

dr. Ingrid Boem, univ. dipl. inž. grad.

ingrid.boem@fsv.cvut.cz

Department of Concrete and Masonry Structures,

Faculty of Civil Engineering,

Czech Technical University in Prague, Thákurova 7, 166 29 Praha 6,

Czech Republic



prof. Natalino Gattesco, univ. dipl. inž. grad.

gattesco@units.it

Department of Engineering and Architecture,

University of Trieste, p.le Europa 1, 34127 Trieste (Ts),

Italy



Allen Dudine, mag. inž. grad.

allen.dudine@fibrenet.it

Fibre Net S.p.A., Via Jacopo Stellini, 3 - Z.I.U.,

33050 Pavia di Udine (Ud),

Italy



doc. dr. Matija Gams, univ. dipl. inž. grad.

mgams@fgg.uni-lj.si

Katedra za konstrukcije in potresno inženirstvo,

Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Univerza v Ljubljani,

Jamova cesta 2, 1000 Ljubljana



Znanstveni članek

UDK 692:699.841

POTRESNO UTRJEVANJE ZIDANIH STAVB: PREDSTAVITEV RAZISKAV S KOMPOZITI ARMIRANIH MALJNIH OBLOG SEISMIC PROTECTION OF EXISTING MASONRY BUILDINGS: A ROUTE OF RESEARCH ON COMPOSITE REINFORCED MORTAR

Povzetek

Na področju utrjevanja obstoječih zidanih stavb se je v zadnjih dvajsetih letih uporaba maltnih oblog, ki so armirane s kompozitnimi materiali (angl. Composite Reinforced Mortar oz. CRM), močno razširila. Tipično za take obloge je, da je plast malte razmeroma tanka in nanosena na celi površini zidu ter da je armirana z mrežico iz kompozitnih vlaken. Običajno imajo kompozitna vlakna visoko natezno trdnost in niso občutljiva na korozijo. V članku predstavimo ključne korake na dolgi raziskovalni poti, na kateri smo eksperimentalno in računsko analizirali obnašanje takih oblog na več nivojih, od posameznih materialov do stavbe v naravnem merilu. Prikazane so izkušnje in spoznanja glede njihovega odziva in učinkovitosti, s katerimi smo prispevali k razumevanju njihovega obnašanja v raziskovalni sferi in na področju projektiranja. Med razvojem smo sistematično preučevali tudi zahtevne in večplastne vidike, s katerimi se srečujejo projektanti, ko izbirajo ustrezno metodo za potresno utrditev zidanih stavb.

Ključne besede: potresna odpornost, utrjevanje zidanih stavb, kompoziti, eksperimenti, numerično modeliranje

Summary

Over the last 20 years, Composite Reinforced Mortars (CRM) have gradually become widespread as innovative strengthening techniques for the seismic protection of existing masonry buildings. They combine an inorganic mortar layer, applied to the masonry surface, with a high tensile resistant, non-corrosive, fiber-based reinforcement. The paper traces the main steps of an in-depth research route on a specific CRM technique, providing an overview on the experimental testing and numerical modeling experiences aimed at achieving an in-depth knowledge on its behavior and on its effectiveness in improving masonry performance. It is an example of a systematic approach to research, which deals with the complexity and multiplicity of aspects that need to be considered by professional designer when choosing among the solutions available on the market.

Key words: seismic vulnerability, masonry strengthening, composites, experimental tests, numerical modelling

1 UVOD

Velik del stavbne kulturne dediščine v Evropi in po svetu so zidane stavbe, ki potrebujejo konstrukcijska popravila zaradi razlogov, kot so dotrajanost, pretekli posegi, posedki tal, čezmerna razpokanost, izpostavljenost neugodnim obtežbam in drugo. Izkušnje kažejo, da so to običajno masivne stavbe, ki dobro prenašajo navpične obtežbe, a so razmeroma občutljive na potresno obtežbo. Glavni razlog za to občutljivost so nezadostna povezanost konstrukcijskih elementov (med zidovi in stropnimi konstrukcijami ter tudi med zidovi v eni in drugi smeri), neustrezna porazdelitev zidov v tlorisu in po višini ter preslabe materialne karakteristike zidovja. Zidovje je najšibkejš v nategu, v katerem praktično nima nosilnosti, razmeroma šibko v strigu in razmeroma dobro za prenašanje tlačnih obremenitev. Zato lahko z dodajanjem materialov, ki dobro prenašajo natezne obremenitve, bistveno izboljšamo natezno in tudi strižno trdnost zidovja.

V tem kontekstu so se zadnjih 20 let razvijali in uveljavljali inovativni sistemi utrjevanja, ki temeljijo na oblaganju zidov z maltnimi oblogami, ki so armirane s kompozitnimi vlakni. Ta kombinacija materialov je zelo učinkovita, saj kompozitna vlakna nudijo visoko odpornost na natege in korozijo, malta pa se razmeroma enostavno nanaša na neravno površino zidovja in je z zidom mehansko in kemično kompatibilna. Malta tudi ščiti vlakna pred UV-sevanjem in požarom. Možno je kombinirati različne materiale za armiranje (npr. steklena, karbonska, bazaltna) in izdelke iz njih (tkanine ali mreže), različne pa so lahko vrste in debeline maltne obloge.

Razvoj teh sodobnih tehnik je zahteval preučitev problema na več nivojih: od preiskav mehanskega in kemičnega obnašanja materialov, preizkušanja konstrukcijskih elementov in celih konstrukcij do razvoja in kalibracije numeričnih in analitičnih metod.

V tem članku je predstavljena raziskovalna pot oz. pregled raziskav skupine raziskovalcev, ki je dalj časa sistematično raziskovala možnost tovrstnega utrjevanja.

2 MALTNE OBLOGE, ARMIRANE S KOMPOZITNIMI VLAKNI

V članku predstavljamo raziskave na specifični vrsti maltnih oblog, ki so debele 25–30 mm ali več in armirane z alkalno odpornimi mrežami iz steklenih vlaken (slika 1). Za ustrezno mehansko povezavo med oblogo in zidom so obloge sidrane v zid s sidri iz steklenih vlaken. Pod sidri so dodatne mrežice za boljši raznos napetosti (slika 1). Obloge se lahko na zid nanesle le z ene strani, a je v tem primeru treba uporabiti dodatna povezovalna sidra, ki so bistveno močnejša in v primeru večslojnih zidov tudi povežejo posamezne sloje v monoliten zid.

