MOGUĆNOST MODELIRANJA SVOJSTAVA BETONA U FUNKCIJI POVEĆANJA TRAJNOSTI

Dragica JEVTIĆ

PREGLEDNI RAD
UDK: 666.972.5.001.575:691.32 = 861

1 UVOD

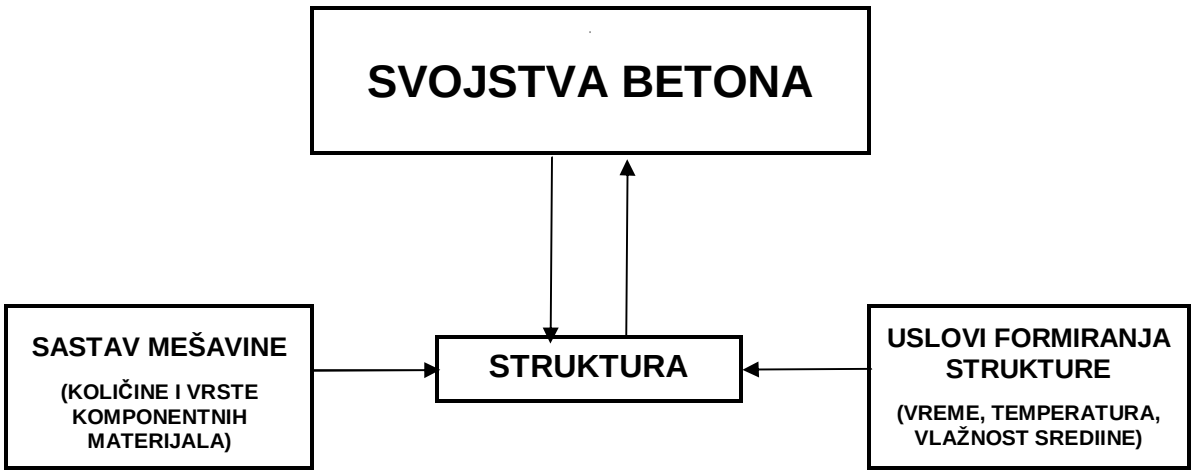
Trajnost betona i betonskih konstrukcija ostvaruje se pravilnim projektovanjem konstrukcija, odgovarajućim izborom svih komponentnih materijala u okviru betona, kao i pravilnim izvođenjem i održavanjem konstrukcija. Drugim rečima, betonske konstrukcije treba projektovati tako da se u očekivanim - poznatim uslovima konkretne sredine obezbedi dovoljna sigurnost i upotrebljivost bez visokih troškova održavanja i popravke. Traženo svojstvo trajnosti betona zavisi svakako od veka upotrebljivosti konstrukcije, od mogućeg budućeg načina korišćenja konstrukcije, od posebnih zaštitnih mera, planiranog održavanja tokom upotrebe kao i od eventualnog otkazivanja u posebnim lokalnim uslovima. U praksi, postignut nivo trajnosti betona i betonskih konstrukcija zavisi od simultanog delovanja ovih, navedenih faktora. Analitičko predviđanje veka upotrebljivosti konstrukcija bazira na procesima degradacije materijala u konkretnoj korozionoj sredini, a korozione sredine su, pak, podeljene na više stepena izloženosti s obzirom na vrstu i karakter oštećenja. Tako se sa priličnom tačnošću može izraditi matematički model veka upotrebljivosti konstrukcije, koji će obuhvatiti sve relevantne faktore (potrebe korisnika, uzroke degradacije, mehanizme dejstva, prethodna ispitivanja, izlaganja i procene). Postignuti nivo trajnosti betona u praksi je uvek proizvod više faktora: projektnog rešenja, primenjenih materijala, načina izvođenja i kontrole kvaliteta kao i strategije menadžmenta i održavanja.

Savremena nauka o materijalima tretira beton kao kompozit tipa aglomerata, tj. kao veštački materijal koji nastaje očvršćavanjem mešavina vode i različitih materijala tipa agregata (granulata, materijala za ispunu, inertnih materijala) i raznih veziva. Kombinovanje komponentnih materijala, u ovom slučaju, podrazumeva njihovo međusobno spajanje u jedan sistem, ne putem nekih mehaničkih spojnih sredstava, već isključivo uspostavljanjem određenih atomskih veza, odnosno dejstvom različitih međumolekulskih sila. Svojstva betona u opštem slučaju su funkcija izvanredno velikog broja uticajnih faktora. Ona zavise od karakteristika primenjenih komponenata - agregata, cementa, vode i eventualno primenjenih dodataka betonu, od kvantitativnih odnosa ovih materijala u masi svežeg betona, od niza tehnoloških faktora, od postupka izrade konkretnog betonskog elementa, od uslova eksploatacije itd. Međutim, bez obzira na kompleksnost pitanja o kojima je reč, danas je nepobitno utvrđeno da najveći broj svojstava betona, i to ne samo betona u očvrslom stanju već i svežeg betona, zavisi od ostvarene strukture. S druge strane, pak, dosadašnja istraživanja na ovom polju ukazuju da struktura svežeg i očvrslog betona, osim od upotrebljenih komponenata, zavisi i od uslova pod kojima se to formiranje odvija , tj. da na formiranje strukture bitno utiču parametri vreme, temperatura i vlažnost sredine. Napred iskazana zavisnost "sastav-struktura - svojstva betona", koja načelno važi kako za svež tako i za očvrsli beton, a koja predstavlja i osnovu tzv. strukturalističkog koncepta teorije i tehnologije betona, može se šematski prikazati na način dat na slici 1, [1].

Betonske konstrukcije izložene su u eksploataciji različitim destruktivnim uticajima koji delujući na konstruktivne materijale - beton i armaturu - bitno opredeljuju vek trajanja objekata. To znači da se tokom eksploatacije objekata u pojedinim sredinama, ove sredine mogu ponašati agresivno u odnosu na date objekte, tako da u opštem slučaju, kao rezultat interakcije sredina-objekat, može da dođe do pojave vrlo značajnih oštećenja, pa i potpunih razaranja konstrukcija. Ovakve pojave se, bez obzira na mehanizam njihovog nastanka, najčešće definišu opštim nazivom **korozija**. Ukupni efekti navedenih destruktivnih procesa, dakle, zavise od karakteristika predmetne agresivne sredine, ali, isto tako, oni su i funkcija unutrašnje otpornosti upotrebljenih materijala (betona i čelika).

Kada je reč o betonskim konstrukcijama može se reći da one u najvećem broju slučajeva mogu da budu

Adresa autora:
Prof. dr Dragica Jevtić, dipl.inž.tehn.
Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu,
Bulevar kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd, Srbija



Sl. 1. Funkcionalna zavisnost svojstva betona - sastav - struktura

tako koncipirane (po konstrukcijskom rešenju i upotrebljenim materijalima) i izvedene, da poseduju sopstvenu (unutrašnju) otpornost prema pojedinim agresivnim uticajima. To znači da se na području betonskih konstrukcija samo u retkim i specifičnim slučajevima moraju primenjivati određena rešenja spoljašnje zaštite konstrukcija, što podrazumeva korišćenje nekih posebnih zaštitnih materijala (površinski premazi, oblaganja i dr,). Međutim, da bi se, u svakom konkretnom slučaju, mogla doneti odluka o izvođenju ili neizvođenju ovih posebnih zaštita, treba u potpunosti determinisati karakteristike date sredine, ali, osim toga, treba i potpuno ovladati funkcijom korozione otpornosti betona, kao i funkcijom korozione otpornosti armature - čelika. Pod ovim se u opštem slučaju podrazumeva poznavanje niza uticajnih parametara, a to su u opštem slučaju:

– hemijske, fizičke i mineraloške karakteristike agregata,

– hemijske, fizičke i mineraloške karakteristike cementa, kao i hemijsko-mineraloške karakteristike odgovarajućeg cementnog kamena,

– zavisnost između sastava betonske mešavine i svojstava očvrslog betona (uticaj agregata, cementa, vode i eventualnih dodataka betonu na njegova fizičko-mehanička i druga svojstva),

– makro i mikrostruktura očvrslog betona,

– eventualni defekti i nehomogenosti strukture betona u okviru konstrukcijskih elemenata,

– mehanizam korozije čelika i korozione otpornosti pojedinih vrsta armature.

Zaštita materijala od korozije može da se obezbedi na više načina, pri čemu u opštem slučaju, metode zaštite mogu da budu neposredne i posredne. U neposredno sprovođenje zaštite, na primer, ubraja se već samo izvođenje konstrukcija od materijala otpornih na sredine u kojima se gradi. Pod posrednim metodama zaštite, pak, podrazumeva se svaka druga radnja koja ima za cilj povećanje trajnosti osnovnog materijala upotrebom proizvoda neke druge vrste.

Na osnovu svega napred izloženog može se izvesti zaključak da trajnost betona i betonskih konstrukcija zavisi od izvanredno mnogo uticajnih faktora. Međutim, bez obzira na kompleksnost pitanja o kome je reč, kao nesumnjiva ipak stoji činjenica da trajnost direktno zavisi od karakteristika upotrebljenih materijala (u slučaju cementa to znači od prirode produkata hidratacije), kao i od ostvarene strukture očvrslog betona [21].

