

**ČVUT v Praze, Fakulta stavební, katedra materiálového
inženýrství a chemie**

Využití cihelného prachu při výrobě tepelně odolných
cementových kompozitů

Využití cihelného prachu při výrobě tepelně odolných cementových kompozitů

Bakalářská práce

Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Požární bezpečnost staveb

Vedoucí práce: Ing. Dana Koňáková, Ph.D.

Romana Vaničková

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: <u>Vaničková</u>	Jméno: <u>Romana</u>	Osobní číslo: <u>494017</u>
Zadávací katedra: <u>K123 - Katedra materiálového inženýrství a chemie</u>		
Studijní program: <u>Stavební inženýrství</u>		
Studijní obor/specializace: <u>Q - Požární bezpečnost staveb</u>		

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: <u>Využití cihelného prachu při výrobě tepelně odolných cementových kompozitů</u>	
Název bakalářské práce anglicky: <u>Applicability of ceramic dust for the production of thermal-resistant cement-based composites</u>	
Pokyny pro vypracování: Zadáním bakalářské práce je studium použitelnosti cihelného prachu pro návrh nízkocementového pojiva odolného vysokým teplotám. Součástí práce bude rešerše současného stavu poznání, metodika testování, charakterizace vyvíjených materiálů a výsledné shrnutí získaných poznatků.	
Seznam doporučené literatury: - SVOBODA, L.. Stavební Hmoty. JAGA Group s.r.o. 2007 - SCRIVENER, K. L. and CAPMAS, A. 13 Calcium Aluminate Cements. In: Lea's Chemistry of Cement and Concrete. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2003, 713-782.	
Jméno vedoucího bakalářské práce: <u>Ing. Dana Koňáková, Ph.D.</u>	
Datum zadání bakalářské práce: <u>27.2.2023</u>	Termín odevzdání BP v IS KOS: <u>22.5.2023</u> <i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>
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“.

<u>27.2.2023</u> Datum převzetí zadání	Podpis studenta(ky)
---	---------------------



**ČVUT v Praze, Fakulta stavební, katedra materiálového inženýrství
a chemie**

Využití cihelného prachu při výrobě tepelně odolných cementových
kompozitů

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předkládanou diplomovou prací zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Praze dne

.....

Romana Vaníčková



**ČVUT v Praze, Fakulta stavební, katedra materiálového inženýrství
a chemie**

Využití cihelného prachu při výrobě tepelně odolných cementových
kompozitů

Poděkování

Ráda bych poděkovala vedoucí mé bakalářské práce Ing. Daně Koňákové, Ph.D, za její vstřícné vedení, odborné podněty a cenné rady při zpracovávání mé bakalářské práce. Také bych ráda vyjádřila své díky zaměstnancům katedry materiálového inženýrství za jejich pomoc při výrobě a experimentálnímu testování navržených kompozitů.



Abstrakt

Tato práce se zabývá možností využití odpadního cihelného prachu jako částečné náhrady hlinitanového cementu při vysokoteplotních aplikacích. Pro dosažení lepších výsledků byla jako další příměs použita reaktivní alumina. Bylo navrženo celkem 14 kompozitů s různými poměry zkoumaných přísad. Experimentální měření byla provedena na vzorcích za standardních podmínek a po vystavení tepelnému zatížení v peci při teplotě 1400 °C. Na základě získaných výsledků lze potvrdit potenciál cihelného prachu jako částečné náhrady hlinitanového cementu při použití ve vysokoteplotních aplikacích. Relativně dobrých výsledků bylo dosaženo při jeho dávkování do 45 %. Jako optimální se však ukázala kombinace 30 % cihelného prachu a 15 % reaktivní aluminu.

Klíčová slova

Hlinitanový cement, cihelný prach, žáruvzdorný beton, odpadní materiály

Abstract

This work investigates the possibility of utilizing waste ceramic powder as a supplementary cementitious material (SCM) in high-temperature applications. Reactive alumina was used as an additional admixture to enhance results properties. A total of 14 composites were designed with varying ratios of the investigated additives. Experimental measurements were carried out on the samples under standard conditions and after subjecting them to thermal loading in an oven at 1400 °C. From the reached results, it can be concluded that waste ceramic powder has a reasonable potential to be used as an SCM for high-temperature applications at a dosage of up to 45%. A combination of 30% ceramic powder and 15% reactive alumina seems to be an optimal solution.

Key words

Calcium aluminate cement, waste ceramic powder, refractory concrete, waste materials



Obsah

Úvod.....	3
Cíle práce.....	4
1 TEORETICKÁ ČÁST	5
1.1 Význam z hlediska požární bezpečnosti staveb.....	5
1.1.1 Charakteristický průběh požáru	5
1.1.2 Reakce stavebních výrobků na oheň.....	6
1.1.3 Beton z pohledu požární ochrany	7
1.2 Procesy probíhající v běžném betonu při vystavení požáru	8
1.2.1 Explosivní odprýskávání	9
1.3 Hlinitanový cement	12
1.3.1 Druhy a složení hlinitanových cementů	13
1.3.2 Výroba.....	13
1.3.3 Hydratace a konverze	14
1.4 Příměsi cementových kompozitů	16
1.4.1 Současný stav poznání.....	17
2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	21
2.1 Metody.....	21
2.1.1 Základní fyzikální vlastnosti	21
2.1.2 Mechanické vlastnosti.....	25
2.2 Materiály	28
2.2.1 Cement.....	28
2.2.2 Cihelný prach	28
2.2.3 Reaktivní alumina	30
2.2.4 Kamenivo	31
2.3 Navržené směsi	32
2.4 Výsledky	35
2.4.1 Základní fyzikální vlastnosti	35
2.4.2 Mechanické vlastnosti.....	44
3 Závěr	49



4	Citovaná literatura.....	50
	Seznam použitých zkratk.....	54
	Seznam obrázků	55
	Seznam tabulek.....	56

Úvod

Beton jako takový je v zásadě nehořlavý materiál a ve srovnání s ostatními stavebními materiály má výborné vlastnosti z hlediska požární odolnosti. Při působení vysokých teplot však dochází ke změně chemických a fyzikálních vlastností betonu a tyto změny bývají většinou nevratné. Trvanlivost betonové konstrukce za zvýšené teploty závisí mimo jiné na pevnosti tohoto materiálu po dobu trvání požáru a také na pevnosti při jeho následném ochlazování. Běžně používané betony na bázi portlandského cementu však nejsou tepelnému namáhání příliš odolné. Při běžném složení jsou vhodné pro aplikace do teplot cca 700 °C, při vyšších teplotách dochází k rozkladu portlanditu a úplné dehydrataci CSH gelů [1]. Ke zvýšení trvanlivosti betonu za požáru se využívají různé kombinace pojiv, plniv, příměsí a přísad v betonové směsi, jejichž obměnou a kombinováním lze dosáhnout materiálů, které jsou schopny odolávat extrémním teplotám i jejich ochlazování.

V současné době vyžaduje řada průmyslových a výrobních procesů použití zařízení, která produkují extrémně vysoké teploty, nebo jsou těmto teplotám přímo vystaveny. Tato zařízení, jako jsou například vysoké pece nebo pece na výrobu skla a keramiky, musí být vyrobeny z materiálů, které jsou schopny takto vysokým teplotám odolávat. V těchto případech je obvykle používán právě beton, protože je snadno dostupný, může být vyroben v nejrůznějších tvarech a má vysokou pevnost. Vhodně navržený žáruvzdorný beton zvyšuje odolnost pece na teplotní šoky, a tím zvyšuje její životnost. Použití takového materiálu může pro své izolační schopnosti také snížit energetickou náročnost pece.

Beton s odolností proti vysokým teplotám může mít své využití také při výstavbě budov, a to zejména tam, kde je vyžadována určitá požární odolnost mezi jednotlivými požárními úseky. Pasivní požární ochrana zahrnuje materiálové, konstrukční a dispoziční řešení stavby a představuje základní schopnost budovy vzdorovat požáru. Oproti aktivní požární ochraně, která používá systémy pro detekci, signalizaci, hašení a likvidaci požáru, pasivní požární ochrana se zaměřuje na zamezení šíření požáru v budovách a mezi nimi.

Výborné požární odolnosti dosahuje beton s hlinitanovým cementem (CAC), kterým se tato práce mimo jiné zabývá. Kvůli nestabilnímu chemickému složení je však v mnoha zemích (včetně České republiky) tento beton zakázáno používat do nosných konstrukcí,

nebo je jeho použití podmíněno použitím vyššího množství pojiva a vyššího vodního součinitele. Tyto kompozity mají obvykle schopnost odolávat teplotám nad 1500 °C bez mechanického a chemického poškození [2].

Spotřeba a poptávka hlinitanového cementu v posledních letech neustále roste a nejčastějším využitím CAC je právě vysokoteplotní aplikace. S rostoucí produkcí cementu je ale spotřebováváno značné množství nerostných surovin a při výrobě samotného slínku je produkováno vysoké množství emisí CO₂. Spotřebu cementu lze částečně snížit přidáváním různých přísad, které navíc mohou pozitivně ovlivňovat výsledné vlastnosti betonu. Kromě běžných přísad lze cement nahradit i některými odpadními látkami, což se pozitivně odráží na jejich ceně. Recyklací odpadního materiálu se navíc smysluplně uplatní jeho další využití. Použití recyklovaných materiálů při nahrazování cementu má však své limity. Je potřeba zohlednit vlastnosti těchto materiálů, zvolit vhodný poměr a zjistit jejich vliv na vlastnosti výsledného produktu.

Tato práce se věnuje využití odpadního cihelného prachu jako alternativní přísady.

Cíle práce

Cílem této práce je návrh složení cementového kompozitu, ve kterém je hlinitanový cement částečně nahrazen cihelným prachem. Práce je zaměřena na nalezení optimálního poměru mezi těmito surovinami tak, aby byly zachovány dobré mechanické vlastnosti a tepelná odolnost betonu.

1 TEORETICKÁ ČÁST

1.1 Význam z hlediska požární bezpečnosti staveb

1.1.1 Charakteristický průběh požáru

Pro hodnocení materiálů nebo výrobků z hlediska požární odolnosti je definován jednotný systém měření. Důležitým faktorem k získání opakovatelných výsledků je stanovení teplot a tepelných změn působících na výrobek v závislosti na čase. Proto pro potřeby zkoušek vznikla celá řada modelů požárů. Tyto modely vycházejí z reálných a experimentálně prováděných požárů v uzavřeném prostoru.

