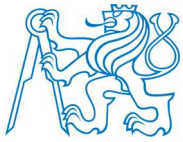
ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra mechaniky K132



Vliv mikromleté vápencové moučky na mechanické vlastnosti cementového kompozitu vyztuženého polymerními vlákny

Influence of Micronised Limestone on Mechanical Properties of Cement Composite Reinforced by Polymeric Fibers

Magisterská práce

Studijní program: Magisterský navazující Stavební inženýrství
Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb

Vedoucí práce: Ing. Pavel Tesárek, Ph.D.
Konzultant: Ing. Josef Fládr, Ph.D.

Bc. Lukáš Hlubocký

Praha 2017

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
Fakulta stavební
Thákurova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Hlubocký Jméno: Lukáš Osobní číslo: 410755

Zadávající katedra: Katedra mechaniky - K132

Studijní program: Stavební inženýrství - SI

Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb - C

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Vliv mikromletć vápencové moučky na mechanické vlastnosti cementového kompozitu vyztuženého polymerními vlákny

Název diplomové práce anglicky: Influence of Micronised Limestone on Mechanical Properties of Cement Composite Reinforced by Polymeric Fibers

Pokyny pro vypracování:
- řešerše současného stavu problematiky
- zjištění vlivu mikromleté vápencové moučky na mechanický vlastnosti cementových past
- návrh cementového kompozitu vyztuženého polymerními vlákny
- stanovení vybraných mechanických vlastností nedestruktivními metodami testování
- stanovení vybraných mechanických vlastností destruktivními metodami testování

Seznam doporučené literatury:
Vybrané články z databáze WoS, Scopus a Science Direct.

Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Pavel Tesárek, Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 10.10.2017 Termín odevzdání diplomové práce: 8.1.2017
Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

[redacted]
Podpis vedoucího práce

Po[redacted]

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce" a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací".

[redacted]

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

SPECIFIKACE ZADÁNÍ

Jméno diplomanta: Bc. Lukáš Hlubocký

Název diplomové práce: Vliv mikromleté vápencové moučky na mechanické vlastnosti cementového kompozitu vyztuženého polymerními vlákny

Základní část: Katedra mechaniky podíl: 80 %

Formulace úkolů: rešerše současného stavu problematiky
zjištění vlivu mikromleté vápencové moučky na mech. vlastnosti
návrh cementového kompozitu vyztuženého vlákny
nedestruktivní testování mechanických vlastností

Podpis vedoucího DP: [redacted] Datum: 10.10.2017

Případné další části diplomové práce (části a jejich podíl určí vedoucí DP):

2. Část: Katedra betonových a zděných konstrukcí podíl: 20 %

Konzultant (jméno, katedra): Ing. Josef Fládr, Ph.D.

Formulace úkolů: Destruktivní testování mechanických vlastností

Podpis konzultanta: [redacted] Datum: 10.10.2017

3. Část: podíl: %

Konzultant (jméno, katedra):

Formulace úkolů:

Podpis konzultanta: ..... Datum: .....

4. Část: podíl: %

Konzultant (jméno, katedra):

Formulace úkolů:

Podpis konzultanta: ..... Datum: .....

Poznámka: Zadání včetně vyplněných specifikací je nedílnou součástí diplomové práce a musí být přiloženo k odevzdané práci (vyplněné specifikace není nutné odevzdat na studijní oddělení spolu s 1.stranou zadání již ve 2.týdnu semestru)

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem zadanou diplomovou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 7. ledna 2018

.....

Bc. Lukáš Hlubocký

Poděkování

Děkuji vedoucímu mé diplomové práce Ing. Pavlu Tesárkovi, Ph.D. za věnovaný čas, podporu a trpělivost při konzultacích, cenné rady, připomínky při tvorbě mé práce a metodické vedení práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Zdeňku Proškovi za konzultace ohledně materiálového řešení navržených směsí a konzultace při přípravě vzorků. Zároveň i za zprostředkování vstupních surovin pro jejich výrobu. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat Bc. Jaromíru Hrůzovi za spolupráci při práci v laboratořích. Za provádění destruktivních zkoušek patří poděkování i Ing. Pavlu Reitermanovi, Ph.D. a Ing. Pavlu Padevětovi. Práce vznikla v rámci řešení projektů Centra pro nanotechnologie ve stavebnictví FSv ČVUT v Praze.

V Praze dne 7. ledna 2017

.....

Bc. Lukáš Hlubocký

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá využitím odpadního materiálu na bázi vápence ve formě mikromleté vápencové moučky. Zaměřena je na cementové kompozity vyztužené rozptýlenou výztuží ve formě vláken s využitím mikroplniva. Práce se v úvodu věnuje současnému stavu problematiky odpadních materiálů na bázi vápence, cementovým kompozitům vyztuženým vlákny a problematice cementových kompozitů vyztužených vlákny s použitím mikroplniva.

Hlavní část diplomové práce se zabývá návrhem cementového kompozitu vyztuženého PVA mikrovlákny za použití mikromleté vápencové moučky jako mikroplniva. Mikroplnivo je využíváno jako náhrada za cement. V této části jsou popsány jednotlivé vstupní materiály, způsob výroby vzorků a testování vybraných vlastností cementového kompozitu. Byla zkoumána zpracovatelnost čerstvé směsi, smrštění a objemová hmotnost kompozitu, dále pevnosti v tlaku a tahu za ohybu při stáří vzorků 28 dní. Pomocí nedestruktivních metod byl sledován průběh dynamického modulu pružnosti v závislosti na stáří vzorků.

Klíčová slova

Vápencová moučka, odpadní materiály, cementový kompozit, mikrovlákna, PVA vlákna, resonanční metoda, mechanické vlastnosti, smrštění

Abstract

The thesis deals with the use of waste materials based on limestone in the form of micronized limestone powder. It is focused on cement composites reinforced with dispersed reinforcement in the form of fibers and using microfillers. The paper deals with the current state of the issue of waste materials based on limestone, fiber reinforced cement composite and fiber reinforced cement composites using microfillers.

The main part of this thesis deals with a draft PVA microfibers reinforced cement composites using micronized limestone powder as a microfiller. Microfiller is used as a substitute for cement. This section describes the individual input materials, The method of manufacturing of samples and the testing of selected properties of cement composite. The workability of the fresh mixtures, the shrinkage and density of the composite, compressive strength and flexural strength were investigated on samples up to 28 days of age. Dynamic modulus of elasticity was monitored according to the age of the samples by using non-destructive methods.

Keywords

Limestone powder, Waste materials, Cement composite, Micro-fibers, PVA fibers, Resonance method, Mechanical properties, Shrinkage

Obsah

1 ÚVOD 8

2 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY 9

2.1 CHARAKTERISTIKY A VLASTNOSTI ODPADNÍHO MATERIÁLU 10
2.2 MOŽNOSTI VYUŽITÍ MIKROMLETÉHO VÁPENCE A MRAMORU JAKO MIKROPLNIVA V CEMENTOVÉM KOMPOZITU 15
2.3 CEMENTOVÉ KOMPOZITY VYZTUŽENÉ ROZPTÝLENOU VÝZTUŽÍ (VLÁKNY) 25
2.4 CEMENTOVÉ KOMPOZITY VYZTUŽENÉ ROZPTÝLENOU VÝZTUŽÍ (VLÁKNY) S POUŽITÍM MIKROPLNIVA 31

3 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE 40

4 PRAKTICKÁ ČÁST 41

4.1 POUŽITÉ MATERIÁLY A NÁVRH SLOŽENÍ SMĚSÍ 41
4.1.1 Zpracovatelnost směsi (zkouška rozlitím) 54
4.1.2 Smrštění vzorků 56
4.2 DYNAMICKÝ MODUL PRUŽNOSTI 57
4.2.1 Metodika měření – rezonanční metoda 57
4.2.2 Výsledky a diskuze – rezonanční metoda 61
4.2.3 Metodika měření – ultrazvuková impulsní metoda 64
4.2.4 Výsledky a diskuze – ultrazvuková impulsní metoda 66
4.3 PEVNOST V TLAKU 67
4.3.1 Metodika měření 67
4.3.2 Výsledky a diskuze 68
4.4 PEVNOST V TAHU ZA OHYBU 69
4.4.1 Metodika měření 69
4.4.2 Výsledky a diskuze 72
4.5 SHRNUTÍ VÝSLEDKŮ A DISKUZE 76

5 ZÁVĚR 78

6 SEZNAM ZDROJŮ 80

7 SEZNAM OBRÁZKŮ 85

8 SEZNAM TABULEK 88

1 Úvod

Diplomová práce se zabývá využitím odpadního materiálu na bázi vápence, který vzniká při těžbě a následném zpracování vápence. Navazuji v ní na svou bakalářskou práci, kde jsem řešil cementový kompozit s využitím tohoto odpadního materiálu jako plniva a mikroplniva. V diplomové práci jsem se zaměřil na cementový kompozit vyztužený rozptýlenou výztuží ve formě polymerních vláken a s mikroplnivem z odpadního materiálu na bázi vápence. Celosvětově je řešena problematika skládek odpadního materiálu, který vzniká při těžbě a zpracování různých druhů kamene. Vzniklý odpadní materiál je skládkován v blízkosti průmyslových závodů, které ho produkují. Tím tyto skládky zatěžují životní prostředí. Produkce těchto odpadních materiálů převyšuje jejich další současné využití. Jedná se tedy o odpadní materiál s téměř nulovou hodnotou (cenou).

Využití těchto odpadních materiálů ve stavebnictví by mohlo snížit množství skládkovaného odpadního materiálu. Zmenšilo by se tím zatížení životního prostředí a zároveň snížení ceny, tedy menší ekonomická náročnost na výrobu konstrukčních materiálů. V první části práce se zabývám současným stavem problematiky. Nejprve v jaké formě a v jaké kvalitě je tento odpadní materiál produkován, jakého je odpadní materiál složení a v jakých formách lze využívat (kapitola 2.1). V práci jsem se zaměřil na využití odpadního materiálu na bázi vápence v podobě mikroplniva. Postupně v rešerši uvádím odborné publikace, které se zabývají nejprve možností využití odpadního materiálu na bázi vápence jako mikroplniva pro cementové kompozity (kapitola 2.2). V další části (kapitola 2.3) se věnuji odborným publikacím, které se zaměřují na cementové kompozity vyztužené rozptýlenou výztuží ve formě vláken bez použití mikroplniv. V poslední části rešerše (kapitola 2.4) jsem se zaměřil na odborné publikace řešící téma cementových kompozitů vyztužených rozptýlenou výztuží ve formě vláken s použitím mikroplniva, tedy spojením dvou předcházejících témat rešerše.

Stěžejní částí práce je praktická část (kapitola 4), ve které je řešen návrh složení směsí cementového kompozitu vyztuženého rozptýlenou výztuží z PVA vláken a s mikroplnivem z mikromleté vápencové moučky. Řešeny jsou směsi se třemi obsahy PVA vláken a různými obsahy mikromleté moučky. Sledován je vliv mikromleté moučky a PVA vláken na vybrané mechanické a fyzikální vlastnosti navržených směsí. Sledovány byly vlastnosti čerstvých i vytvrzených směsí, pomocí nedestruktivních a destruktivních metod testování. Jednotlivé metodiky jsou vždy popsány před vyhodnocením z nich získaných vlastností. V závěru práce (kapitola 5) jsou shrnuty získané poznatky a výsledky z provedených měření.

2 Současný stav problematiky

Při těžbě, zpracování a úpravě přírodního kamene a kameniva vzniká celosvětově velké množství odpadního materiálu. Z některých přírodních kamenů a kameniv se odpadní materiál využívá v jiných průmyslových odvětvích. Zpracovávat odpadní materiály můžeme ve stavebnictví druhotně ve formě, ve které jsou přímo produkované nebo po dalších úpravách. Pro lepší využití a kvalitu odpadního materiálu je dnes většinou nutností využití dalších úprav (recyklace). Například separace škodlivých látek, rozdělení na frakce, mletí na požadované frakce a další možné úpravy.

Podrobněji jsem se využitím samotného odpadního materiálu věnoval ve své bakalářské práci. Diplomová práce řeší využití odpadního materiálu z těžby vápence. Námi použitý odpadní materiál prošel druhotnou úpravou (recyklací) v podobě mikromletí ve vysokorychlostním mlýnu. Bude sledován vliv odpadního materiálu na vlastnosti cementového kompozitu, který je vyztužený PVA vlákny a nevyztuženého cementového kompozitu.

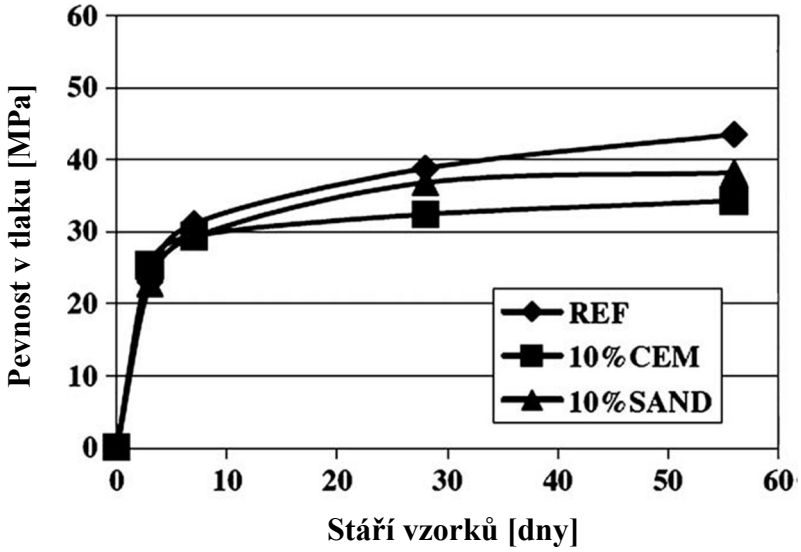
Cementové kompozity s rozptýlenou výztuží jsou v současné době velice rozšířené. Jako rozptýlenou výztuž můžeme použít různá vlákna nebo drátky. V této práci se zaměřuji na použití nekovové rozptýlené výztuže v podobě mikrovláken. Konkrétně se jedná o PVA vlákna. O použití rozptýlené výztuže v cementovém kompozitu nebo v betonu bylo publikováno mnoho vědeckých článků. Některé publikace řeší pouze vliv samotného odpadního materiálu. Jiné publikace se zabývají cementovými kompozity vyztuženými různými druhy vláken. Někteří autoři řeší vlastnosti cementových kompozitů s obsahem odpadního materiálu a zároveň vyztužených vlákny. Tyto články řeší návrhy směsí, mikrostrukturu, soudržnost vláken s matricí a další vlastnosti jako například mechanické vlastnosti. Postupně jsem se zaměřil přímo na články řešící použití mikromletého mramoru nebo vápence jako mikroplniva, články zkoumající cementové kompozity vyztužené různými typy vláken, články řešící použití PVA mikrovláken a dále články s kombinací použití mikroplniva jako náhrady za cement a vyztužení vlákny či mikrovlákny.

2.1 Charakteristiky a vlastnosti odpadního materiálu

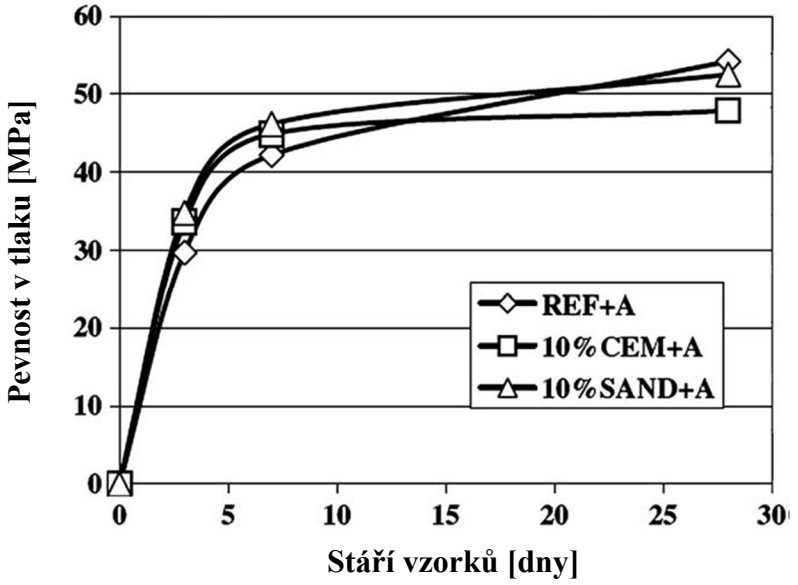
V první kapitole se věnuji publikacím, které se zabývají charakterizací, vlastnostmi, chemickým a fyzikálním složením odpadního materiálu na bázi vápence. Každý z materiálů má lehce odlišné vlastnosti, jelikož odpadní materiál je získáván z jiné lokality. V rozebraných publikacích jsou uvedeny i různá použití, na které se autoři zaměřují.

Corinaldesi a kol (2009) ve své publikaci uvádí, že likvidace mramorového prášku z mramorového průmyslu je dnes jedním z celosvětových problémů životního prostředí. Jedná se o velmi jemný prášek. V publikaci je mramorový prášek charakterizován z fyzikálního a chemického hlediska. Autoři provedli reologickou studii na různých cementových pastách z cementu, mramorového prášku, písku, a i se superplastifikační příměsí. Jako cíl měli zejména zkoumat vliv mramorového prášku na vlastnosti past a předvídat vliv při použití na samozhutnitelné betonové směsi. Tyto vlivy zkoumalo i mnoho dalších autorů jako například Topcu a kol (2009) a Alyamac a Ince (2009). Oba tito autoři se zabývali vlivem na samozhutnitelné betony. V této publikaci k výrobě vzorků autoři použili cement CEM II/A-L 42,5R s jemností 410 m^2/kg a relativní hustotou (měrnou hmotností) 3,05. Dále používali přírodní písek o maximální velikosti zrna 5 mm s podsítným zbytkem 0,9 % na sítu 75 μm. Písek byl použit s relativní hustotou 2,62 a s vodní absorpcí 3 %. Do některých směsí byla přidána superplastifikační přísada na bázi akrylu. Autoři použili mramorový prášek, jehož relativní hustota byla 2,55 a jemnost 1500 m^2/kg. Použitý mramorový prášek byl jemnější než cement, což by mohlo znamenat, že jeho použití by mělo zajistit větší soudržnost směsí. Pro lepší fyzikální charakterizaci použili laserovou difrakci. Dle výsledků z difrakce lze pozorovat, že 50 % částic má průměr menší než 7 μm a 90 % částic má průměr menší než 50 μm. Mramorový kal autoři sušili po dobu 72 h a přibližně po 24 hodinách sušení se kal ustálil na konstantní hmotnosti. Pomocí tepelné analýzy a rentgenové difrakce bylo zjištěno, že použitý materiál obsahuje 66 % $CaCO_3$. Rentgenovou difrakční analýzou byla prokázána přítomnost křemene v obsahu přibližně 3 % a ankeritu o obsahu přibližně 2 %. Zbylá část mramorového prášku tvoří amorfní oxid křemičitý nebo křemičitany z jiných přírodních kamenů, než je mramor. Všechny směsi autoři připravili se stejným poměrem písku k cementu 3:1. Mramorový prášek přidávali ve formě kaše, nikoli ve formě suchého prášku. Zpracovatelnost čerstvých směsí byla zjišťována pomocí střásacího stolku (zkouškou rozlitím) podle normového postupu uvedeného v italské normě UNI 7044-72. Obsah vody byl volen tak, aby byla zachována stejná zpracovatelnost čerstvých směsí. Mramorový prášek byl přidáván jako náhrada 10 hm. % cementu nebo písku, s nebo bez přísady superplastifikátoru v dávce 0,5 hm. % cementu. Testy

probíhaly na vzorcích o velikosti 40 × 40 × 160 mm. Vzorky byly po ukončení výroby umístěny ve vodě při teplotě 20 °C až do doby testování. Směsi bez chemických přísad byly zkoumány tlakovými zkouškami při stáří vzorků 3, 7, 28 a 56 dní. Výsledky je možné vidět na následujícím grafu (Obrázek 1). Z výsledků je patrné, že při náhradě za 10 % cementu nebo písku poklesla pevnost v tlaku o 10 až 20 %. Při náhradě za cement klesla pevnost v tlaku o 20 %, avšak při náhradě za písek klesla pevnost pouze o 10 %. Jedná se o konečné pevnosti v pozdějším stáří vzorků. Úlohu plniva mramorový prášek vykazoval v počátečním stáří vzorků, kde je důležitý. Zároveň nehrál žádnou roli v hydratačním procesu.



Obrázek 1 – Pevnost v tlaku v závislosti na stáří vzorků bez použití superplastifikátoru (REF – Referenční směs, 10 % CEM – 10 % náhrada za cement, 10 % SAND – 10 % náhrady za písek) (Corinaldesi a kol., 2010).



Obrázek 2 – Pevnost v tlaku v závislosti na stáří vzorků s použitím superplastifikátoru (REF – Referenční směs, 10 % CEM – 10 % náhrada za cement, 10 % SAND – 10 % náhrady za písek) (Corinaldesi a kol., 2010).

V případě použití superplastifikační přísady byla ztráta pevnosti menší v obou způsobech náhrady. Ztráta pevnosti v tlaku byla do 10 %. Výsledky se superplastifikační přísadou jsou zobrazeny na následujícím grafu (Obrázek 2). Autoři v publikaci dále uvádějí, že použití mramorového prášku není doprovázeno zřejmou tendencí ke ztrátě energie při betonáži, jako je obvyklé u jiných ultra jemných minerálních přísad, například při použití oxidu křemičitého. Přesto mramorový prášek jako mikroplnivo zajišťuje vysokou soudržnost betonové směsi (Corinaldesi a kol., 2010).

V další publikaci autorů Moon a kol (2017) byly zkoumány účinky jemnosti vápencového prášku a náhrady cementu vápencovým práškem na hydratační a pevnostní vlastnosti. Vlastnosti byly zkoumány pomocí rentgenové difrakce a izotermické kalorimetrie. Dále byla zkoumána pevnost v tlaku a vnikání rtuti porozimetrickými technikami. Autoři uvádí, že přidávání vápencového prášku zrychluje hydrataci cementu tím, že poskytuje místa pro tvorbu hydratačních produktů a tím jemnost prášku z cementu a vápence silně ovlivňuje hydratační reakci a vývoj pevnosti. Pro výrobu směsi použili portlandský cement CEM I. Mineralogické složení cementu bylo 53,9 hm. % C_3S, 19,8 hm. % C_2S, 5,9 hm. % C_3A a 10,3 hm. % C_4AF. Měrný povrch použitého cementu byl 345 m^2/kg a hustota byla 3142 kg/m^3. Použitý vápencový prášek obsahoval 96,9 hm. % $CaCO_3$ a jeho hustota byla 2810 kg/m^3. Obě složky (cement i vápencový prášek) byly mlety v kulovém mlýnu. Po mletí byl měrný povrch cementu 444 m^2/kg a měrný povrch vápencového prášku byl 5980 m^2/kg. Pro výrobu směsí autoři také použili jemné a hrubé kamenivo. Hrubé kamenivo o hustotě 2600 kg/m^3 a jemné kamenivo o hustotě 2700 kg/m^3. Hrubé kamenivo bylo o maximální velikosti zrn 25 mm. Autoři zkoumali směsi při přidání 15 hm. %, 25 hm. % a 35 hm. % vápencového prášku. Vyrobené směsi měly obsah cementu 360 kg/m^3, poměr jemného k hrubému kamenivu byl 1,27 a vodní součinitel V/C byl 0,47. Vzorky pro zkoušky pevnosti v tlaku měly průměr 100 mm a výšku 200 mm. Po 24 hodinách byly vzorky odformovány a poté uloženy ve vodě při 20 ± 1 °C. Zkoušky pevnosti v tlaku byly prováděny dle normy ISO 1920-4 při stáří vzorků 3, 7 a 28 dnů. Autoři zjistili, že jimi použitý vápencový prášek hraje roli v hydrataci cementu jako neinertní materiál a ovlivňuje tedy vlastnosti betonu. Ze závěrů publikace je zřejmé, že vápencový prášek zrychluje hydrataci cementu tím, že poskytuje velké množství reagujících míst a čím větší množství jemných částic, tím více je ovlivněna hydratace. Se zvyšujícím množstvím vápencového prášku se doba tuhnutí zkracuje v důsledku zvýšené hydratace C_3S a C_3A v počátečních hydratačních stupních. Použití jemnějšího cementu a vápencového prášku, čímž vznikaly nové hydratační produkty (např: monokarboaluminát), zapříčinilo nižší porozitu a vyšší pevnost v tlaku při použití 15 hm. % vápencového prášku. Povrch cementu a vápencového prášku výrazně

ovlivnil mikrostrukturu cementové matrice. Větší jemnost podpořila zhuštění struktury pórů a tím se i zvýšila pevnost v tlaku. Přidáváním vápencového prášku se autorům zvyšoval požadavek na množství vody a tím se zvyšovala porozita. Zároveň přidání vápencového prášku zapříčinilo snížení pevnosti v tlaku (Moon a kol., 2017).

V další publikaci autoři zkoumali vliv vápencového prášku v cementových pastách při vytvrzování za pomoci CO_2. Touto problematikou se ve své práci nebudu zabývat, ale autoři se také věnovali charakteristikám vápencového prášku jako například chemickému složení či zrnitosti prášku. Autoři v článku vyráběli cementové pasty z portlandského cementu CEM I 42,5 s měrným povrchem 3460 m^2/kg. Chemická analýza cementu a jeho fyzikální vlastnosti jsou znázorněny v následující tabulce (Tabulka 1).

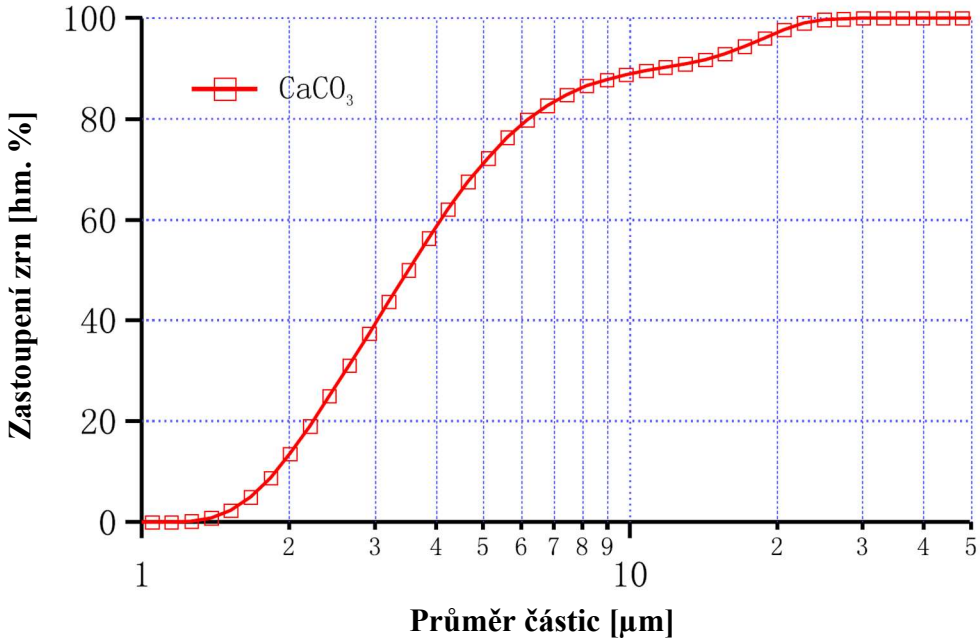
Tabulka 1 – Chemické a fyzikální vlastnosti portlandského cementu (Tu a kol 2016).

Chemická analýza [%]									
SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2Oeq	Cl^-	Na_2O	K_2O
21,62	4,67	3,17	62,6	1,97	2,61	0,57	0,006	0,18	0,60
C_3S	C_2S	C_4AF	C_3A	$CaCO_3$	Sádra	Volné CaO			
47,1	26,5	9,6	7,0	-	-	-			
Fyzikální vlastnosti									
Jemnost	Množství vody [%]		Stabilita	Doba tuhnutí [min]		Pevnost v tlaku [MPa]			
[m^2/kg]	Pro normální konzistenci		[mm]	Počátek	Konec	3 dny		28 dnů	
3460	25,8		0,5	164	220	34,0		50,2	

Tabulka 2 – Chemické a fyzikální vlastnosti vápencového prášku (Tu a kol 2016).

Vápencový prášek									
Průměrná velikost částic					5,7 μm				
Střední velikost					3,8 μm				
Specifická objemová hmotnost					2,71				
Chemická analýza [%]									
$CaCO_3$	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3	TiO_2
97,1	0,63	0,22	0,11	-	-	0,03	-	-	-

Práškový vápenec používali autoři jako náhradu za cement v různých dávkách. Vápencový prášek byl použit jako náhrada za cement v množství 0 hm. %, 5 hm. %, 10 hm. % a 20 hm. %. Chemické a fyzikální vlastnosti vápencového prášku použitého autory znázorňuje Tabulka 2 a na následujícím obrázku je znázorněna křivka zrnitosti vápencového prášku (Obrázek 3).



Obrázek 3 – Rozdělení velikosti částic vápencového prášku (Tu a kol 2016).

Cement a vápencový prášek byl vždy společně promíchán v suchém stavu. Vodní součinitel V/C byl zvolen 0,18. Takto malý vodní součinitel byl volen, jelikož jako vhodný vodní součinitel pro vytvrzování pomocí CO_2 je v rozmezí 0,05 - 0,18 pro rané vytvrzování. Odformování a vytvrzování pomocí CO_2 bylo zahájeno a prováděno maximálně do 3 hodin po odlití. Při vytvrzování nízkým tlakem CO_2 bylo dosaženo vyšší pevnosti v tlaku u vzorků s 5 hm. % vápencového prášku než u referenčních vzorků bez použití vápencového prášku. U vzorků, v nichž bylo použito více jak 5 hm. % vápencového prášku oproti referenčním vzorkům, pevnosti v tlaku klesaly. Dále autoři zjistili, že vzorky s použitím vápencového prášku vykazovaly snížení C_3S a C_2S, ale zároveň zaznamenaly zvýšení množství kalcitu (Tu a kol 2016).

Charakterizací, chemickými a fyzikálními vlastnostmi se ve svých publikacích zabývá mnoho dalších autorů, jako například Torkaman a kol. (2014) nebo Mashaly a kol. (2012). Publikace autorů Mashaly a kol. (2012) byla již rozebrána v mé bakalářské práci. Zaměřovala se přímo na mramorový prášek získaný z těžebního průmyslu v Egyptě.

2.2 Možnosti využití mikromletého vápence a mramoru jako mikroplniva v cementovém kompozitu

Mnoho publikací se zabývá otázkou, jak využívat odpadní materiál na bázi vápence a mramoru. Jedná se o odpadní materiál, který je skladován ve velkém množství u průmyslových závodů na těžbu a úpravu kamene (vápence, mramoru). Odpadní materiál můžeme využít ve formě, ve které ho průmysl přímo produkuje nebo po další úpravě recyklací. Autoři v publikacích využívají jak surovou formu, tak formu po nějakém způsobu recyklace. Běžně se odpadní materiál pro další využití alespoň třídí na konkrétní frakce zrnitosti. Jedno z využití, kterým se zabývají autoři článků, je využití odpadu jako mikroplniva do cementových kompozitů nebo přímo do betonových směsí. V současné době je tento odpadní materiál využíván pouze v malém množství. Jeho nynější využití je nedostačující, jelikož se zpracuje méně odpadního materiálu, než průmyslové závody vyprodukují. Nedostatečným využitím je zapříčiněn každoroční nárůst skladovaného množství odpadního materiálu.

Publikace zabývající se využitím vápencového prášku jako mikroplniva jsou zaznamenány a shrnuty v této podkapitole. Mikhailova a kol. (2013) se ve své práci zabývali vlivem jemně mletého dolomitického vápence na fyzikální a mechanické vlastnosti betonu. Pro přípravu směsí použili portlandský cement a písek v poměru 1:3. Písek měl maximální velikost zrn 2,5 mm. Jako mikroplnivo z dolomitického vápence autoři použili dva druhy jemného vápencového prášku o střední velikosti částic 4 μm a 2,79 μm s měrným povrchem 5500 m^2/kg a 7523 m^2/kg. Vodní součinitel autoři volili jednotný v hodnotě V/C = 0,5. Směsi autoři připravovali s použitím jemného prášku z dolomitického vápence v obsahu od 0 hm. % do 30 hm. %. Autoři vyráběli vzorky o velikosti 40 × 40 × 160 mm. K odformování vzorků došlo po 24 ± 2 hodinách a byly uloženy do vody. Vzorky nechali uložené ve vodní lázni až do doby testování. Testování probíhalo při stáří vzorků 7, 14 a 28 dnů. Podle rentgenového testu vzorek obsahoval karbonát, dolomit a oxid křemičitý. Křemík byl zastoupen krystalovou fází. Dolomitický vápencový prášek je tedy inertní mikroplnivo v cementu. Chemické složení dolomitického vápencového prášku je uvedeno v následující tabulce (Tabulka 3).

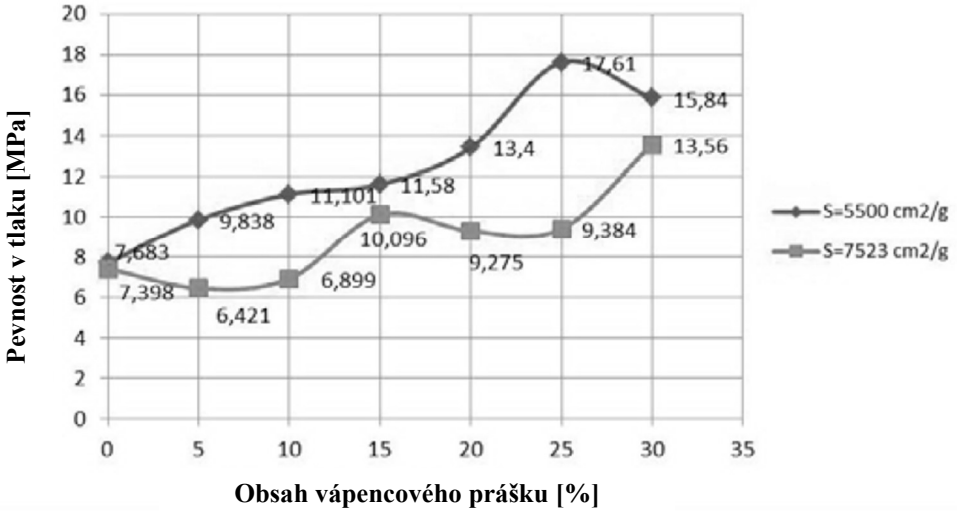
Tabulka 3 – Chemické složení dolomitického vápence (Mikhailova a kol, 2013).

Obsah chemických prvků [%]							**Ztráta zahříváním [%]**
SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	CaO	MgO	SO_3	
21,70	2,40	0,65	0,14	23,16	15,60	0,09	35,70

Autoři na vzorcích zkoumali pevnosti v tlaku, které jsou při stáří vzorků 14 a 28 dnů zaznamenány na následujícím grafu (Obrázek 4). Z grafu je patrné, že částečná náhrada cementu práškem z dolomitického vápence vede ke zvýšení pevnosti v tlaku. Nejprve při přidání 5 hm. % a 10 hm. % prášku pevnost v tlaku klesá a následně při přidávání do 25 hm. % pevnost v tlaku roste. U přidání 30 hm. % již dochází opět k poklesu pevnosti v tlaku. Při 25 hm. % obsahu dolomitického vápence vzrostla pevnost v tlaku o 16,7 % při stáří 14 dnů a o 23,5 % při stáří vzorků 28 dnů.

Obrázek 4 – Vliv vápencového prášku (měrný povrch 5500 m^2/kg) na pevnost v tlaku při stáří vzorků 14 a 28 dní (Mikhailova a kol, 2013).

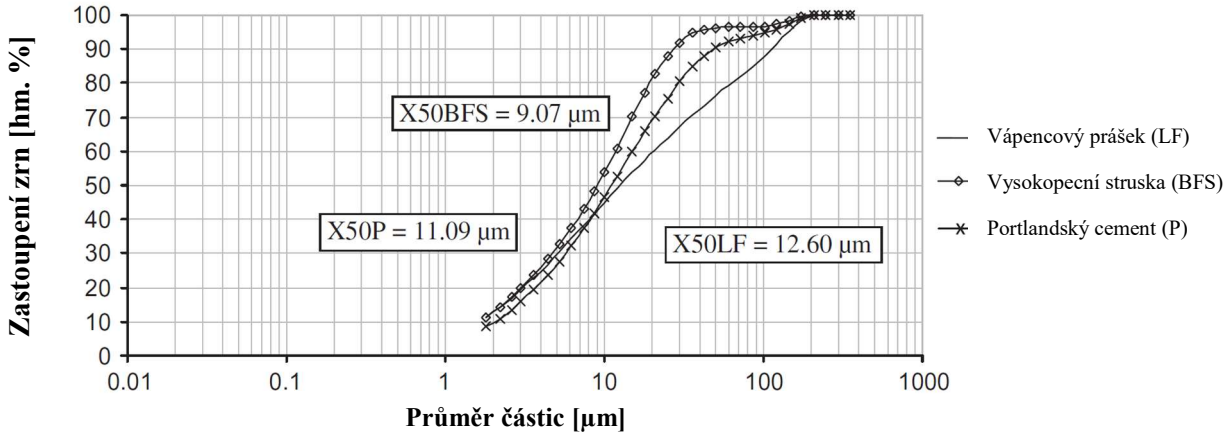
V důsledku přidání ultrajemných částic dolomitického vápence dochází ke zvýšení rychlosti krystalizace silikátů. Toto usnadňuje hydrataci cementových minerálů a změnu poměrů hydrosilikátů. Lze konstatovat, že s použitím čím jemnějších částic dochází ke zvýšení konečné pevnosti a současně i zvýšení hustoty. Vliv jemnosti mikroplniva je zaznamenán na grafu pevností v tlaku při stáří vzorků 7 dní (Obrázek 5).



