

Marina Aškrabić, mast. inž. grad. ¹
Prof. dr Boško Stevanović, dipl.grad.inž. ¹
V.prof. dr Dimitrije Zakić, dipl.grad.inž. ¹
V. prof. dr Gordana Topličić-Ćurčić, dipl.grad.inž. ²
Doc. dr Aleksandar Savić, dipl.graž.inž. ¹

**"PRAVCI ISTRAŽIVANJA MALTERA NA
BAZI KREČA ZA RESTARUACIJU
ISTORIJSKIH OBJEKATA"**

UDK

Rezime

Malteri na bazi kreča korišćeni su prilikom zidanja i malterisanja velikog broja istorijskih objekata od 6000. godina pre nove ere, pa sve do kraja XIX veka. Otkriće hidaruličkih veziva u XIX veku omogućilo je proizvodnju novih maltera viših mehaničkih karakteristika sa većom brzinom očvršćavanja. Tokom prve polovine XX veka ovi malteri su u potpunosti zamenili krečne maltere, pa su primenjivani i prilikom izvođenja sanacija na istorijskim objektima. Usled razlika u mehaničkim karakteristikama,

¹ Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet

² Univerzitet u Nišu, Građevinsko-arhitektonski fakultet

vodopropustljivosti i paropropustljivosti primena maltera na bazi cementa dovela je do oštećenja postojećih materijala. Iz tog razloga se u drugoj polovini XX veka prvi put uvodi pojam kompatibilnosti postojećih materijala i materijala koji se koriste prilikom sanacija i restauracija istorijskih objekata. Aktuelna istraživanja kreću se u pravcu detaljnih ispitivanja uzoraka maltera uzetih sa objekata od interesa kao i u definisanju receptura i ispitivanju svojstava novih maltera koji bi mogli biti korišćeni prilikom restaruacija istorijskih objekata. U radu je dat pregled objavljenih rezultata ispitivanja iz obe navedene oblasti. Opisan je i uticaj pojedinačnih komponentnih materijala na svojstva krečnih maltera.

Ključne reči: krečni malteri, istorijski objekti, restauracija, pucolani, drobljena opeka

„RESEARCH DIRECTIONS OF LIME BASED MORTARS FOR RESTORATION OF HISTORICAL BUILDINGS ”

Summary

Lime based mortars have been used for building and rendering of many historical structures since 6000 years B.C. up to the end of the XIX century. Discovery

of hydraulic binders in the XIX century has induced production of mortars with higher mechanical properties that hardened faster than lime mortars. During the twentieth century these mortars have completely replaced lime mortars, even in restoration of historical structures. In these cases, due to different mechanical properties, water and vapor permeability application of cement based mortars has led to deterioration and damage of existing materials. For these reasons, in the second half of the twentieth century, compatibility between existing materials and materials used for restoration is defined for the first time. Today, research in this area is composed of detailed investigation of old mortar samples collected from structures of interest and defining of new receipts and testing of the properties of the mortars that could be used for restoration of historical buildings. Review of the results form both arias of research has been presented in the paper. Influence of component materials on the properties of lime mortars is also described.

Key words: lime mortars, historical buildings, restoration, pozzolana, crushed brick

1. UVOD

Malteri pripadaju grupi veštačkih kamenih materijala koji se dobijaju kao rezultat očvršćavanja malterskih smeša – homogenizovanih mešavina sitnog agregata i vezivnih supstanci na vazduhu, u vlažnoj sredini ili u vodi [1]. Malter nosi naziv prema vrsti primenjenog veziva (krečni malter, cementni malter, krečno-cementni malter, epoksidni malter, itd.). Krečni malteri i krečni malteri sa dodatkom pucolana korišćeni su prilikom zidanja i malterisanja građevina tokom najvećeg dela razvoja ljudske civilizacije. Najstariji materijalni dokazi o proizvodnji kreča datiraju iz 11000 – 10000 godina pre n.e., a pronađeni su u jugoistočnoj Anadoliji, današnjoj Turskoj. Postoje podaci i da je u razdoblju od 6000. do 4000. godine pre n.e. kreč bio korišćen kao vezivo za zidanje opekama u Palestini. U Evropi jedna od prvih upotreba krečnih maltera bila je pri izradi podova 6200-5400 godina pre n.e. otkrivenih na lokalitetu Lepenski Vir. Malteri na bazi kreča pronađeni su i na građevinama na teritorijama koje su bile pod uticajem feničanske kulture, zatim Stare Grčke, Rimskog carstva, Kine, Indije, Vizantijskog carstva, zatim u graditeljskoj ostavštini Maja i Inka u Južnoj Americi, tokom srednjeg veka, pa sve do sredine (kraja) 19. veka, kada počinje njihova zamena novootkrivenim cementnim malterima.

