

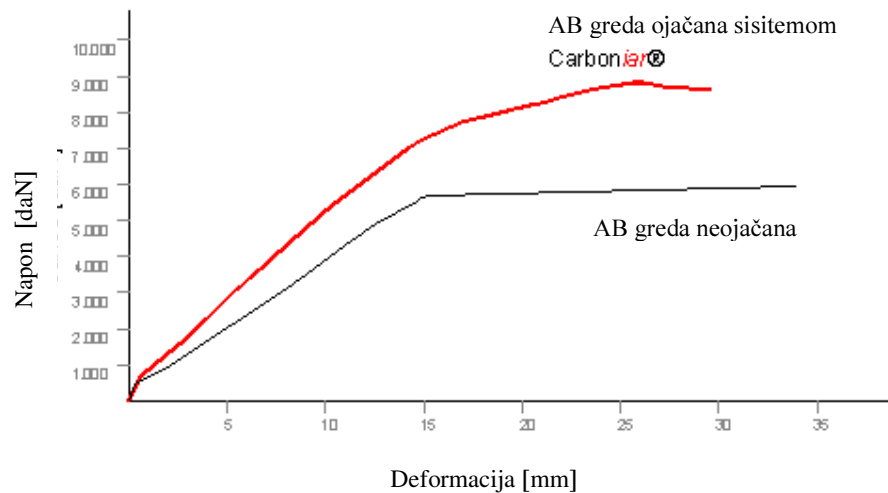


sl.7

Već opisani laboratorijski testovi pokauju da ojačani beton sa Carboniarom, uvijek kolabira zbog slomljenog betona na tlačnom rubu. Ovo je još ispravno kad je ukupna rezultanta tlaka povećana, zbog masivnog ojačanja tlačnih djelova.(4.1.3 laboratorijski testovi)

Prisutnost karbonskih vlakana sa donje strane uzrokuje sniženje neutralne osi i povećava tlačnu površinu betona. Lom tlačnoga ruba je stoga postignut konstantno višim naponima. Zanimljivo je primjetiti promjenjeno ponašanje armiranog betona u prisutnosti linearno elastičnog ojačanja do loma.

Tipičan dijagram napon/pomak za ravni AB sa Carboniarom pletivom prikazan je niže(sl.8).



sl.8

U početku, vlačna sila je podjeljena između longitudinalnih šipki i karbonskih vlakana, u proporcijama površina, pozicijama i modulima elastičnosti svakog materijala. Za isti napon, sila i deformacija na čeliku su manje nego na neojačanoj gredi, pa je točka popuštanja viša. Kada čelik popusti, pojavi se pregib (gubitak krutosti), ali još zadržava pozitivni nagib, jer se napon postupno prenosi od čelika do CFRP-a, koji još zadržava njegovo elastično ponašanje, što obuzdava otvaranje pukotina i plastičnu deformaciju čelika.

Drugim riječima, ojačanja sa CFRP-om dopuštaju povećanje napona čak sa čelikom u plastičnom području.

Kad se dosegne krajnja vlačna čvrstoća greda ojačana Carboniar sistemom se lomi u tlačnoj zoni. Ovo je najbolji mehanizam kolapsa, i za projektiranje i za sigurnost.

#### 4.1.3 Laboratorijski testovi

- 1) Usporedni testovi savijanja na identičnim AB uzorcima, od kojih je dio ojačan Carboniar sistemom, a dio sa CFRP lamelama, sa vlaknima sa istim presjekom i jednakim mehničkim karakteristikama, pokazali su različite rezultate:

Grede sa Carboniar sistemom su pokazale:

- Viši napon pri lomu

- Savijeni kolaps u sredini grede sa tlakom betona
- Dobro ponašanje čak i bez sidrenja

Grede sa lamelama pokazale su:

- Prerano starenje i neočekivani lom sa katastrofalnim kolapsom zbog odvajanja lamela zajedno s podlogom

Ovo se može objasniti manjom kontaktnom površinom između lamela i podloge, te neizbježnom razlikom u procesu ljepljenja. Sve zajedno stvorilo je tangencijalne napone nenosive za armirani beton.

Odvajanje je počelo pored nosača na jednom uzorku bez U sidra na krajevima i na cijeloj dužini uzorka prateći U sidra duž cijele dužine.

Nenalijeganje karbonskih vlakana zbog njihove valovitosti, izgleda ne utječe na konačni otpor.

- 2) Test prijanjanja na betonsku podlogu dosegao je vrijedost od 5 MPa, što je granica opreme koja se koristila, bez uklanjanja uzorka.

Svi izneseni podatci potvrđuju vrijednost Carboniara, za suhe trake i za platna, a također i za ciklus polaganja.

## 4.2 Ojačanje na posmik

Carboniar, se uglavnom koristi kao ojačanje protiv vlačnih sila, ali kad god izvorni presjek ne može izdržati posmik, moguće je nanijeti na strane, bilo jednosmjernu traku kao dodatne podupirače, bilo biaksialnu na 45° umjesto tradicionalnog ojačanja čeličnim L profilom.

Za proračun ojačanja na posmik CFRP-om moguće je konvergirati poprečni presjek čeličnog ojačanja u poprečni presjek karbonske trake djeleći površinu čelika koeficijentom, jednakim odnosu između vlačne čvrstoće karbonskog vlakna i popuštanja čelika.