Obrázek 5 – Vliv jemnosti (měrného povrchu) vápencového prášku na pevnost v tlaku při stáří vzorků 7 dní (Mikhailova a kol, 2013).

Pomocí elektronového mikroskopu (SEM analýzy) byl zkoumán vliv prášku na mikrostrukturu. Výsledky analýzy ukazují, že při stáří vzorků 7 dní má materiál bez jemného vápencového prášku porézní otevřenou strukturu s převahou makropórů. Přidáním vápencového prášku vytvoříme centra, která iniciují krystalizaci a tím zrychlují hydrataci cementu. Výsledkem je výrazné zhutnění (vyšší objemová hmotnost) výsledných směsí. Zároveň dochází ke zvýšení pevnosti v tlaku. Částice mikroplniva totiž působí jako další krystalizační zrna. Optimálním obsahem jemného dolomitického vápencového prášku je dle autorů 25 hm. % z hmotnosti cementu. Při tomto množství prášku zaznamenali nejvyšší pevnosti v tlaku. V závěru také uvádějí, že pomocí jemného vápencového prášku dochází ke zvýšení počátečních pevností bez negativních účinků na dlouhodobé vlastnosti směsí (Mikhailova a kol., 2013).

Courard a Michel (2014) se ve své publikaci zabývají použitím vápencového plniva a vysokopecní strusky na vlastnosti čerstvé a vytvrzené směsi cementového kompozitu. V publikaci se autoři zabývají výsledky testů čerstvých i vytvrzených směsí cementových kompozitů. Prováděli testy za účelem stanovení konzistence čerstvé směsi, mechanických vlastností, smrštění, poréznosti, kapilární absorpce a propustnosti kyslíku. Dále také zkoumali trvanlivost cementového kompozitu. Pro výrobu vzorků byl použit portlandský cement CEM I 42,5 R. Jako druhý typ cementu byl použit vysokopecní struskový cement (65 % portlandského cementu + 35 % granulované vysokopecní strusky). Dále použili pro výrobu normalizovaný písek (EN 196-1) a jako plnivo vápencový prášek z místního vápencového lomu. Pomocí laserové difrakce byla zjištěna distribuce velikosti částic cementu, vysokopecní strusky a plniva z vápencového prášku. Distribuce velikosti částic a průměrná velikost částic materiálů použitých pro výrobu vzorků je uvedena na křivce zrnitosti (Obrázek 6). Použité vápencové plnivo je velice jemný prášek s průměrnou velikostí částic 12,6 μm. Čím bylo větší množství použitého vápencového plniva, tím vyšší byla objemová hmotnost suchých pevných částic. Tento fakt vedl k zjištění, že vápencové plnivo má ve výsledku za následek vyšší odolnost a pevnost výsledného kompozitu. Chemické složení a fyzikální vlastnosti cementu, vysokopecní strusky a vápencového prášku jsou uvedeny v tabulce (Tabulka 4). Při výrobě směsí autoři vždy zachovávali množství vody a písku. Vodní součinitel V/C navrhli na hodnotu 0,45. Testovali vzorky vyrobené ze dvou výše uvedených cementů a u každého z nich zkoušeli zapracovat vápencové plnivo o obsahu 0 hm. %, 15 hm. %, 23 hm. % a 27 hm. % jako náhrady za cement. Vzorky byly odformovány po 24 hodinách a poté uloženy po dobu 27 dní při teplotě 20 ± 2 °C a při relativní vlhkosti 90 ± 10 %. Autoři pro hodnocení zpracovatelnosti použili zkoušku sednutí kužele, jejímž závěrem bylo, že zpracovatelnost zůstává zachována a nemění se s přibývajícím množstvím plniva z vápencového prášku.



Obrázek 6 – Křivka zrnitosti (distribuce velikosti zrn) portlandského cementu (P), granulované vysokopecní strusky (BFS) a vápencového prášku - plniva (LF) (Courard a Michel, 2014b).

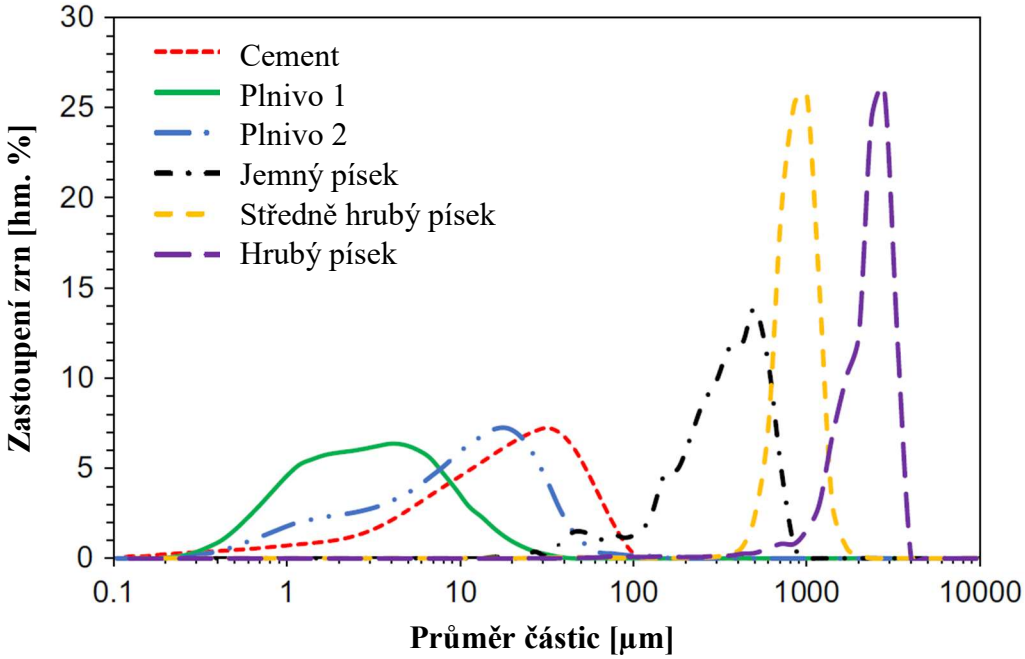
Tabulka 4 – Chemické složení a fyzikální vlastnosti použitých materiálů (Courard a Michel, 2014b).

	Portlandský cement (P)	**Granulovaná vysokopecní struska (BFS)**	**Vápencový prášek (LF)**
CaO	62,80	38,46	98,10 ($CaCO_3$)
SiO_2	19,30	35,08	0,533
Al_2O_3	5,10	13,47	0,166
Fe_2O_3	3,10	0,51	0,082
MgO	0,80	8,50	0,350
SO_3	3,10	0,10	0,085
Objemová hmotnost [kg/m^3]	3090	2890	2700
Měrný povrch [m^2/kg]	385	440	305

Jemná vápencová plniva zlepšují přechodovou zónu mezi kamenivem a cementovou pastou a zmenšují její tloušťku. To může mít pozitivní vliv na kompaktnost hydratované směsi. Doba tuhnutí klesá se zvyšujícím množstvím náhrady cementu vápencovým plnivem. Rychleji tuhnuly směsi s portlandským cementem oproti směsím s příměsí vysokopecní strusky. Dle vyhodnocení autorů se pevnosti v tlaku a celkové smrštění snižuje se zvyšujícím se množstvím vápencového plniva v důsledku poklesu obsahu cementu. Dále z testů pro zjištění pórovitosti vyplívá, že otevřená pórovitost se zvyšuje do 15 hm. % náhrady cementu. Od 15 hm. % do 27 hm. % zůstává konstantní. U cementu s vysokopecní struskou byla zjištěna nižší otevřená pórovitost než u směsí s portlandským cementem. Permeabilita kyslíku zůstává

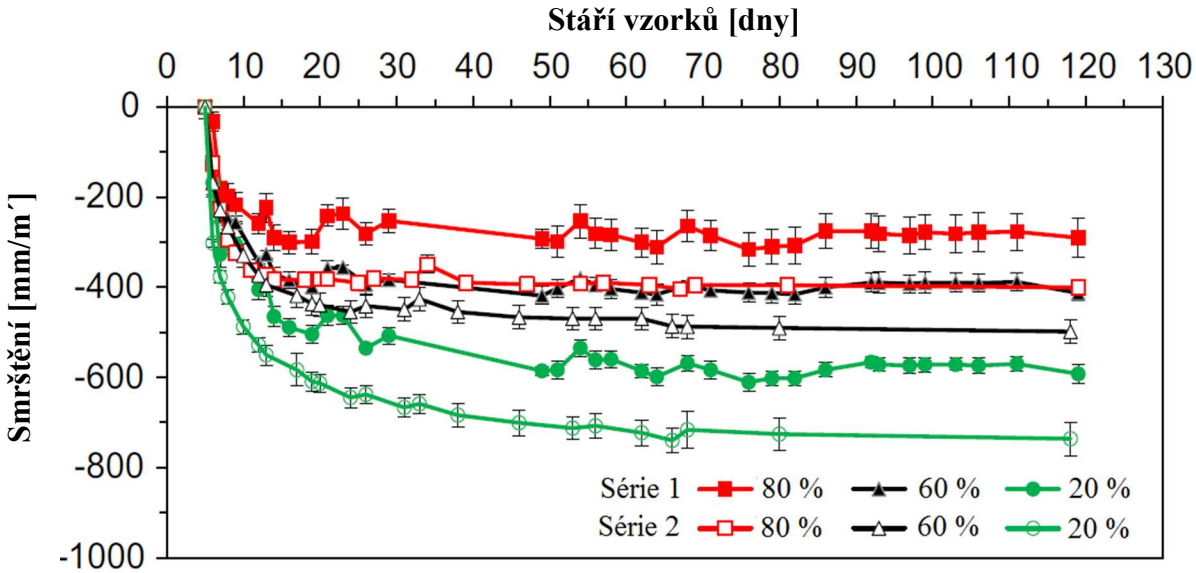
konstantní u různých druhů cementu i různých náhrad vápencovým práškem. Kapilární sorpce se zvyšuje s rostoucím množstvím vápencového plniva. Fyzikální vlastnosti materiálů mají vliv na chování směsí, konkrétně na potřebu vody a zpracovatelnost. Ze závěru publikace vyplývá, že použité vápencové plnivo může mít pozitivní, ale i negativní dopad na chování směsí. Zároveň vápencový prášek, jako plnivo, nemůže být vždy definitivně považován za inertní materiál. Každý vápencový prášek nebo jiné plnivo (mikroplnivo) může mít odlišný vliv podle chemických a fyzikálních vlastností dotyčného materiálu (Courard a Michel, 2014b).

Vliv vápencového plniva na smršťování kompozitu zkoumali Varhen a kol. (2016) ve své publikaci. Pro výrobu vzorků použili portlandský cement o hustotě 2,96 g/m^3 a měrném povrchu 1,15 m^2/g. Použitý cement měl rychlý nárůst počáteční pevnosti. Směsi byly navrženy ze dvou vápencových plniv s rozdílnými rozměry částic. Dále byly použity tři druhy kameniva (písku). Množství vody a kameniva bylo udržováno konstantní ve všech směsích. Směsi byly vyráběny s různými obsahy vápencových plniv jako náhrady za cement. Bylo použito množství vápencových plniv ve výši 80 hm. %, 60 hm. % a 20 hm. % ve vztahu k celkovému množství jemných částic (cement + vápencová plniva). Těmto procentuálním zastoupením odpovídá spotřeba cementu 110, 220, 445 kg/m^3. Obsah celkových jemných částic a vody autoři udržovali konstantní. Vzhledem k celkové hmotnosti materiálů pro výrobu směsí bylo stanoveno množství vody na konstantních 8,25 %. Křivka zrnitosti je znázorněna pro všechny použité materiály v následujícím grafu (Obrázek 7). Z grafu je patrné, že použité plnivo 1 bylo jemnější než použitý cement a plnivo 2 má podobnou distribuci velikosti částic jako použitý cement.



Obrázek 7 – Křivka zrnitosti materiálů použitých pro výrobu směsí (Varhen a kol., 2016).

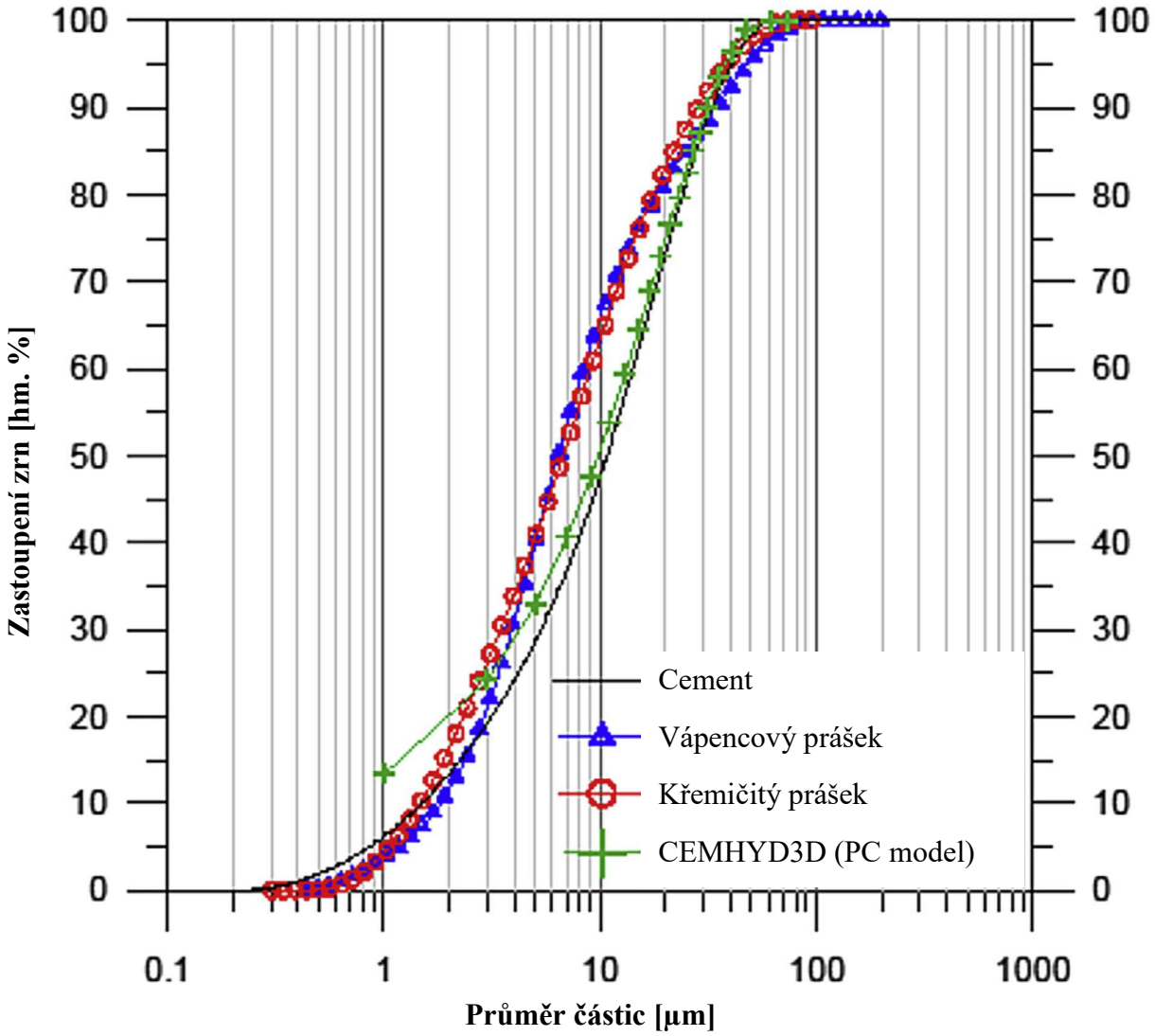
Vzorky byly odformovány po 24 hodinách a uloženy při teplotě 24 °C a relativní vlhkosti 100 % po dobu pěti dnů. Poté byly vyndány z vodní lázně a uloženy do komory s kontrolovaným prostředím o teplotě 24 °C a relativní vlhkosti 50 % a zde byly uloženy až do doby testování. Pro zjištění pevnosti v tlaku byly vyrobeny válcové vzorky 5 × 10 cm, které byly po odformování uloženy do vodní lázně při teplotě 24 °C po dobu 27 dní. Testování proběhlo 28. den po výrobě vzorků podle technické normy NBR 5739. Z výsledků publikace je zřejmé, že přidáním vápencového plniva se zlepšuje zpracovatelnost a zároveň je vyšší viskozita. Tím mohou nastat problémy, například při potřebě čerstvou směs čerpat a tímto způsobem ukládat směs například do bednění. Z testů pevnosti v tlaku zjistili, že se zvyšováním náhrady cementu vápencovým plnivem pevnost v tlaku snižuje. Zvyšuje se tím totiž zároveň i poměr (vodní součinitel) V/C. Ale stále dle výsledků dosahují pevností ne zanedbatelných. Použitím vápencového plniva se snižuje ekologická zátěž při výrobě pojiva (cementu). Při použití plastifikátoru by se mohlo podařit pevnosti opět zvýšit, jelikož bychom mohli snížit potřebu vody, tedy snížit vodní součinitel V/C. Při vyšším objemu plniva v pastě si lze povšimnout nižších hodnot smrštění (Obrázek 8). Přičemž nejvyšší ztráta hmotnosti byla zaznamenána u past, které obsahují nižší objemy vápencových plniv z důvodu nižší retence vody během procesu hydratace cementu. Ztráta hmotnosti vysycháním vody není přímo spojena se smrštěním vzorků při použití vápencových plniv. Vyšší množství náhrady cementu vápencovým plnivem snižuje objem pórů o průměru menším než 10 μm v porézní struktuře materiálů. Toto potvrzuje, že výsledky smrštění se vztahují k vodě v těchto menších pórech.



Obrázek 8 – Vývoj smršťování s použitím 80 hm. %, 60 hm. % a 20 hm. % vápencového plniva (Varhen a kol., 2016).

Autoři také zkoušeli modely predikce smrštění. Modely predikce smrštění, ale hodnoty smrštění nadhodnocují, protože většina modelů spojuje vysokou pevnost v tlaku s nízkými hodnotami smršťování. Modely by bylo potřeba upravit a kalibrovat tak, aby zohledňovaly další faktory, jako je distribuce a velikosti pórů v mikrostruktuře materiálu, jelikož jsou to důležité faktory ovlivňující mechaniku smrštění a faktory, které ovlivňuje přidání vápencových jemných plniv (Varhen a kol., 2016).

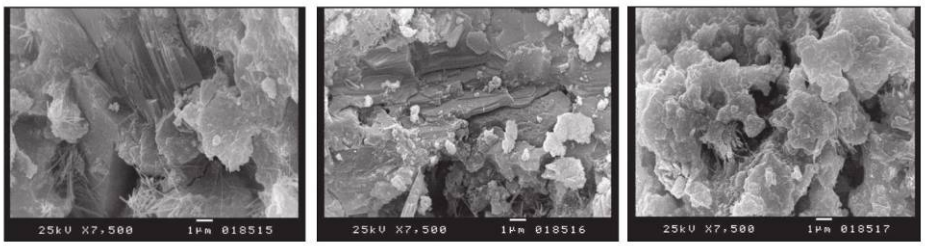
Šetřit čistý portlandský cement a částečně ho nahrazovat, či do něj přidávat další příměsi je snahou z důvodu ekologické zátěže, kterou způsobuje výroba cementu. Z tohoto důvodu se ve výzkumech řeší, čím a jak cement částečně nahrazovat. Jako náhrada se používá například vysokopecní struska nebo popílek, jejichž zásoby mohou být omezené. Z tohoto důvodu mnoho publikací dnes řeší využití vápencových nebo křemičitých prášků získávaných jako odpadní materiál ze zpracování kamene nebo přímo cílené drcení kamene na požadovanou jemnost. V práci autoři zkoumali chemické a fyzikální vlivy těchto dvou prášků na reologii, hydrataci a návrh cementových kompozitů pomocí experimentů a mikrostrukturálního modelování. Ukazuje se, že částice jak vápencového prášku, tak křemičitého prášku jsou aktivní místa pro nukleaci a růst produktů hydratace cementu. Použitím vápencového prášku dochází při hydrataci navíc k tvorbě karboaluminátových hydratačních produktů. Přidání plniva v jakémkoliv množství náhrady má minimální vliv na počáteční dobu tuhnutí. Pro výrobu vzorků autoři použili portlandský cement CEM I a CEM II s hmotnostním přídavkem 3,7 % vápence (91,0 % $CaCO_3$). Vápencový prášek (LS) použili autoři jako komerčně vyráběný podsítný prach pod sítem s okem o velikosti 150 μm. LS má podle TGA měření odhadovaný obsah $CaCO_3$ 98,1 ± 0,6 %. Křemičitý prášek získali smícháním tří laboratorních prášků podobné čistoty tak, aby se dosáhlo podobné ne-li stejné distribuce velikosti částic. Měrný povrch cementu byl 1,61 m^2/g, vápencového prášku 1,54 m^2/g a křemičitého prášku 1,91 m^2/g. Objemová hmotnost cementu byla 3160 kg/m^3, vápencového prášku 2740 kg/m^3 a křemičitého prášku 2660 kg/m^3. Pomocí laserové difrakce byla získána kumulativní křivka zrnitosti (Obrázek 9). Jako čtvrtá křivka na grafu je znázorněna křivka zrnitosti z počítačového modelu označena jako CEMHYD3D.



Obrázek 9 – Křivka zrnitosti určená pomocí laserové difrakce a křivka z počítačového modelu (CEMHYD3D) (Bentz a kol., 2017).

Objemová hmotnost byla zjištěna pomocí heliové pyknometrie a měrný povrch byl zjištěn pomocí BET (Bruneuer-Emmett-Teller) metody. Množství vody bylo udržováno na konstantní hodnotě 160 g vody. Vodní součinitel V/C se měnil podle poměrů náhrady cementu prášky. Množství vody bylo stanoveno podle objemového poměru voda k prášku V/P = 1,26. Směsi byly navrženy s náhradou za cement od 0 obj. % do 95 obj. % vápencového prášku. Pro porovnání vlivu vápencového prášku oproti křemičitému prášku, byly zhotoveny směsi s náhradou cementu křemičitým práškem v obsahu 20 obj. %, 40 obj. %, 60 obj. % a 80 obj. %. Testy prokázaly schopnost obou prášků urychlit hydrataci v raném stáří vzorků. To je způsobeno tím, že jemná plniva poskytují místa pro růst produktů hydratace cementu. Při testech vyšlo, že vápencový prášek je mírně účinnější při urychlování hydratace než křemičitý prášek (Bentz a kol., 2017).

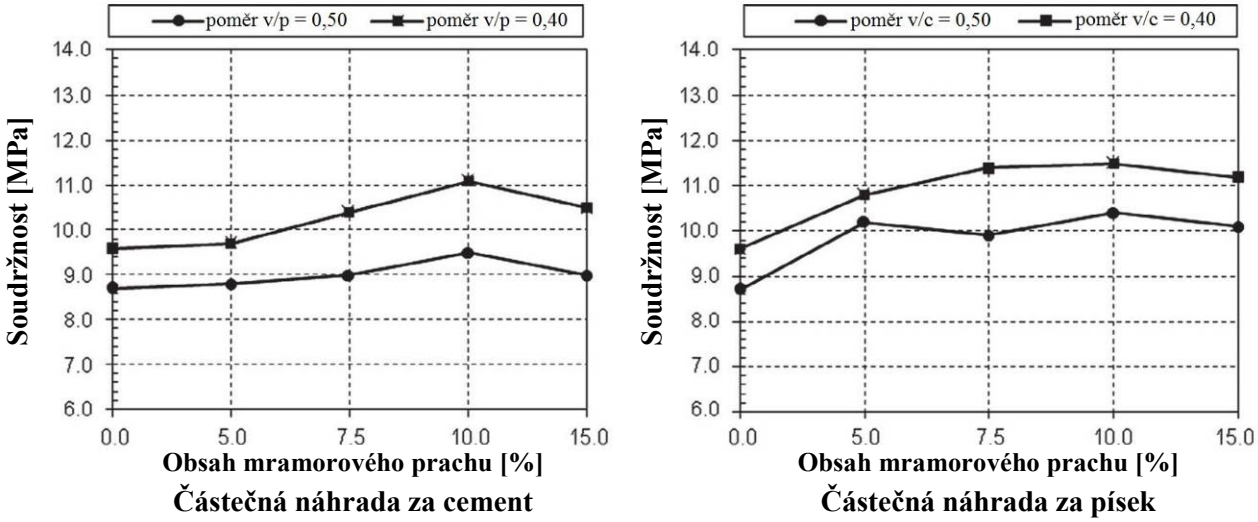
V práci od autorů Aliabdo a kol. (2014) je zkoumána možnost použití mramorového prachu ve dvou aplikacích. První aplikací je modifikace cementu použitím mramorového prachu a druhou aplikací bylo použití mramorového prachu do betonu jako náhrady za cement nebo jako náhrady za písek. Autoři nahrazovali ve své studii pojivo a poté i plnivo postupně od 0,0 hm. %, 5,0 hm. %, 7,5 hm. %, 10,0 hm. % až po 15 hm. % mramorového prachu. Dále použili poměr vody k cementu (v/c) a poměr vody k mramorovému prachu (v/p) tak, aby byl 0,50 a 0,40. Ve studii zkoumali fyzikální, mechanické a chemické vlastnosti cementové pasty a betonu, který byl modifikován mramorovým prachem. Výsledky porovnávali s referenčními vzorky bez modifikace MP. Dále byla provedena termo-gravimetrická analýza (TGA), analýza rentgenovou difrakcí (XRD) a analýza rastrovacím elektronovým mikroskopem (SEM analýza). Pro výrobu vzorků byl použit portlandský cement CEM I 42,5 N. Jako jemný písek byl použit křemičitý písek s jemnostním modulem 2,35 a jako kamenivo byl použit drcený růžový vápenec frakce 0 – 19 mm. Referenční kontrolní vzorky měly stanovený obsah cementu na 400 kg/m^3 a vodní součinitel 0,5. Referenční směs byla složena z 20 hm. % cementu, 30 hm. % jemného písku a 50 hm. % kameniva. Mramorový prach, který byl používán k modifikaci, měl střední velikost zrna 8 μm a maximální velikost zrna 52 μm. Vyrobené vzorky byly až do doby testování skladované ve vodní lázni. Provedená SEM analýza ilustruje vlastnosti mikrostruktury cementových past při stáří 28 dní. Na následujícím obrázku je znázorněna fotografie mikrostruktury referenčního vzorku, vzorku s obsahem mramorového prachu 7,5 hm. % a 10 hm. % jako náhrady za cement. Z analýzy je patrné, že přidáním mramorového prachu je materiál hutnější, méně porézní než referenční vzorky (Obrázek 10). V tomto stáří vzorků se mikrostruktura cementových past skládá z amorfních částic krystalů kalcium silikát hydrátu (C-S-H) a kalcium hydrátu (C-H), které se objevují v masivních vrstvách. Dále jsou zde jehly ettringitu viditelné v pórech.



Obrázek 10 – Mikroskopická (SEM) analýza cementové pasty (Aliabdo a kol., 2014).

Závěry, které autoři vyvodili v článku, jsem již shrnul ve své bakalářské práci. Autoři článku v závěru zmiňují, že použitím mramorového prachu jako náhrady za pojivo nebo plnivo je pozitivně ovlivněna soudržnost betonu s ocelovou výztuží. Nyní bych se chtěl zaměřit pouze na část publikace, kterou autor věnoval soudržnosti jím vyrobeného materiálu (cementového

kompozitu s použitím odpadního mramoru) s betonářskou výztuží. Podle výsledků autora se soudržnost zvyšuje se zvyšujícím se obsahem mramorového prachu do 15 hm. %. Při použití mramorového prachu jako náhrady cementu má soudržnost menší zvýšení než při použití jako náhrady za písek. Nejvyšší nárůst soudržnosti je zaznamenán při použití 10 hm. % mramorového prachu. Soudržnost byla měřena při stáří vzorků 56 dní. Nárůst pevnosti spoje ocel – beton je zobrazen na následujícím obrázku (Obrázek 11).



Obrázek 11 – Soudržnost výztuže s matricí v závislosti na obsahu mramorového prachu (Aliabdo a kol., 2014).

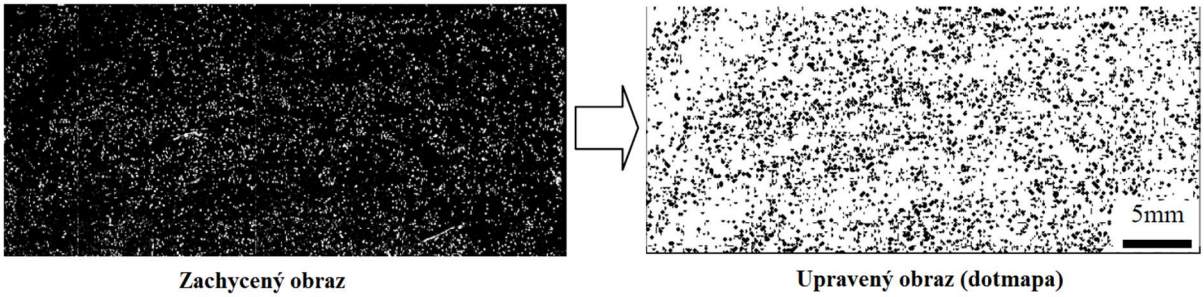
Procentuální nárůst soudržnosti na vzorcích stáří 56 dní s obsahem 5 hm. %, 7,5 hm. %, 10 hm. % a 15 hm. % mramorového prachu, jako náhrady za cement je 1 %, 3 %, 9 % a 3 % pro poměr v/p = 0,50 a 1 %, 8 %, 16 % a 9 % pro poměr v/p = 0,40. Při použití jako náhrady za písek byl nárůst 17 %, 14 %, 20 % a 16% pro poměr v/c = 0,50 a 13 %, 19 %, 20 % a 17 % pro poměr v/c = 0,40. Závěrem autoři uvádí, že při použití mramorového prachu jako náhrady za cement nebo náhrady za písek do 15 hm. % je soudržnost příznivě ovlivněna. Maximální zvětšení soudržnosti mezi výztuží a matricí je zaznamenáno s použitím mramorového prachu jako náhrady za písek při obsahu mramorového prachu 10 hm. %. Vzorky s použitím mramorového prachu měly menší pórovitost než referenční vzorky. Obecně platí, že použití mramorového prachu jako náhrady písku má výraznější vliv na mechanické vlastnosti betonu ve srovnání s použitím jako náhrady cementu (Aliabdo a kol., 2014), (Hlubocký, 2016).

Další publikace se zabývaly například použitím vápencového nebo mramorového prášku do betonu a omítek (Bederina a kol., 2011), (Pawar a Dewangan, 2014), (Vardhan a kol., 2015) a (Shafigh a kol., 2016), studie ukazující možnost využití u samozhutnitelných betonů (SCC), které například řešili autoři Tennich a kol. (2015), Ghafoori a kol. (2016) a Sadek a kol. (2016).

2.3 Cementové kompozity vyztužené rozptýlenou výztuží (vlákny)

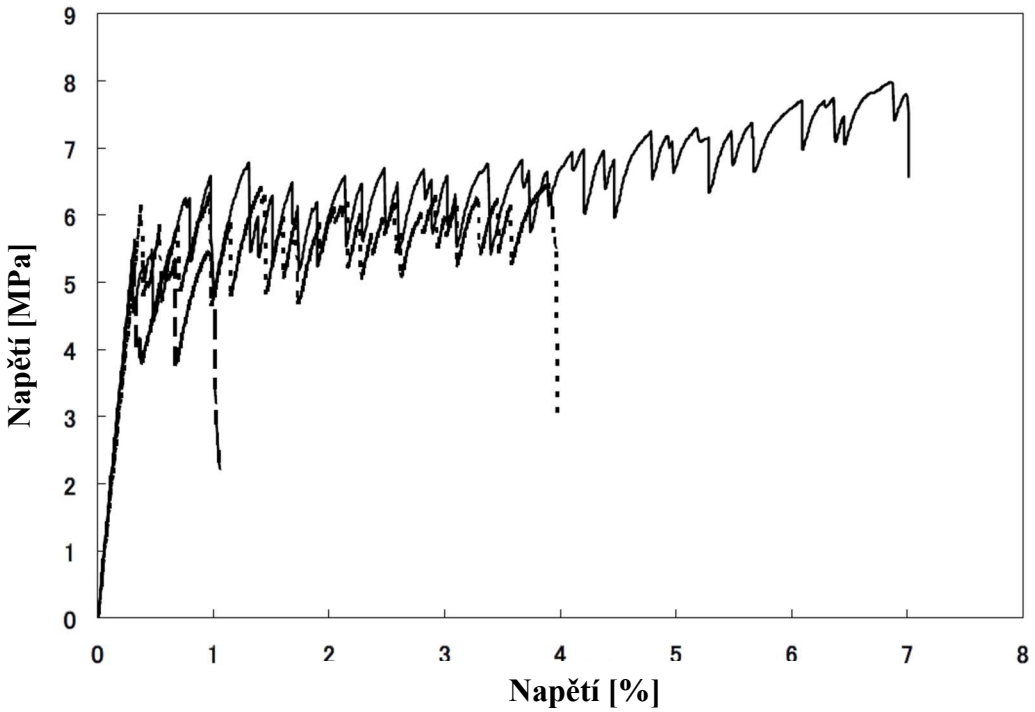
Z předchozí kapitoly v posledním rozebraném článku autoři Aliabdo a kol. (2014) ve své publikaci zmiňují pozitivní vliv mramorového prášku jako mikroplniva na soudržnost s běžnou betonářskou výztuží. Z tohoto důvodu se v této podkapitole věnuji publikacím o cementových kompozitech vyztužených rozptýlenou výztuží bez použití mikroplniva. Cementové kompozity vyztužené rozptýlenou výztuží a zároveň cementové kompozity s využitím mikroplniva řeší publikace rozebrané v další navazující podkapitole. U cementových kompozitů vyztužených rozptýlenou výztuží je nutné sledovat, jak distribuci vláken po ploše průřezu (v lomové ploše), ale zároveň je důležitý jejich směr. Vlákna rovnoběžně se směrem zatížení nejsou přínosem pro zvýšení pevnosti v tahu za ohybu. Důležitá jsou vlákna kolmá na směr zatížení. Tato vlákna zvyšují pevnost a odvrací možnost křehkého lomu konstrukce a její následné selhání bez varování. Rozptýlená výztuž v materiálech po vzniku hlavní lomové trhliny přebírá zatížení. V tuto chvíli je důležitá soudržnost výztuže s matricí. Selhání může nastat dvěma způsoby. První možností je vyčerpání pevnosti vlákna a jeho přetržení. Další způsob porušení je vyčerpání soudržnosti matrice s výztuží. Nedojde k porušení výztuže, ale k jejímu vytržení z matrice. Z tohoto důvodu dalším důležitým parametrem, který je nutné u vyztužených cementových kompozitů sledovat, je soudržnost matrice s výztuží. Soudržnost výztuže s matricí je ovlivněna několika faktory a vlastnosti jak matrice, tak samotné výztuže.

Distribuce vláken v cementových kompozitech (ECC) je jedním z nejdůležitějších faktorů s ohledem na mechanické vlastnosti kompozitu vyztuženého vlákny. Autoři v článku pro zachycení distribuce vláken v průřezu použili novou metodu hodnocení distribuce nespojitých vláken z polyvinylalkoholu (PVA) v ECC. Pomocí fluorescenční techniky byli schopni pozorovat PVA vlákna jako zelené až žluté tečky v průřezu kompozitu. Pro výrobu vzorků autoři použili Portlandský cement, písek, popílek, vodu a PVA vlákna REC15 Kuraray o průměru vlákna 0,04 mm a délky 12 mm. Vodní součinitel byl použit V/C = 0,42 a množství vláken bylo 2 % z objemu směsi. Distribuci vláken autoři zkoumali na výřezech ze vzorků z oblasti hlavní lomové trhliny. (Obrázek 12).



Obrázek 12 – Zpracování obrazu distribuce vláken v průřezu (Torigoe a kol., 2003).

