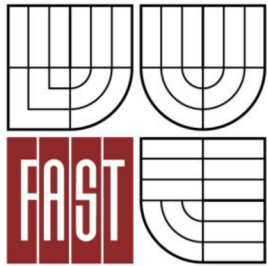


**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STAVEBNÍ  
ÚSTAV CHEMIE**

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING  
INSTITUTE OF CHEMISTRY

# **OMÍTKY S PŘÍDAVKEM JEMNĚ MLETÉHO VÁPENCE**

LIME MORTARS WITH THE ADDITION OF GROUND LIMESTONE

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**  
BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**TOMÁŠ ŽIŽLAVSKÝ**

**VEDOUcí PRÁCE**  
SUPERVISOR

**Mgr. MARTIN VYŠVAŘIL, Ph.D.**

BRNO 2015



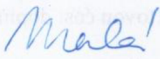
# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

**Studijní program** B3607 Stavební inženýrství  
**Typ studijního programu** Bakalářský studijní program s prezenční formou studia  
**Studijní obor** 3607R020 Stavebně materiálové inženýrství  
**Pracoviště** Ústav chemie

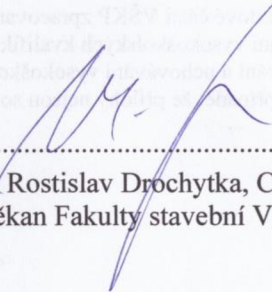
## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

**Student** Tomáš Žižlavský  
**Název** Omítky s přídavkem jemně mletého vápence  
**Vedoucí bakalářské práce** Mgr. Martin Vyšvařil, Ph.D.  
**Datum zadání bakalářské práce** 30. 11. 2014  
**Datum odevzdání bakalářské práce** 29. 5. 2015

V Brně dne 30. 11. 2014

  
.....  
doc. Ing. Jitka Malá, Ph.D.  
Vedoucí ústavu



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

## Podklady a literatura

- Chroust, F. Omítky. Praha, 1959. SNTL.
- The GCI project Bibliographies Series. Preservation of Lime Mortars and Plasters. Los Angeles, 2003. The Getty Conservation Institute.
- Lanas, J., Alvarez, J. I. Masonry repair lime-based mortars: Factors affecting the mechanical behavior. Cement and Concrete Research, 2003, Vol. 33, p. 1867–1876.
- Lanas, J. et al. Mechanical properties of masonry repair dolomitic lime-based mortars. Cement and Concrete Research, 2006, Vol. 26, p. 951–960.
- Mohanu, I. et al. Physical-mechanical and aesthetic characteristics of some mortars based on lime-limestone-volcanic tuff. Romanian Journal of Materials, 2011, Vol. 41, p. 332–345.
- Balen, K. van, Gemert, D. van. Modelling lime mortar carbonation. Materials and Structures, 1994, Vol. 27, p. 393–398.

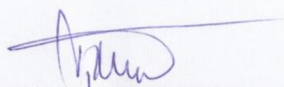
## Zásady pro vypracování (zadání, cíle práce, požadované výstupy)

Proveďte literární rešerši o vlivu přídavku vápence do různých druhů omítek. Zaměřte se též na historii použití vápence při přípravě omítek. Za použití literárních zdrojů podrobně popište karbonatační reakci vápna a možnosti jejího ovlivnění včetně přídavku jemně mletého vápence. Uveďte též souhrn dostupných modelů karbonatace. Pro vypracování teoretické části bakalářské práce použijte zadanou literaturu a doplňte ji o vlastní literární rešerši k tématu. V praktické části vyrobte zkušební tělesa vápenných omítek s přídavkem jemně mletého vápence o různé granulometrii a stanovte jejich mechanické vlastnosti. Výsledky zpracujte do přehledných tabulek a grafů, na konci práce uveďte soupis použité literatury. Bakalářskou práci zpracujte na cca 40 až 50 stran.

## Struktura bakalářské/diplomové práce

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).
- 3.



Mgr. Martin Vyšvařil, Ph.D.  
Vedoucí bakalářské práce

## **Abstrakt**

Bakalářská práce je zaměřena na studium vlivu přídavku vápence do vápenných omítek. Teoretická část práce se zabývá dělením omítek a jejich použitím, historií využití vápence jako kameniva v omítkářství, jeho využitím v současnosti a jeho vlivu na vlastnosti vápenných omítek, především pevnosti. V další části práce je rozpracována karbonatační reakce omítek včetně jejího ovlivnění vnějšími činiteli. Praktická část je zaměřena na ověření předpokladů uvedených v části teoretické, především vlivu vápence na pevnosti vápenných omítek.

## **Klíčová slova**

vápenec, vápenná omítka, karbonatace, pevnost v tahu za ohybu, pevnost v tlaku, kapilární vzlínavost

## **Abstract**

The thesis is focused on an effect of addition of ground limestone on properties of lime based mortars. Theoretical part of the thesis deals with differentiation of plasters and their utilization, history of using limestone as an aggregate, its exploitation in the present and its impact on properties of lime based plasters, specially on strenghts. In the next part there's elaborated the carbonation reaction including the influence of external agents. Practical part of the thesis is focused on proving assumptions from theoretical part, particulary on the influence of ground limestone on the strenght properties of lime based plasters.

## **Keywords**

limestone, lime plaster, carbonation, flexural strenght, compressive strenght, capillary attraction

### **Bibliografická citace VŠKP**

Tomáš Žižlavský *Omítky s přídavkem jemně mletého vápence*. Brno, 2015. 44 s.,  
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav  
chemie. Vedoucí práce Mgr. Martin Vyšvařil, Ph.D.

**Prohlášení:**

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

V Brně dne 19.5.2015

.....  
podpis autora

Tomáš Žižlavský

## Obsah

1. Úvod .....	6
2. Omítky .....	7
2.1 Rozdělení omítek .....	7
2.2 Základní dělení pojiv .....	8
2.3 Pojiva používaná v omítkách, mechanismy tuhnutí a tvrdnutí .....	8
2.3.1 Jíly .....	8
2.3.2 Sádra .....	9
2.3.3 Portlandský cement .....	9
2.3.4 Vápno .....	10
2.4. Plnivo používané v omítkách .....	12
2.4.1 Anorganická ostřiva .....	12
2.4.2 Ostřiva organická .....	14
2.5 Záměsová voda .....	14
3. Vliv přísady jemně mletého vápence na vlastnosti malt a omítek .....	15
3.1 Vápenec .....	15
3.1.1 Těžba a využití jemně mletých vápenců .....	16
3.2 Historie využití vápenců při přípravě omítek .....	17
3.2.1 Starověk .....	17
3.2.2 Středověk .....	18
3.2.3 Novověk .....	19
3.2.4 Současnost .....	19
3.3 Vliv kameniv na vlastnosti omítek .....	19
3.3.1 Vliv poměru pojivo/plnivo na pevnosti omítek .....	20
3.3.2 Vliv fyzikálně – mechanických vlastností plniva na pevnosti omítek .....	21
3.3.3 Vliv chemického složení kameniva na vlastnosti malt a omítek .....	22
3.4 Vliv vápencového kameniva na vlastnosti omítek .....	23
3.4.1 Vliv přísady mramorové moučky .....	23
3.4.2 Vliv použití vápencového kameniva .....	23
4. Vytvrzování vápenných malt a omítek .....	26
4.1 Vysychání malt a omítek .....	26
4.2 Karbonatace .....	26
4.2.1 Vliv prostředí na průběh karbonatace .....	27
4.2.2 Sledování karbonatace .....	28

5. Praktická část .....	31
5.1 Použité suroviny .....	31
5.2 Příprava vzorků .....	31
5.3 Prováděné zkoušky na zatvrdlých maltách .....	32
5.3.1 Stanovení objemové hmotnosti .....	32
5.3.2 Stanovení pevnosti v tahu za ohybu dle ČSN EN 1015 .....	32
5.3.3 Zkouška pevnosti v tlaku .....	33
5.3.4 Stanovení průměrného součinitele vlhkostní vodivosti .....	34
5.4 Výsledky a diskuze .....	35
6. Závěr .....	40
7. Seznamy .....	41
7.1 Seznam použité literatury .....	41
7.2 Seznam obrázků .....	43
7.3 Seznam tabulek .....	44



# 1. Úvod

Omítky jakožto esteticky velmi významná část stavebních objektů vždy byly a dodnes jsou jedním z důležitých prvků ve stavebnictví. Na vytváření omítek byly používány různé materiály, avšak nejdelší historii má v tomto ohledu vápno. Vápenné malty představují nepostradatelnou stavební látku, která slouží ke spojování různých stavebních prvků, k zušlechťování povrchu stěn, resp. stavebního díla, k zaplňování spár apod. V nejstarších dobách obsahovaly omítky jako pojivo dobře zpracované plastické hlíny, které byly ostřeny neplastickým materiálem (pískem) nebo byly vyztuženy přírodními vlákny rostlinného nebo živočišného původu. Omítky ve své dlouhé historii měly svoje specifika, a to jak z hlediska používaných materiálů, tak i technologie přípravy malty nebo jejího nanášení na zdicí materiál. Nejvíce používaným pojivem v omítkách bylo, a stále je, vápno. To se používalo buď samostatně, nebo ve směsi s dalšími přísadami a přísadami. Ve starověkém Řecku a Římě se často používaly mnohvrstvé omítky, v kterých bylo hojně užíváno mletého mramoru a vápenců jako plniva. Tyto omítky se vyznačovaly vysokými pevnostmi a dlouhou trvanlivostí.

V současnosti se v omítkářství používá jemně mletý vápenec pro výrobu suchých omítkových směsí, ve kterých slouží spolu s drceným vápencem jako plnivo. S nutností četných restaurátorských prací na historických budovách se začal rozvíjet i výzkum v použitelnosti a vhodnosti moderních druhů omítek na vyspravení těch historických. Jako nevhodné se ukázaly omítky cementové a vápenocementové. Tyto vykazují až příliš vysoké pevnosti, které jsou však v případě použití na historických stavbách, v kombinaci s historickými materiály spíše na škodu, znemožňují budově pod takovouto omítkou dýchat a mohou způsobit i závažné estetické a statické poruchy vzniklé vlivem kondenzace vlhkosti v konstrukci. Při výzkumu použitelnosti vápenných omítek pro opravy historických staveb bylo již dříve zjištěno, že použití vápence jako plniva do vápenných malt a omítek zvyšuje jejich pevnosti.

Hlavním cílem bakalářské práce je porovnat mechanické vlastnosti vápenných omítek s přísadkou jemně mletého vápence o různé granulometrii a získané výsledky konfrontovat s literárními údaji.

## 2. Omítky

### 2.1 Rozdělení omítek

Omítky lze dělit mnoha různými způsoby. Z pohledu stavebně materiálového je nejdůležitější rozdělení dle typu pojiva, kde pro nás již tato informace nese spolu s sebou množství dalších informací o možnostech použití vyplývajících ze způsobu vazby pojivové složky omítky, o způsobu zpracování a mnohém dalším. Manželé Rajisa a Ilja Kvasničkovi používají v knize Omítky dělení následující:

- a) vnější a vnitřní
- b) podle materiálu (jílové, vápenné, nastavované cementem nebo sádrou, cementové, sádrové, šlechtěné apod.)
- c) podle způsobu nanášení (nátěrové, stříkané, nahazované apod.)
- d) podle úpravy povrchu (hrubé, hladké leštěné apod.)
- e) podle způsobu omítání (ruční nebo strojní)
- f) podle způsobu zpracování materiálu (mokrý a suchý)
- g) podle podkladu (na zdivu jílovém, cihelném, betonu, dřevě, pletivu apod.)
- h) podle umístění v místnosti (omítky stěn, stropů, kleneb apod.)
- i) podle umístění na objektu (soklové, sklepní, přízemní, schodišťové, v I. patře apod.)
- j) podle tvaru podkladu (na plochách rovných, zakřivených, členěných apod.)
- k) podle přísad (vodotěsné, akustické, probarvené apod.) [1].

## 2.2 Základní dělení pojiv

Pojiva jsou nejčastěji anorganické látky, které po smíchání s plnivem, vodou a případnými dalšími přísadami a příměsemi tvoří zpracovatelnou směs, která po určité době vlivem fyzikálních, fyzikálně chemických a chemických pochodů tuhne a tvrdne a stává se odolnou proti mechanickým a jiným vlivům. Tyto směsi nazýváme maltami (pro směsi s plnivem o velikosti zrna do 4 mm, patří sem i omítky), případně betony (pro směsi s plnivem o velikosti zrn větší jak 4 mm).

Anorganická pojiva dělíme v podle jejich chování v zatuhlém stavu ve styku s vodou na pojiva:

- a) vzdušná - po zatuhnutí vytvrzují pouze na vzduchu a po styku s kapalnou vodou pevnosti zcela, nebo částečně ztrácejí (vzdušné vápno, sádra, Sorellova hořečnatá maltovina, jíly)
- b) hydraulická - po zatuhnutí vytvrzují na vzduchu i pod vodou (cement, hydraulické vápno, speciální pojiva) [1].

