

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra betonových a zděných konstrukcí



Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Integrovaná bezpečnost staveb

133 DPM – Diplomová práce

**METODY MĚŘENÍ PÓROVÉHO TLAKU
V BETONU VYSTAVENÉM VYSOKÝM
TEPLOTÁM**

METHODS OF MEASUREMENT OF PORE PRESSURE IN CONCRETE
EXPOSED TO HIGH TEMPERATURES

Autor: Bc. Jan TOMÁŠ

Vedoucí práce: Ing. Radek ŠTEFAN, Ph.D.

Ing. Roman CHYLÍK

2021

Obsah

Úvod	7
Motivace	7
Stanovení výzkumné otázky	7
Cíle práce	7
1 Současný stav poznání.....	8
1.1 Beton za zvýšených teplot.....	8
1.2 Vlhkost v betonu	9
2 Pórový tlak	10
2.1 Vznik pórového tlaku	10
2.2 Faktory ovlivňující velikost pórového tlaku	11
2.3 Snížení pórového tlaku.....	12
2.3.1 Vláknobeton	12
2.3.2 Provzdušněný beton	12
2.3.3 Hybridní beton	12
2.4 Stanovení pórového tlaku v betonu	13
2.4.1 Výpočtem	13
2.4.2 Měřením	14
2.5 Experiment Ye Li	17
3 Experimentální část.....	20
3.1 Měřiče a jejich specifikace	20
3.1.1 Termočlánky	20
3.1.2 Vlhkoměr	22
3.1.3 Korozivzdorná trubička	23
3.1.4 Silikonový olej	24
3.1.5 Manometr	24
3.1.6 Topné těleso	25
3.2 Výroba vzorků a rozmístění měřičů	26
3.3 Měření	35
3.3.1 Příprava vzorku	35
3.3.2 Měření	39
3.4 Vyhodnocení experimentu	40
3.4.1 Teplota	40
3.4.2 Pórový tlak	41
4 Závěr a návaznost na diplomovou práci	43

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Tomáš Jméno: Jan Osobní číslo: 460427

Zadávatel katedra: K133 - Katedra betonových a zděných konstrukcí

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Integrální bezpečnost staveb

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Metody měření pórového tlaku v betonu vystaveném vysokým teplotám

Název diplomové práce anglicky: Methods of measurement of pore pressure in concrete exposed to high temperatures

Pokyny pro vypracování:

Rešerše literatury

Analýza dostupných metod měření pórového tlaku v betonu vystavenému vysokým teplotám

Experiment

Vyhodnocení

Závěr

Seznam doporučené literatury:

KALIFA, Pierre. Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures. B.m.: Centre scientifique et T.

MUGUME RODGERS BANGI. Pore pressure development in hybrid fibre-reinforced high strength concrete at elevated temperatures. B.m.: Hokkaido University, Japan.

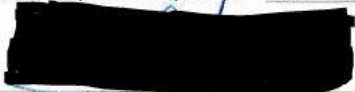
PHAN, Long. T. Pore Pressure and explosive spalling in concrete. B.m.: Springer Nature B.V. 2008.

Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Radek Štefan Ph.D.

Datum zadání diplomové práce: 28.9.2020

Termín odevzdání diplomové práce: 3.1.2021

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

28.9.2020

Datum převzetí zadání


Podpis studenta(ky)

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré užití informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 23. 5. 2019

.....
Bc. Jan Tomáš

Poděkování

Rád bych poděkoval svým vedoucím diplomové práce panu Ing. Radku Štefanovi, Ph.D. a panu Ing. Romanu Chylíkovi za odborné konzultace, vedení práce výrobě vzorků i provedení experimentu. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat své rodině, která mě podporovala po celou dobu studia.

Abstrakt

Práce je věnována pórovému tlaku v betonu a jeho měření při vysokých teplotách. V první kapitole jsou představeny vlastnosti a chování betonu za vysokých teplot. Druhá kapitola je dále věnována samotnému pórovému tlaku v betonu a teoretickému základu tohoto tématu.

Beton je nehořlavý stavební materiál, avšak vysoké teploty na něj mají velmi negativní vliv. Za zvýšených teplot se mění mechanické i fyzikální vlastnosti betonu. V průběhu práce je rozebrána problematika chování betonu za vysokých teplot, kdy právě vlivem teploty dochází k nárůstu tlaku v pórech betonu. V práci je shrnut vznik tlaku v pórech a jeho prevence před vznikem, případně jak lze tlak eliminovat a jaké jsou jeho následky. V dalších kapitolách je práce věnována shrnutím metod měření pórového tlaku pomocí dostupné literatury, kde nicméně žádná neprokazuje kvalitativní výsledky.

Koncepcí měření pórového tlaku v betonu při zvýšených teplotách je vyvedení tlaku z vyhrátého vzorku ven. Realizace experimentu je založena na použití duté trubičky zabetonované do specifické hloubky materiálu, kde na druhý konec je upevněno měřící zařízení. Trubička může být vyplněna ocelovou tyčí, olejem, nebo vzduchem. Na konec trubičky může být navařen kalíšek se slinutým porézním kovem, který shromažďuje větší množství pórového tlaku a rovnoměrně ho rozptyluje do trubičky.

Experiment provedený v této práci má za úkol změření pórového tlaku v betonových vzorcích o velikosti 150 x 300 x 120 mm pomocí manometru a dutých trubiček naplněných silikonovým olejem ve vzdálenosti 20 mm od exponovaného povrchu. Zároveň s měřením pórového tlaku je ve shodné hloubce měřena i teplota a vlhkost.

Klíčová slova

beton; vlhkost; pórový tlak; měření; vysoká teplota; odštěpování; tlakoměr; požár; experiment

Abstract

The thesis deals with the pore pressure in concrete and its measurement at high temperatures. In the first chapter the properties and behaviour of concrete at high temperatures is summarized. The second chapter is further dealing with the pore pressure in concrete itself and the theoretical basics of this topic.

Concrete is generally non-flammable material, but high temperatures have high impact on its properties. At increased temperatures, the mechanical and physical properties of concrete are changing. Thesis introduction is focused on the issue of the behaviour of concrete at high temperatures, where the pore pressure increases and effect the stress in the concrete. The thesis summarizes the formation of pressure in the pores and its prevention, or how the pressure can be eliminated it and what are the consequences in structure. In the further chapters, the thesis is dealing with the pressure reduction methods and the methodology of measuring pressure used in previous literature, where current literature did not reliable results.

Measurement method of pore pressure in concrete at elevated temperatures is carried out by the pressure from the heated sample. Experiment is based on the use of a hollow tubes fixed in concrete in the certain depth. Measuring device is attached to the other side of the tube, which can be filled with a steel rod, oil or air. Specific pressure support tooling can be welded to the end of the tube, which can increase the pore pressure

The goal of this thesis experiment is to measure the pore pressure in concrete samples of 150 x 300 x 120 mm with using a manometer and hollow tubes filled with silicone oil at a distance of 20 mm from the exposed surface. Simultaneously with the measurement of the pore pressure, the temperature and humidity are also measured at the same depth.

Keywords

concrete; pore pressure; measurement; high temperature; spalling; pressure gauge; fire; experiment

Úvod

Motivace

Pórový tlak je parametr, který výrazně ovlivňuje požární odolnost betonu za zvýšených teplot. Tato fyzikální veličina má za následek explozivní odštěpování betonu. Při odštěpení betonu dochází k obnažení výztuže a tím k jejímu přímému vystavení požáru. Ocel, jak je známo, při vysokých teplotách ztrácí svoji pevnost, konstrukce se tak stávají nestabilními a dochází ke kolapsu celých konstrukcí. Druhý negativní účinek odštěpování betonu je ohrožení zasahujících složek IZS. Odlupované kusy mohou dosáhnout až rychlosti vystřelení projektilu.

Stanovení výzkumné otázky

V této práci se budeme zabývat principem, jakým správně a efektivně měřit pórový tlak v betonu vystavenému vysokým teplotám.

Cíle práce

Hlavní cíle práce:

- 1) Rešerše metod měření pórového tlaku v betonu za zvýšených teplot ve světě
- 2) Stanovení nejefektivnější metody měření pórového tlaku v betonu za zvýšených teplot
- 3) Experiment měření pórového tlaku v betonu za zvýšených teplot dle zvolené metody

1 Současný stav poznání

Beton, jakožto velmi často používaný stavební materiál, je nehořlavý, avšak je značně ovlivňován zvýšenými teplotami, vznikajícími při požáru. Při požáru dochází v betonu k dočasným nebo trvalým změnám jeho mechanických a fyzikálních vlastností.

Z pohledu požární odolnosti je možno betonové směsi rozdělit na dva typy. Beton prvního typu má objemovou hmotnost $\gamma \leq 1800 \text{ kg/m}^3$. Jeho směs je tvořena z umělého či přírodního pórovitého kameniva. Druhý typ betonu s objemovou hmotností $\gamma > 1800 \text{ kg/m}^3$ je směs z hutného kameniva. Žáruvzdorný beton zvládne odolávat teplotám do $1580 \text{ }^\circ\text{C}$, přičemž si zachovává své základní fyzikálně-mechanické vlastnosti. Dále tepelně izolační beton, tj. beton s vysokým tepelným odporem dosahovaným vylehčením betonu rovnoměrně rozloženými póry a dutinami. [1]

1.1 Beton za zvýšených teplot

Při nárůstu teplot v betonu dochází k chemickým dějům v betonové struktuře a dochází tak k významným přeměnám fyzikálních a mechanických vlastností. Postupná fáze rozkladu betonu za zvyšování teploty je znázorněna v tab. 1. [2]

Teplota θ [$^\circ\text{C}$]	Procesy přeměny betonu při vystavení vysokých teplot
20-100	Dochází k hydrataci. Vznik CSH a $\text{Ca}(\text{OH})_2$.
100	Začíná dehydratace cementového tmelu – uvolňování volné vody za současného rozkladu hydrátů.
150	Vrcholí první fáze rozkladu CSH.
200+	Dochází k uvolňování vázané vody.
300+	Pokračuje rozklad CSH a $\text{Ca}(\text{OH})_2$ za výrazného vzniku mikrotrhlin. Začíná se porušovat kamenivo, nejdříve se porušuje křemičité kamenivo.
550-560	Dochází k fázové změně křemene. Vlivem rozdílné roztažnosti dochází k narušování vazeb mezi kamenivem a cementovým tmelem.
700-750	Vrcholí druhá fáze rozkladu CSH.
800+	Hydraulické vazby v cementovém tmele přechází ve vazby keramické. Dochází k dekarbonizaci vápencového kameniva, při které vzniká CO_2 .
900	Totální dekompozice cementového tmelu.
1000+	Začíná tavení některých složek betonu.
1200+	Celkové tavení betonu.

tab. 1 - Přeměna betonu za zvýšených teplot [2]

1.2 Vlhkost v betonu

Vlhkost je fyzikální veličina obsažena za běžným podmínek v každém betonu, která ovlivňuje jeho vlastnosti. Voda se v betonu vyskytuje od výroby, kdy ji do cementové směsi záměrně přidáváme kvůli hydrataci směsi. Dále se voda může v betonu vyskytovat z okolního prostředí během jeho životnosti. Přítomnost vody ovlivňuje řadu vlastností a hraje důležitou roli v mnoha procesech. Na poškození betonu se nejvíce projevují dvě základní fázové změny vody, jimiž jsou mrznutí a vypařování se.

Při požárech, kdy se betonové stěny a stropy v budovách nebo jiných stavbách zahřejí vysoko nad 100 °C (až k 1200 °C) se vlhkost z betonu začne vypařovat ven směrem k zahřívanému povrchu. Beton je velice nízkopropustný materiál, a tak při zahřívání dochází k vytváření vysokých tlaků. Kombinace vysokých tlaků, tepelného namáhání a oslabení porézní matrice dehydratací může způsobit odprýskávání betonu. [3]

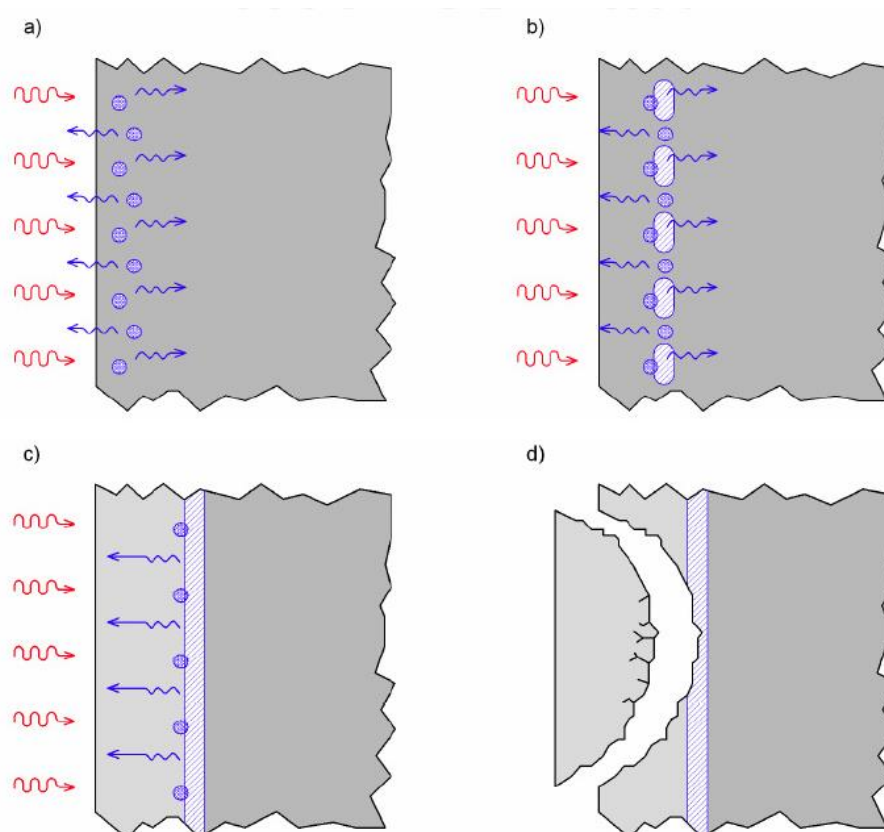
2 Pórový tlak

Pórový tlak v betonu vznikající při teplotním namáhání může mít velmi negativní vliv na konstrukce. Při nárůstu teplot může v betonu dojít k explozivnímu odštěpení betonu, které má za následek snížení požární odolnosti betonových konstrukcí. Explozivní odštěpování také velmi ohrožuje zasahující hasiče při činnosti hašení požáru. Odlupované kusy betonu mohou dosahovat rychlosti vystřelení projektilu.

