

# Usporedba porobetona i vlaknima armiranog betona

---

**Sabo, Martina**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2019**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering in Rijeka / Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet u Rijeci**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:157:062803>

*Rights / Prava:* [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-20**



image not found or type unknown

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering - FCERI Repository](#)



image not found or type unknown

**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
GRAĐEVINSKI FAKULTET U RIJECI**

**Martina Sabo**

**Usporedba porobetona i vlaknima armiranog betona**

**Diplomski rad**

**Rijeka, 2019.**

**SVEUČILIŠTE U RIJECI**  
**GRAĐEVINSKI FAKULTET U RIJECI**

**Diplomski sveučilišni studij građevinarstvo**

**Hidrotehnika**

**Teorija i tehnologija betona**

**Martina Sabo**

**JMBAG: 0069056231**

**Usporedba porobetona i vlaknima armiranog betona**

**Diplomski rad**

**Rijeka, 2019.**

*DIPLOMSKI ZADATAK*

## **IZJAVA**

Diplomski rad izradila sam samostalno, u suradnji s mentoricom i uz poštivanje pozitivnih građevinskih propisa i znanstvenih dostignuća iz područja građevinarstva. Građevinski fakultet u Rijeci je nositelj prava intelektualnog vlasništva u odnosu na ovaj rad.

---

Martina Sabo

U Rijeci, 25.veljače 2019.

## **IZJAVA**

Diplomski rad nastao je kao rezultat rada u okviru projekta Razvoj istraživačke infrastrukture na kampusu Sveučilišta u Rijeci (RC.2.2.06-0001) (voditelj prof.dr.sc. Nevenka Ožanić) koji je sufinanciran iz Europskog fonda za regionalni razvoj (EFRR) i Ministarstva znanosti, obrazovanja i sporta RH.

## **Zahvala**

*Ovom prilikom želim se zahvaliti svojoj mentorici doc. dr. sc. Nataliji Bede koja mi je strpljivo posvetila svoj trud i vrijeme kako bi mi pomogla vrijednim činjenicama i mišljenjima, te brojnim stručnim savjetima koji su usmjerili tijek pisanja rada.*

*Zahvaljujem i prijateljima i kolegama koji su mi uljepšali iskustvo studiranja, također se zahvaljujem svom dečku i velikom prijatelju na velikoj potpori tijekom svih godina studiranja.*

*Najveće hvala ide mojim roditeljima i mojoj sestri koji su mi omogućili studiranje, nesebično me podržavali i iskazali razumijevanje kroz sve godine studija kada mi je to bilo najpotrebnije.*

## SAŽETAK

### **Naslov rada: Usporedba porobetona i vlaknima armiranog betona**

U ovom radu dana je usporedba nekih osnovnih fizikalno-mehaničkih svojstava, kao što su tlačna čvrstoća, gustoća, modul elastičnosti i vodoupojnost, dvaju betona posebnih namjena: porobetona, koji pripada skupini lakih betona te vlaknima armiranog betona. Kronološki slijed diplomskog rada početi će od općenitih činjenica o betonu te betonima posebnih namjena. Nakon toga, opisane su karakteristike promatranih betona, njihove prednosti i nedostaci te primjena. Zatim slijedi kratki pregled korištenih razornih i nerazornih metoda ispitivanja očvrstlog betona te modula elastičnosti. U eksperimentalnom djelu rada opisan je postupak laboratorijskih ispitivanja navedenih svojstava sa svim potrebnim uzorcima i mjernim uređajima. U konačnici su prikazani rezultati provedenih ispitivanja gustoće, tlačne čvrstoće, dinamičkog i statičkog modula elastičnosti, te vodoupojnosti promatranih uzoraka porobetona i vlaknima armiranog betona. Na kraju rada dana je usporedba i zaključak na temelju dobivenih rezultata.

**Ključne riječi: porobeton, vlaknima armirani beton, statički modul elastičnosti, dinamički modul elastičnosti, gustoća, tlačna čvrstoća, vodoupojnost**



## **ABSTRACT**

### **Title: Comparison of autoclaved aerated concrete and fiber reinforced concrete**

This thesis gives comparison between some basic physical and mechanical properties, such as compressive strength, density, modulus of elasticity and water absorption, of two special purpose concretes: autoclaved aerated concrete, classified as lightweight concrete and fiber reinforced concrete. The chronological sequence of graduate thesis will start from the general facts about concrete and special purpose concretes. Next, short review of used destructive and nondestructive test methods of hardened concrete is given as well as on modulus of elasticity. In the experimental part of the work description of the conducted laboratory tests is presented with all necessary samples and measuring instruments. Finally, the test results for the density, compressive strength, dynamic and static modulus of elasticity and water absorption of the observed autoclaved aerated concrete and fiber reinforced concrete samples are presented. At the end of the work comparison and conclusion based on the obtained results are given.

**Keywords: autoclaved aerated concrete, fiber reinforced concrete, static modulus of elasticity, dynamic modulus of elasticity, compressive strength, water absorption**

## SADRŽAJ:

1.	UVOD.....	11
2.	OPĆENITO O BETONU .....	12
2.1.	Komponente modernog betona .....	13
2.1.1.	Agregat.....	13
2.1.2.	Cement .....	14
2.1.3.	Voda.....	15
2.1.4.	Dodaci betonu .....	17
3.	VRSTE BETONA .....	18
3.1.	Lagani beton .....	19
3.1.1.	Lagani betoni od jednozrnatog agregata.....	21
3.1.2.	Lakoagregatni betoni .....	22
3.1.3.	Ćelijasti betoni .....	22
3.1.3.1.	Porobeton.....	23
3.1.4.	Proizvodnja porobetona .....	24
3.1.5.	Mikrostruktura porobetona .....	25
3.2.	Beton armiran vlaknima (MAB).....	26
3.2.2.	Proizvodnja mikroarmirang betona .....	29
3.2.3.	Mikrostruktura armiranog betona .....	30
4.	METODE ISPITIVANJA OČVRSLOG BETONA.....	32
4.1.	Nerazorne metode ispitivanja očvrslog betona .....	32
4.1.1.	Ispitivanje dinamičkog modula elastičnosti metodom rezonantne frekvencije	32
4.2.	Razorne metode ispitivanja očvrslog betona .....	33
4.2.1.	Ispitivanje tlačne čvrstoć betona na hidrauličkoj preši .....	34
4.2.2.	Ispitivanje statičkog modula elastičnosti na hidrauličkoj preši .....	34
5.	MODUL ELASTIČNOSTI BETONA .....	36

5.1.	Dinamički modul elastičnosti .....	36
5.2.	Statički modul elastičnosti .....	40
6.	LABORATORIJSKA ISPITIVANJA .....	42
6.1.	Projektni sastav betona .....	43
6.1.1.	Beton armiran čeličnim i sintetičkim vlaknima .....	44
6.1.2.	Porobeton – Ytong blok .....	45
6.2.	Priprema uzoraka za ispitivanje .....	45
6.3.	Ispitivanje dinamičkog modula elastičnosti metodom rezonantne frekvencije 47	
6.4.	Vodoupojnost (kapilarno upijanje vode) .....	54
6.5.	Ispitivanje tlačne čvrstoće.....	59
6.6.	Ispitivanje statičkog modula elastičnosti .....	66
6.7.	Rezultati svih ispitivanja.....	75
	.....	75
7.	ZAKLJUČAK.....	77
8.	LITERATURA .....	78

## POPIS SLIKA:

Slika 1: Volumni omjeri osnovnih sastojaka u očvrslom betonu [1].....	12
Slika 2: Betonska brana Itaipu u Brazilu [3] .....	13
Slika 3: Vrste agregata [1] .....	14
Slika 4: Klinker i cement, a) portlandcementni klinker, b) portlandski cement [1]15	
Slika 5: Dodaci betonu, a) mineralni dodaci; b) kemijski dodaci [1].....	17
Slika 6: Beton od jednozrnatog agregata [17] .....	21
Slika 7: Zidanje pregradnog zida Ytong blokovima [8] .....	23
Slika 8: Proces proizvodnje porobetona: 1-sirovine, 2-kvarcni pijesak, 3-vapno, 4- voda, 5-cement, 6-aluminijski prah, 7-dodavanje aluminijskog praha u smjesu, 8-mješanje sirovina, 9-izlijevanje smjese u kalupe, 10-formiranje zračnih mjehurića, 11-otvaranje kalupa, 12-rezanje,13-neobrađeni blokovi, 14-autoklav, 15-obrađeni blokovi, 16-pakiranje i dostava [23] .....	24
Slika 9: Mikrostruktura porobetona.....	25
Slika 10: Uobičajena svojstva vlakana i matrice [1] .....	26
Slika 11: Primjena mikroarmiranog betona [1] .....	27
Slika 12: Čelična vlakna za armiranje betona [18].....	28
Slika 13: Polipropilenska vlakna [19].....	28
Slika 14: Makrosintetička vlakna [20].....	29
Slika 15: Mikrostruktura MAB.....	31
Slika 16: Prikaz uzorka sa uređajem za stvaranje i detektiranje vibracija [1] .....	33
Slika 17: Frekvencijska krivulja [1] .....	33
Slika 18: Radni dijagram cemenetnih uzoraka opterećen na pritisak: a) beton manje čvrstoće, b) beton velike čvrstoće [16].....	40
Slika 19: Uzorak opterećen na pritisak [16] .....	41
Slika 20: Uzorci betona (1-7 uzorci porobetona, 9-12 uzorci betona armiranog vlaknima).....	43

Slika 21: Betonski blok – porobeton .....	45
Slika 22: Podaci na sušioniku .....	46
Slika 23: Uzorci u sušioniku.....	46
Slika 24: Postavljeni navoji na prizmatične uzorke (priprema za ispitivanje dinamičkog modula elastičnosti).....	47
Slika 25: Pozicije udara i akcelerometra za pobuđivanje transversalne frekvencije [15] .....	47
Slika 26: Pozicije udara i akcelerometra za pobuđivanje longitudinalne frekvencije [15] .....	48
Slika 27: Uređaj za mjerenje rezonantne frekvencije i uzorak postavljen na spužvastu podlogu .....	49
Slika 28: Ulazni podaci na uređaju .....	49
Slika 29: Spektar frekvencija na uređaju sa obilježenom najvećom frekvencijom	50
Slika 30: Vaganje suhih uzoraka .....	55
Slika 31: Priprema za određivanje kapilarnog upijanja vode .....	55
Slika 32: Uronjeni uzorci.....	56
Slika 33: Uzorci porobetona sa iscrtanim pukotinama dobivenim sušenjem na prevelikoj temperaturi.....	61
Slika 34: Uzorak postavljen na prešu za ispitivanje .....	61
Slika 35: Označene pukotine nakon ispitivanja tlačne čvrstoće betona .....	65
Slika 36: LVDT uređaji (linear variable differential transformer) .....	66
Slika 37: Dijagram opterećenja za modul elastičnosti (MAB).....	67
Slika 38: Postavljanje uzorka MAB u uređaj za ispitivanje statičkog modula elastičnosti .....	69
Slika 39: Postavljanje uzorka porobetona na uređaj za ispitivanje statičkog modula elastičnosti .....	72

## POPIS TABLICA:

Tablica 1: Prihvatljive razine nečistoća u vodi za izradu betona [1].....	16
Tablica 2: Proporcije materijala u betonskim mješavinama različite čvrstoće [2]....	19
Tablica 3: Podjela laganih betona prema namjeni [1] .....	20
Tablica 4: Svojstva porobetona [23].....	25
Tablica 5: Približni rasponi rezonantnih frekvencija za betonske prizmatične i cilindrične uzorke [14].....	39
Tablica 6: Uzorci, dimenzije, vrste betona, provedena ispitivanja.....	42
Tablica 7: ukupne količine sastojaka za izradu uzoraka od mikroarmiranog betona za 1m <sup>3</sup> [21].....	44
Tablica 8: Dimenzije i masa uzoraka.....	48
Tablica 9: Rezultati ispitivanja – <i>transverzalne</i> vibracije. Dobivena rezonantna frekvencija pojedinog uzorka i dinamički modul elastičnosti.....	51
Tablica 10: Rezultati ispitivanja - <i>longitudinalne</i> vibracije. Dobivena rezonantna frekvencija pojedinog uzorka i dinamički modul elastičnosti.....	51
Tablica 11: Ulazni podaci za izračun dinamičkog modula elastičnosti ( <i>transverzalna i longitudinalna frekvencija</i> ) .....	52
Tablica 12: Usporedba proračunatog i na uređaju dobivenog dinamičkog modula elastičnosti .....	52
Tablica 13: Mase suhih uzoraka, te uzoraka uronjenih u vodu (nakon 15, 30, 45, 60, 120 min i 24 h) .....	57
Tablica 14: Dobivene vrijednosti vodoupojnosti za porobeton i MAB.....	58
Tablica 15: Dimenzije i mase uzoraka.....	60
Tablica 16: Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće porobetona i MAB .....	63
Tablica 17: Mase uzoraka i nanešena opterećenja.....	68
Tablica 18: Rezultati ispitivanja modula elastičnosti za MAB.....	71
Tablica 19: Rezultati ispitivanja modula elastičnosti za porobeton .....	74
Tablica 20: Usporedba modula elastičnosti prema empirijskim izrazima.....	74

## POPIS GRAFOVA:

Graf 1: Dinamički modul elastičnosti dobiven pobuđivanjem <i>transverzalne frekvencije</i> .....	54
Graf 2: Dinamički modul elastičnosti dobiven pobuđivanjem <i>longitudinalne frekvencije</i> .....	54
Graf 3: Prikaz vodoupojnosti u vremenu za uzorke porobetona i MAB .....	59
Graf 4: Opterećenje u vremenu – porobeton .....	62
Graf 5: Opterećenje u vremenu – MAB .....	63
Graf 6: Usporedba srednje tlačne čvrstoće betona na uzorcima porobetona i MAB .....	64
Graf 7: Prikaz odnosa gustoće i tlačne čvrstoće na uzorcima porobetona i MAB ..	65
Graf 8: Opterećenje u vremenu - MAB .....	69
Graf 9: Naprezanje- deformacija - uzorak 9 – MAB .....	70
Graf 10: Opterećenje - deformacija - uzorak 10 – MAB.....	70
Graf 11: Opterećenje - deformacija - uzorak 11 – MAB .....	71
Graf 12: Opterećenje u vremenu - porobeton .....	72
Graf 13: Opterećenje - deformacija - uzorak 6 – porobeton.....	73
Graf 14: Opterećenje - deformacija - uzorak 7 – porobeton.....	73
Graf 15: Opterećenje - deformacija - uzorak 8 – porobeton.....	74
Graf 16: Dijagram dobivenih rezultata .....	75

## 1. UVOD

Beton je najrasprostranjeniji materijal na svijetu. Njegova široka primjena dovela je do razvoja velikog broja različitih vrsta betona. U ovom radu opisane su dvije vrste betona posebnih namjena, porobetona, koji pripada skupini lakih betona, te beton armiran čeličnim i sintetičkim vlaknima.

Suvremeno graditeljstvo, zbog prebrzog rasta, i malih resursa, teži za materijalima koji su laki za olikovanje, uz visoku kvalitetu i dostupnost tržištu. U Hrvatskoj i u svijetu, kada spominjemo porobeton, ističemo marku Ytong, kao najpoznatiju vrstu toga betona. Pred proizvođače su postavljeni visoki zahtjevi, dobra fizikalna svojstva, velika nosivost, ali i prihvatljiva ekološka svojstva. Navedeni zahtjevi glavna su motivacija za usporedbu svojstava porobetona sa betonom armiranim čeličnim i sintetičkim vlaknima.

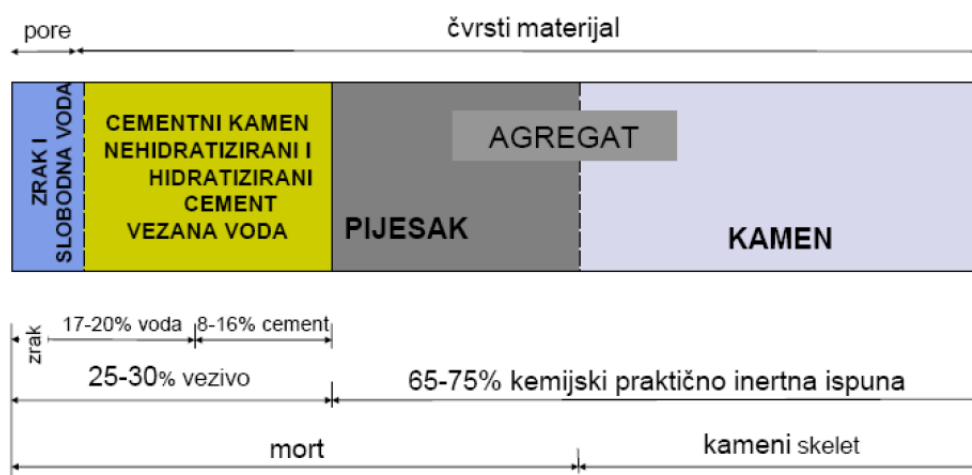
U nastavku su opisane promatrane vrste betona, njihove prednosti i nedostaci, postupak proizvodnje te primjena. Također, opisane su i metode koje su se koristile prilikom ispitivanja njihovih svojstava.

Eksperimentalni dio rada prikazuje uzorke, uređaje i proveden način ispitivanja, te u konačnici usporedbu dobivenih rezultata.



## 2. OPĆENITO O BETONU

Beton je heterogeni, kompozitni građevinski materijal dobiven miješanjem agregata (najčešće šljunka i pijeska), cementa i vode. Svježi beton sadrži 2-5% zraka, 8-16% cementa, 40-45% šljunka, 25-30% pijeska i 17-20% vode (Slika 1.).



Slika 1: Volumni omjeri osnovnih sastojaka u očvrslulom betonu [1]

Beton je široko rasprostranjen i jedan od najčešće korištenih građevinskih materijala. Bez obzira što nema jačinu i čvrstoću kao čelik, najčešće se upotrebljava iz ova tri razloga:

1. Beton ima izvrsnu otpornost na vodu – za razliku od drva i čelika, beton ima sposobnost da izdrži djelovanje vode bez ozbiljnih posljedica što ga čini idealnim materijalom za izvedbu građevinskih konstrukcija za skladištenje i transportiranje vode. Upotreba običnog betona za brane, oblaganje kanala i kolnika uobičajena je pojava gotovo svugdje u svijetu (Slika 2.).
2. Strukturni betonski elementi mogu se oblikovati u različite veličine i oblike, čiji je glavni razlog plastična konzistencija svježe ugrađenog betona.
3. Beton je najjeftiniji i najdostupniji građevinski materijal – komponente za izradu betona (agregat, voda i cement) su relativno jeftine i obično dostupne u svim dijelovima svijeta.



Slika 2: Betonska brana Itaipu u Brazilu [3]

Beton kao konstruktivni materijal koristi se iz mnogobrojnih razloga, nije ga potrebno površinski obrađivati, a njegova se snaga s vremenom povećava. Samim time betonske konstrukcije zahtjevaju puno manje održavanja obzirom na druge materijale. Također, beton je otporan na vatru što je možda jedan od najvažnijih aspekata sigurnosti [2].

Beton uz svoje prednosti sadrži i veliki broj mana, usprkos kojima je i dalje jedan od najraširenije korištenih materijala. Znatna vlastita težina, velika provodljivost topline i zvuka, niska vlačna čvrstoća, otežani radovi kod niskih i visokih temperatura (ispod  $+5^{\circ}\text{C}$  i iznad  $+30^{\circ}\text{C}$ ), poroznost, osjetljivost na mraz, deformacije izazvane skupljanjem i puzanjem betona, neke su od mana betona [4].

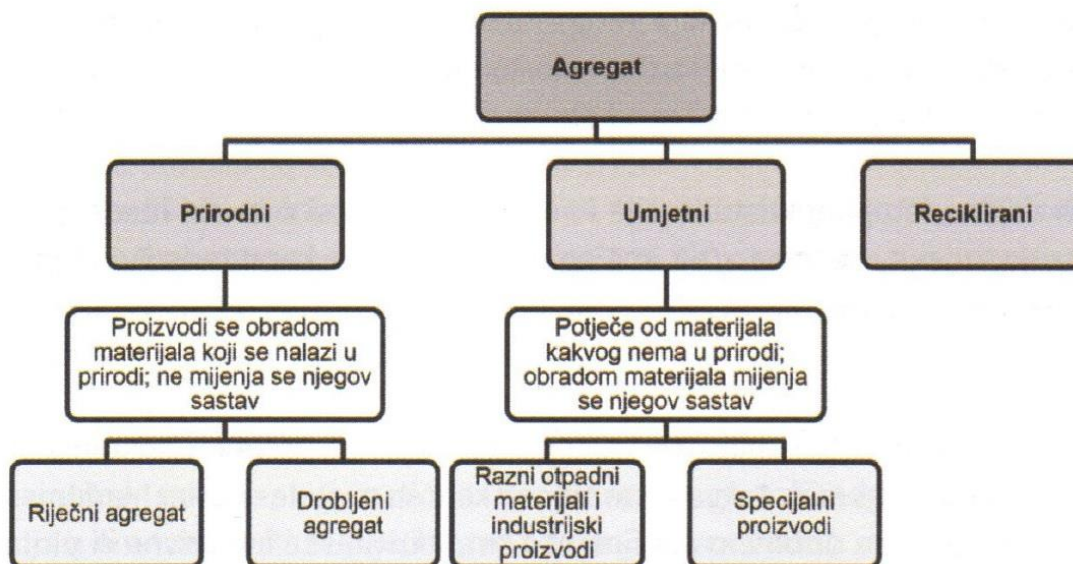
## **2.1. Komponente modernog betona**

Kako je već spomenuto u prethodnom poglavlju, beton je kompozitni materijal koji se u osnovi izrađuje miješanjem veziva (cement), vode i agregata (pijesak, šljunak, drobljenac i sl.). Osim navedenih komponenti, u njegov sastav mogu se dodati i određene tvari (mineralni ili kemijski dodaci) radi poboljšanja ili promjene svojstava betona.

