



FAKULTA STAVEBNÍ
Faculty of Civil Engineering



České vysoké učení technické v Praze

Fakulta stavební

Experimentální centrum

Bakalářská práce

Mechanické vlastnosti cementového kompozitu určeného pro robotické sochaření

Vypracoval: Lukáš Šísl

Vedoucí práce: Doc. Ing. Jiří Litoš, Ph.D.

Praha 2017



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Šísl Jméno: Lukáš Osobní číslo: 410206
Zadávací katedra: K210 - Experimentální centrum
Studijní program: Stavitelství
Studijní obor: Realizace pozemních a inženýrských staveb

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Mechanické vlastnosti cementového kompozitu určeného pro robotické sochařství
Název bakalářské práce anglicky: Mechanical properties of cement composite designed for robotic sculpture

Pokyny pro vypracování:

Bakalářská práce bude obsahovat teoretickou část, kde budou uvedeny obecné vlastnosti cementových kompozitů a rozebrány metody klasického i moderního sochařství. Dále bude obsahovat praktickou část, kde budou uvedeny laboratorní zkoušky výše uvedeného cementového kompozitu.

Seznam doporučené literatury:

Objemové změny cementových past ve fázi tuhnutí; Jiří Litoš

Speciální betony: vlastnosti - technologie - aplikace; Tomáš Klečka, Karel Kolář

Moderní beton; Mario Collepardi

Doporučená literatura na webu

Jméno vedoucího bakalářské práce: Doc. Ing. Jiří Litoš, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce: 15.2.2017

Termín odevzdání bakalářské práce: 28.5.2017

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

15.2.2017

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá mechanickými vlastnostmi cementového kompozitu určeného pro robotické sochaření.

Práce je rozdělena na část teoretickou a část praktickou. V teoretické části je zmíněno obecné složení cementových kompozitů, včetně podrobného popisu složek, vlastností cementových kompozitů a druhů mechanických zkoušek. Dále je zde zmíněno sochaření, a to jak metody klasické, tak metody moderní, včetně popisu robotů, kteří jsou pro sochaření určeni.

Praktická část se zabývá návrhem směsi, která je vyhovující pro robotické sochaření, jejími mechanickými zkouškami a zkouškami na objemové změny. Dávkování složek směsi je přizpůsobeno tak, aby měla dobrou trvanlivost. Dále by měla mít parametry samozhutnitelného betonu, aby konečné dílo neobsahovalo vzduchové bubliny a směs byla dobře zpracovatelná. Výsledná směs je navržena tak, aby byla zpracovatelná i několik hodin, než započne tuhnutí, aby sochař nebyl časově omezen.

Z výsledků zkoušek vyplývá, že pro robotické sochaření jsou vhodné všechny směsi, ale nejvhodnější jsou ty, které jsou v bakalářské práci označeny jako 2 a 5. Tyto směsi jsou samozhutnitelné, mají dobrou zpracovatelnost po dlouhou dobu, velmi dobré mechanické vlastnosti a podléhají malým objemovým změnám.

Klíčová slova: Cementový kompozit, sochaření z betonu, mechanické vlastnosti, objemové změny, samozhutnitelný beton, zpracovatelnost

Abstract

This bachelor thesis deals with the mechanical properties of cement composite designed for robotic sculpture. The thesis is divided into theoretical part and practical part.

The theoretical part contains general composition of cement composites, including a detailed description of the components, properties of cement composites and types of mechanical tests. There is also mentioned sculpture, like classic and modern methods, including the description of robots that are used for sculpting purposes.

The practical part is focused on proposal of the mixture, its mechanical tests and volume changes tests. The mixture should have a good shelf-life, which is adapted to the dosage of the components of the mixture. It should have the parameters of self-compacting concrete as well so the final work does not contain air bubbles and the mixture is well processable. The resulting mixture is designed to be workable for several hours before the solidification starts, so the sculptor is not limited in time.

The results of the tests show that the most suitable mixtures for robotic sculpting are identified in bachelor thesis as mixtures 2 and 5. These mixtures are self-compacting, they have good workability for a long time, very good mechanical properties and they subject to small volume changes.

Key words: cement composite, concrete sculpture, mechanical properties, volume changes, self-compacting concrete, processability

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma „Mechanické vlastnosti cementového kompozitu určeného pro robotické sochaření“ vypracoval samostatně a na základě literatury a pramenů uvedených v Seznamu použité literatury.

Souhlasím s tím, aby má bakalářská práce byla využívána ke studijním účelům na Fakultě stavební Českého vysokého učení technického v Praze bez mého písemného souhlasu.

V Praze dne 27. 5. 2017

.....

Lukáš Šísl

Poděkování

Chtěl bych tímto poděkovat doc. Ing. Jiřímu Litošovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a věcné připomínky, které mi poskytoval v průběhu zpracování bakalářské práce a pomohl mi tak tuto práci dokončit. Dále bych chtěl poděkovat doc. Ing. Karlu Kolářovi, CSc. za cenné rady a celému Experimentálnímu centru Fakulty stavební, že mi umožnilo práci dokončit.

Obsah

| | |
|--|----|
| SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK | 10 |
| ÚVOD | 11 |
| Motivace..... | 11 |
| Rozsah práce..... | 12 |
| Cíle práce..... | 12 |
| 1 TEORETICKÁ ČÁST | 13 |
| 1.1 Kompozitní materiál | 13 |
| 1.2 Kompozitní materiály ve stavebnictví | 13 |
| 1.3 Cementový kompozit..... | 14 |
| 1.3.1 Vývoj | 14 |
| 1.3.1.1 Vývoj cementu | 14 |
| 1.3.2 Obecné složení cementového kompozitu (betonu) | 15 |
| 1.3.3 Cement..... | 16 |
| 1.3.3.1 Třídy pevnosti cementu..... | 17 |
| 1.3.3.2 Složení cementového tmelu | 17 |
| 1.3.3.3 Druhy cementu | 18 |
| 1.3.3.4 Jemnost mletí cementu..... | 18 |
| 1.3.4 Kamenivo | 18 |
| 1.3.5 Voda | 19 |
| 1.3.5.1 Vodní součinitel | 19 |
| 1.3.6 Příměsi..... | 20 |
| 1.3.7 Přísady | 21 |
| 1.4 Hydratace cementu | 23 |

| | | |
|----------|---|----|
| 1.5 | Objemové změny cementových kompozitů..... | 24 |
| 1.6 | Mechanické vlastnosti cementových kompozitů | 26 |
| 1.6.1 | Pevnost | 26 |
| 1.6.2 | Pevnost v tlaku | 26 |
| 1.6.3 | Pevnost v tahu ohybem a příčném tahu..... | 28 |
| 1.7 | Stupně vlivu prostředí..... | 28 |
| 1.8 | Mrazuvzdornost betonu | 29 |
| 1.8.1 | Chemické rozmrazovací látky (CHRL)..... | 29 |
| 1.9 | Zpracovatelnost cementového kompozitu | 30 |
| 1.10 | Konzistence cementového kompozitu | 30 |
| 1.10.1 | Samozhutnitelný beton | 31 |
| 1.11 | Dělení cementového kompozitu dle objemových hmotností..... | 32 |
| 1.12 | Mechanické zkoušky cementového kompozitu | 32 |
| 1.12.1 | Zkoušky mechanicko-fyzikálních vlastností betonu | 33 |
| 1.12.1.1 | Destruktivní zkouška pevnosti v tlaku | 33 |
| 1.12.1.2 | Nedestr. zkouška pevnosti v tlaku: Schmidtovo kladívko | 33 |
| 1.12.1.3 | Nedestruktivní zkouška ultrazvukem..... | 34 |
| 1.12.1.4 | Zkouška pevnosti v prostém tahu..... | 34 |
| 1.12.1.5 | Zkouška pevnosti v příčném tahu | 35 |
| 1.12.1.6 | Zkouška pevnosti v tahu za ohybu..... | 35 |
| 1.13 | Sochařství..... | 36 |
| 1.13.1 | Sochařské techniky, tradiční nástroje, tradiční materiál..... | 36 |
| 1.13.2 | Klasické sochaření z cementu | 37 |
| 1.13.3 | Barevnost soch z cementových kompozitů | 39 |

| | | |
|----------|--|----|
| 1.13.4 | Moderní metody betonového sochařství | 39 |
| 1.13.4.1 | 3D tisk | 39 |
| 1.13.4.2 | Lití hmoty do formy | 40 |
| 1.13.4.3 | Robotické sochaření | 41 |
| 1.13.5 | Roboti určené pro sochaření | 42 |
| 2 | PRAKTICKÁ ČÁST | 44 |
| 2.1 | Cíle praktické části | 44 |
| 2.2 | Výzkumné otázky | 44 |
| 2.3 | Návrh konzistence směsi | 44 |
| 2.3.1 | Složky zkoumané směsi | 44 |
| 2.3.2 | Dávkování složek | 46 |
| 2.3.3 | Zpracovatelnost | 53 |
| 2.4 | Mechanické vlastnosti vzorků | 55 |
| 2.4.1 | Použité mechanické zkoušky..... | 55 |
| 2.4.2 | Výsledky mechanických zkoušek | 57 |
| 2.5 | Objemové změny | 66 |
| 2.5.1 | Použité zkoušky na objemové změny | 66 |
| 2.5.2 | Výsledky zkoušek na objemové změny | 69 |
| 2.6 | Výsledky | 73 |
| 3 | DISKUZE..... | 74 |
| 4 | ZÁVĚR..... | 77 |
| | ZDROJ POUŽITÉ LITERATURY A OBRÁZKŮ..... | 79 |
| | SEZNAM OBRÁZKŮ | 83 |
| | SEZNAM TABULEK..... | 85 |

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

| | |
|-------------|-------------------------------|
| C | - cement |
| EN | - evropské normy |
| EU | - Evropská unie |
| HCS | - vysokopevnostní betony |
| HPC | - vysokohodnotné betony |
| CHRL | - chemické rozmrazovací látky |
| kPa | - kilopascal |
| MPa | - megapascal |
| N | - normální nárůst pevnosti |
| R | - rychlý nárůst pevnosti |
| S | - plastifikátor |
| SCC | - samozhutnitelné betony |
| SP | - superplastifikátor |
| TEA | - trietanolamin |
| UHPC | - ultra-vysokohodnotné betony |
| W | - voda |

ÚVOD

Důvodem, proč jsem si vybral právě toto téma, byla jeho zajímavost a aktuálnost. Větrací výdech z tunelu Blanka v ulici Nad Královskou oborou je aktuálně v centru dění, kdy se jedná o provedení nového uměleckého obkladu, který by z jednotlivých dlaždic vytvořil výsledný vzhled. V současnosti je zmíněný výdech pouze nevzhledný betonový tubus čnící ze země (obr. 1). Vzhled výdechu by se měl změnit podle architektonického návrhu česko-argentinského umělce Federico Diaze [25].



Obr. 1: Dosavadní vzhled výdechu z tunelu Blanka v ulici Nad Královskou oborou [25]

Motivace

K vytvoření bakalářské práce na toto téma mě motivoval vedoucí práce. Vize do budoucna je taková, že pomocí robotického sochaření, které bude podrobněji popsáno v kapitole Moderní metody betonového sochařství, by byly vytvořeny obkladové tvárnice z cementového kompozitu, které by výrazně vylepšily estetiku výdechu.

Myšlenka použít k úpravě vzhledu tubusu právě výše zmíněný materiál a metodu vyplývá z toho, že vytvářet obkladové tvárnice ručně v tomto případě prakticky nelze, protože každá tvárnice bude mít originální vzor. Po obložení budou jednotlivé tvárnice dohromady vytvářet obrazec.

Dále připadá v úvahu použití takzvaného 3D tisku. Nevýhodou této metody je tuhnutí cementového kompozitu, což je jeho typická vlastnost. Tento problém je možné vyřešit například použitím různých druhů přísad nebo domícháváním.

Další možnou metodou je lití cementového kompozitu do forem. Nevýhodou této metody je její pracnost a také nákladnost, protože pro každý vzor by musela být vyrobena jedna forma.

Metoda robotického sochaření z cementového kompozitu je velice zajímavá, protože by mohla potlačit nevýhody výše uvedených metod. Metoda je neobvyklá a prakticky nová, zatím se neobjevuje v České republice ani jinde ve světě. Jde o vytváření vzoru v čerstvé směsi. Z tohoto důvodu se budu v bakalářské práci opírat o obecné vlastnosti cementového kompozitu a betonu a zejména o výsledky a zkušenosti z výzkumné části.

Dle našeho názoru by tento cementový kompozit nemusel být do budoucna navrhován pouze jako prostý, ale mohl by být také použit například jako drátkobeton, neprůstřelný beton, sendvičová konstrukce, či beton s vylepšením akustických vlastností.

Rozsah práce

Tato bakalářská práce je rozdělena na dvě části. První část je teoretická a zabývá se teoretickými informacemi o betonu a cementovém kompozitu. Dále jsou zmíněny jeho vlastnosti a některé druhy mechanických zkoušek. Práce zahrnuje i sochaření z betonu, a to jak metody starší, tak i metody současné, včetně popisu robotů určených pro robotické sochaření.

Druhá část je praktická. Tato část je věnována praktickému zkoušení vlastností cementového kompozitu určeného pro robotické sochaření.

Cíle práce

Cílem bakalářské práce je popis a podílení se na výzkumu mechanických vlastností cementových kompozitů, určených pro robotické sochaření, které je zatím ve světě zcela neobvyklé. Doufám, že mé závěry pomohou ve výzkumu a bude možné z nich vycházet v praxi.

1 TEORETICKÁ ČÁST

1.1 Kompozitní materiál

Kompozit je kombinace dvou či více složek, které mají rozdílné složení nebo tvar. Tyto složky jsou ve směsi obsaženy alespoň z 5% a zachovávají si svoji identitu. To znamená, že nedochází ke slučování ani k rozpouštění. Složky jsou jasně odlišitelné a značně se liší svými vlastnostmi [1].

Kompozity jsou děleny podle toho, jak jsou složky podrobně rozlišitelné, a to na makrokompozity (lze je rozeznat okem a lupou), mikrokompozity (je možné je rozeznat mikroskopem) a nanokompozity (zde už záleží na tom, kde je hranice rozlišitelnosti) [1].

Kompozit má dvě základní složky, kterými jsou výztuž a matrice. Úkolem matrice je kompozit pojít. Vyztužení je například částicové (dřevním prachem - bakelitem, kamenivem), vláknové (sklem, uhlíkem, ocelí, dlouhými a krátkými vlákny), plošné (rohože z vláken), či prostorové (klece) [1].

Výsledek nemusíme automaticky dostat tím, že smícháme dvě složky. Je nutné, aby složka byla uložena správným způsobem. Dále je nutné znát namáhání, které bude na výrobek působit, abychom mohli využít výhody každého materiálu, a nevýhody nechat pro materiál jiný. To je takzvaná synergie – spolupráce, která se dá vyjádřit pomocí rovnice $2 + 3 = 8$. Tedy když někam vložíme dvě látky o konkrétních vlastnostech, získáme látku novou, která nebude mít vlastnosti rovnající se pouhému součtu vlastností složek, ale vlastnosti výrazně lepší [1].

1.2 Kompozitní materiály ve stavebnictví

Nejznámějším kompozitním materiálem ve stavebnictví je železobeton. Matricí je zde beton, který má výbornou tlakovou pevnost, ovšem špatnou pevnost tahovou. Z tohoto důvodu jsou v kompozitu ocelové pruty, které působí jako tahová výztuž. Je nutné vědět, jaké bude silové působení na prvek [1].

Dalšími příklady jsou: drátkobeton, různé druhy laminátů se skelným vláknem, které obsahují umělou pryskyřici jako matrici a umakart [1].

Také dřevo je dlouholetým stavebním materiálem. I tento přírodní materiál dokážeme zpracovat na další kompozity, a tak potlačit jeho negativní vlastnosti (objemové změny z důvodu vlhkosti, biologické škůdce, rozptyl vlastností přírodního prvku) a využít jeho pozitivní vlastnosti – malou objemovou hmotnost, dobrou opracovatelnost, vysokou pevnost v tahu i tlaku a obnovitelnost [1].

Kompozitními materiály ze dřeva dokážeme v některých případech dosáhnout takové pevnosti jakou má ocel, ale při nízké hmotnosti dřeva [1].

1.3 Cementový kompozit

1.3.1 Vývoj

Je znám již od starověku, kdy Egypťané, Řekové a Římané používali materiál, který některými svými vlastnostmi připomínal nynější beton [3].

- V Jeruzalémě jsou ještě dnes používány vodní nádrže z období let 1 000 př. n. l. [3].
- Řekové už ve 2. století př. n. l. používali techniku, při které líce stěn zkonstruovali ze dřeva a zbytek vylili materiálem, který se podobal dnešnímu betonu [3].
- Písemně jsou doloženy techniky, při nichž se využívalo pucolánových, případně hydraulických vlastností materiálů již ve starověkém Římě [3].
- Moderní beton je spjat s poznáváním hydraulických pojiv, hlavně cementu [3].

1.3.1.1 Vývoj cementu

Rok 1824 je považován za začátek výroby cementu, kdy Joseph Aspdin obdržel britský patent na výrobu maltoviny, která byla nazvána jako portlandský cement. Výrobky z tohoto cementu se barevně podobaly svrchnojurskému vápenci, který byl těžen v blízkosti města Portland v jižní Anglii [3].

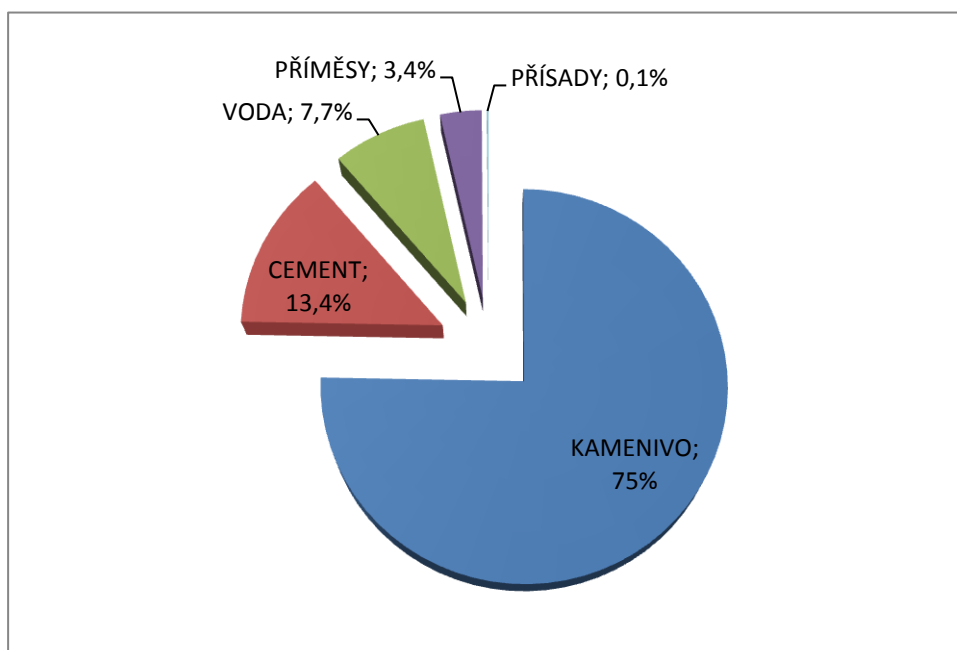
To, že má na hydraulické vlastnosti vliv obsah jílu, bylo objeveno v 18. a 19. století (J. Smeaton, L. J. Vicat, J. F. John). Poměr směsi byl stanoven na 70 - 75 % vápence a 25 - 30 % jílu [3].

Zásadní postup byl zaveden vypalováním umělé směsi vápence a jílu, ovšem ne až do slinutí. Jednalo se o pojivo podobné cementům románským [3].

Latentní hydraulické vlastnosti vysokopecní strusky byly objeveny koncem devatenáctého století. Tento objev byl podnětem k výrobě cementů struskoportlandských (do 30 % strusky) a vysokopecních (více jak 70 % strusky). Tím, že se jako příměs začala ke slínku přidávat struska, byl položen základ ke složce lépe odolávající agresivnímu prostředí [3].

1.3.2 Obecné složení cementového kompozitu (betonu)

Aby vznikl beton, je nutné smíchat následující složky: cement, hrubé a drobné kamenivo, vodu, příměsi a přísady. Tím, že se smíchá cement s vodou, nastane chemická reakce, která se nazývá hydratace. Pojivem v betonu je cement. Poté beton tuhne a tvrdne. Procentuální zastoupení konkrétních složek v běžném betonu je znázorněn na obr. 2 [2].



Obr. 2: Hmotnostní podíl jednotlivých složek betonu [2]

Pokud směs neobsahuje hrubá zrna kameniva, nazývá se malta [4]. Cementová malta bude úlohou této bakalářské práce, jelikož bude obsahovat pouze drobné kamenivo.

K hlavním složkám – vodě, cementu, písku a hrubému kamenivu navíc přistupují další složky – práškové minerální příměsi, chemické přísady a někdy i polymerní nebo kovová vlákna. V této práci nebudeme používat žádná vlákna. Přidáním výše zmíněných složek získáváme takzvaný speciální beton, který se vyznačuje zlepšením vlastností betonu oproti běžnému betonu [4].

1.3.3 Cement

Cement lze označit jako prášek, který když se zhruba v poměru 3:1 smíchá s vodou, vytvoří hmotu (pasty), která se vyznačuje snadnou tvarovatelností. Svou plasticitu ztrácí během několika hodin (nastává tuhnutí). Za několik dní nabude vlastností, které jsou podobné přírodnímu kameni (tomuto procesu říkáme tvrdnutí). Cementový kámen má schopnost odolávat mechanickému namáhání [4].

