



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

REAKTIVNÍ PRÁŠKOVÉ KOMPOZITY (RPC)

REACTIVE POWDER CONCRETE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Miroslav Gabko

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. RUDOLF HELA, CSc.

BRNO 2017



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Miroslav Gabko
Název	Reaktivní práškové kompozity (RPC)
Vedoucí práce	prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.
Datum zadání	31. 3. 2016
Datum odevzdání	13. 1. 2017

V Brně dne 31. 3. 2016

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

Odborné zahraniční i tuzemské časopisy, sborníky z odborných symposií a konferencí, internetové zdroje odborných publikací z daného oboru.

Diplomové práce vypracované na ÚTHD FAST Brno v období 2012 – 2015

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Technologie reaktivních práškových kompozitů je známá cca 20 roků, ale v ČR se prakticky vůbec nepoužívá. Důvodem může být relativně vyšší cena, ale zejména nízká úroveň technického poznání a mizivé praktické zkušenosti. Tato technologie umožňuje dosáhnout na jemnozrnných silikátových kompozitních materiálech pevností až kolem 300 MPa, současně jsou velmi zajímavé i hodnoty pevností v tahu za ohybu či příčného tahu.

Cílem práce bude vyvinout receptury a následně prakticky ověřit základní fyzikálně-mechanické vlastnosti RPC s pevnostmi 200 až 300 MPa s využitím jemnozrnných aktivních příměsí. Při návrhu receptur je nutné optimalizovat složení složek s cílem dosáhnout maximální hutnosti a to například úpravou vodního součinitele podle poměrných objemových hmotností v závislosti na obsahu vody, sestavením ideální křivky zrnitosti všech složek a dávkováním jemnozrnných plniv. Současně je nutné navrhnout způsoby zhutňování a tepelného ošetřování. V další části také experimentálně ověřit možnosti nízkocementového RPC (LCRPC) s vysokým obsahem popílků (aktivovaných či neaktivovaných).

Rozsah práce minimálně 70 stran.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.

Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Reaktivní práškové kompozity (RPC) jsou v posledních letech předmětem mnoha výzkumů v oblasti moderní technologie betonu. Jedná se o velmi jemnozrnné betony, které svými vlastnostmi výrazně převyšují ostatní druhy betonů a nabízí tak nové možnosti využití. Jejich návrh a výroba je složitým technologickým procesem, který vyžaduje stále nové poznatky v oblasti výzkumu RPC tak, aby dosáhl co nejlepších vlastností v poměru ke své vysoké ceně.

Cílem práce je navrhnout směs reaktivního práškového betonu (tzv. RPC200), který disponuje pevností v tlaku 200 – 300 MPa. Dále také ověřit vliv způsobu ošetřování, ať už za zvýšené teploty nebo tlaku a ověřit možnosti výroby nízkocementového reaktivního práškového kompozitu LCRPC.

KLÍČOVÁ SLOVA

Reaktivní práškový kompozit, příměsi, vlákna, ošetřování

ABSTRACT

Reactive powder composites (RPC) have been recently a subject of many researches of modern concrete technology. This type of concrete is very fine and its behaviour exceeds the other types of concrete, therefore there are new possibilities of its use. The design and production of RPC is complex technology process which needs to gain new results in RPC research to get the best features regarding its higher price.

This thesis is focused on design of reactive powder concrete (RPC200), which compressive strength is between 200 – 300 MPa. Next goal is to prove the influence of curing regimes like high temperature or pressure, and also check the possibilities of production of low cement reactive powder composite (LCRPC).

KEYWORDS

Reactive powder composite, admixtures, fibers, curing

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Bc. Miroslav Gabko *Reaktivní práškové kompozity (RPC)*. Brno, 2017. 80 s.,Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 4. 1. 2017

Bc. Miroslav Gabko
autor práce

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval panu prof. Ing. Rudolfu Helovi, CSc za odborné vedení mé diplomové práce a poskytnutí cenných rad v oblasti technologie betonu po celou dobu studia. Děkuji také všem zaměstnancům ústavu THD za velmi ochotnou pomoc při provádění laboratorních prací.

Tato diplomová práce byla zpracována s využitím infrastruktury Centra AdMaS.

1 Obsah

1	Obsah.....	8
2	Úvod.....	11
3	Vývoj reaktivních práškových betonů a jejich aplikace.....	12
3.1	Ductal®.....	12
3.2	CERACEM®.....	13
4	Principy RPC.....	14
4.1	Homogenita.....	14
4.1.1	Efekt použití jemného kameniva.....	14
4.1.2	Efekt vylepšení vlastností cementového kamene.....	15
4.1.3	Efekt snížení množství kameniva.....	15
4.2	Hutnost.....	15
4.2.1	Problematika particle packing.....	15
4.2.2	Návrh ideálního množství vody.....	17
4.3	Duktilita.....	18
4.4	Mikrostruktura.....	18
4.4.1	Pucolánová reakce.....	18
5	Požadavky na materiály pro výrobu RPC.....	20
5.1	Cement.....	20
5.1.1	Vliv složení cementu na účinnost superplastifikátorů.....	20
5.2	Superplastifikační přísady.....	23
5.2.1	Adsorpce superplastifikátorů (PC).....	24
5.3	Příměsi.....	25
5.3.1	Mikrosilika – křemičitý úlet.....	25
5.3.2	Křemenná moučka.....	26
5.4	Křemičité písky.....	27
5.5	Rozptýlená výztuž.....	27
6	Výroba RPC.....	28
6.1	Míchání.....	28
6.1.1	Vliv vakuového míchání na vlastnosti UHPC / RPC.....	29
6.2	Tepelné ošetřování.....	30
6.2.1	Ošetřování propařováním.....	31
6.2.2	Ošetřování autoklávováním.....	31

6.2.3	Kombinace způsobů ošetřování	34
7	Cíl praktické části	35
8	Metodika práce	36
8.1	I. etapa – vývoj receptur RPC a LCRPC.....	36
8.2	II. etapa – ověření vlivu teploty a tlaku prostředí.....	37
8.3	III. etapa – ověření možnosti výroby nízkocementového RPC.....	38
9	Použitá zařízení a jejich principy	39
9.1	Mastersizer 2000 – Laserová difrakce pro měření velikosti částic	39
9.2	TESCAN MIRA3 XMU – Elektronový rastrovací mikroskop.....	39
9.3	Rentgenová difrakční analýza XRD.....	39
9.4	Ruční míchadlo	40
9.5	Autokláv ADMAS II.....	40
9.6	Soustava pro prohřívání vzorků ve vodním uložení	40
10	Pracovní postupy.....	42
10.1	Laserová difrakce a stanovení křivky zrnitosti	42
10.2	Míchání směsi	42
10.3	Výroba vzorků.....	43
10.4	Měření konzistence	43
10.5	Ošetřování vzorků	44
10.6	Stanovení pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku	45
10.7	Příprava vzorků pro mikroskopii	46
10.8	Příprava vzorků pro rentgenovou difrakční analýzu	46
11	Použité materiály	47
11.1	Portlandský cement	47
11.2	Mikrosilika	47
11.3	Křemičité písky	48
11.4	Popílek.....	48
11.5	Superplastifikační přísada	49
11.6	Mikrovýztuž	49
12	Vývoj receptur RPC a LCRPC	50
12.1	Ideální dávkování suchých složek.....	50
12.1.1	Diskuze výsledků určení ideálního dávkování suchých složek	52
12.2	Ideální dávka vody	52
12.2.1	Diskuze výsledků návrhu ideálního vodního součinitele	54
12.3	Ověření vlivu způsobu hutnění	54
12.3.1	Diskuze ověření vlivu hutnění	55

13	Ověření vlastností navržených receptur RPC	56
13.1	Konečné receptury RPC	56
13.2	Výsledky měření vlastností RPC	56
13.2.1	Objemové hmotnosti a pevnosti RPC	57
13.2.2	Analýza mikrostruktury RPC.....	59
13.2.3	XRD analýza RPC	61
13.3	Diskuze výsledků měření vlastností RPC	63
14	Ověření vlastností navržených receptur LCRPC	65
14.1	Výsledky měření vlastní LCRPC	66
14.1.1	Objemové hmotnost a pevnosti LCRPC	66
14.2	Diskuze výsledků měření vlastností RPC	68
15	Závěr	70
16	Seznam použitých zdrojů.....	73
17	Seznam použitých zkratk a symbolů.....	77
18	Seznam grafů	78
19	Seznam tabulek	79
20	Seznam obrázků.....	80

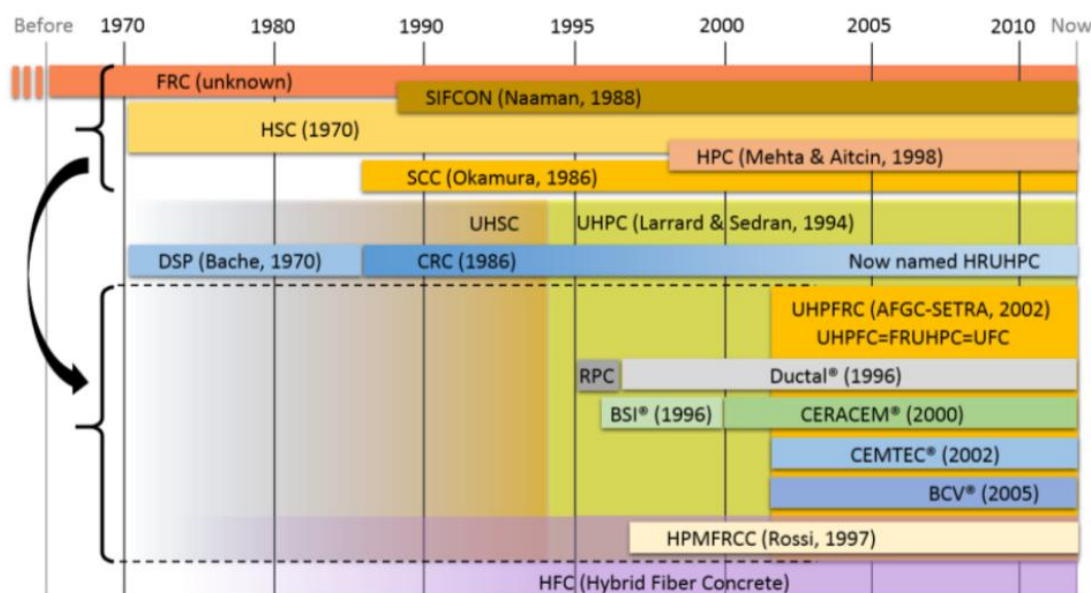
2 Úvod

Výzkumy v oblasti moderní technologie betonu se čím dál více zaměřují na vývoj nových materiálů, které se více či méně podobají takovým betonům, jaké známe již desítky let. Nmalou pozornost tak získávají i ultravysokohodnotné betony (UHPC) či reaktivní práškové kompozity (RPC), které obsahují základní složky betonu – cement, kamenivo, příměsi, vodu a přísady. Jejich podoba je oproti konvenčním betonům však rozdílná a v případě reaktivních práškových kompozitů se jedná o velmi jemnozrnné směsi, které neobsahují hrubé kamenivo, jsou vyztuženy mikrovlákny z ocele a při jejich výrobě je použito velmi malé množství vody. Již tato velmi obecná a zjednodušená charakterizace těchto speciálních směsí napovídá, že taková kombinace vlastností vstupních surovin povede k náročnému návrhu a výrobě. Při správném postupu, který pramení z vytvoření hutné homogenní mikrostruktury, je však možné vyrobit materiál o extrémně vysokých pevnostech a trvanlivosti.

Pevnost v tlaku reaktivních práškových betonů je vyšší než 200 MPa a v případě aplikování hydrotermálních procesů v kombinaci s dalšími způsoby ošetřování může dosáhnout pevností nad 600 MPa. Pevnosti v tahu za ohybu běžně překračují hodnotu 20 MPa a mohou se pohybovat až kolem 100 MPa.^[1] Výjimečné vlastnosti s sebou nesou také některé nevýhody, jakou je například vysoká cena RPC, vzhledem k vysoké dávce cementu a energeticky náročných procesech při výrobě. Je proto nutné vyvinout tento materiál do podoby, kdy budou jeho vylepšené užité vlastnosti mnohonásobně převyšovat pořizovací cenu. Již dnes materiály na bázi UHPC a RPC nahrazují jiné materiály například v strojařském průmyslu, kdy se využívají místo ocelových nosných částí obráběcích strojů apod. RPC betony jsou také využívány pro architektonické a dekorativní účely a byly také využity pro stavbu inženýrských staveb.

3 Vývoj reaktivních práškových betonů a jejich aplikace

Reaktivní práškové kompozity neboli reaktivní práškové betony (RPC) jsou vyvíjeny od 90. let 20. století. Předcházeli jim vývoj například vysokopevnostních betonů HSC, samozhutitelných betonů SCC, ultravysokopevnostních/hodnotných betonů UHSC/UHPC apod. Vždy se jednalo o betony, které měly oproti betonům tradičním vyšší užité vlastnosti, ať už v čerstvém či ztvrdlém stavu. Na obrázku 1 je zachycen vývoj jednotlivých druhů speciálních betonů, které jsou datovány podle časového úseku, ve kterém vznikl jejich název.^[21]



Obrázek 1: Schéma různých speciálních betonů a průběhu jejich vývoje^[21]

Ze schématu je patrné, že se postupně se začaly vyvíjet také suché práškové směsi (premixy), které pod registrovanou obchodní značkou a patentovanou technologií vstoupili na trh do nejrůznějšího odvětví. Níže jsou uvedeny některé z RPC premixů včetně jejich složení.

3.1 Ductal®

Reaktivní práškový beton nesoucí obchodní název Ductal® je jeden z nejstarších premixů tohoto typu obsahující: cement, křemenné písky, křemennou moučku, mikrosiliku, superplastifikační přísadu (SP) a ocelová mikrovlákná. Tento produkt byl vyvinut společnostmi Lafarge a Boygues&Rhodia. Dodaná prášková směs je smíchána s vodou a následně ukládána do forem. Dávka cementu se pohybuje okolo $750 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, vodní součinitel je roven 0,19 a vlákna o délce 13 mm a průměru 0,2 mm jsou dávkovány

v množství $160 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Společná dávka mikrosiliky a křemenné moučky je cca $260 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Křemičitý písek s $d_{\text{max}} = 0,6 \text{ mm}$ je dávkován v množství kolem $1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Směs o této receptuře má za čerstvého stavu rozliti 700 mm , pevnost v příčném tahu 8 MPa a pevnost v tlaku kolem 130 MPa (normové zrání). V případě použití Ductalu[®] v prefabrikovaných betonech, je možné pomocí prohřívání v 90 °C získat pevnosti až kolem 200 MPa . Směs je charakteristická svoji konzistencí, která je vhodná pro betonování členitých, subtilních nebo jinak složitých prvků. Na obrázku 2 je uveden příklad aplikace v inženýrské stavbě, kde jsou RPC nejen v podobě Ductalu[®] využívány díky možnosti pohlcení výjimečně velkého množství energie a odolávání tak explosivnímu, šokovému nebo nárazovému namáhání. Jedná se o lávku pro pěší v jihokorejském Soulu a jde o jeden z největších projektů použití RPC v prvopočátcích jeho aplikací.^{[20][21]}



Obrázek 2: Lávka pro pěší v Soulu^[22]

3.2 CERACEM[®]

Premix CERACEM[®] je pro porovnání mladším produktem oproti výše zmíněnému a disponuje také o něco vyššími pevnostmi v tlaku. Konkrétně 200 MPa po 28 dnech zrání při 20 °C . Po 7 dnech dosahuje pevnosti v tlaku až 165 MPa . Pevnost v příčném tahu je $8,8 \text{ MPa}$. CERACEM[®] obsahuje zhruba o $260 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ cementu více oproti Ductalu[®], jeho dávka se tedy pohybuje kolem $1100 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Dávka křemičitého úletu je 15% z hmotnosti cementu. Dalším rozdílem je, že CERACEM[®] neobsahuje křemennou moučku. Dávkování křemičitého písku je totožné. Hodnota rozliti je nižší a to 640 cm .^{[20][21]}

4 Principy RPC

Představením dvou vyráběných premixů bylo lehce nastíněno složení a vlastnosti RPC betonů. Obecně lze říci, že reaktivní práškové kompozity fungují na principu několika charakteristických rysů, které po jejich dosažení tvoří směs mimořádných vlastností.

4.1 Homogenita

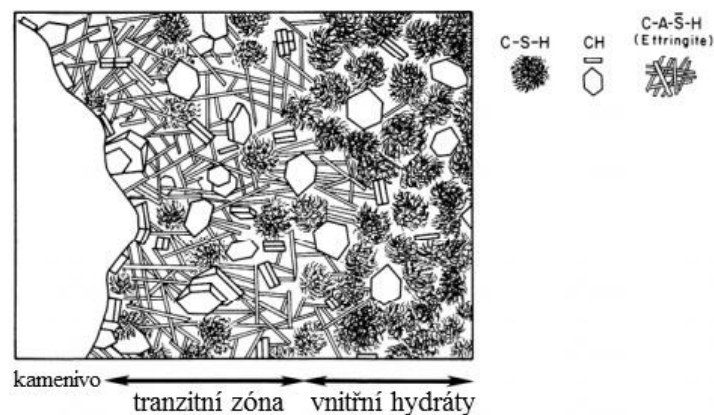
Konvenční beton je velmi heterogenní materiál, ve kterém kamenivo tvoří kostru pojenou cementovým tmelem. Kamenivo se v tomto případě vyznačuje výraznější tvrdostí oproti cementové pastě, kdy například modul pružnosti křemene je 70 GPa, zatímco cementového kamene běžného betonu cca 18 – 22 GPa.^[22]

Nevýhody spojené s heterogenní směsí jsou u RPC redukovány:

- absencí hrubého kameniva, které je nahrazen jemným pískem,
- vylepšením vlastností cementového kamene,
- zmenšením poměru kamenivo / matrice.^[22]

4.1.1 Efekt použití jemného kameniva

U betonů s hrubým kamenivem dochází po tlakovém či tahovém zatížení k vývoji trhlin v cementové pastě a to hlavně na rozhraní pasta – kamenivo. Toto rozhraní se nazývá tranzitní nebo mezifázová zóna a zaujímá tloušťku v rozmezí 10 – 50 μm . Je tvořena hydratačními produkty, které nejsou nositelem vysokých pevností – portlanditem a ettringitem.^{[22][8]} Schematicky je tranzitní zóna zobrazena na obrázku 3.



Obrázek 3: Schematické znázornění tranzitní zóny u běžného betonu

Dalším důvodem nižších pevností je, že hydráty, tvořící se do prostoru, který byl původně zaplněn vodou, jsou více krystalické a mají tedy nižší pevnost, než produkty hydratace kompaktnějšího tvaru, které vznikají uvnitř původních hranic hydratujících cementových zrn a jsou méně pórovité. V případě použití pouze jemného kameniva dochází k eliminaci tranzitní zóny.^{[22][8]}

4.1.2 Efekt vylepšení vlastností cementového kamene

Youngův modul pružnosti RPC betonů se běžně pohybuje kolem 50 GPa a můžou dosáhnout i hodnot 75 GPa v případě směsí s vyššími objemovými hmotnostmi. To způsobuje výrazné snížení rozdílů modulu pružnosti obou fází a v některých případech dokonce dochází k opačnému efektu, tedy že globální modul pružnosti matrice a kameniva lehce převyšuje modul pružnosti samotného kameniva. Každopádně dochází k výraznému snížení účinků rozdílů modulů pružnosti oproti obyčejným betonům.^[22]

4.1.3 Efekt snížení množství kameniva

Reaktivní práškové kompozity mají asi o 20 % vyšší podíl cementové pasty, než je objem mezer v nezhutněném písku. To znamená, že kamenivo, respektive písek, netvoří tuhou kostru, ale pouze samostatná zrna uzavřená v cementové matrici. To umožňuje při globálním smrštění transport jednotlivých zrn a tím zamezení vzniku trhlin. Tato výhoda je však uplatnitelná pouze v případě, že smrštění nebrání vnější vlivy.^[22]

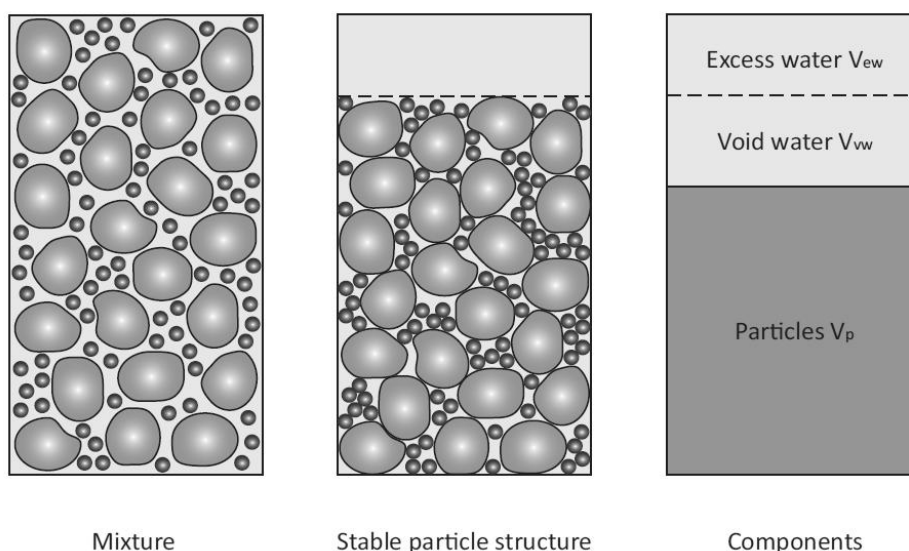
4.2 Hutnost

Hutnost celého systému směsi RPC lze modifikovat několika způsoby a to od vhodného dávkování suchých složek až po vhodné množství vody, případně použití speciálních způsobů hutnění, jako je například působení tlaku na čerstvou, případně částečně zhydratovanou směs.

4.2.1 Problematika particle packing

Již v roce 1890 byla známá teorie (Feret), že čím větší je kompaktnost betonové směsi, tím vyšší je výsledná pevnost^[21]. Při vývoji receptur RPC je ideální skládání jednotlivých zrn vstupních surovin zásadním krokem. Kromě možnosti dosažení mimořádně hutné struktury, vedoucí k nižší pórovitosti a získání vyšších užitných vlastností, lze dosáhnout také velmi nízkých hodnot vodního součinitele, což vede opět k hutnější mikrostruktuře

a dalším výhodám. Na obrázku 4 je znázorněn vliv množství potřebné vody v závislosti na hutnosti poskládaných zrn. Obrázek uprostřed znázorňuje ztuhlé částice o stejném množství jako na obrázku vlevo (reálná situace). V reálné betonové směsi je část vody spotřebována na vyplnění mezer mezi zrna, zatímco další voda navíc tvoří přebytek. Tento přebytek pak způsobuje tekutost směsi, která roste spolu s množstvím přebytku vody. Čím více je přebytkové vody v záměsi, tím více klesá podíl pevných částic.^{[21][24]}



Obrázek 4: Znázornění spotřeby vody v betonové směsi při vyplnění pórů a zajištění tekutosti^[24]

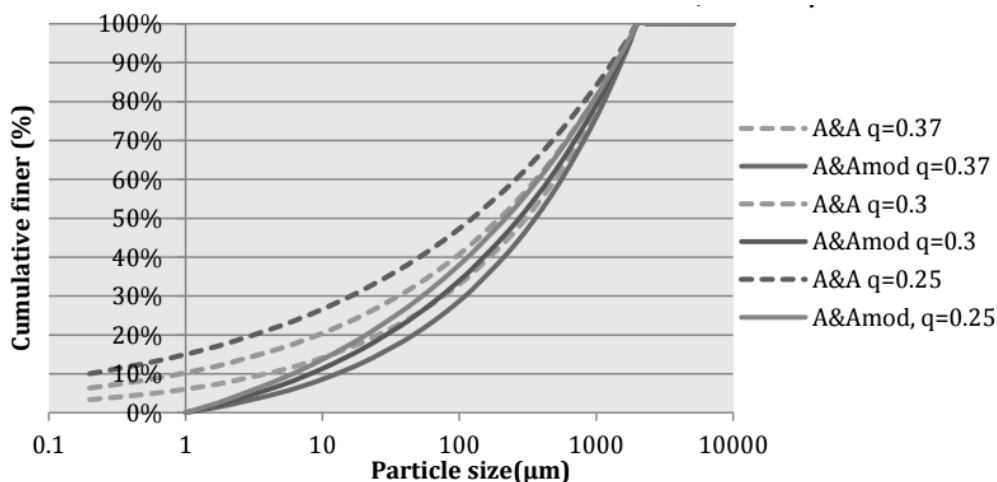
Čím více je směs zrn hutnější, tím menší je její mezerovitost a tím pádem je potřeba méně vody pro vyplnění. Více vody je poté k dispozici k zajištění požadovaných reologických vlastností.^[24]

Pro poskládání částic cementu, fillerů, příměsí a kameniva bylo vyvinuto několik modelů, jako například binární (Binary), potrojný (Trinary), multi-modelový (Multi-model) a mnoho dalších. Je možno použít také jednodušších metod v podobě ideálních křivek zrnitosti, z nichž je pro návrh RPC nejvhodnější modifikovaná křivka zrnitosti vyvinutá dvojicí Andearsen a Andearsen, která se vypočte dle rovnice:^[24]

$$y_i = \frac{D_i^n - D_{Min}^n}{D_{Max}^n - D_{Min}^n} \cdot 100 \%$$

y_i	propad sítem o velikosti d	[%]
D_i	průměr zrna i -frakce	[μm]
D_{min}	průměr maximálního zrna	[μm]
D_{max}	průměr minimálního zrna	[μm]
n	konstanta	[-]

Její průběh v porovnání s modifikovanou křivkou zrnitosti (vypočtená dle Fullera, s modifikovaným $q = 0,37$ a $0,25$) je znázorněn v grafu 1.