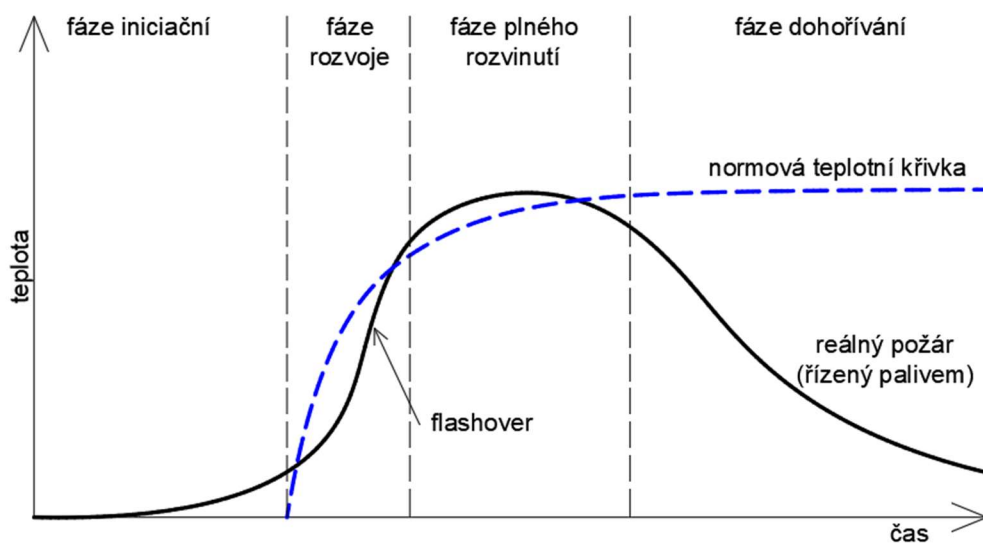
Obvykle lze rozeznat čtyři charakteristické fáze hoření:

Iniciace – dochází k zapálení hořlavého materiálu a jeho rozhořívání. Délka této fáze závisí na mnoha faktorech, například na povaze a umístění hořlavého materiálu, přístupu kyslíku, geometrie prostoru apod. Intenzita hoření je poměrně malá a tato fáze je nejvhodnější pro zahájení hasebních prací. V této fázi jsou účinné prvky aktivní požární ochrany; tj. požárně bezpečnostní zařízení, která detekují a likvidují vznikající požár. V tomto okamžiku musí také proběhnout evakuace ohrožených osob.

Rozvoj – dochází ke kumulování a zahřívání kouře pod stropní konstrukcí. Při dosažení teploty kouře okolo 500–600 °C obvykle dochází k tzv. *flashover efektu*. Ze samostatně hořícího předmětu se požár rychle rozšíří do zbytku prostoru přes nahromaděnou a zahřátou vrstvu kouře. Tento jev je charakteristický prudkým nárůstem teplot. Od této fáze je důležité, aby se požár nešířil do dalších požárních úseků (nebo na okolní budovy).

Plně rozvinutý požár – teploty plynů dosahují maximálních teplot. V místnosti hoří všechny hořlavé látky, bývají narušeny nosné prvky a dochází ke zřícení stropů, krovů apod.

Dohořívání – konstrukce postupně chladne až na teplotu okolí. Požár začíná slábnout v případech, kdy dojde palivo nebo kyslík. Rychlost chladnutí závisí na více faktorech, nejzásadnější je rychlost proudění vzduchu, teplota při požáru, hasební práce a mohutnost konstrukce [3, 4].



obr. 1: Charakteristický průběh požáru v uzavřeném prostoru [4]

Pro potřeby požární bezpečnosti staveb je nejběžněji používaným matematickým vyjádřením požáru tzv. normová teplotní křivka obr. 1. Skutečná požární odolnost výrobků je testována na stejném teplotním průběhu v akreditovaných zkušebnách, jako je například česká zkušebna PAVÚS, která je oprávněna udělovat certifikaci výrobkům, jež splnily požadovaná kritéria. Normová teplotní křivka je definována v ČSN EN 1363-1 [5].

1.1.2 Reakce stavebních výrobků na oheň

Třída reakce stavebních výrobků na oheň udává, jakým způsobem materiál reaguje na kontakt s ohněm, tedy jak přispívá svou hořlavostí k rozvoji a intenzitě vznikajícího požáru. Výrobky jsou klasifikovány do příslušných tříd na základě několika malorozměrových laboratorních zkoušek, které probíhají jednotně dle evropských standardů.

Zkušební metody jsou specifikovány v evropské normě EN 13501-1-1 [6]:

- zkouška nehořlavosti
- stanovení spalného tepla
- zkouška jednotlivým hořícím předmětem
- zkouška zápalnosti
- stanovení chování podlahových krytin při hoření užitím zdroje sálavého tepla

Norma rozděluje stavební výrobky do sedmi tříd:

tab. 1: Třídy reakce na oheň pro stavební výrobky [4]

Třída reakce na oheň		Chování při požáru	Příklad výrobku
Nehořlavé výrobky	A1	nepřispívá k rozvoji požáru ani kouře	keramika, sklo, beton, kovy
	A2	nepřispívá významně k rozvoji požáru	sádkartonová nebo sádrovláknitá deska
	B	velmi omezeně přispívá k rozvoji požáru	vinylové podlahy
Hořlavé výrobky	C	omezeně přispívá k flashover efektu	fenolická pěna
	D	přispívá k flashover efektu	dřevo a výrobky ze dřeva
	E	výrazně přispívá k flashover efektu	expandovaný polystyren
	F	Materiály nezařazené do třídy A1 až E	

Norma dále popisuje tzv. doplňkovou klasifikaci. Tyto charakteristiky se testují spolu s třídou reakce na oheň a pomáhají posoudit další vlastnosti výrobků, jako je intenzita vývoje kouře (s1 až s3) a tvorba hořících kapek (d0 až d2).

1.1.3 Beton z pohledu požární ochrany

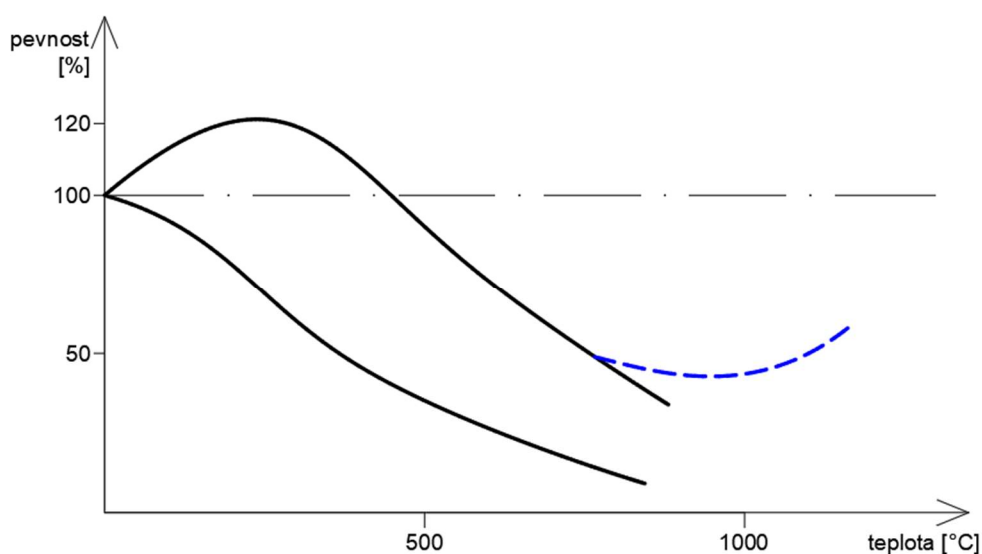
Beton je nehořlavý materiál s klasifikovanou třídou reakce na oheň A1.

V případě požáru betonové stavební konstrukce oddaluje celkový kolaps budovy díky vysoké teplotě bodu tání a poměrně vysoké odolnosti vůči ohni. Beton při požáru nevylučuje kouř, toxické nebo hořlavé plyny, takže žádným způsobem nepřispívá k dalšímu šíření požáru a ani nijak neohrožuje evakuaci osob. Je také odolný proti chemickým vlivům a nebude reagovat v případě kontaktu s chemickými látkami, které mohou při požáru vznikat. Beton má také relativně nízkou tepelnou vodivost, tzn. že teplo se v něm šíří pomalu, a tím se zmenšuje riziko dosažení teploty vzplanutí i v jiných požárních úsecích. V neposlední řadě je beton odolný proti teplotním šokům a není výrazně znehodnocen vodou použitou při hašení požáru.

1.2 Procesy probíhající v běžném betonu při vystavení požáru

Změny probíhající v betonu během zahřívání se liší podle složení cementu a pevných složek, dle intenzity žáru a doby jeho trvání.

Při působení vysokých teplot dochází ke změně struktury betonu, která má zásadní vliv na jeho pevnost v tlaku. Dochází ke zhroucení struktury cementového gelu, a tím také ke ztrátě nosné kapacity betonu. Průběh pevnosti betonu v závislosti na teplotě je patrný z obr. 2. Plné křivky ohraničují oblast výsledků různých zkoušek několika autorů. Čárkovaná čára naznačuje nárůst pevnosti u žáruvzdorných betonů.



obr. 2: Závislost pevnosti betonu na teplotě [7]
(100 % - pevnost betonu za normálních podmínek)

Jak lze vidět na obr. 2, závislost pevnosti betonu na teplotě v případě použití běžného portlandského cementu nemá jednoduchý charakter klesající funkce. Při teplotě do 100 °C pevnost materiálu klesá z důvodu vzniku mikrotrhlin a vzrůstu zdánlivé pórovitosti. V intervalu 100 °C až 300 °C může v některých případech pevnost dokonce i vzrůstat, protože začíná docházet k uvolňování volné vody a při teplotách nad 200 °C i k uvolňování vody vázané. Rostoucí pohyblivost molekul vody pak vede k růstu stupně hydratace, čímž narůstá i pevnost materiálu. Při teplotách vyšších než 300 °C pak pevnost nevratně klesá. Dochází k rozkladu portlanditu Ca(OH)_2 , a když beton obsahuje křemičité kamenivo, dochází k fázové změně křemene z triklinické soustavy na soustavu hexagonální při 573 °C. Tento proces je doprovázen výraznými objemovými změnami, které mohou vést k trhlinám nejen na povrchu betonu. Při vyšších teplotách pak dochází k rozkladu kalcitu [8, 9].

tab. 2: Přehled změn probíhajících v betonu při zahřívání [10]

Teplota betonu θ [°C]	Proces
20-100	Dochází k hydrataci (přeměna volné vody v chemicky vázanou). Vznik hydrosilikátu vápenatého (CSH) a hydroxidu vápenatého (Ca(OH)_2 –portlandit).
100	Začíná dehydratace cementového tmelu – uvolňování volné vody za současného rozkladu hydrátů.
150	Vrcholí první fáze rozkladu hydrosilikátu vápenatého.
300 +	Pokračuje rozklad hydrosilikátu vápenatého (CSH) a hydroxidu vápenatého (Ca(OH)_2) za výrazného vzniku mikrotrhlin. Začíná se porušovat kamenivo, nejdříve se porušuje křemičité kamenivo.
550-600	Dochází k fázové změně křemene (v silikátovém kamenivu) z triklinické soustavy na soustavu hexagonální ($\beta \rightarrow \alpha$ při 573 °C). To vede společně s vlivem rozdílné teplotní roztažnosti k narušování vazeb mezi kamenivem a cementovým tmelem.
700 +	Vrcholí druhá fáze rozkladu hydrosilikátu vápenatého. Hydraulické vazby v cementovém tmele přecházejí na vazby keramické. Dochází k dekarbonataci vápencového kameniva, při kterém vzniká oxid uhličitý (CO_2) –plynná látka rozrušující beton.
900	Totální dekompozice cementového tmelu.
1000 +	Začíná tavení některých složek betonu. Tvorba Wollastonitu β ($\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$).
1200 +	Celkové tavení materiálu.