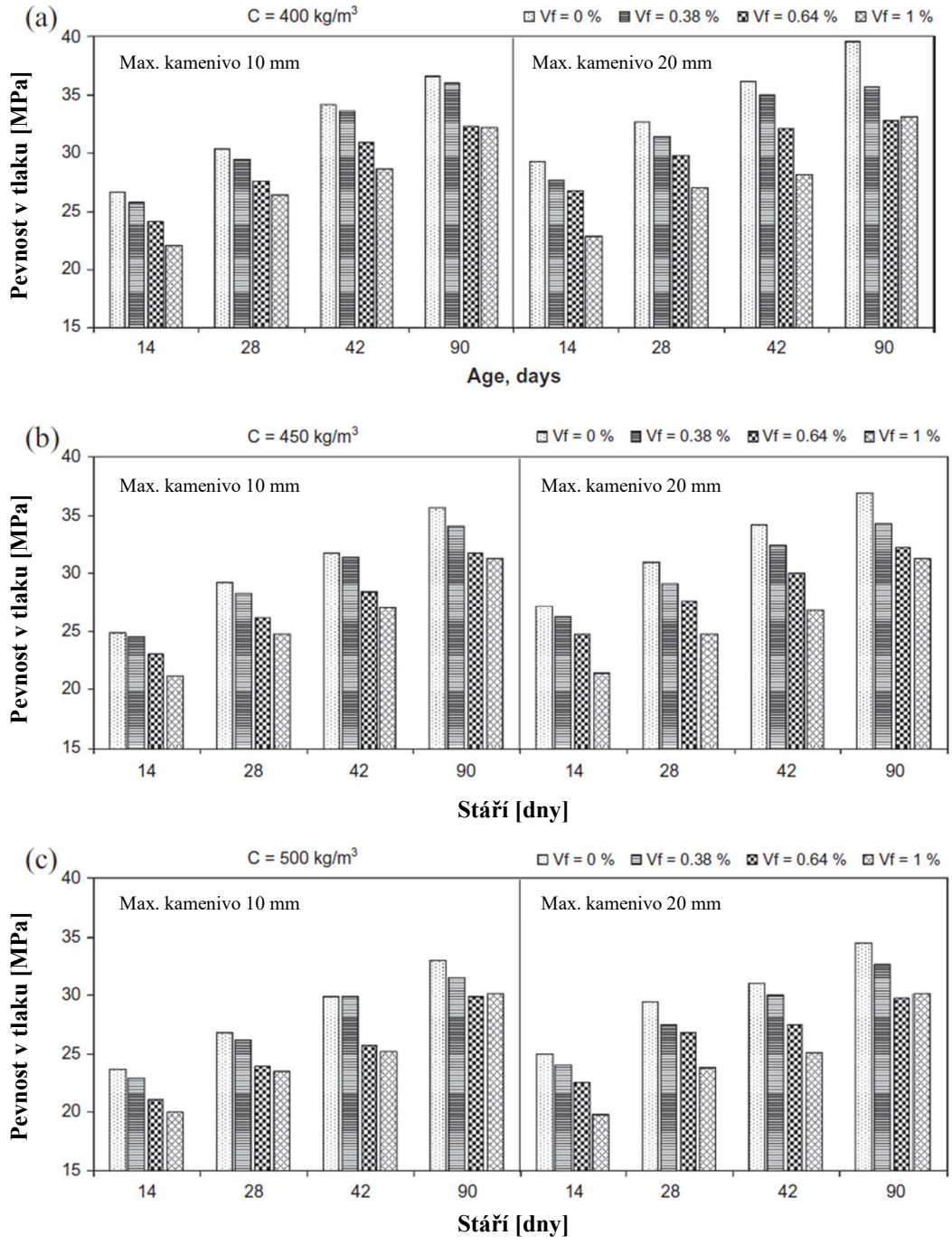
Výsledné výřezy byly o velikosti průřezu 13 × 30 mm (v × š). Autoři se zaměřili na rozdíly výsledků podle použitého rozlišení při vyhodnocování a dále na zjištění vhodné velikosti jednotek. Dle vyhodnocení autorů je viditelný rozdíl v distribučním koeficientu mezi jednotlivými vzorky s rozdílnými počty jednotek. Avšak i přes velký, až pětinásobný, rozdíl mezi počtem jednotek, trend distribučního koeficientu je mezi vzorky téměř identický. Rozdíly jsou dle závěrů způsobeny nehomogenní distribucí vláken ve vzorku. Tím jsou způsobeny i rozdíly při testování ohybové pevnosti v tahu (Torigoe a kol., 2003).



Obrázek 13 – Výsledky zkoušek v prostém tahu (Torigoe a kol., 2003).

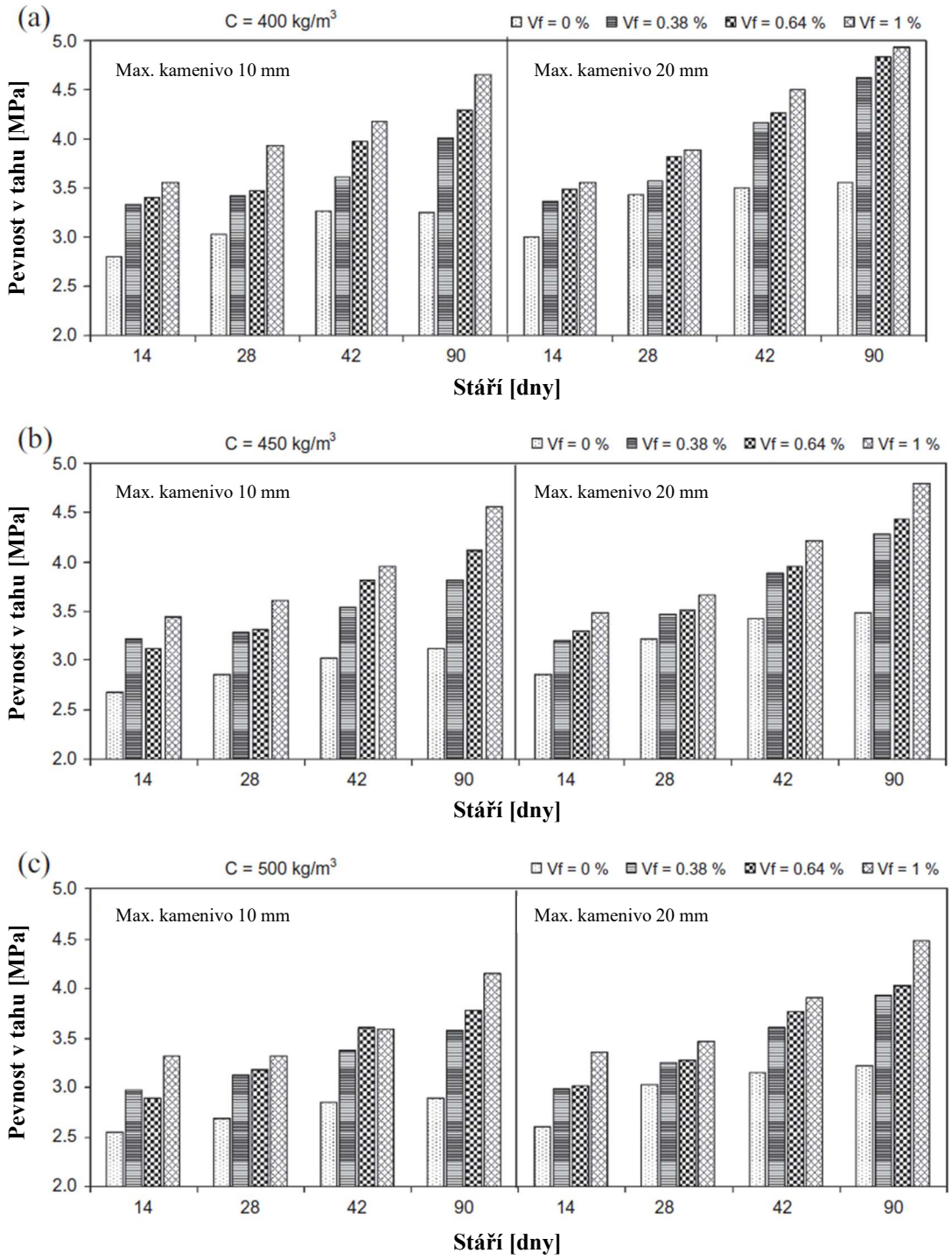
Samozhutnitelný beton (SCC) vyztužený ocelovými vlákny zkoumali ve své práci autoři Madandoust a kol. (2015). V práci zkoumali, jak přidání ocelových vláken ovlivňuje vlastnosti SCC. Pro výrobu vzorků autoři použili cement CEM II ve třech obsazích. Obsah cementu použili 400 kg/m^3, 450 kg/m^3 a 500 kg/m^3. Měrná hmotnost použitého cementu měla hodnotu 3,15 a měrný (specifický) povrch použitého cementu byl 3165 cm2/g. Jako jemné kamenivo využili promývaný říční písek s jemnostním modulem 2,92 a měrnou hmotností 2,65. Dále autoři využili hrubé kamenivo o dvou maximálních velikostech zrna 10 mm a 20 mm, obě s měrnou hmotností 2,65. V jednotlivých sadách využívali autoři ocelová vlákna v množství 0 obj. %, 0,38 obj. %, 0,64 obj. % a 1 obj. %. V přepočtu byl objem vláken stanoven na 0, 30, 50 a 80 kg/m^3. Použitá ocelová vlákna byla o délce 50 mm, průměru 0,8 mm, poměrem stran 62,5 a o hustotě vláken 7,85 g/m^3. Vodní součinitel v/c byl u všech směsí udržován konstantní na hodnotě 0,45. Jako plastifikační činidla byla do směsí přidána plastifikační přísada na bázi polykarboxylových

etherů s hustotou 1,13 ± 0,01 g/cm^3 (při 25 °C). Jako další plastifikační činidlo byl přidán jemný vápencový prášek s objemovou hmotností 2,7 g/cm^3. U samozhutnitelných betonů je důležitý postup míchání a v jakém pořadí se přidávají jednotlivé materiály do míchačky. Autoři použili část vody, do které vmíchávali suché složky a poté postupně přidávali zbylou vodu tak, aby měli dohled nad vznikající hustotou (zpracovatelností) připravované směsi. Pevnosti v tlaku testovali na krychlích o rozměru hrany 150 mm při stáří vzorků 14, 28, 42, a 90 dnů. Výsledné pevnosti v tlaku jsou uvedeny na následujících grafech (Obrázek 14).



Obrázek 14 – Pevnost v tlaku při různých množstvích cementu (C) a různým obsahem vláken (Vf) v závislosti na stáří vzorků (Madandoust a kol., 2015).

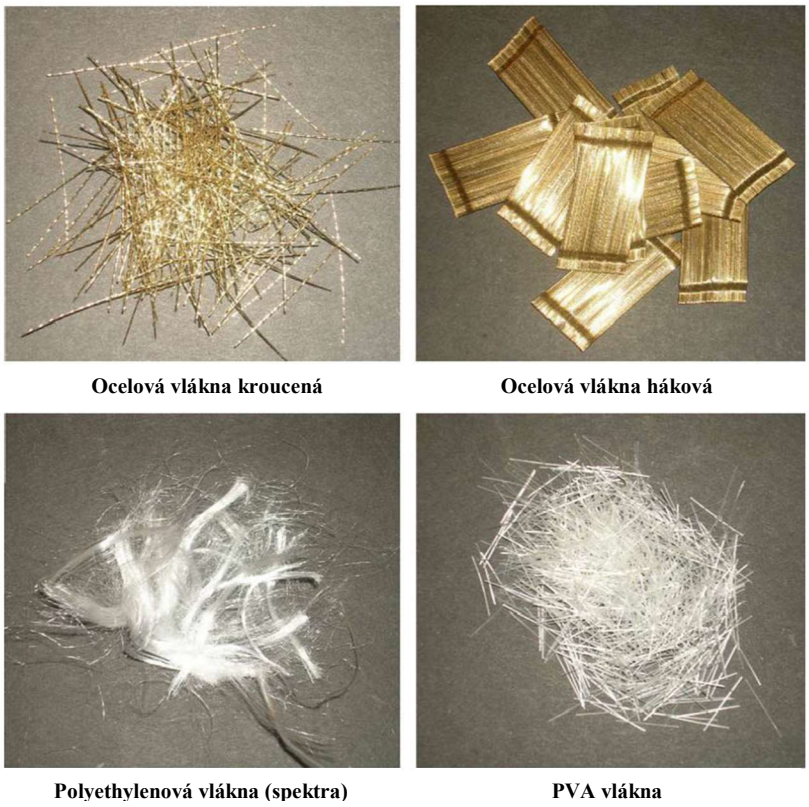
Autoři testovali také pevnosti v prostém tahu na vzorcích tvaru válce o průměru 150 mm a délky 300 mm při stejných stářích vzorků. Vývoj pevností v závislosti na stáří vzorků a na množství použitých ocelových vláken je znázorněn na následujících grafech (Obrázek 15). Dále prováděli testy pro zjištění pevnosti v tahu za ohybu na trámcích o rozměrech 100 × 100 × 500 mm při stáří vzorků 28 dnů. Pevnost v tahu za ohybu zkoušeli pomocí tříbodového ohybu. Autoři také zkoumali Youngův modul pružnosti.



Obrázek 15 – Pevnost v tahu při různých množstvích cementu (C) a různým obsahem vláken (Vf) v závislosti na stáří vzorků (Madandoust a kol., 2015).

Autoři v závěru publikace shrnuli výsledky zkoušek a obecně konstatovali, že zkoumané faktory jako je obsah cementu, obsah ocelových vláken, maximální velikost použitého kameniva a stáří vzorků (konstrukce) významně ovlivňují vlastnosti SCC. Přidáváním ocelových vláken snižuje funkčnost SCC (zhoršuje zpracovatelnost), zejména s vyšším objemem vláken. Pevnosti v tlaku se lehce zvyšují při použití většího kameniva a zároveň přidáváním vláken se pevnosti v tlaku snižují. Z grafů pevnosti v tahu je patrné, že zvyšování obsahu vláken zvyšuje pevnosti v tahu. Zároveň při zachování konstantního vodního součinitele se pevnost v tlaku i pevnost v tahu snižuje s větším obsahem cementu. Youngův modul pružnosti vykazuje pokles se zvyšujícím se obsahem cementu, což způsobuje konstantní vodní součinitel. Autoři uvádí, že Youngův modul pružnosti je mírně vyšší u směsí s použitým větším kamenivem při zachování konstantního vodního součinitele (Madandoust a kol., 2015).

V další publikaci se autoři Kim a kol. (2008) zabývali ohybovým chováním železobetonových kompozitů vyztužených vlákny. Ve své práci používali čtyři různé druhy vláken vždy ve dvou koncentracích. Pro výrobu vzorků využívali cement CEM III, který tvořil matrici se jmenovitou pevností v tlaku 56 MPa. Čtyři vybrané typy vláken byly vysokopevnostní ocelová vlákna kroucená, vysokopevnostní ocelová vlákna háková, vysokomolekulární polyethylenová vlákna (spektra) a PVA vlákna (Obrázek 16). Každý druh vláken byl použit ve dvou koncentracích a to 0,4 obj. % a 1,2 obj. %.



Obrázek 16 – Ukázka použitých vláken (Kim a kol., 2008).

Testy autoři prováděli na trámcích o rozměrech 100 × 100 × 350 mm. Vzorky testovali pomocí čtyřbodového ohybu s rozpětím mezi podporami 300 mm. Autoři při testování použili speciální rám k měření středového průhybu. Tento rám umožňoval odstranit vliv cizích deformací jako například zkroucení vzorku nebo deformace od posunu v uložení. V publikaci se autoři zaměřili pouze na ohybové chování cementového kompozitu s rozptýlenou výztuží. V závěru publikace autoři shrnují a konstatují, že všechny vzorky vykazovaly po vzniku prvních trhlin zpevnění, s vyjímkou vzorků s 0,4 obj. % PVA vláken. Zároveň zaznamenali při testování velice rozdílné výsledky v závislosti na typu a obsahu vláken z hlediska nosnosti (ekvivalentní pevnosti v ohybu), kapacity absorpce energie (houževnatosti) a chování při vzniku trhlin (počet trhlin). Nejvyšší nosnost vykazovaly vzorky s ocelovými kroucenými vlákny při obsahu vláken 1,2 obj. %. Hodnota nejvyšší pevnosti v ohybu byla 13,08 MPa. Z tohoto hlediska od nejlepších výsledků po nejhorší výsledky jsou typy vláken v tomto pořadí: ocelová vlákna kroucená, ocelová vlákna háková, polyethylenová vlákna a PVA vlákna. Stejné pořadí vláken je dle výsledků z hlediska kapacity absorpce energie. Dále v závěru autoři uvádí, že všechny vzorky vykazovaly vznik nejvíce trhlin ve fázi zpevňování. Při obsahu 1,2 obj. % vláken pozorovali výrazně odlišné chování při tvorbě trhlin. Vzorky s ocelovými kroucenými vlákny a polyethylenovými vlákny generovaly mnoho trhlin, vzorky s PVA vlákny generovaly pouze 2 až 3 trhliny a vzorky s ocelovými hákovými vlákny generovaly střední počet trhlin. Pokud seřadíme vlákna z hlediska chování při porušení, jedná se o toto pořadí: ocelová kroucená vlákna, polyethylenová vlákna, ocelová háková vlákna a PVA vlákna. Autoři ve své práci dále zkoumali vliv pevnosti v tlaku použité matrice. Použitou matrici zkoumali pouze u ocelových vláken a z jejich výsledků vyplívá, že v tomto případě záleží na tvaru použitých vláken. Ocelová kroucená vlákna byla totiž schopna více využít matrici s vyšší pevností v tlaku oproti ocelovým hákovým vláknům. Závěrem publikace autoři ještě zmiňují, že najít vždy první bod špičky (tz. first peak point) nelze v počáteční části křivky (pracovním diagramu), zvláště když vzorky stabilně vykazují stabilní odezvu na zpevnění vlákny (Kim a kol., 2008).

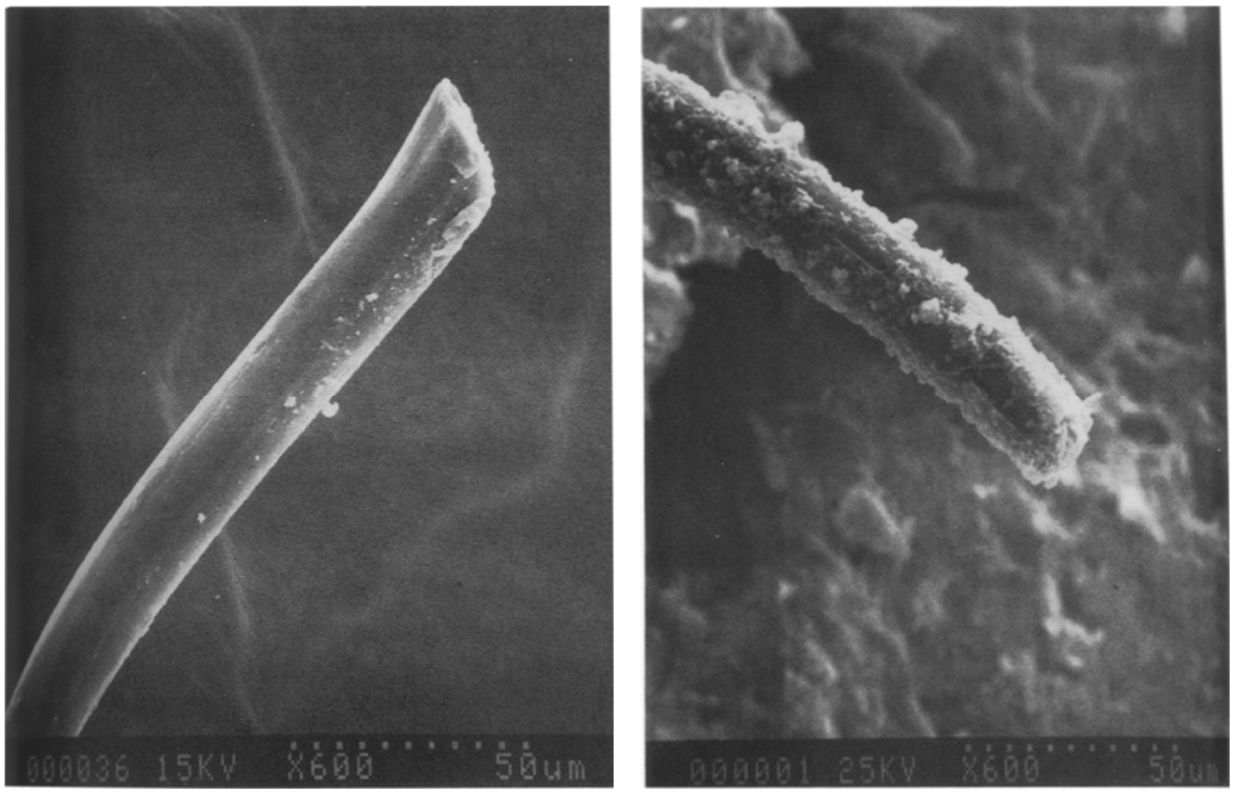
Ohybovému chování cementových kompozitů vyztužených rozptýlenou výztuží (vlákny) se také věnovali autoři Chao a kol. (2009) a Hamoush a kol. (2010). V dalších publikacích se autoři zabývali mechanickými vlastnostmi cementových kompozitů vyztužených vlákny, charakterizací a vlastnostmi vláken. Jednalo se o nylonová, PE vlákna a PVA vlákna (Lee a kol., 2009), (Li a Stangt, 1997), (Wang a Li, 2005) a (Li a kol., 2001). Srovnáním osmi různých druhů vláken se ve své publikaci zabývali autoři Horikoshi a kol. (2006).

2.4 Cementové kompozity vyztužené rozptýlenou výztuží (vlákny) s použitím mikroplniva

V předchozí podkapitole jsem se věnoval cementovým kompozitům vyztuženým rozptýlenou výztuží bez použití mikroplniva. Jelikož autoři Aliabdo a kol., (2014) v již zmiňované publikaci uvádějí, že velice jemný vápencový prášek zlepšuje soudržnost mezi matricí a výztuží, budu se v této podkapitole věnovat právě publikacím, které řeší problematiku cementových kompozitů vyztužených rozptýlenou výztuží v podobě vláken/drátků s využitím nějakého druhu mikroplniva. Z předchozích kapitol je zřejmé, že mikroplnivo v podobě jemného vápencového či mramorového prášku se chová inertně. Tvrzení o inertním chování však nemusí platit u některých prášků z konkrétních lokalit. Mikroplnivo na bázi vápence a mramoru působí částečně jako plastifikační činidlo a při jeho použití vzniká hutnější matrice s menší pórovitostí. Nižší pórovitost, ale může být zároveň způsobena i nižší potřebou vody. Použitím vláken, jako rozptýlené výztuže, do cementového kompozitu dochází ke zhoršení zpracovatelnosti, což je závislé i na obsahu vláken v matrici. Dále dochází ke zlepšení ohybového chování materiálů. Vlákna v matrici odstraňují křehký lom a podle druhu a množství použitých vláken může dojít ke zpevnění či změkčení po vzniku první trhliny. Kombinací využití mikroplniva a rozptýlené výztuže v podobě vláken, tedy spojením dvou výše zmíněných možností z předchozích podkapitol, se budu věnovat v této podkapitole.

Publikace od autorů Betterman a kol. (1995) se zabývá tahovými vlastnostmi malt vyztužených PVA vlákny. Autoři v této publikaci řešili přímé tahové napětí a soudržnost mezi matricí malty a PVA vlákny. Vzorky byly vyrobeny z portlandského cementu CEM I a písku v poměru 1:1. Do směsi bylo ještě přidáno 18 hm. % oxidu křemičitého z hmotnosti cementu a tím bylo dosaženo vodního součinitele voda:pojivu 0,3. Pro zlepšení zpracovatelnosti autoři použili superplastifikátor (WRDA-19 Superplasticizer) ve vysokých dávkách (3 až 5 hm. % z hmotnosti cementu). Pro vyztužení malty byla použita PVA vlákna od japonského výrobce Kuraray Co., Ltd. o různých délkách (4, 7 a 12 mm). Jednalo se o PVA vlákna nerozpustná ve vodě. Průměr vlákna se měnil tak, že k délce vláken měl poměr stran přibližně 300. Použité PVA vlákna měla hustotu 1,3 g/cm3. Autoři vyztužovali malty s množstvím vláken 1, 2 a 4 obj. %. Při použití 1 a 2 obj. % vláken bylo použito 3 hm. % superplastifikátoru a pro 4 obj. % vláken bylo z důvodu zlepšení zpracovatelnosti použito 5 hm. % superplastifikátoru. Autoři zkoušeli také jednu směs připravit z vláken délky 4 mm a délky 12 mm v poměru 1:1 a celkovém množství 4 obj. %. Dále autoři připravovali vzorky pro pull-out testy pro jednotlivé délky vláken. V publikaci předpokládají rozložení vláken ve směru délky vzorku. Alespoň převážnou část vláken v tomto směru, nikoliv ve směru příčném. Pro výrobu

všech směsí měli autoři jednotný postup míchání čerstvé směsi. Autoři pro testování používali vzorky, které byly pomocí broušení pod vodou diamantovým kotoučem upraveny na požadovaný tvar. Broušení probíhalo do tvaru „kosti“, tak aby průřez, ve kterém se vzorky měly porušit, byl o rozměrech 9 × 16 mm. Délka vzorků byla 244 mm. Před testováním tahových vlastností byly na konce vzorků pomocí pryskyřice přilepeny dvě ocelové destičky pro uchycení do testovacího stroje. Dále autoři prováděli pull-out testy na vytažení vlákna z matrice. Vlákna byla vložena do vzorků s průřezem o velikosti 25 × 57 mm. Po provedení destruktivních testů autoři podrobili lomové plochy vzorků pozorování pomocí skenovacího elektronového mikroskopu (SEM). Pomocí SEM analýzy určovali mechanismus selhání, kterým vlákna prošla při zkouškách v prostém tahu. Na snímcích ze SEM je znázorněno jedno vlákno před smíšením do matrice, na kterém je vidět hladký povrch vláken. Na druhém snímku je znázorněno vlákno v lomové ploše. Je zřejmé, že se vlákno vytáhlo z matrice, jelikož není viditelné na jeho konci žádné porušení (selhání) vlákna. Na vlákno jsou navázány částice z matrice což naznačuje dobrou soudržnost mezi vláknem a matricí (Obrázek 17).

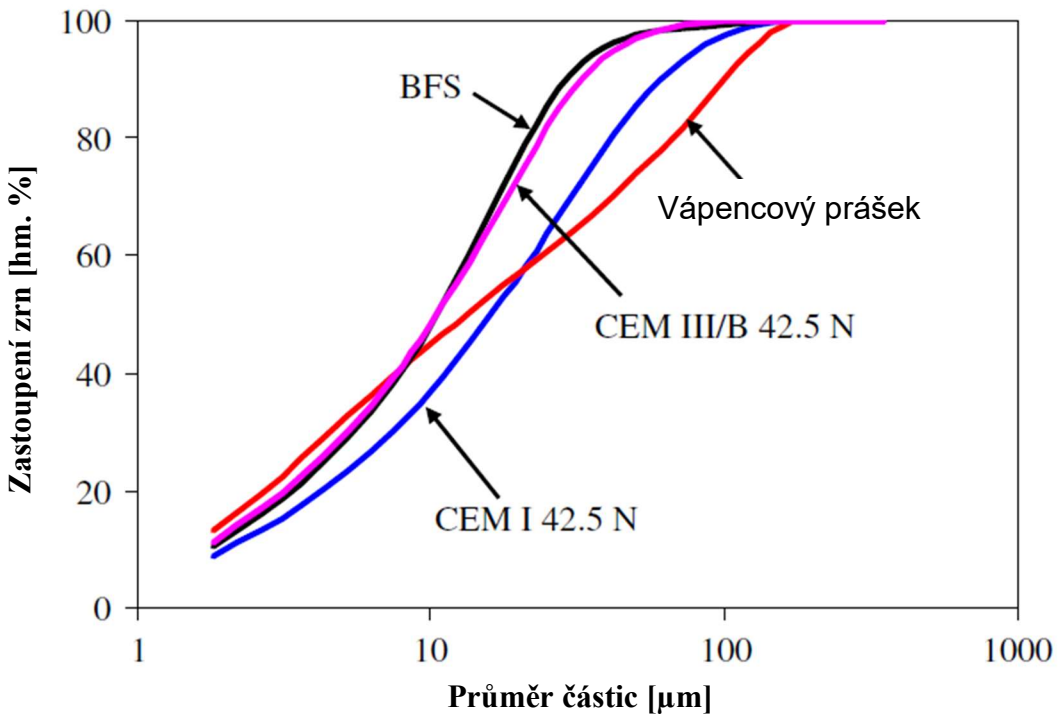


Obrázek 17 – Snímky PVA vláken pomocí SEM. PVA vlákno před smícháním do matrice (vlevo) a PVA vlákno vyčnívající z lomové plochy (vpravo) (Betterman a kol., 1995).

Tahové vlastnosti autoři zjišťovali pomocí lomové energie. Z výsledků zmíněných v této publikaci je zřejmé, že první vrcholové napětí se snižuje v závislosti na zvyšování průměru vlákna. Tento trend je viditelný u všech procentuálních zastoupení vláken. Zároveň autoři zjistili,

že zvětšení průměru vlákna vede ke zvýšení hustoty napětí. Tyto výsledky ukazují, že krátká vlákna o malém průměru jsou účinnější při zvyšování prvního maximálního napětí. Způsobovat to může skutečnost, že otevření a šíření mikrotrhlin je primárně zodpovědné za velikost prvního vrcholu napětí. Velké množství krátkých vláken o malém průměru může efektivně překlenout tyto mikrotrhliny. Na vznik mikrotrhlin navazuje vznik velkých trhlin. Tyto hlavní velké trhliny se otevírají více a tím u krátkých vláken dochází k jejich postupnému vytahování z matrice. Hlavní trhliny naopak nejlépe překlenou zejména delší vlákna. Tato skutečnost vysvětluje, proč čím delší máme vlákna, tím větší je i hustota energie. U vzorků, kdy autoři použili dvě délky vláken (4 a 12 mm) zároveň, zjistili mírný nárůst hodnoty prvního maximálního napětí. Zároveň tato sada vzorků vykazovala vyšší nárůst hustoty deformační energie oproti vzorkům vyrobených z vláken jednotné délky. Při testování na vytažení vláken se autorům zpočátku zatížení zvyšuje. Zároveň, ale sklon křivky klesá. Vytahovací zatížení stále stoupá se skluzem až do vrcholu. Podobné výsledky uvádějí při vytahování polypropylenových a nylonových vláken i autoři Wang a kol. (1988). Autoři svých testů porovnávají s výsledky autorů Li a kol. (1991), ze kterých je patrné, že pevnost ve smyku, pevnost smykové vazby a pevnost třecí vazby u ocelových a PVA vláken jsou podobné. Specifická povrchová energie u PVA vláken je ale mnohem vyšší než u ocelových vláken (Betterman a kol., 1995).

Náhradou cementu vápencovým práškem a vysokopecní struskou se zabývá další publikace od autorů Zhou a kol. (2010). Autoři zkoumali vliv vápencového prášku a vysokopecní strusky při použití v konstrukčním cementovém kompozitu (ECC). ECC je třída cementových kompozitů vyztužených vysoce pevnostními vlákny. V publikaci autoři zkoumali vliv mikroplniva z dvou prášků na vlastnosti čerstvé a zatvrdlé směsi kompozitu. Pro výrobu směsí bylo použito portlandského cementu CEM I 42,5 N. Jako náhradu za cement využívali vápencový prášek a vysokopecní strusku. Jelikož používaný poměr náhrady vysokopecní struskou, který odpovídá hodnotě směsného cementu CEM III/B 42,5 N využili autoři právě tento cement pro zjednodušení. Velikosti částic použitých materiálů byly měřeny pomocí laserové difrakce. Průměrné velikosti části pro CEM I 42,5 N je 16,2 μm, pro vápencový prášek je 13,4 μm, pro vysokopecní strusku je 10,6 μm a pro CEM III/B 42,5 N je 10,7 μm. Křivka zrnitosti všech jemných částic je zobrazena na obrázku 18. Jelikož se jednalo o ECC tak ve všech směsích byl obsah vláken 2 obj. %. Jako vyztužující vlákna byla použita PVA vlákna o délce 8 mm a průměru 40 μm. Pevnost v tahu vláken byla 1600 MPa a hustota vláken byla 1300 kg/m^3. Směs nejprve míchali jako suchou pro homogenizaci jednotlivých jemných částic. Až následně byla přidána voda a superplastifikátor. Po tomto promíchání byla přidána PVA vlákna.

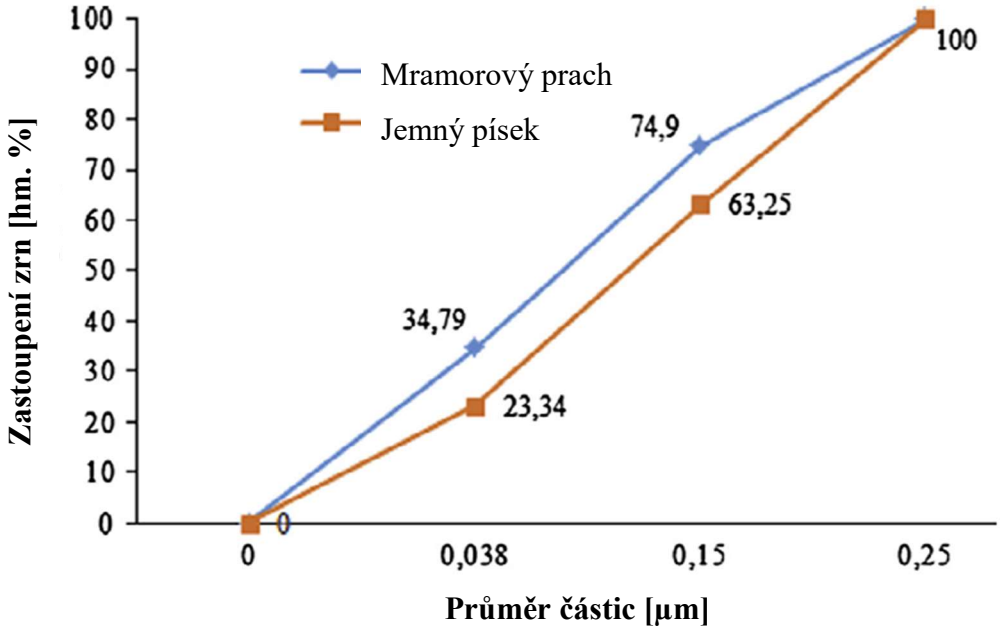


Obrázek 18 – Křivka zrnitosti použitých jemných částic (CEM I 42,5 N, vápencový prášek, BFS a CEM III/B 42,5 N) získaná laserovou difrakcí (Zhou a kol., 2010).

Odformování provedli po 24 hodinách a poté vzorky uložili do uzavřené komory při stálé teplotě 20 °C na dobu 27 dní. Na vzorcích byla zkoumána pevnost v tahu za ohybu pomocí čtyřbodového ohybu, pevnost v tlaku a následně byly vzorky pozorovány pomocí elektronového mikroskopu. Autoři zkoumali několik poměrů náhrady cementu. Ze závěrů, které autoři vyvodili je patrné, že při zvyšování náhrady cementu se zvyšuje i kapacita tahového namáhání. Nejprve se kapacita zvyšuje a poté začíná klesat. Čím více vápencového prášku použijeme, tím menší dostaneme šířku trhliny. Průměrná zatížená šířka trhliny je menší než 100 µm u všech směsí. Směsi měly náhradu za cement až do 15 hm. % prášku. Po 28 dnech tato směs vykazuje vysokou kapacitu pevnosti v tahu a to 3,3 % a pevnost v tlaku 38 MPa s pevnou šířkou trhlin 57 µm. Při použití CEM III/B 42,5 N a přidání prášku z vápence vychází stejné vlastnosti, jako při použití CEM I 42,5 N a přidání náhrady jak prášku z vápence, tak vysokopecní strusky (Zhou a kol., 2010).

Keleştemur a kol. (2014) ve své práci zkoumali vliv použití mramorového prachu a skleněných vláken u cementových malt na odolnost proti cyklům zmrazování a rozmrazování. Vzorky cementové malty vyráběli z portlandského cementu CEM I 42,5 N, mramorového prachu a říčního písku. Mramorový prach získali jako vedlejší produkt při řezání, tvarování a leštění mramorů v provincii Elazig v Turecku. Mramorový prach získávali v mokrém stavu jako mramorový kal. Kal byl před použitím na výrobu vzorků sušen a tříděn proséváním na sítu

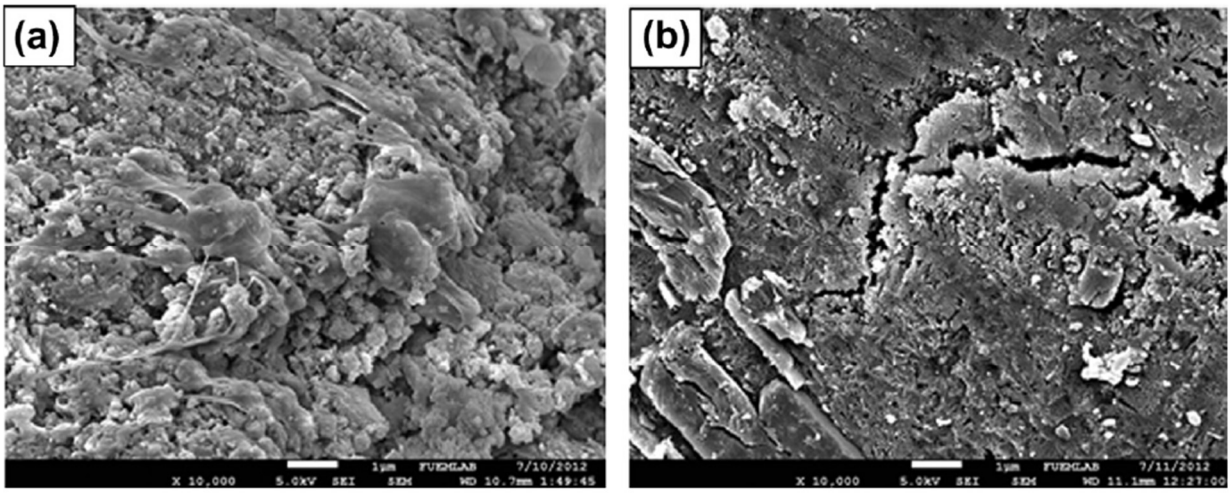
o velikosti oka 0,25 mm. Maximální zrno použitého říčního písku bylo o velikosti 4 mm. Hustota použitého cementu byla 3100 kg/m^3, hustota mramorového prachu byla dle konkrétní lokality, kde byl kal získán, a to 2800 kg/m^3 nebo 2720 kg/m^3 a hustota použitého písku byla 2690 kg/m^3. Říční písek autoři dělili pomocí síta s okem 0,25 mm na frakci 0,25 – 4 mm a na zbytek se zrnem do 0,25 mm. Tento zbytek byl nahrazován v různých procentuálních zastoupeních (0 obj. %, 20 obj %, 40 obj. % a 50 obj. %) mramorovým prachem. Křivka zrnitosti znázorňuje distribuci velikosti zrn u mramorového prachu a jemné frakce písku (Obrázek 19).