### **2.1.1. Agregat**

Agregat je granulirani materijal, koji može biti prirodni, umjetni ili reciklirani, a čija je osnovna zadaća osigurati betonu krutost, dimenzionalnu stabilnost, te ekonomičnost (relativno je jeftin) [1]. On čini 65-75% volumena betona. Kako bi se koristio za spravljanje

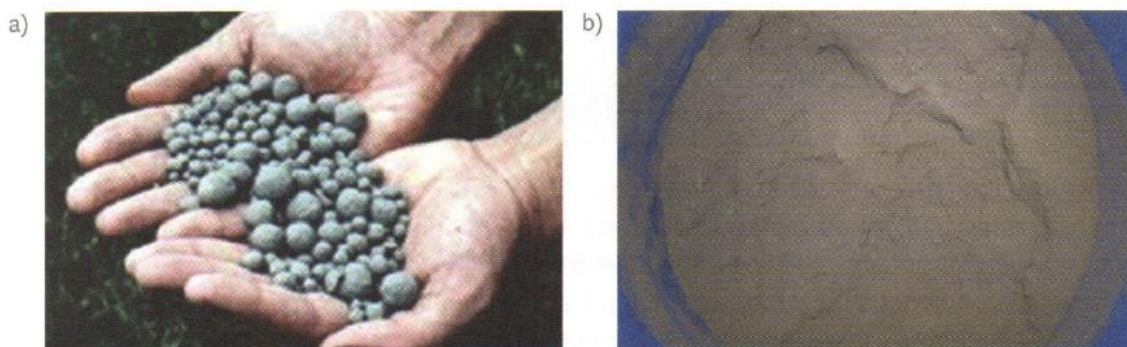
betona, agregat mora zadovoljavati određena svojstva kao što su granulometrijski sastav, oblik i tekstura zrna, gustoća, poroznost, apsorpcija i vlažnost. Navedena svojstva bitna su za projektiranje sastava betona i svojstva betona u svježem i očvrslom stanju. Sve to u konačnici može znatno utjecati na mehanička i trajnosna svojstva betona [1].



Slika 3: Vrste agregata [1]

### 2.1.2. Cement

Cement (zidarski kamen) je hidraulično građevno vezivo koje samostalno očvrstne na zraku i pod vodom. To je fino mljeven anorganski materijal koji u kontaktu s vodom prelazi u očvrslu cementnu pastu ili cementni kamen. Cement usklađen s normom HRN EN 197-2 i BAS EN 197-1, označen kao CEM cement, ako je pravilno pomiješan s odgovarajućim udjelima agregata i vode, ima sposobnost stvaranja betona ili morta. Portland cement, jedan od najčešće korištenih u građevinarstvu, je hidraulični cement proizveden mljevenjem klinkera koji se sastoji od kristalastih kalcijevih silikata i male količine jednog ili više oblika kalcijeva sulfata i do 5% vapnenca. (Slika 4.)



Slika 4: Klinker i cement, a) portlandcementni klinker, b) portlandski cement [1]

Osnovni sastojci portlandskog cementa su kalcijev oksid ( $\text{CaO}$ ) i silicijev oksid ( $\text{SiO}_2$ ). U prirodi se nalaze u velikim količinama i u raznim oblicima. Izvor kalcija je kalcijev karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ), kreda, vapnenac i lapor, dok se silicij dobiva iz gline ili škriljca. [5] Ako se u sastavu sirovinske smjese za proizvodnju cementnog klinkera ne nalazi neki sastojak u dovoljnoj količini, potrebno je dodati korekcijski sastojak. Kod nedostatka željeznog oksida dodaje se boksit, željezna ruda ili zgura, dok se kod nedostatka silicijeva dioksida dodaje kvarcni pijesak ili glina bogata sa  $\text{SiO}_2$ .

Glavna zadaća cementnog kamena je povezati zrna agregata, dati betonu odgovarajuću čvrstoću i ispuniti prostor među česticama agregata, kako bi zajedno s agregatom tvorio nepropusnu masu [1].

### 2.1.3. Voda

Voda je ključni sastojak u proizvodnji betona. Količina i kvaliteta vode znatno utječu na svojstva betona u svježem i očvrslom stanju kao što su obradljivost, vrijeme vezanja, čvrstoća, trajnost i udio pora. U sastavu betona mora biti dovoljna količina vode koja će se adsorbirati na površinu čvrstih čestica, te ispuniti prostor između njih. Prevelika količina vode utjecat će na pojavu segregacije i izdvajanje vode, te samim time i na smanjenje čvrstoće betona.

Za proizvodnju betona najčešće se koristi pitka voda. Druge vrste koje se mogu upotrebljavati su povratne vode iz procesa industrije betona (vode od pranja miksera i ostale opreme), voda iz podzemnih izvora, prirodna površinska voda i industrijska otpadna voda. Morska i bočata voda neprikladne su za spravljanje betona kod armiranih i prednapetih betonskih konstrukcija, te nearmiranih betonskih konstrukcija s ugrađenim metalnim dijelovima zbog opasnosti od pojave korozije.

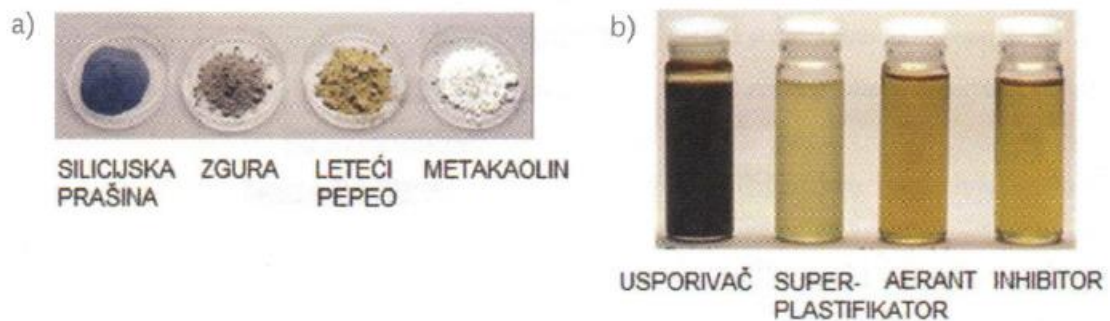
U vodi se mogu nalaziti nečistoće koje nepovoljno utječu na kvalitetu betona, kao što je vrijeme vezanja, skupljanje, trajnost ili promijena boje [1]. U tablici 1. su prikazane prihvatljive razine nečistoća u vodi za izradu betona.

<i>Nečistoća</i>	<i>Najveća koncentracija (‰)</i>	<i>Napomena</i>
Suspendirana tvar (zamućenost)	2.0	Mulj, glina, organska tvar
Alge	0.5 – 1.0	Uvlače zrak
Karbonati	1.0	Smanjuju vrijeme vezivanja
Bikarbonati	0.4 – 1.0	400 mg/l za bikarbonate Ca, Mg
Natrijev sulfat	10.0	Može povećati ranu čvrstoću, ali smanjiti kasniju čvrstoću
Magnezijev sulfat		
Natrijev klorid	20.0	Smanjuje vrijeme vezivanja, povećava ranu čvrstoću, smanjuje krajnju čvrstoću
Kalcijev klorid	-50.0	
Magnezijev klorid	40.0	
Soli željeza	40.0	
Fosfati, arsenati, borati	0.5	Usporava vezivanje
Soli cinka, bakra, olova, mangana, kositra	0.5	
Anorganske soli	10.0	pH ne manji od 3.0
Natrijev hidroksid	0.5	
Natrijev sulfid	0.1	Treba ispitati beton
Šećer	0.5	Produljuje vrijeme vezivanja
Ulja, masnoće, deterdženti	< 50 mg/l	Moguće uvlačenje zraka

Tablica 1: Prihvatljive razine nečistoća u vodi za izradu betona [1]

#### 2.1.4. Dodaci betonu

Dodaci betonu su tvari koje se dodaju u svrhu poboljšanja svojstava svježeg i/ili očvrsnulog betona. Dodaju se prije ili za vrijeme miješanja betonske miješavine. Razlikuju se mineralni dodaci (silicijska prašina, zgura, leteći pepeo i metakaolin) i kemijski dodaci (usporivači, superplastikatori, aeranti i inhibitori). Mineralni dodaci obično se nalaze u praškastom obliku (Slika 5a) i doziraju se u većim količinama dok se kemijski dodaci nalaze u tekućem stanju (Slika 5b) i doziraju u manjim količinama. Ovisno o njihovoj vrsti moguće je poboljšati obradljivost, smanjiti segregaciju, usporiti ili ubrzati vezanje, poboljšati otpornost na zamrzavanje i odmarzavanje i sl [1].



Slika 5: Dodaci betonu, a) mineralni dodaci; b) kemijski dodaci [1]

### 3. VRSTE BETONA

Do danas razvijen je veliki broj različitih vrsta betona te shodno tome postoji i veliki broj različitih podjela betona. S obzirom na namjenu betoni se mogu podjeliti na: samozbijajući beton, teški beton, lagani beton, mikroarmirani beton, beton visokih uporabnih svojstava, prskani beton itd. Na temelju mase/gustoće, beton je moguće klasificirati u tri široke kategorije, lagani, normalni i teški beton. Izborom određene vrste granulata i njihove količine, određivanjem mase cementa i vode, te dodavanjem dodatnih sredstava može se proizvesti beton za svaku namjenu [2]. (Slika 6.)

Izraz lagani beton koristi se za betone čija gustoća materijala iznosi približno  $1800 \text{ kg/m}^3$  (tlačna čvrstoća  $< 20 \text{ MPa}$ ), a koristi se kada je poželjan veći omjer čvrstoće i težine. Specifičnu težinu betona moguće je smanjiti korištenjem agregata niže nasipne čvrstoće. U sastavu ovih betona uglavnom se nalaze lagani dodaci kao što su ekspandirana glina, lapor, iverica i sl. Koristi se uglavnom u izgranji stambenih prostora [2].

Normalni beton, ili beton normalne težine naziv je za betone koji sadrže prirodni pijesak, šljunak ili agregate dobivene drobljenjem stijene. Gustoća takvog betona je približno  $2400 \text{ kg/m}^3$  (tlačna čvrstoća  $20\text{-}40 \text{ MPa}$ ). Ovo je najčešće korištena vrsta betona za strukturalne svrhe [2].

Teški beton, koristi se za posebne namjene kao na primjer za gradnju zaštite od zračenja, a sastoji se od agregata visoke gustoće kao što su bazalt ili čelična vlakna. Ova vrsta betona teži više od  $2600 \text{ kg/m}^3$  ( $> 40 \text{ MPa}$ ) [2].

Ovu vrstu betona karakterizira velika volumenska masa, veća od  $2600 \text{ kg/m}^3$  ( $3000\text{-}5000 \text{ kg/m}^3$ ) što se postiže upotrebom agregata veće gustoće. Kod izrade teških betona upotrebljavaju se rudače i minerali koji sadrže teške agregate (npr. barit, magnetit, željezni oksid, čelični otpatci...), te olovne kuglice.

Teški beton primjenjuje se kad je potrebna velika volumna masa betona, npr. kod protuutega na mostovima, kod blokova za gradnju lukobrana, kod radioaktivnog zračenja u nuklearnim elektranama, medicinskim instalacijama i sl.

Kako je tema ovog diplomskog rada porobeton i beton armiran vlaknima u nastavku će se dati detaljniji pregled tih vrsta betona.

	<i>Niska čvrstoća (kg/m<sup>3</sup>)</i>	<i>Umjerena čvrstoća (kg/m<sup>3</sup>)</i>	<i>Visoka čvrstoća (kg/m<sup>3</sup>)</i>
<i>Cement</i>	255	356	510
<i>Voda</i>	178	178	178
<i>Sitni agregat</i>	801	848	890
<i>Krupni agregat</i>	1169	1032	872
<i>Omjer cementne paste</i>			
<i>Postotak mase</i>	18	22.1	28.1
<i>Postotak volumena</i>	26	29.3	34.3
<i>Voda/cement - masa</i>	0.70	0.50	0.35
<i>čvrstoća</i>	18	30	60

Tablica 2: Proporcije materijala u betonskim mješavinama različite čvrstoće [2]

### 3.1. Lagani beton

Ovu vrstu betona karakterizira mala gustoća, prema HRN EN 206 od 800 kg/m<sup>3</sup> do najviše 2000 kg/m<sup>3</sup>. Kako bi se to postiglo potrebno je koristiti agregate s velikim sadržajem pora, stvoriti međuprostor među krupnim zrnima agregata, te stvoriti pore u mortu.

U odnosu na normalan beton, lagani betoni imaju manju čvrstoću i otpornost na habanje zbog povećanog sadržaja pora. Ovi betoni znatno su skuplji, a kako bi se postigla zahtjevana čvrstoća, proizvodnja, transport i sama ugradnja zahtijevaju više pažnje. Prednosti laganih betona ipak nadmašuju nedostatke, a neke od njih su manja volumna masa i bolja izolacijska svojstva.

Lagani betoni su krtiji, ponašanje im je skoro linearno elastično, sve do sloma. Količine cementa za 1 m<sup>3</sup> laganog betona su do 70% veće od onih za 1 m<sup>3</sup> običnog betona.



Ako je dovoljno suh, ovaj beton je dobar toplinski izolator. Kako se povećava vlažnost, povećava se i njegova vodljivost.

Kod laganih betona javlja se povećano skupljanje i bubrenje što dovodi do stvaranja mrežastih pukotina. Na skupljanje znatno utječe voda, cement i dodaci, te vrsta i kvaliteta agregata. Puzanje laganih betona znatno je veće nego kod običnih betona [5].

*Prednosti lakih betona:*

- dobra toplinsko izolacijska svojstva
- otpornost na djelovanje mraza
- kemijski su inertni
- dobra podloga za žbukanje
- trajnost kao kod običnih betona

*Nedostatci lakih betona:*

- skupoća
- spravljanje, transport i ugradnja zahtjevaju povećanu pažnju
- nisu otporni na habanje
- manji modul elastičnosti, krčkiji su od običnih betona, povećano puzanje
- povećano bubrenje i skupljanje

Lake betone prema namjeni i svojstvima možemo podijeliti na konstrukcijske, konstrukcijsko-izolacijske i izolacijske (Tablica 3.).

<i>Svojstvo</i>	<i>Konstrukcijski</i>	<i>Konstrukcijsko - izolacijski</i>	<i>Izolacijski</i>
<i>Gustoća (kg/m<sup>3</sup>)</i>	< 2000	-	-
<i>Tlačna čvrstoća (MPa)</i>	> 15.0	> 3.5	> 0.5
<i>Toplinska provodljivost (W/mK)</i>	-	< 0.75	> 0.30

Tablica 3: Podjela laganih betona prema namjeni [1]

*Ovisno o načinu postizanja volumne mase, lagani betoni se dijele na:*

- lagani betoni od jednozrnatog agregata
- lakoagregatni betoni
- ćelijasti betoni

### **3.1.1. Lagani betoni od jednozrnatog agregata**

Karakterističnost ovih betona je izostavljanje sitne frakcije agregata i korištenje jedne frakcije jednake veličine zrna. Kod pripreme betona može se upotrijebiti i više od jedne frakcije, ali to dovodi do manjeg sadržaja pora i veće volumne mase. Zrna agregata nebi trebala biti veća od 25 – 30 mm, ili da je najsitnije zrno dvaput manje od najkrupnijeg zrna. U ovom betonu prisutno je mnogo šupljina zbog male volumne koncentracije agregata. Zrna u betonu obavijena su cementnom pastom približne debljine 1.3 mm, što dovodi do velikih šupljina među zrnima (Slika 6). Gustoća ovisi ponajviše o granulometrijskom sastavu. Obzirom da gotovo nema kapilarnih pora ( $v/c$  je od 0.35 do 0.45), lagani jednozrnati beton otporan je na cikluse zamrzavanja i odmrzavanja. Koristi se kod konstrukcija gdje je uvjet zvučne izolacije presudan zbog svoje dobre apsorpcije zvuka (ukoliko se površina ne zagladi).



Slika 6: Beton od jednozrnatog agregata [17]

### **3.1.2. Lakoagregatni betoni**

Za izradu lakoagregatnih betona, moguće je upotrijebiti agregate prirodnog i umjetnog porijekla. Agregati koji se upotrebljavaju za ove betone imaju veliku mogućnost upijanja vode. Prilikom miješanja, agregat upija ili otpušta vodu, ovisno o vlažnosti. Iz tog razloga nije moguće predvidjeti potrebnu količinu vode za pripremu betona, već se ona dodaje prilikom miješanja, do propisane konzistencije betona.

Prilikom miješanja dolazi do segregacije, jer dio zrna ima manju volumnu masu od paste. Takva zrna isplivaju na površinu betona. Ova pojava je tipična za beton koji ima preveliko izlučivanje vode. Segregaciju je moguće minimalizirati ako se količina vode za pripremu ograniči, te se time dobiva stabilan beton.

*Podjela lakoagregatnih betona ovisno o vrsti agregata:*

- prirodni laki agregati (plovućac, pucolani)
- ekspanzirani i umjetni laki agregati (perlit, vermikulit, ekspanzirani polimerni materijal, liapor, ekspanzirana glina)
- sekundarne sirovine (ložišna zgura, kristalna zgura, granulirana zgura, leteći pepeo iz termoelektrana)

### **3.1.3. Čelijasti betoni**

Vrlo lagani betoni u čiji je sastav prije stvrdnjavanja utisnut zrak, ili je kemijski proizveden plin čiji se mjehurići šire u betonu. Ako se čistoj cementnoj pasti dodaju aktivni ili inertni fini agregati (pijesak, pucolan, kvarc, leteći pepeo, pečena glina, itd.), može se dobiti beton porozne strukture na bazi metalurškog i portland cementa.

Volumna masa čelijastih betona kreće se od 600 do 1200 kg/m<sup>3</sup>, a čvrstoća na pritisak najčešće od 3.5 do 10 MPa. Upotrebljavaju se za izradu prefabriciranih elemenata, panela za pregradne zidove, blokova za zidanje, i slično.

*Podjela čelijastih betona:*

- porobetoni (plinobeton)
- pjenobetoni
- ekspanzirane grane polimera

### 3.1.3.1. Porobeton

Porobeton (ili plinobeton) spada u skupinu ćelijastih betona. Osnovne sirovine za proizvodnju ove vrste betona su portland cement, leteći pepeo, vapno, sitno samljeveni kvarcni pijesak i voda.

Porobetoni imaju široku primjenu u građevinarstvu, kod izvedbe vertikalnih i horizontalnih zidnih ploča, stropnih i krovnih ploča, kod izvedbe pregradnih zidova i toplinske izolacije i sl (Slika 8).

Najpoznatiji primjer porobetona je Ytong (korišten u ispitivanjima za potrebe ovog diplomskog rada). Za izradu Ytong blokova upotrebljava se portland cement kao vezivno sredstvo i kvarcni pijesak kao agregat. Za dobivanje ćelijaste strukture, odnosno, za stvaranje mjehurića u strukturi, koristi se aluminijski prah koji se nalazi u obliku fine koloidne prašine.

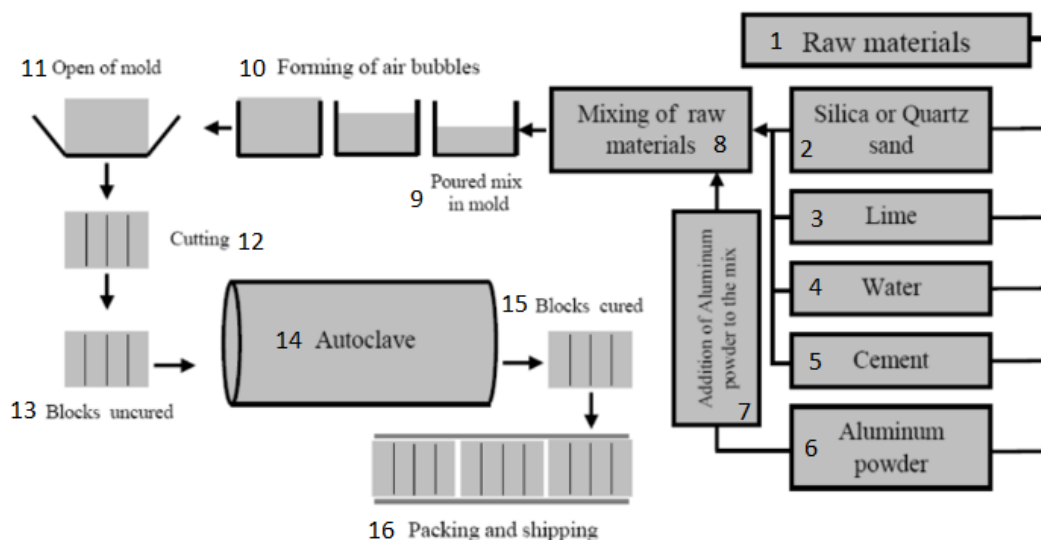
U tablici 3. dan je pregled nekih osnovnih svojstava porobetona. Nadalje, upijanje vode i vlage je znatno smanjeno, jer Ytong ima poroznu strukturu sa zatvorenim porama. Kao materijal, porobeton je otporan na mraz i jako dobar izolator. Njegova dobra otpornost na mraz pokazala se i na nizu konstrukcija čija se otpornost nije promijenila ni nakon 20 godina postojanja. Kao termoizolacijski materijal, porobeton se pokazao vrlo dobar, čak 6 do 8 puta bolji od običnog nearmiranog betona, što se ne može reći i za njegove karakteristike zvučne izolacije. Velika prednost ovog materijala je nezapaljivost te jednostavno obrađivanje raznim alatima. Njegova primjena danas ja vrlo široka zbog njegovih pozitivnih svojstava i jednostavnog rukovanja [5].



Slika 7: Zidanje pregradnog zida Ytong blokovima [8]

### 3.1.4. *Proizvodnja porobetona*

Sirovine pogodne za izradu porobetona su fini materijali, kao kvarcni pijesak, vapno, cement i aluminijski prah. U izradi porobetona, kvarcni pijesak ima najveću zastupljenost. Svi fini agregati pomiješaju se sa vapnom, cementom i vodom. Voda dodana ovoj smjesi formira vezu između agregata i cementne paste. Nakon postupka miješanja, dodaje se ekspanzivno sredstvo za povećanje volumena, koje može biti 2 do 5 puta veće od prvobitnog stanja. Ekspanzivno sredstvo koje se koristi za izradu porobetona je aluminijski prah, koji u kontaktu s kalcijevim hidroksidom povećava volumen. Reakcija između aluminijskog praha i kalcijeva hidroksida uzrokuje stvaranje mjehurića koji rezultiraju povećanjem volumena. Vodik koji nastaje u tom postupku izlučuje mjehuriće i zamjenjuje se zrakom. Povećanje volumena ovisi o količini aluminijskog praha. Pomoću velike posude pod tlakom (autoklav), zagrijane na pari, stvara se veliki pritisak pomoću kojeg se stvrdnjava dobivena smjesa. Dakle, autoklaviranje je proces u kojem se beton izlaže visokoj temperaturi pod visokim pritiskom (4-16 MPa) za određeno vrijeme trajanja (8-16 h). Autoklaviranje smanjuje skupljanje prilikom sušenja na zraku što je vrlo bitno. Nakon završetka autoklaviranja, gotovi uzorci se pakiraju [23]. Na slici 8. prikazan je proces proizvodnje porobetona.