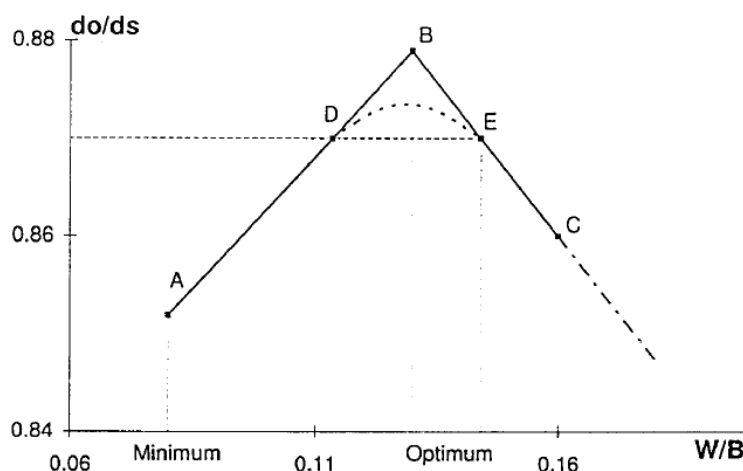


Graf 1: Křivky zrnitosti vyžívané při ideálním skládání částic při návrhu receptur^[24]

Pro optimální poskládání částic s dosažením minimální mezerovitosti je vhodné použít nejjemnější příměsi, jakou je například křemičitý úlet. Ostatně jak je uvedeno v jiných kapitolách, příměsi tohoto typu jsou důležitou součástí směsi RPC.

4.2.2 Návrh ideálního množství vody

Při návrhu ideálního množství vody (z hlediska hutnosti směsi) se sleduje parametr d_0/d_s , tedy relativní objemové hmotnosti, kdy d_0 je objemová hmotnost po odbednění a d_s je objemová hmotnost suchých složek bez vzduchu a vody. Metoda je založena na teorii, že postupně přidávaná voda k suchým složkám postupně zaplňuje mezery a vytlačuje vzduch. Po odstranění veškerého vzduchu dosahuje směs maximální objemové hmotnosti, tedy maximálního d_0/d_s . Dalším přidáváním vody se objemová hmotnost zmenšuje vlivem snížení množství suchých složek s větší měrnou hmotností. V grafu 2, který se podobá výsledku Proctorovy zkoušky, je celý průběh znázorněn. V experimentu [22] byly stanoveny 2 ideální vodní součinitele, v grafu označeny písmeny D a E. Vzhledem k lepším reologickým vlastnostem byla zvolena vyšší dávka vody, respektive vodní součinitel 0,14. Jako teoretické minimum hodnoty vodního součinitele se považuje $w = 0,08$.^[22]



Graf 2: Závislost poměrných objemových hmotností na dávce vody^[22]

4.3 Duktilita

Kromě značně vyšších pevností v tahu za ohybu a příčném tahu přispívá rozptýlená výztuž ke zvýšení duktility. Bez jejich aplikace by matrice měla vyšší pevnosti vlivem již uvedených principů, ale právě duktilita by byla srovnatelná s běžnou cementovou maltou a hodnota lomové energie by nepřekročila $30 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$. V případě aplikace rozptýlených ocelových mikrovláken se hodnota lomové energie pohybuje nad $10000 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$.^{[22][25]}

4.4 Mikrostruktura

Změna mikrostruktury probíhá především vlivem přítomnosti aktivních pucolánových příměsí, které v RPC betonech zastupuje nejčastěji mikrosilika a křemenná moučka. Kromě použití vhodných příměsí se hlavně v případě prefabrikovaných prvků k úpravě mikrostruktury využívá tepelného ošetřování ztvrdlého betonu.

4.4.1 Pucolánová reakce

Pucolánová aktivita se definuje jako reakce amorfního SiO_2 (případně Al_2O_3) s vápenatými ionty ve vodném prostředí, za vzniku CSH gelů (případně CAH gelů). Reakce startuje po nasycení roztoku vápenatými ionty, které pocházejí převážně z cementu. Konkrétně jde o disociaci hydroxidu vápenatého (CH), který je hydratačním produktem alitu a belitu, případně vyhašením volného CaO z cementu na Ca^{2+} a OH^- . Vysoká koncentrace vzniklých OH^- iontů rozštěpuje vazby křemičitanů (nebo

hlinitokřemičitanů), jejichž ionty tvoří po styku s Ca^{2+} výsledné CSH gely (případně CAH gely).^[26]

Za běžných teplot ošetřování betonu lze dosáhnout asi 70 % možné pucolánové reakce, avšak v případě tepelného ošetřování (90 – 200°C) může míra pucolánové reakce dosáhnout až 90 %. Pucolánová aktivita mletého křemene je právě nejúčinnější až po aplikování tepelného ošetření.^[27]

Díky tvorbě CSH gelů dochází k zaplnění kapilárních pórů, což vede také k vyšším konečným pevnostem. Na obrázku 5 je pomocí elektronové rastrovací mikroskopie (SEM) zobrazen portlandit a vzniklý CSH gel.



Obrázek 5: SEM snímky (a) portlanditu (b) C-S-H gelu^[15]

5 Požadavky na materiály pro výrobu RPC

Požadavky na vlastnosti surovin vstupující do směsí reaktivních práškových betonů jsou oproti konvenčním betonům výrazně vyšší a to jak na pojivové složky, tak na složky tvořící plnivo či důležité přísady.

5.1 Cement

Pro výrobu jemnozrnných betonů typu UHPC / RPC s vysokými požadavky na pevnosti a trvanlivost se nejčastěji používají cementy vyšších pevnostních tříd ($> 42,5$ MPa), s velikostí středního zrna $d_{50} \approx 10 \mu\text{m}$. Podstatnější je však celkové zastoupení zrn o jednotlivých velikostech.^[2] Kromě velikosti a distribuci zrn je pro výběr cementu důležité také chemické a mineralogické složení, které může ovlivňovat působení plastifikačních přísad a tím konzistenci čerstvé směsi, která je jedním z klíčových faktorů vývoje RPC.

5.1.1 Vliv složení cementu na účinnost superplastifikátorů

Vzhledem k nízkým dávkám vody vstupující do čerstvé směsi RPC, je potřeba použití moderních superplastifikačních přísad (viz kapitola 2.2), jejichž spotřeba vzrůstá spolu se zastoupením trikalciualuminátu (C_3A) v cementovém slínku a také s jeho jemností, respektive měrným povrchem. Pro přijatelnou zpracovatelnost směsi je také vhodné použití cementů s nízkým obsahem alkálií (K_2O a Na_2O). Při vyšším obsahu alkálií totiž dochází k přeměně C_3A na reaktivnější formu, což vede k ovlivnění reakcí mezi superplastifikátorem a síranovými složkami.^{[1][2]} V případě, vyššího množství alkálií v podobě K_2SO_4 a Na_2SO_4 může docházet k větší tekutosti cementových malt či betonů.^[4]

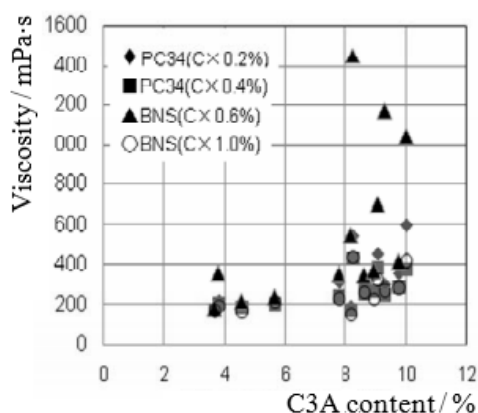
Například experiment [3] byl zaměřen na sledování vlivu chemického a mineralogického složení cementu na jeho konzistenci po smíchání s vodou a různými druhy superplastifikačních přísad. V tabulce 1 je uvedeno složení použitých cementů.

No	Chemical composition (%)											Bouge(%)			
	igloss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Cl ⁻	F-CaO	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
1	0.64	24.9	3.53	3.36	62.8	1.53	1.90	0.15	0.42	0.0011	0.24	31.5	47.7	3.7	10.2
2	0.99	23.8	3.20	2.77	65.1	1.56	1.93	0.13	0.34	0.0016	0.51	50.7	30.2	3.8	8.4
3	0.85	25.0	3.53	2.83	64.1	1.63	1.90	0.15	0.35	0.0054	0.31	36.4	44.3	4.6	8.6
4	0.78	23.6	3.97	2.89	64.4	1.73	1.98	0.20	0.44	0.0082	0.37	44.6	34.1	5.6	8.8
5	0.76	21.3	4.94	3.16	65.8	1.61	1.92	0.20	0.38	0.0070	0.37	61.5	14.7	7.8	9.6
6	0.70	21.8	4.97	2.96	65.4	1.73	1.87	0.21	0.24	0.0045	0.17	56.6	19.9	8.2	9.0
7	0.78	20.2	4.87	2.76	66.4	2.05	1.92	0.24	0.47	0.0097	0.95	70.5	4.82	8.2	8.4
8	0.81	20.7	5.30	3.22	65.4	1.61	1.94	0.30	0.47	0.0034	0.42	61.5	12.9	8.6	9.8
9	0.75	20.6	5.20	2.86	66.0	1.97	1.80	0.22	0.40	0.0035	0.43	66.0	9.44	8.9	8.7
10	0.85	20.2	5.09	2.62	67.0	1.95	1.98	0.22	0.35	0.0175	0.63	72.7	3.23	9.1	8.0
11	0.67	20.1	5.50	3.12	65.9	1.73	1.89	0.28	0.29	0.0050	0.25	67.4	6.86	9.3	9.5
12	0.90	20.4	5.64	3.07	65.9	1.54	1.87	0.28	0.48	0.0271	0.40	63.9	10.4	9.8	9.3
13	0.93	19.9	5.39	2.51	66.6	1.95	2.02	0.26	0.51	0.0191	0.76	71.7	2.93	10.0	7.6

Tabulka 1: Chemické a mineralogické složení porovnávaných cementů^[3]

Jednotlivé cementové slinky byly hrubě mlety a poté smíchány se sádrovcem (poměr 1:1 hemihydrát:dihydrát). Dále byly domlety na požadovanou jemnost. Takto připravené cementy byly rozmíchány ve vodě při vodním součiniteli rovném 0,32. Superplastifikátor na bázi polykarboxylátů (ozn. PC34) byl přidán v dávce 0,2 a 0,4 %. Polymerní přísada na bázi naftalenů (BNS) byla dávkována v množství 0,6 a 1 %. Po 10 minutovém míchání byly vzorky měřeny ve viskozimetru typu válec – válec.

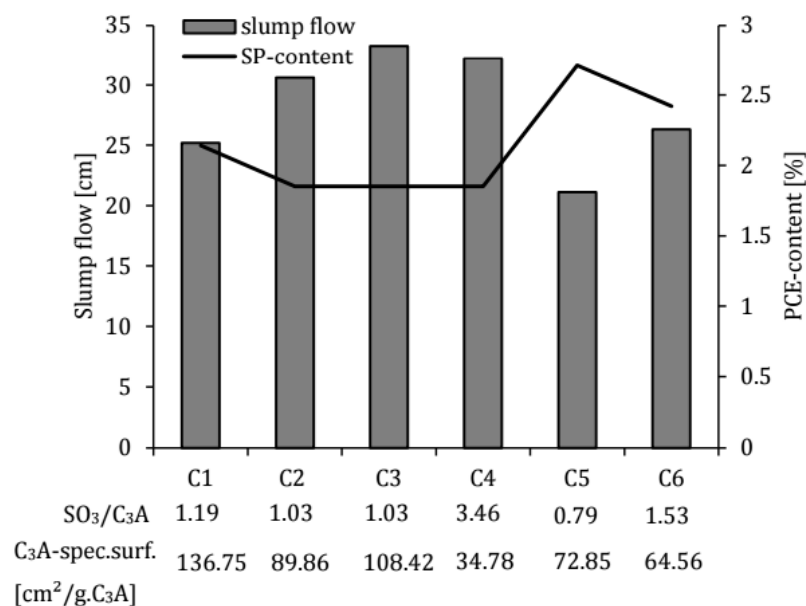
V grafu 3 je uvedena závislost množství C₃A v cementu na viskozitě cementové pasty. Experiment tak dokazuje, že některé cementy s vyšším obsahem trikalciem aluminátu můžou mít několikanásobně vyšší hodnotu viskozity oproti cementům s jeho nižším obsahem.



Graf 3: Závislost množství C₃A na viskozitě cementové pasty^[3]

Princip vlivu chemického a mineralogického složení cementu na účinnost plastifikátoru je popsán také v grafu 4, kdy byl proveden experiment [2] na směsích UHPC o podobném složení jako běžné RPC. Bylo zde testováno 6 různých cementů (C1-6), u kterých byl sledován molární poměr SO_3/C_3A a měrný povrch C_3A .

V případě cementu C1 byla změřena největší hodnota měrného povrchu trikalciem aluminátu, což má za následek rychlejší tvorbu ettringitu, navíc také ve větším množství. To vede ke zvětšení měrného povrchu zrn C_3A , klesá množství vázaného superplastifikátoru na jednotku měrného povrchu a vzrůstá spotřeba vody na smáčení většího měrného povrchu.^{[2][4]} Směs obsahující cement C1 měla také nejrychlejší nárůst pevností, což mělo za následek krátkou dobu zpracovatelnosti v důsledku růstů hydratačních produktů a „přepálení“ bočních řetězců SP, ke kterému může dojít také při brzkém dávkování přísady.



Graf 4: Vliv molárního poměru SO_3/C_3A na konzistenci UHPC^[2]

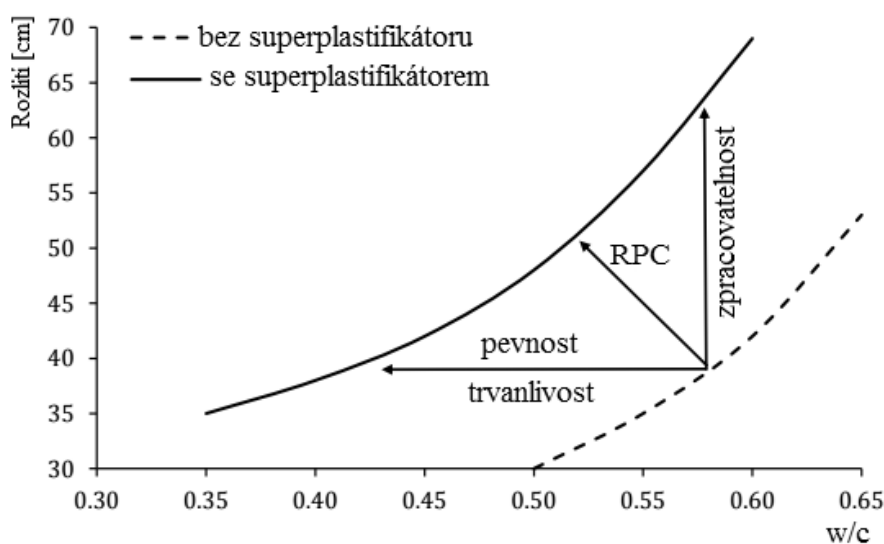
Zmíněný parametr SO_3/C_3A v grafu 2 je také důležitým faktorem ovlivňující konzistenci směsi UHPC či RPC. V případě absence superplastifikátoru ve směsi dochází k tomu, že větší část rozpustných síranových iontů (původem ze sádrovce, kameniva a alkalických sulfátů vytvořených při výrobě slínku) reaguje s přítomným C_3A za vzniku ettringitu. Pokud je přítomen superplastifikátor, dochází ke snaze obsazení „záchytných bodů“ na zrnu C_3A ze strany SP, ale také ze strany síranových iontů. Se vzrůstajícím množstvím SO_4^{2-} dochází k menší šanci návaznosti SP na částice C_3A a zhoršení konzistence. Na druhou stranu však zůstane k dispozici větší množství SP, které se naváže

na nové hydráty a dochází tak k efektu delší zpracovatelnost. Autorem [2] je tak kladen důraz také na vhodné množství SO_3 v cementu a získání tak přijatelné zpracovatelnosti.

Bylo také zjištěno, že v případě nahrazení sádrovce dusičnanem vápenatým k cementovému slínku dochází k tvorbě AFm produktů (monosulfátu), místo Aft produktů (ettringitu), což má za následek nižší spotřebu SP vlivem menšího měrného povrchu AFm fáze oproti Aft. Navíc monosulfát spotřebuje pouze 12 molů vody, oproti 32 molům v případě ettringitu.^[11]

5.2 Superplastifikační přísady

Jak již bylo zmíněno, pro výrobu RPC je nutné použití přísad umožňující získat potřebnou zpracovatelnost v případě velmi malého množství vody. Protože směsi jako RPC nebo UHPC obsahují velké množství jemných částic, které je potřeba kvalitně dispergovat, je možné používat pouze polymerní přísady 4. generace – superplastifikátory. V klasické technologii betonu se plastifikační nebo superplastifikační přísady používají k dosažení lepší zpracovatelnosti při konstantním množství vody nebo zvýšení pevností a odolnosti vlivem možnosti snížení množství vody bez ztráty zpracovatelnosti. Právě kombinace obou těchto účinků je třeba dosáhnout v případě speciálních betonů, jako jsou právě RPC.^[2]



Graf 5: Schematické znázornění požadavků na účinky SP

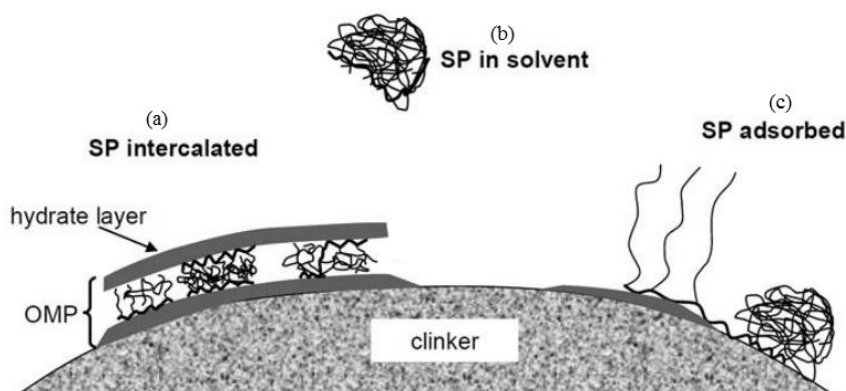
Podle chemického složení můžeme superplastifikátory rozdělit:

- Polykondenzáty sulfonovaných formaldehydů a melaminů (SMF)
- Polykondenzáty sulfonovaných formaldehydů a naftalenů (SNF)
- Polykarboxyláty (PC)

V technologiích RPC nebo UHPC se nejčastěji používají superplastifikátory právě na bázi polykarboxylátů. Jsou tvořené makromolekulami s dlouhými postranními řetězci, které se adsorbují na povrch zrn cementu a v důsledku sterického odpuzování výrazně ovlivňují konzistenci čerstvé směsi i při nízkém vodním součiniteli.^{[8][9][10]}

5.2.1 Adsorpce superplastifikátorů (PC)

Počáteční adsorpce PC je ovlivněna zejména počtem karboxylových skupin, pružností/tuhostí hlavního řetězce a sterickým efektem. Teprve správně adsorbovaný SP na zrn cementu, mikrosiliky nebo filleru může stericky odpuzovat jednotlivá zrna. Na obrázku 6 jsou znázorněny 3 druhy přítomnosti SP v okolí cementového zrna. Část (a) je pohlcena hydráty kalcium aluminátovými, zejména při nedostatku síranů v roztoku. Část SP (b) zůstává volně v roztoku a není v žádné interakci s okolními zrny. Další část (c) je adsorbována na povrchu a efektivně odpuzuje zrna cementu a dalších složek.^{[2][12]}



Obrázek 6: Tři druhy přítomnosti SP v okolí zrna cementu^[12]

Stále však platí, že správnou adsorpci a celkovou účinnost superplastifikační přísady neovlivňují pouze vlastnosti samotné přísady, ale také vlastnosti cementů a dalších složek, jak bylo popsáno výše.

5.3 Příměsi

Příměs je dle ČSN EN 206-1 definována jako práškový materiál, který je přidáván do betonu za účelem získání lepších či speciálních vlastností. Příměsi se dělí na dva druhy:

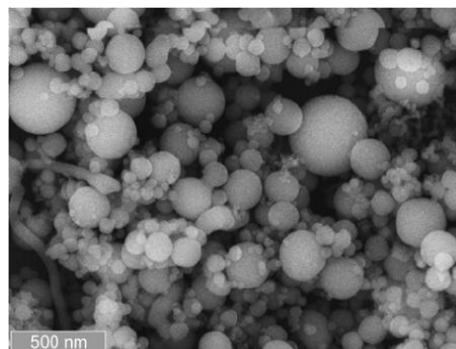
- Typ I – inertní příměsi
- Typ II – aktivní příměsi

Inertní příměsi se v betonech používají jako fillery, které slouží k modifikaci křivky zrnitosti. Aktivní příměsi se dále rozdělují na látky latentně hydraulické a hydraulicky aktivní (pucolánové). Latentně hydraulické příměsi se vyznačují tuhnutím a tvrdnutím pouze za přítomnosti budičů (alkalických nebo síranových). Pucolánové příměsi, jakožto anorganické látky, obsahující amorfni oxid křemičitý, jsou schopny reagovat s hydroxidem vápenatým za vzniku C-S-H gelu.^{[6][7]}

Právě pucolánové příměsi tvoří důležitou složku reaktivních práškových betonů, které ovlivňují mikrostrukturu cementového kamene. Nejčastěji používaným zástupcem je pak velmi účinný pucolán mikrosilika (MS).

5.3.1 Mikrosilika – křemičitý úlet

Křemičité úlety jsou vedlejším produktem při výrobě křemíku, ferrosilicia a dalších slitin křemíku v obloukové peci, kde je křemen redukován v přítomnosti paliva (a železa v případě ferrosilicia). Během redukce vzniká plynný SiO (při teplotě $> 2000^{\circ}\text{C}$), ten uniká horní části pece, kde se ochlazuje, kondenzuje a hlavně oxiduje ve formě jemných částic SiO_2 . Částice se shromažďují v odlučovacím systému.^[8]



Obrázek 7: SEM snímek mikrosiliky^[16]

5.3.1.1 Vlastnosti mikrosiliky

Velikost zrn křemičitých úletů je $0,1 - 0,3 \mu\text{m}$ při měrném povrchu $15000 - 25000 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ a měrné hmotnosti cca $2120 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Obsahují velké množství amorfniho SiO_2 (80 – 99 %), dále Al_2O_3 (0,5 – 3 %) a Fe_2O_3 (0,7 – 2,5 %).^[8]

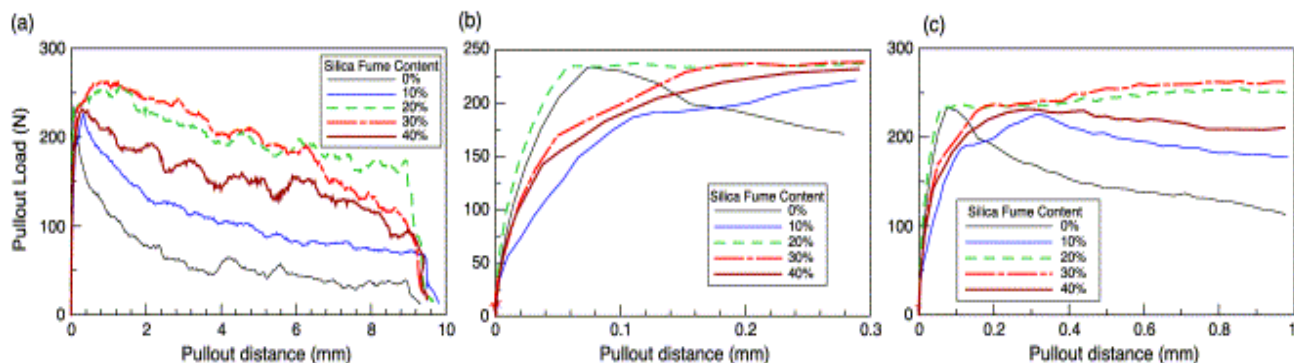
Dávka mikrosiliky se udává jako procentuální množství cementu. V případě RPC se pohybuje v rozmezí 20 – 30 %, oproti například vysokopevnostním betonům HPC, u kterých se křemičitý úlet obvykle dává do 10 %.^[13]

5.3.1.2 Mikrosilika jako pucolán

Princip pucolánové reakce mikrosiliky je popsán v kapitole 3.4.1. Při vhodném poměru CaO/SiO_2 , který je modifikován přítomností křemičitého úletu, lze při speciálním tepelném ošetřování (viz kapitola 3.2.1) přeměnit vzniklé hydráty a přítomné složky na pevný tobermorit.^[14]

5.3.1.3 Vliv mikrosiliky na přídržnost rozptýlené výztuže

Kromě vyšších pevností, lze pomocí mikrosiliky dosáhnout také lepší přídržnosti vláken k cementové matici, jak bylo zjištěno v experimentu [13], ve kterém byl ověřen vliv dávky křemičitého úletu na potřebnou sílu [N] k vytažení vlákna o určitou vzdálenost [mm]. Z grafu 4 vyplývá, že ideální dávka mikrosiliky z hlediska přídržnosti vláken je v rozmezí 20 – 30 % (červená a zelená křivka) z hmotnosti cementu, což je obecně optimální dávka pro výrobu RPC.