Betony s vysokou pevností jsou výrazně citlivější na vliv vysokých teplot z důvodu nízké propustnosti vodní páry. V těchto betonech při vysokých teplotách nastává značný pórový tlak při odpařování vody ze struktury betonu.

2.1 Vznik pórového tlaku

Pórový tlak vzniká následkem vysokých teplot, při kterých se volná a částečně i vázaná voda v betonu přeměňuje na páru. Voda přeměněná na páru nabývá na objemu a ve struktuře betonu tak vytváří napětí, které má za následek odlupování povrchových částí betonu. Toto má vliv na požární odolnost betonu. Princip vzniku pórového tlaku je znázorněn na obr. 1.

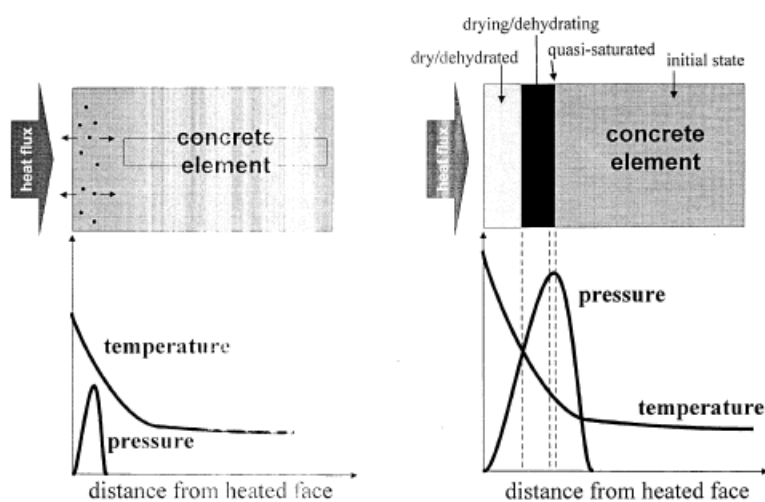


obr. 1 - Vznik pórového tlaku v betonu [2]

Tento termohydrální proces je spojen s přenosem hmoty (voda v kapalně a parní fázi a vzduch), jak je znázorněno na obr. 2. S rostoucí teplotou se voda částečně odpařuje, a právě toto odpařování vytváří tlak v porézní struktuře. Gradient tlaku je hlavní hnací silou pro přenos hmoty.

Pára a vzduch se částečně přesouvají k vyhřívanému povrchu, ale také se přesouvají do středu prvku, kde vlivem nižší teploty páry opět kondenzují na vodu, jakmile jsou splněny termodynamické podmínky. V důsledku toho se vytváří kvazi nasycená vrstva. Po určité době betonový prvek obsahuje od strany vyhřívaného povrchu suchou a dehydratovanou zónu, sušící a dehydratační zónu a kvazi nasycenou vrstvu, která působí jako nepropustná stěna pro putující plyny. Zbytek prvku se nezmění. Vrchol tlaku je umístěn v nasycené vrstvě. Čím nižší je propustnost materiálu, tím dříve (a blíže k zahřátému povrchu) vzniká toto ucpávání vlhkostí, vyšší tlak a teplotní gradient.[4]

Vlivem tlakového gradientu se voda vypařená v zóně blízko vyhřívané plochy transportuje nejen směrem ven, ale také dovnitř betonového prvku při nižší teplotě. Znovu kondenzuje a téměř nasycená vrstva se postupně formuje, což brání další hmotě v transportu ve vnitřním směru [4]



obr. 2 - Proces vytváření tlaku. [4]

2.2 Faktory ovlivňující velikost pórového tlaku

Velikost pórového tlaku ovlivňuje několik faktorů [5].

1) Vlhkost

- Tento faktor nejvíce ovlivňuje pórový tlak v betonu. V betonech s vysokou vlhkostí se při zahřátí vytvoří větší množství vodní páry, která způsobuje napětí v povrchové části prvku.

2) Mikrostruktura betonu

- Betony s vysokým vodním součinitelem obsahují velké množství kapilárních pórů, které umožňují transportní procesy uvnitř materiálu. V otevřenější mikrostruktuře betonu se vytvořené vodní páry mohou dostat z prvku lépe a rychleji, což má za následek nižší pórové tlaky. Naopak při hutnější mikrostruktuře betonu se pára nedostane z prvku ven a tlak dosahuje vysokých hodnot. Toto nastává především u vysokopevnostních betonů, které mají vysokou hustotu.

- Dalším možným výskytem pórů v materiálu jsou technologické póry, které vznikají při betonáži záměrně díky provzdušňovacím přísadám. [6]

3) Rychlost nárůstu teploty

- Čím rychleji narůstá teplota v betonu, tím výrazněji se zvyšuje pórový tlak v betonu.

2.3 Snížení pórového tlaku

Velikost pórového tlaku lze ovlivnit několika způsoby. Nejjednodušší způsobem, jak snížit pórový tlak a tím zabránit odštěpování betonu, je snížit vlhkost betonu, a to na méně než 3 % hmotnosti betonu. Při této vlhkosti je odštěpování betonu velmi nepravděpodobné. Dalším způsobem je použití vláken do betonu. Nejčastěji se v ČR používají polypropylenová vlákna a ocelová vlákna. Dále se může použít hybridní beton, který je složen ze dvou či více typů vláken. Snížení pórových tlaků v betonu lze zajistit také provzdušňovací přísadou, která má za následek vyšší pórovitost betonu. Provzdušňovací přísady vnášejí tzv účinný vzduch, tj uzavřené póry do 300 μm , který slouží pro lepší rozložení pórového tlaku v betonu.

2.3.1 Vláknobeton

Na historicky první vláknobeton se použily ocelové drátky. Drátky použité v betonu se vyrábí z oceli různých pevností a různých tvarů. Dále se do betonu používají další typy vláken, jako například skleněné, syntetické nebo přírodní. Vlákná se do betonu obvykle přidávají v množství 2 kg/m^3 . [7]

2.3.2 Provzdušněný beton

Provzdušněný beton lze získat pomocí provzdušňovacích přísad, které mají za následek vyšší pórovitost a lepší zpracování betonové směsi. Hlavní důvod provzdušňování betonu však spočívá ve vyšší odolnosti proti působení mrazu v kombinaci s chemickými rozmrazovacími látkami. Vyšší pórovitost provzdušněného betonu má dále za následek menší nárůst pórových tlaků. Velikost pórů v provzdušněném betonu bývá okolo 100–300 μm . Hodnoty porozity neprovzdušněného betonu bývají okolo 3,5 %, hodnoty provzdušněného betonu dvojnásobné, tedy okolo 6,5 %. [8]

2.3.3 Hybridní beton

Jedná se o beton s různými typy rozptýlených vláken v betonovém kompozitu, například o kombinaci ocelových a polypropylenových vláken.

2.4 Stanovení pórového tlaku v betonu

Pórový tlak v betonu můžeme zjistit dvěma způsoby. Jedním z nich je početní metoda, kde stačí znát dvě ze tří veličin, kterými jsou teplota a vlhkost, přičemž poslední neznámou (pórový tlak) dopočítáme. Druhá metoda se zabývá přímým měřením pórového tlaku pomocí měřicích přístrojů.

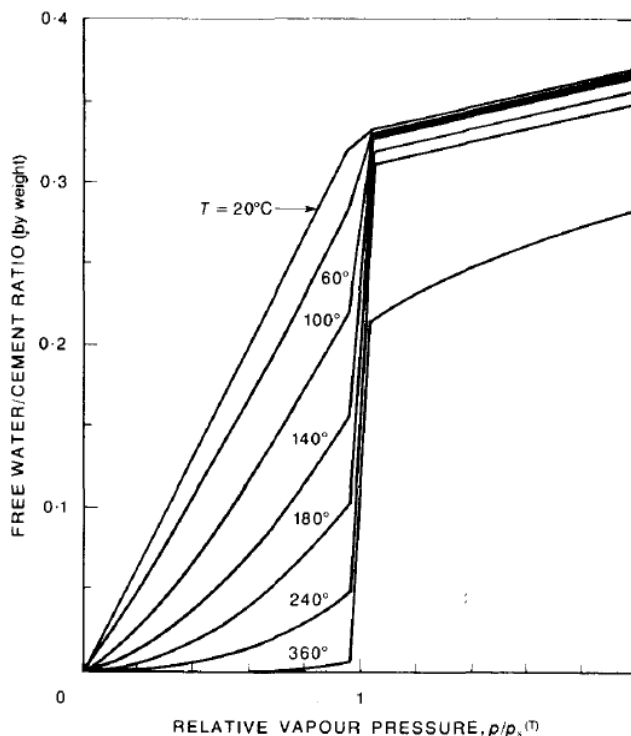
Přestože požární reakce betonových konstrukcí je zkoumána již delší dobu, experimentální studie chování materiálu nad 100 °C jsou relativně nedávná. Racionální fyzikální matematický model pro zvýšení pórového tlaku a pohyb vlhkosti v zahřátém betonu byl obecně formulován v roce 1975 a podrobná teorie byla vyvinuta až v roce 1978. [9]

2.4.1 Výpočtem

Stupeň nasycení kapaliny porézní pevné látky může být spojen nasáváním (kapilární tlak) a teplotou, která závisí na struktuře a velikosti pórů. Kelvinova rovnice stanovuje spojení mezi kapilárním tlakem a relativní vlhkostí pórů (za předpokladu, že pórový tlak je přibližný atmosférickému tlaku, nebo alespoň zanedbatelný ve srovnání s kapilárním tlakem). Stupeň nasycení zároveň souvisí s obsahem odpařitelné vody (hmotnost odpařitelné vody na jednotku objemu porézního materiálu [kg/m^3]). Hmotnostní hustotu kapalné vody lze považovat za konstantní. Hmotnostní hustotu vodní páry lze vyjádřit pomocí relativní vlhkosti a teploty pórů kombinací stavové rovnice s definicí relativní vlhkosti. Bylo zjištěno, že maximální pórový tlak je mnohem vyšší u rychlého než u pomalého zahřívání. Pohyb vlhkosti v oblastech, kde je tlakový gradient opačný než teplotní gradient, je sledován spíše nepravidelný a vykazuje oscilace. Teorie předpovídá na základě testů jev „vlhkostní bariéry“, který navrhl Hermathy. [9–12]

Při konstantní teplotě je vztah mezi obsahem odpařitelné vody a relativní vlhkostí pórů znám jako sorpční izoterma. Přesněji řečeno, desorpční izoterma nám popisuje funkci snižování obsahu vody, zatímco adsorpční izoterma (též nazývána jen sorpční izoterma) platí pro zvyšování obsahu vody.[12]

Na obr. 3 můžeme vidět sorpční izotermy, kde je vyjádřen vztah mezi poměrem volné vody s cementem a relativním tlakem par při různých teplotách. Hustota betonu = $2300 \text{ kg}/\text{m}^3$, obsah cementu = $300 \text{ kg}/\text{m}^3$, obsah volné vody $w = 100 \text{ kg}/\text{m}^3$.



obr. 3 - Sorpční izotermy – vztah mezi poměrem volné vody / cementem a relativním tlaku par při různých teplotách. [10]

2.4.2 Měření

Měření pórového tlaku v betonu je velice důležité pro ověřování výpočtů a matematických modelů. Doposud bylo ve světě zkoumáno a zkoušeno měření pórového tlaku pomocí několika způsobů [4, 5, 13, 14]. Techniky měření pórového tlaku používané různými vědci se však příliš neshodují. Nejaktuálnější popis všech doposud použitých měřících technik experimentálního nastavení popsal ve svém článku Ye Li. [14]

Aby se předcházelo poškození snímačů tlaku vysokou teplotou, bylo základní koncepcí přenášet pórový tlak ven ze zahřátého betonového vzorku. Do betonových vzorků byly proto zabetonovány korozivzdorné trubičky pro přenos tlaku do měřícího zařízení vně vzorku.