Slika 8: Proces proizvodnje porobetona: 1-sirovine, 2-kvarcni pijesak, 3-vapno, 4-voda, 5-cement, 6-aluminijski prah, 7-dodavanje aluminijskog praha u smjesu, 8-mješanje sirovina, 9-izlijevanje smjese u kalupe, 10-formiranje zračnih mjehurića, 11-otvaranje kalupa, 12-rezanje, 13-neobrađeni blokovi, 14-autoklav, 15-obrađeni blokovi, 16-pakiranje i dostava [23]

<i>Gustoća u suhom stanju (kg/m<sup>3</sup>)</i>	<i>Tlačna čvrstoća (MPa)</i>	<i>Čvrstoća na savijanje (MPa)</i>	<i>Modul elastičnosti (Gpa)</i>	<i>Toplinska vodljivost (W/mK)</i>
450	3.2	0.65	1.6	0.12
525	4.0	0.75	2.0	0.14
600	4.5	0.85	2.4	0.16
675	6.3	1.00	2.5	0.18
750	7.5	1.25	2.7	0.20

Tablica 4: Svojstva porobetona [23]

### 3.1.5. Mikrostruktura porobetona

Poroznost u cementnom materijalu bazirana je na kapilarnim porama, makro porama zbog namjerno utisnutog zraka i neadekvatnog zbijanja. Pore u gelu ne utječu na snagu betona kroz njegovu poroznost iako su one izravno povezane s puzanjem i skupljanjem. Kapilarne pore i druge velike pore odgovorne su za smanjenje elastičnosti i čvrstoće. Porobeton bi imao veću snagu kada bi mu zračni udio bio manji. To se može postići korištenjem letećeg pepela kako bi se ravnomjernije raspodjelile zračne šupljine. Pri većem volumenu smjese, stapanje mjehurića rezultira širokom raspodjelom praznina koje dovode do manje čvrstoće betona. Uzorci promatrani od strane Nambiara i Ramamurthya [literatur] pokazali su da mješavine s manjom količinom zraka pokazala veću snagu. Na propusnost porobetona znatno utječe veličina i raspored pora. Pore su podijeljene u dvije vrste, one koje se spajaju s vanjskom granicom materijala, tzv. otvorene pore i zatvorene pore. Propusnosti doprinose otvorene pore, dok se materijali zatvorenih pora uglavnom koriste kao zvučni i toplinski izolatori.



Slika 9: Mikrostruktura porobetona

### 3.2. Beton armiran vlaknima (MAB)

Beton armiran vlaknima (mikroarmirani beton, MAB) obzirom na svoju volumensku masu, obično spada pod kategoriju *teški betoni*, međutim, mikroarmirani betoni imaju posebne zahtjeve i svojstva, pa se zbog toga nazivaju i posebnim betonima.

Kod izrade mikroarmiranih betona, u procesu miješanja, uz uobičajene sastojke dodaju se i diskontinuirana vlakna velike vlačne čvrstoće. (Slika 10.)

Vrsta vlakna	Relativna gustoća	Presjek ili debljina ( $\mu\text{m}$ )	Duljina (mm)	Modul elastičnosti (GPa)	Vlačna čvrstoća (MPa)	Deformacija pri slomu (%)	Doziranje (%)
Čelik	7,8	40 – 600	10 – 60	150 – 200	350 – 2000	3 – 5	0,3 – 2,0
Staklo	2,5 – 2,7	12,5	10 – 50	70	600 – 2500	3 – 4	3 – 7
Polimerna: -polipropilen -polietilen -poliester -aramid	0,91 0,96 1,4 1,45	20 – 100 25 – 10000 10 – 10000 10 – 15	5 – 20	4,0 5 – 170 10 – 20 60 – 120	300 – 500 200 – 3000 550 – 1200 3600	8 3 – 80 10 – 50 2,5 – 3,5	0,1 – 3,0
Ugljična	1,2 – 2,0	7 – 18	$\geq 3$	30-390	600-2700	0,5 – 2,5	0,5 – 1,5
Prirodna (drvo – juta)	1,5	20 – 120	0,5 – 5,0	10 – 50	300 – 1000	1,5 – 25	5 – 15
Matrica morta	1,8 – 2,0	300 – 5000	-	10 – 30	1 – 10	0,01 – 0,05	85 – 97
Matrica betona	1,8 – 2,4	10000 – 20000	-	20 – 40	1 – 4	0,01 – 0,02	97 – 99,9

Slika 10: Uobičajena svojstva vlakana i matrice [1]

Najčešće korištena vlakna za spravljanje ove vrste betona su čelična, polimerna, staklena i prirodna vlakna (drvo, kokosov orah, bambus, juta, agava). Kod izrade mikroarmiranog betona najveća poteškoća je postići jednoličnu smjesu i jednolični raspored vlakana.

Prilikom izrade mikroarmiranog betona moguće je koristiti i kombinaciju dviju ili više vrsta vlakana, različitih oblika i veličina. Takav beton nazivamo hibridni mikroarmirani beton. Odabir vlakana za izradu hibridnog mikroarmiranog betona ovisi o svojstvima betona koje želimo dobiti. Kombinacijom više različitih vrsta čeličnih vlakana dobivaju se bolja mehanička svojstva (uz manju količinu vlakana) nego kod upotrebe samo jedne vrste čeličnih vlakana.

Obzirom na obični beton, mikroarmirani beton posjeduje veću vlačnu čvrstoću, otpornost na pucanje, otpornost na poslijepukotinsko stanje, otpornost na habanje, otpornost na udar, te otpornost na dinamičko opterećenje. Primjena vlakana u betonu doprinosi kod izrade tankostijenih elemenata koje nije moguće armirati klasičnim putem, kod dinamički opterećenih elemenata, tunelskih obloga, sanacija površinskih betonskih oštećenja, prometnih površina izloženih teškim uvjetima eksploatacije. (Slika 11.)

	Planirana upotreba	Kontrola plastičnog skupljanja			Kontrola temperature i skupljanja		Kontrola temperature i skupljanja
		✓	✓	✓	✓	✓	
<b>Kompozitne metalne ploče</b>	Višekatne poslovne zgrade	✓	✓	✓	✓	✓	✓
<b>Ploče</b>	Stambene/lagane poslovne zgrade	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Poslovne zgrade	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Industrijske zgrade/skladišta	✓	✓	✓	✓	✓	✓
<b>Betonski kolnici</b>	Garaže i parkirališta	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Autoceste, ceste, piste	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Završni slojevi	✓	✓	✓	✓	✓	✓
<b>Zidovi i temelji</b>	Izolirani betonski elementi				✓	✓	

Slika 11: Primjena mikroarmiranog betona [1]

### *Beton armiran čeličnim vlaknima*

Čelična vlakna su najčešće primjenjivana vlakna, njihova uloga je zamjena uobičajene armature. Razlikuju se ravna vlakna s plosnatim krajevima, ravna vlakna s kukastim krajevima i valovita vlakna. Prednosti primjene čeličnih vlakana uočene su kod povećanja otpornosti na savijanje, povećanja vlačne čvrstoće (i do 50%), povećanja žilavosti, poslijepukotinske nosivosti, te povećanja opornosti na udarno i abrazijsko opterećenje. Primjenjuju se kod hidrotehničkih konstrukcija s jakim kavitacijskim i abrazijskim opterećenjem, kod izrade kolničke konstrukcije zračnih luka, predgotovljenih elemenata te za industrijske podove.

Primjena betona armiranog čeličnim vlaknima znatno smanjuje troškove ugradnje jer se ne koristi mrežasta armatura, ne gubi se vrijeme za ugradnju armature, nema vidljive armature te nema straha da se neće osigurati zaštitni sloj betona.

Na slici 12. prikazane su različite vrste čeličnih vlakana za armiranje betona.



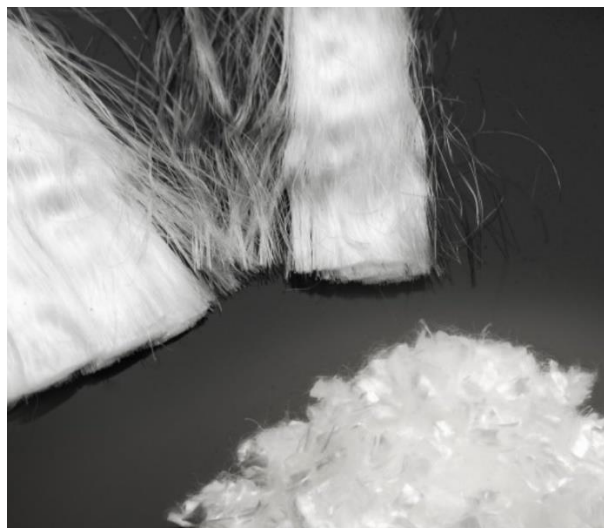


Slika 12: Čelična vlakna za armiranje betona [18]

#### *Beton armiran polipropilenskim vlaknima*

Polipropilenska ili mikrosintetička vlakna ne mogu zamijeniti uobičajenu armaturu. Ova vlakna imaju prednost kod prilikom povećanja žilavosti, otpornosti na udar, za reduciranje izdvajanja vode, smanjenje segregacije, povećanju poslijepukotinske nosivosti i sl. Primjenjuju se kod konstruktivnih elemenata s traženom otpornosti na zagrijavanje, za izradu glazura za podove, predgotovljene betonske elemente te za tunelogradnju.

Na slici 13. prikazana su polipropilenska vlakna.



Slika 13: Polipropilenska vlakna [19]

### *Beton armiran makrosintetičkim vlaknima*

Makrosintetička vlakna su najnovija vlakna u tehnologiji betona. Kombinacija su polietilena i polipropilena. Ova vlakna u potpunosti zamjenjuju uobičajenu armaturu, valovitog su oblika i čvrsto se sidre u beton. Kombinacijom makrosintetičkih i mikrosintetičkih vlakana stvara se rizik od pojave mikropukotina. Prednost primjene makrosintetičkih vlakana je u povećanju žilavosti, nepostojanju rizika korozije, te povećanju poslijepukotinske nosivosti. Primjenjuju se za stabilizaciju pokosa, izradu betonske podne ploče, primarne podgrade tunela, te zahtjevne predgotovljene betonske elemente.

Na slici 14. prikazana su makrosintetička vlakna.



Slika 14: Makrosintetička vlakna [20]

### **3.2.2. Proizvodnja mikroarmirang betona**

Mikroarmirani beton je vrsta betona koji pored sastojaka običnog betona sadrži i diskontinuirana vlakna velike čvrstoće. Osim vlakana, ova vrsta betona razlikuje se po povećanom udjelu cementa, većoj količini sitnog agregata i smanjenom najvećem zrnju agregata. Odnos duljine vlakana i veličine najvećeg zrna mora biti barem tri ili više.

Prilikom mješanja bitno je da se vlakna jednoliko rasporede u mješavini kako nebi došlo do stvaranja „gnijezda“ i segregacije betona. Mikroarmiranjem se poboljšavaju dinamička svojstva, a doprinos vlakana utječe na spriječavanje nastanka i širenja pukotina. Ukoliko se u beton doda veća količina vlakana, tada posjeduje sposobnost nošenja i većeg opterećenja nakon pojave pukotine [24].

Prilikom proizvodnje betona bitno je pratiti zahtjevanu kvalitetu i ekonomičnost. Agregat treba zadovoljiti granulometrijski sastav pa se radi s više frakcija. Cement može biti raznih kvaliteta pa ga je potrebno odvojeno skladištiti. Voda mora zadovoljiti tehničke zahtjeve. Uređaji za miješanje mogu biti različiti u odnosu na vrste mješalica, na skladištenje agregata i cementa te njihovo transportiranje i doziranje [25].

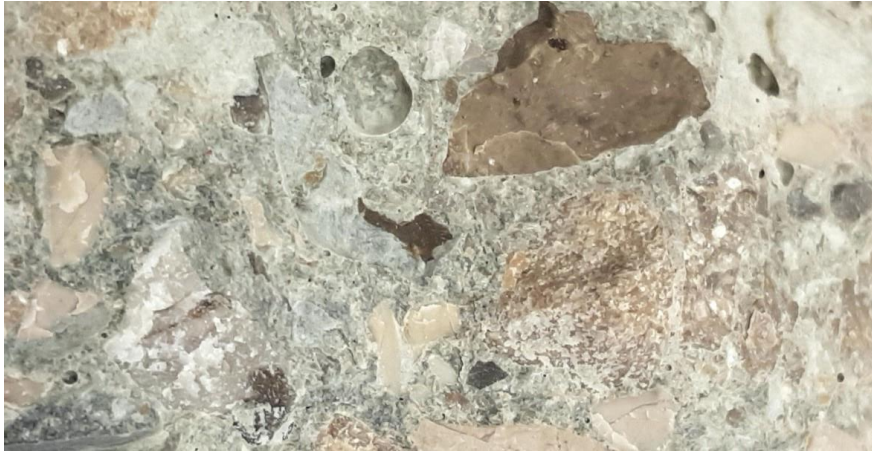
### ***3.2.3. Mikrostruktura armiranog betona***

Beton ima izrazito heterogenu i kompleksnu mikrostrukturu. Stoga je vrlo teško koncipirati njegovu mikrostrukturu iz koje se pouzdano može predvidjeti ponašanje materijala. Svojstvo mikrostrukture utječe na snagu, stabilnost i trajnost betona.

Vrsta, količina, veličina i oblik pora prisutnih u materijalu čine njegovu strukturu. Na mikroskopskoj razini beton se može smatrati dvofaznim materijalom koji se sastoji od čestica agregata raspršenih u matrici cementne paste. U nekim područjima hidratizirana cementna pasta čini se da je jednako gusta kao i agregat, dok je u drugim dijelovima vrlo porozna. Ako nekoliko uzoraka sadrži istu količinu cementa, a ispituje se uzorak u različitim vremenskim intervalima, sa različitom količinom vode, volumen kapilarnih pora smanjuje se sa smanjenjem vodocementnog omjera ili povećanjem starosti hidratacije. U prisutnosti agregata, mikrostruktura hidratizirane cementne paste u blizini velikih čestica agregata različita je od mikrostrukture rasutog materijala u sustavu.

Međufazna prijelazna zona, predstavlja malo područje pored čestica krupnog agregata. Svaka čestica agregata može sadržavati nekoliko minerala, mikropukotine i praznine. Slično tome, cementna pasta u masovnoj hidrataciji i međufazna tranzicijska zona općenito sadrži heterogenu distribuciju različitih vrsta i količine očvrslih pora i mikropukotina. Za razliku od drugih inženjerskih materijala, mikrostruktura betona podložna je promijeni s vremenom, vlažnošću i temperaturom.

Vrlo heterogena i dinamična priroda mikrostrukture betona je osnovni razlog ponašanja betona.



Slika 15: Mikrostruktura MAB

## 4. METODE ISPITIVANJA OČVRSLOG BETONA

Nakon određenog vremena i određene starosti betona, bitno je odrediti karakteristike betona u očvrsлом stanju.

Metode ispitivanja očvrslog betona mogu se podijeliti u tri skupine, destruktivne (razorne) metode, nedestruktivne (nerazorne) metode, te kombinacija navedenih.

U nastavku su opisane metode ispitivanja koje su korištene za potrebe ovog rada kao nerazorne i razorne metode .

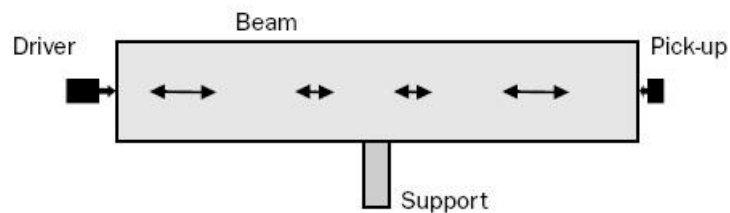
### 4.1. Nerazorne metode ispitivanja očvrslog betona

Nerazorne metode najčešće se koriste za laboratorijska ispitivanja betona kod određivanje vremenski promjenjivih svojstava uzorka, te za procjenu njegovih svojstava u konstrukciji. Ove metode ispitivanja pružaju inženjerima informacije o čvrstoći betonskih konstrukcija, ispitivanja se mogu ponoviti na istim uzorcima i usporediti u ovisnosti o vremenu.

#### 4.1.1. *Ispitivanje dinamičkog modula elastičnosti metodom rezonantne frekvencije*

Metoda rezonantne frekvencije ispituje se na prizmatičnim ili cilindričnim uzorcima. Koristi se za određivanje dinamičkog modula elastičnosti, dinamičkog Poissonovog koeficijenta, dinamičke krutosti spoja greda – stup i prigušenje materijala. Ovom se metodom mogu odrediti uzdužne, poprečne ili torzijske frekvencije uzoraka. Oprema potrebna za ispitivanje sastoji se od mjernog instrumenta, akcelerometra, kuglica za pobudu (ili udarnog čekić), te podloge (oslonca).

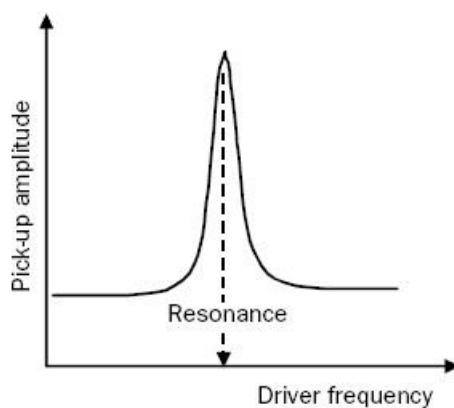
Ova metoda ispitivanja betona koristi se isključivo u laboratoriju, gdje se procjenjuju promjene ili oštećenja betona nastala kemijskom agresijom. Na betonskim prizmama ili cilindrima određenih dimenzija mjeri se rezonantna frekvencija slobodnih vibracija. Uzorak je pričvršćen na sredini, a vibriranje se aktivira malim uređajem koji dodiruje uzorak s jedne strane. Vibracije koje nastaju detektiraju se uređajem koji se nalazi na drugom kraju uzorka. (Slika 16.)



Slika 16: Prikaz uzorka sa uređajem za stvaranje i detektiranje vibracija [1]

Prilikom ispitivanja, deformacija betona je neznatna, pa je dinamički modul elastičnosti u pravilu tangenti modul u ishodištu radnog dijagrama betona.

Na slici 17. prikazana je frekvencijska krivulja uzrokovana vibracijama.



Slika 17: Frekvencijska krivulja [1]

Detaljniji opis postupka dan je u poglavlju 6.3.

#### 4.2. Razorne metode ispitivanja očvrslag betona

U nastavku su opisane neke od destruktivnih metoda koje se koriste pri ispitivanju betona u konstrukciji. Osnovna karakteristika ovih metoda je da se uzorak može ispitati samo jednom budući da u uzorcima nastupa slom.

#### **4.2.1. Ispitivanje tlačne čvrstoće betona na hidrauličkoj preši**

Ispitivanje tlačne čvrstoće betona ispituje se na standardnim uzorcima oblika kocke ili valjka. Prije ispitivanje potrebno je očistiti i osušiti uzorak. Ispitivanje tlačne čvrstoće izvodi se prema normi HRN EN 12390-3 na tri uzorka standardom propisanih dimezija. Ispitivanje se provodi na hidrauličkoj preši, na način da se uzorak postavi na sredinu ploče za ispitivanje. Opterećenje koje se nanosi na uzorak mora djelovati okomito na smjer lijevanja betona u kalup. Početno opterećenje koje se nanosi iznosi najviše 30% kritičnog opterećenja, uz konstantnu brzinu od 0.6+/-0.2 MPa/s. Nakon početnog opterećenja, opterećenje se kontinuirano povećava za 10% sve do sloma uzorka.

Izračun tlačne čvrstoće provodi se prema izrazu:

$$f_c = \frac{f}{A} \text{ (MPa)}$$

gdje je:

$f$  = sila sloma (N)

$A$  = površina poprečnog presjeka (mm<sup>2</sup>)

Detaljnije opisano u poglavlju 6.5.

#### **4.2.2. Ispitivanje statičkog modula elastičnosti na hidrauličkoj preši**

Ispitivanje statičkog modula elastičnosti izvodi se prema normi HRN EN 12390-13 na valjcima ili prizmama određenih dimenzija. Uzorke je potrebno očistiti, osušiti i na njih postaviti uređaje za mjerenje deformacije uzoraka. Tako pripremljene uzorke potrebno je postaviti u hidrauličku prešu na sredinu ploče. Uređaju se zadaje nominalno donje opterećenje koje iznosi 10%-15% tlačne čvrstoće uzoraka, uz konstantnu brzinu 0.6+/-0.2 MPa/s uz zadržavanje max. 20 sekundi. Opterećenje se zatim smanjuje na vrijednost između 0.5 MPa i 10%-15% tlačne čvrstoće, te se također zadržava 20 sekundi. Opterećenje se nanosi još dva puta na isti način. Nakon tri kruga nanošenja opterećenja najmanje opterećenje zadržava se 60 sekundi tokom koje se rade dvije provjere. U prvoj se provjeravaju očitavanja sa svakog uređaja za mjerenje deformacija, kako se nebi razlikovala za više od 10% od drugog i trećeg kruga. U drugoj provjeri se provjerava da očitavanja iz zadnjeg kruga ne premašuju više od 20% srednje vrijednosti očitavanja iz sva tri kruga. Ukoliko provjere zadovoljavaju nastavlja se sa ispitivanjem. Konstantnom brzinom se

opterećenje povećava do 10%-15% tlačne čvrstoće, zadržava 20 sekundi, zatim se povećava do trećine tlačne čvrstoće uz zadržavanje najviše 20 sekundi. Vrijednost se konstantnom brzinom smanjuje do 10%-15% tlačne čvrstoće i ponavlja još dva puta.