## 2.3 Pojiva používaná v omítkách, mechanismy tuhnutí a tvrdnutí

### 2.3.1 Jíly

Jíly patří mezi nejstarší používaná pojiva, hojně využívaná v oblasti středního východu dodnes. Omítky na bázi jílu jsou složeny z písku, vody, vláknitých látek (seno, plevy) a jílového pojiva. Jíly jsou složeny z jemných částic (do 2  $\mu\text{m}$ ) jílových minerálů. Mezi hlavní jílové minerály patří:

Kaolinit ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2 \cdot \text{SiO}_2 \cdot 2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ )

Illit ( $n \cdot \text{K}_2\text{O} \cdot 3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot n \cdot \text{H}_2\text{O}$ )

Montmorillonit ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot n \cdot \text{H}_2\text{O}$ )

Hallyosit ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2 \cdot \text{SiO}_2 \cdot 4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ )

Tuhnutí a tvrdnutí jílových omítek je způsobeno pouze vysycháním směsi a je doprovázeno smršťováním závislým na složení použitého jílu, množství a granulometrii pojiva [2].

### 2.3.2 Sádra

Sádrové omítky jsou v posledních letech moderním řešením vnitřních úprav novostaveb v České republice, ale jejich použití je dochováno už z doby 4500 let př. n. l. v ranně neolitické kultuře jerišské, kde se stěny potahovaly červeně zbarvenou sádrovou vrstvou hlazenou kameny.

Nízký rozvoj omítek na bázi sádry je u nás způsoben především nedostatkem vhodných surovin, kdy jediné naše ložisko leží v Kobeřicích. Zavedením odsiřování v tepelných elektrárnách v 90. letech se nám otevřely nové možnosti, protože vedlejším produktem odsiřování je téměř čistý (cca 95%) sádrovec.

Sádrovec ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) již při teplotě  $42^\circ\text{C}$  začíná ztrácet vodu a přeměňovat se na rychletuhnoucí sádru ( $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$ ). Tato se po smísení s vodou rehydratuje a rychle tuhne za vzniku sádrovce. Tyto změny probíhají za minimálních objemových změn, proto jsou omítky na bázi sádry prosty trhlin vzniklých v důsledku vyzrávání omítky [1, 2].

### 2.3.3 Portlandský cement

Roku 1824 přihlásil J. Absbin patent s názvem „Zlepšení ve výrobě umělého kamene“ a o rok později začal vyrábět hydraulické pojivo s názvem „Portlandský cement“. Portlandský proto, že beton z tohoto cementu svou barvou připomínal portlandský vápenec. Roku 1844 I. Ch. Johnston došel k poznatku, že je třeba vstupní suroviny pálit až na mez slinutí, čímž dovršil pokládání základů moderního cementářství.

Portlandský cement vzniká pomletím portlandského slínku se sádrovcem, který plní funkci regulátoru tuhnutí. Portlandský slínek vzniká smísením a vypálením surovinové moučky sestávající z: cca 75 % vápence (hlavní zdroj  $\text{CaO}$ ), zemin (jíly, hlíny, břidlice; zdroj  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) a korigujících složek, které vhodně upravují poměry mezi hlavními oxidy.

Portlandský slínek je z velké části tvořen čtyřmi hlavními slínkovými minerály: alit (trikalciumpsilikát,  $3 \cdot \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ,  $\text{C}_3\text{S}$ ), belit (dikalciumsilikát,  $2 \cdot \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ,  $\text{C}_2\text{S}$ ), trikalciumaluminát ( $3 \cdot \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{C}_3\text{A}$ ), brownmillerit (celit, tetrakalciumaluminátferit,  $4 \cdot \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{C}_4\text{AF}$ ).

Principem vytvrzování maltovin na bázi portlandského cementu je hydratace především alitu a belitu, kdy vzniká trihydrát trikalciumpdisilikátu ( $3 \cdot \text{CaO} \cdot 2 \cdot \text{SiO}_2 \cdot 3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) a hydroxid vápenatý ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ). Maltoviny na bázi cementu mají vysoké pevnosti, avšak jejich nevýhodou je nízká plasticita vzniklé maltoviny a její difuzní uzavřenost. Proto se cement v omítkách používá především ve směsi s vápnem, kterým se zlepší jeho plastické vlastnosti. Čistě cementové omítky se používají do prostorů silně namáhaných chemicky, mechanicky či vlhkostně [2 – 4].

### **2.3.4 Vápno**

Vápno je ve stavebnictví používáno již přibližně od 6. století př. n. l., kde jsou doklady o jeho použití v Babyloně. Velký rozmach poté zažilo vápno a veškerá pojava na jeho bázi za doby Římské říše, ze kdy se nám také dochovaly první předpisy pro jeho výrobu. Na našem území je možno nalézt fragmenty omítek s freskovou výzdobou z období Velké Moravy tj. z 9. století n. l. Pochopení chemických procesů probíhajících při výrobě vápna a jeho tuhnutí přinesl až J. Black v 60. letech 18. století.

Vápna dělíme dle ČSN EN 459-1 na vzdušná, přirozeně hydraulická, směsná a hydraulická.

#### **2.3.4.1 Vápno přirozeně hydraulické**

Vyrábí se z jílových vápenců nebo vápencových slínů, které kromě vápence obsahují také značné množství hydraulických oxidů ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Výpal tohoto vápna se provádí na teploty pod  $1250^\circ\text{C}$  s následným hašením na prach. Někdy se tomuto vápnu též říká románský cement.

Za hydraulitou tohoto pojiva stojí především belit vzniklý při výpalu a hydratující stejným způsobem jako v případě portlandského slínku.

#### **2.3.4.2 Vápno směsné**

Vyrábí se společným pomletím vzdušného vápna a vhodných anorganických hydraulických nebo pucolánových příměsí, například popílků, vulkanických tufů, cementu, portlandského slínku, lupků, vysokopecní strusky apod. Přičemž převažuje obsah vápna vzdušného.

Při vytvrzování maltoviny připravené z takového pojiva hrají zásadní vliv okolní podmínky (relativní vlhkost vzduchu, teplota), které rozhodují o tom, zda bude probíhat především karbonatace (tuhnutí vzdušného vápna, probíhající za nižších relativních vlhkostí) nebo reakce založené na pucolanitě či hydraulicitě příměsi.

#### 2.3.4.3 Vápno hydraulické

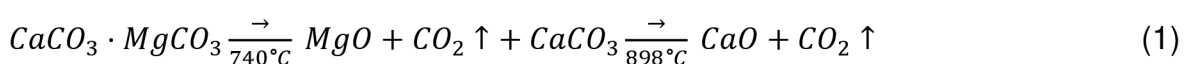
Vyrábí se stejným způsobem jako vápno směsné, hlavním rozdílem oproti vápnu směsnému je nižší obsah vápna a tím i volného CaO. Toto vápno tuhne a tvrdne převážně hydraulickými procesy, i když k procesu tvrdnutí přispívá i karbonatace.

#### 2.3.4.4 Vápno vzdušné

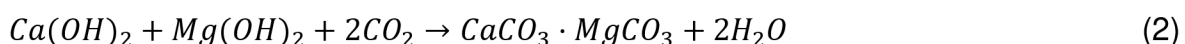
Vzdušné vápno dělíme podle ČSN EN 459 do dvou hlavních kategorií na vápna dolomitická (obsahující po výpalu vyšší množství MgO, obecně více jak 5 %) a vápna bílá.

##### 2.2.4.4.1 Vápno dolomitické

Vyrábí se pálením dolomitických vápenců, vápnitých dolomitů a dolomitů, kde se minerál dolomit ( $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$ ) teplotou rozkládá. Nejdříve při teplotě  $740^\circ\text{C}$  dochází k rozkladu magnezitu na oxidy uhličitý a hořečnatý a následně při teplotě  $898^\circ\text{C}$  se obdobně rozkládá kalcit na oxidy uhličitý a vápenatý:



Jedná se o vápno vždy ostře pálené, jeho reaktivitu lze zvýšit velmi jemným mletím, při dobrém zpracování vykazují vyšší vaznost jak vápna bílá. Jeho hašením vzniká směs hydroxidů vápenatého a hořečnatého ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$  a  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ), které následně působením vzdušného  $\text{CO}_2$  karbonatují za opětovného vzniku dolomitu a vody:



##### 2.2.4.4.2 Vápno bílé

Vyrábí se pálením vápenců o různé čistotě, kde hlavní složkou je minerál kalcit ( $\text{CaCO}_3$ ), který se při teplotě  $898^\circ\text{C}$  rozkládá na oxid uhličitý a vápenatý.

Pro výrobu vápna lze použít i další horniny s obsahem kalcitu, v současné době se však nepoužívají. Za dob Římské říše byl při nedostatku vápence používán i mramor získaný rozbíjením soch.



Bílé vápno může být páleno buď měkce, v tomto případě má nekonsolidovanou strukturu, které se docílí prudkým ochlazením vápna ihned po výpalu a která zajišťuje jeho vysokou reaktivitu, nebo ostře, kdy nevykazuje tak velkou reaktivitu, z důvodu konsolidace struktury. Pro omítky se více hodí vápno pálené měkce, protože ostře pálené vápno se nevyhasí celé již při mísení a při následném dohašování zrn CaO v omítce dochází k tzv. střílení omítek způsobeném větším objemem vznikajícího Ca(OH)<sub>2</sub>. Vyhašené vápno působením vzdušného CO<sub>2</sub> karbonatuje za vzniku CaCO<sub>3</sub> a vody [2, 3, 5, 6]:



Podrobněji se touto reakcí zabývá kapitola 4.2.

## 2.4. Plnivo používané v omítkách

Plniva v omítkách se také často označují jako ostřiva. Nejčastěji se do omítek používá ostřiv anorganických, především písků, které jsou částečně v závislosti na druhu pojiva doplňovány o další látky. Kromě písků se používají také lehká kameniva, především pro zvýšení tepelně izolačních vlastností omítek. V některých případech se používají i ostřiva organická.

### 2.4.1 Anorganická ostřiva

Hlavním anorganickým ostřivem je písek, dále mezi ně lze zařadit kamenné moučky, kamenné drtě, umělá kameniva, průmyslové dopady (např. cihelný prach), případně recykláty. Dále také barviva sloužící k dosažení různých barevných odstínů omítek.

#### 2.4.1.1 Písek

Jako písky jsou označovány kameniva frakce do 4 mm. Lze použít písky jak těžené z vody (též označovány jako říční), kopané, tak i drcené. Pro omítky nejvhodnější jsou písky říční, které jsou díky působení vody oprané o nevhodné

hlinité a humusovité částice. V dnešní době jsou však již i kopaná kameniva v lomech propírána. Zpracovatelnost a plasticitu malty zvýší malý podíl jílu, avšak při větším množství výrazně snižují výsledné pevnosti znemožněním navázání pojiva [1].

#### 2.4.1.2 Kamenné moučky

Jako kamenné moučky označujeme jemně mletá kameniva. Nejčastěji se používají moučky z mramoru, vápenců, dolomitů, serpentínů a porfyrů. Moučky při správném dávkování svou jemností zlepšují tvárnost a plastičnost malty a také její barevnou vydatnost. Stejně jako u jemných jílových podílů hrozí i zde nebezpečí při příliš vysoké dávce kamenné moučky ztráty pevností z důvodu nedostatku pojiva pro obalení všech zrn ostřiv. Použitím kamenných mouček z různých barevných hornin lze docílit i probarvení omítky a byly také k tomuto účelu používány [1].

#### 2.4.1.3 Kamenné drtě

Kamennou drť bývá nejčastěji ostřivo o větší velikosti zrn neobsahující velmi jemné frakce. Používají se především do speciálních druhů omítek především pro tvrdé omítky, používané jako imitace kamene [1].

#### 2.4.1.4 Umělá kameniva

Z umělých kameniv se v omítkách používá především expandovaný perlit, který výrazně vylehčuje omítku a snižuje její součinitel tepelné vodivosti  $\lambda_p = 0,100 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  oproti  $\lambda_p = 0,990 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  u omítky vápenocementové. Avšak vzhledem k omezené tloušťce nanášené vrstvy omítky (do 4 cm) se tato používá již pouze výjimečně, k omítání staveb, nevyžadujících dodatečné zateplení obvodového pláště [1, 7].

#### 2.4.1.5 Průmyslové odpady a recykláty

Využívají se především odpady a recykláty z cihlářského průmyslu. Cihelný prach slouží obdobně jako kamenná moučka pro zlepšení zpracovatelnosti, pevnosti a pro svou typickou barvu také pro dosažení červeného zbarvení výsledné omítky. Do omítek lze použít i cihelnou drť jako náhradu části pojiva. Cihelná drť byla v hojné míře využívána ve stavebnictví především po druhé



světové válce, kdy byl dostatek zdrojů pro její přípravu, po jejich vyčerpání bylo vyráběno i umělé kamenivo obdobných vlastností – cihloporit [1].