2.4.2.1 Zakončení přenosové trubičky

Zakončení trubičky lze zajistit několika způsoby. Nejjednodušším zakončením přenosové trubičky je ponechání samotné trubičky bez jakýchkoliv úprav. Druhou možností je navaření na konec trubičky korozivzdorný kalíšek, který sbírá tlak z větší plochy. Poslední možnou úpravou je do kalíšku vložit porézní slinutý kov, který shromažďuje větší množství par a rozkládá je rovnoměrně do trubičky (obr. 4). Nevýhodou porézního slinutého kovu je, že může změnit vlastnosti betonové matrice a vnést volný objem vzduchu do vzorku. Volný objem vzduchu při zahřívání usnadňuje odpařování vodních par a zpomaluje hromadění pórového tlaku.



obr. 4 - Korozivzdorná trubička s navařeným kalíškem a slinutý porézni kov [15]

2.4.2.1 Výplň přenosové trubičky

Dalším zdrojem volného objemu vzduchu je trubička, jejíž duté jádro je taktéž vyplněno vzduchem. Možností, jak se zbavit volného objemu vzduchu v trubičce je například vložení ocelové tyče, která funguje v trubičce jako píst. Druhá možnost je naplnit trubičku silikonovým, nebo ropným olejem. Tepelná roztažnost oleje však také může narušit přesnost měření pórového tlaku. Do trubiček byly také vkládány termočlánky, pro snížení volného objemu vzduchu v trubičkách, jako při vložení ocelové tyče.

2.4.2.2 Možné nastavení měřicích sestav

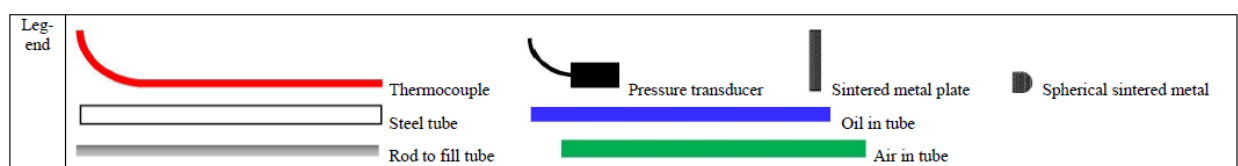
Jelikož doposud neexistuje standardizovaná zkušební metoda, jsou techniky pro měření pórových tlaků v betonu za zvýšených teplot diferencovány na základě tří základních rozdílných nastavení. První rozdíl v tlakoměrných sestavách je, zdali měříme pouze samotnou trubičkou, nebo máme na konci kalíšek se slinutým porézním diskem. Druhý rozdíl v tlakoměrné sestavě je v umístění termočlánku. Termočlánek umísťujeme buď vně, nebo uvnitř měřicí trubičky. Třetím rozdílem je zvolení více velikostí vnitřního průměru měřicí trubičky. V trubičce s vyšším průměrem se nachází vyšší objem volného vzduchu, který zneprůšňuje výsledky. Trubička s menším průměrem bez kalíšku zas naopak nemusí zachytit všech tlak z pórů vzorku a přenést ho do měřiče. Zdali je trubka naplněna silikonovým olejem, hydraulickým olejem nebo pouze vzduchem vytváří další odlišné sestavy. Každý olej má různé teplotní roztažnosti a různě reaguje na vysokou teplotu. Ideální volbou je takový olej, který má co nejmenší teplotní roztažnost. Objemová roztažnost olejů je závislá na jejich specifické hustotě. Koeficient roztažnosti klesá se stoupající hustotou, a tedy klesá i objemová roztažnost.

Na obr. 5 jsou znázorněny veškeré vyzkoušené nastavení měřicích sestav s maximálním naměřeným pórovým tlakem. Nelze však porovnávat hodnoty naměřených tlaků, kde jsou rozdílná měřidla umístěna v různých vzdálenostech od exponovaného povrchu, různé složení, vlhkost,

rychlost zahřívání betonové směsi atd. Zmíněné proměnné parametry zdatelně ovlivní výsledky naměřených hodnot. Vývoj pórového tlaku byl porovnán s teoretickým tlakem nasycených par (SVP), který představuje maximální tlak v zahřátém stavu, aby se vyhodnotilo, zda měřený tlak je skutečně přesný a spolehlivý. Měřené tlaky, kde byl v betonu počáteční obsah vlhkosti nízký, jsou nižší než SVP a pokud byl porézní tlak v suchém uzavřeném pórobetonu nasycený vodou, naměřené tlaky budou vyšší než SVP.

No.	Design of pressure gage	Type of gage head	Placement of thermocouple	Inner diameter of tube (mm)	Medium in tube	Free cross section (mm ²)	Maximum pressure (MPa)	Agreement with SVP
1		Tube	External	unknow	Rod	unknow	0.76	Lower than SVP
2		Tube	External	1	Air	0.785	3.1	Equal to SVP
3		Tube	External	4	Air	12.56	0.49	Lower than SVP
4		Tube	External	2	Diameter 1.5 mm rod	1.37	3.5	Lower than SVP
5		Tube	External	2	Hydraulic jack oil	0	8.4	Higher than SVP
					Silicon oil		4.7	Higher than SVP
6		Sintered metal plate	Internal	1.6	Diameter 1.5 mm thermocouple	0.24	0.7	Lower than SVP
							1.4	Lower than SVP
							1.25	Equal to SVP
							4.0	Higher than SVP
							3.7	Higher than SVP
7		Sintered metal plate	External	1.5	Silicon oil	0	2.5	Unknow
							1.2	Higher than SVP
							2.75	Unknow
8		Sintered metal plate	Internal	2	Diameter 1.5 mm thermocouple	1.37	6.17	Higher than SVP
							5.0	Higher than SVP
							5.0	Unknow
9		Sintered metal plate	External	2	Silicon oil	0	1.2	Equal to SVP
				Unknow	Unknow	unknow	2.52	Unknow
10		Sintered metal plate	External	1.6	0	0	2.1	Lower than SVP
11		Spherical sintered metal	Internal	2	0	0	1.32	Higher than SVP
							1.6	Unknow
							1.6	Lower than SVP
							2.5	Higher than SVP

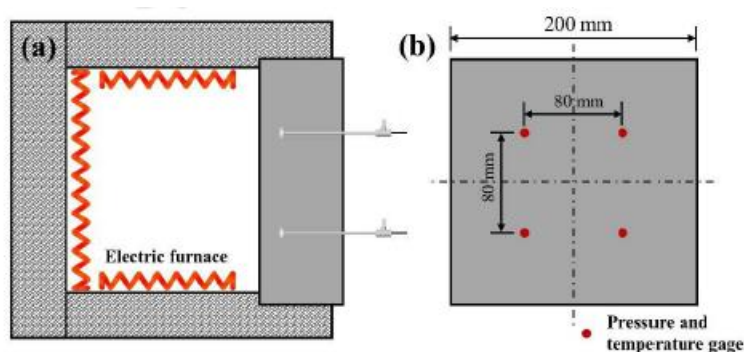
obr. 5 - Různé nastavení měřících sestav pro měření pórového tlaku v betonu vystaveném vysokým teplotám s maximálními naměřenými pórovými tlaky [14]



obr. 6 - Legenda k návrhovým tlakovým měřičům [14]

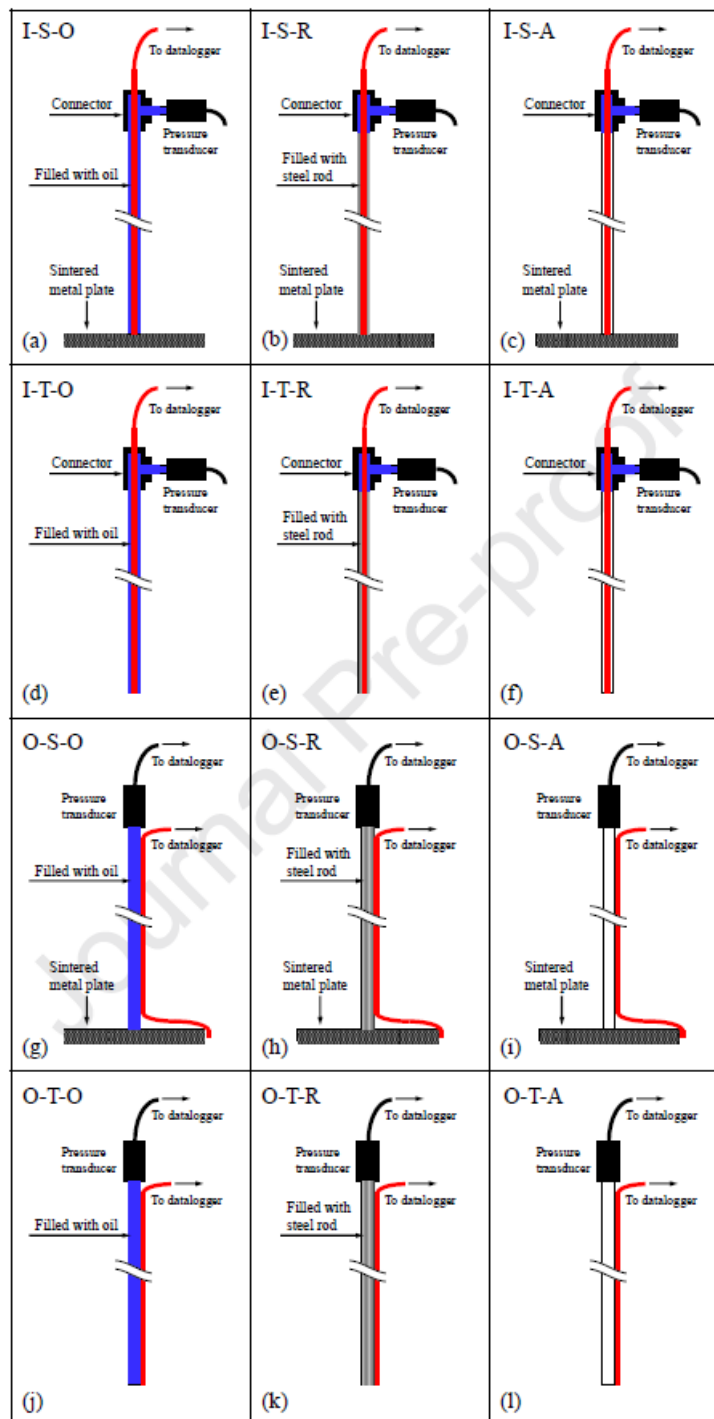
2.5 Experiment Ye Li [14]

Vzorky pro měření byly vybetonovány ze směsi portlandského cementu ASIA@ CEM I 52,5 N, přírodních říčních písků s maximálním průměrem zrna 600 μm , mikrosilikátové písky se střední velikostí částic do 130 μm a různých příměsí a přísad. Poměr vody k cementu byl držen pouze na hodnotě 0,2. Zahřívání probíhalo otvorem v elektrické topné peci o rychlosti zahřívání 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Po stranách byly vzorky izolovány minerální vatou, aby docházelo pouze k jednosměrnému zahřívání vzorku. Po dosažení teploty 600 $^{\circ}\text{C}$ byla udržována konstantní teplota, dokud neklesl měření tlak ve vzorku na nízké hodnoty. Při experimentu se také monitorovala teplota ve vzorku termočlánkem umístěným 20 mm od vyhřívaného povrchu. Na obr. 7 se nachází schéma experimentálního nastavení s umístěním měřících hlav v betonovém vzorku.



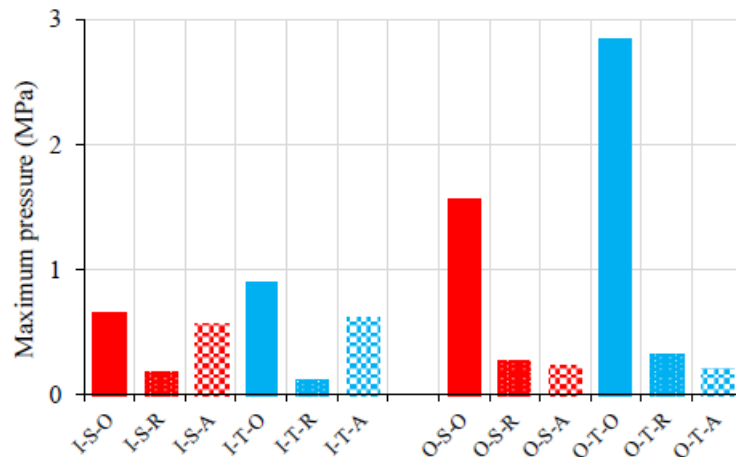
obr. 7 - (a) schéma experimentálního nastavení, (b) umístění měřících hlav [14]

obr. 8 ukazuje všech 12 konfigurací experimentálního uspořádání s rozdílem typu měřících hlav, umístění termočlánku, nebo náplní trubky olejem.