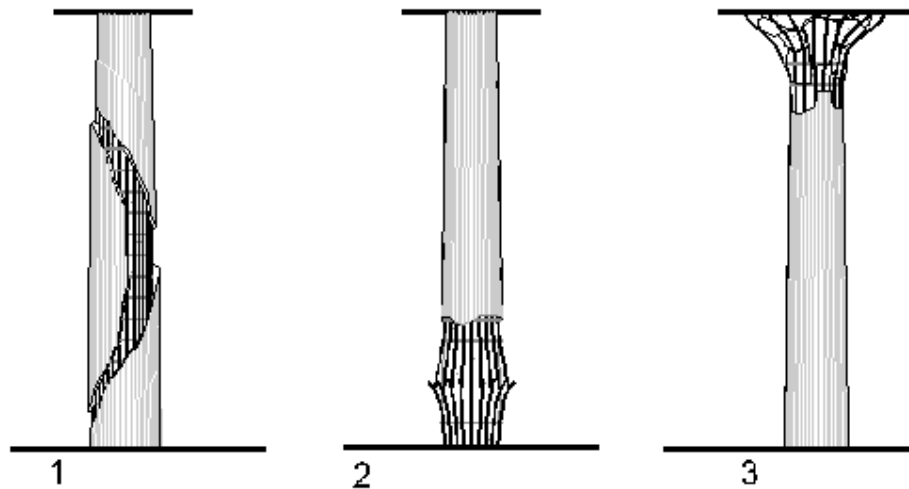
## 4.3 Tlačno ojačanje omatanjem (wrapping)

CFRP se može efikasno koristiti za omatanje tlačno opterećenih elemenata, tako da se ponašanje stupova u zgradama i na mostu pod potresnim djelovanjem može poboljšati jednostavnim omatanjem trakama karbonskih vlakana.

Naponi na stupovima mosta se dramatično mjenjaju pod potresnim djelovanjem, jer se neuobičajena horizontalna sila dodaje na normalne vertikalne.

Razlozi rušenja mogu biti (sl.9) :

1. Rušenje zbog posmika. Ovo je najopasnije zbog njegove lomljive i eksplozivne prirode. Općenito zbog nedostatka stupova.
2. Rušenje pri dnu pod naponima savijanja. Ovo je također vrlo opasno. To je općenito zbog nedovoljno postavljenih čeličnih šipki.
3. Rušenje gornjeg plastičnog okova. Ovo je manje opasan oblik zbog njegove povezanosti sa velikom rastezljivošću.



sl. 9

Mehanizam rušenja može se usporiti ili odgoditi povećavanjem vanjske potpore, omatanjem stupova jednosmjernom trakom karbonskih vlakana položenom duž horizontalnih linija. Na ovaj način rubna ekspanzija betona je promijenjena, zahvaljujući aktivaciji triaksialnog stanja tlaka zbog sistema omatanja.

Sistem nudi niz prednosti kao,

- Povećanu otpornost na osne tlačne napone
- Povećnu duktilnost, jer stup, nakon popuštanja, prelazi na deformaciju, u plastično stanje, trošeći veliku količinu energije
- Poboljšanu posmičnu čvrstoću, jer se trake ponašaju kao broj dodatnih stupova

Laboratorijski rest potvrđuje, da stup omotan trakom nastavlja otpor do dezintegracije betona.

Da bi čvrstoća na savijanje bila povoljna, dvosmjerne  $0^\circ/90^\circ$  trake trebale bi se koristiti. Količina vertikalno postavljenih traka će poboljšati čvrstoću na savijanje.

Da zaključimo, ponašanje stupova prilikom potresa može se znatno poboljšati jednostavnim, brzim i laganim postupcima.

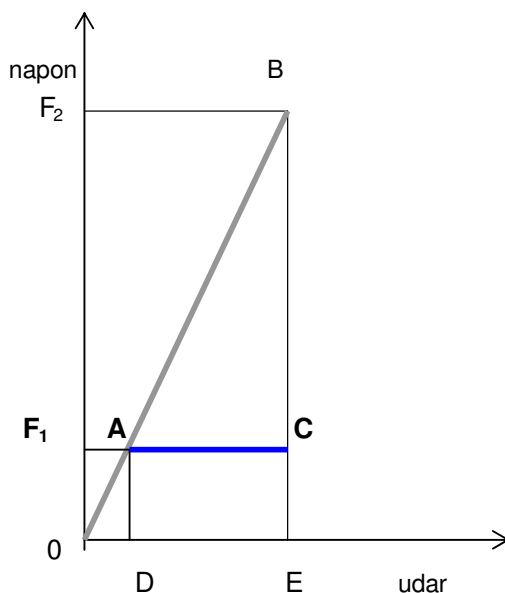
#### **4.4 Strukturalna dogradnja armiranobetonskih zgrada u potresnim zonama modernim tehnikama uz korištenje karbonskih vlakana**

Ispravan pristup predostrožnoj strukturalnoj nadogradnji armiranobetonskih zgrada u potresnim zonama propisuje prethodnu pažljivu analizu čvrstoće i krutosti nosivih elemenata (stupovi, grede i,

ako su prisutni, nosivi zidovi), rebalansiranje njihovih parametara te poboljšanje duktilnosti navedenih elemenata pomoću adekvatne tehnologije.

Kroz kvalificirani projekt baziran na analizi konačnih stanja, kako propisuje Eurocod, i uporabu inovativnih karbonskih vlakana, moguće je postići traženi sigurnosni nivo i spriječiti rušenje strukture (i moguće ljudske žrtve) uzrokovanjem da nosivi elementi prihvaćaju energiju nastalu potresima, prihvaćajući oštećenja strukture, čak do vrlo ozbiljnih, bez rušenja.

Princip je grafički prikazan na slici 10. i pokazuje ponašanje strukture pod povećanjem napona do  $F_2$  maksimalno, koje se može odrediti ordinatom, te se može predstaviti segmentom 0B ili 0AC slomljenom linijom.