Graf 6: Vliv množství mikrosiliky na přídržnost vláken

5.3.2 Křemenná moučka

Jemně mletá křemenná moučka se využívá jako reaktivní příměs v případě tepelně ošetřovaných RPC. Maximální reaktivita v průběhu prohřívání je dosažena v případě středního zrna moučky $d_{50} = 5 - 25 \mu\text{m}$. Jedná se tedy o velikost zrn podobných cementu.^[18]

Množství dávkování křemenné moučky odpovídá stechiometrickému optimu pro přeměnu amorfních hydratačních produktů na již zmíněný minerál tobermorit (v případě

ošetřování RPC za zvýšené teploty a tlaku), což udává poměr CaO/SiO_2 roven 0,83. Ten může být dosažen v případě poměru (mikrosilika+moučka)/cement cca 0,62.^[18]

5.4 Křemičité písky

Nejhrubší složku reaktivních práškových betonů tvoří kamenivo. Vzhledem k nutnosti dosažení nižší heterogenity směsi se používají písky s maximálním zrnem cca 600 μm . Výhodou použití křemičitých písků je jejich dobré spolupůsobení s cementovou pastou z hlediska tranzitní zóny, velká tvrdost, relativně nízká cena a dobrá dostupnost.^{[17][18]}

Kromě vhodné granulometrie použitých písků je požadován také minimální obsah SiO_2 , který musí být vyšší než 90 %.^[18]

5.5 Rozptýlená výztuž

Pro výrobu reaktivních práškových kompozitů se používají ocelové drátky, které mohou mít různou délku, stejně jako průměr. Nejčastěji se však využívá rozptýlené mikrovýztuže o délce kolem 12 mm a tloušťce cca 0,15 mm.^[8]

V případě reaktivních práškových kompozitů se díky velmi jemným zrnům kameniva uplatňuje poměr mezi velikostí vláknité výztuže a velikosti zrna kameniva. V případě, že velikosti maximálního zrna písku ve směsi RPC je kolem 0,3 mm a délka mikrovýztuže 12 mm, je získán stejný poměr velikosti vlákna ke kamenivu, jaký by byl v případě rozptýlení výztuže o délce 1 m ve směsi HPC s maximálním zrnem 20 mm.^[9]

6 Výroba RPC

6.1 Míchání

Pro efektivní a krátkodobé míchání směsí RPC je třeba znát vhodný způsob, respektive vhodné pořadí dávkování jednotlivých surovin. V tabulce 2 jsou pro srovnání uvedeny dvě různá pořadí dávkování. U prvního způsobu byly nejprve míchány suché složky a poté byla přidána celá dávka vody a SP. U druhého způsobu byla míchána nejprve mikrosilika a písek společně s vodou a poté byl přidán cement. Následovala pouze částečná dávka SP a po krátkém míchání pauza, po které byl dávkován zbylý superplastifikátor. Druhá, efektivnější metoda, měla celkový čas míchání kratší až o 6 minut, což prokazuje důležitost vhodného dávkování.

Čas míchání [min]	Dávkovaná surovina	Čas míchání [min]	Dávkovaná surovina
0 – 4	Mikrosilika + křemičitý písek	0 – 1	Mikrosilika + křemičitý písek
4 – 6	Cement + křemenná moučka	1 – 2	Voda
6 – 7	Voda + SP	2 – 2,7	Cement + křemenná moučka
7 – 12	- Míchání -	2,7 – 3,5	40% SP
12 - 13	Ocelová vlákna	3,5 – 7	- Pauza -
13 – 15	- Míchání -	7 - 8	60 % SP
		8 - 9	Ocelová vlákna
Celkový čas míchání 15 min		Celkový čas míchání 9 min	
-		Míchačka Zyklus zz 75 he	
Exp. [28]		Exp. [29]	

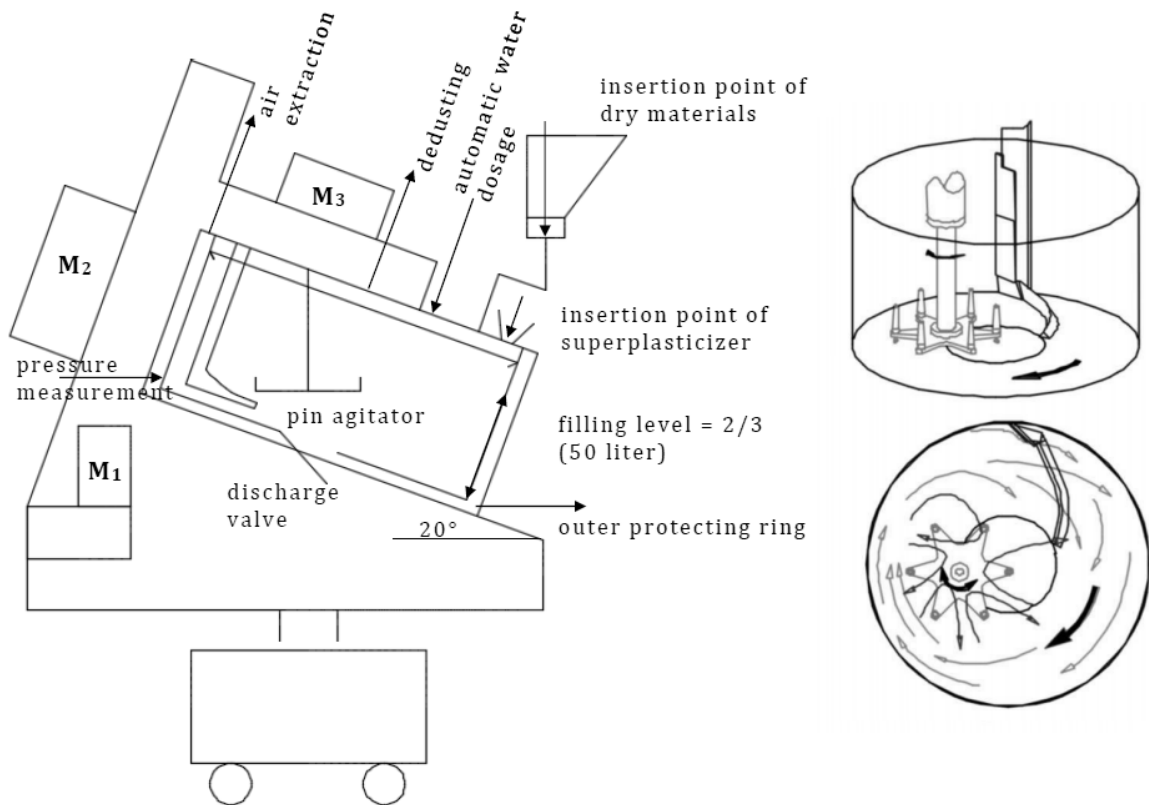
Tabulka 2: Vliv pořadí dávkování složek na době míchání

Vysvětlením získání vhodné konzistence během kratší doby může být také počáteční hydratace cementu. Jak již bylo zmíněno, hydratační produkty mohou přerušit boční řetězce SP a dojde ke ztrátě zpracovatelnosti. Přesněji řečeno – krystaly ettringitu, vytvořené po smíchání cementu s vodou, mají rozměr cca 300 – 500 nm, kdežto molekuly superplastifikační přísady 20 – 30 x menší. Molekuly SP jsou přerosteny těmito hydráty, do kterých jsou také chemicky zakotveny a ztrácí tak svoji účinnost. Při přidání SP po vytvoření těchto hydrátů dochází k lepší a hlavně delší zpracovatelnosti směsi.^[21]

Rychlost otáček míchačky by měla být zpočátku vyšší pro lepší dispergaci jemných částic. Po ztekucení RPC směsi by však měla být nižší kvůli vnášení vzduchu do čerstvé směsi.^[21] Problematikou provzdušnění směsi se zabývala řada studií. Zajímavé výsledky přináší vliv vakuového míchání na vlastnosti čerstvého betonu, ale hlavně také betonu ztvrdlého.

6.1.1 Vliv vakuového míchání na vlastnosti UHPC / RPC

Schéma vakuové míchačky o objemu 75 l a schéma směru pohybu směsi v bubnu s míchadlem je zobrazeno na obrázku 8. Míchačka je vybavena třemi motory – M1 je motor vypouštěcího ventilu, M2 motor bubnu a M3 motor míchadla.^[2]



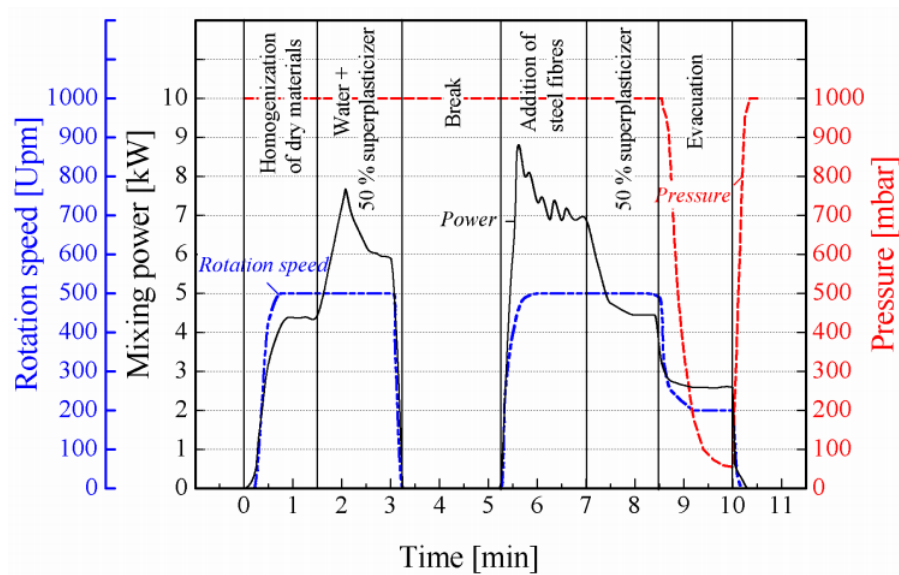
Obrázek 8: Schéma vakuové míchačky^{[29][2]}

Princip odstranění vzduchu v čerstvé směsi ve vakuové míchačce je založen na vytvoření podtlaku v uzavřeného bubnu, většinou o velikosti 50 - 1000 mbar.^[29]

Rozsáhlý experiment [2] byl proveden na betonových směsích včetně betonů typu RPC, kdy byl sledován vliv vakuového míchání, mj. také na výsledné mechanické vlastnosti směsí. Výsledné pevnosti byly v případě vakuování u všech zkoušených směsí vyšší, oproti směsí míchaným běžným způsobem. Množství vzduchu v betonu bylo také silně redukováno o cca 50 – 70 %, což vysvětluje nárůst pevností. V experimentu bylo také zjištěno, že nejvyšší pevnosti byly získány v případě vytvoření podtlaku kolem 50 mbaru.

Ideální proces vakuového míchání znázorňuje graf 7., ve kterém lze pozorovat rychlost otáček, výkon míchačky a hodnota podtlaku v čase. Podtlak se aplikuje až po ztekucení směsi, které lze pozorovat na klesajícím výkonu (běžný způsob měření konzistence

betonové směsi v míchačce) motoru míchačky. Vakuování probíhá za současného míchání po dobu asi 90s.^[29]



Graf 7: Závislost rychlosti otáček, výkonu míchačky a podtlaku v míchačce na čase míchání směsi^[29]

6.2 Tepelné ošetřování

Reaktivní práškové kompozity mohou dosahovat vysokých pevností v tlaku kolem 200 MPa i za běžných normových podmínek, tedy při teplotě 20°C, vhodné relativní vlhkosti a po době zrání 28 dnů. Vyšších pevností, stejně jako dalších užitných vlastností může být získáno při speciálních metodách ošetřování.

Tepelným ošetřováním, které se provádí po 24 hodinách zrání betonu, vznikají další finanční náklady na výrobu prefabrikovaných výrobků. Každopádně některé společnosti jsou schopné výrobky prohřívat například při teplotě 90°C až po dobu 48 hodin a to za náklady nižší než 2 % z celkové ceny výrobku.^[30]

Druhy tepelného ošetřování:

- ve vodním prostředí,
- horkým vzduchem,
- propařováním,
- autoklávováním.

Ošetřování pomocí zvýšených teplot do 50°C se používá pro akceleraci nárůstů pevností u prvků, po kterých jsou požadovány vysoké počáteční pevnosti. Zde je však třeba počítat s nižšími konečnými pevnostmi, oproti betonům, u kterých nebyla urychlená hydratace na jejím počátku.^[21]

6.2.1 Ošetřování propařováním

Propařování betonů probíhá buď ve speciálních komorách, nebo pod PE fóliemi. Teplota prostředí dosahuje hodnoty kolem 90°C a relativní vlhkosti 100 %. Nárůst teplot by měl být 15°C/hod. Při vhodném způsobu ošetření dojde k rapidnímu urychlení hydratace a hlavně pucolánových reakcí, které mohou také proběhnout ve větší míře, oproti betonům neproteplováním.^[21] Na obrázku 9 je zobrazen proces proteplování betonového prvku (mimořádně jde o první projekt aplikace RPC v inženýrské stavbě – lávka pro pěší v Sherbrook), který je propařován pod polyetylenovou fólií.



Obrázek 9: Propařování betonového prvku pod PE fólií^[30]

6.2.2 Ošetřování autoklávováním

Ošetřování v autoklávu umožňuje působit na ztvrdlý beton zvýšenou teplotou a tlakem. Na obrázku 10 je uveden příklad průmyslového autoklávu.

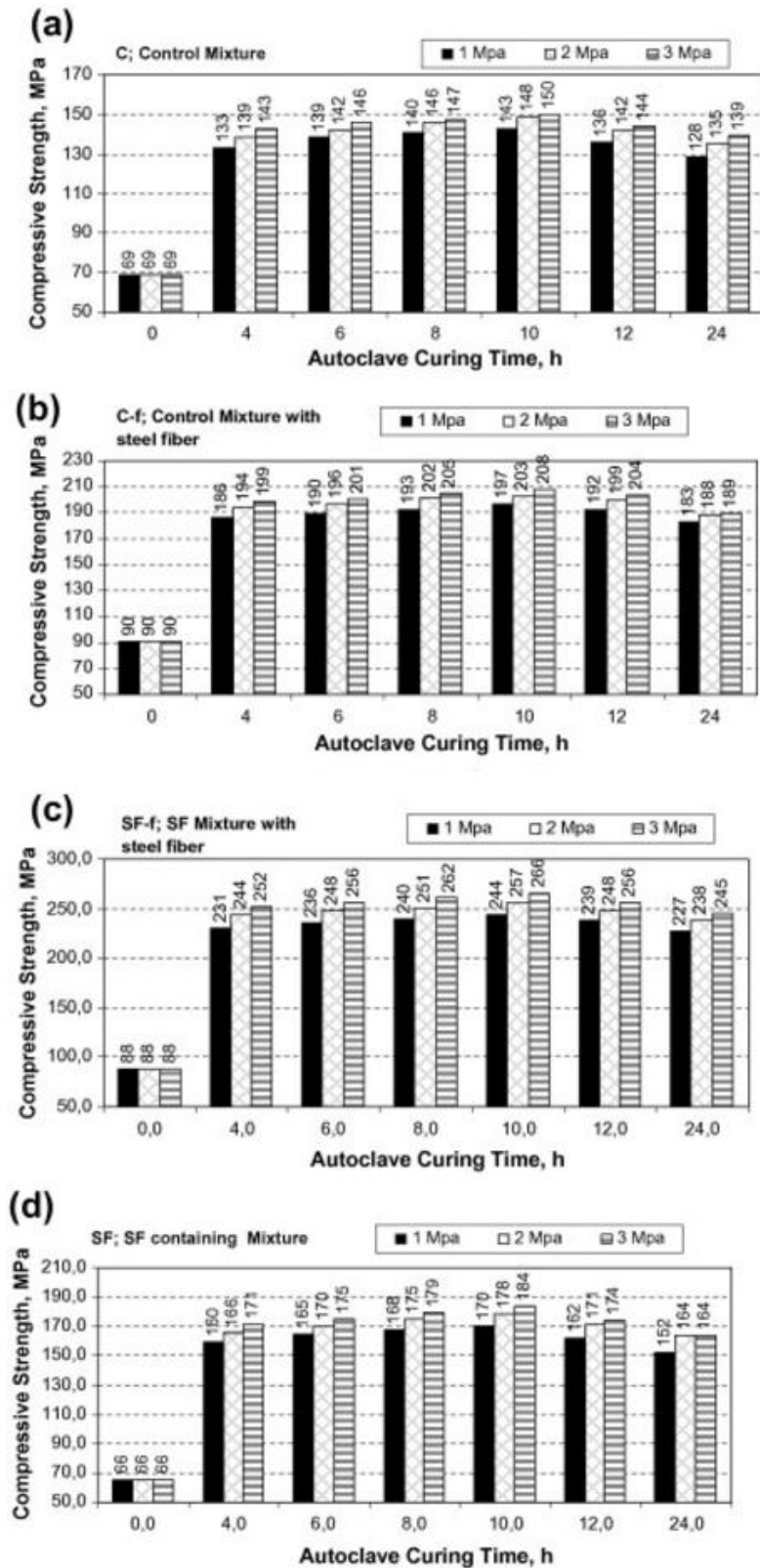
Při teplotách 50 – 150°C dochází opět k rapidnímu urychlení hydratace a pucolánové reakce mikrosiliky s CH fází.^[31] V případě působení teploty kolem 180°C a tlaku 1 MPa dochází ke změnám v mikrostruktuře za tvorby únosného minerálu tobermoritu. V případě přítomnosti křemenné moučky, která je při 20°C absolutně inertní i při dlouhodobém zrání betonu, dochází při překročení teploty 250°C k vyvolání její pucolánové aktivity. Jsou pak dosaženy ještě vyšší pevnosti vlivem vytvoření CSH gelů s delšími řetězcy a pevným

propojením křemičitých zrn k okolním CSH gelům. Při těchto teplotách se přeměňuje vzniklý tobermorit na xonolit.^{[32][37][38]}



Obrázek 10: Průmyslový autokláv^[39]

Vliv ošetřování RPC betonů za vysokých teplot a tlaků v autoklávu byl proveden v experimentu [37]. 4 směsi, lišící se dávkou mikrosiliky a dávkou ocelové mikrovýztuže, byly autoklávovány po dobu v rozmezí 4 – 24 hodin a při teplotě v rozmezí 180 – 235°C, což odpovídá tlakům 1 – 3 MPa. Výsledky jsou uvedeny v grafu 8 a vypovídají o jednoznačném vlivu použití mikrosiliky a rozptýlené výztuže na výsledné pevnosti. Například v případě 8 hodinového autoklávování při tlaku 1 MPa (180°C) byla změřena pevnost v tlaku u referenční receptury bez mikrosiliky a vláken 140 MPa a v případě aplikace vláken 193 MPa (nárůst cca 38 %). Směsi obsahující mikrosiliku v dávce 23 % dosahovaly pevností 163 MPa bez vláken a 240 MPa s vlákny (nárůst s použitím vláken cca 47 %). Rozdíl mezi pevnostmi vláknitých RPC s mikrosilikou a bez mikrosiliky byl 25 %, kdy vyšších pevností dosahovala receptura s křemičitým úletem. Nárůst pevností oproti vzorkům zrajícím v normovém prostředí byl až 93 % v případě směsi bez MS a 68 % směsi s MS. Uvedené hodnoty pevností v tlaku v grafu 8 s 0 hodinových prohříváním jsou měřeny po době zrání 24 hodin.



Graf 8: Vliv doby a tlaku autoklávování na pevnosti v tlaku (a) směs bez mikrosiliky (b) směs bez mikrosiliky s vlákny (c) směs s mikrosilikou a vlákny (d) směs s mikrosilikou bez vláken^[37]

6.2.3 Kombinace způsobů ošetřování

Nejvyšších pevností v tlaku, dokonce i kolem 800 MPa, bývá dosaženo kombinací různých druhů tepelného ošetřování.

Například v experimentu [2] byla kombinována metoda ošetřování propařováním při 90°C po dobu 48 hodin, následující horkovzdušným prohříváním při teplotě 250°C po dobu dalších 48 hodin. Bylo dosaženo pevností v tlaku kolem 330 MPa. Tyto extrémní pevnosti jsou však zatím dosahovány za použití extrémně energeticky náročných procesů, které by v měřítku reálných betonových prvků znamenaly výrazné zvýšení finančních nákladů, což znemožňuje jejich použití v praxi.

B Praktická část

7 Cíl praktické části

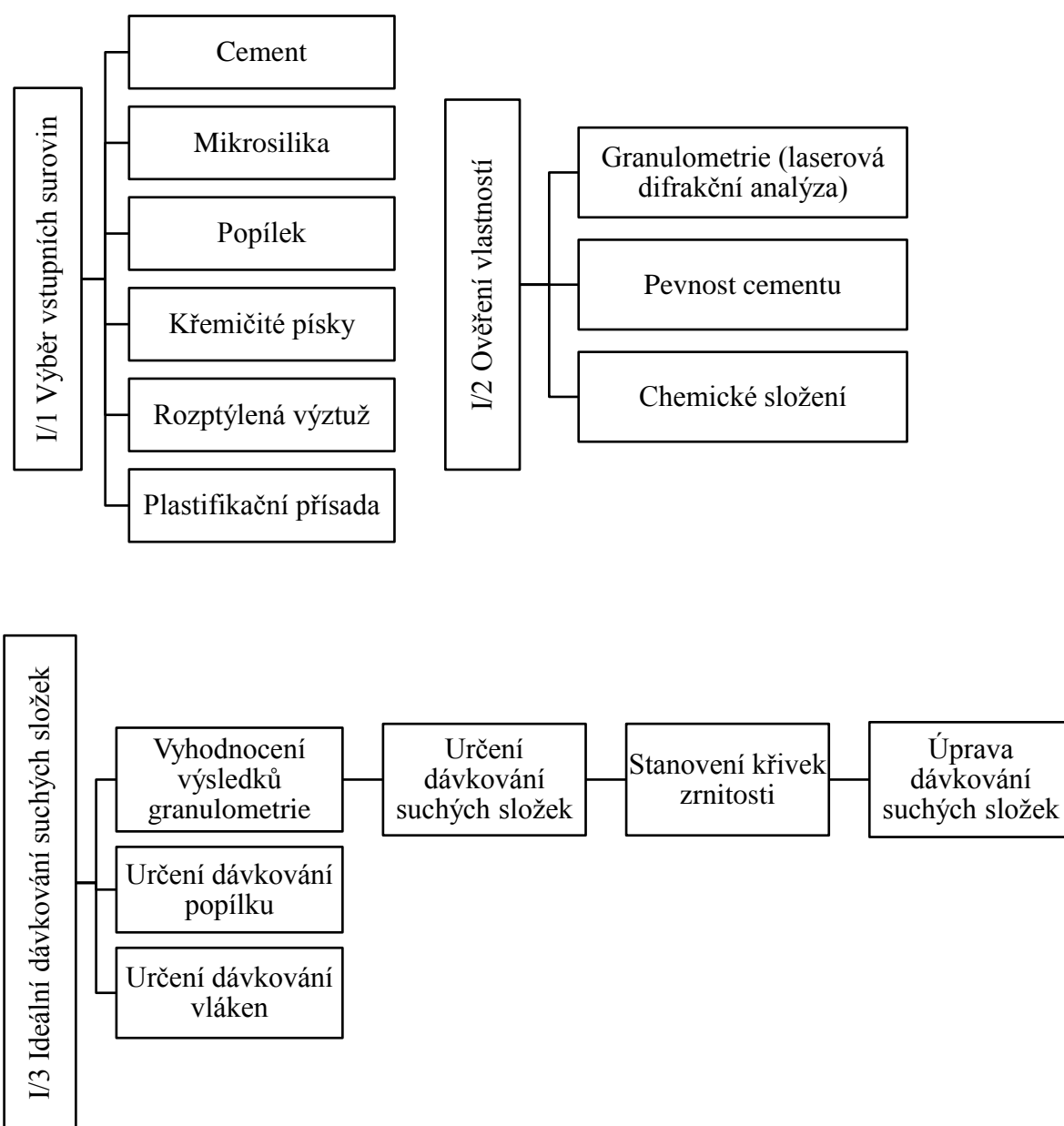
Cílem praktické části je vývoj receptury reaktivního práškového kompozitu na základě získaných poznatků o jejich principech. Obecně lze říci, že RPC tvoří reaktivní suché složky, voda, superplastifikační přísada a rozptýlená výztuž. Reaktivní složky jsou nejčastěji pak cement, mikrosilika a velmi jemné křemičité písky, které mohou podléhat reakcím s pojivem za zvýšených teplot, případně zvýšeného tlaku při zrání betonu. Vhodný způsob ošetření RPC a stanovení jeho vlivu na jednotlivé směsi je proto také hlavním předmětem experimentální části. Dávkování složek a způsoby ošetření by měli odpovídat výsledným pevnostem v tlaku 200 – 300 MPa, tedy tzv. RPC200.