Ponovno interesovanje graditeljske i naučne javnosti za ovaj tip materijala javlja se tek u drugoj polovini 20. veka, a posebno krajem 80-tih godina. U ovom periodu, na istorijskim objektima od kulturnog značaja na kojima su bile izvršene intervencije primenom maltera na bazi cementa, primećena su oštećenja na originalnim malterima i elementima za zidanje. Objašnjenje za ovu pojavu pronađeno je u višim vrednostima čvrstoća i krutosti cementnih maltera u odnosu na istorijske maltere i materijale, koje su dovele do drugačije preraspodele napona unutar postojećih elemenata konstrukcije. Iz tog razloga malter koji je bio projektovan tako da bude najslabija tačka u konstrukciji, jer je najlakše izvršiti njegovu zamenu i sanaciju, postao je element sa često najvišom vrednošću čvrstoće pri pritisku od svih primenjenih materijala. Drugi razlog negativnog uticaja maltera na bazi cementa na stanje starih, istorijskih objekata je drugačija mikrostruktura (stepen poroznosti), a s tim u vezi paropropustljivost i vodopropustljivost. Upotreba cementnog ili produžnog maltera promenila je tokove vlage u zidanoj konstrukciji i omogućila zadržavanje rastvorljivih soli unutar elemenata konstrukcije, što je uticalo na pojavu oštećenja na originalnim materijalima.

U cilju pronalaženja rešenja za uočene probleme prilikom sanacija i restauracija istorijskih objekata organizovan je veći broj istraživačkih projekata koji su

imali zadatak da detaljnije istraže svojstva maltera na bazi kreča, uzroke njihovog propadanja i mogućnost njihove primene u ovoj oblasti. Paralelno su objavljeni su i mnogobrojni naučni radovi i studije. U radu su prikazani osnovni pravci aktuelnih istraživanja kao i pregled određenih objavljenih rezultata ispitivanja svojstava maltera na bazi kreča, koji bi mogli biti iskorišćeni prilikom sanacija i restoracija istorijskih objekata.

2. MALTERI NA BAZI KREČA

U krečnim malterima, kao osnovno vezivo koristi se kreč koji se proizvodi u nekoliko različitih oblika. Živi (negašeni) kreč – CaO nastaje pečenjem krečnjaka – CaCO₃ koji ne sadrži nečistoće u vidu silikata ili aluminata, na temperaturama od 900°C do 1200°C.

Živi kreč se kao vezivo koristio prilikom zidanja utvrđenja i srednjovekovnih gradova, tako što se proces gašenja kreča odvijao mešanjem živog kreča i vlažnog agregata sa naknadnim dodavanjem vode. Tom prilikom oslobađala se određena količina toplote i dolazilo je do ekspanzije vezivnog materijala.

U zavisnosti od procesa gašenja živog kreča nastaju dve vrste gašenog kreča (kalcijum-hidroksida) - Ca(OH)₂: odležali kreč ili krečno testo (vodeni rastvor) i

hidratisani kreč (u praškastom stanju). Kada se nađe u fomi minerala ovo jedinjenje se naziva i portlandit.

Ukoliko se voda dodaje u stehiometrijskoj količini (u proračunatim molarnim odnosima – voda/živi kreč=0,22/1) dobija se hidratisani kreč, koji se industrijski proizvodi i danas najčešće primenjuje [2]. Dobijeni prah se skladišti u suvom prostoru najmanje 6 meseci pre distribucije. Ukoliko se gašenje kreča vrši sa većom količinom vode nego što je stehiometrijski potrebno (odnos voda/živi kreč~2-4/1) dobija se disperzija kalcijum-hidroksida. Nakon određenog perioda tokom koga disperzija odstoji, razlikuje se talog formiran na dnu i filtrat koji se nalazi iznad taloga. Pomenuti filtrat naziva se krečna voda, dok se talog naziva krečno testo. Osobine čestica u talogu se razlikuju po slojevima. Na samom dnu se talože najkрупnije i neugašene čestice, pa se ovakvo krečno testo može koristiti za zidanje, dok se prema vrhu nalaze zone sa finijim česticama, pa se središnja zona najčešće koristi za malterisanje, a zona na samom vrhu za slikanje fresko-tehnikom. U starom Rimu je prema Pliniju važio zakon da kreč mora da odleži najmanje tri godine pre upotrebe. Vreme odležavanja kreča nije standardizovano, i preporuke se razlikuju od autora do autora. U savremenoj proizvodnji minimalno vreme odležavanja kreče se oko trideset – četrdeset dana, dok se kod nekih autora kao minimalno vreme odležavanja

navode tri meseca. Za potrebe sanacije i rekonstrukcije starih objekata u nekim zemljama se proizvodi krečno testo koje je odležalo u dužem vremenskom periodu (u nekim slučajevima više od 14 godina).