Sl.10

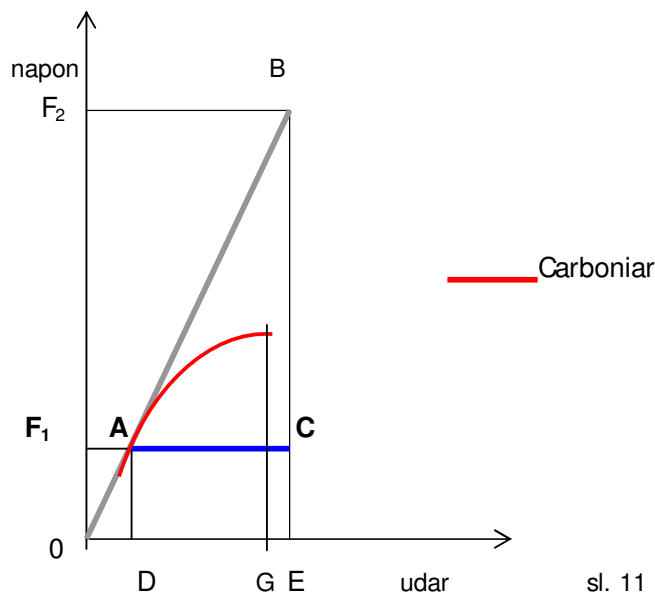
U prvom slučaju deformacije ostaju u elastičnom području i mogu se primjetiti kao 0E segment na apscisi. Takvo teoretski ispravno ponašanje ne može se dobiti u stvarnosti. Tražilo bi povećanje ojačanja do neprihvatljivih dimenzija i posljedičan gubitak korisnog prostora.

U drugom slučaju, nakon što se prva elastična faza poklopi sa prethodnom, predstavljeno segmentom 0A i 0D deformacijom, nakon što je  $F_1$ , povezan sa točkom popuštanja čelika, dosegnut, strukturalna deformacija ulazi u plastičnu fazu. Plastično ponašanje je prikazano AC segmentom, a plastična deformacija apscisi DE segmentom.

Takvo ponašanje je dobiveno razlikom sila  $F_2 - F_1$  koje se ne može pročitati sa ordinate, nego kao deformacija na apscisi. Drugim riječima, sagrađena struktura može izdržati do  $F_1$  i ne više. Sve dodatne sile, do maksimalne projektne vrijednosti  $F_2$  proizvode plastične deformacije. U ovoj fazi, struktura trpi više oštećenja, ali se ne ruši.

Razvojno planiranje preporučuje Eurokod i najnoviji propisi zemalja sa visokim rizikom potresa.

Interesantno je primjetiti balans energije, koji također predstavlja duktilnost, odnosno mogućnost strukture da izdrži bez izmjeničnih ciklusa lomova zatega u plastičnom području, izražen površinom nasprot OB linji, (elastično ponašanje strukture) je ugrađen u strukturu i kasnije oslobođen, dok u



sl. 11

Slučaju elastoplastičnog ponašanja, što je OAC slučaj, bit će rasipan tijekom plastične deformacije strukture, izbjegavajući opasnu elastičnu reakciju koja može uzrokovati udaranje same strukture ili susjednih elemenata, smanjujući oštećenja u zgradi. Sl. 11.

Kroz analizu efekata velikog broja seizmičkih događaja na armiranobetonskim zgradama istaklo se da, u većini slučajeva, su katastrofalni rezultati dobiveni zbog rušenja stupova ili vertikalnih nosivih elemenata općenito. Takvi elementi, premda pokazuju vertikalna ojačanja adekvatna u kvaliteti i količini za normalnu uporabu, čine se manjkavi nedostatkom horizontalnog ojačanja (koje kontrolira duktilnost) i, vjerojatno, trpe zbog nepravilnog odnosa čvrstoće i krutosti vertikalnih elemenata prema horizontalnim.

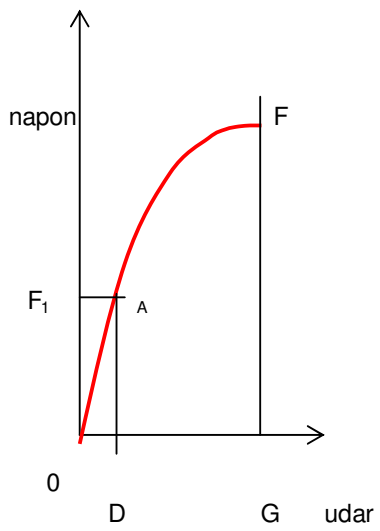
Duktilnost strukture može se poboljšati povećanjem horizontalnih ojačanja i, u ovom polju, najbolji rezultati su postignuti omatanjem sistemom Carboniar.

Prošireni testovi izvedeni sa Carboniar-om potvrđuju da ponašanje omotanih struktura prate uzorak OAF krivulje. Slike 11-12.

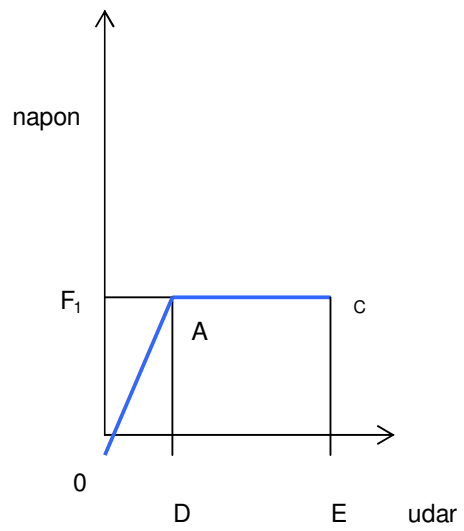
To znači :

- Povećanje duktilnosti i primljene energije u plastičnom području, jer je površina ispod OAF krivulje( sl.12) veća od površine pod OAC slomljene linije (sl 13)
- Poboljšanu čvrstoću

Ukratko, moderna tehnika karbonskih vlakana, u ovisnosti o valjanom projektu dopušta izvođenje zgrada prikladnih za projektirani seizmički rizik ili osposobljavanje zgrada oštećenih prijašnjim potresima.



sl 12



sl 13



## 5.0 Carboniar za obnovu povijesnih građevina i spomenika

### 5.1 Opći principi

Kad su počele studije mogućnosti i problema povezanih sa uporabom karbonskih vlakana u obnovi povijesnih građevina i spomenika, činilo se bitnim projektirati i razviti potpuno savitljiv materijal koji dopušta prilagodljivost svakoj površini, čak do najsloženijih i nepravilnih formi. Nadalje, tradicionalna slaba čvrstoća starih potpornih struktura potaknula je daljna istraživanja na poboljšanju njihove čvrstoće prije nanošenja ojačanja. Činilo se bitnim dosegnuti najbolji mogući kompromis između proširenja površine koju treba ojačati i adekvatne transpiracije u smislu sprečavanja mogućih oštećenja slika i freski. Konačno, prijanjanje mora biti najbolje.