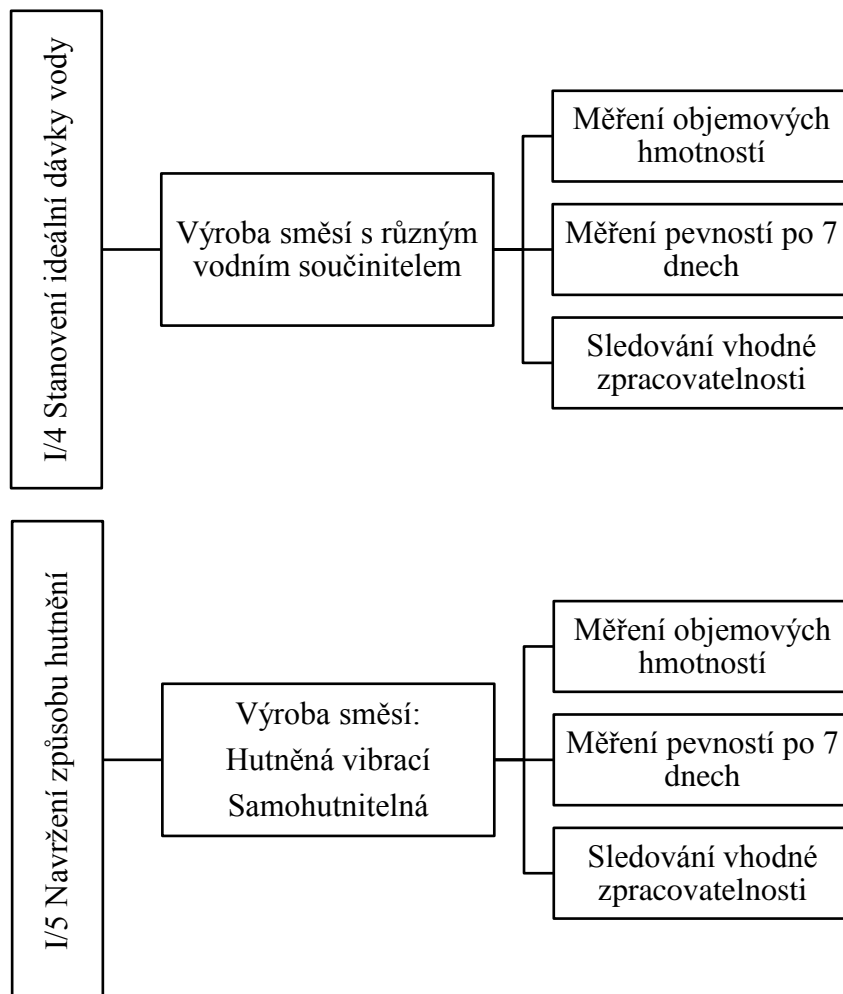
Vzhledem k velmi vysokým dávkám cementu při výrobě RPC je dalším cílem ověření možnosti nahrazení cementu popílkem až do 60 %. Sledován bude opět hlavně vliv náhrady cementu popílkem na fyzikálně mechanické vlastnosti při různých způsobech ošetřování.

8 Metodika práce

Při provádění praktické části bylo postupováno ve třech etapách. První etapa spočívala v návrhu receptur, druhá etapa v ověření navržených receptur a ověření vlivu prostředí ošetřování a třetí etapa pak v ověření vlivu náhrady části cementu popílkem a to ve třech různých dávkách. Schematicky je celý postup znázorněn na obrázku 11 – 13, podrobněji je pak popsán v dalších kapitolách.

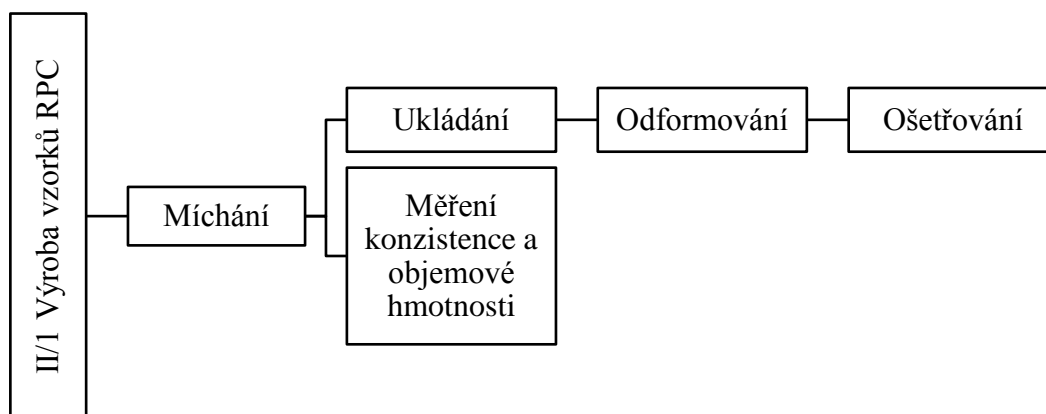
8.1 I. etapa – vývoj receptur RPC a LCRPC

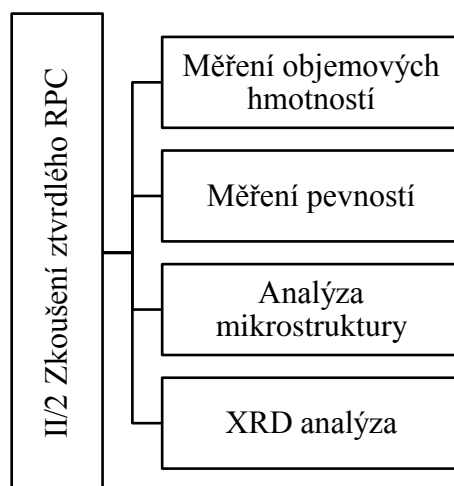




Obrázek 11: Schematické znázornění I. etapy kroku 1 - 5

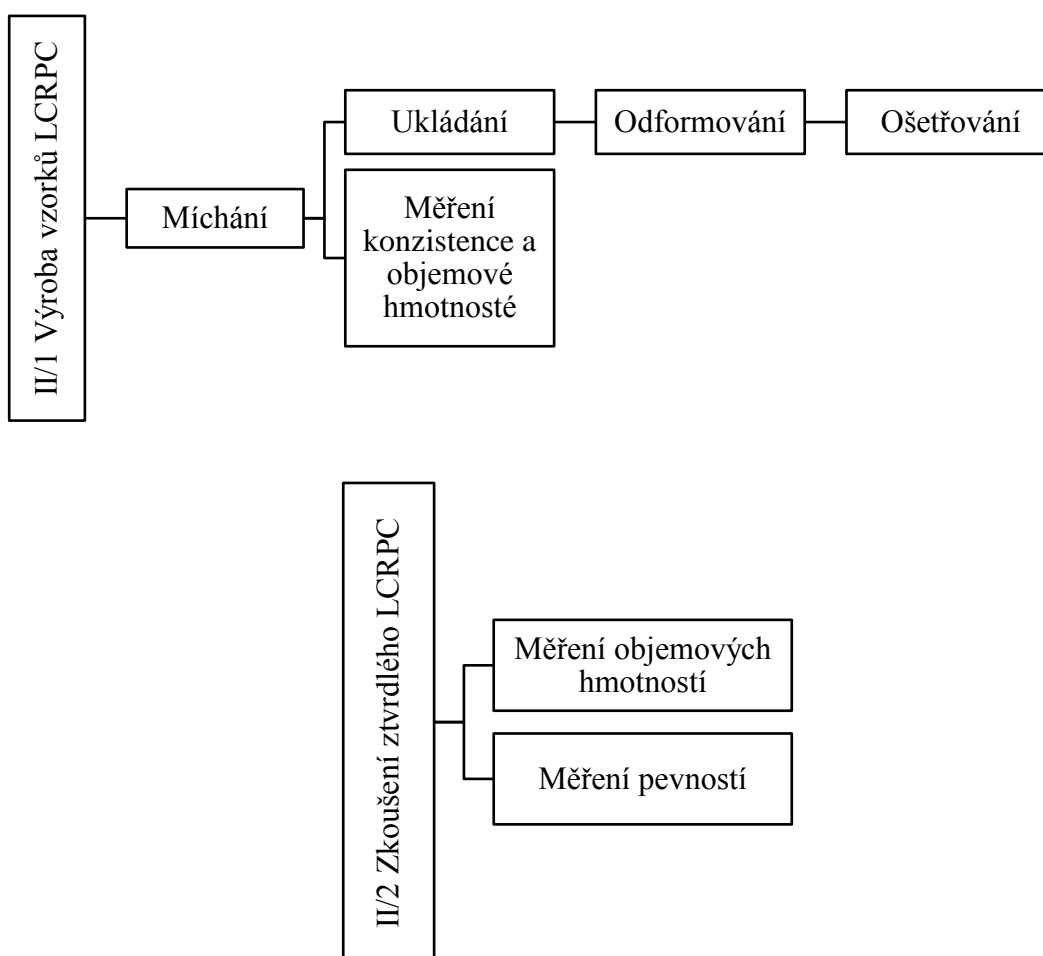
8.2 II. etapa – ověření vlivu teploty a tlaku prostředí ošetřování





Obrázek 12: Schematické znázornění II. etapy kroku 1 – 2

8.3 III. etapa – ověření možnosti výroby nízkocementového RPC



Obrázek 13: Schematické znázornění III. etapy kroku 1 – 2

9 Použitá zařízení a jejich principy

9.1 Mastersizer 2000 – Laserová difrakce pro měření velikosti částic

Mastersizer 2000 je přístroj vyrobený společností Malvern. Měření velikostí částic pomocí laserové difrakce je založeno na prozařování částic laserovým paprskem, který se v měřicí nádobě (kyvetě) rozptyluje. Vlivem přítomnosti částic dochází k ohybu (difrakci) laserového paprsku a vzniklý úhel ohybu je nepřímo úměrný velikosti částic. Intenzita světla stanovená v různých směrech se vnáší do výpočtu distribuce částic. Výsledek měření je vyhodnocen podle teorie MIE (matematicko-fyzikální teorie rozptylu elektromagnetického záření – Gustav Mie 1908).^[33]

9.2 TESCAN MIRA3 XMU – Elektronový rastrovací mikroskop

Elektronový mikroskop od společnosti TESCAN ORSAY HOLDING a.s. vytváří proud elektronů pomocí Schottkyho autoemisní katody. Ten je v jemném svazku veden vychylovacím systémem po povrchu zkoumaného vzorku. Detektory potom zachycují sekundární elektrony buzené ionizací valenčních sfér atomů po dopadu primárních elektronů. Právě na základě rozdílného buzení proudů vzniká obraz povrchu vzorku, jehož kontrast je určen výtěžkem elektronů odražených (sekundárních) na jednotlivých detailech vzorku. Primární paprsek, který dopadá na povrch vzorku a vytváří v místě dopadu ve vzorku prostor, v němž dochází k interakci elektronu s hmotou, což je zdrojem dalších snímaných a analyzovaných signálů (např. sekundární a odražené elektrony, Augerovy elektrony, absorbované elektrony ve vzorku, prošlé elektrony, fotony, ...).^[34]

9.3 Rentgenová difrakční analýza XRD

Vzorky zkoumaných silikátových vzorků obsahují velký počet malých nezávisle difraktujících krystalů, které jsou zcela náhodně rozmístěny. Zde se nachází vzájemně rovnoběžné roviny, které jsou od sebe vzdáleny mezimřížkovou vzdáleností, charakteristickou pro jednotlivé krystaly. Tato vzdálenost lze určit právě pomocí rentgenové difrakční analýzy, konkrétně pomocí rentgenkou vytvořeným svazkem rentgenového záření, které dopadá na vzorek. Úhel difraktovaných paprsků slouží poté k výpočtu mezimřížkové vzdáleností, který je proveden pomocí Braggovi rovnice.^[34]

9.4 Ruční míchadlo

Pro míchání všech směsí bylo použito ruční míchadlo pro stavební hmoty, které nahradilo normovou experimentální normovou míchačku pro míchání maltovin a to z důvodu jejího nedostatečného výkonu při delší zátěži. Míchadlo disponuje jmenovitým příkonem 1200 W a maximální rychlostí otáček 700 ot/min.

9.5 Autokláv ADMAS II

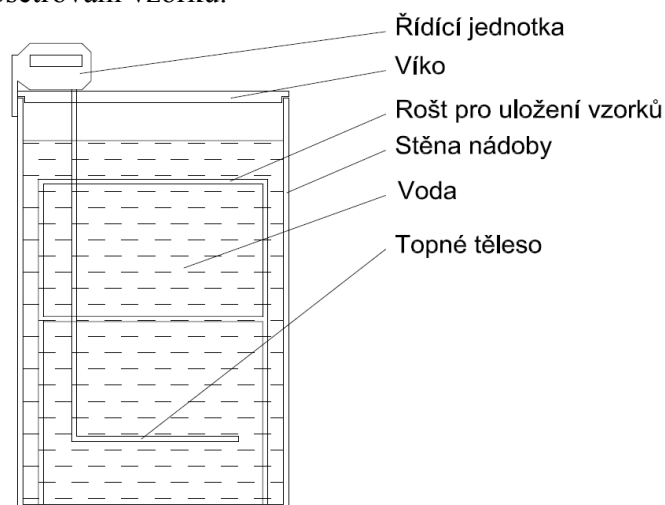
Ošetřování ztvrdlého betonu za zvýšené teploty a tlaku probíhalo v autoklávu vyrobeném českou firmou VKS Pardubice s.r.o., který má objem 275 l, rozsah tlaku od - 0,1 MPa do 2 MPa a maximální možnou teplotou 220°C. Topné médium (olej) se nachází v duplikačním plášti. V komoře je pak umístěn koš s uloženými vzorky a vhodné množství vody. Regulace tlaku probíhá pomocí ventilu a vhodným nastavením teploty. Autokláv je zachycen na obrázku 14.



Obrázek 14 Autokláv ADMAS II

9.6 Soustava pro prohřívání vzorků ve vodním uložení

Použitá soustava se skládá z plastové nádoby opatřené víkem, kompozitního roštu pro uložení vzorků a topného tělesa řízeného regulací. Schéma soustavy je znázorněno na obrázku 15. Díky řídicí jednotce je možné nastavit požadovanou teplotu vody v nádobě, která byla také ověřena pomocí externího teploměru. Tato teplota byla konstantně udržována po danou dobu ošetřování vzorků.



Obrázek 15: Schéma soustavy pro tepelné ošetřování vzorků

Kromě výše popsaných zařízení byly použity také:

- Běžné laboratorní pomůcky,
- ocelové formy o rozměru 40x40x160 mm,
- hydraulický zkušební lis,
- střešovací stolek pro zkoušení konzistence dle normy ČSN EN 1015-3,
- tenzometrické váhy s přesností $\pm 0,01$ g,
- posuvné měřítko s přesností $\pm 0,01$ mm,
- rtuťový teploměr,
- vibrační stůl,
- planetární mlýn.

10 Pracovní postupy

10.1 Laserová difrakce a stanovení křivky zrnitosti

Laserová difrakce umožnila změření velikosti částic jednotlivých materiálů, které vstupovaly do směsi jako reaktivní prášková složka – cement, mikrosilika, popílek a také slévárenské písky. Výsledkem byla jednak distribuce velikosti částic, ale hlavně také kumulativní množství, které bylo použito při tvorbě křivky zrnitosti. Ta byla stanovena sečtením zrn jednotlivých velikostí od všech vstupních složek v dané receptuře s ohledem na poměr, v jakém byly materiály míchány. Tato křivka byla poté porovnávána s ideální křivkou zrnitosti, která byla stanovena následujícím výpočtem:

$$y_i = \frac{D_i^n - D_{Min}^n}{D_{Max}^n - D_{Min}^n} \cdot 100 \%$$

y_i	propad sítem o velikosti d	[%]
D_i	průměr zrna i -frakce	[μm]
D_{min}	průměr maximálního zrna	[μm]
D_{max}	průměr minimálního zrna	[μm]
n	konstanta rovna 0,37	[-]

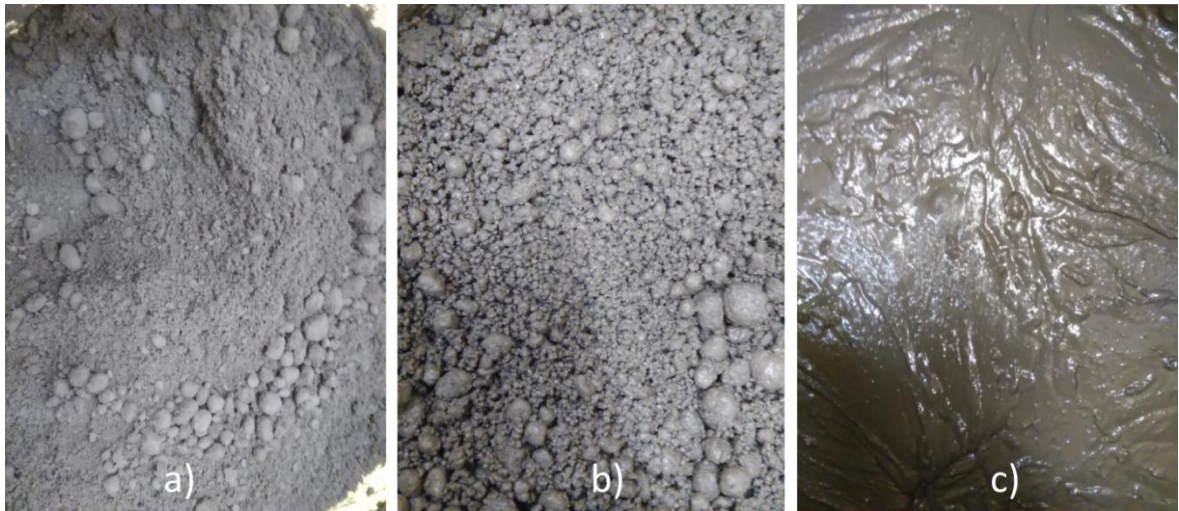
10.2 Míchání směsi

Míchání pomocí ručního míchadla probíhalo v několika krocích, kdy byly první tři minuty míchány suché složky a poté byla postupně dávkovaná voda zhruba s polovinou dávky SP. Tato směs byla míchána další dvě minuty a následně byl přidán zbytek superplastifikační přísady. Po uplynutí dalších pěti minut stálého míchání došlo k ztekucení směsi. Nakonec byla přidána vlákna a vmíchána do směsi po dobu jedné minuty. Na obrázku 16 je schematicky zobrazen proces míchání.



Obrázek 16: Schematické znázornění procesu míchání

Na obrázku 17 je zdokumentován průběh ztekucení, které bylo dosaženo až po uplynutí cca 10 minut míchání všech vstupních složek.



Obrázek 17: a) směs krátce po zamíchání SP b) směs po cca 2 – 3 min od míchání všech vstupních surovin c) směs v plastickém stavu po 10 min míchání

10.3 Výroba vzorků

Vzorky určené k hutnění pomocí vibrace byly do formy ukládány ve 3 vrstvách a hutněny na vibračním stole o frekvenci 50 Hz a amplitudě 0,375 po dobu 2 minut. Samozhutnitelné vzorky RPC a LCRPC byly do formy ukládány litím, kdy byl lehkým poklepem formy a stěrkou zarovnán povrch.

10.4 Měření konzistence

Měření konzistence čerstvého RPC bylo v případě vibrovatelných směsí provedeno pomocí střešovacího stolku dle normy ČSN EN 1015-3.^[3] Kovový kužel, který byl umístěn do středu desky střešovacího stolku, o výšce $60 \pm 0,5$ mm byl ve dvou vrstvách naplněn čerstvou směsí. Každá vrstva byla hutněna 10 lehkými údery dusadla o průměru 40 mm. Přebytková malta byla seříznuta a po cca 15 s byl kužel zvednut směrem kolmým na podložku. Směs se rozlila 15 nárazy o konstantní rychlosti 1 náraz za sekundu. Takto rozlitý vzorek byl poté změřen ve dvou na sebe kolmých směrech s přesností na 1 mm. Po vyzkoušení dvou vzorků byla průměrná hodnota zaokrouhlena na 5 mm.

Směsi navržené jako samozhutnitelné vykazovaly rozlití bez nutnosti vložení další energie, respektive střešání. Měření probíhalo pouze zvednutím kužele na podložce a měřením průměrů stejně jako u vzorku setřesených.

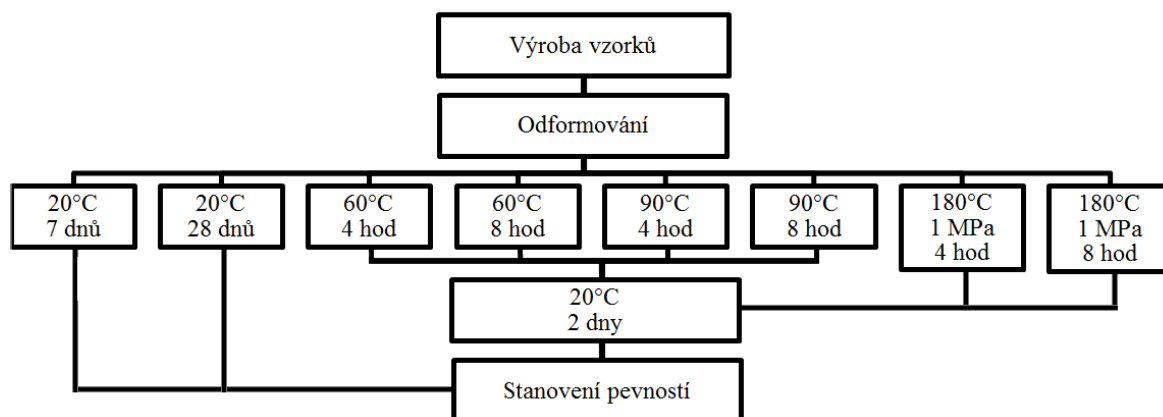
10.5 Ošetřování vzorků

Celkem bylo porovnáno 8 různých druhů ošetření vzorků RPC a LCRPC, které se lišily jednak dobou ošetřování, teplotou nebo případně tlakem ošetřovacího prostředí.

Referenční vzorky zrály při teplotě 20°C po dobu 28 dnů ve vodním prostředí, kde byly uloženy po odformování, které bylo provedeno 24 hodin po vyrobení vzorku. Při normové laboratorní teplotě zrály také vzorky, u kterých byly pevnosti měřeny po 7 dnech.

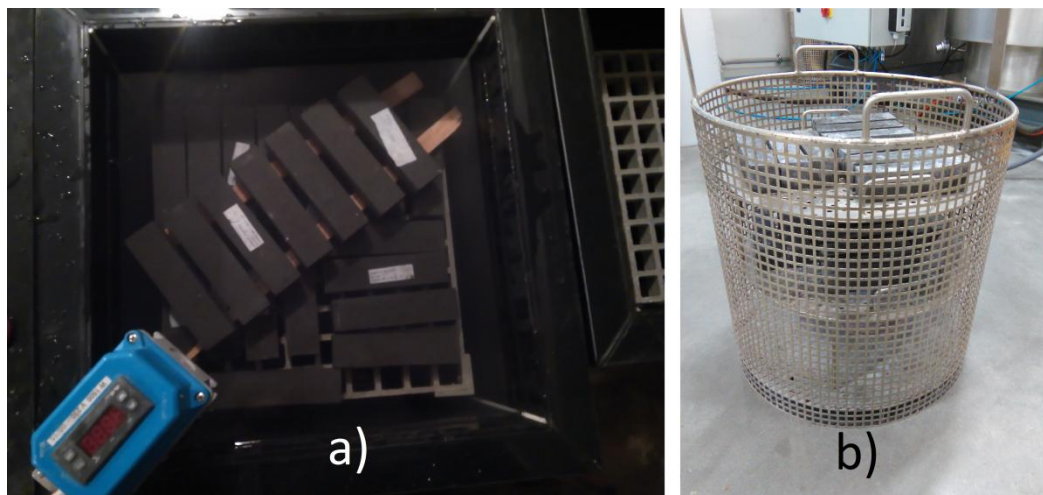
Doba zrání tepelně ošetřených vzorků byla celkem 72 hodin. Prvních 24 hodin byly vzorky uloženy ve formách, poté byly vyjmuty a ošetřeny ve vodě o teplotě 60 a 90°C po dobu 4 a 8 hodin. Další skupina vzorků byla ošetřována v autoklávu při teplotě 180°C a tlaku 1 MPa také po dobu 4 a 8 hodin. Po vychladnutí vzorků byly stanoveny pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku. Kvůli synchronizaci doby zrání u tepelně ošetřených vzorků, byly všechny změřeny až následující den, respektive po 72 hodinách.

Schematicky je metodika ošetřování znázorněna na obrázku 18.



Obrázek 18: Schematické znázornění způsobů ošetřování vzorků

Na obrázku 19 je zachycen způsob uložení vzorků do koše autoklávu a v nádobě uzpůsobené tepelnému prohřívání ve vodě.



Obrázek 19: a) proteplování vzorků ve vodě b) koš pro uložení vzorků do autoklávu

10.6 Stanovení pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku

Pevnosti referenčních vzorků byly zkoušeny po 7 a 28 dnech zrání dle normy ČSN EN 196-1.^[4] Vzorky ošetřené za vyšších teplot byly testovány po jejich vychladnutí.

