



**Vysoké učení technické v Brně**  
Fakulta stavební  
Ústav technologie stavebních hmot a dílců

Studentská vědecká a odborná činnost  
**Akademický rok 2011/2012**

# **Vliv jemnozrnných příměsí na charakter pórového systému betonu**

Jméno a příjmení soutěžícího :

Bc. Veronika Elfmarková

Ročník, obor :

1. r., Stavebně materiálové inženýrství

Vedoucí práce :

prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.

## OBSAH

<b>1</b>	<b>ABSTRAKT V ČESKÉM A ANGLICKÉM JAZYCE .....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>ÚVOD .....</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>KOMPLEXNÍ ANALÝZA JEMNOZRNÝCH PŘÍMĚSÍ.....</b>	<b>4</b>
3.1	VYBRANÉ A ZKOUŠENÉ MATERIÁLY .....	4
3.1.1	<i>Nereaktivní příměsi.....</i>	4
3.1.2	<i>Reaktivní příměsi .....</i>	5
3.1.3	<i>Cementy .....</i>	5
3.2	GRANULOMETRICKÉ VLASTNOSTI .....	6
3.2.1	<i>Křivka zrnitosti - PSD.....</i>	6
3.2.2	<i>Měrný povrch .....</i>	8
3.3	FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI .....	9
3.3.1	<i>Objemová hmotnost.....</i>	9
3.3.2	<i>Stanovení mezerovitosti zhutněného fileru .....</i>	10
<b>4</b>	<b>TVAROVÝ INDEX .....</b>	<b>12</b>
4.1	MORFOLOGIE .....	13
4.2	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ A ZÁVĚR .....	15
<b>5</b>	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>16</b>
<b>6</b>	<b>VYSVĚTLIVKY .....</b>	<b>17</b>
<b>7</b>	<b>LITERATURA.....</b>	<b>18</b>

## **1 ABSTRAKT V ČESKÉM A ANGLICKÉM JAZYCE**

Literatura neposkytuje uspokojivou odpověď na to, jaká je velikost částic hrubé fáze nebo velikost částic v maltové části a to především pro dosažení optimální mezerovitosti betonu. Za účelem překonání nedostatků návrhových metod vznikla myšlenka návrhu nového postupu pro návrh betonové směsi. Tato myšlenka je založena na komplexní analýze jemnozrnných příměsí (stanovení granulometrických vlastností, tvaru jednotlivých částic, pórovitosti, stanovení mezerovitosti) a následné posouzení vlivu na charakter pórového systému betonu. V této práci jsou představeny a analyzovány příměsi elektrárenský popílek a mletý vápenec.

Literature does not provide a satisfactory answer to maximum and minimum particle size or the particle size of the mortar phase especially for optimal porosity of concrete. To overcome the shortcomings of the design methods were thought to design a new method for design of concrete mix. This idea is based on a complex analysis of powder materials (determination of granular properties, shape factor of fillers, porosity, packing of powder materials, surface area, etc.) and subsequently to assess the influence to pore system of concrete. In this work are presented and analyzed two types of fillers – fly ash and limestone dust.

## 2 ÚVOD

Komplexní analýza jemnozrnných podílů je v dnešní době považována za důležitou součást průmyslu a výzkumu. Vlastnosti těchto podílů jsou důležitými atributy pro kontrolu výsledných produktů a také cestou, jak správně a vhodně tyto materiály použít. Toto platí i pro výrobu betonu. Vzhledem k povaze betonu je důraz kladen nejen na komplexní analýzu, ale také na chování těchto podílů v mokřém stavu.

Výsledné vlastnosti betonu, jako jsou například pevnosti v tlaku, v tahu za ohybu nebo trvanlivost betonových výrobků, jsou dány vlastnostmi matrice, použitým kamenivem a vazbami mezi maticí a kamenivem. Zmiňovaná matrice je zde chápána jako složení cementu, záměsové vody, vzduchových pórů, množství jemných podílů z použitého kameniva, přísady a v neposlední řadě jemnozrné příměsi. Jinými slovy matrice betonu je tvořena cementem, vodou a jemnými příměsemi. V literatuře se můžeme setkat s definicí takto jemných podílů jako složek betonu s velikostí zrna menší než 125  $\mu\text{m}$ . Vlastnosti matrice a vazby mezi maticí a kamenivem jsou závislé na řadě faktorů, z kterých vodní součinitel (součinitel vody ku všem jemným podílům), reaktivita, tvarový index a křivka zrnitosti jsou jedny z nejdůležitějších.

V této práci jsou představeny jemné příměsi – *mletý vápenec* (Carmeuse, Mokrý) a *elektrárenské popílky* (ČEZ – elektrárny Počeradý EPC, Mělník EME, Ledvice ELE, Tušimice ETU, Dětmárovice EDE) a jsou charakterizovány s ohledy na jejich objemovou hmotnost, měrný povrch, mezerovitost a distribuci částic (stanovení křivek zrnitosti). Představené materiály představují materiály používané v technologii betonu, včetně různých druhů cementů. Na základě získaných výsledků z komplexní analýzy suchých příměsí můžeme usuzovat na velké množství nových hypotéz. Například pro stanovení tvaru částic byla použita optická a konfokální mikroskopie a nepřímé odvození tvarového indexu vycházející z těchto měření. Tvarový index je také derivován a vychází z následně prováděných zkoušek na pastách obsahujících představené materiály.

## 3 KOMPLEXNÍ ANALÝZA JEMNOZRNÝCH PŘÍMĚSÍ

S ohledem na vysoký měrný povrch, který poskytují jemné podíly, je jejich komplexní analýza zásadní pro pochopení a stanovení fyzikálních vlastností, jako je například zpracovatelnost čerstvé betonové směsi nebo pórovitost již ztvrdlého betonu. Kromě toho je vývoj pevností a odolnost betonu ovlivňována množstvím a typem použité jemné příměsi. V této kapitole jsou představeny všechny jemné podíly, používané v této práci a jsou představeny jejich vlastnosti.

### 3.1 Vybrané a zkoušené materiály

#### 3.1.1 Nereaktivní příměsi

Mletý vápenec, jedna ze standardních příměsí do betonu, byl zařazen do této práce v návaznosti na již předchozí zkoušení tohoto materiálu. V tomto případě byly použity 4 frakce mletého vápence z vápenky v Mokřé (firma Carmeuse, 4 typy mletých vápenců obchodně značených 7/V, 8/V, 9/V a 12/V). V tabulce 3.1 je

zobrazena chemická analýza těchto vzorků. V případě mletých vápenců a jejich aplikace do betonu mohou tyto materiály vykazovat omezenou schopnost hydraulické reaktivity. To však především zlepšuje vazby s okolní mikrostrukturou za vzniku reakčních produktů vytvářených na jednotlivých zrnech vápenců. Mletý vápenec sám o sobě není schopen vytvářet strukturní produkty, nicméně je tedy pozoruhodné, že se zapojuje do procesu nárůstu pevností. Díky této vlastnosti jsou mleté vápence považovány za nereaktivní příměsi.