Svi ovi zahtjevi usmjerili su finalizaciju Carboniar-a, koji nudi optimalnu soluciju svim navedenim zahtjevima, što je potvrđeno raznim važnim restauratorskim radovima izvedenim ovom osjetljivom području i rezultatima atesta.

Razlozi izbora materijala posebno dizajniranog za aeroindustriju, također na građevinama iznimne povijesne vrijednosti, kao što su Bazilika Sv. Francesca u Assisiu, Sv. Marco u Veneciji, Caldogno Villa pokraj Palladia, mogu se razumjeti kroz analizu napona, koji mogu biti nametnuti na takvim građevinama.

Ukratko, naponi se mogu podijeliti u dvije kategorije: naponi koji proizvode tlačne sile prihvatljive za povijesne materijale i oni koji proizvode vlačnu silu koja se ne može podnijeti.

U prvom primjeru, restauracija se može postići uporabom poželjno formulirnog morta koji koristi hidrauličko vapno kao vezivo i slično je originalnom mortu, za restauraciju pod tlakom. Naša firma proizvodi te materijale sa različitim formulacijama prikladnim, na primjer, za injektiranje, prionjive smjese za štukature ili za krpanje, žbuke makro porozne za disperziju vlage i zadržavanje topivih soli.

U drugom primjeru, moguće je koristiti samo materijale visoke vlačne čvrstoće. Bilo koji drugi izbor vodi do neizbježnog gubitka strukture pod vlačnim naponima.

Ima više uzroka koji vode do toga: zamislimo kombinirane vlačno/tlačne sile, izbačene iz ravnine zbog pomaka temelja, nasuprotan udarac krovova, vlačni napon u svodovima, lukovima i kupolama i zadnje ali ne i najmanje, potres u visoko potresnoj zoni, kao što se dogodilo 1997. u Assisiu gdje su ljudski životi i jedinstveno umjetničko bogatstvo poput Giottovih freski bili izgubljeni.

Čak i trenutni i trend obnove za prenamjenu nekih starih građevina koje su inače osuđene na potpuno propadanje, neizbježno se susreće sa dodatnim vlačnim silama zbog viših preopterećenja koja su izazvana prenamjenom objekta, koje nije predviđeno u njihovom početku.

Za povijesne građevine, Carboniar koristi suhe trake karbonskih vlakana, a ne lamelirana vlakna. Krutost lameliranih vlakana čini ih problematičnim zbog nemogućnosti prilagođavanja zaobljenim površinama i tangencijalni naponi na sučelju sa podlogom su glavni problemi s kojima se u tom slučaju treba boriti.

## 5.2 Carboniar: specifične karakteristike obnove povijesnih građevina i spomenika

Intervencije sistemom Carboniar nisu napadne i reverzibilne su jer se trake mogu ukloniti jednostavnim postupkom vrućim zrakom, ne povećavaju osjetno težinu same strukture, a to je od iznimne važnosti u slučaju potresa, ne zahtjevaju nikakve spojeve, mogu se brzo položiti, ne zahtjevaju ni posebnu opremu ni održavanje te su kompatibilne sa povijesnim materijalima. Nadalje ne mijenja "karakter" građevine, dok čuva funkcije strukturalnih komponenti.

Ovo objašnjava zašto ovi materijali, inovativni ali još organske prirode, nailaze na rastuću potražnju u uredima za zaštitu spomenika i kulturne baštine u svijetu.

Predložene intervencije su optimalni kompromis restauratorskih zahtjeva, uz pažljivo zadovoljavanje istih i novijih Eurokodova, koji inzistiraju na kompatibilnosti, reverzibilnosti, efikasnosti i trajnosti.

## 5.3 Laboratorijski testovi: Test prijanjanja i kombinirani test tlaka i savijanja

Testovi prijanjanja izvedeni su u IARovom laboratoriju na uzorcima Carboniara nanijetog na šljunkovito kamenu podlogu imaju prosječnu vrijednost od 0,83 MPa sa kohezivnim lomom podloge. Tako visoke vrijednosti, sa vrhovima do čak 1,6 MPa pokazuju da je podloga ojačana tretmanom površine Carboniar.

Testovi savijanja na zidanim stupovima, također nabivenim tlakom, te ojačani karbonskim trakama različite težine i modula elastičnosti, izvedeni u laboratorijima Sveučilišta u Padovi, dali su rezultate, koji se mogu svesti na slijedeće:

- Nulta linija unutar poprečnog presjeka i vrlo blizu osi lika
- Vrlo visoke vrijednosti tlaka, te lom na gornjem rubu (oko 14 N/mm<sup>2</sup>)(cigle 42,5 N/mm<sup>2</sup>, mort od hidrauličnog vapna 5 N/mm<sup>2</sup>)
- Nema raslojavanja na vlačnom rubu
- Visoka deformacija na (0,58%) vlačnom rubu bez vidljivih pukotina (moguće mikropukotine u mortu ).

### ***Trajnost popravki***

**EUROCODE 8** " Projektno pripremanje za otpornost strukture na potres dio 1-4: Opća pravila – Ojačanje i poporavak zgrada, Aneks F. : Osobito razmatranje za povijesne građevine i spomenike":

"Trajnost. Intervencija treba biti izvedena materijalima i tehnikom čija je trajnost dokazano usporediva sa drugim materijalima građevine. Manje trajna intervencija je prihvatljiva ako je predviđena zamjena".