Obrázek 19 – Křivka zrnitosti mramorového prachu a velmi jemného písku (Keleştemur a kol., 2014).

Byla použita skleněná kruhová rovná vlákna délky 6 mm a průměru 13 µm. Skleněná vlákna byla použita v množství 0 kg/m^3, 0,25 kg/m^3, 0,5 kg/m^3 a 0,75 kg/m^3. Pro zlepšení zpracovatelnosti do směsí použili superplastifikátor na bázi polykarboxylátu od společnosti SIKA v množství 1 hm. % cementu. Vodní součinitel V/C použili pro vzorky s 0 a 0,25 kg/m^3 vláken o hodnotě 0,492 a pro vzorky s 0,5 kg/m^3 a 0,75 kg/m^3 byla hodnota vodního součinitele V/C rovna 0,495. V závěru publikace autoři shrnuli poznatky, ze kterých vyplívá, že přidání mramorového prachu zvyšuje pevnost v tahu za ohybu i v tlaku, pokud se jedná o náhradu jemného písku mramorovým prachem. To může být způsobeno tím, že mramorový prach částečně vyplní póry v cementové pastě nebo může působit jako ideální můstek v rozhraní mezi jemným pískem a cementovou pastou. Naopak použití skleněných vláken zvyšovalo pevnost v tahu za ohybu, ale snižovalo pevnost v tlaku. Snížení pevnosti v tlaku může být přikládáno špatné adhezi mezi vlákny a maltou. Při zmrazovacích cyklech se u všech cementových malt

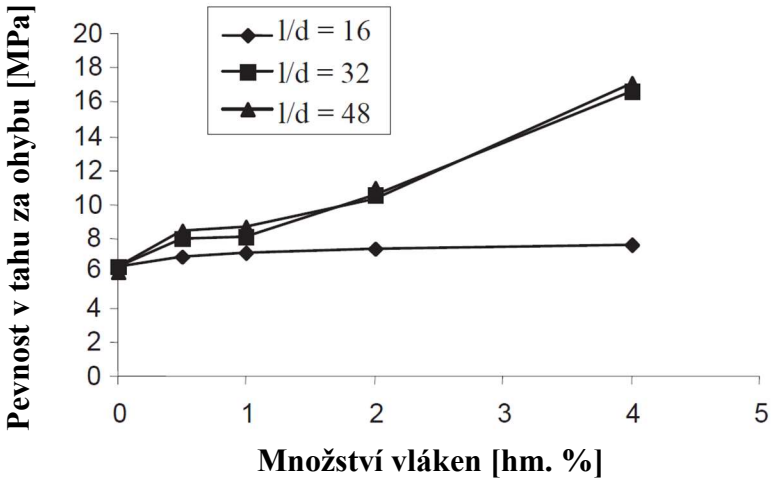
mechanické vlastnosti snižovaly, avšak u malt vyztužených vlákny byl tento pokles menší. Přidání mramorového prachu do malty s vlákny snížilo odolnost proti zmrazovacím cyklům ve srovnání s cementovými maltami pouze s vlákny. Pokles autoři připisovali částicím mramorového prachu, které mohou působit jako mikroplnivo pro póry vytvořené přidáním skleněných vláken do malt. Mikrostrukturu zkoumali autoři SEM analýzou. Obrázek 20 znázorňuje mikrostrukturu vzorku před zmrazovacími cykly (a) a po 30-ti zmrazovacích cyklech (b). Po 30-ti zmrazovacích cyklech je viditelná trhlina (Keleştemur a kol., 2014).



Obrázek 20 – SEM snímky mikrostruktury vzorků před zmrazovacími cykly (a) a po 30-ti zmrazovacích cyklech (Keleştemur a kol., 2014).

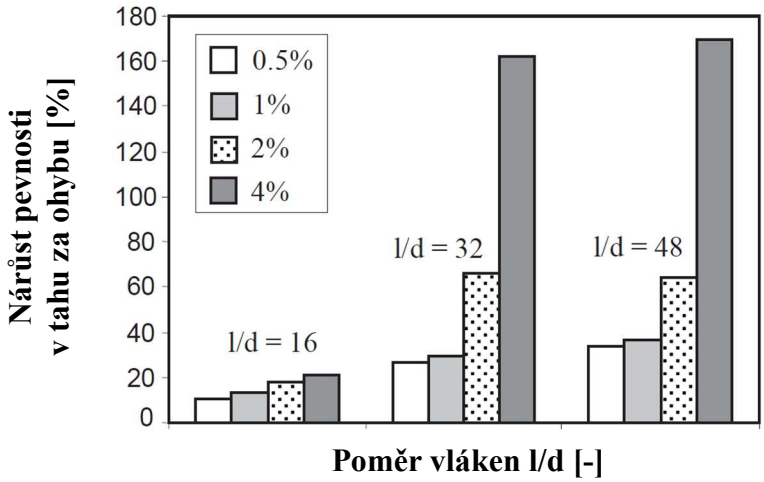
Náhradou písku mramorovým prachem a vyztužením cementového kompozitu se ve své publikaci zabývali autoři Kumar a Jain (2017). Věnovali se vlivu kombinace mramorového prachu a ocelových vláken na mechanické vlastnosti vysokopevnostního betonu. Pro výrobu betonu používali portlandský cement. Základně se jednalo o vysokopevnostní beton C 60/75. Ve své práci nahrazovali písek mramorovým prachem v množstvích 0 hm. %, 15 hm. %, 30 hm %, 45 hm.% a 60 hm. %. Ve všech směsích byl stejný obsah ocelových vláken a to 0,8 obj. %. Pro všechny směsi byl zachován stejný vodní součinitel v/c na hodnotě 0,31. Pro zlepšení zpracovatelnosti použili superplastifikátor BASF-PCE BASE 50 ve všech směsích v množství 1 hm. % cementu. V závěru publikace uvádějí, že zvyšování obsahu mramorového prachu zhoršovalo zpracovatelnost. Tento závěr odporuje většině publikací, které jsem rozebíral ve své bakalářské práci i v předchozích kapitolách. Autorům při testování pevnosti v tlaku pevnost rostla až do použití 45 hm. % náhrady a poté pevnost v tlaku začala klesat. Při nižším vodním součiniteli v/c je použití mramorového prachu účinnější. Největšího nárůstu pevnosti v tlaku dosáhli autoři u 45 hm. % náhrady mramorového prachu za písek. Pevnost v tlaku při 45% náhradě se zvýšila přibližně o 9 % při stáří vzorků 28 dní. U pevnosti v tahu za ohybu byl nárůst pevnosti patrný také až do 45 hm. % náhrady za písek. Největší pevnosti v tahu

za ohybu bylo dosaženo při 15 hm. % náhrady mramorového prachu za písek. Nárůst pevnosti v tahu za ohybu při 15 ˇhm. % náhrady byl přibližně 15 % oproti referenční směsi bez náhrady mramorového prachu za písek při stáří vzorků 28 dní. Zvýšení pevnosti v tahu za ohybu je dle autorů způsobeno nižším modulem jemnosti. Nižší modul jemnosti zajišťuje lepší soudržnost materiálu (Kumar a Jain, 2017).Autoři Bendjillali a kol. (2011) se zaměřili na využití drceného vápencového odpadu jako náhrady za říční písek a vyztužením malty polypropylenovými vlákny pocházejících z výroby domácích kartáčů a košťat. Ve své práci se věnovali fyzikálním a mechanickým vlastnostem cementových malt vyztužených PP vlákny s použitím vápencového písku získaného z průmyslového závodu v blízkosti města Laghouat v Jižním Alžíru. Pro výrobu vzorků o velikosti 40 × 40 × 160 mm používali portlandský cement CEM I 42,5 R o hustotě 3 g/cm^3 a měrným povrchem 3200 cm^2/g. Chemické složení použitého cementu bylo 65,9 % CaO, 21,94 % SiO_2, 4,82 % Al_2O_3, 3,94 % Fe_2O_3, 1,65 % MgO, 0,98 % SiO_3, 0,6 % K_2O a 0,1 % Na_2O. Drcený vápencový písek měl maximální velikost zrn 2 mm, měrnou hmotnost 2,52 a modul jemnosti 1,8. Použitá polypropylenová vlákna měla průměr 0,62 mm s poměrem délka/průměru (l/d) 16, 32 a 48. Vlákna měla měrnou hmotnost téměř 1,0, tažnost (deformaci) 58 %, pevnost v tahu 86 MPa a nulovou absorpci. Vodní součinitel v/c autoři drželi konstantní pro všechny směsi na hodnotě 0,78 a poměr písek/cement na hodnotě 3. Autoři zhotovili směsi s množstvím PP vláken 0 hm. %, 0,5 hm. %, 1 hm. %, 2 hm. % a 4 hm. %. Vzorky byly po odformování uloženy ve vodní lázni při teplotě 20 °C až do doby testování. Pro zjištění pevnosti v tahu za ohybu využili zkoušku tříbodovým ohybem a dále testovali pevnost v tlaku. Obě pevnosti testovali podle francouzské normy EN 196-1. Pevnost v tahu za ohybu se zvyšuje s procentuálním obsahem a poměrem l/d polypropylenových vláken (Obrázek 21).



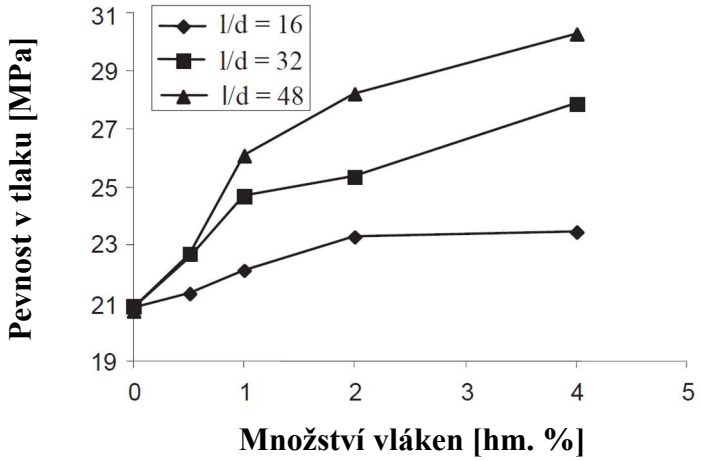
Obrázek 21 – Pevnost v tahu za ohybu v závislosti na množství vláken (Bendjillali a kol., 2011).

Vývoj pevnosti v tahu za ohybu je nejlépe oceněn u obsahu 2 hm. % vláken. Je to zdůvodněno prospěšnou úlohou zabraňovat vzniku trhlin. Při obsahu vláken pod 2 hm. % je tento efekt nevýznamný. Obsah vláken je hlavním faktorem ovlivňujícím mechanické vlastnosti a je potřeba stanovit optimální obsah vláken potřebný pro zvýšení pevnosti v tahu za ohybu. Použití polypropylenových vláken s poměrem l/d = 16 podle následujícího grafu způsobuje pouze malé zlepšení pevnosti v tahu za ohybu (Obrázek 22). Avšak vlákna s poměrem l/d = 32 a 48 dávají stejné zlepšení, které je u vláken s poměrem l/d = 32 přibližně 26 % pro obsah vláken 0,5 hm. % a přibližně 162 % pro obsah vláken 4 hm. %. U vláken s poměrem l/d = 48 je zlepšení na hodnotě přibližně 34 % pro obsah vláken 0,5 hm. % a přibližně 170 % pro obsah vláken 4 hm. %. Přítomnost polypropylenových vláken do obsahu 0,3 hm. % mají velice malý vliv na zlepšení pevnosti v tahu za ohybu.



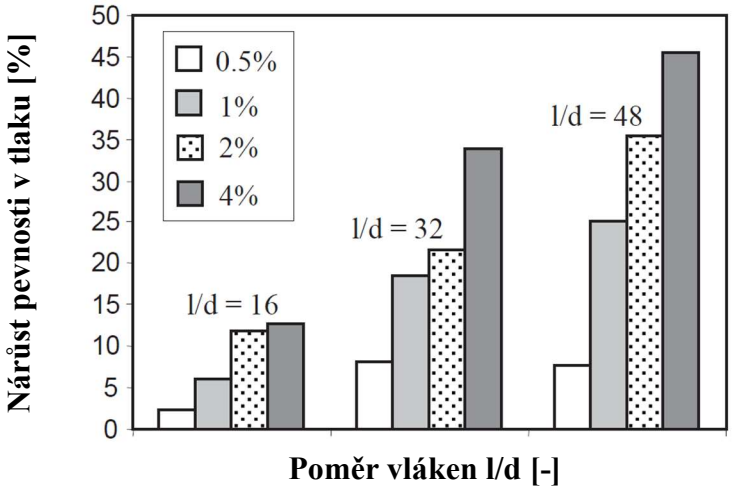
Obrázek 22 - Nárůst pevnosti v tahu za ohybu vzorků ve srovnání s maltami bez vláken (Bendjillali a kol., 2011).

Pevnost v tlaku se viditelně zvyšuje v závislosti na množství polypropylenových vláken, ale také v závislosti na poměru l/d (Obrázek 23).



Obrázek 23 – Pevnost v tlaku v závislosti na množství vláken (Bendjillali a kol., 2011).

Z následujícího grafu (Obrázek 24) je patrné, že zlepšení pevnosti v tlaku ve srovnání s maltami bez vláken je mnohem menší, než bylo zjištěno u pevností v tahu za ohybu. U vláken s poměrem l/d = 48 je zlepšení pevnosti v tlaku přibližně o více než 7 % pro obsah vláken 0,5 hm. % a přibližně o více než 45 % pro obsah vláken 4 hm. %. U většiny výzkumů bylo z výsledků patrné u pevnosti v tlaku jen nepatrné zvýšení pevnosti v tlaku nebo nedošlo k žádnému zlepšení. Možným důvodem tohoto chování u pevnosti v tlaku je špatná homogenita kompozitu, vysoký obsah vody nebo velký obsah vláken zapříčiňující horší kompaktnost kompozitu.



Obrázek 24 – Nárůst pevnosti v tlaku vzorků ve srovnání s maltami bez vláken (Bendjillali a kol., 2011).

V závěru autoři navíc uvádí zjištěné skutečnosti jako je zhoršení zpracovatelnosti při použití polypropylenových vláken. Při použití více než 1 hm. % polypropylenových vláken je podle autorů nutností využít superplastifikátor. Dále uvádí, že použití vláken převážně ovlivňuje pevnost v tahu za ohybu. Pevnost v tlaku přidání vláken neovlivní nebo přinese jen malé zlepšení. Při použití více než 2 hm. % vláken dochází pouze ke vzniku trhlin, ale vlákna zabraňují zlomení (přetržení) vzorku (Bendjillali a kol., 2011).

Další publikace zabývající se problematikou kombinace mikroplniva a rozptýlené výztuže v cementovém kompozitu nebo betonu se věnoval autor Yun (2013), který se zabýval vyztuženými kompozity pomocí PVA a PE vláken a vlivem křemičitého mikroplniva na mrazuvzdornost. Keleştemur a kol. (2014) se věnovali vlivem mramorového prachu a skleněných vláken na odolnost proti vysokým teplotám. Mechanickými vlastnostmi a optimálním množstvím vláken se zabývala publikace s mramorovým prachem a ocelovými vlákny (Pund a kol., 2016). Samozhutnitelný beton s mikroplnivem a různými typy vláken řešili ve své publikaci autoři Corinaldesi a Moriconi (2011).

3 Cíle diplomové práce

Cílem diplomové práce je zjištění vlivu mikromletého odpadního materiálu na bázi vápence a vlivu vyztužení pomocí rozptýlené výztuže z PVA vláken. Dále je cílem návrh optimálního složení směsí. V první fázi návrh směsí pouze s použitím různých množství mikromleté vápencové moučky a zjištění vlivu samotné mikromleté moučky na vlastnosti cementového kompozitu. V druhé fázi návrh směsí pro zjištění vlivu mikromleté vápencové moučky spolu s různými obsahy PVA vláken jako rozptýlené výztuže.

Nejprve je nutné navrhnout směsi pro první fázi výroby vzorků a zjistit podle vybraných mechanických vlastností obsahy mikromleté vápencové moučky pro výrobu vzorků v druhé fázi. Pro druhou fázi navrhnout složení ucelené řady sad vzorků cementového kompozitu s mikroplnivem v podobě mikromleté vápencové moučky a vyztuženého rozptýlenou výztuží z PVA vláken. Obsah mikromleté moučky byl stanoven od 0 hm. % do 50 hm. % náhrady za cement. Rozsah obsahů mikromleté vápencové moučky byl zvolen podle výsledků publikace od autora Prošek (2016). Rozsah obsahu PVA vláken ve směsích byl volen s ohledem na vyhledané publikace zmíněné v předchozí kapitole 2. Rozsah PVA vláken byl stanoven od 1 hm. % do 4 hm. % z hmotnosti všech jemných vstupních surovin v suchém stavu. Vstupní suroviny pro návrh složení směsí a navržené složení směsí řeším v kapitole 4.1.

V první fázi na vzorcích zjišťuji vybrané mechanické vlastnosti pro následující volbu množství mikromleté vápencové moučky. V první fázi je testování prováděno pouze pomocí destruktivních zkoušek. Následně na vyrobených vzorcích pro druhou (hlavní) fázi zjišťuji vybrané mechanické vlastnosti pomocí nedestruktivního i destruktivního testování. Jednotlivé výsledky mechanických vlastností a jejich měření pomocí experimentálních metod jsem popsal v kapitolách 4.2 až 4.4. Vždy je uveden popis zkušební metody, způsob vyhodnocení zkoušek a výsledky zkoušek s diskuzí.

4 Praktická část

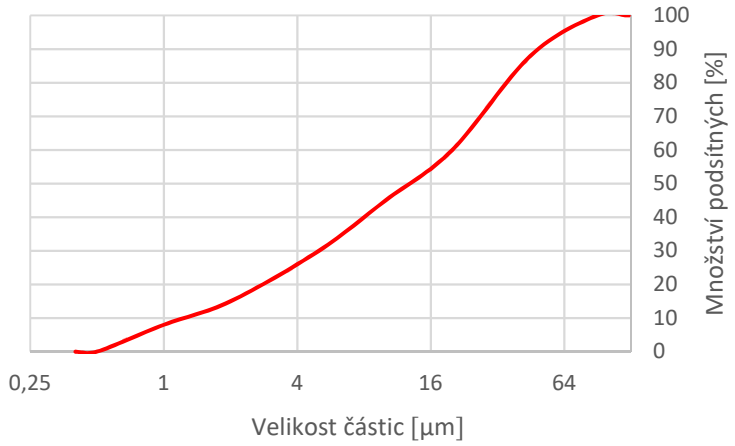
Praktická část této práce je zaměřena na stanovení vybraných mechanických vlastností cementového kompozitu s použitím odpadního materiálu na bázi vápence a rozptýlené polymerní výztuže. Odpadní materiál na bázi vápence je použit jako mikroplnivo ve formě mikromleté vápencové moučky. Rozptýlená výztuž je použita v podobě PVA mikrovláken. Práce řeší vliv mikromleté vápencové moučky v různých poměrech a vliv PVA vláken v různých množství na vybrané mechanické vlastnosti cementového kompozitu. Vlastnosti byly zjišťovány pomocí nedestruktivních i destruktivních zkušebních metod.

4.1 Použité materiály a návrh složení směsí

Pro výrobu vzorků byl použit portlandský cement CEM I 42,5R z výrobny v Radotíně, vápencové odprašky a odpadní drť (úlomky) frakce 0 - 2 mm z oblasti západního břehu Jordánu a PVA vlákna KURARAY REC 15 × 12 od japonského výrobce KURARAY. Jednotlivé vstupní suroviny a návrh složení směsí podrobněji popisuji v této podkapitole.

Cement

Použitý cement pochází z výrobního závodu společnosti Českomoravský cement, a.s. v Radotíně. Pro výrobu vzorků cementového kompozitu vyztuženého PVA vlákny byl použit portlandský cement CEM I 42,5R. Křivka zrnitosti cementu vyobrazená na obrázku je použita pro porovnání s křivkou zrnitosti použitého mramorového kalu (Obrázek 25). Vybrané mechanické, fyzikální a chemické vlastnosti použitého cementu jsou uvedeny v tabulce od výrobce cementu (Tabulka 5). Vlastnosti byly získané z technického listu výrobce.



Obrázek 25 – Křivka zrnitosti cementu (Českomoravský cement, a.s.)

Tabulka 5 – Specifikace použitého cementu CEM I 42,5 R (Českomoravský cement a.s.).

Parametr		Průměrná hodnota	Metodika
Mechanické vlastnosti			
Pevnost v tlaku [MPa]	1 den	16	EN 196-1
	7 dní	50	EN 196-1
	28 dní	59	EN 196-1
Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	1 den	4	EN 196-1
	7 dní	9	EN 196-1
	28 dní	9	EN 196-1
Fyzikální vlastnosti			
Normální konzistence [%]		28,3	EN 196-3
Počátek tuhnutí [min]		185	EN 196-3
Konec tuhnutí [min]		258	EN 196-3
Objemová stálost [mm]		1,2	EN 196-3, Le Chatelier
Měrný povrch [m^2/kg]		361	EN 196-6, Blaine
Měrná hmotnost [kg/m^3]		3080	EN 196-6
Hydratační teplo [J/g]	7 dní	320	EN 196-8
Chemické vlastnosti			
Obsah [%]	CaO	64,9	EN 196-2
	SiO_2	19,8	EN 196-2
	Al_2O_3	4,2	EN 196-2
	Fe_2O_3	2,6	EN 196-2
	MgO	1,8	EN 196-2
	SO_3	3,0	EN 196-2
	Cl^-	0,062	EN 196-2
	K_2O	3,01	EN 196-2
	Na_2O	0,16	EN 196-2
Na_2O ekvivalent [%]		0,6	EN 196-2
Nerozpustný zbytek [%]		1,2	EN 196-2
Ztráta žíháním [%]		3,1	EN 196-2

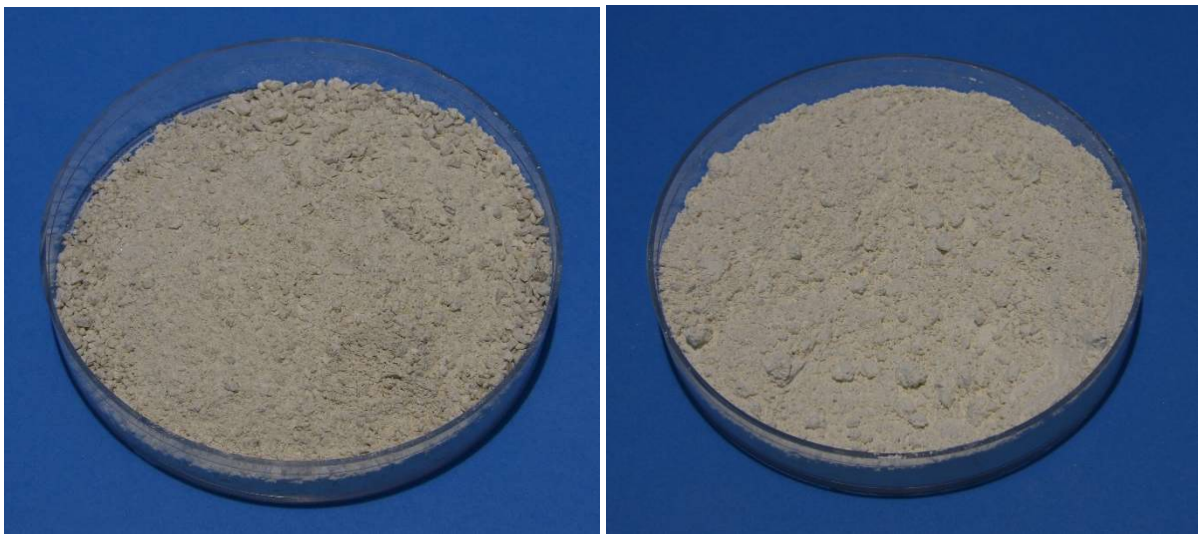
Vápencový prášek

Vápencové odprašky a vápencové úlomky frakce 0 - 2 mm je odpadní materiál z vápencového průmyslu, vznikající během procesu zpracovávání vápence (těžba, drcení, řezání, broušení). Použitý odpadní materiál na bázi vápence pochází z průmyslové oblasti na západním břehu Jordánu. Obsah $CaCO_3$ v námi použité vápencové moučce byl podle analýzy provedené na vysoké škole chemicko-technické v Praze stanoven přibližně na 99 hm. %. Ostatní příměsi jako jsou jíly, písky a další nečistoty ze zpracovávání měly obsah okolo 1 hm. %. Tyto výsledky je možné také usuzovat z chemického prvkového složení a atomových hmotností. Chemické složení vápencové moučky je uvedeno v následující tabulce (Tabulka 6).

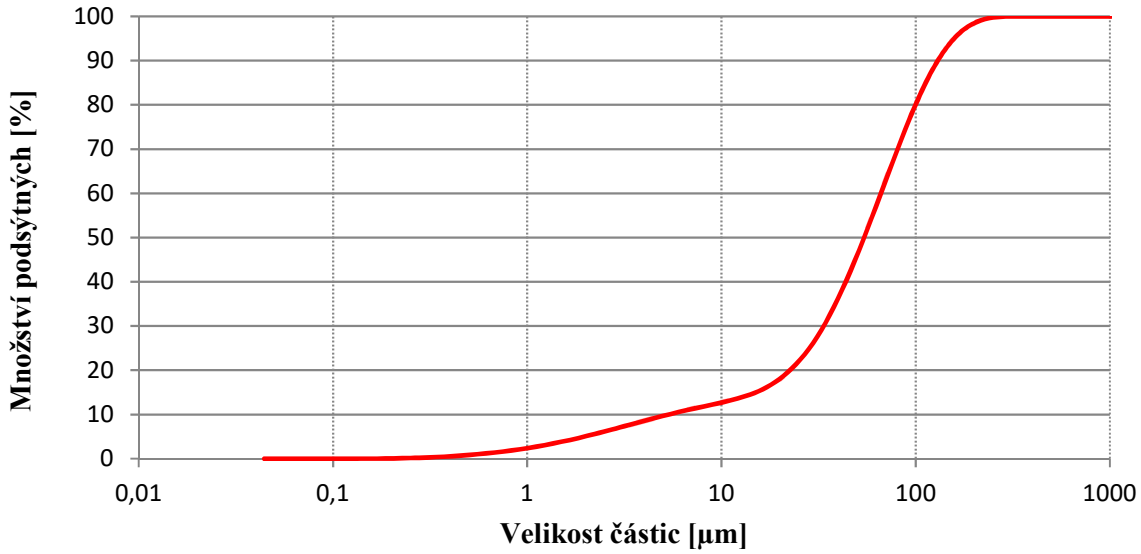
Tabulka 6 – Chemické složení mikromleté vápencové moučky.

Chemické složení			
Prvek	**Obsah [hm. %]**	**Sm. odchylka [hm. %]**	**Atomová hm. [%]**
C	19,29	0,31	32,04
O	37,02	0,43	46,15
Na	0,00	0,00	0,00
Mg	0,23	0,04	0,18
Al	0,00	0,00	0,00
Si	0,00	0,00	0,00
S	0,00	0,00	0,00
Ca	43,46	0,32	21,63
Mn	0,00	0,00	0,00
Fe	0,00	0,00	0,00

Vápencové odprašky a vápencové úlomky, jako odpadní materiál, byly pomocí vysokorychlostních mlýnů mlety z důvodu předpokladu lepší zpracovatelnosti a zlepšení vlastností jako zvětšení měrného povrchu, zmenšení velikosti zrn apod... Mletí bylo provedeno ve firmě LAVARIS. Výsledkem byla mikromletá vápencová moučka se střední velikostí zrn 58,2 μm a maximální velikostí zrn 249 μm. Surový odpadní materiál a výsledná mikromletá vápencová moučka jsou pro porovnání zobrazeny na následujících obrázcích (Obrázek 26). Na křivce zrnitosti (Obrázek 27) je znázorněna zrnitost mikromleté vápencové moučky. Jemnost mletí mikromleté vápencové moučky je větší než u portlandského cementu, což je patrné z porovnání křivek zrnitosti (Obrázek 25 a Obrázek 27). Ostatní zjištěné fyzikální vlastnosti vápencové moučky jsou uvedeny v tabulce pod obrázky (Tabulka 7).



**Obrázek 26 – Vápencový odpadní materiál – vlevo,
Mikromletá vápencová moučka – vpravo.**



Obrázek 27 – Křivka zrnitosti mikromleté vápencové moučky.

Tabulka 7 – Fyzikální vlastnosti použité vápencové moučky.

Fyzikální vlastnosti		
Parametr	**Průměrná hodnota**	**Metodika**
Měrný povrch [m^2/kg]	1187	EN 196-6, Blaine
Měrná hmotnost [kg/m^3]	2700	EN 196-6
Střední velikost zrn D_{50} [µm]	58,2	EN 196-6
Maximální velikost zrna [µm]	249	EN 196-6

PVA vlákna

Pro výrobu vzorků byla použita mikrovlákna od firmy Kuraray CO., LTD.. Jedná se konkrétně o vlákna vyráběná a produkovaná pod názvem KURARAY REC 15 × 12 (Obrázek 28). Vlákna jsou vyrobena z PVA (Polyvinylalkohol). Vlákna jsou dodávána v papírových pytlích. Vlákna v balení tvořila menší shluky několika jednotlivých vláken. Fyzikální a mechanické vlastnosti použitých PVA vláken jsou uvedeny v následující tabulce pod obrázkem (Tabulka 8).

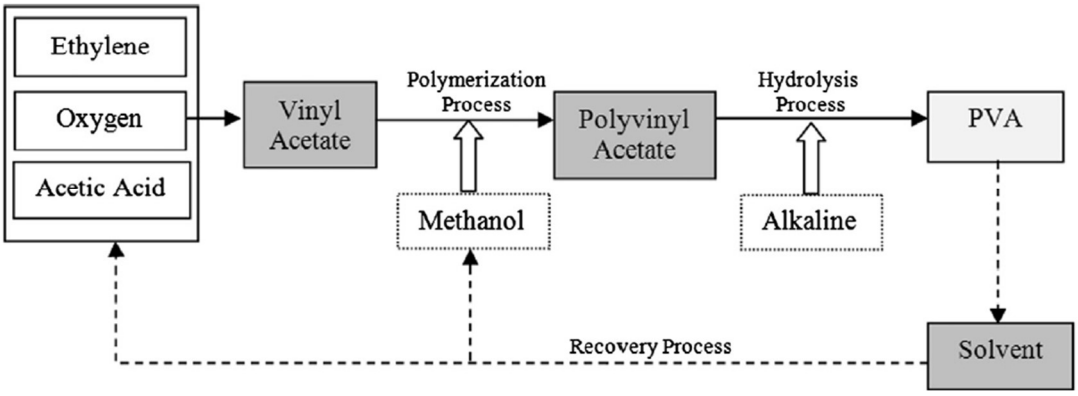
Obrázek 28 – Použitá PVA vlákna KURARAY REC 15 × 12.

Tabulka 8 – Fyzikální a mechanické vlastnosti použitých PVA vláken.

Fyzikální vlastnosti		
Parametr	**Průměrná hodnota**	**Jednotka**
Průměr vláken	40	[μm]
Délka vláken	12	[mm]
Objemová hmotnost	1300	[kg/m^3]
Mechanické vlastnosti		
Parametr	**Průměrná hodnota**	**Jednotka**
Modul pružnosti	13950	[MPa]
Pevnost v tahu	630	[MPa]

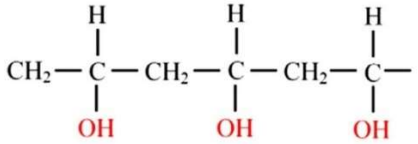
PVA vlákna jsou velmi využívána jako rozptýlená výztuž v cementových kompozitech. Jsou jedny z nejvyužívanějších organických vláken pro tento typ použití. PVA vlákna mají vysokou pevnost v tahu, vysoký modul pružnosti, nízké protažení přibližně 7 – 10 %, malou

objemovou hmotnost a relativně nízkou pořizovací cenu v porovnání s jinými druhy vláken. PVA vlákna se vyrábějí z bílého amorfního PVA prášku. Výroba samotného PVA je znázorněna na schématickém obrázku (Obrázek 29), který ve své práci uvedl Thong a kol. (2016). Společně se schématem výroby na dalším obrázku uvádí výsledný produkt PVA neboli polyvinylalkoholu ve formě amorfního prášku (Obrázek 30). PVA vlákna jsou z tohoto prášku vytlačována. PVA obsahuje hydroxylové skupiny (OH), mající potenciál tvořit vodíkovou vazbu mezi molekulami. Strukturu PVA vlákna zobrazuje další obrázek (Obrázek 31) (Noushini a kol., 2013). Mezi cementovou matricí a PVA vlákny vzniká velmi silná vazba, což je jedním z významných faktorů k častému využití PVA vláken v cementovém kompozitu. Předpokladem je schopnost PVA vláken přitahovat ionty Ca^{+} a OH^{-}, které jsou obsažené v cementové pastě. Vzniká kontaktní vrstva $Ca(OH)_2$, která zesiluje vazbu mezi PVA vlákny a cementovou matricí. Při porovnání s jinými polymerními vlákny je tato vazba silnější (Topič, 2013).



Obrázek 29 – Schéma výroby PVA (polyvinylalkoholu) (Thong a kol., 2016).

Obrázek 30 PVA v práškové formě (Thong a kol., 2016).



Obrázek 31 – Struktura PVA vlákna (Noushini a kol., 2013).

Zkušební vzorky a jejich výroba

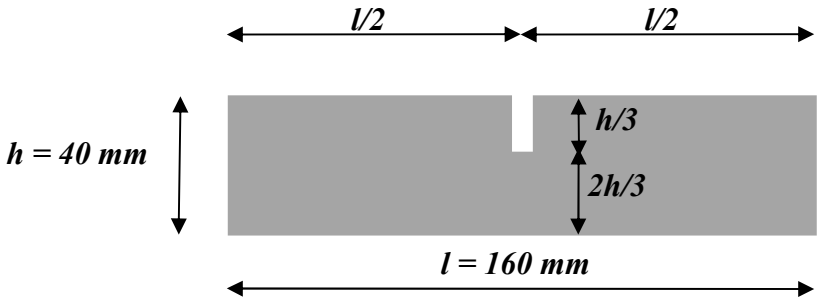
Zkušební vzorky byly vyráběny ve dvou fázích. V první fázi se jednalo o výrobu menších vzorků cementového kompozitu s použitím různého množství vápencové moučky bez použití vláken. První fáze výroby vzorků sloužila pro výběr směsí matrice pro druhou fázi výroby. V první fázi byly vyráběny vzorky ve tvaru trámků o rozměrech 20 × 20 × 100 mm. Při výrobě byly zhotoveny čtyři směsi o různém obsahu vápencové mikromleté moučky. Byly tedy vyrobeny čtyři sady a každá sada obsahovala tři vzorky. Složení směsí je sepsáno v následující podkapitole „Složení směsí“. Všechny vzorky byly použity pro testování 21denních vlastností pomocí destruktivních zkoušek pro zjištění pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku.

Po vyhodnocení zkoušek prováděných na vzorcích z první fáze výroby, byly vyráběny vzorky pro druhou fázi. Zkušební vzorky pro druhou fázi byly vyráběny o rozměrech 40 × 40 × 160 mm. Při výrobě bylo zhotoveno devět různých směsí, tedy devět sad vzorků. Každá sada obsahovala 6 vzorků. Ve druhé fázi se jednalo o vzorky vyrobené z cementu, různých náhrad vápencové moučky za cement a různé obsahy vláken. Složení jednotlivých směsí je sepsáno v následující podkapitole „Složení směsí“. Všechny vzorky byly nedestruktivně testovány při stáří vzorků 1 den, 7 dní, 14 dní, 21 dní a 28 dní. Všechny vzorky od každé sady byly použity pro destruktivní testování po 28 dnech stáří vzorků. Destruktivní testování bylo prováděno pro zjištění pevnosti v tlaku a pevnosti v tahu za ohybu. K vytvoření pracovních diagramů jednotlivých vzorků sloužil záznam síly a posunu při zkoušce tříbodovým ohybem.

Výroba a měření mechanických vlastností zkušebních vzorků probíhalo v laboratořích Fakulty stavební ČVUT v Praze. Výroba vzorků pro první fázi byla míchána ručně. Při výrobě vzorků pro druhou fázi bylo k míchání použito elektrické ruční míchadlo od výrobce Hitachi s nastavitelnou rychlostí otáček. Vždy byly nejprve smíchány všechny vstupní suroviny v suchém stavu pro lepší homogenizaci jednotlivých složek směsi. Promísení suchých složek probíhalo vyšší rychlostí přibližně jednu minutu. Poté byla postupně přidávána záměsová voda. Po dobu přidávání vody bylo míchání prováděno na nejnižší rychlost otáček po dobu přibližně jedné minuty. Poté byla směs další minutu míchána na vyšší rychlost po přibližně půl minutové pauze pro „odpočinutí“ směsi. Směs byla ukládána do předem vymazaných forem odbedňovacím olejem a průběžně hutněna. Formy k tuhnutí a tvrdnutí byly uloženy v laboratorním prostředí jako byly uloženy vzorky po odformování. Po odformování vzorků, které proběhlo druhý den od výroby vzorků, následovalo uložení volně v laboratorním prostředí při teplotě 22 ± 1 °C a při relativní vlhkosti vzduchu 50 ± 2 %. Vzorky byly uloženy ve stejném prostředí po celou dobu, než byly použity k testování. Vždy po nedestruktivním testování došlo k navrácení vzorků do stejného laboratorního prostředí.

