

POTŘEBA VODY PŘI POUŽITÍ JEMNÝCH PŘÍMĚSÍ V CEMENTOVÝCH KOMPOZITECH

Luboš Musil, *

Katedra betonových a zděných konstrukcí, Fakulta stavební,
České vysoké učení technické v Praze, Thákurova 7/2077, 166 29 Praha 6, Česká republika.
lubos.musil@fsv.cvut.cz

ABSTRAKT

Článek popisuje použití jemných příměsí do cementových kompozitů, což má zásadní vliv na množství záměsové vody a reologické vlastnosti čerstvých směsí. Porovnává způsoby zkoušek, jak stanovit optimální, respektive maximální množství vody pro jednotlivé příměsí. Nejvíce je zaměřen na zkoušku rozlitím pomocí Hägermannova kuželu. Veškeré experimenty probíhají na pastách s rozdílnou konzistencí. Pasty jsou složeny pouze ze zkoumané příměsí a vody. Článek je zaměřen především na požadované množství vody pro žulový filler vzniklý při opracování dekoračního kamene. Součástí experimentů je i stanovení požadovaného množství vody pro cement s ohledem na reologické vlastnosti. Jednotlivé metody zkoušení udávají rozdílné výsledky pro požadované množství vody. S ohledem na segregaci nebo krvácení kompozitu je vhodné pro aplikaci v praxi zvolit nejnižší možný výsledek.

KLÍČOVÁ SLOVA

Požadavek vody • Příměs • Filer • Rozlití

ABSTRACT

The paper describes the use of fine additives in cement composites, which has a fundamental effect on the amount of mixing water and the rheological properties of fresh mixtures. It compares test methods for determining the optimal or maximum amount of water for individual additives. It is mostly focused on the spread-flow test with Hägermann cone. All experiments take place on pastes with different consistency. Pastes are composed only of the investigated additives and water. The paper focuses mainly on the demand water for the granite filler created during the processing of decorative stone. Part of the experiments is to determine the water demand for cement with respect to rheological properties. The individual methods give different results for the required amount of water. Due to the segregation or bleeding of the composite, it is advisable to select the lowest possible result for practical application.

KEYWORDS

Water Demand • Addition • Filler • Flow

1. ÚVOD

V dnešní době je do cementových kompozitů přidávané velké množství přísad a příměsí. Tyto složky jsou přidávané především za účelem zlepšení vlastností čerstvé směsi nebo ztvrdlého kompozitu. Aktuálně jsou do cementů a cementových kompozitů přimíchávané i příměsí z druhotných surovin z ekonomických důvodů. Cílem je zejména šetřit nerostné bohatství a suroviny, minimalizovat odpadní složky a redukovat emise skleníkových plynů při výrobě. Rovněž je vyřešeno skládkování, jelikož je odpadní (druhotná) surovina prodávána jako produkt, což podporuje oběhové hospodářství.

Jednou z možností využití odpadních surovin je použití fileru do cementových kompozitů (betonu) jakožto částečná náhrada cementu. Beton je jedním z nejrozšířenějších stavebních materiálů. Spotřeba cementu rok od roku roste na všech světových kontinentech kromě Evropy, a proto je vliv úspory nezanedbatelný již při náhradě nízkých procent cementu za filer. Množství produkovaných filerů je rovněž velmi vysoké, což druhotně využívá podporuje. V článku je řešen žulový filer vzniklý při opracování dekoračního kamene. Jedná se o velké množství materiálu, který vzniká při řezání, broušení a leštění pod vodou. Vzniklý filer je dlouhodobě zkoumán především s ohledem na pevnostní charakteristiky v cementových kompozitech s čím souvisí například i velikost a tvar zrn. Dle vlastních výzkumů má žulový filer pozitivní vliv na pevnost cementových kompozit v tlaku [1], [2], [3], [4].