Před zkouškou byly zkušební tělesa otřeny vlhkou tkaninou, změřeny jejich rozměry a zváženy. Poté byla měřena pevnost v tahu za ohybu, kdy se vzorek vložil do zkušebního lisu osazeného přípravkem pro trojbodový ohyb (rozpětí dolních podpor bylo 100 mm, zatěžovací váleček působil uprostřed). Zatěžovalo se kolmo na směr ztuhnutí rychlostí 50 ± 10 N/s až do porušení vzorku. Odečetla se maximální zatížení F_t a po dosazení do uvedeného vztahu se stanovila pevnost vtahu za ohybu jednotlivých vzorků. Výsledek je průměr ze tří hodnot, uváděny s přesností na 0,1 MPa.

Vztah pro výpočet:

$$f_{cf} = \frac{3}{2} \cdot \frac{F_t \cdot l}{b \cdot h^2}$$

f_{cf}	Pevnost v tahu za ohybu	[MPa]
F_t	Maximální zatížení při porušení	[N]
b	Šířka vzorku	[mm]
h	Výška vzorku	[mm]

Pevnost v tlaku byla změřena ve zkušebním lisu s osazeným přípravkem pro zatěžování v tlaku s tlačnou plochou 1600 mm². Zatěžovací rychlost byla 2400 ± 200 N/s a zatěžování proběhlo až do porušení, kdy byla určena maximální síla při porušení F_c a dosazena do vztahu pro výpočet pevnosti v tlaku. Výsledek měření je průměr z šesti hodnot, poté zaokrouhlený na 0,1 MPa. Vztah pro výpočet:

$$f_c = \frac{F_c}{1600}$$

f _c	Pevnost v tahu za ohybu	[MPa]
F _c	Maximální zatížení při porušení	[N]
1600	Zatěžovací plocha	[mm ²]

10.7 Příprava vzorků pro mikroskopii

Přístroj TESCAN MIRA3 umožňuje snímání celých fragmentů vzorků. Vzhledem k elektrické nevodivosti zkoumaných vzorků, bylo nutno je před snímáním „pokovovat“. Tento proces byl proveden v tzv. naprašovačkách, ve kterých je vzorek pokryt tenkou vrstvičkou zlata, platiny, uhlíku aj. Aplikace filmu probíhá ve vakuu. Pokud by byl vzorek nevodivý, vyvolával by primární svazek elektronů po dopadu na materiál kumulaci elektronového náboje a znemožňoval tak jeho snímání.

10.8 Příprava vzorků pro rentgenovou difrakční analýzu

Část zlomků vzorků, získaných po měření pevností, byla mleta v planetárním mlýně po dobu 5 minut. Poté namletý vzorek prošel sítím k získání analytické jemnosti < 63 μm. Takto upravený vzorek byl vložen do nosiče v podobě ploché formičky kruhového tvaru.

11 Použité materiály

Uvedené vlastnosti materiálů byly získány z technických listů, informací od výrobců či dodavatelů, případně byly experimentálně ověřeny popsáním způsobem.

11.1 Portlandský cement

Použitý portlandský cement je vyráběn v rakouském městě Mannersdorf společností Lafarge. Obchodní název je Der Contragress CEM I 52,5 N, s označením CEM I 52,5 N - SR 0 WT 38 C3A-frei. Cement byl vybrán z důvodu nízkého obsahu C3A, což je dle literatury důležitým kritériem pro výrobu jemnozrnných betonů s nízkým obsahem vody. V tabulce 3 jsou uvedeny fyzikální a chemické vlastnosti cementu.

Fyzikální/mechanické vlastnosti	Hodnota	Jednotka
Pevnost v tlaku (28 dnů)	59,2	MPa
Jemnost mletí podle Blaina	454	m ² ·kg ⁻¹
Počátek doby tuhnutí	170	min
Konec doby tuhnutí	225	min
Objemová stálost (Le Chatelier)	0,5	mm
Normální konzistence	149 (29,8)	ml (%)
Hydratační teplo 7 dní	322	J·g ⁻¹
Chemické vlastnosti	Hodnota	Jednotka
SO ₃	2,6	%
Cl	0,06	%
Al ₂ O ₃	2,79	%
Fe ₂ O ₃	4,25	%
C ₃ A	0,2	%

Tabulka 3: Fyzikální a chemické vlastnosti použitého cementu

11.2 Mikrosilika

Křemičitý úlet zvolený pro provedení experimentu je vyráběn společností Elkem (Norsko). Vlastnosti mikrosiliky označené 940D (D - densified – zhutněný) jsou popsány v tabulce 4 a 5. Jedná se o světle šedý sypký prášek.

Fyzikální vlastnosti	Hodnota	Jednotka
Jemnost mletí podle Blaina	1551	m ² ·kg ⁻¹
Sypná objemová hmotnost	300 - 700	kg·m ⁻³
Střední zrno	0,15	μm
Měrná hmotnost	2100	kg·m ⁻³
Ztráta žíháním	1,86	%

Tabulka 4: Fyzikální vlastnosti mikrosiliky Elkem 920D

Oxid	Množství [%]
SiO ₂	94,73
CaO	0,20
Al ₂ O ₃	0,36
Fe ₂ O ₃	0,71
MgO	0,39
Na ₂ O	0,20
K ₂ O	0,90
SO ₃	0,27

Tabulka 5: Chemické složení mikrosiliky Elkem 920D

11.3 Křemičité písky

Byly vybrány dva druhy křemičitých písků těžných společností Kerkosand (Slovensko), které se lišily svou granulometrií. Jedná se o slévárenské písky, které jsou po jejich úpravě třením tříděny na sítěch a zbaveny organických nečistot. Zrna mají kulovitý tvar, což může také přispívat ke zlepšení konzistence čerstvé betonové směsi. Vlastnosti jednotlivých písků jsou uvedeny v tabulce 6.

Označení	Vlastnost	Hodnota	Jednotka
SH34	Sypná hmotnost	1500	kg·m ⁻³
	Měrná hmotnost	2650	kg·m ⁻³
	Střední zrno (d ₅₀)	0,24	mm
	Obsah SiO ₂	97	%
	Obsah Al ₂ O ₃	1,9	%
	Obsah Fe ₂ O ₃	0,19	%
SH32	Sypná hmotnost	1500	kg·m ⁻³
	Měrná hmotnost	2650	kg·m ⁻³
	Střední zrno (d ₅₀)	0,38	mm
	Obsah SiO ₂	98	%
	Obsah Al ₂ O ₃	1,4	%
	Obsah Fe ₂ O ₃	0,16	%

Tabulka 6: Vlastnosti křemičitých slévárenských písků

11.4 Popílek

Vysokoteplotní létavý popílek produkováný společností ČEZ a.s. v tepelné elektrárně Dětmarovice. Měrná hmotnost použitého popílku je 2120 kg·m⁻³ a měrný povrch pak 220 m²·kg⁻¹. Chemické složení je uvedeno v tabulce 7.

Oxid	Množství [%]
SiO ₂	54,2
CaO	4,0
Al ₂ O ₃	24,2
Fe ₂ O ₃	6,4
MgO	2,8
Na ₂ O	0,3
K ₂ O	2,8
TiO ₂	1

Tabulka 7: Chemické složení Popílku Dětmarovice

11.5 Superplastifikační přísada

Superplastifikační přísada na bázi polykarboxylátů od firmy Chryso Chemie s.r.o. byla použita pro dosažení požadované konzistence při výrobě RPC. Byl použit typ CHRYSO[®] Fluid Premia 330 se stabilizujícím účinkem. Vlastnosti superplastifikátoru jsou uvedeny v tabulce 8.

Vlastnost	Hodnota	Jednotka
Hustota	1060	kg·m ⁻³
Obsah chloridů	< 0,1	%
pH	6,5 ± 2	-
Obsah sušiny	23,6 ± 1,2	%

Tabulka 8: Vlastnosti superplastifikační přísady

11.6 Mikrovýztuž

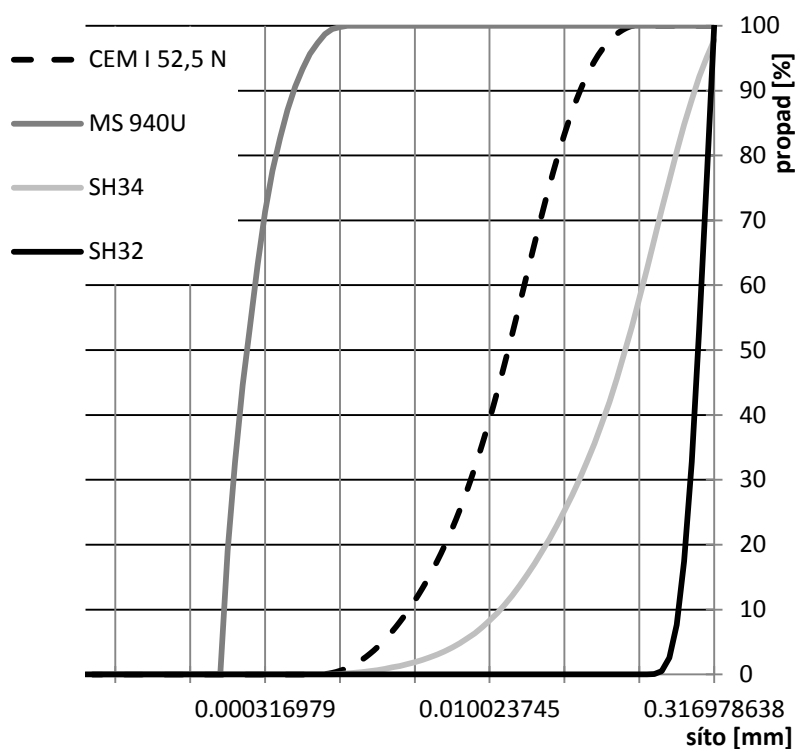
Ocelové drátky DM 6/0.17, vyráběné společností KrampeHarex CZ spol. s r.o., byly použity jako rozptýlená výztuž v různých dávkách. Tyto drátky jsou produkovány v délce 6 mm, o průměru 0,17 mm a pevnosti v tahu 2100 MPa.

12 Vývoj receptur RPC a LCRPC

Základní poměr dávkování vstupních surovin byl dále upraven v závislosti na vlastnostech, respektive granulometrii použitých materiálů. Ideální dávka vody byla určena pomocí experimentu, stejně jako dávka superplastifikační přísady, která byla určena na základě požadované konzistence. Dvě různé dávky vláken byly pak přidány do konečných receptur.

12.1 Ideální dávkování suchých složek

V grafu 9 je zobrazeno kumulativní množství zrn určitých velikostí, respektive propad zrn sítím o dané velikosti. Jak již bylo zmíněno, tento výstup byl prvním krokem při vývoji receptur RPC.



Graf 9: Granulometrie použitých materiálů

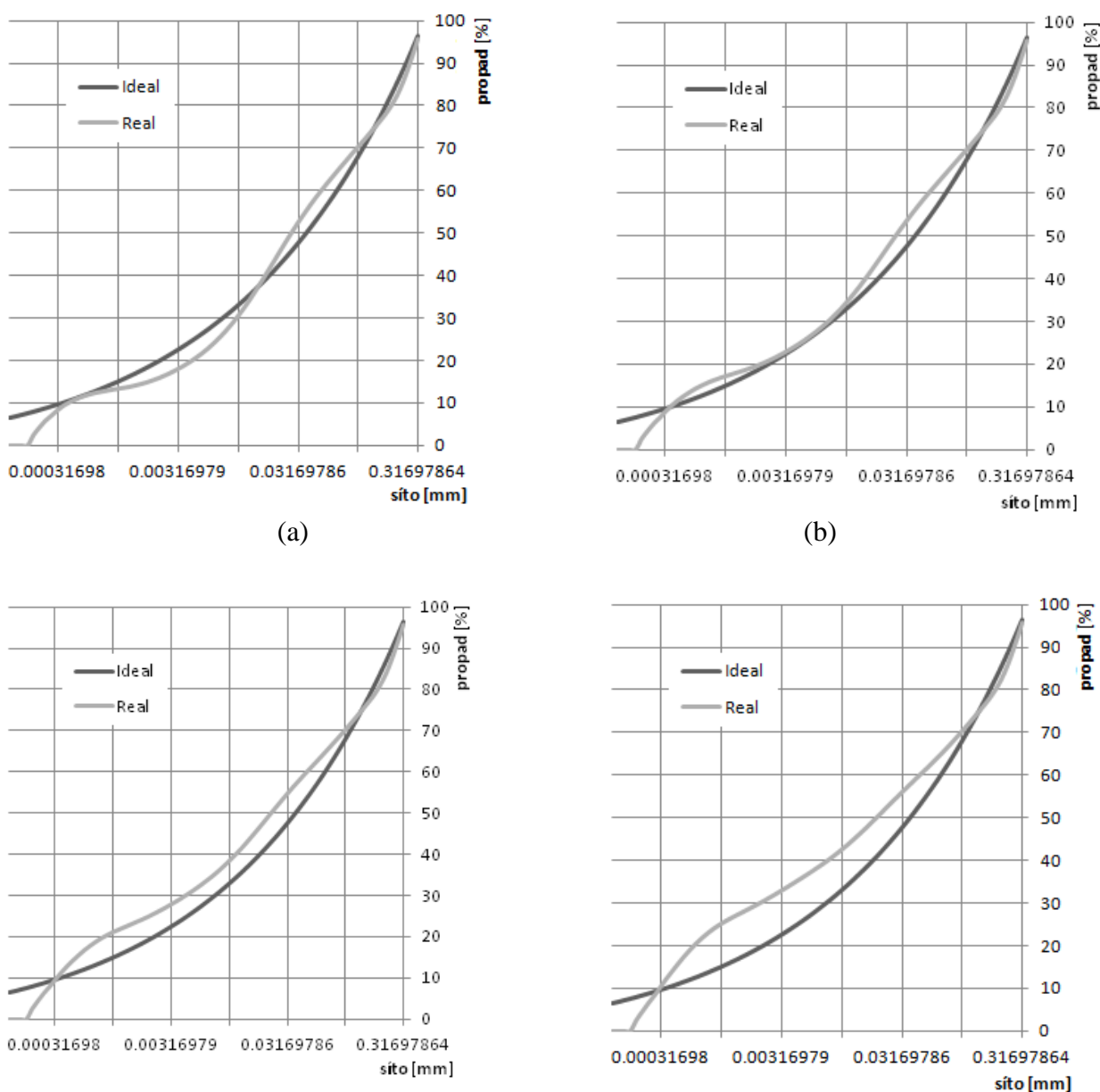
V grafu 10 a) je vyobrazeno porovnání teoretické reálné křivky zrnitosti s křivkou ideální navržené receptury RPC. Ideální hmotností poměr složek, který dovozoval největší přiblížení k ideální křivce, byl:

Cement : Mikrosilika : Písek SH34 : Písek SH32
1 : 0,26 : 0,85 : 0,34

Tento poměr byl vypočítán na základě objemového poměru získaného při tvorbě křivky zrnitosti dosazením hodnot měrných hmotností použitých materiálů.

Ideální změna celkové granulometrie hrubších frakcí spočívala ve vhodném smíchání dvou použitých písků. Jemnější frakce byly korigovány úpravou dávky cementu v teoreticky vhodném rozmezí, který byl stanoven na základě teoretických poznatků.

Dávkování popílku při výrobě LCPRC bylo testováno ve třech různých hmotnostních náhradách cementu, konkrétně pak 20, 40 a 60% náhrady. V grafu 10 (b), (c) a (d) jsou zobrazeny teoretické reálné křivky zrnitosti těchto směsí pro porovnání s křivkou ideální.



Graf 10: Porovnání teoretických reálných křivek zrnitosti s křivkami ideálními
 (a) RPC (b) LCRPL 20 % popílku (c) LCRPC 40 % popílku (d) LCRPC 60 % popílku

12.1.1 Diskuze výsledků určení ideálního dávkování suchých složek

Při pohledu na porovnání reálných a ideálních křivek zrnitosti všech suchých složek je zřejmé, že se podařilo, alespoň teoreticky, téměř dokonale kopírovat ideální křivku v případě receptury reaktivního práškového betonu. V případě nízkocementového RPC se reálná křivka oddálila od křivky ideální pouze u receptury s 40 a 60% náhradou cementu popílkem. Jejich průběh se však zdál uspokojivý.

12.2 Ideální dávka vody

Stanovení vodního součinitele ($w = \text{voda}/\text{cement} + \text{mikrosilika}$) bylo provedeno pomocí experimentu, kdy byly navržené dávky suchých složek míchány s určitým množstvím vody. Poté byla změřena objemová hmotnost ztvrdlé směsi a vyrobeny vzorky trámečků 40x40x160 mm pro stanovení pevností po 7 dnech.

Původním záměrem bylo stanovení ideálního vodního součinitele na základě poměrných objemových hmotností (objemová hmotnost betonu : objemová hmotnost suchých složek bez vzduchu a vody), jako je popsáno v teoretické části (kapitola 3.2.2). V průběhu experimentu se však ukázalo, že při nižších hodnotách vodního součinitele než 0,16 je směs velmi suchá, tvrdá a těžce zpracovatelná. Nepodařilo se tak určit hodnotu ideálního w tímto způsobem, protože hodnota objemové hmotnosti také stoupala s klesajícím množstvím vody. V grafu 11 jsou zobrazeny poměry objemových hmotností pro jednotlivé dávky vody. V tabulce 9 jsou uvedeny receptury jednotlivých směsí a hodnota jejich rozlití při zkoušce měření konzistence pomocí střešovacího stolku. Výsledné pevnosti po 7 dnech jsou uvedeny v grafu 12.

	Cement	MS 940D	Písek SH34	Písek SH32	SP ¹⁾	Voda ²⁾	Rozlití
Receptura	[kg·m ⁻³]						[mm]
RPC_016	997	255	845	338	15,9	200	180
RPC_018					12,0	225	200
RPC_020					9,8	250	210
RPC_022					9,8	275	200

Tabulka 9: Receptury pro stanovení ideálního vodního součinitele

1) Množství účinné složky

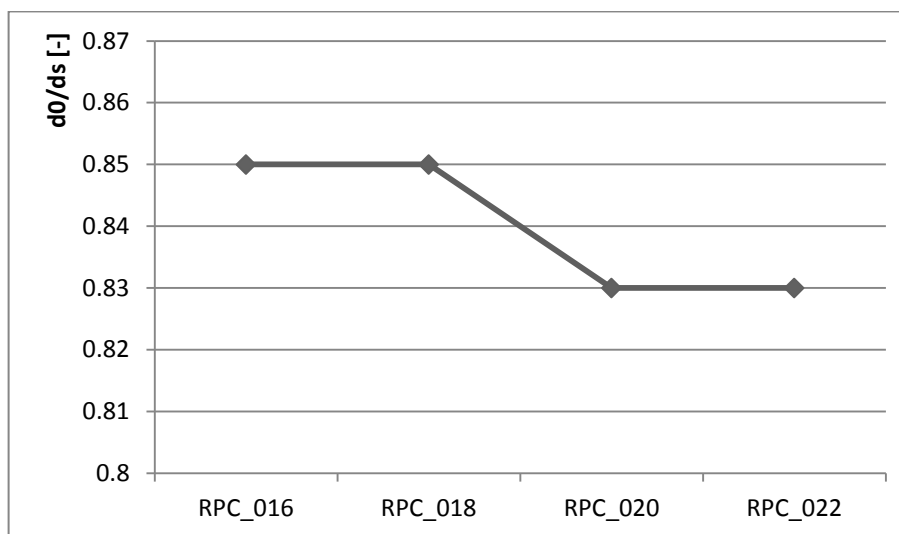
2) Množství přidané vody + vody ze SP

7 denní					
	Objemová hmotnost čerstvé směsi	Výpočtová objemová hmotnost ¹⁾	Poměrná objemová hmotnost ²⁾	Pevnost v tahu za ohybu	Pevnost v tlaku
Receptura	[kg·m ⁻³]	[kg·m ⁻³]	[-]	[MPa]	[MPa]
RPC_016	2470	2900	0,85	14,9	106,9
RPC_018	2460		0,85	15,2	100,7
RPC_020	2410		0,83	13,9	98,5
RPC_022	2420		0,83	12,1	100,0

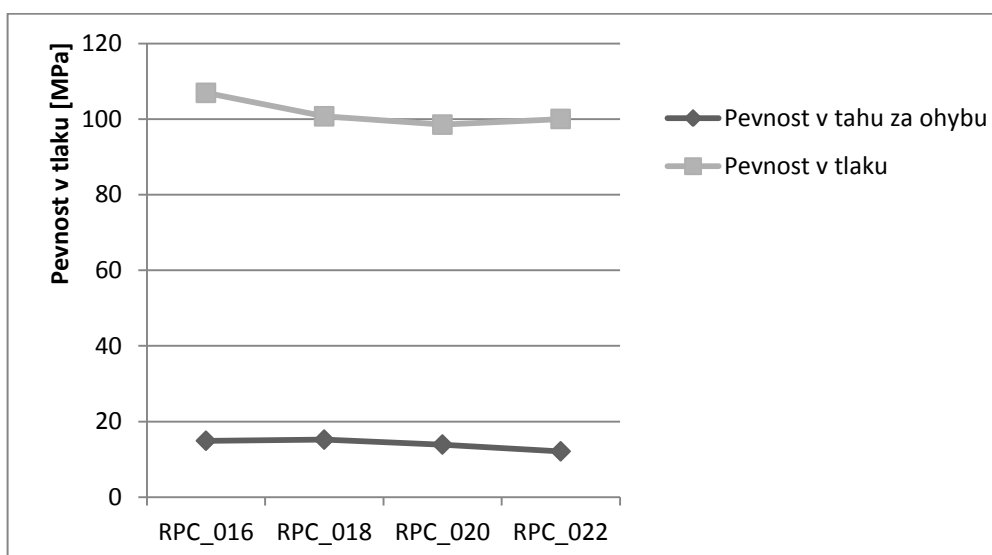
Tabulka 10: Výsledné vlastnosti směsí pro stanovení ideálního vodního součinitele

1) Bez vzduchu a vody

2) Objemová hmotnost čerstvé směsi : výpočtová objemová hmotnost suchých složek d_0/d_s



Graf 11: Poměrné objemové hmotnosti



Graf 12: Pevnost v tahu za ohybu a tlaku po 7 dnech

Vzhledem k malým rozdílům v objemových hmotnostech, stejně jako v pevnostech, byla jako ideální dávka vody stanovena $w = 0,22$. Byly tedy upřednostněny makroskopické

vlastnosti, jako je právě vhodnější konzistence ovlivňující náročnost procesu míchání a ukládání čerstvé směsi.

12.2.1 Diskuze výsledků návrhu ideálního vodního součinitele

Při provádění experimentu pro určení vhodné dávky vody při návrhu receptury reaktivního práškového betonu se podařilo vyrobit směs, která měla dávku vody $w = 0,16$. Již tato směs byla však tvrdá a lepivá, při vyšších dávkách SP se tyto vlastnosti nezlepšovaly, proto nebyly testovány další směsi s nižším vodním součinitelem. Pro zlepšení konzistence a zpracovatelnosti směsi při nižších hodnotách vodního součinitele by bylo nejspíše vhodné otestovat například různé druhy mikrosiliky, což může mít také vliv na konzistenci^[2]. Dále by bylo vhodné ověřit také vliv použití různých metod stanovení křivek zrnitosti, případně použití složitějších výpočtových modelů (kapitola 3.2.1). Pokud by se podařilo vytvořit směs o lepší konzistenci, klesla by dávka superplastifikační přísady, která může mít také vliv na lepivost směsi.

Při měření objemových hmotností čerstvé směsi byly zjištěny nízké hodnoty oproti výpočtové objemové hmotnosti. To může dokazovat také vyšší množství vzduchu v betonu, který se nepodařilo odstranit ani hutněním. Tento vzduch mohl být do záměsi vnesen mícháním, které je oproti například obyčejnému betonu výrazně delší. Také někteří autoři [2][29] zjistili významný vliv vakuového míchání těchto typů betonů, což by mohlo být řešení jak tento problém eliminovat. Dalším důvodem vyššího provzdušnění mohlo být také napěnění superplastifikační přísady vlivem vyšších otáček, které byly potřeba použít při ručním míchání. Tento jev by však odporoval faktu, že výsledná objemová hmotnost byla nejvyšší u směsi s nejnižším obsahem vody, respektive nejvyšší dávkou superplastifikátoru. Každopádně množství vneseného vzduchu do čerstvého betonu, který nelze odstranit běžnou vibrací, může mít negativní vliv také na výsledné pevnosti a další vlastnosti.

12.3 Ověření vlivu způsobu hutnění

Byly navrženy dva různé typy hutnění neboli dvě směsi o různé konzistenci. Ta byla ovlivněna dávkou superplastifikační přísady. Pomocí střešacího stolku dle normového postupu byla vyrobena směs s rozlitím 200 ± 5 mm. Další směs měla také rozlití 200 ± 5 mm, ale bez použití střešání stolku. Jeden způsob hutnění čerstvého betonu byl tedy pomocí vibrace a druhá směs byla samozhutnitelná.

V tabulce 11 jsou uvedeny receptury navržené pro ověření vlivu hutnění a v tabulce 12 výsledky měření.

	Cement	MS 940D	Písek SH34	Písek SH32	SP	Voda	Hutnění
Receptura	[kg·m⁻³]						[mm]
RPC_VIB	997	255	845	338	12,0	275	Vibrace
RPC_SCC					19,4		Samozhut.

