

Studium tuhnutí betonu pomocí impedanční spektroskopie

Michal Rokos

Bakalářská práce
2005



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

ÚVODNÍ STRANA

ZADÁNÍ BP

ZADÁNÍ BP

ABSTRAKT

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je vytvořit pracoviště pro měření kinetiky tuhnutí betonu metodami dielektrické spektroskopie. Dále vybrat vhodný systém betonu a provést jednotlivá měření pro zhotovené vzorky.

Na závěr posoudit vhodnost metody dielektrické spektroskopie a možnosti využití ve stavebnictví.

Abstrakt

The main goal of the graduation thesis is to create a workplace for measurement of kinetics of concrete solidification through the dielectric spectroscopy methods. Moreover to choose a suitable system of concrete and to complete particular measurements for produced samples.

In conclusion I wanted to evaluate appropriateness of the dielectric spectroscopy method and its application possibilities in building industry.

Pokládám za svou povinnost poděkovat vedoucímu bakalářské práce, RNDr. Vojtěchu Křesálkovi, CSc., za odborné vedení, cenné rady a zájem, který věnoval realizaci mé bakalářské práce.

Souhlasím s tím, že s výsledky mé diplomové práce může být naloženo podle uvážení vedoucího diplomové práce a ředitele ústavu a Institutu. V případě publikace budu uveden jako spoluautor.

Prohlašuji, že na celé diplomové práci jsem pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval.

Ve Zlíně 30. srpna 2005

.....
Michal Rokos

OBSAH

OBSAH.....	6
ÚVOD.....	7
I. TEORETICKÁ ČÁST.....	8
1 BETON.....	9
1.1 KAMENIVO.....	9
1.2 CEMENT.....	11
1.2.1 Hydratace.....	12
1.2.2 Tuhnutí.....	13
1.1.3 Tvrdnutí.....	13
1.3 VODA.....	19
1.4 SMĚS.....	19
1.5 PRINCIP DIELEKTRICKÝCH MĚŘENÍ.....	21
1.5.1 Odezva materiálu na střídavé elektrické napětí.....	21
1.5.2 Měření impedance.....	21
1.5.3 Disipační faktor.....	24
1.5.4 Komplexní permitivita materiálu.....	25
1.6 DIELEKTRICKÉ VLASTNOSTI Z HLEDISKA STRUKTURY MATERIÁLU.....	26
1.6.1 Objemové jevy.....	26
1.6.2 Iontová vodivost	26
1.6.3 Dipólová orientace.....	28
II. PRAKTICKÁ ČÁST.....	31
2 BAKALÁŘSKÁ PRÁCE.....	32
2.1 HARWAROVÉ PROSTŘEDKY.....	32
2.1.1 Digitální měřící můstek HP 4284 a.....	32
2.1.2 Dvouelektrodový měřící systém.....	32
2.2 PROGRAMOVÉ PROSTŘEDKY.....	32
2.2.1 Programové prostředky HP Vee 3.12.....	32
2.3 POUŽITÉ BETONY.....	33
2.4 SESTAVENÍ MĚŘÍCÍ APARATURY.....	33
2.4.1 Přípravy před vlastním měřením.....	33
2.5 VÝBĚR VHODNÉ DIELEKTRICKÉ CHARAKTERISTIKY.....	33
2.6 OVĚŘENÍ PRINCIPU SLEDOVÁNÍ TUHNUTÍ BETONU.....	34
2.6.1 Výběr vhodného systému betonu.....	34
2.6.2 Stanovení měřících frekvencí.....	34
2.7 MĚŘENÍ $R(T)$ U VZORKŮ BETONŮ.....	35
2.7.1 Příprava vzorků k měření.....	35
2.7.2 Beton B 25, B 20, B 15.....	35
ZÁVĚR.....	38
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	39
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	40
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	42
SEZNAM TABULEK.....	43

ÚVOD

Sledování průběhu chemických reakcí pomocí dielektrických vlastností materiálu bylo poprvé využito u organických látek před více než padesáti lety. V roce 1934 Kienle a Race jako první publikovali využití dielektrických vlastností ke studiu polyesterifikačních reakcí. Již v této publikaci byly popsány některé důležité poznatky [19]:

- dielektrické vlastnosti je nejlepší sledovat pomocí iontové vodivosti
- vodivost je stejná při použití stejnosměrného či střídavého proudu
- existuje vztah mezi viskozitou a vodivostí v počáteční fázi reakce
- existuje možné přispění od orientace dipólů a od nečistot k dielektrickým veličinám
- při nízkých frekvencích se uplatňuje polarizace elektrod

Od roku 1958 bylo napsáno velké množství článků a publikací zaměřených především na epoxidy, menší prostor byl určen polyesterům, polyamidům, fenolům a ostatním pryskyřicím.

Alternativně jsme se proto rozhodli aplikovat dielektrická měření na beton, který je jedním ze základních stavebních materiálů dnes používaných.

Cílem této práce bylo vytvořit měřicí pracoviště, realizovat sběr dat s grafickým vyhodnocením při měření tuhnutí betonu pomocí impedanční spektroskopie.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 BETON

1.1 Kamenivo

Kamenivo je zrnitý materiál anorganického, přírodního nebo umělého původu, určený ke stavebním účelům. Vytváří nosnou kostru betonu.

Vlastnosti kameniva

Jednotlivá zrna kameniva spojená cementovou maltou tvoří pevnou, kompaktní hmotu. Pro výrobu kvalitních betonů používáme zrna kameniva různých velikostí, vykazující dobrou pevnost, trvanlivost, odolnost proti vlivu povětrnosti a mrazu, s minimální nasákavostí. Pro výrobu kameniva se hodí jak horniny vyvřelé, tak i usazené nebo přeměněné. Přednost dáváme horninám kyselým s větším obsahem SiO_2 .

Pevnost kameniva

Pevnost jednotlivých zrn kameniva musí být minimálně taková jako je požadovaná pevnost betonu.

Na pevnost zrn kameniva usuzujeme podle obecně známých vlastností hornin nebo hmot, z nichž jsou zrna vyrobená. Zvětralé, vrstevnaté kamenivo malé soudržnosti, značně drobné kamenivo, popř. s četnými trhlinami nebo puklinami na povrchu, má malou pevnost. Podobné kamenivo obsahující minerály malé pevnosti nebo tmely proměnlivé pevnosti poskytuje malou pevnost. Pevnost kameniva odhadujeme z pečlivého ohledání vzhledu a zkusmého šetření vlastností. Stupeň pevnosti hodnotíme podle odolnosti zrna v tlaku nebo příčném tahu (zrno zmáčkne v ruce mezi prsty proti podložce, v kleštích nebo ve svěráku).

Sloučeniny síry

Sulfidy (sírniky) a sírany obsažené v kamenivu mohou mít nepříznivý vliv již na tuhnutí betonové směsi. V zatvrdlém betonu se projevují škodlivě především rozpustné sírany vznikem sulfoaluminátu vápenatého. Stejně se projevují i sloučeniny síry, které někdy pod vlivem vzdušného kyslíku oxidují na sírany. Oxidace probíhá obzvláště u některých sírníků za zvětšování objemu, což samo může způsobit rozpad kameniva nebo

rozrušení betonu. Sloučeniny síry mohou též podporovat korozi ocelové výztuže v betonu i jiných kovových součástí stavby.

Sulfidy (sirníky) v kamenivu zjistíme přidáním 10% roztoku chemicky čisté kyseliny chlorovodíkové. Uvolňuje-li se sulfan (sirovodík), jsou ve směsi sulfidy (sirníky). Podle normy se obsah sulfidové (sirníkové) síry odvozuje výpočtem z rozdílu obsahu veškeré síry a síry síranové.

Sírany zjišťujeme pomocí chloridu barnatého. Vzorek rozdrčeného kameniva hmotnosti 10 až 55 g smícháme s 10% roztokem kyseliny chlorovodíkové. Po usazení směsi přidáme 10 až 15 cm³ chloridu barnatého. Objeví-li se bílá sraženina, jsou v kamenivu sírany.

Humusovitost

Přítomnost humusovitých látek v přírodním kamenivu působí škodlivě při tvrdnutí cementu. Humusovité látky v kamenivu zjišťujeme pomocí hydroxidu sodného. Je-li zbarvení roztoku tmavší než sytě žluté, jsou v kamenivu humusovité látky.

Hlinitost

Malé množství jílovitých látek, do 1,5 % hmotnosti kameniva, přispívá k vazkosti betonové směsi. Větší množství snižuje pevnost betonu, zvláště ulpívají-li částice na zrnech kameniva. Hlinitost stanovíme informativní zkouškou.

Do poloviny odměrného válce nasypeme kamenivo zbavené zrn větších než 22 mm. Do válce dolijeme vodu po značku 1000 ml. Kamenivo pečlivě ve vodě protřepeme a pak ponecháme válec po dobu 24 hodin v klidu. Jemné částice vytvoří nad kamenivem zřetelný prstenec. Tloušťka prstence vztažená k celkové výšce kameniva včetně usazeniny, určuje hlinitost. Výšku prstence H vyjádříme v %.

Nasákavost

Různé petrografické složení horniny podmiňuje různou nasákavost kameniva. Hutné kamenivo z vyvřelých a přeměněných hornin je většinou méně nasákavé (0,5 až 1 % hmotnosti). Kamenivo z usazenin je nasákavější. Vliv nasákavosti kameniva se projeví během půl hodiny od přidání vody. Protože dáváme do betonové směsi jen nejnutnější množství vody, musíme s nasákavostí kameniva při dávkování vody počítat a ověřovat si ji.

