

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Štokelj, M., 2014. Vpliv EAF C žlindre na fizikalno-mehanske lastnosti betona. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentorica Bokan-Bosiljkov, V., somentor Cotič, Z.): 23 str.

Datum arhiviranja: 15-10-2014

University
of Ljubljana

Faculty of
*Civil and Geodetic
Engineering*



Jamova cesta 2
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

DRUGG – The Digital Repository
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Štokelj, M., 2014. Vpliv EAF C žlindre na fizikalno-mehanske lastnosti betona. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljani, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Bokan-Bosiljkov, V., co-supervisor Cotič, Z.): 23 pp.

Archiving Date: 15-10-2014

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*

Jamova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si



UNIVERZITETNI ŠTUDIJSKI
PROGRAM PRVE STOPNJE
GRADBENIŠTVO

Kandidat:

MATEVŽ ŠTOKELJ

**VPLIV EAF C ŽLINDRE NA FIZIKALNO-MEHANSKE
LASTNOSTI BETONA**

Diplomska naloga št.: 142/B-GR

**EAF C SLAG INFLUENCE ON PHYSICAL AND
MECHANICAL PROPERTIES OF CONCRETE**

Graduation thesis No.: 142/B-GR

Mentorica:

izr. prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov

Predsednica komisije:

izr. prof. dr. Violeta Bokan-
Bosiljkov

Ljubljana, 23. 09. 2014

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVA

Podpisani Matevž Štokelj izjavljam, da sem avtor diplomskega dela z naslovom »Vpliv EAF C žindre na fizikalno-mehanske lastnosti betona«.

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v digitalnem repozitoriju.

Ajdovščina, 12. 9. 2014

Matevž Štokelj

ZAHVALA

Za pomoč pri nastajanju diplomske naloge bi se rad zahvalil svoji mentorici izr. prof. dr. Violeti Bokan-Bosiljkov, somentorju dipl. inž. grad. Zvonku Cotiču, dipl. ing. grad. Franciju Čeponu in sodelavcem v podjetju Structum, d. o. o, ki so mi pomagali pri raziskovanju in izdelavi diplomske naloge.

Izredna zahvala gre moji družini in študijskim kolegom za vso podporo in pomoč pri študiju.

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK**UDK: 691.322(043.2)****Avtor: Matevž Štokelj****Mentor:izr. prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov****Somentor: Zvonko Cotič, dipl. inž. grad****Naslov: Vpliv EAF C žindre na fizikalno-mehanske lastnosti betona****Tip dokumenta: diplomsko delo - univerzitetni študij - B****Obseg in oprema: 23 str., 10 pregl., 14 sl.****Ključne besede: žindra, odpornost betona, vodotesnost betona****Izvleček**

V diplomski nalogi sem ugotavljal, kakšen vpliv ima EAF C žindra na fizikalno-mehanske lastnosti betona. V ta namen sem izdelal dve betonski mešanici po enaki recepturi, pri čemer sem uporabil različna agregata. V prvi mešanici sem uporabil žlindrin, v drugi pa drobljen apnenčev agregat. Najprej sem preizkušal lastnosti betona v svežem stanju, kjer sem meril konsistenco betona po metodi poseda stožca, delež por v betonu s pomočjo porozimetra ter temperaturo betona. Na strjenem betonu sem ugotavljal tlačno in upogibno natezno trdnost vzorcev ter njihovo odpornost proti prodoru vode pod pritiskom. Zanimalo me je, ali lahko z obema mešanicama dosežemo enake oziroma primerljive vrednosti, torej ali z uporabo žlindrene agregata vplivamo na karakteristike betona.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 691.322(043.2)

Author: Matevž Štokelj

Supervisor: assoc. prof. Violeta Bokan-Bosiljkov, Ph.D.

Cosupervisor: Zvonko Cotič, B.Sc

Title: EAF C Slag influence on physical and mechanical properties of concrete

Document type: Graduation thesis – University studies – B

Scope and tools: 23 pages, 10 inspections, 14 pictures

Keywords: slag, concrete resistance, water penetration

Abstract:

The diploma thesis deals with the influence of the EAF slag C on physical-mechanical properties of concrete. Two concrete mixtures were designed according to the same recipe; however, two different aggregates with the same volume fraction were used. In the first mix the slag was applied and in the second one crushed limestone aggregate was incorporated. First the properties of concrete in the fresh state were tested: consistency of concrete by the slump method, content of air pores using pressure gauge method and measurements of temperature. In the hardened state of concrete compressive and flexural tensile strength of samples were tested and resistance of concrete to penetration of water under pressure was determined. The aim of the thesis was to establish whether both concrete mixtures have comparable properties and if and how we influence the concrete properties when using the slag aggregate.

Kazalo vsebine

1 Uvod.....	- 1 -
2 Žindra.....	- 2 -
2.1 Splošno o žindri	- 2 -
2.2 Pridobivanje žindre železnega izvora.....	- 3 -
2.2.1 Pridobivanje plavžne žindre.....	- 3 -
2.2.2 Pridobivanje jeklarske žindre.....	- 4 -
2.3 Predelava črne žindre	- 6 -
2.4 Lastnosti črne žindre	- 7 -
2.4.1 Kemijske in mineralne lastnosti žindre	- 7 -
2.4.2 Mehansko-fizikalne lastnosti žindre.....	- 8 -
2.4.3. Prostorninska stabilnost žindre.....	- 10 -
2.4.4. Kemična inertnost žindre	- 10 -
3 Preiskave betona.....	- 10 -
3.1 Preiskave svežega betona.....	- 10 -
3.1.1. Metoda s posedom stožca.....	- 10 -
3.1.2 Določanje vsebnosti zraka.....	- 11 -
3.1.3 Meritev vodocementnega razmerja	- 12 -
3.2 Preiskave strjenega betona	- 12 -
3.2.1 Tlačna trdnost.....	- 13 -
3.2.2 Upogibna trdnost betona	- 14 -
3.2.3 Globina prodora vode pod pritiskom.....	- 14 -
4. Rezultati lastnih preiskav	- 15 -
4.1 Preiskave svežega betona.....	- 16 -
4.1.1 Komentar meritev.....	- 16 -
4.2 Tlačna trdnost preizkušancev	- 17 -
4.2.1 Vzorci z EAF C žindro.....	- 17 -
4.2.2 Vzorci z drobljenim apnenčevim agregatom.....	- 17 -
4.2.3 Grafični prikaz rezultatov obeh mešanic in komentar.....	- 18 -
4.3 Upogibna trdnost preizkušancev	- 19 -
4.3.1 Vzorci z EAF C žindro.....	- 19 -

4.3.2	Vzorci z drobljenim apnenčevim agregatom.....	- 19 -
4.3.3	Grafični prikaz rezultatov obeh mešanic in komentar.....	- 19 -
4.4	Globina prodora vode.....	- 20 -
4.4.1	Rezultati preiskave na obeh mešanicah.....	- 20 -
4.4.2	Grafični prikaz rezultatov obeh mešanic in komentar.....	- 20 -
5	Zaključek	- 22 -
Viri.....		- 23 -