Konačno, kad god se koristi materijal različit od izvornog, uputno je predvidjeti, već u projektnom stupnju, periodičke kontrole i moguće održavanje ili zamjenu.

### ***Završni tretman***

Kada ojačanje zahtjeva žbukanje, poprskajte tanak sloj kvarcnog pijeska preko svježe smole.

Ako će ojačanje ostati vidljivo, treba izabrati UV otpornu smolu.

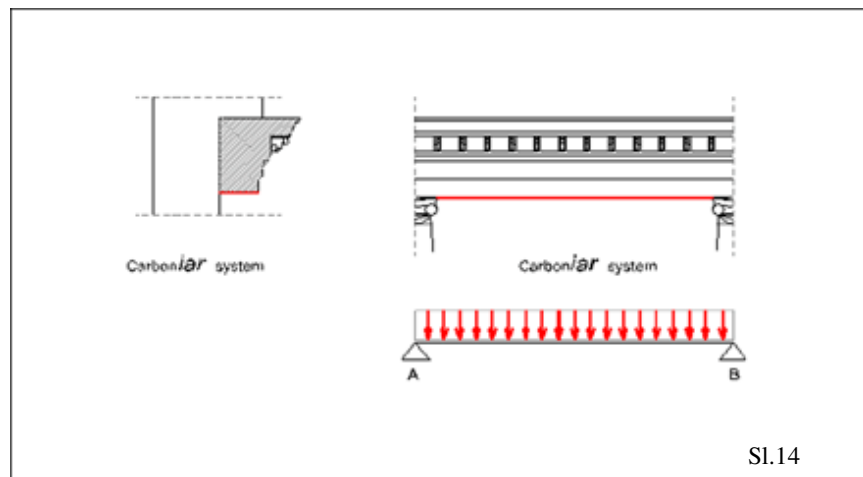
Popravci mogu biti tretirani da izgledaju poput ulaštenog čelika.

#### 5.4 Ojačanje vertikalnih zidova, omatanje stupova i kupola, ojačanje zvonika, svodova i drvenih greda: proračuni

Kao što je već naznačeno, karbonska vlakna bi trebala uzeti kontrolu svih napona koje ne mogu nositi tradicionalni materijali, odnosno vlačne napone.

Proračunski model je u liniji sa uobičajenim uzorkom tektonskih poremećaja kada dva materijala surađuju, svaki sa svojstvenim karakteristikama, uglavnom čvrstoćom i modulom elastičnosti. Kada vanjski naponi takvi, kao što je pojava vlačnih napona na tradicionalnim materijalima, upotreba karbonskih vlakana se sastoji u tome da pomakne nultu liniju unutar strukture, tako da dio presjeka vraća dio svog prirodnog ponašanja pod tlakom, dok vlačni naponi, naglašeni u vlačnoj zoni ispod nulte linije, će biti pomaknuti prema karbonskim vlaknima ( sl.14).

Takav pomak će postati više i više značajan sa povećanjem odnosa između modula elastičnosti karbonskih vlakana i onoga kod povijesne podloge.



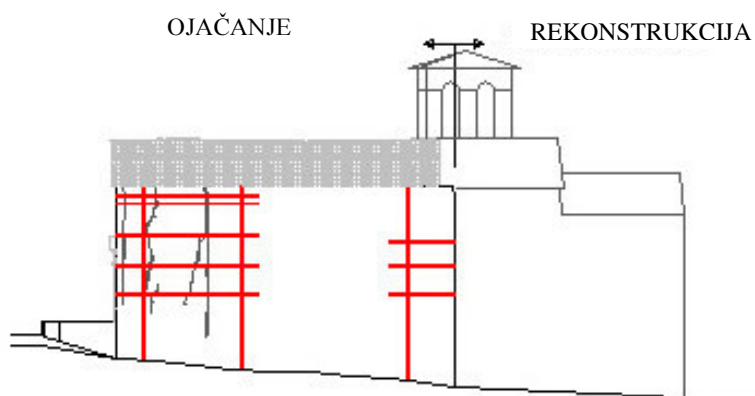
Na zidanim strukturama, karbonska vlakna se moraju oduprijeti horizontalnim komponentama svih sila, pogledaj shemu interverncije na crkvi u regiji Marche,Italija, (sl15), oštećenu u potresu, gdje karbonska vlakna preuzimaju sve neplanirane horizontalne sile seizmičkog porijekla, naročito na prednjoj strani, koja je potpuno odvojena od ostatka građevine.

Stukturalna provjera je bila proširena na horizontalne sile i njihove momente.

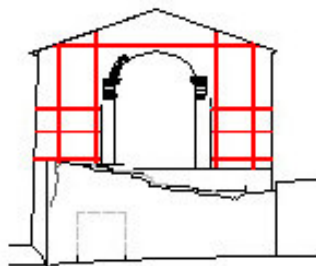
Na kraju, ispravni proračun površine prijanjanja dopustio je balans horizontalnih sila i tangencijalnih sila prijanjanja.