Mreža iz steklenih vlaken za armiranje oblog ima vlakna (oz. niti) v obeh smereh. V postopku proizvodnje se vlakna impregnirajo s polimerom (vinylester-epoxy) in spletejo v mrežo. Ko se polimer na povišani temperaturi strdi, se mreže zvijejo v rolo, ki je pripravljena za uporabo.



Slika 1. Mreža iz steklenih vlaken in sidra pred nanosom maltne obloge.

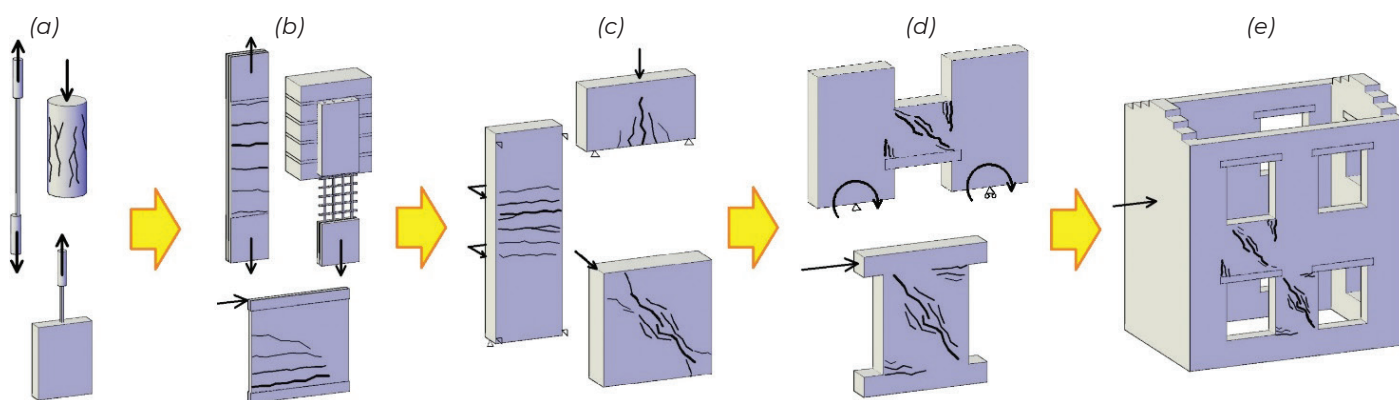
3 EKSPERIMENTALNE RAZISKAVE

Eksperimentalne raziskave so bile ključne za določitev obnašanja posameznih materialov, maltnih oblog in njihovega učinka na potresni odziv konstrukcijskih elementov in konstrukcij. Da bi jih optimizirali, smo sistematično obravnavali vedno bolj zahtevne preizkušance, kot je prikazano na sliki 2. Seveda se je število preizkušancev zmanjševalo s kompleksnostjo preiskave zaradi sorazmerno večjih finančnih stroškov in porabe časa.

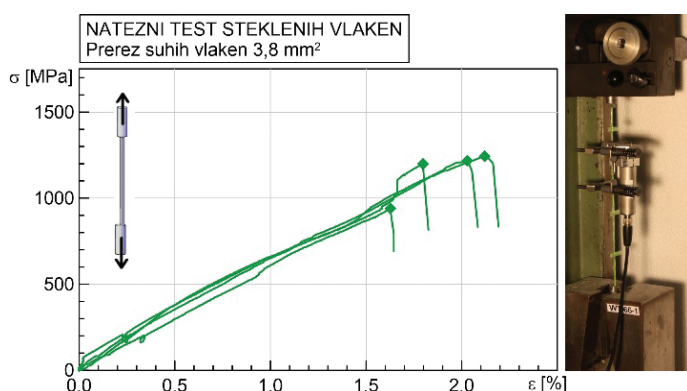
Na nivoju posameznih materialov (slika 2a) smo izvedli natezne teste na vrveh iz vlaken (primer je prikazan na sliki 3), teste za določitev tlačne in natezne trdnosti malte, strižne teste vzdolž mreže in izvlačne (angl. pull-out) teste vlaken iz malte [Gattesco, 2017a]. Ti testi so bili pomembni za določitev mehanskega obnašanja različnih materialov in njihove interakcije.

Omeniti je pomembno, da so bili za niti mreže oz. za steklena vlakna izvedeni testi trajnosti pri različnih temperaturah in vlažnostih ter testi utrujanja pri dolgotrajni obtežbi. Za steklena vlakna je namreč zelo pomembno preveriti odpornost v alkalnem okolju, ki se nahaja v malti ([Micelli, 2017], [Micelli, 2019]).

Na nivoju obloge smo preizkušali vzorce, ki jih imenujemo kuponi (slika 2b). Preizkusili smo jih v čistem nategu in strižno. S strižnimi testi smo preizkusili moč vezi med oblogo in zidom ter strižno trdnost v ravnini obloge. Na podlagi teh preizkusov smo določili ekvivalentne karakteristike CRM-oblog kot kompozitnega materiala ([Gattesco, 2017a], [Sisti, 2019]). Primer čistega nateznega preizkusa kupona je prikazan na sliki 4a. Rezultati teh testov so pokazali, da se CRM-obloge v nategu



Slika 2. Prikaz sistematičnega pristopa eksperimentalnih raziskav maltnih oblog (CRM) oz. njihovega učinka na: (a) posameznih materialih, (b) CRM-oblogi, (c) preprostih vzorcih z monotono obtežbo, (d) konstrukcijskih elementih s potresno obtežbo in (e) stavbi v naravnem merilu.