Kazalo slik

<i>Slika 1: ABS žindra (vir: [7])</i>	- 3 -
<i>Slika 2: GBS žindra (vir: [7])</i>	- 4 -
<i>Slika 3: BOS žindra (vir: [7])</i>	- 4 -
<i>Slika 4: Shematski prikaz elektroobločne peči (vir: [3])</i>	- 5 -
<i>Slika 5: EAF C žindra</i>	- 5 -
<i>Slika 6: Deponiranje in pršenje žindre z vodo (vir: [1])</i>	- 6 -
<i>Slika 7: Mehanska obdelava žindre (vir: [1])</i>	- 6 -
<i>Slika 8: Značilni posesti stožca (vir: [4])</i>	- 11 -
<i>Slika 9: Shema porozimetra (vir: [4])</i>	- 12 -
<i>Slika 10: Hidravlična stiskalnica za ugotavljanje tlačne trdnosti</i>	- 13 -
<i>Slika 11: Shematični prikaz preiskave upogibne natezne trdnosti (vir: [4])</i>	- 14 -
<i>Slika 12: Grafični prikaz rezultatov tlačnih trdnosti</i>	- 18 -
<i>Slika 13: Grafični prikaz upogibne trdnosti vzorcev</i>	- 20 -
<i>Slika 14: Grafični prikaz rezultatov prodora vode vzorcev</i>	- 21 -

1 Uvod

V današnjem svetu vse bolj opažamo pomembnost razvoja in izvajanja trajnostnega gradbeništva. Tak pristop v gradbeništvu obravnava tri vidike: okoljskega, ekonomskega in družbenega. Okoljski vidik poudarja pomembnost vplivov na okolje, ki nastajajo v celotni življenjski dobi gradbenega projekta. Ekonomski vidik poudarja pomembnost stroškov gradbenega projekta v celotni življenjski dobi. Slednji je pomemben zaradi zavedanja, da je začetna investicija le del stroškov in da moramo torej razmisliti tudi o stroških vzdrževanja in razgradnje objekta. Družbeni vidik poudarja pomembnost takega načina gradnje, ki zadošča današnjim potrebam, ne da bi bile pri tem ogrožene možnosti prihodnjih generacij. Vsi trije vidiki so tesno povezani in soodvisni, zato jih moramo, da lahko govorimo o trajnostnem gradbeništvu, obravnavati uravnoteženo. Znotraj takega gradbeništva se pojavijo različni problemi, od dobave materialov pa vse do njihove obdelave ter skladiščenja odpadkov. Zavedamo se problematičnosti odpadnega materiala, ki nastaja tako v industriji kot v gradbeništvu, zato stremimo k njegovi predelavi in ponovni uporabi. Z današnjim znanjem o ravnanju, predelavi, skladiščenju in ponovni rabi določenega odpadka, lahko z aplikacijo ustrezne tehnološke opreme pridobimo nov uporaben vir surovin.

V okviru diplomske naloge se bom osredotočil na ponovno uporabo žindre, ki spada med industrijske odpadke. V uvodnem delu bom na splošno predstavil žindro, njeno pridobivanje, lastnosti in uporabo. V drugem delu diplomskega dela pa bom, primerjal rezultate opravljenih raziskav na različnih vzorcih betona. Posamezne metode, ki sem jih uporabil pri raziskovanju, sem opisal v nadaljevanju. Po isti betonski recepturi sem izdelal več vzorcev betona, ki so vsebovali ali drobljen apnenčev agregat ali črno žindro. Zanimalo me je, ali ima lahko mešanica, pri kateri sem uporabil žindrin agregat, primerljive karakteristike kot mešanica z drobljenim apnenčevim agregatom.

2 Žindra

2.1 Splošno o žindri

Žindra spada med industrijske odpadke, saj nastaja kot stranski produkt v proizvodnih procesih industrije. Od vrste industrije je odvisen tudi izvor žindre, ki je lahko železnega ali neželeznega izvora. Žindra neželeznega izvora nastaja pri pridobivanju barvnih kovin (aluminij, baker, cink ...), medtem ko nastaja žindra železnega izvora v industriji proizvodnje jekla in železa. Kovine pridobivamo po različnih metalurških postopkih, pri vseh pa moramo iz nje izločiti nečistoče, ki se izločijo kot trden ostanek, ki ga imenujemo žindra. Največji del proizvedene žindre v industriji je železnega izvora in ravno ta je najbolj ugoden material za nadaljnjo uporabo. Take žindre delimo na [1]:

- železarske žindre (plavžne žindre):
 - na zraku hlajena plavžna žindra (ABS),
 - granulirana plavžna žindra (GBS),

- jeklarske žindre:
 - žindre iz oksidacijskih talilnih peči (BOS),
 - žindre iz elektroobločnih peči (EAF C in EAF S),
 - žindre iz procesov sekundarne metalurgije (SMS).

Uporaba žindre v gradbeništvu narašča tako po svetu kot v Sloveniji. To se dogaja zaradi njenih odličnih fizikalnih in mehanskih lastnosti, njene kemične inertnosti ter razvoja gradbeništva v smer recikliranja odpadkov. Največ se žindra v gradbeništvu uporablja na področju gradnje cest, kjer se zaradi odličnih tornih sposobnosti žindre uporablja v nevezanih nosilnih in obrabnih plasteh.

Žindro lahko uporabimo tudi namesto tolčenca na področju gradnje železniških prog, kot dodatek v betonih, za vodne nasipe, drenažne poti itd. Kakovost žindre je odvisna od kakovosti primarnega materiala, predelave in skladiščenja samega odpadka.

2.2 Pridobivanje žlindre železnega izvora

Žlindra je stranski produkt pri proizvodnji železa in jekla. Poznamo več vrst žlindre, ki se delijo glede na proizvodni proces. Tako ločimo plavžne in jeklarske žlindre. Postopki pridobivanja posamezne vrste so opisani v nadaljevanju.

2.2.1 Pridobivanje plavžne žlindre

Plavžne žlindre pridobivamo v talilnih pečeh oziroma plavžih, od koder izhaja tudi njihovo ime. V plavžih talimo železovo rudo, ki se stali v tekočo kovino. Ta vsebuje tudi nečistoče – žlindro –, ki prehajajo na vrh železove taline zaradi manjše gostote, zato jih moramo v nadaljevanju ločiti od železa. Nadaljnja obdelava žlindre je odvisna od namena uporabe končnega proizvoda.

Če žlindro ohlajamo počasi, tako da jo izpostavimo atmosferskim vplivom, se oblikujejo visoko porozna zrna, ki so podobna običajnemu kamenemu agregatu. Tako žlindro imenujemo kristalna plavžna ali ABS žlindra (Slika 1).



Slika 1: ABS žlindra (vir: [7])

Če žlindro takoj, ko jo razlijemo iz plavža, ohladimo s hladno vodo oziroma jo dalj časa pršimo z vodo, dobimo steklasti material, ki ima hidravlične lastnosti. Tako žlindro imenujemo granulirana plavžna oziroma GBS žlindra (Slika 2).