Kvalita celého kompozitu a matrice – betonu nebo malty – je závislá hlavně na poměru cementu a vody, které jsou použity pro přípravu pasty. Čím méně vody vzhledem k cementu se použije, tedy nízký vodní součinitel, tím větší je předpoklad pro získání cementové matrice s dobrými mechanickými a fyzikálními vlastnostmi [4].

I když budou všechny parametry betonu totožné (vodní součinitel, poměr cementu a kameniva, zrnitostní křivka kameniva, použitá příměs, kvalita ošetřování atd.), mohou betonové vlastnosti výrazně záviset na zvoleném cementu. Různé vlastnosti betonu závisí na různosti cementu [4].

Jelikož jsou cementy rozdílné, musí proběhnout jejich klasifikace na základě jejich složení a vlastností. S tím, jak se vyvíjí dostupnost surovin, technologie a geopolitické podmínky se mohou během doby velice měnit kritéria, podle kterých jsou cementy zařizovány. Jakmile byla v zemích Evropské unie zavedena jednotná regulace, byla také pro cementy přijata nová norma (EN 197-1) a další normy jí odpovídající [4].

1.3.3.1 Třídy pevnosti cementu

Výrobce může teoreticky dodávat každý typ cementu v následujících pevnostních třídách: 32,5N, 32,5R, 42,5N, 42,5R, 52,5N a 52,5R. Čísla 32,5, 42,5 a 52,5, udávají minimální pevnost malty v tlaku, která se vyjadřuje v megapascálech (obr. 3). Tato pevnost se zjišťuje, když beton dosáhne stáří 28 dní [4].

Symbol R se týká krátkodobé pevnosti cementu. R znamená rychlý [4].

| Třída pevn. | Pevnost v tlaku (MPa) | | |
|-------------|-----------------------|-------|--------|
| | 2 dny | 7 dní | 28 dní |
| 32,5N | - | 16 | 32,5 |
| 32,5R | 10 | - | 32,5 |
| 42,5N | 10 | - | 42,5 |
| 42,5R | 20 | - | 42,5 |
| 52,5N | 20 | - | 52,5 |
| 52,5R | 30 | - | 52,5 |

Obr. 3: Minimální tlakové pevnosti, které jsou předepsány pro různé třídy cementů [4]

1.3.3.2 Složení cementového tmelu

- Fáze kapalná:

- Kapilární póry – rovnovážná vlhkost
- Tzv. pórový roztok = hlavně $\text{Ca}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{pH} \sim 12,45$ při 20°C

- Fáze plynná:

- Vzduch v technologických a kapilárních pórech

- Fáze pevná:

- Nezreagované částice slínku
- Gel, který se stává z hydrátů o rozměrech 5 – 20 nm a z gelových pórů (průměr 1 – 3 nm)
- Krystaly hydroxidu vápenatého a další hydratované částice
- Kapilární póry (průměr 0,01 – 1 mm)
- Technologické póry vznikající provzdušněním záměsi (50 μm – 2 mm) [5].

1.3.3.3 Druhy cementu

Evropské normy dle složení uvádí následujících pět skupin cementů pro obecné použití: CEM I – cement portlandský, CEM II – cement portlandský směsný, CEM III- cement vysokopecní, CEM IV – cement pucolánový, CEM V – cement směsný [4].

Při výzkumu bude použit cement CEM I 42,5 R.

1.3.3.4 Jemnost mletí cementu

Na jemnosti mletí je závislý takzvaný měrný povrch cementu. Měrný povrch cementu se nejčastěji pohybuje v rozmezí od 250 do 400 m²/kg. Cementy, které jsou jemněji mleté, hydratují rychleji [16].

V praktické části práce se bude používat jemně mletý cement.

1.3.4 Kamenivo

Je obvykle chemicky neaktivní a zrnitý materiál. V cementovém kompozitu je kamenivo obsaženo hlavně proto, aby byla nižší jeho cena, protože kamenivo bývá většinou levnější než cement. Role kameniva v betonu je ovšem velice důležitá. Představuje dvě třetiny až tři čtvrtiny jeho objemu. Zajišťuje lepší objemovou stálost a také trvanlivost. Dále je kamenivo významné z hlediska pevnostního, a to hlavně u betonu vysokohodnotného [4].

Zrnitý charakter kameniva je jeho nejnápadnějším znakem. Skládá se z množství samostatných zrn (obr. 4). Pokud jsou zrna menší než 4-5 mm, nazýváme kamenivo písek. Pokud jsou zrna větší, hovoříme o kamenivu hrubém [4].

Při výzkumu bude použit písek velikosti zrn 0,1 – 0,6 mm a 0,3 – 0,8 mm. Bude se tedy jednat o cementovou maltu [4].



Obr. 4: Písek, štěrk a drcené hrubé kamenivo [4]

1.3.5 Voda

Voda je spolu s kamenivem a cementem jednou ze tří složek, které jsou hlavní při výrobě betonu. Pokud by nebyla voda, nebyl by beton, protože by cement nemohl hydratovat a tedy ani tvrdnout. Ale co se týká trvanlivosti a pevnosti betonu, přebytek vody snižuje jejich kvalitu. Přídavek vody sám o sobě trvanlivost a pevnost betonu nesnižuje, ale snižuje ji vysoký vodní součinitel (hmotnost vody/hmotnost cementu). Lze tedy říci, že pokud to zpracovatelnosti pomůže, je možné množství vody zvýšit, ale současně je nutné zvýšit i dávku cementu, aby vodní součinitel nebyl změněn [4].

1.3.5.1 Vodní součinitel

Jedná se o poměr hmotnosti účinného obsahu vody k hmotnosti cementu v čerstvém betonu. Vodní součinitel je běžný v rozmezí od 0,3 do 0,6. Čím menší je vodní součinitel, tím lepší vykazuje beton mechanické vlastnosti (modul pružnosti, pevnost, odolnost vůči průsaku tlakové vody) a také vyšší trvanlivost, než jakou má beton s vodním součinitelem vysokým [28].

V této práci se bude vodní součinitel pohybovat zhruba od 0,20 do 0,35. Chceme ho co možná nejnižší, zejména z důvodu lepší trvanlivosti, ale i kvůli lepším mechanickým vlastnostem.

1.3.6 Příměsi

Většinou se jedná o anorganické látky, které se do betonu přidávají, aby se zlepšily vlastnosti, jak ve stavu čerstvém, tak ve stavu zatvrdlém. Příměsi jsou charakteristické tím, že velikost jejich částic bývá menší než 0,125 mm a také tím, že mají velký měrný povrch. Může se jednat například o odpad, který se zpracovává ve stavebnictví, což je pozitivní a je to znát na jejich ceně, která bývá většinou menší než je cena cementu [6].

První typ – příměsi inertní – tyto příměsi se většinou přidávají kvůli tomu, aby se dosáhlo hutnější struktury betonu, nebo aby došlo k vylepšení reologických vlastností v čerstvém betonu. Tento druh příměsí svým mineralogickým a chemickým složením netuhne či netvrdne, i kdyby se k nim přidaly budiče. Přidávají se proto, aby zvýšily hutnost struktury a zvýšily množství jemné cementové malty. Tím mohou přispět k lepší zpracovatelnosti betonové směsi nebo mohou ovlivnit barevnost betonu. Většinou se jedná o barevné pigmenty, či kamennou moučku. Ovšem je nutné si uvědomit, že ke smočení povrchu příměsí bude potřeba více záměsové vody. Mikromletý vápenec se také částečně řadí do inertních příměsí [6].

Druhý typ – příměsi aktivní – jsou takové příměsi, které aktivně přispívají k nárůstu pevnosti cementového tmelu díky svému složení. Dle působení jsou děleny na látky latentně hydraulické a pucolánové [7].

Schopnosti latentně hydraulické se aktivují účinkem budičů. Budiče jsou dle povahy děleny na alkalické ($\text{pH} > 7$) a síranové (vytvářejí ettringit). Nejvýznamnější latentně hydraulickou látkou je jemně mletá vysokopecní struska. Látky pucolánové jsou anorganické, samy netuhnou, netvrdnou, nejsou latentně hydraulické, ale je v nich obsaženo amorfni SiO_2 , které reaguje s Ca(OH)_2 za vzniku C-S-H gelu [7].

Děleny jsou dle původu na přírodní (trasy, tufy, křemelina) a umělé (vysokopecní popílky, mikrosilika, jemně mletý cihlářský stěp) [7].

Při výzkumu bude použita jako příměs prášková mikrosilika. Je to kondenzát křemičitých par velmi jemné amorfni struktury [29]. Charakteristická

velikost jejích částic se pohybuje v rozmezí od 0,1 do 0,2 mm. Částice tvoří především SiO_2 a další příměsi [29]. Jedná se o aktivní příměs pucolánovou. Doporučuje se pro výrobu vysokohodnotných betonů, betonů a malt s požadavkem na vysokou finální pevnost a odolnost proti vodě a chemikáliím [29].

Z výše uvedených důvodů ji bude obsahovat i naše směs, protože bude vystavena agresivnímu prostředí a také je nutná její vysoká pevnost.

1.3.7 Přísady

Jedná se o chemickou látku, která má za úkol upravovat některou vlastnost čerstvého, či ztvrdlého betonu. Je dávkována v malém množství – v procentech ke hmotnosti cementu [8].

Dle funkce rozeznáváme řadu druhů [8]:

- Plastifikátory, superplastifikátory
- Zpomalovače tuhnutí, tvrdnutí
- Urychlovače tuhnutí, tvrdnutí
- Provzdušňující
- Inhibitory koroze
- Zpěňující
- Stabilizační
- Jiné

Plastifikátory a superplastifikátory – Používají se pro lepší zpracovatelnost směsi a snížení vodního součinitele. Tím nepřímo zvyšují pevnost směsi [9].

Jako první plastifikační přísady se objevily lignosulfonáty, které pocházely ze sulfitových výluhů po chemickém opracování dřeva. V naší oblasti se začaly používat v 50. letech minulého století (S plastifikátor). Mezi jejich nedostatky patřil zbytkový obsah sacharidů [9].

Dále se na trhu objevily další syntetické makromolekulární sloučeniny. To byly produkty kondenzace sulfonovaného naftalenu nebo melaminu s formaldehydem. Tyto produkty, které uměly zredukovat potřebný obsah záměsové vody přibližně o jednu pětinu, nebyly nejprve přijaty odbornou veřejností s důvěrou, protože pevnost betonu v rozmezí 20 až 30 megapascalů byla považována za dostatečnou [9].

Efektivnější přísady nové generace superplastifikátorů na bázi polykarboxylátů nemusí obsahovat sulfoskupinu. Umožňují snížení vodního součinitele cementové pasty již při obsahu v desetínách procenta pod hodnotu až 0,25 při zachování téměř stejné konzistence (zpracovatelnosti) 45 – 90 minut. Díky tomu můžeme připravit hutné, vysokohodnotné betony (high-performance concrete, HPC) s nízkou pórovitostí, při pevnosti vyšší než 120 MPa a hlavně betony samozhutnitelné (selfcompacting concrete, SCC) [9].

V bakalářské práci chceme připravit samozhutnitelný beton s pevností přesahující 100 MPa, proto budeme používat právě superplastifikátor.

Zpomalovače tuhnutí – Mají opodstatnění při betonáži v teplém prostředí nebo v případě, kdy by hrozil příliš rychlý nárůst tepla, který by mohl zhoršit mechanické vlastnosti. Ve většině případů se jedná o organické vodorozpustné látky typu lignosulfonátů, hydroxykarboxylových kyselin, sacharidů a podobně. Většina zpomalovačů má vlastnost snížit potřebu záměsové vody při zachování stejné zpracovatelnosti. Tedy typické vlastnosti tzv. plastifikátorů a superplastifikátorů. Většina superplastifikátorů působí tedy jako zpomalovače [9].

Urychlovače tuhnutí – Přidávají se do betonu, aby se urychlilo zvyšování začáteční pevnosti a zkrátilo se tuhnutí. Mají opodstatnění při betonáži pod studenou vodou, při betonáži za chladného počasí a při betonování stříkaným betonem [9].

Když se betonuje pod studenou vodou je možné místo urychlovačů zvýšit dávku portlandského cementu nebo použít předeřhřáté suroviny [9].

Jako urychlovače je možné použít například rozpustné anorganické soli (uhličitany, tiokyanidy, chlorid vápenatý, fluoridy, dusičnany a dusitany), rozpustné organické látky (mravenčan vápenatý, trietanolamin TEA, octan vápenatý). Urychlovače, které způsobují velice rychlé ztuhnutí betonové směsi v průběhu několika minut, představují speciální kategorii urychlovačů. Jsou používány zejména při aplikaci stříkaného betonu (chlorid hlinitý, hlinitan sodný, křemičitan sodný, fluorid sodný a další) [9].

Provzdušňující přísady - Cyklické rozmrazování a zmrazování nemá na trvanlivost betonu dobrý vliv. Aby se tomuto vlivu zamezilo, používají se provzdušňovací přísady [9].

Požadované ideální parametry tvaru, obsahu a vzájemného rozmístění vzduchových dutin v betonu ovlivňuje více faktorů: teplota, technologie betonování, míchání a proměnlivé složení vstupních surovin [9].

Idealizovat recepturu pro provzdušněný, superplastifikovaný a zároveň i vysokopevnostní beton není snadné. Nově dodávané provzdušňující přísady zabezpečují beton před cyklickým rozmrazováním a zmrazováním tak, že vytvoří velmi stabilní vzduchové bublinky. Ty jsou malé a blízko sebe. U takových přísad se jedná o vícesložkovou směs solí sulfonových kyselin, mastných kyselin a stabilizátorů. Výhodou této přísady je to, že ji lze použít i na vylepšení vlastností betonů s delším mícháním [9].

Při výzkumu bude použit superplastifikátor – carboxylether. Bude použit z důvodu lepší zpracovatelnosti, aby směs zůstala pro sochaře déle „živá“ a také pro snížení vodního součinitele.

1.4 Hydratace cementu

Hydratační proces je možné vidět pouze mikroskopem. Je nastartován po smíchání cementu s vodou. Proces probíhá tak, že cementové zrno je obklopeno vodou, která rozpouští jeho nerostné složky a z vody se stává přesycený roztok. Z tohoto roztoku se poté vylučují nově vytvořené krystalky

nerostných látek. Krystalky narůstají v nitkovité útvary, které se proplétají a postupně srůstají ve svazky a vytvářejí hustou síťovinu, která je základem pojivé schopnosti cementu a podstatou pevné hmoty [10].

Hydratační proces se dělí na dvě fáze:

- Tuhnutí
- Tvrdnutí

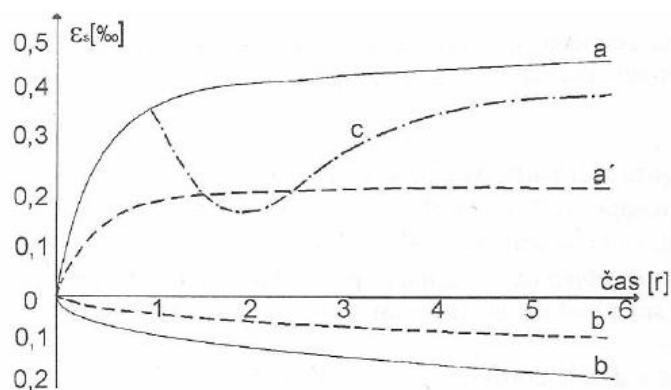
Tuhnutí je proces, při kterém dochází k houstnutí cementové kaše. Protože je nutné betonovou směs uložit do bednění dříve, než dojde k tuhnutí betonu, legislativa požaduje, aby začátek tuhnutí cementu byl nejdříve 45 minut po smíchání s vodou. Konec může někdy nastat až za několik dní [10].

Tvrdnutí je proces, při kterém nabývá ztuhlá cementová kaše na pevnosti. Nejpodstatnější část nabývání na pevnosti proběhne v prvních 28 dnech. Zpočátku je nárůst pevnosti intenzivní, později je pomalejší a k ukončení dojde až po několika letech. Aby byl hydratační proces co nejefektivnější, je nutné, aby probíhal při teplotě od 15 do 20 °C [10].

Při hydratačním procesu dochází k uvolňování tepla, které cementovou kaši zahřívá. Teplo způsobuje objemové změny, protože napomáhá odpařování vody ze směsi. Hydratačního tepla lze využít v zimě, kdy může pomáhat k udržení potřebné teploty, aby mohlo probíhat normální tvrdnutí [10].

1.5 Objemové změny cementových kompozitů

Při tvrdnutí cementového kompozitu dochází k jeho objemovým změnám, což je jeho negativní vlastnost. Pokud beton tvrdne na vzduchu, zmenšuje se jeho objem. Pokud beton tvrdne pod vodou, dochází k mírnému zvětšování jeho objemu. Použitím vhodných cementů, optimálním postupem betonáže a správným ošetřováním tvrdnoucího betonu se dá toto smršťování ovlivnit. Průběh smršťování a nabývání je schematicky znázorněn na obr. 5 [11].



Obr. 5: Smršťování betonu na vzduchu: a – prostého, a' - železového; nabývání betonu pod vodou: b – prostého, b' - železového; c – smršťování betonu vloženého po roce do vody [11]

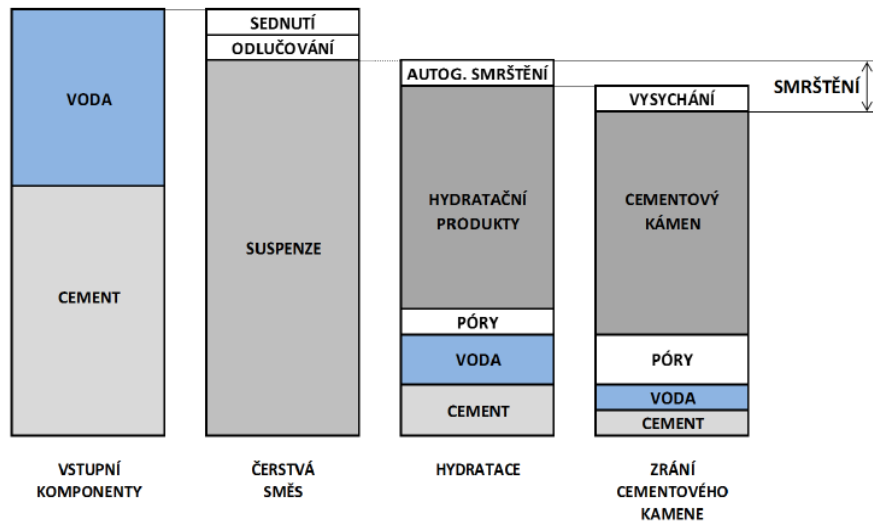
Další negativní vlastností betonu je jeho plastické dotlačování – dotvarování betonu, probíhající po velice dlouhou dobu. Důvodem dotvarování je cementový tmel a plochy jeho dotyku s pevnými zrny. Tmel sám se dotvaruje mnohonásobně více než cementová malta [11].

Zkoušení prokázalo, že více podléhají dotvarování betony s velkým množstvím vody a menším množstvím cementu, tedy s vyšším vodním součinitelem. Všechny činitele podporující pevnost betonu zmenšují jeho dotvarování. V pořadí důležitosti to jsou: zvětšená vlhkost prostředí, hutnost betonu, zvětšená dávka cementu, nízký vodní součinitel, převládající hrubé kamenivo při vhodné zrnitosti [11].

Smršťování a dotvarování mají na chování betonových konstrukcí zásadní vliv. Tento účinek patří mezi tzv. reologické účinky. Rozlišují se tyto druhy smršťování:

- Materiálové: objem výsledné hmoty je menší než součet objemů jednotlivých komponentů [11].
- Vysycháním: způsobuje ho postupné snižování volné nevázané vody [11].

Objemové změny během hydratace a zrání betonu jsou znázorněny na obr. 6.



Obr. 6: Objemové změny během hydratace a zrání betonu [30]

1.6 Mechanické vlastnosti cementových kompozitů

1.6.1 Pevnost

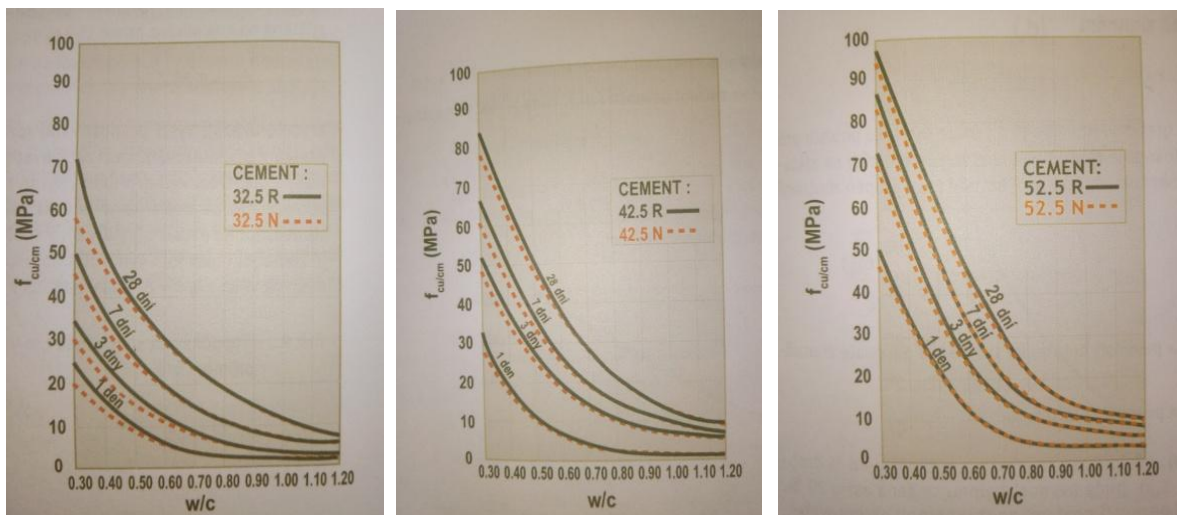
Prostý beton je materiál, který dokáže vzdorovat vysokému tlakovému namáhání, ale jen velice slabě dokáže vzdorovat namáhání tahovému a ohybovému. Aby mohl beton přenášet i tato dvě namáhání, musí být vyztužen ocelovou výztuží, která má tahovou pevnost vysokou. Potom mluvíme o betonu vyztuženém nebo železobetonu [4].