Tabulka 11: Receptury pro určení vhodného způsobu hutnění

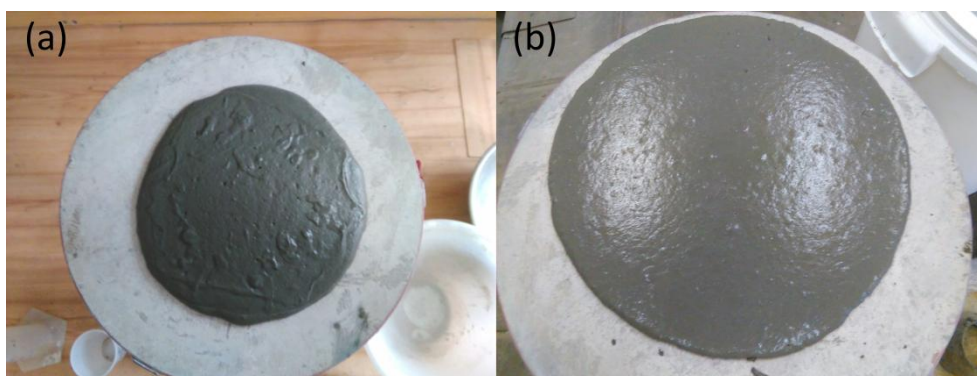
7 denní				
	Objemová hmotnost čerstvé směsi	Objemová hmotnost ztvrdlého betonu	Pevnost v tahu za ohybu	Pevnost v tlaku
Receptura	[kg·m⁻³]	[kg·m⁻³]	[MPa]	[MPa]
RPC_VIB	2470	2440	12,1	100,0
RPC_SCC	2430	2410	16,4	104,9

Tabulka 12: Výsledné vlastnosti směsí pro určení vhodného způsobu hutnění

12.3.1 Diskuze ověření vlivu hutnění

Výsledné pevnosti byly téměř srovnatelné, stejně jako objemové hmotnosti. Vyšší pevnosti byly změřeny u samozhutnitelné směsi, ale nárůst byl jen nepatrný. Případný výraznější nárůst by mohl být také ovlivněn jinou dávkou superplastifikační přísady, která může počáteční pevnosti také ovlivňovat.

Pro praktičtější využití byla zvolena varianta samozhutnitelného RPC. Takto vyrobené RPC mělo charakter tekoucí směsi. Na obrázku 20 jsou zachyceny oba druhy směsí – vibrovatelná a samozhutnitelná v průběhu provádění experimentu a stanovení vhodné dávky SP.



Obrázek 20: (a) vibrovatelná směs po střešení stolku (b) samozhutnitelná směs

13 Ověření vlastností navržených receptur RPC

13.1 Konečné receptury RPC

V tabulce 13 jsou uvedeny navržené receptury, které byly použity pro výrobu vzorků a způsob ošetřování.

Receptura	Cement	Mikrosilika	Popílek	Písek SH34	Písek SH32	Vlákna	Superplastifikátor	Voda	Teplota ošetření	Tlak ošetření	Doba ošetřování ¹
	[kg·m ⁻³]							[°C]	[MPa]		
RPC_FIB3_REF7									20	0,1	7 d
RPC_FIB3_REF28									20	0,1	28 d
RPC_FIB3_604									60	0,1	4 h
RPC_FIB3_608	997	255	-	845	338	73	19,4	275	60	0,1	8 h
RPC_FIB3_904									90	0,1	4 h
RPC_FIB3_908									90	0,1	8 h
RPC_FIB3_A4									180	1	4 h
RPC_FIB3_A8									180	1	8 h
RPC_FIB6_REF7									20	0,1	7 d
RPC_FIB6_REF28									20	0,1	28 d
RPC_FIB6_604									60	0,1	4 h
RPC_FIB6_608	997	255	-	845	338	146	19,4	275	60	0,1	8 h
RPC_FIB6_904									90	0,1	4 h
RPC_FIB6_908									90	0,1	8 h
RPC_FIB6_A4									180	1	4 h
RPC_FIB6_A8									180	1	8 h

Tabulka 13: Navržené receptury reaktivního práškového betonu

13.2 Výsledky měření vlastností RPC

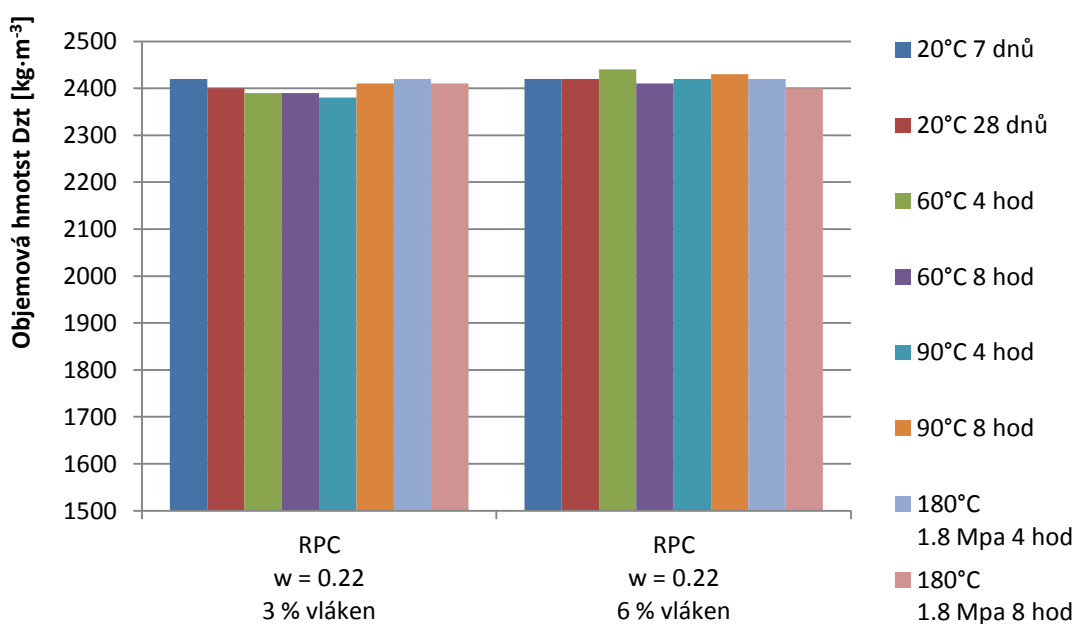
Výše popsaným způsobem byly stanoveny objemové hmotnosti, pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku navržených receptur RPC a ověřen tak vliv způsobů ošetřování, dávky vláken a vhodnost návrhu receptur. Dále bylo také provedeno mikroskopické snímání mikrostruktury a XRD analýza u vybraných receptur s nejvyšším rozdílem pevností.

13.2.1 Objemové hmotnosti a pevnosti RPC

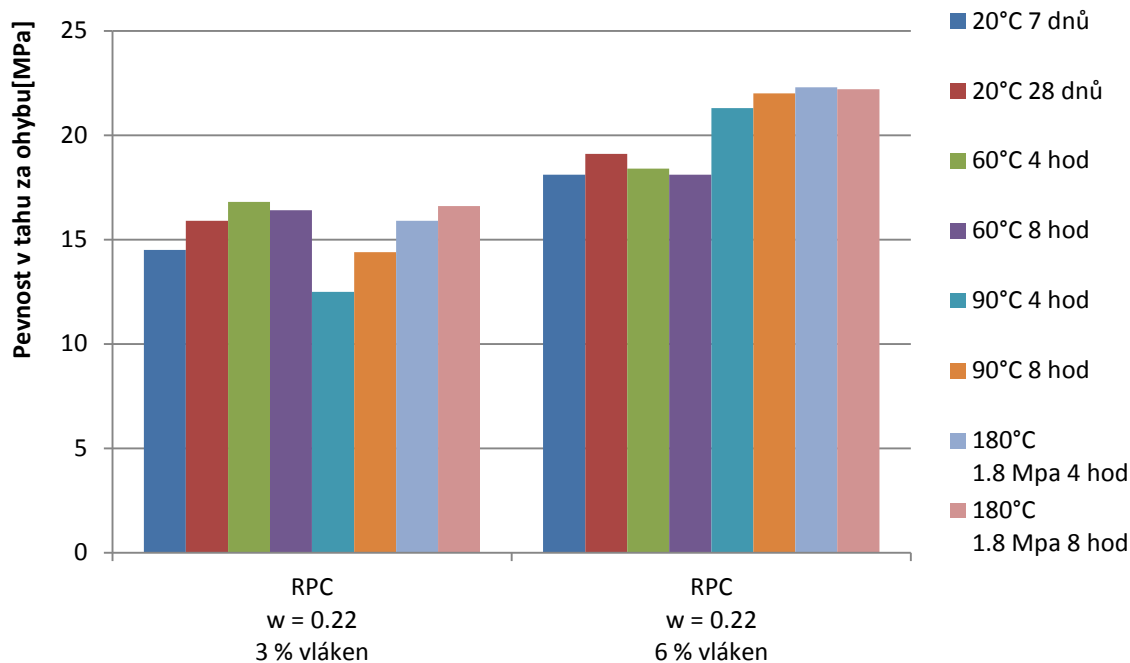
V tabulce 14 jsou uvedeny výsledky provedených zkoušek. Ty jsou také zobrazeny v grafu 13, 14 a 15.

Receptura	Obj. hmotnost čerstvého betonu [kg·m ⁻³]	Obj. hmotnost ztvrdlého betonu [kg·m ⁻³]	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	Pevnost v tlaku [MPa]	Rozlítí [mm]
RPC_FIB3_REF7	2430	2420	14,5	108,3	200
RPC_FIB3_REF28		2400	15,9	152,2	
RPC_FIB3_604		2390	16,8	124,1	
RPC_FIB3_608		2390	16,4	127,6	
RPC_FIB3_904		2380	12,5	135,1	
RPC_FIB3_908		2410	14,4	136,3	
RPC_FIB3_A4		2420	15,9	166,0	
RPC_FIB3_A8		2410	16,6	182,8	
RPC_FIB6_REF7	2440	2420	18,1	125,7	190
RPC_FIB6_REF28		2420	19,1	163,9	
RPC_FIB6_604		2440	18,4	137,3	
RPC_FIB6_608		2410	18,1	140,8	
RPC_FIB6_904		2420	21,3	149,7	
RPC_FIB6_908		2430	22,0	142,6	
RPC_FIB6_A4		2420	22,3	192,0	
RPC_FIB6_A8		2400	22,2	210,6	

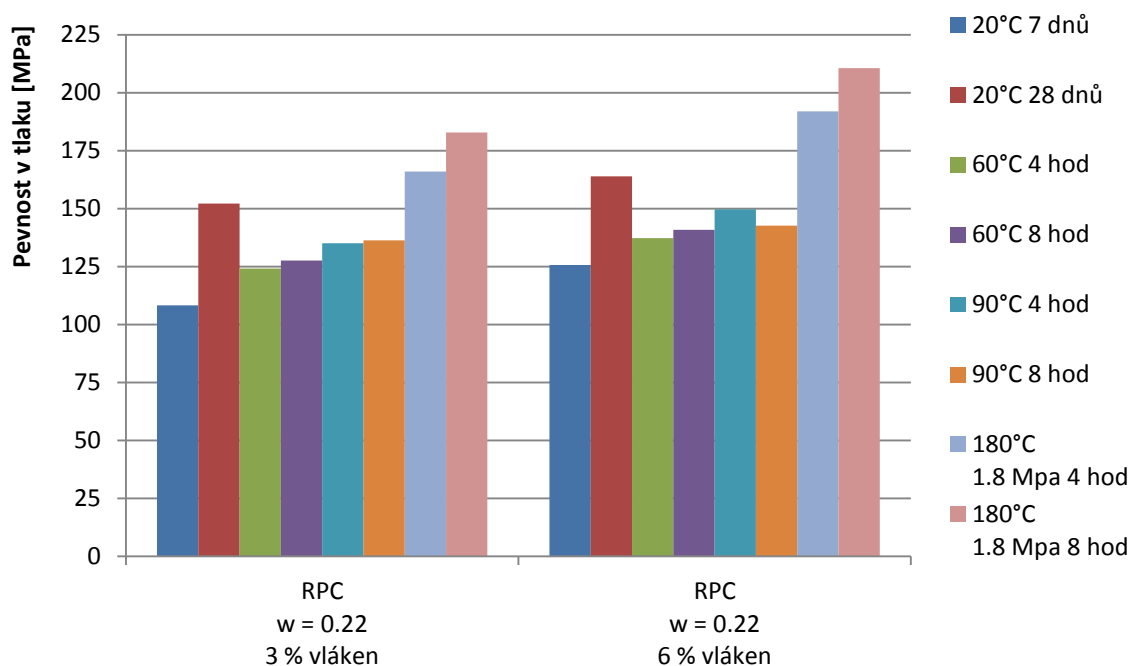
Tabulka 14: Výsledné vlastnosti RPC



Graf 13: Objemové hmotnosti ztvrdlého RPC – vliv dávky vláken a druhu ošetření

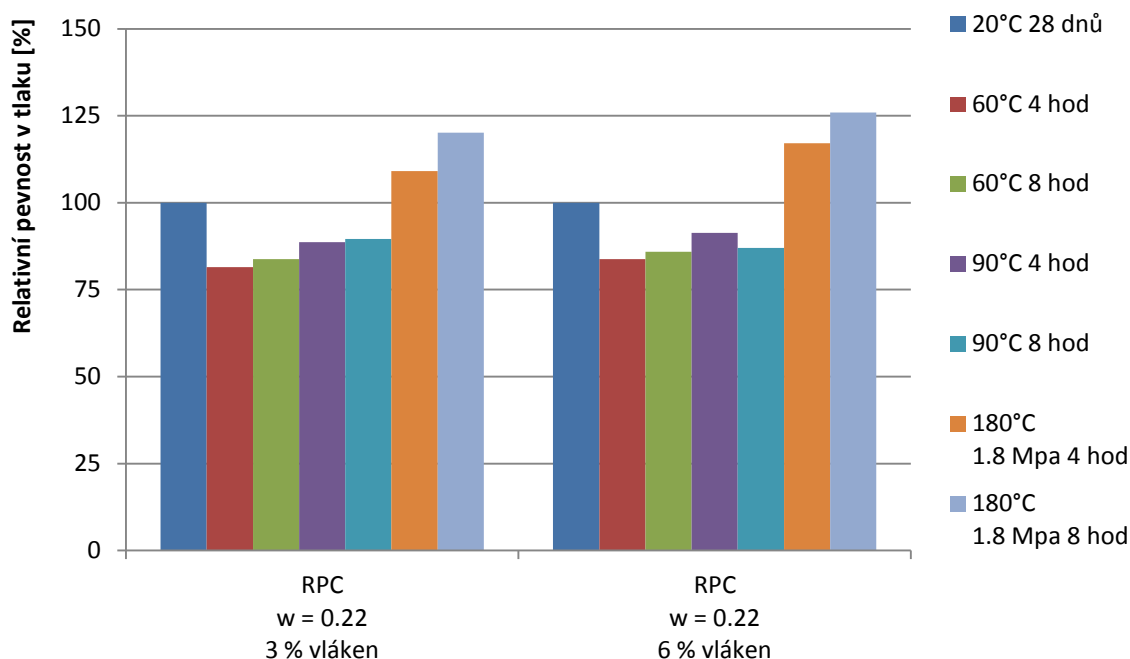


Graf 14: Pevnosti v tahu za ohybu RPC – vliv dávky vláken a druhu ošetření



Graf 15: Pevnosti v tahu za ohybu RPC – vliv dávky vláken a druhu ošetření

V grafu 16 jsou zobrazeny relativní pevnosti v tlaku, pro zobrazení poklesu/nárůstu pevností. Relativní pevnosti vzorků s 3 % vláken jsou vztaženy k referenčně ošetřené receptuře se 3 % vláken. Relativní pevnosti vzorků s 6% dávkou vláken zase k referenčně ošetřené sadě vzorků s 6 % vláken.



Graf 16: Relativní pevnosti v tlaku – vliv dávky vláken a druhu ošetření

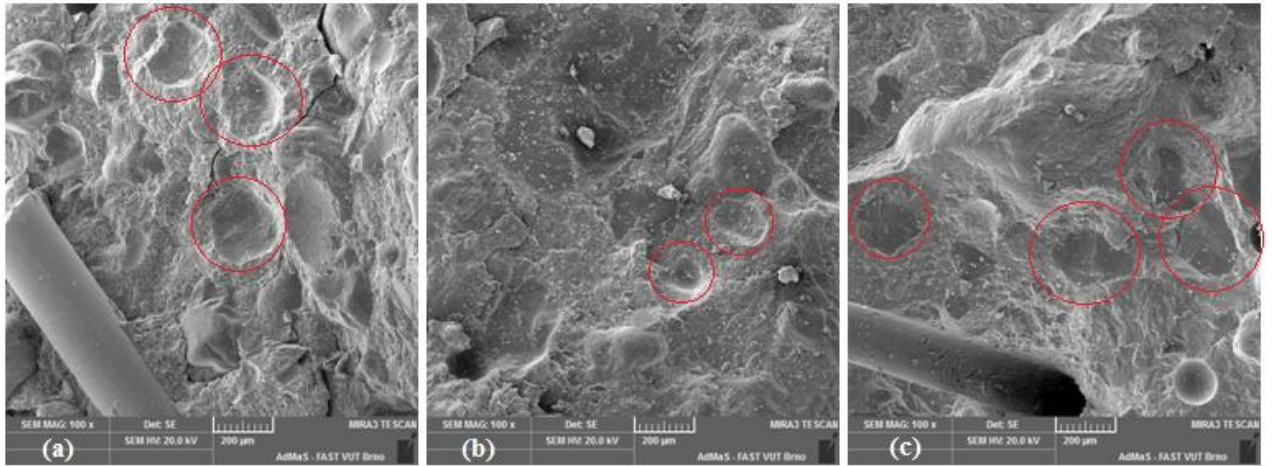
13.2.2 Analýza mikrostruktury RPC

Mikroskopické snímky byly provedeny u vzorků s normovým způsobem ošetření, tedy ve vodě o teplotě 20°C po dobu zrání 28 dní. Dále byl pozorován vzorek prohříváný 8 hodin ve vodě o teplotě 90°C a vzorek autoklávovaný 8 hodin při teplotě 180°C a tlaku 1 MPa.

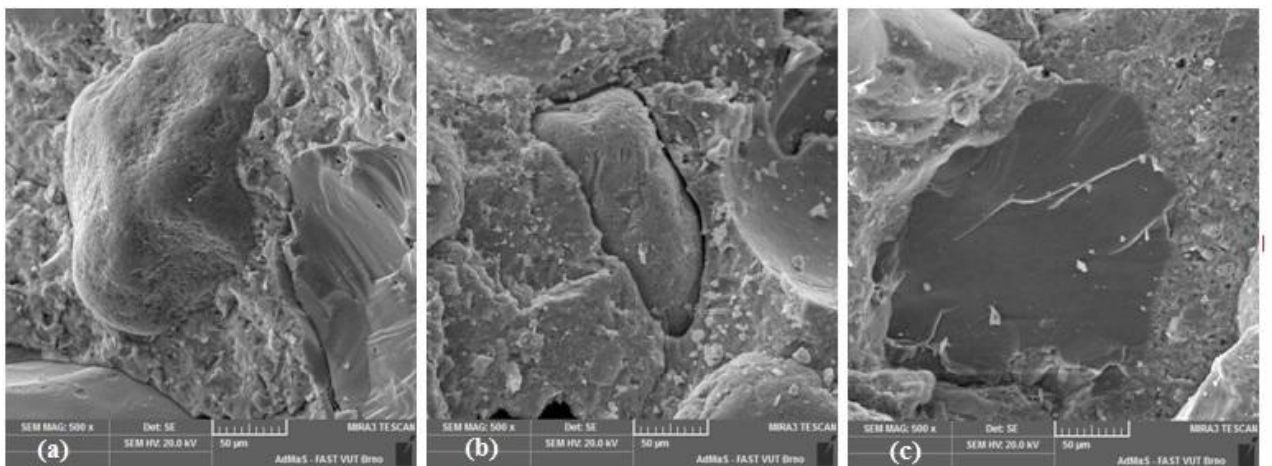
Byly vyzorovány především 3 změny, ve kterých se jednotlivé mikroskopické snímky lišily:

- porušení v oblasti výskytu kameniva,
- jiné tvary přítomných hydrátů,
- přítomnost nezreagované mikrosiliky.

Některé změny byly patrné již při makroskopickém pohledu bez použití mikroskopu, kdy vzorek ošetřený v autoklávu vykazoval odlesky v místě přítomného křemičitého písku. Bylo také zřejmé, že došlo k porušení zrn písku ve větší míře, než tomu bylo v případě ostatních vzorků. Tento jev lze přesněji pozorovat na obrázku 21 a 22.

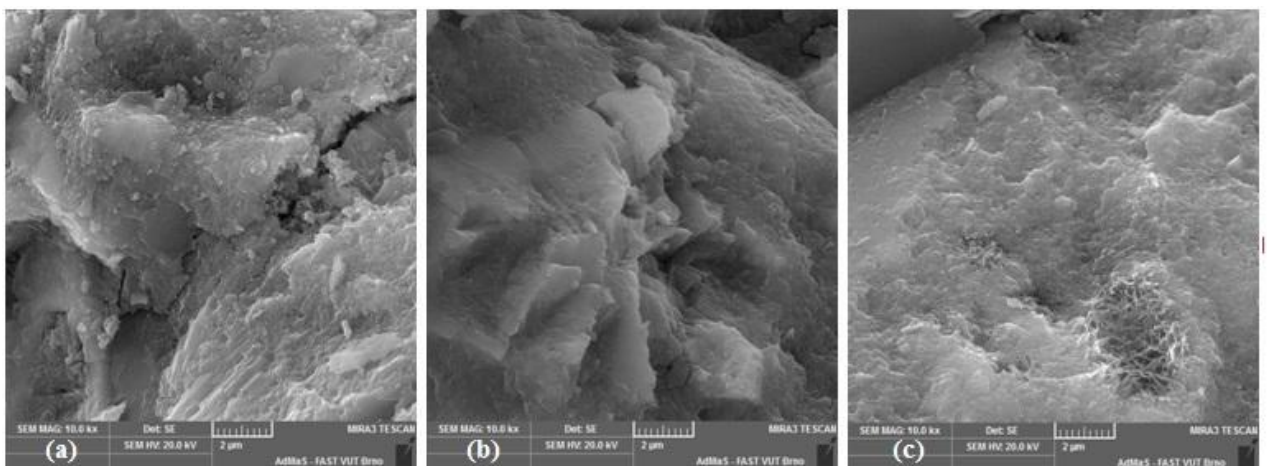


Obrázek 21: SEM snímek, zvětšeno 100x, ošetřování : (a) 20°C (b) 90°C (c) 180°C / 1 MPa



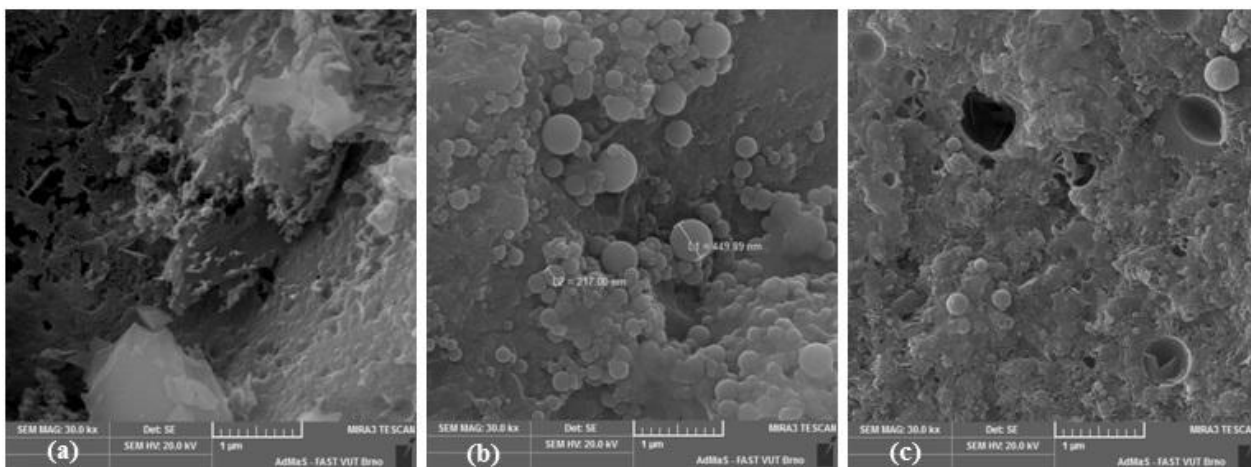
Obrázek 22: SEM snímek, zvětšeno 500x, ošetřování : (a) 20°C (b) 90°C (c) 180°C / 1 MPa

Mikrostruktura tvořila kompaktní celek, avšak změna, v podobě větší míry výskytů CSH gelů, byla patrná opět u vzorku ošetřovaného při 180°C, jak je zachyceno na obrázku 23.



Obrázek 23: SEM snímek, zvětšeno 10000x, ošetřování : (a) 20°C (b) 90°C (c) 180°C / 1 MPa

Poslední zachycenou změnou byla přítomnost mikrosiliky ve vzorcích tepelně ošetřených. V případě vzorků, které zrály v prostředí normovém, nebyla MS nalezena.