Slika 2: GBS žindra (vir: [7])

2.2.2 Pridobivanje jeklarske žindre

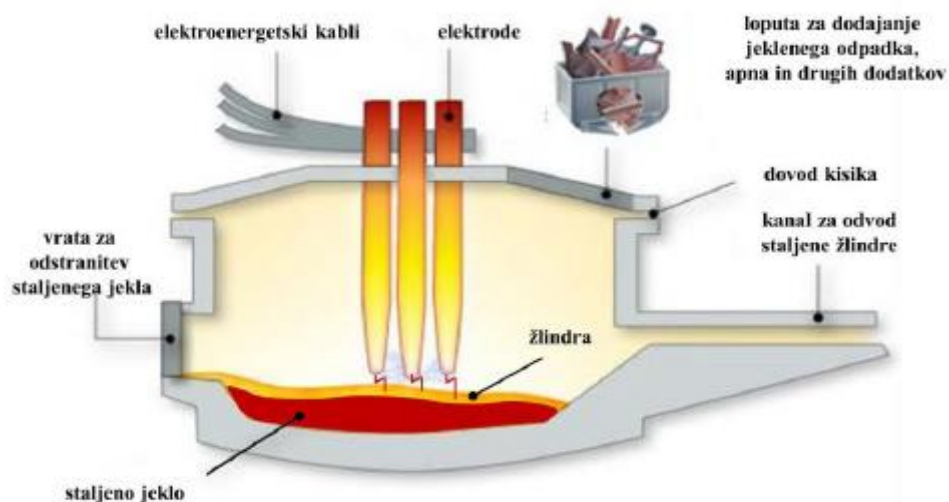
Jeklarsko žindro ločimo glede na postopek pridobivanja jekla. Žindra, ki jo pridobimo iz oksidacijskih talilnih peči, se imenuje BOS («Basic Oxygen furnace Slags») (Slika 3), žindra iz elektroobločnih peči pa EAF žindra («Electric Arc furnace Slags»).

Za pridobivanje BOS žindre vpihujemo v oksidacijsko talilno peč čisti kisik, ki znižuje raven ogljika v talini. Pri tem procesu se tvori nizko legirano jeklo in žindra.



Slika 3: BOS žindra (vir: [7])

Za pridobivanje EAF žlindre napolnimo elektroobložno peč z jeklenim ali železnim odpadkom. Nato se ob kontaktu grafitnih elektrod in odpadka sprosti električna energija, ki ustvari toploto, ta pa povzroča raztalitev odpadka. V peč nato dodamo želene aditive (apno, kisik, dolomit ...), ki vežejo nečistoče v žlindro. Ta se zaradi manjše gostote zbira nad talino in se na koncu odlije pod peč, kjer se strjuje (Slika 4).



Slika 4: Shematski prikaz elektroobložne peči (vir: [3])

Žlindro iz elektroobložnih peči ali EAF žlindro delimo na dve vrsti, ki se razlikujeta po kemični in mineralni sestavi. EAF C žindra (v Sloveniji poznana kot črna žindra – Slika 5), ki je največ, nastaja pri proizvodnji ogljikovih nelegiranih jekel, EAF S žindra (v Sloveniji poznana kot bela žindra) pa nastaja pri proizvodnji nerjavnih, visoko legiranih jekel. Na področju gradbeništva je zaradi boljših lastnosti in današnje tehnologije največkrat uporabljena črna žindra.



Slika 5: EAF C žindra

2.3 Predelava črne žindre

Žindra, pridobljena iz elektroobločne peči, mora biti ustrezno obdelana in deponirana, saj je od tega odvisna kakovost žlindrinega agregata. Žindra se iz peči izteka v korito pod pečjo, kjer se jo s posebnimi bagri premeša in nato naloži na ustrezne, toplotno zaščitene kamione ter odpelje na deponijo. Tam se nato začne postopek staranja žindre, ki poteka v dveh fazah. Prva faza traja 15 dni, v njej pa hladimo žindro tako, da jo močimo oziroma pršimo z vodo (Slika 6). Pri tem počasnem ohlajanju, razvija žindra značilno kristalno strukturo. V drugi fazi, ki poteka 30 dni, nadaljujemo s prelaganjem materiala in počasnim ohlajanjem na zraku.



Slika 6: Deponiranje in pršenje žindre z vodo (vir: [1])

Po končanem postopku staranja moramo žindro obdelati, da dobimo ustrezen agregat. Postopek pridobivanja agregata iz žindre je podoben postopu pridobivanja agregata iz naravne kamnine. Glavna razlika je v tem, da mora žindra najprej skozi postopek magnetnega separiranja, kjer iz žindre izločimo železo. Nato prestane dve fazi drobljenja do zelene frakcije, ki se nato preseje skozi sita v nazivne frakcije posameznih velikosti (Slika 7).



Slika 7: Mehanska obdelava žindre (vir: [1])

2.4 Lastnosti črne žlindre

Črna žindra nastane pri predelavi žlindre iz elektroobločnih peči pri proizvodnji nelegiranih jekel. Kakovost črne žlindre je odvisna od kakovosti primarnega materiala v proizvodnji, vrste proizvodnih procesov, doslednosti pri upravljanju z žlindro pred, med in po postopku staranja ter načina predelave v agregat. S porastom uporabe žlindre v gradbeništvo so se razvili in nadgradili tudi postopki predelave takega materiala. S pomočjo ustreznih postopkov smo dobili črno žindro take kakovosti, da jo lahko primerjamo z lastnostmi naravnih eruptivnih kamnin. Tako primerjavo dokazujejo številne preiskave. Poleg preiskav mineralnih lastnosti ter mehansko-fizikalnih lastnosti je bilo potrebno pri žlindri preiskati prostorninsko stabilnost in kemično inertnost. Preiskave so potrdile odlične sposobnosti in lastnosti črne žlindre, kot so [6] (glej Preglednica 1):

- odpornost proti drobljenju,
- odpornost proti obrabi,
- odpornosti proti zaglajevanju,
- odpornost proti zmrzovanju.

Prav zaradi teh lastnosti je črna žindra izgubila svoj negativni prizvok (odpadek) in se s pridom uporablja kot sekundarna surovina. Zaradi naštetih odpornosti je njena uporaba najbolj smiselna v asfaltnih in betonskih obrabnih plasteh voziščnih konstrukcij.

2.4.1 Kemijske in mineralne lastnosti žlindre

Kemijske in mineralne lastnosti žlindre igrajo bistveno vlogo pri določanju ustreznosti materiala za uporabo v gradbeništvo. Če je v okviru mineralne sestave prisotno apno in periklaz, dobimo prostorninsko nestabilen material [2]. Apno in periklaz v stiku z vodo nabrekmeta, kar povzroči nabrekanje celotnega materiala in lahko vodi v večje poškodbe (npr. obrabne plasti). Temu se lahko izognemo s primernim manevriranjem žlindre v času staranja ter z ustreznimi dodatki pri taljenju materialov v elektroobločnih pečeh.

Najpomembnejše komponente kemijske sestave žlindre so [1]:

- $\text{CaO} = 30 \text{ m.-%}$,
- $\text{FeO in Fe}_2\text{O}_3 = 30 \text{ m.-%}$,
- $\text{SiO}_2 = 15 \text{ m.-%}$,
- $\text{Al}_2\text{O}_3 = 8 \text{ m.-%}$,
- $\text{MnO} = 4,5 \text{ m.-%}$,

- $\text{Cr}_2\text{O}_3 = 1,5 \text{ m.-%}$,
- $\text{MgO} = 8 \text{ m.-%}$.

Zaradi različnih načinov predelave žindre ne moremo enolično določiti njene mineralne sestave, saj lahko vsebuje različne deleže posameznih mineralov. Sestavo lahko smiselno posplošimo s predstavitvijo posameznih mineralov v žindri. Najpomembnejši minerali, ki jih najdemo v žindri, podani po vrsti glede na vsebnost posameznega minerala [1]:

- Wustit,
- Belit,
- Alit,
- Brownmillerit,
- Kromit,
- Mayenit,
- Gehlenit,
- Apno (CaO),
- Periklaz.