Formula za početni sekantni modul elastičnosti:

$$E_{c,0} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_0} = \frac{\sigma_a^m - \sigma_b^m}{\varepsilon_{a,1} - \varepsilon_{b,0}}$$

Formula za stabilizirani sekantni modul elastičnosti:

$$E_{c,s} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon_s} = \frac{\sigma_a^m - \sigma_b^m}{\varepsilon_{a,3} - \varepsilon_{b,2}}$$

gdje je:

$\sigma_a$  = gornja granica naprezanja

$\sigma_b$  = donja granica naprezanja

$\varepsilon_{a,n}$  = deformacija pri opterećenju  $\sigma_a$  u  $n$  – tom krugu

$\varepsilon_{b,n}$  = deformacija pri opterećenju  $\sigma_b$  u  $n$  – tom krugu

Detaljnije prikazano u poglavlju 6.6.



## 5. MODUL ELASTIČNOSTI BETONA

Osnovni parametar koji opisuje krutost betona upravo je modul elastičnosti. On ovisi o projektnom sastavu betona, čvrstoći i gustoći betona te vrsti agregata.

Ispitivanja modula elastičnosti zahtijevnija su od ispitivanja tlačne čvrstoće betona, zbog čega se u propisima često daje formula koja se može koristiti za proračun modula elastičnosti preko čvrstoće betona, i njegove gustoće. Modul elastičnosti dobiven ovim putem može značajno odstupati od realne vrijednosti, posebice kod posebnih vrsta betona kao što je beton armiran vlaknima. Obzirom na vrstu formule, moguća razlika je +/- 20%.

Propisi koriste probnu veličinu, sekantni modul elastičnosti, koji je moguće dobiti iz nagiba pravca koji povezuje ishodište dijagrama naprezanje-deformacija i točku koja predstavlja granicu proporcionalnosti u betonu [16].

### 5.1. Dinamički modul elastičnosti

Dinamički modul elastičnosti materijala može se odrediti mjerenjem frekvencije vibracija prizmatičnih uzoraka i matematičkih odnosa koji postoje među njima. Ti odnosi koriste se za krute materijale za koje se smatra da su homogeni, izotropni i savršeno elastični, ali se mogu primjeniti i na heterogene sustave, kao što je beton. Dinamički modul elastičnosti može se izračunati iz slijedećih jednadžbi (ovisno o tipu vibracija):

$$E = \frac{4\pi^2 L^4 N^2 d}{m^4 k^2}$$

gdje je:

$E$  = dinamički modul elastičnosti

$d$  = gustoća materijala

$L$  = duljina uzorka

$N$  = temeljna frekvencija savijanja

$k$  = polumjer okretanja dijela oko osi okomito na ravninu savijanja

=  $\frac{t}{12}$  za pravokutne presjeke,  $t$  = debljina

$m$  = konstanta (4.73)

$$E = 4L^2 d N^2$$

Dinamički modul elastičnosti ovisno o tipu vibracija može se dobiti slijedećim empirijskim izrazima:

- za transverzalnu frekvenciju:  $E_d = CMn^2$  [Pa]

gdje je:

$M =$  masa uzorka (kg)

$n =$  transverzalna frekvencija uzorka (Hz)

$$C = 0.9464 \frac{L^3 T}{bt^3} \quad [Ns^2(kgm^2)]$$

$L =$  duljina uzorka (m)

$t, b =$  dimenzije poprečnog presjeka prizme

$T =$  korekcijski faktor koji za prizmu iznosi  $t/3.464$

- za longitudinalnu frekvenciju:  $E_d = DM(n')^2$  [Pa]

gdje je:

$M =$  masa uzorka (kg)

$n =$  longitudinalna frekvencija uzorka (Hz)

$$D = 4 \frac{L}{bt} \quad [Ns^2(kgm^2)]$$

$L =$  duljina uzorka (m)

$t, b =$  dimenzije poprečnog presjeka prizme

$T =$  korekcijski faktor koji za prizmu iznosi  $t/3.464$

- za torzijsku frekvenciju:  $E_d = BM(n'')^2$  [Pa]

gdje je:

$M =$  masa uzorka (kg)

$n =$  longitudinalna frekvencija uzorka (Hz)

$$B = 4 \frac{LR}{A} \quad [Ns^2(kgm^2)]$$

$L$  = duljina uzorka (m)

$A$  = površina poprečnog presjeka prizme

$R$  = korekcijski faktor oblika koji za prizmu iznosi 1.183

Metoda određivanja dinamičkog modula elastičnosti čvrstog tijela korištenjem rezonantne frekvencije u uporabi je već 55 godina. Sve do posljednjih nekoliko godina, metode rezonantnih frekvencija koristile su se isključivo u laboratorijskim istraživanjima. Ta ispitivanja vršila su se na betonskim prizmatičnim ili cilindričnim uzorcima kako bi se ispitao dinamički modul elastičnosti i krutosti [14].

Metoda određivanja rezonantne frekvencije svodi se na izazivanje uzdužnih, savojnih ili torzijskih vibracija koje proizvode osnovnu rezonantnu frekvenciju u uzorku koji se ispituje. Na temelju te frekvencije određuje se modul elastičnosti, dinamički modul posmika i dinamički Poissonov koeficijent.

Temeljne rezonantne frekvencije određuju se pomoću jedne od dvije alternativne procedure, metoda prisilne rezonance ili metoda rezonance udara [15].

Ove metode ispitivanja namijenjene su prvenstveno za otkrivanje značajnih promjena u dinamičkom modulu elastičnosti laboratorijskih ili terenskih uzoraka koji su izloženi vremenskim uvjetima. Vrijednosti dinamičkog modula elastičnosti dobivene ovom metodom, općenito će biti veće od statičkog modula elastičnosti dobivenog primjenom metode ispitivanja.

Različite izračunate vrijednosti za dinamički modul elastičnosti mogu proizaći iz vrlo različitih rezonantnih frekvencija uzoraka različitih veličina i oblika istog betona. Stoga nije preporučljivo uspoređivati rezultate s uzorcima različitih veličina i oblika.

Uvjeti proizvodnje, sadržaj vlage i druge karakteristike ispitnih uzoraka zatno utječu na dobivene rezultate [15].

Uređaji za ispitivanje sastoje se prvenstveno od dva dijela, jedan stvara mehaničke vibracije, dok ih drugi prihvaća. Oprema koja zadovoljava ASTM zahtjeve dizajnirana je od strane raznih komercijalnih organizacija [14].

Za određivanje rezonantne frekvencije pomoću pokazivača, potrebne su određene vještine i iskustva. Moguće je odrediti nekoliko frekvencija koje odgovaraju različitim tipovima vibracija (savojne, longitudinalne ili torzijske). Kod uzoraka koji imaju ili vrlo mali ili vrlo veliki omjer duljine i poprečnog presjeka (maksimalnog), teško je pobuditi vibracije [14].

Podloge za uzorak koji se ispituje trebaju biti od materijala koji dopušta vibriranje uzorka bez značajnih ograničenja. Mekana spužvasta guma je zadovoljavajuća podloga, a poželjna je ako se uzorci koriste za studije smrzavanja i odmrzavanja.

Kod ispitivanja rezonantne frekvencije korisno je procijeniti očekivanu frekvenciju. U nastavku je dana tablica koja prikazuje približne raspone temeljnih longitudinalnih i savojnih rezonantnih frekvencija, za standardne uzorke betona [14]. (Tablica 5.).

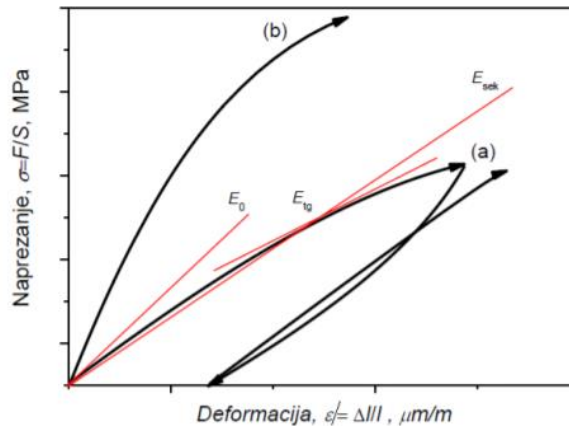
<i>Veličina uzorka (mm)</i>	<i>Približni raspon rezonantne frekvencije (Hz)</i>	
	<i>transverzalna</i>	<i>longitudinalna</i>
<i>152 x 152 x 710 – mm, prizma</i>	550 – 1150	1800 – 3200
<i>102 x 102 x 510 – mm, prizma</i>	900 – 1600	2500 – 4500
<i>152 x 305 – mm, vajak</i>	2500 – 4500	4000 – 7500

Tablica 5: Približni rasponi rezonantnih frekvencija za betonske prizmatične i cilindrične uzorke [14]

Dinamički moduli elastičnosti, krutosti i Poissonov omjer betona može se izračunati jednadžbama danim u ASTM C 215-02. To su modifikacije teoretskih jednadžbi koje se primjenjuju na uzorke čija je dužina znatno veća od presjeka. Korekcije teorijskih jednadžbi u svim slučajevima uključuju Poissonov koeficijent i znatno su veće za savojnu nego za longitudinalnu rezonantnu frekvenciju. Longitudinalni i savojni način vibracija daju gotovo jednaku vrijednost za dinamički modul elastičnosti. Dinamički modul elastičnosti može biti u rasponu od 14 GPa za lošiju kvalitetu betona do 48 GPa za bolju kvalitetu betona [14].

## 5.2. Statički modul elastičnosti

Statički modul elastičnosti dobiva se ispitivanjem uzorka prizmatičnog ili cilindričnog oblika. Uzorak se opterećuje na pritisak, u smjeru dulje osi, a deformacije se mjere u srednjoj trećini (monoaksijalna naprezanja). Sile (F) i promjene u duljini ( $\Delta l$ ) bilježe se nakon svakog kruga povećanja opterećenja. Naprezanja ( $\sigma$ ) i relativne deformacije ( $\epsilon$ ) dobiju se dijeljenjem s površinom, tj. mjernom duljinom [16]. (slika 18.)



Slika 18: Radni dijagram cemenetnih uzoraka opterećen na pritisak: a) beton manje čvrstoće, b) beton velike čvrstoće [16]

Radni dijagram je malo zakrivljena linija, a modul elastičnosti predstavlja samo aproksimaciju stvarnog ponašanja betona. Ukoliko se opterećenje nanosi sporije, a naprezanje povećava, nelinearnost je veća. To je posljedica puzanja betona. Kod betona velikih čvrstoća, modul elastičnosti je veći, a radni dijagram se približava pravocrtnom (konsolidacija u strukturi betona). Na krivulji radnog dijagrama betona moguće je odrediti tri vrste statičkog modula elastičnosti: početni, sekantni i tangentni [16].

Prije početka mjerenja nanosi se početno naprezanje od 10% kako bi se izbjegle početne neravnomjernosti kod mjerenja deformacija (posljedica neravnosti kontaktnih ploha). Kod materijala opterećenog na pritisak u smjeru osi y, dobivamo Poissonov omjer iz slijedeće formule [16]:

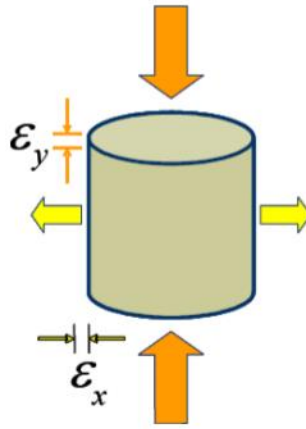
$$\nu = -\frac{\epsilon_x}{\epsilon_y}$$

gdje je:

$\epsilon_x$  = transverzalna deformacija

$\varepsilon_y = \text{aksijalna deformacija}$

Na slici 20. prikazan je uzorak opterećen na pritisak.



Slika 19: Uzorak opterećen na pritisak [16]

## 6. LABORATORIJSKA ISPITIVANJA

U Laboratoriju za materijale, Građevinskog fakultetu u Rijeci, provedena su ispitivanja na prizmatičnim i kockastim uzorcima različitih vrsta betona. Ispitivanja su se provodila na betonu armiranom čeličnim i sintetičkim vlaknima, te na porobetonu (Ytong blok). Nakon provedenih ispitivanja napravila se usporedba među navedenim vrstama betona. Uzorci su obilježeni brojevima od 1 do 14. (Slika 20.)

U tablici 6. dan je sumarni prikaz uzoraka za ipitivanje, njihove dimenzije, vrste betona te ispitivanje koje se provodilo na tim uzorcima.

<i>Uzorak (broj)</i>	<i>Broj uzoraka</i>	<i>Dimenzije (mm)</i>	<i>Vrsta betona</i>	<i>Ispitivanje</i>
<b>Prizma</b> <b>(9, 10, 11)</b>	3	b=100, t=100, L=250	MAB	-dinamički modul elastičnosti -statički modul elastičnosti
<b>Prizma</b> <b>(6, 7, 8)</b>	3	b=100, t=100, L=250	porobeton	-dinamički modul elastičnosti -statički modul elastičnosti
<b>Kocka</b> <b>(12, 13, 14)</b>	3	a=100	MAB	-tlačna čvrstoća -vodoupojnost
<b>Kocka</b> <b>(1, 2, 3, 4)</b>	3 (+1)	a=100	porobeton	-tlačna čvrstoća -vodoupojnost

Tablica 6: Uzorci, dimenzije, vrste betona, provedena ispitivanja

Za potrebe ispitivanja korištene su slijedeće norme:

ASTM C215 – 02 (Standardna metoda za ispitivanje poprečne, uzdužne i rezonantne frekvencije betonskih uzoraka)

HRN EN 12390 – 1 (Oblik, dimezije i drugi zahtjevi)

HRN EN 12390 – 3 (Tlačna čvrstoća ispitnih uzoraka)

HRN EN 12390 – 7 (Gustoća očvrsloga betona)

HRN EN 12390 – 13 (Određivanje sekantnog modula elastičnosti pri tlaku)

HRN EN 678 (Određivanje gustoće u suhom stanju porastoga betona)

HRN EN 679 (Određivanje tlačne čvrstoće porastoga betona)

HRN EN 1352 – (Određivanje statičkog modula elastičnosti porastoga betona ili betona s laganim agregatom otvorene strukture)



Slika 20: Uzorci betona (1-7 uzorci porobetona, 9-12 uzorci betona armiranog vlaknima)

## 6.1. Projektni sastav betona

Kao što je već spomenuto, za ispitivanja smo koristili beton armiran čeličnim i sintetičkim vlaknima, te porobeton. U sklopu ovog diplomskog rada nije se radila svježa betonska mješavina, već su prethodno navedeni uzorci ispiljeni iz očvrslih uzoraka betona armiranog vlaknima te Ytong blokova. Projektni sastav mikroarmiranog betona detaljnije je opisan u poglavlju “6.1.1. Beton armiran čeličnim i sintetičkim vlaknima“. U poglavlju “6.1.2. Porobeton – Ytong blok“ detaljnije je opisan korišteni porobeton za ispitivanja.



### 6.1.1. Beton armiran čeličnim i sintetičkim vlaknima

Prilikom izrade betona armiranog čeličnim i sintetičkim vlaknima odabran je agregat s 2 frakcije (0-4, 4-8) te kvarcnim pijeskom.

Odabran je cement CEM II/A-LL 42.5R, gustoća je ispitana Le-Chatelierovom tikvicom i iznosi  $2.95 \text{ kg/dm}^3$ . Voda korištena pri izradi uzoraka je obična voda iz vodoopskrbnog sustava. Za mikroarmiranje korištena su čelična vlakna "Dramix", promjera  $d=0.15 \text{ mm}$ , duljine  $L=13 \text{ mm}$  i gustoće  $\rho=6670 \text{ kg/m}^3$ , te polimerna vlakna "Verstaerkung Fiber Association", duljine  $L=12 \text{ mm}$  i gustoće  $\rho=910 \text{ kg/m}^3$ . U vodu su dodani superplastifikator "Glenium sky 629" kako bi se povećala obradivost betona, te "Master Matrix SDC 150" za dobivanje viskoziteta unutar mješavine.

U tablici 7. dane su ukupne količine sastojaka za izradu uzoraka od mikroarmiranog betona.

<b>MATERIJAL</b>	<b>Masa (kg)</b>	<b>Gustoća (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Volumen (m<sup>3</sup>)</b>
<b>Cement</b>	311.1	2.95	105.46
<b>Silicijska prašina</b>	77.8	2.18	35.68
<b>Voda</b>	175	1	175
<b>Sp Glenium</b>	9.72	1.105	8.80
<b>Mastrer matrix</b>	2.33	0.979	2.38
<b>Čelična vlakna</b>	195	7.80	25.0
<b>Polimerna vlakna</b>	1.82	0.91	2.0
<b>Frakcija 0-4</b>	971.85	2.87	338.62
<b>Frakcija 4-8</b>	571.04	2.65	215.49
<b>Kvarcni pijesak</b>	161.31	2.62	61.57

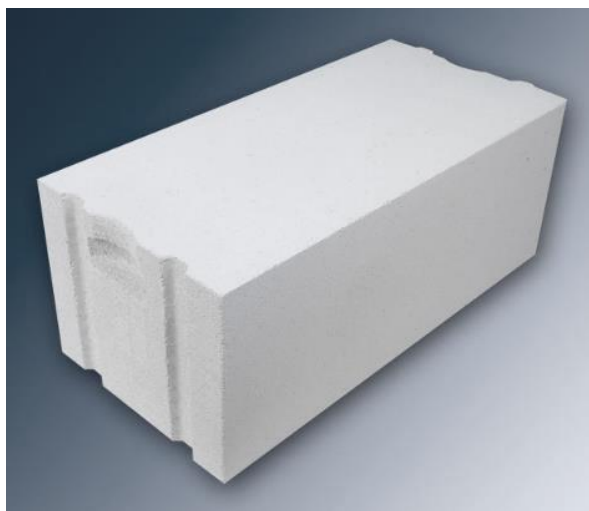
Tablica 7: ukupne količine sastojaka za izradu uzoraka od mikroarmiranog betona za  $1\text{m}^3$  [21]

### **6.1.2. Porobeton – Ytong blok**

Porobeton korišten u ispitivanjima je gotovi proizvod, kupljen za potrebe ispitivanja, proizvođača Ytong.

Osnovne sirovine za proizvodnju Ytong blokova su voda, kremen pijesak, prirodni gips, vapno i cement.

Odabrali smo Ytong blok dimenzija 600 x 200 x 250 mm (Slika 22), te ga pripremili za ispitivanja rezanjem u prizme dimenzija 100 x 100 x 250 mm, te kocke dimenzija a=100 mm.



Slika 21: Betonski blok – porobeton

### **6.2. Priprema uzoraka za ispitivanje**

Za ispitivanje je pripremljeno 6 prizmi (3 MAB, 3 porobeton) i 6 kocki (3 MAB, 3 porobeton). Prizme i kocke navedenih dimenzija obilježile su se brojevima od 1 do 14 (1 kocka i 1 prizma viška).

Za navedena ispitivanja uzorci su se pripremili prema normi HRN EN 12390-1 (Ispitivanje očvrsllog betona – 1.dio: Oblik, dimenzije i drugi zahtjevi za uzorke i kalupe (EN 12390-1:2012)).

Svi uzorci su se izvagali (mase  $m_1$  zabilježene), te odložili u sušionik na 105 °C. Nakon cca 32 sata, uzorci su se izvadili iz sušionika te ostavili da se istemperiraju na sobnoj temperaturi 30 minuta.

Uzorci su ponovno izvagani (mase  $m_2$  zabilježene), uzete su sve potrebne dimenzije, te izračunate površine  $P$ , volumeni  $V$ , te gustoća  $\rho$ . Kocke su se vratile u sušionik kako bi bile potpuno suhe, dok su se prizmatični uzorci ostavili vani na sobnoj temperaturi.



Slika 22: Podaci na sušioniku



Slika 23: Uzorci u sušioniku

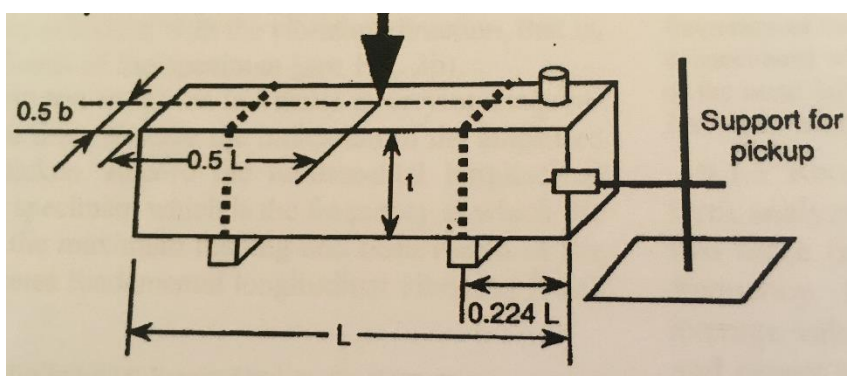
### 6.3. Ispitivanje dinamičkog modula elastičnosti metodom rezonantne frekvencije

Nakon što su se uzorci osušili, na prizmatičnim uzorcima (MAB, porobeton) definirano je mjesto za lijepljenje navoja (prema ASTM C215-14) na koje se postavlja akcelerometar, te mjesto udara za pobuđivanje longitudinalne i transverzalne frekvencije (za određivanje dinamičkog modula elastičnosti). Navoj se na uzorak zalijepio pomoću brzosušećeg dvokomponentnog epoksidnog ljepila. Zalijepljeni navoji ostavljeni su da miruju dok se epoksid ne stvrdne. (Slika 24.)

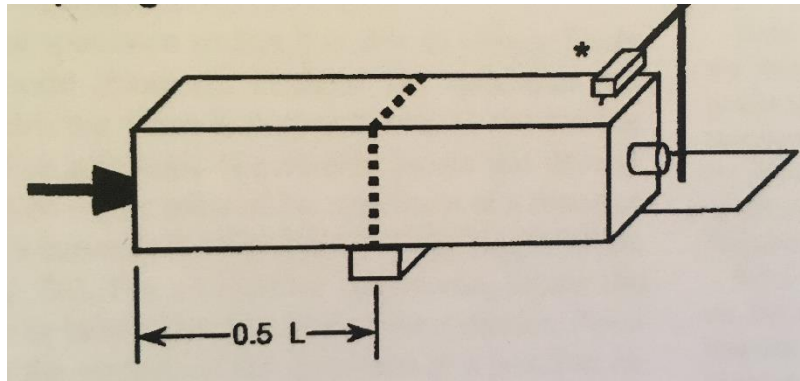


Slika 24: Postavljeni navoji na prizmatične uzorke (priprema za ispitivanje dinamičkog modula elastičnosti)

Obilježene pozicije za prizmatične uzorke prikazane su na slikama 25. i 26. (ovisno o vrsti pobuđivanja frekvencija).