1.2 Cement

Cement je hydraulické pojivo, jemně mletá anorganická látka. Po smíchání s vodou vytváří kaši, která tuhne a tvrdne následkem hydratace vápenatých silikátů. Cementy, jejichž tvrdnutí způsobují jiné mineralogické složky (např. vápenaté alumináty v hlinitanovém cementu), patří do další skupiny cementů.

Výroba cementu za sucha

1. základní surovina (vápenec, vápenné slíny, hlinité břidlice) se roztlouká a drtí v drtičkách na menší kusy, smíchá se s kazivcem, kyzovými výpalky a nechá se uležet na skládce
2. uleželá směs se drtí v kulových mlýnech na surovinovou moučku a ukládá se do homogenizačních sil (pro získání stejnorodé směsi)
3. ze sil putuje směs do rotační pece, kde se taví a dochází k jejímu slinování - *slínek* (rotační pec se skládá ze tří pásem: pásmo vzrůstu teploty - pásmo slinovací cca 1400°C - pásmo ochlazovací), poté se na delší dobu odveze na skládku
4. po dostatečném odležení se slínek mele a přidávají se do něj přísady pro vylepšení nebo získání požadovaných vlastností (základní přísadou, která se přidává do všech cementů je sádrovec, který reguluje tuhnutí)

Slínek:

- křemičitanový - obsahuje více CaO, SiO a méně Al₂O₃, Fe₂O₃
- hlinitanový - obsahuje více CaO, Al₂O₃ a méně SiO₂, Fe₂O₃

1.2.1 Hydratace

Hydratace je pochod, při němž voda vstupuje do struktury sloučeniny a vznikající sloučeniny přecházejí v tuhou hmotu. Všechny slínkové nerosty jsou bezvodé. Ve styku s vodou hydrolyzují a hydratují. Silikáty bohaté na oxid vápenatý se hydrolyzou rozkládají na silikáty chudé na oxid vápenatý a hydroxid vápenatý.

Celkový obsah aktivního oxidu vápenatého (CaO) a aktivního oxidu křemičitého (SiO_2) musí být v cementu větší než 50 % hmotnosti cementu.

Při hydrataci vznikají sloučeniny s chemicky vázanou vodou. Vytvářejí se řady kalciumhydroaluminátů a kalciumhydrosilikátů s různým množstvím chemicky vázané vody. Vzhledem k tomu, že tyto hydráty jsou méně rozpustné, tvoří se přesycený roztok a hydráty se srážejí v drobné krystalky. Část vysrážených krystalků má vysokou kohezní a adhezní vlastnost. Kolem prvních krystalů jako jader se vytvářejí krystalky hydratovaných složek. Stále narůstají a prodlužují se. Vlivem molekulárních sil jsou krystaly přitahovány, střetávají se navzájem, proplétají se. Vzájemné proplétání vznikajících krystalů má velkou styčnou plochu, přispívá k pevnosti.

Hydratací vznikají hydratované sloučeniny a u alitu a belitu volný hydroxid vápenatý Ca(OH)_2 . Tato sloučenina je nejreaktivnější složkou hydratovaného cementu a umožňuje korozi betonu v agresivním prostředí.

Hydratace je chemický a fyzikální proces, při němž kašovitá cementová směs přechází do tuhého a tvrdého stavu.

Při chemické reakci cementu s vodou vzniká teplo, které nazýváme hydratační teplo. Závisí na chemickém složení cementu, množství minerálů, a na jemnosti mletí. Čím je cement jemněji mletý, tím má větší povrch, který je smáčen vodou, tím je intenzivnější hydrolyza, včasnější počátek průběhu hydratace, tím rychleji se vyvíjí hydratační teplo. Hydratace probíhá nerušeně při optimální teplotě 15 až 25 °C.

1.2.2 Tuhnutí

Tuhnutí je chemický a fyzikální pochod, při němž kašovitá směs cementu a vody tuhne v pevnou hmotu. Začátek tuhnutí je pro cementy obecného použití stanoven s ohledem na pevnostní třídu. Cementy pevnostní třídy maxim. 42,5 mají počátek tuhnutí stanoven nejdříve za hodinu, nejpozději do 12 hodin po smíchání cementu s vodou. U cementů pevnostní třídy 52,5 je počátek tuhnutí stanoven nejdříve za 45 minut. Začátek tuhnutí se oddaluje proto, aby se zajistila doba potřebná pro výrobu betonové směsi, její dopravu, uložení a zpracování. Regulace tuhnutí, stanovení počátku, se provádí přidáváním sádrovce, a to maximálně do 5 % hmotnosti cementu, anebo sádrových střepů, které se přidávají s dalšími přísadami ke slínku při mletí cementu. Bez těchto přísad by přítomný minerál trikalciumaluminát počal hydratovat již při smáčení vodou.

Cementy se speciálními vlastnostmi mají stanoven začátek tuhnutí dříve, za 30 i méně minut, a konec tuhnutí za 6 hodin nebo dokonce za 8 minut. Takové cementy používáme pro urychlení betonáže při výrobě betonových dílců, při injektáži, nástřiku.

1.2.3 Tvrdnutí

Tvrdnutí je chemický a fyzikální pochod, při němž se tuhá směs přeměňuje v tvrdou hmotu, která nabývá pokračující hydratací větší pevnosti. Rychlost tvrdnutí je dána chemickým složením a jemností cementu. Tvrdnutí probíhá zpočátku intenzivně, později se tvrdnutí zpomaluje, až se po několika letech ustálí. Největší přírůstek pevnosti nastává do 28 dnů. Tuto pevnost považujeme za základní, stoprocentní, a označujeme ji $R_{c,28}$. Další nárůst pevnosti je velmi pomalý, velikost přírůstku pevnosti ovlivňuje prostředí a množství tetrakalciumaluminátferitu v cementu. Pevnost cementu a betonu zjišťujeme za 28 dní, ta je pro hodnocení rozhodující.

Druhy cementů

Cementy pro obecné použití podle ENV 197-1 jsou rozděleny do 5 hlavních skupin označených římskou číslicí I až V. Základem těchto cementů je portlandský slínek, který je spojován méně nebo více složkami. Ty zvyšují vlastnosti cementu.

Evropský cement musí být označován druhem cementu a hodnotou normalizované pevnostní třídy. Má-li cement vysoké počáteční pevnosti, připojuje se písmeno R. Pro

cementy určené k výrobě prefabrikátů zpracovaných proteplováním se použije označení UTB.

K rozlišení druhů cementů používáme barevné odlišení nápisů, a to:

druh I - portlandské cementy ... černou barvou

druh II - portlandské cementy směsné ... zelenou barvou

druh III - vysokopecní cementy ... červenou barvou

druh IV - pucolánové cementy ... modrou barvou

druh V - směsné cementy ... hnědou barvou

I. Portlandský cement

- základem je křemičitý slínek (K), přísady sádrovec

- pevnostní třídy: 42,5; 52,5 (42,5R; 52,5R)

- rychlovazný: má strmý nárůst počáteční pevnosti v tlaku (použití pro prvky, které potřebujeme rychle odbednit)

počátek tuhnutí: 42,5 - 60min; 52,5 - 45min

konec tuhnutí: 42,5; 52,5 - max. 12hod.

- má rychlý hydratační proces, přičemž se uvolňuje velké množství hydratačního tepla (použití pro nízké teploty do 5°C, pro předpjaté konstrukce, pro konstrukce s požadavkem vysoké počáteční pevnosti, tenkostěnné konstrukce)

II. a) Portlandský struskový cement

- základem je křemičitý slínek (K), přísady sádrovec + vysokopecní struska

- pevnostní třídy: 32,5; 42,5 (32,5R; 42,5R)

počátek tuhnutí: nejdříve za 60min

konec tuhnutí: max. 12hod

- množství strusky: A...6-20%; B...21-35%

- struska zvyšuje odolnost proti agresivnímu prostředí, zpomaluje hydratační proces a zmenšuje množství hydratačního tepla

- nevýhoda :zvyšuje smrštitelnost betonu na suchu

- použití pro základové a masivní konstrukce a pro betonáž v létě

- skupina A je pro běžné konstrukce

- v prvním týdnu zrání musíme beton z tohoto cementu udržovat vlhký

Zvláštní druhy cementů

Silniční cementy jsou speciální cementy, které mají velmi malou smrštitelnost, větší modul pružnosti, velkou odolnost proti střídavým vlivům povětrnosti, proti oděru a jsou velmi mrazuvzdorné. Silniční portlandské a silniční portlandské struskové cementy se vyrábějí ve třídách 6,5; 7,0 a 7,5 pevnostní třídy v tahu. Počátek tuhnutí u silničního portlandského cementu je minimálně 1,5 hodiny a u silničního portlandského struskového cementu minimálně 2 hodiny. Tuhnutí musí být ukončeno u obou do 12 hodin.

Hlinitanový cement je hydraulické pojivo, které má vyšší podíl oxidu hliníku (základní surovinou je bauxit a vápenec). Betony z hlinitanového cementu mají velké počáteční pevnosti, avšak beton je nutno udržovat neustále vlhký (nesmí se používat při více jak 30°C). Lze použít k betonování až do - 10°C.

Dnes se hlinitanový cement nesmí používat pro nosné konstrukce, protože se zjistilo, že konstrukce z hlinitanového cementu vlivem vlhkosti nebo různých teplot ztrácejí pevnost a rozpadají se. Používá se především ke speciálním pracem vyžadující velké počáteční pevnosti.

Síranovzdorný portlandský cement je odolný proti síranovým a agresivním vodám, nesmí se přidávat žádná přísada ani žádné příměsi. Na trh se dostává pod obchodním názvem Sulfares ve třídách 22,5 a 32,5 (doba skladovatelnosti 6 týdnů).

Hydrofobizované cementy jsou vyrobeny s hydrofobní látkou odpuzující vlhkost a umožňují tak skladovat cementy až 9 měsíců. Hydrofobizovat můžeme všechny druhy cementu, kromě cementu síranovzdorného.