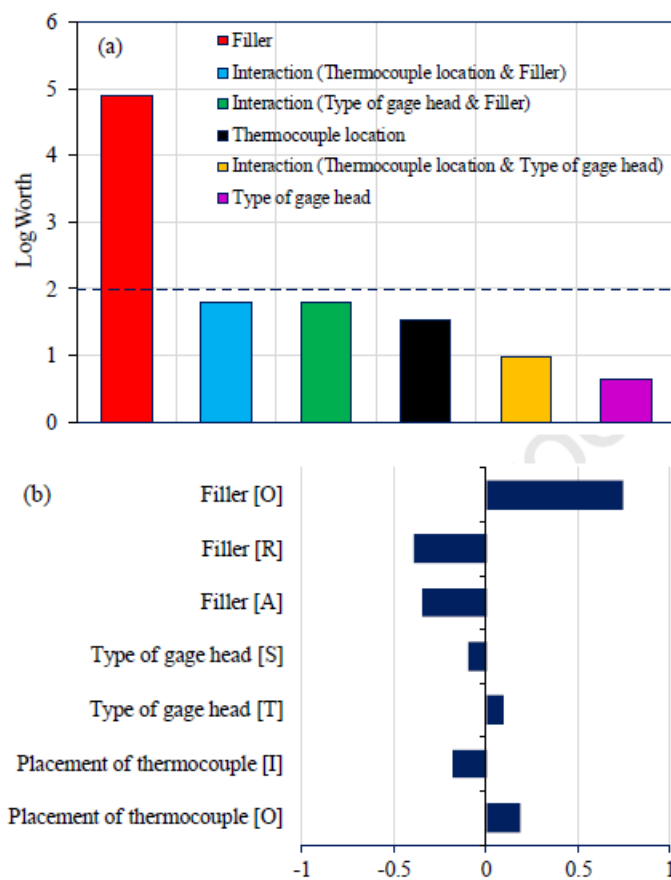
obr. 8 - Konfigurace tlakoměrných sestav (I/O: termočlánek uvnitř/vně trubky, S/T: slinutý porézni disk/pouze trubka, O/R/A: trubka vyplněna olejem/tyčí/vzduchem) [14]

Z obr. 9 je patrné, že nejvyšší tlaky byly zaznamenány v měřicích sestavách s olejovou náplní. Důvod je takový, že vyplnění trubky tyčí, nebo pouze vzduchem zanechá značný prostor pro hromadění vlhkosti.



obr. 9 - Maximální pórové tlaky použitých tlakoměrných sestav [14]

Výsledky experimentu byly analyzovány statistickým softwarem, kde byla použita analytická technika „nejmenších čtverců“. Záměrem použití softwaru bylo zjištění dominantního parametru na účinek měření. Díky tomuto bylo zjištěno, že nejvyšší vliv na měření pórových tlaků má typ plniva trubky. Při tomto vlivu ještě velice závisí na umístění termočlánků. Jestliže měříme pouze trubkou, nebo s navařeným slinutým porézním diskem není tak významné.



obr. 10 - Vliv faktorů na maximální změřený pórový tlak [14]

3 Experimentální část

Tato část diplomové práce bude zaměřena na vytvoření vzorku k experimentálnímu měření pórového tlaku v betonu vystaveném vysokým teplotám. Ve vzorku bude dále měřena vlhkost a teplota při iniciaci tepelným zdrojem. Experiment bude prováděn na Fakultě stavební ČVUT v Praze.

Cílem tohoto experimentu je provést měření pórového tlaku ve vzorku ve vzdálenosti 20 mm od zahřívaného povrchu. Při tomto měření bude také ve vzorcích měřena teplota a vlhkost. Pro experiment bylo vyrobeno 6 vzorků. Tři vzorky byly vyrobeny z kameniva, cementu a chemických příměsí, druhá polovina vzorků navíc obsahuje PP vlákna.

Vzorky o velikosti 150 x 300 x 120 mm (š x d x v) budou vystaveny tepelnému záření z keramické podložky. Pro prováděný experiment bude zdroj tepla dostačující k zahřívání zkoušeného vzorku. Při zahřívání se bude průběžně měřit proměnná hodnota pórového tlaku v závislosti na teplotě a vlhkosti. Současně budou ve vzorku umístěny termočlánky pro měření teplot. Dále se ve vzorku bude nacházet vlhkoměr Hygropin, pro měření vlhkosti.

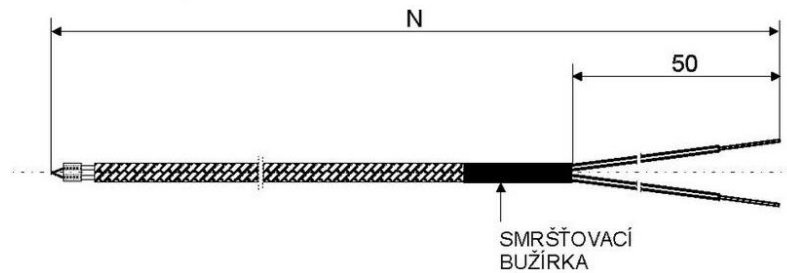
Rozměry betonového vzorku byly voleny na základě rozměru keramické topné dečky tak, aby byly přibližně stejné a nedocházelo k velkému uvolňování tepla do okolí. Pórový tlak ve vzorku se měřil pomocí měřiče, který se skládal z korozivzdorné trubičky, manometru a oleje (viz kapitola 2.4.2).

3.1 Měřiče a jejich specifikace

Pro experiment bylo použito více měřících zařízení. Pro měření teploty byl použit plášťový a kabelový termočlánek. Vlhkost byla naměřena pomocí vlhkoměru a pórový tlak byl měřen pomocí trubiček a manometru.

3.1.1 Termočlánky

Pro měření teploty uvnitř vzorku byly použity kabelové termočlánky MTC 12 typu K, které mají deklarovaný měřicí rozsah teplot až 600 °C. Ve skutečnosti ale umí měřit i více °C. Vedení GHGH z keramického vlákna s vnějším rozměrem 2 x 0,5 mm, měřicí konec bez keramického korálku, provedení studeného konce: miniaturní konektor MTCK-MM-K. Jedná se o jednoduchý kabelový termočlánek s neizolovaným měřicím spojem. Na konci je termočlánek opatřen speciálním zakončením. [16] Viz. obr. 12.



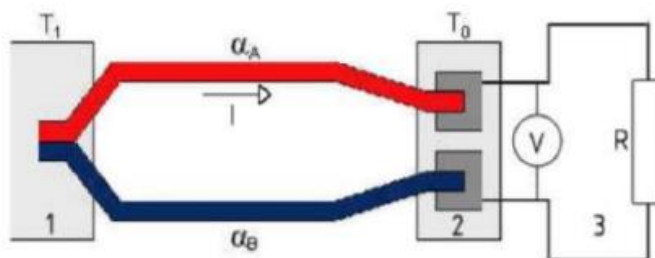
obr. 11 - Schéma kabelového termočlánku MTC 12 [16]



obr. 12 - Termočlánek upevněn na konci trubičky pro měření pórového tlaku

Dalším použitým termočlánkem v experimentu byl plášťový termočlánek, který byl vložen při realizaci experimentu mezi keramickou topnou dečku a vzorek pro měření teplot na povrchu betonového vzorku. Plášťový termočlánek je trubka z korozivzdorné oceli, v jejímž jádru se nachází termoelektrické vodiče, které jsou izolovány minerální izolací. Vnější průměr článků bývá v rozmezí od 0,1 do 8 mm. Jestliže je teplota jednoho spoje rozdílná od teploty druhého spoje, vzniká termoelektrické napětí a obvodem prochází termoelektrický proud. Jeden z uzlů je přitom měřící a druhý srovnávací. [17]

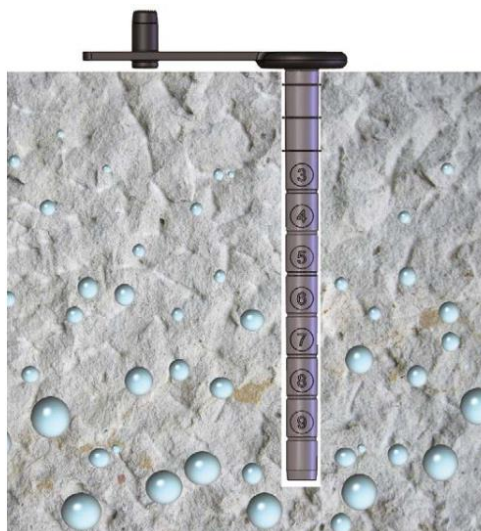
Na obr. 13 se nachází 1 – měřící spoj, 2 – srovnávací spoj a 3 – kompenzační obvod αA ; αB – dva vodiče s nízkým termoelektrickým součinitelem.



obr. 13 - Konstrukce termočlánu [18]

3.1.2 Vlhkoměr [19]

Vlhkoměr označením Hygropin od firmy Proceq je přístroj se dvěma sondami. Jedna sonda měří vlhkost pod povrchem betonu a druhá pro měření vlhkosti okolí. Vlhkoměr Hygropin využívá in-site technologie, která určí skutečný obsah vlhkosti v betonu.



obr. 14 - Řez Hygropinem v betonu [19]

Do betonu se zabetonuje plastové pouzdro, což je plastová dutá trubička s průměrem 8 mm. Na konci je pouzdro opatřeno límcem, který zabraňuje přílišnému vnoření do betonu. Při betonáži se do pouzdra se vloží plastová ucpávací tyčinka, které zabraňuje mokrému betonu natečení do pouzdra. Po vytvrzení betonu se tyčinka z pouzdra vyjme a do pouzdra se vloží in-site sonda, která je kabelem připojena k přístroji. [3]



obr. 15 - Plastové pouzdro hygropinu



obr. 16 - Plastové pouzdro hygropinu + ucpávací tyčinka

3.1.3 Korozivzdorná trubička [20]

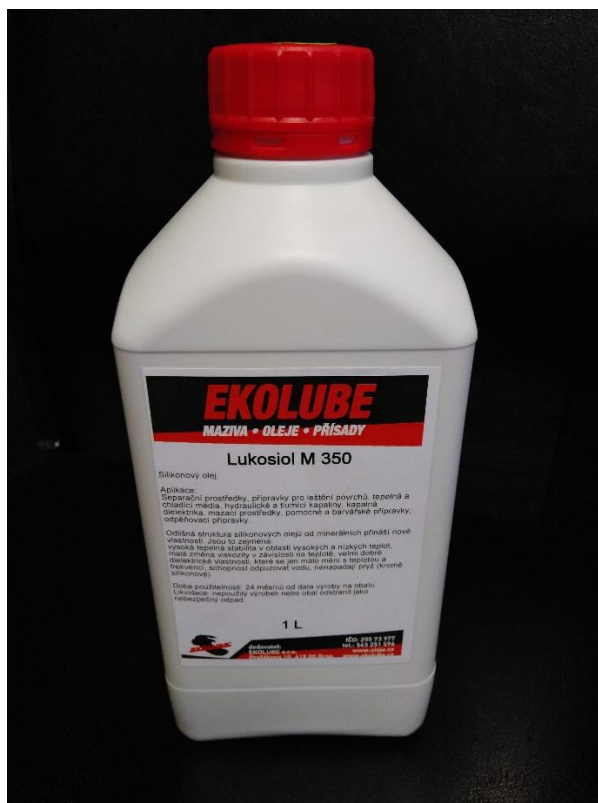
Trubička byla vyrobena z korozivzdorné oceli s označením 1.4541 – odolná vůči agresivním kyselinám. Materiál je nemagnetický, nekalitelný, obtížně lešitelný a dobře svařitelný. Trubička o vnějším průměru 8 mm, tloušťkou stěny 2 mm a délky 1,8 m. Trubička byla zakrácena na délku 300 mm, tj. bylo vyrobeno celkem 6 kusů. Na jeden konec trubičky byl navařen dutý obrobek šestiúhelníkového průřezu s vnitřním závitem s označením G 1/4 “. Závít byl volen takový, aby byl shodný se závitem na manometru.



obr. 17 - Korozivzdorná trubička s navařeným zvnitřním závitem.

3.1.4 Silikonový olej [21]

Pro tento experiment byl vybrán jako nejvhodnější olej metyl silikonový, a to z důvodu nízké teplotní roztažnosti. Konkrétně byl vybrán olej Lukosiol M 350 značky Ekolube. Tento olej se vyznačuje vysokou tepelnou stabilitou v oblasti vysokých a nízkých teplot, malou změnou viskozity v závislosti na teplotě a téměř neměnnou hustotou (970 kg/m^3) v širokém rozmezí viskozit.



obr. 18 - Silikonový olej Ekolube

3.1.5 Manometr [22]

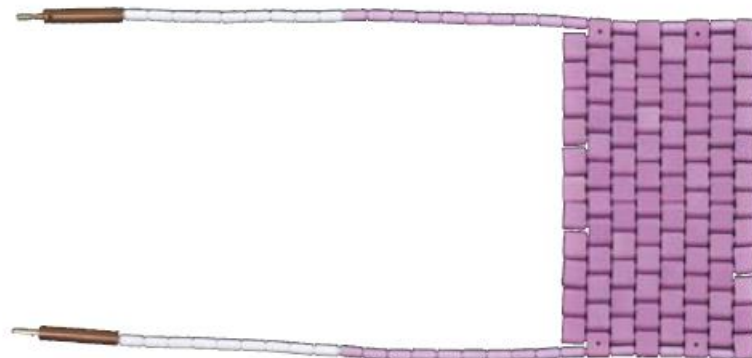
Korozivzdorný manometr značky WIKA pro experiment byl doporučen pro jeho odolnost vysokým teplotám. Tento manometr s průměrem 63 mm a se spodním připojením je opatřen vnějším závitem G 1/4 “. Rozmezí měřených tlaků se pohybuje mezi 0 bar až 60 bar. V experimentu předpokládáme maximální tlaky okolo 40 bar. Korozivzdorné manometry – série MN se vyrábí z korozivzdorné oceli AISI 316L (1.4404), která je dobře svařitelná a lešitelná. Ocel je velice odolná proti koncentrovaným kyselinám jak organickým, tak anorganickým a má výrazně zvýšenou odolnost proti všem typům koroze. Tato ocel se používá v chemickém průmyslu. Manometr je tudíž určen pro měření tlaku agresivních medií s vysokými nároky na mechanickou i teplotní odolnost přístroje. Třída přesnosti měření manometru je udávána 1,6 %.



obr. 19 - Manometr (foto pouze ilustrativní) [22]

3.1.6 Topné těleso [23]

Vzorek byl zahříván topným tělesem značky Thermal Hire. Jedná se o keramickou podložku s označením 400003 o velikosti 152 x 336 mm, napětí 60 V a výkonem 2,7 kW. Keramická podložka je vyrobena z keramických korálků s vysokým obsahem oxidu hlinitého pospojovanými drátem z nikl-chromového pružného jádra. Podložky jsou vhodné pro teploty do 1050 °C. Vyšší teploty lze dosáhnout použitím jádrového drátu s jiným složením materiálů.



obr. 20 - Topné těleso Thermal Hire [23]

3.2 Výroba vzorků a rozmístění měřičů

Betonové vzorky o rozměru 150 x 300 x 120 mm byly vybetonovány ze dvou velmi podobných směsí. První tři vzorky byly vybetonovány ze směsi viz. tab. 2. Čtvrtý až šestý vzorek byl vybetonován ze směsi viz. tab. 3. Rozdíly jsou pouze v použití PP vláken do betonu.