2 KOMPONENTNI MATERIJALI I NJIHOVA KOROZIONA OTPORNOST

Prema evropskom standardu EN 12620 Agregat za beton, korišćeni agregat može biti prirodan, prerađen (veštački ili recikliran). Recikliran agregat je onaj agregat koji je nastao iz prerade neorganskog materijala i koji je prethodno korišćen u izgradnji.

Koroziona otpornost, pa samim tim i trajnost agregata je, kao i mnoge druge karakteristike, funkcija vrste konkretnog stenskog materijala. U tabeli 1. [2] prikazana su svojstva nekih najrasprostranjenijih vrsta kamenih materijala koji imaju primenu kao agregati za beton. Na osnovu prezentiranih karakteristika moguće je dati dosta pouzdanu ocenu njihove trajnosti u određenim uslovima eksploatacije.

Polazeći od svojstava stenskih materijala o kojima je ovde reč, može se uvek definisati i koroziona otpornost agregata. Ovo je u opštem slučaju moguće stoga što agregat, bez obzira da li se radi o prirodnom (rečnom, morskom) ili drobljenom, u suštini predstavlja skup manje-više istovrsnih čestica - fragmenata pojedinih stenskih masa. To znači da, načelno govoreći, trajnost agregata u okviru betona u prvom redu zavisi od otpornosti pojedinih zrna na delovanje određenih agresivnih agenasa. Međutim, kako nas u predmetnom slučaju otpornost agregata na delovanje pojedinih agresivnih faktora interesuje samo onoliko koliko je to od značaja za trajnost samog betona, zaključci o trajnosti betona nikada se ne mogu izvlačiti isključivo na bazi ispitivanja u okviru kojih će se determinisati mineraloško-petrografski sastav konkretnog agregata. Trajnost betona, vezano za prisustvo agregata u njemu, biće u opštem slučaju i funkcija niza drugih faktora, kao što su sadržaj organskih materija, upijanje vode, sadržaj hemijski štetnih primesa, sadržaj grudvi gline, sadržaj sitnih čestica, obavijenost zrna krupnog agregata prašinastim (glinovitim) česticama, postojanost na dejstvo mraza, ukupni sadržaj sumpora, hlorida i dr. Prema tome,

Tabela 1. Karakteristike nekih vrsta prirodnog kamena, [2]

Karakteristika	Vrsta kamena								
	Granit	Gabro	Andezit	Bazalt	Krečnjak	Dolomit	Peščar	Kvarcit	Mermer
Zapreminska masa (kg/m^3)	2500-2800	2700-3200	2200-2700	2600-3000	1800-2800	1800-2700	2000-2900	2600-2700	2800-2900
Poroznost (%)	0,2-3,5	0,3-1,5	0,5-5,5	0,1-1,0	0,4-2,0	0,5-20	1,0-18	0,1-0,5	0,4-2,0
Upijanje vode (%)	0,1-0,5	0,1-1,0	0,1-0,5	0,1-0,5	0,5-4,0	0,5-4,0	0,5-4,0	0,1-0,5	0,1-0,5
Skupljanje - bubrenje (%)	zanemarljivo	zanemarljivo	zanemarljivo	zanemarljivo	do 0,1	0,1-0,2	do 0,07	zanemarljivo	zanemarljivo
Čvrstoća pri pritisku (MPa)	100-250	150-250	80-220	100-200	15-200	100-200	30-300	250-400	60-300
Otpornost na habanje po Beme-u ($cm^3/50\ cm^2$)	< 10	< 8	< 10	< 10	30-40	30-40	30-100	20-40	< 5
Koeficijent termičke dilatacije ($1/°C \times 10^5$)	0,2-1,2	0,4-1,0	0,4-1,1	0,4-1,0	0,1-1,2	0,5-1,2	1,0-1,2	0,8-1,3	0,1-1,5
Postojanost na mrazu	dobra do odlična	dobra do odlična	dobra do odlična	dobra do odlična	slaba do vrlo dobra	slaba do vrlo dobra	slaba do vrlo dobra	dobra do odlična	dobra do odlična
Otpornost na atmosferske uticaje	dobra	dobra	dobra	dobra	rđava do dobra	dobra	rđava do dobra	vrlo dobra	rđava do dobra
Otpornost prema kiselinama	dobra	dobra	dobra	dobra	dobra	uglavnom slaba	dobra (sem krečnjačkog tipa)	vrlo dobra	slaba
Postojanost na temperaturnim promenama	dobra	dobra	dobra	dobra	dobra do 800°C	dobra do 800°C	uglavnom dobra	puca na cca 500°C	dobra do 800°C

trajnost betona u zavisnosti od korozione otpornosti i drugih svojstava agregata je veoma složena funkcija i ona se ne može zadovoljiti isključivo usvajanjem u mineraloško-petrografskom pogledu povoljnog agregata. Da bi se dobio beton zahtevane trajnosti, potrebno je, u okviru rešavanja problema, odrediti i celokupan kompleks ostalih karakteristika agregata, koje u suštini predstavljaju njegove uslove kvaliteta propisane odgovarajućim standardima.

Agregat je značajan u vezi trajnosti betona i sa aspekta odvijanja tzv. alkalno-agregatnih reakcija u očvrslom betonu čije posledice su toliko ozbiljne - manifestuju se najčešće u obliku potpunog razaranja betona.

U vezi sa prisustvom agregata u betonu su i potencijalne mogućnosti razvijanja destruktivnih procesa u betonu usled termičke nekompatibilnosti agregata i cementnog kamena, o čemu se takođe mora voditi računa.

Novi evropski standard za cement ENV 197-1 (2000) [3] daje klasifikaciju cementa prema tabeli 2.

Kao što se vidi cement (27 običnih tipova) je podeljen u pet kategorija:

CEM I portland cement,
CEM II portland-kompozitni cement,
CEM III metalurški cement,
CEM IV pucolanski cement, i
CEM V kompozitni cement.

U okviru tabele 2, u sastav cementa, kao što se vidi, mogu da uđu granulisana zgura visoke peći (oznaka *S*), silikatna prašina - čađ (oznaka *D*), prirodni (oznaka *P*) i industrijski (oznaka *Q*) pucolani, leteći pepeo - silikatni (oznaka *V*) i karbonatni (oznaka *W*), sagoreli škriljac (oznaka *T*), kao i krečnjak (oznaka *L*).

Koroziona otpornost cementnog kamena načelno je funkcija dva osnovna faktora - prirode produkata hidratacije i ostvarene strukture (poroznosti) cementnog kamena koji se formira tokom procesa hidratacije [4], [5], [6].

Ne ulazeći dublje u vrlo složen kompleks pitanja hemijske otpornosti cementa, ovde će se samo istaći da u reakcije sa spoljašnjim hemijskim agensima najčešće stupaju sastojci cementnog kamena $Ca(0H)_2$ i $3CaO{\cdot}Al_2O_3{\cdot}6H_2O$ (C_3AH_6) i da se, s obzirom na mehanizam agresivnog delovanja, korozija cementnog kamena u betonu može svesti na tri osnovna oblika:

– (1) rastvaranje i ispiranje kalcijumhidroksida (korozija usled delovanja tzv. mekih voda),

– (2) obrazovanje lakorastvorljivih jedinjenja pri međudejstvu hemijskih agenasa i cementnog kamena - rastvaranje dobijenih jedinjenja i njihovo ispiranje (kiselinska i magnezitna korozija, korozija usled delovanja mineralnih đubriva),

– (3) obrazovanje u porama cementnog kamena takvih jedinjenja koja zauzimaju veći prostor od polaznih supstanci, što izaziva pojavu unutrašnjih napona u cementnom kamenu i razaranje njegove strukture (sulfatna korozija i alkalno-agregatna reakcija).

Oblici korozije pod (1) mogu da se svedu na manju meru, pa čak i da se potpuno eliminišu upotrebom cemenata sa nižim sadržajem klinker minerala C_3S. Ispitivanja pokazuju da se u slučaju primene portland cementa najbolji rezultati dobijaju ako je sadržaj ovog minerala u cementu ispod 50%. Međutim, isto tako zadovoljavajući rezultati dobijaju se i kod primene cemenata sa preko *30%* pucolanskih dodataka, pa se stoga u našim uslovima za rešavanje ovakvih problema mogu preporučiti metalurški i pucolanski cementi, metalurški cementi sa dodatkom pucolana, kao i aluminatni cementi.