#### 2.4.1.6 Barviva

K probarvování omítek se používají především přírodní barvy připravované úpravami jílu a hlinek, nebo uměle připravované na bázi oxidů především železa, ale také chromu či zinku. Barviva jsou většinou jemné práškovité látky, platí pro ně tedy stejné omezení jako v případě kamenných mouček. Tyto barviva dávají obvykle teplé barvy od žluté přes okrovou až po hnědou. U omítek pro fasádní barvy uvádí F. Chroust maximální dávku 10 % z objemu malty. Hlavním požadavkem na barviva je jejich stálost v zásaditém prostředí [1].

#### 2.4.2 **Ostřiva organická**

Organická ostřiva neplní povětšinou funkci plnicí, ale spíše zlepšující některé nežádoucí vlastnosti omítek.

V minulosti bylo využíváno ostřiv organického původu – otrub, slámy, rostlinných vláken, a živočišných chlupů, které všechny zamezovaly vzniku trhlin vzniklých v důsledku smršťování. V dnešní době jsou pro tyto účely využívána vlákna umělá, především polypropylenová [1, 2].

### 2.5 **Záměsová voda**

Důležitou složkou malty je i záměsová voda, tato by měla splňovat některé základní požadavky. Pro malty a omítky hydraulické je důležité hlídat obsah organických látek ve vodě, protože tyto negativně ovlivňují průběh hydratace kalciumsilikátových minerálů. Tyto reakce také negativně ovlivňují tzv. huminové kyseliny, které se vyluhují z humusovitých půd a jejich přítomnost lze pozorovat žlutým až hnědým zbarvením vody.

Pro malty a omítky je vhodná voda splňující požadavky normy ČSN EN 1008 - Záměsová voda do betonu - Specifikace pro odběr vzorků, zkoušení a posouzení vhodnosti vody, včetně vody získané při recyklaci v betonárně, jako záměsové vody do betonu. Bez dalších chemických rozborů lze bezpečně použít vodu pitnou, která tyto požadavky vždy splňuje [1, 2, 8].

### 3. Vliv přídavku jemně mletého vápence na vlastnosti malt a omítek

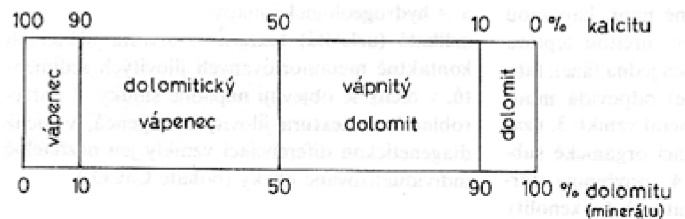
Tato kapitola se zabývá vlivem přídavku kamenných mouček, především na bázi vápence a mramoru, na vlastnosti malt a omítek v čerstvém i zatvrdlém stavu a jeho vlivu na jejich pevnosti.

#### 3.1 Vápenec

Vápenec je celistvá usazená (sedimentární) hornina barev od bílé až do šedé s množstvím okrových odstínů způsobených oxidy železa, jejíž hlavní složkou je uhličitán vápenatý ( $\text{CaCO}_3$ ), především ve formě kalcitu (krystalizuje v soustavě trigonální, též zvané klencová), méně často také aragonit (krystalizuje v soustavě kosočtverečné) který je rozpustnější než kalcit a proto bývá z této horniny vyloužen, nebo rekrystalizuje na kalcit, proto ho v geologicky starších vápencích většinou nenajdeme. Jako mineralogické příměsi vápence lze nalézt dolomit ( $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$ , krystalizuje v soustavě klencové), který je druhou nejobsáhlejší složkou a tvoří se podle jeho obsahu i názvosloví vápenců v řadě vápenec-dolomit (viz Obr. 1). Dále jsou to Siderit ( $\text{FeCO}_3$ ), křemen ( $\text{SiO}_2$ ), jílové minerály a především u organogenních vápenců úlomky zkamenělin [9].

Kalcit ( $\text{CaCO}_3$  v soustavě klencové) tvoří krystaly bezbarvé, případně bílé, žlutavé, červené, šedé, hnědé až černé, které mohou v ideálních podmínkách dorůst značných rozměrů. Na Mohsově stupnici tvrdosti je základním minerálem s tvrdostí 3 (lze do něj rýpat nožem) [10].

Mezi vápencové horniny patří také mramor. Mramor obsahuje více než 95 % kalcitu a vznikl metamorfózou vápenců, kdy vlivem vysokého tlaku a teploty došlo k rekrystalizaci původní horniny – povětšinou organogenního vápence. Mramor je pro svůj vzhled, vysokou leštitelnost a snadnou opracovatelnost již od dob starověku oblíbeným materiálem pro sochařství a dekorační prvky budov [9].



Obr. 1 Dělení vápenec – dolomit [9]

### 3.1.1 Těžba a využití jemně mletých vápenců

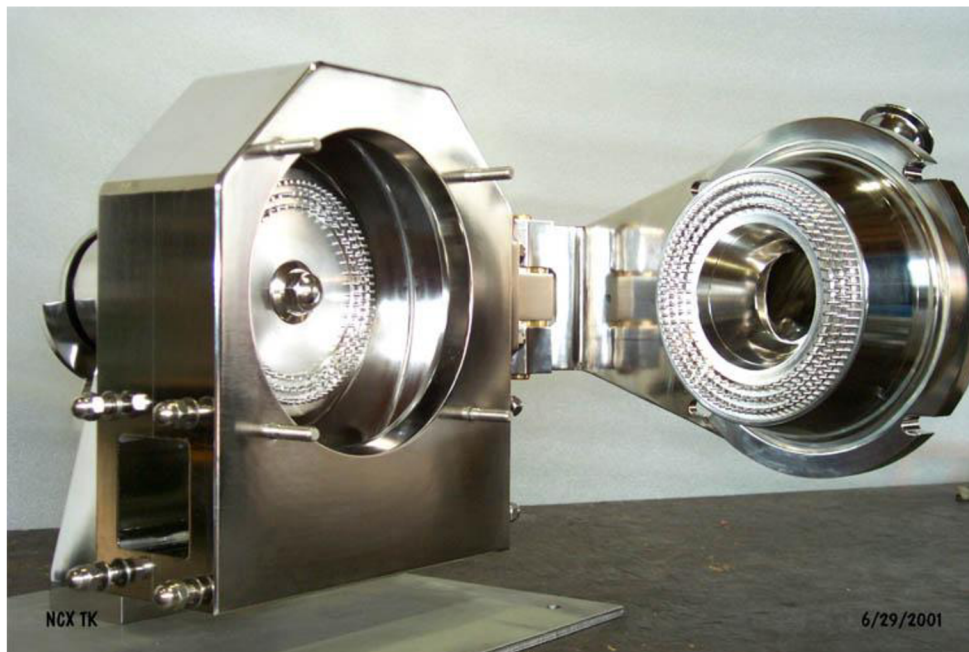
Využitelná ložiska vápence pro vápenictví jsou především lokality s výskytem zpevněného vápence, který se většinou těží odstřely, výjimečně jsou využívána i ložiska šterková.

Natěžený vápenec se využívá ve vápenictví k výrobě páleného vápna ( $\text{CaO}$ ), případně následně vyhašením vzniklého vápenného hydrátu ( $\text{Ca(OH)}_2$ ). Pálené vápno se vyrábí ve vápenkách v šachtových, případně rotačních pecích výpalem při teplotách nad teoretickou teplotou rozkladu kalcitu  $898^\circ\text{C}$ . Pro vsázku pecí šachtových jsou používány frakce vápence v rozmezí 60 – 180 mm, v pecích rotačních se používá vápenec s frakcí od 5 mm do 90 mm, výjimkou jsou rotační pece systému Rosa – Petr, ve kterých se zpracovává mletý vápenec s velikostí částic pod 2 mm. Pece s tímto systémem nesou i některé nevýhody a nejsou zdaleka tak rozšířeny aby spotřebovaly veškerý vápenec nevyužitý v pecích šachtových a běžných rotačních.

Vápenec nevyužitý v pecích běžných lze dodávat do cementáren, kde je využíván jako korekční složka při přípravě surovinové moučky pro výrobu cementu. Tento vápenec má po namletí v závislosti na čistotě také využití v mnoha dalších průmyslových odvětvích – v zemědělství, úpravě vody, papírenském průmyslu, odsiřování atd. [4].

Pro velmi jemné mletí vápenců a mnoha dalších látek jsou využívány především kolíkové mlýny (Obr. 2). Tyto jsou tvořeny mezikružími z kolíků z vysokopevnostní oceli, které jsou upevněny na statické i rotační části mlýna. Mlýny jsou plněny do středu tohoto mezikruží a surovina je odstředivými silami, vyvozenými velkým počtem otáček rotační části hnána k okrajům mlýna. Po cestě

k okrajům je rozměňována mezi řadami kolíků, u kterých se vzdáleností od středu klesá jejich rozteč [10].



Obr. 2 Kolíkový mlýn [29]

## 3.2 Historie využití vápenců při přípravě omítek

### 3.2.1 Starověk

Mramoru a vápenců se ve starověku hojně užívalo především v antických kulturách řeckých a římských. Z těchto dob je nám cenným zdrojem informací spis Marca Vitruvia Polio Deset knih o architektuře, především kniha sedmá, ve které se zabývá prováděním starověkých omítek a jejich složením [1].

#### 3.2.1.1 Římské omítky

V Řecku i Římě se používalo mnohvrstevných omítek. Římští stavitelé jako pojiva využívali vápna vypáleného z velmi čistých vápenců. Hlavní plnivovou složkou malt byly písky kopané, až v případě nedostatku kopaného písku v okolí stavby se uchýlovali k používání písků říčních, ještě řidčeji potom mořských. Při potřebě hydraulických vlastností pojiva používali příměsi písku zpod Vesuvu, od městečka Puzzoli.

Římané nanášeli omítky jak na zdivo, tak na dřevěné bednění, falešné klenby a při vyztužení rákosem i na zdivo z nepálených cihel. Dle Vitruvia měla být

správná omítka provedená minimálně 7 vrstvami. První vrstvou byla podkladní vrstva z hrubé malty, do které se do lehce zavadlé nanasla omítka z jemného písku. Tato se nanasla ještě celkem dvakrát a vznikl tak podklad pro omítku s přídavkem mramorové moučky. Ta se nanášela také ve třech vrstvách, ve kterých se měnila granulometrie drceného mramoru. V první vrstvě byl použit drcený mramor nejhrubší a ve finální vrstvě naopak co nejjemnější. Do takto zhotovené, čerstvé omítky se poté mohla nanášet malba, která se s omítkou spojila a stala se velmi trvanlivou a stálou.

Postup výroby římské omítky s mramorovým prachem připomínal výrobu umělého mramoru o mnoho staletí později. Tyto omítky se vyznačovaly vysokými pevnostmi a dlouhou trvanlivostí, při malbě do čerstvé omítky i velkou barevnou stálostí a při dostatečné tloušťce mramorových vrstev i vysokým leskem [1, 11].

#### 3.2.1.2 Řecké omítky

Římské stavitelství vycházelo z velké části z řeckého a tudíž i postup výroby mramorové omítky je téměř totožný. Dle Vitruvia je zde hlavní rozdíl v době zpracování malty, kde Řekové maltu v truhlíku ještě dřevěnými sochory pečovali.

Dále se také zmiňuje, že omítky ze starých řeckých budov bývaly používány jako deskové obkladové prvky.

Pracnějším postupem Řekové pravděpodobně docílili jemnějšího podrcení kusového vápna a samozřejmě vzhledem k době míchání i větší homogenity [11].

#### **3.2.2 Středověk**

Z dob středověku bohužel nemáme tak kompletní a vyčerpávající zdroj jako bylo Vitruviových Deset knih o architektuře pro antiku. Avšak vzhledem k celkovému úpadku kultury po pádu Římské říše a stěhování národů nelze předpokládat tak velké rozšíření využití vápence v omítkách, omezeno nejspíš bude především na místní využití kameniv z obsahem vápenců. Pouze ve speciálních odvětvích stavebnictví, například ve štukatérství lze místy najít v použité sádrové maltě i stopy po mramorové moučce, avšak až do masovějšího rozšíření ozdobných prvků, především v dobách Baroka, libujícím si v honosných a početných ozdobách byla tato používána spíše výjimečně [1, 6].

### 3.2.3 Novověk

S nástupem renesance se kromě užití mramorové moučky ve štukatérství rozšířilo takzvané "Stucco lustro", které je věrnou kopií omítky popsané ve Vitruviových spisech. Stucco lustro je v podstatě freska, tedy malba nanášená do čerstvé omítky, která je při vysychání leštěna achátem, leštící špachtlí nebo speciální štukatérskou žehličkou. Rozšiřuje se také tzv. Marocký štuk, který je obdobou Stucca lustra s tím rozdílem, že místo křemičitých plniv jsou použita plniva jílová a nelze do něj provádět malbu, ale pouze jej plošně probarvovat. Rozšiřují se také mnohé další postupy užívající mramorovou moučku, například kletování ve vápně, používané jako podkladní vrstva pod malbu, kdy se obroušená, oprášená a provlhčená omítka hladí směsí řídké vápenné kaše s jemnou mramorovou moučkou [6].