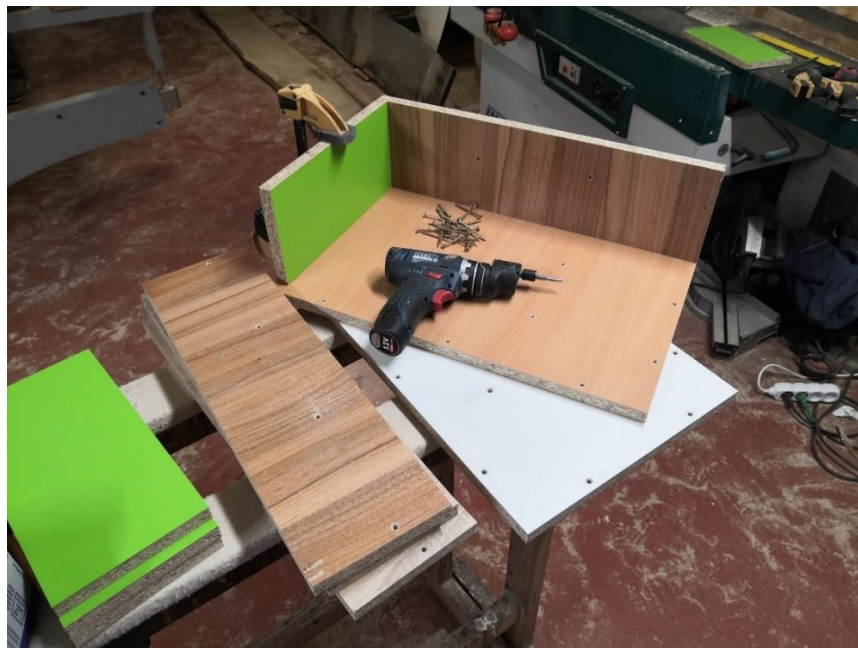
Složení betonové směsi C30/37 - vzorek č. 1	
Složka	Typ/označení
Cement	CEM I 42,5 - Mokrý
Voda	----
Kamenivo	Frakce 0/4, 8/16, 11/22
Plastifikátor	Stachement S33
Provzdušňovač	Mikroporan 2

tab. 2 - Receptura betonové směsi č. 1 (bez PP vláken)

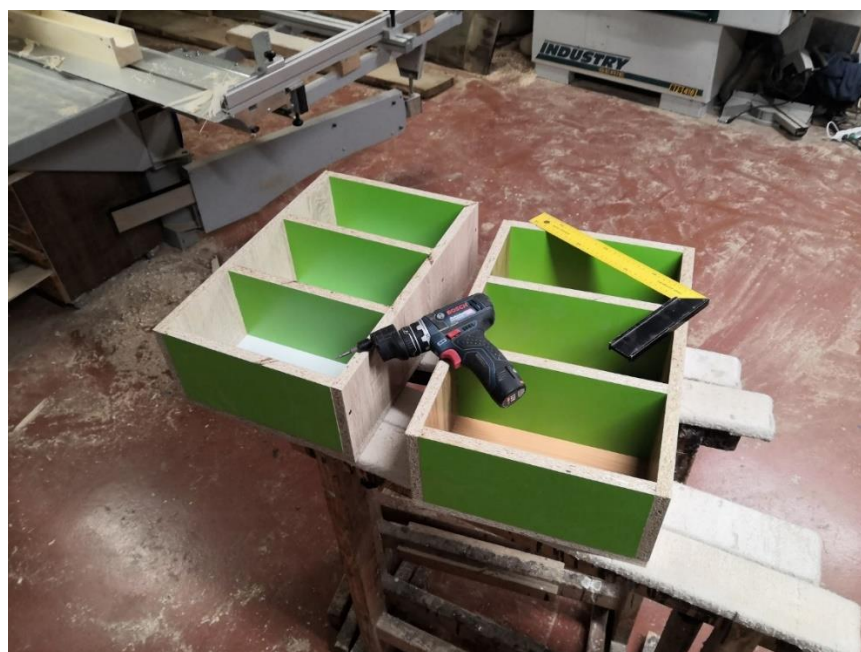
Složení betonové směsi C30/37 - vzorek č. 2	
Složka	Typ/označení
Cement	CEM I 42,5 - Mokrý
Voda	----
Kamenivo	Frakce 0/4, 8/16, 11/22
Plastifikátor	Stachement S33
Provzdušňovač	Mikroporan 2
Vlákna	PP 6 mm

tab. 3 - Receptura betonové směsi č.2 (s PP vlákny)

Před výrobou vzorků bylo třeba si nejprve připravit jednotlivé části. První připravovaná část bylo bednění z laminátových desek. Desky byly nařezány do požadovaných rozměrů a následně sešroubovány. Byly vyrobeny dvě formy, z nichž každá sloužila k výrobě tří zkušebních těles daných rozměrů. Forma byla o celkové velikosti 300 x 450 x 150 mm.



obr. 21 - Výroba formy



obr. 22 - Hotové formy k výrobě zkušebních těles

Do připravených forem byly umístěny duté korozivzdorné trubičky viz 3.1.3. Otvor trubičky byl vyplněn tyčí o průměru 3 mm, a to z důvodu, aby se nám směs při betonáži nevytlačila do trubičky. Tyč byla zasunuta horním otvorem do trubičky v celé délce trubičky a následně byla zafixována modelovací gumou. Následně byl k trubičce lepicí páskou připevněn termočlánek, který má funkci měření teplot ve vzdálenosti 20 mm od nahřívajícího povrchu. Vzhledem k použití speciálního spoje byl termočlánek na konci ohnut od trubičky do pravého úhlu, aby byla přesně dána polohová výška měření a měření probíhalo v isothermě. Další méně důležitý důvod ohybu byl takový, aby nedocházelo k měření chybných hodnot teploty vlivem doteku s korozivzdornou trubičkou.



obr. 23 - Ocelová tyč utěšňující otvor trubky proti případnému vniknutí betonové směsi při betonáži



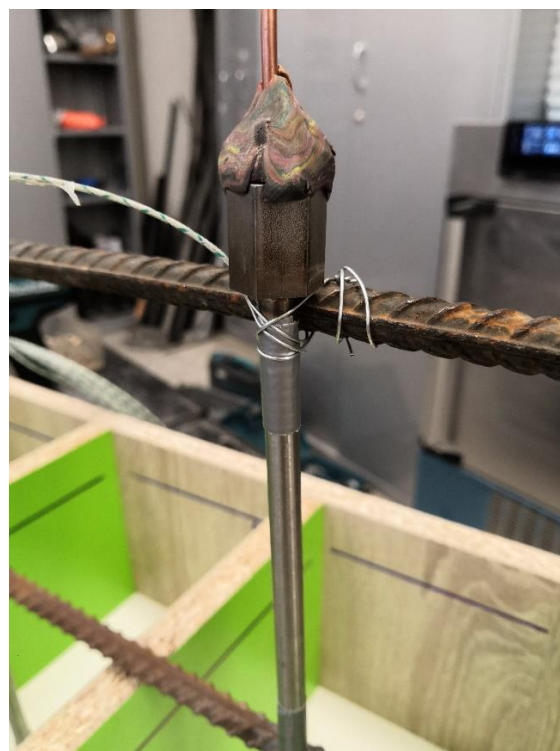
obr. 24 - Upevnění ocelové tyče k trubičce

Bednicí formy byly opatřeny hrazdou z výztužných tyčí, která slouží jako pomocná konstrukce pro upevnění korozivzdorných trubiček. Hrazda byla vyrobena pomocí dřevěných hranolů připevněných svisle na obou kratších stranách bednicího dílce, ke kterým se následně vodorovně upevnily ocelové betonářské žebírkové tyče. Tyto tyče byly k hranolu upevněny pomocí vázacích drátů.

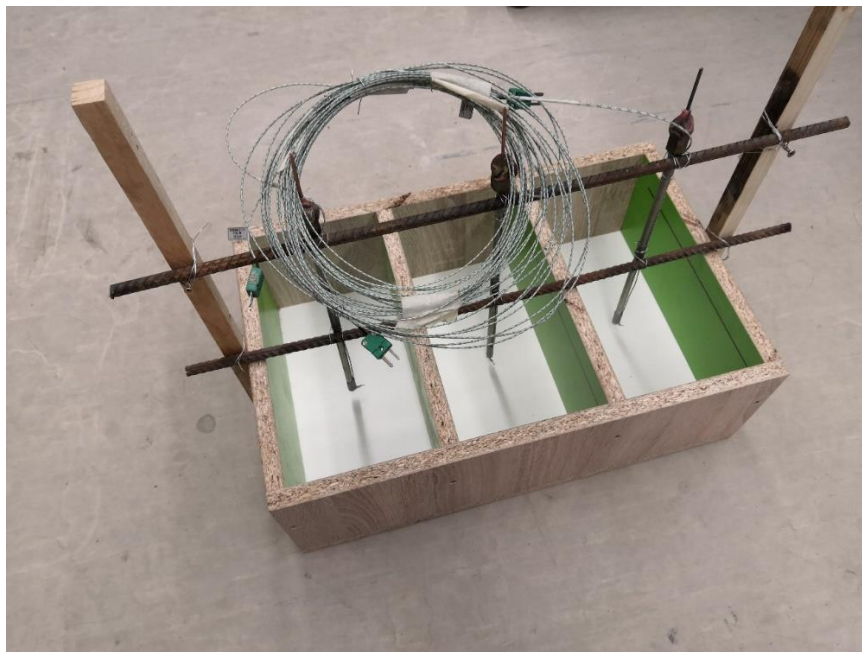
Následně byly upevněny korozivzdorné trubičky. Tyto trubičky byly vázány ve svislé poloze, kolmo k betonářským žebírkovým tyčím, pomocí vázacího drátu. Nejprve byla trubička upevněna ke spodní betonářské tyči a poté se trubička horizontálně srovnala tak, aby byl její konec 20 mm od podlahy bednicího dílce. Po výškovém urovnání byla upevněna i k horní betonářské tyči a drátem řádně utažena, aby nemohla změnit svou polohu. Při provádění veškerých spojů byl kladen velký důraz na přesnost, aby vlivem ukládání betonu do formy a vlivem vibrací nedošlo ke změně přesné polohy trubičky a termočlátku.



obr. 25 - Detail upevnění korozivzdorné trubičky pomocí žebříku z betonářské výztuže k bednicím dílcům



obr. 26 - Detail upevnění horní části korozivzdorné trubičky k betonářské výztuži pomocí vázacího drátu



obr. 27 - Bednicí dílec s fixovanými korozivzdornými trubičkami a termočlánky připravený k betonáži

Další částí přípravy k samotné betonáži byla příprava jednotlivých materiálů pro betonovou směs. Betonová směs C30/37 byla složena ze tří základních složek, a to z cementu, vody a kameniva. Dále bylo přidáno chemických přísad jako plastifikátor a provzdušňovač betonu. Složení betonových směsí viz tab. 2 a tab. 3. Všechny materiály byly s vysokou přesností naváženy do plastových nádob. Každá složka kameniva, cementu a vody se nacházela samostatně v plastových nádobách. Do dvou malých nádob byl navážen provzdušňovač a plastifikátor. Viz. obr. 28. Druhý typ vzorku navíc obsahoval polypropylenová vlákna délky 6 mm viz. obr. 29.



obr. 28 - Jednotlivé složky betonové směsi



obr. 29 - Polypropylenová vlákna délky 6 mm obsažené v jednom typu betonových vzorků

Složky prvního vzorku byly nasypány do míchačky od nejhrubší frakce kameniva po nejjemnější. Po kamenivu se přisypal cement a vše se nechalo na sucho promíchat viz. obr. 30. Po dostatečném smíchání suchých směsí byla v nádobě smíchána voda s plastifikátorem a provzdušňovačem betonu. Připravená voda s chemickými přísadami byla za stálého míchání postupně vlévána do suché směsi. Doba míchání od přidání vody byla 3 minuty. Po dostatečném promíchání se pomocí zednické lžice začala směs plnit do připravených forem, které byly již položeny na vibračním stole.



obr. 30 - Postupné nasypání suché směsi do míchačky od nejhrubšího kameniva po nejjemnější s následným zasypáním cementu



obr. 31 - Vlévání vody do míchačky s přidáním plastifikátorem a provzdušňovačem betonu



obr. 32 - Vyplnění a vibrování betonové směsi do bednicího dílce na požadovanou výšku

Postupným ukládáním betonové směsi a vibrováním vzorku byly vyplněny všechny tři komory bednicího dílce až na požadovanou výšku 120 mm. Po dosažení této výšky bylo do jednoho betonového vzorku vtlačeno plastové pouzdro hygropinu o délce 100 mm.



obr. 33 - Po dosažení požadované výšky betonového vzorku bylo ponořeno plastové pouzdro hygropinu

Druhý typ vzorku byl připravován obdobným způsobem, kdy se do míchačky vsypala nejprve suchá směs od nejhrubší frakce kameniva až po cement. Dále byla, na rozdíl od prvního vzorku, přidána polypropylenová vlákna viz. obr. 34. Po rozmíchání suché směsi se přilila voda s potřebnou chemií a vše se důkladně rozmíchalo v maximální době 3 minuty. Následně se směsí vyplnil a zavibroval i druhý bednicí dílec a bylo přidáno plastové pouzdro hygropinu.