Plastifikované cementy obsahují plastifikátory a používají se především pro dopravu betonové směsi čerpadly.

Fungicidní cementy obsahují látky ničící mikroorganismy. Používá se v prostředích se zvýšenými požadavky na hygienu.

Bílý cement se vyrábí z bílého vápence a silikátů. Používá se do omítek a pro výrobu cementového zboží.

Barevné cementy se vyrábějí z bílých cementů s přidáním barvy a pigmentů.

Barnaté a strontnaté cementy při výrobě je vápník nahrazen baryem a stronciem. Betony vytvořené z tohoto cementu odolávají vlivům mořské vody, jsou chemicky stálé a pohlcují škodlivé paprsky jaderného záření.

Vysokopevnostní cement se používá pro výrobu předpjatých a tenkostěnných konstrukcí, pod těžké stroje apod. Obsahuje 55 - 75 % trikalciumsilikátu.

Rychlovazný cement má vysoké počáteční pevnosti, které jsou dosaženy vhodným mineralogickým složením slínku. Používá se pro zkrácení technologických přestávek při výstavbě.

Složky cementů

Cement je směsí sloučenin obsahujících oxid vápenatý, oxid křemičitý, oxid hlinitý, oxid železitý a oxid hořečnatý ve větších množstvích. Portlandský cement obsahuje čtyři hlavní petrografické složky:

- TRIKALCIUMSILIKÁT $(\text{CaO})_3 \cdot \text{SiO}_2$ - mezinárodně označovaný C_3S , se nazývá alit. Rychle se slučuje s vodou, uvolňuje velké množství hydratačního tepla a dává velmi pevné produkty.
- DIKALCIUMSILIKÁT $(\text{CaO})_2 \cdot \text{SiO}_2$ - zkráceně označovaný C_2S , se nazývá belit. Při hydrataci uvolňuje belit polovinu tepla ve srovnání s alitem. Pomalu hydratují (má nízké hydratační teplo), avšak konečné pevnosti jsou srovnatelné s alitem.
- TETRAKALCIUMALUMINÁTFERIT $(\text{CaO})_4 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ zkráceně C_4AF , se nazývá celit. Přispívá ke vzrůstu pevnosti betonu po delší době (jen na suchu). Zajišťuje objemovou stálost cementu.
- TRIKALCIUMALUMINÁT $(\text{CaO})_3 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ - zkráceně C_3A . Tento minerál velmi prudce hydratuje (okamžitě po smíchání s vodou), čímž vyvíjí značné hydratační teplo, avšak dosahuje malých pevností.

Portlandský slínek v normě označen značkou K, je hydraulická látka, která musí sestávat nejméně ze dvou hmotnostních třetin silikátů vápenatých, alitu a belitu a ve zbytku obsahu z oxidu hlinitého, železného a dalších oxidů. Poměr oxidu vápenatého a křemičitého pak podle hmotnosti nesmí být menší než 2. Obsah oxidu horečnatého nesmí být větší než 5 % hmotnostních.

Granulovaná struska vysokopecní (S) je latentní hydraulická látka, jejíž hydraulické vlastnosti jsou vyvolány vhodnou aktivací při hydrataci. Nejméně ze dvou hmotnostních třetin musí obsahovat strusku ve sklovitém stavu. Hmotnostní obsah oxidu vápenatého, horečnatého a křemičitého v granulované vysokopecní strusce musí tvořit nejméně dvě třetiny její hmotnosti. Ve zbytku je obsažen oxid hlinitý s malým množstvím dalších oxidů. Hmotností poměr oxidu vápenatého a horečnatého k oxidu křemičitému musí být větší než 1. Granulovaná vysokopecní struska vzniká rychlým ochlazením vhodně složené struskové taveniny při tavení železné rudy ve vysoké peci.

Pucolán (P, Q) pucolány jsou přírodní nebo průmyslové látky křemičité, hlinito-křemičité nebo směsi těchto látek. Ačkoliv popílek a křemičitý úlet mají rovněž pucolánové vlastnosti, jsou uváděny zvlášť. Pucolány po smíchání s vodou samy netvrdnou. Jsou-li však jemně semlety, reagují v přítomnosti vody za normální teploty s rozpuštěným hydroxidem vápenatým za tvorby sloučenin vápenatých silikátů a vápenatých aluminátů, které jsou nositeli postupně narůstající pevnosti. Tyto sloučeniny jsou podobné těm, které vznikají při tvrdnutí hydraulických látek. Pucolány musí v podstatě obsahovat aktivní oxid křemičitý a oxid hlinitý. Ve zbytku pak oxid železitý a další oxidy. Obsah aktivního oxidu vápenatého je zanedbatelný. Obsah aktivního oxidu křemičitého musí být nejméně 25 % hmotnostních.

Přírodní pucolán (P) jsou obvykle látky vulkanického původu nebo sedimentární horniny vhodného chemického i mineralogického složení a musí vyhovovat požadavkům výroby.

Průmyslový pucolán (Q) jsou tepelně zpracované a aktivované hlíny a břidlice, vzduchem ochlazené strusky z výroby olova, mědi, zinku a jiných výrobků metalurgického průmyslu. Průmyslový pucolán může být použit jen takový, který výrazně nezvyšuje spotřebu vody pro zpracování cementu a v žádném případě nezhoršuje odolnost betonu nebo malty či nesnižuje ochranu výztuže.

Křemičitý popílek (V) je jemně mletý prášek převážně z kulovitých sklovitých částic s pucolánovými vlastnostmi. Musí se sestávat hlavně z aktivního oxidu křemičitého a oxidu hlinitého. Ve zbytku pak z oxidu železitého a jiných oxidů. Obsah aktivního oxidu vápenatého musí být menší než 5 % hmotnostních. Obsah aktivního oxidu křemičitého v křemičitém popílku podle předběžné evropské normy nesmí být menší než 25 % hmotnostních.

Vápenatý popílek (W) je jemně mletý prášek s hydraulickými nebo pucolánovými vlastnostmi či oběma. Musí se sestávat hlavně z aktivního oxidu vápenatého, aktivního oxidu křemičitého a oxidu hlinitého. Ve zbytku pak z oxidu železitého a jiných oxidů. Obsah aktivního oxidu vápenatého nesmí být menší než 5 % hmotnostních. Vápenatý popílek obsahující 5 % až 15 % aktivního oxidu vápenatého musí obsahovat nejméně 25 % aktivního oxidu křemičitého. Takový jemně mletý vápenatý popílek musí mít po 28 dnech hydratace nejméně 10 N/mm² pevnosti v tlaku. Rozpínání vápenatého popílku musí být menší než 10 mm.

Kalcinovaná břidlice (T) zvláště kalcinovaná olejnatá břidlice se vyrábí ve speciální peci při teplotě cca 800 °C. Podle složení přírodního materiálu a výrobního postupu obsahuje kalcinovaná břidlice slínkové fáze, zvláště dikalciumsilikát a monokalcium aluminát. Vedle toho obsahuje malá množství volného oxidu vápenatého a síranu vápenatého a značný podíl pucolanicky reagujících oxidů, zvláště oxidu křemičitého. Kalcinovaná břidlice má v jemně semletém stavu výrazně hydraulické vlastnosti jako cement portlandský a navíc pucolánové vlastnosti. Jemně mletá kalcinovaná břidlice musí mít po 28 dnech nejméně 25 N/mm² pevnosti v tlaku, rozpínání menší než 10 mm.

Křemičitý úlet (D) je tvořen velmi jemnými kulovitými částicemi s vysokým obsahem amorfního oxidu křemičitého, jež je větší než 85 % hmotnostních. Křemičitý úlet vzniká při redukci čistého křemíku v obloukových pecích při výrobě křemičitých a ferrokřemičitých slitin.

Vápenec (L), jehož obsah v cementu převyšuje 5 % hmotnostních, musí vyhovovat následujícím požadavkům:

- obsah uhličitanu vápenatého musí být větší než 75 % hmotnostních
- obsah jílovitého podílu absorpce metylenové modři menší než 1,2 g/100 g
- obsah organických složek menší než 0,2 % hmotnostních.

1.3 Voda

Voda umožňuje hydrataci cementu a krystalizaci nových produktů, a tím vytváření pevné vazby mezi kamennými zrny. Do betonové směsi dáváme větší množství vody, než je nutno pro hydrataci, a to proto, aby jsme snížili tření mezi zrny kameniva, a tím zlepšili vlastnosti při zhutňování.

Vodu, kterou používáme pro přípravu betonové směsi, nazýváme vodou záměsovou a vodu, kterou používáme k ošetřování betonu, nazýváme vodou ošetřovací.

Záměsová i ošetřovací voda musí být čistá, bez chemických přísad a bez škodlivých příměsí, které by mohly nepříznivě ovlivnit hydrataci cementu. Při výrobě betonu můžeme použít vodu, která byla označena za pitnou (pokud to není voda minerální).

Záměsová voda by měla mít optimální teplotu v rozmezí 20 - 25 °C, teploty vody využíváme také při betonáži v létě (použijeme studenou vodu) a v zimě (použijeme teplou vodu, max. 50 °C).

1.4 Směs

Kamenivo

Běžné betony vyrábíme nejméně ze dvou frakcí kameniva, a to ze širokých frakcí hrubého kameniva a drobného kameniva. Pro betony vyšších pevností použijeme nejméně tří frakcí kameniva. Běžné dávkování kameniva je 1,2 až 1,3 m³ na 1 m³ hotového betonu.