Na širší využití fileru ve stavebnictví jako součást cementových kompozitů nemají vliv pouze ekologické a ekonomické aspekty, ale především schopnost fileru zlepšit vybrané fyzikální vlastnosti výsledného materiálu při současném nezhoršení materiálových vlastností ve stádiu realizace. V případě cementových kompozitů se jedná především o výrobu, přepravu a zpracování čerstvé betonové směsi. Z těchto důvodů jsou v tomto článku zkoumány reologické vlastnosti čerstvé betonové směsi s obsahem žulového fileru, který tvoří částečnou náhradu cementu.

* Školitel: doc. Ing. Jan Vodička, CSc., školitel specialista: Ing. Hana Hanzlová, CSc.

2. METODY

V článku je nejprve popsán použitý filer. Následně je článek rozdělen do 3. základních částí. Zkouška konzistence malty (dle ČSN EN 1015-3) pomocí střešovacího stolku. Dále zkoušku rozlití pasty (ze žulového fileru, cementu) pomocí Hägermannova kužele a zkoušku pasty žulového fileru Marquardtovým testem. V první části je zkoušen vliv náhrady cementu žulovým filerem na konzistenci malty. V dalších částech je zkoumané potřebné množství vody při použití žulového fileru.

2.1. Filer

Filer, který byl použit jako náhrada cementu byl tvořený kalem, který vznikl při řezání, broušení a leštění dekoračních kamenů pod vodou. Úprava fileru byla minimální. Kal obsahující žulový filer byl pouze vysušen a přesát přes síto s okem 0,25 mm. Dle vlastních předešlých výzkumů [1] je žulový filer velmi vhodný jako náhrada cementu, jelikož má příhodné chemické složení, velikost zrn, měrný povrch nebo například pozitivní vliv na pevnosti. Velmi výhodnou vlastností je velikost zrn, která jsou menší než zrna u použitého cementu. S tím souvisí i měrný povrch fileru ($437 \text{ m}^2\text{kg}^{-1}$), který je větší než u běžných cementů. Částečnou nevýhodou je tvar zrn. Optimální tvar s ohledem na reologické vlastnosti čerstvé směsi je koule (ve 2D snímku kruh), což velmi dobře slňují například popílky do betonu. Kruhovitost lze určit například pomocí speciálních programů, které vyhodnocují snímky pořízené mikroskopem, ať už optickým nebo elektronovým. Kruhovitost nabývá hodnot od 0 do 1, přičemž dokonalý kruhový tvar vykazuje hodnotu 1 a dlouhé, protáhlé tvary nabývají hodnoty blízké 0. Přibližně stejnou kruhovitost (0,65) mají zrna žulového, mramorového, vápencového a rulového fileru. Méně výhodnou kruhovitost (0,53) mají zrna fileru z amfibolitu. Zrna amfibolitu jsou velmi protáhlá až jehličkovitá, proto jsou s ohledem na reologické vlastnosti směsi nevhodná. [1]

2.2. Zkouška konzistence

Po přesném postupu dávkování a míchání proběhla zkouška konzistence čerstvé malty s použitím střešovacího stolku dle normy ČSN EN 1015-3. Nejprve proběhlo navlhčení střešovacího stolku a kužele separačním olejem. Kužel byl následně plněn ve dvou vrstvách a zarovnán. Poté proběhlo sejmutí kužele. Střesení proběhlo patnácti pravidelnými údery. Následně byl měřen rozliv ve dvou na sebe kolmých směrech. Kromě rozlivu byla měřena i výška nestřeseného kužele. Laboratorní zkoušky vycházely z evropských norem pro malty a betony. Výroba testovaných směsí probíhala dle normy pro zkoušení cementu ČSN EN 196-1 a na ní navazující normy, zejména ČSN EN 934-6 - *Příklady do betonu, malt a injektážních malt*, dále ČSN EN 13263-1 +A1- *Křemičitý úlet do betonu*, nebo, ČSN EN 450-1 - *Popílek do betonu*. Při výrobě čerstvých směsí byly dodrženy požadované poměry kameniva (kamenivo namíchané z frakcí křemičitého písku 1-2; 0,6-1,2; 0,1-0,7), cementu, vody a přesný postup míchání. Celkem bylo vyrobeno 10 směsí, včetně směsi referenční (bez náhrady cementu žulovým filerem). V ostatních

směsích byla provedena hmotnostní náhrada vybraného množství cementu za žulový filer v předem stanoveném poměru. Jednotlivé receptury jsou znázorněny v tabulce 1.