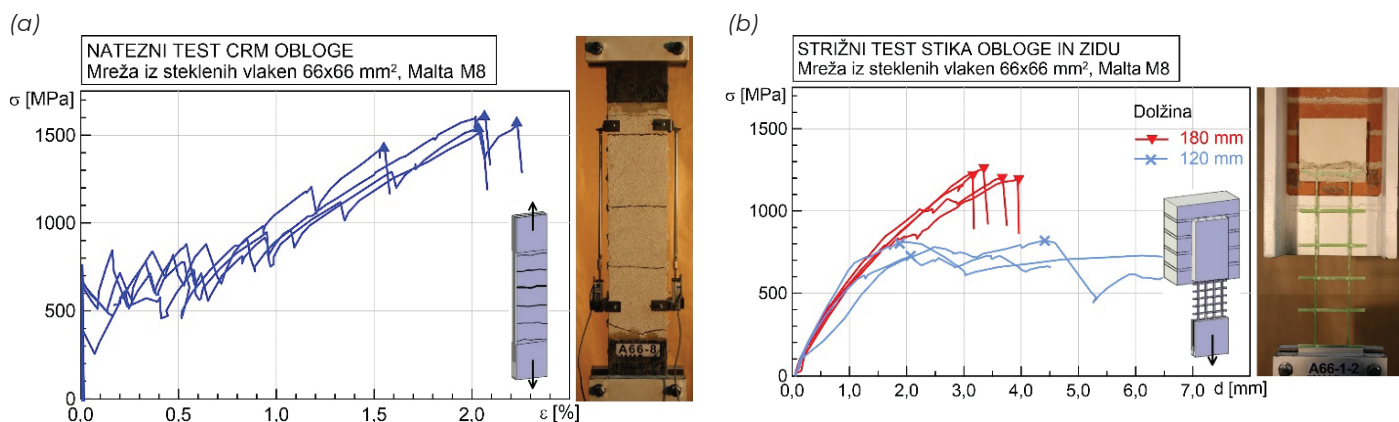
Slika 3. Natezni preizkus na vrvi iz kompozitnih vlaken: levo je graf napetost-deformacija (napetost se nanaša na prerez suhih vlaken), desno pa preizkuševališče.

obnašajo kot dvofazni material. V prvi fazi nudi odpornost malta. Ko malta razpoka, drastično pade togost, a še ne pride do porušitve, saj se obtežba prenese na vlakna v razpokah, ki se pod obtežbo odpirajo. V optimalnem primeru pride do končne porušitve zaradi pretrganja vlaken. Če sidrna dolžina ni za-

dostna ali če je vlaken preveč, lahko pride do zdrsa vlaken iz obloge ali pa do tega, da popusti stik z osnovnim zidom. To je razvidno iz grafa na sliki 4b, ki prikazuje rezultate strižnega testa povezave z dvema sidrnima dolžinama (180 in 120 mm). V primeru dovolj velike sidrne dolžine je prišlo do porušitve v vlaknih. V drugem primeru s prekratko sidrno dolžino pa je prišlo do zdrsa vlaken v malti, zaradi česar nismo uspeli v celoti izkoristiti. Posledično je bila manjša tudi nosilnost obloge.

Z eksperimentalnimi raziskavami na preprostih zidovih na sliki 2c smo izvedli preliminarne raziskave učinkovitosti tovrstnih oblog pri tipičnih porušnih mehanizmih obstoječega zidovja. Preučevali smo strižno porušitev z diagonalnimi razpokami, upogibno porušitev v ravnini in upogibno porušitev izven ravnine ([Gattesco, 2015], [Gattesco, 2017b]).

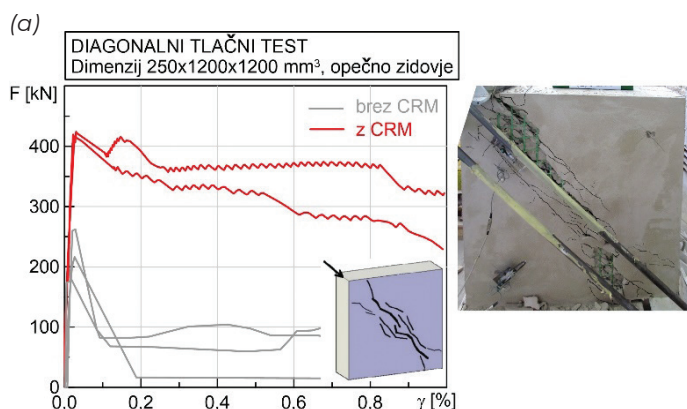
Primer na sliki 5a prikazuje diagonalne tlačne teste na vzorcih iz polne opeke. Diagonalni tlačni testi so bili izvedeni na preizkušanih dimenzij debelina x dolžina x višina = 250 x 1200 x 1200 mm³, graf sila-strižna deformacija pa prikazuje velik vpliv obloge oz. povečanje nosilnosti. Ko je malta popustila, je mreža učinkovito prevzela obremenitve in jih celo uspela razporediti na širše območje.



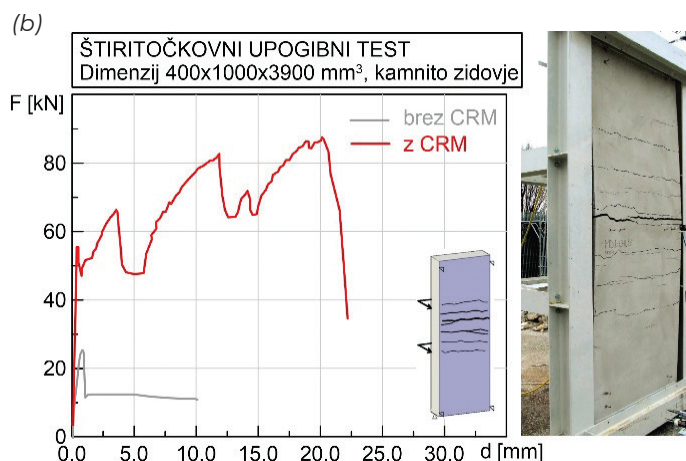
Slika 4. Preiskave CRM-oblog v (a) nategu in (b) na strižno nosilnost stika z zidom: graf ekvivalentnih napetosti v odvisnosti od deformacije ali zdrsa in tipične poškodbe vzorcev.