	EDE	EPC	EME	ETU	Mleté vápence MV 1 - MV 4
SiO <sub>2</sub>	52,400	50,900	53,710	50,000	4,938
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	24,200	30,200	30,940	23,400	0,895
CaO	4,000	1,810	2,080	3,420	51,033
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,400	5,310	6,000	14,500	0,410
K <sub>2</sub> O	2,800	1,590	1,670	1,065	0,111
MgO	2,800	1,080	1,280	1,720	1,550
MnO	0,100	0,041	0,020	0,092	0,045
Na <sub>2</sub> O	0,300	0,205	0,280	0,291	0,074
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,400	0,134	0,240	0,164	0,027
SO <sub>3</sub>	0,000	0,080	0,270	0,723	0,077
TiO <sub>2</sub>	1,000	1,750	1,950	1,526	0,055

**Tabulka 3.1** Chemické složení analyzovaných elektrárenských popílků a mletých vápenců (průměrné hodnoty)

### 3.1.2 Reaktivní příměsi

Z různých minerálně aktivních příměsí do malt a betonů je elektrárenským popílkům přikládán největší význam. Z tohoto důvodu byly zkoušeny a analyzovány popílků z elektráren Ledvice, Tušimice, Počerady, Mělník a Dětmárovice. V tabulce 3.1 jsou uvedena chemická složení těchto materiálů. Veškeré uvedené popílků jsou produkty procesu spalování uhlí - nejjemnější frakce zbytku ze spalování uhlí.

### 3.1.3 Cementy

V této práci byl pro komplexní analýzu použit portlandský cement CEM I 42,5R z cementárny Mokrý splňující požadavky normy ČSN EN 196 - 6. Vzhledem ke své vysoké jemnosti a vysokému měrnému povrchu je nutné s tímto materiálem počítat a to z hlediska ovlivnění tekutosti čerstvé betonové směsi, ale i dosažení optimální mezerovitosti.

Celý proces měření a komplexní analýzy začal v únoru 2010 a pokračuje do této chvíle, je nadále rozvíjen a jsou zkoušeny a analyzovány další materiály.

Pro zjištění granulometrických a fyzikálních vlastností byly použity následující zkoušky:

- Chemická analýza (XRF) – dle ASTM C114 – 07 (Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement), 5 individuálních měření pro každý vzorek

- Stanovení křivky zrnitosti – pomocí laserové difrakční analýzy (přístroj Malvern Mastersizer 2000), 5 individuálních měření pro každý vzorek
- Stanovení měrného povrchu dle Blaina – dle ČSN EN 196 - 6 (Metody zkoušení cementu, část 6: Stanovení jemnosti mletí), 3 individuální měření pro každý vzorek
- Objemová hmotnost – měření pomocí heliového pyknometru, 5 individuálních měření pro každý zkoušený vzorek a dle ČSN EN 1097 - 7 (Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva, část 7: Stanovení měrné hmotnosti fileru - Pyknometrická zkouška), 5 individuálních měření pro každý zkoušený vzorek
- Sytná hmotnost - dle ČSN EN 1097 - 6 (Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva, část 6: Stanovení objemové hmotnosti zrn a nasákavosti)
- Stanovení mezerovitosti zhuštěného fileru - dle ČSN EN 1097 - 4 (Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva, část 4: Stanovení mezerovitosti suchého zhuštěného fileru), 3 individuální měření pro každý zkoušený vzorek
- Mikroskopická měření pro stanovení tvaru zrn jednotlivých materiálů (optický a konfokální mikroskop), cca 40 – 60 individuálních měření pro každý zkoušený vzorek

### 3.2 Granulometrické vlastnosti

Granulometrické vlastnosti popisující fyzikální vlastnosti zrna a následný vliv na pórovitost směsi byly stanoveny při komplexní analýze. Pro toto vyhodnocení využíváme stanovení křivek zrnitosti, tvaru částic a distribuci částic v celém granulometrickém systému. Křivky zrnitosti a tvarový index částic mají zásadní vliv na mezerovitost a tím i pro mikroskopické a makroskopické chování betonových směsí. V následující kapitole je popsán zvolený způsob stanovení křivek zrnitosti, tvarového indexu a měrného povrchu.

#### 3.2.1 Křivka zrnitosti - PSD

Křivky zrnitosti jednotlivých materiálů použitých při přípravě malt a betonů mají dominantní vliv na mezerovitost dané matrice a hydratační proces cementu. Pro zjištění křivky zrnitosti můžeme využít několika metod. Kromě síťového rozboru je mnoho existujících metod založeno na sedimentaci částic ve vhodné tekutině nebo difrakci světla.

Jemné podíly jsou problematickými materiály pro analýzu a určení křivek zrnitosti. Síťový rozbor můžeme použít pouze pro hrubší frakce kameniva. V případě jemných částic je převažující metodou používána laserová difrakční analýza (*LALLS = Low Angle Laser Light Scattering*). Tato technika je založena na skutečnosti, že průměr částic je nepřímo úměrný reakčnímu úhlu laserového světla. Jinými slovy, zrna větších průměru lámou laserové světlo pod malými úhly a zrna menších průměru naopak úhly většími. Distribuce částic podle velikosti je velmi široká a to od 100 mikrometrů až po velikosti menší než 1 mikron.

Pro analýzu všech příměsí bylo použito disperzní prostředí destilované vody, pro cementy bylo použito disperzní prostředí propan - 1 - ol. Veškeré prezentované křivky zrnitosti příměsí a cementů byly měřeny v tekutém disperzním prostředí pomocí přístroje Malvern Mastersizer 2000 používající metodu rozptylu dle Mie (*Mie theory*).

## Výsledky měření

Stanovení křivky zrnitosti touto metodou je seznam hodnot, které definují relativní množství přítomných částic v disperzním prostředí, seřazených podle velikosti. Během měření křivek zrnitosti byly změřeny 4 vzorky mletých vápenců a 52 vzorků elektrárenských popílků, v obou případech měření probíhalo pětkrát. Charakteristické velikosti částic těchto materiálů jsou uvedeny v tabulkách 3.2 a 3.3.