2.4.2 Mehansko-fizikalne lastnosti žindre

Mehansko-fizikalne lastnosti žindre najlepše prikažemo s primerjavo z eruptivnim materialom. V tabeli so podane nekatere pomembne lastnosti črne žindre iz različnih slovenskih jeklarn v primerjavi z uvoženima eruptivnima kamninama (Preglednica 1).

Preglednica 1: Primerjava lastnosti žindre in eruptivnega materiala (vir: [3])

Parameter	Metoda preiskave	enota	ŽLINDRA			ERUPTIVEC	
			A	B	C	D	E
Prostorninska masa s porami in votlinami	SIST EN 1097-6	Mg/m^3	3,81	3,95	3,60	2,95	2,87
Vpijanje vode	SIST EN 1097-6	%	1,0	2,5	3,1	< 1	< 1
Odpornost proti drobljenju	SIST EN 1097-2	%	15	16	18	18	17
Odpornost proti zglajevanju	SIST EN 1097-8	kategorija	PSV₆₁	PSV₅₆	PSV₆₁	PSV ₅₀	PSV ₅₀
Odpornost proti zmrzovanju in tajanju	SIST EN 1367-1	kategorija	F₁	F₁	F₁	F ₁	F ₁
Prostorninska stabilnost	SIST EN 1744-1	% V/V	0,9	0,3	0,2	-	-

Zavedamo se, da ima eruptivni agregat boljše lastnosti glede na podane odpornosti kot drobljen apnenčev agregat. Predhodna primerjava je smiselna, saj bi lahko predvidevali, da bo žindra kot agregat z boljšimi lastnostmi pozitivno vplivala na lastnosti betona.

Po primerjavi posameznih mehansko-fizikalnih lastnosti lahko opazimo odstopanja v prostorninskih masah in pri vpijanju vode.

Prostorninska masa je pri črni žindri nekoliko višja kot pri eruptivnih materialih. To je ena redkih slabosti žindre, saj nam poveča stroške transporta in obtežbe.

Prav tako je kot posledica višje poroznosti žindre višji delež vpijanja vode. Delež vpijanja vode dobimo na podlagi razlike mas med z vodo zasičenimi in površinsko suhimi zrni žindre ter popolnoma suhimi zrni.

Odpornosti proti drobljenju določimo po postopu Los Angeles ali po postopku udarne trdnosti. Ta lastnost nam določa trajnost žindre v obrabnih plasteh in je odvisna od mineralne sestave, oblike, velikosti in razporeditve mineralov v materialu. Opazimo lahko, da je odpornost proti drobljenju žindre primerljiva z eruptivnim materialom.

Odpornost proti zaglajevanju je zelo pomembna pri uporabi žindre v obrabnih plasteh, kjer je bistvenega pomena, da ostane agregat pri obrabi oster in tako nudi visoko torni sposobnost čez življenjsko dobo. Tako lastnost imajo tako žindra kot eruptivne kamnine, med tem ko se sedimentne kamnine zgladijo in postanejo spolzke. Odpornost proti zaglajevanju je ovrednotena s količnikom PSV (Polished stone value). Dobimo jo s pomočjo modelčka, ki ga napolnimo z zrni in epoksidnim lepilom. Modelček poliramo z abrazivnim materialom in ga po končanem postopku primerjamo s tistim, ki smo ga pripravili za preverjanje. Če primerjamo rezultate preiskave odpornosti proti zglajevanju med žindro in eruptivnim materialom, lahko opazimo, da ima črna žindra še boljše lastnosti kot eruptivni material.

Odpornost proti zmrzovanju je zelo pomembna, saj se lahko pri izpostavljenosti materiala nizkim temperaturam v njem pojavijo veliki pritiski. Ti pritiski povzročajo poškodbe posameznih zrn, ki se lahko razširijo na večjo površino in tako močno poškodujejo končni produkt. Preizkus odpornosti proti zmrzovanju opravimo tako, da posamezne frakcije materiala, ki so potopljene v vodo, izpostavimo desetim ciklusom zmrzovanja in tajanja. Končni rezultat je odvisen od izgube mase vzorca. V preglednici lahko vidimo, da je črna žindra glede odpornosti proti zmrzovanju in tajanju povsem primerljiva z eruptivnim materialom.

2.4.3. Prostorninska stabilnost žlindre

Prostorninska stabilnost je v obrabnih plasteh zelo pomembna, saj lahko vodi v večje poškodbe plasti. Prostorninska nestabilnost je posledica nestabilnih mineralov v žlindri, ki v stiku z vodo nabrekajo in se vežejo [6]. Takemu obnašanju se lahko izognemo s primernim in doslednim upravljanjem z odpadkom pri staranju žlindre. Pri staranju poskrbimo, da se ti nestabilni minerali vežejo z vodo in postanejo stabilni. Prostorninska stabilnost žlindre se preverja s parnim testom. V Preglednici 1 lahko opazimo, da je eruptivni material prostorninsko povsem stabilen. Na drugi strani pa ima žindra manjšo prostorninsko nestabilnost (<1 %).

2.4.4. Kemična inertnost žlindre

Pri črni žlindri moramo preveriti tudi njeno kemično inertnost. Zavedamo se, da je žindra odpadek in lahko zaradi vsebnosti težkih kovin negativno vpliva na okolje. Kemična inertnost agregata se preverja s kemijsko analizo izlužka žlindre. Dosedanji rezultati raziskav na tem področju kažejo, da črna žindra ne presega vrednosti, določenih v standardu, in da njena uporaba ni nevarna ter ne škoduje okolju [6].

3 Preiskave betona

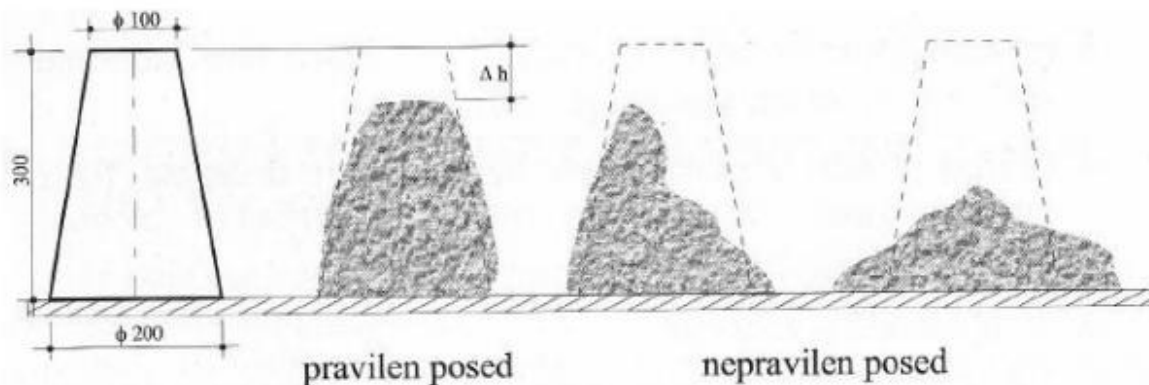
3.1 Preiskave svežega betona

V tem poglavju so na kratko opisane metode preiskav, ki so bile uporabljene na svežem betonu.