Slika 25: Pozicije udara i akcelerometra za pobuđivanje transverzalne frekvencije [15]



Slika 26: Pozicije udara i akcelerometra za pobuđivanje longitudinalne frekvencije [15]

Dimenzije prizmatičnih uzoraka izmjerene su pomičnom mjerkom, te izvagani vagom. Izmjerene dimenzije i masa uzoraka dane su u tablici 8.

<i>Uzorak</i>	<i>L (mm)</i>	<i>b (mm)</i>	<i>t (mm)</i>	<i>Masa (kg)</i>	<i>Volumen (dm<sup>3</sup>)</i>	<i>Gustoća (kg/dm<sup>3</sup>)</i>
<i>Prizma 6</i>	248.14	102.64	96.57	1.05	2.43	0.43
<i>Prizma 7</i>	248.08	101.12	97.68	1.06	2.45	0.43
<i>Prizma 8</i>	247.94	99.55	96.96	1.03	2.41	0.43
<i>Prizma 9</i>	249.61	99.58	99.69	5.64	2.50	2.26
<i>Prizma 10</i>	250.77	100.96	100.03	5.84	2.54	2.30
<i>Prizma 11</i>	249.84	101.11	99.88	5.81	2.53	2.30

Tablica 8: Dimenzije i masa uzoraka

Uzorci označeni brojevima 6, 7 i 8 su uzorci porobetona, a 9, 10 i 11 su uzorci mikroarmiranog betona.

Za određivanje dinamičkog modula elastičnosti metodom rezonantne frekvencije korišten je uređaj talijanske tvrtke Controls. Uređaj C311-R izračunava frekvenciju transverzalne, longitudinalne i torzijske rezonance na betonskim uzorcima, ili na uzorcima stijena za utvrđivanje faktora prigušenja, te za analiziranje dotrajalosti uzrokovane ciklusima smrzavanja – odmrzavanja. Uređaj je opremljen PC-om i LCD zaslonom, akcelometrom,

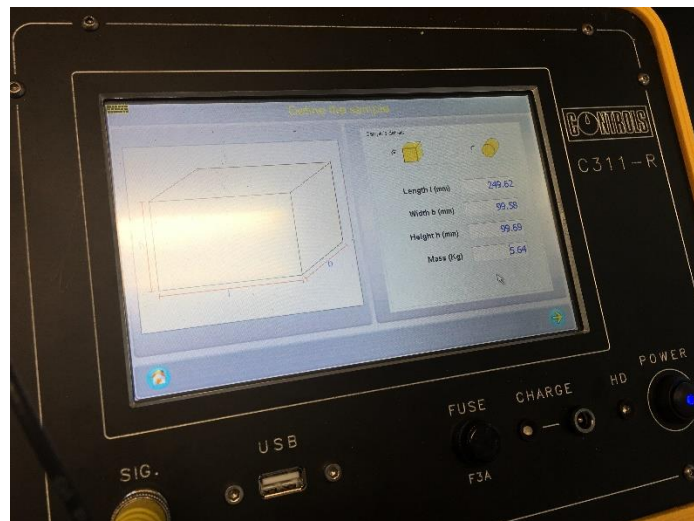
kuglicom za pobuđivanje frekvencija, kablom za spajanje akcelerometra, vijcima te podlogom. Podloga može biti spužva ili metalni oslonci.

Za potrebe ispitivanja koristila se spužva kao podlogu, a pobuđivale su se transversalne i longitudinalne frekvencije na obe vrste betona. Spužvasta podloga omogućuje uzrcima nesmetano vibriranje. (Slika 27.)



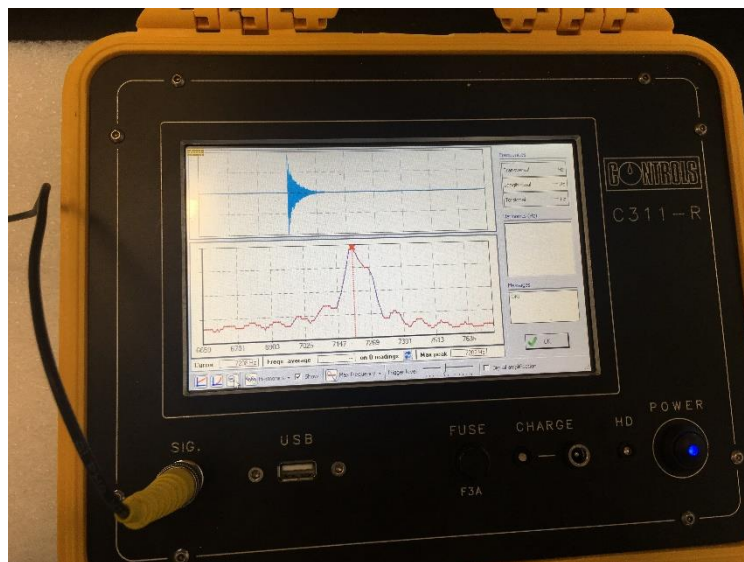
Slika 27: Uređaj za mjerenje rezonantne frekvencije i uzorak postavljen na spužvastu podlogu

U uređaj su se unijeli svi traženi podaci (L, b, t, m), i odabrani tipovi vibracija koji će se mjeriti (transverzalne i longitudinalne). Nakon unošenja potrebnih parametara, započelo je ispitivanje. (Slika 28.)



Slika 28: Ulazni podaci na uređaju

Ispitivanje se provodilo na način da se metalnim sferičnim udaračem udarilo po uzorku na prethodno definirano mjesto udara što također ovisi o vrsti frekvencije koju pobuđujemo. Nakon svakog udara na uređaju se prikazao spektar frekvencija. Rezonantna frekvencija je frekvencija kojoj odgovara maksimum u spektru frekvencija (potrebno odabrati tu frekvenciju kako bi ju uređaj zapamtio). (Slika 29.)



Slika 29: Spektar frekvencija na uređaju sa obilježenom najvećom frekvencijom

Navedeni postupak ponavlja se tri puta, dakle dobiva se tri vrijednosti rezonantne frekvencije, nakon čega uređaj automatski ispisuje prosječnu vrijednost pomoću koje vrši izračun dinamičkog modula elastičnosti. Vrlo je važno pratiti da očitane frekvencije među ponavljanjima ne odstupaju više od 10%, inače bi se ispitivanje smatralo nevažecim. Ovaj postupak primjenjen je na svakom uzorku, za longitudinalne i transverzalne vibracije.

Rezultati ispitivanja dani su u tablici 9. i 10.

<i>Uzorak</i>	<i>1.očitanje (Hz)</i>	<i>2.očitanje (Hz)</i>	<i>3.očitanje (Hz)</i>	<i>Prosječna rezonantna frekvencija (Hz)</i>		<i>Dinamički modul elastičnosti (Gpa)</i>		<i>Poissonov koeficijent (pretpostavka)</i>
<i>Prizma 6</i>	1587	1605	1648	1611	<b>1678.33</b>	0.8	<b>0.9</b>	0.17
<i>Prizma 7</i>	1782	1770	1770	1776		1		0.17
<i>Prizma 8</i>	1617	1630	1691	1648		0.9		0.17
<i>Prizma 9</i>	4028	3937	4016	3992	<b>4095.33</b>	28.7	<b>29.37</b>	0.18
<i>Prizma 10</i>	4156	4156	4156	4156		30		0.18
<i>Prizma 11</i>	4132	4132	4150	4138		29.4		0.18

Tablica 9: Rezultati ispitivanja – *transverzalne* vibracije. Dobivena rezonantna frekvencija pojedinog uzorka i dinamički modul elastičnosti

<i>Uzorak</i>	<i>1.očitanje (Hz)</i>	<i>2.očitanje (Hz)</i>	<i>3.očitanje (Hz)</i>	<i>Prosječna rezonantna frekvencija (Hz)</i>		<i>Dinamički modul elastičnosti (GPa)</i>		<i>Poissonov koeficijent</i>
<i>Prizma 6</i>	2222	2289	2368	2295	<b>2299</b>	0.5	<b>0.53</b>	0.17
<i>Prizma 7</i>	2277	2136	2338	2252		0.5		0.17
<i>Prizma 8</i>	2313	2350	2393	2350		0.6		0.17
<i>Prizma 9</i>	7019	7043	7013	7025	<b>7086.33</b>	28.9	<b>29.2</b>	0.18
<i>Prizma 10</i>	7178	7184	7172	7178		30		0.18
<i>Prizma 11</i>	7050	7062	7062	7056		28.7		0.18

Tablica 10: Rezultati ispitivanja - *longitudinalne* vibracije. Dobivena rezonantna frekvencija pojedinog uzorka i dinamički modul elastičnosti

*Napomena:* uzorci su prije ispitivanja bili potpuno suhi, pa je pretpostavljena manja vrijednost Poissonovog koeficijenta što nije znatno utjecalo na dobivene rezultate.



Kako dinamički modul elastičnosti ovisi o masi i dužini uzorka, te o izmjerenim frekvencijama, u tablici 11. su dani podaci za izračun. Korištene su prosječne vrijednosti dobivenih parametara.

	<i>Porobeton</i>	<i>Mikroarmirani beton</i>
<i>dužina L (m)</i>	0.25	0.25
<i>stranica b (m)</i>	0.10	0.10
<i>stranica t (m)</i>	0.097	0.099
<i>masa uzorka M (kg)</i>	1.05	5.76
<i>rezonantna transverzalna frekvencija (Hz)</i>	1687.33	4095.33
<i>rezonantna longitudinalna frekvencija (Hz)</i>	2299	7086.33
<i>Poissonov koeficijent</i>	0.17	0.18

Tablica 11: Ulazni podaci za izračun dinamičkog modula elastičnosti (*transverzalna i longitudinalna frekvencija*)

Uvrštavanjem dobivenih vrijednosti u gore navedene izraze dobivamo slijedeće vrijednosti dinamičkog modula elastičnosti:

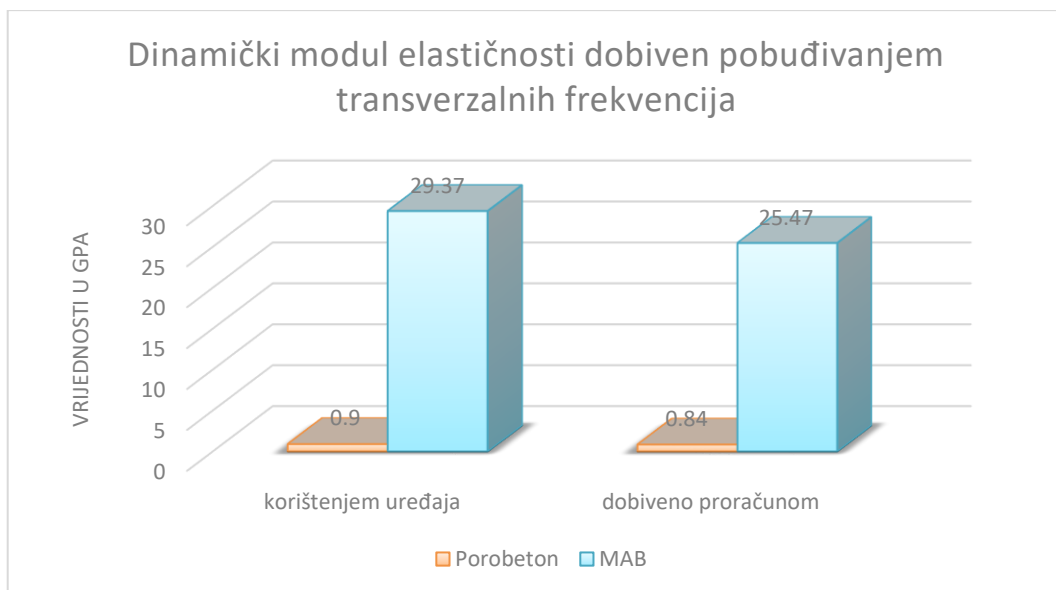
<i>frekvencija</i>	<i>E<sub>d</sub> dobiven na uređaju (GPa)</i>		<i>E<sub>d</sub> proračunat iz navedenih izraza (GPa)</i>	
	<i>Transverzalna</i>	<i>Longitudinalna</i>	<i>Transverzalna</i>	<i>longitudinalna</i>
<i>Porobeton</i>	0.9	0.53	0.84	0.57
<i>MAB</i>	29.37	29.2	25.47	29.22
<i>razlika (%)</i>	96.94%	98.19%	96.70%	98.05%

Tablica 12: Usporedba proračunatog i na uređaju dobivenog dinamičkog modula elastičnosti

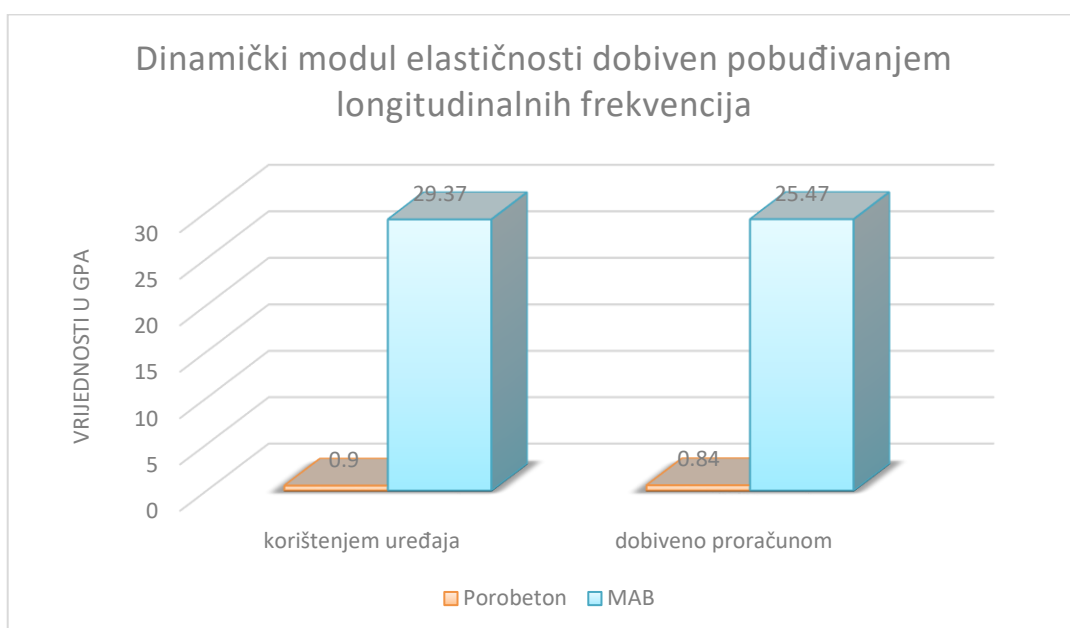
U tablici 8., Grafu 1 i 2, vidljive su razlike u dinamičkom modulu elastičnosti između porobetona i MAB, za transversalne i longitudinalne vibracije. Dinamički modul elastičnosti dobiven korištenjem uređaja, prilikom pobuđivanja transversalnih vibracija, razlikuje se za 96.94% između navedene dvije vrste betona, a dinamički modul elastičnosti dobiven proračunom, razlikuje se za 96.97% između dvije vrste betona. Vidljivo je da je razlika dinamičkog modula elastičnosti za transversalne vibracije korištenjem uređaja i proračunata iz dobivenih parametara vrlo mala. Također je u tablici vidljivo da je razlika dinamičkog modula elastičnosti za pobuđene longitudinalne vibracije (između dvije vrste betona), korištenjem uređaja (98.19%) i računanjem parametara (98.05%), vrlo mala. Na temelju dobivenih rezultata zaključujemo da je korišteni uređaj vrlo točan, praktičan i brz način ispitivanja dinamičkog modula elastičnosti.

Ako usporedimo dinamički modul elastičnosti dobiven na temelju transversalnih i longitudinalnih vibracija vidimo da kod MAB krajnji rezultat daje iste vrijednosti. Međutim, kod porobetona dinamički modul elastičnosti dobiven preko transversalne vibracije je oko 50-60% veći od onoga dobivenog temeljem pobuđivanja longitudinalnih vibracija. Kako je metoda rezonantne frekvencije često korištena i za detekciju šupljina i pora nekog materijala zaključujemo da razlog takvoj razlici upravo može biti porozna struktura betonskog uzorka kroz koju prolazi val pobuđene frekvencije..

Usporedbom dinamičkih modula elastičnosti između porobetona i mikroarmiranog betona uočavamo veliku razliku, od 96.97% (dobiveno korištenjem uređaja).



Graf 1: Dinamički modul elastičnosti dobiven pobuđivanjem *transverzalne frekvencije*



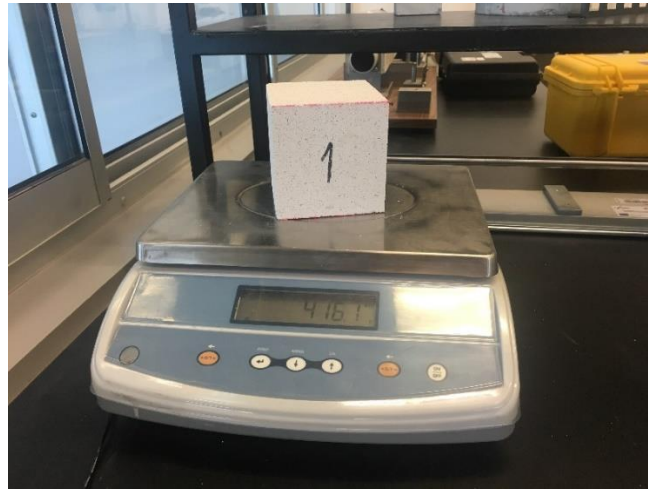
Graf 2: Dinamički modul elastičnosti dobiven pobuđivanjem *longitudinalne frekvencije*

#### 6.4. Vodoupojnost (kapilarno upijanje vode)

Pod kapilarnom vodoupojnošću podrazumijeva se prodiranje vode u materijal, zbog kapilarnog upijanja (kada je jedna ploha materijala u kontaktu s vodom).

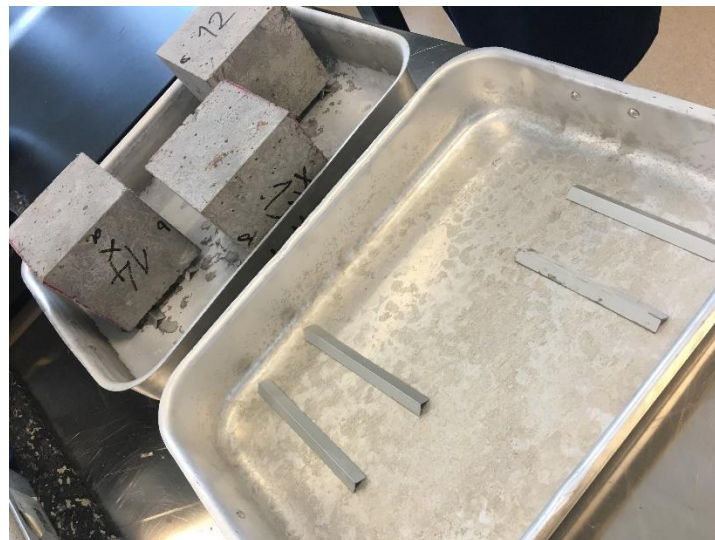
Vodoupojnost (kapilarno upijanje vode) se provodilo na kockastim uzorcima mikroarmiranog betona i porobetona. Uzorci su se sušili u sušioniku s ventilacijom na

temperaturi od  $105 \pm 5$  °C do stalne mase. Smatra se da je postignuta stalna masa ona koja tijekom dva uzastopna vaganja (u razmaku od najmanje 24 sata) nema gubitak veći od 0.2% ukupne mase. Na slici 30. prikazan je način vaganja uzoraka.



Slika 30: Vaganje suhих uzoraka

Nakon sušenja, i kontroliranja mase, uzorci su ostavljeni na sobnoj temperaturi da se ohlade. Ohlađenim uzorcima izmjerene su površine koje će biti uronjene u vodu. Uzorci su postavljeni na način da je uronjena površina stavljena na oslonce kako bi se omogućilo nesmetano upijanje vode. (Slika 31.)



Slika 31: Priprema za određivanje kapilarnog upijanja vode

Uzorci su uronjeni u vodu do dubine  $5 \pm 1$  mm za cijelo vrijeme trajanja ispitivanja. Uzorci su se ponovno vagali nakon 15, 30, 45, 60, 120 min i 24 h, te su bilježile povećane mase. (Slika 32.)



Slika 32: Uronjeni uzorci

Dobivene mase upisane su u tablicu 13.

<i>Vrijeme (min)</i>	<i>Masa uzorka (g)</i>					
	<i>Kocka 1</i>	<i>Kocka 2</i>	<i>Kocka 3</i>	<i>Kocka 12</i>	<i>Kocka 13</i>	<i>Kocka 14</i>
<i>0 (suhi uzorak)</i>	414.2	413.8	408.2	2252.0	2250.9	2274.5
<i>15</i>	445.5	444.3	437.6	2266.1	2266.7	2288.1
<i>30</i>	459.3	457.6	452.2	2272.9	2272.1	2293.6
<i>45</i>	468.6	468.8	463.1	2280.0	2276.2	2298.0
<i>60</i>	478.3	480.7	472.1	2285.7	2279.8	2301.9
<i>120</i>	494.0	500.6	487.3	2292.5	2284.7	2307.4
<i>1440</i>	558.3	566.8	549.8	2322.4	2309.5	2334.7
<i>Površina uronjene plohe (mm<sup>2</sup>)</i>	9907.40	9781.37	9751.17	10043.01	10019.23	10262.70

Tablica 13: Mase suhih uzoraka, te uzoraka uronjenih u vodu (nakon 15, 30, 45, 60, 120 min i 24 h)

Uzorci označeni brojevima 1, 2 i 3 su uzorci porobetona, a 12, 13 i 14 su uzorci mikroarmiranog betona.