Příprava zkušebních vzorků pro zkoušky pevnosti v tahu za ohybu

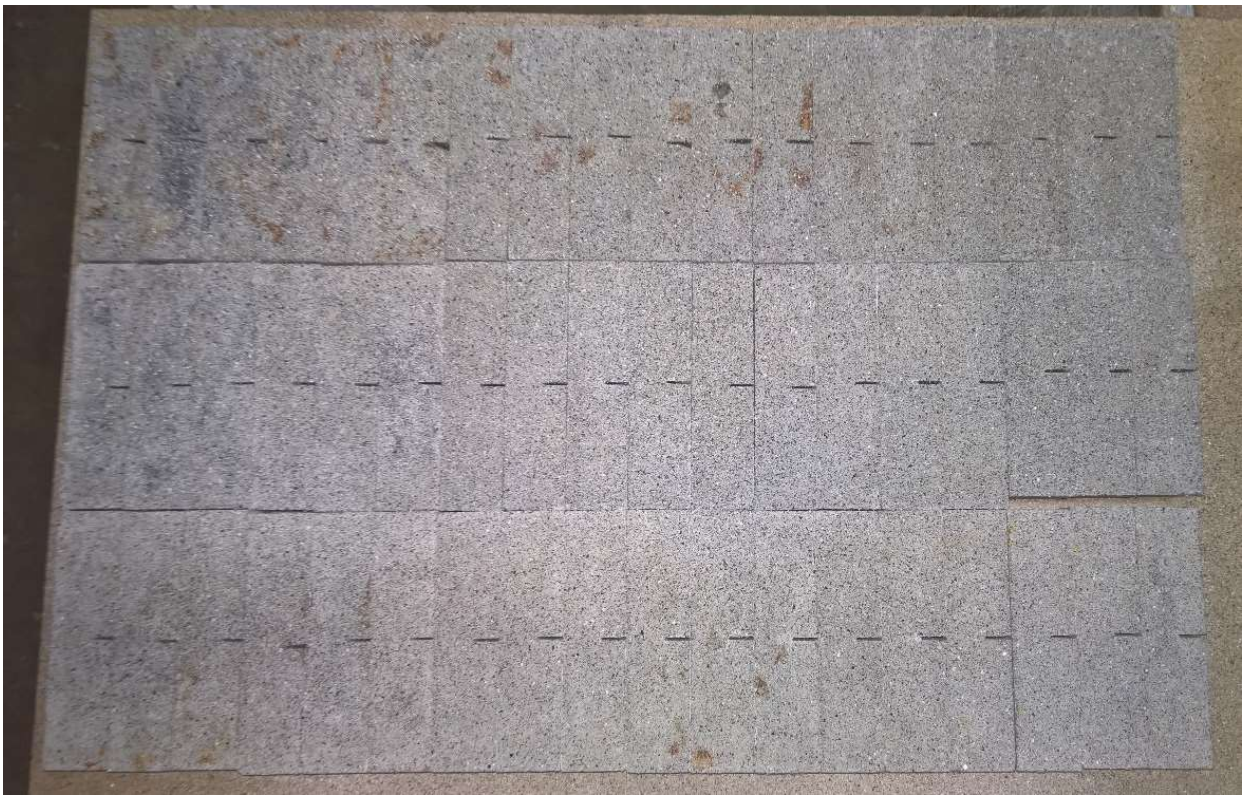
Zkušební vzorky po provedení všech nedestruktivních testování při stáří vzorků 28 dní byly připraveny na destruktivní testování. Příprava vzorků spočívala ve vytvoření vrubů pro testování pevnosti v tahu za ohybu pomocí zkoušky tříbodovým ohybem. Nejprve byl vyroben přípravek pro zachování stejné výšky od podkladní dřevěné rovné desky. Přípravek byl k desce připevněn pomocí svorek. Do přípravku byly vzorky umístěny a připevněny pomocí plastových klínků pro aretaci vzorků ve správné poloze. Přípravek lze nastavovat pomocí ocelových podložek pro vytvoření stanovené hloubky vrubu. Hloubka vrubu byla volena přibližně na 1/3 celkové šířky vzorku. Vzniklé vruby měli hloubku přibližně 15 mm. Vrub byl vytvořen pomocí elektrické úhlové brusky s diamantovým řezným kotoučem určeným pro řezání betonu. Jednalo se o diamantový řezný kotouč pro řezání a broušení betonu a vytváření užších řezů než standardními diamantovými řeznými kotouči od firmy NorWit, s.r.o. Vytvořené vruby měly šířku přibližně 2 mm. Zachovaná část vzorků byla o rozměrech přibližně 25 mm. Následující obrázky znázorňují schéma připraveného vrubu (Obrázek 32) a fotografii vzorků umístěných v přípravku a úhlovou brusku s použitým řezným kotoučem (Obrázek 33).



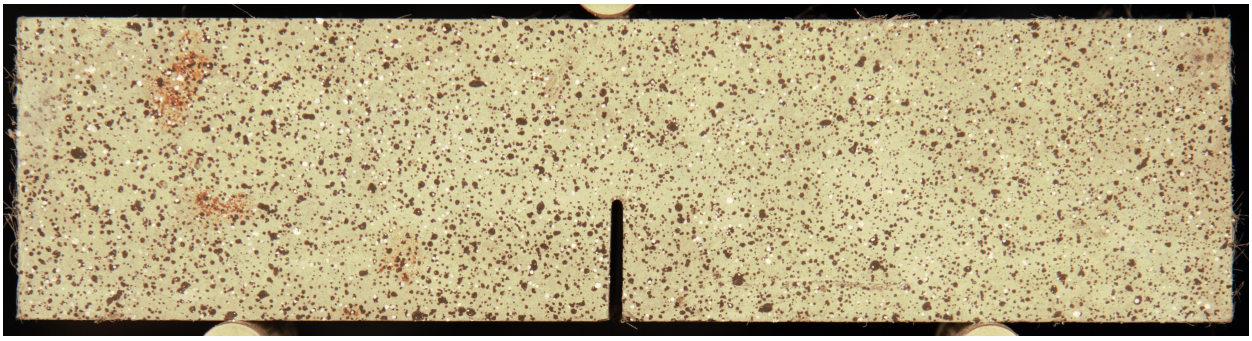
Obrázek 32 - Schéma vytvořeného vrubu ve zkušebním vzorku.

Obrázek 33 – Příprava vzorků s vrubem – řezání úhlovou bruskou pomocí diamantového řezného kotouče na beton.

Po vytvoření vrubů na všech zkušebních vzorcích byly vzorky očištěny pomocí vzduchu. Následovala příprava vzorků pro focení a možnost vyhodnocení průběhu deformace pomocí metody digitální korelace obrazu (DIC). Na vzorku bylo nutné vytvořit strukturu („krupičku“), jako vytvoření jednotlivých bodů. Posuny těchto vytvořených bodů se vyhodnocují pomocí metody DIC. Připravené, nastříkané vzorky zobrazuje následující fotografie (Obrázek 34). Další fotografie zobrazuje jeden z připravených zkušebních vzorků s vytvořeným vrubem a strukturou pro vyhodnocování deformací pomocí metody DIC (Obrázek 35).



Obrázek 34 – Připravené vzorky s vrubem po nástřiku krupičky černé a bílé barvy (vytvoření rastru pro DIC).



Obrázek 35 – Fotografie vytvořené struktury na zkušebním vzorku s vrubem pro vyhodnocení deformací metodou DIC.

Složení směsí – vzorky pro první fázi

Pro první fázi byly vyráběny vzorky ve tvaru trámků menších rozměrů pro následný výběr matrice pro další fázi výroby vzorků a testování. Složení směsí bylo navrženo pro dva vodní součinitele v/c. Konstantní množství vody zajistilo zjištění vlivu mikromleté vápencové moučky na zpracovatelnost a plastifikační účinky, které zjistili autoři publikací zmíněných v kapitole „2. Současný stav problematiky“. Použité vstupní suroviny jsou popsány v této kapitole v předchozích odstavcích. Testované materiály měly vždy stejnou celkovou hmotnost vstupních surovin. Množství vstupních surovin bylo počítáno v suchém stavu. Označení sad směsí uvádí obsah cementu a mikromleté vápencové moučky v hmotnostních procentech (Tabulka 9). V označení sady je vodní součinitel v/c = 0,3 označen písmenem „*a*“ a pro vodní součinitel v/c = 0,4 označení písmenem „*b*“.

Tabulka 9 – Složení jednotlivých sad vzorků pro první fázi (20 × 20 × 100 mm).

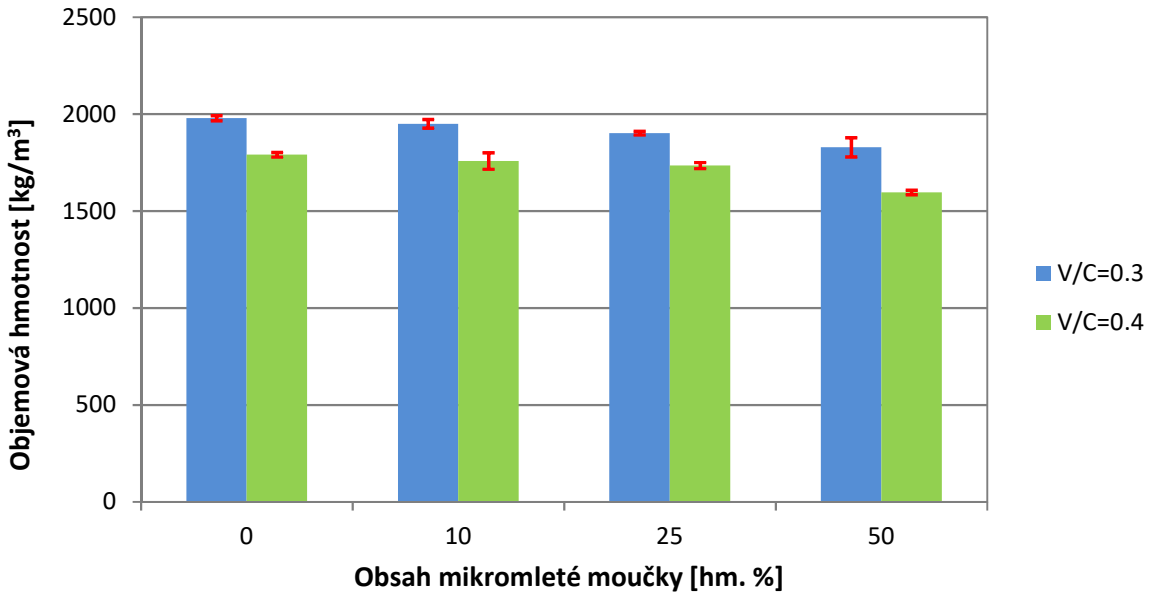
Označení sady	Cement (C) [hm. %]	Cement (C) [g]	Mletá moučka (MM) [hm. %]	Mletá moučka (MM) [g]
C100+MM0a	100	1000	0	0
C90+MM10a	90	900	10	100
C75+MM25a	75	750	25	250
C50+MM50a	50	500	50	500
C100+MM0b	100	1000	0	0
C90+MM10b	90	900	10	100
C75+MM25b	75	750	25	250
C50+MM50b	50	500	50	500

Pro zjištění vlivu mikromleté vápencové moučky a množství záměsové vody na vlastnosti cementového kompozitu byly zvoleny dva vodní součinitele. Zvolili jsme vodní součinitele v/c o hodnotách 0,3 a 0,4. Množství záměsové vody bylo stanoveno z vodního součinitele, který udával poměr mezi vodou a celkovým množstvím vstupních surovin (jemných částic, tedy cement + mikromletá vápencová moučka). Nejedná se tedy přímo o poměr mezi vodou a cementem. Zpracovatelnost čerstvé směsi byla hodnocena podle hodnoty rozlivu, která byla stanovena pomocí zkoušky rozlitím (viz kapitola 4.1.1). V tabulce jsou uvedeny i objemové hmotnosti, které byly naměřeny při stáří vzorků 21 dní (Tabulka 10). Podle zkušeností z předchozích výzkumů se fyzikální vlastnosti cementového kompozitu s mikromletým vápencovým plnivem mezi 21 dnem a 28 dnem stáří vzorů příliš neliší.

Tabulka 10 – Množství vody, vodní součinitel, hodnoty rozlivu směsí a objemová hmotnost.

Označení sady	Voda [g]	Vodní součinitel v/c [-]	Hodnota rozlivu [mm]	Objemová hmotnost [kg/m^3]
C100+MM0a	300	0,3	147,5 ± 2,5	1979 ± 13,1
C90+MM10a	300	0,3	172,5 ± 2,5	1950 ± 22,4
C75+MM25a	300	0,3	175,0 ± 0,0	1902 ± 9,4
C50+MM50a	300	0,3	200,0 ± 0,0	1828 ± 49,5
C100+MM0b	400	0,4	200,0 ± 0,0	1790 ± 12,1
C90+MM10b	400	0,4	227,5 ± 2,5	1758 ± 42,6
C75+MM25b	400	0,4	255,0 ± 0,0	1734 ± 15,3
C50+MM50b	400	0,4	262,5 ± 2,5	1596 ± 11,9

Z tabulky a následujícího grafu (Obrázek 36) je zřejmé, že při použití většího vodního součinitele klesají objemové hmotnosti. Objemová hmotnost klesá v důsledku vzniku větší pórovitosti cementového kompozitu. Vyšší pórovitost je zapříčiněna větším obsahem vody. Póry v matrici vznikají vysycháním záměsové vody při tuhnutí a tvrdnutí směsi. Zároveň je z grafu patrné, že s přibývajícím množstvím mikromleté vápencové moučky objemová hmotnost rovněž klesá. Skutečnost klesání objemové hmotnosti v závislosti na množství mikromleté vápencové moučky přikládám nižší měrné hmotnosti mikromleté vápencové moučky (2700 kg/m^3) oproti měrné hmotnosti použitého cementu (3080 kg/m^3).



Obrázek 36 – Graf závislosti objemové hmotnosti na množství mikromleté vápencové moučky.

Složení směsí – vzorky pro druhou (hlavní) fázi

Druhá fáze výroby vzorků navazovala na testování vzorků z první fáze. Podle výsledků vyhodnocení zkoušek vzorků z první fáze byly zvoleny obsahy mikromleté vápencové moučky. V druhé fázi byly vyráběny vzorky ve tvaru trámků klasických rozměrů 40 × 40 × 160 mm. Jako referenční směsi jsou navrženy směsi pouze s cementem a různými obsahy vláken. Složení směsí bylo navrženo se snahou zachování zpracovatelnosti těchto referenčních směsí. Použité vstupní suroviny jsou popsány v této kapitole v předchozích odstavcích. Testované materiály měly vždy stejnou celkovou hmotnost vstupních surovin plus hmotnost použitých vláken. Množství vstupních surovin bylo počítáno v suchém stavu. Označení sad směsí uvádí obsah cementu, mikromleté vápencové moučky v hmotnostních procentech a za lomítkem obsah PVA vláken v hmotnostních procentech (Tabulka 11).

Tabulka 11 – Složení jednotlivých sad vzorků pro druhou (hlavní) fázi (40 × 40 × 160 mm).

Označení sady	Cement (C)		Mletá moučka (MM)		PVA vlákna (V)	
	[hm. %]	[g]	[hm. %]	[g]	[hm. %]	[g]
C100+MM0/V1	100	3000	0	0	1	30
C75+MM25/V1	75	2250	25	750	1	30
C50+MM50/V1	50	1500	50	1500	1	30
C100+MM0/V2	100	3000	0	0	2	60
C75+MM25/V2	75	2250	25	750	2	60
C50+MM50/V2	50	1500	50	1500	2	60
C100+MM0/V4	100	3000	0	0	4	120
C75+MM25/V4	75	2250	25	750	4	120
C50+MM50/V4	50	1500	50	1500	4	120

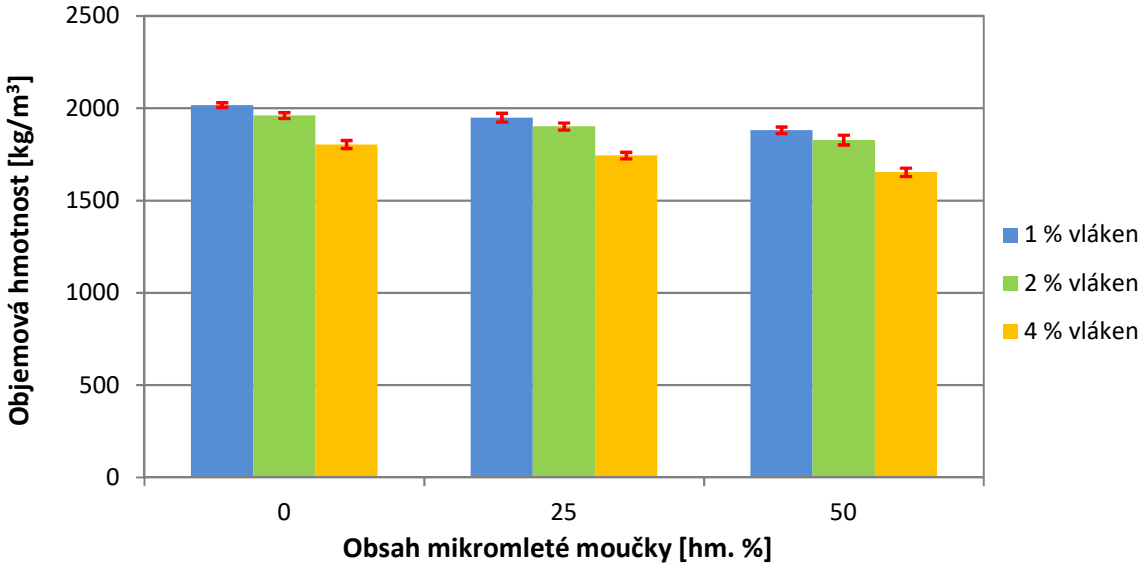
Vodní součinitele v/c byly stanoveny konstantní vždy pro jedno obsahové množství vláken. Konstantní množství vody pro jedno obsahové množství vláken zajistilo zjištění vlivu mikromleté vápencové moučky na zpracovatelnost, plastifikační účinky a na soudržnost vláken s matricí. Téměř stejné zpracovatelnosti bylo dosaženo pomocí tří vodních součinitelů v/c. Zvolili jsme vodní součinitel v/c o hodnotě 0,27 pro obsah PVA vláken 1 hm. %, 0,30 pro obsah PVA vláken 2 hm. % a 0,37 pro obsah PVA vláken 4 hm. %. Množství záměsové vody bylo stanoveno z vodního součinitele, který udával poměr mezi vodou a celkovým množstvím vstupních surovin (jemných částic, tedy cement + mikromletá vápencová moučka). Nejedná se tedy přímo o poměr mezi vodou a cementem. Zpracovatelnost čerstvé směsi byla hodnocena

podle hodnoty rozlivu, která byla stanovena pomocí zkoušky rozlitím (viz kapitola 4.1.1). V tabulce jsou uvedeny i objemové hmotnosti pro jednotlivé sady vzorků, které byly naměřeny při stáří vzorků 28 dní (Tabulka 12).

Tabulka 12 – Množství vody, vodní součinitel, hodnoty rozlivu směsí a objemová hmotnost.

Označení sady	Voda [g]	Vodní součinitel v/c [-]	Hodnota rozlivu [mm]	Objemová hmotnost [kg/m^3]
C100+MM0/V1	810	0,27	140,0 ± 0,0	2017 ± 13,1
C75+MM25/V1	810	0,27	170,0 ± 0,0	1949 ± 23,9
C50+MM50/V1	810	0,27	185,0 ± 5,0	1881 ± 17,8
C100+MM0/V2	900	0,30	142,5 ± 2,5	1960 ± 16,0
C75+MM25/V2	900	0,30	157,5 ± 2,5	1901 ± 19,1
C50+MM50/V2	900	0,30	170,0 ± 0,0	1827 ± 26,4
C100+MM0/V4	1110	0,37	132,5 ± 2,5	1804 ± 21,7
C75+MM25/V4	1110	0,37	137,5 ± 2,5	1743 ± 17,9
C50+MM50/V4	1110	0,37	142,5 ± 2,5	1653 ± 22,7

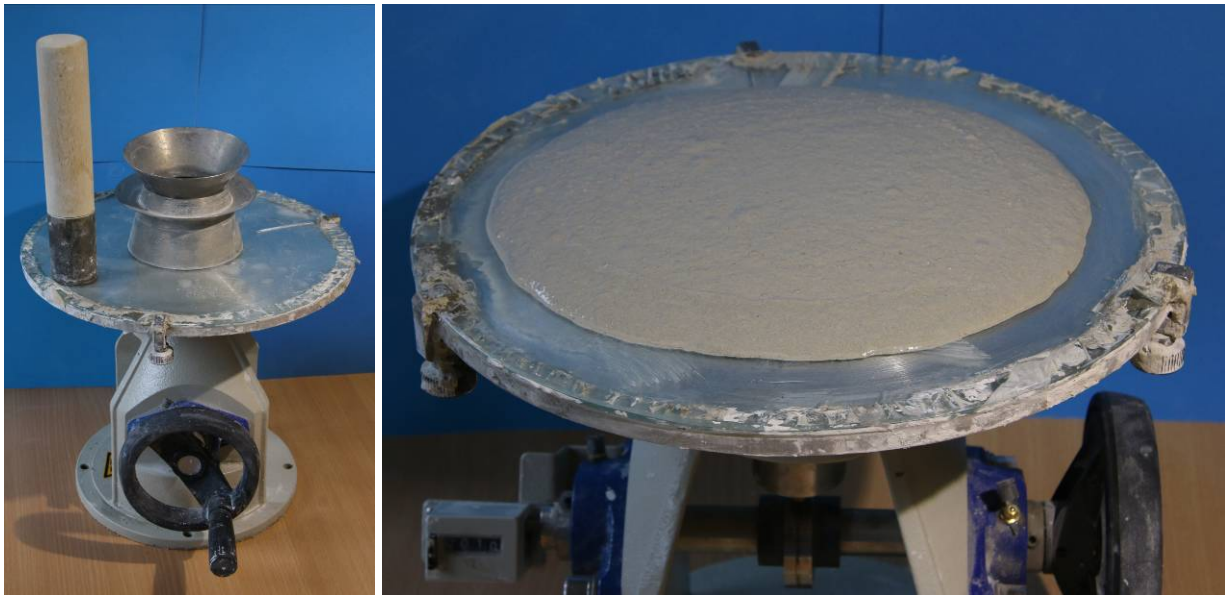
Z tabulky a následujícího grafu (Obrázek 37) je zřejmé, že při použití většího vodního součinitele klesají objemové hmotnosti. Objemová hmotnost klesá ze stejných důvodů jako u vzorků z první fáze (množství záměsové vody a objemové hmotnosti cement/mikromletá moučka). Zároveň objemová hmotnost klesá v závislosti na množství použitých PVA vláken.



Obrázek 37 – Graf závislosti objemové hmotnosti na množství mikromleté vápencové moučky a obsahu PVA vláken.

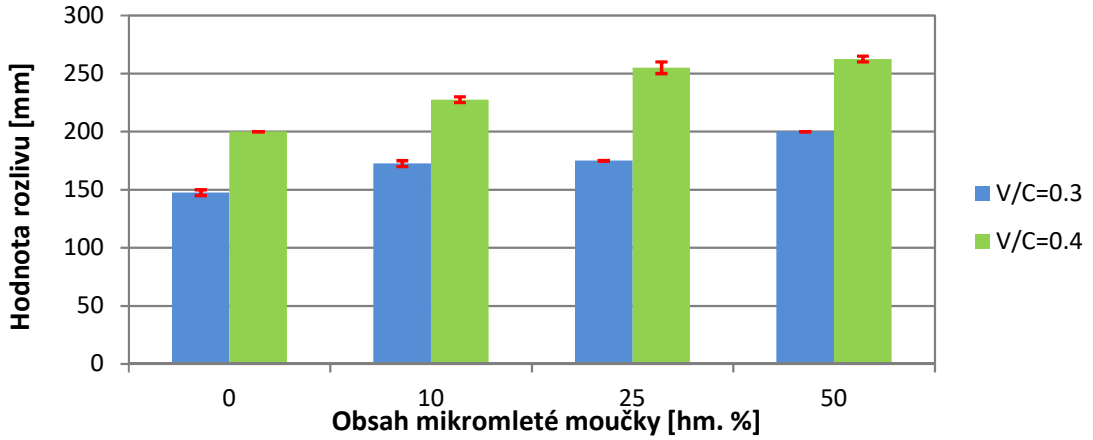
4.1.1 Zpracovatelnost směsi (zkouška rozlitím)

Při návrhu složení směsí jsme se snažili o zachování stejné zpracovatelnosti referenčních směsí. Konstantní množství záměsové vody bylo zachováno vždy pro jedno obsahové množství PVA vláken. Konzistenci čerstvé směsi jsme zjišťovali pomocí zkoušky rozlitím. Konzistence čerstvé směsi znázorňuje zároveň zpracovatelnost. Zkouška se provádí na střásacím stolku dle normy. Před zkouškou se očistí vodorovná skleněná deska o průměru 300 mm a kovová forma ve tvaru seříznutého kužele. Forma má výšku 60 ± 0,5 mm, vnitřní průměr ve spodní části 100 ± 0,5 mm a vnitřní průměr v horní části 70 ± 0,5 mm. Po očistění a osušení se zkušební skleněná deska a vnitřní povrch formy natře tenkou vrstvou minerálního oleje. Forma se umístí na střed skleněné desky střásacího stolku a naplní se směsí ve dvou vrstvách. Každá vrstva se musí zhutnit 10 lehkými údery dusadla, které je kruhového průřezu o průměru cca 40 mm, musí být z nenasákavého materiálu v délce alespoň 20 mm z celkové délky 200 mm a o hmotnosti 0,250 ± 0,015 kg (Obrázek 38). Během plnění a hutnění je nutné formu přidržovat rukou u desky. Po naplnění a zhutnění se přebytečná směs odstraní a volná plocha desky se otře, aby byla suchá a čistá. Po uplynutí 15 s od naplnění formy se forma odebere kolmo vzhůru. Následuje střásání, kde po 10 a 20 střeseních se změří průměr koláče směsi ve dvou na sebe kolmých směrech. Měří se vždy průměr spodní podstavy kužele. Hodnota rozlití se vypočte jako průměrná hodnota z průměrů koláče ve dvou na sebe kolmých směrech. Výsledná hodnota rozlití je aritmetický průměr hodnot d_{10} (rozliv po 10 rázech) a d_{20} (rozliv po 20 rázech). Provádí se vždy 2 měření pro každou směs a výsledky se nesmí lišit o více než 10 %. Pokud se výsledky liší více, je nutné zkoušku opakovat (ČSN EN 1015-3) (Hlubocký, 2016).



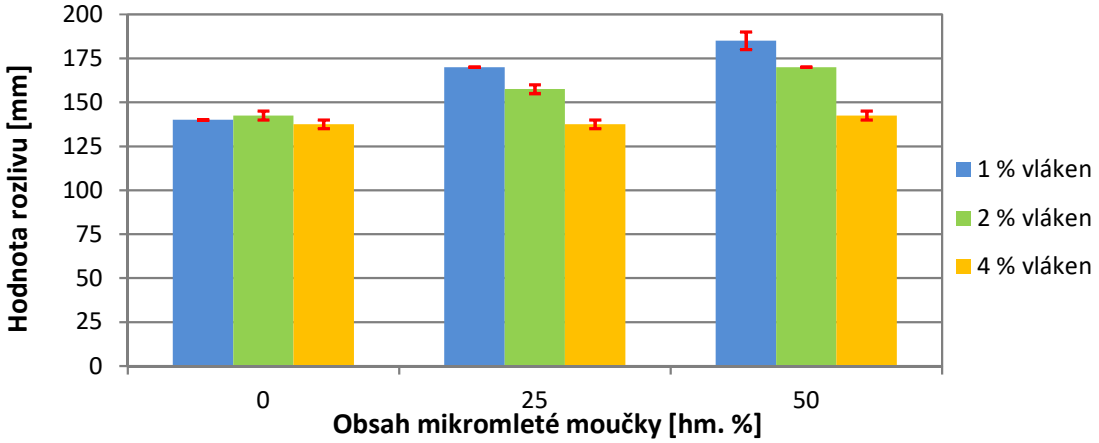
Obrázek 38 – Zkouška rozlitím, střásací stolek s formou a dusadlem – vlevo, směs po 20 rázech zkoušky – vpravo (Hlubocký, 2016).

Konzistenci čerstvé směsi jsme zjišťovali pro směsi jak v první fázi výroby vzorků, tak i v druhé (hlavní) fázi výroby vzorků. V první fázi jsme zachovali konstantní dvě množství záměsové vody. Z grafu (Obrázek 39) je patrný vliv obsahu mikromleté vápencové moučky na zpracovatelnost čerstvé směsi. Se zvyšujícím obsahem mikromleté moučky se zlepšuje zpracovatelnost čerstvé směsi. Mikromletá vápencová moučka vykazuje plastifikační účinky.



Obrázek 39 – Zpracovatelnost směsí z první fáze výroby vzorků v závislosti na obsahu mikromleté vápencové moučky.

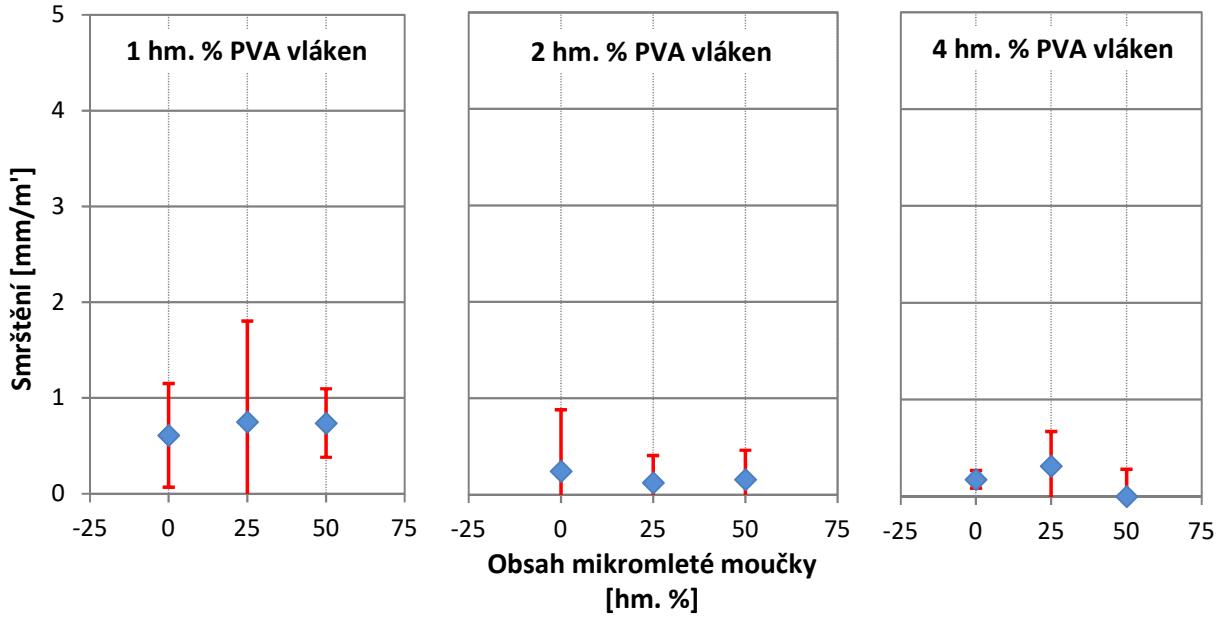
V druhé fázi výroby vzorků byly stanoveny vodní součinitele se snahou o zachování stejné zpracovatelnosti u směsí bez mikromleté vápencové moučky. Z grafu zpracovatelnosti čerstvých směsí (Obrázek 40) je patrné, že u obsahu 4 hm. % PVA vláken nemá mikromletá moučka výrazný vliv na zpracovatelnost. Při obsahu PVA vláken 4 hm. % nebylo možné zlepšit zpracovatelnost, ani zvyšováním vodního součinitele. Od hodnoty vodního součinitele v/c = 0,37 se zpracovatelnost téměř neměnila. Zvyšování obsahu vody mělo za následek pouze oddělování matrice od vláken při rázech zkoušky rozlitím. Dále je z grafu zřejmý vliv mikromleté vápencové moučky na zpracovatelnost u 1 a 2 hm. % PVA vláken. Tento vliv se snižuje se zvyšujícím se obsahem PVA vláken. Zpracovatelnost se zlepšuje s nárůstem obsahu moučky.



Obrázek 40 – Zpracovatelnost směsí z druhé (hlavní) fáze výroby vzorků v závislosti na obsahu mikromleté vápencové moučky a PVA vláken.

4.1.2 Smrštění vzorků

Smrštění vzorků bylo stanoveno 24 hodin po výrobě vzorků. Smrštění bylo zjištěno pouze u vzorků z druhé (hlavní) fáze výroby vzorků. Připravené formy jsme před nalitím čerstvé směsi změřili v podélném směru a rozměry zaznamenali. Po 24 hodinách proběhlo odformování vzorků. Po odformování bylo provedeno změření délky jednotlivých vzorků. Z rozdílů délek prázdné formy a délek vzorků bylo stanoveno smrštění vzorků jako procento zkrácení (smrštění) vzorků. Pro názornost uvádím přepočtené smrštění jako smrštění vzorků v milimetrech na běžný metr (Obrázek 41).



Obrázek 41 – Smrštění po 24 hodinách v závislosti na obsahu mikromleté moučky pro jednotlivé obsahy PVA vláken.

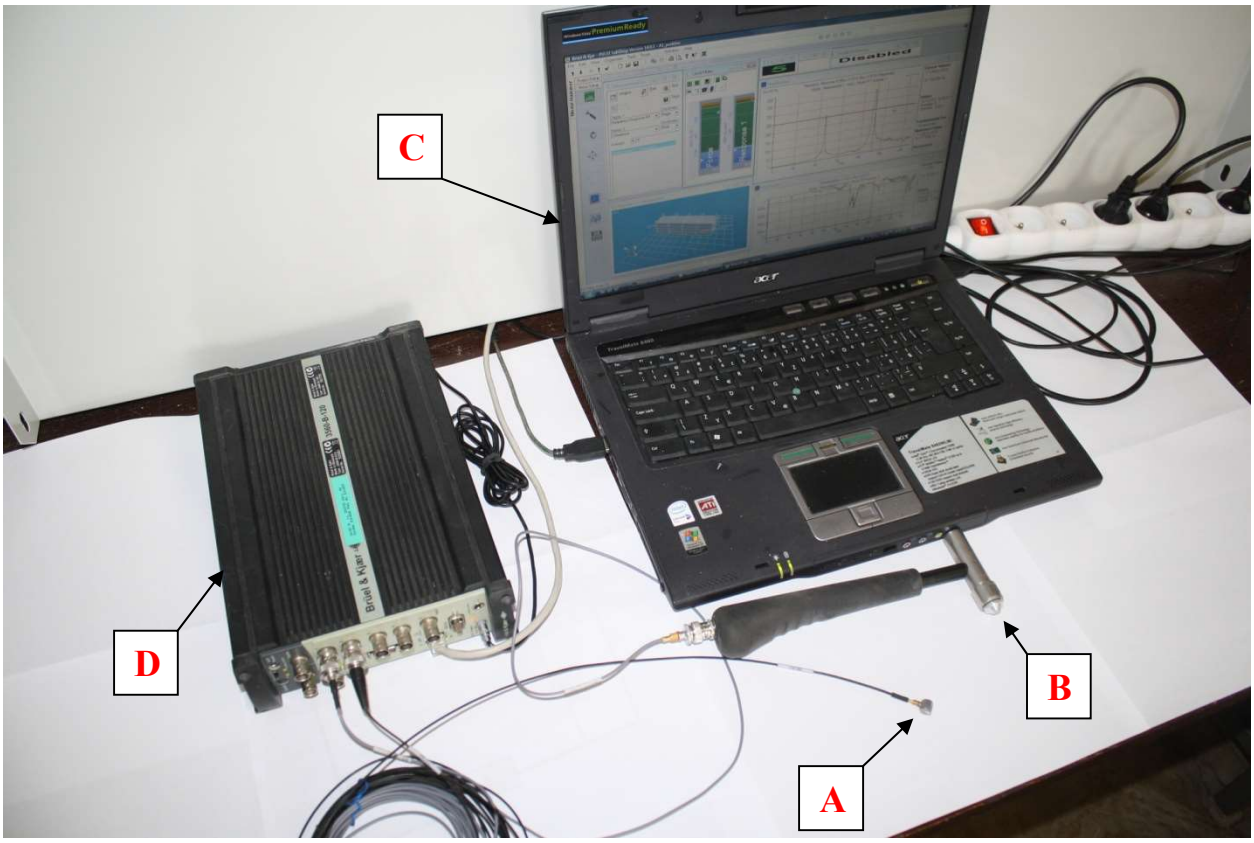
Z grafu je patrné, že je smrštění vzorků minimální. Výsledné smrštění vzorků bylo o velikosti do jedné desetiny procenta zkrácení (smrštění) vzorků. V přepočteném smrštění to znamená smrštění do velikosti 1 mm na běžný metr u vzorků s 1 hm. % PVA vláken a smrštění do 0,5 mm na běžný metr u vzorků s více než 1 hm. % PVA vláken. PVA vlákna zjevně pozitivně ovlivňují smrštění vzorků. PVA vlákna zamezují smrštění vzorků a zároveň omezují vznik smršťovacích trhlin či mikrotrhlin. S použitím PVA vláken dle našich výsledků neovlivňuje smrštění ani použité množství záměsové vody. PVA vlákna zamezila smrštění, které obvykle vzniká vlivem vysychání záměsové vody při tuhnutí a tvrdnutí vzorků.