Pevnost betonu je velikost napětí potřebná k porušení konstrukce při zániku celistvosti [4].

Záměrem této práce je navrhnout cementový kompozit s vysokou pevností použitím vhodných složek popsaných v praktické části.

1.6.2 Pevnost v tlaku

Dle Powersovy rovnice je pevnost cementové pasty funkcí vodního součinitele pro dané hodnoty stupně hydratace. Důležité je říci, že grafy na obr. 7 platí pro beton bez provzdušnění a ošetřovaný při teplotě 20°C [4]. Zjišťování pevnosti v tlaku vzorků bude věnována praktická část bakalářské práce.



Obr. 7: Vliv vodního součinitele na pevnost v tlaku 32,5, 42,5, 52,5 [4]

podle ČSN EN 206-1 je charakteristická pevnost betonu v tlaku po 28 dnech jako třída pevnosti vyjádřena následovně [4]:

- Písmenem „C“ pro beton běžný a těžký a písmeny „LC“ pro beton lehký
- Charakteristická pevnost zjišťována na válcích 150x300 mm
- Lomítko
- Odpovídající charakteristická pevnost krychelná (150 mm)

Například: C20/25, to znamená, že předepsaná válcová charakteristická pevnost tohoto běžného betonu je 20 MPa a ekvivalentní krychelná charakteristická pevnost je 25 MPa [4].

Pevnostní třídy betonu v tlaku jsou znázorněny na obr. 8.



Skrytá tabulka pocházející z normy

Obr. 8: Pevnostní třídy betonu v tlaku [4]

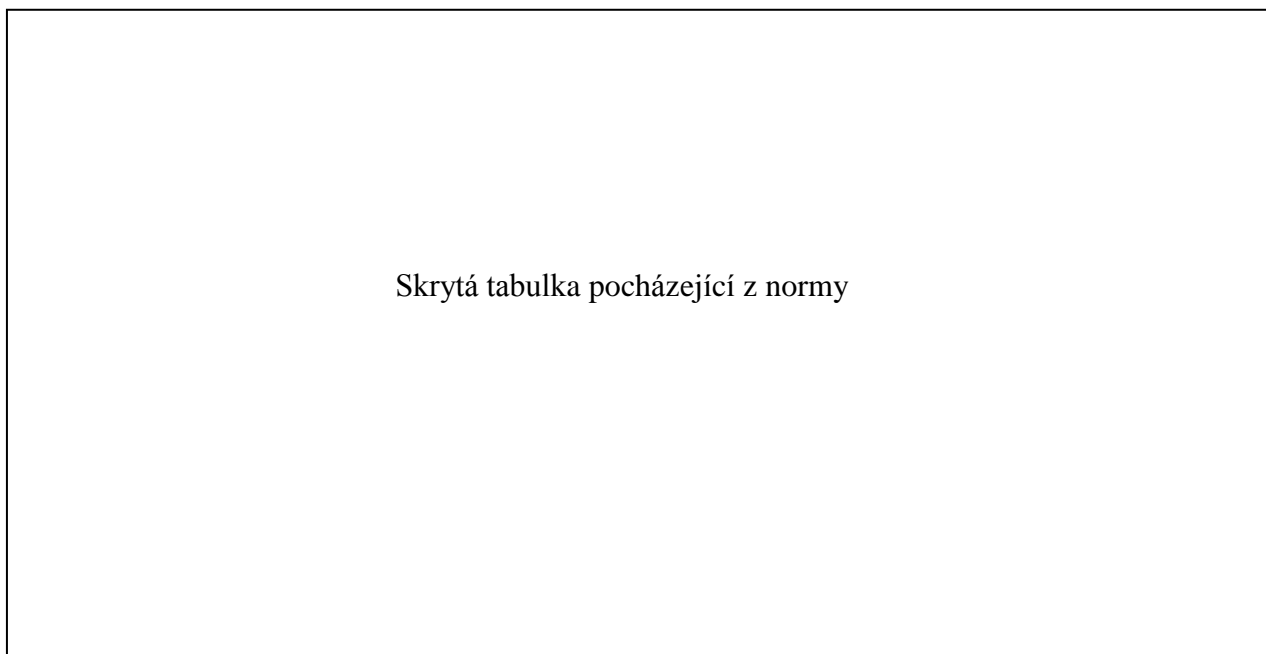
1.6.3 Pevnost v tahu ohybem a příčném tahu

Pevnost v tahu ohybem a příčném tahu závisí na stupni hydratace (na třídě cementu, na době a způsobu ošetřování) a vodním součiniteli, ale také na druhu použitého kameniva [4]. Zjišťování pevnosti v tahu ohybem bude věnována praktická část bakalářské práce.

1.7 Stupně vlivu prostředí

ČSN EN 206-1 klasifikuje prostředí, ve kterých má konstrukce z betonu sloužit. Tyto kategorie prostředí se nazývají stupně vlivu prostředí a jsou značeny písmenem X, za kterým následuje ještě další písmeno: O, C, D, S, F a A. Stupně vlivu prostředí spolu s charakteristikou prostředí jsou uvedeny na obr. 9. Všechny stupně, kromě XO, jsou ještě dále děleny. Stupeň XO představuje vnitřní prostředí, kde nehrozí nebezpečí koroze výztuže v betonu. Se stupni vlivu prostředí je spjata trvanlivost betonu [4].

Dekoratívni beton musí zpravidla odpovídat odolnosti XC v interiéru a XC, XF v exteriéru [4].



Obr. 9: Stupně vlivu prostředí [35]

1.8 Mrazuvzdornost betonu

Mrazuvzdornost je schopnost betonu nasyceného vodou vzdorovat účinkům střídavého rozmrazování a zmrazování. Tyto účinky, které na beton působí, jsou jedním z důležitých vlivů prostředí pro správnou specifikaci betonu [23].

1.8.1 Chemické rozmrazovací látky (CHRL)

Jedná se nejčastěji o různé chemické soli.

Působení CHRL se projevuje následovně:

- chloridy působí v kombinaci s opakovaným rozmrazováním a zmrazováním [24]

- v nepříznivých podmínkách zvýšeným rizikem ASR (alkalicko-křemičité reakce) a zanášením alkálií do betonu [24]

1.9 Zpracovatelnost cementového kompozitu

Poté, co se složky smíchají, je nutné plastickou směs dopravit na místo, kde bude uložena a zhutněna. Zpracovatelnost je vlastnost betonové směsi se pohybovat a být zhutňována. Nejrozšířenější zkouškou na zpracovatelnost betonové směsi je zkouška sednutí kužele, ale používají se i jiné zkoušky [4].

Při výzkumu chceme, aby naše směs měla dobrou zpracovatelnost po relativně dlouho dobu, proto se uvažuje o dávkování superplastifikátoru.

1.10 Konzistence cementového kompozitu

Konzistence čerstvého betonu vyjadřuje odpor proti přetváření. Podle výsledků zkoušky a použité zkušební metody se vyjadřuje třídou konzistence. Méně odborně se dá říci, že konzistence směsi je vyjádření toho, jak moc nebo málo se čerstvý beton sype nebo teče. Konzistenci můžeme stanovit jako: Vebe, stupeň zhutnění, sednutí kužele, rozlití a rozlití kužele [26].

Při výzkumu chceme dosáhnout konzistence, kterou má samozhutnitelný beton. Pro měření této konzistence použijeme střešací stolek.

Princip zkoušky: Cílem zkoušky je změřit průměr koláče, který vznikne rozlitím malty na střešacím stolku [27].

Zkušební zařízení: Pro zkoušku se používá takzvaný střešací stolek. Dále kovový kužel, který je vysoký $60 \pm 0,5$ mm, vnitřní průměr ve spodní části kužele je $100 \pm 0,05$ a vnitřní průměr v horní části kužele je $70 \pm 0,5$ mm. Dále se používá dusadlo kruhového průřezu z nenasákavého materiálu. Průměr dusadla je asi 40 mm a je dlouhé přibližně 20 mm. Dusadlo váží $0,250 \pm 0,015$ kg [27].

Postup zkoušení: Před každým zkoušením je třeba střešací stolek a vnitřní povrch kužele včetně okraje řádně očistit vlhkou tkaninou. Dále je vhodné jejich povrch natřít tenkou vrstvou minerálního oleje [27].

Kovový kužel se umístí na střed desky střešacího stolku a ve dvou vrstvách se naplní maltou. Každou vrstvu je třeba ztuhnout deseti lehkými údery dusadla. Je nutné kužel během plnění jednou rukou přitlačovat k desce střešacího stolku. Přebytečná malta se odstraní a volná plocha desky stolku se očistí, aby byla suchá a čistá [27].

Přibližně po 15 vteřinách se kužel pomalu zvedne svisle vzhůru a malta se nechá na desce stolku rozlít 15 nárazy se stálou frekvencí jeden úder za vteřinu. Dále je nutné změřit dva na sebe kolmé průměry koláče pomocí měřidla. Výsledek je udáván v milimetrech s přesností na jeden milimetr [27].

Zkoušku je potřeba provést alespoň na dvou vzorcích. Pokud se jednotlivé rozlité liší o více než 10% od jejich průměrné hodnoty, je třeba zkoušku opakovat.

Výsledkem zkoušky je průměrná hodnota rozlité koláče v mm zaokrouhlená na 5 mm [27].

Aby výsledkem byl samozhutnitelný beton, musí se malta po zvednutí kužele rozlít tak, aby průměr koláče byl mezi 22 a 25 centimetry. Pro samozhutnitelný beton se nepoužívá 15 poklepů, ale malta se rozlije sama od sebe [27].

1.10.1 Samozhutnitelný beton

Jako samozhutnitelný beton (SCC) označujeme speciální typ betonu, který má dobrou odolnost proti segregaci, takže lze ukládat bez ztuhování. Hlavním znakem SCC je vyšší poměr cementové matrice ke kamenivu, než jak tomu bývá u běžného betonu. Objem cementové matrice, která je nutná pro pohyblivost betonové směsi, musí být vyšší, aby kamenivo bylo vlivem tlaku unášeno při čerpání betonu. Objem kameniva musí být na druhé straně snížen. I maximální zrno kameniva musí být zmenšeno, jelikož i tím dojde ke zlepšení pohyblivosti směsi a odolnosti čerstvé směsi vůči rozmíšení [4].

1.11 Dělení cementového kompozitu dle objemových hmotností

Jedno z dělení cementových kompozitů, je dělení dle jejich objemové hmotnosti. Dle ČSN EN 206-1 se takto dělí na takzvaný beton lehký, který má objemovou hmotnost od 800 do 2 000 kg/m³. Dále na beton obyčejný, který má objemovou hmotnost od 2 000 do 2 600 kg/m³ a na beton těžký, který má objemovou hmotnost vyšší než 2 600 kg/m³ [4].

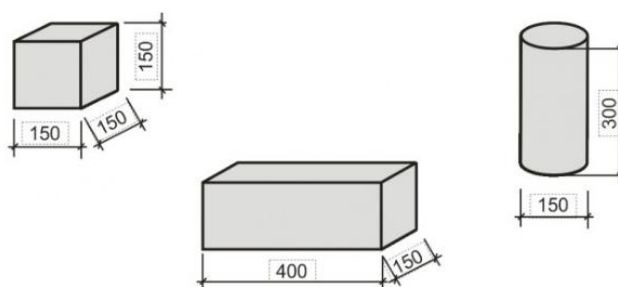
Podle našich předpokladů se v této bakalářské práci budeme pohybovat v objemové hmotnosti, kterou má obyčejný beton.

1.12 Mechanické zkoušky cementového kompozitu

Nejdříve je nutné definovat si tzv. zkušební těleso:

Takzvané normové těleso (obr. 10) je takové, na kterém se zkouší pevnost ztvrdlého betonu. Není-li jinak stanoveno, pevnost se prokazuje na tělesech, které mají stáří 28 dnů. O zkouškách ztvrdlého betonu hovoří normy řady ČSN EN 12390. Nejpoužívanější v dnešní době jsou [12]:

- krychle 150/150/150 mm (je možné použít i krychle o hraně 100, 200 nebo 300 mm),
- válce 150/300 mm,
- trámce 150/150/400 mm,
- trámečky 40/40/160 mm.



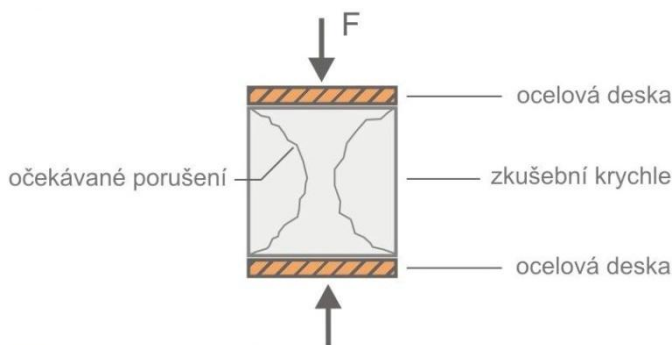
Obr. 10: Zkušební tělesa [12]

1.12.1 Zkoušky mechanicko-fyzikálních vlastností betonu

1.12.1.1 Destruktivní zkouška pevnosti v tlaku

Rozeznávají se tři druhy pevnosti v tlaku: pevnost krychelná, pevnost válcová a pevnost hranolová. Ke zkoušce (obr. 11) jsou používána výše uvedená zkušební tělesa. Zkušební těleso se vkládá mezi desky lisu, kde na něj působí tlak. Pro tlakovou pevnost platí: $R = F/A$ (MPa) kde F je největší dosažená síla (N) a A je tlačná plocha (mm²) [12].

V praktické části se bude pevnost v tlaku zkoušet na polovině z trámečku 160/40/40 mm, která vznikne po zkoušce v tahu za ohybu.



Obr. 11: Příklad zkoušky pevnosti v tlaku [12]

1.12.1.2 Nedestr. zkouška pevnosti v tlaku: Schmidtovo kladívko

Schmidtovo kladívko je obecně nazýváno jako odrazový tvrdoměr. Používá se pro nedestruktivní zkoušky ztvrdlého betonu. Pružina vymrští kladívko, které je umístěno v pouzdře, proti povrchu betonu. Pevnost betonu v tlaku se odvozuje na základě velikosti odrazu kladívka od betonu. To je tzv. sklerometrická neboli tvrdoměrná zkouška. Je měřena povrchová tvrdost a na jejím základě je odvozena tlaková pevnost betonu [12].

Výhodou této metody je rychlost a cena. Nevýhodou je to, že výsledek zkoušky je méně přesný [12].

1.12.1.3 *Nedestruktivní zkouška ultrazvukem*

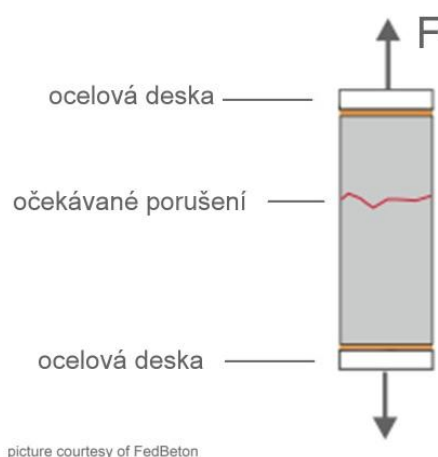
Ultrazvuková impulsní metoda spočívá v měření rychlosti šíření ultrazvukových impulsů materiálem v m/s. Ve stavebnictví se používá frekvence od 20 kHz do 500 kHz. Touto metodou je možné zjistit rovnoměrnost betonu a dynamický modul pružnosti.

Pro stanovení dynamického modulu pružnosti slouží vzorec $E_{cu} = D \cdot v_L^2 \cdot (1/k^2)$, kde D je objemová hmotnost, v_L je rychlost šíření impulsů ultrazvukového vlnění a k je součinitel rozměrnosti. Dynamický modul pružnosti se dá přepočítat na statický dle vztahu $E_c = K_u \cdot E_{cu}$, kde K_u je zmenšovací součinitel, který lze najít v ČSN 73 2011 [32].

Tato zkouška bude prováděna a detailněji popsána v praktické části.

1.12.1.4 *Zkouška pevnosti v prostém tahu*

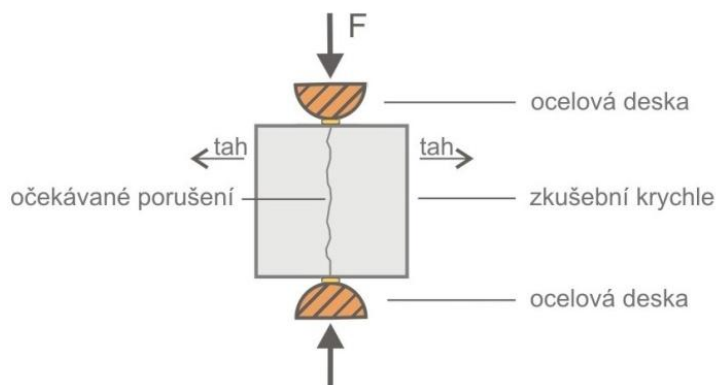
Zkoušení je prováděno na trámečcích, někdy i na válcích či jádrových vývrtech (obr. 12). Vždy je nutné testovat minimálně tři tělesa. Před vlastním zkoušením je třeba ověřit geometrii a tvar zkušebního tělesa. Nestandardně porušené vzorky je třeba ze zkoušky vyloučit – je u nich předpokládána chyba. Zkoušení betonu v prostém tahu se provádí málokdy. Je nutné ocelové desky přilepit ke vzorku, což zkoušku komplikuje. Přilepení musí mít vyšší pevnost, než je pevnost vzorku. Častější jsou zkoušky v tahu za ohybu, či v příčném tahu [12].



Obr. 12: Schéma zkoušky v prostém tahu [12]

1.12.1.5 Zkouška pevnosti v příčném tahu

Tělesa stejných rozměrů jako pro zkoušku v tlaku jsou vkládaná do lisu. Lis má uzpůsobené čelisti tak, že se do těles tlak přenáší bodově (zatížení je přenášeno středem tělesa). Prostřednictvím soustředěného tlakového zatížení jsou při této zkoušce (obr. 13) nepřímo vyvolávána tahová napětí (příčné tahové napětí je vyvoláno zakřivením isostatických čar) [12].

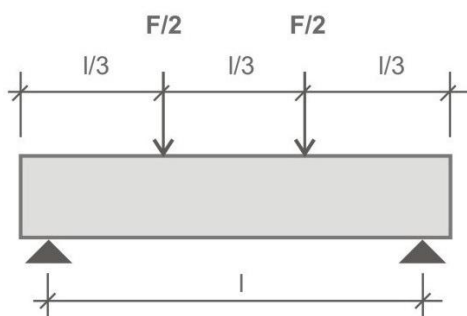


Obr. 13: Schéma zkoušky v příčném tahu [12]

1.12.1.6 Zkouška pevnosti v tahu za ohybu

Tato zkouška je prováděna na betonových trámečcích o rozměrech 160/40/40 mm či trámčích 400/150/150 mm. Je nutné vždy zkoušet minimálně tři vzorky. Před začátkem zkoušky je nutné zkontrolovat geometrii tělesa a dále ho správně vložit do lisu (zkušebního zařízení). Dle toho, jak je vzorek zatěžován rozlišujeme tři nebo čtyřbodové (obr. 14) uspořádání [12].

O pevnosti betonu v tahu za ohybu více vypovídá zkouška při čtyřbodovém uspořádání - vzorek je porušen ve střední třetině mezi oběma silami od zatížení. Jelikož jsou při tomto zatížení posouvající síly nulové, dojde v této oblasti k porušení čistým ohybem. Pokud je zkouška prováděna třibodovým uspořádáním, dochází vždy ke kombinaci smyku a ohybu. Z tohoto důvodu je čtyřbodové uspořádání vhodnější, ovšem na trámečcích 160/40/40 mm je neobvyklé, proto v praktické části budeme pevnost v tahu za ohybu testovat při třibodovém uspořádání [12].



Obr. 14: Schéma zkoušky v tahu za ohybu [12]

Jako další mechanické vlastnosti se určují moduly pružnosti. Ovšem popsání a zkoušení všech modulů pružnosti (statické, dynamické, v tlaku, v tahu za ohybu, destruktivní, nedestruktivní,...) by obsáhlo celou bakalářskou práci. Proto v této práci uvádím pouze zjištění dynamického modulu pružnosti pomocí ultrazvuku.

V praktické části budou některé mechanické zkoušky uvedeny. Konkrétně se bude jednat o destruktivní zkoušku v tahu za ohybu, destruktivní zkoušku v tlaku a nedestruktivní zkoušku pomocí ultrazvuku.

1.13 Sochařství

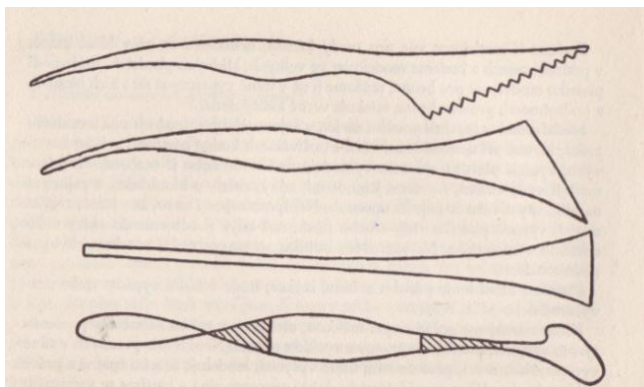
Je to druh výtvarného umění, které zobrazuje umělecké představy a skutečnost trojrozměrným objektem. Případně dociluje prostorovosti světelnými prostředky, plastickým náznakem, a tak dále [13].