Tab. I. Poměr kameniva

Tabulka poměru drobného a hrubého kameniva		
Třída betonu	drobné kam.	hrubé kam.
B12,5	45%	55%
B15	40%	60%
B20 až B25	35%	65%
B30 a více	30%	70%

Cement

Cement je nejdražší složkou betonové směsi, proto se snažíme vyrobit kvalitní beton požadované pevnosti s minimálním množstvím cementu. Pro běžné konstrukce můžeme vycházet z normativních hodnot:

PB - 200 kg cementu na 1 m³ hotového betonu

ŽB - pro chráněnou expozici 240 kg cementu na 1 m³ hotového betonu, pro nechráněnou expozici 260 kg cementu na 1 m³ hotového betonu a pro vodohospodářské stavby 300 kg cementu na 1 m³ hotového betonu

Pevnost betonu se zvyšuje s množstvím cementu až do hodnoty 450 kg cementu na 1 m³ hotového betonu. Větší dávkování cementu již pevnost betonu nezvyšuje. Pro náročné betony musíme dávkování cementu prokázat zkouškou.

Voda

Vodu dávkujeme objemově. Dávka vody vychází z množství vody nutný k hydrataci cementu. Minimální množství vody pro hydrataci 1 kg cementu je 0,23 l vody. Vyšší množství vody napomáhá lepší zpracovatelnosti betonové směsi.

Množství vody ve směsi vyjadřujeme tzv. vodním součinitelem:

$$w = \frac{m_v}{m_c}$$

kde m_v je hmotnost vody a m_c je hmotnost cementu.

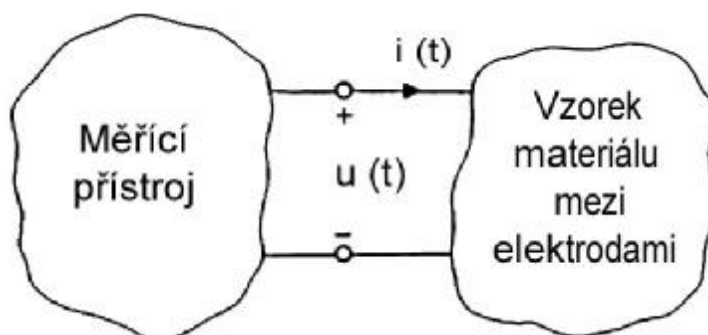
Tab. 2. Rozlišení konzistence betonové směsi podle vodního součinitele

Tabulka vodního součinitele w			
w	konzistence	použití	způsob zpracování
0,23 - 0,3	tuhá (suchá)	prefabrikáty	vibrolisování
0,3 - 0,5	zavadlá	méně namáhané vyztužené prvky a základové KCE	vibrátory
0,45 - 0,7	málo měkká velmi měkká	ŽB monolitické KCE	vibrátory propichování tyčemi
0,7 - 1,0	tekutá	tenkostěnné stěnové systémy	propichování tyčemi

1.5 Princip dielektrických měření

1.5.1 Odezva materiálu na střídavé elektrické napětí

Základním principem měření je umístění zkoumaného materiálu mezi dvě vodivé elektrody, použití časově proměnného napětí mezi elektrodami a sledování časově proměnného proudu nebo impedance (Obr. 1). Prostřednictvím střídavého napětí je vyvoláno elektrické pole, zkoumaný materiál se začíná polarizovat a vede elektrický náboj, který přechází z jedné elektrody na druhou. Dielektrická polarizace a elektrická vodivost jsou příčiny vzniku proudu, jehož velikost se může výrazně změnit v závislosti na podmínkách měření [1].



Obr.1. Princip dielektrických měření [5]

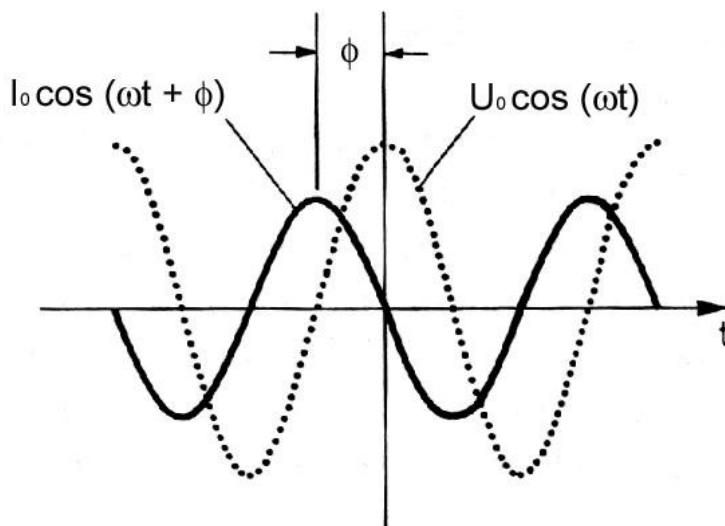
1.5.2 Měření impedance

Průběh napětí $u(t)$ a proudu $i(t)$ lze vyjádřit vztahy [5]:

$$u(t) = U_o \cos(\omega t) \quad (1)$$

$$i(t) = I_o \cos(\omega t + \phi) \quad (2)$$

kde U_o a I_o jsou hodnoty amplitud [-], ω je úhlová frekvence [s^{-1}] a ϕ je fázový posun [rad], (Obr.2).



Obr. 2. Sinusový průběh napětí a proudu s fázovým posunem ϕ [5]

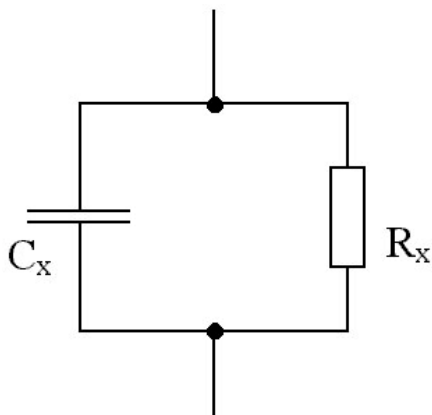
Impedance je zdánlivý odpor elektrického obvodu, přičemž její velikost a fázový posun ϕ jsou veličiny závislé na použité frekvenci měření [2].

$$Z(\omega) = \frac{U_o}{I_o} \quad (3)$$

Admitance je zdánlivá vodivost elektrického obvodu, přičemž její velikost a fázový posun ϕ jsou veličiny závislé na použité frekvenci měření.

$$Y(\omega) = \frac{1}{Z(\omega)} = \frac{I_o}{U_o} \quad (4)$$

Pro frekvence využívané při dielektrických měřeních je možno sestavit ekvivalentní elektrický obvod, který je složený z kondenzátoru $C_x(\omega)$ a z paralelně zapojeného odporu $R_x(\omega)$, plnícího funkci materiálu mezi elektrodami, viz. Obrázek (Obr. 3).



Obr. 3. Ekvivalentní obvod pro znázornění impedance elektrod a vzorku

Pro převrácenou hodnotu celkové impedance takového obvodu platí:

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{X_{Cx}} + \frac{1}{R_x} \quad (5)$$

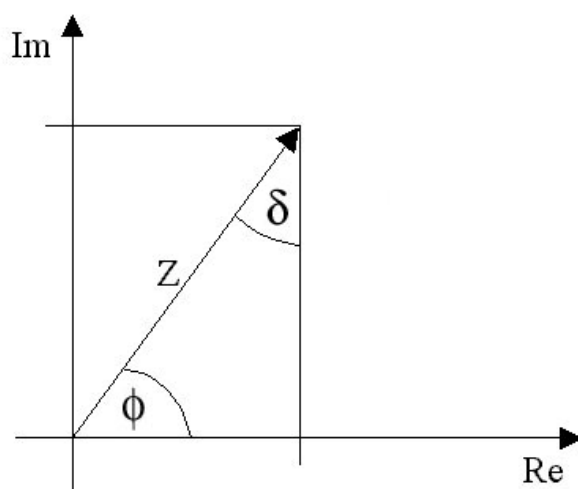
kde

$$X_{Cx} = \frac{1}{j\omega C_x} \quad (6)$$

Takže pro výslednou celkovou impedanci obvodu můžeme napsat:

$$Z = \frac{R_x}{1 + j\omega R_x C_x} = \frac{R_x}{1 + \omega^2 R_x^2 C_x^2} - j \frac{\omega R_x^2 C_x}{1 + \omega^2 R_x^2 C_x^2} \quad (7)$$

Grafické znázornění celkové impedance Z v komplexní rovině je znázorněno na obrázku (Obr. 4).



Obr. 4. Ekvivalentní obvod pro znázornění impedance elektrod a vzorku

1.5.3 Disipační faktor

Při měření impedance se využívá faktor disipace D . Není závislý na velikosti impedance, ale pouze na jejím fázovém posunu. Jeho definice je:

$$D = \cotg(\phi) = \tan(\delta) = \left| \frac{\operatorname{Re}(Z)}{\operatorname{Im}(Z)} \right| = \left| \frac{\frac{R}{1 + \omega^2 R^2 C^2}}{\frac{-\omega R^2 C}{1 + \omega^2 R^2 C^2}} \right| = \frac{1}{\omega RC} \quad (8)$$

Protože platí:

$$R = r \frac{l}{S} \quad (9)$$

$$C = \varepsilon \frac{l}{t} \quad (10)$$

$$s = \frac{1}{r} \quad (11)$$

kde σ je měrná vodivost [S.m^{-1}], ρ je měrný elektrický odpor [$\Omega.\text{m}$], ε je permitivita prostředí, S je plocha [m^2], můžeme po dosazení zapsat ve tvaru:

$$D = \frac{1}{wRC} = \frac{1}{wr \frac{l}{S} e \frac{S}{l}} = \frac{1}{wre} = \frac{s}{we} \quad (12)$$

Z výše uvedeného je patrné, že faktor disipace je závislý na úhlové frekvenci, hodnotě permitivity a vodivosti materiálu, tedy pouze na materiálových vlastnostech.