### 3.2.4 Současnost

V současnosti jsou používány všechny výše zmiňované postupy, především Stucco lustro a marocký štuk (též zvaný tadeakt). I když jejich rozšíření je podstatně menší než v minulosti, větší využití je v restaurátorských pracích.

Nejvíce se jemně mletý vápenec používá pro přípravu suchých omítkových směsí, ve kterých slouží spolu s drceným vápencem jako plnivo. Proto se také výroby suchých maltových směsí staví v blízkosti vápenek a cementáren, případně přímo nahrazují výrobu ve vápence po vytěžení ložiska [6, 12].

## 3.3 Vliv kameniv na vlastnosti omítek

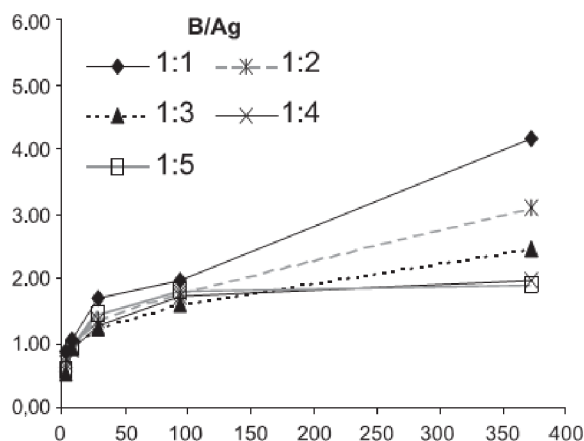
S nutností četných restaurátorských prací na historických budovách se začal rozvíjet i výzkum v použitelnosti a vhodnosti moderních druhů omítek na vyspravení těch historických. Jako nevhodné se ukázaly omítky cementové a vápenocementové. Tyto vykazují až příliš vysoké pevnosti, které jsou však v případě použití na historických stavbách, v kombinaci s historickými materiály spíše na škodu, protože na pohyby budovy, sedání, pohyby vlivem teplotních změn a podobně reagují odlišně od původních povětšinou vápenných omítek. Další nevýhodou použití omítek s cementovým pojivem je jejich vyšší difuzní uzavřenost, která znemožní budově pod takovouto omítkou dýchat, jak byla zvyklá

po několik předcházejících století, a může způsobit i závažné estetické a statické poruchy vzniklé vlivem kondenzace vlhkosti v konstrukci.

### 3.3.1 Vliv poměru pojivo/plnivo na pevnosti omítek

Při výzkumu použitelnosti vápenných omítek pro opravy historických staveb vyvstává mnoho otázek. Jednou z podstatnějších je jaký nevhodnější poměr pojiva k plnivu použít.

Názory na tuto problematiku se mírně liší. Cazalla a kol. doporučují pro nové omítky používané pro opravy stávajících konstrukcí poměr blízký se 1 : 4 objemově (jeden díl pojiva a čtyři díly plniva). Tuto volbu zdůvodňují vyšší tuhostí omítky a sníženým výskytem trhlin oproti omítkám připraveným v poměru 1 : 3. Naproti tomu Moropoulou a kol. uvádějí právě tento poměr jako nevhodnější pro obnovné práce. Tyto závěry oba kolektivy učinily na základě zkoumání poměrně malého množství vzorků a nelze z něj tedy vyvozovat jednoznačné závěry [13, 14] J. Lanás a J. I. Alvares se touto otázkou zabývali podrobněji. Připravili sady vzorků se čtyřmi různými poměry pro plnivo (1 : 1; 1 : 2; 1 : 3; 1 : 4 a 1 : 5), a sledovali vývoj pevností až po pevnosti po 365 dnech. Z jejich výsledků vyplývá, že čistě vzhledem k pevnostním charakteristikám je po dlouhé době zrání nevhodnější co nejvyšší obsah pojiva. V prvních devadesáti dnech je u všech směsí vývoj pevností podobný a i jejich hodnoty jsou si blízké. U vzorků s nejnižším obsahem plniva po 90 dnech došlo již téměř k úplné karbonataci a pevnosti už dále nerostou, naopak mohou i klesat. Oproti tomu pevnosti vzorků s vysokým obsahem pojiva po 365 dnech vzrostly a dalece předčily pevnosti vzorků s vyšším obsahem plniva. Tento dlouhodobý růst pevností vykazovaly vzorky s poměrem 1 : 3 a vyšším. Tento růst pevností je způsoben pomalým průběhem karbonatace, kdy u vzorků s poměrem 1 : 1 ani po 365 dnech není ještě zkarbonatovaných téměř 5 % portlanditu ( $\text{Ca(OH)}_2$ ). Růst pevností s rostoucím objemem pojiva je známý i u cementových malt. Avšak u těchto je to způsobeno nižší porozitou výsledných zatvrdlých malt, zatímco u vápenných malt s rostoucím objemem pojiva roste i porozita [15].



Obr.3 Vývoj pevností v tlaku v závislosti na čase a poměru pojiva a plniva u křemičitého kameniva [15]

### 3.3.2 Vliv fyzikálně – mechanických vlastností plniva na pevnosti omítek

Na vlastnosti omítek mají vliv fyzikálně mechanické vlastnosti plniva stejně tak jako jeho mineralogické složení. Mezi fyzikálně mechanické vlastnosti plniva počítáme jak jeho charakteristiky pevnostní, tak i tvar zrn a granulometrické složení směsi.

#### 3.3.2.1 Vliv tvarového indexu

Tvarovým indexem kameniva rozumíme poměr mezi jeho největším a nejmenším rozměrem. Tvarovým indexem u kameniva se zabýváme především u kameniv větších frakcí, kde u betonu ovlivňuje jeho reologické vlastnosti a zpracovatelnost.

U betonů je jako použitelný tvarový index považovaný 3, tedy poměr největšího rozměru k nejmenšímu 3 : 1. Na tvarový index má vliv především původ kameniva. Kamenivo těžené z vody nebo kopané má obecně lepší tvarový index než kamenivo drcené.

Omítky, malty a betony vyrobené z kameniva drceného, které mívá horší tvarový index a je ostrohranější, vykazují vyšší pevnosti v tahu za ohybu v důsledku zaklesnutí kostry kameniva do sebe. Oproti tomu zrna těženého kameniva jsou kulatá, omletá horninotvornými pochody a tím pádem mají i tvarový index blížíící se jedné [16].



### 3.3.2.2 Vliv granulometrického složení kameniva

Použitím kameniva nevhodné křivky zrnitosti dosáhneme u malt a především betonů mnohých výsledků. Při použití kameniva především hrubé frakce dostáváme betony mezerovité, jejichž soudržnost zajišťuje pouze malá kontaktní vrstva z cementového tmelu mezi jednotlivými zrny. Naopak při použití kameniva s velkým zastoupením velmi jemných podílů je třeba velké množství pojiva na obalení všech zrn kameniva. Příliš vysoké množství jemných frakcí kameniva, případně absence větších zrn může vést k nepřiměřeně velkému smrštění dané malty a jejímu poškození vlivem smršťování. Avšak správnou prací s obsahem jemných podílů lze díky minimalizaci obsahu vzduchových pórů v maltě, potažmo betonu, získat malty či betony velmi vysokých pevností [17].

Problémy s granulometrií mohou u malt a omítek nastat především při používání umělého kameniva, ve kterém například výrazně převládá frakce nad 1 mm, v takovémto případě dostáváme omítku podobnou mezerovitému betonu, s velmi špatnou zpracovatelností a možností nanášení.

### 3.3.2.3 Vliv pevností kameniva na vlastnosti omítek

S rostoucí pevností kameniva by měla samozřejmě při stejném poměru kameniva k pojivu stoupat i celková pevnost takové omítky. Ovšem při nevhodném použití pojiva, použití velkého množství vody a tak podobně lze i s velmi kvalitním kamenivem vytvořit maltu mizivých mechanických vlastností.

Vhodnou kombinací vysokopevnostního kameniva, kvalitního pojiva a vhodného množství jemných podílů lze vytvořit malty a betony velmi vysokých pevnostní, kterých by se pouze úpravou granulometrie docílit nedalo.

### **3.3.3 Vliv chemického složení kameniva na vlastnosti malt a omítek**

Jako nevhodné složky kameniva jsou považovány především sloučeniny síry (sulfidy i sírany), které nepříznivě ovlivňují především hydrataci cementu a následně v betonové konstrukci mohou způsobovat korozi výztuže a při nadměrném obsahu agresivních síranů může docházet až k rozpadu betonu.

Další nevhodnou složkou jsou chloridy, které obdobně jako sírany způsobují korozi výztuže.

Vhodnou složkou jsou především hydraulické oxidy (především amorfni  $\text{SiO}_2$ ). Tyto spolu s oxidy a hydroxidy vápenatými, obsaženými ve formě volného vápna případně vzniklé hydratačními reakcemi u cementových pojiv, případně přímo tvořícími hlavní pojivovou složku u vápenných malt, tvoří hydraulickou reakcí C-S-H fáze. Tohoto bylo hojně využíváno v antickém Římě, kde používali velmi čisté vápno a hydraulicity svých pojiv dosahovali pomocí vulkanických písků od vesničky Puzzoli [1, 11].

### **3.4 Vliv vápencového kameniva na vlastnosti omítek**

V literatuře je většinou jako ideální kamenivo do omítek označován křemičitý písek těžený z vody, případně praný a tím zbavený veškerých organických znečišťujících látek, jílu a odplavitelných podílů. Lze také používat kamenivo drcené a to jak vyráběné rozměňováním pískovců tak i drcením jiných hornin [1].

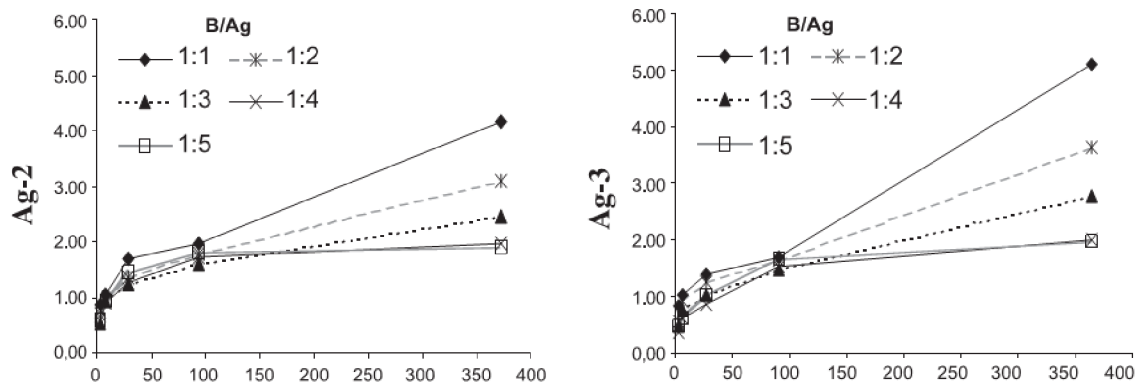
#### **3.4.1 Vliv přídavku mramorové moučky**

Přídavkem mramorové moučky můžeme korigovat zrnitostní křivku kameniva a tím ovlivnit vlastnosti výsledné malty a omítky pomocí granulometrie. Jejím přídavkem také dochází ke zvyšování pevnosti malt, pravděpodobně v důsledku vzniku krystalizačních center pro krystalizaci kalcitu, vznikajícího karbonatací hydroxidu vápenatého [18].

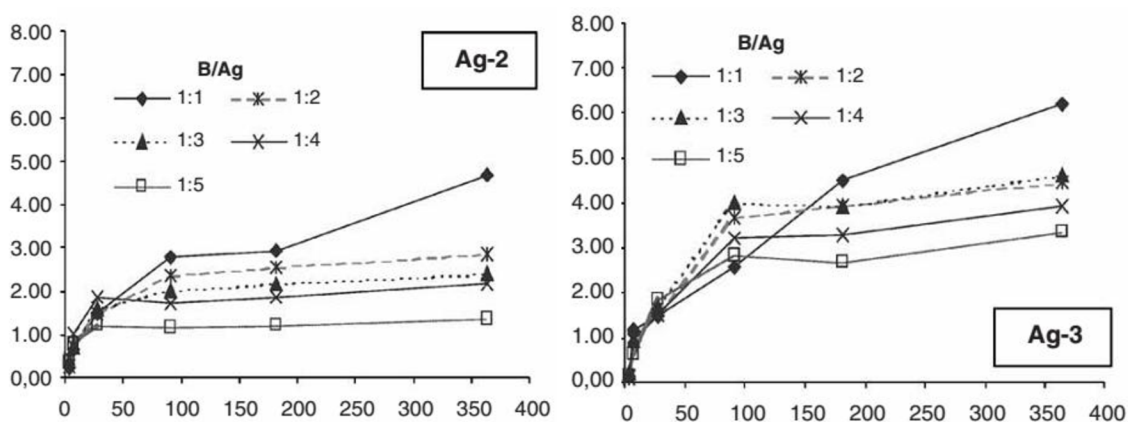
#### **3.4.2 Vliv použití vápencového kameniva**

J. I. Alvares v několika svých výzkumných pracích dokázal, že použití drceného vápencového kameniva zvyšuje výsledné pevnosti malt a omítek z vápna vzdušného i hydraulického.