Tabela 2. Sastav i oznake cementa prema EN 197-1:2000

Sadržaj u procentima mase[1)]

Vrsta cementa	Naziv	Oznaka	Klinker	Granulisana zgura visoke peći	Silikatna čađ	Pucolan		Leteći pepeo		Sagoreli škriljac	Krečnjak	Manji dodatni sastojci[2)]
						prirodni	industrijski	silikatni	karbonatni			
			K	S	D[3)]	P	Q[4)]	V	W	T	L	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
I	Portland cement	I	95 do 100	–	–	–	–	–	–	–	–	0 do 5
II	Portland cement sa dodatkom zgure	II/A-S	80 do 94	6 do 20	–	–	–	–	–	–	–	0 do 5
		II/B-S	65 do 79	21 do 35	–	–	–	–	–	–	–	0 do 5
	Portland cement sa dodatkom silikatne čađi	II/A-D	90 do 94	–	6 do 10	–	–	–	–	–	–	0 do 5
	Portland cement sa dodatkom pucolana	II/A-P	80 do 94	–	–	6 do 20	–	–	–	–	–	0 do 5
		II/B-P	65 do 79	–	–	21 do 35	–	–	–	–	–	0 do 5
		II/A-Q	80 do 94	–	–	–	6 do 20	–	–	–	–	0 do 5
		II/B-Q	65 do 79	–	–	–	21 do 35	–	–	–	–	0 do 5
	Portland cement sa dodatkom letećeg pepela	II/A-V	80 do 94	–	–	–	–	6 do 20	–	–	–	0 do 5
		II/B-V	65 do 79	–	–	–	–	21 do 35	–	–	–	0 do 5
		II/A-W	80 do 94	–	–	–	–	–	6 do 20	–	–	0 do 5
		II/B-W	65 do 79	–	–	–	–	–	21 do 35	–	–	0 do 5
	Portland cement sa dodatkom sagorelog škriljca	II/A-T	80 do 94	–	–	–	–	–	–	6 do 20	–	0 do 5
		II/B-T	65 do 79	–	–	–	–	–	–	21 do 35	–	0 do 5
	Portland cement sa dodatkom krečnjaka	II/A-L	80 do 94	–	–	–	–	–	–	–	6 do 20	0 do 5
		II/B-L	65 do 79	–	–	–	–	–	–	–	21 do 35	0 do 5
	Portland-kompozitni cement	II/A-M	80 do 94	(6 do 20[5)])								
		II/B-M	65 do 79	(21 do 20[5)])								
III	Metalurški cement	III/A	35 do 64	36 do 65	–	–	–	–	–	–	–	0 do 5
		III/B	20 do 34	66 do 80	–	–	–	–	–	–	–	0 do 5
		III/C	5 do 19	81 do 95	–	–	–	–	–	–	–	0 do 5
IV	Pucolanski cement	IV/A	65 do 89	–	(11 do 35)				–	–	–	0 do 5
		IV/B	45 do 64	–	(36 do 55)				–	–	–	0 do 5
V	Kompozitni cement	V/A	40 do 64	18 do 30	–	(18 do 30)			–	–	–	0 do 5
		V/B	20 do 39	31 do 50	–	(31 do 50)			–	–	–	0 do 5

1) Vrednosti u tabeli se odnose na čestice cementa, bez gipsa i drugih aditiva.
2) Minorni dodatni sastojci mogu biti punilo ili bilo koji od glavnih sastojaka osim ako su uključeni kao glavni sastojci cementa.
3) Količina silikatne čađi je ograničena do 10 %.
4) Količina zgure koja nije iz visoke peći ograničena je do 15 %.
5) Količina punila je ograničena do 5 %.

Ako je reč o korozionim razaranjima usled delovanja agenasa navedenih pod (2), treba istaći da ovi agensi prvenstveno deluju na kalcijumhidroksid u okviru cementnog kamena, ali isto tako i na pojedine silikate kalcijuma, koji su takođe konstitutivni elementi cementnog kamena. S obzirom da se kiselinska korozija, magnezitna korozija i korozija pod dejstvom mineralnih đubriva odvijaju po identičnom mehanizmu, sva tri

navedena tipa korozije mogu se, kao u prethodnom slučaju, sprečiti primenom cemenata sa niskim procentom minerala C_3S, odnosno primenom cemenata sa većim sadržajem pucolanskih dodataka.

Sulfatna korozija,koja se odvija po mehanizmu opisanom pod (3) je vrlo česta u morskoj vodi, a može da se javi pod uticajem podzemnih voda, kao i nekih otpadnih industrijskih voda. Ovde samo treba napomenuti da morska voda, koja inače sadrži značajnu količinu sulfatnih jona, ne deluje toliko agresivno na cementni kamen kao neke obične sulfatne vode. Razlozi za ovo leže u činjenici da su u morskoj vodi prisutni i hlor-joni, pa u takvoj kombinaciji dolazi do usporenih reakcija sulfata [7], [8].

Za borbu protiv sulfatne korozije primenjuju se cementi sa niskim sadržajem minerala C_3A. To su u našim uslovima sledeći tipovi cemenata: sulfatnootporni portland cement, sulfatnootporni metalurški cement, aluminatni cement, supersulfatni cement.

Mada hemijska otpornost određenog cementa može potpuno pouzdano da se determiniše samo putem odgovaragućih laboratorijskih ispitivanja (koja su dugotrajna i koja bi u principu trebalo da se izvode i na betonima u okviru kojih će se koristiti predmetni cementi), globalna predstava o hemijskoj otpornosti cementa može da se dobije i na osnovu hemijskih analiza putem kojih će se utvrditi sadržaji jedinjenja SiO_2, Al_2O_3, CaO i dr. u nehidratisanom cementu. Na osnovu poznavanja količina ovih supstanci može se izračunati indeks hidrauličnosti cementa ili tzv. Vikatov indeks, koji predstavlja odnos kisele i bazične frakcije u cementu:

$$I = \frac{SiO_2 + Al_2O_3}{CaO + MgO} \quad (1)$$

Što je vrednost ovog indeksa veća, smatra se da je otpornost cementa prema hemijskoj agresiji veća. Na primer, kod aluminatnog cementa, koji se u opštem slučaju smatra za hemijski veoma otporan, vrednost *I* je uvek veća od 1,0. Međutim, kod portland cementa ("čistog") *I* je skoro uvek ispod 0,5 , pa je portland cement po pravilu najneotporniji od svih cemenata u odnosu na hemijske uticaje. Što se, pak, tiče cemenata sa dodacima zgure ili/i pucolana, oni imaju $0,5 < I < 1,0$, što znači da su oni otporniji od portland cementa, ali ne toliko otporni kao aluminatni cement [11].

Na osnovu prethodnih razmatranja, koja su se odnosila na korozionu otpornost agregata i cementnog kamena, mogu se izvesti i zaključci u vezi sa korozionom otpornošću betona. Naime, eksperimentalna ispitivanja pokazuju da ova otpornost nesumnjivo zavisi od pojedinačnih korozionih otpornosti agregata i cementnog kamena (od njihovog hemijskog sastava i strukturnih karakteristika), ali da je ona, isto tako, i funkcija ostvarene strukture betona, shvaćenog u smislu kompozita kod koga agregat i cementni kamen predstavljaju samo osnovne makrostrukturne komponente.

3 PARAMETRI STRUKTURE BETONA OD UTICAJA NA TRAJNOST

Struktura očvrslog betona je, načelno, rezultat dostizanja određenog stepena hidratacije cementa, tj. rezultat dovoljnog očvršćavanja betonske mešavine. Tok procesa formiranja strukture betona i njegovo trajanje zavise od mnogih faktora: od sastava svežeg betona, svojstva cementa, od eventualno prisutnih aditiva i dr.

Strukturu betona u opštem slučaju čine:

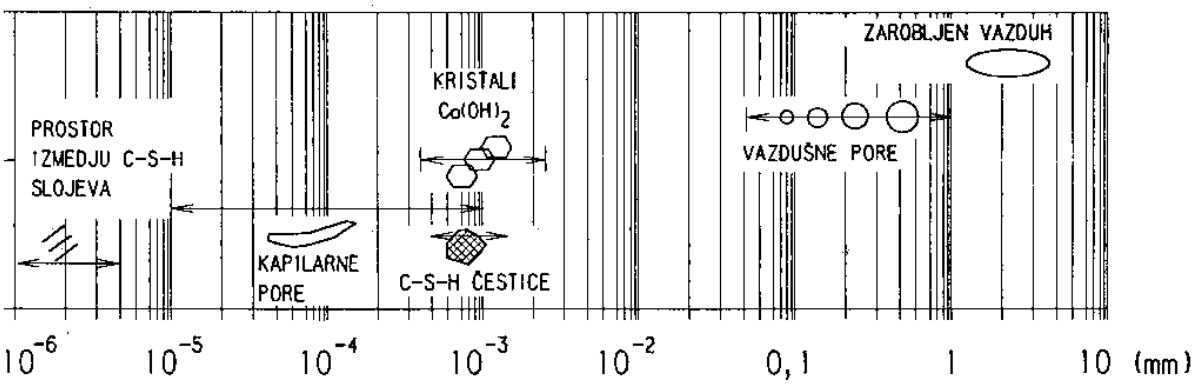
– makrostruktura - struktura dvokomponentnog sistema u čiji sastav ulaze malterska komponenta i krupan agregat

– mikrostruktura tj. struktura cementnog kamena i

– prelazna (tranzitna) zona između agregata i cementnog kamena.