1.2.1 Explosivní odprýskávání

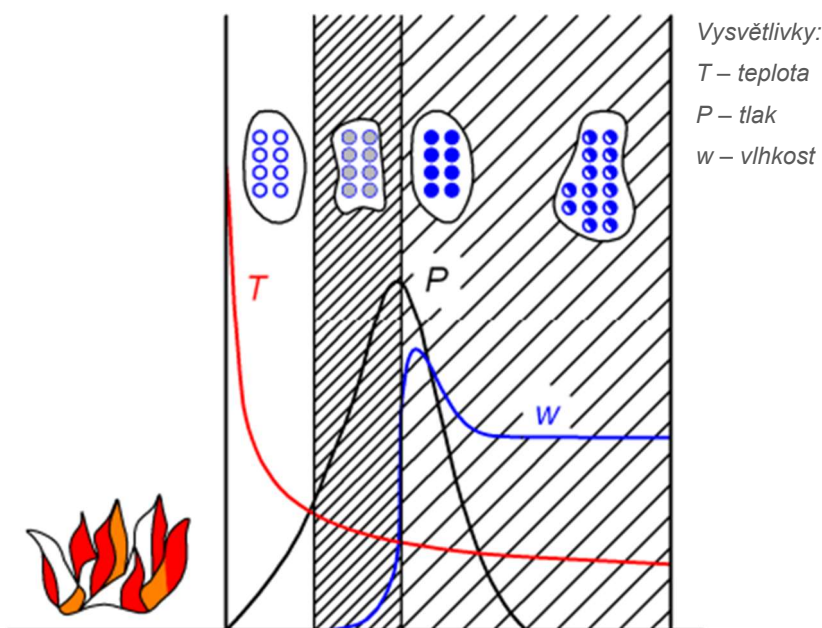
Ačkoliv má beton při požáru velmi dobré vlastnosti, nezanedbatelnou negativní vlastností je tzv. spalling neboli explozivní odprýskávání betonu způsobené zvýšenými teplotami.

Odprýskávání betonu je jev, který nastává u betonových prvků při vystavení vyšším (nad 300 °C) a rychle rostoucím teplotám. Z povrchu konstrukčního prvku se oddělují vrstvy nebo jednotlivé části betonu, a to může velmi rychle ohrozit nosnost a celistvost konstrukce. Při odštěpování hrozí exponování ocelové výztuže betonu, což způsobuje vyšší nárůst teploty ve výztuži, a tím i zhoršení schopnosti prvku přenášet zatížení. Vystavení výztuže vlivům požáru může způsobit i celkový kolaps konstrukce. Dalším rizikem může být i vysoká rychlost odštěpovaných kusů betonu, které mohou například ohrozit evakuované osoby nebo jednotky hasičského záchranného sboru.

U odprýskávání betonu lze bohužel velmi špatně určit, ve kterých případech a v jakém rozsahu odprýsknutí hrozí. Známe ale faktory, které tento jev způsobují nebo ovlivňují.

1.2.1.1 Hydro-termální proces

V pórovém systému betonu dochází během zvýšených teplot k migraci vody, vodní páry a vzduchu. Při zvyšování teploty se při povrchu betonu začne vypařovat voda obsažená v pórech, vzniklá pára se z části přesouvá k ohřívanému povrchu a tam se vypařuje. Další část páry však migruje do středu konstrukce, kde pára opět kondenzuje na chladnější části prvku a dochází k vytvoření kvazi-nasycené vrstvy. Směrem od povrchu betonového prvku vzniká suchá/dehydratovaná vrstva, sušící/dehydratující vrstva a kvazi-nasycená část (obr. 3). Poslední zmíněná vrstva působí jako nepropustná zábrana pro plyny a jejich hromadění způsobuje vysoký pórový tlak, který může překročit tahovou pevnost betonu, a tím způsobit odštěpení vrstvy betonu [11, 12].



obr. 3: Vznik pórového tlaku v betonu [13]

1.2.1.2 Termo-mechanický proces

Při tomto jevu vzrůstá vnitřní napětí betonu při snaze materiálu zabránit teplotnímu přetvoření. Teplotní gradienty způsobují různou snahu jednotlivých složek betonu tepelně dilatovat, a tím vzniká smykové napětí kolmé k zahřívané ploše. Ostatní složky betonu mají tendenci se vlivem teploty roztahovat, zatímco cementová pasta se vlivem dehydratace smršťuje a v důsledku tohoto procesu se může část betonu odštěpit [11, 12].

Při skutečném požáru probíhají tyto dva procesy souběžně v různé intenzitě. Například u hydro-termálního procesu záleží na tom, jak je materiál pórovitý a jakou má vlhkost, zatímco termo-mechanický proces je ovlivněn spíše materiálovým složením betonové směsi nebo způsobem uložení konstrukčního prvku (omezení teplotní roztažnosti).

1.3 Hlinitanový cement

Hlinitanový cement (calcium aluminate cement; CAC) je rychle tvrdnoucí hydraulické pojivo, které je typické svým vývinem velkého množství hydratačního tepla a rychlým nárůstem počáteční pevnosti.

Ve srovnání s portlandským cementem (PC) má určité výhody:

- Lépe odolává vysokým teplotám.
- Beton vyrobený z CAC je odolný vůči působení síranů.
- Pro svůj vysoký vývin hydratačního tepla je vhodný i pro zimní betonáž.
- Jednodenní pevnosti CAC mohou být vyšší než dvacetiosmidenní pevnosti PC [14].

Právě pro svůj rychlý nárůst počáteční pevnosti se beton vyrobený z CAC začal ve velké míře používat v období po druhé světové válce, kdy vyvstala potřeba rychlé obnovy válkou zničených objektů a při rozvoji stavebnictví obecně. Teprve od 50. let 20. století se začal projevovat problém s dlouhodobou stabilitou tohoto materiálu a došlo ke kolapsu několika stavebních objektů po celé Evropě [14]. Také v Uherském Hradišti na území tehdejší ČSSR došlo v roce 1984 ke zřícení velké části výrobní haly z roku 1952, která zapříčinila smrt 18 osob. V reakci na tuto tragédii bylo na našem území použití CAC k výrobě konstrukčního betonu zakázáno. Předsednictvo vlády také rozhodlo prověřit všechny stavby vybudované v letech 1930 až 1960, u kterých mohlo dojít k použití hlinitanových cementů při jejich výstavbě [14]. Za náhlými kolapsy budov stojí přeměna nestabilních hydratovaných slínkových minerálů na (z hlediska termodynamiky) stálejší formy, které se vyznačují menším molárním objemem, což vede k výrazné ztrátě pevnosti betonu. Tomuto jevu se říká *konverze* a blíže bude popsán v kapitole 1.3.3.

Přestože bylo použití CAC do nosných konstrukcí zakázáno, najde tento materiál své uplatnění zejména pro svou odolnost vůči vysokým teplotám a chemickým vlivům.

1.3.1 Druhy a složení hlinitanových cementů

Základními složkami hlinitanového cementu jsou oxid hlinitý (Al_2O_3) a oxid vápenatý (CaO). Povahu vytvořeného cementu ovlivňuje složení základních minerálů a jejich poměr. Čím je poměr $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ vyšší, zvyšuje se zásaditost výsledného cementu a s ní roste i rychlost hydratace. Na druhou stranu se ale zvýšením obsahu CaO snižuje odolnost materiálu proti vysokým teplotám [17]. V menším množství se v cementu vyskytuje i oxid železitý (Fe_2O_3), křemičitý (SiO_2), hořečnatý (MgO), titaničitý (TiO_2), sodný (Na_2O), draselný (K_2O), chromitý (Cr_2O_3) a fosforečný (P_2O_5) [14]. Obecně lze ale říci, že odolnost proti vysokým teplotám u hlinitanového cementu závisí na množství obsahu Al_2O_3 .

Hlinitanový cement tedy rozlišujeme dle obsahu Al_2O_3 do dvou až čtyř tříd:

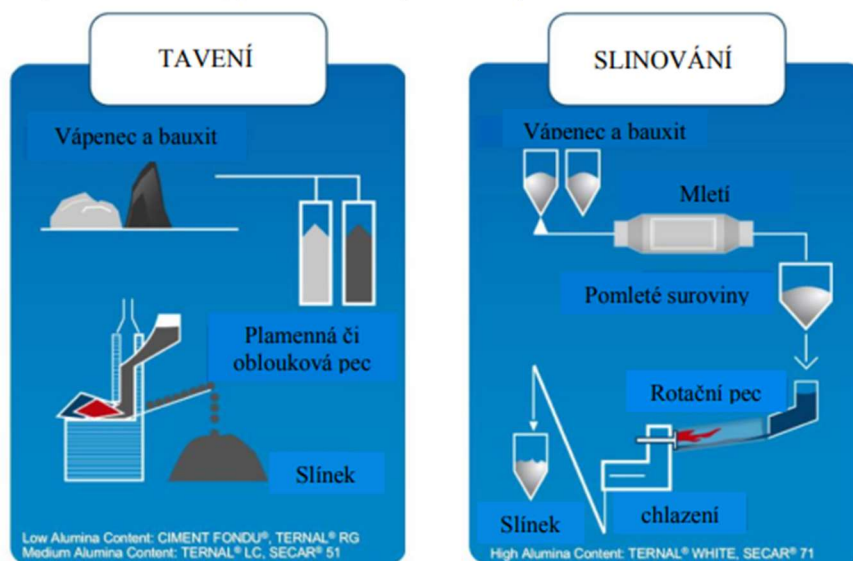
tab. 3: Rozdělení hlinitanových cementů [18]

Základní třídy hlinitanových cementů a jejich typické složení (% hm.)				
Třída	Barva	Al_2O_3	CaO	$\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3$
CAC 40	Světle hnědá	37,5-45,5	36,5-39,5	12,0-18,0
CAC 50	Světle šedivá	50,8-54,5	36,0-39,0	1,0-10,0
CAC 70	Bílá	68,5-71,0	28,0-31,0	<0,5
CAC 80	Bílá	79,5-82	16,2-17,8	0,2

1.3.2 Výroba

Základními surovinami pro výrobu hlinitanového cementu jsou vápenec a bauxit v poměru 1:1. Vápenec je sedimentární hornina, jejíž hlavní složkou je uhličitán vápenatý (CaCO_3), zatímco bauxit je směsicí několika minerálů jako jsou gibbsit, böhmit, diaspor, jejichž hlavními složkami jsou hydroxidy hliníku [19].

Pro výrobu hlinitanového cementu se používají dva hlavní výrobní procesy, a to buď výroba pálením na mez slinutí v rotační peci při teplotách kolem $1350\text{ }^\circ\text{C}$, nebo tavením v elektrických obloukových pecích při cca $1600\text{ }^\circ\text{C}$. Na rozdíl od výroby portlandského cementu vyžadují oba tyto procesy pomalé chlazení výsledného produktu, protože pro co nejkvalitnější cement je zapotřebí postupná krystalizace hlinitanů. Oba postupy jsou naznačeny na obr. 4. Proces slinování umožňuje získat zpravidla čistější cement s vyšším obsahem oxidu hlinitého a pro získání co nejkvalitnějšího slínku je zapotřebí používat suroviny s co nejnižším obsahem oxidů železa, titanu, nebo křemíku [20–22].



obr. 4: Schematické znázornění výrobních procesů [16]

1.3.3 Hydratace a konverze

Proces hydratace je ovlivněn mnoha faktory, například zatímco u hydrosilikátových pojiv je průběh hydratace do 100 °C stabilní, hydratace hlinitanového cementu výrazně závisí na teplotě. Jak již bylo zmíněno, hydratace hlinitanového cementu je také podstatně rychlejší, což souvisí i s vysokým vývinem hydratačního tepla. V hlinitanovém cementu jsou hlavními minerály krotit (CA), grossit (CA₂) a mayenit (C₁₂A₇) [20].