4.2 Dynamický modul pružnosti

Dynamický modul pružnosti a dynamický modul pružnosti ve smyku byl měřen pomocí rezonanční metody a pomocí ultrazvukové impulsní metody na vzorcích o velikosti 40 × 40 × 160 mm. Rezonanční metoda a ultrazvuková impulsní metoda jsou nedestruktivní metody měření. Měřením lze sledovat průběh dynamických modulů pružnosti v čase na stejných vzorcích. Z tohoto důvodu jsou výsledné trendy průběhů mechanických vlastností z této metody přesnější než trendy mechanických vlastností zkoumané metodami destruktivními. Nejprve se budu věnovat v následujících dvou podkapitolách rezonanční metodě a výsledkům získaných pomocí této metody. V dalších dvou podkapitolách se budu věnovat ultrazvukové impulsní metodě.

4.2.1 Metodika měření – rezonanční metoda

Rezonanční metoda je založena na měření odpovídající základní vlastní frekvence vzorku, rozměrech a objemové hmotnosti každého vzorku. Měření bylo prováděno pomocí měřicí sestavy od firmy Brüel & Kjær. Sestava se skládá z měřicí stanice Brüel & Kjær typ 3560-B-120, piezoelektrického snímače zrychlení Brüel & Kjær typ 4519-003, rázového kladívka Brüel & Kjær typ 8206 a řídícího PC (Obrázek 42).



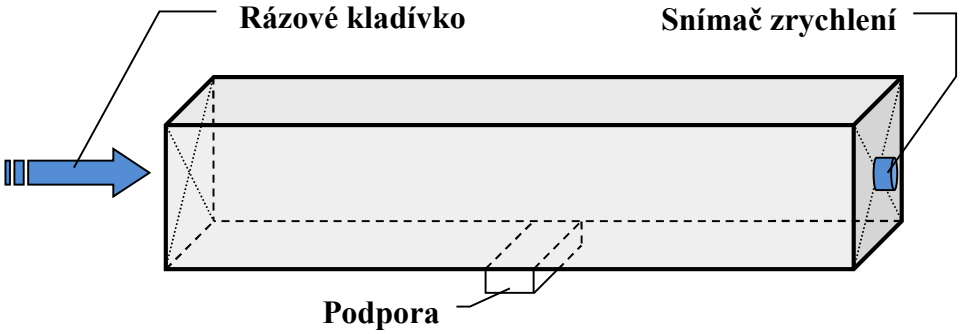
Obrázek 42 – Měřicí sestava Brüel & Kjær (A – piezoelektrický snímač zrychlení, B – rázové kladívko, C – řídící PC, D – měřicí stanice) (Hlubocký, 2016).

Při zkoušení je nutné mít podpory umístěné tak, aby neomezovaly pohyb vzorků při kmitání v příslušném vlastním tvaru, a aby tuhost podepření byla dostatečně nízká oproti tuhosti vzorků. Z tohoto důvodu jsme měli podpory vytvořené z dostatečně měkkého materiálu – mirelonu. Vzorky byly podepřeny vždy v místech uzlových linií základních vlastních tvarů odpovídajících jednotlivým typům kmitání – podélné, příčné, kroutivé. Po uložení vzorků na podpory se na vzorky připevnil piezoelektrický snímač zrychlení v místech maximální amplitudy kmitání daného vlastního tvaru. Dále se pomocí rázového kladívka vnášela budící síla, která vybudila kmitání vzorku. Měřicí stanice zaznamenávala v časové oblasti budicí signál a signál odezvy. Použitím rychlé Fourierovi transformace (dále jen FFT – „Fast Fourier Transform“) byly signály převedeny z časové do frekvenční oblasti. Software PULSE LabShop verze 14.0.1 vyhodnotil přenosovou funkci (dále jen FRF – „Frequency Response Function“) jako podíl odezvy a budící síly ve frekvenční oblasti. Maximální amplituda ukazovala, že došlo k rezonanci, ze které se určila vlastní frekvence kmitání vzorku. Ze změřené základní vlastní frekvence příslušného tvaru kmitání, hmotnosti a rozměrů vzorku byl vyhodnocen dynamický modul pružnosti a dynamický modul pružnosti ve smyku (Topič a kol., 2014). Určení fyzikálně-mechanických vlastností vzorků je založené na vztazích mezi vlastními frekvencemi kmitání a pružnostními vlastnostmi vzorků (Hlubocký, 2016).

Schéma umístění podpor, snímače zrychlení a místa vnesení budící síly rázovým kladívkem jsou dále uvedeny pro jednotlivé druhy měření základních vlastních frekvencí (ČSN 73 1372, 2012).

Popis způsobu měření základní vlastní frekvence podélného kmitání vzorku

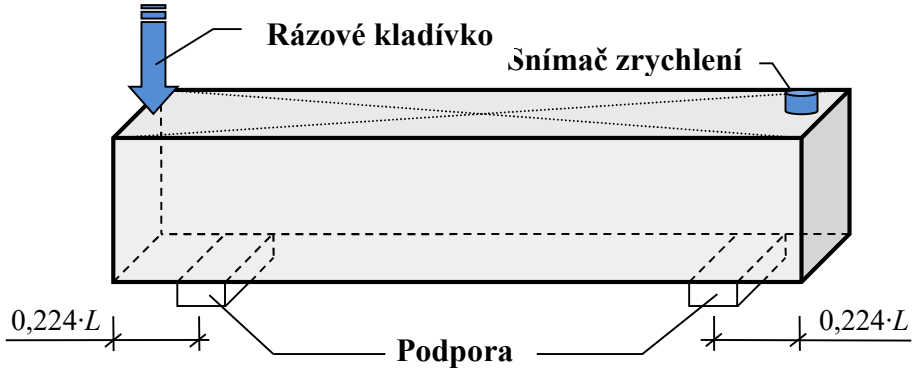
Při měření základní vlastní frekvence podélného kmitání vzorku ve tvaru hranolu je podpora umístěna v polovině své délky. Obrázek 43 zobrazuje schéma umístění piezoelektrického snímače zrychlení a místo vnesení budící síly rázovým kladívkem. Měřením zjišťujeme první (nejnižší) vlastní frekvenci podélného kmitání vzorku (Hlubocký, 2016).



Obrázek 43 – Schéma měření základní vlastní frekvence podélného kmitání vzorku rezonanční metodou (Hlubocký, 2016).

Popis způsobu měření základní vlastní frekvence příčného (ohybového) kmitání vzorku

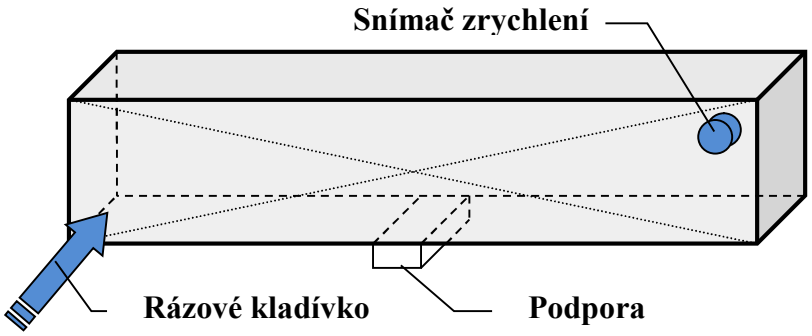
Při měření základní vlastní frekvence příčného (ohybového) kmitání vzorku ve tvaru hranolu jsou podpory umístěny v místě uzlových linií, které leží ve vzdálenosti 0,224 L od čel vzorku, kde L je délka vzorku. Obrázek 44 zobrazuje schéma umístění piezoelektrického snímače zrychlení a místo vnesení budící síly rázovým kladívkem. Měřením zjišťujeme první (nejnižší) vlastní frekvenci příčného kmitání vzorku (Hlubocký, 2016).



Obrázek 44 – Schéma měření základní vlastní frekvence příčného kmitání vzorku rezonanční metodou (Hlubocký, 2016).

Popis způsobu měření základní vlastní frekvence kroutivého kmitání vzorku

Při měření základní vlastní frekvence kroutivého neboli torzního kmitání vzorku ve tvaru hranolu je podpora umístěna v polovině své délky. Obrázek 45 zobrazuje schéma umístění piezoelektrického snímače zrychlení a místo vnesení budící síly rázovým kladívkem. Měřením zjišťujeme první (nejnižší) vlastní frekvenci kroutivého kmitání vzorku (Hlubocký, 2016).



Obrázek 45 – Schéma měření základní vlastní frekvence kroutivého kmitání vzorku rezonanční metodou (Hlubocký, 2016).

Stanovení dynamického modulu pružnosti a dynamického modulu pružnosti ve smyku ze základních vlastních frekvencí vzorku

Pomocí softwaru PULSE LabShop verze 14.0.1 se vyhodnocuje graf FRF. Z grafu v softwaru jsme vyčetli příslušné základní vlastní frekvence a použili je pro stanovení dynamického modulu pružnosti a dynamického modulu pružnosti ve smyku výpočtem.

Dynamický modul pružnosti byl vypočten z naměřené základní vlastní frekvence podélného kmitání vzorku pomocí vzorce:

$$E_{d,l} = \frac{4 \cdot l \cdot m \cdot f_l^2}{b \cdot t}, \qquad \textbf{(4.2.1-1)}$$

kde $E_{d,l}$ je dynamický modul pružnosti pro podélné kmitání [Pa], l je délka vzorku [m], m je hmotnost vzorku [kg], f_l je základní vlastní frekvence podélného kmitání vzorku [Hz], b je šířka vzorku [m] a t je výška vzorku [m].

Následně jsme dynamický modul pružnosti kontrolovali výpočtem z naměřené základní vlastní frekvence příčného kmitání vzorku pomocí vzorce:

$$E_{d,p} = \frac{0{,}9465 \cdot l^3 \cdot m \cdot f_p^2 \cdot T_l}{b \cdot t}, \qquad \textbf{(4.2.1-2)}$$

kde $E_{d,p}$ je dynamický modul pružnosti pro příčné kmitání [Pa], l je délka vzorku [m], m je hmotnost vzorku [kg], f_p je základní vlastní frekvence příčného kmitání vzorku [Hz], T_l je korekční součinitel zahrnující vliv délky vzorku a Poissonova čísla, b je šířka vzorku [m] a t je výška vzorku [m].

Pro výpočet dynamického modulu pružnosti ve smyku byla použita naměřená základní vlastní frekvence kroutivého kmitání vzorku a byla dosazena do vzorce:

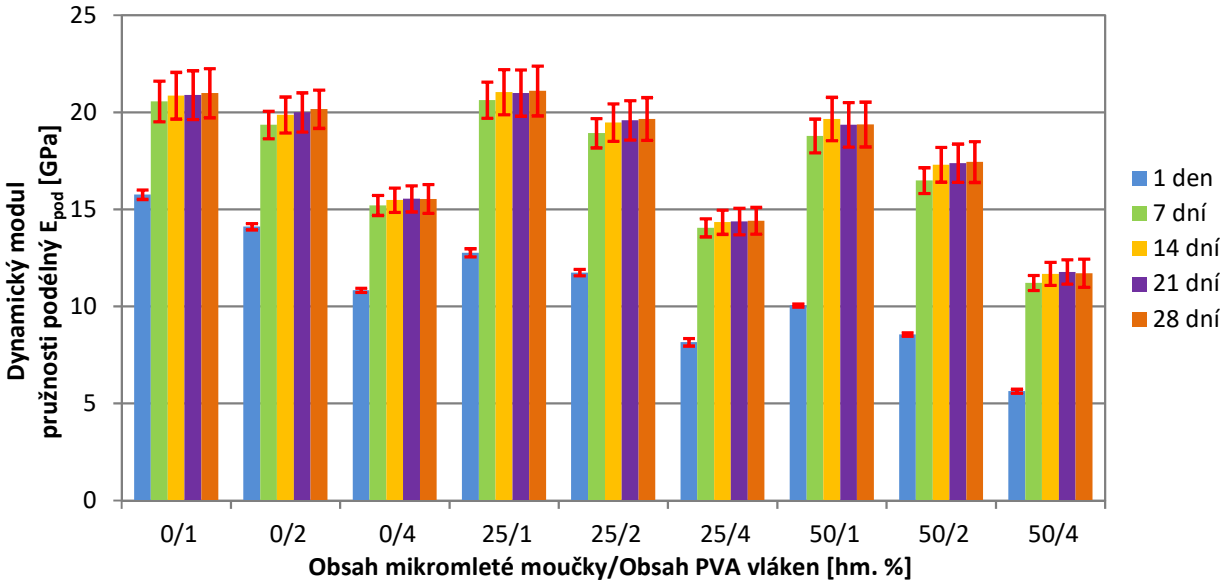
$$G_d = \frac{4 \cdot l \cdot m \cdot f_t^2}{b \cdot t} \cdot \frac{B}{1 + A}, \qquad \textbf{(4.2.1-3)}$$

$$B = \frac{\frac{b}{t} + \frac{t}{b}}{4 \cdot \frac{t}{b} - 2{,}52 \cdot (b \cdot t)^2 + 0{,}21 \cdot \left(\frac{t}{b}\right)^6}, \qquad \textbf{(4.2.1-4)}$$

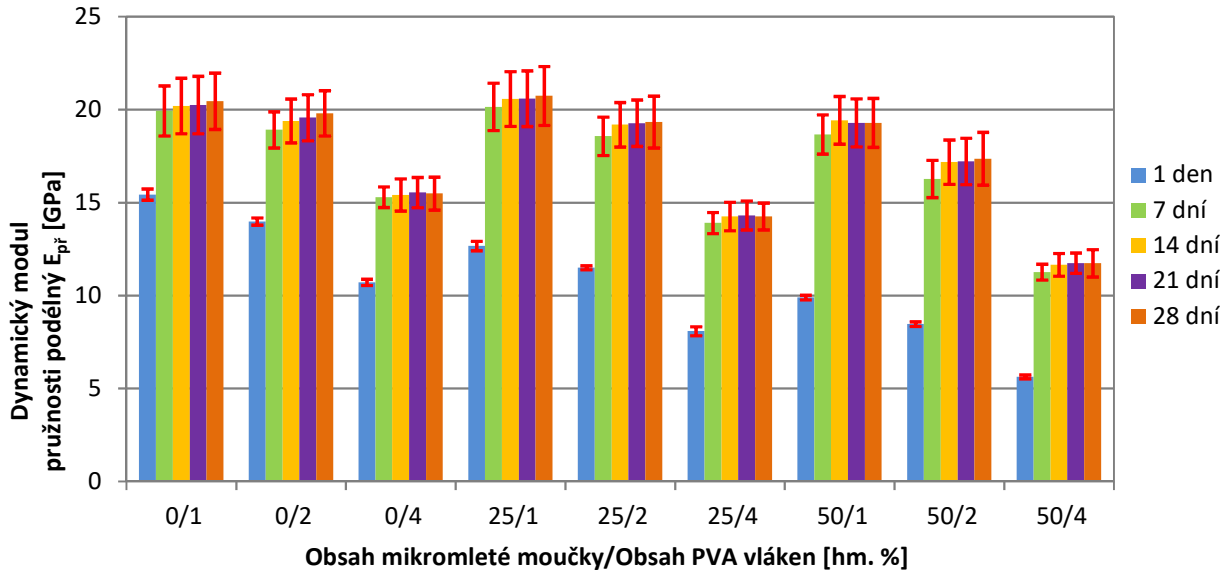
kde G_d je dynamický modul pružnosti ve smyku [Pa], l je délka vzorku [m], m je hmotnost vzorku [kg], f_t je základní vlastní frekvence kroutivého kmitání vzorku [Hz], b je šířka vzorku [m], t je výška vzorku [m], A je empirický součinitel poměru šířky a výšky vzorku (Hlubocký, 2016).

4.2.2 Výsledky a diskuze – rezonanční metoda

Následující graf (Obrázek 46) shrnuje vývoj dynamického modulu pružnosti jednotlivých sad vzorků pro podélné kmitání v čase pro stáří vzorků 1, 7, 14, 21 a 28 dní. Další graf (Obrázek 47) shrnuje vývoj dynamického modulu pružnosti jednotlivých sad vzorků pro příčné kmitání v čase pro stáří vzorků 1, 7, 14, 21 a 28 dní. Z obou grafů je patrný stejný trend. Jednotlivé sady jsou shrnuty níže v této kapitole. Materiál v prvních 24 hodinách nabývá u všech sad alespoň 50 % hodnoty dynamického modulu pružnosti při stáří vzorků 28 dní. Nejmenších hodnot po prvních 24 hodinách nabývají sady s 50 hm. % mikromleté vápencové moučky, u kterých dochází k nárůstu necelých 50 % z hodnoty při stáří 28 dní.

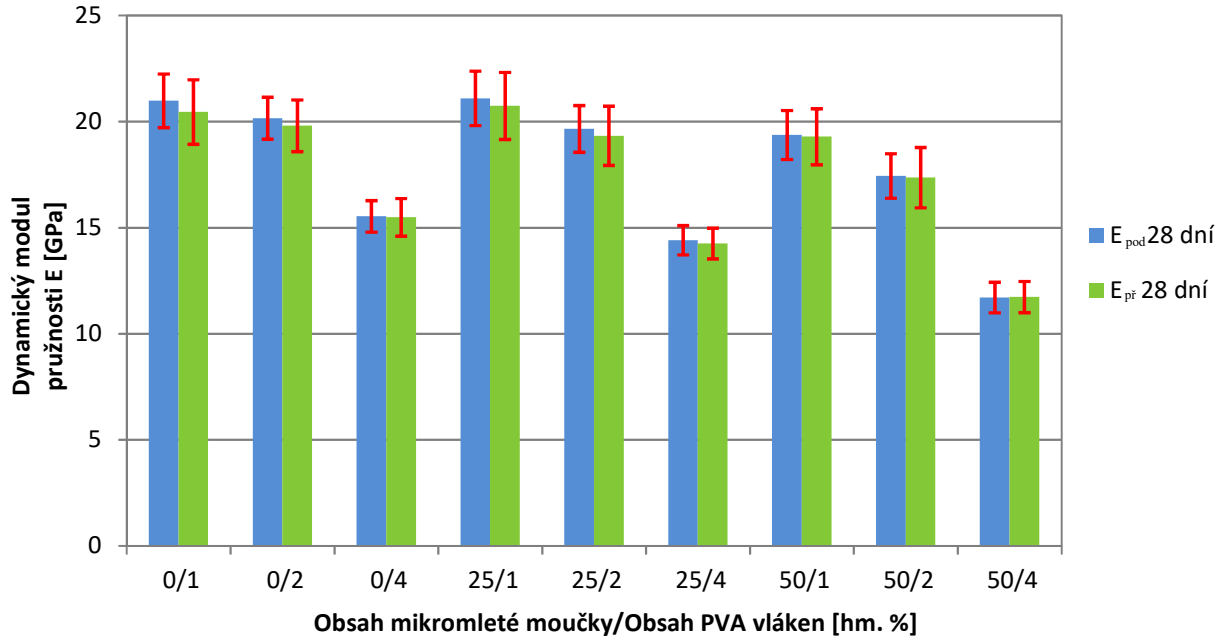


Obrázek 46 – Vývoj dynamického modulu pružnosti pro podélné kmitání pro jednotlivé sady vzorků při stáří 1, 7, 14, 21 a 28 dní.

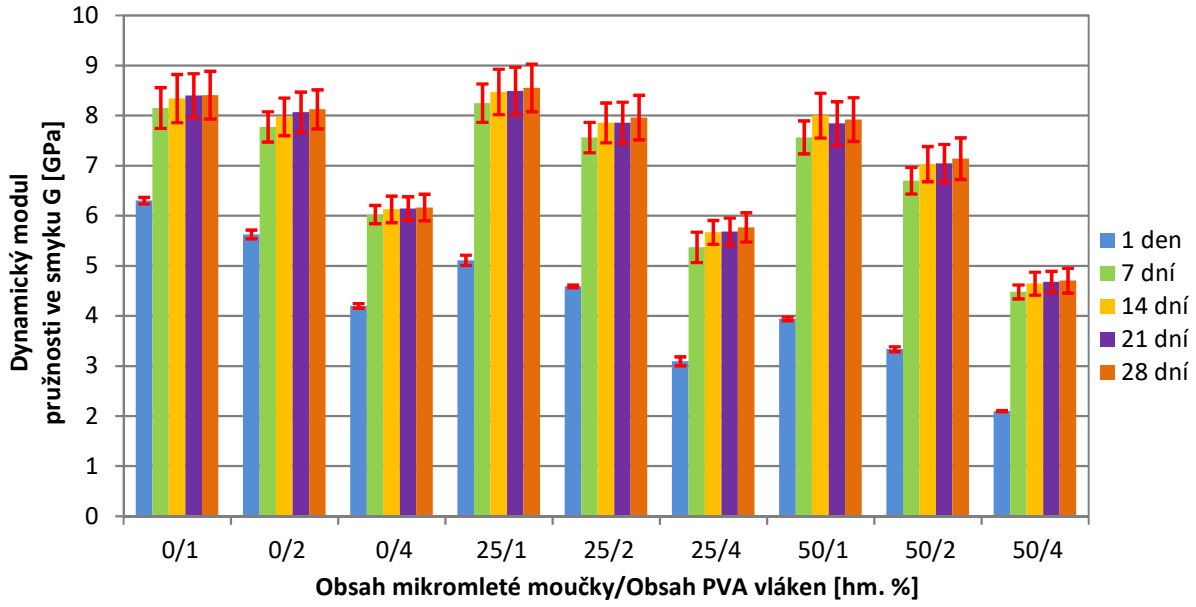


Obrázek 47 – Vývoj dynamického modulu pružnosti pro příčné kmitání pro jednotlivé sady vzorků při stáří 1, 7, 14, 21 a 28 dní.

V následujícím grafu (Obrázek 48) je uvedeno srovnání výsledků dynamického modulu pružnosti pro podélné kmitání a dynamického modulu pružnosti pro příčné kmitání. Z grafu je patrné, že v rámci odchylek je po vyhodnocení dynamický modul pružnosti z měření základní vlastní frekvence podélného kmitání a z měření základní vlastní frekvence příčného kmitání téměř shodný ($E_{pod} \approx E_{př}$). Zároveň je z grafu lépe patrný trend klesajícího dynamického modulu pružnosti v závislosti na zvyšujícím se obsahu PVA vláken. Tento trend je patrný i z grafu (Obrázek 49) dynamického modulu pružnosti ve smyku.

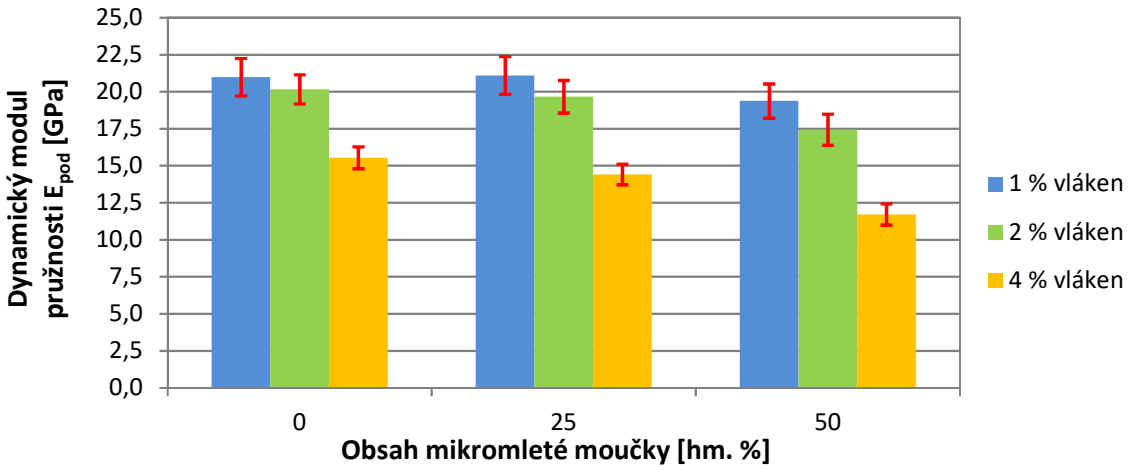


Obrázek 48 – Dynamický modul pružnosti pro jednotlivé sady vzorků při stáří vzorků 28 dní – srovnání podélného a příčného.

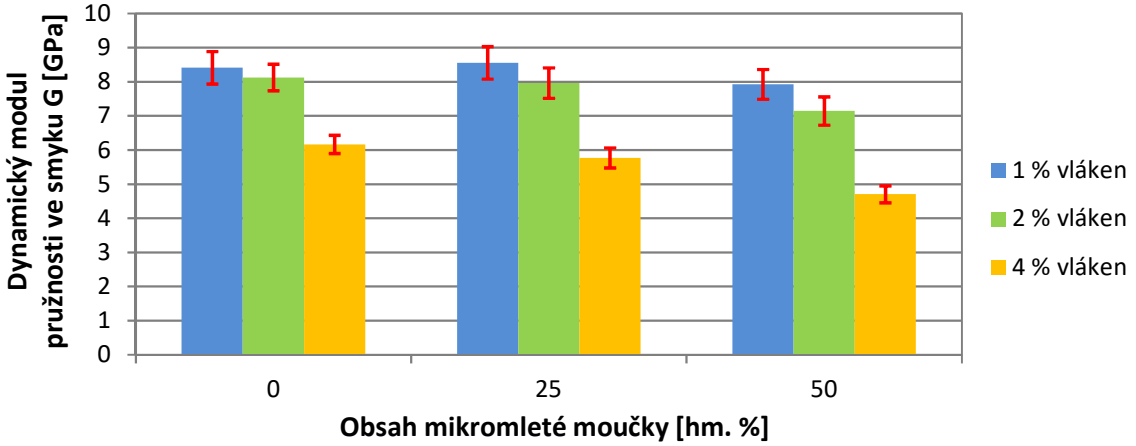


Obrázek 49 – Vývoj dynamického modulu pružnosti ve smyku pro jednotlivé sady vzorků při stáří 1, 7, 14, 21 a 28 dní.

Pro názornost následující grafy (Obrázek 50 a Obrázek 51) ukazují dynamický modul pružnosti z podélného kmitání a dynamický modul pružnosti ve smyku v závislosti na obsahu mikromleté vápencové moučky při stáří vzorků 28 dní. Z grafů vyplývá, že u sad s 1 hm. % PVA vláken se při obsahu 25 hm. % mikromleté moučky lehce dynamické moduly pružnosti zvýší oproti sadě s 0 hm. % mikromleté moučky. U ostatních sad je již trend stejný, tedy klesající se zvyšujícím množstvím mikromleté vápencové moučky. Nejvyššího průměrného dynamického modulu pružnosti z podélného kmitání 21,09 ± 1,28 GPa bylo dosaženo u sady C75+MM25/V1, což je o 1 % více než u sady C100+MM0/V1 a o 9 % více než u sady C50+MM50/V1. Dynamický modul pružnosti z příčného kmitání u sady C75+MM25/V1 dosáhl hodnoty 20,74 ± 1,58 GPa a procentuální rozdíly od ostatních sad s 1 hm. % PVA vláken byly stejné jako z podélného kmitání. Nejvyšší hodnoty dynamického modulu pružnosti ve smyku 8,55 ± 0,47 GPa bylo také dosaženo u sady C75+MM25/V1 a procentuální rozdíly byly přibližně shodné jako u dynamických modulů pružnosti z podélného i příčného kmitání.



Obrázek 50 – Dynamický modul pružnosti v závislosti na obsahu mikromleté moučky při stáří vzorků 28 dní.

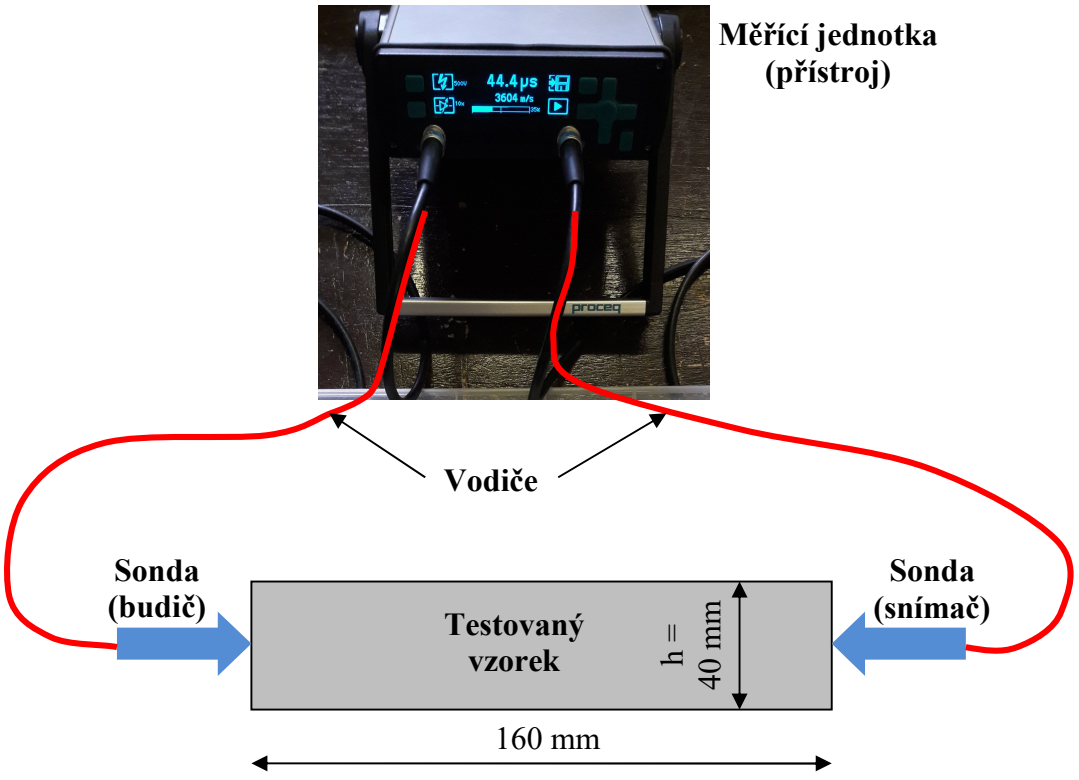


Obrázek 51 - Dynamický modul pružnosti ve smyku v závislosti na obsahu mikromleté moučky při stáří vzorků 28 dní.

4.2.3 Metodika měření – ultrazvuková impulsní metoda

Ultrazvuková impulsní metoda je založena na principu měření rychlosti šíření ultrazvukového impulsu materiálem. Tato metoda spočívá na vysílání opakujících se ultrazvukových impulsů přes zkoušený vzorek (materiál). Zaznamenává se rychlost (časový úsek), za který projde ultrazvukový impuls skrz zkoumaný vzorek (Veselý, 2012). Ve stavebnictví se využívá ultrazvukové vlnění v rozsahu od 20 Hz do 150 kHz. Výjimečně vlnění s frekvencemi až do 500 kHz. Ultrazvukovou metodou pro zkoušení betonu se zabývají normy ČSN 73 1371 (2011) a ČSN EN 12505-4 (2005). V druhé uvedené normě je však absence výpočtu pro stanovení dynamického modulu pružnosti. Z tohoto důvodu je nutné využívat i normu ČSN 73 1371, ne pouze normu evropskou (Cikrle a kol., 2013). Elektroakustický budič vyvolá impuls, který projde skrz vzorek (známá dráha impulsu). Na druhé straně vzorku je umístěn snímač měnící impuls na elektrický signál. Poté přístroj vyhodnotí (změří) časový úsek, za který projde impuls vzorkem.

Měření nejprve spočívalo v uvedení přístroje do provozu a provedení jeho kalibrace pomocí kalibračního referenčního vzorku o známé časové charakteristice. Samotné měření rychlosti šíření ultrazvukového impulsu zkoušenými vzorky probíhalo pomocí sond, které se pomocí vazebního gelu přiložili a přitlačili na oba konce vzorku (Obrázek 52).



Obrázek 52 – Měřící jednotka (přístroj) a schéma měření ultrazvukovou impulsní metodou.

Do měřící jednotky se před zahájením měření zadá délka zkušebního vzorku. Přístroj do stanovení rychlosti šíření ultrazvukového impulsu zahrnuje i tzv. mrtvý čas, který zohledňuje čas průchodu ultrazvukového impulsu vazebním gelem. Z přístroje jsme tedy získali přímo vyhodnocenou rychlost šíření ultrazvukového impulsu, která se určí pomocí vztahu:

$$v_L = \frac{L}{t}, \tag{4.2.3-1}$$

kde v_L je rychlost šíření ultrazvukového impulsu [m/s], L je délka zkoušeného vzorku [m] a t je časový úsek (doba průchodu) ultrazvukového impulsu přes vzorek [s].

Poté je nutné určit koeficient rozměrnosti pro 3D prostředí k, který je závislý na hodnotě Poissonova poměru (čísla) zkoušeného materiálu. Poissonovo číslo bylo převzato z hodnot stanovených pomocí rezonanční metody. Koeficient rozměrnosti pro 3D prostředí se stanový podle vztahu:

$$k = \sqrt{\frac{1-\nu}{(1+\nu)\cdot(1-2\cdot\nu)}}, \tag{4.2.3-2}$$

kde k je koeficient rozměrnosti pro 3D prostředí [-] a v je Poissonovo číslo (poměr) zkoušeného materiálu [-].

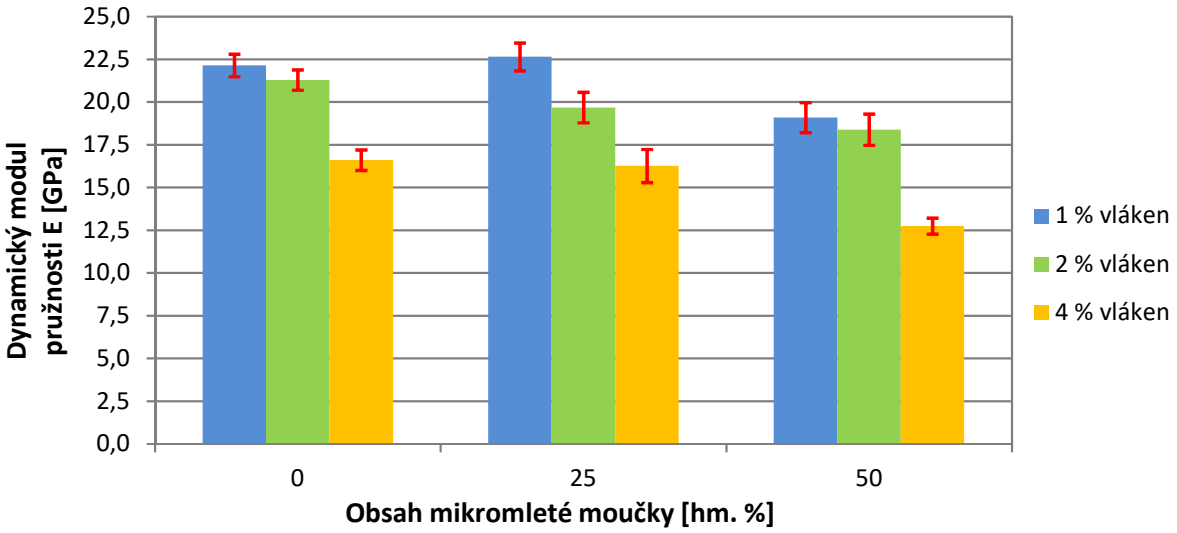
Po určení v_l a k můžeme přistoupit k výpočtu dynamického modulu pružnosti E podle vztahu pro podélné vlnění:

$$E = \frac{\rho \cdot v_L^{\,2}}{k^2}, \tag{4.2.3-1}$$

kde E je dynamický modul pružnosti [MPa], ρ je objemová hmotnost vzorku [kg/m^3], v_L je rychlost šíření ultrazvukového impulsu [m/s] a k je koeficient rozměrnosti pro 3D prostředí [-].