Tabulka 1: *Složení receptur*

Náhrada [hm. %]	Cement [g]	Filer [g]	Voda [g]	Písek [g]
0	381	0	190	1143
5	362	19	190	1143
10	343	38	190	1143
15	324	57	190	1143
20	305	76	190	1143
25	286	95	190	1143
30	267	114	190	1143
40	229	152	190	1143
50	190	190	190	1143
60	152	229	190	1143

2.3. Zkouška rozlití - Hägermannovým kuželem

Tato zkouška se obvykle provádí na pastách pro SCC, aby bylo zjištěno množství vody, které mohou částice zadržet. V případě většího množství vody může docházet k segregaci jednotlivých složek SSC. Spotřeba nebo poměr zadržené vody se značí β_p . Zkoušku pro určení β_p lze provést několika způsoby. Nejjednodušší je zkouška Vicatovým přístrojem s válečkem – zkouška cementové kaše normální konzistence. Mezi dále používané zkoušky patří například Punktest, který je hojně využíván zejména v Německu, nebo Marquardtův modifikovaný test. Posledním způsobem je zkouška rozlití - Hägermannovým kuželem. S ohledem na podobnost zkoušky konzistence malt pomocí střešovacího stolku a zkouškou rozlití pro pasty, bylo pro zjištění potřebné vody pro cement (filer) použita zkouška rozlití. Pomocí tohoto testu lze určit závislost rozlití (konzistence) na vodním součiniteli. Pasta se namíchá v různých konzistencích a udělá se zkouška rozlití Hägermannovým kuželem na rovné ploše bez střešování. Postup míchání je přesně daný a provádí se v normové míchačce pro malty. Nejprve je do míchačky nalita voda, poté přidána zkoumaná příměs (filer/cement) a 30 s je pasta míchána. Následně proběhne během 60 s ruční promíchání, aby byla zajištěna homogenita a dostatečné promíchání především u dna mixovací nádoby. Poté se pasta míchá 90 s a ukládá se do Hägermannova kužele. Množství pasty vystačí na dvě samostatné zkoušky. Obě zkoušky by měly být provedeny co nejrychleji, aby byly zjištěny celkem 4 rozměry rozlití (dva z každé samostatné zkoušky). Rozlití se měří nejprve v maximálním rozměru a poté ve směru kolmém. Závislost rozlití na vodním součiniteli je lineární, proto

stačí naměřená data aproximovat přímkou a získáme hodnotu β_p [5], [6]. Vztah lze vyjádřit:

$$\frac{V_w}{V_p} = \beta_p + E_p \Gamma_p \quad (1)$$

$\frac{V_w}{V_p}$ objemový poměr vody a příměsi (fileru; cementu)

β_p objemový poměr voda/příměs pro $\Gamma_p = 0$

E_p deformační koeficient

Γ_p relativní pokles suspence (pasty) vypočítaný jako:

$$\Gamma_p = \left(\frac{d}{d_0}\right)^2 - 1 \quad (2)$$

Kde d_0 je spodní průměr Hägermanova kužele (100 mm) a d je průměr dvou na sebe kolmých rozměrů rozlité.

2.4. Upravený Marquardtův test

Marquardt charakterizuje spotřebu vody jako procento vody adhezivně navázané na povrchu částic. Toto množství vody lze určit pomocí spotřeby energie míchačky během procesu míchání směsi při přidávání vody. Základním principem Marquardtova testu je smykový odpor past s různým obsahem vlhkosti. Suchý prášek vykazuje pouze malý smykový odpor, tudíž i malý příkon míchačky. Postupným přidáváním vody v malých množstvích do směsi je zvyšována spotřeba energie míchačky na maximum v důsledku aglomerace jednotlivých částic. Největší spotřeba energie při míchání odráží obsah vody, kde jsou všechny povrchy částic smáčeny a samotné částice jsou spojeny vodními filmy. Další přidávání vody vede ke zkapalnění směsi (tj. rostoucí tloušťky vodních vrstev kolem částic), což má za následek nižší spotřebu energie míchačky. [5]

Zkouška proběhla v normové míchačce pro cement. Pro zkoušku bylo použito 1000 g žulového fileru a voda byla přidávána v množství 15 g po 20 s. Příkon míchačky byl zjištěn přes měřič spotřeby energie Solight DT27 bez digitálního sběru dat. Měřič byl nahrazen a z videozáznamu byly přepsány hodnoty po 1 s do digitální podoby.