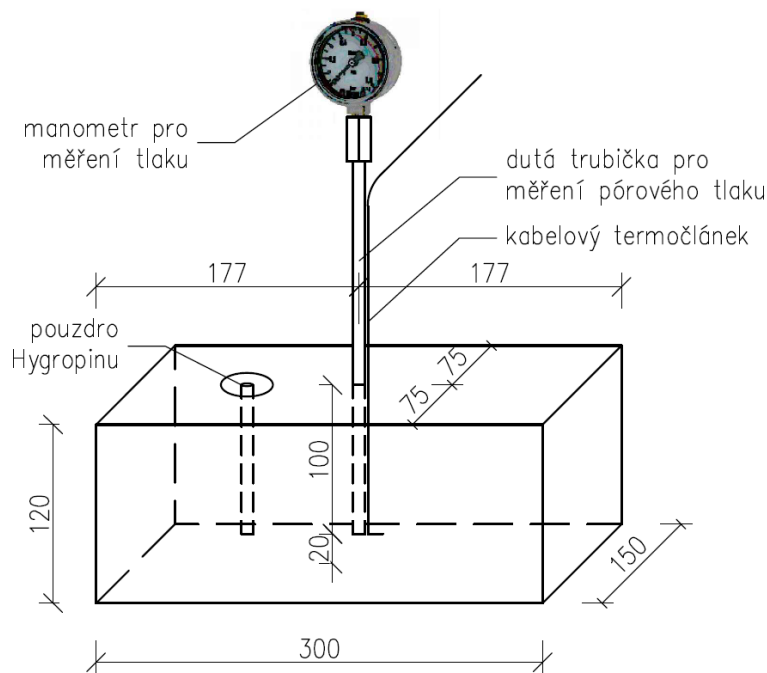


obr. 34 - Přidání polypropylenových vláken do suché směsi betonu před jejím zamíchání

Obě hotové vybetonované formy byly převezeny do zkušební místnosti, kde se vzorky nechaly vytvrdnout.



obr. 35 - Tělesa po betonáži



obr. 36 - Schéma betonového vzorku s rozmístěním měřičů

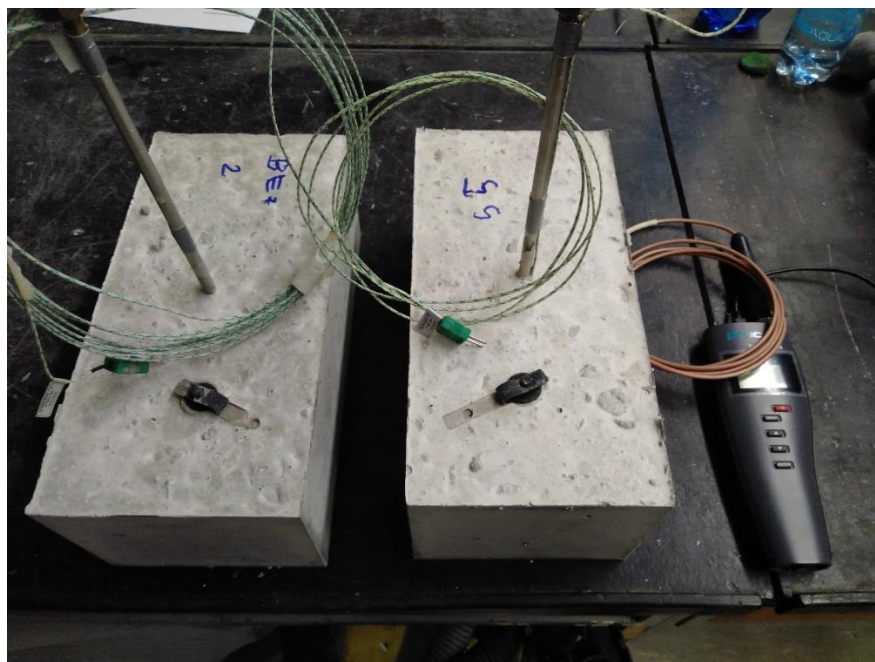
Poslední fází výroby vzorků bylo samotné odbednění, které proběhlo 7 dnů po betonáži.

3.3 Měření

Dále bylo provedeno měření teploty, vlhkosti a pórových tlaků v betonu za zvýšených teplot. Příprava celého měření začala lehce po 14. hodině a v plánu bylo měření na dvou vzorcích. První měření probíhalo na betonovém vzorku bez PP vláken a druhé měření se provádělo na vzorku s PP vlákny. Autoři fotografií v části 3.3 Měření jsou pánové Ing. Radek Štefan Ph.D. a Ing. Roman Chylík.

3.3.1 Příprava vzorku

Vzorky, které byly uloženy téměř 4 týdny v konstantních laboratorních podmínkách, aby beton dostatečně vyžrál, byly připraveny k měření vlhkosti. Měření vlhkosti bylo prováděno pomocí přístroje Hygropin Proceq na obou vzorcích. Nejprve byla měřena vlhkost a teplota vzduchu v místnosti. Vlhkost vzduchu byla naměřena na hodnotu 26,61 % a teplota 22,82 °C. Dále již bylo prováděno měření samotných vzorků. Vlhkost vzorku bez PP vláken byla 62,71 % při teplotě 20,66 °C. Vlhkost vzorku s PP vlákny byla 62,54 % při teplotě 19,6 °C. obr. 37 a obr. 38 znázorňují měření vlhkosti v obou vzorcích.

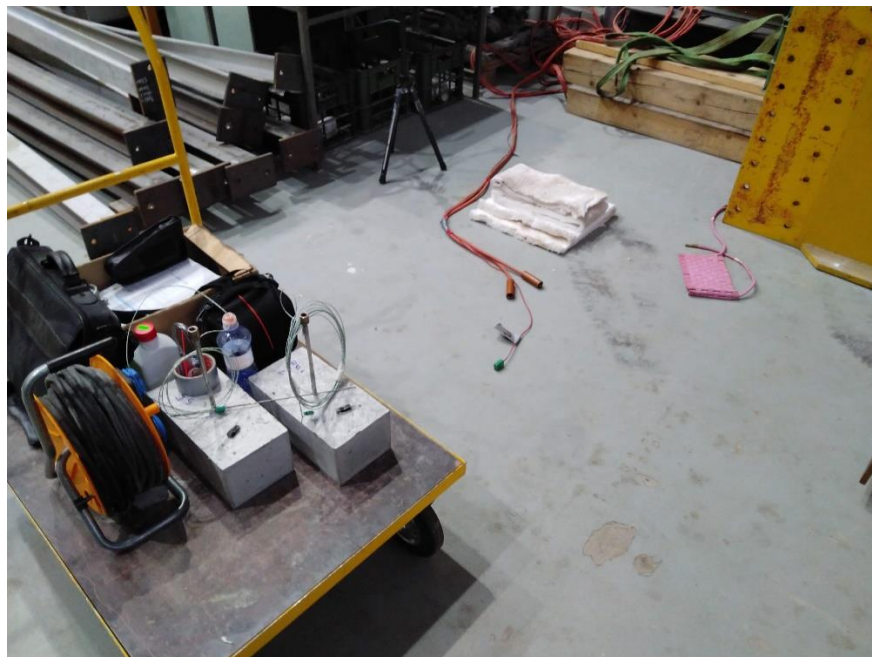


obr. 37 - Příprava na měření vlhkosti pomocí přístroje Hygropin Proceq



obr. 38 - Měření vlhkosti ve vzorku s PP vlákny

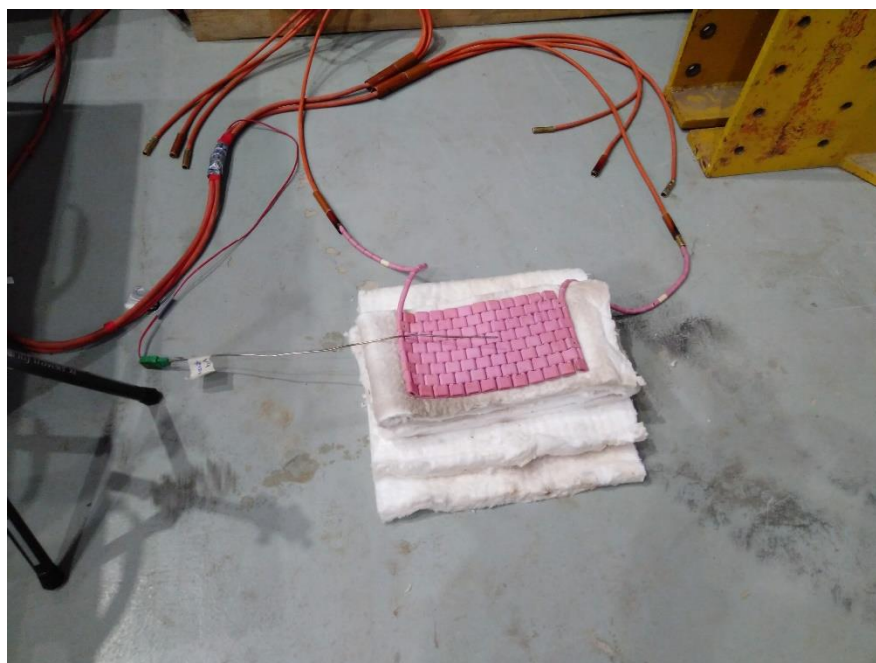
Po tomto měření vlhkosti byla tělesa přepravena k měření pórového tlaku. K experimentu bylo připraveno místo pro měření tak, že byla rozestlána sklená vata v několika vrstvách, aby nedocházelo k úniku tepla do podlahy a tím i k případnému poškození podlahy. Na sklenou vatu byla následně položena dečka z keramických korálků, která sloužila jako iniciační zdroj teploty.



obr. 39 - Vozík s připravenými věcmi pro experiment, zkušebními tělesy a místo zvolené pro experiment

Na obr. 39 je vozík s potřebnými věcmi a v dále jsou na zemi již vidět červené kabely pro připojení topné rohože (růžová), kabel pro připojení pláštěvého termočlánku k dataloggeru a připravenou skelnou vatou.

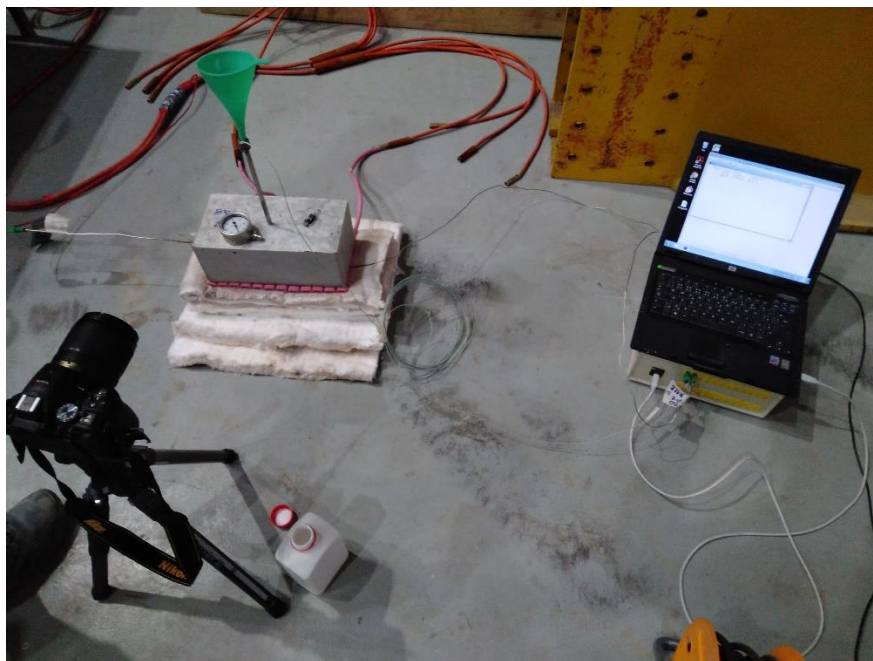
Topné těleso bylo umístěno na skelnou vatu a připojeno ke kabelům, které vedly k ovládacímu přístroji viz obr. 40. Ovládací přístroj a udával teplotu topnému tělesu.



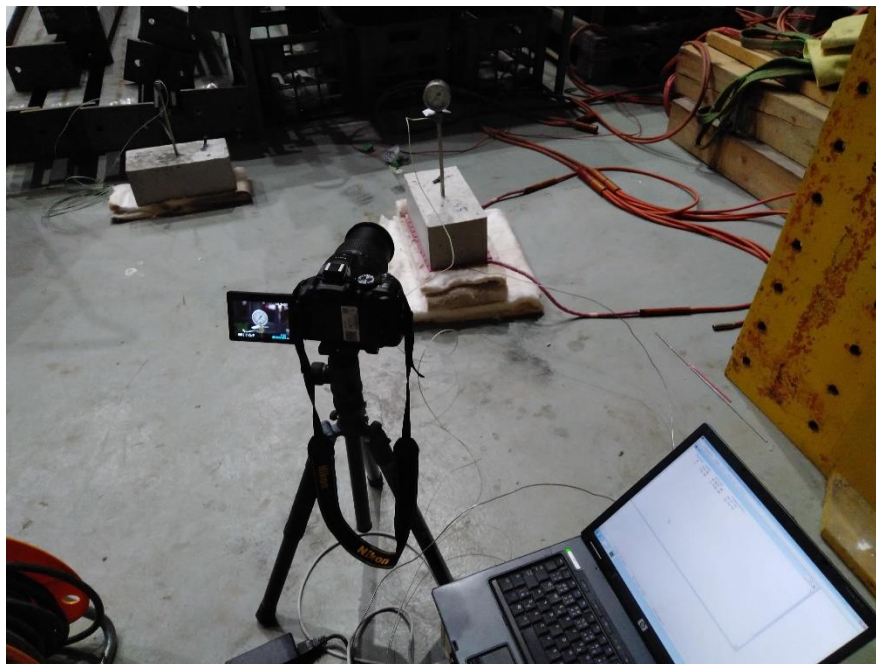
obr. 40 - Topná rohož umístěna na podestýlce ze skelné vaty a připravený pláštěvý termočlánek

V poslední fázi přípravy byl připojen k dataloggeru také počítač, který později při měření zapisoval teploty na povrchu a uvnitř vzorku.