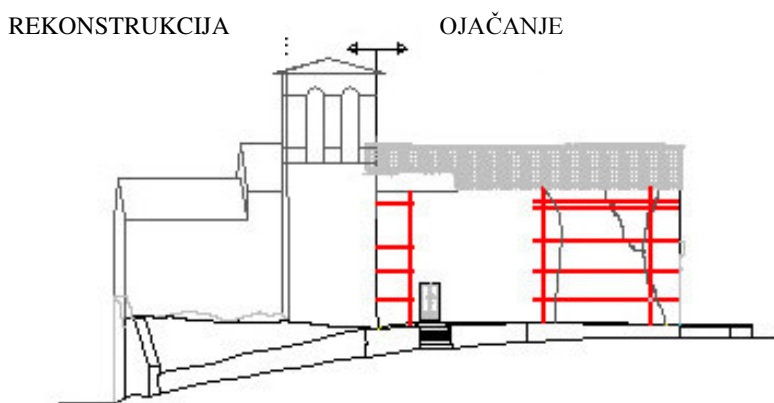
ISTOK



JUG



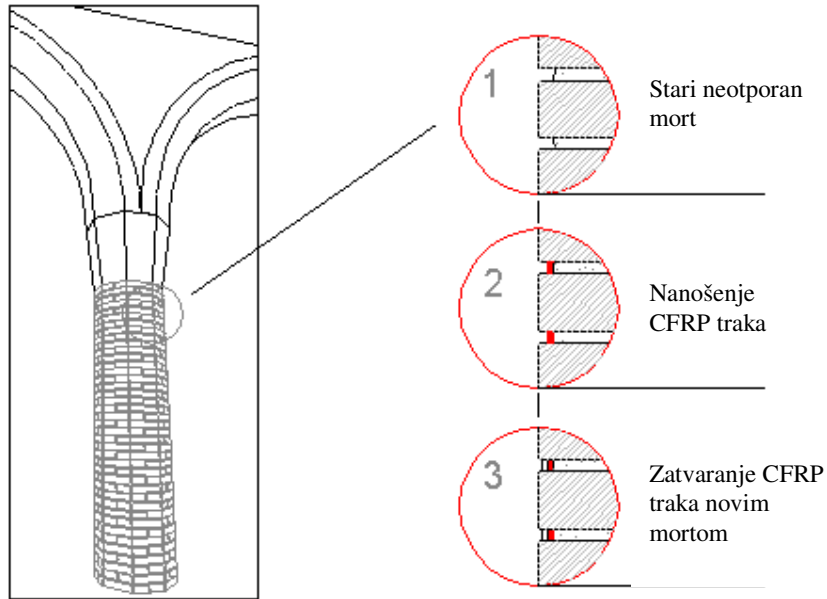
ZAPAD



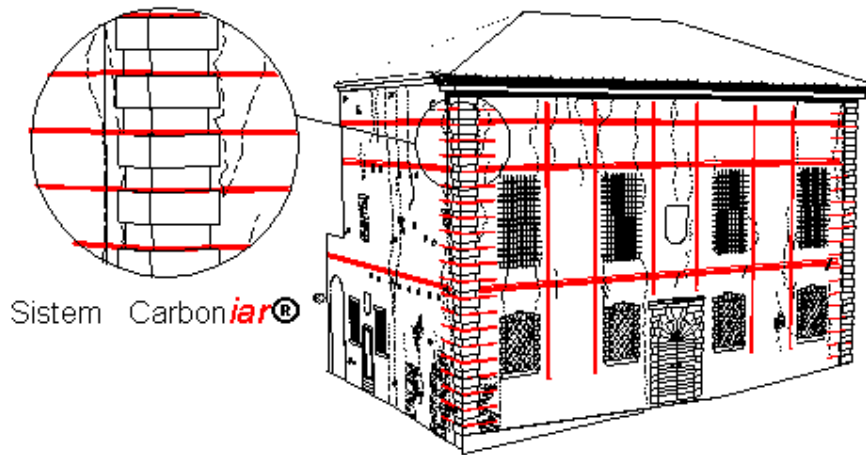
SJEVER

SL.15

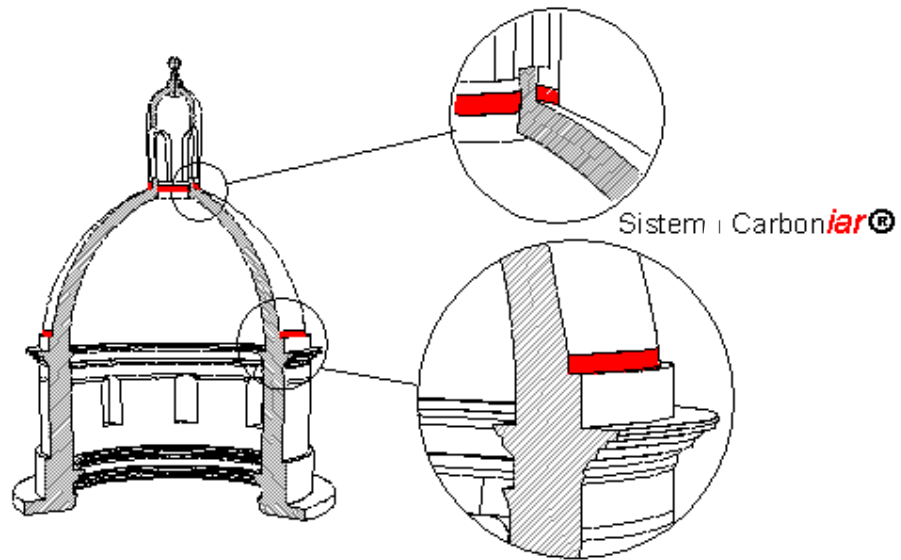
Stupovi od opeke mogu se efikasno omotati, što postavlja troosno tlačno stanje, uvelike bolje nego jednoosno, koje lagano prekoračuje dopuštene napone stvaranjem sistema paralelnih pukotina(s116.).