1.13.1 Sochařské techniky, tradiční nástroje, tradiční materiál

Sochařství je děleno dle techniky na sochařství, které vytváří konečné dílo odebráním hmoty (například glyptika, kamenosochařství) a sochařství, které spočívá na principu přidávání hmoty a modelování (například kovolitectví, štukatérství) [13].

Dále může být děleno dle funkce, materiálu, pojetí a druhu [13]. Tato bakalářská práce se zabývá sochařstvím (odebráním hmoty).

Pro tradiční sochařství se jako nástroje používaly a stále používají modelovátka a špachtle, které jsou kostěné, dřevěné a železné (obr. 15). Konkrétně se používaly například hladítka, nůž a očko (obr. 15) [14].



Obr. 15: Dřevěná modelovátka: nůž, hladítka a očko [14]

Tradiční materiály a metody v sochaření jsou: tradiční sochaření z kamene, odlévání do sádry, odlévání sádrových modelů do kovů, odlévání a pěstování do cementových hmot, přenášení sádrových modelů do kamene a přenášení sádrových modelů do dřeva [14].

1.13.2 Klasické sochaření z cementu

V naší krajině se pro sochařské účely nejčastěji používá cement portlandský. Mezi nejdůležitější cementové vlastnosti patří: chemické složení, pevnost, objemové změny, jemnost mletí, barva [14].

Kdysi se při odlévání cementové plastiky používaly jako přísady hlavně žulové či mramorové prášky. Pro získání lesku bylo přidáváno jemně roztlučené sklo nebo slída. Aby bylo dosaženo napodobení přírodní barvy, přidávala se suchá barva v prášku (minium, okr, saze či jiné barvy) [14].

Na opracování se používaly štukatérské a kamenické nástroje, tj. škrabky, zanašečky, kovová modelovátka, zubáky, špičáky a podobně [14].

Cementová plastika se dá vytvářet dvěma způsoby: tekutým betonováním (cement s přísadami vytvoří kašovitou hmotu), nebo napěstováním cementové

masy „za sucha“ (cement s přísadami se jen mírně navlhčí vodou). Pokud si autor přeje, aby se objevila lesklá hmota napodobující mramor, žulu či pórovitý vápenec, je třeba zbavit se cementového povlaku [14].

Klasickou i moderní metodu sochařství z betonu vyznává řada českých i zahraničních umělců. Mezi nimi např. Olbram Zoubek, Lubomír Dostál a Josef Klimeš [17].

Olbram Zoubek léta pracoval s tzv. osinkocementem (azbestocement – dnes se již nepoužívá). V současné době používá beton, do něhož jsou přidána jiná, zdravotně nezávadná vlákna. Využívá metodu, která se nazývá tekuté betonování (obr. 16), což je kašovitá hmota litá do formy [17].



Obr. 16: Betonové sochy Olbrama Zoubka [17]

Lubomír Dostál využívá beton z důvodu jeho krásy a možností (obr. 17). Beton má velké možnosti zpracování: nahazování, vydusání základního nebo konečného tvaru do forem, odlévání, broušení, osekávání a barvení betonu, které umožňují variabilitu povrchových struktur. Na některé ze svých soch využívá beton prokládaný pletivem tloušťky cca 100 mm [17].



Obr. 17: Betonové sochy Lubomíra Dostála [17]

Josef Klimeš využívá techniku torkret – do připravené vyšalované formy s vloženou armaturou se zezadu nahazuje řídký beton zednickým způsobem, aby zpředu zůstal otisk po šalovaných prknech [17].

Kurt Gebauer například dával malou vrstvu betonu na jádro z polystyrenu a celek pak vypadal jako monolit [17].

1.13.3 Barevnost soch z cementových kompozitů

Barevný beton bývá někdy označen jako beton probarvený. Barevný beton vzniká volbou barvy kameniva, probarvením cementového tmelu pomocí pigmentů a kombinováním obou metod. Na finální odstín betonu má velký vliv použití běžného šedého nebo bílého cementu [15].

1.13.4 Moderní metody betonového sochařství

1.13.4.1 3D tisk

3D tisk je proces, při kterém je vytvářen fyzický model z digitální předlohy. Jedná se o aditivní proces, což znamená, že materiál je přidáván. To je rozdíl od obráběcích strojů, které materiál ubírají, než dosáhnou požadovaného tvaru [18].

Nejpoužívanější technologií je FDM, která funguje na velice jednoduchém principu. Materiál je přidáván vrstvu po vrstvě po tenkých proužcích, než vznikne konečný objekt. Tento proces si lze představit tak, že se model rozkrájí na plátky jako brambora, a poté se každý řez nakreslí pistolí na tavné lepidlo [18].

Beton podléhá hydrataci a tuhne, což je problém 3D tisku. Michal Kovářík, odborný asistent na Katedře technologie staveb Fakulty stavební ČVUT, se zabývá progresivními technologiemi a výrobou řízenou digitálními systémy a říká, že pokud má být tato technologie rozšířená do běžné stavební výroby, je nutné uvědomit si výhody i nedostatky této technologie. Za velice náročné považuje dosáhnout vysoké rychlosti tisku při zachování vysokého rozlišení [19].

Z tohoto důvodu je pro případ 3D tisku nutné dodat do cementového kompozitu přísady, které by zpomalily tuhnutí (fosfáty, lignosulfonáty, deriváty cukrů nebo oxycarbonových kyselin) nebo zajistit stálé míchání [19].

Ve stavebnictví se přemýšlí o rychleschnoucím betonu vyztuženém ocelovými vlákny. V současné době existují 3D tiskárny se speciálním vláknobetonem, který nepotřebuje podporu během stavby [20].

1.13.4.2 Lití hmoty do formy

Základem pro výrobu betonových prvků se vzorem je vytvoření otisku vzoru do pohledové plochy prvku. Tento otisk je vytvářen pomocí různých typů a druhů polymerových matic. Dále jsou používány atypické prvky, které jsou vkládány a vhodným způsobem upevněny na stěny resp. dno bednění. Takové matrice je vždy nutné vyrobit v negativní poloze, aby na prvku byl vytvořen pozitivní otisk [17].

Výroba polymerových matic je například založena na laserovém vypálení připravené grafiky do tenké uhlíkové vrstvy integrované na vlastním fotopolymeru. Abychom dosáhli úspěchu, je nutné mít dokonale připravenou a vyčištěnou formu opatřenou speciálním odformovacím prostředkem [17].

Pokud se vyrábí reliéfní panely (obr. 18), které často bývají určeny do exteriéru, je nutné použít betony vysokých pevností s chemickým složením, které zohledňuje stupeň vlivu prostředí, kde budou prvky umístěny [17].

Jsou používány pevnostní třídy C30/37 až C40/50, stupeň vlivu prostředí bývá zpravidla XC4, XF1. Nejlepších výsledků bývá dosaženo v kombinaci třídy betonu C35/45-XC4, XF1 [17].

Používají se lehce zhutnitelné betonové směsi, které obsahují dostatečné množství cementu, jemných příměsí a chemických přísad, aby se zaručilo dokonalé vyplnění formy, všech dutin a záhybů v matrici. Aby se odstranily vzduchové dutiny, je nutné zvolit dokonalou a účinnou vibraci [17].

Jak už bylo řečeno, tato metoda má nevýhodu v tom, že může být velice nákladná, protože pro každý vzor je třeba jedna forma [17].



Obr. 18: Příklad použití zdí s výtvarně řešeným reliéfem [17]

1.13.4.3 Robotické sochaření

Ačkoli robotické sochaření ještě není vyzkoumané, zahrnul jsem ho do kapitoly Moderní metody betonového sochařství.

Výzkumu robotického sochaření a zejména materiálu, který bude pro tuto techniku sochaření určen, bude věnována praktická část bakalářské práce.

Vize je taková, že za pomoci robotů bude ve směsi vytvořen vzor, který tam zůstane, protože směs již bude dostatečně tuhá, ale zároveň bude tak měkká, aby v ní bylo možné vzor vytvořit. Bude se tedy jednat o vytváření vzoru v čerstvé směsi, dle přání umělce.

1.13.5 Roboti určení pro sochaření

Jsou základem k tomu, aby byl digitální model přetvořen do fyzické podoby. Vyrobí formu pro beton netradičních tvarů bývá většinou velice nákladné, ale díky robotům to lze provést o mnoho levněji [21].

Charakteristika tohoto oboru spočívá v tom, že materiál je pomocí robotů odebírán a vzniká skulptura. Tento postup je zcela opačný, než např. 3D tisk. Roboti fungují na principu odebírání hmoty a 3D tisk naopak funguje na principu nanášení hmoty (výroba aditivní) [22].

Rameno robota, díky své kinematice pohybu, znamená přelomovou inovaci v možnostech vyrábění složitých prostorových tvarů. Rameno pracuje v sedmi osách v systému cylindrických nebo sférických souřadnic. Robotické rameno svou prací nahrazuje lidskou ruku, která má totožný počet stupňů volnosti za předpokladu použití ještě otočného stolu [22].

Většina strojů pro obrábění pracuje v kartézských (pravoúhlých) souřadnicích a nemůže tedy vyhovět požadavkům na prostorové tvary. Rameno je na posledním prvku (ekvivalent lidského zápěstí) opatřeno vřetenem, které nese některý rotační nástroj. Nástroje jsou určeny například pro lepení, sváření, uchopení, umístění, obrábění, rytí a tak dále [22].

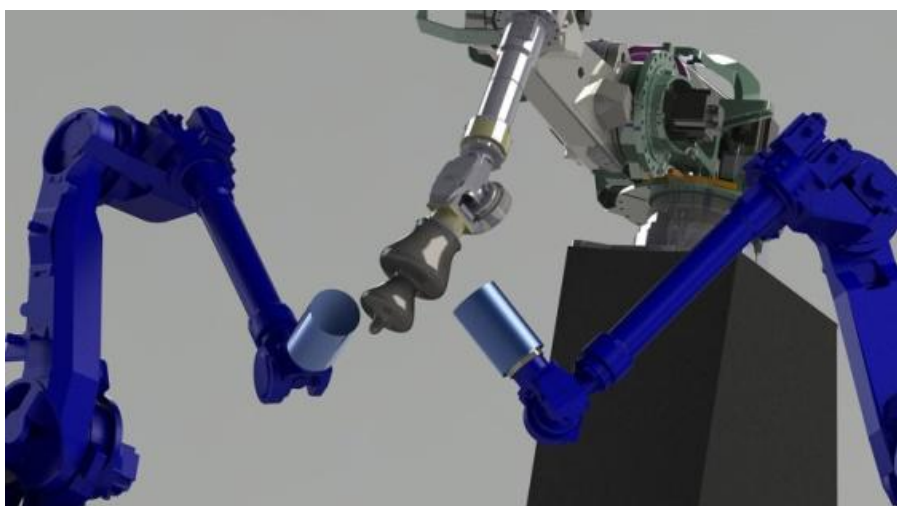
V našem případě, tedy vytváření vzoru v čerstvé směsi, ponese vřetenem nástroj určený pro rytí, vlačování apod. Rycí šířka může být od velmi úzké do široké v rozmezí, které závisí na umělcově požadavku. Rycí hloubka může být jen estetická, ale i funkční [22].

Úlohou této bakalářské práce je rytí či vlačování nástrojů do čerstvé betonové směsi. Nejedná se tedy o obrábění ztvrdlé směsi.

Robotické rameno a jeho provoz je především technologickou a technickou záležitostí. Je třeba určit technologický postup, který je nejvhodnější pro konkrétní dílo. Z toho důvodu je třeba mít dobré znalosti pracovního postupu sochaře, které je třeba akceptovat pro práci nástrojů [22].

Nástroje si stroj vyměňuje sám. Pracuje v zásadě v režimu opracování hrubého a opracování jemného. Rameno (obr. 19) umí pracovat až s extrémní přesností 0,05 mm [22].

Díky spojitosti skeneru a modelování lze potom vyrábět a také restaurovat díla bez dotyku lidské ruky [22].



Obr. 19: Příklad robota Robotic Composite Making [36]

2 PRAKTICKÁ ČÁST

V praktické části bakalářské práce byl použit kvalitativní výzkum, který byl proveden na sedmi směsích, které budou dále popsány.

2.1 Cíle praktické části

1. Návrh ideální konzistence směsi určené pro robotické sochaření. Konzistence má mít vlastnosti SCC. Snahou je vytvoření suché směsi, která se poté smíchá s vodou dle ideálního vyzkoumaného vodního součinitele. Chceme navrhnout takovou směs, která bude mít parametry vysokohodnotného betonu.
2. Podrobit vzorky z těchto směsí mechanickým zkouškám – prostý tlak, tah za ohybu a zkouška ultrazvukem.
3. Zkoumání objemových změn směsi. Závislost objemových změn na čase při změně dávky superplastifikátoru.

2.2 Výzkumné otázky

1. Jaká je ideální konzistence směsi určené pro robotické sochaření?
2. Jaké má tato směs mechanické vlastnosti?
3. Jaké má tato směs objemové změny?

2.3 Návrh konzistence směsi

2.3.1 Složky zkoumané směsi

Naše konkrétní směs se skládá z cementu, písku, jedné příměsi a jedné přísady. Dohodli jsme se, že cement (obr. 20) bude portlandský, v třídě pevnosti 42,5 MPa a rychlovazný (CEM I 42,5 R). Písek je jemný křemičitý (obr. 20). Směs obsahuje dvě frakce písku, konkrétně frakci 0,1 – 0,6 mm a frakci 0,3 – 0,8 mm. Jako příměs je zvolena mikrosilika (obr. 21), která je dominantně tvořena SiO_2 s dalšími příměsemi. Příklad tvoří superplastifikátor carboxylether (obr. 21).



Obr. 20: Použitý cement CEM I 42,5 R a křemičitý písek frakce 0,1 – 0,6 mm a 0,3 – 0,8 mm [37]



Obr. 21: Použitá příměs mikrosilika a použitá přísada carboxylether [37]

Směs je navržena takto, protože jedním ze záměrů je vytvořit vysokohodnotný beton. Důvodem proč chceme vytvořit vysokohodnotný beton, je to, že má oproti běžnému betonu lepší trvanlivost. Pro naše účely potřebujeme trvanlivost co nejlepší [33].

Trvanlivost betonu je obecný název pro odolnost betonu proti fyzikálním nebo chemickým agresivním vlivům. Vysokohodnotný beton má dobrou trvanlivost proto, že má nízký vodní součinitel a tím zrna cementu blíže u sebe než běžný beton. Obsahuje tedy méně pórů, než beton běžný. Čím méně pórů, tím je beton trvanlivější. Redukci pórovitosti způsobuje redukce dávky vody [33].

Vysokohodnotný beton se skládá z kameniva, které má velikost zrna maximálně kolem 1 mm a s vysokým obsahem SiO_2 . Proto je vhodný křemičitý písek. Dále se skládá z jemně mletého cementu, nejlépe CEM I (portlandský)

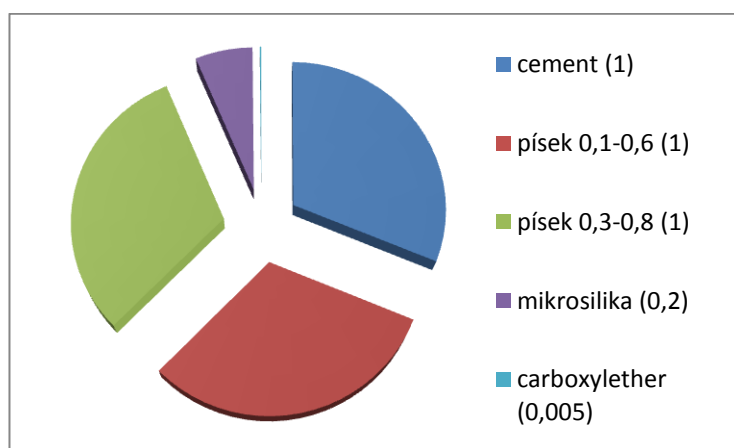
s minimální pevnostní třídou 42,5. Směs také musí obsahovat minerální příměsi a plastifikační přísady. Všechny tyto složky naše směs obsahuje. Dále je to takový beton, který má některou vylepšenou vlastnost a vodní součinitel nižší než 0,4 [33].

Konkrétně jsme chtěli dosáhnout vysokopevnostního betonu (HSC). To je takový beton, který má pevnostní třídu v tlaku vyšší než C 50/60 pro obyčejný beton. Je to podmnožina vysokohodnotného betonu (HPC) [33].

Ultra-vysokopevnostní beton (UHPC) je podmnožinou ultra-vysokohodnotného betonu a jeho charakteristická tlaková pevnost je vyšší než 150 MPa. Tato hranice není nikde přesně dána a v mnoha podkladech se objevují různé hodnoty pro tuto pevnost. Některé zdroje uvádějí, že UHPC je již od pevnosti v tlaku 120 MPa [33].

2.3.2 Dávkování složek

Při dávkování složek vycházíme z toho, že pro naše účely chceme konzistenci, jakou má samozhutnitelný beton. To chceme proto, aby ve směsi nebyly vzduchové bubliny a dobře se rozlila. Předběžné představy byly takové, že se do směsi dá jeden díl cementu, jeden díl písku 0,1 – 0,6 mm, jeden díl písku 0,3 – 0,8 mm, 0,2 dílu mikrosiliky a 0,005 dílu carboxyletheru, jak je znázorněno na obr. 22.



Obr. 22: Poměr složek ve směsi 1 [37]

Aby se docílilo samozhutitelné směsi, je třeba při zkoušce na střešacím stolku dosáhnout hodnoty rozlití betonového koláče 22 – 25 cm v jeho průměru.

Zkouška na konzistenci cementové směsi se provádí tak, že se nejprve všechny potřebné složky naváží a vloží do nádoby na míchání. Snaha je taková, aby složky s větším podílem jemných částic (mikrosilika) byly pod složkami s větším podílem hrubších částic (písek frakce 0,3 – 0,8 mm), aby se jemnější částice nemohli vyprašovat pryč z nádoby. Složky se poté zasucha lehce promíchají, aby došlo k jejich smísení. Toto míchání probíhá zhruba jednu minutu. Poté se za stálého míchání začne lehce přilévat voda z odměrného válce (obr. 23).



Obr. 23: Míchání směsi [37]

Když se zdá, že už by konzistence mohla být samozhutitelná, přestane se voda přilévat. Dle normy musí od doby, kdy se do směsi přidá voda, do doby než se začne se zkouškou rozlitím uplynout deset minut. Po deseti minutách je možné nalít směs do navlhčeného kužele na navlhčeném střešacím stolku. Kužel musí být směsí zcela naplněn. Přebytečná směs se odstraní zednickou lžící. Poté se kužel opatrně a pomalu zvedne ve směru své vertikální osy. Pro dosažení rozlití jako má samozhutitelná směs se nepoužívá patnácti nárazů, ale směs se nechá rozlít sama od sebe. Po zvednutí kužele se čeká zhruba jednu minutu,

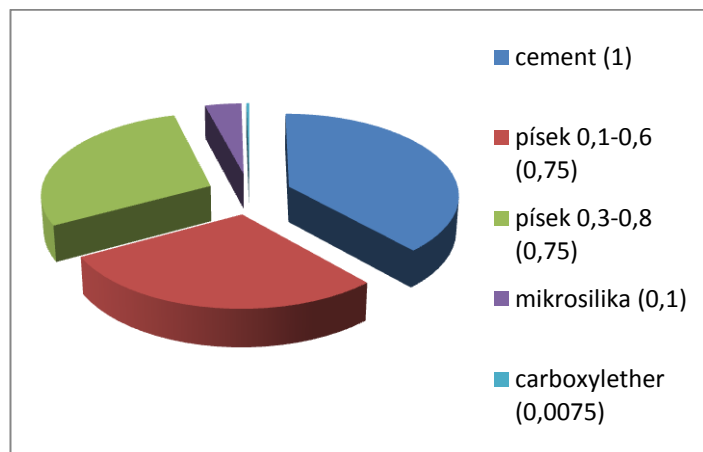
a poté se změří průměr rozlití koláče. Z toho se vyvodí závěr zkoušky. Aby byla zkouška objektivní, musí se měření provést alespoň dvakrát. Směs ze střešovacího stolku se nesmí vrátit zpět do nádoby na míchání, ale dle normy se musí udělat směs nová a provést měření znovu. To platí i pro případ, kdy nám směs nevyhovuje. Vždy je nutné udělat směs novou.

Měření rozlitím na střešacím stolku jsme provedli pro výše uvedenou směs (obr. 22). Po zvednutí kužele a minutě čekání byl průměr rozlitého koláče zhruba 12 cm, jak je možné vidět na obr. 24. Taková směs nelze označit jako samozhutnitelná, proto bylo třeba navrhnout směs s jiným poměrem složek. Vodní součinitel této směsi byl 0,33. Bylo jasné, že vodní součinitel je již dost vysoký a další přidávání vody by nemělo na konzistenci takový vliv. Proto jsme přistoupili k jinému dávkování složek směsi.



Obr. 24: Rozlití směsi 1 na střešacím stolku [37]

Po této zkušenosti jsme se dohodli, že zkusíme směs, která bude obsahovat 1 díl cementu, 0,75 dílu písku 0,1 – 0,6 mm, 0,75 dílu písku 0,3 – 0,8 mm, 0,1 dílu mikrosiliky a 0,0075 dílu carboxyletheru, jak je znázorněno na obr. 25.



Obr. 25: Poměr složek ve směsi 2 [37]

Pro tuto směs (pracovně označena jako směs 2) jsme opět provedli zkoušku na střešacím stolku. Směs jsme nalili do navlhčeného kužele na navlhčeném střešacím stolku a poté kužel zvedli. Směs za jednu minutu vytvořila koláč o průměru 22 cm. Po dalších dvou minutách měl koláč průměr dokonce 25 cm, jak znázorňuje obr. 26. Vodní součinitel této směsi byl 0,26 a ukázal se pro tento poměr složek jako ideální.