3.1.1. Metoda s posedom stožca

Ta je najenostavnejša metoda za merjenje konsistence tekočega in srednje ter mehko plastičnega svežega betona. Konsistenca je lastnost svežega betona, ki vpliva na vgradljivost, obdelavnost in zgostitev betona. Za preiskavo potrebujemo gladko ravno podlago, zidarsko žlico, gladko, na eni strani zaobljeno kovinsko palico ter kovinski stožec višine 300 mm ter premera 100 mm zgoraj in 200 mm spodaj. Stožec postavimo na ravno podlago in ga napolnimo enakomerno v treh plasteh. Vsako plast 25-krat prebodemo z jekleno palico tako, da ne prehajamo globlje v predhodno plast, prebodemo pa čez stik dveh plasti. Ko je stožec poln, z zidarsko žlico odstranimo višek betona. Stožec po 30

sekundah počasi in enakomerno dvignemo ter izmerimo posed betonskega stožca. Celoten postopek mora potekati kontinuirano in ne sme trajati več kot 150 s [8]. Na naslednji sliki (Slika 8) so prikazani značilni posedi betona po tej metodi.



Slika 8: Značilni posedi stožca (vir: [4])

Glede na velikost poseda stožca, lahko beton razvrstimo v enega od 5 razredov (Preglednica 2):

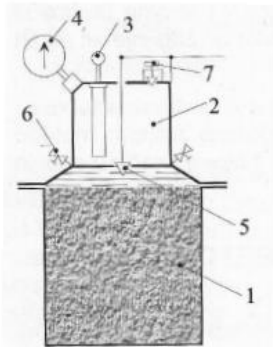
Preglednica 2: Razredi poseda stožca (vir: [4])

Razred	Posed
S1	10 do 40
S2	50 do 90
S3	100 do 150
S4	160 do 210
S5	≥ 220

3.1.2 Določanje vsebnosti zraka

Vsebnost zraka v svežem betonu merimo s pomočjo manometriške metode v porozimetru. V posodo vgradimo beton v eni ali več plasteh, odvisno od konsistence betona. Zgoščen beton v napolnjeni posodi na vrhu zagladimo z zidarsko žlico, očistimo robove posode in pritrdimo pokrov. Skozi odprtino z ventilom vlivamo vodo, da zapolnimo prostor med pokrovom in posodo. Vodo vlivamo tako dolgo, dokler opazimo izločanje zračnih mehurčkov na nasprotnem ventilu. Nato ventila zapremo in s pomočjo ročne zračne črpalke vnesemo v pokrov (predkomoro) toliko zraka, da nam kazalec na manometru pokaže vrednost nič. Nato odpremo ventil, s katerim spustimo zrak iz

predkomore v posodo, in po nekaj sekundah odčitamo delež zračnih por v betonu v odstotkih (Slika 9) [9] [4].



Slika 9: Shema porozimetra (vir: [4])

3.1.3 Meritev vodocementnega razmerja

Vodocementno razmerje svežega betona sem določeval po preskusni metodi, ki je podana v standardu SIST 1026, dodatek 3. Ta dodatek predpisuje preskusno metodo s sušenjem vzorca svežega betona. Z meritvijo izgube mase med sušenjem svežega betona na plinskem gorilniku ali v mikrovalovni pečici, določimo količino vode v svežem betonu. Poudariti je treba, da je metoda občutljiva že na majhne napake med izvajanjem preizkusa, zato je treba opraviti več meritev za pridobitev zanesljivih rezultatov. Pred odvzemom vzorca moramo beton ročno premešati, da dobimo homogen vzorec, na katerem opravimo raziskavo. Vzorec betona položimo v gumijasto posodo, ki jo postavimo v mikrovalovno pečico v dveh korakih. Vzorec najprej sušimo 8 minut, nato ga vzamemo iz pečice in ga ročno razdrobimo, da pospešimo sušenje. Nato ga vstavimo v mikrovalovno pečico za nadaljnjih 15 minut pri moči 750W. Po končanem sušenju vzorec stehamo. Pri znani količini cementa lahko iz razlike mas določimo vodocementno razmerje betonske mešanice. Za določitev efektivnega vodocementnega razmerja moramo upoštevati še morebitne druge dodatke betonu in vodovpojnost uporabljenega agregata.

3.2 Preiskave strjenega betona

V tem poglavju so na kratko opisani postopki, ki so bili uporabljeni pri preiskavah strjenega betona.

3.2.1 Tlačna trdnost

Tlačni preizkus je standardna preiskava betona, definirana kot maksimalna izmerjena odpornost na osno tlačno obremenitev. Preizkusna metoda je predpisana s standardom [10]. Tlačno trdnost določamo na standardiziranih preizkušancih v oblikah valjev ali kock [11]. V preiskavi sem ugotavljal tlačno trdnost na kockah dimenzij 15 cm. Tlačna trdnost je odvisna od vodocementnega razmerja, vrste cementa, starosti, temperature in nege betona, itd [5]. V splošnem določamo tlačno trdnost pri betonu starem 28 dni, ko doseže 70–90 % končne tlačne trdnosti. Za natančnejše meritve in primerjave lahko trdnost preverjamo ob različnih starostih. V preiskavi sem preverjal tlačno trdnost betona na vzorcih starih 2, 28, 56 in 90 dni, pri čemer velja poudariti, da se tlačna trdnost pri starostih večjih od 90 dni le malo spreminja. Preverjamo jo s pomočjo stiskalnice, kjer vzorec obremenimo do porušitve (Slika 10). Preden vstavimo preizkušane v stiskalnico, moramo očistiti naležne površine tako na stiskalnici kot na vzorcu. Vzorec nato vstavimo v stiskalnico, tako da ga obremenimo pravokotno na smer vgrajevanja (ravne gladke površine). Silo na stiskalnici dodajamo enakomerno s hitrostjo 0,2–1 MPa/s do porušitve. Ko se vzorec poruši, na merilni skali odčitamo porušno silo in tlačno trdnost preizkušanca (če na stiskalnici ni moč direktno odčitati tlačne trdnosti, jo izračunamo iz dobljene porušne sile in prečnega prereza kocke). Pozorni moramo biti na način porušitve, saj se lahko zgodi, da se nam vzorec poruši nepravilno. Take porušitve lahko v splošnem pripišemo poškodovanim kalupom, naključnim nečistočam v vzorcu oziroma nepravilni negi vzorca, ki mora zoreti v bazenu z vodo pri temperaturi 18–22 °C.



Slika 10: Hidravlična stiskalnica za ugotavljanje tlačne trdnosti

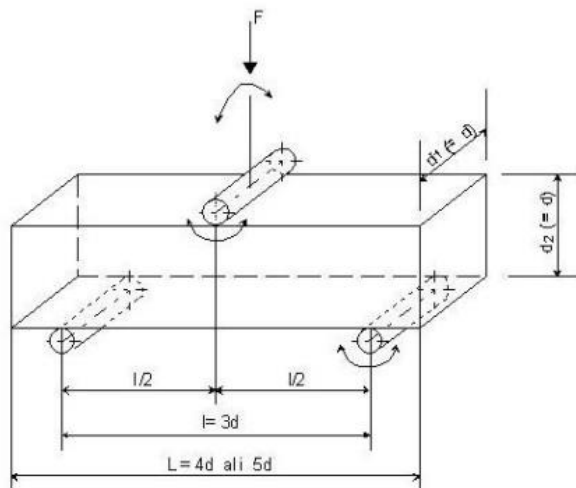
3.2.2 Upogibna trdnost betona

Preiskava upogibne natezne trdnosti betona je standardna preiskava betona [12]. Preizkušance pripravimo in negujemo podobno kot tiste za preiskavo tlačne trdnosti. Glavna razlika je le v njihovih dimenzijah. Dimenzije vzorcev za ugotavljanje upogibne natezne trdnosti so 10/10/40 cm. Vzorce tudi tu preizkušamo pri starosti 28 dni. Pri preiskavi, uporabljeni v okviru te diplomske naloge, sem preverjal upogibno trdnost vzorcev pri starosti 28 in 90 dni. Postopek poteka podobno kot pri analizi tlačne trdnosti. Preizkušani vzorec vstavimo v posebno stiskalnico na dve valjčni podpori, tretji valj pa damo na sredino razpona med podporama na vrhu prizme. Tako postavljeni vzorec (slika 11) enakomerno obremenjujemo s korakom 0,04–0,06 MPa/s do porušitve. Po porušitvi vzorca odčitamo porušno silo in izračunamo upogibno trdnost s pomočjo enačbe:

$$f_{cf} = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot d_1 \cdot d_2^2}$$

pri čemer velja:

- l razmik med podporama [cm],
- d1 in d2 dimenziji prečnega prereza prizme [cm],
- F sila ob porušitvi [kN].



Slika 11: Shematični prikaz preiskave upogibne natezne trdnosti (vir: [4])

3.2.3 Globina prodora vode pod pritiskom

Odpornost betona proti prodoru vode se določa na standardnih preizkušancih enako kot za preiskavo tlačne trdnosti. Sama preiskava je predpisana s standardom [13]. Standard določa opravljanje

preiskave na treh preizkušancih iste starosti za posamezen beton. Starost preizkušancev, ki morajo biti v času zorenja ustrezno negovani v bazenih z vodo, mora biti med 28 in 35 dni.

Preizkus opravimo tako, da vstavimo preizkušance v napravo pravokotno na smer vgrajevanja v kalup, pri čemer morajo biti površine kock očiščene. Nato ga pritrdimo s pomočjo tesnilnega vijaka in s spodnje strani izpostavimo vodi, ki na preizkušance konstantno deluje 72 \pm 2 uri pod pritiskom petih barov. Med preizkusom moramo biti pozorni, da nam voda ne uhaja preko nepravilnosti na površini posameznega vzorca. Po pretečenem predpisanem času preizkušance vzamemo iz naprave. Na strani, ki je bila izpostavljena vodi pod pritiskom, očistimo površino in preizkušane na tej ploskvi pravokotno razcepimo. Na razcepljeni površini lahko opazimo vzorec in globino prodora vode, ki jo izmerimo v milimetrih. Tu je smiselno skicirati tudi potek omočitve, saj lahko večja zrna in morebitne nepravilnosti preizkušanca vplivajo na globino prodora vode.

Glede na globino prodora vode ločimo tri stopnje odpornosti (Preglednica 3):

Preglednica 3: Stopnje odpornosti proti prodoru vode

Stopnja odpornosti proti prodoru vode	Maksimalna dovoljena vrednost [mm]	Maksimalni dovoljen odklon [mm]
PV-I	50	\pm 15
PV-II	30	\pm 10
PV-III	20	\pm 5

4. Rezultati lastnih preiskav

V diplomski nalogi sem raziskoval vpliv EAF C žlindre na lastnosti betonske mešanice. Zanimalo me je, ali lahko dosežemo enake lastnosti betona, kadar za agregat uporabimo EAF C žlindro, v primerjavi z betonom, kjer smo uporabili drobljeni apnenčev agregat. V ta namen sem uporabil že pripravljeno betonsko recepturo in v njej spremenil le vrsto agregata. V obeh mešanicah sem uporabil agregat frakcij 0/2, 0/4, 2/4 in 8/11. V mešanici z dobljenim apnenčevim agregatom sem za vse frakcije uporabil apnenčev agregat iz kamnoloma Laže. V mešanici z EAF C žlindro pa sem frakciji 2/4 in 8/11 nadomestil z enako prostornino agregata iz žlindre, frakciji 0/2 in 0/4 pa sta ostali enaki. Za te frakcije sem opravil pralno-sejalne analize in dobil naslednje rezultate (Preglednica 4) [14]:

Preglednica 4: Rezultati pralno-sejalne analize uporabljenega agregata

Sito (mm)		0,06										
		3	0,09	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	11,2	16
presevek (%)	EAF C žindra 8/11	0,7	4,4	4,7	4,7	5,2	11,9	11,9	89,0	100,0	100,0	100,0
Sito (mm)		0,06										
		3	0,09	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	11,2	16
presevek (%)	EAF C žindra 8/11	0,3	2,6	2,7	2,7	2,7	2,9	2,9	3,2	10,0	86,3	100,0
Sito (mm)		0,06										
		3	0,09	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	11,2	16
presevek (%)	Drobljenec 0/2	12,1	17,0	19,3	26,7	40,7	62,9	91,5	100,0	100,0	100,0	100,0
Sito (mm)		0,06										
		3	0,09	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	11,2	16
presevek (%)	Drobljenec 0/4	10,2	13,6	15,0	19,5	27,5	39,5	62,5	95,2	100,0	100,0	100,0

V nadaljevanju so prikazani rezultati preiskav na svežem in strjenem betonu po zgoraj opisanih postopkih.

4.1 Preiskave svežega betona

V preglednici so podane vrednosti rezultatov preiskav na svežem betonu (Preglednica 5).

Preglednica 5: Rezultati preiskav na svežem betonu

vzorec	datum preiskave	posed	v/c	v/c, eff	delež por [%]	T betona [°C]	T zraka [°C]
z EAF C žindro	5. marec	210	0,54	0,49	3,2	21,4	20,9
z drobljencem	20. marec	200	0,54	0,5	3,6	21,2	20,8

4.1.1 Komentar meritev

Preiskave svežega betona so bile opravljene po predhodno opisanih postopkih. Rezultati so prikazani v zgornji preglednici (Preglednica 5). Po primerjavi posameznih rezultatov lahko ugotovimo, da so rezultati primerljivi, lahko bi rekli celo, da so enaki. Posed pri vzorcih s črno žindro je nekoliko višji

kot pri vzorcu z drobljencem. Glede na to, da se posed zgodi zaradi lastne teže betona, lahko večji posed pripišem višji gostoti žlindre agregata. Vodocementno razmerje je dobljeno iz razmerja med vodo in cementom po uporabljeni recepturi, zato sta ti dve vrednosti enaki. Pri efektivni vrednosti tega razmerja pa upoštevamo še vodovpojnost agregata. Nekoliko nižja vrednost efektivnega razmerja pri vzorcu s črno žlindro je posledica višje vodovpojnosti žlindre. Če primerjamo še delež por, opazimo, da sta rezultata zelo podobna in lahko predpostavimo, da žindra bistveno ne vpliva na delež por v betonski mešanici. Mešanje vseh vzorcev je potekalo v laboratoriju pri stalni temperaturi, zato lahko predpostavimo, da uporaba žlindre agregata ne vpliva na temperaturo betona v svežem stanju.

4.2 Tlačna trdnost preizkušancev

4.2.1 Vzorci z EAF C žlindro

V preglednici so podane povprečne vrednosti rezultatov preiskav na preizkušancih starih 2, 28, 56, in 90 dni (Preglednica 6).