Vodoupojnost možemo izračunati prema slijedećoj formuli:

$$A = \frac{m_i - m_0}{S}$$

gdje je:

$A$  = vodoupojnost (kg/m<sup>2</sup>)

$m_i$  = masa uzorka nakon  $i$  vremena u kontaktu s vodom (kg)

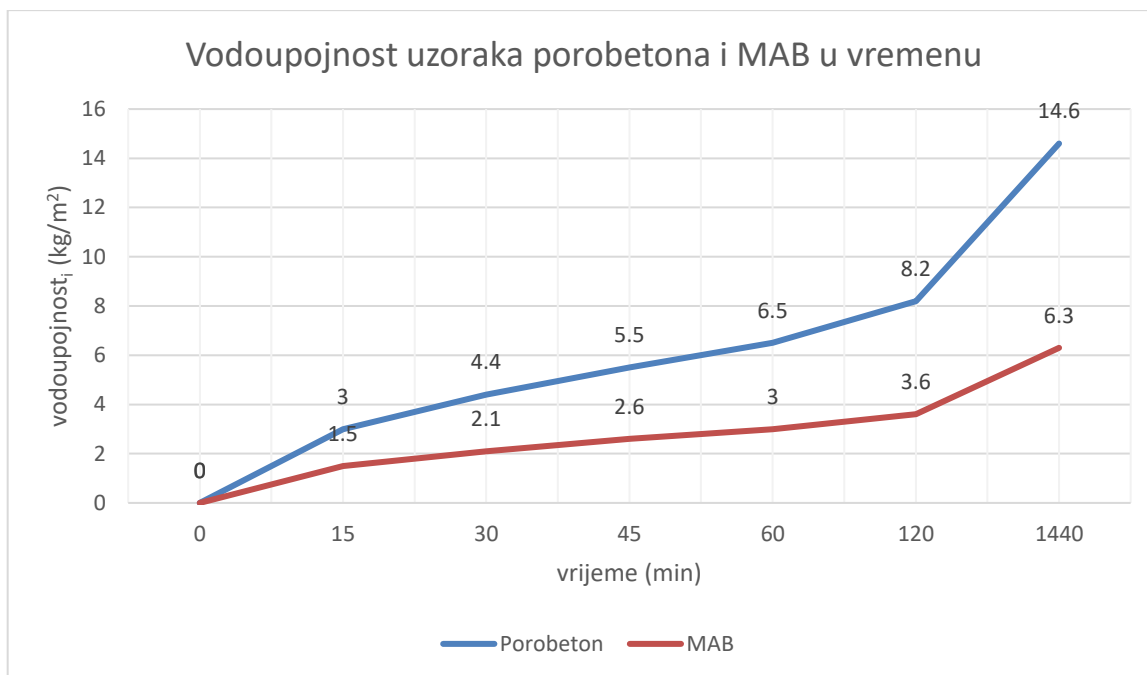
$m_0$  = masa suhog uzorka (kg)

$S$  = površina uronjene plohe (m<sup>2</sup>)

Uvrštavanjem dobivenih vrijednosti u gore navedeni izraz dobivamo slijedeće vrijednosti vodoupojnosti (korištene su prosječne vrijednosti dobivenih parametara):

<b>Vrijeme (min)</b>	<b>Masa uzorka (kg)</b>		<b>Vodoupojnost A (kg/m<sup>2</sup>)</b>		<b>Koeficijent vodoupojnosti w (kg/m<sup>2</sup>s<sup>0.5</sup>)</b>	
	<b>Porobeton</b>	<b>MAB</b>	<b>Porobeton</b>	<b>MAB</b>	<b>Porobeton</b>	<b>MAB</b>
<b>0 (suhi uzorak)</b>	0.412	2.259	/	/	/	/
<b>15</b>	0.442	2.274	3.00	1.50	0.10	0.05
<b>30</b>	0.456	2.280	4.40	2.10	0.1037	0.0495
<b>45</b>	0.467	2.285	5.50	2.60	0.1058	0.0500
<b>60</b>	0.477	2.289	6.50	3.00	0.1083	0.05
<b>120</b>	0.494	2.295	8.20	3.60	0.0966	0.0424
<b>1440</b>	0.558	2.322	14.60	6.30	0.0497	0.0214
<b>Površina uronjene plohe (m<sup>2</sup>)</b>	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010

Tablica 14: Dobivene vrijednosti vodoupojnosti za porobeton i MAB



Graf 3: Prikaz vodoupojnosti u vremenu za uzorke porobetona i MAB

Kroz dobivene vrijednosti izračunom, i iscertavanjem grafa (Graf 3) jasno uočavamo veliku razliku u vodoupojnosti između dvije promatrane vrste betona.

Vodoupojnost kod uzoraka porobetona je za 56.85% veća nego kod uzoraka MAB, za 24 sata. Masa uzoraka porobetona je povećana za 26.17% u odnosu na masu suhog uzorka, u 24 sata, dok je masa uzoraka MAB povećana za 2.72% u odnosu na masu suhog uzorka, također u 24 sata.

### 6.5. Ispitivanje tlačne čvrstoće

Ispitivanje tlačne čvrstoće uzoraka provedeno je prema normi HRN EN 12390-3 (za MAB) i HRN EN 679 (za porobeton). Ispitivanje se provodilo na ukupno 7 kocki čija je duljina brida 100 mm, od toga tri MAB i četiri porobeton. Prije početka ispitivanja vagani, te izmjerene točne dimenzije svake kocke.

Širina, visina i duljina dobiveni su kao srednja vrijednost izmjera dobivenih mjerenjem uzoraka tri puta sa svake strane. (Tablica 15.)



<i>Uzorak</i>	<i>a (mm)</i>	<i>b (mm)</i>	<i>c (mm)</i>	<i>Površina (mm<sup>2</sup>)</i>	<i>Masa (kg)</i>	<i>Volumen (dm<sup>3</sup>)</i>	<i>Gustoća (kg/dm<sup>3</sup>)</i>
<b><i>Kocka 1</i></b>	98.20	100.89	99.58	9907.40	0.418	0.99	0.42
<b><i>Kocka 2</i></b>	97.24	100.59	100.59	9781,37	0.418	0.99	0.42
<b><i>Kocka 3</i></b>	98.12	99.38	98.10	9751,17	0.417	0.95	0.44
<b><i>Kocka 4</i></b>	100.90	99.92	97.47	10081,93	0.417	0.98	0.43
<b><i>Kocka 12</i></b>	100.41	100.02	100.64	10043,01	2.272	1.01	2.25
<b><i>Kocka 13</i></b>	98.77	101.44	99.61	10019,23	2.264	1.00	2.26
<b><i>Kocka 14</i></b>	101.27	101.34	99.56	10262,70	2.284	1.02	2.24

Tablica 15: Dimenzije i mase uzoraka

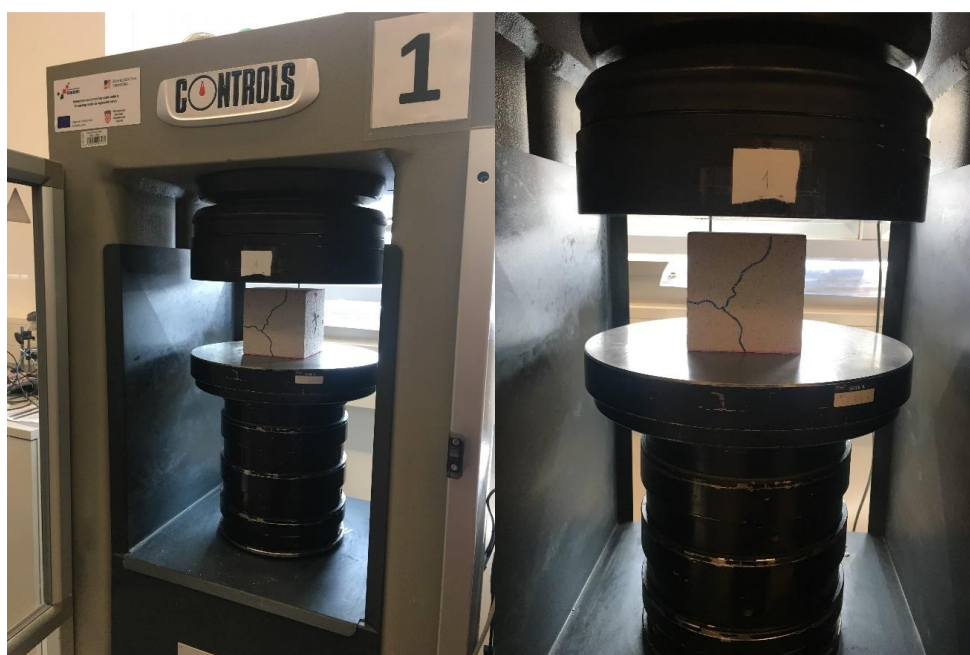
Kocke označene brojevima 1, 2, 3 i 4 su uzorci porobetona, a 12, 13 i 14 su uzorci MAB.

Tokom sušenja uzoraka, uzorci porobetona su djelomično popucali. Razlog tome je što su isti uzorci betona bili podvrgnuti procesima sušenja i vlaženja (ostavljeni u sušioniku na temperaturi od 105°C, što nije propisana temperatura za sušenje takvih uzoraka). Nastala mreža pukotina označena je plavom bojom na svakom uzorku i prikazana na Slici 33.



Slika 33: Uzorci porobetona sa iscertanim pukotinama dobivenim sušenjem na prevelikoj temperaturi

Prilikom ispitivanja tlačne čvrstoće, uzorci su simetrično centrirani na ploču za ispitivanje, na način da opterećenje koje se nanosi djeluje okomito na smjer lijevanja betona u kalup. (Slika 34.) Prilikom ispitivanja i usporedbom s podacima dostupnim od strane proizvođača zaključeno je da prethodno nastale pukotine nisu utjecale na rezultate tlačne čvrstoće.

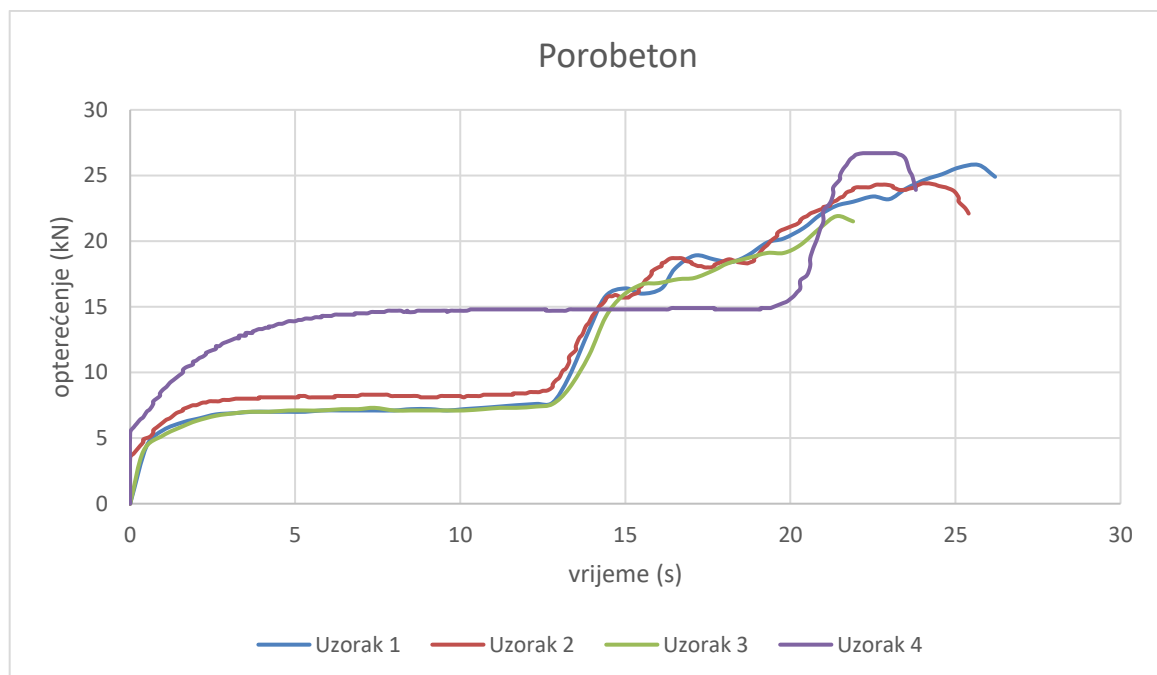


Slika 34: Uzorak postavljen na prešu za ispitivanje

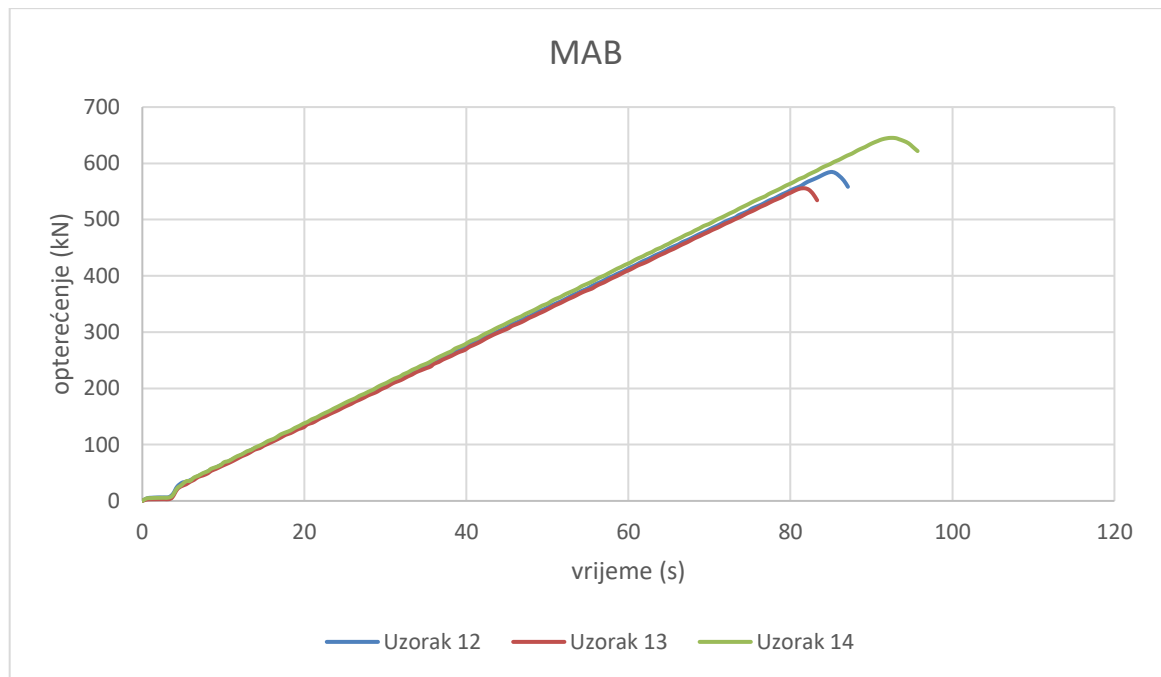
Početno opterećenje koje se nanosi iznosi najviše 30% kritičnog opterećenja, te se nanosi konstantnom brzinom od 0.1 MPa/s (za porobeton) ili 0.6+/-0.2 Mpa/s (za MBA). Nakon nanošenja početnog opterećenja, opterećenje se kontinuirano povećava za 10% sve do sloma.

Ispitivanje je provedeno na hidrauličkoj preši tvrtke Controls, maksimalnog pritiska od 3000 Kn.

U nastavku su iscratni grafovi za uzorke porobetona (Graf 4) i MAB (Graf 5).



Graf 4: Opterećenje u vremenu – porobeton



Graf 5: Opterećenje u vremenu – MAB

Dobivene vrijednosti prikazane su u tablici 16.

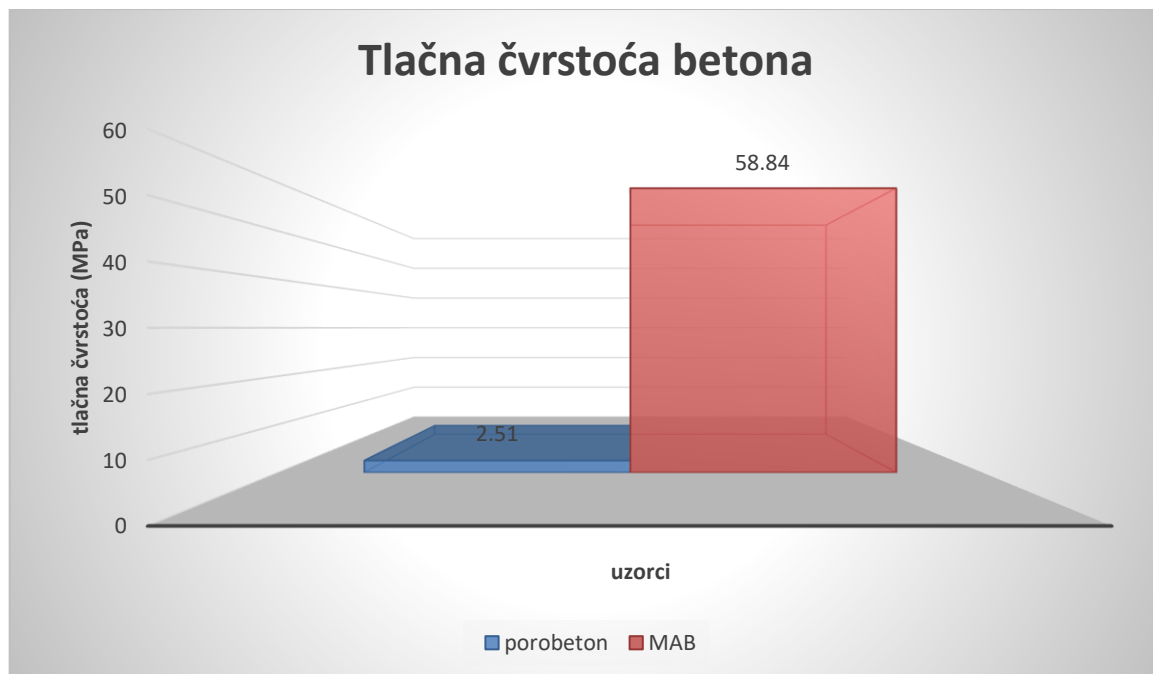
<i>Uzorak</i>	<i>A (mm<sup>2</sup>)</i>	<i>F (kN)</i>	<i>f<sub>c</sub> (MPa)</i>
<i>Kocka 1</i>	9907,40	25,80	2,60
<i>Kocka 2</i>	9781,37	24,40	2,50
<i>Kocka 3</i>	9751,17	22,10	2,26
<i>Kocka 4</i>	10081,93	26,70	2,67
<i>Kocka 12</i>	10043,01	584,80	58,23
<i>Kocka 13</i>	10019,23	555,80	55,48
<i>Kocka 14</i>	10262,70	645,3	62,82

Tablica 16: Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće porobetonu i MAB

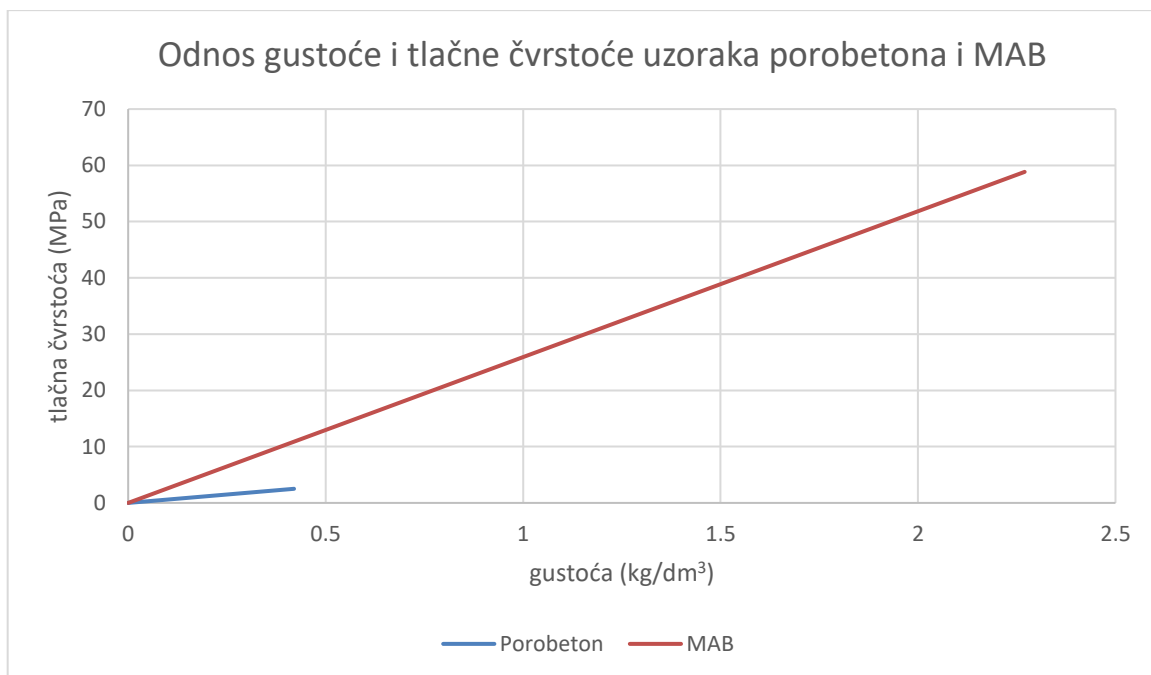
Srednja tlačna čvrstoća – porobeton :  $f_c = 2.51 \text{ MPa}$

Srednja tlačna čvrstoća – MAB :  $f_c = 58.84 \text{ MPa}$

Dobivenim rezultatima (Graf 6 i 7) jasno je vidljiva razlika tlačne čvrstoće porobetona u odnosu na MAB. Srednja tlačna čvrstoća ispitanih uzoraka porobetona iznosi 2.51 MPa što je za 95.73% posto manje u odnosu na srednju tlačnu čvrstoću uzoraka MAB koja iznosi 58.84 MPa.



Graf 6: Usporedba srednje tlačne čvrstoće betona na uzorcima porobetona i MAB



Graf 7: Prikaz odnosa gustoće i tlačne čvrstoće na uzorcima porobetona i MAB

Na slici 35. nalaze se ispitani uzorci, sa označenim pukotinama nakon sloma.