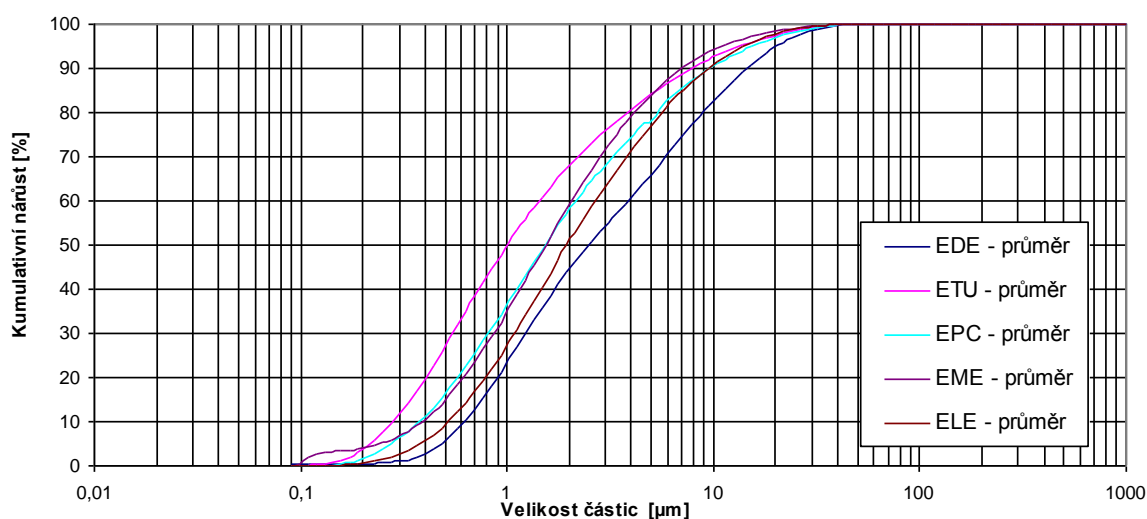
Hodnoty středního zrna [ $\mu\text{m}$ ]	d [0.1]	d [0.5]	d [0.9]
ETU	1,44	3,97	20,69
EPC	1,81	5,62	24,82
EME	1,86	5,71	18,89
ELE	2,34	6,74	24,44
EDE	2,72	8,21	34,11

Tabulka 3.2 Přehled charakteristických velikostí zrn stanovených z křivek zrnitosti pro el. popílků

Hodnoty středního zrna [ $\mu\text{m}$ ]	d [0.1]	d [0.5]	d [0.9]
MV 3	0,55	2,89	15,01
MV 1	1,13	3,99	14,14
MV 4	1,37	4,37	15,94
MV 2	1,31	4,37	16,43

Tabulka 3.3 Přehled charakteristických velikostí zrn stanovených z křivek zrnitosti pro mleté vápence

### Elektrárenské popílků - PRŮMĚRY všech měření v jednotlivé dny odběru

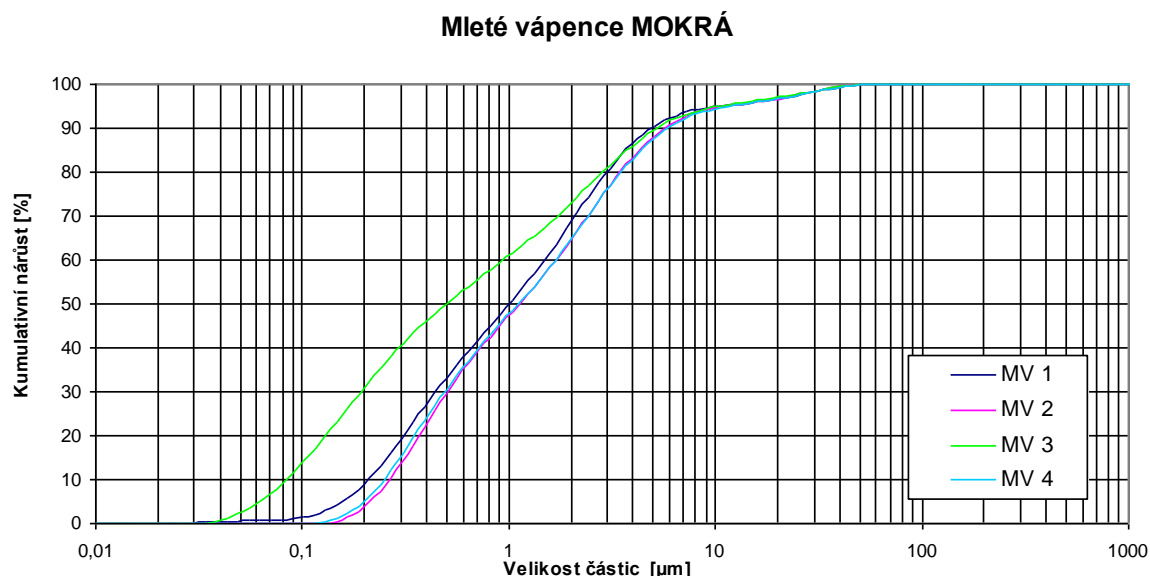


Graf 3.1 Porovnání křivek zrnitosti el. popílků

## Vyhodnocení

Grafy a výsledky měření ukazují odlišnou jemnost mletí jednotlivých elektrárenských popílků, tak i mletých vápenců. Pozorovatelné rozdíly jsou především v oblasti hodnot středního zrna. V tabulkách můžeme vidět vzestupné pořadí podle jemnosti mletí obou typů materiálů. V případě elektrárenských popílků je nejjemnější popílek z elektrárny Tušimice, u mletých vápenců došlo k potvrzení technických listů pro jednotlivé frakce - obchodním značením 12/V je tato frakce nejjemnější (v tomto případě značena MV 3).

Pomocí křivek zrnitosti může být řečeno, že tento materiál vyplní pomyslnou mezeru mezi jednotlivými složkami maltové nebo betonové směsi – to znamená, že se minimalizuje nežádoucí pórovitost, především se minimalizuje obsah kapilárních pórů betonu a může tak být dosaženo optimální mezerovitosti. Použitím tohoto materiálu je možné zlepšit vlastnosti čerstvé směsi (např. zpracovatelnost, schopnost vyplňovat bednění, pohledovost, tekutost, apod.) a ztvrdlé směsi (např. pevnost v tlaku).