U mikrostrukturi betona javljaju se strukturni elementi koji u najvećem procentu sačinjava cementni gel - skup submikrokristalnih čestica uglavnom hidrosilikata kalcijuma. Pored ovoga, u cementnom kamenu su prisutni i relativno krupni kristali kalcijum hidroksida, nehidratisana ili delimično hidratisana zrna cementa, kao i izvesna količina etringita. U cementnom kamenu su prisutni i "prazni" prostori - pore u gelu, kapilarne pore i šupljine i mehurići vazduha zaostali ili namerno uvučeni u cementni kamen. Na slici 2. date su dimenzije čvrste faze i pora u cementnom kamenu u okviru betona prema [1].

U ukupnoj poroznosti betona p, učestvuju kapilarna, gelska (osnovna poroznost) i zaostala poroznost Δp koja je posledica različitih faktora, kao što su neefikasno ugrađivanje, primena aeranata i drugo. Kapilarna i gelska poroznost mogu da se napišu u obliku:



Sl. 2. Dimenzije čvrste faze i pora u cementnom kamenu u okviru betona [1]

– kapilarna poroznost

$$p_k = 0{,}1 m_c \left(\frac{m_v}{m_c} - 0{,}4\, a_h \right) \%, \text{ za } \frac{m_v}{m_c} \geq 0{,}4\, \alpha_h \quad (2)$$

– pore u gelu

$$p_G = 0{,}016\, a_h m_c + 0{,}006\, a_h m_c = 0{,}022\, a_h m_c \,(\%) \quad (3)$$

gde m_c označava količinu cementa po kubnom metru betona, a_h stepen hidratacije cementa, a m_v/m_c vodocementni faktor.

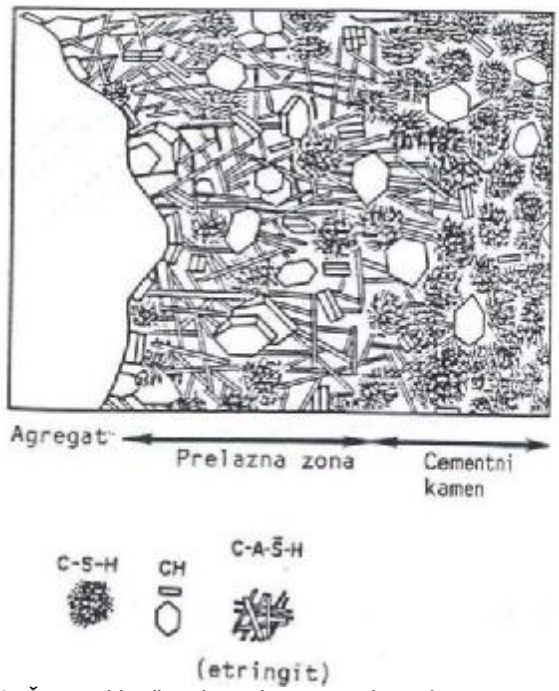
Ispisani izrazi na vrlo jasan način pokazuju kako se može modelirati mikrostruktura betona, odnosno kako se može regulisati njegova poroznost, pa samim tim i njegova svojstva, uključujući tu i trajnost betona. Kao što se vidi iz datih izraza, na gelsku poroznost se može vrlo malo uticati, pa se ona praktično mora prihvatiti kao neizbežna. Međutim, ostala dva sabirka u izrazu za ukupnu poroznost betona omogućavaju da se poroznost menja u vrlo širokim granicama i to u funkciji vodocementnog faktora, funkciji efikasnosti ugrađivanja, odnosno stepena zbijanja - kompaktiranja betona, kao i eventualno u funkciji primene nekog postupka "namernog" uvlačenja vazduha u strukturu betona. Korišćenjem svih navedenih mogućnosti, uvek se može dobiti takav nivo ukupne poroznosti koji će obezbeđivati ostvarivanje zahtevanog nivoa kvaliteta betona.

Kontaktni sloj između zrna agregata i cementnog kamena veoma je značajan za zajednički rad ovih mikrostrukturnih komponenata u sklopu ukupne mase betona. Širina ovog kontakta obično iznosi 0,03-0,06 mm (2-3 prečnika zrna cementa). Ova kontaktna zona se, po sastavu i svojstvima, bitno razlikuje od ostalog cementnog kamena, (sl. 3 i sl. 4) [14], [18].

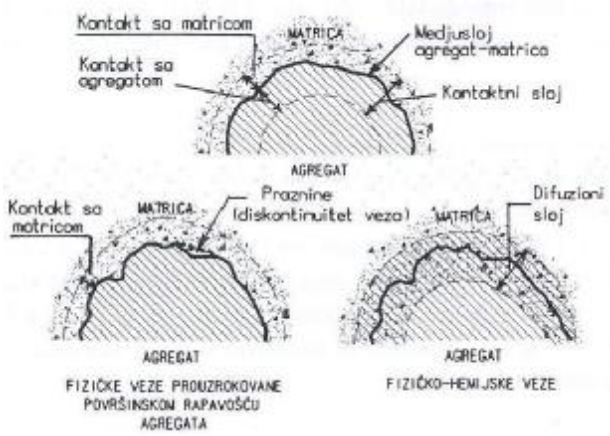
Povezivanje - srastanje zrna agregata sa cementnim kamenom tesno je povezano sa migracijom kalcijum-hidroksida koji se u vrlo velikom obimu deponuje na površinama zrna agregata i tu delom kristališe, a delom prelazi u kalcijumkarbonat. Ovi produkti deponovani na površinama zrna agregata uslovljavaju pojavu vrlo značajnih Vandervalsovih sila, koje predstavljaju osnovni faktor veze (athezije) agregat - cementni kamen. Ispitivanja su pokazala da kontaktna zona između agregata i cementnog kamena ima uvek nešto veću poroznost od ostale mase cementnog kamena, pa stoga ovu zonu uvek karakteriše veća vodopropustljivost u odnosu na sam cementni kamen i agregat. Kako se voda uvek kreće linijom najmanjeg otpora i kako se u okviru betona najintenzivnije kretanje vode zapaža baš u ovoj zoni, ova zona se stoga često naziva i tranzitnom zonom. S obzirom na fenomen kretanja vode kroz beton, kontaktna zona je posebno važna sa gledišta trajnosti betona; u okviru nje uvek su prisutni najveći pritisci leda (ako dođe do smrzavanja vode u pornom prostoru betona), a takođe su najintenzivnija i hemijska razaranja (ukoliko je u pornom prostoru prisutan neki tečan agresivni medijum).

Sa praktičnog aspekta, čvrstoća veze agregat-cementni kamen zavisi od prirode agregata, od njegove eventualne poroznosti, od hrapavosti površine, kao i od čistoće površine zrna. Ova veza ima velikog značaja u odnosu na pojedina svojstva betona (čvrstoća, vodonepropustljvost, otpornost na dejstvo mraza, termička stabilnost, hemijska otpornost i dr.), što je i razumljivo s obzirom na njenu povećanu poroznost, pa samim tim i niže mehaničke karakteristike.

Kako se danas uglavnom proizvode cementi sa mineralnim dodacima (zgura, pucolan), interesantno je na ovom mestu prikazati strukturu betona sa ovim dodacima.



Sl. 3. Šematski prikaz kontaktne zone između zrna agregata i cementnog kamena



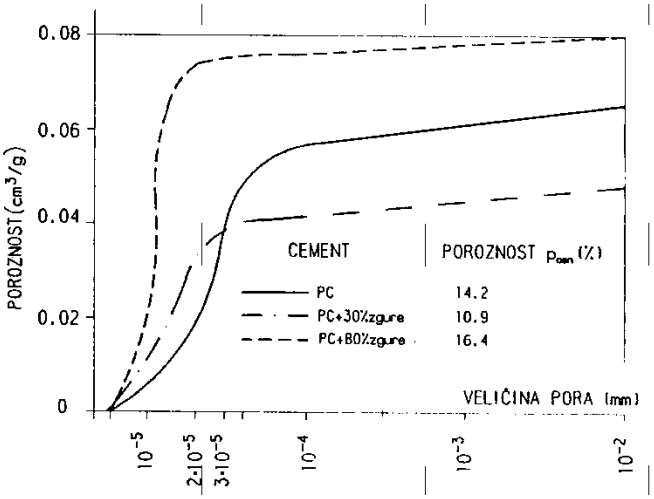
Sl. 4. Šematski prikaz međuzavisnosti između agregata i cementne paste u kontaktnoj zoni

Mikrostruktura betona sa cementima sa dodatkom zgure u principu je identična mikrostrukturi betona na bazi čistog portland cementa. Ispitivanja međutim, pokazuju da se pri primeni zgure kao dodatka cementu menja dimenzionalni raspored pora tako da se dobija veći procenat sitnijih pora. Pri ovome, međutim, kod cementa sa dodatkom zgure do 30% osnovna poroznost se smanjuje u odnosu na slučaj primene čistog portland cementa, dok se pri većim količinama zgure osnovna poroznost betona povećava u odnosu na beton sa čistim portland cementom. O ovome vrlo ubedljivo svedoče rezultati ispitivanja čiji se dijagram dobijen ispitivanjima daje na sl. 5 [17].