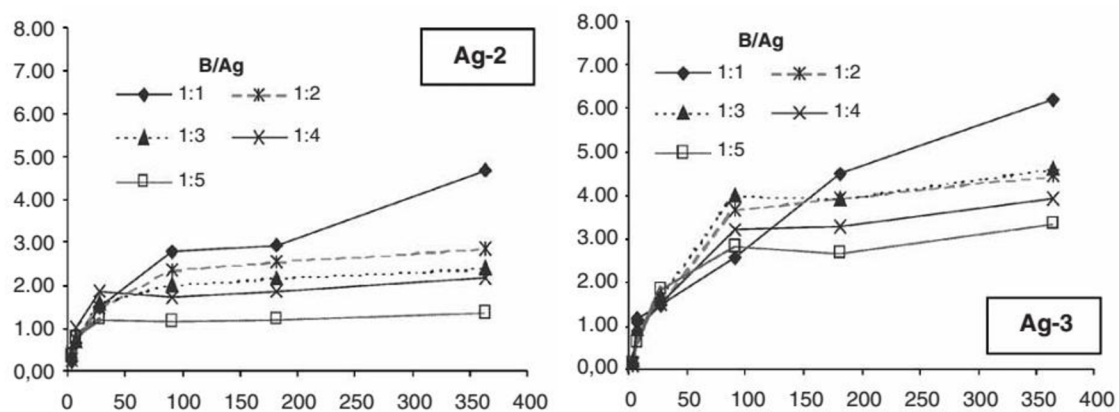
Použitím křemičitého kameniva s velmi nízkým obsahem amorfni fáze  $\text{SiO}_2$  (obsah pucolanických složek v kamenivu pod 10 %) eliminoval vliv hydraulických reakcí na výsledné pevnosti malt. Při vyhodnocování výsledků došel k závěru, že použití vápencového kameniva jednoznačně zlepšuje výsledné pevnosti omítek. Toto může být způsobeno podobností pojivové matrice u vápenné malty a struktury vápencového kameniva. V průběhu karbonatace kalcit obsažený v plnivu tvoří krystalizační jádra pro krystalizaci vznikajícího kalcitu z hydroxidu vápenatého a tím tuto reakci urychluje [15, 19, 20].



Obr. 4 Pevnosti v tlaku na vzorcích vzdušného vápna, ag-2 křemičité kamenivo, ag-3 kamenivo vápencové [15]



Obr. 5 Pevnosti v tlaku na vzorcích hydraulického vápna, ag-2 křemičité kamenivo, ag-3 kamenivo vápencové [19]



Obr. 6 Pevnosti v tlaku na vzorcích hydraulického vápna, ag-2 křemičité kamenivo, ag-3 kamenivo vápencové [20]

Z výše uvedených grafů z prací J. I. Alváreze a J. Lanase je patrný rozdíl mezi vlastnostmi vzorků připravených z vápencového kameniva (Ag-3) a z kameniva

křemičitého (Ag-2). Tento rozdíl je pozorovatelný u všech druhů pojiv, tedy jak u vzorků vyrobených z vápna vzdušného, hydraulického tak i dolomitického. V těchto grafech je vynesena průběh pevností v tlaku v závislosti na době zrání a to pro 5 různých poměrů pojiva (B) a plniva (Ag).

Největší rozdíl pozorujeme u devadesátidenních pevností a to výrazněji u vzorků z přirozeně hydraulického vápna (NHL) a dolomitického vápna (DL). Kdy u vzorků s křemičitým plnivem mají nejvyšší pevnosti vzorky s nejvyšším obsahem pojiva a s klesajícím obsahem pojiva úměrně klesají i pevnosti vzorků. Oproti tomu o kameniva vápencového má vzorek s největším množstvím plniva pevnosti nejnižší a naopak nejlepší má směs s poměrem pojiva k plnivu 1 : 3. Až po 180 dnech zrání se u těchto vzorků dostává do popředí malta s poměrem 1 : 1 avšak i nadále se jako druhá nejlepší ukazuje malta 1 : 3, byť je již touto dobou téměř nastejno s maltou 1 : 2, která po 365 dnech vykazuje nepatrně větší pevnosti.

Z těchto výsledků lze vyvozovat, že použitím vápencového kameniva, lze dosáhnout u omítek na bázi vápna, a to ať běžného vzdušného, dolomitického nebo přirozeně hydraulického, zvýšení konečných pevností těchto omítek při zachování všech ostatních vstupních surovin nezměněných.

## 4. Vytvrzování vápenných malt a omítek

Proces vytvrzování vápenných malt a omítek je časově náročný proces sestávající z několika dílčích, navzájem se prolínajících pochodů. V prvotní fázi se jedná o vysychání směsi, při kterém ještě neprobíhají žádné významné chemické reakce, a nastává největší smrštění vlivem úniku nadbytečné vody z malty. Na tuto fázi navazuje nejpodstatnější a nejdelší fáze karbonatace, která probíhá v omítkách a maltách dlouhodobě a není zcela dokončená ani po několika letech.

### 4.1 Vysychání malt a omítek

Maltové a omítkové směsi obsahují velké množství nadbytečné vody především z důvodu dosažení vhodné konzistence pro zpracování malty. Tato voda v prvotní fázi obaluje zrna pojiva a znemožňuje přístupu vzduchu k nim. Postupným vysycháním vody a jejím odsátím do pórové struktury kameniva vznikají gelové struktury hydroxidu vápenatého, které následně vysychají a vážou na sebe plynný oxid uhličitý ( $\text{CO}_2$ ) ze vzduchu a tím karbonatují [21].

### 4.2 Karbonatace

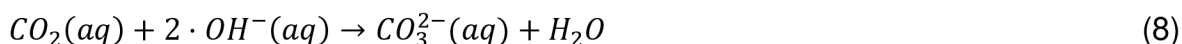
Karbonatací se obecně rozumí reakce hydroxidu s oxidem uhličitým za vzniku uhličitanu (dříve karbonátu, odtud název karbonatace). Ve stavebnictví se tento název používá především pro reakci hydroxidu vápenatého ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) za vzniku uhličitanu vápenatého ( $\text{CaCO}_3$ ). Tato reakce probíhá jak při vytvrzování vápenných malt, kde je hlavním pochodem způsobujícím jejich vytvrzování tak i v maltách a betonech s cementovým pojivem, kde naopak působí negativně, protože snižuje schopnost betonu chránit kovovou výztuž před korozi takzvanou pasivací výztuže způsobenou vysokým pH.

Nezákladnějším vyjádřením karbonatace je následující rovnice:



Tuto rovnici lze rozdělit na několik dalších, dílčích rovnic zahrnujících přechody jednotlivých molekul do různých skupenství a jejich následnou vzájemnou reakci, jedná se o disociaci  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ve vodě (6), rozpouštění oxidu

uhličitého a jeho reakce s hydroxidovými anionty za vzniku aniontů uhličitanových (7), (8), a jejich následná reakce s vápenatými kationty (9).



Vzhledem k tomu, že rozpustnost  $\text{CaCO}_3$  je mnohem nižší než rozpustnost  $\text{Ca(OH)}_2$  dochází při krystalizaci  $\text{CaCO}_3$  z roztoku k dalšímu rozpouštění  $\text{Ca(OH)}_2$ , díky čemuž tato reakce probíhá až do úplného vyčerpání  $\text{Ca(OH)}_2$  [22, 24].

#### 4.2.1 Vliv prostředí na průběh karbonatace

Rychlost karbonatace ovlivňuje mnoho vnějších činitelů. Mezi hlavní patří obsah  $\text{CO}_2$  ve vzduchu, relativní vlhkost prostředí a jeho teplota.

##### 4.2.1.1 Vliv relativní vlhkosti prostředí na průběh karbonatace

Z výše uvedených rovnic vyplývá, že karbonatace probíhá s většinou reaktantů rozpuštěných ve vodném prostředí, a proto lze předpokládat, že při naprosté absenci vody nebude tato reakce probíhat.

Rychlost karbonatace se tedy s rostoucí relativní rychlostí zvyšuje, aby při relativních vlhkostech kolem 100 % opět prudce klesla. Při nízké relativní vlhkosti probíhá velmi rychle difuze plynného  $\text{CO}_2$  do vnitřního prostředí maltoviny, avšak kvůli absenci vody ve struktuře nemůže probíhat samotná karbonatace, protože nedojde k rozpouštění  $\text{Ca(OH)}_2$ . Relativní vlhkost, pod kterou karbonatace neprobíhá je uváděna 8 %. Naopak při velmi vysoké relativní vlhkosti jsou póry téměř zaplněny vodou, a může se tedy hojně rozpouštět  $\text{Ca(OH)}_2$  avšak rychlost difuze  $\text{CO}_2$  vodním prostředím je nižší, protože binární koeficient difuze je  $10^4 - 10^5$  krát nižší. Konkrétní hodnota relativní vlhkosti vzduchu, pro kterou probíhá karbonatace nejrychleji je udávána různými autory různá v rozmezí 50 % – 93 % relativní vlhkosti [23, 24].

#### 4.2.1.2 Vliv teploty na průběh karbonatace

Teplota je obecně parametr, který urychluje průběh chemických reakcí. Oba členy karbonatace mají závislost rozpustnosti ve vodě na teplotě nepřímou, tedy s rostoucí teplotou klesá rozpustnost jak  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  tak  $\text{CO}_2$ . I přesto ale urychlení reakce vlivem teploty převáží sníženou rozpustnost reaktantů a s rostoucí teplotou roste i rychlost karbonatace. Tento vzájemně protichůdný postup však způsobuje v porovnání s vlivem relativní vlhkosti jenom malé ovlivnění rychlosti [24].

#### 4.2.1.3 Vliv koncentrace $\text{CO}_2$ na průběh karbonatace

Koncentrace  $\text{CO}_2$  jako jednoho z hlavních reaktantů ovlivňuje rychlost karbonatační reakce pozitivně. Vzhledem k nízké koncentraci  $\text{CO}_2$  ve vzduchu (průměrně 0,038 % obj. tj. cca  $700 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ), je jedním z hlavních příčin nízké rychlosti karbonatace právě nedostatek  $\text{CO}_2$ . G. Cultone ve své práci zjistil, že zvýšením koncentrace  $\text{CO}_2$  na cca 0,625 % obj. lze dosáhnout přibližně 90 % karbonatace již během osmi dní.

Při karbonataci za zvýšeného obsahu  $\text{CO}_2$  ve vzduchu je v jeho pokusech 90 % hmotnostních  $\text{CaCO}_3$  krajní hodnota a po jejím překonání rapidně klesá rychlost karbonatace. Toto může být způsobeno odpařením vody v maltě v důsledku vývinu tepla při karbonataci, které se při vysoké rychlosti nedaří odvádět [25].

### 4.2.2 **Sledování karbonatace**

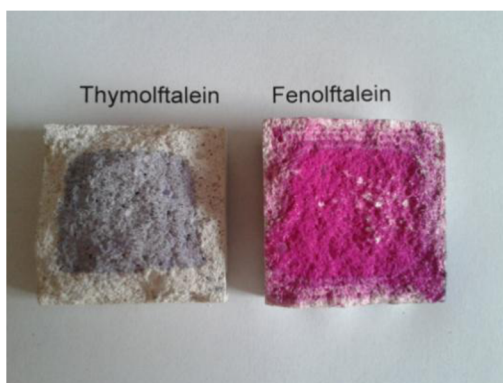
Průběh karbonatace  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ve stavebních pojivech lze sledovat pomocí chemických i fyzikálních metod. Mezi nejběžnější metody patří sledování pH vzorku pomocí roztoku fenolftaleinu nebo thymolftaleinu, sacharátová metoda nebo též Rentgenová difrakční analýza (XRD).

#### 4.2.2.1 Sledování karbonatace pomocí acidobazických indikátorů

Jak vyplývá z rovnic uvedených v kapitole 4.2 do karbonatační reakce vstupuje hydroxid vápenatý ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), z chemického hlediska silná zásada (pH nasyceného roztoku při  $20^\circ\text{C}$  je 12,45), z reakce vystupuje uhličitan vápenatý ( $\text{CaCO}_3$ ), který je ve vodě téměř nerozpustný a nemá tedy vliv na její pH.

Toho se využívá při zkouškách karbonatace. Vzorek se seřízne a na jeho průřezovou plochu se nanese roztok indikátoru. Části vzorku, které nejsou zkarbonatovány vykazují vysoké pH způsobené přítomností  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .

Jako indikátorů se při této zkoušce využívá zředěného roztoku fenolftaleinu případně thymolftaleinu (Obr. 7). Oba patří do skupiny ftaleinů a z čirého zbarvení v kyselé části pH přechází do barevného v zásaditém prostředí. Fenolftalein přechází do červené při pH mezi 8,0 a 9,8. Thymolftalein přechází do modré při pH mezi 9,3 a 10,5. Z tohoto je zřejmé, že při zkoušení thymolftaleinem budou vzorky vykazovat větší stupeň karbonatace než u fenolftaleinu vzhledem k vyššímu pH při přechodu, kde částečně zkarbonatované vzorky se u fenolftaleinu zbarví ještě slabě červeně.