Preglednica 6: Rezultati tlačnih trdnosti vzorcev s črno žlindro

starost [dni]	masa [kg]	gostota [kg/m ³]	porušna sila [kN]	tlačna trdnost [MPa]
2	8,86	2625	205	9,1
28	8,74	2590	1167,7	51,9
56	8,69	2573	1276,6	56,7
90	8,93	2644	1320	58,7

4.2.2 Vzorci z drobljenim apnenčevim agregatom

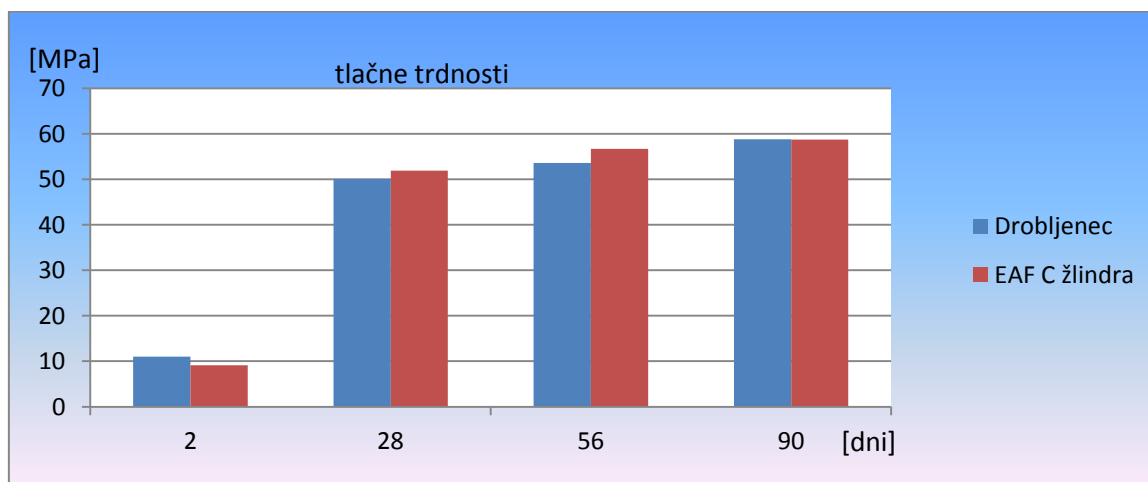
V preglednici so podane povprečne vrednosti rezultatov preiskav na preizkušancih starih 2, 28, 56, in 90 dni (Preglednica 7).

Preglednica 7: Rezultati tlačnih trdnosti vzorcev z apnenčevim agregatom

starost [dni]	masa [kg]	gostota [kg/m ³]	porušna sila [kN]	tlačna trdnost [MPa]
2	7,98	2364	248,4	11
28	7,99	2367	1127,1	50,1
56	7,95	2355	1207,2	53,6
90	8,07	2390	1322,8	58,8

4.2.3 Grafični prikaz rezultatov obeh mešanic in komentar

Dobljene povprečne vrednosti tlačnih trdnosti, predstavljene v grafični obliki (Slika 12):



Slika 12: Grafični prikaz rezultatov tlačnih trdnosti

Preiskave tlačne trdnosti so bile opravljene po predhodno opisanih postopkih na preizkušancih različnih starosti, ki so bili ustrezno negovani v bazenih z vodo. Pri primerjavi dobljenih rezultatov lahko opazimo, da imajo zaradi višje prostorninske teže žlindrene agregata vzorci s črno žlindro višjo maso kot vzorci z drobljencem. Če primerjamo dobljene tlačne trdnosti obeh mešanic, opazimo, da se vrednosti le malo razlikujejo – vidne so nekoliko višje vrednosti vzorcev z žlindrinim agregatom pri 28 in 56 dneh. Ker med dobljenimi rezultati ne prihaja do bistvenih razlik, lahko ugotovimo, da črna žindra nima niti negativnega niti pozitivnega vpliva na tlačno trdnost betona.

4.3 Upogibna trdnost preizkušancev

4.3.1 Vzorci z EAF C žlindro

V preglednici so podane povprečne vrednosti rezultatov preiskav na preizkušancih starih 28 in 90 dni (Preglednica 8).

Preglednica 8: Rezultati upogibne trdnosti vzorcev s črno žlindro

starost [dni]	masa [kg]	gostota [kg/m ³]	porušna sila [kN]	upogibna trdnost [MPa]
28	10,46	2615	19,46	8,7
90	10,54	2635	22,54	10,1

4.3.2 Vzorci z drobljenim apnenčevim agregatom

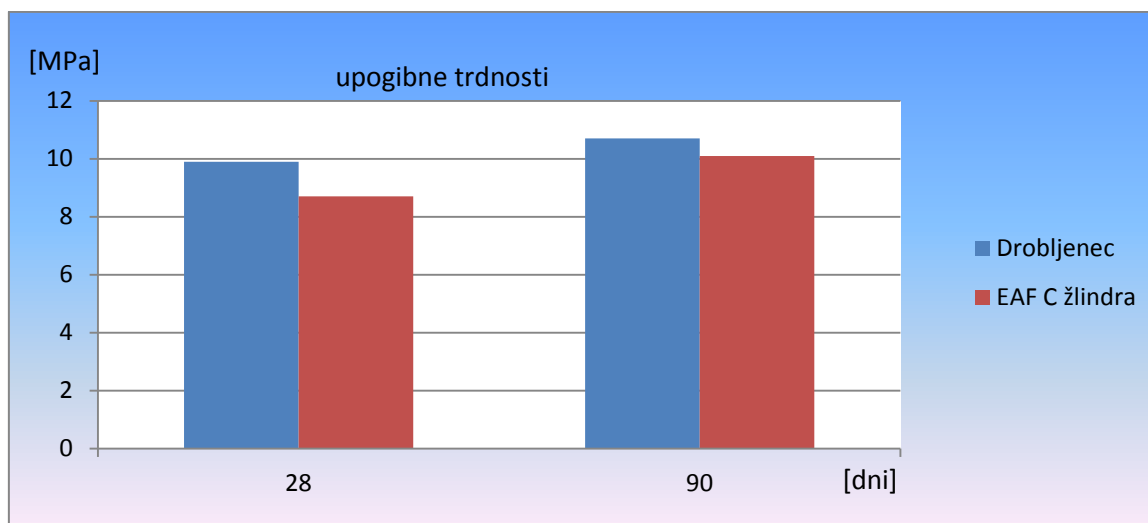
V preglednici so podane povprečne vrednosti rezultatov preiskav na preizkušancih starih 28 in 90 dni (Preglednica 9).

Preglednica 9: Rezultati upogibne trdnosti vzorcev z apnenčevim agregatom

starost [dni]	masa [kg]	gostota [kg/m ³]	porušna sila [kN]	upogibna trdnost [MPa]
28	9,43	2358	21,97	9,9
90	9,62	2405	23,79	10,7

4.3.3 Grafični prikaz rezultatov obeh mešanic in komentar

Dobljene povprečne vrednosti upogibnih trdnosti prikazuje naslednja slika (Slika 13):



Slika 13: Grafčni prikaz upogibne trdnosti vzorcev

Preiskave upogibne trdnosti so bile opravljene po predhodno opisanih postopkih na preizkušancih različnih starosti, ki so bili ustrezno negovani v bazenih z vodo. Pri primerjavi dobljenih rezultatov lahko opazimo, da imajo vzorci s črno žlindro zaradi višje gostote žlindrene agregata višjo maso kot vzorci z drobljencem. Če primerjamo dobljene upogibne trdnosti obeh mešanic, opazimo, da se vrednosti le malo razlikujejo. Mešanica z apnenčevim agregatom sicer dosega nekoliko višje trdnosti, vendar pa razlika med rezultati ni bistvena. Zato lahko tudi v primeru upogibnih trdnosti zaključimo, da črna žindra nima niti negativnega niti pozitivnega vpliva na upogibno trdnost betona.