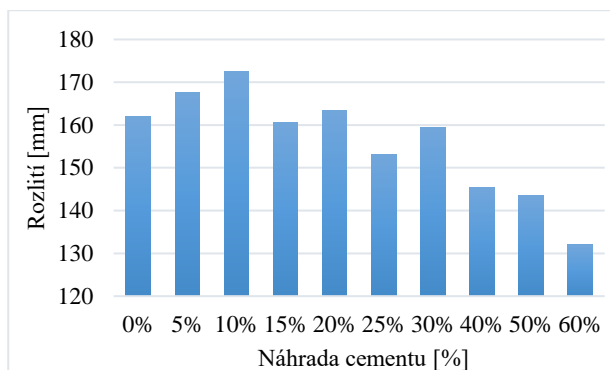
3. VÝSLEDKY

3.1. Zkouška konzistence

Náhrada cementu žulovým filerem má podstatný vliv na reologické vlastnosti čerstvé směsi. Oproti referenčnímu vzorku vykazovaly větší rozlité směsi na střešacím stolku s 5 % a 10 % náhradou cementu. V případě 15% náhrady cementu žulovým filerem bylo rozlité blízké referenčnímu vzorku. Následné náhrady cementu, tj. 20% a výše, vykazovaly menší rozlité s klesajícím trendem (viz obr 2). Současně byla sledovaná kvalita (spojitost) směsi těsně po sejmutí kužele. Od vzorku s náhradou v množství 20 %hm. cementu začala směs vykazovat nespojitost (viz obr. 1) mezi vkládanými vrstvami, ačkoliv byly vrstvy řádně zhutněny. Na obrázku 1 je rovněž vidět minimální klesnutí kužele těsně po sejmutí formy (pouze 5 mm). Směs s 60% náhradou cementu vykazovala nulové klesnutí směsi těsně po sejmutí kužele a velmi nízkou kvalitu (spojitost) směsi (viz obr 1).



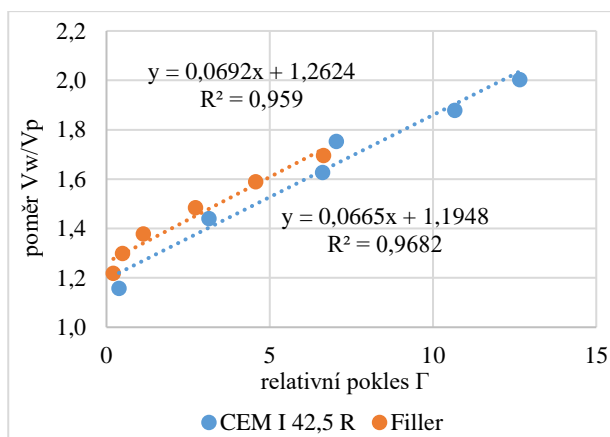
Obrázek 1: Vzorky těsně po sejmutí kužele



Obrázek 2: Závislost rozlité na náhradě cementu

3.2. Zkouška rozlité - Hägermannovým kuželem

Článek porovnává hodnoty rozlité past dle zkoušky rozlité pomocí Hägermanova kužele, jelikož je zkouška na setřásacím stolku nejvíce podobná. Z výsledků této zkoušky vyplývá potřebný objem vody na cement (filer) (viz obr. 3), z čehož byl pomocí měrné hmotnosti dopočítán klasický hmotnostní vodní součinitel (viz tab 2).