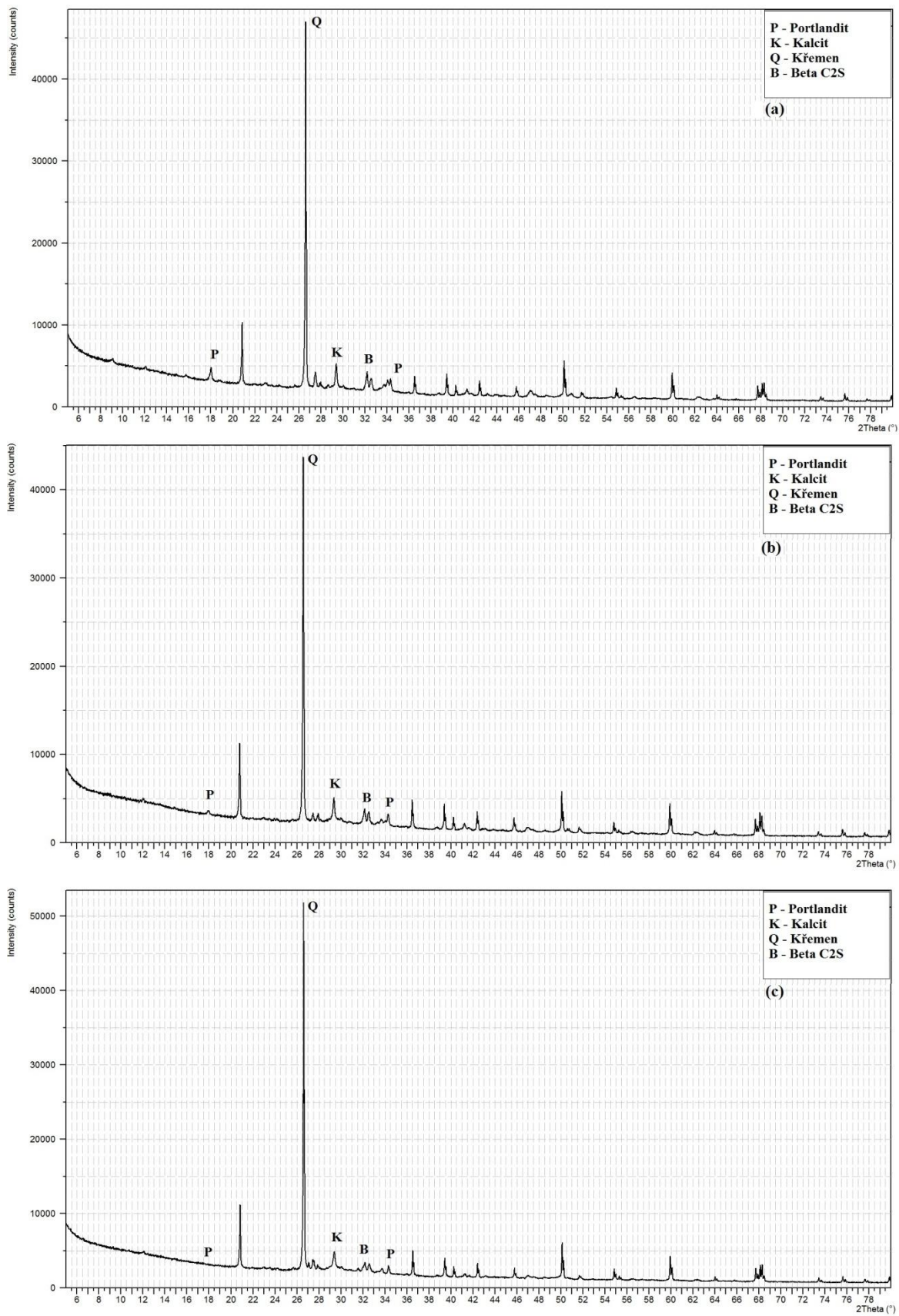


Obrázek 24: SEM snímek, zvětšeno 30000x, ošetřování : (a) 20°C (b) 90°C (c) 180°C / 1 MPa

13.2.3 XRD analýza RPC

Rentgenová difrakční analýza byla provedena na stejných vzorcích zkoumaných elektronovým mikroskopem.

Zde byla pozorována změna v množství přítomného portlanditu, který byl nejvíce zastoupen u vzorků při běžném ošetřování a nejméně u vzorku autoklávovaném. Přítomné nekystalické CSH gely se nepodařilo na výsledném diagramu odečíst. Bylo by potřeba měření provést při vhodnějším nastavení přístroje. U Autoklávovaného vzorku bylo také zaznamenáno nižší množství přítomných slínekových minerálů z nehydratovaného cementu, například β -C₂S. Výsledky jsou zachyceny na obrázku 27.



Obrázek 25: Výsledek XRD analýzy, ošetřování : (a) 20°C (b) 90°C (c) 180°C / 1 MPa

13.3 Diskuze výsledků měření vlastností RPC

Objemová hmotnost čerstvé směsi byla téměř totožná při různé dávce vláken. Objemová hmotnost ztvrdlého RPC byla také srovnatelná u všech vzorků a to jednak co se týče porovnání dávky vláken, tak v porovnání vlivu druhu ošetřování. Pro přesnější posouzení změny objemové hmotnosti vlivem působení vyšších teplot byly také změřeny hmotnosti vzorků před prohříváním a porovnány s hmotnostmi po prohřívání. Zde také nedocházelo k žádné změně. Objemové hmotnosti se pohybovaly kolem hodnoty $2400 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, což je výrazně nižší hmotnost oproti výpočtové hmotnosti ($\approx 2700 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$). Odůvodnění nižší objemové hmotnosti je komentováno v kapitole 11.2, zabývající se návrhem ideální dávky vody.

Výsledné pevnosti v tahu za ohybu u receptur s 3% dávkou vláken jsou velmi proměnlivé u různých druhů prostředí, ve kterém byly ošetřovány. Nelze tak jednoznačně určit přímý vliv způsobu ošetření na pevnosti v tahu za ohybu. Nižší pevnosti v tahu za ohybu byly změřeny u vzorků ošetřených při teplotě 90°C , kde byl změřen pokles oproti referenčnímu ošetření asi 20 %. Nejspíše by bylo vhodné provést měření v tahu za ohybu na trácích o větším rozměru, což by mohlo poskytnout více odpovídající hodnoty.

V případě receptur s dávkou vláken 6 % byly pevnosti srovnatelné při běžném ošetření a při teplotě ošetření 60°C . Vlivem ošetření při teplotě 90°C a 180°C došlo k překonání hranice pevnosti v tahu za ohybu 20 MPa a nárůstu oproti referenčním vzorkům o cca 20 %. Zde byl však opět velký rozptyl hodnot u jednotlivých vzorků měřených sad, proto by bylo vhodné vyzkoušet pevnosti na vzorcích větších rozměrů.

Každopádně lze na základě výsledků konstatovat, že u vyšší dávky rozptýlené výztuže v podobě ocelových mikrovláken může být dosaženo vyšších pevností v ohybu, na čemž se shodují i autoři citováni v teoretické části.

Pevnost v tlaku po 28 dnech se pohybovala u referenčního vzorku s 3% dávkou vláken kolem 150 MPa a s dávkou 6 % vláken kolem 160 MPa, což odpovídá nárůstu pevností cca 7 % zvýšením dávky vláken. U prohříváných vzorků za běžného tlaku byl zaznamenán pokles pevností od 10 až do 19 % oproti referenčnímu zrání 28 dnů při 20°C . Tímto způsobem urychlení hydratace nebylo dosaženo požadovaných pevností, bylo by tedy třeba upravit návrh tohoto druhu ošetření, jako například prodloužit dobu tepelného prohřívání nebo oddálit jeho aplikaci po vytvoření dostatečného množství portlanditu.

Nejvyšší pevnosti byly získány ošetřením v autoklávu. Zde byl nárůst pevností 9 % v případě vzorků FIB3, autoklávovaných 4 hod, a 20 % v případě autoklávování po dobu 8 hodin. Vyšší nárůst pevností v tlaku byl u receptur FIB6, kdy pevnosti vzrostly o 17 % po 4 hodinách v autoklávu a o téměř 26 % po 8 hodinách v autoklávu. Tento nárůst pevností by mohl být způsoben zvýšením efektivity vláken vlivem úpravy mikrostruktury. Pevnosti v tlaku, rostoucí spolu s dávkou mikrovýztuže, zaznamenali také citovaní autoři [35]. Výrazný nárůst pevností v tlaku (například z 80 MPa na 150 MPa [35]) vlivem autoklávování byl dosažen také některými autory zvýšení pevnosti v tahu za ohybu, navzdory popsané teorii snížení přídržnosti vláken k matrici vlivem tepelného ošetřování.

Z mikroskopické analýzy, provedené elektronovým rastrovacím mikroskopem, byly pozorovány 3 změny v pozorované mikrostrukturu, které by mohly vysvětlovat nárůst pevností u autoklávovaného vzorku, případně pokles pevností u vzorku prohřivaného při 90°C po dobu 8 hodin. V případě referenčního vzorku a vzorku prohřivaného v 90°C bylo pozorováno větší množství zrn křemičitého písku, které nebyly porušeny. Naopak u vzorku autoklávovaného došlo ve většině případu k jejich porušení. Tento fakt může být způsobem jednak vyššími pevnostmi cementového kamene a jednak možným spolupůsobením zrn písku s okolními hydráty, což v obou případech vedlo k vyšším pevnostem. U autoklávovaných vzorků byl také nalezen výskyt CSH gelů v jinak celistvé mikrostrukturu. V případě tepelně ošetřených vzorků bylo při zvětšení 30000x nalezeno určité množství mikrosiliky. U vzorku proteplovaném při 90°C bylo množství výraznější, oproti vzorku autoklávovaného. To může být způsobeno vlivem nedostatečné tvorby portlanditu, se kterým mikrosilika v podobně amorfního oxidu křemičitého reaguje. Například autor [21] uvádí vhodnou dobu aplikace tepelného ošetřování v době, kdy je k dispozici potřebné množství portlanditu 4 – 6 dnů.

Výsledky XRD analýzy potvrdili nižší množství portlanditu v proteplovaných vzorcích, které zrály kratší dobu než normově ošetřené. Nejméně CH fáze pak bylo v případě autoklávovaného vzorku, což může také vysvětlit nižší množství mikrosiliky nalezené v SEM snímcích.

14 Ověření vlastností navržených receptur LCRPC

Navržené receptury nízkocementového RPC jsou uvedeny v tabulce 15. Jejich vlastnosti byly srovnávány s recepturou RPC_FIB3, tedy vyvinutou recepturou RPC s dávkou vláken 3 %, jejichž kompletní popis je uveden v kapitole hodnotící směsi RPC.

Receptura	Cement	Mikrosilika	Popílek	Přísek SH34	Přísek SH32	Vlákna	Superplastifikátor	Voda	Teplota ošetření	Tlak ošetření	Doba ošetřování ¹
	[kg·m ⁻³]								[°C]	[MPa]	
RPC_REF7	997	255	-	845	338	73	2,9	275	20	0,1	7 d
RPC_REF28									20	0,1	28 d
LCRPC_20F_REF7									20	0,1	7 d
LCRPC_20F_REF28									20	0,1	28 d
LCRPC_20F_604									60	0,1	4 h
LCRPC_20F_608	787	255	210	845	338	73	2,9	275	60	0,1	8 h
LCRPC_20F_904									90	0,1	4 h
LCRPC_20F_908									90	0,1	8 h
LCRPC_20F_A4									180	1	4 h
LCRPC_20F_A8									180	1	8 h
LCRPC_40F_REF7									20	0,1	7 d
LCRPC_40F_REF28									20	0,1	28 d
LCRPC_40F_604									60	0,1	4 h
LCRPC_40F_608	598	255	399	845	338	73	2,9	275	60	0,1	8 h
LCRPC_40F_904									90	0,1	4 h
LCRPC_40F_908									90	0,1	8 h
LCRPC_40F_A4									180	1	4 h
LCRPC_40F_A8									180	1	8 h
LCRPC_60F_REF7									20	0,1	7 d
LCRPC_60F_REF28									20	0,1	28 d
LCRPC_60F_604									60	0,1	4 h
LCRPC_60F_608	399	255	598	845	338	73	2,9	275	60	0,1	8 h
LCRPC_60F_904									90	0,1	4 h
LCRPC_60F_908									90	0,1	8 h
LCRPC_60F_A4									180	1	4 h
LCRPC_60F_A8									180	1	8 h

Tabulka 15: Navržené receptury nízkocementového RPC

14.1 Výsledky měření vlastní LCRPC

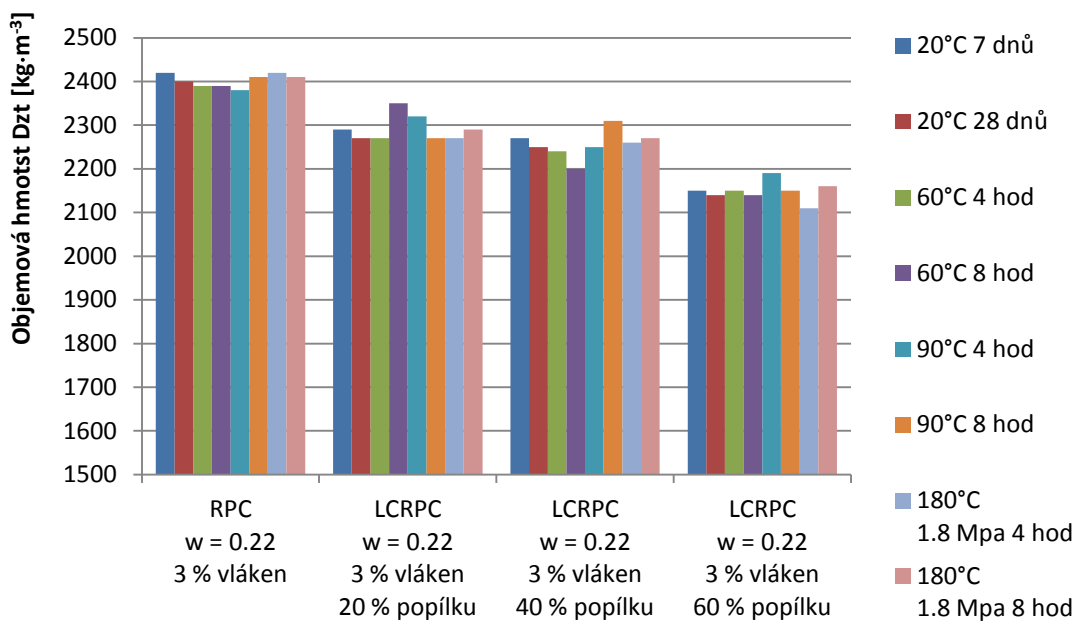
14.1.1 Objemové hmotnost a pevnosti LCRPC

V tabulce 16 jsou uvedeny výsledky objemových hmotností, pevností a rozliti směsí nízkocementového reaktivního práškového betonu.

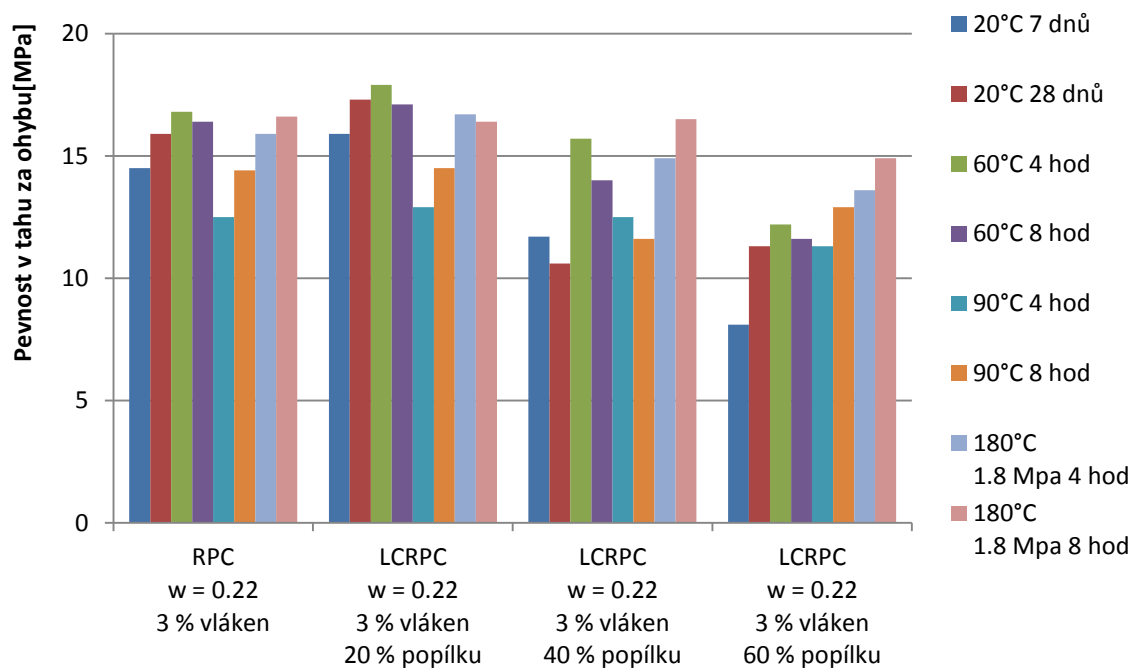
Receptura	Obj. hmotnost čerstvého betonu [kg·m ⁻³]	Obj. hmotnost ztvrdlého betonu [kg·m ⁻³]	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	Pevnost v tlaku [MPa]	Rozliti [mm]
LCRPC_20F_REF7	2350	2290	15,9	83,0	200
LCRPC_20F_REF28		2270	17,3	142,3	
LCRPC_20F_604		2270	17,9	105,7	
LCRPC_20F_608		2350	17,1	117,0	
LCRPC_20F_904		2320	12,9	117,7	
LCRPC_20F_908		2270	14,5	133,4	
LCRPC_20F_A4		2270	16,7	153,6	
LCRPC_20F_A8		2290	16,4	160,2	
LCRPC_40F_REF7	2230	2270	11,7	67,1	210
LCRPC_40F_REF28		2250	10,6	118,0	
LCRPC_40F_604		2240	15,7	91,5	
LCRPC_40F_608		2200	14,0	102,6	
LCRPC_40F_904		2250	12,5	105,6	
LCRPC_40F_908		2310	11,6	128,5	
LCRPC_40F_A4		2260	14,9	141,7	
LCRPC_40F_A8		2270	16,5	164,6	
LCRPC_60F_REF7	2180	2150	8,1	42,6	240
LCRPC_60F_REF28		2140	11,3	81,2	
LCRPC_60F_604		2150	12,2	66,3	
LCRPC_60F_608		2140	11,6	79,0	
LCRPC_60F_904		2190	11,3	92,6	
LCRPC_60F_908		2150	12,9	111,2	
LCRPC_60F_A4		2110	13,6	121,2	
LCRPC_60F_A8		2160	14,9	140,6	

Tabulka 16: Výsledné vlastnosti LCRPC

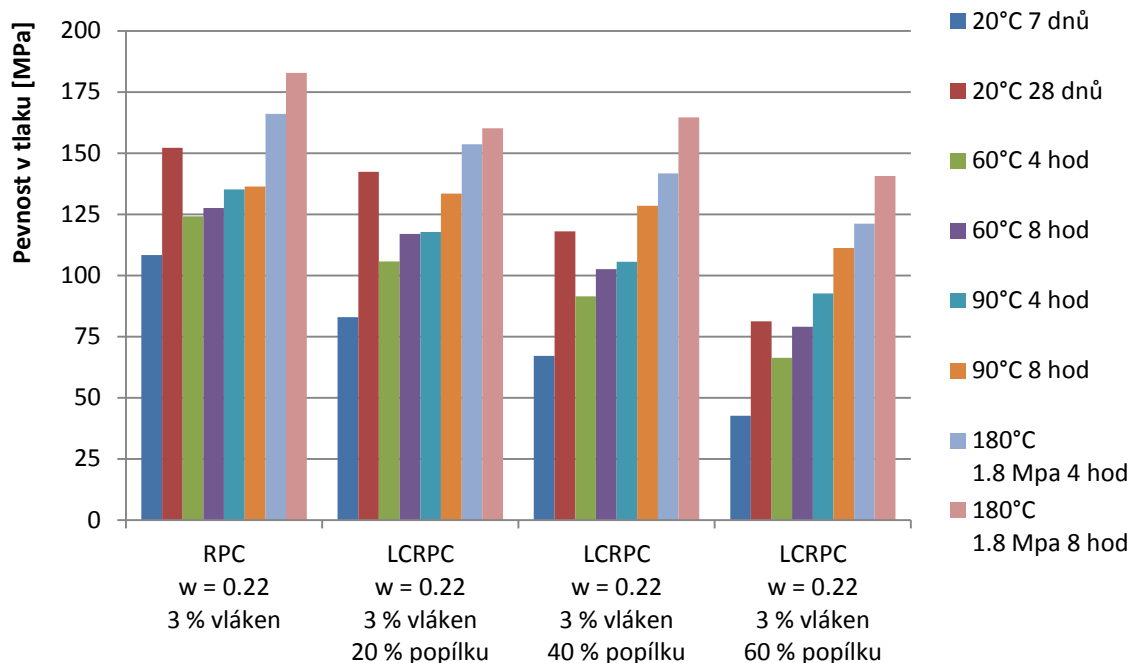
Pokles objemových hmotností vlivem náhrady cementu popílkem je znázorněn v grafu 17. V Grafu 18 a 19 jsou znázorněny výsledné pevnosti a v grafu 20 opět relativní pevnosti v procentech. Ty udávají procentuální pokles či nárůst pevností jednotlivých skupin vzorků (dle způsobu ošetření) vůči vzorkům ošetřeným normovým způsobem.



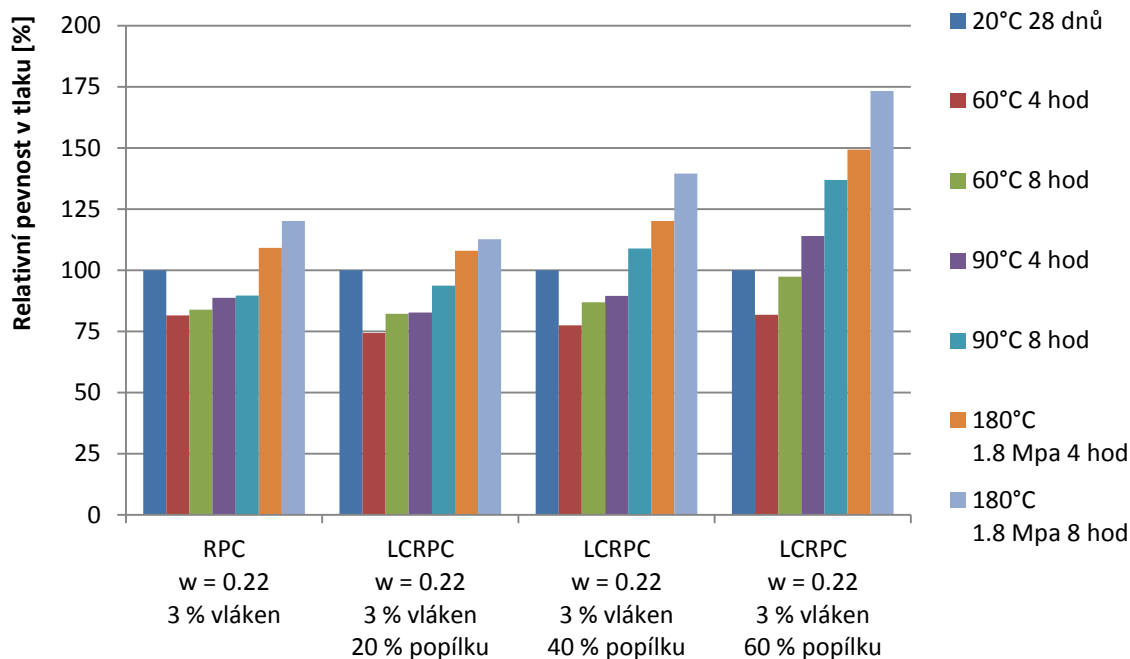
Graf 17: Objemové hmotnosti ztvrdlého LCRPC – vliv dávky popílku a druhu ošetření



Graf 18: Pevnosti v tahu za ohybu LCRPC – vliv dávky popílku a druhu ošetření



Graf 19: Pevnosti v tahu za ohybu LCRPC – vliv dávky popílku a druhu ošetření



Graf 20: Relativní pevnosti v tlaku LCRPC – vliv dávky popílku a druhu ošetření

14.2 Diskuze výsledků měření vlastností RPC

Použitím popílku jako náhrady cementu v receptuře reaktivního betonu byly pozorovány změny ve všech měřených vlastnostech.

Hodnota rozlité čerstvé směsi rostla spolu s dávkou popílku, konkrétně z původních 190 mm na 200 mm při 20% náhradě, 210 mm při 40% náhradě a 240 mm při 60% náhradě. Příčinou mohl být příznivý vliv sférických zrn použitého popílku, oproti tvarově nepravidelným zrnům cementu.

Objemová hmotnost čerstvého i ztvrdlého LCRPC klesala vlivem přidání popílku. Tento jev je způsobem nižší měrnou hmotností popílku oproti cementu. Teoreticky by objemová hmotnost mohla být částečně ovlivněna změnou křivky zrnitosti suchých složek a vytvořením tak mezerovitější mikrostruktury.

Stejně jako u pevností v tahu za ohybu reaktivních práškových betonů s plnou dávkou cementu, byly také u LCRPC naměřeny hodnoty, které neprokazují přímý vztah mezi ohybovou pevností a způsobem ošetření. Jak již bylo zmíněno, bylo by nejspíše vhodné experiment provést na větších trámcích. Celkově však byl pozorován mírný nárůst pevností v tahu za ohybu u receptury s dávkou popílku 20 % a nižší s dávkou 40 a 60 % oproti receptuře referenční.