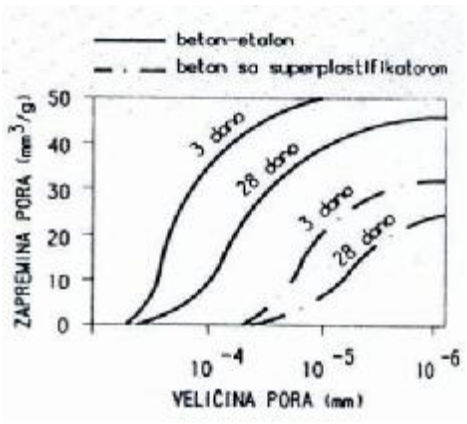
Za objašnjenje ovog fenomena neki autori uzimaju veliku reaktivnost zgure koja reaguje sa $Ca(OH)_2$, koji se stvara pri hidrataciji portland cementa, uz obrazovanje amorfnog kalcijumhidrosilikata.

Pri primeni dodatka betonu tipa superplastifikatora takođe se značajno menja raspored pora u mikrostrukturi betona, odnosno u cementnom kamenu. Prema ispitivanjima Mora i Mehte [16] primena superplastifikatora smanjuje procenat krupnijih pora povećavajući u izvesnoj meri sadržaj sitnih pora. Navedeni autori klasifikuju pore na krupne i sitne s obzirom na granicu od 10^{-4} mm, pri čemu po njima, krupne pore predstavljaju opasne pore koje snižavaju čvrstoću betona, a povećavaju njegovu paropropustljivost, vodo-propustljivost i dr. Rezultati ispitivanja ovih autora daju se u tabeli 3, koja jasno pokazuje da se pri starosti od 28 dana sadržaj krupnih pora u cementnom kamenu pri primeni superplastifikatora skoro dva puta smanjuje.

Isto tako, Monosi i Kolepardi [15] daju kumulativnu zapreminu pora u funkciji radijusa pora i to za cementnu pastu uz primenu superplastifikatora kao i za čistu cementnu pastu. Sa slike 6 može se videti da se dodatkom 2,5% superplastifikatora ukupna zapremina, kao i veličine pora značajno smanjuju, tako da superplastificirani cement u starosti od 3 dana ima manju poroznost nego čist (bez superplastifikatora) u starosti od 28 dana. Naravno, ovde se radilo o velikom smanjenju vodocementnog faktora od 0,55 kod cementne paste bez superplastifikatora, na 0,32 uz upotrebu 2,5% superplastifikatora, a pri količini cementa od 400 kg/m^3. Ovo smanjenje sadržaja vode dovodi do smanjenja sadržaja kapilarnih pora i uopšte zapremine pora u cementnom kamenu, što cementni kamen čini gušćim i prouzrokuje porast čvrstoće.



Sl. 5. Uticaj vrste cementa na dimenzionalni raspored pora [17]



Sl. 6. Uticaj superplastifikatora na raspored pora [15]

Tabela 3. Uticaj superplastifikatora na veličinu pora [16]

Tipovi cementnih pasta	Zapremina kapilarnih pora, cm^3/g			Pore, %	
	Ukupna zapremina	Sitne pore	Krupne pore	Krupne	Sitne
Referentna pasta	0,0720	0,0433	0,0287	40	60
Pasta sa dodatkom melamin kondenzata	0,0860	0,0663	0,0197	23	77
Pasta sa dodatkom naftalin kondenzata	0,0870	0,0692	0,0178	20	80

Alkalnost betona predstavlja vrlo efikasnu zaštitu čelika od korozije. To znači da ova zaštita zavisi kako od uslova sredine, tako i od veličina zaštitnih slojeva betona i strukture betona u okviru ovih slojeva. Korozija može da se obavlja bilo onda kada su ovi slojevi oštećeni (prsline), bilo u slučajevima kada oni imaju suviše veliku poroznost, ili kada su izvedeni od betona sa neadekvatnim (hemijski neotpornim) cementom. S obzirom na opasnost od korozije, izbor čelika predstavlja vrlo važan činilac trajnosti konstrukcija od armiranog i prednapregnutog betona. Kao veoma osetljiva na koroziju smatra se sva armatura, bez obzira o kakvim je čelicima reč, sa prečnicima $f \leq 4$ mm. Pored ovoga, na koroziju su vrlo osetljivi termički obrađeni čelici, kao i hladno obrađeni čelici, koji su stalno izloženi naponima zatezanja većim od 400 MPa. Svi ostali armaturni čelici, pak, mogu se smatrati kao manje osetljivi na koroziju [3].

Pri izboru materijala za beton takođe treba voditi i računa o zaštiti čelika. Najbolju zaštitu predstavlja beton na bazi portland cementa ili portland cemenata sa umerenim količinama dodataka zgure ili/i pucolana. Međutim, u slučajevima primene cemenata sa visokim procentima pucolanskih dodataka, vrlo često može nakon hidratacije da se dobije nedovoljna količina kalcijumhidroksida koja će obezbeđivati potreban stepen alkalnosti betona, pa u takvim slučajevima beton neće predstavljati dovoljno efikasnu zaštitu za armaturu.

Prema tome, prilikom izrade određenog elementa ili konstrukcije vrlo je bitno da se upotrebi dovoljno velik zaštitni sloj, da se usvoji dobar granulometrijski sastav agregata, da se odabere odgovarajući cement kako po vrsti tako i po količini i da se usvoji što je moguće niži vodocementni faktor. Naravno, pri ovome uvek treba voditi računa o mogućnosti pravilnog ugrađivanja (zbijanja, kompaktiranja) sveže betonske mase, kao i o negovanju betona koje sledi nakon ugrađivanja. Nega je vrlo važan elemenat postupka zaštite, pošto ukoliko ona nije zadovoljavajuća, u betonu, usled skupljanja, mogu da se jave prsline koje otvaraju put za agresiju. Ukoliko dođe do ovoga, otpočeće proces korozije, narušiće se veza između betona i čelika, čime će nosivost konstrukcije biti znatno ugrožena. Trajnost konstrukcije u znčajnoj meri zavisi od debljine i kvaliteta zaštitnog sloja betona oko armature.

4 KLASE IZLOŽENOSTI PREMA EN 206-1

Evropski standard EN 206-1:2000, "Beton-Deo 1: Specifikacija, svojstva, proizvodnja i kontrola saglasnosti", za razliku od važećeg Pravilnika BAB 87, veliku pažnju posvećuje danas vrlo aktuelnom aspektu trajnosti betona i betonskih konstrukcija [9]. U poglavlju "Klasifikacija" na prvom mestu i vrlo precizno definišu se Klase izloženosti prema delovanju sredine. Ove klase se, u opštem slučaju, rangiraju na bazi opisa uslova agresivnosti (korozivnosti) sredina i u sklopu toga uzimaju se u obzir i stepeni vlažnosti pojedinih sredina. Mada klase izloženosti usvojene u predmetnom standardu još uvek ne predstavljaju "klase trajnosti betona", ipak pristup o kome je reč nesumnjivo predstavlja vrlo značajan napredak na području rešavanja pitanja trajnosti betona i betonskih konstrukcija.

Napred pomenute klase izloženosti su predstavljene u okviru tabele 4, a podeljene su na šest kategorija i to na sledeći način:

1. Nema rizika od korozije ili agresije (klasa sa oznakom X0)
2. Korozija prouzrokovana karbonatizacijom (klase sa oznakama XC1, XC2, XC3 i XC4)
3. Korozija prouzrokovana hloridima koji ne potiču iz morske vode (klase sa oznakama XD1, XD2 i XD3)
4. Korozija prouzrokovana hloridima iz morske vode (klase sa oznakama XC1, XC2 i XC3)
5. Zamrzavanje/odmrzavanje sa ili bez agenasa za odmrzavanje (klase sa oznakama XF1, XF2, XF3 i XF4)
6. Hemijska izloženost (klase sa oznakama XA1, XA2 i XA3).

Uz navedene klase izloženosti pomenuti dokument sadrži i maksimalan sadržaj hlorida u betonu zavisno od toga da li se radi o armiranom ili prednapregnutom betonu (tabela 5), kao i granične vrednosti hemijske agresivnosti prirodnog tla i podzemne vode što se ovde neće prikazivati.

Za određivanje sadržaja hlorida u betonu (prema tabeli 3) mora se koristiti proračun baziran na sumiranju maksimalno dozvoljenih sadržaja hlorida u svim materijalima za spravljanje betona.

Betonske konstrukcije u nekim slučajevima mogu biti izložene delovanju više od jednog uticaja opisanih u tabeli 4, tada je uslove sredine potrebno iskazati kao kombinaciju klasa izloženosti.