Obr. 7 Zkouška karbonatace na vzorcích slabě zkarbonatované vápenné malty pomocí acidobazických indikátorů

#### 4.2.2.2 Sacharátová metoda

Sacharátovou metodou se určuje zbytkový obsah  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ve výluhu vzorku titračním způsobem.

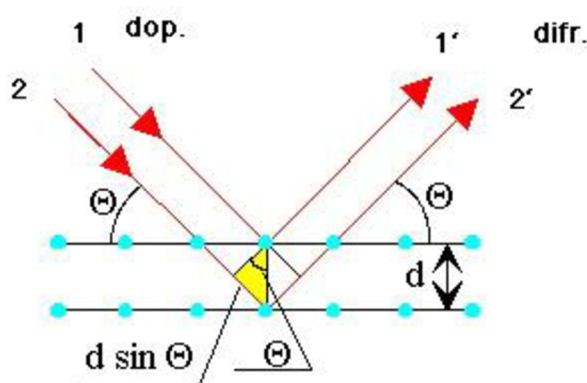
Části vzorků se namelou a zalijí převařenou destilovanou vodou. Nechají se dvě hodiny na třepačce louhovat. Následně se roztok zfiltruje a napipetuje do titračních baněk, kde se k němu přidá sacharosa. Tento roztok se titruje  $\text{HCl}$  (kyselina chlorovodíková) na fenolftalein do ztráty zbarvení. Při titraci probíhá neutralizace kyseliny chlorovodíkové s hydroxidem vápenatým dle rovnice (10). Z množství odtitrované  $\text{HCl}$  se vypočítá obsah zbytkového  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ve vzorku.





#### 4.2.2.3 Zjišťování pomocí Rentgenové difrakční analýzy (XRD)

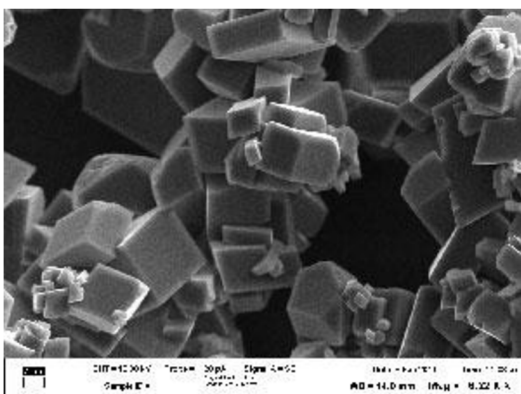
Rentgenovou difrakční analýzou (XRD) se stanovují mezimřížkové vzdálenosti v jednotlivých krystalech minerálů. Kombinace několika mezimřížkových vzdáleností je pro každý minerál typická a lze touto metodou tedy zjistit mineralogické složení vzorku. XRD je založena na Braggově rovnici, ve které vystupuje úhel dopadu  $\Theta$ , mezimřížková vzdálenost  $d$  a vlnová délka záření  $\lambda$  (11) a na měření intenzity odraženého záření.



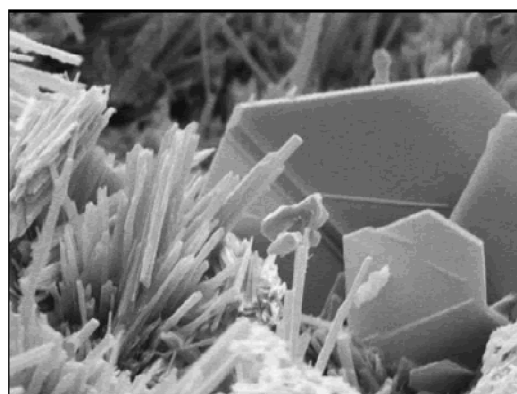
Obr. 8 Princip skládání záření s dopadovým úhlem  $\Theta$  a mezimřížkovou vzdáleností  $d$  [26]

$$2d \cdot \sin\theta = n \cdot \lambda \quad (11)$$

V pojivu vápenných malt se nachází krystalický  $\text{CaCO}_3$  především ve formě kalcitu (Obr. 9), který krystalizuje v soustavě klencové. Méně často i ve formě aragonitu, který se postupně přeměňuje na kalcit. Krystalická fáze  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  se nazývá portlandit a krystalizuje v soustavě šesterečné (Obr. 10). Sledováním přítomnosti portlanditu a kalcitu ve vzorcích pomocí elektronové mikroskopie lze pozorovat průběh karbonatace vápenných malt a omítek.



Obr. 9 Krystaly kalcitu [27]



Obr. 10 Krystal portlanditu mezi vlákny ettringitu [28]

## 5. Praktická část

Cílem praktické části je ověřit vliv náhrady části křemičitého plniva jemně mletým vápencem o různé granulometrii na vlastnosti vápenných omítek. Sledovanými vlastnostmi jsou objemová hmotnost, pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku, kapilární vztlakovost a s její pomocí vypočtený průměrný součinitel vlhkostní vodivosti.

### 5.1 Použité suroviny

Pro výrobu vzorků vápenných omítek byl použit vápenný hydrát CL 90 od firmy Carmeuse s. r. o., směs omítkových písků o různé granulometrii PG I (< 0,5 mm), a PG II (0,5–1 mm), jemně mleté velmi čisté vápence firmy Omya CZ s. r. o., kde číslo v označení vápence značí průměrnou velikost částic v  $\mu\text{m}$  a srážený vápenec pro chemické účely. Jako záměsová voda byla použita pitná voda z vodovodního řadu.

Tab. 1 Složení jemně mletého vápence

	CaCO <sub>3</sub> + MgCO <sub>3</sub>	z toho MgCO <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	nerozpustný zbytek v HCl	MnO	SO <sub>3</sub>
2VA	min. 98,5 %	max. 0,8 %	max. 0,8 %	max. 0,4 %	max. 0,1 %	max. 1,5%	max. 0,01 %	max. 0,05 %

### 5.2 Příprava vzorků

Z daných surovin byly připraveny směsi s hmotnostním poměrem pojiva k plnivu 1 : 4 a kromě referenčních vzorků s náhradou 18,75 % (75 g vápence ke 100 g pojiva) písku jemně mletým vápencem. Uvedený poměr jemně mletého vápence k pojivu byl použit s ohledem na výsledky získané v dřívějším výzkumu, kde se s přihlédnutím k získaným pevnostem jevil jako nejvhodnější. Množství záměsové vody bylo stanoveno pomocí střešovacího stolku dle ČSN EN 1015 pro rozlití vápenné kaše 160 mm.

Od každé z těchto směsí bylo připraveno 12 trámečků o rozměrech 40 × 40 × 160 mm. Tyto byly po 3 dnech odformovány a uloženy za volného

přístupu vzduchu v laboratoři. Po 7, 14, 28 a 90 dnech byly vždy tři vzorky odebrány, změřeny, zváženy a stanoveny na nich pevnosti.

Tab. 2 Receptury jednotlivých vzorků a stanovení vodního součinitele w/p

vzorek	Ca(OH) <sub>2</sub>	Písek PG I	Písek PG II	vápenec	voda	rozliv	w
	[g]	[g]	[g]	[g]	[ml]	[mm]	[-]
REF	100,0	200,0	200,0	0,0	110	160	1,10
0 – 0,2 VA	100,0	162,5	162,5	75,0	115	160	1,15
2 VA	100,0	162,5	162,5	75,0	116	160	1,16
5 VA	100,0	162,5	162,5	75,0	116	160	1,16
15 VA	100,0	162,5	162,5	75,0	116	160	1,16
40 VA	100,0	162,5	162,5	75,0	116	160	1,16
sr.CaCO <sub>3</sub>	100,0	162,5	162,5	75,0	120	160	1,20

## 5.3 Prováděné zkoušky na zatvrdlých maltách

### 5.3.1 Stanovení objemové hmotnosti

Objemová hmotnost vzorků byla stanovena pouze měřením a vážením a to z hodnot změřených před zkouškami pevností. Objemová hmotnost byla vypočtena dle rovnice (12)

$$\rho_c = \frac{m}{l \cdot b \cdot h} [kg \cdot m^{-3}] \quad (12)$$

kde

m ..... hmotnost tělesa [kg]

l, b, h ..... rozměry tělesa [m]

### 5.3.2 Stanovení pevnosti v tahu za ohybu dle ČSN EN 1015

Stanovení pevnosti v tahu za ohybu bylo na zatvrdlých maltách prováděno pomocí trojbodového ohybu. Pevnost v tahu za ohybu byla vypočítána pomocí rovnice (13):

$$R_f = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot b \cdot h^2} [MPa] \quad (13)$$

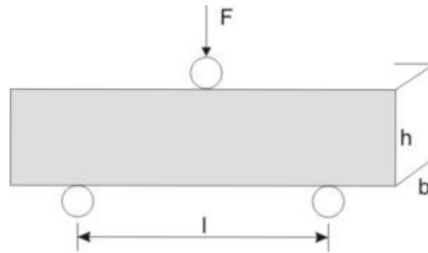
Kde:

F ..... síla při porušení [N]

l ..... vzdálenost podpor [mm]

b ..... šířka zatěžovaného tělesa [mm]

h ..... výška zatěžovaného tělesa [mm]



Obr. 11 Schéma zatěžování při zkoušce pevnosti v tahu za ohybu [27]

### 5.3.3 Zkouška pevnosti v tlaku

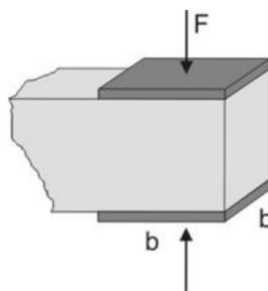
Stanovení pevnosti v tlaku bylo na zatvrdlých maltách prováděno dle ČSN EN 1015 na zlomcích ze zkoušky pevnosti v tahu za ohybu. Pevnost v tlaku byla vypočítána pomocí rovnice (14):

$$R_c = \frac{F_c}{A} \text{ [MPa]} \quad (14)$$

Kde:

F<sub>c</sub>..... síla při porušení [N]

A..... tlačná plocha na vzorku (počítáno s plochou přípravku 1600 mm<sup>2</sup>)



Obr. 12 Schéma zatěžování při zkoušce pevnosti v tlaku [27]

### 5.3.4 Stanovení průměrného součinitele vlhkostní vodivosti

Aparatura pro stanovení součinitele vlhkostní vodivosti sestává z nádoby na vodu, nad níž je na kovové konstrukci zavěšený na automatickou digitální váhu vzorek s parotěsně a vodotěsně odizolovanými bočními stěnami. Dolní čelo vzorku se ponoří 1 – 2 mm pod hladinu v nádobě. Automatické váhy připojené k počítači pomocí programu vytvořeného speciálně pro toto měření zaznamenávají časový průběh navlhání vzorku.

Z naměřených hodnot se sestrojí závislost kumulativního obsahu vlhkosti (na jednotku plochy)  $I$  na odmocnině z času  $t$ , ze které se pomocí lineární závislosti těchto veličin přímo určí vlhkostní absorpční koeficient  $A$  [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-0.5}$ ] podle vztahu (15):

$$A = \frac{I}{t^{0.5}} [\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \text{s}^{-0.5}] \quad (15)$$

Průměrnou hodnotu součinitele vlhkostní vodivosti  $\kappa$  [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ] lze vypočítat pomocí rovnice:

$$\kappa \approx \left(\frac{A}{w_c}\right)^2 [\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (16)$$

kde  $A$  je vlhkostní absorpční koeficient [ $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-0.5}$ ],  $w_c$  je obsah nasycené vlhkosti ( $\text{kg m}^{-3}$ ).