Poboljšanje svojstava krečnog testa sa starenjem objašnjava se promenama u njegovoj mikrostrukturi. Naime, poređenjem uzoraka krečnog testa različitih starosti korišćenjem transmisionog elektronskog mikroskopa (TEM) i skenirajućeg elektronskog mikroskopa (SEM), može se primetiti da su kristali portlandita najveći u rastvoru hidratisanog kreča u vodi (mikrometarske veličine) dok se sa starenjem veličina kristala smanjuje i oni dobijaju pločasti oblik.

Tradicionalno, pre industrijske revolucije za unutrašnje i spoljašnje malterisanje krečnim malterima kao vezivo je korišćen odležali kreč u vidu krečnog testa. Danas je proizvodnja ovog materijala u jednom delu evropskih zemalja povezana sa projektima restauracija istorijskih zgrada (Italija, Nemačka, Mađarska), u nekim slučajevima je povezana i sa izgradnjom novih objekata (u najvećoj meri Turska, ali i Srbija), dok je u mnogim zemljama potpuno ugašena (Belgija, Francuska, Češka, Slovačka, Rumunija, Bosna i Hercegovina). Razlog za opstanak tradicionalne tehnike su povećana plastičnost krečnog testa u odnosu na mešavinu hidratisanog kreča i vode, koja utiče na poboljšanje radne upotrebljivosti maltera.

Pored navedenih vrsta kreča koje očvršćavaju na vazduhu u procesu karbonatizacije (stvaranja kalcijum-karbonata CaCO_3), postoje vrste kreča koje imaju sposobnost očvršćavanja i u vodi i na vazduhu. Ovde spadaju prirodni hidraulični kreč, hidraulični kreč i formulisani kreč. Prirodni hidraulični kreč nastaje pečenjem krečnjaka sa primesama reaktivnih minerala u vidu silikata i aluminata. Hidraulični kreč nastaje pečenjem krečnjaka zajedno sa dodatkom cementa, zgure visokih peći ili letećeg pepela, dok formulisani kreč nastaje mešanjem hidratisanog kreča sa dodacima koji imaju hidraulična i/ili pucolanska svojstva.

Pucolani su supstance bez vlastitih vezivnih svojstava, a njihovi konstituenti reaguju na normalnim temperaturama sa kalcijum-hidroksidom i stvaraju stabilna nerastvorna jedinjenja sa osobinama veziva. Pucolani se najčešće dele prema poreklu na prirodne i veštačke [3]. Prirodni pucolani su prema definiciji materijali vulkanskog porekla, silikatnog ili alumino-silikatnog sastava. U prirodne pucolane se ubrajaju vulkanski tufovi (nalazište Pucoli blizu Napulja, nalazište na Santoriniju, u Milosu, itd.), dijatomejska zemlja, prirodni zeoliti, dok u veštačke pucolane spadaju kalcinisane gline, silikatna prašina i leteći pepeo

Malteri na bazi kreča koji su korišćeni u ranijim periodima mogu se podeliti na: čisto krečne maltere, krečne maltere sa dodatkom prirodnih ili veštačkih

pucolana i maltere na bazi prirodnog hidrauličnog kreča. Ovi malteri spravljani su sa inertnim agregatima ili agregatima sa pucolanskim svojstvima, različitih granulometrijskih sastava. Sastav i svojstva istorijskih maltera zavise od više faktora: kvaliteta osnovnog materijala korišćenog za zidanje (kamen, opeka, itd.), namene maltera (za zidanje, unutrašnje ili spoljašnje malterisanje), uslova sredine (vlažna ili suva), a u velikoj meri i od dostupnosti lokalnih materijala.

3. ISPITIVANJA UZORAKA STARIH MALTERA UZETIH SA ISTORIJSKIH OBJEKATA

Aktuelna istraživanja u oblasti maltera za sanaciju istorijskih objekata, koja okupljaju naučnike različitih profila (arhitekta, građevinske inženjere, tehnologe, hemičare, geologe, mineraloge, itd.) kreću se u dva osnovna pravca:

- ispitivanje uzoraka starih maltera uzetih sa različitih pozicija i različitih objekata, kao i razvoj novih metoda za njihovo ispitivanje,
- ispitivanje fizičko-mehaničkih svojstava maltera spravljenih sa različitim dostupnim komponentnim materijalima koji bi bili kompatibilni sa tradicionalnim malterima i koji bi mogli da se primene za sanaciju i restauraciju oštećenih maltera.

Raznolikost i raznorodnost korišćenih komponentnih materijala i ostvarenih svojstava maltera, kao i različiti uslovi sredine i načini održavanja istorijskih objekata, vode ka zaključku da se svaki objekat mora posmatrati odvojeno i da se konačna odluka o izboru maltera koji će se koristiti tokom sanacije/restauracije donosi tek nakon sprovođenja detaljnih ispitivanja originalnih materijala. Ipak, na osnovu velikog broja ispitivanja sprovedenih na uzorcima originalnih maltera na bazi kreča, koji su korišćeni za zidanje i malterisanje, u različitim laboratorijama, moguće je uočiti određene pravilnosti i definisati granične vrednosti za osnovna strukturna i fizičko-mehanička svojstva ovih maltera.