Upogibni testi kamnitega zidovja izven ravnine s štiritočkovnim upogibom so prikazani na sliki 5b. Izvedeni so bili na vzorcih velikosti debelina x dolžina x višina = 400 x 1000 x 3000 mm³ in so prav tako pokazali veliko povečanje nosilnosti zaradi obloge. Kot smo omenili že prej, ključno spremembo v obnašanju dosežemo zaradi natezne nosilnosti vlaken v oblogi. Vendar pa je za delovanje obloge pomembno, da uspemo vlakna ustrezno aktivirati. Če npr. pride do zdrsa vlaken v oblogi ali pa če se obloga delaminira od zidu, utrjevanje ni učinkovito.

Z vidika potresnega obnašanja je pomembno in ugodno še, da se je količina disipirane energije (ploščina pod krivuljo) v obeh primerih znatno povečala.



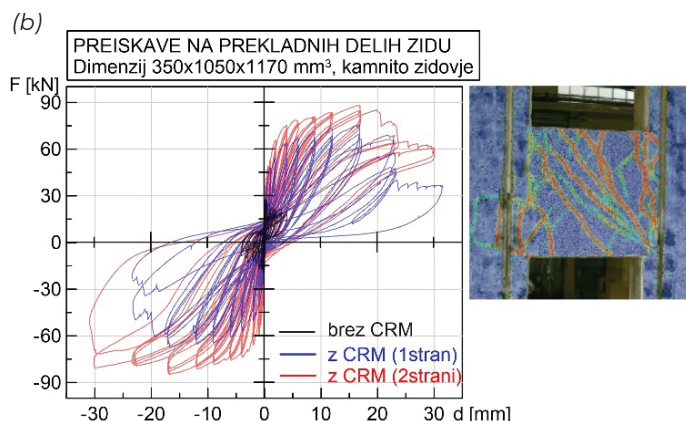
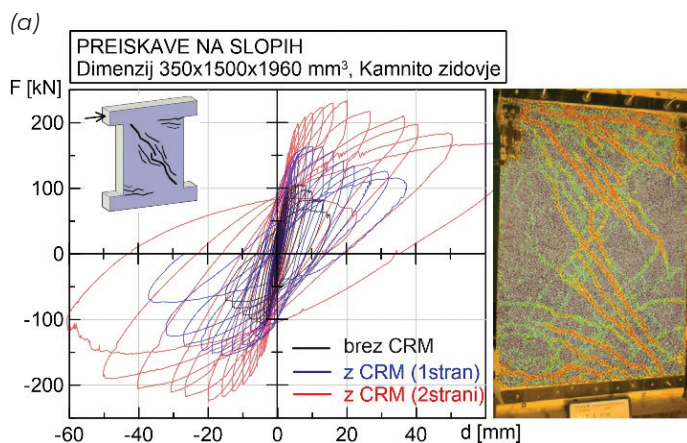
Zidni slop, prikazan na sliki 6a, je bil dolg 1500 mm in visok 1960 mm. Potresno obtežbo na zid smo simulirali z vsiljevanjem pomikov na zgornjem robu. Pomike smo nanašali izmenično v eni in drugi smeri ter amplitudo postopoma povečevali. Med preiskavo je bila v zidu konstantna tlačna napetost 0,5 MPa, poleg tega pa je imel zid na zgornjem robu preprečene zasuke. Rezultat preiskave je prikazan na grafu v obliki vodoravna sila v odvisnosti od vodoravnega pomika (histerezna krivulja). Slika zidu ob grafu prikazuje poškodbe utrjenega zidu – črte rdeče oz. toplih barv prikazujejo razpoke. Kombinacija poševnih in vodoravnih razpok pa nakazuje tako strižne kot tudi upogibne poškodbe.



Slika 5. Krivulje odpornosti in vzorci poškodovanosti pri preiskavah osnovnih mehanizmov za (a) diagonalni tlačni test in (b) za upogibni test izven ravnine.

Z eksperimentalnimi raziskavami zidnih slopov in prekladnih delov v naravni velikosti pri simulirani potresni obtežbi (slika 2d) smo opazovali dejansko obnašanje konstrukcijskih elementov, s katerimi običajno modeliramo zidane stavbe po metodi nadomestnih okvirjev [Gattesco, 2022]. Vzorci na sliki 6 so bili zgrajeni kot dvoslojni kamniti zidovi debeline 350 mm, maltne obloge CRM pa so bile na eni ali obeh straneh zidu.

Preizkušane prekladne delo zidu na sliki 6b je v obliki »H«, pri čemer je dolžina prekladnega dela 1050 mm, višina pa 1170 mm. Prekladni del je sezidan na leseni prekladi, levo in desno od preklade pa sta slopa dolžine 1420 mm in višine 2190 mm. Zidna slopa na straneh sta potrebna za zagotavljanje ustreznih robnih pogojev in za vnos obtežbe. Obtežba se vnaša tako, da se slopa ob vpetju zasukata v isti smeri, kar povzroči strižne in upogibne obremenitve v prekladnem delu.



Slika 6. Preiskave (a) zidnih slopov in (b) prekladnih delov: histerezne krivulje in vzorci poškodb utrjenih zidov.

Rezultati v obliki histreznih krivulj za prekladni del so prikazani poleg sheme poškodb utrjenega zidu, na kateri ponovno vidimo kombinacijo strižnega in upogibnega odziva. Upogibne razpoke so tokrat navpične na levem in desnem robu prekladnega zidu [Gams, 2021].

Primerjava odziva neutrjenega zidovja z zidovjem, ki je utrjeno z oblogami na eni ali obeh straneh, kaže na veliko povečanje nosilnosti, kapacitete pomikov in disipacije energije. Do povečanja disipacije energije pride zaradi armiranja, ki povzroči, da se poškodbe porazdelijo po veliki površini in niso skoncentrirane le v posameznih razpokih. Pri zidnih slopih je izboljšanje odziva zaradi oblaganja z obeh strani večje kot v primeru oblaganja le z ene strani. V primeru prekladnih delov pa oblaganje z obeh strani ne prinese veliko več kot utrjevanje z ene strani.