Tabela 4 – Klase izloženosti AB prema delovanju sredine

Oznaka klase	Opis uslova sredine	Informativni primeri gde se klase izloženosti mogu primeniti
1 Nema rizika od korozije ili agresije		
X0	Za beton bez armature ili ugrađenog metala: Sve izloženosti sem zamrzavanje/odmrzavanje, habanje ili hemijska agresija	Beton unutar zgrada veoma niske vlažnosti vazduha
2 Korozija prouzrokovana karbonatizacijom		
Kada je beton koji sadrži armaturu ili druge ugrađene metale izložen vazduhu i vlazi, izloženost će biti klasifikovana na sledeći način: NAPOMENA Uslovi vlažnosti se odnose na uslove u betonu zaštitnog sloja armature ili drugog ugrađenog metala, ali u mnogim slučajevima, uslovi u zaštitnom sloju betona mogu se smatrati da reflektuju uslove sredine. U ovim slučajevima klasifikacija uslova sredine može biti adekvatna. Ovo se ne odnosi na slučaj kada postoji barijera između betona i okruženja.		

XC1	Suva ili stalno vlažna sredina	Beton unutar zgrada niske vlažnosti vazduha Beton stalno potopljen u vodu
XC2	Vlažna, retko suva sredina	Betonska površina izložena dugotrajnom kontaktu sa vodom Mnogi temelji
XC3	Umereno vlažna sredina	Beton unutar zgrada umerene ili visoke vlažnosti vazduha Spoljašnji beton koji je zaštićen od kiše
XC4	Ciklično vlažna i suva sredina	Betonske površine izložene kontaktu sa vodom, ali ne u okviru klase izloženosti XC2
3 Korozija prouzrokovana hloridima koji ne potiču iz morske vode		
Kada je beton koji sadrži armaturu ili drugi ugrađeni metal izložen kontaktu sa vodom koja sadrži hloride, uključujući i so za odmrzavanje, koji ne potiču iz morske vode, izloženost će biti klasifikovana na sledeći način: PRIMEDBA U vezi sa uslovima vlažnosti vidi takođe odeljak 2 ove tabele		
XD1	Umereno vlažna sredina	Betonske površine izložene hloridima iz vazduha
XD2	Vlažna, retko suva sredina	Plivački bazeni Beton izložen industrijskim vodama koje sadrže hloride
XD3	Ciklično vlažna i suva Sredina	Delovi mostova izloženi prskanju vodom koja sadrži hloride Kolovozi, trotoari Ploče na parkinzima
4 Korozija prouzrokovana hloridima iz morske vode		
Kada je beton koji sadrži armaturu ili drugi ugrađeni metal izložen kontaktu sa hloridima iz morske vode ili vazduha koji sadrži so poreklom iz morske vode, izloženost će biti klasifikovana na sledeći način:		
XS1	Sredina izložena solju iz vazduha ali gde beton nije u direktnom kontaktu sa morskom vodom	Konstrukcije blizu obale ili na obali
XS2	Beton permanetno potopljen u morskoj vodi	Delovi konstrukcija u morskoj vodi
XS3	Zone izložene plimi, kvašenju i prskanju	Delovi konstrukcija u morskoj vodi
5 Zamrzavanje/odmrzavanje sa ili bez agenasa za odmrzavanje		
Kada je beton u vlažnom stanju izložen značajnim ciklusima zamrzavanja/odmrzavanja		
XF1	Umerena zasićenost vodom, bez agensa za odmrzavanje	Vertikalne betonske poršine izložene kiši i mrazu
XF2	Umerena zasićenost vodom, sa agensom za odmrzavanje	Vertikalne betonske površine saobraćajnih konstrukcija izložene mrazu i sredstvima za odmizavanje iz vazduha
XF3	Velika zasićenost vodom, bez agenasa za odmrzavanje	Horizontalne betonske površine izložene kiši i mrazu
XF4	Velika zasićenost vodom sa agensima za odmrzavanje ili morskom vodom	Ploče na putevima i mostovima izložene sredstvima za odmrzavanje Betonske površine izložene direktnom prskanju rastvorima sredstava za odmrzavanje i mrazu Zone kvašenja konstrukcija na morskoj obali izložene mrazu
6 Hemijska izloženost		
Kada je beton izložen hemijskim uticajima iz zemljišta i podzemnih voda, kao što je prikazano u tabeli 2, izloženost će biti klasifikovana kao što je dato dole. Klasifikacija morske vode zavisi od geografske lokacije, tako da važi klasifikacija koja odgovara mestu primene betona. NAPOMENA Može biti potrebna posebna studija da bi se definisali relevantni uslovi izloženosti, kada su u pitanju: - granice izvan onih koje su date u tabeli 5; - druge agresivne hemikalije - hemijski zagađeno zemljište ili voda - velika brzina vode u kombinaciji sa hemikalijama iz tabele 5.		
XA1	Blaga hemijska agresivnost sredine prema tabeli 5	
XA2	Umerena hemijska agresivnost sredine prema tabeli 5	
XA3	Veoma hemijski agresivna sredina prema tabeli 5	

Tabela 5 – Maksimalan sadržaj hlorida u betonu [9]

Primenjeni beton	Klasa sadržaja hlorida[a]	Maksimalan sadržaj Cl^- po masi cementa[b]
Ne sadrži čeličnu armaturu ili druge ugrađene metale, sa izuzetkom koroziono otpornih ankera za dizanje (elemenata)	Cl 1,0	1,0 %
Sadrži čeličnu armaturu ili drugi ugrađeni metal	Cl 0,20	0,20 %
	Cl 0,40	0,40 %
Sadrži čelik za prednaprezanje	Cl 0,10	0,10 %
	Cl 0,20	0,20 %

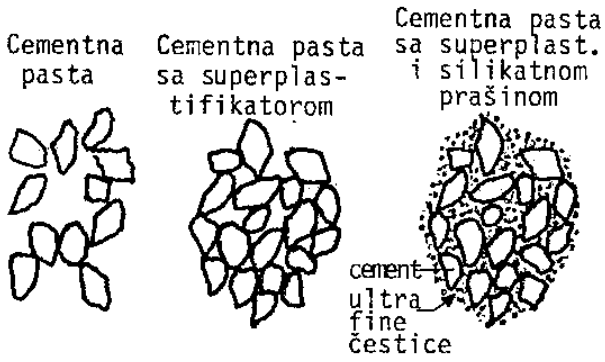
[a] Za specifičnu upotrebu betona, klasa koju treba primeniti zavisi od odredaba koje važe na mestu primene betona.

[b] Ako se koriste mineralni dodaci tipa II, i ako su oni uzeti u obzir za količinu cementa, sadržaj hlorida se izražava kao procenat jona hlorida, u odnosu na (masu cementa plus ukupna masa mineralnih dodataka) koji su uzeti u obzir.

5 NAČINI POBOLJŠANJA KOROZIONE OTPORNOSTI BETONA

Mere za povećanje trajnosti betona u uslovima date korozione sredine idu u pravcu ostvarenja što veće unutrašnje otpornosti komponentnih materijala kao i što veće kompaktnosti betona.

Na hemijsku otpornost cementnog kamena može se u opštem slučaju uticati i putem regulisanja njegove strukture, a to se može postići izborom optimalnog vodo-cementnog faktora, korišćenjem aditiva tipa plastifikatora ili superplastifikatora (radi smanjenja potrebne količine vode), upotrebom nekih posebnih dodataka (osim onih koji su već eventualno sadržani u cementu) - na primer tzv. silikatne prašine (silica fume videti sliku 7), raznih polimera rastvorljivih ili dispergovanih u vodi (lateks, poliakrilat, polivinilacetat) i dr. U svim ovim slučajevima postižu se efekti povećanja gustine cementnog kamena, odnosno efekti smanjenja njegove poroznosti [22].



Slika 7. Mehanizam dejstva superplastifikatora i silikatne prašine [22]

Ultra fine čestice silikatne prašine utiču na svojstva svežeg i očvrslog betona putem svog sfernog oblika i veličine, koja je 10 - 100 puta manja od veličine čestica cementa, tako da se, osim velikih specifičnih površina, može govoriti i o tzv. "gustom pakovanju", odnosno pokoravanju čestica poznatim geometrijskim i kinematičkim principima. Naime, cementna pasta kojoj je dodata silikatna prašina, i to najviše do 15% u odnosu na masu cementa, ima vrlo visok sadržaj čvrstih čestica u tečnom medijumu, tako da zrnca silikatne prašine vrlo efikasno popunjavaju prostore između inače gusto upakovanih čestica cementa (sl. 7), pri čemu sama pasta ima veoma visoku kohezivnost. Povećana potreba za vodom pri primeni silikatne prašine, uslovljena veoma velikim specifičnim površinama, kod spravljanja betona uspešno se kompenzira upotrebom dodataka betonu tipa superplastifikatora, tako da se zahvaljujući ukupnim efektima primene silikatne prašine i superplastifikatora, mogu dobiti betoni sa čvrstoćama pri pritisku između 80 i 150 MPa, a sa čvrstoćama pri savijanju od 6 do 12 MPa [22].