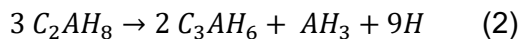
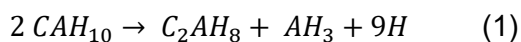
- CA (monokalcium aluminát) je hlavní složkou všech druhů hlinitanového cementu. Vyznačuje se pomalým procesem tuhnutí, ale následně velmi rychle tvrdne.
- CA₂ (monokalcium dialuminát) je fáze s nejvyšší odolností proti žáru, ale vyžaduje delší čas k úplné hydrataci.
- C₁₂A₇ (dodecalcium hepta-aluminát) je vysoce reaktivní a velmi rychle hydratuje. Z tohoto důvodu je jeho množství v cementu omežováno [16, 18].

V závislosti na teplotě a jejich vzájemném poměru vznikají různé druhy hydratovaných hlinitanů vápenatých. V následující tabulce jsou zjednodušeně popsány hlavní reakce rozdělené do tří teplotních intervalů:

tab. 4: Průběh hydratace v závislosti na teplotě [20]

Teplota [°C]	Reaktanty	Produkty hydratace
<15	CA + 10 H	CAH ₁₀
15–30	2 CA + 11 H	C ₂ AH ₈ + AH ₃
>30	3 CA + 12 H	C ₃ AH ₆ + 2 AH ₃

Většina reakcí proběhne v prvních 24 hodinách. Výsledkem je pevná a velmi hutná cementová matrice [14]. Vzniklé CAH₁₀ a C₂AH₈ jsou termodynamicky nestálé, pouze při hydrataci nad 30 °C vzniká stabilní C₃AH₆. Všechny nestabilní hlinitany se s časem přeměňují na stabilní formy a tento jev se nazývá konverze. Doba této přeměny závisí na více faktorech, například na teplotě, vlhkosti nebo na vodním součiniteli směsi, ale nelze se jí vyvarovat [20]. Při teplotě 20 °C probíhá pomalu (několik let), ale se stoupající teplotou rychlost reakce roste a při 50 °C se hlinitany přemění již během několika hodin [14]. Proces konverze je popsán následujícími rovnicemi [20].



Konverze nestabilních hlinitanů je z hlediska trvanlivosti betonové konstrukce problematickým jevem. Rekrystalizace nestabilních CAH₁₀ a C₂AH₈ na stabilní kubickou formu je doprovázena objemovými změnami, které zvyšují pórovitost materiálu, a tím se i snižuje pevnost betonu. Během procesu přeměny navíc dochází k uvolňování vody [20]. Na druhou stranu, zvýšená pórovitost umožňuje během zahřívání migraci vlhkosti, což může snížit riziko explozivního odprýskávání [23]. Konverzi, a s ní spojený pokles mechanických vlastností, obvykle signalizuje změna barvy pojiva do červených odstínů [16].

Dlouhodobé snížení pevnosti betonu vlivem konverze lze omezit několika způsoby. Jedním způsobem je snížení vodního součinitele w/c. Díky menšímu množství vody v cementové matici zůstávají nehydratované hlinitany, které pak reagují s vodou uvolněnou během konverze, což může vést k pozdějšímu zvýšení pevnosti [20]. Poklesu pevnosti lze zamezit i přidáním materiálů s pucolánovou aktivitou (například křemičitého

úletu) nebo částečnou náhradou portlandským cementem, a s tím spojenou změnou výsledných hydratačních produktů [16].

1.4 Příměsi cementových kompozitů

Příměsi jsou látky, které jsou přidávány do betonu za účelem zlepšení nebo upravení jejich vlastností. Může se jednat jak o ovlivnění vlastností čerstvé betonové směsi, tak i výsledného materiálu. Přidáním příměsi do betonu se například může upravovat rychlost tuhnutí směsi při betonáži, nebo se mohou zlepšovat mechanické i fyzikální vlastnosti zatvrdělého betonu. Jak již bylo zmíněno v úvodu, příměsí se částečně snižuje spotřeba cementu, což může mít ekologické i ekonomické výhody.

Dle vlivu na hydrataci cementu a původu se příměsi dělí na dva typy [24]:

Inertní příměsi svým chemickým složením nemají schopnost reagovat s ostatními složkami betonu. Tyto materiály se nejčastěji používají jako fillery, které snižují mezerovitost kameniva a zlepšují tak celkovou strukturu betonu. Do této skupiny se řadí například jemně mleté horniny, kamenné moučky nebo také pigmenty určené k zabarvení betonu.

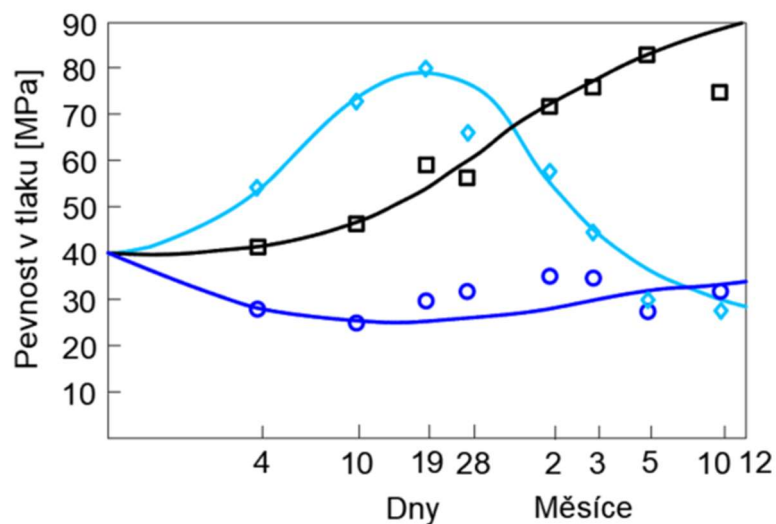
Druhým typem jsou aktivní příměsi. To jsou látky aktivně přispívající k pevnosti cementu. Lze je rozdělit na další dvě skupiny: latentně hydraulické a pucolánové. Tyto dvě formy látek se odlišují zejména obsahem oxidu vápenatého. Latentně hydraulické příměsi obsahují vápník a po smíchání s vodou jsou schopny samy tvrdnout. Tyto příměsi často vznikají jako vedlejší produkty průmyslových procesů, jako jsou např. strusky z hutí nebo některé typy popílků v rámci odsiřovacího procesu z tepelných elektráren. Druhou skupinou jsou pucolánové látky, které obsahují jen velmi malé množství vápníku a bez jeho přítomnosti netvrdnou. Mezi pucolánově aktivní látky patří například křemičité úlety, pálené jíly nebo křemelina [25].

V případě portlandského cementu byla aplikace příměsí do betonu široce studována a v současnosti se využívá velmi často. U hlinitanového cementu se vliv různých příměsí na jeho vlastnosti a fázové složení stále vylepšuje a zkoumá. Cílem výzkumu je zejména zlepšení vlastností výhodných pro vysokoteplotní aplikace a také zamezení nebo zpomalení konverze způsobující dlouhodobou ztrátu pevnosti.

1.4.1 Současný stav poznání

V této kapitole je uvedena rešerše současných vědeckých prací věnujících se nahrazování hlinitanového cementu jinými materiály. Výzkumy se zabývají jak použitím typických příměsí používaných u portlandského cementu, tak i použitím alternativních nekonvenčních materiálů.

Starší výzkum z italské univerzity prezentuje vliv pucolánových materiálů na konverzi hlinitanového cementu [26]. Jako zkoumané aktivní příměsi byly vybrány popílek a křemičitý úlet. Ve vzorcích byl hlinitanový cement nahrazen vždy 20 % a 40 % zkoumaného materiálu. Vzorky se byly rozděleny na tři skupiny a nechaly se vytvrdnout při 5 °C, 20 °C a 40 °C a jejich vlastnosti byly měřeny pravidelně po celý rok. Na obr. 5 je zobrazen vývoj pevnosti vzorků obsahujících pouze hlinitanový cement. U vzorků udržovaných při teplotě 5 °C pevnost po celý rok rostla a po roce dosáhla pevnosti 90 MPa. Vzorky při teplotě 20 °C dosáhly nejvyšší pevnosti už po 19 dnech a následně jejich pevnost postupně klesala. Po roce vzorky dosahovaly pevnosti pouze 30 MPa. Při 40 °C pevnost klesala prvních deset dnů a poté celý rok lehce stoupala až na pevnost 30 MPa.



obr. 5: Pevnost v tlaku u vzorků s čistým CAC [26]

Chování vzorků s křemičitým úletem již není tolik závislé na teplotě a křivky vývoje pevností se vzájemně více podobají. Počáteční pevnosti sice dosahují nižších hodnot, ale během celého roku nebyl zaznamenán žádný výrazný pokles, jako tomu bylo u čistého CAC. Tyto pozitivní výsledky jsou způsobeny vlivem amorfní fáze v křemičitém

úletu, kdy během hydratace vzniká hydrát gehlenit (C_2ASH_8) na úkor kubické fáze C_3AH_6 . Díky vzniku rozdílných hydrátů je vliv konverze zmírněn. Použití popílku naopak nemělo na fázové složení a pokles mechanických vlastností v čase velký vliv a jeho aplikace v tomto experimentu nebyla příliš přínosná.

Vlivem popílku, vysokopecní strusky a křemičitého úletu na hydrataci malt na bázi CAC se zabývala Maria Idrees a kol. [27]. Vzorke byly vyrobeny s konstantním obsahem CAC a s různým množstvím zkoumaných příměsí jako částečné náhrady písku. Vzorke se následně nechaly na 24 hodin hydratovat v klimatických komorách při 20 °C a při 38 °C a jejich vlastnosti byly měřeny při různém stáří od 3 do 90 dnů. Mimo pevnosti v tlaku a v tahu za ohybu byla sledována i nasákavost vzorku nebo také průběh hydratace pomocí izotermického kalorimetru. Výsledky potvrdily, že ke konverzi nestabilních hydrátů dochází dříve, pokud hydratace vzorku probíhá při vyšších teplotách. Nicméně přidáním popílku a vysokopecní strusky lze poklesy pevnosti omezit. Nejlepších výsledků dosáhly vzorky s 10% náhradou. Naopak vzorky s křemičitým úletem dosahovaly menších pevností, což je přisuzováno zejména horší zpracovatelnosti směsi. Výsledky také ukázaly, že stupeň hydratace byl při 38 °C vyšší a nastal dříve, než u vzorků hydratovaných při 20 °C. Autoři došli k závěru, že se zvyšujícím se obsahem příměsí roste schopnost vzorku absorbovat vodu.

V jiné studii se vědci zabývali vlivem vysokopecní strusky na mechanické a tepelné vlastnosti hlinitanového cementu vystaveného vysoké teplotě [28]. Výsledky ukazují, že s 30–40% náhradou CAC se při 800 °C zlepšila mikrostruktura pasty, což způsobilo i vyšší tepelnou vodivost a vyšší pevnosti v tlaku oproti referenčnímu vzorku. Také bylo potvrzeno, že vysokopecní struska má mít pozitivní vliv na zpomalení konverze při nízkých teplotách.