Obr. 26: Rozlité směsi 2 na střešacím stolku za 1 minutu a za 3 minuty [37]

Jelikož tato směs vytvořila konzistenci, jakou jsme si přáli, dohodli jsme se, že se jí budeme nadále držet. Tedy 1 díl cementu CEM I 42,5 R, 0,75 dílu písku frakce 0,1 – 0,6 mm, 0,75 dílu písku frakce 0,3 – 0,8 mm a 0,1 dílu mikrosiliky.

Přísadu carboxylether budeme postupně zvyšovat, abychom mohli zkoumat závislost objemových změn a pevnosti na čase při změně dávky superplastifikátoru. Přísadu budeme dávkovat dále v poměru 1%, 1,5%, 2%, 2,5% a 3% k dávce cementu. Podle toho se nám bude měnit vodní součinitel, abychom stále měli samozhutnitelnou směs.

Pro další směs (pracovně označena jako směs 3) jsme použili stejné složení cementu, písku a mikrosiliky jako u předchozí směsi. Pouze carboxylether byl dávkován v poměru 1% k objemu cementu a tomu bylo třeba přizpůsobit vodní součinitel. Opět jsme provedli zkoušku na střešacím stolku (obr. 27). Pro dosažení samozhutnitelnosti jsme použili vodní součinitel v hodnotě 0,24. Při zkoušce na střešacím stolku jsme dosáhli rozlití 22 cm.



Obr. 27: Rozlití směsi 3 na střešacím stolku za 1 minutu [37]

Další směs (pracovně označena jako směs 4) měla opět stejné složení, pouze carboxylether byl dávkován 1,5% k objemu cementu. Tomu se přizpůsoboval vodní součinitel, který nám vyšel 0,22. Rozlití směsi bylo přibližně 20 cm (obr. 28).



Obr. 28: Rozlití směsi 4 na střešacím stolku za 1 minutu [37]

Směs 5 obsahovala 2% carboxyletheru. Vodní součinitel vyšel 0,21 při rozlití směsi okolo 24 cm (obr. 29).



Obr. 29: Rozlití směsi 5 na střešacím stolku za 1 minutu [37]

Směs 6 obsahovala 2,5% carboxyletheru. Vodní součinitel vyšel 0,205 při rozlití směsi okolo 19 cm. Další směs, označena jako směs 7 obsahovala 3,0% přísady, vodní součinitel vyšel 0,20 při rozlití směsi kolem 20 cm.

Při posledním pokusu na konzistenci (směs označena jako 1b) jsme zkusili dávkovat superplastifikátor jako na začátku pokusů, tedy 0,5% k objemu cementu.

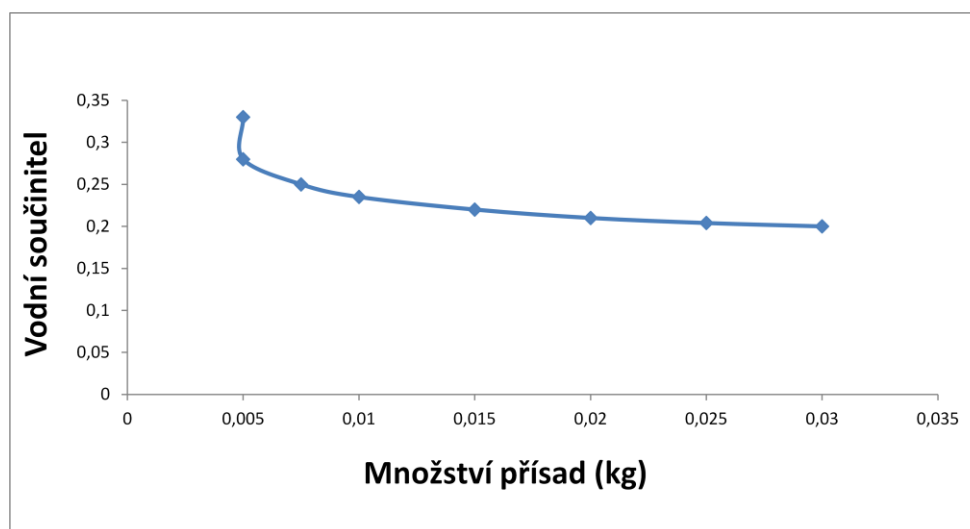
Poměr ostatních složek jsme ponechali jako u předchozích pokusů. Pro dosažení samozhutnitelnosti nám vodní součinitel vyšel 0,28 při rozlití směsi kolem 22 cm.

Pro lepší představu o směších, vodních součinitelích a průměrech rozlití, přikládám tabulku, kde jsou tyto údaje přehledně znázorněny. V tabulce je znázorněný poměr složek v suché směsi a nutný vodní součinitel pro dosažení samozhutnitelné konzistence (tab. 1):

| SMĚS | MNOŽ. | MNOŽ. | MNOŽ. | MNOŽ. | MNOŽ. | VODNÍ | PRŮMĚR |
|-----------|-------|--------------|--------------|---------|-----------|--------------|---------|
| | CEM. | PÍS. 0,1-0,6 | PÍS. 0,3-0,8 | MIKROS. | PŘÍS. | SOUČ. | ROZLITÍ |
| 1 | 1 kg | 1 kg | 1 kg | 0,2 kg | 0,005 kg | 0,33 | 12 cm |
| 1b | 1 kg | 0,75 kg | 0,75 kg | 0,1 kg | 0,005 kg | 0,28 | 22 cm |
| 2 | 1 kg | 0,75 kg | 0,75 kg | 0,1 kg | 0,0075 kg | 0,26 | 22 cm |
| 3 | 1 kg | 0,75 kg | 0,75 kg | 0,1 kg | 0,010 kg | 0,24 | 22 cm |
| 4 | 1 kg | 0,75 kg | 0,75 kg | 0,1 kg | 0,015 kg | 0,22 | 20 cm |
| 5 | 1 kg | 0,75 kg | 0,75 kg | 0,1 kg | 0,020 kg | 0,21 | 24 cm |
| 6 | 1 kg | 0,75 kg | 0,75 kg | 0,1 kg | 0,025 kg | 0,205 | 19 cm |
| 7 | 1 kg | 0,75 kg | 0,75 kg | 0,1 kg | 0,030 kg | 0,20 | 20 cm |

Tab. 1: Poměr složek ve zkoumaných směších

Na obr. 30 je důkaz, že čím více superplastifikátoru se přidá, tím je vodní součinitel menší. Ovšem v určitém čase dojde k tomu, že přidání superplastifikátoru nemá na vodní součinitel už takový vliv, jak ukazují poslední řádky tabulky 1.



Obr. 30: Velikost vodního součinitele v závislosti na přísadách [37]

2.3.3 Zpracovatelnost

S konzistencí úzce souvisí zpracovatelnost směsi. Pro běžné používání v praxi je důležitá dobrá zpracovatelnost, a proto jsme se jí v praktické části také zabývali. Pro naše účely je také důležité, aby se se směsí dalo pracovat dlouho a sochař mohl vytvářet vzor i několik hodin, než začne tuhnoutí. Právě proto byl dávkován superplastifikátor carboxylether.

Zkoušky na zpracovatelnost jsme prováděli tak, že jsme si připravili vždy čerstvou směs (směsi 1b až 7) a přelili jsme ji do čtyř nádob tak, aby v každé nádobě bylo přibližně stejné množství směsi. Postupně jsme směsi v nádobách testovali na střešacím stolku a zkoumali jsme průměr rozlití. Testování probíhalo vždy po 5, 15, 60 a 120 minutách, abychom získali představu o závislosti zpracovatelnosti na čase. Testování probíhalo jak s poklepem, tak bez poklepu na střešacím stolku.

Všechny tyto závislosti včetně výsledků zkoušek jsou uvedeny v tab. 2, která je na konci této kapitoly.

Z tabulky je zřejmé, že po delším čase po smíchání s vodou se směs rozlije méně. Také se často vyskytuje jev, že čím více se konkrétní směs testuje, tím více se rozlije. Nejméně časové závislosti podléhá směs 2. Dále byla na těchto vzorcích zkoušena pevnost. Směs byla do forem uložena až po dvou hodinách, po ukončení zkoušky na zpracovatelnost. Dle našich předpokladů by měla charakteristická pevnost v tahu za ohybu i v tlaku vyjít přibližně stejně jako v průkazních zkouškách. To z toho důvodu, že při těchto konzistencích počítáme s tím, že tuhnutí započne až za několik hodin.

Vodní součinitelé u některých směsích jsou již tak nízké, že experiment může negativně ovlivnit například i více navlhčený kužel a střešací stůlek, či více navlhčená nádoba.

| Označení vzorku | Vodní součinitel v/c | Obsah plastifikátoru [%] | Před/po poklepu střešním stolkem | Uplývání doba od smíchání směsi s vodou [min] | | | | | | | | | | | | Pevnost v tlaku [MPa] | | | Pevnost v tahu za ohybu [MPa] | |
|-----------------|----------------------|--------------------------|----------------------------------|---|------|------|------|------|------|--|------|------|------|---------------|----------------|-----------------------|---------------|----------------|-------------------------------|----------|
| | | | | 60 | | | 120 | | | Násobnost znovupoužití vzorku od začátku zkoušky | | | | | | 1-denní | 7-denní | 28-denní | 1-denní | 28-denní |
| | | | | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 4 | | | | | | | |
| | | | | Velikost rozlité kůže [cm] | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1b | 0,28 | 0,50 | před | 19,5 | 13,0 | 14,0 | 10,5 | 11,0 | 11,5 | 9,5 | 10,0 | 10,0 | 10,5 | 41,9 | 101,3 (8. den) | 111,3 (32. den) | 8,4 | 17,6 (32. den) | | |
| | | | | 21,5 | 16,5 | 17,0 | 14,0 | 15,0 | 15,0 | 12,5 | 13,0 | 14,5 | 14,5 | | | | | | | |
| 2 | 0,26 | 0,75 | před | 16,0 | 19,0 | 19,5 | 17,5 | 16,0 | 16,0 | 15,5 | 16,5 | 17,0 | 17,5 | 37,2 | 95,0 (8. den) | 106,9 (32. den) | 7,7 | 21,8 (32. den) | | |
| | | | | 18,5 | 22,0 | 23,0 | 20,5 | 20,5 | 20,0 | 18,5 | 21,0 | 21,0 | 21,0 | | | | | | | |
| 3 | 0,24 | 1,00 | před | 19,0 | 17,5 | 18,5 | 17,5 | 16,0 | 18,0 | 14,0 | 16,5 | 14,5 | 16,0 | 23,8 | 100,0 (8. den) | 114,1 (32. den) | 5,2 | 20,8 (32. den) | | |
| | | | | 22,0 | 20,0 | 21,0 | 20,5 | 18,5 | 20,5 | 19,5 | 19,5 | 17,0 | 18,5 | | | | | | | |
| 4 | 0,22 | 1,50 | před | 14,0 | 14,5 | 15,5 | 13,0 | 14,0 | 14,0 | 13,0 | 13,0 | 13,5 | 14,0 | 73,1 (2. den) | 75,0 | 108,4 (30. den) | 11,9 (2. den) | 23,9 (30. den) | | |
| | | | | 15,0 | 16,0 | 17,0 | 15,0 | 15,5 | 15,5 | 14,5 | 14,5 | 15,5 | 16,5 | | | | | | | |
| 5 | 0,21 | 2,00 | před | 16,0 | 14,5 | 14,0 | 14,0 | 14,0 | 15,0 | 13,5 | 14,0 | 14,5 | 14,5 | 53,8 (2. den) | 86,3 | 120,0 (30. den) | 9,9 (2. den) | 24,3 (30. den) | | |
| | | | | 17,0 | 16,0 | 15,5 | 16,0 | 16,0 | 16,5 | 15,0 | 15,5 | 16,0 | 16,5 | | | | | | | |
| 6 | 0,205 | 2,50 | před | 14,0 | 14,5 | 13,0 | 12,5 | 13,0 | 13,0 | 12,0 | 13,0 | 13,5 | 13,5 | 94,4 (5. den) | 104,4 | 110,9 (29. den) | 11,9 (2. den) | 25,3 (30. den) | | |
| | | | | 15,5 | 16,5 | 15,0 | 13,5 | 14,0 | 14,5 | 13,0 | 14,5 | 14,5 | 14,5 | | | | | | | |
| 7 | 0,20 | 3,00 | před | 16,0 | 14,0 | 13,5 | 12,5 | 13,0 | 13,5 | 12,0 | 13,0 | 13,0 | 13,5 | 88,8 (5. den) | 103,8 | 123,1 (29. den) | 11,9 (2. den) | 25,5 (29. den) | | |
| | | | | 17,5 | 14,5 | 15,0 | 13,5 | 14,0 | 14,5 | 13,0 | 14,0 | 14,0 | 14,5 | | | | | | | |

Tab. 2: Výsledky zkoušek na zpracovatelnost

2.4 Mechanické vlastnosti vzorků

2.4.1 Použité mechanické zkoušky

V praktické části bakalářské práce se používaly některé mechanické zkoušky, kterým byl věnován popis v teoretické části práce. Konkrétně se jednalo o destruktivní zkoušku v tahu za ohybu (obr. 31) na trámečcích vzorků 40/40/160 mm.



Obr. 31: Zkouška vzorků v tahu za ohybu [37]

Po zkoušce v tahu za ohybu zůstane z trámečku přibližně jeho polovina, na které se provádí zkouška v tlaku (obr. 32). Tlačná plocha, která na vzorek působí má rozměry 40x40 mm.



Obr. 32: Zkouška vzorků v tlaku [37]

Každá zkouška se musí provést alespoň třikrát, aby byl výsledek objektivní. Z tohoto důvodu se od každé směsi vždy vytvořili čtyři trojice trámečků (obr. 33), tři pro vyhotovení průkazních zkoušek a jedna jako rezerva.



Obr. 33: Tři sady trámečků a jedna rezerva [37]

Zkoušky byly prováděny vždy v různých dobách po vyhotovení vzorku, abychom měli představu o nárůstu pevnosti a mechanických vlastnostech vzorku. Konkrétně se tah za ohybu a tlak testovaly po 1 – 3 dnech v závislosti na dávce superplastifikátoru, dále po týdnu a nakonec po 28 dnech.

Dále byla prováděna nedestruktivní zkouška rovnoměrnosti vzorku pomocí ultrazvuku (obr. 34). Tato zkouška byla prováděna ihned po odbednění vzorku, ještě než se přistoupilo k destruktivním zkouškám.



Obr. 34: Nedestruktivní zkouška pomocí ultrazvuku [37]

2.4.2 Výsledky mechanických zkoušek

První mechanické zkoušky (tah za ohybu + tlak) byly prováděny na směsích, na kterých byla zkoušena konzistence. Zde se ještě nejednalo o zkoušky průkazní, ale dělali jsme je proto, abychom měli přibližnou představu o budoucích pevnostech směsi. Proto jsou zkoušky dělány pouze na několika vzorcích. Zde je výsledek těchto zkoušek (tab. 3):

| VZ. | PEVN. V TAHU ZA OHYBU PO (Mpa): | | | | | PEVNOST V TLAKU PO (Mpa): | | | | | POZN.: | |
|-----|---------------------------------|-------|-------|------|-------|---------------------------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|
| | 24 H. | 48 H. | 72 H. | 7 D. | 28 D. | 24 H. | 48 H. | 72 H. | 7 D. | 28 D. | PŘÍS.: | V.S.: |
| 1 | 6,3 | - | - | - | 19,4 | 40,6 | - | - | 86,6 | 116,3 | 0,50% | 0,33 |
| 1b | 6,7 | - | - | - | 17,8 | 45,9 | - | - | 100,0 | 125,0 | 0,50% | 0,28 |
| 2 | - | - | 12,2 | - | 24,0 | - | - | 94,1 | 104,4 | 118,8 | 0,75% | 0,26 |
| 3 | 6,1 | - | - | - | 24,3 | 35,0 | - | - | 115,0 | 132,5 | 1,00% | 0,24 |
| 4 | 4,4 | - | - | - | 21,2 | 20,0 | - | - | 100,0 | 136,9 | 1,50% | 0,22 |
| 5 | - | 9,6 | - | - | 22,9 | - | 49,4 | - | 96,6 | 110,6 | 2,00% | 0,21 |
| 6 | - | 5,6 | - | - | 22,5 | - | 33,1 | - | 109,4 | 121,3 | 2,50% | 0,205 |
| 7 | - | 1,2 | - | - | 20,4 | - | 3,6 | - | 104,4 | 120,0 | 3,00% | 0,20 |

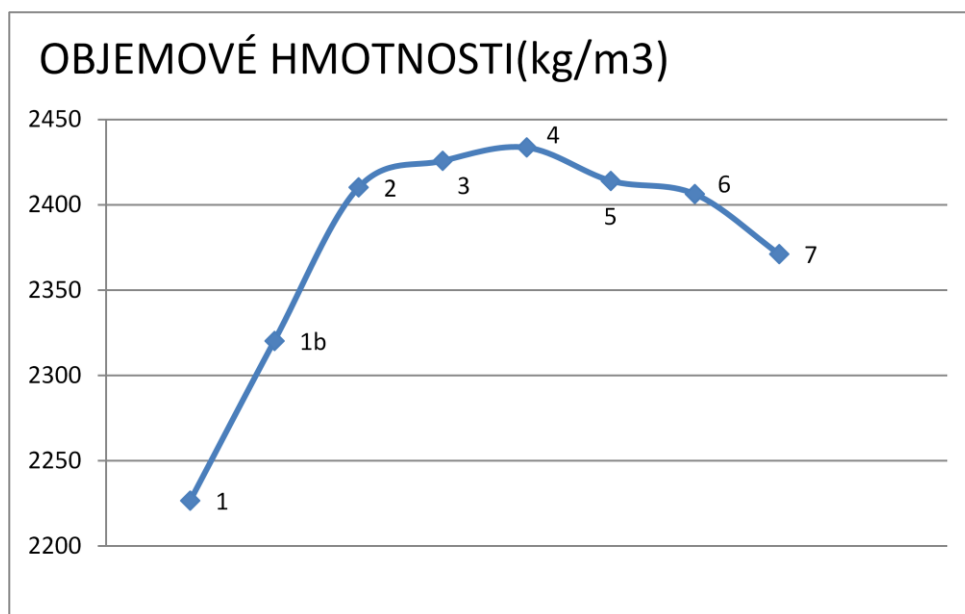
Tab. 3: Výsledky mechanických zkoušek na orientačních vzorcích

Z tabulky pevností je jasné, že čím více obsahuje směs superplastifikátoru, tím menší má v prvních dnech pevnost v tahu za ohybu i v tlaku. To se dá vysvětlit tím, že směs je v prvních dnech ještě tzv. „živá“. Čím více superplastifikátoru směs obsahuje, tím více je v prvních hodinách „živá“.

Průměrná objemová hmotnost těchto zkoušených těles vyšla následovně (tab. 4, obr. 35):

| VZ. | OBJ. HMOTN. (kg/m ³): | POZN.: | |
|-----|-----------------------------------|--------|-------|
| | | PŘÍS.: | V.S.: |
| 1 | 2 226,6 | 0,50% | 0,33 |
| 1b | 2 320,3 | 0,50% | 0,28 |
| 2 | 2 410,2 | 0,75% | 0,26 |
| 3 | 2 425,8 | 1,00% | 0,24 |
| 4 | 2 433,6 | 1,50% | 0,22 |
| 5 | 2 414,1 | 2,00% | 0,21 |
| 6 | 2 406,3 | 2,50% | 0,205 |
| 7 | 2 371,1 | 3,00% | 0,20 |

Tab. 4: Objemové hmotnosti orientačních vzorků



Obr. 35: Objemové hmotnosti orientačních vzorků [37]

Z hlediska objemových hmotností se jedná o tzv. obyčejný beton. Ten má objemovou hmotnost od 2 000 do 2 600 kg/m³ [4].

Z výsledků orientačních mechanických zkoušek je patrné, že se skutečně jedná o vysokopevnostní beton (HSC), jelikož všechny výsledky pevnosti v tlaku po 28 dnech jsou vyšší než 60 MPa. Některé vzorky z orientačních zkoušek by se dokonce daly označit jako ultra-vysokopevnostní beton (UHPC). Jsou to vzorky, které mají po 28 dnech pevnost v tlaku vyšší než 120 MPa [33].