4.2.4 Výsledky a diskuze – ultrazvuková impulsní metoda

Dynamický modul pružnosti zjištěný pomocí ultrazvukové impulsní metody byl stanoven pro jednotlivé vzorky. Jejich průměrné hodnoty jsem shrnul v následujícím grafu (Obrázek 53). Z grafu je zřejmý stejný trend jako u dynamického modulu pružnosti zjištěného pomocí rezonanční metody, tedy klesající se zvyšujícím množstvím mikromleté moučky u sad s 2 hm. % a se 4 hm. % PVA vláken. U sady s 1 hm. % PVA vláken je také patrný mírný nárůst dynamického modulu pružnosti při obsahu 25 hm. % mikromleté vápencové moučky oproti sadě s 0 hm. % mikromleté vápencové moučky. Při porovnání výsledků dynamického modulu pružnosti z rezonanční metody a ultrazvukové impulsní metody jsou hodnoty z ultrazvukové impulsní metody až o 10 % vyšší než hodnoty z metody rezonanční. Pouze u sady C50+MM50/V1 byla hodnota z ultrazvukové impulsní metody o cca 2 % nižší. U ultrazvukové impulsní metody byly nižší směrodatné odchylky mezi naměřenými hodnotami jednotlivých vzorků než u rezonanční metody. Nejvyšší průměrné hodnoty dynamického modulu pružnosti 22,64 ± 0,82 GPa bylo dosaženo také u sady C75+MM25/V1. Sada C75+MM25/V1 měla dynamický modul pružnosti vyšší o 2,5 % než sada C100+MM0/V1 a o 16 % vyšší než sada C50+MM50/V1. Nejnižších hodnot dosahovaly sady se 4 hm. % PVA vláken. Nejnižší hodnoty dosáhla směs C50+MM50/V4 a to 12,74 ± 0,47 GPa, což je o 42 % méně než nejvyšší dosažená hodnota (sada C75+MM25/V1). Na dynamický modul pružnosti nemá pozitivní vliv přidávání obsahu PVA vláken. Přidávání mikromleté vápencové moučky může mít do určitého obsahu pozitivní vliv na dynamický modul pružnosti. Výsledný trend je obdobný jako v mé bakalářské práci, kde se snižujícím množstvím mikromleté moučky rostl dynamický modul pružnosti.



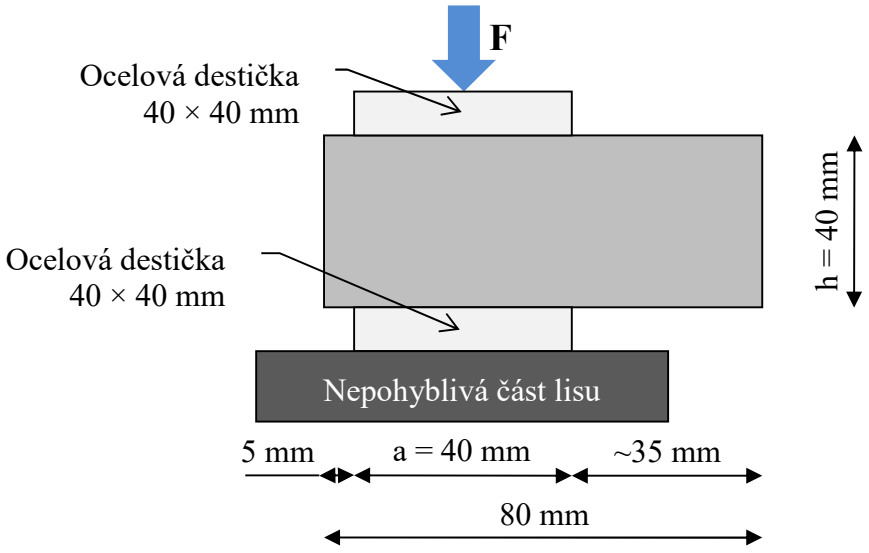
Obrázek 53 – Dynamický modul pružnosti v závislosti na obsahu mikromleté moučky získaný z ultrazvukové impulsní metody při stáří vzorků 28 dní.

4.3 Pevnost v tlaku

Pevnost v tlaku byla měřena jednoosou tlakovou zkouškou pouze pro druhou fázi výroby vzorků na zlomcích vzorků o velikosti 40 × 40 × ~ 80 mm. Testovány byly vždy zlomky z pěti vzorků z každé sady směsí. Jeden vzorek z každé sady byl ponechán pro hodnocení lomové plochy a pro uložení do archivu. Vzorky byly testovány tlakovou zkouškou při stáří vzorků 28 dní. Zlomky vzorků byly získány ze zkoušky pevnosti v tahu za ohybu.

4.3.1 Metodika měření

Pevnost v tlaku byla měřena jednoosou zkouškou pevnosti v tlaku (v normálovém směru). Zkouška byla prováděna na univerzálním měřicím stroji EV 40. Použitý měřicí stroj má rozsah zatěžovací síly 0 kN až 400 kN. Zatěžování v průběhu zkoušky bylo definováno konstantní rychlostí posunu 0,3 mm/s. Výstupem měření byla maximální zatěžovací síla při porušení vzorku. Vzorky byly zatěžovány kolmo na delší rozměr zlomku vzorku. Zatěžování probíhá pomocí jedné síly působící na vzorek plochou 40 × 40 mm. Jako roznášecí plochy byly využity ocelové destičky o jmenovaných rozměrech (Obrázek 54). Vzorky byly zatěžovány až do úplného porušení (Hlubocký, 2016).



Obrázek 54 – Schéma zkoušky jednoosým tlakem (Hlubocký, 2016).

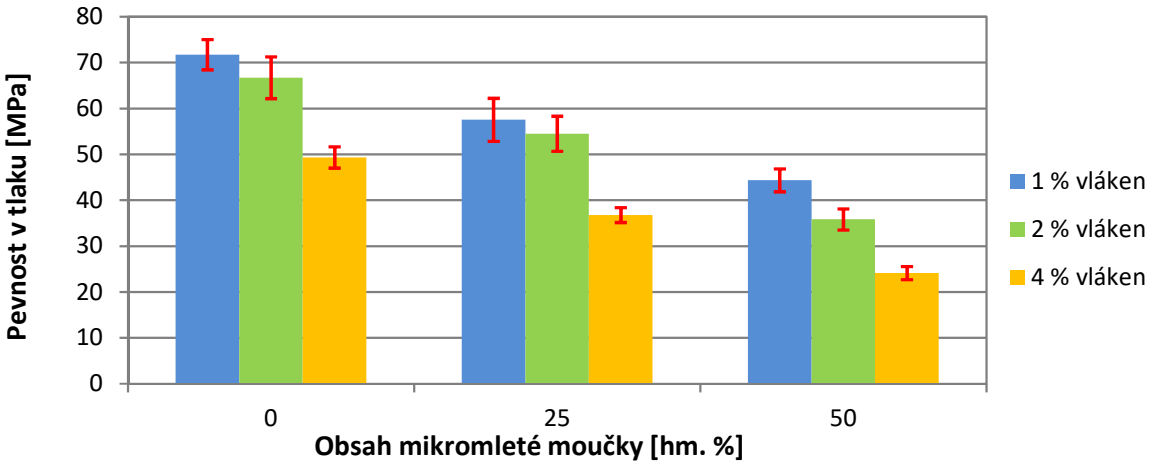
Stanovení pevnosti v tlaku se provádí pomocí vzorce pro napětí v tlaku:

$$\sigma = \frac{F}{A}, \tag{4.3.1-1}$$

kde F je zatěžovací síla [kN], A je zatěžovací plocha (plocha ocelové roznášecí destičky) [m^2] a σ je napětí v tlaku (pevnost v tlaku) [MPa].

4.3.2 Výsledky a diskuze

Nejprve jsem stanovil pevnosti v tlaku jednotlivých zkušebních vzorků. Po jejich zprůměrování jsem průměrné hodnoty jednotlivých sad shrnul v následujícím grafu (Obrázek 55). Z grafu je patrné, že pevnost v tlaku ovlivňuje jak množství PVA vláken, tak i množství mikromleté vápencové moučky. Z grafu je zřejmý trend snižující se pevnosti v tlaku se zvyšováním obsahu mikromleté vápencové moučky. Zároveň se pevnost v tlaku snižuje s rostoucím obsahem PVA vláken. Trend klesající pevnosti v tlaku přikládám vlivu snížení množství cementu jako pojiva a faktu, že mikromletá vápencová moučka se v kompozitu chová pouze jako inertní mikroplnivo. Zakomponováním PVA vláken jako rozptýlené výztuže do cementového kompozitu vzniká nehomogenní směs a tím je ovlivňována pevnost v tlaku a její klesající trend při zvyšování obsahu PVA vláken. Nejvyšší pevnosti v tlaku bylo dosaženo u sady vzorků bez použití mikromleté vápencové moučky a s nejnižším obsahem PVA vláken, tedy 1 hm. % PVA vláken. U sady C100+MM0/V1 bylo dosaženo průměrné pevnosti v tlaku 71,72 ± 3,29 MPa, což byla pevnost v tlaku vyšší o 39 % než u sady C50+MM50/V1 a o 31 % vyšší než u sady C100+MM0/V4. Stejný trend jako u pevnosti v tlaku je patrný u objemových hmotností. Uvedené výsledné pevnosti v tlaku se týkají vzorků při stáří 28 dní. U sad s 1 hm. % PVA vláken znamená zvýšení obsahu mikromleté vápencové moučky o každých 25 hm. % snížení pevnosti v tlaku o cca 20 %. U sad s 2 hm. % PVA vláken znamená zvýšení obsahu mikromleté vápencové moučky o každých 25 hm. % snížení pevnosti v tlaku o cca 23 %. U sad se 4 hm. % PVA vláken znamená zvýšení obsahu mikromleté vápencové moučky o každých 25 hm. % snížení pevnosti v tlaku o cca 26 %. Zdvojnásobením obsahu PVA vláken tedy dochází ke snížení pevnosti v tlaku o další cca 3 %.



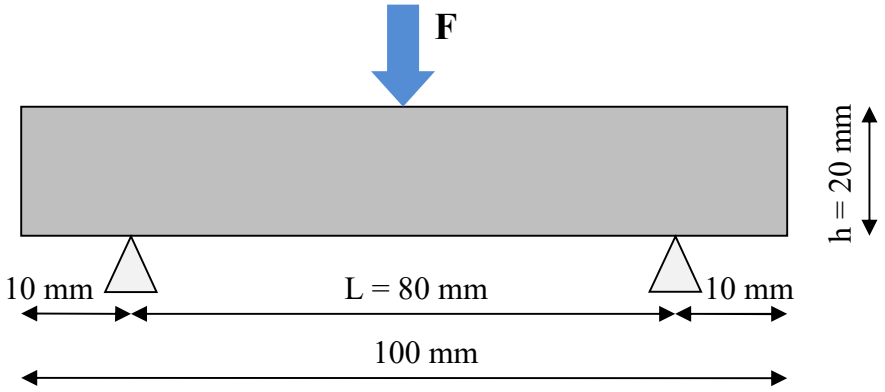
Obrázek 55 – Pevnost v tlaku v závislosti na obsahu mikromleté vápencové moučky a obsahu PVA vláken při stáří vzorků 28 dní.

4.4 Pevnost v tahu za ohybu

Pevnost v tahu za ohybu byla měřena zkouškou tříbodovým ohybem na vzorcích o velikosti 20 × 20 × 100 mm pro první fázi a na vzorcích o velikosti 40 × 40 × 160 mm s vytvořeným vrubem (viz kapitola 4.1 – Příprava zkušebních vzorků pro zkoušky pevnosti v tahu za ohybu) pro druhou (hlavní) fázi. Byla testována trojice vzorků z každé sady směsí z první fáze a šestice vzorků z každé sady směsí z druhé (hlavní) fáze. Vzorky první fáze byly testovány při stáří vzorků 21 dní a vzorky druhé (hlavní) fáze byly testovány při stáří vzorků 28 dní. Jedná se o destruktivní zkoušku, ze které vznikly dvě části vzorku. Při testování vzorků z druhé fáze byly zlomky vzorků použity pro následné testování pevnosti v tlaku (viz předchozí podkapitola 4.3).

4.4.1 Metodika měření

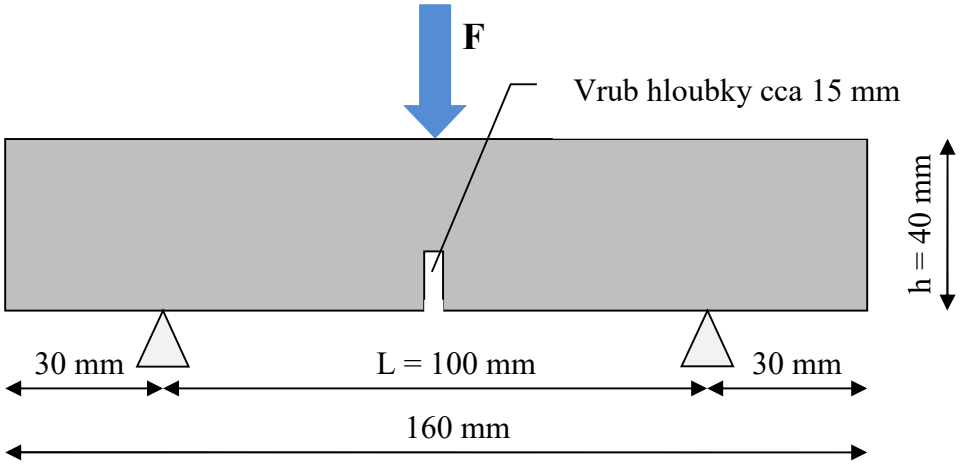
Pevnost v tahu za ohybu byla měřena zkouškou tříbodovým ohybem. Zkouška vzorků pro první fázi byla prováděna na univerzálním měřicím stroji MTS Alliance RT 30kN. Použitý měřicí stroj má rozsah zatěžovací síly 0 kN až 30 kN. Způsob zatěžování byl definován konstantní rychlostí posunu 0,1 mm/min. Na stroji se zaznamenává zatěžovací síla, deformace a čas. Vzorky byly zatěžovány kolmo na směr hutnění. Zatěžování probíhá pomocí jedné síly působící uprostřed rozpětí. Vzdálenost podpor na pevné části stroje byla 80 mm (Obrázek 56). Vzorky byly zatěžovány až do úplného porušení křehkým lomem (Hlubocký, 2016).



Obrázek 56 – Schéma zkoušky tříbodovým ohybem pro vzorky první fáze (Hlubocký, 2016).

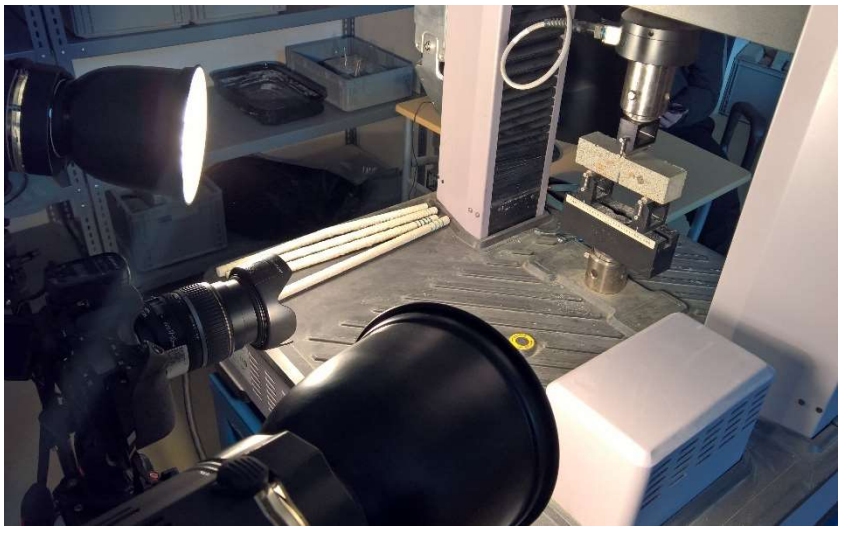
Vzorky vyrobené v druhé fázi byly testovány na univerzálním měřicím stroji MTS Criterion modelová řada 43. Tento měřicí stroj má rozsah zatěžovací síly také 0 kN až 30 kN. Způsob zatěžování byl definován konstantní rychlostí posunu. Rychlost posunu byla zvolena pro tři vzorky z každé sady na 0,8 mm/min pro vzorky, které nebyly foceny pro vyhodnocení metodou DIC. U vzorků focených pro metodu DIC byla zvolena rychlost posunu 0,4 mm/min.

Focení pro metodu DIC probíhalo vždy na třech vzorcích od každé sady vzorků. Vzorky pro focení byly voleny podle výsledků z nedestruktivního testování, tak aby měly nejpodobnější vlastnosti. Na stroji se zaznamenává zatěžovací síla, deformace a čas. Zatěžování vzorků bylo kolmo na směr hutnění při výrobě vzorků. Zatěžování probíhalo dle schématu na následujícím obrázku, tedy uprostřed rozpětí v místě vytvořeného vrubu jednou silou. Vzdálenost podpor pevné části stroje byla 100 mm (Obrázek 57). Vzorky byly zatěžovány do doby, než zatěžovací síla klesla na přibližně 40 % maximální zatěžovací síly. U vzorků z druhé (hlavní) fáze bylo zamezeno vzniku křehkého lomu pomocí PVA vláken.



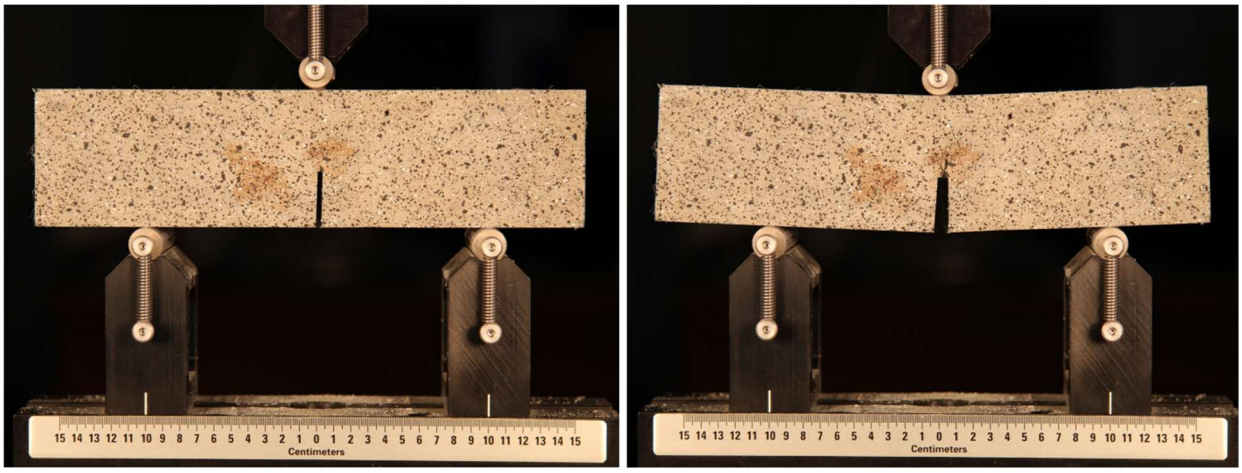
Obrázek 57 – Schéma zkoušky tříbodovým ohybem pro vzorky druhé fáze s vrubem (Hlubocký, 2016).

Obrázek 58 ukazuje uspořádání prostoru pro zkoušení pevnosti v tahu za ohybu s fotografováním průběhu zkoušky pro metodu DIC. V pravé části fotografie je vzorek umístěný v měřícím stroji a v levé části jsou světla a fotoaparát pro nasvětlení vzorku a fotografování průběhu zkoušky.



Obrázek 58 - Fotografie uspořádání měření pro zkoušku pevnosti v tahu za ohybu a pro fotografování pro metodu DIC.

Na dalším obrázku (Obrázek 59) je zobrazen vzorek umístěný v měřícím stroji, připravený pro zkoušení tříbodovým ohybem pro stanovení pevnosti v tahu za ohybu. Na levé fotografii je zachycen vzorek před zahájením zatěžování vzorku. Na pravé fotografii je snímek deformovaného vzorku na konci prováděné zkoušky tříbodovým ohybem.



Obrázek 59 – Zkouška tříbodovým ohybem – Vlevo snímek vzorku před zahájením zatěžování a vpravo snímek deformovaného vzorku u konce zkoušky.

Stanovení pevnosti v tahu za ohybu se provádí pomocí ohybového momentu uprostřed rozpětí podpor, který se stanoví jako:

$$M = \frac{F}{2} \cdot \frac{L}{2}, \tag{4.4.1-1}$$

kde F je zatěžovací síla [kN] a L je rozpětí podpor [m].

Dále potřebujeme pro výpočet pevnosti znát průřezový modul W [m^3], který se u obdélníkového průřezu vypočte jako:

$$W = \frac{1}{6} \cdot b \cdot h^2, \tag{4.4.1-2}$$

kde b je šířka zkušebního vzorku [m] a h je výška zkušebního vzorku [m].

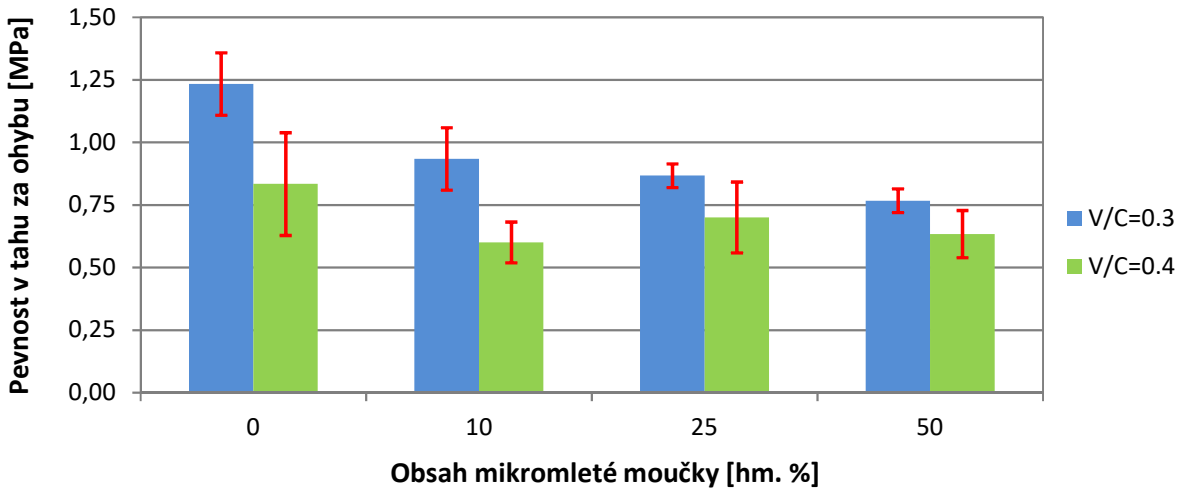
Pevnost v tahu za ohybu se stanoví výpočtem ze vzorce pro napětí:

$$\sigma = \frac{M}{W}, \tag{4.4.1-3}$$

kde M je ohybový moment uprostřed rozpětí [kNm], W je průřezový modul [m^3] a σ je napětí (pevnost v tahu za ohybu) [MPa] (Hlubocký, 2016).

4.4.2 Výsledky a diskuze

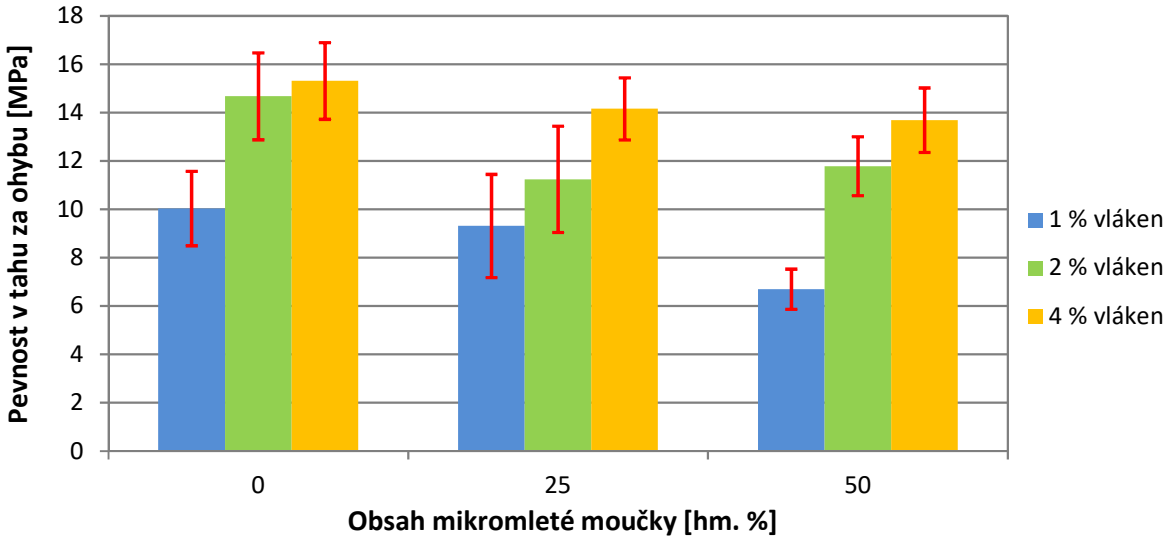
Pevnost v tahu za ohybu byla testována na vzorcích první i druhé (hlavní) fáze. Z výsledných pevností v tahu za ohybu první fáze jsem volil obsahy mikromleté vápencové moučky pro výrobu vzorků pro druhou fázi. Nejprve jsem stanovil pevnosti v tahu za ohybu jednotlivých zkušebních vzorků. Po jejich zprůměrování jsem průměrné hodnoty jednotlivých sad shrnul v následujícím grafu (Obrázek 60). Z grafu je patrný trend snižující se pevnosti v tahu za ohybu se zvyšujícím obsahem mikromleté vápencové moučky. Pevnost v tahu za ohybu se zvýšením vodního součinitele snižuje. Nejvyšší pevnosti v tahu za ohybu dosahuje směs bez použití mikromleté moučky. Mezi použitím 10 hm. % mikromleté moučky a 25 hm. % mikromleté moučky není ve výsledné pevnosti velký rozdíl. Z této skutečnosti jsem vycházel při volbě množství mikromleté vápencové moučky pro výrobu vzorků ve druhé (hlavní) fázi. Zvýšení využití o 15 hm. % mikromleté moučky nezpůsobí velké snížení pevnosti v tahu za ohybu. Využijeme více odpadního materiálu a ušetříme „drahý“ cement.



Obrázek 60 – Pevnost v tahu za ohybu vzorků z první fáze v závislosti na obsahu mikromleté vápencové moučky při stáří vzorků 21 dní.

Při vyhodnocování zkoušek druhé fáze jsem nejprve stanovil pevnosti v tahu za ohybu jednotlivých zkušebních vzorků vyrobených pro druhou fázi. Po jejich zprůměrování jsem průměrné hodnoty jednotlivých sad shrnul v následujícím grafu (Obrázek 61). Z grafu je patrné, že pevnost v tahu za ohybu negativně ovlivňuje zvyšování obsahu mikromleté vápencové moučky a pozitivně pevnost v tahu za ohybu ovlivňuje zvyšující obsah PVA vláken. Z grafu je patrný stejný trend jako u pevnosti v tlaku s ohledem na vliv mikromleté vápencové moučky, tedy že se zvyšujícím množstvím mikromleté vápencové moučky klesá pevnost v tahu za ohybu. Opačný trend můžeme pozorovat se zvyšujícím obsahem PVA vláken. Zvyšování obsahu PVA vláken zvyšuje pevnost v tahu za ohybu. Největší nárůst pevnosti v tahu za ohybu je viditelný

mezi 1 hm. % PVA vláken a 2 hm. % PVA vláken. Mezi 2 hm. % a 4 hm. % PVA vláken již není tak velký nárůst pevnosti. Z této skutečnosti usuzuji, že použití 4 hm. % PVA vláken ve směsi nepřináší výrazné zlepšení a není tedy ekonomickým řešením. Nejvyšší pevnosti v tahu za ohybu bylo dosaženo u sady vzorků bez použití mikromleté vápencové moučky a s nejvyšším obsahem PVA vláken, tedy 4 hm. % PVA vláken. U sady C100+MM0/V4 bylo dosaženo průměrné pevnosti v tahu za ohybu 15,31 ± 1,58 MPa, což byla pevnost v tahu za ohybu vyšší o 35 % než u sady C100+MM0/V1 a pouze o 11 % vyšší než u sady C50+MM50/V4. Uvedené výsledné pevnosti v tahu za ohybu se týkají vzorků při stáří 28 dní.

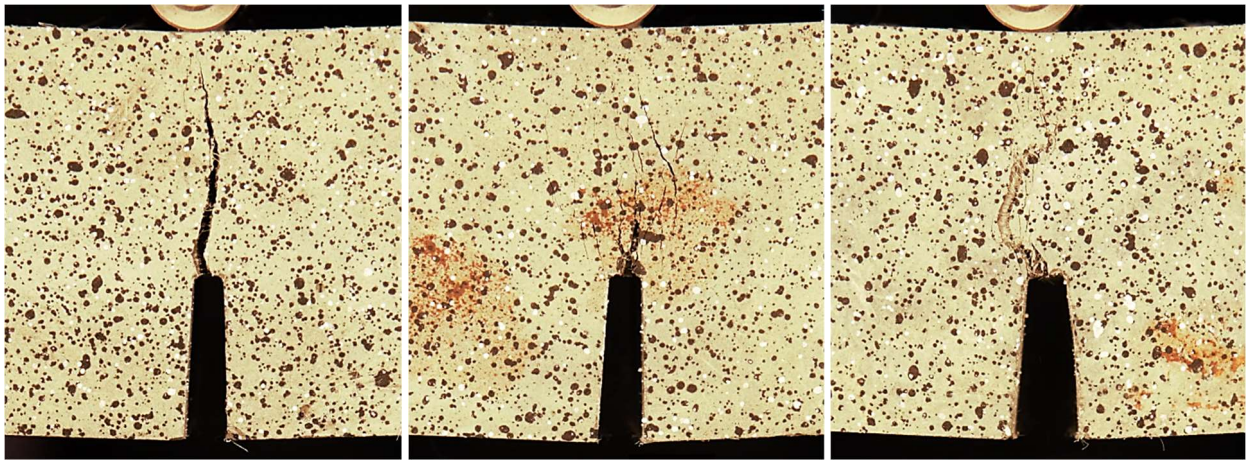


Obrázek 61 – Pevnost v tahu za ohybu vzorků z druhé (hlavní) fáze v závislosti na obsahu mikromleté vápencové moučky a obsahu PVA vláken při stáří vzorků 28 dní.

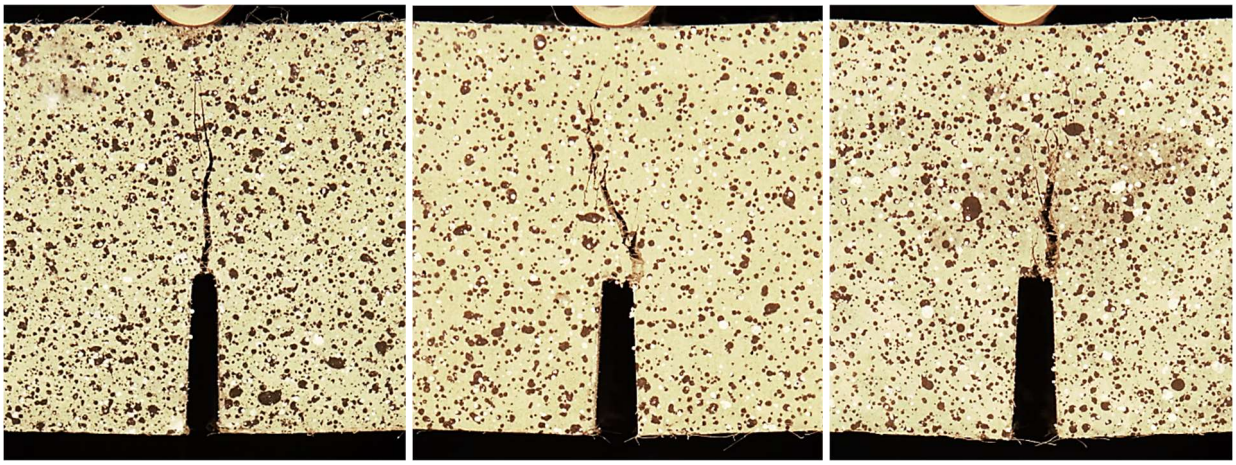
Sada vzorků C100+MM0/V1 dosáhla průměrné hodnoty pevnosti v tahu za ohybu 10,03 ± 1,54 MPa, což je o 33 % více než pevnost v tahu za ohybu u sady C50+MM50/V1 a o 12 % menší pevnosti v tahu za ohybu než u sady C50+MM50/V2. Porovnání pevností v tahu za ohybu u sad C100+MM0/V1 a C50+MM50/V2 vede k ekonomické otázce. Pokud nahradíme 50 hm. % cementu mikromletou vápencovou moučkou, tedy odpadním materiálem s nízkou cenou, a přidáme do směsi navíc 1 hm. % PVA vláken, získáváme i v rámci odchylek stále větší pevnost v tahu za ohybu než u sady C100+MM0/V1.

Následující obrázky (Obrázek 62, Obrázek 63 a Obrázek 64) znázorňují porušení vzorků při zkoušce tříbodovým ohybem. Fotografie ukazují deformaci a trhliny v době ukončení zatěžování, tedy v době poklesu zatěžovací síly na přibližně 40 % maximální zatěžovací síly. Obrázek 62 zobrazuje vzorky bez použití mikromleté moučky. Obrázek 63 zobrazuje vzorky s 25 hm. % mikromleté moučky. Obrázek 64 zobrazuje vzorky obsahující 50 hm. % mikromleté moučky. Zleva doprava se jedná vždy o vzorky s 1 hm. %, 2 hm. % a 4 hm. % PVA vláken.

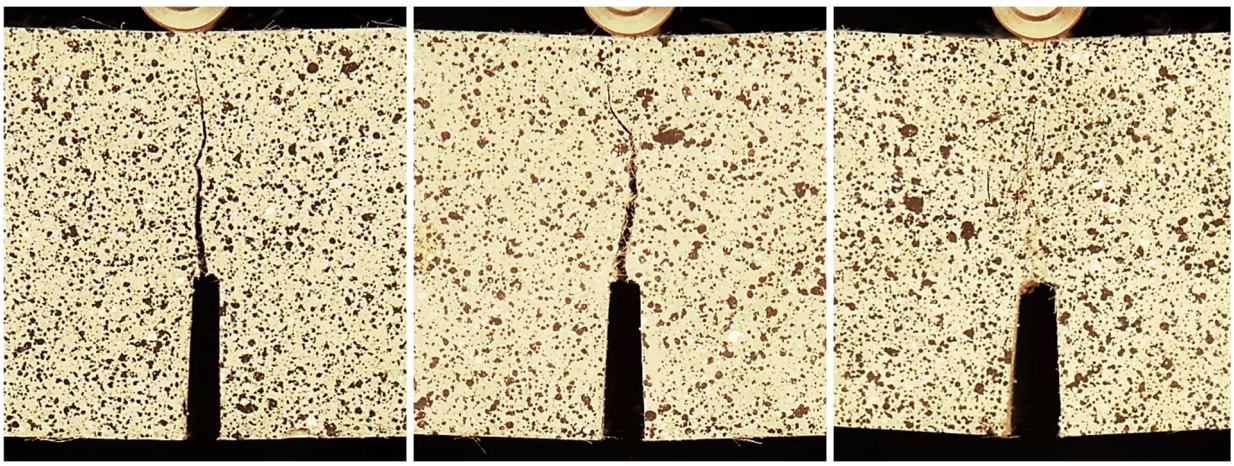
U vzorků s 1 hm. % PVA vláken vždy došlo ke vzniku jedné hlavní trhliny. U vzorků se 2 hm. % PVA vláken vzniklo více středních trhlin kromě vzorku s obsahem 50 hm. % mikromleté moučky, kde vznikla také jedna hlavní trhlina. U vzorků se 4 hm. % PVA vláken vznikalo mnoho malých trhlin. Avšak u sad C100+MM0/V4 a C75+MM25/V4 se dále více rozvíjela jedna větší trhlina. U sady C50+MM50/V4 se tvořili další malé trhlinky.



Obrázek 62 – Porušení vzorků sady C100+MM0 (zleva sady /V1, /V2 a /V4).



Obrázek 63 – Porušení vzorků sady C75+MM25 (zleva sady /V1, /V2 a /V4).



Obrázek 64 – Porušení vzorků sady C50+MM50 (zleva sady /V1, /V2 a /V4).

Následující obrázky (Obrázek 65, Obrázek 66 a Obrázek 67) znázorňují lomové plochy vzorků pro jednotlivé sady vzorků. Uspořádání fotografií pro jednotlivé sady je stejné jako u fotografií porušení vzorků. Z lomových ploch je patrné, že přidáním mikromleté moučky dochází z lepší distribuci vláken po průřezu. Dále můžeme pozorovat ze stylu lomu, jak dochází k porušení. Na povrchu lomových ploch jsou viditelná vlákna vytažená z matrice i porušená vlákna. U vzorků s 25 hm.% moučky a s 1 hm. % i s 2 hm. % vláken je viditelné na lomové ploše vetší množství porušených vláken než už sad s obsahem 50 hm % mikromleté moučky. Dalo by se předpokládat, že použití mikromleté moučky do obsahu 25 hm. % může mít vliv na lepší soudržnost matrice s vlákny.

Obrázek 65 – Lomové plochy vzorků sady C100+MM0 (zleva sady /V1, /V2 a /V4).

Obrázek 66 – Lomové plochy vzorků sady C75+MM25 (zleva sady /V1, /V2 a /V4).

Obrázek 67 – Lomové plochy vzorků sady C50+MM50 (zleva sady /V1, /V2 a /V4).

4.5 Shrnutí výsledků a diskuze

Diplomová práce zabývající se vlivem mikromleté vápencové moučky na vlastnosti cementového kompozitu vyztuženého PVA vlákny vznikla v návaznosti na bakalářskou práci, která řešila využití mikromleté mramorové moučky jako náhrady za cement s plnivem z drceného vápence frakce 0 - 2 mm. V diplomové práci používám pouze mikromletý odpadní materiál jako mikroplnivo a PVA vlákna jako rozptýlenou výztuž v cementovém kompozitu. Trendy mechanických vlastností získané v bakalářské práci odpovídají trendům mechanických vlastností získaných v této práci.