Vzorek bez PP vláken byl položen na topné těleso a kabelový termočlánek, který byl umístěn uvnitř betonového vzorku byl připojen k dataloggeru. Do zabetonované korozivzdorné trubičky byl pomocí trychtýře nalit silikonový olej a následně byl přišroubován manometr (obr. 41). Kousek od vzorku byl připraven stativ s fotoaparátem, který sloužil ke snímání hodnot na manometru (obr. 42).



obr. 41 - Poslední fáze přípravy před měřením



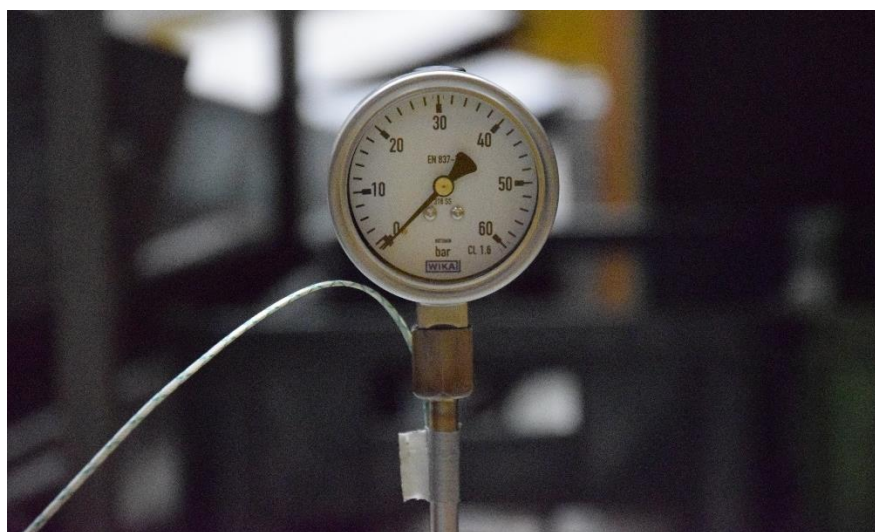
obr. 42 - Měřicí sestava

3.3.2 Měření

Sestavení měřicí aparatury a nastavení všech požadovaných čidel trvalo přibližně hodinu, a tak zahřívání vzorků započalo kolem 15. hodiny. Venkovní teploty v laboratoři ukazovaly okolo 20 °C a teploty na povrchu vzorku a uvnitř vzorku začínaly pomalu narůstat. Celé měření trvalo kolem 90 minut po kterých byl první vzorek odzkoušen. Ihned poté byl vzorek bez PP vláken odstraněn a na jeho místo byl uložen vzorek s PP vlákny. Celý proces přípravy od položení vzorku na topné těleso, přes připevnění termočlánku, až po našroubování manometru pouze s rozdílem bez naplnění trubičky silikonovým olejem, byl zopakován jako u předchozího vzorku. Druhý vzorek byl nahříván cca 105 minut.



obr. 43 - Měření

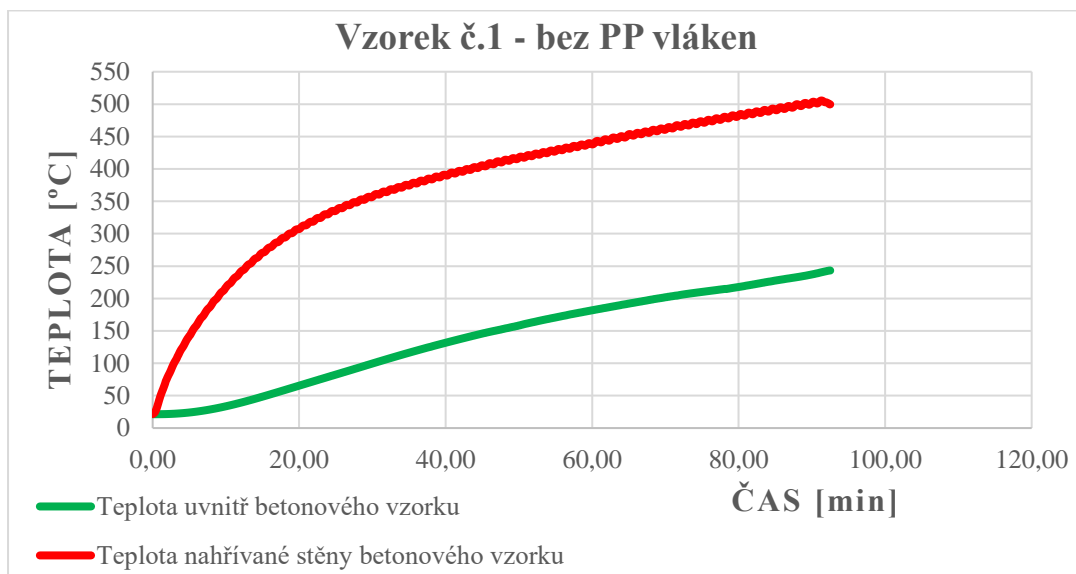


obr. 44 - Zaznamenání změn pórového tlaku na manometru

3.4 Vyhodnocení experimentu

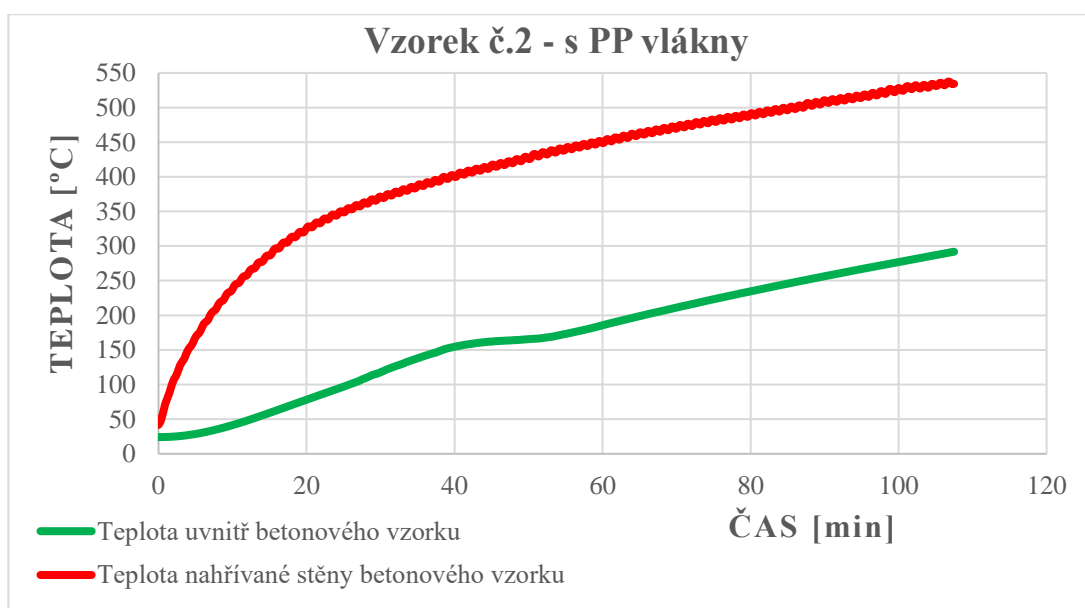
3.4.1 Teplota

Teplota byla měřena na nahřivaném povrchu vzorku díky plášt'ovému termočlánku uloženému mezi topným tělesem a betonovým vzorkem. Druhá teplota byla měřena uvnitř vzorků, a to ve vzdálenosti 20 mm od nahřivaného povrchu, tzn. ve stejné vzdálenosti jako v umístění sběrného místa měřicí aparatury pro měření vlhkosti a pórového tlaku.



graf 1 - Teploty ve vzorku č. 1 - bez PP vláken

Z grafu č.1 je patrné, že maximální teplota v čase ukončení měření, tj. po 120 minutách, byla na nahřivaném povrchu vzorku (červená) cca 500 °C, uvnitř vzorku ve vzdálenosti 20 mm od nahřivané plochy vzorku (zelená) necelých 300 °C.



graf 2 - Teploty ve vzorku č. 2 - s PP vlákny

Na grafu č.2 vidíme nárůst teplot na nahřivaném povrchu vzorku (červená) do maximální teploty 540 °C a uvnitř vzorku (zelená), kde byly termočlánky umístěny 20 mm od nahřivaného povrchu do maximální teploty 290 °C. V graf 2 je také možno vidět v čase 50 minut při teplotě 160 °C prokluz měřené teploty. To vyplívá z uvolňování vázané vody – fázová výměna.

3.4.2 Pórový tlak

Ačkoliv set-up experimentu této diplomové práce byl zvolen přesně dle experimentu Ye Li [14], kde byla zvolena varianta pouze korozivzdorné trubičky vyplněné silikonovým olejem, tak žádný pórový tlak bohužel nebyl naměřen. Po prvním, neúspěšně odzkoušeném, vzorku bylo vyzkoušeno měření bez silikonového oleje, tzn. s trubičkou vyplněnou pouze vzduchem. Bohužel ani toto nastavení nemělo úspěšný konec. Po odejmutí manometru z trubičky nebylo vidět, že by šla z trubička alespoň pára, naopak z Hygropinového pouzdra pára vycházela. To, že nebyl zaznamenán žádný pórový tlak v betonu mohla být příčina mnoha faktorů.

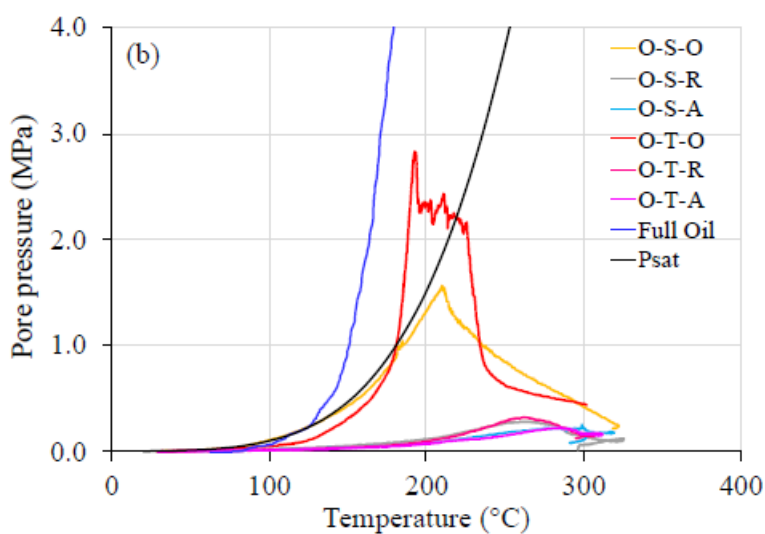
V tomto experimentu neměl žádný vliv na měření rozdíl set-upů, zdali je tlak přenášen do manometru pomocí oleje, nebo vzduchu. Nastavení měřící techniky by mohlo pomoci například:

- Použitím trubičky o větším průměru, která díky většímu průměru sbírala tlak z větší plochy v betonovém vzorku.
- Navařením kalíšku na konec trubičky, který by taktéž sbíral tlak z větší plochy.
- Změna délky či síly stěny trubičky by mohla ovlivňovat výsledky tím, že trubičku na převislém konci ochlazuje okolní vzduch a tím trubička může odvádět teplo z betonového vzorku. Ověření by mohlo být provedeno vložením termočlánku do trubičky a následné zahřátí vzorku, čímž by se zjistil rozdíl teplot mezi teplotou uvnitř trubičky a teplotou ve vzdálenosti 20 mm od zahřivaného povrchu mimo trubičku. Vyřešením tohoto problému by bylo použití trubičky s tenčí stěnou a zkrácení trubičky na délku, aby bylo možno manometr našroubovat hned u vzorku.
- Složením receptury betonové směsi. V žádné z předchozích prací nebyla uvedena přesná receptura betonové směsi, a tak na měření pórového tlaku může mít vliv i například velikost kameniva.
- Vtlačení trubičky do betonu. V tomto experimentu byla uchycena trubička k bedně před betonáží a následně byla provedena betonáž s vibrováním. Tím může dojít k postupnému ucpání trubičky jemným cementovým tmelem, který by mohl utěsnit otvor trubičky a nepustit tak do trubičky pórový tlak. Jiný postup by mohl být takový, že by se vzorek nejprve vybetonoval a následně by byla trubička vtlačena do betonové směsi. Takto bylo do betonové směsi uloženo i plastové pouzdro Hygropinu, které bylo při experimentu zaklapnuto gumovou zásepku a při zahřívání gumová zásepka tlakem vylétla z pouzdra (obr. 45).



obr. 45 - Obrázek zachycující explozivní vystřelení gumového víčka Hygropinového pouzdra

Očekávaný výstup experimentu byla podobná křivka jako na obr. 46, kde stejné nastavení měřící techniky je označovány písmeny O-T-O. Označení znamená O (outside) termočlánek vně měřící trubičky, T (tube) trubička ukončená bez kalíšku, O (oil) trubička naplněná olejem. Toto nastavení bylo vybráno z důvodu jednoduchosti přípravy a dále z hlediska vykazování nejvyšších pórových tlaků v experimentu Ye Li [14].



obr. 46 - Zobrazení výsledků měření experimentu Ye Li [14]

4 Závěr a návaznost na diplomovou práci

Cílem této diplomové práce bylo zjistit možnosti, jaké jsou v dnešní době metody měření pórového tlaku v betonu vystavených vysokým teplotám a shrnout tyto metody měření pórového tlaku. Jedna z metod byla vybrána a vyzkoušena v experimentu.