Další používanou veličinou je ztrátový úhel δ , což je dielektrická vlastnost materiálu [5] a je definována:

$$d = \arctg(D) \quad (13)$$

přičemž platí:

$$d = \frac{p}{2} - f \quad (14)$$

1.5.4 Komplexní permitivita materiálu

Komplexní permitivita materiálu popisuje odezvu materiálu na vnější elektrické pole [5] a zapisujeme ji takto:

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (15)$$

kde j je imaginární jednotka, ε' reálná část komplexní permitivity, ε'' imaginární část komplexní permitivity. Pro reálné dielektrikum lze psát:

$$\varepsilon^* = \varepsilon_0 \left(\varepsilon_r - \frac{js}{\omega \varepsilon_0 \varepsilon_r} \right) \quad (16)$$

kde ε_0 je permitivita vakua a je rovna hodnotě $8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$.

Imaginární část komplexní permitivity ε'' se skládá ze dvou částí:

- ztráty energie, spojené s časově proměnnou polarizací

- ztráty energie, spojené s objemovou vodivostí

Disipační faktor označovaný jako D , může být také definován, jako podíl imaginární a reálné části komplexní permitivity materiálu:

$$\operatorname{tg}(d) = \frac{e''}{e'} \quad (17)$$

K měření dielektrických vlastností materiálu se nejčastěji užívá plošných elektrod, mezi které je zkoumaný vzorek vkládán. Pokud je cílem měření získání hodnot ε' a ε'' , je nezbytné určení plochy a vzdálenosti elektrod.

V praxi se lze často spolehnout pouze na měření D , protože při sledování kinetiky reakcí (např. síťování nebo vulkanizace) dochází v materiálu k rozměrným změnám. Přesnost tohoto měření však bývá ovlivněna chybami, které způsobují efekty probíhající na rozhraní materiálu a elektrod.

1.6 Dielektrické vlastnosti z hlediska struktury materiálu

1.6.1 Objemové jevy

Permitivitu homogenní látky ε lze vyjádřit jako součet základní složky permitivity ε_u a příspěvku k permitivitě ε_d , přičemž ε_d je způsoben dipólovou orientací na frekvenci, teplotě a stupni zesíťování materiálu [4]:

$$\varepsilon = \varepsilon_u + \varepsilon_d \quad (18)$$

1.6.2 Iontová vodivost

Iontová vodivost v materiálu je způsobena nečistotami, které vznikají jako vedlejší produkty při polymeračních reakcích, jedná se hlavně o ionty sodíku a chlóru.

Elektrické pole v materiálu o intenzitě E způsobuje, že ionty i -tého druhu dosahují průměrné driftové rychlosti v_i . Za předpokladu lineárního chování materiálu je driftová rychlost úměrná intenzitě elektrického pole [4]:

$$\vec{v}_i = u_i \vec{E} \quad (19)$$

kde u_i je konstantou úměrnosti a nazývá se pohyblivost iontu.

Pokud se v materiálu nachází N_i inotů n -tého druhu s nábojem o velikosti Q_i , může být iontová vodivost vyjádřena následovně jako:

$$s = \sum (Q_i N_i u_i) \quad (20)$$

Vztahem mezi pohyblivostí iontů a vlastnostmi materiálu je kvantitativně vyjádřen Stokesovým zákonem pro pohyb sférického objektu ve viskózní látce. Pohyblivost tělesa o poloměru r_i v látce o viskozitě η za působení síly $Q_i E_i$ bude:

$$u_i = \frac{Q_i}{6\pi\eta r_i} \quad (21)$$

V předcházejícím modelu je pohyblivost, tedy i iontová vodivost, nepřímo závislá na viskozitě. Proto veličina $1/\sigma$, nazývaná odpor, bude přímo závislá na viskozitě. Je potřeba upozornit na to, že přiblížení pomocí Stokesova zákona je poměrně zjednodušené a úplně neplatné pro zželatinování materiálu. Při želatinaci roste viskozita k nekonečnu v důsledku vytvoření makromolekulární sítě. Odpor však zůstává na konečné velikosti, protože část polymerních segmentů, které jsou velikostí srovnatelné s ionty, bude stále vlivem difúzních mechanismů pohyblivá. Viskozita a odpor budou tedy v období před želatinací úzce spojeny, protože mají podobnou závislost na pohyblivosti polymerních řetězců.

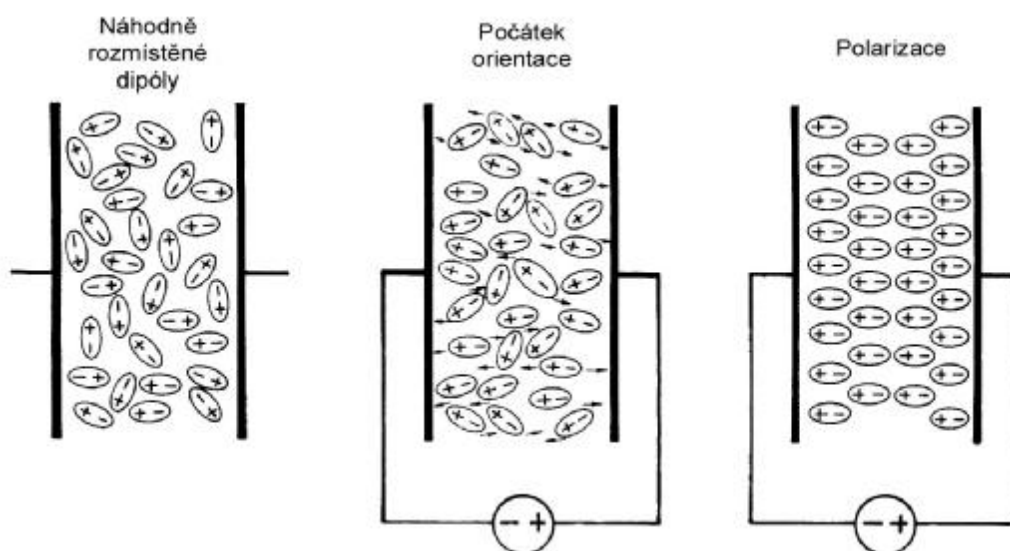
Vliv iontové vodivosti na ztrátový faktor materiálu je vyjádřen vztahem [4]:

$$\epsilon'' = \left(\frac{s}{\omega \epsilon_o} \right) + \epsilon_d'' \quad (22)$$

kde ϵ_d'' značí příspěvek k ϵ'' od ztrát narůstajících vlivem dipólové orientace.

1.6.3 Dipólová orientace

Na obrázku (Obr. 5) je znázorněna orientace dipólů do směru elektrického pole.



Obr. 5. Orientace dipólů v elektrickém poli [5]

Dipóly se nacházejí ve viskózním prostředí, přičemž jejich pohyb je bržděn narůstající makromolekulární sítí. Proces orientace dipólů si vyžaduje čas, který je označován jako relaxační a značí se τ_d . Během typické síťovací reakce je nejprve krátký a pak postupně vzrůstá s rozvojem molekulární struktury.

K popisu dipolárních veličin je vhodné označit [5]:

ϵ_U jako *konstantní permitivitu*: pro dostatečně vysoké frekvence, kdy v daném materiálu nejsou dipóly schopny sledovat změny elektrického pole.

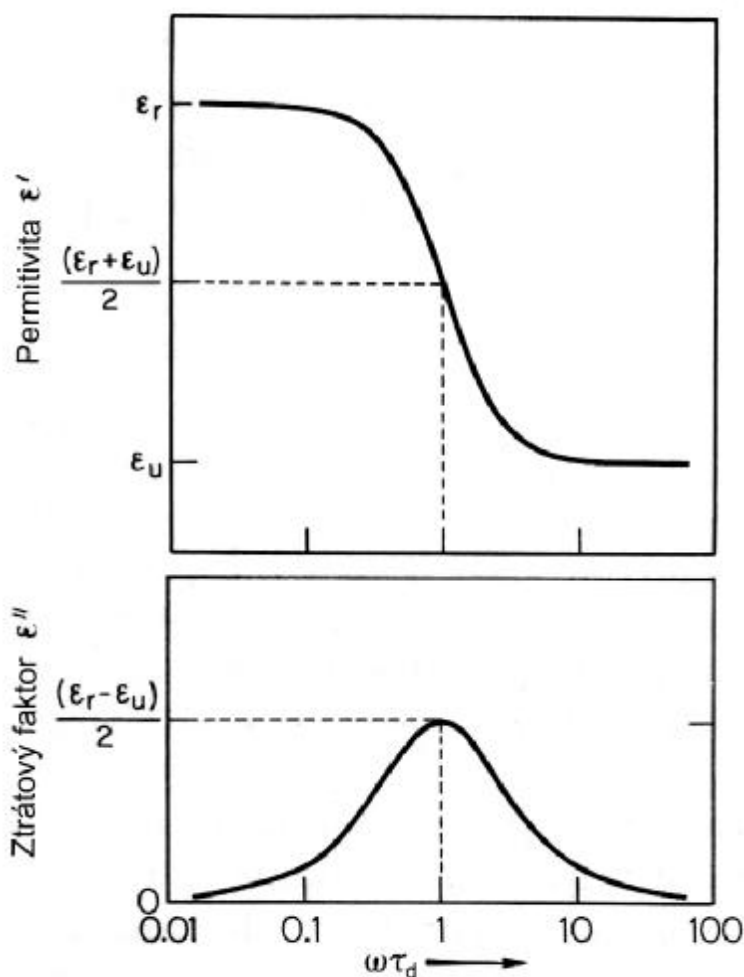
ϵ_R jako *relaxační permitivitu*: dipóly jsou schopny sledovat elektrické změny s nejmenším možným relaxačním časem pro danou teplotu.