Učinkovitost utrjevanja smo preizkusili tudi na stavbi v naravnem merilu. Stavba, prikazana na sliki 7a, je bila zgrajena iz 350 mm debelega dvoslojnega kamnitega zidovja in je imela tlorisne dimenzije 5750 mm x 4350 mm, visoka pa je bila 6000 mm [Gattesco, 2022]. Imela je lesene stropne konstruk-

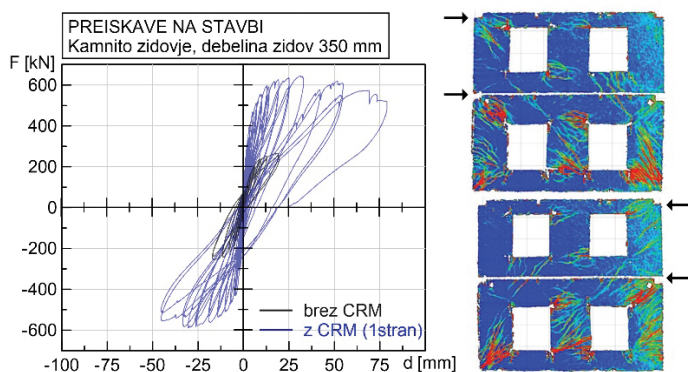
cije in dvokapno streho z opečno kritino. Manjkajočo koristno in stalno obtežbo smo simulirali z betonskimi utežmi. Vodoravno obtežbo smo vnašali v vzdolžni smeri na nivoju etažne konstrukcije in strehe. Oblika vodoravne obtežbe po višini je sledila obliki prve nihajne oblike. Stavbo smo najprej preizkusili v neutrjenem stanju do večjih, a še popravljivih poškodb. Poškodbe smo zatem popravili z injektiranjem razpok in stavbo utrdili s CRM-oblogami z ene strani. Obloge so bile sidrane v temelje po celotnem obodu konstrukcije z jeklenimi navojnimi palicami. Utrjeno stavbo smo ponovno preizkusili. Tokrat do stanja blizu porušitve.

Učinkovitost utrjevanja na nivoju stavbe je razvidna iz grafa na sliki 7b, na katerem sta prikazani histreznata odziva neutrjene in utrjene stavbe v obliki strižne sile ob vpetju v odvisnosti od pomika na vrhu stavbe. Na sliki 7b so prikazane tudi poškodbe stavbe pri obtežbi z ene in druge smeri. Poškodbe so, podobno kot pri posameznih konstrukcijskih elementih, razporejene po veliki površini stavbe. Ravno ta razpršenost razpok predstavlja veliko izboljšanje v primerjavi z osnovnim stanjem, saj omogoča veliko disipacijo energije.

(a)



(b)



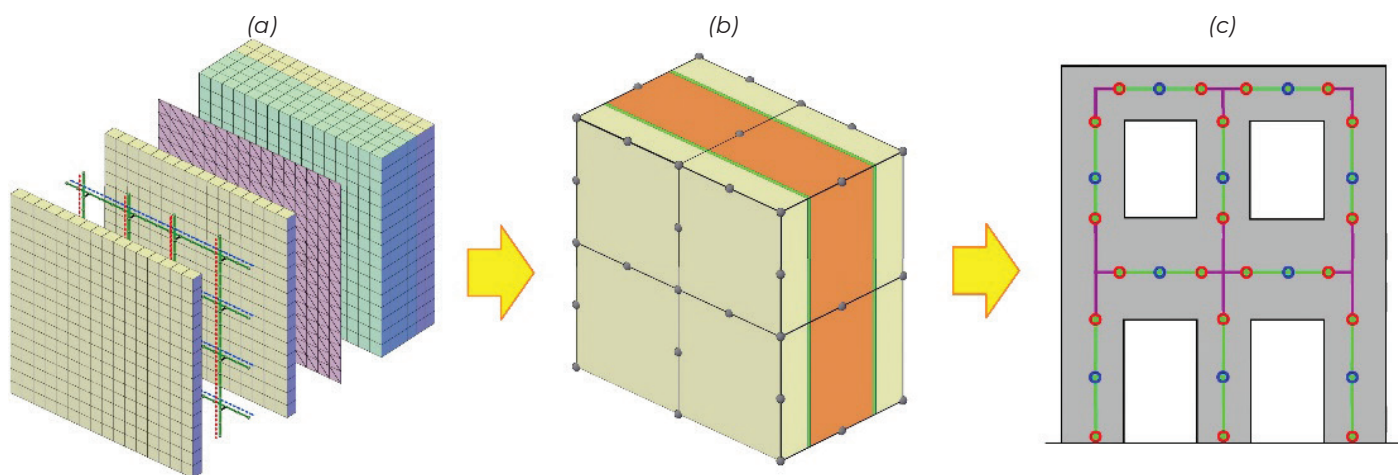
Slika 7. Preiskave na stavbi v naravnem merilu: (a) stavba na preizkuševališču in (b) rezultati preiskave v obliki histreznih krivulj in vzorca poškodb utrjene stavbe.

4 NUMERIČNO MODELIRANJE

Zaradi časovnih in finančnih omejitev ni mogoče eksperimentalno preizkusiti vseh različnih kombinacij materialov in oblik preizkušancev, prav tako ni mogoče izvesti preizkusov pri veliko različnih napetostnih stanjih in robnih pogojih, saj je kombinacij preveč. Da bi preverili kombinacije parametrov, ki jih ne preverimo z eksperimenti, si moramo pomagati z numeričnimi modeli. Z njimi lahko upoštevamo poljubno geometrijo in kombinacije vhodnih podatkov, uporabimo pa jih lahko tudi za optimizacijo CRM-oblog in občutljivostne analize.

Razvoj računskih modelov v razvoju obravnavanih maltnih oblog CRM je temeljil na nelinearnih analizah z večnivojskim pristopom (angl. Multi-Level Approach). V skladu s tem pristopom smo uporabili modele na različnih velikostnih nivojih, kot je prikazano na sliki 8. Prve so bile analize na najmanjših preizkušancih (slika 8a). Za te analize so bili uporabljene najbolj detajlni modeli, ki jih imenujemo Detailed-Level Modelling (DLM). Na teh modelih je bila narejena kalibracija z eksperimenti in optimizacija, s katero smo dobili enako natančen in zanesljiv računski model, ki pa je bil veliko bolj numerično učinkovit in smo z njim lahko modelirali bistveno večje preizkušance. Ta model je t. i. model z več plastmi oz. angl. Multi-Layer Model (MLM) in je prikazan na sliki 8b. S tem modelom smo uspešno modelirali teste konstrukcijskih elementov (slopov in prekladnih delov) pri ciklični obtežbi. Na nivoju računskih modelov celih stavb, kot je tisti, prikazan na sliki 8c, smo uporabili modele nadomestnih okvirjev s koncentrirano plastičnostjo v členkih (Lumped Plasticity Model, LPM).