Finský výzkum [29] se zabýval použitím pánvové strusky (ladle slag) jako příměsí CAC (Calight 40). Pánvová struska vzniká jako odpadní produkt při výrobě oceli v pánvové peci. Tato struska se vyznačuje (na rozdíl od té vysokopecní) vysokým obsahem oxidu hlinitého, proto by mohla být potenciálně vhodná k částečné náhradě CAC. Tato struska se nechala přirozeně vychladnout a dále byla mleta tak, aby velikost částic odpovídala CAC. Výsledky zkoušek ukázaly, že pánvová struska nemá žádný vliv na hydratační mechanismus, ale nezhoršuje mechanické vlastnosti výsledného produktu. Při testování trvanlivosti, jako je odolnost proti otěru, vlivu síranů a zmrazování – rozmrazování, měl vzorek, kde byl CAC z 50 % nahrazen struskou, stejné nebo lepší výsledky.

Hlinitanový cement lze použít i ve zdravotnictví jako součást bioaktivního materiálu. Bioaktivní materiály jsou materiály, které mají schopnost interagovat s biologickými systémy a podporovat nebo ovlivňovat biologické procesy. Mohou být použity v různých biologických aplikacích, jako jsou implantáty, náhrady tkání nebo zubní výplně. Vědci z Iráku se zabývali hodnocením bioaktivních vlastností hlinitanového cementu za přítomnosti nanosiliky [30]. Použití nanosiliky výrazně snížilo pórovitost a zlepšilo strukturu materiálu, díky čemuž se i zvýšila odolnost vůči chemickým vlivům. Nanosilika také zvýšila pevnost materiálu a u výsledného vzorku byl potvrzen bioaktivní efekt.

Zajímavým použitelným materiálem by mohl být například i popel z rýžových slupek (rice husk ash – RHA). Při pěstování rýže zůstává velké množství jinak nevyužitelného materiálu, jako jsou rýžové slupky a rýžová sláma. Jedna tuna neloupané rýže vyprodukuje přibližně 200 kg rýžových slupek a celosvětová produkce neloupané rýže je zhruba 740 milionů tun ročně (z toho 30 % je vyprodukováno v Číně) [31]. Tento odpad zatím nemá mnoho využití a většinou se pálí přímo na polích, vyhazuje se na skládky nebo do řek. Proto v Číně vzniká řada výzkumů, jak s tímto materiálem lépe naložit. Bylo zjištěno, že popel z těchto produktů má podobné chemické složení jako křemičitý úlet a mohl by být použit i ve stavebnictví [32]. Při kombinaci RHA s CAC výsledky ukazují, že RHA výrazně urychluje hydrataci a zvyšuje počáteční pevnost betonu. Vysoký obsah RHA (60 %) sice snižuje pórovitost cementové matrice, ale také snižuje výslednou pevnost. Z výzkumu tedy zjistili, že množství nahrazeného CAC by nemělo být více než 40 % [33].

Studie Keita Irisawa [34] a jeho týmu se zabývá nahrazením části hlinitanového cementu Secar 51 různým množstvím sodných polyfosfátů (CAP) v kombinaci s různým vodním součinitelem. Zjistili, že se zvyšujícím se množstvím sodných fosfátů ve směsi je při hydratační fázi pozorována vyšší tvorba gibbsitu a také se redukuje spotřeba vody při tvorbě cementového gelu. Zdá se, že obě tyto vlastnosti vedou ke snížení mikrotrhlin a zvýšení životnosti výsledného materiálu.

Vědci z Jižní Koreje provedli výzkum zaměřený na modifikaci CAC oxidem hořečnatým (MgO) [35]. Vzorky s různým poměrem MgO k CAC byly z důvodu urychlení konverze hydratačních produktů v hlinitanovém cementu vystaveny teplotě 60 °C. Tyto vzorky byly před i po vytvrzení podrobeny mikrostrukturální analýze a bylo zjištěno, že MgO minimalizuje přeměnu nestabilních fází na stabilní fáze a díky tomuto jevu je pak ztráta pevnosti z důvodu konverze výrazně nižší.

Možností využití odpadního metalupku při vývinu tepelně odolného kompozitu na bázi CAC se zabývala Kateřina Šádková a její kolegové z ČVUT [23]. Podobně jako metakaolin, i metalupek vzniká vypalováním jílovitých materiálů. V tomto případě je vypalovaným produktem břidlice (shale), sedimentární hornina složená převážně z jílovců a prachovců. Testované vzorky byly vyrobeny v různých poměrech reaktivního oxidu hlinitého (reactive alumina), boehmitu a odpadního metalupku při konstantním množství hlinitanového cementu. Došli k závěru, že cementová směs v poměru 60:40 (metalupek ku cementu) obsahuje po hydrataci výrazně menší množství CAH_{10} , což by mohlo vést k menším ztrátám pevností v důsledku konverze. Přidáním metalupku do směsi se však zvýší pórovitost a vzorek za běžných teplot vykazuje horší mechanické vlastnosti než ten referenční. Po vystavení vysokým teplotám je ale pokles pevnosti výrazně mírnější než u referenčního vzorku a po vystavení 1400 °C se pevnost vzorku dokonce zvýšila. O metalupku a jeho vlivu na vlastnosti cementových směsí bylo na ČVUT napsáno i několik dalších studií [36, 37].

Dana Koňáková a kol. [38] zkoumala také částečné nahrazení CAC dalšími materiály, jako je například cihelný prach, metalupek (calcined shale) nebo mullit. Byly vytvořeny cementové pasty vždy s 5% a 15% náhradou zkoumaným materiálem. Na těchto cementových pastách zkoumali změny nejen základních fyzikálních a mechanických vlastností, ale také rozdílů ve fázovém složení za různých teplot pomocí XRD (X-Ray Diffraction), DSC (diferenční skenovací kalorimetrie) a dalších metod. Ve výsledcích této studie měl na hydrataci CAC největší vliv cihelný prach, který nejvíce ovlivnil fázové složení a také výrazně zvýšil rychlost hydratace. To vedlo ke snížení pórovitosti, a tím i zvýšení pevnosti v tlaku oproti referenčním vzorkům. Lepších výsledků však dosahoval CAC s 5 % cihelného prachu.

2 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

2.1 Metody

2.1.1 Základní fyzikální vlastnosti

2.1.1.1 Objemová hmotnost

Objemovou hmotnost lze definovat jako podíl hmotnosti a objemu vzorku, a to včetně dutin a pórů. Pro tuto práci byla objemová hmotnost stanovena gravimetrickou metodou. Pomocí digitálního posuvného měřítka byly třikrát změřeny skutečné rozměry vysušeného vzorku, ze kterých se následně vypočítal objem a objemová hmotnost:

$$\rho = \frac{m_d}{V} = \frac{m_d}{a \cdot b \cdot c}$$

ρ	<i>objemová hmotnost</i>	<i>[kg/m³]</i>
m_d	<i>hmotnost vysušeného vzorku</i>	<i>[kg]</i>
V	<i>objem</i>	<i>[m³]</i>
a, b, c	<i>skutečné rozměry vzorku</i>	<i>[m]</i>

2.1.1.2 Hustota matrice

Hustota matrice byla zjištěna pomocí heliového pyknometru Pycnomatic Evo. Plynový pyknometr funguje na stejném principu jako klasické kapalinové pyknometry. Helium je pro svou nízkou reaktivitu a malou velikost molekul nevhodnějším plynným médiem a měření hustoty matrice pomocí této metody je velmi přesné [39].

Do přístroje byl vložen malý úlomek zkoumaného vzorku. Přístroj vtlačí do komory o známém objemu plyn tak, aby jeho molekuly pronikly i do dutin a pórů měřeného materiálu. Poté plyn expanduje do druhé prázdné komory o známém objemu a na základě rozdílu tlaků v komorách se dopočítá objem vyšetřovaného materiálu. Dle objemu a váhy vzorku je následně určena hustota matrice materiálu. Délka jednoho měření se pohybuje v čase do deseti minut [39].

Objem vzorku [22]:

$$V = V_1 - \frac{V_2}{\left(\frac{P_r}{P_f}\right) - 1}$$

Výsledná hustota matrice:

$$\rho_m = \frac{m}{V}$$

V	<i>objem vzorku</i>	<i>[ml]</i>
m	<i>hmotnost vzorku</i>	<i>[g]</i>
ρ_m	<i>hustota matrice</i>	<i>[g/ml]</i>
V_1	<i>objem měřicí komory</i>	<i>[ml]</i>
V_2	<i>objem expanzní komory</i>	<i>[ml]</i>
P_r	<i>plnicí tlak</i>	<i>[Pa]</i>
P_f	<i>konečný tlak</i>	<i>[Pa]</i>



obr. 6: Pycnometr Pycnomatic Evo

2.1.1.3 Pórovitost

Z naměřených hodnot objemové hmotnosti a hustoty matrice lze vypočítat celková pórovitost materiálu:

$$\psi = 1 - \frac{\rho}{\rho_m}$$

ψ celková pórovitost [-]

2.1.1.4 Rtuťová porozimetrie

Charakterizace a distribuce velikosti pórů byla provedena pomocí porozimetru Pascal 110+440. V principu je vzorek ponořen do špatně smáčivé kapaliny a pomocí tlaku je kapalina vtlačena do pórů. Pro své vysoké povrchové napětí, vysoký kontaktní úhel a stálost je používána téměř výhradně rtuť. Porozimetr zjišťuje objem vtlačené rtuti v závislosti na tlaku – když má rtuť pronikat do menších pórů, je na ni potřeba vyvinout větší tlak. Díky tomuto vztahu lze ke každému materiálu získat porozimetrické křivky, které udávají četnost pórů v závislosti na jejich velikosti [22, 40].



obr. 7: Porozimetr Pascal 140+440 Evo

Studovaný materiál se umístil do skleněné nádoby ukončené kapilárou o konstantním průměru. Po odstranění vázané vlhkosti ze vzorku je nádoba naplněna rtutí, jež vzorek obklopí. Porozimetr postupně zvyšuje tlak a rtuť proniká do pórů. Z konstrukčních důvodů pracuje přístroj na dvou pracovních stanicích – pro nízkotlaký a vysokotlaký režim. Samotné měření trvá několik desítek minut.

2.1.1.5 Teplotní dilatace

Měření teplotní dilatace v závislosti na zvyšující se teplotě bylo provedeno pomocí teplotního horizontálního dilatometru (). Přístroj využívá komparativní metody a srovnává roztažnost zkoumaného materiálu s referenční korundovou trubicí.



obr. 8: Teplotní horizontální dilatometr



obr. 9: Vzorky před a po měření teplotní dilatace

Zkušební vzorek o rozměrech 15 x 15 x 160 mm je vložen do korundové trubice a umístěn tak, aby se jedním koncem dotýkal pevné stěny přístroje. Na druhém konci se nachází pohyblivé táhlo spojené s indikátorem změny délky. Vzorek je postupně zahříván rychlostí 1 °C/min až do dosažení teploty 1400 °C. Změny délky jsou postupně zaznamenány v programu "Dilatometer 1.3" od firmy CLASIC CZ s. r. o.

Z naměřených hodnot lze spočítat relativní prodloužení a součinitel teplotní roztažnosti:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$$

$$\alpha = \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta T}$$

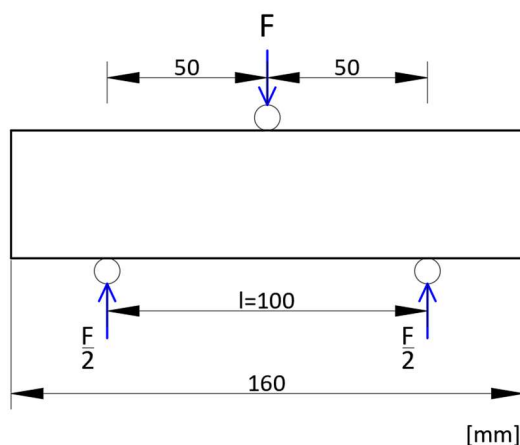
ε	relativní prodloužení	[-]
Δl	změna délky vzorku	[m]
l_0	původní délka vzorku	[m]
α	součinitel teplotní délkové roztažnosti	[1/K]
T	teplota	[K]

2.1.2 Mechanické vlastnosti

Mechanické vlastnosti byly měřeny na trámcích o rozměrech 40 x 40 x 160 mm na hydraulickém lisu EU40 dle normy ČSN EN 1015-11 [41].