Detaljna ispitivanja tradicionalnih maltera danas podrazumevaju sprovođenje nedestruktivnih i destruktivnih ispitivanja, izradu analiza hemijskog i mineralošskog sastava maltera, termogravimetrijsku analizu, ispitivanje poroznosti i određivanje raspodele dimenzija pora, ispitivanja granulometrijskog sastava agregata i veziva, kao i mehaničkih svojstava ovih maltera.

Neke od karakteristika krečnih maltera koje ih razlikuju od modernih cementih maltera su [4]:

- niska vrednost zapreminske mase 1500 – 1800 kg/m³,
- visoka poroznost 20-40%,
- malo zadržavanje vode i brzo sušenje,

- vrlo dobra veza sa podlogom,
- dobro kristalizovana matrica.

Čvrstoća pri pritisku istorijskih krečnih maltera je relativno mala (< 5MPa), dok se modul elastičnosti kreće između 2 i 6 GPa.

Sumirani rezultati ispitivanja 400 uzoraka iz antičkog grčkog, helenističkog, rimskog, vizantijskog, post-vizantijskog i kasnijih perioda uzetih iz manastira, crkava, istorijskih zgrada i zidanih konstrukcija Mediterana prikazani su u tabeli 1 [5].

Tabela 1. Rezultati fizičko-mehaničkih ispitivanja sprovedenih na 400 uzoraka istorijskih maltera

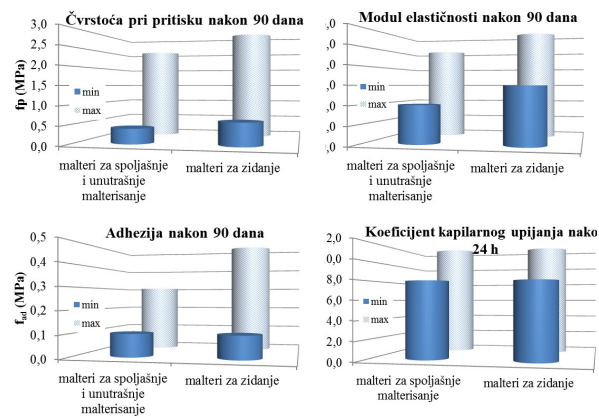
Vezivo	Zaprem. masa (γ_d) (g/cm ³)	Poroznost (%)	Čvrstoća pri zatezanju (MPa)	Prosečan radijus pora (μ m)	Maseni odnos vezivo/agregat
L	1,5-1,8	30-45	<0,35	0,8-3,3	1:4-1:1
L+PT	1,8-1,9	20-43	0,06-0,7	0,03-6,5	1:1-1:2
NHL	1,7-2,1	18-40	0,35-0,55	0,1-3,5	1:4-1:1
L+NP	1,6-1,9	30-42	>0,60	0,1-1,5	1:4-1:5
L+AP	1,5-1,9	30-40	>0,55	0,1-0,8	1:3

L - kreč, PT - neizreagovani portlandit, NHL - prirodni hidraulični kreč, NP - prirodni pucolan, AP - veštački pucolan

Iz rezultata prikazanih u tabeli 1 može se zaključiti da je dodavanjem prirodnih i veštačkih pucolana dolazilo do porasta mehaničkih svojstava maltera, pri čemu se smanjivala prosečna veličina pora, dok je ukupna poroznost ostajala nepromenjena.

U okviru istraživačkog projekta Oldrenders, koji je sproveden u organizaciji Nacionalne laboratorije za građevinarstvo (LNEC) iz Portugalije analizirani su različiti aspekti sanacija i restauracija prvenstveno maltera za spoljašnje malterisanje u okviru fasada istorijskih zgrada. Urađena je i sistematizacija minimalnih zahteva za osnovna fizičko – mehanička svojstva maltera, koji su prikazani na slici 1[6].

Na teritoriji Srbije još uvek nisu izvršena opsežna istraživanja iz ove oblasti. Detaljnije ispitivanje elemenata i maltera za zidanje i malterisanje, kao i podnih maltera istorijskih objekata sprovedeno je u okviru Arheološkog parka Viminacijum [7], arheološkog nalazišta Medijana [8] kao i prilikom obnove Tvrđave u Baču [9]. U okviru istraživanja sprovedenih prilikom obnove rimskog amfiteatra Viminacijuma, ispitani su uzorci maltera za zidanje i malterisanje. Svi malteri su spravljani sa krečnim vezivom i rečnim agregatom, ali su određene grupe uzoraka pokazivale više mehaničke karakteristike od uobičajenih.