**Graf 3.2** Porovnání křivek zrnitosti mletých vápenců

Ze zjištěných křivek zrnitosti je dále možné vypočítat měrný povrch materiálu. Tato nepřímá metoda zjišťování měrného povrchu je založena na předpokladu, že jsou všechna zrna ideálního tvaru, tedy koule. K dosažení spolehlivého výpočtu měrného povrchu určitého materiálu by měl být zvolen také vhodný tvarový index. Tento výpočet je však pouze přibližný, avšak udává přesnější výsledky v porovnání s běžnými zkouškami jako je měření pomocí Blainova přístroje nebo B.E.T. analýzy.

### 3.2.2 Měrný povrch

Měrný povrch, neboli zkráceně SSA, je podíl dané plochy částice včetně všech otevřených vnitřních ploch pórů dělené hmotností [ $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ ]. Pro návrh



betonových směsí nás zajímají pouze vnější povrchy částic, které se dostávají do kontaktu s vodou. Pro stanovení měrného povrchu jsou k dispozici různá přímá a nepřímá měření. Pravděpodobně nejvíce známou metodou je měření měrného povrchu pomocí Blainova přístroje. Tato metoda je založena na tlakovém rozdílu suchého a ztuhlého fileru, který je ovlivněn průtokem a kinetickou viskozitou vzduchu, rozměrem zkoušeného vzorku a jeho pórovitostí. Touto metodou avšak získáváme spíše hodnoty relativní, než hodnoty absolutní.

Pro uvedené materiály byla pro stanovení měrného povrchu použita zkouška dle Blainova měření. Avšak byly stanoveny hodnoty měrného povrchu také nepřímou metodou a to s využitím stanovených křivek zrnitosti. Tato metoda byla použita především proto, že v případě velmi jemných příměsí nebo naopak hrubších příměsí, není Blainovo měření příliš přesné a můžeme získávat velmi vysoké odchylky měření. Proto na rozdíl od tohoto měření, můžeme nepřímou metodu použít i pro materiály s vysokou jemností mletí.

Pro měření měrného povrchu dle Blaina byla použita Blainova aparatura a měření probíhalo dle ČSN EN 196 - 6. Vyhodnocení měření je zobrazeno v tabulce 3.4.

<b>Popílek</b>	<b>Průměr SSA [cm<sup>2</sup>·g<sup>-1</sup>]</b>	<b>COV [%]</b>
EDE	3960	2,85
EPC	2970	3,46
ELE	2950	4,29
ETU	2470	1,10
EME	2420	0,66
<b>Mletý vápenec</b>	<b>Průměr SSA [cm<sup>2</sup>·g<sup>-1</sup>]</b>	<b>COV [%]</b>
MV 3	4920	0,44
MV 1	4910	0,03
MV 4	4780	0,58
MV 2	3590	1,01

**Tabulka 3.4** Přehled měrných povrchů měřených dle Blaina (elektrárenské popílků a mleté vápence)

## Vyhodnocení

Výsledky z měření pomocí Blainovy aparatury potvrdily v případě mletých vápenců stejný trend jemnosti mletí jako v případě stanovení křivek zrnitosti. U elektrárenských popílků se toto přesně nepotvrdilo. V případě takto jemných materiálů je toto měření pouze komparativním.

### 3.3 Fyzikální vlastnosti

V následující části byly pro uvedené materiály prováděny zkoušky pro stanovení fyzikálních vlastností.

#### 3.3.1 Objemová hmotnost

Literatura udává mnoho definic pro objemovou hmotnost a obdobně najdeme i mnoho dostupných zkušebních metod. Použité materiály byly zkoušeny podle normy ČSN EN 1097 - 7 - pyknometrickou metodou. V případě nereaktivních příměsí byla

použita demineralizovaná voda, v případě popílků propan - 1 - ol. Výsledky z jednotlivých měření pro dané materiály jsou zobrazeny v tabulce 3.5.

Zkoušený materiál	Objemová hmotnost D [g·cm <sup>-3</sup> ]
ETU	2,01
EPC	2,21
EME	2,09
ELE	2,13
EDE	2,38
MV1 - 4	2,73

**Tabulka 3.6** Přehled objemových hmotností elektrárenských popílků a mletých vápenců

### 3.3.2 Stanovení mezerovitosti zhutněného fileru

Stanovení mezerovitosti zhutněného fileru bylo provedeno pomocí Rigdenovy aparatury dle ČSN EN 1097 - 4. Výsledky z tohoto měření jsou zobrazeny v tabulce 3.7. K zamyšlení vedla také otázka toho, zda průměr nádoby a uzavřená nádoba negativním způsobem neovlivňuje zhutnění fileru. Literatura v této souvislosti odkazuje na kontejner o takovém průměru, který by měl být nejméně a řád větší než je velikost zkoušených částic. V tomto případě bylo tedy dosaženo maximálního zhutnění.

Materiál	Objemová hmotnost fileru ve zhutněném stavu $\rho_{comp}$ [g·cm <sup>-3</sup> ]	Objemová hmotnost D [g·cm <sup>-3</sup> ]	Sypná hmotnost $\rho_s$ [g·cm <sup>-3</sup> ]
EDE	1,562	2,38	0,831
EPC	1,400	2,21	0,653
ELE	1,460	2,13	0,722
ETU	1,495	2,01	0,764
EME	1,250	2,09	0,507
MV 1	1,673	2,73	0,670
MV 2	1,581		0,585
MV 3	1,751		0,753
MV 4	1,645		0,649