Pro vysokohodnotné betony existuje tabulka (tab. 5) závislosti tlakové pevnosti na hodnotě vodního součinitele. Tento princip založený na vodním součiniteli je pilířem vysokohodnotných betonů [33]

| Vodní součinitel | Očekávaná tlaková pevnost (MPa) |
|------------------|---------------------------------|
| 0,40 - 0,35 | 50 - 75 |
| 0,35 - 0,30 | 75 - 100 |
| 0,30 - 0,25 | 100 - 125 |
| 0,25 - 0,20 | > 125 |

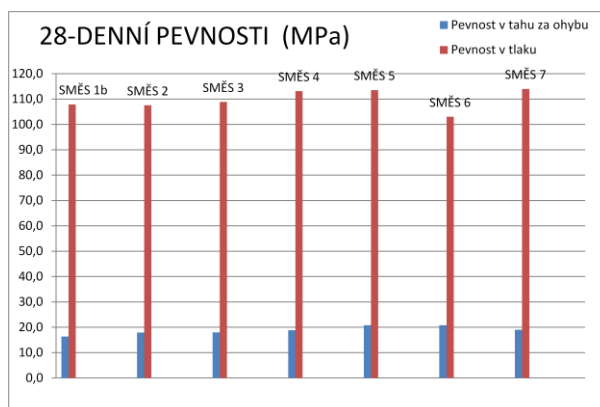
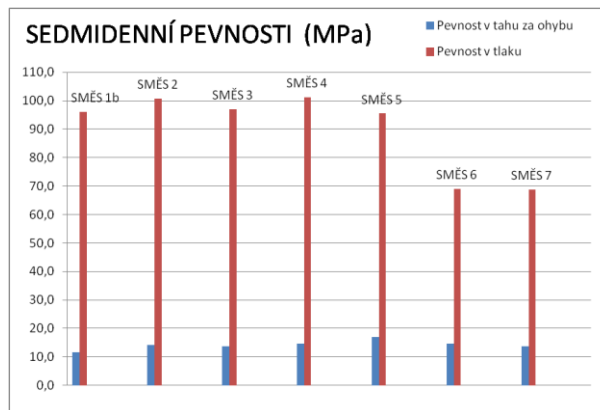
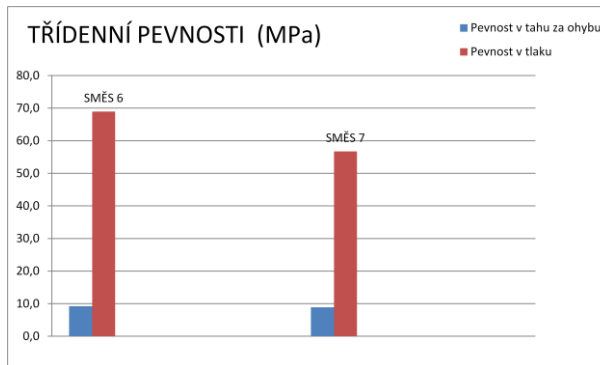
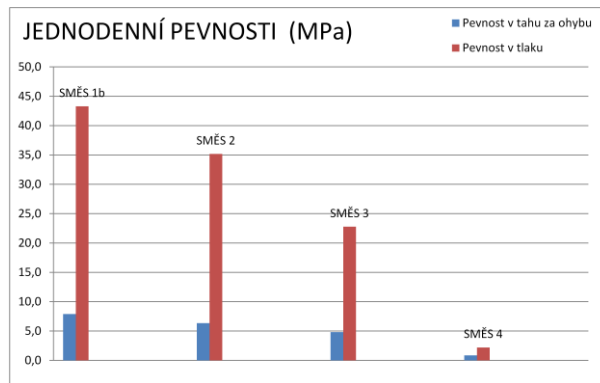
Tab. 5: Závislost tlakové pevnosti na vodním součiniteli HPC

Dále jsme se věnovali průkazným zkouškám. Jsou to zkoušky, kterými se dokazuje, že cementový kompozit určité konzistence vyhoví technickým požadavkům na čerstvou i ztvrdlou směs, za předpokladu použití totožných materiálů a podmínek výroby směsi [34].

Vzorky směsí jsme opět testovali v tahu za ohybu a tlaku na trámečcích o rozměrech 160/40/40 mm. Všechny směsi (1b - 7) jsme nalili do čtyř forem, abychom mohli vždy vzorky testovat třikrát a dostat objektivní výsledky. Čtvrtá forma byla naplněna kvůli případné rezervě. Vzorky byly opět testovány po 1-3 dnech v závislosti na dávce superplastifikátoru, dále po 7 a 28 dnech. Výsledky průkazných zkoušek opět přikládám v tab. 6 a na obr. 36.

| OZN. PRÍSLADY [%] | W/C | JEDNOUŠERNÍ ZKOUSKY | | | | | | | | | | SEDMIRERNÍ ZKOUSKY | | | | | | | | | | OSMADJACETIBERNÍ ZKOUSKY | | | | | | | | | | Třída |
|---|------|---------------------|--------|-------------------------|--------------------------|---------------|---------|-----------------|------|------|-------|--------------------|-------------------------|--------------------------|---------------|---------|-----------------|-------|------|-------|--------|--------------------------|--------------------------|---------------|---------|-----------------|-------|------|-------|--|--|-------|
| | | m [g] | h [mm] | Pv [kg/m ³] | ρPv [kg/m ³] | PEVNOST [Mpa] | V TLAKU | Ø PEVNOST [Mpa] | OHVB | TLAK | m [g] | h [mm] | Pv [kg/m ³] | ρPv [kg/m ³] | PEVNOST [Mpa] | V TLAKU | Ø PEVNOST [Mpa] | OHVB | TLAK | m [g] | h [mm] | Pv [kg/m ³] | ρPv [kg/m ³] | PEVNOST [Mpa] | V TLAKU | Ø PEVNOST [Mpa] | OHVB | TLAK | | | | |
| 1b | 0,28 | 606 | 41,58 | 2,277 | 7,7 | 43,8 | 41,3 | 7,9 | 43,3 | 598 | 40,45 | 2,309 | 2,317 | 10,5 | 86,9 | 98,1 | 11,5 | 96,0 | 593 | 40,35 | 2,296 | 16,1 | 118,9 | 105,0 | 17,9 | 111,3 | 103,8 | 16,3 | 107,9 | | | |
| | | 599 | 40,33 | 2,321 | 8,0 | 45,6 | 40,3 | 7,9 | 43,3 | 594 | 40,42 | 2,296 | 2,317 | 11,2 | 86,4 | 97,8 | 11,5 | 96,0 | 601 | 40,43 | 2,322 | 2,311 | 17,9 | 111,3 | 103,8 | 16,3 | 107,9 | | | | | |
| | | 605 | 40,95 | 2,308 | 8,1 | 42,5 | 46,3 | 7,9 | 43,3 | 606 | 40,35 | 2,345 | 2,317 | 12,7 | 86,4 | 97,8 | 11,5 | 96,0 | 597 | 40,33 | 2,314 | 15,0 | 100,6 | 103,8 | 16,3 | 107,9 | | | | | | |
| 2 | 0,26 | 606 | 41,08 | 2,305 | 6,2 | 35,3 | 35,8 | 6,4 | 34,4 | 599 | 40,35 | 2,319 | 2,327 | 13,9 | 99,4 | 99,7 | 14,1 | 100,7 | 603 | 40,06 | 2,353 | 19,2 | 96,4 | 102,5 | 17,9 | 107,5 | | | | | | |
| | | 602 | 41,38 | 2,273 | 6,4 | 34,4 | 34,7 | 6,4 | 34,4 | 613 | 41,06 | 2,332 | 2,327 | 14,7 | 104,4 | 100,0 | 14,1 | 100,7 | 609 | 40,15 | 2,393 | 16,0 | 96,4 | 102,5 | 17,9 | 107,5 | | | | | | |
| | | 596 | 40,24 | 2,314 | 6,5 | 35,6 | 35,3 | 6,4 | 34,4 | 600 | 40,25 | 2,330 | 2,327 | 13,7 | 96,3 | 104,4 | 14,1 | 100,7 | 609 | 40,31 | 2,359 | 18,7 | 115,6 | 116,9 | 18,8 | 108,1 | 121,9 | 19,0 | 114,0 | | | |
| 3 | 1,0 | 594 | 40,50 | 2,292 | 4,8 | 23,1 | 23,4 | 4,8 | 22,8 | 605 | 40,84 | 2,315 | 2,318 | 13,7 | 97,2 | 98,8 | 13,8 | 96,9 | 612 | 41,47 | 2,307 | 19,0 | 101,3 | 115,0 | 18,0 | 108,9 | | | | | | |
| | | 595 | 40,52 | 2,294 | 4,7 | 22,8 | 23,8 | 4,8 | 22,8 | 611 | 41,25 | 2,315 | 2,318 | 14,0 | 96,9 | 96,9 | 13,8 | 96,9 | 605 | 40,73 | 2,330 | 17,6 | 106,9 | 110,0 | 18,0 | 108,9 | | | | | | |
| | | 596 | 40,65 | 2,291 | 5,0 | 22,0 | 21,6 | 4,8 | 22,8 | 607 | 40,79 | 2,325 | 2,318 | 14,0 | 96,9 | 96,9 | 13,8 | 96,9 | 605 | 41,08 | 2,303 | 17,6 | 106,9 | 110,0 | 18,0 | 108,9 | | | | | | |
| 4 | 1,5 | 609 | 41,59 | 2,288 | 0,9 | 1,9 | 2,3 | 0,9 | 1,9 | 619 | 42,07 | 2,298 | 2,307 | 14,3 | 111,3 | 105,0 | 14,5 | 101,1 | 628 | 42,17 | 2,328 | 19,0 | 123,1 | 119,4 | 18,8 | 113,1 | | | | | | |
| | | 624 | 41,70 | 2,338 | 0,8 | 2,1 | 2,1 | 0,9 | 1,9 | 619 | 42,14 | 2,295 | 2,307 | 14,8 | 91,9 | 98,8 | 14,5 | 101,1 | 629 | 42,19 | 2,330 | 20,0 | 102,3 | 113,1 | 18,8 | 113,1 | | | | | | |
| | | 609 | 41,36 | 2,301 | 0,9 | 2,4 | 2,5 | 0,9 | 1,9 | 611 | 41,01 | 2,330 | 2,307 | 14,5 | 93,8 | 103,8 | 14,5 | 101,1 | 629 | 41,87 | 2,348 | 17,5 | 111,3 | 109,4 | 18,8 | 113,1 | | | | | | |
| DVOUŠERNÍ ZKOUSKY | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | 2,0 | 620 | 42,09 | 2,303 | 7,6 | 55,0 | 52,5 | 7,8 | 52,8 | 601 | 40,76 | 2,305 | 2,291 | 17,8 | 90,0 | 101,9 | 17,0 | 95,5 | 605 | 40,98 | 2,308 | 20,7 | 102,5 | 115,6 | 20,7 | 102,5 | 115,6 | 20,8 | 113,5 | | | |
| | | 609 | 41,46 | 2,293 | 7,9 | 50,9 | 50,6 | 7,8 | 52,8 | 600 | 41,07 | 2,284 | 2,291 | 17,6 | 90,0 | 97,5 | 17,0 | 95,5 | 615 | 41,61 | 2,308 | 20,4 | 122,5 | 111,3 | 20,8 | 113,5 | | | | | | |
| | | 615 | 41,74 | 2,300 | 8,0 | 52,5 | 55,0 | 7,8 | 52,8 | 605 | 41,40 | 2,283 | 2,291 | 15,8 | 98,1 | 97,5 | 17,0 | 95,5 | 607 | 41,58 | 2,281 | 21,4 | 113,1 | 116,3 | 20,8 | 113,5 | | | | | | |
| TŘÍDEBNÍ ZKOUSKY | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 6 | 2,5 | 622 | 41,73 | 2,327 | 9,3 | 68,1 | 69,7 | 9,2 | 68,9 | 607 | 41,47 | 2,282 | 2,299 | 14,4 | 71,7 | 72,4 | 14,5 | 69,0 | 613 | 41,20 | 2,324 | 19,2 | 110,0 | 110,0 | 19,2 | 110,0 | 110,0 | 19,0 | 114,0 | | | |
| | | 610 | 41,12 | 2,317 | 9,3 | 69,3 | 70,6 | 9,2 | 68,9 | 620 | 41,75 | 2,320 | 2,299 | 13,6 | 67,9 | 66,7 | 14,5 | 69,0 | 622 | 42,34 | 2,294 | 20,7 | 97,5 | 93,25 | 20,8 | 103,0 | | | | | | |
| | | 602 | 40,58 | 2,318 | 9,1 | 65,0 | 70,9 | 9,2 | 68,9 | 616 | 42,04 | 2,289 | 2,299 | 15,7 | 66,1 | 66,1 | 14,5 | 69,0 | 608 | 41,23 | 2,303 | 22,5 | 106,25 | 108,125 | 20,8 | 103,0 | | | | | | |
| 7 | 3,0 | 605 | 40,89 | 2,310 | 9,2 | 52,5 | 53,1 | 8,9 | 56,7 | 598 | 40,98 | 2,280 | 2,270 | 13,6 | 71,3 | 61,3 | 13,6 | 88,8 | 595 | 40,98 | 2,268 | 18,8 | 120,0 | 110,0 | 18,8 | 108,1 | 121,9 | 19,0 | 114,0 | | | |
| | | 607 | 41,50 | 2,285 | 8,8 | 57,8 | 58,8 | 8,9 | 56,7 | 600 | 41,33 | 2,269 | 2,270 | 14,4 | 72,2 | 70,6 | 13,6 | 88,8 | 611 | 41,70 | 2,290 | 18,8 | 108,1 | 121,9 | 19,0 | 114,0 | | | | | | |
| | | 611 | 41,18 | 2,319 | 8,6 | 58,1 | 60,0 | 8,9 | 56,7 | 606 | 41,85 | 2,292 | 2,270 | 12,8 | 86,8 | 68,8 | 13,6 | 88,8 | 595 | 41,11 | 2,260 | 19,5 | 110,0 | 110,0 | 19,0 | 114,0 | | | | | | |
| OSMADJACETIBERNÍ ZKOUSKY | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| <input checked="" type="checkbox"/> VZORKY VYLOUČENÉ ZE ZKOUSKY KVŮLI PŘÍLIŠ VELIKÉ ODCHYLCE (VICE JAK 10%) OD PRŮMĚRU VÝSLEDKU MĚŘENÍ. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Tab. 6: Výsledky průkazných zkoušek



Obr. 36: Výsledky průkazných zkoušek v grafech [37]

Z výsledků průkazních zkoušek vyplývá, že nejlepší pevnostní vlastnosti má po 28 dnech směs 5 a 7, ale ostatní vzorky se finálními pevnostmi příliš neliší. Dále je patrné, že výsledky tlakových zkoušek přibližně odpovídají tabulce závislosti tlakové pevnosti na hodnotě vodního součinitele vysokohodnotných betonů, která je zmíněna o čtyři strany výše. Každá směs je zařazena do pevnostních tříd, dle normové tabulky, která je zmíněna v teoretické části v kapitole Mechanické vlastnosti cementových kompozitů.

Když porovnáme výsledky průkazních zkoušek s výsledky orientačních mechanických zkoušek, zjistíme, že vzorky číslo 1b, 2, 3 a 5 se přibližně shodují. Vzorek 4 se v prvních dnech celkem výrazně liší, což je způsobeno tím, že průkazní zkoušky byly provedeny o pár hodin dříve než po 24 hodinách. Vzorky 6 a 7 se celkem výrazně liší v týdenních zkouškách.

Když porovnáme výsledky průkazních zkoušek s výsledky zkoušek po zkoušce zpracovatelnosti (do formy uloženy až po 2 hodinách) skutečně zjistíme, že výsledky se, s výjimkou směsí 6 a 7, příliš neliší. Pouze finální pevnosti jsou u vzorků po zkoušce na zpracovatelnost vyšší a to patrně z toho důvodu, že pevnostní zkoušky se u těchto vzorků prováděly po delším čase než po 28 dnech. To, že výsledky pevnostních průkazních zkoušek a pevnostních zkoušek po zkoušce zpracovatelnosti jsou téměř stejné, se dá vysvětlit tím, že při těchto konzistencích začíná tuhnutí skutečně až po několika hodinách, díky přidanému superplastifikátoru. Což bylo jedním z našich cílů a je to jeden z důkazů o tom, že sochař skutečně může dílo vytvářet několik hodin, než začne tuhnutí směsi.

Také byla prováděna nedestruktivní zkouška pomocí ultrazvuku. Touto zkouškou se pomocí měření rychlosti šíření ultrazvukových impulsů materiálem zjišťuje rovnoměrnost betonu. Z této rychlosti je možné odvodit dynamický modul pružnosti a z něho dále statický modul pružnosti. Toto odvozování je popsáno v teoretické části a u výsledků ultrazvukových zkoušek. Zkouška ultrazvukem se provádí ještě před destruktivními zkouškami, aby bylo možné změřit celý vzorek. Z tohoto důvodu jsme ji provedli ihned po odbednění vzorků.

Zkouška probíhá tak, že po odbednění se vzorky umístí na dřevěný kvádr, aby došlo k jejich separaci (obr. 37)



Obr. 37: Vorky před zkouškou ultrazvukem [37]

Dále se na boční strany vzorků nanese sonogel a začne se s měřením (obr. 38).



Obr. 38: Měření ultrazvukovým přístrojem [37]

Když přístroj měření dokončí, zobrazí se na displeji hodnota rychlosti šíření ultrazvukových impulsů materiálem (obr. 39).

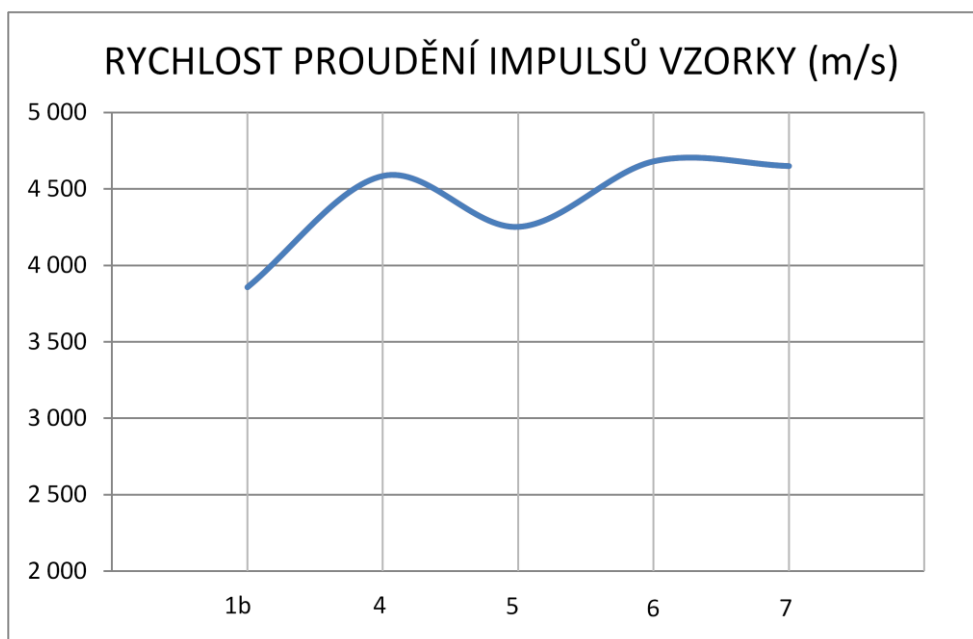


Obr. 39: Výsledek ultrazvukového měření [37]

Z důvodu nefunkčnosti přístroje během jednoho dne měření nemohu uvést výsledky měření na směsích číslo 2 a 3. Jelikož by tato měření nebyla objektivní, neuvádím je v tabulce ani v grafech. Výsledky zkoušky jsou v tab. 7 a na obr. 40:

| OZN. | RYCHLOST ŠÍŘ. ULTR. IMPULSŮ VE VZORKU (m/s) | | | | |
|---------|---|-------|-------|-------|-------|
| | 1b | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 1 | 3 865 | 4 545 | 4 222 | 4 748 | 4 692 |
| 2 | 3 865 | 4 558 | 4 222 | 4 692 | 4 678 |
| 3 | 3 865 | 4 561 | 4 278 | 4 706 | 4 651 |
| 4 | 3 865 | 4 624 | 4 244 | 4 678 | 4 678 |
| 5 | 3 837 | 4 558 | 4 222 | 4 611 | 4 624 |
| 6 | 3 846 | 4 611 | 4 255 | 4 638 | 4 638 |
| 7 | 3 846 | 4 573 | 4 222 | 4 692 | 4 665 |
| 8 | 3 893 | 4 581 | 4 278 | 4 706 | 4 624 |
| 9 | 3 774 | 4 605 | 4 258 | 4 692 | 4 624 |
| 10 | 3 865 | 4 593 | 4 278 | 4 694 | 4 642 |
| 11 | 3 912 | 4 601 | 4 222 | 4 702 | 4 641 |
| 12 | 3 865 | 4 623 | 4 336 | 4 621 | 4 653 |
| PRŮMĚR: | 3 858 | 4 586 | 4 253 | 4 682 | 4 651 |

Tab. 7: Rychlost šíření ultrazvukových impulsů ve vzorcích



Obr. 40: Výsledky ultrazvukových zkoušek [37]

Z výsledků zkoušek pomocí ultrazvuku jsme dostali rychlost šíření ultrazvukových impulsů, ze kterého jsme pomocí přepočtu získali následující hodnoty dynamického a statického modulu pružnosti vzorků (tab. 8):

| VZOREK | Pv [kg/m ³] | v_L^2 (m/s) | k | E _{cu} (Gpa) | E _c (Gpa) |
|--------|-------------------------|---------------|---|-----------------------|----------------------|
| 1b | 2 317 | 3 858 | 1 | 34,5 | 31,0 |
| 4 | 2 307 | 4 586 | | 48,5 | 43,7 |
| 5 | 2 291 | 4 253 | | 41,4 | 37,3 |
| 6 | 2 299 | 4 682 | | 50,4 | 45,3 |
| 7 | 2 270 | 4 651 | | 49,1 | 44,2 |

Tab. 8: Hodnoty dynamického a statického modulu pružnosti

DYNAMICKÝ: $E_{cu} = D \cdot v_L^2 \cdot (1/k^2)$ D je objemová hmotnost
 v_L je rychlost šíření impulsů ultrazvukového vlnění
k je součinitel rovnoměrnosti = 1

STATICKÝ: $E_c = K_u \cdot E_{cu}$ K_u je zmenšovací součinitel = 0,9 (C45/55 a výš)

2.5 Objemové změny

2.5.1 Použité zkoušky na objemové změny

Objemové změny chceme co nejmenší. Zejména smršťování je vhodné u cementových kompozitů, které jsou určené pro sochaření, co nejvíce omezit. Proto bylo toto testování velmi důležité pro vytvoření závěru celé práce.