V najbolj podrobnem modelu DLM na sliki 8a smo uporabili zelo fino mrežo končnih elementov (stranica končnega elementa je bila dolga približno 15 mm). Z osemvozličnimi prostorninskimi elementi smo modelirali zidovje, maltno oblogo in steklena vlakna. Med posameznimi materiali smo uporabili



Slika 8. Večnivojski pristop pri modeliranju zidov s CRM-oblogami: (a) podrobni model DLM, (b) model z več plastmi MLM in (c) model s koncentrirano plastičnostjo LPM.

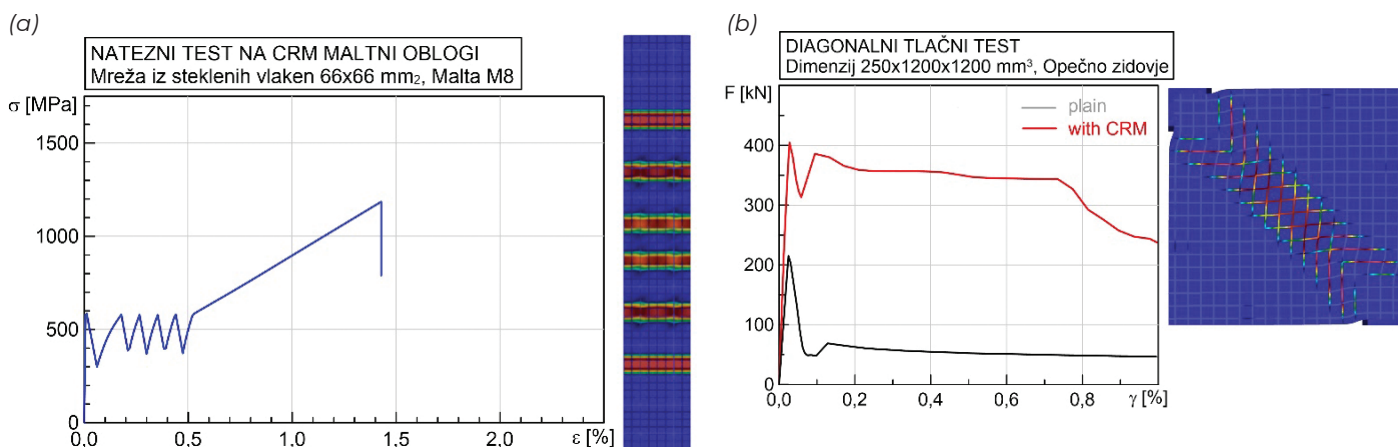
posebna pravila za obnašanje stika. V primeru pravokotnih vlaken smo določili stike v posameznih vozliščih, lastnosti stika med vlakni in malto smo definirali z linijskimi elementi, stike med malto in zidovjem pa s ploskovnimi elementi. Model je upošteval možnost porušitve v kateremkoli od materialov (npr. pretrg vlaken, razpokanje in drobljenje malte itd.) kot tudi v stikih (porušitev stika med vlakni in malto in med malto in zidovjem).

Model smo kalibrirali na podlagi eksperimentalnih testov posameznih komponent in stikov, ki so prikazani na sliki 2a. Validirali pa smo jih tako, da smo z njimi modelirali teste na maltne obloge CRM (slika 2b) [Boem, 2022a] in teste obnašanja osnovnih mehanizmov odziva (slika 2c) [Boem, 2022b]. Rezultata nateznega testa CRM-obloge in diagonalnega tlačnega testa sta prikazana na sliki 9, iz katere je razvidno, da je podrobni model sposoben modelirati razpršenost razpok in napetostno stanje v steklenih vlaknih.

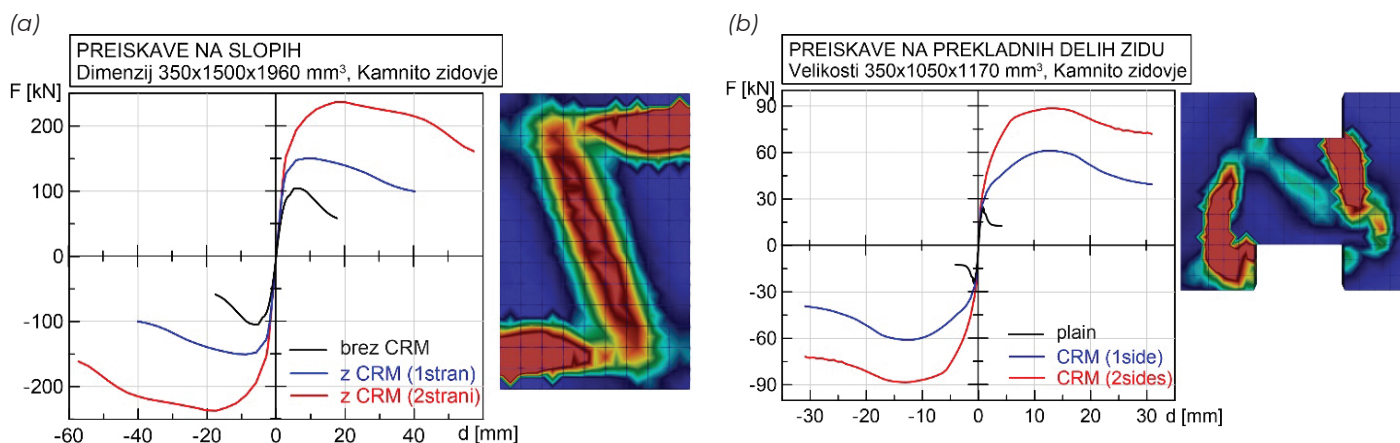
Podrobni model se je izkazal za zelo uporabnega pri občutljivostnih analizah, s katerimi smo raziskovali vpliv posameznih

parametrov na učinkovitost CRM-oblog. Preučili smo vplive stopnje armiranja, orientacijo mreže, kakovost stika med vrvmi, kvaliteto malte, povezanost med mrežo in malto ter povezanost med malto in zidovjem.