Pored fizičkog dejstva napred pomenutog "gustog pakovanja", ultra fine čestice SiO_2 u hidratisanom cementnom kamenu hemijski reaguju sa kalcijum-hidroksidom $Ca(OH)_2$, što znači da se obavlja i reakcija pucolanizacije - vezivanja SiO_2 i $Ca(OH)_2$ u produkte slične cementnom gelu. Na ovaj način povećava se količina produkata na kojima se zasniva čvrstoća cementnog kamena, a ujedno se smanjuje količina $Ca(OH)_2$, koji bi tokom korozije betona bio ispran i na taj način uticao na povećanje poroznosti cementnog kamena. Tako, na primer ako $Ca(OH)_2$ rastvoren u vodi (dobijen pri hidrataciji cementa) stupa u reakciju sa SiO_2, dobiće se hidrosilikat kalcijum:

$$Ca(OH)_2 + SiO_2 + nH_2O = CaO \cdot SiO_2 \ (n+1)\ H_2O \qquad (4)$$

Regulisanje strukture cementnog kamena u betonu može da ide i u pravcu programiranog povećanja njegove poroznosti. Na primer, za dobijanje betona (a to isto važi i za cementni kamen) otpornog na dejstvo mraza i na dejstvo mraza i soli za odmrzavanje, može se ići i na uvođenje u strukturu cementnog kamena dodatne poroznosti korišćenjem postupka aeriranja. Primenom hemijskih dodataka - aeranata u strukturi betona se formiraju mehurići vazduha veličine 0,01-0,3 mm koji su ravnomerno raspoređeni unutar mase cementnog kamena. Ovi mehurići prekidaju mrežu kapilara u cementnom kamenu, pa se na taj način, s jedne strane, smanjuje

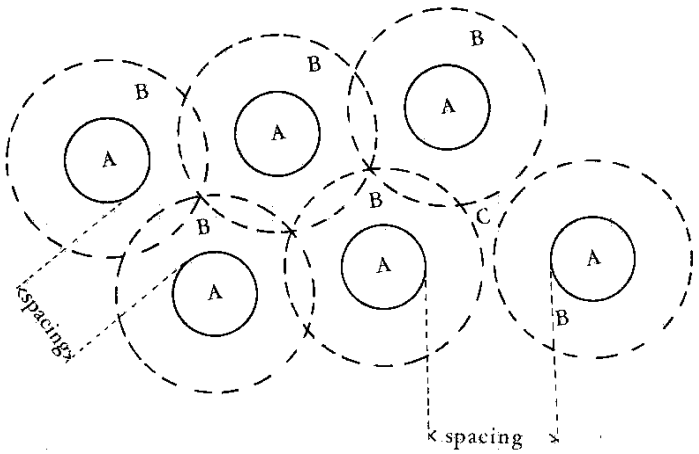
kapilarno upijanje vode, a s druge strane, ukoliko dođe do smrzavanja vode unutar mase betona, dobija prostor za nesmetano širenje leda, tj. putem mehurića uvučenog vazduha u betonu stvara se rezervna zapremina pora koja je najčešće za oko 20% veća od zapremine zamrznute vode. Odlučujuću ulogu u povećanju otpornosti na dejstvo mraza aeriranih betona ima međusobna udaljenost vazdušnih mehurića (spacing factor, sl. 8) [13]. Eksperimentalna ispitivanja su pokazala da se najpovoljniji rezultati dobijaju pri razmacima vazdušnih mehurića 0,15-0,25 mm, što uslovljava da se optimalna količina uvučenog vazduha mora posmatrati u funkciji količine cementne paste, odnosno u funkciji krupnoće agregata. Kako optimalan procenat vazdušnih mehurića, u ovakvim slučajevima, obično iznosi 4-6% u odnosu na ukupnu zapreminu betona, povećanje otpornosti betona na dejstvo mraza ne podrazumeva istovremeno i smanjivanje njegove čvrstoće. Razlozi za ovo, u prvom redu, leže u činjenici da mehurići vazduha u svežem betonu igraju i ulogu plastifikatora, pa se time smanjuje potreba za vodom i nadoknađuje eventualni gubitak čvrstoće prouzrokovan povećanom poroznošću.

Smanjenje kapilarne poroznosti betona može se postići, kao što je već rečeno pod tačkom 3, upotrebom hemijskih dodataka tipa plastifikatora ili superplastifikatora, čiji mehanizam dejstva je prikazan na slici 9. Ovi hemijski dodaci desete generacije omogućavaju procenat smanjenja sadržaja vode u betonu i do 30%, a isto tako i očuvanje "slump"-a u toku zahtevanog vremena (i do 2 časa) [10].

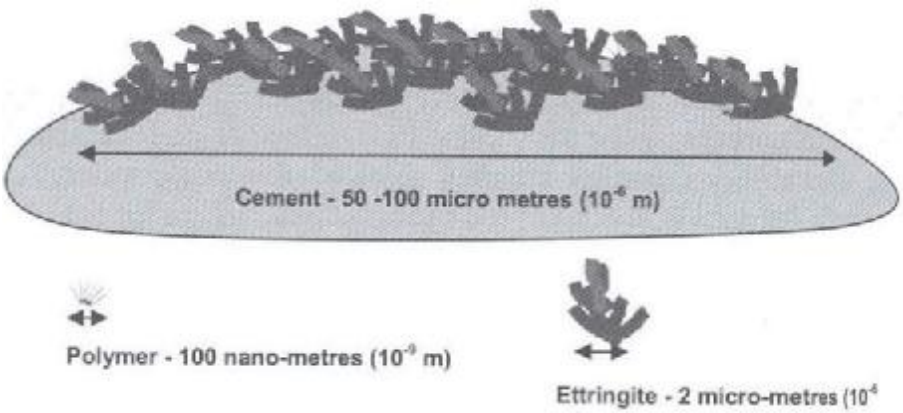
Raspored pora u strukturi betona i modeliranje pornog prostora može se postići i upotrebom npr. metakaolina kao jednog dela veziva.

Metakaolin ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$) je amorfni proizvod dehidratacije kaolinita koji se odlikuje visokom pucolanskom aktivnošću. Uticaj metakaolina na mikrostrukturu i difuziona svojstva cementnih pasti i maltera je predmet interesovanja mnogih naučnika. Pokazalo se da se značajno smanjenje srednje veličine pora postiže kada se na primer 20% cementa zameni metakaolinom. Isto tako, dodatkom metakaolina smanjuje se brzina difuzije Cl^- i Na^+ jona i brzina apsorpcije vode u malterima. Isto tako pokazano je da prisustvo metakaolina u određenom procentu može potpuno da spreči veoma štetnu alkalno-silikatnu reakciju i formiranje bubrećeg gela [23].

Rezultati naših ispitivanja pokazuju da se upijanje vode može smanjiti i za cca 26% uz porast čvrstoće pri pritisku za cca 17% u prisustvu metakaolina [19], [20].



Slika 8. Faktor razmaka ("spacing") kod aeranata [13]



Slika 9. Mehanizam dejstva superplastifikatora [10]

Tabela 6. Preporučene granične vrednosti za sastav i svojstva betona [9]

	Klase izloženosti																	
	Bez rizika korozije ili agresije	Korozija prouzrokovana karbonatizacijom				Korozija prouzrokovana hloridima						Uticaj zamrzavanja/odmrzavanja				Hemijski agresivna sredina		
						Morska voda			Hloridi koji ne potiču iz morske vode									
	X0	XC1	XC2	XC3	XC4	XS1	XS2	XS3	XD1	XD2	XD3	XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2	XA3
Max v/c	-	0,65	0,60	0,55	0,50	0,50	0,45	0,45	0,55	0,55	0,45	0,55	0,55	0,50	0,45	0,55	0,50	0,45
Min. klasa čvrstoće	C12/15	C20/25	C25/30	C30/37	C30/37	C30/37	C35/45	C35/45	C30/37	C30/37	C35/45	C30/37	C25/30	C30/37	C30/37	C30/37	C30/37	C35/45
Min. količina cementa (kg/m^3)	-	260	280	280	300	300	320	340	300	300	320	300	300	320	340	300	320	360
Min. sadržaj vazduha (%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,0[a]	4,0[a]	4,0[a]	-	-	-
Drugi zahtevi												Agregat u skladu sa prEN 12620:2000 dovoljne otpornosti na zamrzavanje/odmrzavanje					Sulfatno cement[b] otporni	
Za beton bez uvučenog vazduha, svojstva betona treba da budu ispitivana prema odgovarajućem postupku ispitivanja, u poređenju sa betonom za koji je dokazana otpornost na zamrzavanje/odmrzavanje za relevantnu klasu izloženosti. Kada SO_4^{2-} vodi ka klasama izloženosti XA2 i XA3, osnovno je upotrebiti sulfatno otporni cement. Kada je cement klasifikovan prema sulfatnoj otpornosti, treba koristiti cement umerene ili visoke otpornosti na sulfate u klasi izloženosti XA2 (i u klasi izloženosti XA1 kada je primenljivo), cement visoke otpornosti na sulfate treba da bude korišćen u klasi izloženosti XA3.																	