**Tabulka 3.7** Přehled objemových a sypných hmotností zkoušených materiálů

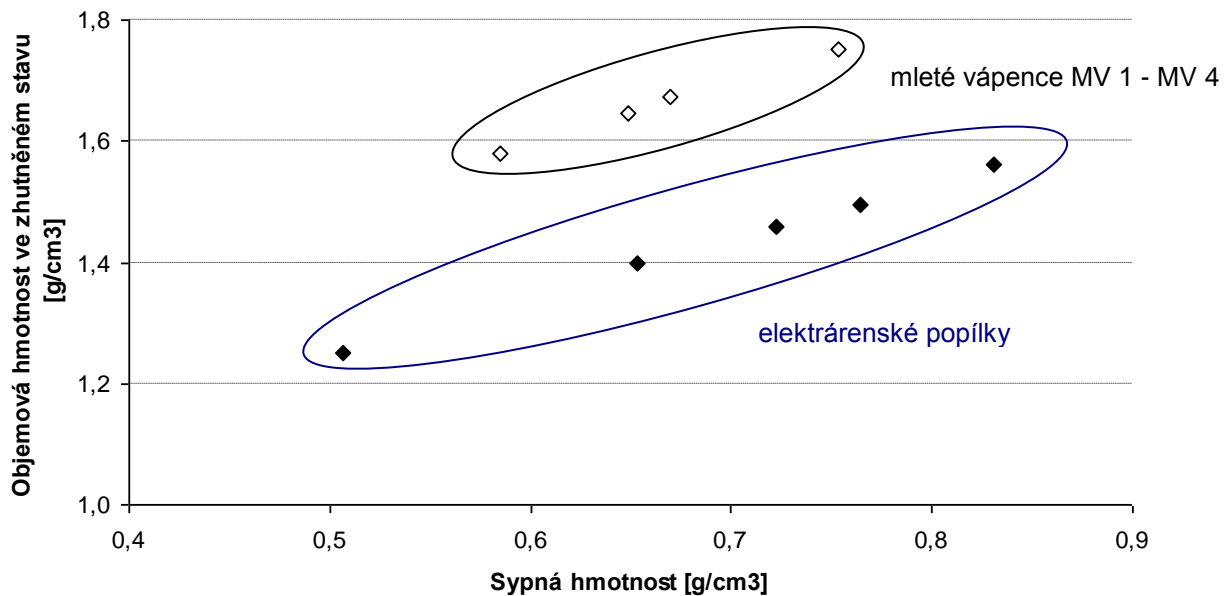
Všechny zrnité materiály mají určité procento pórů svého objemu, které definujeme jako podíl celkových mezer v jednotce objemu, a proto můžeme říci, že je nekonečně malý. Takovéto mezery jsou závislé na křivkách zrnitosti, tvaru částic, aplikované síle zhutnění a vlhkosti zkoušené frakce.

Objemová hmotnost daného materiálu tedy závisí na způsobu zhutnitelnosti částic. V technologii zabývající se jemnozrnnými podíly je běžné rozlišovat míru zhutnitelnosti v setřeseném i nesetřeseném stavu. Musíme však zvážit, jak nám výsledky při stanovení mezerovitosti suchým příměsí mohou pomoci při vyhodnocení zkoušek a následném návrhu betonu. Je třeba však poznamenat, že nám pomáhají pochopit chování při vyplňování mezer v dané matici.

## Vyhodnocení

Kromě objemové hmotnosti materiálu jsou důležité pro zrnité materiály také sypná hmotnost a objemová hmotnost stanovená pomocí zhutnění fileru. Objemová hmotnost je hmotnost částic dělená objemem, který zaujmají. Tento objem se může měnit v závislosti na stupni zhutnitelnosti daného materiálu a na použité metodě pro stanovení. Z geometrických úvah je známo, že částice tvaru ideální koule dosahují nejhorších výsledků dosažení mezerovitosti pomocí zhutňování.

V této práci byl použit vztah pro porovnání závislosti sypné hmotnosti a objemové hmotnosti zhutněného fileru pomocí Rigdenovy aparatury.



**Graf 3.3** Vztah mezi sypnou hmotností a objemovou hmotností ve zhutněném stavu zkoušených elektrárenských popílků a mletých vápenců

Z grafu a výsledků je patrné, že nejhorší mezerovitosti bude dosahovat elektrárenský popílek Tušimice. Tyto hodnoty jsou opět pouze orientačními, avšak pomohou nám předpovědět chování těchto příměsí v čerstvé směsi a následný předpoklad pórovitosti ztvrdlého betonu. Toto chování je však závislé na mnoha dalších faktorech.

## 4 TVAROVÝ INDEX

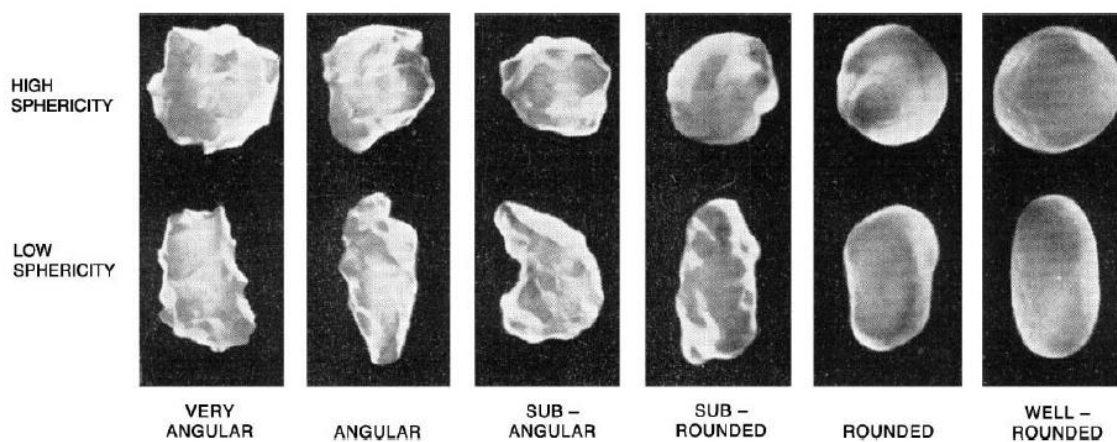
Zhutnitelnost a tok částic je považován za důležité vlastnosti v oblasti fyziky a inženýrských aplikací. Technologie výzkumu jemnozrnných podílů má rychle rostoucí význam ve světové ekonomice a je často spojován s chemickým inženýrstvím, kde van der Waalovy a elektrostatické síly mají převládající význam před silou gravitační a kde jsou materiálové vlastnosti částic důležitější v průběhu jednotlivých etap přípravy betonu.

Výzkumné práce podle Fullera a Thomsona dávají teoreticky ideální příklady křivek zrnitosti a dávají předpoklad pro návrh betonu a minimalizaci obsahu pórů ve struktuře matrice. Společným cílem technologů je minimalizovat pórovitost ve směsích a v dnešní době se můžeme v literatuře setkat s myšlenkami návrhů na základě spojitě křivky zrnitosti. Kvalifikace vlivu různých velikostí částic s vlivem na pórovitost vyžaduje rozsáhlou teoretickou a experimentální studii s různými druhy částic. Burminster na základě jeho výzkumů a zaměřením se na porozitu jako funkci křivky zrnitosti prezentoval pět distribučních typů, zobrazených níže (obrázek 4.1).