Slika 35: Označene pukotine nakon ispitivanja tlačne čvrstoće betona

## 6.6. Ispitivanje statičkog modula elastičnosti

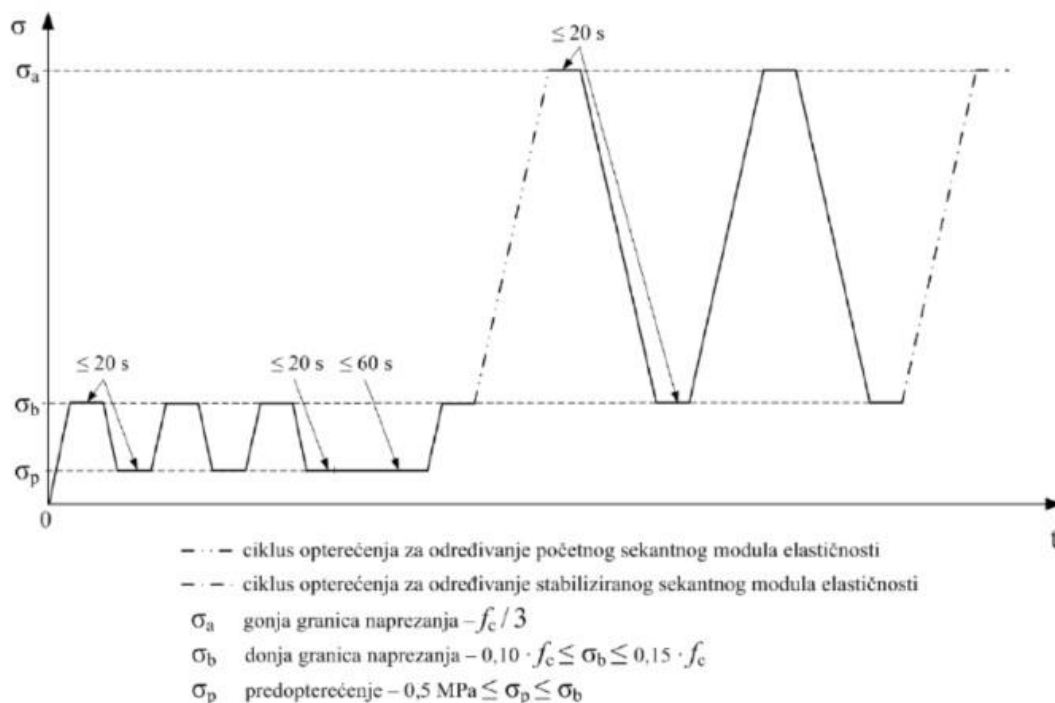
Prema normi HRN EN 12390 – 13 (za MAB) i HRN EN 1352 (za porobeton) ispitivanje statičkog modula elastičnosti izvodilo se na prizmama dimenzija 100 x 100 x 250 mm. Ispitivanje se provodilo na ukupno 6 prizmi, od kojih su tri MAB i tri porobeton. Prije ispitivanja uzorke smo očistili i na njih postavili ekstenziometre koji mjere deformacije uzoraka. Korišteni ekstenziometri su 55-C0222/F proizvođača CONTROLS čija je osjetljivost 0.02 mikrometra, uz mogućnost pomaka od +/- 1.5mm. (Slika 36.)



Slika 36: LVDT uređaji (linear variable differential transformer)

Uzorci su postavljeni u hidrauličku prešu, na sredinu ploče za ispitivanje. Prilikom ispitivanja uzoraka MAB, u uređaj se nanosi minimalno donje opterećenje  $\sigma_b$  (10%-15% tlačne čvrstoće  $f_c$ ), koje je iznosilo 6.54 MPa, konstantnom brzinom od 0.6+/-0.2 MPa/s i zadržava se najviše 20 sekundi. Zatim se vrijednost istom brzinom smanjuje na vrijednost  $\sigma_p$  (između 0.5 MPa i  $\sigma_b$ ), koje je iznosilo 1.0 MPa, također uz zadržavanje najviše 20 sekundi. Opterećenje se nanosi još dva puta na isti način. Nakon tri kruga nanošenja opterećenja na uzorak, opterećenje  $\sigma_p$  se zadržava još 60 sekundi tokom kojih se rade dvije provjere. Opisani ciklus opterećenja prikazan je na Slici 43. U prvoj provjeri se provjeravaju očitavanja sa svakog LVDT uređaja, na način da se u drugom i trećem krugu nesmiju razlikovati za više od 10%. U drugoj provjeri se provjerava da se očitavanja iz posljednjeg kruga ne razlikuju više od 20% srednje vrijednosti očitavanja sva tri kruga. Ukoliko provjere zadovoljavaju, nastavlja se sa ispitivanjem uzorka. Uz konstantnu brzinu, opterećenje se povećava do  $\sigma_b$  i zadržava 20 sekundi, nakon čega se povećava do  $\sigma_a$  ( $f_c/3$ , trećina tlačne čvrstoće uzorka) koji u našem slučaju iznosi 19.61 MPa, i zadržava najviše 20 sekundi.

Jednakom brzinom vrijednost se smanjuje do vrijednosti  $\sigma_b$  i postupak se ponavlja još dva puta. Očitavanja se zabilježavaju pri dosezanju  $\sigma_a$  u prvom krugu za početni sekantni modul elastičnosti ( $E_{c,0}$ ) i u trećem krugu za stabilizirani sekantni modul elastičnosti ( $E_{c,s}$ ).



Slika 37: Dijagram opterećenja za modul elastičnosti (MAB)

Prilikom ispitivanja uzoraka porobetona, u uređaj se nanosi minimalno donje opterećenje  $\sigma_a$  (5% tlačne čvrstoće  $f_c$ ), konstantnom brzinom od  $0.1 \pm 0.5$  MPa/s i zadržava se najviše 2 sekunde. Zatim se vrijednost istom brzinom povećava na vrijednost  $\sigma_b$  ( $f_c/3$ , trećina tlačne čvrstoće), također uz zadržavanje najviše 2 sekunde. Opterećenje se nanosi još jednom na isti način. Nakon dva kruga nanošenja opterećenja na uzorak, opterećenje  $\sigma_a$  se zadržava još 60 sekundi tokom kojih se rade dvije provjere. U prvoj provjeri se provjeravaju očitavanja sa svakog ekstenziometra  $u$ , na način da se u drugom i trećem krugu nesmiju razlikovati za više od 10%. U drugoj provjeri se provjerava da se očitavanja iz posljednjeg kruga ne razlikuju više od 20% srednje vrijednosti očitavanja sva tri kruga. Ukoliko provjere zadovoljavaju, nastavlja se sa ispitivanjem uzorka. Uz konstantnu brzinu, opterećenje se povećava do  $\sigma_b$  i zadržava 60 sekundi.

Napomena: za ispitivanje modula elastičnosti na uzorcima porobetona, bilo je potrebno povećati vrijednosti  $\sigma_a$  i  $\sigma_b$  jer uređaj na kojem se ispitivao modul elastičnosti ne očitava vrijednosti manje od 0.3 MPa. Prema normi HRN EN 1352,  $\sigma_a$  je trebao iznositi 0.13



MPa, što je premala vrijednost za uređaj, pa je ta vrijednost povećana na minimalnu vrijednost očitavanja uređaja, 0.3 MPa. Zbog povećanja vrijednost  $\sigma_a$ , srazmjerno povećati i je povećana i vrijednost  $\sigma_b$ , sa 0.83 MPa na 1.92 MPa.

Formula za izračunavanje sekantnog modula elastičnosti:

$$E_c = \frac{\sigma_b - \sigma_a}{\varepsilon_b - \varepsilon_a}$$

gdje je:

$\sigma_b$  = gornja granica naprezanja

$\sigma_a$  = donja granica naprezanja

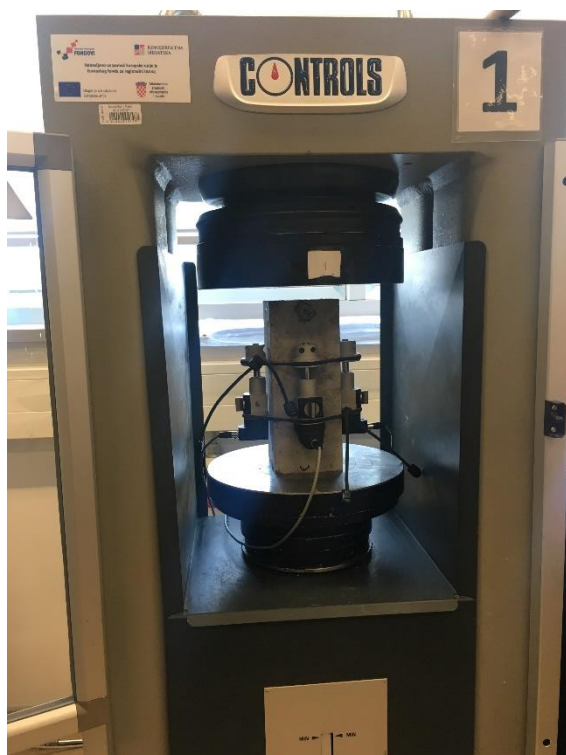
$\varepsilon_b$  = deformacija pri opterećenju  $\sigma_b$

$\varepsilon_a$  = deformacija pri opterećenju  $\sigma_a$

U nastavku je prikazana tablica sa masama uzoraka i proračunatim opterećenjima prema tlačnoj čvrstoći. Uzorci 6, 7, i 8 su uzorci porobetona, a uzorci 9, 10 i 11 su uzorci MAB.

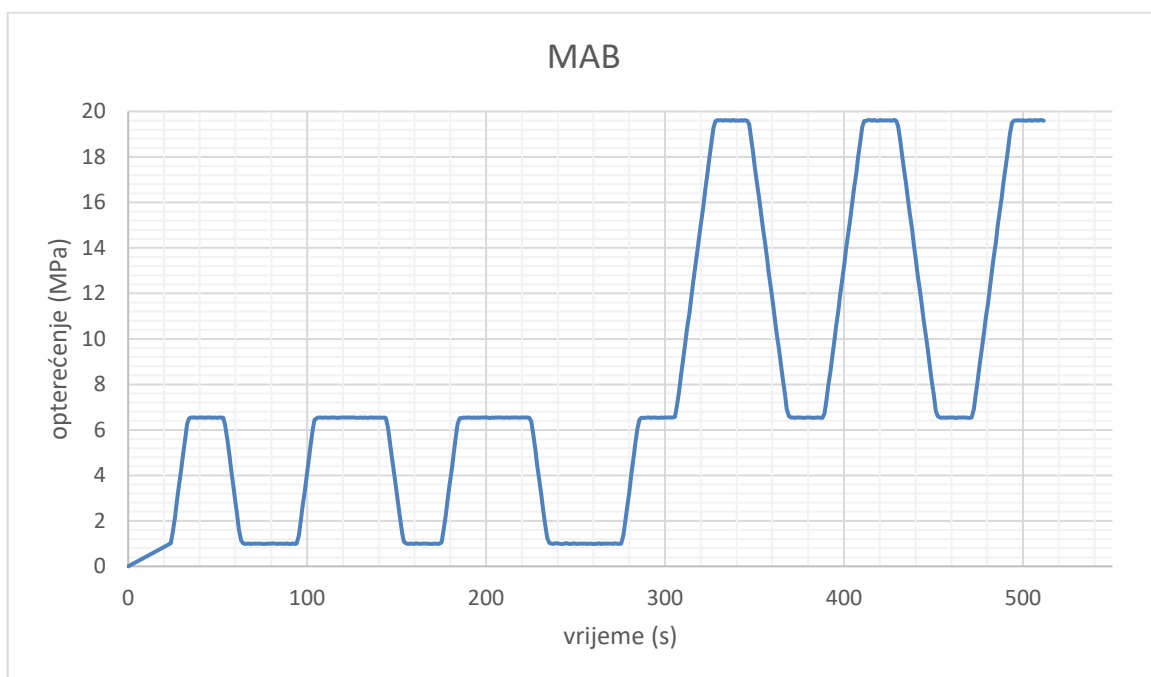
<i>Uzorak</i>	<i>Masa (kg)</i>	<i>Korištena opterećenja prilikom ispitivanja (MPa)</i>		
		$\sigma_a$	$\sigma_b$	$\sigma_p$
<i>Prizma 6</i>	1.05	0.3	1.9	/
<i>Prizma 7</i>	1.06	0.3	1.9	/
<i>Prizma 8</i>	1.03	0.3	1.9	/
<i>Prizma 9</i>	5.64	19.61	6.54	1.0
<i>Prizma 10</i>	5.84	19.61	6.54	1.0
<i>Prizma 11</i>	5.81	19.61	6.54	1.0

Tablica 17: Mase uzoraka i nanešena opterećenja

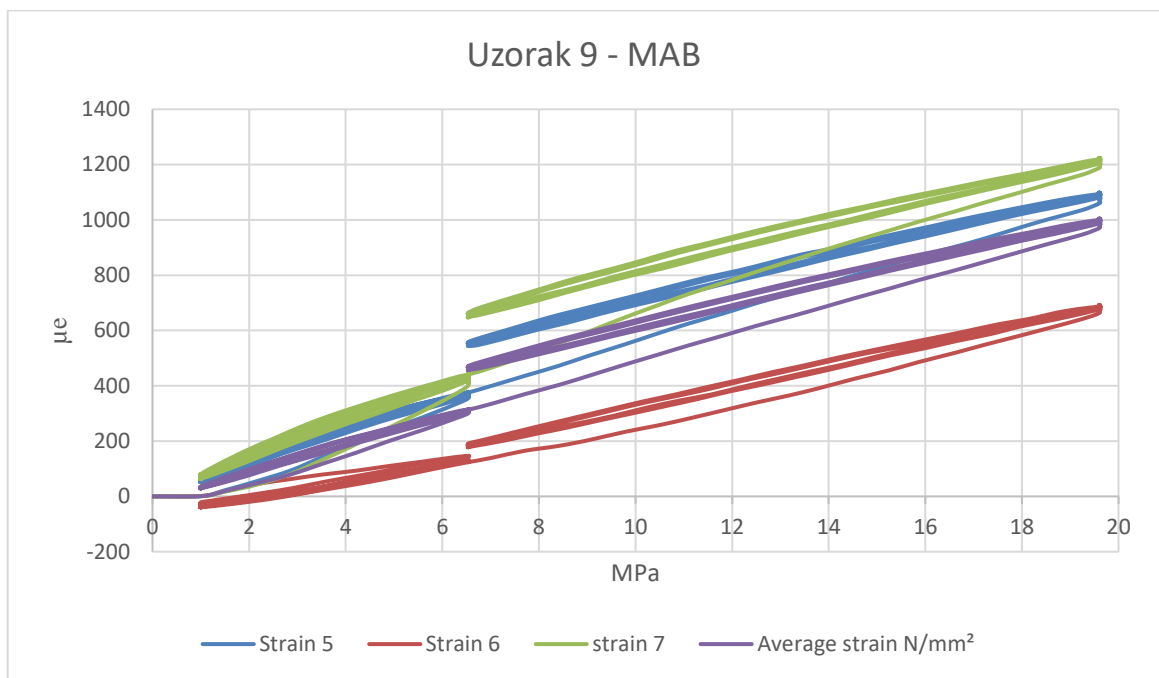


Slika 38: Postavljanje uzorka MAB u uređaj za ispitivanje statičkog modula elastičnosti

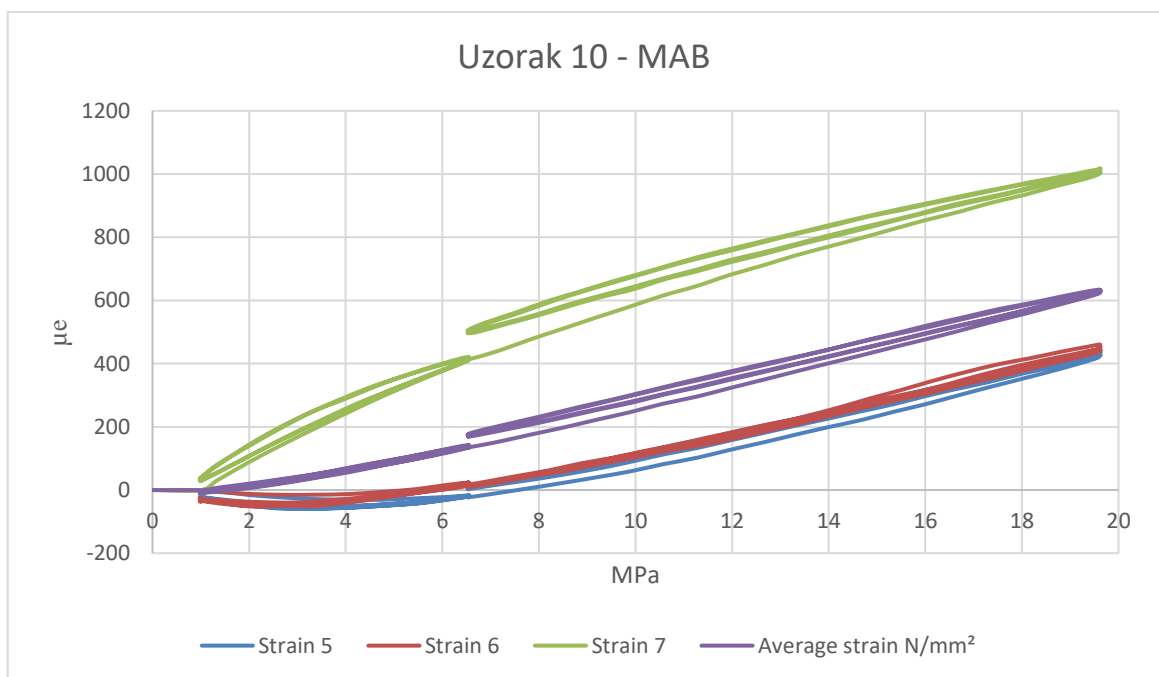
U nastavku su iscratni grafovi opterećenja u vremenu (Graf 8 i 12) te dijagram naprezanje-deformacija za svaki uzorak pojedinačno (Graf 9,10, 11, 13,14, 15) te dobivene srednje vrijednosti za dvije promatrane vrste betona.



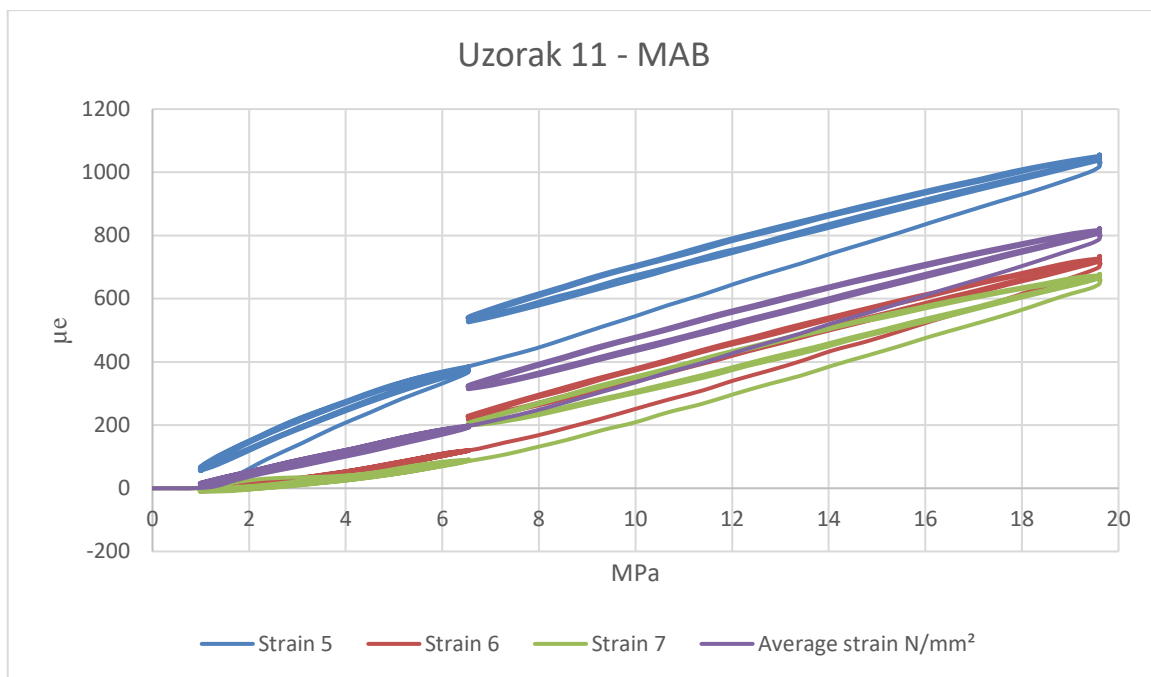
Graf 8: Opterećenje u vremenu - MAB



Graf 9: Naprežanje- deformacija - uzorak 9 – MAB



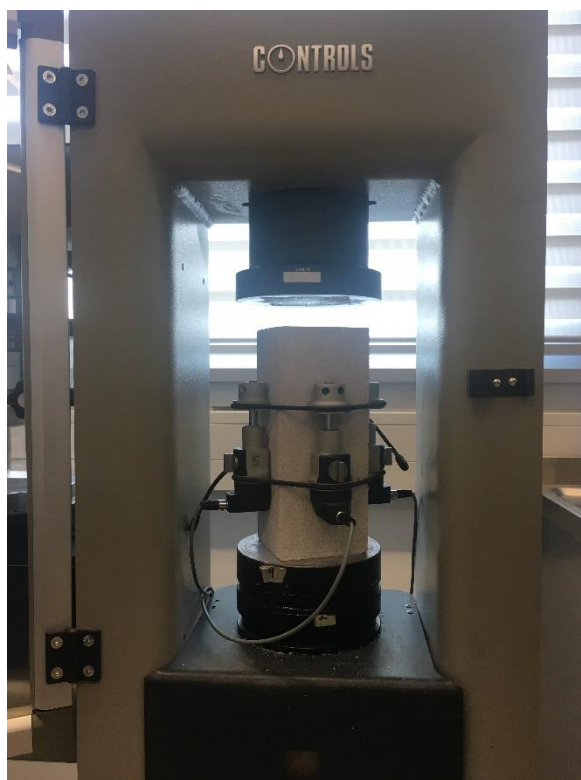
Graf 10: Opterećenje - deformacija - uzorak 10 – MAB