Stoga Iar također proizvodi vrlo uske trake, oko 1 cm širine, koje se mogu umetnuti u fuge i potpuno prkriti. Sa takvom trakom, bilo je moguće povezati kamene kutove stare građevine izbjegavajući bušenje i čelične zatege. (s117)

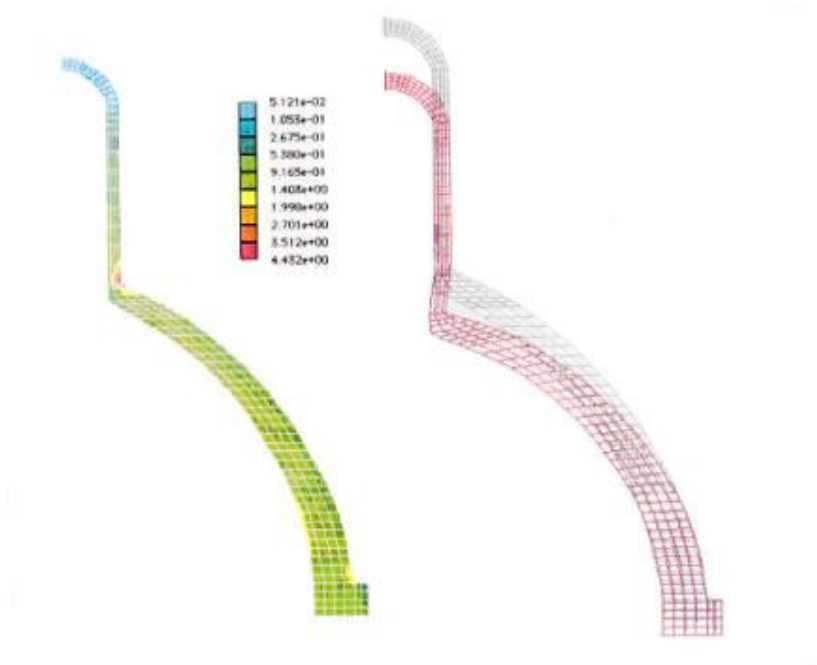


sl.17

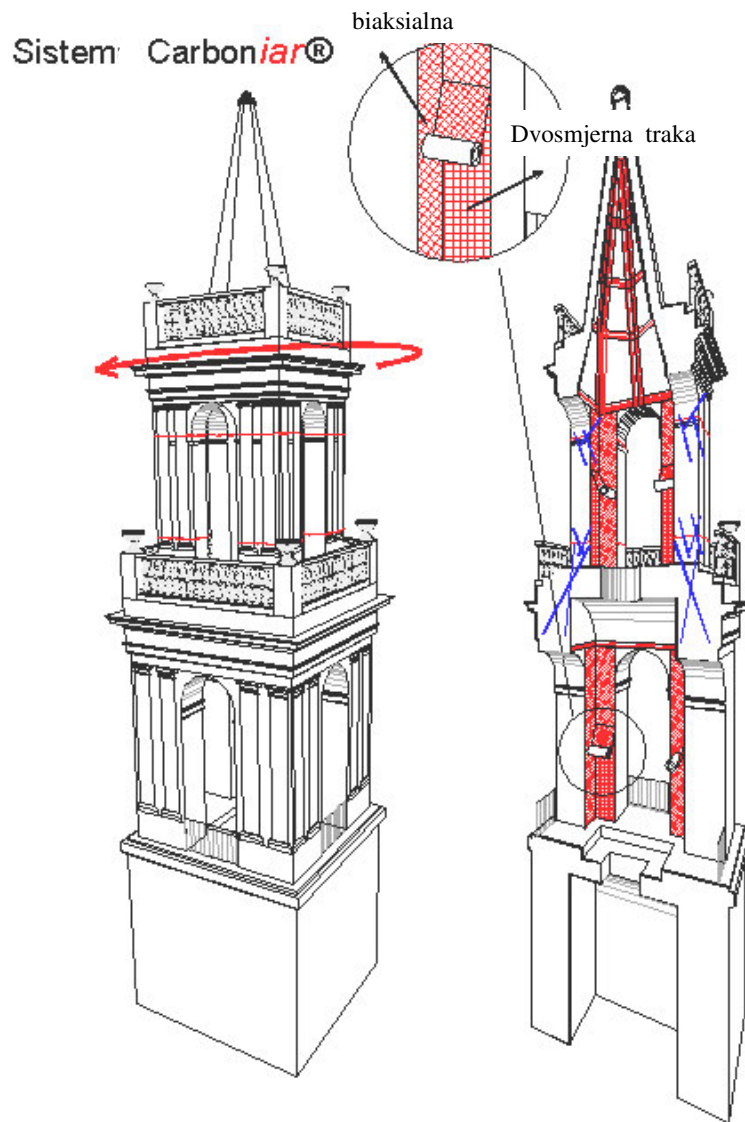


sl.18

Kupole se mogu omotati na isti način, naročito u kritičnim zonama očitovanim kroz strukturalnu analizu (F:E:M): općenito su smještene pri dnu ili na vrhu, ako podupire svjetionik (sl 18-19).