Slika 1. Minimalni zahtevi za fizičko-mehanička svojstva istorijskih maltera

Poreklo ovog materijala nije otkriveno, mada se pretpostavlja da se moglo raditi o zeolitiziranom tufu u selu Slanci pored Beograda, u blizini Dunava [7]. Rezultati ispitivanja maltera uzetih iz podova prilikom obnove Tvrđave u Baču i nalazišta Medijana pokazuju da su u pitanju krečni malteri sa rečnim agregatom koji je u oba slučaja delimično zamenjen drobljenom opekam i lokalno kalcinisanim glinama, koji takođe pokazuju hidraulička svojstva [8,9].

4. PREGLED REZULTATA ISPITIVANJA MALTERA NA BAZI KREČA

Koncept kompatibilnosti starih i novih materijala, koji je uveden u drugoj polovini XX veka prilikom odabira materijala za sanacije i restoracije istorijskih objekata u opštem slučaju se može definisati kroz različite kriterijume kompatibilnosti:

- površinski (boja, tekstura, hrapavost),
- prema sastavu (tip veziva, granulometrija agregata, hemijski sastav),
- prema nivou čvrstoće (čvrstoća pri pritisku i pri zatezanju),
- prema elastičnosti (modul elastičnosti, deformabilnost),
- prema hidrofizičkim svojstvima (vodopropustljivost, paropropustljivost, kapilarno upijanje),
- prema strukturi (poroznost, raspodela veličine pora),
- prema koeficijentu linearnog širenja.

U slučaju maltera za malterisanje može se smatrati da je adhezija najvažnija karakteristika. Pored navedenih svojstava, idealni malter namenjen za sanaciju bi trebalo da ima i sledeće karakteristike:

- laka obradljivost,

- brzo i pouzdano očvršćavanje u suvoj i vlažnoj sredini,
- kontrolisano skupljanje tokom očvršćavanja,
- mehaničke, termičke i strukturne karakteristike, koje su bliske vrednostima izmerenim kod elemenata za zidanje (prirodni kamen, opeka, itd.),
- najniži mogući sadržaj rastvorljivih soli,
- ne smeju da doprinose daljim oštećenjima na konstrukciji,
- ne smeju da prenose velika naprezanja postojećim materijalima sa kojima su u kontaktu,
- ne smeju da zadržavaju vodu unutar konstrukcije,
- moraju posedovati odgovarajuću otpornost na dejstvo mraza, ciklične promene temperature i vlažnosti .

Novi malteri ne smeju da izazovu dalje propadanje postojećih materijala, ali moraju da poseduju odgovarajuću trajnost u slučaju izlaganja ekstremnim klimatskim uslovima, dejstvu vlage i rastvorljivih soli [10].

4.1 Krečni malteri sa dodatkom pucolana

Mnogi naučnici su u pokušaju dobijanja maltera kompatibilnih sa postojećim materijalima, koji bi zadovoljio propisane uslove istraživali uticaj dodataka različitih prirodnih i veštačkih pucolana na svojstva

krečnih maltera. Prilikom ispitivanja u najvećem broju slučajeva korišćeni su komercijalno dostupni materijali, kao što je metakaolin ili lokalno dostupni prirodni materijali kao što su: prirodna glina i minerali gline (sepiolit, paligorskit, vermikulit i bentonit, materijali sa lokalnih nalazišta kao što su: češki glineni škrljac, grčki pucolani iz okoline Kiklada ili zeoliti kao moguća delimična zamena kreča.

Iz literature se može zaključiti da dodatak pucolana utiče na sledeća svojstva krečnih maltera:

- 1) povećavaju se vrednosti čvrstoća pri savijanju i pritisku,
- 2) menja se raspodela veličina pora, kao i u ukupna poroznost napravljenih maltera,
- 3) upijanje vode se smanjuje sa povećanjem sadržaja pucolana i povećanja vrednosti čvrstoća pri pritisku,
- 4) poboljšava se njihova otpornost na dejstvo mraza,
- 5) umanjuju se konačne vrednosti deformacija skupljanja,
- 6) povećava se koeficijent toplotne provodljivosti i do 10% u odnosu na referentne krečne maltere.

Pregled rezultata iz navedenih radova prikazan je u tabeli 2.

Tabela 2. Čvrstoće pri pritisku i savijanju krečnih maltera sa delimičnom zamenom veziva dodacima sa pucolanskim svojstvima

Autor, godina	Udeo dodatka u ukupnoj količini veziva (%)	Vrsta dodatka	Čvrstoća pri savijanju (MPa)	Čvrstoća pri pritisku (MPa)
(Černý et al. 2006 [11])	50%	metakaolin, drobljena opeka, enamel staklo	0,53-0,58 (28 dana)	2,36-4,06 (28 dana)
(Do Rosário Veiga et al. 2010 [12])	25%, 50%	pucolani sa nalazišta Cabo Verde i Açores	0,10-0,60	0,30-2,00
(Faria i Martins 2011 [13])	20%	metakaolin (vezivo hidratirani kreč i krečno testo)	0,20-0,30 (60 dana)	0,40-0,50 (60 dana); 0,60-1,10 (90 dana)
(Arizzi i Cultrone 2012 [14])	10%, 20%	metakaolin	0,07-3,44 (60 dana)	3,05-11,96 (60 dana)