2.1.2.1 Pevnost v tahu za ohybu

Pevnost v tahu za ohybu byla měřena vždy na třech vzorcích. Byla použita metoda tříbodového ohybu.



obr. 10: Schéma tříbodové zkoušky v tahu za ohybu

Vzorek se umístil do lisu na dvě podpory tak, aby směr působení zatížení byl kolmý na směr ukládání betonu. Vzdálenost podpor byla 100 mm a zatížení působilo uprostřed mezi podporami. V průběhu postupného zatěžování konstantní rychlostí jsou spodní vlákna namáhána tahovou silou. Vyvíjené napětí je postupně zvyšováno, dokud nedojde ke křehkému lomu (zpravidla uprostřed zatěžovaného vzorku).

Pevnost v tahu za ohybu byla vypočítána dle následujícího vzorce:

$$f_{cf} = \frac{M}{W} = \frac{\frac{1}{4} \cdot Fl}{\frac{1}{6} \cdot b \cdot a^2} = \frac{3}{2} \cdot \frac{Fl}{b \cdot a^2}$$

f_{cf} pevnost v tahu za ohybu [Pa]

F maximální zatěžovací síla [N]

l vzdálenost mezi podporami [N]

a, b rozměry vzorku [m]

2.1.2.2 Pevnost v tlaku

Na vzniklých fragmentech vzorků ze zkoušky pevnosti v tahu za ohybu bylo provedeno měření pevnosti v tlaku. Vzorky byly zatěžovány pomocí hydraulického lisu mezi dvěma ocelovými destičkami o rozměrech 40 x 40 mm. Lis vyvíjel jednoosé tlakové napětí, dokud nebyla překročena tlaková pevnost betonu a vzorek se nerozdrtil.

Pevnost v tlaku byla následně vypočtena dle vzorce:

$$f_c = \frac{F}{A_c}$$

f_c	<i>pevnost v tlaku</i>	<i>[Pa]</i>
F	<i>maximální zatěžovací síla</i>	<i>[N]</i>
A_c	<i>velikost zatěžovací plochy</i>	<i>[m²]</i>



obr. 11: Průběh zkoušky pevnosti v tlaku

2.1.2.3 Dynamický modul pružnosti

Měření dynamického modulu pružnosti proběhlo ještě před měřeními destruktivními zkouškami. Hodnoty dynamického modulu pružnosti byly zjištěny pomocí nedestruktivní ultrazvukové impulsové metody dle ČSN 73 1371 [42].

Metoda spočívá v měření rychlosti přenosu ultrazvukového impulsu ve vzorku. Impuls se šíří rychleji v homogenních materiálech s menším množstvím pórů, proto lze tímto způsobem odhadnout například narušení struktury nebo degradaci materiálu [22, 43].



obr. 12: Měření dynamického modulu pružnosti

Přístroj se skládá ze dvou sond, z nichž každá dokáže generovat a přijímat ultrazvukové impulsy. Před samotným měřením se vzorek očistil od nečistot a sondy se potřely tenkou vrstvou gelu, aby byl zajištěn dostatečný kontakt bez vzduchových mezer. Vzorek se umístil na podložku tak, aby se nedotýkal stolu. Doba měření přístroje trvala několik sekund. Výsledkem měření byla doba šíření impulsu v materiálu. Rychlost ultrazvukového impulsu se potom vypočítal z rovnice [44]:

$$v_L = \frac{l}{t}$$

V_L rychlost šíření impulsu [m/s]

l délka zkoušeného vzorku [m]

t doba šíření impulsu ve vzorku [s]

Následně lze vypočítat dynamický modul pružnosti [22]:

$$E_{cu} = \rho * v_L^2 * \frac{1}{k^2}$$

ρ objemová hmotnost materiálu [kg/m³]

k součinitel rozměrnosti prostředí ($k=1$) [-]

2.2 Materiály

2.2.1 Cement

Hlavním pojivem pro všechny navržené směsi byl hlinitanový cement. Pro tuto práci byl zvolen hlinitanový cement Secar 71 od výrobce Kerneos Inc.

Secar 71 je čistá, bílá forma hlinitanového cementu používaná převážně pro svou odolnost vůči vysokým teplotám (do cca 1500 °C [45]) a rychlým nárůstem počáteční pevnosti. Tento materiál s obsahem oxidu hlinitého okolo 70 % lze zařadit mezi střední až vyšší třídy hlinitanového cementu [20, 46].

Chemické složení (tab. 5) a poměr jednotlivých sloučenin ovlivňuje výsledné chování cementu. Jak již bylo zmíněno, čím je poměr $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ vyšší, tím se zvyšuje zásaditost výsledného cementu a s ní roste i rychlost hydratace. Se zvyšujícím se obsahem Al_2O_3 však roste schopnost cementu odolávat vysokým teplotám [17].

tab. 5: Chemické složení cementu [%]

Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	CaO	MgO	TiO_2	K_2O	Na_2O
70,70	0,40	0,10	28,20	0,10	-	0,06	-

Analýza mineralogického složení (tab. 6) ukázala, že hlavní složkou cementu Secar 71 je krotit (CA), což je vysoce reaktivní minerál, který velmi rychle tvrdne. Druhou nejčtetnější složkou je minerál grossit (CA_2), který má velký podíl na žáruvzdornosti cementu. Dalšími složkami jsou potom korund, mayenit a beta-alumina [18, 20].

tab. 6: Mineralogické složení cementu [%]

Krotit	Grossit	Beta-alumina	Korund	Mayenit	Gehlenit	Katoit	Amorfni
55,1	35,8	1,6	1,3	0,4	0,7	0,1	5,1

2.2.2 Cihelný prach

Tato práce je zaměřena na částečnou náhradu hlinitanového cementu cihelný prachem (CP). Do navržených směsí byl použit cihelný prach získaný od českého výrobce HELUZ cihlářský průmysl v.o.s z výrobního závodu v Hevlíně. Při výrobě cihelného bloku je potřeba upravit její výšku a zbrousit nerovný povrch pomocí diamantových brusných

kotoučů. Tímto obrušováním vzniká odpadní cihelný prach, který je buď vyvážen na skládku nebo vrácen zpět do výroby jako ostřívo [47].

Bylo ale zjištěno, že cihelný prach vykazuje díky vysokému obsahu SiO_2 (tab. 7) relativně dobrou pucolánovou aktivitu. Použití cihelného prachu jako částečné náhrady portlandského cementu se zabýval výzkum Evy Vejmelkové a kol. z ČVUT[48]. Cílem studie bylo navrhnout vysokopevnostní beton s co nejvyšším obsahem cihelného prachu tak, aby nedošlo ke zhoršení jeho vlastností. Autoři došli k závěru, že kombinace cihelného prachu a křemičitého úletu má dobrý vliv na výsledné vlastnosti betonu. Zatímco cihelný prach měl pozitivní vliv na pevnosti betonu, přítomnost křemičitého úletu svou vysokou reaktivností umožňovala použít vyšší dávkování cihelného prachu. Protože cihelný prach obsahoval přibližně 47 % amorfnní fáze, mohla se pucolánové reakce účastnit zhruba jedna polovina této příměsi a zbývající část fungovala jako mikroplnivo, díky čemuž bylo dosaženo kompaktní mikrostruktury betonu. Nejlepších výsledků dosáhnul vzorek s 18,5 % křemičitého úletu a 24,5 % cihelného prachu.

Cihelným prachem a dalšími materiály v kombinaci s CAC se na ČVUT také zabývala Dana Koňáková a kol. [36]. Při výzkumu cihelného prachu v cementových pastách bylo zjištěno, že cihelný prach má značný vliv na rychlost hydratace CAC a vývin hydratačního tepla, což vede ke snížení pórovitosti pasty a zlepšení mechanických vlastností past. Tato práce na jejich výzkum navazuje.

tab. 7: Chemické složení cihelného prachu [%]

Al_2O_3	SiO_2	CaO	Fe_2O_3	MgO	TiO_2	K_2O	Na_2O
20,0	51,3	11,5	6,0	4,5	0,8	3,2	1,3

U mineralogického složení je vhodné sledovat podíl amorfnní fáze (

tab. 8). Amorfnní fáze zahrnuje nekystalické částice, které nemají pevně definovanou krystalickou strukturu. Tyto částice mohou snadněji reagovat s ostatními složkami betonu, což pozitivně ovlivňuje hydratační proces.

tab. 8: Mineralogické složení cihelného prachu

Křemen	Illit	Ortoklas	Mullit	Kalcit	Biotit	Mikrocline	Amorfnní
34,0	10,5	5,1	3,5	3,2	2,8	2,5	32,0

2.2.3 Reaktivní alumina

Další použitou příměsí je reaktivní oxid hlinitý (reaktivní alumina, RA). Reaktivní alumina je velmi jemně rozemletý, kalcinovaný oxid hlinitý. Je to často využívaná příměs do žáruvzdorných betonů, a to zejména pro svou odolnost vůči vysokým teplotám, odolnost proti teplotním šokům a odolnost proti korozi [49]. V tomto případě byl použit NABALOX NO 713.

tab. 9: Chemické složení reaktivní aluminy [%]

Al₂O₃	SiO₂	Fe₂O₃	CaO	MgO	TiO₂	K₂O	Na₂O
99,70	0,05	0,03	-	-	-	-	0,10

Je to materiál s vysokou reaktivitou a schopností vytvářet silné chemické vazby s ostatními látkami. Předpokládá se, že jeho použitím se dosáhne synergie s cihelným prachem a tyto látky se budou vzájemně pozitivně ovlivňovat. Cílem této práce je maximalizovat dávkování cihelného prachu s pomocí reaktivní aluminy, aniž by došlo ke zhoršení vlastností vůči referenčnímu materiálu.

tab. 10: Mineralogické složení reaktivní aluminy [%]

Korund	K-Alumina	Boehmit
88,81	8,29	2,9

2.2.4 Kamenivo

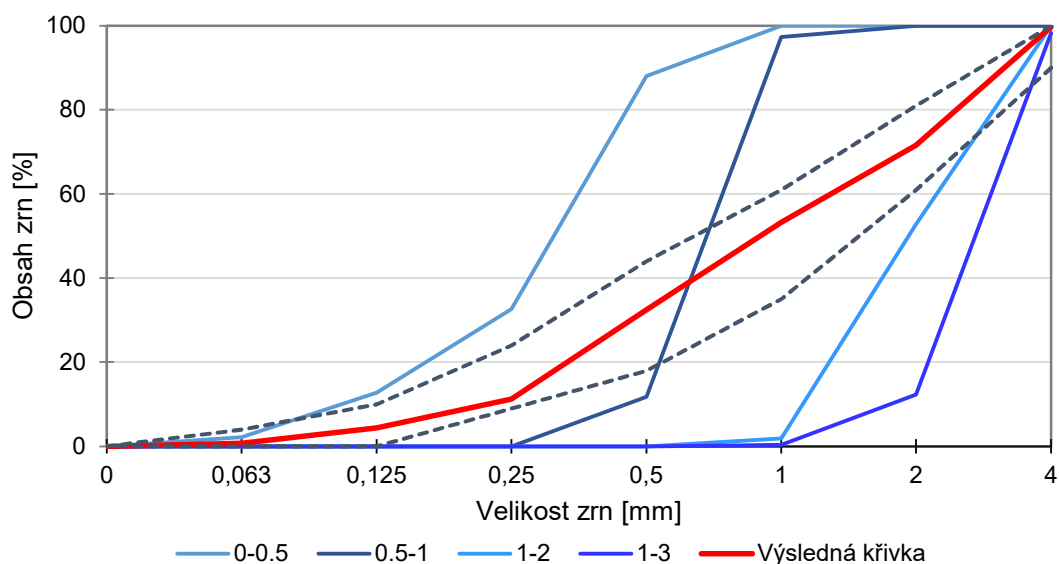
Jako plnivo bylo v této práci použito pálené lupkové kamenivo (šamot). Lupek je vrstevnatý jílovec, jehož hlavní složkou je jílový minerál kaolinit. Řízeným homogenním výpalem tohoto materiálu se získává keramické ostřivo s nízkou pórovitostí. Pro vysoký obsah oxidu hlinitého a nízký obsah tavících příměsí se navíc šamot vyznačuje vysokou odolností proti vysokým teplotám [50].