6 ZAKLJUČAK

Na osnovu svega prethodno rečenog može se zaključiti da se otpornost betona i betonskih konstrukcija prema koroziji može povećati delovanjem u pravcu izrade betona što je moguće manje poroznosti, a to znači upotrebom dovoljno niskih količina vode pri spravljanju betona. Visoka homogenost betona, vrlo visok nivo mehaničkih čvrstoća kao i visok stepen vodonepropustljivosti mogu se postići samo pravilnim izborom agregata i granulometrijske kompozicije, izborom vrste i optimalne količine cementa, povećanjem stepena hidratacije, efikasnim ugrađivanjem, kao i primenom različitih hemijskih dodataka betonu putem kojih se deluje na mikrostrukturu betona. U svetlu svega ovoga napred iznetog, prema evropskom standardu navedenom u okviru tabele 6 [9], daju se preporučene granične vrednosti za sastav i svojstva betona, tj. za određene stepene izloženosti korozionoj sredini i zahtevanu klasu - marku betona, minimalne količine cementa i maksimalan vodocementni faktor.

Hemijski dodaci betonu tipa plastifikatora ili superplastifikatora, eventualno dodaci tipa zaptivača i dodaci sa simultanim efektom aeriranja i plastificiranja direktno će uticati na modeliranje pornog prostora i raspored pora u strukturi betona. Svakako, pri ovome treba voditi računa o kompatibilnosti hemijskih dodataka sa upotrebljenim cementom, kao i o eventutualno štetnim materijama tipa hlorida, prisutnim u hemijskim dodacima [12].

Primenom mineralnih dodataka tipa zgure, pucolana, silikatne prašine ili metakaolina, u tačno određenom procentu može se takođe uticati na mikrostrukturu betona kao kompozita, ali isto tako i na poboljšanje korozione otpornosti. Navedeni dodaci utiču i na kvalitet prelazne - tranzitne zone između zrna agregata i cementnog kamena pa time i na poboljšanje vodonepropustljivosti i trajnosti betona.

Ukoliko se na osnovu prethodno sprovedenih analiza pokaže da se radi o izrazitoj agresivnosti sredine (na osnovu datih klasa izloženosti) tako da se zahtevana trajnost konstrukcije ne može obezbediti unutrašnjom otpornošću pristupa se i izradi projekta antikorozivne zaštite betonske konstrukcije na bazi različitih premaza, vodonepropustljivih materijala i obloga, što nije predmet ovog rada.

Treba napomenuti da je veoma važno napraviti program osmatranja i održavanja objekata od betona pa s tim u vezi proveriti alkalnost betona, dubinu karbonatizacije kao i propagaciju prslina.

7 LITERATURA

[1] D. Jevtić: Svojstva svežeg i očvrslog betona u funkciji termohigrometrijskih parametara sredine, monografija, 1996. Beograd, Građevinski fakultet Beograd.

[2] N. Bilbija: Tehnička petrografija - svojstva i primena kamena, Naučna knjiga, Beograd, 1984, str. 2.

[3] SRPS ENV 197-1 Cement, sastav, specifikacije i kriterijumi usaglašenosti. Deo 1: Obični cement, 2000.

[4] D. Jevtić: Hemijski agresivne sredine i stepeni agresivnosti, "Korozija, trajnost i zaštita betonskih konstrukcija", seminar SDGKJ, Beograd 1988.

[5] M. Muravljov: Osnovni aspekti trajnosti betona i betonskih konstrukcija, Korozija, trajnost i zaštita betonskih konstrukcija", seminar SDGKJ, Beograd 1988.

[6] M. Muravljov, V. Ukrainčik, D. Bjegović, D. Jevtić, N. Denić: Korozija i zaštita materijala, Građevinski kalendar, 1989, DGIJ Beograd, str. 11.

[7] M. Muravljov: Osnovi teorije i tehnologije betona, Građevinska knjiga, Beograd, 1991, str. 184.

[8] S. Mladenović, M. Petrović, G. Rikovski: Korozija i zaštita materijala - Hemijsko-tehnološki priručnik 6, Beograd, 1985.

[9] Harmonizacija domaće i evropske regulative u oblasti tehnologije betona saglasno standardu EN 206-1:2000, Beton-Deo 1: Specifikacija, svojstva, proizvodnja i kontrola saglasnosti, naučnostručni skup - JUDIMK, Beograd, 2004.

[10] Corradi, M., Khurana, R., Magarotto, R.: Tailored Properties of Concrete to Keep it Attractive, ***fib*** Symposium "Keep Concrete Attractive", Budapest 2005.

[11] Jevtić, D.:Osnovni principi zaštite betonskih konstrukcija,VIII YUCORR R Korozija i zaštita materijala u industriji u građevinarstvu, Tara 09-12.05.2006., plenarno predavanje ISBN 86-82343-07-X., Zbornik radova, str. 79-90.

[12] Jevtić, D.: Dodaci betonu, Zbornik radova naučno-stručnog skupa JUDIMK-a "Harmonizacija domaće i evropske regulative u oblasti tehnologije betona saglasno standardu EN 206-1: 2000", 14.10.2004., Beograd, Zbornik radova, str. 113-128.,

[13] Collepardi, M.: Scienza e technologia del calcestruzzo, Hoepli, Milano, 1980.

[14] Mehta, P.K. and Aitcin, P.C., Microstructural Basis of Selection of Materials and Mix Proportions for High Strenght Concrete, SP 121, High Strenght Concrete, Second International Symposium, ACI, 1990.

[15] Monosi, S. and Collepardi, M., Low Porosity and Early Durability of Concrete, RILEM, From Material Science to Construction Materials Engineering, Vol. I, Versailles, September 1987.

[16] Mor, A., Mehta, P.K., Effect of Superplasticizing Admixtures on Cement Hydration, Cement and Concrete Research, Vol. 14, 1984.

[17] Roy, D.M. and Idorn, G.M., Hydration, Structure and Properties of Blast-Furnace Slag Cements, Mortars and Concrete, ACI Journal, Vol. 79, No. 6, Nov-Dec 1982.

[18] Swamy, R.N., The Nature of the Strenght of Concrete, Progress in Concrete Technology, Energy, Mines and Resources, Ottawa 1980.

[19] Jevtić, D.: Modeliranje svojstava kompozita tipa maltera savremenim dodacima, Građevinski kalendar 2008, str. 42.

[20] Jevtić, D. Pavlović, Lj., Terzić, A., Dimitrijević, V.: Poboljšanje otpornosti na mraz cementnih kompozita u prisustvu metakaolina, XX Simpozijum o koroziji i zaštiti materijala sa međunarodnim učešćem, Podgorica. 2006, str. 102-107.

[21] Živković S., Jevtić D., Radonjanin V.: Istraživanja na području materijala i njihove primene. Generalni izveštaj i prikaz radova za XXIII Kongres Društva za ispitivanje materijala i konstrukcija SCG. Materijali i konstrukcije br. 4, god. 2005, str. 9-15.

[22] Muravljov, M., Jevtić, D.: Građevinski materijali 2, Akademska misao, 2003, Beograd, str. 22.

[23] Khatib J.M. and Wild S.: Pore size distribution of metakaolin paste. Cem. Concr. Res. 26 (1996), pp. 1545-1553.

REZIME

MOGUĆNOST MODELIRANJA SVOJSTAVA BETONA U FUNKCIJI POVEĆANJA TRAJNOSTI

Dragica JEVTIĆ

U radu se prikazuju parametri koji utiču na koroziona svojstva agregata, cementa, cementnog kamena i betona kao kompozitnog materijala. Posebna pažnja je posvećena makro i mikrostrukturi očvrslog betona kao i načinima kojima je moguće promeniti - smanjiti kapilarnu porozonost betona. U tom smislu daju se primeri primene superplastifikatora, aeranata, silikatne prašine kao i metakaolina. Kriterijumi trajnosti betona s obzirom na agresivnost sredine dati su prema novom evropskom standardu EN 206-1:2000. Dalje prikazuju se preporučene vrednosti sastava betona zavisno od klase izloženosti.

Ključne reči: beton, trajnost korozija, evropski standard EN 206-1

SUMMARY

MODELING POSSIBILITY OF CONCRETE PROPERTIES IN ORDER TO INCREASE ITS DURABILITY

Dragica JEVTIĆ

The parameters that have influence on corrosion properties of aggregate, cement, hardened cement paste and concrete as a composite material, are presented in the paper Special attention has been paid to the macro and micro structure of the hardened concrete, as well as to the possible ways for reduction of the capillary porosity of concrete In relation to that, the examples of application of superplasticizers. air-entraining agents, silica fume and metakaolin are presented. The criteria of durability of concrete in relation to the aggressiveness of the environment are given according to the new European standard EN 206-1:2000. Furthemore recomanded values of concrete composition related to the classes of exposition are shown.

Key words: concrete, durability corrosion, European standard EN 206-1