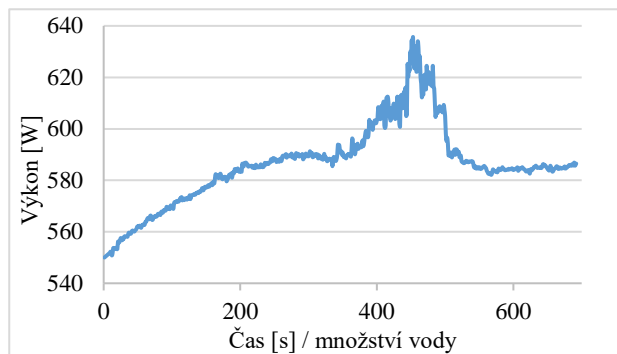
Obrázek 3: Závislost rozlité na vodním součiniteli

Tabulka 2: Potřebné množství vody (β_p)

materiál	Poměr voda/prach	
	objemový	hmotnostní
Žulový filer	1,2624	0,476
CEM I 42.5 R	1,1948	0,382

3.3. Upravený Marquardtův test

Největší spotřeba energie při míchání pasty ze žulového fileru byla naměřena v rozmezí 400 – 500 s od počátku míchání, což odpovídá dávce vody v rozmezí 300 – 360 g. Po přepočtu vychází hmotnostní vodní součinitel v rozmezí 0,30 – 0,36 a objemový vodní součinitel 0,80 – 0,96. Pro zpřesnění výsledku je vhodné zkoušku opakovat a to v kritickém rozmezí. Důležitou změnou je dávkování vody, kde je doporučeno přidávat 1 g vody po 15. vteřinách.



Obrázek 4: Spotřeba energie během přidávání vody (15 ml každých 20 s) k žulovému fileru

4. DISKUZE

Obecně lze říci, že jemné příměsi (pod 0,25 mm) zvyšují potřebné množství záměsové vody při zachování stejné konzistence čerstvé směsi. V tomto experimentu byl cement nahrazován žulovým fillerem a neměnilo se množství vody. Jelikož je dle provedených zkoušek žulový filer považován za inertní, můžeme říci, že zvyšujeme vodní součinitel, nebo nadbytečnou vodou přispíváme ke zlepšení konzistence. Dle výpočtů je však nutné záměsovou vodu s ohledem na rozlití (zpracovatelnost) přidávat. Velmi zásadní pro konzistenci čerstvé směsi je velikost a tvar zrn jemných podílů. V případě náhrady cementu žulovým fillerem je velikost zrn srovnatelná, případně jsou menší zrna žulového fileru [1]. Zásadní rozdíl v těchto materiálech je potřebné množství vody pro obalení zrn a jejich měrná hmotnost. Dle tabulky 2 je pro pasty žulového fileru potřeba o 5,7 % více vody v objemovém poměru (V_w/V_f) a přibližně o 25% více vody v hmotnostním poměru (m_w/m_f) než u cementové pasty. Vysoký rozdíl mezi objemovým a hmotnostním poměrem je dán měrnou hmotností, která se podstatně liší. Dle technického listu výrobce je měrná hmotnost cementu 3130 kg/m³, zatímco hodnota u žulového fileru je 2650 kg/m³. Měrná hmotnost materiálu se může měnit a je závislá například na lokalitě těžby. Stanovení měrné hmotnosti fileru použitého ve zkoušených směsích bylo provedeno pomocí pyknometru. Poměr měrných hmotností fileru a cementu je 1,18. Ačkoliv je náhrada cementu hmotnostně stejná, objemově je ve směsi o 18% více žulového fileru. To může mít za následek větší vyplnění mezer drobného kameniva a lepší křivku zmitosti. Pozitivní úprava křivky zmitosti má za následek zlepšení fyzikálních vlastností, jako například konzistence čerstvé betonové směsi, pevnostní charakteristiky, nasákavost, mrazuvzdornost apod. Na veškeré tyto vlastnosti má vliv i

množství vody v cementové směsi. Obvykle platí, že nižší množství vody má pozitivní vliv na vlastnosti ztvrdlého kompozitu. S ohledem na další nepříznivé vlivy velkého množství vody ve směsi (segregace nebo krvácení) je vhodné zvolit nejnižší hodnotu z uvedených zkoušek a zpracovatelnost čerstvé směsi zlepšit superplastifikátorem. Pro známé příměsi jsou dle normy uvedené k-hodnoty pro výpočet vodního součinitele.