Obr. 13 Aparatura pro stanovení průměrného součinitele vlhkostní vodivosti

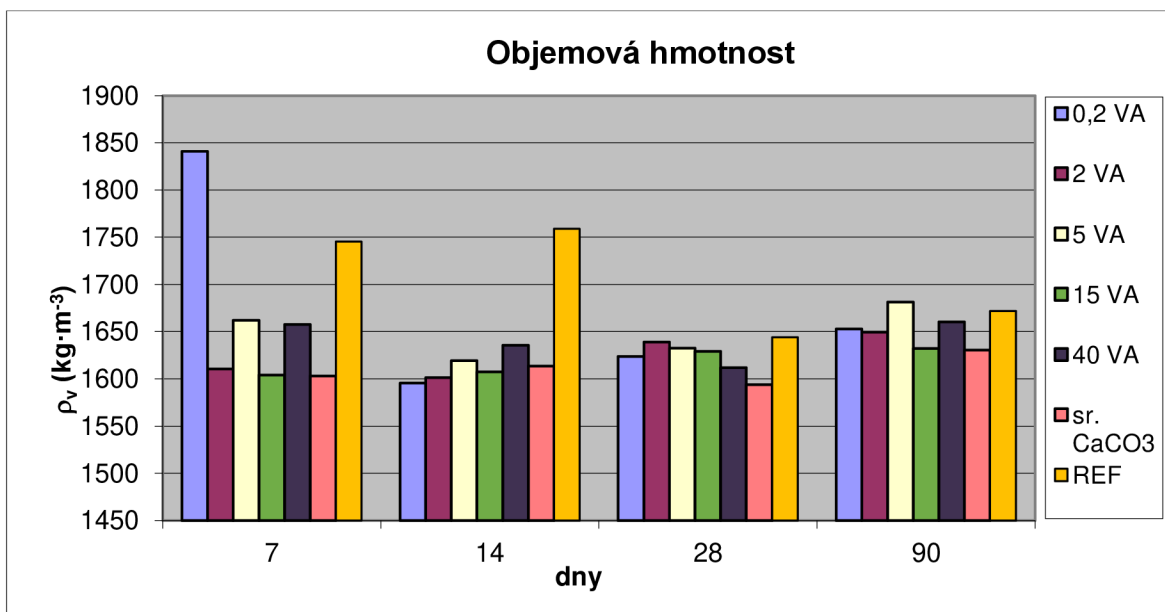
## 5.4 Výsledky a diskuze

Tab. 3 a 4 Průměrné objemové hmotnosti a pevnosti po 7 a 14 dnech zrání

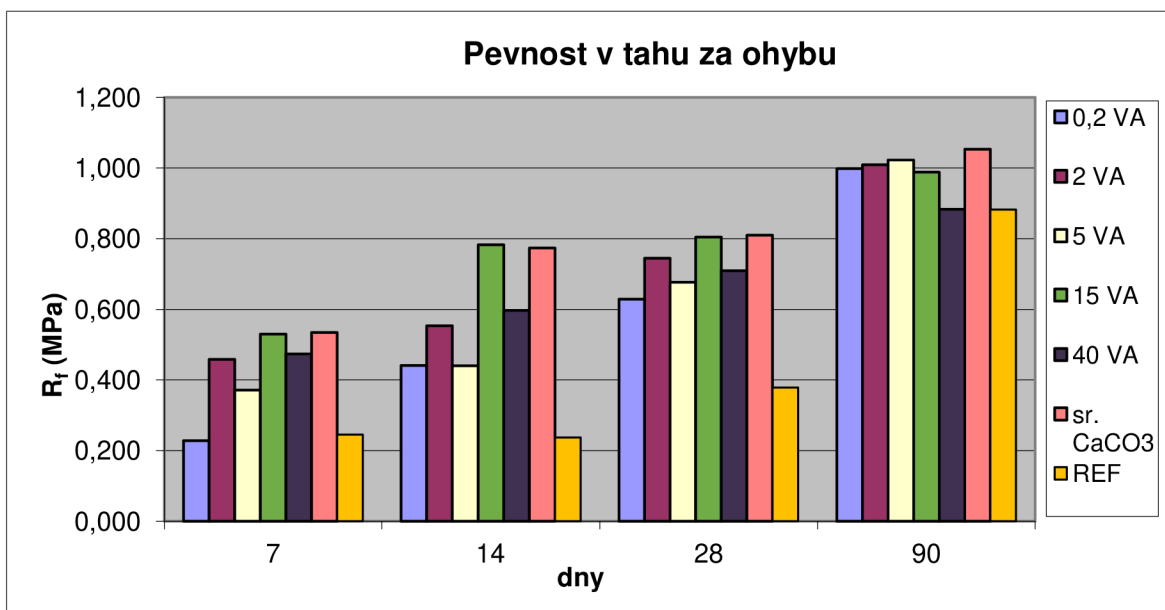
7 dní		$R_f$ [MPa]	$R_c$ [MPa]	14 dní		$R_f$ [MPa]	$R_c$ [MPa]
vzorek	obj. hmotnost [kg·m <sup>-3</sup> ]			vzorek	obj. hmotnost [kg·m <sup>-3</sup> ]		
REF	1745	0,245	0,769	REF	1759	0,238	0,771
0–0,2 VA	1841	0,228	0,633	0–0,2 VA	1596	0,441	0,911
2 VA	1610	0,459	0,890	2 VA	1601	0,553	1,238
5 VA	1662	0,371	0,934	5 VA	1619	0,441	1,117
15 VA	1604	0,530	0,763	15 VA	1607	0,783	1,113
40 VA	1658	0,473	0,780	40 VA	1635	0,597	1,167
sr. CaCO <sub>3</sub>	1603	0,534	1,064	sr. CaCO <sub>3</sub>	1614	0,774	1,559

Tab. 5 a 6 Průměrné objemové hmotnosti a pevnosti po 28 a 90 dnech zrání

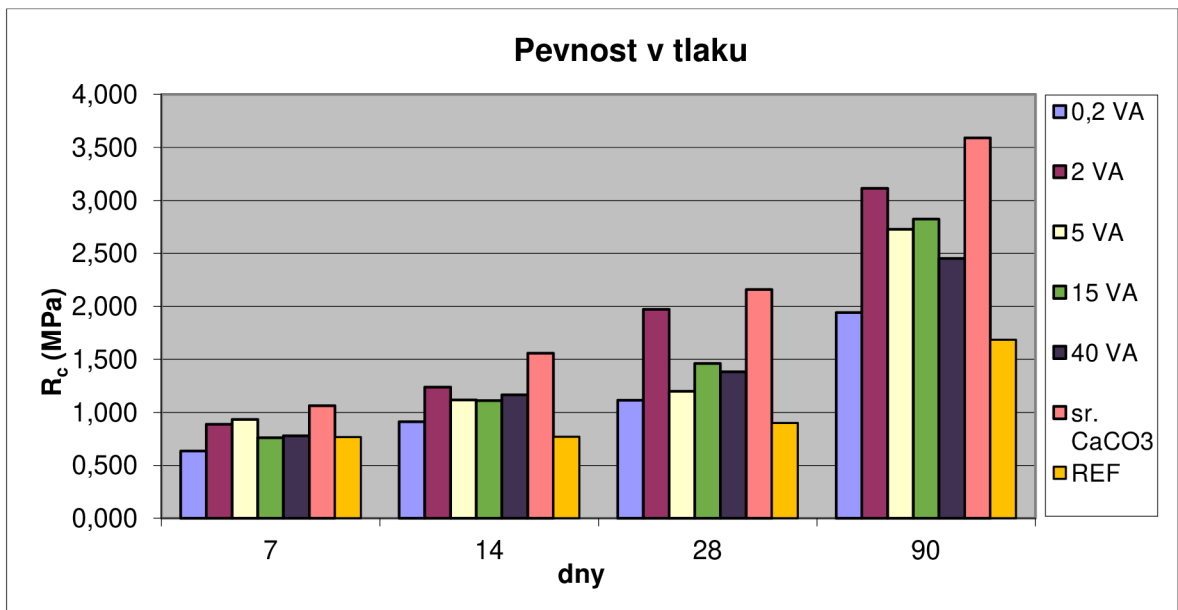
28 dní		$R_f$ [MPa]	$R_c$ [MPa]	90 dní		$R_f$ [MPa]	$R_c$ [MPa]
vzorek	obj. hmotnost [kg·m <sup>-3</sup> ]			vzorek	obj. hmotnost [kg·m <sup>-3</sup> ]		
REF	1644	0,379	0,901	REF	1672	0,882	1,686
0–0,2 VA	1624	0,629	1,115	0–0,2 VA	1653	0,999	1,941
2 VA	1639	0,745	1,973	2 VA	1650	1,009	3,114
5 VA	1633	0,677	1,201	5 VA	1681	1,023	2,728
15 VA	1629	0,805	1,461	15 VA	1632	0,988	2,825
40 VA	1612	0,709	1,382	40 VA	1660	0,883	2,451
sr. CaCO <sub>3</sub>	1594	0,810	2,158	sr. CaCO <sub>3</sub>	1631	1,053	3,590



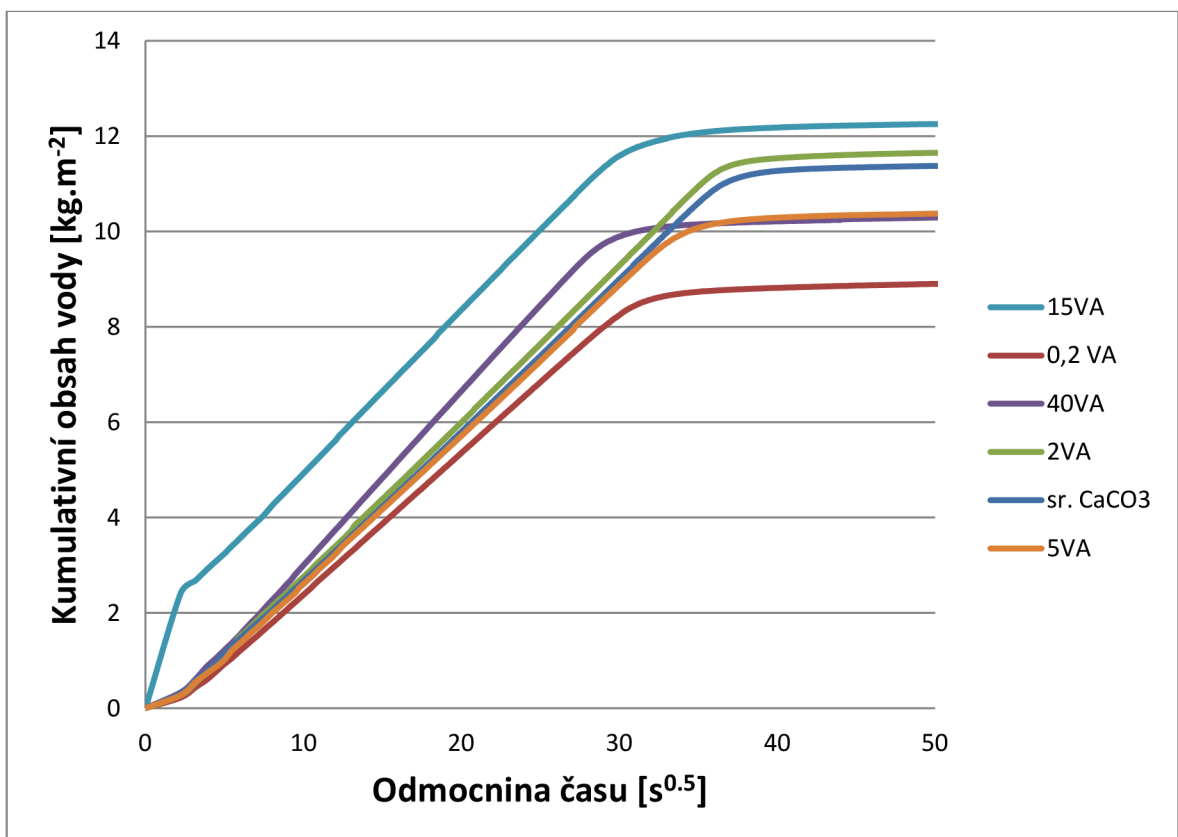
Obr. 14. Porovnání objemových hmotností



Obr. 15 Porovnání pevností v tahu za ohybu



Obr. 16 Porovnání pevností v tlaku



Obr. 17 Průběh kumulativního obsahu vody



Tab. 7 Výpočet průměrného součinitele vlhkostní vodivosti

vzorek	w [kg·m <sup>-3</sup> ]	l určeno z grafu [kg·m <sup>-2</sup> ]	t určeno z grafu [s <sup>-0.5</sup> ]	A [kg·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-0.5</sup> ]	κ [m <sup>2</sup> ·s <sup>-1</sup> ]
0,2 VA	249,96009	8,201149	29,89280	0,274351984	1,20×10 <sup>-6</sup>
2VA	294,88079	11,084150	35,49648	0,312260540	1,12×10 <sup>-6</sup>
5VA	290,25765	9,126080	30,82207	0,296089134	1,04×10 <sup>-6</sup>
15VA	352,04082	9,897320	24,59674	0,402383405	1,31×10 <sup>-6</sup>
40VA	296,38752	9,561780	28,28427	0,338059989	1,30×10 <sup>-6</sup>
sr. CaCO <sub>3</sub>	308,94531	10,370370	34,27827	0,302534813	9,59×10 <sup>-7</sup>

Z obrázku č. 14 je patrné, že přídavek jemně mletého vápence se projevil snížením objemové hmotnosti vzorků po 7 a 14 dnech zrání. Rozdíly v poklesu u jednotlivých granulometrií jsou velmi malé a lze tedy konstatovat, že průměrná velikost částic vápence nemá na tento pokles vliv. Vyšší objemová hmotnost referenčních vzorků a vzorků s nejjemnějším průmyslově vyráběným vápencem je způsobena pravděpodobně větším množstvím zadržené vody ve vzorku. S postupujícím časem se rozdíly mezi vzorky smazávají a je možné sledovat postupný nárůst objemových hmotností vlivem postupující karbonatace. Závěrem lze konstatovat, že při největším rozdílu objemových hmotností 50 kg·m<sup>-3</sup> po 90 dnech zrání nelze pozorovat žádný vliv přídavku jemně mletého vápence na objemové hmotnosti omítek.