Objemové změny jsme zkoumali na aparatuře pro měření objemových změn betonu v raném stádiu (obr. 41). To je v období, ve kterém betonová směs přechází z quazikapalné formy do pevné formy hmoty. Konstrukce této aparatury je taková, že umožňuje zkoumat objemové změny celé soustavy, která zahrnuje cementovou směs vzorku i s jeho formou. Díky tomu je možné zjišťovat skutečné autogenní smršťování i roztažnosti, které nejsou ovlivněné odpařováním z nekryté vnější plochy zkušebního tělesa od začátku tvrdnutí [30].

Tato metoda je nazývána jako metoda ztracené pryžové vlnovcové formy. Princip této metody je založen na tom, že vlnovec má ve srovnání s jinými tvary nepatrný odpor proti podélné deformaci [30].



Obr. 41: Aparatura pro měření objemových změn, tzv. vlnovec [37]

Princip měření objemových změn vychází z toho, že je zjišťována deformace ve svislém směru pomocí bezkontaktní optické metody měření vzdálenosti. Tato metoda umožňuje souvisle snímat délkové změny s přesností

0,6 μm u laserových snímačů. Pro měření je využíváno laserových snímačů nebo tzv. reflexního čidla. Na povrch měřeného vzorku se musí umístit odrazová ploška, aby mohlo dojít k optickému odrazu, a tím vysílaný signál opět přijmout [30].

Po naplnění vlnovce je aparatura umístěna do termostatu, který zajišťuje stálou teplotu okolního prostředí vzorku a také zamezuje vlivu okolního světelného záření, které má negativní vliv na naměřené hodnoty [30].

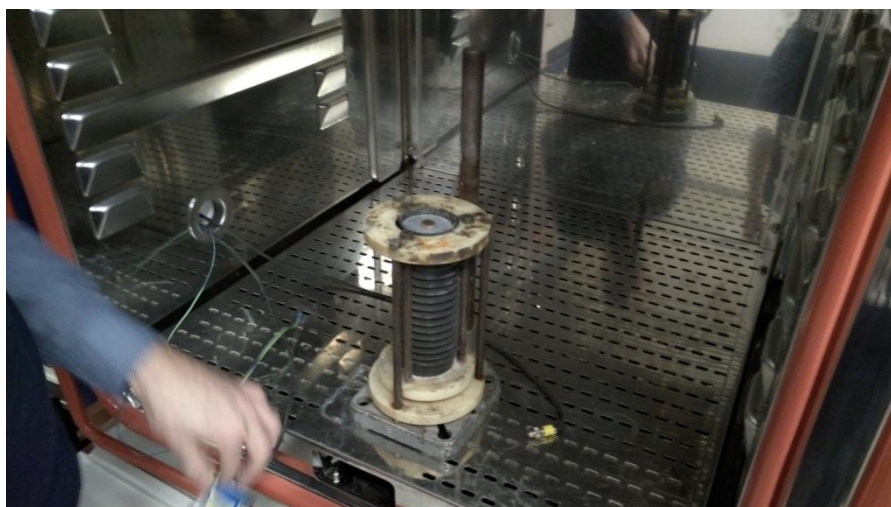
Veškerá měření jsou dále pomocí výpočetní techniky zaznamenávána a elektronicky zpracovávána [30].

V praktické části bakalářské práce se postupovalo totožně. Nejprve se vlnovec vymazal odbedňovacím prostředkem a postupně se plnil cementovým kompozitem s průběžným vibrováním na vibračním stole (obr. 42).



Obr. 42: Vlnovec s cementovým kompozitem na vibračním stole [37]

Po naplnění se povrch zakryl fólií, na kterou byla umístěna mosazná destička o průměru dostatečném pro odrazení vysílaného signálu. Poté se celá aparatura umístila do termostatu (obr. 43).



Obr. 43: Kompletní aparatura v termostatu [37]

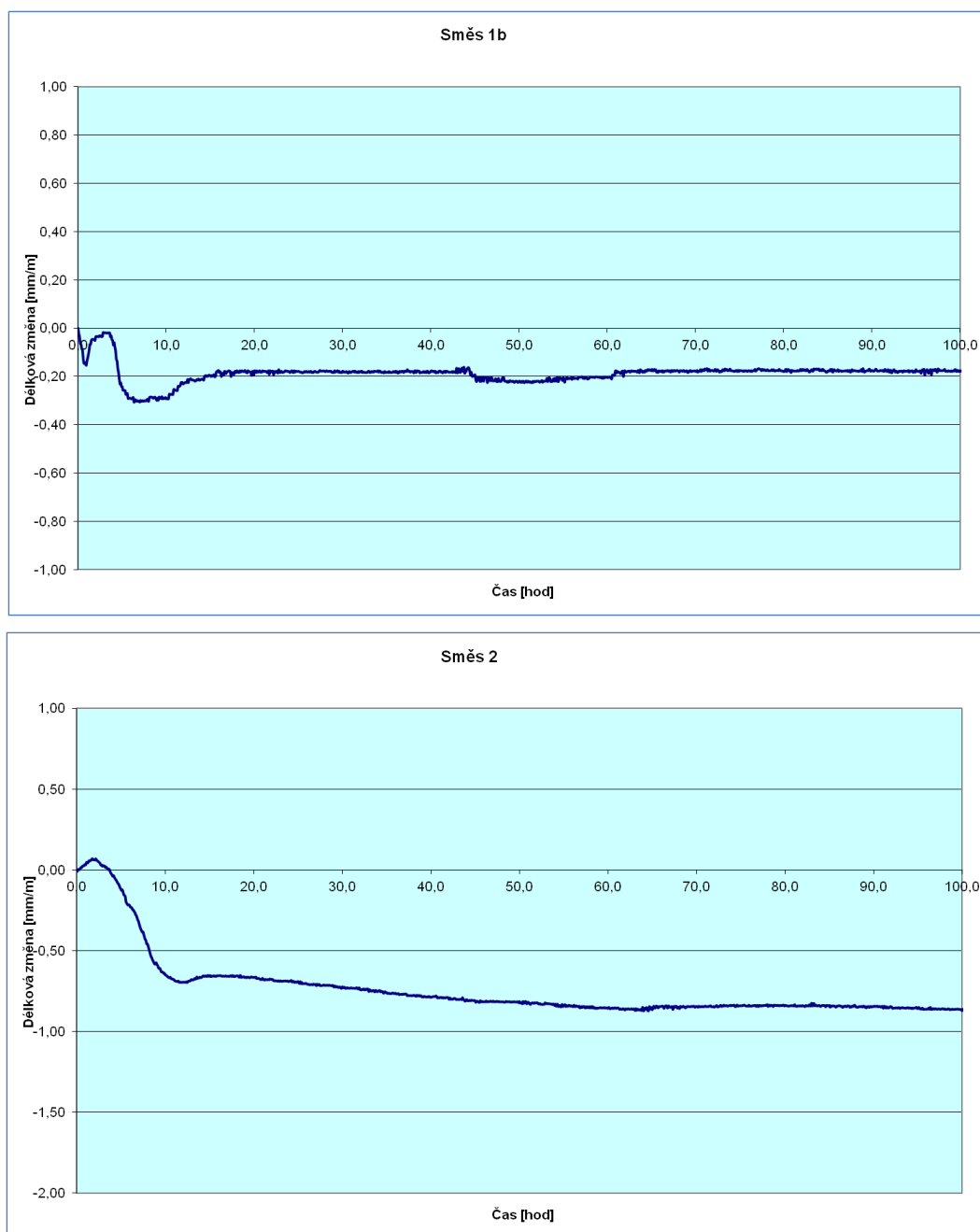
Pomocí výpočetní techniky jsme dostali výsledky o objemových změnách konkrétního cementového kompozitu (obr. 44).



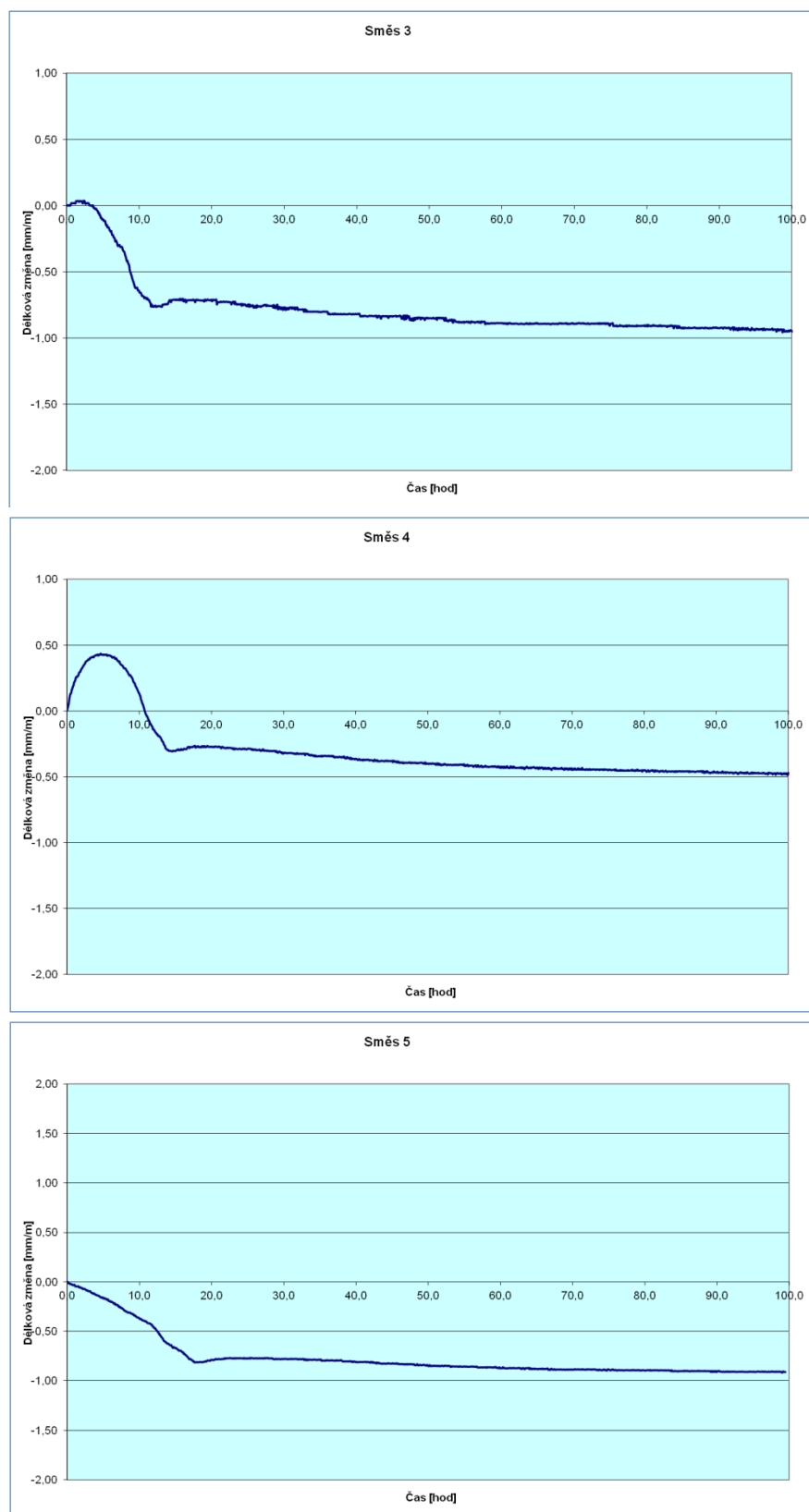
Obr. 44: Výsledky objemových změn vzorků pomocí výpočetní techniky [37]

2.5.2 Výsledky zkoušek na objemové změny

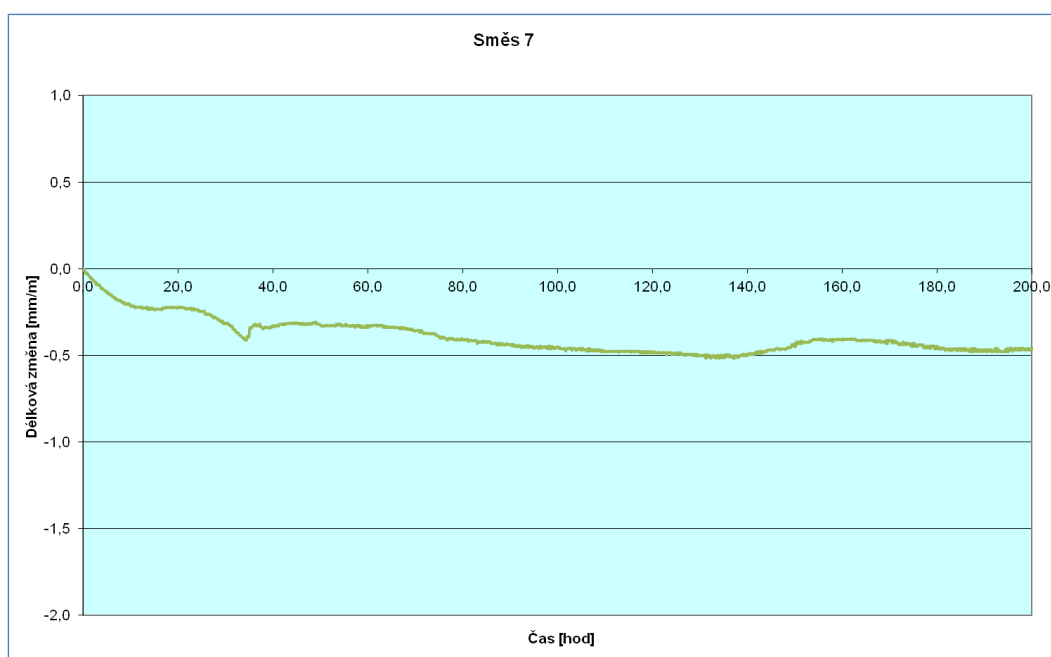
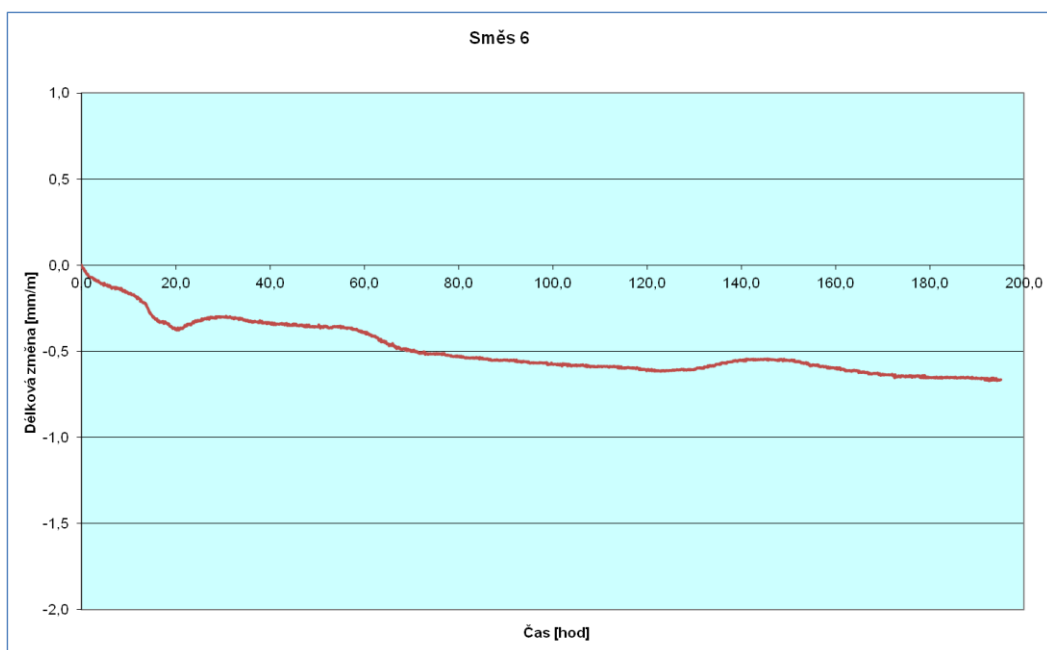
Pomocí výpočetní techniky a vhodné úpravy jsme dostali výsledky objemových změn všech směsí, které níže uvádím na obr. 45, 46, 47.



Obr. 45: Výsledky objemových změn směsí 1b a 2 [37]



Obr. 46: Výsledky objemových změn směsí 3, 4 a 5 [37]



Obr. 47: Výsledky objemových změn směsí 6 a 7 [37]

Z grafů je jasné, že některé směsi ještě před smrštěním zvětšily svůj objem, konkrétně směsi 2, 3 a 4. Vysvětlujeme si to tak, že hydratace je velice složitý proces a v některých případech se může stát, že některé směsi nabydou.

Pro lepší přehlednost přikládám výsledky objemových změn v tab. 9. Výsledky jsou uváděny od počátku tuhnutí do uběhnutí 100 hodin od počátku tuhnutí.

| VZOREK | NABYTÍ [mm/m] | SMRŠTĚNÍ [mm/m] | CELKOVÁ ZMĚNA [mm/m] |
|--------|---------------|-----------------|----------------------|
| 1b | 0,00 | 0,31 | 0,31 |
| 2 | 0,07 | 0,87 | 0,94 |
| 3 | 0,04 | 0,96 | 1,00 |
| 4 | 0,43 | 0,49 | 0,92 |
| 5 | 0,00 | 0,92 | 0,92 |
| 6 | 0,00 | 0,60 | 0,60 |
| 7 | 0,00 | 0,50 | 0,50 |

Tab. 9: Výsledky objemových změn

2.6 Výsledky

Pevnostní vlastnosti všech směsí jsou po 28 dnech velice podobné, a to jak v tahu za ohybu, tak v tlaku. Průměrově mají nejhorší pevnost směsi 1b a 2. Nejlépe vychází směs 5 a 7. Výsledky mezi nejlepšími a nejhoršími jsou pouze v jednotkách megapascalů.

Co se zpracovatelnosti týče, nejlépe vychází směs 2 a nejhůře směs 1b. Za dobře zpracovatelné, z hlediska robotického sochaření, považují ještě směsi 3 a 5.

Z hlediska objemových změn vyšla nejlépe směs 1b a nejhůře směs 3.

V tab. 10 uvádím výsledky pokusů na vzorcích 1b – 7. V tab. 11 uvádím pořadí směsí, seřazených od čísla 1 (nejlepší) do čísla 7 (nejhorší), podle toho jak vyhovují pro náš účel.

| SMĚS | PEVNOST PO 28 DNECH [Mpa] | | ZPRACOVATELNOST | OBJEMOVÉ ZMĚNY |
|------|---------------------------|-----------------|-----------------|----------------|
| | V TLAKU | V TAHU ZA OHYBU | [POŘADÍ SMĚSÍ] | [mm] |
| 1b | 107,9 | 16,3 | 7. | 0,31 |
| 2 | 107,5 | 17,9 | 1. | 0,94 |
| 3 | 108,9 | 18,0 | 2. | 1,00 |
| 4 | 113,1 | 18,8 | 4. | 0,92 |
| 5 | 113,5 | 20,8 | 3. | 0,92 |
| 6 | 103,0 | 20,8 | 6. | 0,60 |
| 7 | 114,0 | 19,0 | 5. | 0,50 |

Tab. 10: Kompletní výsledky pokusů

| SMĚS | POŘADÍ SMĚSÍ | | |
|------|--------------|-----------------|----------------|
| | PEVNOSTI | ZPRACOVATELNOST | OBJEMOVÉ ZMĚNY |
| 1b | 4. | 7. | 1. |
| 2 | 4. | 1. | 5. |
| 3 | 3. | 2. | 6. |
| 4 | 2. | 4. | 4. |
| 5 | 1. | 3. | 4. |
| 6 | 3. | 6. | 3. |
| 7 | 1. | 5. | 2. |

Tab. 11: Pořadí směsí

3 DISKUZE

Tato bakalářská práce se zabývá výzkumem cementového kompozitu určeného pro robotické sochaření, zkoumáním jeho mechanických vlastností a objemových změn. Tento kompozit je určen pro vytváření vzoru v čerstvé směsi. Metoda sochaření, kdy robot vytváří vzor v čerstvé směsi, není popsána v žádné dostupné literatuře. S vedoucím bakalářské práce jsme se shodli, že je zatím ve světě zcela neobvyklá, a proto je teoretická část založena zejména na obecných vlastnostech cementových kompozitů.

Prvním cílem praktické části bakalářské práce bylo navrhnout ideální konzistenci směsi určené pro robotické sochaření tak, aby měla parametry vysokohodnotného betonu. Zejména navrhnout složky tohoto cementového kompozitu a z těchto složek vytvořit samozhutnitelný beton, aby ve směsi nebyly vzduchové bubliny a snadno se rozlévala. Dalšími cíli bylo podrobit vzorky z těchto směsí mechanickým zkouškám – prostý tlak, tah za ohybu a zkouška ultrazvukem, zkoumání objemových změn směsi a závislost objemových změn na čase při změně dávky superplastifikátoru.

Bylo navrženo 7 směsí, aby se mohly porovnávat jejich zpracovatelnosti, mechanické vlastnosti a objemové změny. S vedoucím bakalářské práce jsme se shodli, že pro robotické sochaření jsou vhodné všechny tyto směsi a všechny se dají řídit dle přání umělce. Některé například mohou tuhnout po delší době, některé dříve, dále se mohou lišit jejich zpracovatelnosti a pevnosti. Těmto vlastnostem je třeba přizpůsobovat dávkování složek směsi.

Snaha byla taková, aby směs, která je navržena pro robotické sochaření byla samozhutnitelná a měla co nejvyšší pevnost, protože čím vyšší pevnost, tím vyšší trvanlivost. Dále bylo potřeba, aby směs byla zpracovatelná po několik hodin, aby sochaře neomezovalo tuhnutí směsi a vykazovala malé objemové změny.