Nejjednodušší model bržděné orientace dipólů lze vyjádřit Debay, ten předpokládá jeden relaxační čas pro všechny skupiny molekul [5]. Tento model můžeme vyjádřit následujícími vztahy:

$$\epsilon' = \epsilon_U + \frac{(\epsilon_R - \epsilon_U)}{1 + \omega^2 \tau_d^2} \quad (23)$$

$$\epsilon'' = \left(\frac{s}{\omega \epsilon_0} \right) + \frac{(\epsilon_R - \epsilon_U) \omega \tau_d}{1 + \omega^2 \tau_d^2} \quad (24)$$

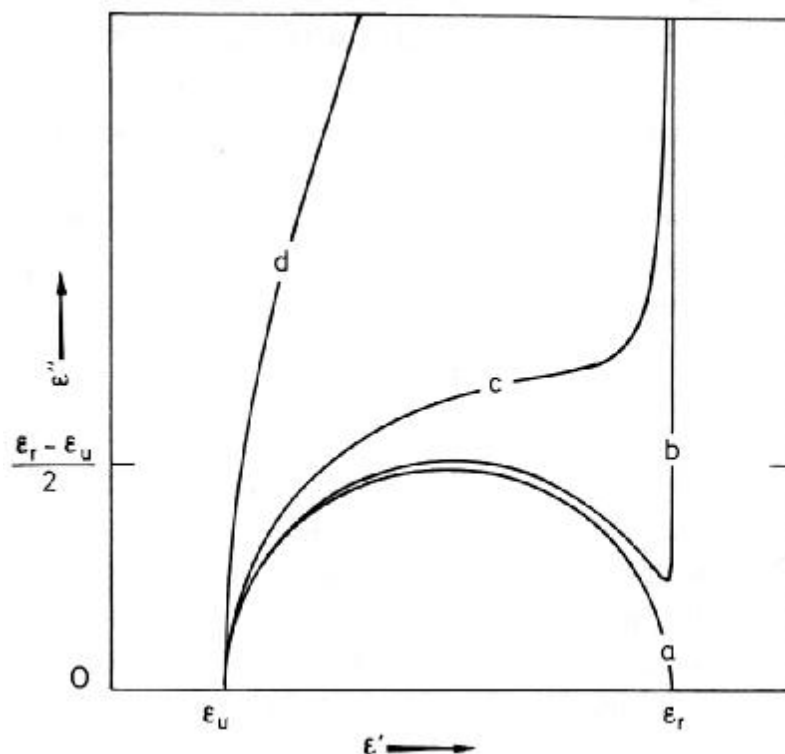
Na obrázku (Obr. 6) je znázorněna frekvenční závislost ϵ' . Je možné si všimnout, že hodnota ϵ' dosahuje střední hodnotu mezi ϵ_U a ϵ_R pro $\omega = 1/\tau_d$. Frekvenční závislost ϵ'' je poměrně složitější, neboť je potřeba stanovit relativní příspěvek od iontové vodivosti a od dipólových ztrát.



Obr.6. Závislost ϵ' a ϵ'' na frekvenci měření [5]

Velmi častým vyjádřením ϵ' a ϵ'' na frekvenci je diagram Cole-Cole, kde ϵ'' je vyneseno proti ϵ' jako parametr (Obr. 7). Pro $\sigma = 0$ je diagram polokružnice s konečnými

body v ϵ_U a ϵ_R a s maximem $\epsilon'' = (\epsilon_R - \epsilon_U)/2$. S narůstajícím σ se však diagram přibližuje vertikální čáře s úsekem na ϵ' rovným ϵ_U [5].



Obr. 7. Diagram Cole-Cole, a: $s = 0$, b,c,d: $-2ps t_d/(e_R - e_U) e_0 = 0.1, 1, 10$ [5]

Protože při sledování kinetiky síťování prochází materiál rozměrovými změnami, v praxi se lze často spolehnout pouze na měření D. Přesnost tohoto měření bývá často ovlivněna chybami způsobenými efekty, probíhajícími na rozhraní materiálu a elektrod.

II. PRAKTICKÁ ČÁST

2 BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

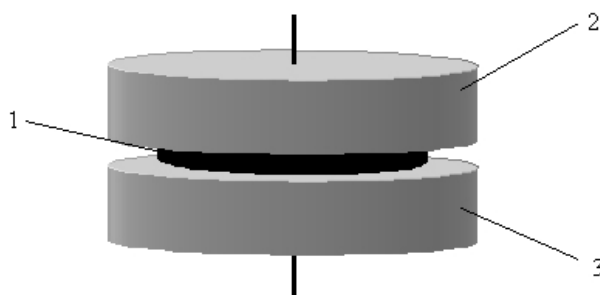
2.1 Hardwarové prostředky

2.1.1 Digitální měřící můstek HP 4284A

Jedná se přesný měřící přístroj od firmy HEWLETT - PACKARD. Používá se pro přesné měření kapacity, indukčnosti, rezistivity, impedance, ztrátového úhlu a některých jiných veličin. Je schopen měřit v rozsahu testovací frekvence 20 Hz až 1 MHz. Udávaná chyba měření přístroje je 1%.

2.1.2 Dvouelektrodový měřící systém

Na obrázku (Obr. 8) je znázorněn princip měření zkoumaného vzorku mezi kovovými elektrodami. Protože byly sledovány změny R , plocha elektrod a vzdálenost mezi nimi měla na měření vliv. Proto se musely vzdálenosti a plochy elektrod udržovat u měřených vzorků stejné.



Obr. 8. Dvouelektrodový měřící systém, 1 – zkoumaný vzorek, 2,3 – kovové elektrody

2.2 Programové prostředky

2.2.1 Programové prostředky HP Vee 3.12

HP Vee 3.12 je grafický programovací jazyk firmy HEWLETT – PACKARD, který umožňuje načítat, analyzovat, zpracovávat a zobrazovat data bez textově založeného programování. Ve svém jádře obsahuje velké množství různých procedur a matematických funkcí.

U našeho měření jsme se však rozhodli vzhledem k množství vzorků a časové prodlevě mezi měřeními tento program nevyužít. Nebylo možné blokovat měřící zařízení ostatním studentům během celého měsíce.

2.3 Použité betony

Beton B 25, B20, B15 – pytlované betonové směsi, vyr. Calofrig a.s., ČR

2.4 Sestavení měřící aparatury

Aparatura se skládá pouze z digitálního měřícího můstku HP a dvouelektrodového měřícího systému. Měření vzorků bylo prováděno manuálně, jako i zápisy jednotlivě naměřených hodnot.

2.4.1 Přípravy před vlastním měřením

Použité kovové elektrody jsou vyrobeny z měděného plechu tl. 15 mm, který byl nastříhán na stejně velké pásy. Abychom docílili konstantní vzdálenosti mezi elektrodami a zabránili zároveň vytlačení měřeného vzorku z prostoru mezi nimi, a tím zkratování elektrod, použili jsme plastové distanční podložky.

Při prakticky prováděném měření se takto upravené elektrody vloží do středu plastových nádob a následně zalejí stejným množstvím betonové směsi přiměřené viskozity.

2.5 Výběr vhodné dielektrické charakteristiky

Při sledování tuhnutí betonové směsi jsme se rozhodli sledovat změny hodnot elektrického odporu, který považujeme za jednu ze základních materiálových vlastností. Protože tato vlastnost je závislá na rozměru elektrod a na jejich vzájemné vzdálenosti, musíme při výrobě vzorků a hlavně při následném umístění elektrod dbát na konstantní vzdálenosti mezi nimi.

Odpor se mění v důsledku měnící se struktury materiálu, která brání iontům v pohybu.

Pro zobrazení průběhů, vyhodnocení a případného srovnání s jinými měřeními je pro nás výhodnější naměřené hodnoty R přepočítat dle vzorce (9) na hodnoty měrného odporu ρ .

2.6 Ověření principu sledování tuhnutí betonu

2.6.1 Výběr vhodného systému betonu

Pro ověření principů na sestavené aparatuře byl vybrán zkušební vzorek betonové směsi pod označením B 20.

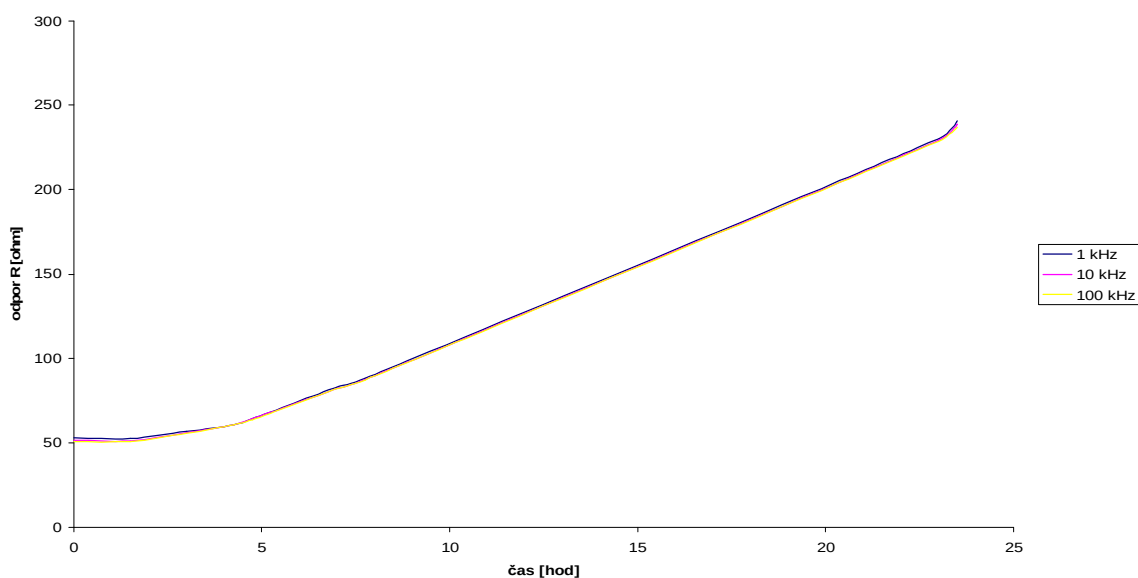
Betonová směs je materiál, u kterého po smíchání s vodou dojde k hydrataci cementu a krystalizaci nových produktů a tím vytváření pevné vazby mezi kamennými zrny. K počátku tuhnutí dochází u běžných betonů do jedné hodiny od přidání vody.