Použité kamenivo od výrobce České lupkové závody a.s. bylo kombinováno celkem ze čtyř frakcí (0–0,5 mm; 0,5–1 mm; 1–2 mm a 1–3 mm A 111 VHR). Poměr jednotlivých frakcí byl volen tak, aby granulometrická křivka výsledného kameniva odpovídala normě [51]. Zastoupení jednotlivých frakcí je zobrazeno v

tab. 11 a na obr. 13.

tab. 11: Kompozice výsledného kameniva

Název frakce	Množství [g]	Množství [%]
0–0.5 mm A 111 VHR	550	0,34
0.5–1 mm A 111 VHR	300	0,19
1–2 mm A 111 VHR	500	0,31
1–3 mm A 111 VHR	250	0,16



obr. 13: Granulometrická křivka kameniva

2.3 Navržené směsi

Bylo navrženo celkem 14 cementových kompozitů kombinujících různé poměry cihelného prachu a reaktivní aluminu.

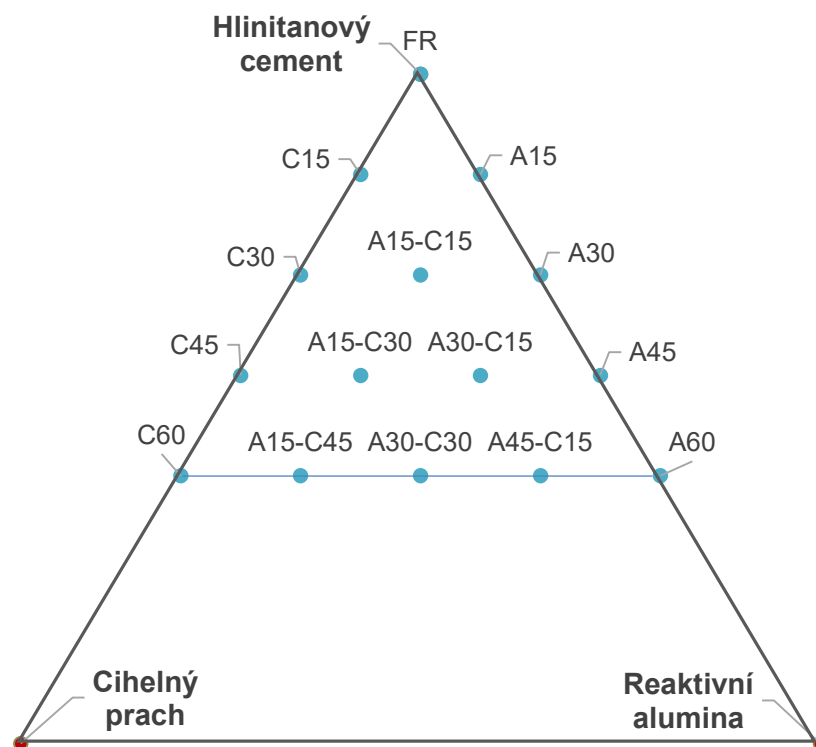


obr. 14: Výroba směsí

Referenčním vzorkem FR byl čistý CAC bez dalších příměsí. První čtveřice směsí (C15, C30, C45, C60) byla vytvořena kombinací různých poměrů hlinitanového cementu s cihelným prachem – číslo v názvu směsi udává vždy procento hmotnosti použité příměsi. V dalších čtyřech směsích (A15, A30, A45, A60) byla použita jako příměs pouze reaktivní alumina. Jelikož hlavním cílem této práce bylo najít využití cihelného prachu, vzorky obsahující pouze RA sloužily spíše pro porovnání jako referenční materiály. Posledních šest směsí (A15-C15, A15-C30, A15-C45, A30-C15, A30-C30, A45-C15) kombinovalo jak cihelný prach, tak reaktivní aluminu v různých poměrech. Při výrobě kompozitů bylo vždy použito stejné množství záměsové vody. Konkrétní složení jednotlivých směsí je vypsáno v tab. 12. Na fázovém diagramu (obr. 15) je přehledně znázorněn poměr mezi jednotlivými složkami kompozitů.

tab. 12: Složení navržených kompozitů

Název směsi	Cihelný prach	Reaktivní alumina	Hlinitanový cement	Kamenivo	v/c
FR	-	-	500	1600	0,3
C15	75	-	425	1600	0,3
C30	150	-	350	1600	0,3
C45	225	-	275	1600	0,3
C60	300	-	200	1600	0,3
A15	-	75	425	1600	0,3
A30	-	150	350	1600	0,3
A45	-	225	275	1600	0,3
A60	-	300	200	1600	0,3
A15-C15	75	75	350	1600	0,3
A15-C30	150	75	275	1600	0,3
A15-C45	225	75	200	1600	0,3
A30-C15	75	150	275	1600	0,3
A30-C30	150	150	200	1600	0,3
A45-C15	75	225	200	1600	0,3



obr. 15: Trojúhelníkový diagram složení navržených kompozitů

Jelikož je průběh hydratace hlinitanového cementu výrazně ovlivněn vlastnostmi okolního prostředí (zejména teplotou), všechny vzorky byly ihned po odbednění uloženy na 28 dnů do klimatické komory nastavené na 20 °C a R.H. 50 %, aby mohly vytvrdnout v konstantních podmínkách.

U vzorků byly měřeny jejich vlastnosti při pokojové teplotě a po výpalu v peci nastavené na 1400 °C. Teplotní zatížení v peci postupně rostlo rychlostí 1 °C/min až do teploty 1400 °C. Po třech hodinách tepelného namáhání se vzorky nechaly samovolně vychladnout. Následně byly porovnávány změny vlastností před výpalem a po výpalu.

Vzorky určené k měření teplotní dilatace byly tepelně zatížené v průběhu měření v dilatometru.

2.4 Výsledky

2.4.1 Základní fyzikální vlastnosti

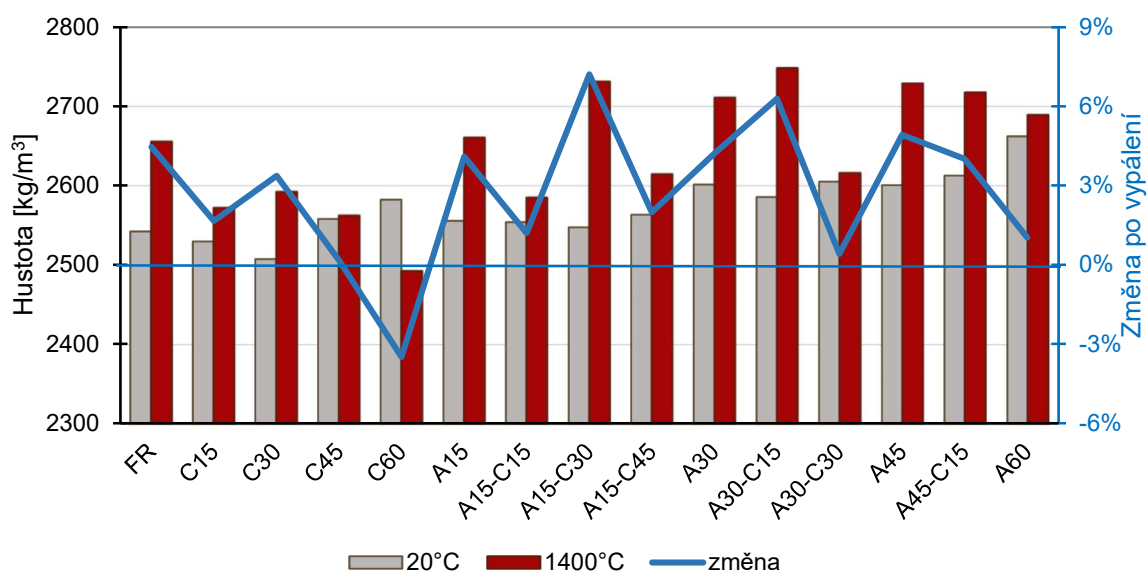
2.4.1.1 Hustota matrice

Na obr. 16 jsou zobrazeny výsledky z měření hustoty matrice pomocí heliového pyknometru.

Obecně lze říci, že se zvyšujícím se množstvím nahrazeného CAC se hustota směsi lehce zvyšovala. Lehkého poklesu a zároveň nejnižších hodnot hustoty dosahovaly vzorky C15 a C30. Naopak nejvyšší hustoty matrice za běžných teplot bylo dosaženo u vzorků s vyšším množstvím RA.

Po výpalu na teplotu 1400 °C se hustota téměř ve všech případech zvýšila, což může být způsobeno dehydratací cementové pasty, čímž vznikají hutnější minerály [22]. Výjimkou byla směs C60, jež vykazovala abnormální chování téměř ve všech provedených měřeních. Její hustota klesla o více než 3 %, a tím dosáhla nejnižší hodnoty po výpalu. Od 30 % obsahu CP se při vyšším dávkování hustota po výpalu postupně snižovala. Zajímavé je, že za běžných teplot tomu bylo přesně naopak.

Dále byl pozorován vliv RA na zvyšování hustoty matrice po výpalu. Nejzřetelnější vzrůst byl pozorován u směsi A15-C30, jejíž hustota vzrostla o 7 %. Směs měla před výpalem hustotu srovnatelnou s referenčním vzorkem, nicméně po výpalu její hustota prudce vzrostla a dosahovala jedné z nejvyšších hodnot. Podobně vysoký nárůst hustoty lze zaznamenat i u směsi A30-C15, jejíž hustota matrice byla po výpalu ze všech nejvyšší. Naopak velmi malý nárůst hustoty byl pozorován u směsi A30-C30. Naměřené výsledky po vypálení nenaznačují výraznou pravidelnost a nelze z nich udělat jednoznačný závěr. V tomto případě by k hlubšímu vysvětlení dopomohlo použití dalších metod, jako je například rentgenová difrakční analýza (XRD), diferenční skenovací kalorimetrie (DSC) nebo analýza snímků z elektronového mikroskopu (SEM).