Z obrázku č. 15 znázorňujícího vývin pevností v tahu za ohybu lze pozorovat výrazně vyšší krátkodobé pevnosti (7, 14 a 28 dní) u všech vzorků omítek s přídavkem vápence v porovnání s omítkou referenční. Tento rozdíl se po 90 dnech částečně snižuje, přesto však je nárůst pevnosti u sráženého vápence oproti referenčnímu vzorku téměř 20 %. Vyšší růst pevnosti u vzorků s vápencem je způsoben jeho pozitivním vlivem na rychlost karbonatace. Nejvíce pevnosti ovlivnil přídavek vápence sráženého. Z průmyslově vyráběných

vápenců má nejlepší vliv na dlouhodobé pevnosti vápenec s průměrnou velikostí částic 5  $\mu\text{m}$ . Po 90 dnech zrání vykazovaly vzorky s větší i menší velikostí částic vápenec nepatrně nižší pevnosti. Vápenec s průměrnou velikostí částic 15  $\mu\text{m}$  ovlivňuje výrazně pevnosti krátkodobé.

Z obrázku č. 16 znázorňujícího vývin pevností v tlaku je možné pozorovat podobný vývin jako u pevností v tahu za ohybu, byť zde se rozdíl s postupem času zvětšuje. Stejně jako u pevnosti v tahu za ohybu i zde nejvíce ovlivnil pevnosti vápenec srážený. Z průmyslově vyráběných vápenců pevnosti v tlaku nejvíce ovlivnil vápenec s průměrnou velikostí částic 2  $\mu\text{m}$ . Vápenec s průměrnou velikostí částic 5  $\mu\text{m}$ , který nejvíce ovlivňoval pevnosti v tahu za ohybu, vykazoval o 13 % horší pevnosti v tlaku než vápenec 2 VA.

Z podobného tvaru křivek většiny vzorků v grafu na obrázku č. 17 je patrné, že budou tyto vzorky dosahovat i velmi podobných hodnot průměrného součinitele vlhkostní vodivosti  $\kappa$ . Toto je patrné i v tabulce č. 7, kde jsou vypočítány jeho hodnoty. Nejlepší průměrný součinitel vlhkostní vodivosti měl opět vápenec srážený, z průmyslových vápenců vápenec 5 VA. Tento součinitel úzce souvisí s porozitou daného materiálu a lze tedy předpokládat, že vzorky ze sráženého vápenec měly nejvhodnější rozložení pórů, případně tyto póry vyplněny jemnými částicemi vápenec.

Výsledky těchto zkoušek potvrdily předpoklady z teoretické části práce o pozitivním vlivu přídavku vápenec do vápenných omítek. Jako nejvhodnější se při tomto použití, tedy částečné náhradě plniva jemně mletým vápencem, jeví vápenec srážený. Z průmyslově vyráběných vápenců jsou to pak vápenec 2 VA a 5 VA s průměrnou velikostí částic do 2 resp. 5  $\mu\text{m}$ , které byly v popředí při všech sledovaných zkouškách především po 90 dnech zrání.

## 6. Závěr

V bakalářské práci věnované omítkám s přídavkem vápence je v teoretické části zpracováno základní rozdělení omítek s následným zaměřením na omítky vápenné. Bylo zmapováno použití cíleného přídavku vápence do malt a omítek od starověkého Říma až po současnost. Vliv přídavku vápence byl sledován především z hlediska vývinu pevností vápenných omítek. Všichni autoři zabývající se touto problematikou se shodují, že použití vápence jako plniva do vápenných malt a omítek zvyšuje jejich pevnosti.

V části zabývající se karbonatací je podrobněji popsána tato chemická reakce a popsán pozitivní vliv teploty, vhodné relativní vlhkosti vzduchu a koncentrace  $\text{CO}_2$  v atmosféře na její rychlost. Dále zde jsou uvedeny metody používané pro zjištění stupně karbonatace vzorků a to jak jednoduché chemické, tak i náročnější přístrojové.

Cílem praktické části bylo ověřit předpoklady z části teoretické, tedy především vliv náhrady části kameniva vápencem a také zhodnotit vliv velikosti zrn vápencového kameniva na tyto vlastnosti. Sledovanými vlastnostmi byly především pevnosti v tlaku a tahu za ohybu. V praktické části byl potvrzen předpoklad z kapitoly 3.4.2 – nárůst pevností po náhradě části kameniva vápencem. Nejvhodnějším vápencem pro toto použití se ukázal být vápenec připravený chemickou cestou – srážený, a to především díky jeho amorfnímu charakteru. Z komerčních mletých vápenců se jeví jako nejvhodnější vápence 2 VA a 5 VA, s průměrnou velikostí částic do 2 resp. 5  $\mu\text{m}$ .

## 7. Seznamy

### 7.1 Seznam použité literatury

- [1] CHROUST, František, KVASNIČKA, I. a KVASNIČKOVÁ, R. *Omítky*. 2. upr. vyd. Praha: SNTL, 1959, 189 s. Odborné příručky pro stavebnictví
- [2] ROVNANÍKOVÁ, Pavla. *Omítky: chemické a technologické vlastnosti*. Vyd. 1. Praha: Společnost pro technologie ochrany památek - Stop, 2002, 89 s. ISBN 8086657000.
- [3] SVOBODA, Luboš. *Stavební hmoty* [online]. 3. vydání. Praha: Jaga, 2013, 950 s. [cit. 15.2.2015]. ISBN 978-80-260-4972-2. Dostupné z: <http://people.fsv.cvut.cz/~svobodal/sh/>
- [4] FRIDRICHOVÁ, Marcela et al. *BJ 16 Maltoviny: Modul M02*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2014, 140 s. ISBN 978-80-214-4973-2
- [5] ČSN EN 459 *Stavební vápno*, Praha: Český normalizační institut, 2011.
- [6] LOSOS, Ludvík a GAVENDA, M. *Štukatéřství*. 1. vyd. Praha: Grada, 2010, 181 s. Řemesla, tradice, technika. ISBN 978-80-247-2175-0
- [7] ČSN 73 0540 *Tepelná ochrana budov*, Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [8] ČSN EN 1008 *Záměsová voda do betonu - Specifikace pro odběr vzorků, zkoušení a posouzení vhodnosti vody, včetně vody získané při recyklaci v betonárně, jako záměsové vody do betonu*, Praha: Český normalizační institut, 2003.
- [9] PETRÁNEK, Jan. *Usazené horniny. Jejich složení, vznik a ložiska*. 1. vyd. Praha: Nakladatelství československé akademie věd, 1963, 717 s
- [10] DINTER, O., *Drcení a mletí nerostných surovin*, SNTL 1984
- [11] VITRUVIUS POLLIO, Marcus. *Deset knih o architektuře*. 3. vyd. Praha: Arista, 2001, 438 s. ISBN 80-864-1023-4
- [12] BAYER, R., LUTZ., H: Dry Mortars. In *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry* [online]. 6. ed. 2003, Electronic Release, Wiley-VCH, Weinheim. 17 s

- [13] CAZALLA, Olga, et al. Aging of Lime Putty: Effects on Traditional Lime Mortar Carbonation. *Journal of the American Ceramic Society*. 2000, vol. 83, issue 5, s. 1070-1076. DOI: 10.1111/j.1151-2916.2000.tb01332.x.
- [14] MOROPOULOU, A., et al. Advanced Byzantine cement based composites resisting earthquake stresses: the crushed brick/lime mortars of Justinian's Hagia Sophia. *Construction and Building Materials*. 2002, vol. 16, issue 8, s. 543-552. DOI: 10.1016/s0950-0618(02)00005-3.
- [15] LANAS, J a ALVAREZ-GALINDO, J.I. Masonry repair lime-based mortars: factors affecting the mechanical behavior. *Cement and Concrete Research*. 2003, vol. 33, issue 11, s. 1867-1876. DOI: 10.1016/s0008-8846(03)00210-2.
- [16] POLAT, Rýza, et al. The corellation between aggregate shape and compressive strenght of concrete: digital image processing approach. *International Journal of Structural and Civil Engineering Research*. 2013, vol. 2, č. 3, s. 62-80.
- [17] BARONIO, G., BINDA, L. a LOMBARDINI, N.. The role of brick pebbles and dust in conglomerates based on hydrated lime and crushed bricks. *Construction and Building Materials*. 1997, vol. 11, issue 1, s. 33-40. DOI: 10.1016/s0950-0618(96)00031-1.
- [18] ROVNANÍKOVÁ, Pavla. Malta na bázi dolomitického vápna pro doplňování středověkých omítek a štuků. In *Sborník semináře Vápno, cement, ekologie*. Ed. M. Paříková, Lísek: Výzkumný ústav maltovin Praha, s.r.o., 2013
- [19] LANAS, J., et al. Mechanical properties of natural hydraulic lime-based mortars. *Cement and Concrete Research*. 2004, vol. 34, issue 12, s. 2191-2201. DOI: 10.1016/j.cemconres.2004.02.005
- [20] LANAS, J., et al.. Mechanical properties of masonry repair dolomitic lime-based mortars. *Cement and Concrete Research*. 2006, vol. 36, issue 5, s. 951-960. DOI: 10.1520/stp157720130162.
- [21] ROVNANÍKOVÁ, Pavla a MALÝ, J. *Stavební chemie: přednášky*. Brno: CERM, 1994, 120 s. ISBN 80-858-6739-7.

[22] BALEN, K. Van a GEMERT, D. Van. Modelling lime mortar carbonation. *Materials and Structures*. 1994, **27**(7): 393-398. DOI: 10.1007/bf02473442.

[23] CHROMÁ, M. Studium a modelování karbonatace betonu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2012. 143 s. Vedoucí disertační práce prof. Ing. Jaromír Havlica, DrSc.

[24] SHIH, Shin-Min, et al. Kinetics of the Reaction of Ca(OH)<sub>2</sub> with CO<sub>2</sub> at Low Temperature. *Industrial*. 1999. **38**(4): 1316-1322. DOI: 10.1021/ie980508z. ISSN 0888-5885. Dostupné také z: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ie980508z>

[25] CULTRONE, G., SEBASTIÁN, E. a HUERTAS, M.Ortega. Forced and natural carbonation of lime-based mortars with and without additives: Mineralogical and textural changes. *Cement and Concrete Research*. 2005. **35**(12): 2278-2289. DOI: 10.1016/j.cemconres.2004.12.012.

[26] [http://vega.fjfi.cvut.cz/docs/sfbe/rtg\\_difrakce/4.html](http://vega.fjfi.cvut.cz/docs/sfbe/rtg_difrakce/4.html)

[27] [http://pages.uoregon.edu/watkins4/images/calcite\\_SEM.jpg](http://pages.uoregon.edu/watkins4/images/calcite_SEM.jpg)

[28] <http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/pavements/pccp/04150/images/fig175.gif>

[29] <http://www.filmix.cz/strana5.php>

## 7.2 Seznam obrázků

Obr. 1 Dělení vápenec – dolomit ..... 16

Obr. 2 Kolíkový mlýn ..... 17

Obr. 3 Vývoj pevností v tlaku v závislosti na čase a poměru pojiva a plniva u křemičitého kameniva.....21

Obr. 4 Pevnosti v tlaku na vzorcích vzdušného vápna, ag-2 křemičité kamenivo ag-3 kamenivo vápencové.....24

Obr. 5 Pevnosti v tlaku na vzorcích hydraulického vápna, ag-2 křemičité kamenivo ag-3 kamenivo vápencové.....24

Obr. 6 Pevnosti v tlaku na vzorcích hydraulického vápna, ag-2 křemičité kamenivo ag-3 kamenivo vápencové.....	24
Obr. 7 Zkouška karbonatace na vzorcích slabě zkarbonatované vápenné malty pomocí acidobazických indikátorů.....	29
Obr. 8 Princip skládání záření s dopadovým úhlem $\Theta$ a mezimřížkovou vzdáleností d .....	30
Obr. 9 Krystaly kalcitu .....	30
Obr. 10 Krystal portlanditu mezi vlákny ettringitu .....	30
Obr. 11 Schéma zatěžování při zkoušce pevnosti v tahu za ohybu .....	33
Obr. 12 Schéma zatěžování při zkoušce pevnosti v tlaku .....	33
Obr. 13 Aparatura pro stanovení průměrného součinitele vlhkostní vodivosti .....	34
Obr. 14 Porovnání objemových hmotností .....	36
Obr. 15 Porovnání pevností v tahu za ohybu .....	36
Obr. 16 Porovnání pevností v tlaku .....	37
Obr. 17 Průběh kumulativního obsahu vody.....	37

### **7.3 Seznam tabulek**

Tab. 1 Složení jemně mletého vápence .....	31
Tab. 2 Receptury jednotlivých vzorků a stanovení vodního součinitele w .....	32
Tab. 3 Průměrné objemové hmotnosti a pevnosti po 7 dnech zrání.....	35
Tab. 4 Průměrné objemové hmotnosti a pevnosti po 14 dnech zrání.....	35
Tab. 5 Průměrné objemové hmotnosti a pevnosti po 28 dnech zrání.....	35
Tab. 6 Průměrné objemové hmotnosti a pevnosti po 90 dnech zrání.....	35
Tab. 7 Výpočet průměrného součinitele vlhkostní vodivosti .....	38