V teoretické části se práce zabývá, co je to pórový tlak. Jak vzniká, jaké má negativní následky na betonové konstrukce a jak ho lze snížit. Dále bylo stručně popsáno, jak lze pórový tlak získat výpočtem a podrobněji popsáno, jak lze změřit. V práci je shrnut výzkum z roku 2020 z Číny, který měl na starost Ye Li [14]. Práce byla na téma metody měření pórového tlaku. Byly v ní shrnuty veškeré možnosti nastavení měřicích zařízení pórových tlaků v betonu za zvýšených teplot. Ye Li si zvolil ve své práci 12 různých možností nastavení měřicích zařízení a podrobně je porovnal a analyzoval výsledky. Díky tomuto bylo zjištěno, že nejvyšší vliv na měření pórových tlaků má typ plniva trubky. Při tomto vlivu ještě velice závisí na umístění termočlánků. Jestli že měříme pouze trubkou, nebo s navařeným slinutým porézním diskem není tak významné.

Praktická část této práce se zaměřila na výrobu 6 betonových vzorků o rozměrech 150 x 300 x 120 mm. Dva odlišné typy vzorků se lišily pouze ve výskytu polypropylenových vláken. Ve 3 vzorcích se PP vlákna vyskytovala a ve 3 se nevyskytovala PP vlákna. Betonová směs byla tedy složena z vody, kameniva, cementu, provzdušňovače, plastifikátoru a polypropylenových vláken. Do každého vzorku byla zabetonována dutá trubička, na jejímž konci vně vzorku se nachází závit pro upevnění manometru. Druhý, volný konec trubičky uvnitř vzorku byl vzdálen od nahřívajícího povrchu 20 mm. Ve stejné vzdálenosti od povrchu byl umístěn také termočlánek pro měření teploty. Dále se ve vzorku vyskytovala plastová trubička Hygropin, díky které se ve vzorku zároveň změnila vlhkost.

Vzorky se nechaly vytvrdnout a po necelých 4 týdnech byl proveden experiment. Experiment započal se dvěma vzorky, jedním bez PP vláken a jedním s PP vlákny. Před zkoušením se ve vzorcích změnila vlhkost pomocí přístroje Hygropin Proceq, která ukazovala téměř stejné hodnoty 62 % a teploty 22 °C. Zkoušený vzorek byl následně položen na topné těleso, které vzorek nahřívalo. Teploty na povrchu se pohybovaly po cca 120 minutách kolem 500 °C, uvnitř vzorku kolem 300 °C. Při tomto měření měl být zároveň měřen i pórový tlak, čehož se bohužel nedařilo.

Pórový tlak se nejspíš nepodařilo změřit z jednoho z následujících faktorů. Jedním z nich může být například ochlazování polohy měření korozivzdornou trubičkou dlouhou vysoko nad vzorek. To by šlo zjistit například vložením termočlánku do trubičky a pozorovat teplotu přímo v trubičce. Druhým faktorem může být ucpání hrdla trubičky cementovou kaší při betonáži a následném vibrování. Dalo by se trubičku zatlačit do vzorku až po betonáži.

Námětem na další diplomovou práci by bylo vhodné zkusit promyslet další možné důvody, proč se pórový tlak nepodařilo změřit. Zkusit použít jiný set-up pro měření, například trubička opatřená na konci kalíškem, který sbírá pórový tlak z větší plochy.

Seznam obrázků

obr. 1 - Vznik pórového tlaku v betonu [2].....	10
obr. 2 - Proces vytváření tlaku. [4].....	11
obr. 3 - Sorpční izotermy – vztah mezi poměrem volné vody / cementem a relativním tlaku par při různých teplotách. [10].....	14
obr. 4 - Korozivzdorná trubička s navařeným kalíškem a slinutý porézni kov [15].....	15
obr. 5 - Různé nastavení měřících sestav pro měření pórového tlaku v betonu vystaveném vysokým teplotám s maximálními naměřenými pórovými tlaky [14].....	16
obr. 6 - Legenda k návrhovým tlakovým měřičům [14].....	16
obr. 7 - (a) schéma experimentální nastavení, (b) umístění měřících hlav [14].....	17
obr. 8 - Konfigurace tlakoměrných sestav (I/O: termočlánek uvnitř/vně trubky, S/T: slinutý porézni disk/pouze trubka, O/R/A: trubka vyplněna olejem/tyčí/vzduchem) [14].....	18
obr. 9 - Maximální pórové tlaky použitých tlakoměrných sestav [14].....	19
obr. 10 - Vliv faktorů na maximální změřený pórový tlak [14].....	19
obr. 11 - Schéma kabelového termočlátku MTC 12 [16].....	21
obr. 12 - Termočlánek upevněn na konci trubičky pro měření pórového tlaku.....	21
obr. 13 - Konstrukce termočlátku [18].....	22
obr. 14 - Řez Hygropinem v betonu [19].....	22
obr. 15 - Plastové pouzdro hygropinu.....	23
obr. 16 - Plastové pouzdro hygropinu + ucpávací tyčinka.....	23
obr. 17 - Korozivzdorná trubička s navařeným zvnitřním závitem.	23
obr. 18 - Silikonový olej Ekolube.....	24
obr. 19 - Manometr (foto pouze ilustrativní) [22].....	25
obr. 20 - Topné těleso Thermal Hire [23].....	25
obr. 21 - Výroba formy.....	27
obr. 22 - Hotové formy k výrobě zkušebních těles.....	27
obr. 23 - Ocelová tyč utěsňující otvor trubky proti případnému vniknutí betonové směsi při betonáži.....	28
obr. 24 - Upevnění ocelové tyče k trubičce.....	28
obr. 25 - Detail upevnění korozivzdorné trubičky pomocí žebříku z betonářské výztuže k bednicím dílcům.....	29
obr. 26 - Detail upevnění horní části korozivzdorné trubičky k betonářské výztuži pomocí vázacího drátu.....	29

obr. 27 - Bednicí dílec s fixovanými korozivzdornými trubičkami a termočlánek připravený k betonáži	30
obr. 28 - Jednotlivé složky betonové směsi	30
obr. 29 - Polypropylenová vlákna délky 6 mm obsažené v jednom typu betonových vzorků	31
obr. 30 - Postupné nasypání suché směsi do míchačky od nejhrubšího kameniva po nejjemnější s následným zasypáním cementu	31
obr. 31 - Vlévání vody do míchačky s přidáním plastifikátorem a provzdušňovačem betonu	32
obr. 32 - Vyplnění a vibrování betonové směsi do bednicího dílce na požadovanou výšku ...	32
obr. 33 - Po dosažení požadované výšky betonového vzorku bylo ponořeno plastové pouzdro hygropinu	33
obr. 34 - Přidání polypropylenových vláken do suché směsi betonu před jejím zamíchání	34
obr. 35 - Tělesa po betonáži	34
obr. 36 - Schéma betonového vzorku s rozmístěním měřičů	35
obr. 37 - Příprava na měření vlhkosti pomocí přístroje Hygropin Proceq	36
obr. 38 - Měření vlhkosti ve vzorku s PP vlákny	36
obr. 39 - Vozík s připravenými věcmi pro experiment, zkušebními tělesy a místo zvolené pro experiment	37
obr. 40 - Topná rohož umístěna na podestýlce ze skelné vaty a připravený plášťový termočlánek	37
obr. 41 - Poslední fáze přípravy před měřením	38
obr. 42 - Měřicí sestava	38
obr. 43 - Měření	39
obr. 44 - Zaznamenání změn pórového tlaku na manometru	39
obr. 45 - Obrázek zachycující explozivní vystřelení gumového víčka Hygropinového pouzdra	42
obr. 46 - Zobrazení výsledků měření experimentu Ye Li [14]	42

Seznam tabulek

tab. 1 - Přeměna betonu za zvýšených teplot [3]	8
tab. 2 - Receptura betonové směsi č. 1 (bez PP vláken)	26
tab. 3 - Receptura betonové směsi č.2 (s PP vlákny)	26

Seznam grafů

graf 1 - Teploty ve vzorku č. 1 - bez PP vláken.....	40
graf 2 - Teploty ve vzorku č. 2 - s PP vlákny.....	40

Literatura

- [1] KUPILÍK, Václav. *Stavební konstrukce z požárního hlediska*. Grada Publishing, a.s. 2006. ISBN 80-247-1329-2.
- [2] ŠTEFAN, Radek a Jaroslav PROCHÁZKA. Požární spolehlivost betonových a zděných konstrukcí. In: . Praha. 2016.
- [3] RAJMAN, Daniel. *Metody měření vlhkosti v betonu vystaveném vysokým teplotám*. Praha, 2018. Diplomová práce. ČVUT.
- [4] KALIFA, Pierre. *Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures*. B.m.: Centre scientifique et Technique de Batiment, France. 1. srpen 2000
- [5] MUGUME RODGERS BANGI. *Pore pressure development in hybrid fibre-reinforced high strength concrete at elevated temperatures*. B.m.: Hokkaido University, Japan. 2011
- [6] Základní fyzikální vlastnosti stavebních materiálů ve vazbě na izolační vlastnosti. In: [online]. Praha. Dostupné z: http://tpm.fsv.cvut.cz/student/documents/files/TVVM/prednaskaII_YISM_03.pdf
- [7] BROUKALOVÁ, Iva. *Aplikace cementových a betonových kompozitů v konstrukčních prvcích*. Praha, 2017. ČVUT.
- [8] HOLAN, Jakub, Radek ŠTEFAN a Josef NOVÁK. Provzdušnění betonu jako alternativa k polypropylenovým vláknům a jeho vliv na pevnost v tlaku běžného betonu vystaveného působením vysokých teplot. 2020, **20**(2), Technologie, 40–43.
- [9] BAŽANT, Zdeněk a Werapol THONGUTHAI. *Pore pressure and drying of concrete at high temperature*. B.m.: Journal of the engineering mechanics division. říjen 1978
- [10] BAŽANT, Zdeněk a Werapol THONGUTHAI. *Pore pressure in heated concrete walls: theoretical prediction*. B.m.: Northwestern university. červen 1979
- [11] ŠTEFAN, Radek. *Transport Processes in Concrete at High Temperatures Mathematical Modelling and Engineering Applications with Focus on Concrete Spalling*. Praha, 2015. Disertační práce. ČVUT.
- [12] BAŽANT, Zdeněk P. a Milan JIRÁSEK. *Creep and hygrothermal effects in concrete structures*. B.m.: Springer, 2018. Solid mechanics and its applications. ISBN 978-94-024-1136-2.
- [13] MINDEGUIA, Jean-Christophe. *Temperature, pore pressure and mass variation of concrete subjected to high temperature — Experimental and numerical discussion on spalling risk*. B.m.: Elsevier, France. 2010
- [14] LI, Ye, Dong ZHANG a Kang Hai TAN. On measuring techniques of pore pressure in concrete at elevated temperature. *Cement and Concrete Composites* [online]. 2020, (114). ISSN 09589465. Dostupné z: doi:doi:10.1016/j.cemconcomp.2020.103737

-
- [15] KUČA, Martin. *Experimentální analýza transportu tepla v betonových a ocelobetonových prvcích*. Praha, 2016. Diplomová práce. ČVUT.
- [16] *Kabelový termočlánek MTC 12* [online]. B.m.: MAVIS Nový Bor s. r. o. 2018. Dostupné z: <http://www.mavis.cz/termoclanek-kabelovy-mtc12>
- [17] PŘIDAL, Oldřich. *Termočlánekový snímač teploty (TST)*. Brno, 2008. VUT.
- [18] LIŠKOVÁ, Nikola. *Adiabatická teplota povrchu ve vodorovné peci*. Praha, 2017. Diplomová práce. ČVUT.
- [19] *Hygropin Proceq - The perfect solution to identify and monitor moisture in concrete*. [online]. B.m.: Proceq SA. 2017. Dostupné z: https://pqwworld.proceq.com/uploads/tx_proceqproductcms/import_data/files/Hygropin_Sales%20Flyer_English_high.pdf
- [20] *Nerezové trubky - bežešvé* [online]. B.m.: Inerez.cz. Dostupné z: <https://www.inerez.cz/nerezove-trubky-a-jekly/nerezove-trubky-bezesve/>
- [21] *Lukosiol M350 (1 l)* [online]. B.m.: Ekolube. Dostupné z: <https://www.oleje.cz/p/lukosiol-m-350-1-l--18595>
- [22] *Nerezové manometry - série MN* [online]. B.m.: WIKA. Dostupné z: https://www.kompresory-vzduchotechnika.cz/user/related_files/katalogy-katalog-list-503.pdf
- [23] *Thermal Hire - Product catalogue* [online]. B.m.: Thermal Hire. Dostupné z: https://www.thermalhire.com/media/5itbddhq/thermalhire_cat_lr.pdf