Autor, godina	Udeo dodatka u ukupnoj količini veziva (%)	Vrsta dodatka	Čvrstoća pri savijanju (MPa)	Čvrstoća pri pritisku (MPa)
(Kurugöl 2017 [15])	50%	tri tipa glina kalcinirane na različitim temperaturama	1,21-3,10 (7 dana)	2,71-6,89 (7 dana)
(Vejmelková, et al. 2012 [16])	8,7%, 20%, 36%, 52%, 68%	češki glineni škrljac i metakaolin kao referentni dodatak	0,70-3,50	2,20-15,70
(Andrejkovičová et al. 2013 [17])	5%, 20%	paligorskit, metakaolin (pojedinačno i zajedno)	0,21-0,39 (28 dana), 0,23-0,48 (90 dana)	0,34-0,92 (28 dana), 0,55-1,02 (90 dana)
(Pavlik 2013[18])	50%	prirodni zeolit ZEOCEM, Slovačka	nema podataka	3,30-6,70 (28 dana); 2,60-4,70 (1 godina)

Autor, godina	Udeo dodatka u ukupnoj količini veziva (%)	Vrsta dodatka	Čvrstoća pri savijanju (MPa)	Čvrstoća pri pritisku (MPa)
(Gameiro et al. 2014 [19])	30%, 50%	metakaolin	0,60-2,00	1,00 - 13,00
(Andrejko- vičová et al. 2015 [20])	5%, 20%	bentonit, metakaolin (pojedinačno i zajedno)	0,22-0,16 (28 dana), 0,28-0,15 (90 dana)	0,18-0,66 (28 dana), 0,40-0,75 (90 dana)
(Ince et al. 2015[21])	5, 10, 20, 30, 40, 50%	zeolit i mleveni kamen sa nalazišta Bayburt	nema podataka	1,10-2,25 (28 dana) 1,60 – 3,00 (90 dana)

Kao što se može videti iz tabele 2 variranjem vrste i količine pucolanskog dodatka mogu se dobiti malteri različitih mehaničkih svojstava. Najveći broj ispitivanja urađen je sa delimičnom zamenom kreča od 50%. Međutim, Arizzi i Cultrone [14], zaključili su da su malteri sa 10% dodatka metakaolina imali strukturu pora blisku čisto krečnim malterima, dok je kod maltera sa dodatkom od 20% metakaolina primećena pojava pora manjih radijusa od 0,01 do 0,1 μm .

Priraštaj vrednosti čvrstoća pri pritisku i savijanju, kao i njihove konačne vrednosti kod maltera sa dodatkom pucolana u velikoj meri zavisiće od uslova nege, o čemu se mora posebno voditi računa. Proces očvršćavanja se kod ovih maltera odvija kroz dva međusobno uslovljena procesa: reakciju karbonatizacije i pucolansku reakciju, kojima pogoduju različiti uslovi sredine. Pucolanskoj reakciji iz koje nastaju proizvodi slični proizvodima hidratacije cementa pogoduju uslovi povišene vlažnosti (relativna vlažnost 95%), dok reakciji karbonatizacije pogoduju suvi uslovi (relativna vlažnost 60%). S obzirom na to da potrošnja kreča u reakciji karbonatizacije utiče na smanjenje intenziteta pucolanske reakcije, zaključeno je da bi bilo potrebno negovati maltere u uslovima povišene vlažnosti do starosti od 28 dana. Na ovaj način se obezbeđuje odvijanje pucolanske reakcije. Nakon prestanka nege odvija se proces karbonatizacije kako na preostalom neizreagovanom kreču, tako i na proizvodima pucolanske reakcije. Tokom ovog procesa može se očekivati određeno smanjenje vrednosti čvrstoće pri pritisku, pri čemu ne dolazi do promena u poroznosti maltera.

Do Rosario Veiga et al. [12] prikazali su rezultate prikupljene tokom višegodišnjeg istraživanja i spravljanja maltera korišćenih za sanacije istorijskih objekata. Autori smatraju da malteri sa različitim

pucolanskim dodacima imaju potencijal za primenu prilikom restauracija starih objekata ukoliko se optimizuje procenat dodatka pucolana i pronade najbolji način nege. To je u saglasnosti i sa zaključcima Arizzi i Cultrone [14] koji nalaze da bi malterske mešavine sa 10% delimične zamene kreča metakaolinom i odnosima kreča i peska 1/4 i 1/6, kao i dodatkom aditiva u količinama manjim od 2% mogle biti korišćene prilikom restauracija fasada izvedenih od krečnih maltera.