5. ZÁVĚR

S ohledem na reologii je větší množství záměsové vody potřebné pro žulový filer než pro cement. Pro zjištění potřebného množství vody existuje mnoho zkoušek, kterými je možné ideální množství záměsové vody stanovit. Dle výše uvedených výsledků jsou rozdíly v jednotlivých zkouškách velmi výrazné. Zkouška rozlití pasty udává nejvyšší množství záměsové vody, tedy nejvyšší vodní součinitel. Naopak nejmenší hodnoty udává Marquardtův test. Zkouška normální konzistence stanovená pomocí Vicatova přístroje je dle zdrojů [5] mezi Marquardtovou zkouškou a zkouškou rozlití pomocí Hägermannova kužele. Velikost rozdílů mezi výsledky jednotlivých zkoušek je dán především typem zkoušeného fileru/příměsi. Nejmenší rozdíly mezi jednotlivými zkouškami vykazuje popílek [5]. Jelikož má popílek vhodný tvar (kulovité částice) s ohledem na reologii, lze uvažovat závislost velikosti rozdílů mezi jednotlivými zkouškami na tvaru zrna. Mezi důležité aspekty při provádění zkoušek patří okrajové podmínky. U zkoušky rozlití je nevýhodou především vliv lidského faktoru. Například zdvih Hägermannova kužele, aby nedošlo k nerovnoměrnému rozlití, rychlost zdvihu, vyrovnání podložky, navlhčení podložky, kužele nebo hladkost použité podložky. V případě Marquardtova testu patří mezi nevýhody nedostatečné promíchání směsi (především pod lopatkou míchačky). Další nevýhodou je samovolný nárůst příkonu. Tento jev byl zjištěn v případě míchání „naprázdno“. Jelikož se jednalo o předběžné zjištění příkonu elektrické energie, nebyl tento rozdíl do výsledků započítán. V případě upřesnění výsledků (zkouška při dávkování vody 1 g/15 s) je nutné tento vliv uvážit.

PODĚKOVÁNÍ

Příspěvek vznikl za finanční podpory ČVUT v Praze v rámci projektu SGS22/091/OHK1/2T/11.

Reference

- [1] Musil, L, Cibulka, T., Vodicka J. and Chylik, R., Characterization of fillers made of natural stones as a cement substitute. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering [online]. 2021, 1039(1). ISSN 1757-8981. Dostupné z: doi:10.1088/1757-899X/1039/1/012007
- [2] Zaleska, M., Pavlikova, M., Pavlik, Z., Jankovsky, O., Pokorny, J., Tydlit, V., Svora, P., Cerny, R., Physical and chemical characterization of technogenic pozzolans for the application in blended cements, Construction and building materials, Volume 160, Page 106-116 Published 2018

- [3] Nežerka, V., Hrbek, V., Prošek, Z., Somr, M., Tesárek, P., Fládr, J., Micromechanical characterization and modeling of cement pastes containing waste marble powder, *Journal of Cleaner Production*, Volume 195, 2018, Pages 1081-1090, ISSN 0959-6526, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.284>
- [4] Simão, L., Souza, M.T., Ribeiro, M.J., Klegues Montedo, O.R., Hotza, D., Novais, R.M., Raupp-Pereira, F., Assessment of the recycling potential of stone processing plant wastes based on physicochemical features and market opportunities, *Journal of Cleaner Production*, Volume 319, 2021, ISSN 09596526, DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.128678
- [5] Hunger, M., Brouwers, H.J.H., Flow analysis of water-powder mixtures: Application to specific surface area and shape factor, *Cement and Concrete Composites*, Volume 31, Issue 1, 2009, Pages 39-59, ISSN 0958-9465, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.09.010>
- [6] Peter Domone, Chai Hsi-Wen, Testing of binders for high performance concrete, *Cement and Concrete Research*, Volume 27, Issue 8, 1997, Pages 1141-1147, ISSN 0008-8846, [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(97\)00107-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(97)00107-5)