4.4 Globina prodora vode

4.4.1 Rezultati preiskave na obeh mešanicah

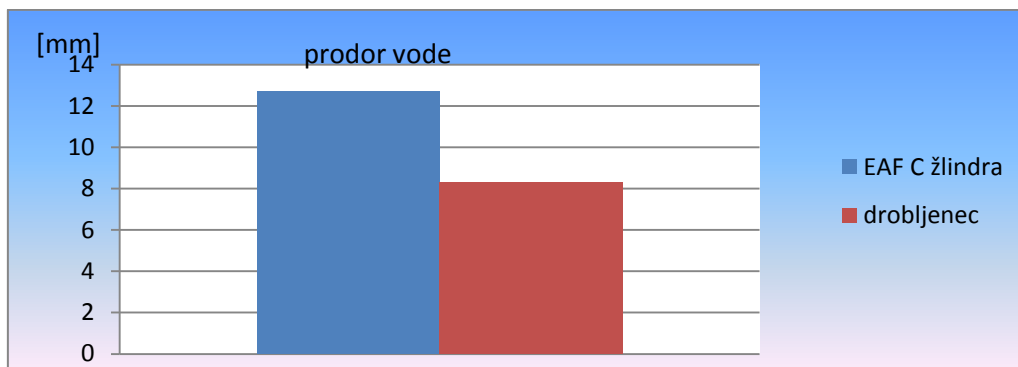
V preglednici so podane povprečne vrednosti prodora vode na treh preizkušancih iste mešanice (Preglednica 10).

Preglednica 10: Rezultati globine prodora vode

vzorec	prodor vode [mm]
EAF C žindra	12,7
drobljenec	8,3

4.4.2 Grafčni prikaz rezultatov obeh mešanic in komentar

Dobljene povprečne vrednosti prodora vode so predstavljene v grafični obliki (Slika 14):



Slika 14: Grafični prikaz rezultatov prodora vode vzorcev

Preiskava globine prodora vode je bila opravljena po predhodno opisanem postopku. Rezultate sem zaradi preglednosti prikazal grafično. Če primerjamo dobljene rezultate na obeh mešanicah, lahko opazimo, da je pri mešanici, v kateri sem uporabil agregat iz črne žlindre, prodor vode večji kot pri mešanici z drobljenim apnenčevim agregatom. Glede na to, da sta bili obe mešanici pripravljene po enaki recepturi, lahko večjo globino prodora vode pri uporabi črne žlindre pripišem uporabi drugačnega agregata. Sledi, da je globina prodora vode pri mešanici s črno žlindro višja zaradi višje poroznosti črne žlindre v primerjavi z drobljenim apnenčevim agregatom.

5 Zaključek

Namen diplomske naloge je bil ugotoviti možnost uporabe EAF C žlindre kot agregata v betonu in njen vpliv na karakteristike betona. S pomočjo več preiskav na svežem in strjenem betonu sem ugotovil, da z uporabo žlindre kot agregata v mešanici ne vplivamo na karakteristike betona. Preiskave sem opravil na dveh mešanicah, ki sta se razlikovali le v uporabljenem agregatu. V eni mešanici sem uporabil drobljen apnenčev agregat, v drugi pa žlindrin agregat. Pri primerjavi rezultatov sem ugotovil, da dosežemo enak trdnosti razred betona v obeh primerih. Prav tako ostanemo v istem karakterističnem razredu v smislu upogibne trdnosti in prodora vode. Tudi na svežem betonu so lastnosti obeh betonov primerljive.

Na podlagi dobljenih rezultatov preiskav lahko naredim zaključek, da zamenjava večjih frakcij drobljenega apnenčevega agregata z žlindrinim agregatom ne spremeni lastnosti betona. To pomeni, da lahko v nekaterih primerih v betonskih mešanicah uporabimo žlindrin agregat. Pri tem pa moramo razmisliti o primerih uporabe, kjer lahko izkoristimo prednosti take mešanice. Smiselno jo je uporabiti v primeru talnih plošč, obrabnih betonskih plasti itd, torej v primerih, ko se zahteva visoka odpornost na obrabo in njeno drsnost. Nesmiselno bi jo bilo uporabljati v gradnji npr. etažnih plošč, saj zaradi višje prostorninske teže mešanic z žlindrinim agregatom povečamo lastno težo konstrukcije.

Med raziskovanjem lastnosti žlindre in možnostjo njene uporabe v betonu sem naletel tudi na problem nabrekanja žlindre, česar ne moremo preprosto zanemariti, saj lahko vodi v poškodbe betona.

Viri

- [1] Jurjavčič, P., Mladenovič, A., Cotič, Z. 2013. Priročnik za uporabo agregata iz črne jeklarske iz elektroobločnih peči v asfaltnih obrabnih plasteh: 34 str.
<http://www.re-birth.eu/prirocniki-za-uporabo-odpadkov/> (Pridobljeno 8. 8. 2014.)
- [2] Jurjavčič, P. 2012. Vrste žlindre kot proizvodi v gradbeništvu. Mineral 21: 28–31.
<http://www.re-birth.eu/clanki/> (Pridobljeno 8. 8. 2014.)
- [3] Jurjavčič, P., Cotič, Z. 2012. Črna jeklarska žindra v asfaltu. Mineral 25: 40–44.
<http://www.re-birth.eu/clanki/> (Pridobljeno 8. 8. 2014.)
- [4] Žarnič R., Bosiljkov V., Bokan Bosiljkov V., Dujič, B. 2008/09. Gradiva vaje. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 142 str.
- [5] Žarnič, R. 2005. Lastnosti gradiv. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za preskušanje materialov in konstrukcij: 350 str.
- [6] Korbar, P. 2013. Analiza in uporabnost črne jeklarske žlindre v bituminiziranih zmesih. Diplomsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, FGG, Odd. za gradbeništvo, Prometna smer: 121 str.
- [7] The European Slag Association. Properties. 2012.
<http://www.euroslag.com/products/properties/> (Pridobljeno 8. 8. 2014.)
- [8] SIST EN 12350-2:2009. Preskušanje svežega betona – 2. del: Preskus s posedom stožca.
- [9] SIST EN 12350-7:2009. Preskušanje svežega betona – 7. del: Vsebnost zraka – Metode s pritiskom.
- [10] SIST EN 12390-3:2009. Preskušanje strjenega betona – 3. del: Tlačna trdnost preskušancev.
- [11] SIST EN 12390-1:2001 Preskušanje strjenega betona – 1. del: Oblika, mere in druge zahteve za vzorce in kalupe.
- [12] SIST EN 12390-5:2009. Preskušanje strjenega betona – 5. del: Upogibna trdnost preskušancev.
- [13] SIST EN 12390-8:2009. Preskušanje strjenega betona – 8. del: Globina vpijanja vode pod pritiskom.
- [14] SIST EN 933-1:2012. Preskusi geometričnih lastnosti agregatov – 1. del: Ugotavljanje zrnivosti.