4.2 Krečni malteri sa dodatkom drobljene opeke

Pored krečnih maltera sa dodatkom materijala sa pucolanskim svojstvima, predmet aktuelnih ispitivanja je i uticaj agregata na svojstva krečnih maltera. U prošlosti su kao agregati najčešće korišćeni prirodni rečni ili drobljeni sitan agregat, često sa lokalnih nalazišta, koji se smatraju inertnim agregatima. Prilikom izbora agregata potrebno je ispitati maksimalnu veličinu zrna agregata, sastav agregata i odabrati procenat učešća agregata u malteru. Agregati u malterima za zidanje korišćenim u starim konstrukcijama imali su različite granulacije, kao što su 0-4 mm, 0-12 mm, 0-16 mm, pa čak i 0-40 mm. Kod maltera za malterisanje, granulometrijski sastav kretao se u užim granicama 0-4 mm, 0-2 mm ili 0-1 mm. Pored njih u istorijskim

malterima je prisutna i drobljena opeka kao delimična ili potpuna zamena agregata u delovima konstrukcija ili na površinama koje su izložene vlažnim uslovima i uticajima sredine. Ovakav postupak posebno je bio prisutan u rimskom i vizantijskom graditeljstvu, a kasnije i u Otomanskoj imperiji. U najvećem broju slučajeva prilikom hemijske analize, u ovim malterima je zabeleženo prisustvo proizvoda nastalih kao posledica hidraulične reakcije. Sitnije frakcije agregata od drobljene opeke imale su ulogu hidrauličkog dodatka, dok je ispitivanjem kontaktne zone između veziva i zrna drobljene opeke primećeno da njena širina iznosi oko 10 μm , da je kompaktna i da na njoj nije zabeleženo prisustvo većih pora [22]. Na reaktivnost agregata od keramike utiče nekoliko faktora: količina amorfnih silikata i aluminata, temperatura i trajanje temperaturnog tretmana, količina i tip glina od kojih potiču, granulometrijski sastav i specifična površina. Temperature pečenja gline na kojima je najveća verovatnoća dobijanja keramičkog materijala sa pucolanskim svojstvima, a posebno najviše preporučene vrednosti, bliske su temperaturama korišćenim u savremenoj proizvodnji građevinske keramike. Prilikom ispitivanja primene drobljenih proizvoda iz fabrika opeka i crepa u Portugaliji kao dodatka krečnim malterima dobijeni su malteri sa poboljšanim mehaničkim karakteristikama i poboljšanom otpornošću

na dejstvo mraza. Sa druge strane ovi malteri su imali povećano upijanje vode i smanjenu paropropustljivost u odnosu na referentne maltere [23].

5. ZAKLJUČAK

Iako je pokazano da krečni malteri u najvećoj meri ispunjavaju uslove kompatibilnosti sa istorijskim malterima, njihova upotreba u projektima restauracije istorijskih objekata je i dalje retka pojava. Postoji potreba da se nastavi sa naučnim istraživanjem lokalno dostupnih materijala, kao i lokalnih uslova sredine, kao i da se unapredi praktično znanje izvođača radova sa krečnim malterima. U cilju pronalaženja optimalnog rešenja za sanaciju i restauraciju istorijskih objekata, potrebno je izvršiti opsežnija ispitivanja postojećih maltera, a takođe i ispitivanja različitih formulacija maltera koji imaju potencijal za primenu u ovoj oblasti. Primer ovakve prakse jesu ispitivanja svojstava krečnih maltera sa dodatkom materijala sa pucolanskim svojstvima, koji zamenom kreča u odgovarajućem procentu i primenom optimalnih uslova nege imaju potencijal za primenu prilikom sanacija i restauracija istorijskih objekata. Slično, potrebno je ispitati mogućnosti primene savremenih proizvoda građevinske keramike kao delimične zamene agregata u krečnim malterima. Potrebno je još jednom naglasiti da se sva

pomenuta ispitivanja mogu koristiti kao pomoć prilikom odabira rešenja za pojedinačni problem. Konačan odabir materijala koji će se koristiti prilikom sanacija i restauracija istorijskih objekata vrši se nakon sagledavanja mnogobrojnih faktora uticaja koji su jedinstveni za svaki objekat.

6. LITERATURA

- [1] MURAVLJOV, M. 2000. *Građevinski materijali*. Beograd: Građevinska knjiga.
- [2] JELIKIĆ, A. 2014. "Hemizam u osnovi krečnog ciklusa." *Zbornik radova: Kreč kao istorijski materijal – seminar i radionica*, 41–47. Republički zavod za zaštitu spomenika kulture, Beograd.
- [3] DRAGIĆEVIĆ, Lj. 1996. *Savremeni materijali u zaštiti spomenika kulture*. Beograd: Republički zavod za zaštitu spomenika kulture, Beograd
- [4] PAPAYIANNI, I. 2005. "Design and Manufacture of Repair Mortars for Interventions on Monuments and Historic Buildings." *International RILEM Workshop on Repair Mortars for Historic Masonry*, January:292–304.
- [5] MOROPOULOU, A., A. Bakolas, and S. Anagnostopoulou. 2005. "Composite Materials in Ancient Structures." *Cement and Concrete Composites* 27 (2):295–300.