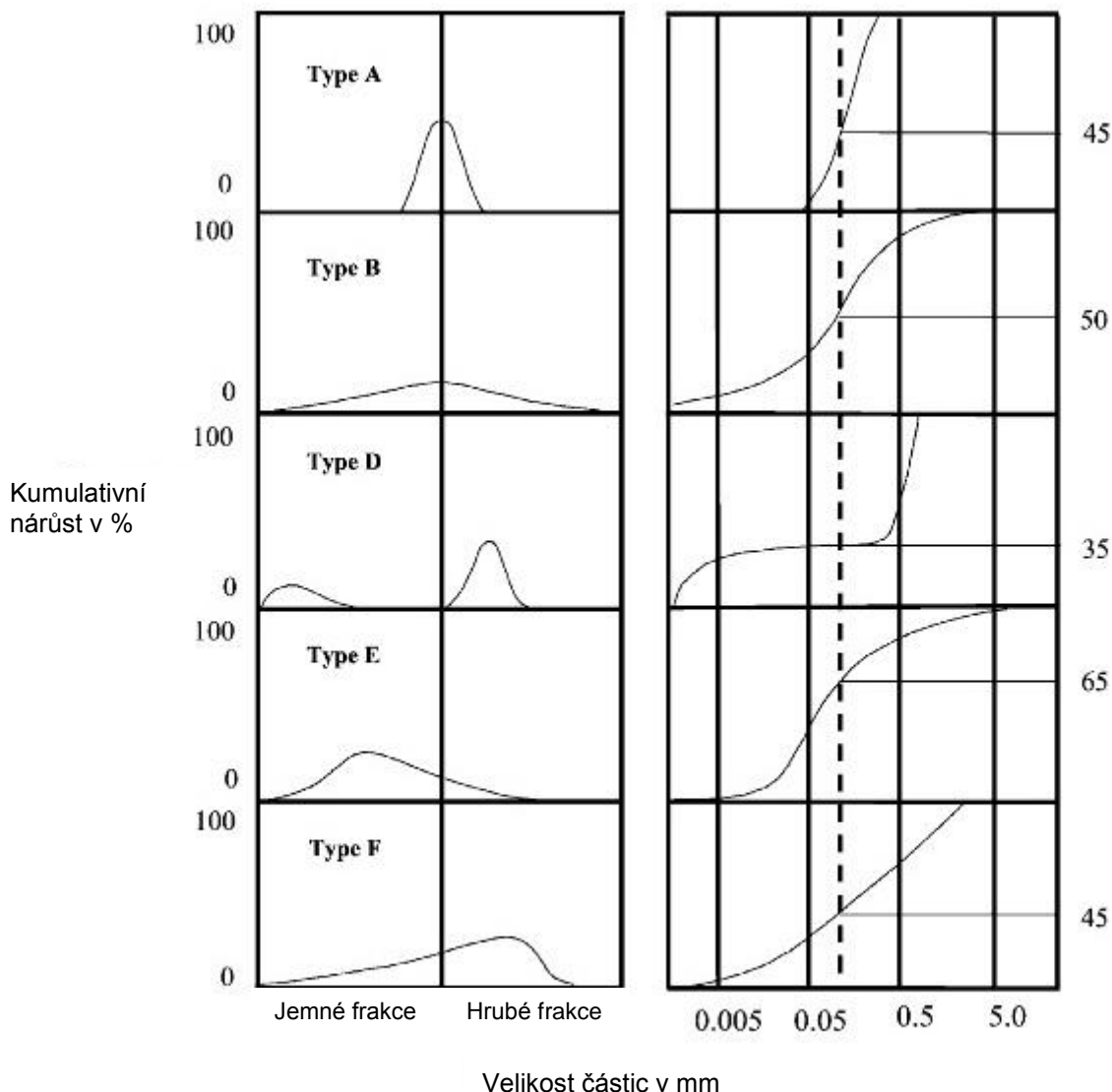
Vysvětlení k obrázku 4.2:

- Typ A - velmi úzký rozsah velikosti částic. Většinou písky nebo štěrk.
- Typ B - velmi široká a rovnoměrná distribuce částic.
- Typ D - dominující jemná a hrubá frakce distribuce částic. Patří sem písek nebo naopak jemnější / hrubší kamenivo.
- Typ E - převažující obsah jemnějších částic.
- Typ F - převažující obsah hrubších částic.

Každá z těchto distribucí (viz obrázek 4.2) byla analyzována tak, aby byl prokázán vliv na pórovitost směsi. Tyto výsledky byly shrnuty v literatuře Peroniuse a Sweetinga a závěry jsou následující. Měření ukázala, že distribuční model typu A má nejvyšší pórovitost, zatímco distribuční model typ F ukázal nejnižší pórovitost. Materiály aplikovatelné na tento modul mají distribuční rozdělení podobné Fullerovým křivkám. V případě určení pórovitosti je také nutné stanovit podmínky "Powersovy kulatosti" částic (viz. obrázek 4.1), tzv. tvarového indexu částic.