Výzkumný vzorek tvořilo 7 směsí, které byly pracovníě označeny čísly 1b-7. Vzorek číslo 1 byl ze zkoušek vyloučen, protože neměl vlastnosti samozhutnitelné směsi. Každá směs měla jinou dávku superplastifikátoru. Tomu se přizpůsoboval vodní součinitel, který byl také pokaždé jiný. Dávku superplastifikátoru jsme

měnili proto, abychom mohli zkoumat závislost vlastností cementového kompozitu na jeho dávce a dále proto, abychom mohli pro náš účel vybrat směs s nejlepšími vlastnostmi.

Mechanické vlastnosti všech vzorků vyšly podobné, liší se v jednotkách megapascalů. Zpracovatelnosti směsí se již liší výrazně, stejně tak jako výsledky objemových změn.

Dle mého názoru se vlastnosti směsí liší z důvodu rozdílné dávky vody. Výsledky, až na výjimky (směs 1b) potvrzují, že čím méně vody směs obsahuje, tím hůře zpracovatelná je. Na druhou stranu se často objevuje jev, že čím méně vody směs obsahuje, tím je její finální pevnost vyšší a objemové změny nižší (opět mimo směs 1b). Dá se říci, že ve většině případů platí, že čím větší má směs pevnost, tím menší má objemové změny, ale tím horší je její zpracovatelnost. Směs 1b se může vymykat z řady důvodů. Například dávkovaný cement nemusel přesně odpovídat daným parametrům, přístroje nemusely objektivně měřit, či jsem mohl udělat chybu při dávkování složek, hutnění a podobně.

Ze zkoumaných směsí bylo třeba vybrat takovou, která se bude co nejvíce hodit pro robotické sochaření v čerstvé směsi. Jak již bylo zmíněno, je nutné, aby taková směs měla dobré mechanické vlastnosti, dobrou zpracovatelnost po dlouhou dobu a vykazovala malé objemové změny.

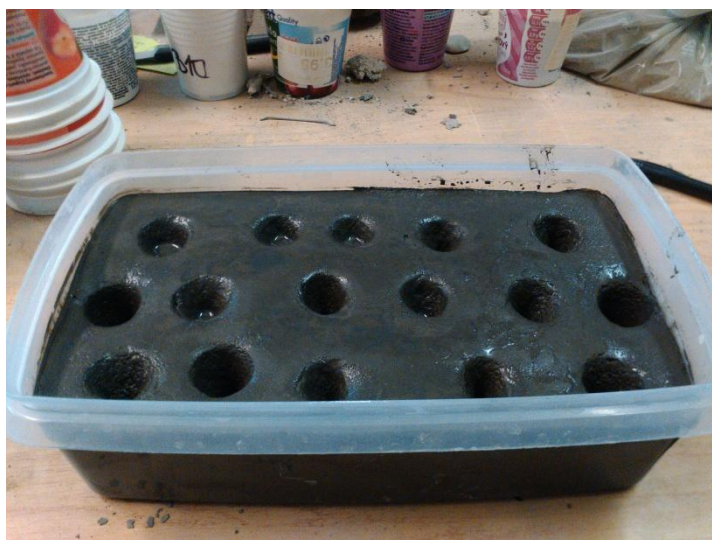
Dle mého názoru tyto podmínky splňují všechny směsi. Všechny se dají řídit podle toho, k jakému účelu budou určeny a jaké vlastnosti budou pro daný účel vhodné. Průnik těchto vlastností nejlépe splňuje směs 5, která má jedny z nejlepších mechanických vlastností. Ačkoli obsahuje již velice málo vody, má dobrou zpracovatelnost po dlouhou dobu (třetí nejlepší ze všech směsí) a je uprostřed výsledků objemových změn. Dále by přicházela v úvahu směs 2, která ale již podléhá větším objemovým změnám. Z výše uvedených důvodů upřednostňuji směs 5.

Ideální konzistence směsi určené pro robotické sochaření je samozhutnitelný beton, který obsahuje 1 díl cementu CEM I 42,5R, 0,75 dílu

křemičitého písku 0,1-0,6 mm, 0,75 dílu křemičitého písku 0,3-0,8 mm, 0,1 dílu mikrosiliky, 0,02 dílu carboxyletheru. Vodní součinitel této směsi je 0,21.

Tato směs má po 28 dnech pevnost v tlaku 113,5 MPa a v tahu za ohybu 20,8 MPa. Patří tedy do třídy betonu C90/105 a lze ji označit jako vysokohodnotný beton. Tato směs podléhá objemovým změnám 0,92 mm/m.

Jako důkaz, že tato směs bude skutečně fungovat pro účely robotického sochaření, slouží závěrečný pokus. Do připravené směsi nalité do plastové nádoby jsem po nějaké době zkoušel vtlačovat tupý nástroj. Výsledkem tohoto pokusu bylo, že se do směsi bylo možné nástroj vtlačovat několik hodin (obr. 48).



Obr. 48: Závěrečný pokus na fungování směsi 5 [37]

Poprvé jsem zkoušel vtlačovat předmět po 10 minutách, ale to se ještě vpichy lehce zacelovaly. Poté jsem to zkusil po 30 minutách a směs již fungovala tak, jak má. Další pokus jsem provedl po 60 a 90 minutách a směs stále fungovala bezchybně, vpichy se daly provést hladce a zůstávaly ostré. To je důkazem toho, že směs 5 je pro robotické sochaření vhodná. Doporučuji s rytím počkat 30 minut od rozmíchání směsi a poté je možné vzor vytvářet několik hodin.

Jak již bylo řečeno, pro tyto účely se dá použít každá ze zkoumaných směsí, záleží na umělci, jaké vlastnosti od směsi žádá. Tyto vlastnosti se poté dají řídit vhodným dávkováním složek.

4 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zabývala návrhem a zkoumáním vlastností cementového kompozitu, který je určen pro robotické sochaření.

Teoretická část práce byla věnována obecnému popisu cementového kompozitu, jeho vlastnostem a mechanickým zkouškám. Dále popisu betonového sochaření a to jak klasického, tak moderního a popisu robotů pro sochaření.

Cílem teoretické části bakalářské práce bylo informovat zejména o složkách cementových kompozitů a jejich vlastnostech, ale také o betonovém sochaření.

V praktické části byla zvolena kvalitativní metoda výzkumu. Bylo navrženo a zkoušeno 7 směsí, které byly testovány na mechanické vlastnosti a objemové změny. Každá směs obsahovala jinou dávku superplastifikátoru. Praktická část dále obsahuje zkoušku pomocí ultrazvuku, podrobný popis směsí, vlastností a vyhodnocení všech pokusů. Všechny vlastnosti byly zkoušeny několikrát, aby byl výzkum objektivní.

Cílem praktické části bylo navrhnout směs z hlediska použití a dávkování složek. Dále na těchto směsích zkoušet mechanické vlastnosti a objemové změny. Na základě těchto zkoušek byla zvolena ideální směs, která by se hodila pro robotické sochaření v čerstvé směsi. Dle mého názoru by se pro tento účel daly použít všechny směsi, záleží jen na umělci, které vlastnosti bude požadovat. Směsi se liší v pevnostech, zpracovatelnostech i objemových změnách a sochař má možnost si vybrat takovou směs, jakou potřebuje. Všechny tyto vlastnosti se dají řídit pomocí různého dávkování složek. Směsi jsem zredukoval na směs, která má průnik ideálních vlastností všech směsí. Tato směs je v bakalářské práci označena číslem 5. Dle mého názoru má velice dobré mechanické vlastnosti, dobrou zpracovatelnost po dlouhou dobu a přípustné objemové změny. Splňuje požadavky, které byly určeny jako cíle bakalářské práce.

Ostatní směsi nevyhovovaly některým požadavkům. Směs 1b se vyznačovala horší zpracovatelností, směs 3 většími objemovými změnami, směs 4, 6 a 7 horší zpracovatelností. Dále jsem uvažoval o směsi 2, která měla podobné

vlastnosti jako směs 5, ale vyznačovala se většími objemovými změnami. Proto jsem nakonec jako ideální zvolil směs číslo 5.

Každá směs vyhovuje pro jiné účely, některé se dají použít po krátkou dobu a některé po dlouhou. Záleží na sochaři, kterou směs si vybere. Vybranou směs je možné ladit podle jeho přání. Všechny směsi se dají řídit a přizpůsobovat konkrétním podmínkám.

Směs nemusí být používána pouze pro umělecké účely. Při lehké změně dávkování složek by mohla být použita i jako „vysprávková“ směs pod kolejnici. Směs pod kolejnici by měla oproti směsi pro sochařské účely tuhnout brzy, aby nevznikaly dlouhé prodlevy v provozu na železnicích. Naopak u směsi pro sochaření je potřeba, aby tuhnutí začalo až po několika hodinách, aby sochař nebyl časově omezen. Tomu by bylo třeba přizpůsobit dávkování složek směsi. I po takové směsi je požadovaná vysoká pevnost a malé objemové změny, pouze samozhutnitelnost u ní vyžadována není. Z těchto důvodů by se za vhodnou směs pro tyto účely dala považovat směs, která je v této bakalářské práci označena číslem 1. Pro naše účely se nehodila, protože neměla parametry samozhutnitelného betonu, ovšem pro tyto účely by byla ideální.

Také je do budoucna možné, že by se tento cementový kompozit dal vyrábět jako drátkobeton, neprůstřelný beton a tak dále.

ZDROJ POUŽITÉ LITERATURY A OBRÁZKŮ

- [1] tzbinfo; Kompozitní materiály ve stavebnictví [online], [cit. 2017-2-21]. Dostupný z WWW: <http://stavba.tzb-info.cz/stresni-okna/9909-kompozitni-materialy-ve-stavebnictvi>
- [2] eBeton; Složení betonu – složky betonu [online], [cit. 2017-2-21]. Dostupný z WWW: <http://www.ebeton.cz/pojmy/slozeni-betonu-slozky-betonu>
- [3] eBeton; Historie betonu [online], [cit. 2017-2-21]. Dostupný z WWW: <http://www.ebeton.cz/pojmy/historie-betonu>
- [4] COLLEPARDI, Mario. Moderní beton. 1. vyd. Praha: Informační centrum ČKAIT, 2009. 342 s. ISBN 978-80-87093-75-7.
- [5] Katedra materiálového inženýrství a chemie; Chemie silikátových materiálů [online], [cit. 2017-2-23]. Dostupný z WWW: <http://tpm.fsv.cvut.cz/student/documents/files/CHS/CHS3.pdf>
- [6] HELA, Rudolf. PŘÍMĚSI DO BETONU. Beton TKS [online]. 2015, 7 [cit. 2017-02-23]. Dostupné z: <http://www.betontks.cz/sites/default/files/2015-2-04.pdf>
- [7] ACI Committee, Mineral Admixtures, ACI Compilation 22, American Concrete Institute, 2013
- [8] eBeton; Přísady [online], [cit. 2017-2-23]. Dostupný z WWW: <http://www.ebeton.cz/pojmy/prisady>
- [9] ZAJÍČEK, Milan. CHEMICKÉ PŘÍMĚSI DO BETONU A MALT. ASB - portal [online]. 2008 [cit. 2017-02-23]. Dostupné z: <https://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/materialy-a-vyrobky/cihly-tvarnice/chemicke-prisady-do-betonu-amalt>
- [10] Hydratace cementu. MujBeton.cz [online]. Zlín [cit. 2017-02-24]. Dostupné z: <http://www.mujbeton.cz/hydratace-cementu>

- [11] WITZANY, Jiří et al. Konstrukce pozemních staveb 70: prefabrikované konstrukční systémy a části staveb. Vyd. 1. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2003. 268 s. ISBN 80-01-02656-6.
- [12] eBeton: Zkoušení betonu [online], [cit. 2017-2-28]. Dostupný z WWW: <http://www.ebeton.cz/pojmy/zkouseni-betonu>
- [13] Všeobecná encyklopedie ve čtyřech svazcích. Praha: Nakladatelský dům OP, 1996-. Encyklopedie Diderot. ISBN 80-85841-17-7.
- [14] ŠEDÝ, V. Sochařské řemeslo.
- [15] eBeton: Barevný beton [online], [cit. 2017-3-1]. Dostupný z WWW: <http://www.ebeton.cz/pojmy/barevny-beton>
- [16] eBeton: Měrný povrch cementu [online], [cit. 2017-3-1]. Dostupný z WWW: <http://www.ebeton.cz/pojmy/merny-povrch-cementu>
- [17] BETON TKS: BETON A ARCHITEKTURA. Praha 5, 2016 16(5/2016). ISSN 1213-3116
- [18] Co je 3D tisk. Josef Průša [online]. [cit. 2017-03-02]. Dostupné z: <http://josefprusa.cz/o-3d-tisku/>
- [19] TISKNOU SE SOCHY, DOMY I MOSTY. MATERIAL TIMES [online]. Praha 6, 2013 [cit. 2017-03-02]. Dostupné z: <https://www.materialtimes.com/tema-tydne/tisknou-se-sochy-domy-i-mosty.html>
- [20] tzbinfo; 3D tisk a jeho využití ve stavebnictví [online], [cit. 2017-3-2]. Dostupný z WWW: <http://stavba.tzb-info.cz/11123-3d-tisk-a-jeho-vyuziti-ve-stavebnictvi>

- [21] Robotic Composite Making. Technological Institute [online]. Taastrup [cit. 2017-03-02]. Dostupné z: <https://www.dti.dk/robotic-composite-making/34275>
- [22] 3D robot na kamenické a sochařské SPŠ v Hořicích [online]. Hořice, 2013 [cit. 2017-03-02]. Dostupné z: <http://www.lomyatezba.cz/2012/2012-4/item/216-3d-robot-na-kamenicke-a-socharske-sps-v-horicich>
- [23] eBeton: Mrazuvzdornost betonu [online], [cit. 2017-3-2]. Dostupný z WWW: <http://www.ebeton.cz/pojmy/mrazuvzdornost-betonu>
- [24] eBeton: CHRL- Chemické rozmrazovací látky [online], [cit. 2017-3-3]. Dostupný z WWW: <http://www.ebeton.cz/pojmy/chrl-chemicke-rozmrazovaci-latky>
- [25] METRO.CZ. Větrací výdech z Blanky u Stromovky upraví za 20 milionů [online]. [cit. 2.3.2017]. Dostupný na WWW: http://www.metro.cz/vetraci-vydech-z-blanky-u-stromovky-upravi-za-20-milionu-pj4-/praha.aspx?c=A151031_105211_co-se-deje_jsk
- [26] eBeton: Konzistence betonu [online], [cit. 2017-3-12]. Dostupný z WWW: <http://www.ebeton.cz/pojmy/konzistence-betonu>
- [27] Malty - zkoušky čerstvých malt. Vysoká škola báňská — Technická univerzita Ostrava [online]. Ostrava [cit. 2017-03-12]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~khe0007/opory/opory.php?stranka=malty_zk
- [28] eBeton: Vodní součinitel [online], [cit. 2017-3-12]. Dostupný z WWW: www.ebeton.cz/pojmy/vodni-soucinitel
- [29] Trvanlivost cementového betonu 2 – modifikace na bázi mikrosiliky. IMateriály [online]. 2008 [cit. 2017-03-12]. Dostupné z: http://imaterialy.dumabyt.cz/rubriky/technologie/trvanlivost-cementoveho-betonu-2-modifikace-na-bazi-mikrosiliky_101356.html

- [30] LITOŠ, Jiří. Objemové změny cementových past ve fázi tuhnutí. V Praze: České vysoké učení technické, 2011. ISBN 978-80-01-04700-2.
- [31] eBeton: Vysokohodnotný beton [online], [cit. 2017-3-21]. Dostupný z WWW: <http://www.ebeton.cz/pojmy/vysokohodnotny-beton-hpc>
- [32] CIKRLE, Petr a Tomáš VYMAZAL. Moderní trendy v betonu III. – Provádění betonových konstrukcí: Nedestruktivní metody zkoušení železobetonových konstrukcí [online]. Praha, 2014 [cit. 2017-03-20].
- [33] AÏTCIN, Pierre-Claude. Vysokohodnotný beton. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) a Českou betonářskou společnost vydalo Informační centrum ČKAIT, 2005. Betonové stavitelství. ISBN 80-86769-39-9.
- [34] eBeton: Průkazní zkouška [online], [cit. 2017-4-20]. Dostupný z WWW: <http://www.ebeton.cz/pojmy/prukazni-zkouska>
- [35] ABS STAVEBNÍ SPOLEČNOST. Druhy betonů [online]. [cit. 2.3.2017]. Dostupný na WWW: http://www.absbilina.cz/upload/248-1293024853_185Oj92p4T.upl-vliv_prostredi.jpg
- [36] TECHNOLOGICAL INSTITUTE. Robotic Composite Making [online]. [cit. 2. 3. 2017]. Dostupný na WWW: <https://www.dti.dk/robotic-composite-making/34275>
- [37] Vlastní zdroj obrázku

SEZNAM OBRÁZKŮ

| | |
|--|----|
| Obr. 1: Dosavadní vzhled výdechu z tunelu Blanka v ulici Nad Královskou oborou | 11 |
| Obr. 2: Hmotnostní podíl jednotlivých složek betonu..... | 15 |
| Obr. 3: Minimální tlakové pevnosti, které jsou předepsány pro různé třídy cementů..... | 17 |
| Obr. 4: Písek, štěrk a drcené hrubé kamenivo..... | 19 |
| Obr. 5: Smršťování betonu..... | 25 |
| Obr. 6: Objemové změny během hydratace a zrání betonu | 26 |
| Obr. 7: Vliv vodního součinitele na pevnost v tlaku 32,5, 42,5, 52,5..... | 27 |
| Obr. 8: Pevnostní třídy betonu v tlaku..... | 28 |
| Obr. 9: Stupně vlivu prostředí..... | 29 |
| Obr. 10: Zkušební tělesa | 32 |
| Obr. 11: Příklad zkoušky pevnosti v tlaku | 33 |
| Obr. 12: Schéma zkoušky v prostém tahu | 34 |
| Obr. 13: Schéma zkoušky v příčném tahu | 35 |
| Obr. 14: Schéma zkoušky v tahu za ohybu | 36 |
| Obr. 15: Dřevěná modelovátka: nůž, hladítko a očko | 37 |
| Obr. 16: Betonové sochy Olbrama Zoubka | 38 |
| Obr. 17: Betonové sochy Lubomíra Dostála | 39 |
| Obr. 18: Příklad použití zdí s výtvarně řešeným reliéfem | 41 |
| Obr. 19: Příklad robota Robotic Composite Making | 43 |
| Obr. 20: Použitý cement CEM I 42,5 R a křemičitý písek frakce 0,1 – 0,6 mm a 0,3 – 0,8 mm..... | 45 |
| Obr. 21: Použitá příměs mikrosilika a použitá přísada carboxylether..... | 45 |
| Obr. 22: Poměr složek ve směsi 1..... | 46 |
| Obr. 23: Míchání směsi | 47 |
| Obr. 24: Rozlití směsi 1 na střešacím stolku..... | 48 |
| Obr. 25: Poměr složek ve směsi 2..... | 49 |
| Obr. 26: Rozlití směsi 2 na střešacím stolku za 1 minutu a za 3 minuty..... | 49 |

| | |
|---|----|
| Obr. 27: Rozlití směsi 3 na střešacím stolku za 1 minutu..... | 50 |
| Obr. 28: Rozlití směsi 4 na střešacím stolku za 1 minutu..... | 51 |
| Obr. 29: Rozlití směsi 5 na střešacím stolku za 1 minutu..... | 51 |
| Obr. 30: Velikost vodního součinitele v závislosti na přísadách | 52 |
| Obr. 31: Zkouška vzorků v tahu za ohybu..... | 55 |
| Obr. 32: Zkouška vzorků v tlaku..... | 55 |
| Obr. 33: Tři sady trámečků a jedna rezerva..... | 56 |
| Obr. 34: Nedestruktivní zkouška pomocí ultrazvuku..... | 56 |
| Obr. 35: Objemové hmotnosti orientačních vzorků..... | 58 |
| Obr. 36: Výsledky průkazných zkoušek v grafech..... | 61 |
| Obr. 37: Vorky před zkouškou ultrazvukem..... | 63 |
| Obr. 38: Měření ultrazvukovým přístrojem..... | 63 |
| Obr. 39: Výsledek ultrazvukového měření..... | 64 |
| Obr. 40: Výsledky ultrazvukových zkoušek..... | 65 |
| Obr. 41: Aparatura pro měření objemových změn, tzv. vlnovec..... | 66 |
| Obr. 42: Vlnovec s cementovým kompozitem na vibračním stole..... | 67 |
| Obr. 43: Kompletní aparatura v termostatu..... | 68 |
| Obr. 44: Výsledky objemových změn vzorků pomocí výpočetní techniky... | 68 |
| Obr. 45: Výsledky objemových změn směsí 1b a 2..... | 69 |
| Obr. 46: Výsledky objemových změn směsí 3, 4 a 5..... | 70 |
| Obr. 47: Výsledky objemových změn směsí 6 a 7..... | 71 |
| Obr. 48: Závěrečný pokus na fungování směsi 5..... | 76 |

SEZNAM TABULEK

| | |
|---|----|
| Tab. 1: Poměr složek ve zkoumaných směsích..... | 52 |
| Tab. 2: Výsledky zkoušek na zpracovatelnost..... | 54 |
| Tab. 3: Výsledky mechanických zkoušek na orientačních vzorcích..... | 57 |
| Tab. 4: Objemové hmotnosti orientačních vzorků..... | 57 |
| Tab. 5: Závislost tlakové pevnosti na vodním součiniteli HPC..... | 58 |
| Tab. 6: Výsledky průkazných zkoušek..... | 60 |
| Tab. 7: Rychlost šíření ultrazvukových impulsů ve vzorcích..... | 64 |
| Tab. 8: Hodnoty dynamického a statického modulu pružnosti..... | 65 |
| Tab. 9: Výsledky objemových změn..... | 72 |
| Tab. 10: Kompletní výsledky pokusů..... | 73 |
| Tab. 11: Pořadí směsí..... | 73 |