Bylo navrženo devět sad po šesti vzorcích, na kterých byly prováděny destruktivní a nedestruktivní zkoušky mechanických vlastností cementového kompozitu. Ze zkoušek zpracovatelnosti čerstvé směsi byl pozorovatelný vliv plastifikačních účinků mikromleté vápencové moučky. Tento fakt je podložený i tvrzeními autorů v publikacích, které jsou zmíněné v kapitole 2 této práce. Zpracovatelnost čerstvé směsi naopak zhoršuje zvyšování obsahu PVA vláken. Při zvyšování obsahu vláken je totiž nutné zvyšovat pro zachování zpracovatelnosti množství záměsové vody. Zvýšení množství záměsové vody má za následek větší pórovitost kompozitu. Vznik pórů v kompozitu snižuje jak objemovou hmotnost kompozitu, tak hlavně vzniklé póry zapříčiňují menší kompaktnost matrice kompozitu. Náhrada cementu mikroplnivem je účinnější při menším vodním součiniteli. Se zvýšením vodního součinitele klesají pevnosti v tlaku i tahu za ohybu. Potvrzení této skutečnosti dokládá i publikace od autorů Kumar a Jain (2017) zmíněné v rešerši.

Z výsledků testování pomocí rezonanční metody a ultrazvukové impulsní metody (kapitola 4.2) je patrný trend dynamického modulu pružnosti, který klesá s přibívajícím množstvím mikromleté moučky nad obsah 25 hm. %, což potvrzují i výsledky v bakalářské práci. Do obsahu 25 hm. % mikromleté mramorové moučky je patrný mírný nárůst dynamického modulu pružnosti. Tento trend platí pouze u obsahu 1 hm. % PVA vláken. U většího obsahu PVA vláken je trend s přibývajícím množstvím mikromleté moučky klesající. Zároveň dynamický modul pružnosti klesá s rostoucím obsahem PVA vláken. Z výsledných hodnot dynamických modulů pružnosti vyplývá, že výsledný kompozit v závislosti na zvyšování obsahu PVA vláken je „pružnější“. Nejvyššího dynamického modulu pružnosti a dynamického modulu pružnosti ve smyku dosáhla sada C75+MM25/V1. Naopak nejnižšího dynamického modulu pružnosti dosáhla sada C50+MM50/V4.

Pevnost v tlaku má stejný trend jako v bakalářské práci a v dalších publikacích zmíněných v rešerši (Madandoust a kol., 2015), (Keleştemur a kol., 2014b) a (Aliabdo a kol., 2014). Trend u pevnosti v tlaku je klesající se zvyšováním obsahu mikromleté vápencové moučky. Zároveň

se pevnost v tlaku snižuje s rostoucím obsahem PVA vláken. Trend klesající pevnosti v tlaku přikládám vlivu snížení množství cementu jako pojiva a skutečnosti, že se mikromletá vápencová moučka v cementovém kompozitu chová jako inertní mikroplnivo. Avšak Courard a Michel (2014) ve své publikaci uvádí, že nelze vždy mikroplnivo na bázi vápence považovat za zcela inertní. Ovšem, dle výsledků autora Prošek (2016) a dalších publikací, se mikromletá vápencová moučka jako inertní chová. Dalším vlivem negativně ovlivňujícím pevnost v tlaku je zakomponování PVA vláken jako rozptýlené výztuže do kompozitu. Použitím vláken vznikne nehomogenní směs a vlivem nehomogenit je snížena pevnost v tlaku. Toto potvrzují ve své práci i výše uvedení autoři. Nejvyšší pevnosti v tlaku dosahuje směs s nejmenším obsahem PVA vláken a bez použité mikromleté vápencové moučky jako mikroplniva. Nejmenší pevnosti v tlaku naopak dosáhla směs s největším obsahem PVA vláken a s nejvyšší náhradou mikromleté vápencové moučky za cement.

Pomocí zkoušky tříbodovým ohybem byly stanoveny pevnosti v tahu za ohybu. Pevnost v tahu za ohybu byla stanovena pro vzorky z první i druhé fáze výroby vzorků. První fáze sloužila k určení obsahů mikromleté vápencové moučky pro druhou fázi. Z výsledků pevnosti v tahu za ohybu u první fáze je patrné, že rozdíl mezi sadou s 10 hm. % a sadou s 25 hm. % není výrazný rozdíl v pevnostech v tahu za ohybu. Z tohoto důvodu byly zvoleny obsahy mikromleté vápencové moučky 0 hm. % jako referenční, 25 hm. % a 50 hm. %. Ve druhé fázi bylo potvrzeno, že pevnost v tahu za ohybu negativně ovlivňuje zvyšování obsahu mikromleté vápencové moučky. Trend s ohledem na mikromletou moučku je stejný jako u pevností v tlaku. Pevnost v tahu za ohybu je jediná zkoumaná mechanická vlastnost, kterou pozitivně ovlivňuje zvyšování obsahu PVA vláken. Největší nárůst pevnosti v tahu za ohybu je viditelný mezi 1 hm. % PVA vláken a 2 hm. % PVA vláken. Mezi 2 hm. % a 4 hm. % PVA vláken již není tak velký nárůst pevnosti. Z výsledků usuzuji, že použití 4 hm. % PVA vláken nepřináší natolik výrazné zlepšení pevnosti v tahu za ohybu, aby bylo ekonomickým řešením i s faktem, že obsah 4 hm. % PVA vláken přináší zhoršení i dalších zkoumaných vlastností. Ohybové chování navrženého cementového kompozitu je patrné z fotografií porušení vzorků a z fotografií lomových ploch v kapitole 4.4.2. Při pohledu na lomové plochy vzorků usuzuji, že dochází ke zlepšení soudržnosti vláken s matricí při použití mikromleté moučky do obsahu 25 hm. %

Z provedených testů a jednotlivých vyhodnocení by na tuto práci bylo výhodné navázat zkoumáním dalších obsahových frakcí jak PVA vláken, tak obsahů mikromleté moučky mezi 0 hm. % a 25 hm. %. Dále se bude nutno věnovat možnostem modifikace tohoto cementového kompozitu chemickými přísadami jako jsou superplastifikátory nebo modifikací pro zlepšení soudržnosti výztuže s matricí.

5 Závěr

Diplomová práce byla zaměřena na studium cementového kompozitu vyztuženého rozptýlenou výztuží ve formě PVA vláken za využití mikromleté vápencové moučky jako mikroplniva. Práce hodnotí jednotlivé vybrané vlastnosti mnou navrženého cementového kompozitu. Tyto vlastnosti byly testovány pomocí destruktivních zkoušek při stáří vzorků 28 dní a pomocí nedestruktivního testování byl zjišťován vývoj vlastností v čase. V hlavní druhé fázi bylo vyrobeno 9 sad po 6-ti vzorcích. Trojice sad měla vždy stejnou obsahovou frakci PVA vláken (1, 2 a 4 hm. %), dále byly použity tři obsahy mikromleté moučky (0, 25 a 50 hm. %) jako náhrady za cement. Pro možnost porovnání měly sady pro každý obsah mikromleté moučky trojici sad s různými obsahy PVA vláken. Za nejdůležitější považuji zkoušky a vyhodnocení pevnosti v tahu za ohybu, které s ohledem na hledání vhodného kompozitu pro výrobu prvků pro vodorovné stavební konstrukce ukazují ohybové chování navrženého kompozitu.

Na základě shrnutí výsledků diplomové práce lze vyvodit tyto závěry:

- Bylo navrženo devět sad vzorků s různými obsahy mikromleté vápencové moučky (0 hm. %, 25 hm. % a 50 hm. %) a se třemi obsahovými frakcemi PVA vláken (1 hm. %, 2 hm. % a 4 hm. %).
- Vodní součinitel byl udržován konstantní vždy pro jedno množství PVA vláken.
- Zpracovatelnost čerstvé směsi se zlepšovala s rostoucím množstvím mikromleté vápencové moučky.
- Mikromletá vápencová moučka vykazuje plastifikační účinky.
- Zpracovatelnost je také závislá na obsahu PVA vláken ve směsi. Při obsahu 4 hm. % PVA vláken se snižuje vliv mikromleté moučky na zpracovatelnost.
- Objemová hmotnost klesá s nárůstem vodního součinitele, se zvyšováním obsahu PVA vláken a se zvyšováním obsahu mikromleté moučky.
- PVA vlákna zamezují smrštění vzorků a vznik smršťovacích trhlin. Smrštění vzorků bylo minimální (do 0,1 % zkrácení vzorku).
- Při použití PVA vláken smrštění téměř neovlivňuje ani množství záměsové vody.
- Dynamický modul pružnosti zjištěný pomocí rezonanční metody byl až o 10 % nižší než dynamický modul pružnosti získaný pomocí ultrazvukové impulsní metody.
- Dynamický modul pružnosti klesal s rostoucím množstvím PVA vláken.
- Nejvyššího dynamického modulu pružnosti dosahovaly sady s obsahem 25 hm. % mikromleté moučky a s obsahem 1 hm. % PVA vláken.

- Dynamický modul pružnosti u sad vzorků s 2 hm. % a 4 hm. % PVA vláken klesal se zvyšujícím množstvím mikromleté vápencové moučky. U sady s 1 hm. % PVA vláken došlo k mírnému nárůstu dynamického modulu pružnosti při obsahu 25 hm. % mikromleté moučky.
- Dynamický modul pružnosti po 24 hodinách nabývá alespoň 50% hodnoty dynamického modulu pružnosti při stáří vzorků 28 dní.
- Přidávání mikromleté moučky může mít do určitého obsahu (předpoklad do 25 hm. %) pozitivní vliv na dynamický modul pružnosti.
- Pevnost v tlaku klesala v závislosti na zvyšování jak obsahu mikromleté moučky, tak i obsahu PVA vláken.
- Na klesající trend pevnosti v tlaku má vliv snížení množství cementu jako pojiva a inertnost mikromleté vápencové moučky. Zároveň i zakomponování PVA vláken a tím vznik nehomogenní směsi.
- Pevnost v tahu za ohybu negativně ovlivňuje zvyšování množství mikromleté vápencové moučky.
- Pevnost v tahu za ohybu dle očekávání roste se zvyšujícím obsahem PVA vláken.
- Přidáním 1 hm. % PVA vláken dokážeme nahradit snížení pevnosti v tahu za ohybu vlivem přidání 50 hm. % mikromleté vápencové moučky.
- Nárůst pevnosti v tahu za ohybu u sad s 4 hm. % PVA vláken není natolik velký oproti sadám se 2 hm. % PVA vláken, aby bylo takto velké množství obsahu vláken produktivním či ekonomickým řešením.
- Ohybové chování kompozitu s ohledem na vznik trhlin je nejlepší u sady C50+MM50/V4.
- Zvyšování obsahu mikromleté moučky potvrzuje výsledky zjištěné v bakalářské práci.

Diplomová práce navazovala na bakalářskou práci, která řešila pouze použití odpadního materiálu na bázi mramoru a vápence jako mikroplniva a plniva v cementovém kompozitu. Dále řešila návrh překladu pro ucelený stavební systém. Z bakalářské práce, její rešerše i praktické části, vyplynula otázka vlivu mikromleté moučky na soudržnost výztuže s matricí. Diplomová práce řeší v návaznosti cementový kompozit vyztužený rozptýlenou výztuží. Výsledky práce ovšem nenapovídají s jistotou tvrzením o zlepšení soudržnosti výztuže s matricí. V navazujícím zkoumání tohoto cementového kompozitu bude nutno se dále věnovat možnostem modifikace chemickými přísadami a dalším obsahům mikroplniva mezi 0 hm. % a 25 hm. % mikromleté vápencové moučky jako náhrady za cement.

6 Seznam zdrojů

ALIABDO, Ali A., Abd Elmoaty M. ABD ELMOATY a Esraa M. AUDA, 2014. Re-use of waste marble dust in the production of cement and concrete. *Construction and Building Materials* [online]. 1., roč. 50, s. 28–41 [vid. 5. červen 2015]. ISSN 09500618. Získáno z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.09.005

BEDERINA, Madani, Zoubir MAKHLOUFI a Tayeb BOUZIANI, 2011. Effect of limestone fillers the physic-mechanical properties of limestone concrete. *Physics Procedia* [online]. B.m.: Elsevier B.V., roč. 21, s. 28–34. ISSN 18753892. Získáno z: doi:10.1016/j.phpro.2011.10.005

BENDJILLALI, Khadra, Mohamed S. GOUAL, Mohamed CHEMROUK a Zineb DAMENE, 2011. Study of the reinforcement of limestone mortars by polypropylene fibers waste. *Physics Procedia* [online]. B.m.: Elsevier B.V., roč. 21, s. 42–46. ISSN 18753892. Získáno z: doi:10.1016/j.phpro.2011.10.007

BENTZ, Dale P., Chiara F. FERRARIS, Scott Z. JONES, Didier LOOTENS a Franco ZUNINO, 2017a. Limestone and silica powder replacements for cement: Early-age performance. *Cement and Concrete Composites* [online]. B.m.: Elsevier Ltd, roč. 78, s. 43–56. ISSN 09589465. Získáno z: doi:10.1016/j.cemconcomp.2017.01.001

BETTERMAN, L. R., C. OUYANG a S. P. SHAH, 1995. Fiber-matrix interaction in microfiber-reinforced mortar. *Advanced Cement Based Materials* [online]. roč. 2, č. 2, s. 53–61. ISSN 10657355. Získáno z: doi:10.1016/1065-7355(95)90025-X

CIKRLE, Petr, Daniel KOCÁB a Ondřej POSPÍCHAL, 2013. Zkoušení Betonu Ultrazvukovou Impulsovou Metodou. *Beton: Technologie, Konstrukce, Sanace*.

CORINALDESI, Valeria a Giacomo MORICONI, 2011. Characterization of self-compacting concretes prepared with different fibers and mineral additions. *Cement and Concrete Composites* [online]. B.m.: Elsevier Ltd, roč. 33, č. 5, s. 596–601. ISSN 09589465. Získáno z: doi:10.1016/j.cemconcomp.2011.03.007

CORINALDESI, Valeria, Giacomo MORICONI a Tarun R. NAIK, 2010. Characterization of marble powder for its use in mortar and concrete. *Construction and Building Materials* [online]. 1., roč. 24, č. 1, s. 113–117 [vid. 21. březen 2016]. ISSN 09500618. Získáno z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2009.08.013

COURARD, Luc a Frédéric MICHEL, 2014a. Limestone fillers cement based composites: Effects of blast furnace slags on fresh and hardened properties. *Construction and Building Materials* [online]. B.m.: Elsevier Ltd, roč. 51, s. 439–445. ISSN 09500618. Získáno z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.10.076

ČSN 73 1371, 2011. *Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu*. 2011. B.m.: Praha: Český normalizační institut.

ČSN 73 1372, 2012. *Nedestruktivní zkoušení betonu - Rezonanční metoda zkoušení betonu*. 2012. B.m.: Praha: Český normalizační institut.

ČSN EN 1015-3, 2000. *Zkušební metody malt pro zdivo - Část 3: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím střásacího stolku)*. 2000. B.m.: Praha: Český normalizační institut.

ČSN EN 12505-4, 2005. *Zkoušení betonu - Část 4: Stanovení rychlosti šíření ultrazvukového impulsu*. 2005. B.m.: Praha: Český normalizační institut.

GHAFOORI, Nader, Rebecca SPITEK a Meysam NAJIMI, 2016. Influence of limestone size and content on transport properties of self-consolidating concrete. *Construction and Building Materials* [online]. B.m.: Elsevier Ltd, roč. 127, s. 588–595. ISSN 09500618. Získáno z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.10.051

HAMOUSH, Sameer, Taher ABU-LEBDEH a Toney CUMMINS, 2010. Deflection behavior of concrete beams reinforced with PVA micro-fibers. *Construction and Building Materials* [online]. B.m.: Elsevier Ltd, roč. 24, č. 11, s. 2285–2293. ISSN 09500618. Získáno z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.04.027

HLUBOCKÝ, Lukáš, 2016. *Návrh prvků stavebního systému na bázi odpadních materiálů při zpracování kamene*. B.m. ČVUT v Praze, Fakulta stavební.

HORIKOSHI, T, A OGAWA, T SAITO a H HOSHIRO, 2006. Properties of polyvinyl alcohol fiber as reinforcing materials for cementitious composites. *International RILEM Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites in Structural Applications*. roč. 2, č. 1, s. 145–153.

CHAO, Shih-Ho, Antonie E. NAAMAN a Gustavo J. PARRA-MONTESINOS, 2009. Bond behavior of reinforcing bars in tensile strain-hardening fibre-reinforced cement composites. *ACI Structural Journal*. roč. 106, č. 6, s. 897–906. ISSN 08893241 (ISSN).

KELEŞTEMUR, Oğuzhan, Erdinç ARICI, Servet YILDIZ a Bihter GÖKÇER, 2014a. Performance evaluation of cement mortars containing marble dust and glass fiber exposed to high temperature by using Taguchi method. *Construction and Building Materials* [online]. roč. 60, s. 17–24. ISSN 09500618. Získáno z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.02.061

KELEŞTEMUR, Oğuzhan, Servet YILDIZ, Bihter GÖKÇER a Erdinç ARICI, 2014b. Statistical analysis for freeze-thaw resistance of cement mortars containing marble dust and glass fiber. *Materials and Design* [online]. roč. 60, s. 548–555. ISSN 18734197. Získáno z: doi:10.1016/j.matdes.2014.04.013

KIM, Dong joo, Antoine E. NAAMAN a Sherif EL-TAWIL, 2008. Comparative flexural behavior of four fiber reinforced cementitious composites. *Cement and Concrete Composites* [online]. B.m.: Elsevier Ltd, roč. 30, č. 10, s. 917–928. ISSN 09589465. Získáno z: doi:10.1016/j.cemconcomp.2008.08.002

KUMAR, Krishan a Sumesh JAIN, 2017. Combined effect of marble dust and steel fiber on the mechanical properties of high strength concretes. *International Journal of Trend in Scientific Research and Development* [online]. roč. 1, č. 4. ISSN 2456-6470. Získáno z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061807001201

LEE, Bang Yeon, Jin Keun KIM, Jeong Su KIM a Yun Yong KIM, 2009. Quantitative evaluation technique of Polyvinyl Alcohol (PVA) fiber dispersion in engineered cementitious composites. *Cement and Concrete Composites* [online]. B.m.: Elsevier Ltd, roč. 31, č. 6, s. 408–417. ISSN 09589465. Získáno z: doi:10.1016/j.cemconcomp.2009.04.002

LI, Victor C. a Henrik STANGT, 1997. Interface Property Characterization and Strengthening Mechanisms in Fiber Reinforced Cement Based Composites. *Advanced Cement Based Materials*. roč. 6, č. 6, s. 1–20.

LI, Victor C., Shuxin WANG a Cynthia WU, 2001. *Tensile strain-hardening behavior or polyvinyl alcohol engineered cementitious composite (PVA-ECC)* [online]. 2001. Získáno z: doi:10.14359/10851

MADANDOUST, Rahmat, Malek Mohammad RANJBAR, Reza GHAVIDEL a S. FATEMEH SHAHABI, 2015. Assessment of factors influencing mechanical properties of steel fiber reinforced self-compacting concrete. *Materials and Design* [online]. B.m.: Elsevier Ltd, roč. 83, s. 284–294. ISSN 18734197. Získáno z: doi:10.1016/j.matdes.2015.06.024

MASHALY, A O, B N SHALABY a M A EL-HEFNAWI, 2012. Characterization of The Marble Sludge of The Shaq El Thoaban Industrial Zone, Egypt and Its Compatibility for Various Recycling Applications. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*. roč. 6, č. 3, s. 153–161. ISSN 1991-8178.

MIKHAILOVA, Olesia, Grigory YAKOVLEV, Irina MAEVA a Sergey SENKOV, 2013. Effect of dolomite limestone powder on the compressive strength of concrete. *Procedia Engineering* [online]. B.m.: Elsevier B.V., roč. 57, s. 775–780. ISSN 18777058. Získáno z: doi:10.1016/j.proeng.2013.04.098

MOON, Gyu Don, Sungwoo OH, Sang Hwa JUNG a Young Cheol CHOI, 2017. Effects of the fineness of limestone powder and cement on the hydration and strength development of PLC concrete. *Construction and Building Materials* [online]. B.m.: Elsevier Ltd, roč. 135, s. 129–136. ISSN 09500618. Získáno z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.12.189

NOUSHINI, Amin, Bijan SAMALI a Kirk VESSALAS, 2013. Effect of polyvinyl alcohol (PVA) fibre on dynamic and material properties of fibre reinforced concrete. *Construction and Building Materials* [online]. B.m.: Elsevier Ltd, roč. 49, s. 374–383. ISSN 09500618. Získáno z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.08.035

PAWAR, Manju a Arvind DEWANGAN, 2014. The Significance of Partial Replacement of Cement With Waste Marble Powder Periodic Research. č. 2231, s. 1–6.

PROŠEK, Zdeněk, 2016. *Využití recyklovaných materiálů na bázi kamenných odprašků ve stavebnictví*. B.m. ČVUT v Praze, Fakulta stavební.

PUND, Vishendra, Shailesh KUSHWAH, Kapil SONI, Scholar M TECH, Structural ENGINEERING, Civil ENGINEERING, Civil ENGINEERING a Civil ENGINEERING, 2016. Experimental study of using waste marble powder and steel fibres for preparation of cement concrete. *International Journal of Advanced Technology for Science & Engineering Research*. roč. 1, č. 12, s. 1–15.

SADEK, Dina M., Mohamed M. EL-ATTAR a Haitham A. ALI, 2016. Reusing of marble and granite powders in self-compacting concrete for sustainable development. *Journal of Cleaner Production* [online]. 5., roč. 121, s. 19–32 [vid. 7. březen 2016]. ISSN 09596526. Získáno z: doi:10.1016/j.jclepro.2016.02.044

SHAFIGH, Payam, Mohammad A. NOMELI, U. Johnson ALENGARAM, Hilmi Bin MAHMUD a Mohd Zamin JUMAAT, 2016. Engineering properties of lightweight aggregate concrete containing limestone powder and high volume fly ash. *Journal of Cleaner Production* [online]. roč. 135, s. 148–157. ISSN 09596526. Získáno z: doi:10.1016/j.jclepro.2016.06.082

TENNICH, Mohsen, Abderrazek KALLEL a Mongi BEN OUEZDOU, 2015. Incorporation of fillers from marble and tile wastes in the composition of self-compacting concretes. *Construction and Building Materials* [online]. 8., roč. 91, s. 65–70 [vid. 25. březen 2016]. ISSN 09500618. Získáno z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.04.052

THONG, C.C., D.C.L. TEO a C.K. NG, 2016. Application of polyvinyl alcohol (PVA) in cement-based composite materials: A review of its engineering properties and microstructure behavior. *Construction and Building Materials* [online]. roč. 107, s. 172–180. ISSN 09500618. Získáno z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.12.188

TOPIČ, Jaroslav, 2013. *Studium vlastností kompozitního materiálu na bázi cementu a PVA*. B.m. ČVUT v Praze, Fakulta stavební.

TOPIČ, Jaroslav, Zdeněk PROŠEK, Pavel TESÁREK, Václav NEŽERKA a Tomáš PLACHÝ, 2014. Cement based composite with PVA: Development of mechanical properties. In: *EAN 2014 - 52nd International Conference on Experimental Stress Analysis* [online]. B.m.: Vyzkumny a zkusebni ustav Plzen. ISBN 9788023103776. Získáno z: http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84906258363&partnerID=tZOtx3y1

TORIGOE, Shin-ichi, Tetsuo HORIKOSHI, Atsuhisa OGAWA, Tadashi SAITO a Toshihiro HAMADA, 2003. Study on Evaluation Method for PVA Fiber Distribution in Engineered Cementitious Composite. *Journal of Advanced Concrete Technology* [online]. roč. 1, č. 3, s. 265–268. ISSN 1346-8014. Získáno z: doi:10.3151/jact.1.265

TORKAMAN, Javad, Alireza ASHORI a Ali SADR MOMTAZI, 2014. Using wood fiber waste, rice husk ash, and limestone powder waste as cement replacement materials for lightweight concrete blocks. *Construction and Building Materials* [online]. B.m.: Elsevier Ltd, roč. 50, s. 432–436. ISSN 09500618. Získáno z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.09.044

TU, Zhenjun, Ming Zhi GUO, Chi Sun POON a Caijun SHI, 2016. Effects of limestone powder on CaCO3 precipitation in CO2 cured cement pastes. *Cement and Concrete Composites* [online]. B.m.: Elsevier Ltd, roč. 72, s. 9–16. ISSN 09589465. Získáno z: doi:10.1016/j.cemconcomp.2016.05.019

VARDHAN, Kirti, Shweta GOYAL, Rafat SIDDIQUE a Malkit SINGH, 2015. Mechanical properties and microstructural analysis of cement mortar incorporating marble powder as partial replacement of cement. *Construction and Building Materials* [online]. 10., roč. 96, s. 615–621 [vid. 26. březen 2016]. ISSN 09500618. Získáno z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.08.071

VARHEN, Christian, Isabela DILONARDO, Roberto Cesar DE OLIVEIRA ROMANO, Rafael Giuliano PILEGGI a Antonio Domingues DE FIGUEIREDO, 2016a. Effect of the substitution of cement by limestone filler on the rheological behaviour and shrinkage of microconcretes. *Construction and Building Materials* [online]. B.m.: Elsevier Ltd, roč. 125, s. 375–386. ISSN 09500618. Získáno z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.08.062

VESELÝ, Jan, 2012. *Zkoušky modulu pružnosti betonu*. B.m. ČVUT v Praze, Fakulta stavební.

WANG, Shuxin a Victor C. LI, 2005. Polyvinyl alcohol fiber reinforced engineered cementitious composites: material design and performances. *Proc., Int'l Workshop on HPFRCC Structural …* [online]. s. 1–8. Získáno z: http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.67.4523&rep=rep1&type=pdf

YUN, Hyun Do, 2013. Effect of accelerated freeze-thaw cycling on mechanical properties of hybrid PVA and PE fiber-reinforced strain-hardening cement-based composites (SHCCs). *Composites Part B: Engineering* [online]. B.m.: Elsevier Ltd, roč. 52, s. 11–20. ISSN 13598368. Získáno z: doi:10.1016/j.compositesb.2013.03.021

ZHOU, Jian, Shunzhi QIAN, M. Guadalupe Sierra BELTRAN, Guang YE, Klaas VAN BREUGEL a Victor C. LI, 2010. Development of engineered cementitious composites with limestone powder and blast furnace slag. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions* [online]. roč. 43, č. 6, s. 803–814. ISSN 13595997. Získáno z: doi:10.1617/s11527-009-9549-0

7 Seznam obrázků

Obrázek 1 – Pevnost v tlaku v závislosti na stáří vzorků bez použití superplastifikátoru (REF – Referenční směs, 10 % CEM – 10 % náhrada za cement, 10 % SAND – 10 % náhrady za písek) (Corinaldesi a kol., 2010). 11
Obrázek 2 – Pevnost v tlaku v závislosti na stáří vzorků s použitím superplastifikátoru (REF – Referenční směs, 10 % CEM – 10 % náhrada za cement, 10 % SAND – 10 % náhrady za písek) (Corinaldesi a kol., 2010). 11
Obrázek 3 – Rozdělení velikosti částic vápencového prášku (Tu a kol 2016). 14
Obrázek 4 – Vliv vápencového prášku (měrný povrch 5500 m^2/kg) na pevnost v tlaku při stáří vzorků 14 a 28 dní (Mikhailova a kol, 2013). 16
Obrázek 5 – Vliv jemnosti (měrného povrchu) vápencového prášku na pevnost v tlaku při stáří vzorků 7 dní (Mikhailova a kol, 2013). 16
Obrázek 6 – Křivka zrnitosti (distribuce velikosti zrn) portlandského cementu (P), granulované vysokopecní strusky (BFS) a vápencového prášku - plniva (LF) (Courard a Michel, 2014b). 18
Obrázek 7 – Křivka zrnitosti materiálů použitých pro výrobu směsí (Varhen a kol., 2016). 19
Obrázek 8 – Vývoj smršťování s použitím 80 hm. %, 60 hm. % a 20 hm. % vápencového plniva (Varhen a kol., 2016). 20
Obrázek 9 – Křivka zrnitosti určená pomocí laserové difrakce a křivka z počítačového modelu (CEMHYD3D) (Bentz a kol., 2017). 22
Obrázek 10 – Mikroskopická (SEM) analýza cementové pasty (Aliabdo a kol., 2014). 23
Obrázek 11 – Soudržnost výztuže s matricí v závislosti na obsahu mramorového prachu (Aliabdo a kol., 2014). 24
Obrázek 12 – Zpracování obrazu distribuce vláken v průřezu (Torigoe a kol., 2003). 25
Obrázek 13 – Výsledky zkoušek v prostém tahu (Torigoe a kol., 2003). 26
Obrázek 14 – Pevnost v tlaku při různých množstvích cementu (C) a různým obsahem vláken (Vf) v závislosti na stáří vzorků (Madandoust a kol., 2015) 27
Obrázek 15 – Pevnost v tahu při různých množstvích cementu (C) a různým obsahem vláken (Vf) v závislosti na stáří vzorků (Madandoust a kol., 2015) 28
Obrázek 16 – Ukázka použitých vláken (Kim a kol., 2008). 29
Obrázek 17 – Snímky PVA vláken pomocí SEM. PVA vlákno před smícháním do matrice (vlevo) a PVA vlákno vyčnívající z lomové plochy (vpravo) (Betterman a kol., 1995). 32
Obrázek 18 – Křivka zrnitosti použitých jemných částic (CEM I 42,5 N, vápencový prášek, BFS a CEM III/B 42,5 N) získaná laserovou difrakcí (Zhou a kol., 2010). 34
Obrázek 19 – Křivka zrnitosti mramorového prachu a velmi jemného písku (Keleştemur a kol., 2014). 35
Obrázek 20 – SEM snímky mikrostruktury vzorků před zmrazovacími cykly (a) a po 30-ti zmrazovacích cyklech (Keleştemur a kol., 2014). 36
Obrázek 21 – Pevnost v tahu za ohybu v závislosti na množství vláken (Bendjillali a kol., 2011). 37
Obrázek 22 - Nárůst pevnosti v tahu za ohybu vzorků ve srovnání s maltami bez vláken (Bendjillali a kol., 2011). 38

Obrázek 23 – Pevnost v tlaku v závislosti na množství vláken (Bendjillali a kol., 2011). 38
Obrázek 24 – Nárůst pevnosti v tlaku vzorků ve srovnání s maltami bez vláken (Bendjillali a kol., 2011). 39
Obrázek 25 – Křivka zrnitosti cementu (Českomoravský cement, a.s.) 41
Obrázek 26 – Vápencový odpadní materiál – vlevo, Mikromletá vápencová moučka – vpravo. 44
Obrázek 27 – Křivka zrnitosti mikromleté vápencové moučky. 44
Obrázek 28 – Použitá PVA vlákna KURARAY REC 15 × 12. 45
Obrázek 29 – Schéma výroby PVA (polyvinylalkoholu) (Thong a kol., 2016). 46
Obrázek 30 PVA v práškové formě (Thong a kol., 2016). 46
Obrázek 31 – Struktura PVA vlákna (Noushini a kol., 2013). 46
Obrázek 32 - Schéma vytvořeného vrubu ve zkušebním vzorku. 48
Obrázek 33 – Příprava vzorků s vrubem – řezání úhlovou bruskou pomocí diamantového řezného kotouče na beton. 48
Obrázek 34 – Připravené vzorky s vrubem po nástřiku krupičky černé a bílé barvy (vytvoření rastru pro DIC). 49
Obrázek 35 – Fotografie vytvořené struktury na zkušebním vzorku s vrubem pro vyhodnocení deformací metodou DIC. 49
Obrázek 36 – Graf závislosti objemové hmotnosti na množství mikromleté vápencové moučky. 51
Obrázek 37 – Graf závislosti objemové hmotnosti na množství mikromleté vápencové moučky a obsahu PVA vláken. 53
Obrázek 38 – Zkouška rozlitím, střásací stolek s formou a dusadlem – vlevo, směs po 20 rázech zkoušky – vpravo (Hlubocký, 2016). 54
Obrázek 39 – Zpracovatelnost směsí z první fáze výroby vzorků v závislosti na obsahu mikromleté vápencové moučky. 55
Obrázek 40 – Zpracovatelnost směsí z druhé (hlavní) fáze výroby vzorků v závislosti na obsahu mikromleté vápencové moučky a PVA vláken. 55
Obrázek 41 – Smrštění po 24 hodinách v závislosti na obsahu mikromleté moučky pro jednotlivé obsahy PVA vláken. 56
Obrázek 42 – Měřicí sestava Brüel & Kjær (A – piezoelektrický snímač zrychlení, B – rázové kladívko, C – řídící PC, D – měřicí stanice) (Hlubocký, 2016). 57
Obrázek 43 – Schéma měření základní vlastní frekvence podélného kmitání vzorku rezonanční metodou (Hlubocký, 2016). 58
Obrázek 44 – Schéma měření základní vlastní frekvence příčného kmitání vzorku rezonanční metodou (Hlubocký, 2016). 59
Obrázek 45 – Schéma měření základní vlastní frekvence kroutivého kmitání vzorku rezonanční metodou (Hlubocký, 2016). 59
Obrázek 46 – Vývoj dynamického modulu pružnosti pro podélné kmitání pro jednotlivé sady vzorků při stáří 1, 7, 14, 21 a 28 dní. 61
Obrázek 47 – Vývoj dynamického modulu pružnosti pro příčné kmitání pro jednotlivé sady vzorků při stáří 1, 7, 14, 21 a 28 dní. 61
Obrázek 48 – Dynamický modul pružnosti pro jednotlivé sady vzorků při stáří vzorků 28 dní – srovnání podélného a příčného. 62

Obrázek 49 – Vývoj dynamického modulu pružnosti ve smyku pro jednotlivé sady vzorků při stáří 1, 7, 14, 21 a 28 dní. 62
Obrázek 50 – Dynamický modul pružnosti v závislosti na obsahu mikromleté moučky při stáří vzorků 28 dní. 63
Obrázek 51 - Dynamický modul pružnosti ve smyku v závislosti na obsahu mikromleté moučky při stáří vzorků 28 dní. 63
Obrázek 52 – Měřící jednotka (přístroj) a schéma měření ultrazvukovou impulsní metodou. 64
Obrázek 53 – Dynamický modul pružnosti v závislosti na obsahu mikromleté moučky získaný z ultrazvukové impulsní metody při stáří vzorků 28 dní. 66
Obrázek 54 – Schéma zkoušky jednoosým tlakem (Hlubocký, 2016). 67
Obrázek 55 – Pevnost v tlaku v závislosti na obsahu mikromleté vápencové moučky a obsahu PVA vláken při stáří vzorků 28 dní. 68
Obrázek 56 – Schéma zkoušky tříbodovým ohybem pro vzorky první fáze (Hlubocký, 2016). . 69
Obrázek 57 – Schéma zkoušky tříbodovým ohybem pro vzorky druhé fáze s vrubem (Hlubocký, 2016). 70
Obrázek 58 - Fotografie uspořádání měření pro zkoušku pevnosti v tahu za ohybu a pro fotografování pro metodu DIC. 70
Obrázek 59 – Zkouška tříbodovým ohybem – Vlevo snímek vzorku před zahájením zatěžování a vpravo snímek deformovaného vzorku u konce zkoušky. 71
Obrázek 60 – Pevnost v tahu za ohybu vzorků z první fáze v závislosti na obsahu mikromleté vápencové moučky při stáří vzorků 21 dní. 72
Obrázek 61 – Pevnost v tahu za ohybu vzorků z druhé (hlavní) fáze v závislosti na obsahu mikromleté vápencové moučky a obsahu PVA vláken při stáří vzorků 28 dní. 73
Obrázek 62 – Porušení vzorků sady C100+MM0 (zleva sady /V1, /V2 a /V4). 74
Obrázek 63 – Porušení vzorků sady C75+MM25 (zleva sady /V1, /V2 a /V4). 74
Obrázek 64 – Porušení vzorků sady C50+MM50 (zleva sady /V1, /V2 a /V4). 74
Obrázek 65 – Lomové plochy vzorků sady C100+MM0 (zleva sady /V1, /V2 a /V4). 75
Obrázek 66 – Lomové plochy vzorků sady C75+MM25 (zleva sady /V1, /V2 a /V4). 75
Obrázek 67 – Lomové plochy vzorků sady C50+MM50 (zleva sady /V1, /V2 a /V4). 75

8 Seznam tabulek

Tabulka 1 – Chemické a fyzikální vlastnosti portlandského cementu (Tu a kol 2016). 13
Tabulka 2 – Chemické a fyzikální vlastnosti vápencového prášku (Tu a kol 2016). 13
Tabulka 3 – Chemické složení dolomitického vápence (Mikhailova a kol, 2013). 15
Tabulka 4 – Chemické složení a fyzikální vlastnosti použitých materiálů (Courard a Michel, 2014b). 18
Tabulka 5 – Specifikace použitého cementu CEM I 42,5 R (Českomoravský cement a.s.). 42
Tabulka 6 – Chemické složení mikromleté vápencové moučky. 43
Tabulka 7 – Fyzikální vlastnosti použité vápencové moučky. 44
Tabulka 8 – Fyzikální a mechanické vlastnosti použitých PVA vláken. 45
Tabulka 9 – Složení jednotlivých sad vzorků pro první fázi (20 × 20 × 100 mm). 50
Tabulka 10 – Množství vody, vodní součinitel, hodnoty rozlivu směsí a objemová hmotnost. ... 51
Tabulka 11 – Složení jednotlivých sad vzorků pro druhou (hlavní) fázi (40 × 40 × 160 mm). ... 52
Tabulka 12 – Množství vody, vodní součinitel, hodnoty rozlivu směsí a objemová hmotnost. ... 53