- [6] CARVALHO F., M Rosário Veiga J.A. Santos Silva A.. 2001. "Methodologies for Characterisation and Repair of Mortars of Ancient Buildings." *Historical Constructions. International Seminar*, 353–62.
- [7] NIKOLIĆ, E. 2013. "Primena krečnog maltera prilikom restauracije rimskog amfiteatra Viminacijuma tokom 2013. godine." *Zbornik radova malteri, građevinski materijali i konzervatorsko-restauratorski postupci*, 37–45.
- [8] TOPLIČIĆ, Gordana, Zoran Grdić, Nenad Ristić, and Dušan Grdić. 2014. "Characterization of Roman Mortar from the Mediana Archeological Site." *Tehnički Vjesnik* 3651:191–97
- [9] VUJOVIĆ, S., S. Vučetić, V. Ducman, and I. Ranoaie. 2013. "Pucolanski mortovi za konzervatorsku obradu starih zidanih konstrukcija." *Gradjevinar* 65 (8):721–29.
- [10] RILEM TECHNICAL COMMITTEE. 2012. "RILEM TC 203-RHM: Repair Mortars for Historic Masonry." *Materials and Structures* 45 (9):1295–1302.
- [11] ČERNÝ, R., Kunca A., Tydlitát V., Drchalová J., and Rovnaníková P. 2006. "Effect of Pozzolanic Admixtures on Mechanical, Thermal and Hygric Properties of Lime Plasters." *Construction and Building Materials* 20 (10):849–57.
- [12] VEIGA R., M. Do, Fragata A., Velosa A., Magalhães A., and Margalha G. 2010. "Lime-Based

Mortars: Viability for Use as Substitution Renders in Historical Buildings.” *International Journal of Architectural Heritage* 4 (2):177–95.

[13] FARIA, P., and A. Martins. 2011. “Influence of Curing Conditions on Lime and Lime-Metakaolin Mortars.” *XII DBMC*, 1–8.

[14] ARIZZI, A., and G. Cultrone. 2012. “Aerial Lime-Based Mortars Blended with a Pozzolanic Additive and Different Admixtures: A Mineralogical, Textural and Physical-Mechanical Study.” *Construction and Building Materials* 31. Elsevier Ltd:135–43.

[15] KURUGÖL, S. 2017. “Correlation of Ultrasound Pulse Velocity with Pozzolanic Activity and Mechanical Properties in Lime-Calcined Clay Mortars,” no. February.

[16] VEJMEJKOVÁ, E., Keppert M, Rovnaníková P., Keršner Z., and Černý. 2012. “Properties of Lime Composites Containing a New Type of Pozzolana for the Improvement of Strength and Durability.” *Composites Part B: Engineering* 43 (8):3534–40.

[17] ANDREJKOVIČOVÁ, S., A. Velosa, A. Gameiro, E. Ferraz, and F. Rocha. 2013. “Palygorskite as an Admixture to Air Lime-Metakaolin Mortars for Restoration Purposes.” *Applied Clay Science* 83–84:368–74.

- [18] PAVLIK V., Užáková M. 2013. "Use of Zeolite Dust in Lime Mortars." *Journal of the Polish Mineral Engineering Society*, 31.
- [19] GAMEIRO, A., A. Santos Silva, P. Faria, J. Grilo, T. Branco, R. Veiga, and A. Velosa. 2014. "Physical and Chemical Assessment of Lime-Metakaolin Mortars: Influence of Binder:Aggregate Ratio." *Cement and Concrete Composites* 45. Elsevier Ltd:264–71.
- [20] ANDREJKOVIČOVÁ, S., C. Alves, A. Velosa, and F. Rocha. 2015. "Bentonite as a Natural Additive for Lime and Lime-Metakaolin Mortars Used for Restoration of Adobe Buildings." *Cement and Concrete Composites* 60 (April):99–110.
- [21] INCE, C., Derogar S., Yardimci Tiryakiođlu N., and Y.C.Toklu. 2015."The Influence of Zeolite and Powdered Bayburt Stones on the Water Transport Kinetics and Mechanical Properties of Hydrated Lime Mortars." *Construction & Building Materials* 98:345–52.
- [22] BÖKE, H., Akkurt S., Ipekođlu B., and Uđurlu E. 2006. "Characteristics of Brick Used as Aggregate in Historic Brick-Lime Mortars and Plasters." *Cement and Concrete Research* 36 (6):1115–22..
- [23] MATIAS, G., Faria P., and Torres I. 2014. "Lime Mortars with Ceramic Wastes: Characterization of Components and Their Influence on the Mechanical Behaviour." *Construction and Building Materials* 73. Elsevier Ltd:523–34.