Příprava vzorku probíhala tak, že po promíchání suché směsi s vodou byla naplněna plastová nádoba, do které jsme poté vložili měděné elektrody. Následovalo co nejlepší zhutnění směsi, přiložení svorek na elektrody a následné měření odporu.

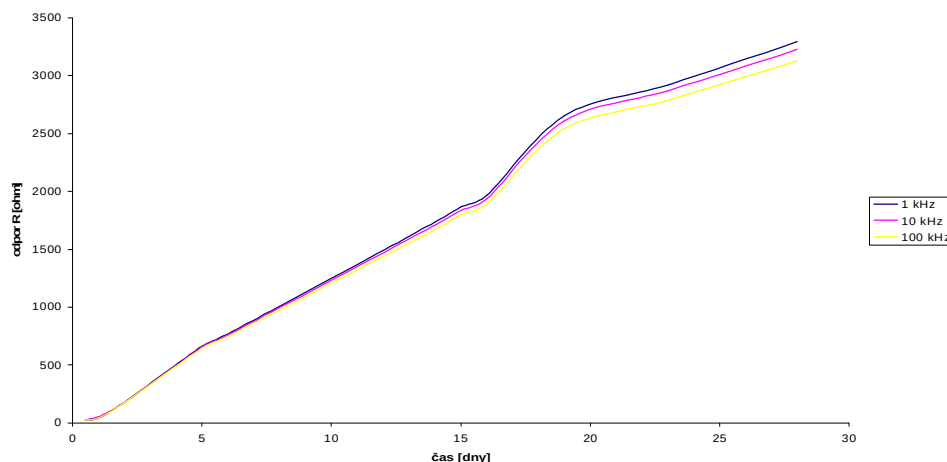
2.6.2 Stanovení vhodných měřících frekvencí

Frekvence byly zvoleny od 1 kHz, neboť u všech vyráběných RLC můstků jsou tyto měřící frekvence běžně realizovatelné.

Bylo provedeno měření R v závislosti na čase u betonu B 20 při třech různých frekvencích. Výsledky jsou znázorněny na (obr.8,9).



Obr. 9. $R(t)$, beton B 20 – různé frekvence, 0-24 hodin



Obr. 10. $R(t)$, beton B 20, různé frekvence, 0-28 dní

Z výsledků je jasné, že časový průběh R je při všech frekvencích velmi podobný. Za nejvhodnější frekvenci jsme považovali 1 kHz. Je to frekvence běžně používaná a u všech vyráběných RLC můstků běžně realizovatelná.

Proto všechna následující měření, která byla provedena, se měřila při frekvenci 1 kHz.

2.7 Měření $R(t)$ u vzorků betonů

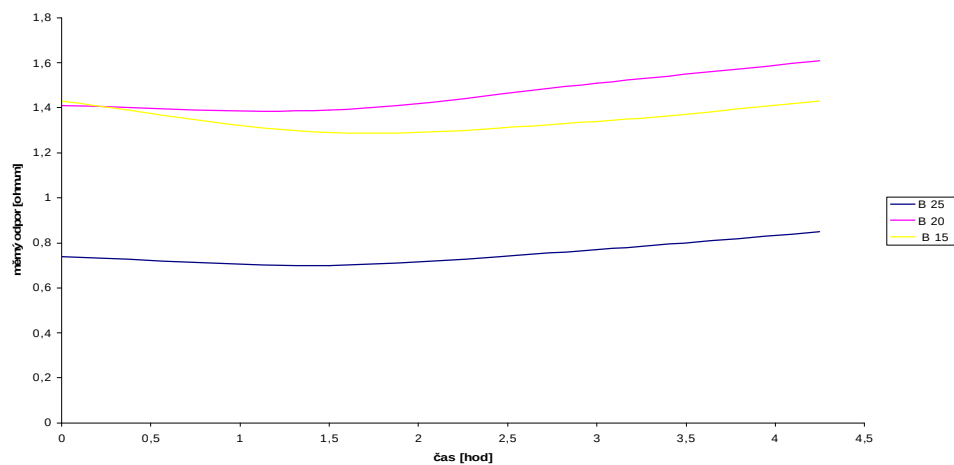
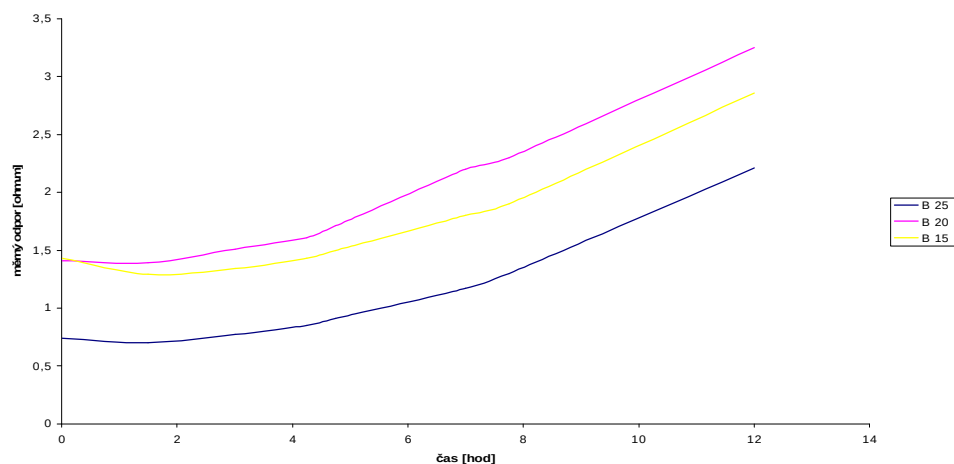
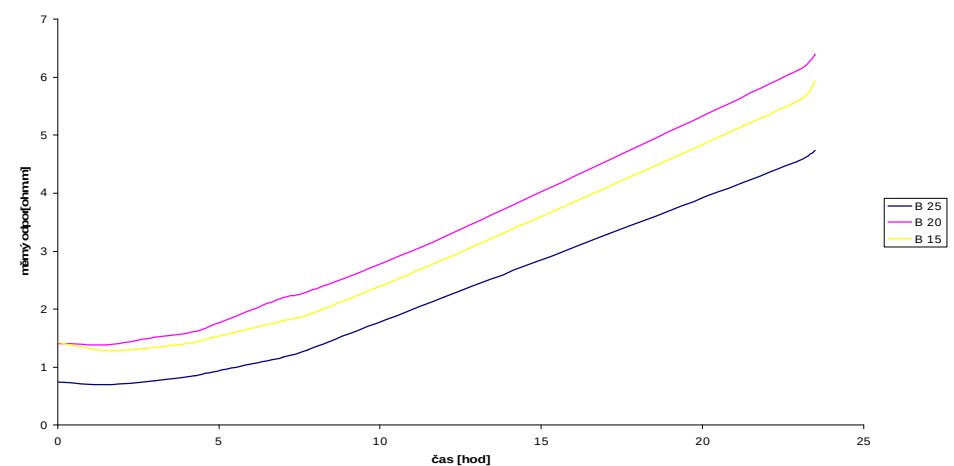
2.7.1 Příprava vzorků k měření

Do suchých betonových směsí jednotlivých pevností byla přidána voda, následně jsme vše důkladně promíchali a naplnili připravené plastové nádoby stejným množstvím směsi. Po vložení elektrod z měděného plechu byly vzorky připraveny k měření.

2.7.2 Beton B 25, B 20, B15

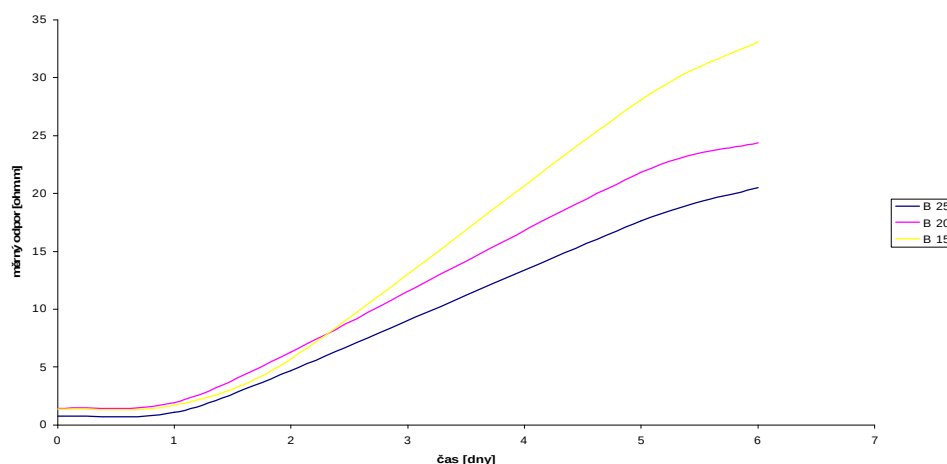
Tuhnutí je chemický a fyzikami pochod, při němž kašovitá směs cementu, kameniva a vody tuhne v pevnou hmotu. Začátek tuhnutí je pro cementy obecného použití stanoven s ohledem na pevnostní třídu. Cementy pevnostní třídy maxim. 42,5 mají počátek tuhnutí stanoven nejdříve za hodinu, nejpozději do 12 hodin po smíchání cementu s vodou.