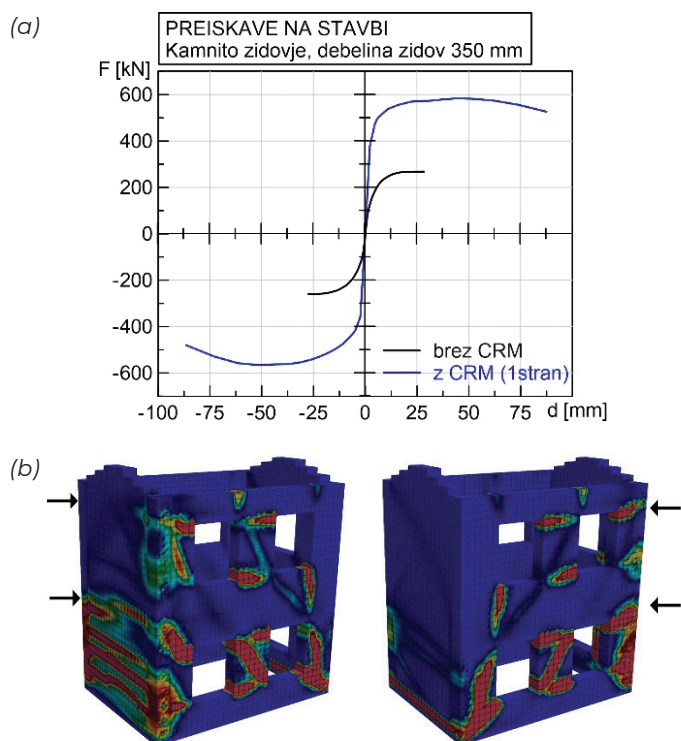
Na naslednjem nivoju modeliranja smo uporabili model z več plastmi MLM (slika 8b), pri katerem je mreža končnih elementov bistveno redkejša (dolžina stranice je približno 150 mm). Tudi v tem modelu so uporabljeni prostorninski elementi, ki pa imajo tokrat 20 vozlišč na element. Kot je razvidno že iz imena, gre za model iz več plasti, ki predstavljajo malto, mrežo iz steklenih vlaken in zidovje. Med posameznimi sloji je predpostavljen popoln stik. Lastnosti vsake od plasti smo kalibrirali z eksperimenti in z numeričnimi analizami podrobnega modela (DLM). Z MLM-modelom smo modelirali odziv konstrukcijskih elementov (slopi in prekladni deli) kot tudi cele stavbe (slika 2e in 11b) [Boem, 2022c]. Rezultati analiz na sliki 11 in primerjava z eksperimentalnim odzivom dokazujejo, da je pristop MLM dovolj natančen in zanesljiv.



Slika 9. Rezultati analiz s podrobnim računskim modelom DLM: (a) natezni test na CRM-oblogi – kuponu in (b) diagonalni tlačni test zidu.



Slika 10. Numerične simulacije odziva konstrukcijskih elementov z MLM: krivulje odziva in vzorci poškodb zidov s CRM-oblogami za (a) slope in (b) prekladne dele zidov.



Slika 11. Numerične simulacije odziva stavbe v naravnem merilu z MLM: (a) krivulje odziva in (b) vzorec poškodb stavbe utrjene s CRM-oblogami.

Zaradi razmeroma redke mreže in predpostavljene razmazane plastičnosti (angl. smeared plasticity) MLM ni primeren za simuliranje posameznih razpok. Če želimo bolj natančno simulirati razpokanje, moramo uporabiti DLM. Če pa smo zadovoljni s tem, da vidimo območja poškodb približno, model MLM zadostuje. MLM je torej kompromis med analizo cele konstrukcije in podrobno analizo razvoja poškodb in porušnih mehanizmov. Da pa bi pristop MLM deloval, mora biti zagotovljena predpostavka o popolni povezavi med plastmi. To dosežemo z zagotavljanjem zadostnih preklonih in sidrnih dolžin mrež in z omejevanjem stopnje armiranja. V primeru, da ni

popolnega stika, lahko v MLM-modelu omejimo mejno deformacijo v mreži iz steklenih vlaken (s tem npr. upoštevamo zdrs vlaken v oblogi) ali pa omejimo tlačno trdnost malte (s čimer upoštevamo izklon obloge na najbolj obremenjenih delih). Kot omenjeno, pa je podlaga za take ukrepe eksperiment in modeliranje z bolj natančnimi modeli.

Za račun odpornosti obstoječih zidanih stavb se v praksi uporabljajo modeli iz nadomestnih okvirjev s koncentrirano plastičnostjo LPM, kot je prikazano na sliki 8c. Stavbo se v tem pristopu modelira z enodimenzionalnimi elastičnimi nosilci, ki predstavljajo t. i. makroelemente oz. slope in prekladne dele. Makroelementi so povezani s togimi deli. Nelinearno obnašanje sloпов in prekladnih delov se lokalizira v plastične členke, ki lahko upoštevajo različne porušne mehanizme (strižni ali upogibni).

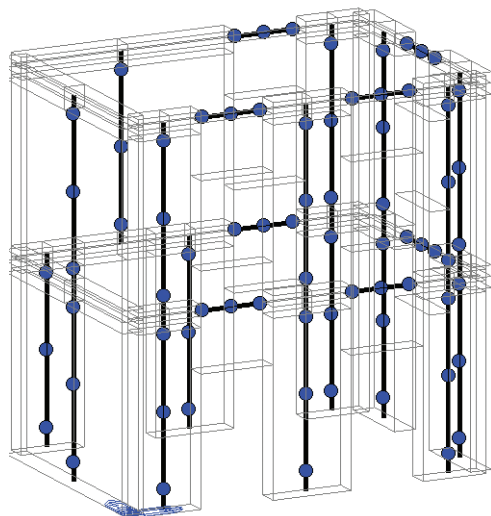
S pomočjo občutljivostnih analiz konstrukcijskih elementov na nivoju MLM smo umerili karakteristike plastičnih členkov v obliki krivulje odziva posameznega elementa. Te karakteristike smo zatem upoštevali v makromodelu (LPM) cele stavbe, kot je prikazano na sliki 12. Primerjava rezultatov modelov LPM in MLM na nivoju stavbe je validirala LPM-model. Taki modeli pa se, kot smo že omenili, uporabljajo v praksi za načrtovanje utrditve obstoječih stavb [Gattesco, 2022].