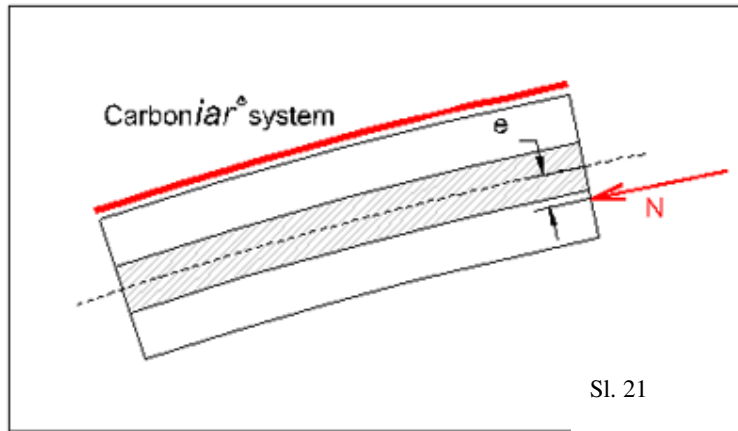
sl. 19



sl.20

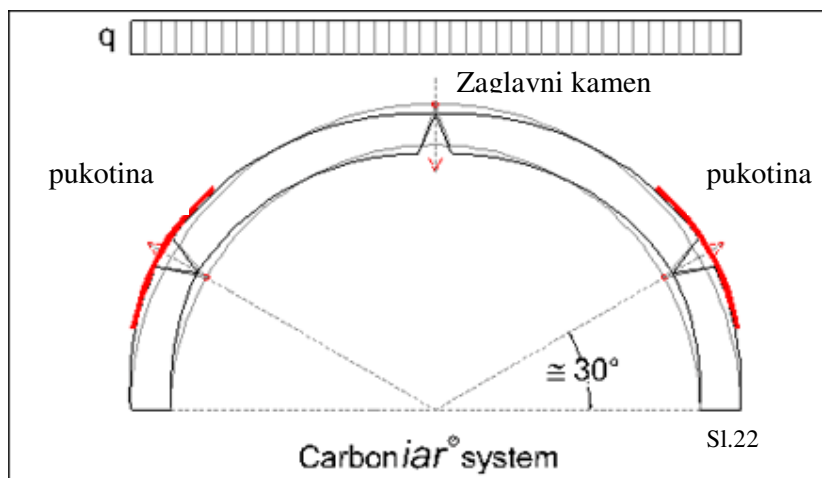
Složena vlačna situacija u vitkim strukturama, poput zvonika, primorala nas je da dizajniramo unutarnje ojačanje koje se sastoji od dva položena sloja traka karbonskih vlakana, jedan njih dvosmjernog tipa  $0^\circ$ -  $90^\circ$ , te drugi biaksialni  $\pm 45^\circ$ . (sl.20)

Kada se radi o svodovima, predimenzioniranje se može dobiti grafičkom Mary metodom, koja dopušta korištenje jednažbi. Spontano formiranje triju pukotina, jedna blizu vrha te dvije druge na bokovima, mijenjaju strukturu iz hiperstatičke u izostatičku, te se dobiva luk sa tri pukotine.(sl.22)

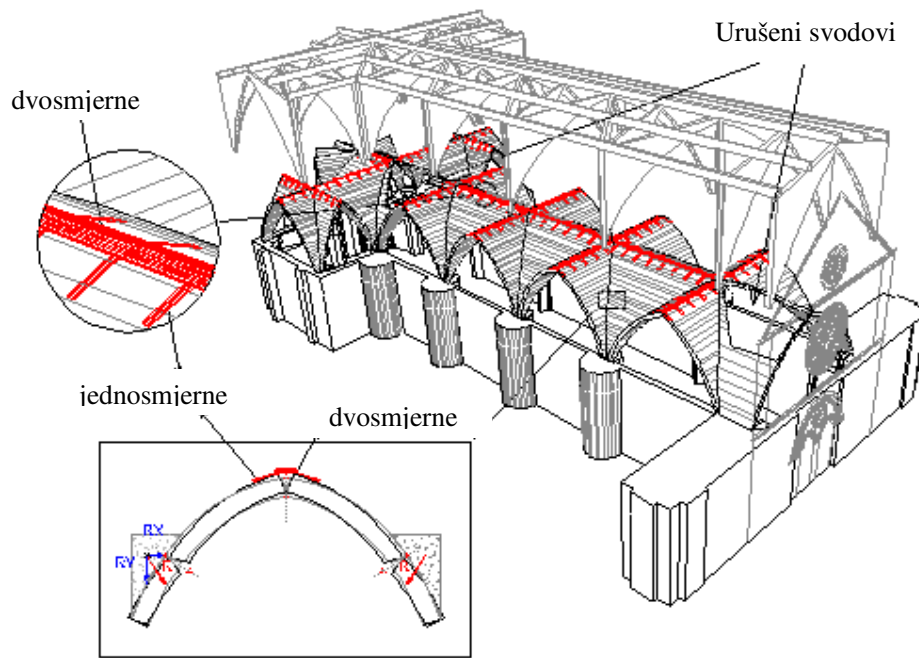


Sl. 21

Ojačanje karbonskim vlaknima apsorbira vlačne napone dobivene kombiniranim tlačnim i vlačnim naponima u zoni gdje centar potiska pada van središnje jezgre inercije, zbog iznenadnog preopterećenja ili potresnog djelovanja. Zidane strukture iziskuju kapacitet vlačnih sila od CFRPa. (Sl.21-22-23)

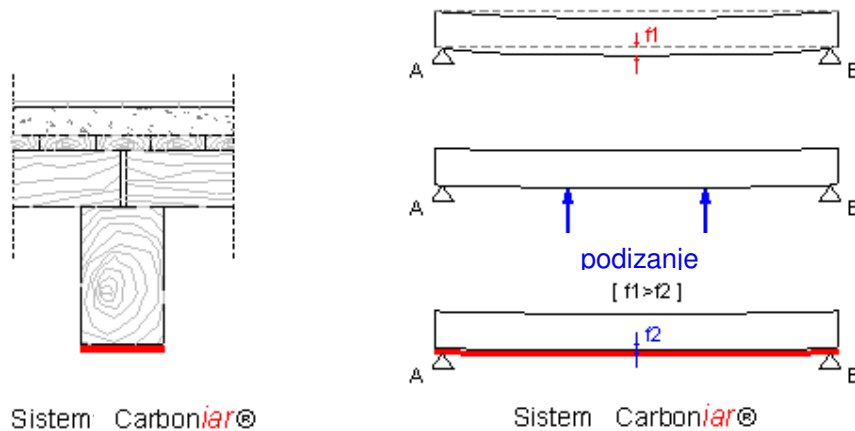






sl.23

Kod drvenih greda problemi proizlaze više zbog spore deformacije radi starenja, nego zbog nedostatka čvrstoće. Prikladnim postupcima moguće je barem djelomično obnoviti postojeći otklon, te spriječiti vraćanje, ne koristeći lamelirane grede, neprikladne za restauraciju ili drvene grede povećanih dimenzija, koje bi pokvarile arhitektonske karakteristike građevine (sl. 24).



Sl. 24

Konačno, karbonska vlakna omogućavaju uspješno povezivanje strukturnih elemenata, ostvarujući čvrsto držanje cijele građevine, što je esencijalno u slučaju potresa (sl. 15).