Výsledky měření od počátku tuhnutí jsou znázorněny na (obr. 11,12,13)

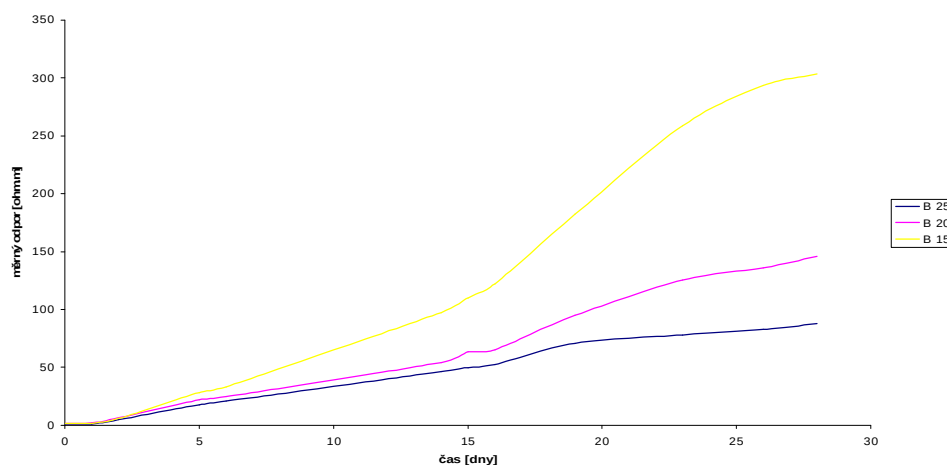
*Obr. 11. 1 kHz, srovnání betonů, 0-4,5 hod**Obr. 12. 1 kHz, srovnání betonů, 0-12 hod**Obr. 13. 1 kHz, srovnání betonů, 0-24 hod*

Tvrdnutí je chemický a fyzikální pochod, při němž se tuhá směs přeměňuje v tvrdou hmotu, která nabývá pokračující hydratací větší pevnosti. Začátek tvrdnutí je pro cementy stanoven nejdříve za 24 hodin. Rychlost tvrdnutí je dána chemickým složením a jemností cementu. Tvrdnutí probíhá zpočátku intenzivně, později se zpomaluje, až se po několika letech ustálí. Největší přírůstek pevnosti nastává do 28 dnů. Tuto pevnost považujeme za základní, stoprocentní.

Výsledky měření během 6 dnů jsou znázorněny na (obr. 14), během 28 dnů na (obr. 15)



Obr. 14. 1 kHz, srovnání betonů, 0-6 dní



Obr. 15. 1 kHz, srovnání betonů, 0-28 dní

ZÁVĚR

Byl sestaven měřicí systém na bázi LCR můstku, který umožňoval ruční sběr dat při měření tuhnutí betonu pomocí impedanční spektroskopie, jako vhodnou měřenou veličinu jsme zvolili odpor R . Pro zobrazení průběhů, vyhodnocení a případného srovnání s jinými měřeními jsme naměřené hodnoty R přepočítali na hodnoty měrného odporu ρ .

Byla provedena měření vzorku betonové směsi při různých testovací frekvencích za účelem zjištění vhodné frekvence pro tuhnutí. Na základě výsledků bylo rozhodnuto o měřicí frekvenci 1 kHz.

Následně byla provedena měření tuhnutí u betonů tříd B15, B20, B25, které se liší v použití cementů různých tříd a tím následně v různé konečné pevnosti.

Měření byla prováděna první den v hodinových intervalech. Poté každý den, dle možností, až do 28 dne, kdy beton dosáhne základní pevnosti.

Ke grafickému vyhodnocení jsme použili program Excel, který umožňuje grafické zobrazení naměřených dat v podobě časových závislostí měrného odporu ρ .

Podle naměřených hodnot křivka kinetiky reakce tuhnutí u zhotovených vzorků kopíruje křivku tuhnutí a tvrdnutí betonu. Největší nárůst odporů jsme zaznamenali během prvních 8 dnů a následně ještě kolem 20 dne. Po 28 dnech a tím dosažení tzv. stoprocentní pevnosti se přírůstky odporů znatelně snižovaly.

Je problematické naši práci hodnotit, protože i když pro srovnání jsou publikovány podobné výzkumy, většinou se u nich objevují nejednoznačné výsledky. Pravděpodobně je to dáno nehomogenitou materiálů, hlavně kameniva, které může obsahovat složky výrazně ovlivňující výsledky měření. Podrobné určení charakteristik tuhnutí pomocí impedanční spektroskopie by vyžadovalo delší čas ke zvládnutí této problematiky a podrobnější výzkum daného problému.

Metoda je vhodná spíše pro laboratorní účely, v praxi budou převládat více mechanické a destruktivní zkoušky betonů.

LITERATURA

- [1] KVASNICA, J. *Fyzikální pole*. Praha: SNTL, 1964
- [2] ČIČMANEC, P. *Všeobecná fyzika 2, Elektřina a magnetismus*. Bratislava: ALFA, 1980
- [3] ŠINDELÁŘ, V., SMRŽ, L. *SI nová soustava jednotek*. Praha, SPN, 1989
- [4] MEISSNER, B., ZILVAR, V. *Fyzika polymerů*. Praha, SNTL/ALFA, 1987
- [5] NAVRÁTIL, M. *Instrumentace a zpracování signálů při měření kinetiky síťovacích reakcí pomocí impedanční spektroskopie*. Diplomová práce FT UTB, 2002
- [6] HEDWIG, P. *Dielectric Spectroscopy of Polymers*, Akademiai Kiado Budapest, 1977
- [7] DAŽO, S., KREIDL, M. *Senzory a měřicí obvody*. Praha, ČVUT, 1996
- [8] Firemní literatura fy Agilent (Hewlett-Packard)
- [9] LAPČÍK, L., RAAB, M. *Nauka o materiálech*. Zlín, UTB ve Zlíně, 2000

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

j		imaginární jednotka
E	$[V.m^{-1}]$	intenzita elektrického pole
i	$[A]$	elektrický proud
u	$[V]$	elektrické napětí
t	$[s]$	čas
τ_d	$[s]$	relaxační čas
ω	$[s^{-1}]$	úhlová frekvence
ϕ	$[rad]$	fázový posun
T	$[^{\circ}C]$	teplota
Y	$[S]$	admittance
Z	$[\Omega]$	impedance
R	$[\Omega]$	elektrický odpor
C	$[F]$	elektrická kapacita
S	$[m^2]$	plocha
r	$[m]$	poloměr
l	$[m]$	vzdálenost
η	$[Pa.s]$	dynamická viskozita
ρ	$[\Omega.m]$	měrný elektrický odpor
σ	$[S.m^{-1}]$	měrná elektrická vodivost
D	$[-]$	faktor disipace
D'	$[-]$	transformovaný faktor disipace
r_k	$[-]$	korelační koeficient
δ	$[rad]$	ztrátový úhel
ϵ	$[F.m^{-1}]$	permitivita
ϵ^*	$[F.m^{-1}]$	komplexní permitivita
ϵ'	$[F.m^{-1}]$	reálná část komplexní permitivity
ϵ''	$[F.m^{-1}]$	imaginární část komplexní permitivity
ϵ_0	$[F.m^{-1}]$	permitivita vakua
ϵ_r	$[-]$	relativní permitivita
ϵ_u	$[F.m^{-1}]$	základní složka permitivity

ε_d	$[\text{F.m}^{-1}]$	příspěvek k permitivitě
ε_R	$[\text{F.m}^{-1}]$	relaxační permitivita
ε_U	$[\text{F.m}^{-1}]$	konstantní permitivita
v_i	$[\text{m.s}^{-1}]$	průměrné driftové rychlosti
u_i	$[\text{m.C.s}^{-1}.\text{N}^{-1}]$	pohyblivost iontu
N	$[-]$	počet iontů
Q_i	$[\text{C}]$	iontový náboj

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Princip dielektrických měření [5].....	21
Obr. 2. Sinusový průběh napětí a proudu s fázovým posunem ϕ [5].....	22
Obr. 3. Ekvivalentní obvod pro znázornění impedance elektrod a vzorku.....	23
Obr. 4. Ekvivalentní obvod pro znázornění impedance elektrod a vzorku.....	24
Obr. 5. Orientace dipólů v elektrickém poli [5].....	28
Obr. 6. Závislost ϵ' a ϵ'' na frekvenci měření [5].....	29
Obr. 7. Diagram Cole-Cole, a: $\sigma = 0$, b,c,d: $-2\pi\sigma\tau_d/(\epsilon_R - \epsilon_U) \epsilon_0 = 0.1, 1, 10$ [5].....	30
Obr. 8. Dvouelektrodový měřicí systém, 1 – zkoumaný vzorek, 2,3 – kovové elektrody..	32
Obr. 9. $R(t)$, beton B 20, různé frekvence, 0-24 hodin.....	34
Obr. 10. $R(t)$, beton B 20, různé frekvence, 0-28 dní.....	35
Obr. 11. 1 kHz, srovnání betonů, 0-4,5 hod.....	36
Obr. 12. 1 kHz, srovnání betonů, 0-12 hod.....	36
Obr. 13. 1 kHz, srovnání betonů, 0-24 hod.....	36
Obr. 14. 1 kHz, srovnání betonů, 0-6 dní.....	37
Obr. 15. 1 kHz, srovnání betonů, 0-28 dní.....	37

SEZNAM TABULEK

Tab. 1. Poměr kameniva.....	20
Tab. 2. Rozlišení konzistence betonové směsi podle vodního součinitele.....	21