5 SKLEP

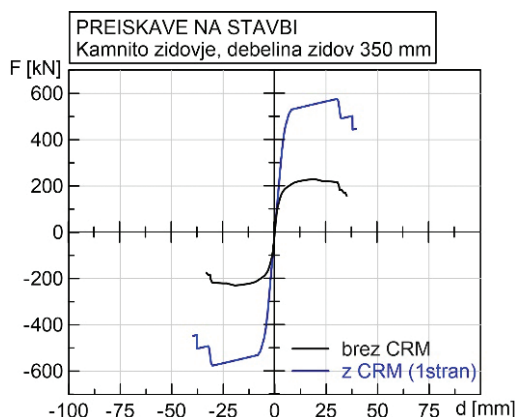
Predstavili smo kratek povzetek lastnih obsežnih, skoraj dvajset let trajajočih eksperimentalnih in numeričnih raziskav maltnih oblog za utrjevanje zidanih konstrukcij. Z eksperimentalnimi raziskavami smo sistematično preizkušali vedno večje vzorce, od posameznih materialov vse do stavbe v naravnem merilu. Sistematično smo izvajali tudi numerične raziskave z večnivojskim pristopom. To nam je dalo nov vpogled v problematiko in mehanizme odziva.

Z laboratorijskimi preiskavami materialov in obloge smo določili materialni odziv, ki je pokazal zmožnost prenašanja obtežbe po razpokanju in omogočil določiti npr. potrebne sidrne dolžine. Eksperimenti na konstrukcijskih elementih (slopi in prekladni deli zidov) in celo na celi stavbi so pokazali učinkovi-

(a)



(b)



Slika 12. Numerična simulacija stavbe z modelom s koncentrirano plastičnostjo LPM: (a) pogled na model in (b) krivulje odziva.

tost utrjevanja z maltnimi oblogami, ki so armirane s kompozitnimi vlakni. Obnašanje se občutno izboljša tako za obremenitve, ki delujejo v ravnini zidov, kot tudi izven ravnine zidov. Rezultati eksperimentov so bili ključni za validacijo računskih modelov, s katerimi se modelira nelinearni odziv. Odziv smo modelirali z modeli različnih natančnosti, od detajlnih analiz interakcije med komponentami do razmeroma enostavnih modelov s koncentrirano plastičnostjo za modeliranje odziva stavb.

Sveda raziskave niso končane in mnogo vprašanj ostaja odprtih. Jasno pa je, da je odziv zidanih konstrukcij, utrjenih z maltnimi oblogami, zahteven inženirski in raziskovalni problem. Opravljene raziskave in ugotovitve predstavljajo osnovo za razvoj postopkov projektiranja in izbiro ustreznih metod utrjevanja v praksi.

6 ZAHVALA

Del raziskav je bil financiran iz evropskega projekta Horizon 2020 s pogodbo Marie Skłodowska-Curie No 101003410 (projekt conFIRMa).

Del raziskav je bil financiran iz evropskega fonda za regijski razvoj v sklopu programa Italija-Slovenija po pogodbi No FIN-CON-2020-0000009-P-P (project Constrain).

Za strokovne nasvete in pomoč se zahvaljujemo prof. B. Patzáku in prof. A. Kohoutkovi (ČVUT, CZ), prof. M. Tomaževiču in M. Lutman (ZAG, SI) ter podjetju Fibre Net S.p.A. (I).

7 LITERATURA

Boem, I., Characterization of textile-reinforced mortar: state of the art and detailed level modelling with a free open-source finite element code, *Journal of Composites for Construction*, 26, 04022060, 2022a.

Boem, I., Masonry elements strengthened through Textile-Reinforced Mortar: application of detailed level modelling with a free open-source Finite-Element code, *Construction and Building Materials*, 357, 129333, 2022b.

Boem, I., Multi-layer modelling of masonry structures strengthened through Textile-Reinforced Mortar, *Open Research Europe*, 2, 132, 2022c.

Gams, M., Farič, M., Pučnik, V., Eksperimentalne raziskave utrjenih prekladnih delov kamnitih zidov (Experimental research of strengthened stone masonry spandrels), V: Zbornik : 42. zbornik gradbenih konstruktorjev Slovenije, Rogaška Slatina, 2021.

Gattesco, N., Boem I., Experimental and analytical study to evaluate the effectiveness of an in-plane reinforcement for masonry walls using GFRP meshes, *Construction and Building Materials*, 88, 94–104, 2015.

Gattesco, N., Boem I., Characterization tests of GFRM coating as a strengthening technique for masonry buildings, *Composite Structures*, 165, 209–222, 2017a.

Gattesco, N., Boem I., Out-of-plane behavior of reinforced masonry walls: Experimental and numerical study, *Composites Part B: Engineering*, 128, 39–52, 2017b.

Gattesco, N., Boem, I., Rizzi, E., Bez, A., Gams, M., Marič, M., Pučnik, V., Dudine, A., The Experimental campaign and numerical simulations of the Constrain project, Interreg Italia-Slovenija standard project co-funded with European Regional Development Fundaion, Technical Report, 2022.

Micelli, F., Aiello, M. A., Residual tensile strength of dry and impregnated reinforcement fibres after exposure to alkaline environments, *Composites Part B: Engineering*, 159, 490–501, 2019.

Micelli, F., Corradi, M., Aiello, M. A., Borri, A., Properties of Aged GFRP Reinforcement Grids Related to Fatigue Life and Alkaline Environment, *Applied Sciences*, 7(9), 897, 2017.

Sisti, R., Castori, G., Dudine, A., Borri, A., In-plane response of mortar plates strengthened by traditional or innovative reinforcement materials (Comportamento a taglio di lastre di CRM, FRM o intonaco armato tradizionale - in Italian), In: *Proceedings of XVIII Conference "ANIDIS L'ingegneria Sismica in Italia"*, Pisa University Press, Ascoli Piceno, I, 2019.