Obrázek 4.1 Dělení jemnozrnných částic dle Powersovy kulatosti

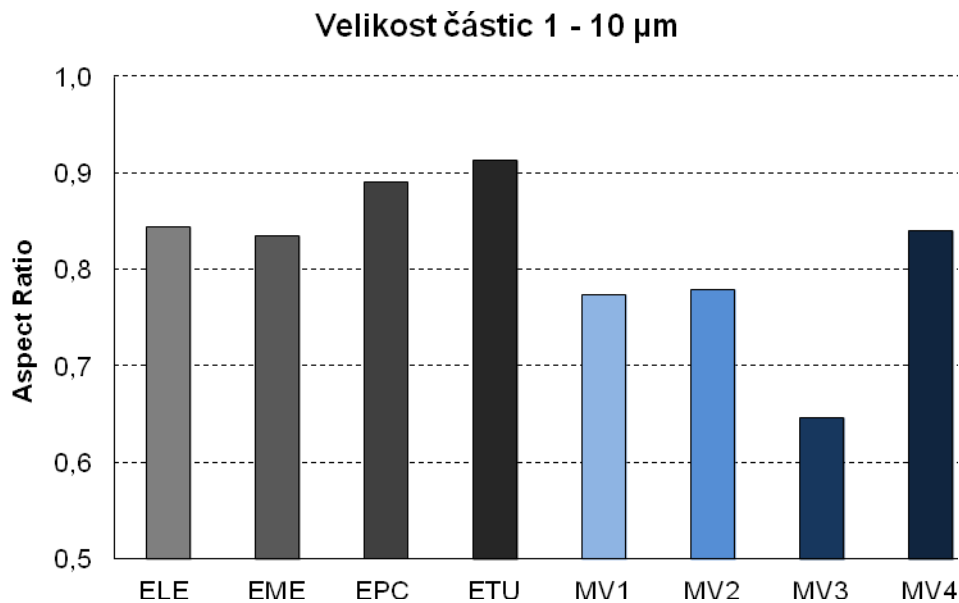


**Obrázek 4.2** Pět typů distribučních křivek a křivek zrnitosti prezentovaných Burminsterem

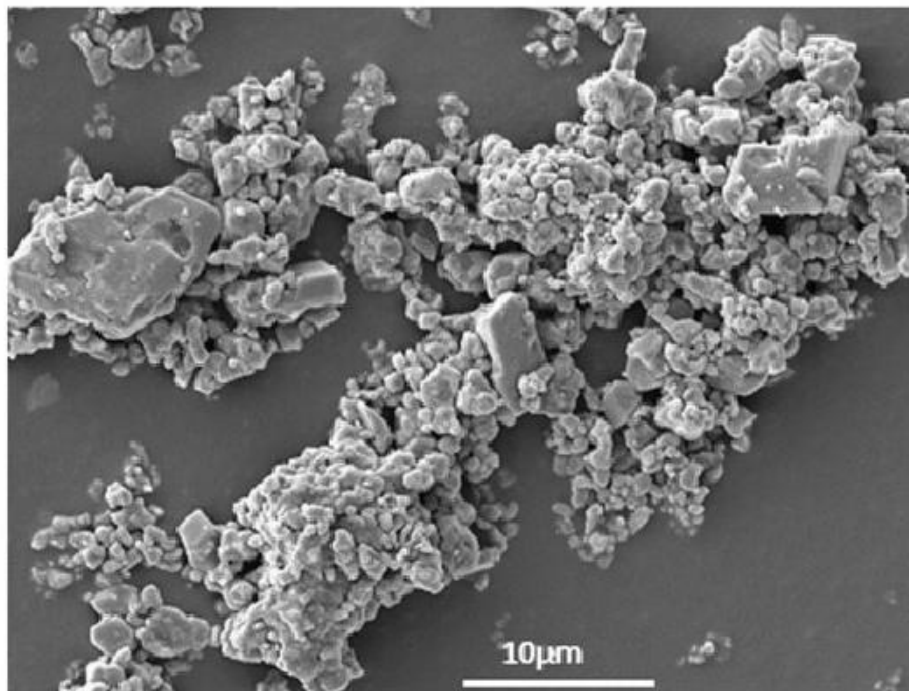
#### 4.1 Morfologie

Tvary částic měřených mletých vápenců a elektrárenských popílků byly získány prostřednictvím optického a konfokálního mikroskopu s vybavením automatického systému charakterizace částic. Každý vzorek byl měřen v pěti individuálních měřeních, obraz byl snímán dvojrozměrně a mohly být stanoveny různé parametry. Při měření konfokálním mikroskopem došlo k přesnému stanovení délky a šířky částic - u částic středního zrna. Z různých studií víme, že k definování tvarového indexu je třeba zahrnout ještě prodloužení tvaru částice a drsnost povrchu. Prodloužení bylo charakterizováno poměrem stran (šířka částice kladena kolmo na podélnou stranu dělená délkou částice, definovaná jako nejdelší rozměr měřené částice) - *Aspect Ratio*, zatímco drsnost částice je dána faktorem, který je definován poměrem druhé mocniny obvodu kruhové částice a skutečného obvodu zrna - *Form Factor*. Obě zmíněné hodnoty přibližující se číslu 1 odpovídají kulatým a hladkým částicím.

Průměrné hodnoty zmíněných hodnot (Aspect Ratio – poměr stran) pro velikosti středního zrna jsou vyneseny v grafu 4.1. Z tohoto grafu a z promítání mikroskopu můžeme říci, že částice mletých vápenců jsou v oblasti středních hodnot nepravidelné a mírně protáhlého tvaru, elektrárenské popílky mají téměř kulovitý tvar s poměrně přibližujícími se hodnotami k hodnotě 1. Z mikroskopického promítání bylo u hrubších částic zřejmé, že jsou protáhlejšího tvaru než částice v oblasti středních hodnot u obou materiálů. Pro jemnější a hrubší zrna nebyla provedena měření šířek a délek částic, nedošlo ke sejnému vyhodnocení jako je uvedeno v grafu 4.1.



**Graf 4.1** Aspect Ratio elektrárenských popílků a mletých vápenců v oblasti částic 1 – 10  $\mu\text{m}$



**Obrázek 4.3** Aglomerované částice mletých vápenců

## 4.2 Vyhodnocení výsledků a závěr

V případě zkoušených materiálů docházelo zejména při vysokém zvětšení ke ztrátě ostroty a nebylo příliš možné zřetelně vyhodnotit povrch částic. I přes zmiňované nedostatky je však tato metoda užitečnou pro odhad a porovnání tvaru a povrchové charakteristiky částic.

Teoreticky můžeme říci, že jemnější materiály budou mít větší schopnost vyplňovat mezery mezi hrubšími částicemi v dané matici. Ovšem tvar částic a povrchová struktura částic musí být brána také v úvahu. Jakákoliv odchylka od kulového zrna znamená změnu viskozity pro stejnou objemovou část. Z různých teoretických předpokladů můžeme říci, že čím jemnější jsou materiály a jejich tvar se přibližuje kulovitému tvaru, bude vykazovat lepší reologické chování, avšak chování v průběhu zhutňování a dosahování požadované mezerovitosti bude horší. V porovnání mletého vápence s elektrárenským popílčkem výsledky ukázaly, že částice jsou u mletých vápenců hranatější a podlouhlejší v porovnání s podobnými křivkami zrnitosti obou materiálů. Nicméně pórovitost zrn vápenců byla extrémně vyšší než u popílků. Avšak pomocí měření uvedených výše nebylo možné přesně rozlišit a stanovit tvarové charakteristiky a povrchovou morfologii jednotlivých částic.

Z grafu 4.1 můžeme vidět, že hodnoty poměrů stran částic v oblasti hodnot středního zrna elektrárenských popílků jsou poměrně vysoké a na základě toho můžeme usuzovat o poměrně kulovitém tvaru částic, což potvrdila i mikroskopická měření. Naopak u mletých vápenců nejsou tyto hodnoty příliš vysoké a mikroskopická měření potvrdila částice protáhlých tvarů, s různou drsností povrchu.

V závěru je potřeba říci, že tvar a morfologické vlastnosti takto jemných částic hrají významnou roli v cementových kompozitech. Nicméně je nutné poznamenat, že výsledky mohou být ovlivněny způsobem přípravy a vybranou metodou měření. Srovnání různých druhů materiálů může však poskytnout cenné informace například pro stanovení mechanického chování těchto podílů v cementové pastě a následně v kompozitu s hrubým kamenivem.