V případě receptury s 20% náhradou cementu popílkem došlo k poklesu pevností v tlaku tepelným ošetřením v případě 60°C, ale také v případě 90°C. Pevnosti byly nižší až o 25 %, avšak v případě prohřívání při teplotě 90°C po dobu 8 hodin byl pokles pouze necelých 7 %. Vlivem ošetřování v autoklávu došlo k nárůstu pevností a to o 9 % po 4 hodinách a o 20 % při 8 hodinách ošetřování za definovaných teplot a tlaků. Při pohledu na graf 20, který znázorňuje právě tyto procentuální poklesy/nárůsty je zřejmé, že se tento trend opakuje podobně i u receptur se 40 a 60 % popílku. Nárůsty pevností jsou však stále vyšší s rostoucí dávkou popílku. Nejvyšší nárůst pevností je u receptury s dávkou popílku 40 %, jejichž vzorky byly ošetřeny v autoklávu po dobu 8 hodin, a to o 75 %, zatímco referenční vzorek měl nárůst pevností stejným ošetřením o 17 %. Vyšší nárůsty pevností v tlaku vlivem tepelných ošetření u receptur s přítomností popílku by mohly být vysvětleny vyvoláním pucolánové reakce, která se v případě popílkových betonů projevuje až v 90 denních pevnostech. Dalším vysvětlením může být změna v poměru CaO/SiO_2 , kdy mohlo docházet k tvorbě krystalů tobermoritu a dosažení tak vyšších pevností oproti referenčním vzorkům.

15 Závěr

Cílem práce bylo vyvinout receptury reaktivního práškového betonu, který se vyznačuje pevností v tlaku v rozmezí 200 – 300 MPa, a při návrhu postupovat pomocí metod, které vedou k co možná nejlepším vlastnostem ať už v čerstvém nebo ztvrdlém stavu.

Teoretická část se tedy zabývala požadavky na vstupní suroviny, které jsou u těchto směsí zvláště náročné. RPC obsahují velmi jemné práškové suroviny, které je třeba přivést do tekoucí konzistence a to při velmi malé dávce vody. To je možné pouze za použití moderních superplastifikačních přísad, ale také právě vhodnými vlastnostmi všech vstupních složek, jakou je například jejich granulometrie nebo chemické či mineralogické složení. Dále jsou uvedeny důležité poznatky, týkající se návrhu samotných receptur. Ten je prováděn od určení vhodných dávek jednotlivých suchých složek až po ověření ideální dávky vody, případně rozptýlené výztuže. Důraz je také kladen na výrobu, kdy je popsána problematika míchání a ošetřování. Míchání směsí RPC je oproti konvenčním betonům náročnější a vyžaduje speciální technologické postupy. Stejně tak je tomu u ošetřování RPC betonů, které může ovlivnit výsledné pevnosti a jiné vlastnosti až o několik desítek procent. Některé způsoby ošetřování jsou však v praxi nevyužitelné a tak je snahou tento materiál dále vyvíjet a získat tak mimořádné vlastnosti, které budou aplikovatelné v reálné praxi. V teoretické části jsou také prezentovány některé RPC premixy, které jsou pro betonáže dodávány v suchém homogenním stavu. Tyto směsi dosahují pevností v tlaku i přes 200 MPa, kterých lze dosáhnout za běžných podmínek. Tyto produkty jsou dnes běžně využívány pro výrobu subtilních architektonických prvků, ale také v inženýrských konstrukcích, jako jsou například již celosvětově realizované lávky pro pěší, případně mosty.

Praktická část byla řešena v několika etapách, které vedly ke konečnému určení vhodných dávek všech použitých vstupních surovin. Vstupní poměr suchých složek byl určen na základě jejich granulometrie a to s cílem získání co nejhutnější mikrostruktury, což bylo předmětem také při stanovení ideálního vodního součinitele. Experiment probíhal za použití čtyř různých dávek vody, ze kterých se však nepodařilo popsáním způsobem jednoznačně určit vhodný vodní součinitel, protože sledované parametry, konkrétně objemová hmotnost a týdenní pevnosti, se od sebe výrazně nelišily ve svých výsledcích. Byl proto zvolen vodní součinitel $w = 0,22$, který měl výhodné vlastnosti z hlediska své

konzistence a zpracovatelnosti. Směsi dosahovaly týdenních pevností v tlaku kolem 100 MPa. Při experimentu bylo také zjištěno, že výsledná objemová hmotnost dosahovala hodnoty cca $2400 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

Po zjištění vhodných dávek vstupních surovin, byl na směsích testován vliv množství vláken v dávkách 3 a 6 %. Dále byl také sledován vliv tepelného ošetřování při teplotě 60°C po dobu 4 a 8 hodin a při teplotě 90°C po dobu také 4 a 8 hodin. Za použití autoklávu byl také ověřen vliv zvýšené teploty 180°C a tlaku 1 MPa. V tomto experimentu bylo při porovnání takto ošetřených vzorků s referenčními vzorky, ošetřenými normově, zjištěno, že prohříváním ve vodě po dobu 4 a 8 hodin v 60 a 90°C (celková doba zrání byla 72 hodin) nebyly získány vyšší pevnosti. Oproti tomu vzorky ošetřené v autoklávu vykazovaly vyšší pevnosti a to v rozmezí 9 – 20 % v případě dávkování rozptýlené výztuže ve třech procentech. Vyšší nárůst pevností při ošetření v autoklávu vykazovaly vzorky s dávkou vláken 6 %, kdy byl výsledný nárůst vyšší o 17 – 27 %. Referenční vzorky měli pevnosti kolem 150 MPa (dávka vláken 3 %) a 160 MPa (dávka vláken 6 %). Nejvyšší pevnosti byly získány při délce autoklávování 8 hodin, konkrétně 182 MPa (dávka vláken 3 %) a 210 MPa (dávka vláken 6 %). Pevnosti v tahu za ohybu neprokázaly vliv druhu ošetření na jejich výsledné hodnoty, protože byly značně kolísavé. Prokazatelný byl však příznivý vliv zvýšení dávky vláken, protože nejvyšší pevnosti v tahu za ohybu byly kolem 16 MPa u receptur se 3 % vláken, kdežto v případě dávky 6 % čítaly 22 MPa. Mikroskopická analýza nastínila možné příčiny nárůstu pevností autoklávovaných vzorků, kdy byly zjištěny změny v mikrostruktuře v podobě porušení většiny zrn křemičitého písku nebo výskytu CSH gelů. Také prokázala, že čas, kdy byly vzorky proteplovány v 60 a 90°C , nebyl vhodný z důvodu nízkého obsahu CH fáze, a tudíž došlo výskytu nezreagovaných částic mikrosiliky. Tyto výsledky částečně potvrdila také XRD analýza, která prokázala změnu v množství portlanditu u jednotlivých vzorků.

V poslední části byla ověřena možnost náhrady cementu popílkem v rozmezí 20 - 60 %. Zde bylo zjištěno, že lze vytvořit nízkocementové RPC s relativně vysokými pevnostmi v tlaku, avšak až po jejich tepelném ošetření. Zde se opět projevil hlavně vliv autoklávování, protože u pouze proteplených vzorků nebyly dosaženy výrazně vyšší pevnosti, naopak při proteplení v 60°C byly pevnosti u všech dávek popílku nižší, oproti referenčním. Efektivní proteplení bylo pouze v případě teploty 90°C a době prohřívání 8 hodin. Zajímavým závěrem je, že při teplotě 180°C a tlaku 1 MPa rostl procentuální nárůst pevností spolu s klesajícím množstvím cementu, respektive rostoucí dávkou popílku. Zde

bylo dosaženo až o 75 % vyšších pevností v tlaku vlivem ošetření vzorku s 60% dávkou popílku v autoklávu a to z 81 MPa na 141 MPa. V případě použití autoklávu byla ideální dávka popílku 40 %, která vykazovala nejvyšší pevnosti v tlaku 165 MPa.

Závěrem lze říci, že výroba reaktivních práškových betonů vyžaduje složitější postupy při jejich návrhu, počínaje výběrem vstupních surovin, konče zvolením jejich ideálního dávkování. Navržené receptury v této práci by měly teoreticky vykazovat vyšší pevnosti, než kterých bylo dosaženo. Bylo by proto vhodné zaměřit se více na vliv jednotlivých surovin, otestováním například několika druhů křemičitého úletu, křemičitých mouček apod. Ke zvýšení pevností by také mohlo přispět použití složitějších modelů pro určení dávkování suchých složek a získání tak mimořádně hutné mikrostruktury. Z otestovaných metod ošetřování se zdálo efektivní pouze prostředí o teplotě 180°C a tlaku 1 MPa, tedy proces autoklávování. Zde by bylo možné také otestovat různé teploty, tlaky a doby ošetřování k získání vyšších pevností.

Tzv. RPC200, které disponuje pevnostmi v tlaku 200 – 300 MPa se podařilo vyrobit právě autoklávováním po dobu 8 hodin.

16 Seznam použitých zdrojů

- [1] SAKAI, AIZAWA, NAKAMURA a KATO. Influence of superplasticizers on the fluidity of cements with different amount of aluminate phase - *Ultra high performance concrete (UHPC): proceedings of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel, Germany, March 05-07, 2008*. Kassel: Kassel University Press, 2008. Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, Heft 10. ISBN 3899583760.
- [2] DILS, Jeroem, TAERWE, L., ed. Influence of Vacuum Mixing, Air Entrainment or Heat Curing on the Properties of Hardened and Fresh (Ultra) High Performance Mortar. Universiteit Gent, 2005.
- [3] CHANDRA, S. a J. BJÖRNSTRÖM. Influence of superplasticizer type and dosage on the slump loss of Portland cement mortars - Part II. *Cement and Concrete Research*. 2002, 10(32), 1613–1619.
- [4] CHEUNG, J., A. JEKNAVORIAN, L. ROBERTS a D. SILVA. Impact of admixtures on the hydration kinetics of Portland cement. *Cement and Concrete Research*. 2011, 12(41), 1289–1309.
- [5] HABBABA, A., Z. DAI a J. PLANK. Formation of organo-mineral phases at early addition of superplasticizers: The role of alkali sulfates and C3A content. *Cement and Concrete Research*. 2014, May 2014(42), 112–117.
- [6] KRNECOVÁ, V, S UNČÍK a K SALKOVA. NOVÝ SUPERPLASTIFIKÁTOR PRE VYSOKOHODNOTNÉ BETÓNY. *Beton TKS*. 2011, 10(6), 33-35.
- [7] MELICHAR, T a D PROCHÁZKA. STUDIUM VLIVU JEMNOZRNÝCH PŘÍMĚSÍ Z ALTERNATIVNÍCH ZDROJŮ NA FYZIKÁLNĚ-MECHANICKÉ PARAMETRY HSC. *Beton TKS*. 2011, 10(6), 65-73.
- [8] AÏTCIN, Pierre-Claude. *Vysokohodnotný beton*. 1. české vyd. Praha: ČKAIT, 2005, 320 s. Betonové stavitelství. ISBN 80-86769-39-9.
- [9] HELA, R. *Technologie betonu II*. Brno, 2007. Studijní opora. VUT FAST.
- [10] TKACZEWSKA, E. Effect of the superplasticizer type on the properties of the fly ash blended cement. *Construction and Building Materials*. 2014, 18(70), 388–393.
- [11] Justnes, H. *Alternatives to gypsum as set regulator for Portland cement clinker*, Proceedings of the 1st concrete innovation conference (CIC) 2014, Oslo, Norway, 1-11.
- [12] Lesage, Karel. (2014). *Interactions between cement and combined concrete admixtures: the influence of cement paste rheology*. KU Leuven. Faculty of Engineering Science ; Ghent University. Faculty of Engineering and Architecture, Leuven ; Ghent, Belgium.
- [13] WEN CHAN, Y. a S. HSIEN CHU. Effect of silica fume on steel fiber bond characteristics in reactive powder concrete. *Cement and Concrete Research*. 2004, 7(34), 1167–1172.

- [14] LEE, N.P. a D.H. CHISHOLM. *Reactive Powder Concrete: Study Report* [online]. 2005, -(146), 1-35 [cit. 2017-01-05]. Dostupné z: http://www.branz.co.nz/cms_show_download.php?id=58b96f3b1316d9c1a8c0aea4259a02d5f9497fa7
- [15] MEHTA, P a Paulo J MONTEIRO. *Concrete: microstructure, properties, and materials*. 3rd ed. /. New York: McGraw-Hill, c2006, xxi, 659 p. ISBN 071462899.
- [16] SNELLINGS, R., G. MERTENS a J. ELSSEN. *Supplementary Cementitious Materials*. DOI: 10.2138/rmg.2012.74.6. ISBN 10.2138/rmg.2012.74.6. Dostupné také z: <http://rimg.geoscienceworld.org/cgi/doi/10.2138/rmg.2012.74.6>
- [17] MOSTOFINEJAD, D., M.R. NIKOO a S.A. HOSSEINI. Determination of optimized mix design and curing conditions of reactive powder concrete (RPC). *Construction and Building Materials*. 2016, x(123), 754-767.
- [18] RICHARD, P., CHEYREZY, M. Composition of reactive powder concretes. *Cement and Concrete Research*. 1995, x(25), 1501-1511.
- [19] BEGLARIGALE, A., Ç. YALÇINKAYA a H. YAZICI. Autoclaved reactive powder concrete: the effects of steel micro-fibers and silica fume dosage on the mechanical properties. *Usak University Journal of Material Sciences*. 2014, 1(1), 7-14.
- [20] Rebentrost, M., Wight, G. *Experience and Applications of UHPC in Asia - Ultra high performance concrete (UHPC): proceedings of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel, Germany, March 05-07, 2008*. Kassel: Kassel University Press, 2008. Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, Heft 10. ISBN 3899583760. 19-30
- [21] TORREGROSA, E.C. *Dosage optimization and bolted connections for UHPFRC ties*. Valencie, Spain, 2013. UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
- [22] CHEYREZY, M. Composition of reactive powder concretes. *Cement and Concrete Research*. 1995, x(25), 1501-1511.
- [23] *Civil Engeneering* [online]. -: atacanute, - [cit. 2016-01-09]. Dostupné z: <http://www.atacanute.com/2015/12/transition-zone-in-concrete.html?m=1>
- [24] FENNIS, S. a J. WALRAVEN. *Using particle packing technology for sustainable concrete mixture design*. the Netherlands, 2012. Delft University of Technology.
- [25] ABBAS, A.N. EXPERIMENTAL STUDY ON REACTIVE POWDER AND NORMAL CONCRETE RECTANGULAR BEAMS UNDER DIFFERENT LOADING RATE. *International Journal of Engineering and Advance Technology Studies*. 2014, 2(2), 1-10.
- [26] Bc. Martin Ťažký *Aktivace vysokoteplotního popílku přidavkem popílku fluidního pro výrobu betonu*. Brno, 2016. 59 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rudolf Hela, CSc

- [27] JEONG, D. a H. LEE. The effect of Pozzolanic reaction under different curing temperatures in strength development of RPC. In: *International Conference on Sustainable Building Asia*. s. 1-6.
- [28] EWERT, BUDELMANN, KRAUß. Heat of hydration and hardening of UHPC - *Ultra high performance concrete (UHPC): proceedings of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel, Germany, March 05-07, 2008*. Kassel: Kassel University Press, 2008. Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, Heft 10. ISBN 3899583760.
- [29] SCHACHINGER, SCHUBERT, MAZANEC: Effect of Mixing and Placement methods on Fresh and Hardened UHPC. *International Symposium of UHPC*, Kassel, 13-15 September, 2004, s. 575-586
- [30] BLAIS, P. a M. COUTURE. Precast, Prestressed Pedestrian Bridge World's First Reactive Powder Concrete Structure: New Technology. In: *Precast/Prestressed Concrete Institute* [online]. Chicago, USA: PCI, - [cit. 2016-09-10]. Dostupné z: http://www.pci.org/uploadedFiles/Siteroot/Publications/PCI_Journal/1999/DOI_Articles/jl-99-september-october-5.pdf
- [31] REM, P. a N. IYER. Influence of curing regimes on compressive strength of ultra high performance concrete. *Sadhana*. Indian Academy of Sciences, 2013, **6**(38), 1421–1431.
- [32] Effect of Curing Temperature at an Early Age on the Long-Term Strength Development of UHPC. In: <Http://www.beton-team.de/> [online]. Germany, 2006 [cit. 2017-01-06]. Dostupné z: <http://www.beton-team.de/img-int/Effect%20of%20Curing%20Temperature%20at%20an%20Early%20Age%20on%20the%20Long-Term%20Strength%20Development%20of%20UHPC.pdf>
- [33] KOSÍKOVÁ, Jana. Laserová difrakce pro měření velikost částic. SUPMAT: Podpora zdělávání pracovníků center pokročilých stavebních materiálů [online]. [cit. 2065-09-24]. Dostupné z: www.supmat.cz
- [34] DUFKA, A. a J. NOVÁK. *Laboratorní a experimentální metody*. Brno VUT FAST, 2007. Studijní opora.
- [35] ČSN EN 1015-3: *Zkušební metody malt pro zdivo - Část 3: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím střešacího stolku)*. 1. Praha: ÚNMZ, 2000.
- [36] ČSN EN 196-1: *Metody zkoušení cementu - Část 1: Stanovení pevnosti*. 1. Praha: ÚNMZ, 2016.
- [37] YAZICI, Halit, Engin DENIZ a Bülent BARADAN. The effect of autoclave pressure, temperature and duration time on mechanical properties of reactive powder concrete. *Construction and Building Materials* [online]. 2013, **42**, 53-63 [cit. 2017-01-06]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.01.003. ISSN 09500618. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061813000299>

- [38] HELMI, Masdar, Matthew R. HALL, Lee A. STEVENS a Sean P. RIGBY. Effects of high-pressure/temperature curing on reactive powder concrete microstructure formation. *Construction and Building Materials* [online]. 2016, 105, 554-562 [cit. 2017-01-10]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.147. ISSN 09500618. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061815308187>
- [39] New Style Industrial Autoclave Machine. In: *WEIKU* [online]. GER: weiku, 2016 [cit.2016-09-10]. Dostupné z: http://www.weiku.com/products/9424384/New_style_Industrial_Autoclave_Machine.html

17 Seznam použitých zkratek a symbolů

RPC	reaktivní práškový beton / kompozit
LCRPC	nízkocementový práčkový beton / kompozit
UHPC	ultravysokohodnotné beton
HSC	vysokopevnostní beton
UHSC	ultravysokopevnostní beton
SCC	samozhutnitelný beton
PC	superplastifikační přísada na bázi polykarboxylátů
SP	superplastifikační přísada
MS	mikrosilika / křemičitý úlet
CSH	gel kalciumhydrosilikát
SiO ₂	oxid křemičitý
Al ₂ O ₃	oxid hlinitý
Fe ₂ O ₃	oxid železitý
CaO	oxid vápenatý
Ca(OH) ₂	hydroxid vápenatý (portlandit)
CH	hydroxid vápenatý (portlandit)
C ₃ A	slinkový minerál – trikalciumaluminát
SEM	elektronová rastrovací mikroskopice
XRD	rentgenová difrakční analýza
w	vodní součinitel
Exp.	Experiment
PE	Polyetylen

18 Seznam grafů

Graf 1: Křivky zrnitosti využívané při ideálním skládání částic při návrhu receptur ^[24]	17
Graf 2: Závislost poměrných objemových hmotností na dávce vody ^[22]	18
Graf 3: Závislost množství C ₃ A na viskozitě cementové pasty ^[3]	21
Graf 4: Vliv molárního poměru SO ₃ /C ₃ A na konzistenci UHPC ^[2]	22
Graf 5: Schematické znázornění požadavků na účinky SP.....	23
Graf 6: Vliv množství mikrosiliky na přídržnost vláken	26
Graf 7: Závislost rychlosti otáček, výkonu míchačky a podtlaku v míchačce na čase míchání směsi ^[29]	30
Graf 8: Vliv doby a tlaku autoklávování na pevnosti v tlaku (a) směs bez mikrosiliky (b) směs bez mikrosiliky s vlákny (c) směs s mikrosilikou a vlákny (d) směs s mikrosilikou bez vláken ^[37]	33
Graf 9: Granulometrie použitých materiálů.....	50
Graf 10: Porovnání teoretických reálných křivek zrnitosti s křivkami ideálními (a) RPC (b) LCRPL 20 % popílku (c) LCRPC 40 % popílku (d) LCRPC 60 % popílku	51
Graf 11: Poměrné objemové hmotnosti	53
Graf 12: Pevnost v tahu za ohybu a tlaku po 7 dnech.....	53
Graf 13: Objemové hmotnosti ztvrdlého RPC – vliv dávky vláken a druhu ošetření	57
Graf 14: Pevnosti v tahu za ohybu RPC – vliv dávky vláken a druhu ošetření.....	58
Graf 15: Pevnosti v tahu za ohybu RPC – vliv dávky vláken a druhu ošetření.....	58
Graf 16: Relativní pevnosti v tahu za ohybu RPC – vliv dávky vláken a druhu ošetření ...	59
Graf 17: Objemové hmotnosti ztvrdlého LCRPC – vliv dávky popílku a druhu ošetření...	67
Graf 18: Pevnosti v tahu za ohybu LCRPC – vliv dávky popílku a druhu ošetření	67
Graf 19: Pevnosti v tahu za ohybu LCRPC – vliv dávky popílku a druhu ošetření	68
Graf 20: Relativní pevnosti v tahu za ohybu LCRPC – vliv dávky popílku a druhu ošetření	68

19 Seznam tabulek

Tabulka 1: Chemické a mineralogické složení porovnávaných cementů ^[3]	21
Tabulka 2: Vliv pořadí dávkování složek na době míchání.....	28
Tabulka 3: Fyzikální a chemické vlastnosti použitého cementu	47
Tabulka 4: Fyzikální vlastnosti mikrosiliky Elkem 920D	47
Tabulka 5: Chemické složení mikrosiliky Elkem 920D	48
Tabulka 6: Vlastnosti křemičitých slévárenských písků.....	48
Tabulka 7: Chemické složení Popílku Dětmarovice.....	49
Tabulka 8: Vlastnosti superplastifikační přísady.....	49
Tabulka 9: Receptury pro stanovení ideálního vodního součinitele.....	52
Tabulka 10: Výsledné vlastnosti směsí pro stanovení ideálního vodního součinitele.....	53
Tabulka 11: Receptury pro určení vhodného způsobu hutnění	55
Tabulka 12: Výsledné vlastnosti směsí pro určení vhodného způsobu hutnění	55
Tabulka 13: Navržené receptury reaktivního práškového betonu	56
Tabulka 14: Výsledné vlastnosti RPC	57
Tabulka 15: Navržené receptury nízkocementového RPC	65
Tabulka 16: Výsledné vlastnosti LCRPC	66

20 Seznam obrázků

Obrázek 1: Schéma různých speciálních betonů a průběhu jejich vývoje ^[21]	12
Obrázek 2: Lávka pro pěší v Soulu ^[22]	13
Obrázek 3: Schematické znázornění tranzitní zóny u běžného betonu.....	14
Obrázek 4: Znázornění spotřeby vody v betonové směsi při vyplnění pórů a zajištění tekutosti ^[24]	16
Obrázek 5: SEM snímky (a) portlanditu (b) C-S-H gelu ^[15]	19
Obrázek 6: Tři druhy přítomnosti SP v okolí zrna cementu ^[12]	24
Obrázek 7: SEM snímek mikrosliky ^[16]	25
Obrázek 8: Schéma vakuové míchačky ^{[29][2]}	29
Obrázek 9: Propařování betonového prvku pod PE fólií ^[30]	31
Obrázek 10: Průmyslový autokláv ^[39]	32
Obrázek 11: Schematické znázornění I. etapy kroku 1 - 5	37
Obrázek 12: Schematické znázornění II. etapy kroku 1 – 2	38
Obrázek 13: Schematické znázornění III. etapy kroku 1 – 2.....	38
Obrázek 14 Autokláv ADMAS II.....	40
Obrázek 15: Schéma soustavy pro tepelné ošetřování vzorků	40
Obrázek 16: Schematické znázornění procesu míchání	42
Obrázek 17: a) směs krátce po zamíchání SP b) směs po cca 2 – 3 min od míchání všech vstupních surovin c) směs v plastickém stavu po 10 min míchání.....	43
Obrázek 18: Schematické znázornění způsobů ošetřování vzorků.....	44
Obrázek 19: a) proteplování vzorků ve vodě b) koš pro uložení vzorků do autoklávu.....	45
Obrázek 20: (a) vibrovatelná směs po střásání stolku (b) samozhutitelná směs	55
Obrázek 21: SEM snímek, zvětšeno 100x, ošetřování : (a) 20°C (b) 90°C (c) 180°C / 1 MPa.....	60
Obrázek 22: SEM snímek, zvětšeno 500x, ošetřování : (a) 20°C (b) 90°C (c) 180°C / 1 MPa.....	60
Obrázek 23: SEM snímek, zvětšeno 10000x, ošetřování : (a) 20°C (b) 90°C (c) 180°C / 1 MPa.....	60
Obrázek 24: SEM snímek, zvětšeno 30000x, ošetřování : (a) 20°C (b) 90°C (c) 180°C / 1 MPa.....	61
Obrázek 25: Výsledek XRD analýzy, ošetřování : (a) 20°C (b) 90°C (c) 180°C / 1 MPa..	62