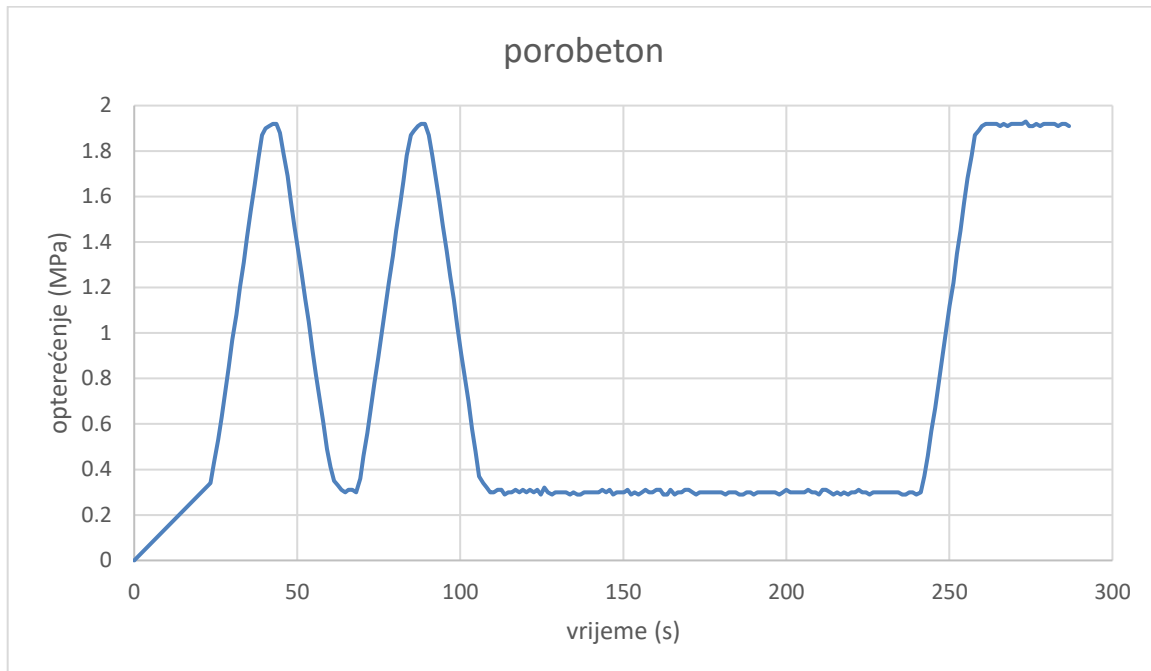
Graf 11: Opterećenje - deformacija - uzorak 11 – MAB

<i>Uzorci</i>	<i>Početni modul elastičnosti <math>E_{c,0}</math> (MPa)</i>	<i>Stabilizirani modul elastičnosti <math>E_{c,s}</math> (MPa)</i>	<i>Srednji stabilizirani modul elastičnosti (MPa)</i>
<i>Prizma 9</i>	18533.75	18953.02	<b>22145.68</b>
<i>Prizma 10</i>	26602.89	26592.07	
<i>Prizma 11</i>	21300.52	20891.94	

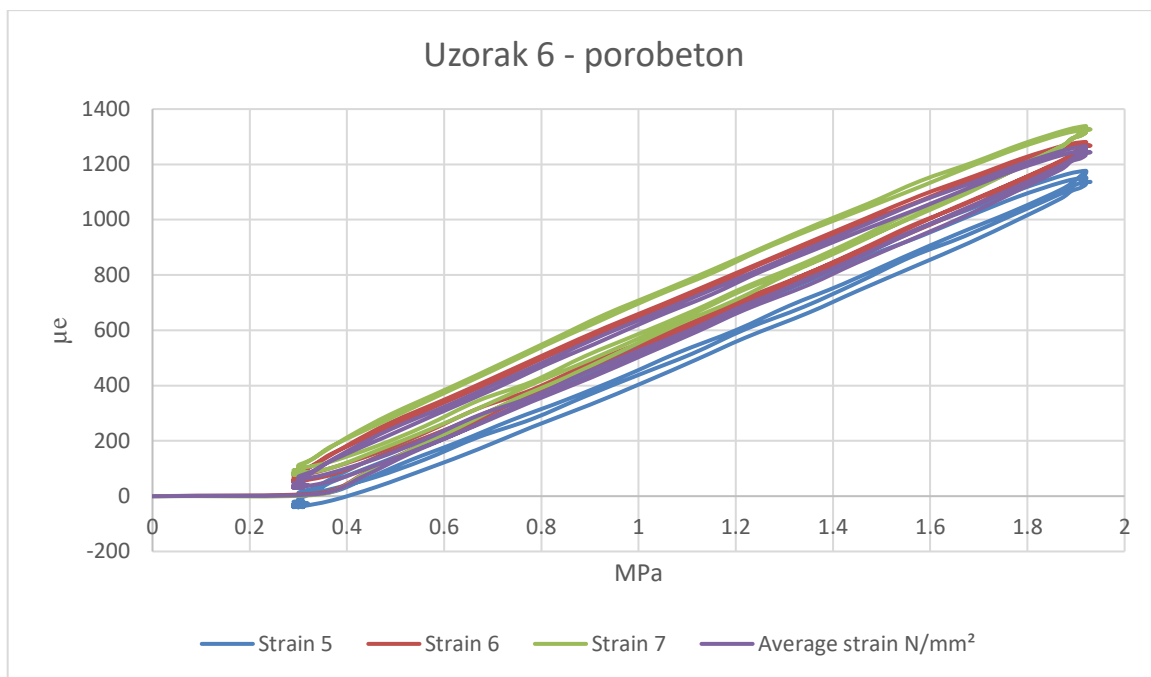
Tablica 18: Rezultati ispitivanja modula elastičnosti za MAB



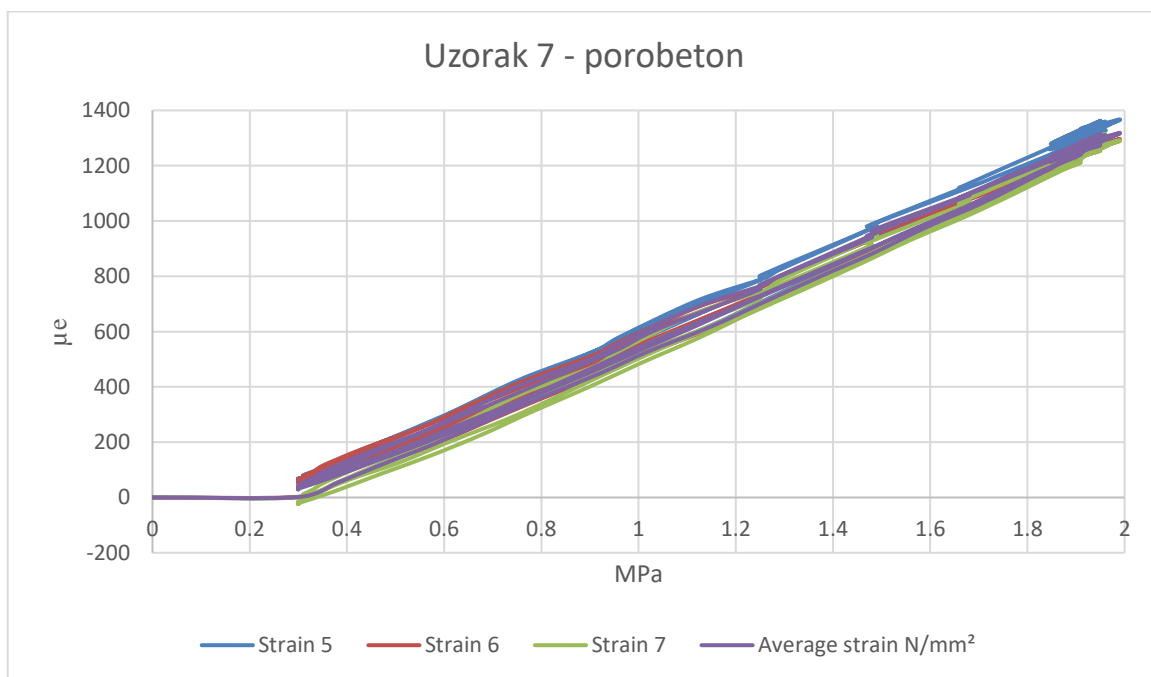
Slika 39: Postavljanje uzorka porobetona na uređaj za ispitivanje statičkog modula elastičnosti



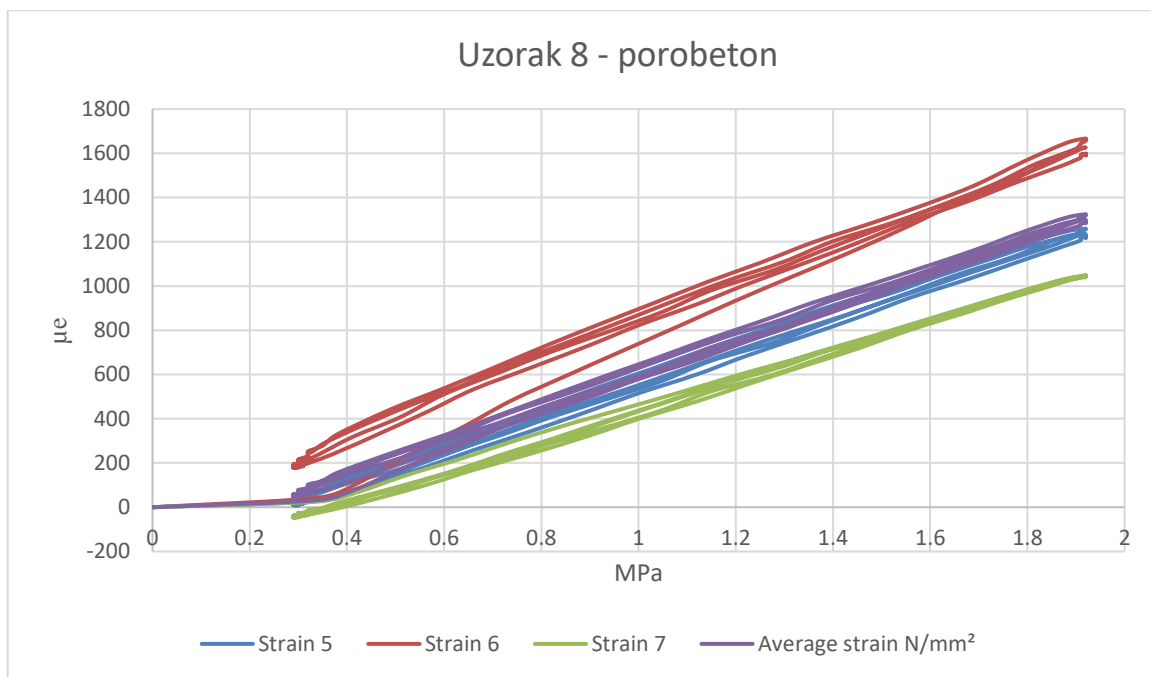
Graf 12: Opterećenje u vremenu - porobeton



Graf 13: Opterećenje - deformacija - uzorak 6 – porobeton



Graf 14: Opterećenje - deformacija - uzorak 7 – porobeton



Graf 15: Opterećenje - deformacija - uzorak 8 – porobeton

<i>Uzorak</i>	<i>Modul elastičnosti (MPa)</i>	<i>Srednji modul elastičnosti (MPa)</i>
<i>Prizma 6</i>	1339.14	<b>1321.53</b>
<i>Prizma 7</i>	1316.11	
<i>Prizma 8</i>	1309.33	

Tablica 19: Rezultati ispitivanja modula elastičnosti za porobeton

<i>Uzorak</i>	<i>Srednji modul elastičnosti (MPa)</i>
<i>Porobeton</i>	1321.53
<i>MAB</i>	22145.68

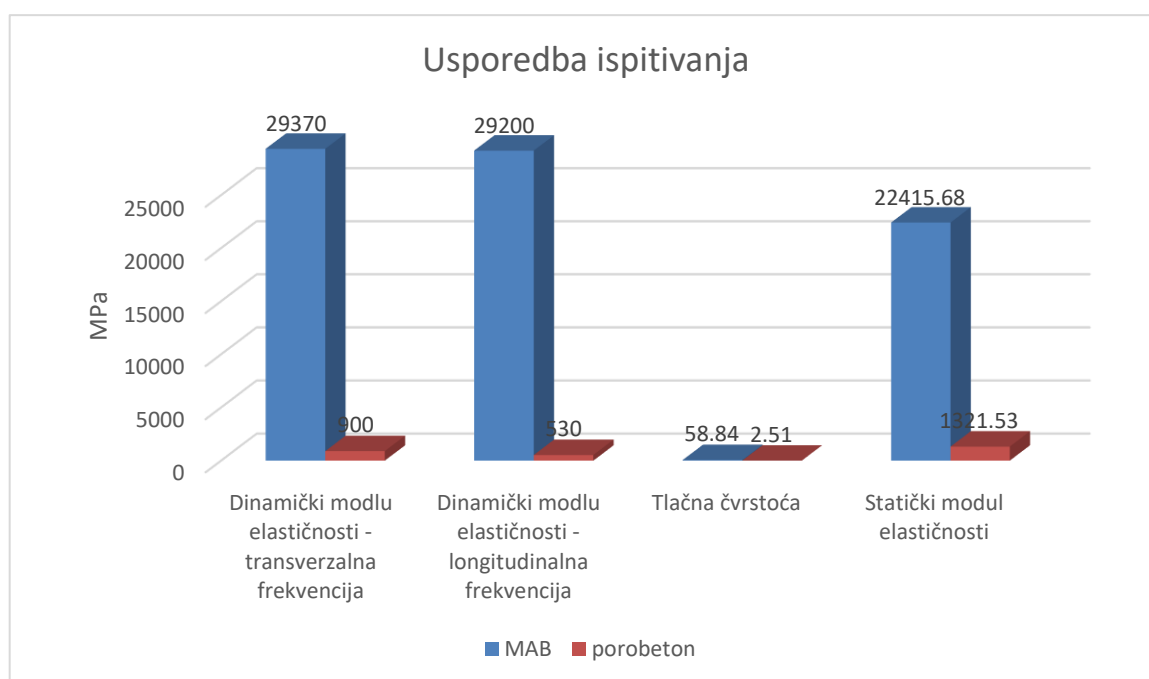
Tablica 20: Usporedba modula elastičnosti prema empirijskim izrazima

Ispitivanjem statičkog modula elastičnosti u hidrauličkoj preši, dobili smo znatnu razliku među promatranim vrstama betona. Rezultati prikazuju da statički modul elastičnosti porobetona iznosi 1321.53 MPa, što je za 94.03% manje od statičkog modula elastičnosti MAB, koji iznosi 22145.68 MPa.

### 6.7. Rezultati svih ispitivanja

<i>Uzorak</i>	<i>Dinamički modul elastičnosti (MPa)</i>		<i>Tlačna čvrstoća (MPa)</i>	<i>Statički modul elastičnosti (MPa)</i>	<i>Gustoća (kg/dm<sup>3</sup>)</i>
	<i>Longitudinalna frekvencija</i>	<i>Transverzalna frekvencija</i>			
<b><i>MAB</i></b>	29200.00	29370.00	58.84	22415.68	2.27
<b><i>Porobeton</i></b>	530.00	900.00	2.51	1321.53	0.43

Tablica 21: Usporedba rezultata dobivenih ispitivanjima



Graf 16: Dijagram dobivenih rezultata



Iz dobivenih rezultata (Tablica 21 i Graf 16) jasno je vidljivo znatno odstupanje u gotovo svakom provedenom ispitivanju među uzorcima porobetona i MAB.

Dobivenim rezultatima jasno je vidljiva razlika gustoće porobetona u odnosu na MAB. Srednja gustoća ispitanih uzoraka porobetona iznosi  $0.42 \text{ kg/dm}^3$  što je za 81.06% posto manje u odnosu na srednju gustoću uzoraka MAB koja iznosi  $2.27 \text{ kg/dm}^3$ .

Mđutim, kada bi omjer gustoće i tlačne čvrstoće uspoređivali među promatranim betonima, dobili bi omjer od 96.14% za MAB, i 83.27% za porobeton. Time zaključujemo da porobeton obzirom na svoju gustoću pokazuje također veoma dobra svojstva.

## 7. ZAKLJUČAK

U ovome je radu obrađivano eksperimentalno ispitivanje betonskih prizmi i kocaka porobetona (Ytong blokova) i MAB (beton armiran čeličnim i sintetičkim vlaknima). Mikroarmirani beton u svom sastavu sadrži kvarcni pijesak, agregat s dvije frakcije maksimalnog promjera 8 mm, čelična (Dramix) i sintetička (Verstaerkung Fiber Association) vlakna, superplastifikator (Glenyum sky 629) i cement CEM II/A-LL 42.5R. Porobeton je gotovi proizvod kupljen za potrebe ispitivanja, proizvođača Ytong. Izvođenjem eksperimentalnih ispitivanja modela betonskih prizmi i kocki (MAB i porobeton) svrha je dobiti dinamički modul elastičnosti, tlačnu čvrstoću, statički modul elastičnosti te vodoupojnost, kako bi dobili jasne razlike među promatranim vrstama betona.

Kroz cijeli proces ispitivanja vidljivo je kako beton armiran čeličnim i sintetičkim vlaknima daleko nadmašuje porobeton kako u modulima elastičnosti, tako i u tlačnoj čvrstoći. Promatrani betoni se razlikuju od samog početka proizvodnje, sastava, mase i gustoće. Vidjeli smo da je vodoupojnost porobetona također visoka u odnosu na beton armiran čeličnim i sintetičkim vlaknima. Razlog svemu tome je različita mikrostruktura ove dvije vrste betona. Porobeton je materijal vrlo velike poroznosti, šupljikavosti, što proizlazi iz same njegove proizvodnje. To je materijal koji sadrži veliku količinu pora, što doprinosi smanjenju elastičnosti i čvrstoće. Povećanjem vodocementnog omjera i dodataka aeranata, dolazi do povećanja poroznosti, a samim time i smanjenju tlačne čvrstoće. Mikroarmirani beton ima izrazito heterogenu i kompleksnu mikrostrukturu. Samim dodavanjem hibridnih vlakana u procesu proizvodnje povećava se tlačna i vlačna čvrstoća betona.

Na kraju zaključujemo da se ove dvije vrste betona nemogu takmičiti u svojstvima kao što su tlačna čvrstoća i moduli elastičnosti. Svaka vrsta posjeduje svoje prednosti i mane, a korištenje ovih betona ima različitu primjenu. Porobeton je beton koji se upotrebljava pri zidanju pregradnih zidova, osiguravanja zvučne i toplinske izolacije, a veliku primjenu počeo je imati pri izvedbi pješačkih staza, kolničkih prilaza, parkirališta, retencijskih polja i sl., zbog svoje velike moći upijanja (može služiti kao suhi spremnik). Beton armiran vlaknima masivan je beton, velike gustoće, što je pozitivno pri izvedbi hidrotehničkih konstrukcija s jakim i abrazivskim opterećenjem, kolničkih površina zračnih luka i sl.

## 8. LITERATURA

- [1] Bjegović, D; Štirmer, N, Teorija i tehnologija betona, Građevinski fakultet Sveučilišta, Zagreb, 2015.
- [2] Kumar Mehta, P; J. M. Monteiro, Paulo, Concrete: Microstructure, Properties, and Materials, Third edition, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California at Berkeley
- [3] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Hidroelektrana\\_Itaipu](https://hr.wikipedia.org/wiki/Hidroelektrana_Itaipu)
- [4] Gukov, I, Betonske konstrukcije I (predavanja), Zagreb, 2017.
- [5] Lovrić, Mislav, Laki samozbijajući beton s dodatkom mljevene opeke, Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Split, 2014.
- [6] <https://www.bauhaus.hr/ytong-zidna-ploca-zp10-62-5x20x10-cm.html#pid=2>
- [7] [https://www.grad.unizg.hr/download/repository/metode\\_ispitivanja\\_cvrstoce.pdf](https://www.grad.unizg.hr/download/repository/metode_ispitivanja_cvrstoce.pdf)
- [8] Banjad Pečur, Ivana, Primjena nerazornih ispitivanja u građevinarstvu, Hrčak Portal znanstvenih časopisa Republike Hrvatske – Srce, 2009.
- [9] Jerčinović, Ana, Određivanje pouzdanosti nerazorne i polurazorne metode ispitivanja tlačne čvrstoće betona, Diplomski rad, Sveučilišni diplomski studij Građevinarstvo, Rijeka, 2015.
- [10] [https://www.grad.unizg.hr/download/repository/metode\\_ispitivanja\\_cvrstoce.pdf](https://www.grad.unizg.hr/download/repository/metode_ispitivanja_cvrstoce.pdf)
- [11] Mrduljaš, Branka, Doprinos karakterizaciji svojstava betona izloženog požaru, Sveučilište u Zagrebu, 2015.
- [12] Malhotra, V.M.; Carino, N.J., Nondestructive testing of concrete, 2004.
- [13] C 215-02, Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens
- [14] Polančec, Š, Odnosi naprežanja i deformacija kod ispitivanja betonskih prizmi, Varaždin, 2015.
- [15] [https://en.wikipedia.org/wiki/Permeable\\_paving](https://en.wikipedia.org/wiki/Permeable_paving)
- [16] <https://spajic.com/sr/>
- [17] [http://www.lorencic.hr/polipropilenska-vlakna-eurofiber\\_09-8-1\\_3.htm](http://www.lorencic.hr/polipropilenska-vlakna-eurofiber_09-8-1_3.htm)

- [20] Seferović, E; Šandrk Nukić, I; Mračkovski, D; Macan, D, Armiranje mlaznog betona makrosintetičkim vlaknima, Varaždin, 2009.
- [21] Beton armiran mikro vlaknima s kvarcnim pijeskom i silikatnom prašinom, Laboratorijske vježbe, Građevinski fakultet u Rijeci, Rijeka, 2018./2019.
- [22] [https://www.ytong.hr/fizikalno\\_mehani\\_ka\\_svojstva\\_.php](https://www.ytong.hr/fizikalno_mehani_ka_svojstva_.php)
- [23] Hamad, Ali. J, Materials, Production, Properties and Application od Aerated Lightweight Concrete: Rewiew, Iraq, 2014.
- [24]<http://www.gradimo.hr/clanak/mikroarmirani-beton-pomice-granice-primjene-cementa/86693>
- [25] [https://www.grad.unizg.hr/\\_download/repository/6\\_TGV\\_beton1.pdf](https://www.grad.unizg.hr/_download/repository/6_TGV_beton1.pdf)