## 5 ZÁVĚR

Počátkem 60. let představil Powers myšlenku, že beton může být považován za směs částic kameniva a cementové pasty. Dále představil názor, že pasta uvězněná uvnitř dutin kameniva není účinná pro zpracovatelnost betonové směsi.

Dále byla představena myšlenka pro dosažení lepších reologických vlastností a snížení pórovitosti betonové směsi - přidávkem například mletých vápenců nebo elektrárenských popílků s cílem zaplnění dutin a pórů tak, aby nedocházelo ke snížení zpracovatelnosti směsi a aby nedocházelo k vyšší potřebě vody a tím ke zhoršování fyzikálních vlastností. Aby tomu tak nebylo, je nutné provést komplexní analýzu jemnozrnných podílů, která je zde představena.

Z dosažených výsledků můžeme vyvodit následující závěry:

- V případě mletých vápenců (homogenních materiálů) výsledky ukazují, že čím jemnější materiál, tím je dosahováno lepší mezerovitosti zhutněného fileru, tzn. nižší pórovitosti zhutňované směsi.
- Lepší mezerovitost potvrzuje také mikroskopické stanovení – Aspect Ratio (poměr stran částic), kdy vidíme, že čím vzdálenější je hodnota od čísla 1 (tzn. částice kulovitého tvaru) mají tyto částice schopnost dosažení lepší mezerovitosti zhutněného fileru v suchém stavu.
- Mikroskopická měření ukázala podstatně vyšší pórovitost a drsnost zrn mletých vápenců než elektrárenských popílků, z toho můžeme usuzovat na horší reologické chování pasty. Elektrárenské popílků jsou jemnější a jejich tvar se přibližuje kulovitému tvaru, proto usuzujeme na lepší reologické vlastnosti.
- Avšak příliš velké množství kulových částic a vysoká hodnota poměrů stran (Aspect Ratio) v elektrárenských popílcích způsobuje větší pórovitost zhutněného fileru v suchém stavu.

V dalším kroku této práce je nutné ověřit předpokládané chování představených příměsí. V první řadě budou stanovovány konkrétní hodnoty tvarových indexů a to z prováděných zkoušek reologického chování pasty – pomocí rotačního viskozimetru, zkoušky rozlití pasty a stanovení vodonáročnosti příměsí. Následně budou namíchány maltové směsi, kdy bude opět prováděna mikroskopie, rtuťová porozimetrie a nasákavost vzorků. Cílem těchto zkoušek a poznatků bude vytipování vhodných jemnozrnných příměsí pro betony s cílem dosažení optimální mezerovitosti.



## 6 VYSVĚTLIVKY

ASTM	-	American Society for Testing and Materials
B.E.T.	-	Brunauer, Emmett a Tellerova analýza
COV	-	Variační koeficient [%]
D	-	Objemová hmotnost [ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ]
EDE	-	Popílek z elektrárny Dětmarovice
ELE	-	Popílek z elektrárny Ledvice
EME	-	Popílek z elektrárny Mělník
EPC	-	Popílek z elektrárny Počerady
ETU	-	Popílek z elektrárny Tušimice
MV1	-	Mletý vápenec Carmeuse, Mokrá (9/V)
MV2	-	Mletý vápenec Carmeuse, Mokrá (7/V)
MV3	-	Mletý vápenec Carmeuse, Mokrá (12/V)
MV4	-	Mletý vápenec Carmeuse, Mokrá (8/V)
PSD	-	Particle Size Distribution (křivka zrnitosti)
SSA	-	Specific Surface Area (měrný povrch)
XRF	-	RTG analýza
$\rho_{\text{comp}}$	-	Objemová hmotnost fileru ve zhutněném stavu
$\rho_s$	-	Sypná hmotnost [ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ]

## 7 LITERATURA

Diederich, P.; Mouret, M.: *The nature of limestone filler and self – consolidating feasibility – Relationships between physical, chemical and mineralogical properties of filler and the flow at different states, from powder to cement – based suspensions*, Powder Technology 218, 2012

Felekoglu, B.: *Effects of PSD and surface morphology of micro – aggregate on admixture requirement and mechanical performance of micro – concrete*, Cement & Concrete Composites 29, 2007

Felekoglu, B.: *A new approach to the characterization of particle shape and surface properties of powders employed in concrete industry*, Construction and Building Materials 23, 2009

He, M.; Wang, Y.; Forssberg, E.: *Parameter studies on the rheology of limestone slurries*, Industrial Journal of Mineral Processing 78, 2006

Hunger, M.; Brouwers, H. J. H.: *Flow analysis of water – powder mixtures: Application of specific surface area and shape factor*, Cement & Concrete Composites 31, 2009

Hunger, M.: *An integral design concept for ecological Self – Compacting Concrete*, Ph.D. Thesis, Eindhoven University of Technology, Netherlands 2010, ISBN 978 – 90 – 6814 – 628 – 8

Jia, X.; Williams, R. A.: *A packing algorithm for particles of arbitrary shapes*, Powder Technology 120, 2001

Kwan, A. K. H.; Fung, W. W. S.: *Packing density measurement and modeling of fine aggregate and mortar*, Cement & Concrete Composites 31, 2009

Latham, J. – P.; Munjiza, A., Lu, Y.: *On the prediction of void porosity and packing of rock particulates*, Powder Technology 125, 2002

Okamura, H.; Ouchi, M.: *Self – Compacting Concrete*, Journal of Advanced Concrete Technology 1, 2003

Sobolev, K.; Amirjanov, A.: *Application of genetic algorithm for modeling of dense packing of concrete aggregates*, Construction and Building Materials 24, 2010

Svěrák, T.; Števílová, N.; Eštoková, A.; Pecinar, M.: *Fluidization of Coarser Particulate Materials*, Proceedings of the abstracts of 12th International Conference on Mechanical Engineering, SI 2008, SESSION 4 Environment and Environmental Technologies, Slovensko: SASI, Bratislava, 2008, ISBN 978 – 80 – 227 – 2987 – 1

Westernholm, M.; Lagerblad, B.: *Influence of fine aggregate characteristics on the rheological properties of mortars*, Cement & Concrete Composites 30, 2008

Yu, A. B.; Bridgwater, J.; Burbidge, A.: *On the modeling of the packing of fine particles*, Powder Technology 92, 1997

Zhu, W.; Gibbs, J. C.: *Use of different limestone and chalk powders in self – compacting concrete*, Cement and Concrete Research 35, 2005