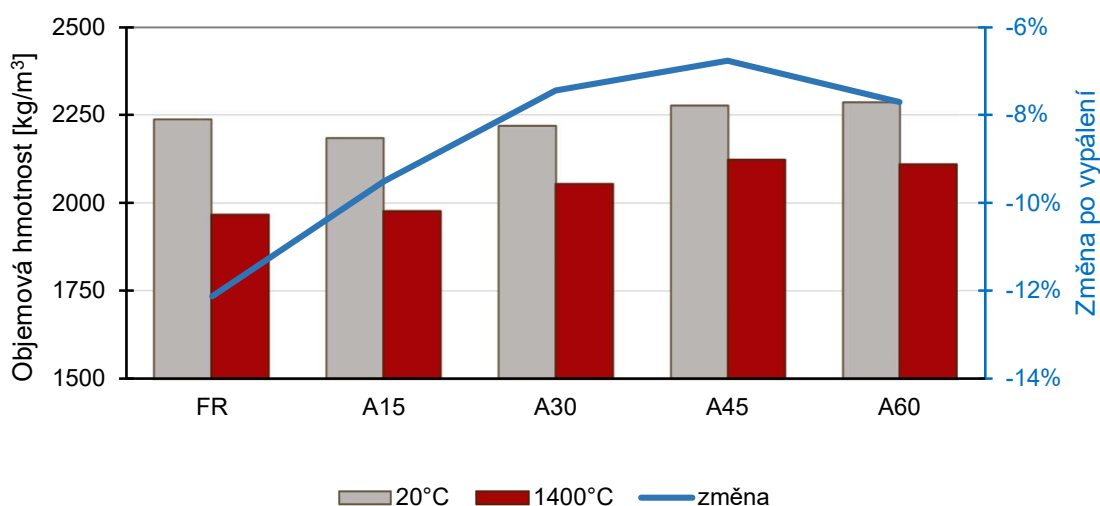


obr. 16: Hustota matrice

2.4.1.2 Objemová hmotnost

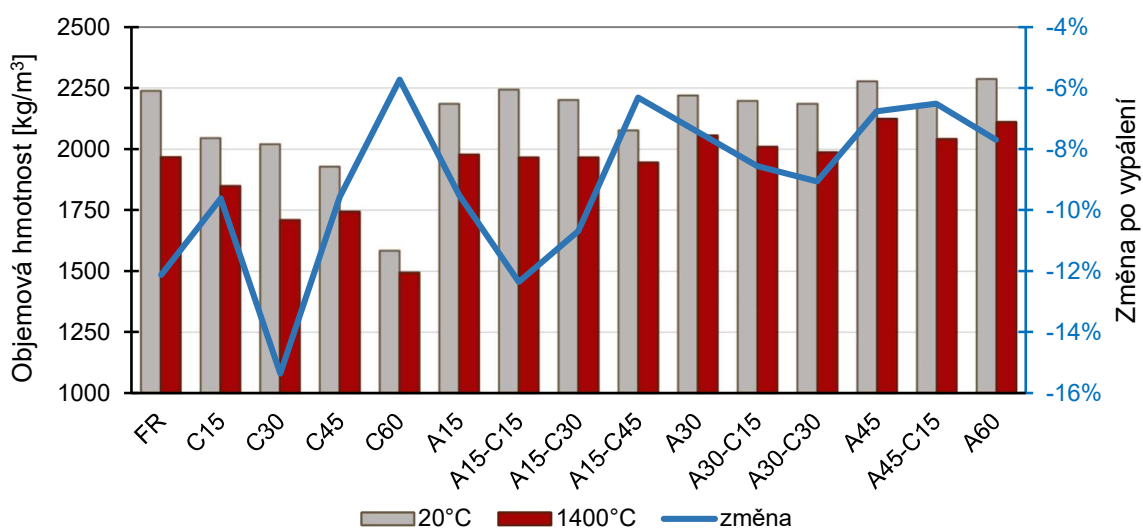
Objemová hmotnost (obr. 18) byla zjištěna gravimetrickou metodou.

S rostoucím množstvím přidávaných příměsí se objemová hmotnost nijak výrazně neměnila. Výraznější pravidelnost lze pozorovat při částečném nahrazování cementu cihelným prachem, kde s rostoucím poměrem CP objemová hmotnost vzorku klesala. Je zde také zřetelný přímý vztah mezi objemovou hmotností a hustotou. Nejnižší hodnoty objemové hmotnosti pak dosáhla směs C60. U směsí obsahující pouze RA lze pozorovat, že s rostoucím dávkováním reaktivní aluminu dochází v těchto směsích k mírnému nárůstu objemové hmotnosti (obr. 17). Tento nárůst je ale téměř nepatrný a jedná se o desítky jednotek. U směsí obsahujících obě příměsí se opět projevuje vliv vyššího dávkování CP na nepatrné snížení naměřených hodnot.



obr. 17: Objemová hmotnost kompozitů s RA

Po tepelném zatížení vykazovaly všechny vzorky podobné chování a jejich objemová hmotnost po výpalu klesla. Směs C60 dosáhla výrazně nejnižší hodnoty podobně jako za běžných teplot. Obecně všechny směsi obsahující pouze CP dosáhly nižších hodnot v porovnání s ostatními vzorky. Nejvýraznější pokles objemové hmotnosti byl pozorován u směsi C30. Menší změny objemové hmotnosti byly pozorovány u směsí s obsahem RA. Pokud vzájemně porovnáme směsi pouze s RA (obr. 17), lze s vyšším dávkováním pozorovat menší změnu objemové hmotnosti. Výjimkou je směs A60, u které křivka změny opět vykazovala mírně klesající trend. Avšak nejmenší změna (kromě C60) byla zaznamenána u vzorků A15-C45.



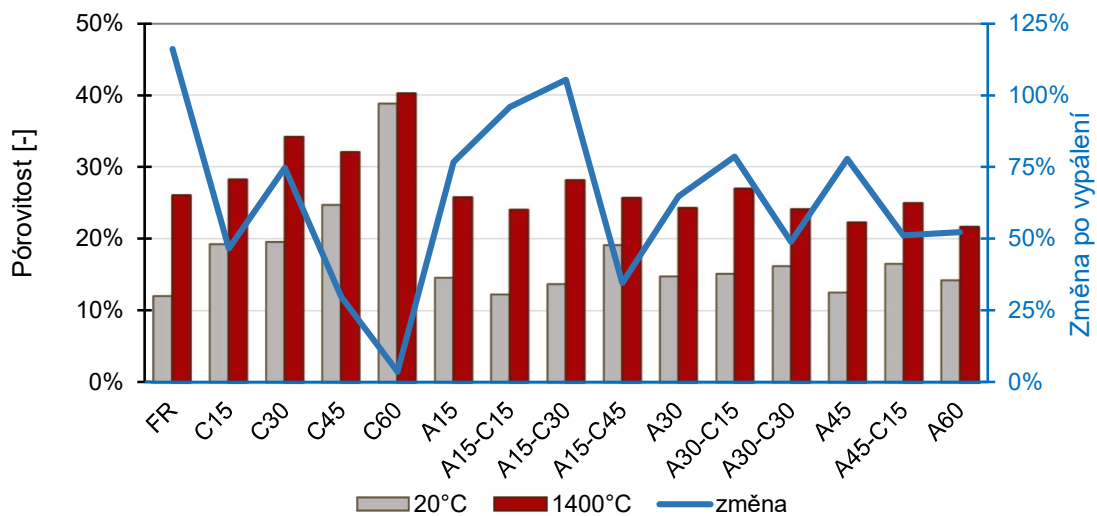
obr. 18: Objemová hmotnost všech vzorků

2.4.1.3 Pórovitost

Pórovitost navržených kompozitů je zobrazena na obr. 19. Pórovitost směsi většinou přímo souvisí s výslednou pevností vzorku, a proto jsou vysoké hodnoty pórovitosti často nežádoucí. Běžné hodnoty pórovitosti u betonu se při pokojové teplotě pohybují do 20 %. Vyšší hodnoty by se již mohly negativně projevit na pevnosti. Tyto hodnoty jsou také přímo závislé na hustotě a objemové hmotnosti, protože se z těchto měření přímo počítají. Obecně platí, že čím nižší je objemová hmotnost, tím vyšší je pórovitost.

Hodnota pórovitosti se s přidanou příměsí ve všech případech zvýšila. Nejvyšších hodnot pórovitosti dosahovaly kompozity s příměsí cihelného prachu, jak šlo očekávat dle výsledků objemové hmotnosti. Hranici 20% pórovitosti překročily vzorky C45 a C60. Přidáním reaktivní aluminy do směsi se pórovitost materiálu ve všech případech výrazně snížila. Lze tvrdit, že s vyšším podílem RA se pórovitost postupně snižovala. Nicméně s rostoucím množstvím cihelného prachu rostla pórovitost i u kompozitů s obsahem RA. Kromě referenčního vzorku FR dosahovala velmi nízkých hodnot i směs A15-C15.

Po výpalu byl nejvyšší nárůst pórovitosti (116 %) pozorován u referenčního vzorku. Přidáním příměsi se tedy ve všech případech zmírnil nárůst pórovitosti po vypálení. Nicméně pórovitost výrazně vzrostla i u směsí A15-C15 a A15-C30. Zdá se, že CP měl v některých případech pozitivní vliv na menší změny pórovitosti. Menší změny lze pozorovat mezi vzorky A15 a A15-C45 nebo A30 a A30-C30. Nicméně obecně nižší hodnoty pórovitosti vykazovaly vzorky s příměsí RA. Je patrné, že reaktivní alumina s cihelným prachem spolupůsobí a jejich kombinace má tendenci snižovat pórovitost matrice.

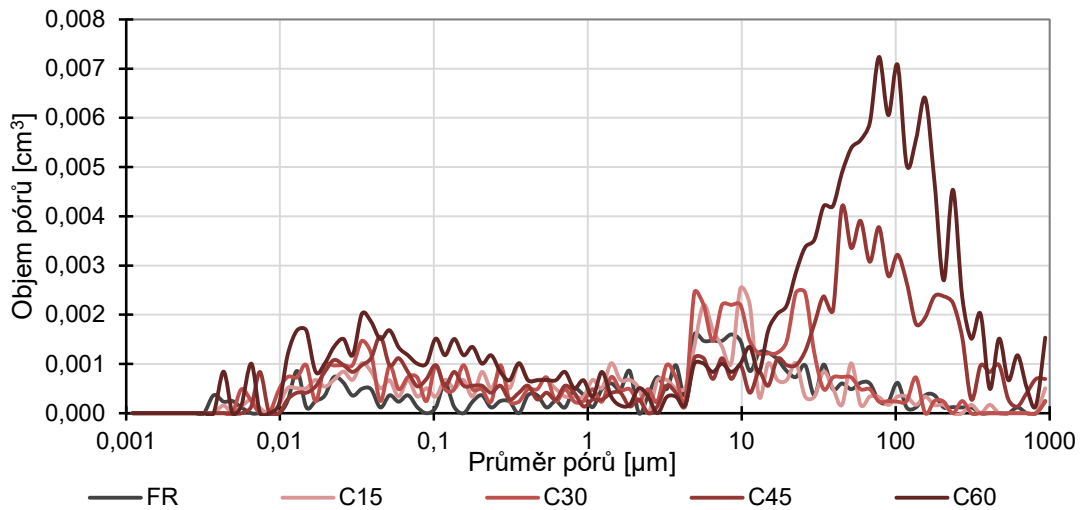


obr. 19: Pórovitost vzorků

2.4.1.4 Rtuťová porozimetrie

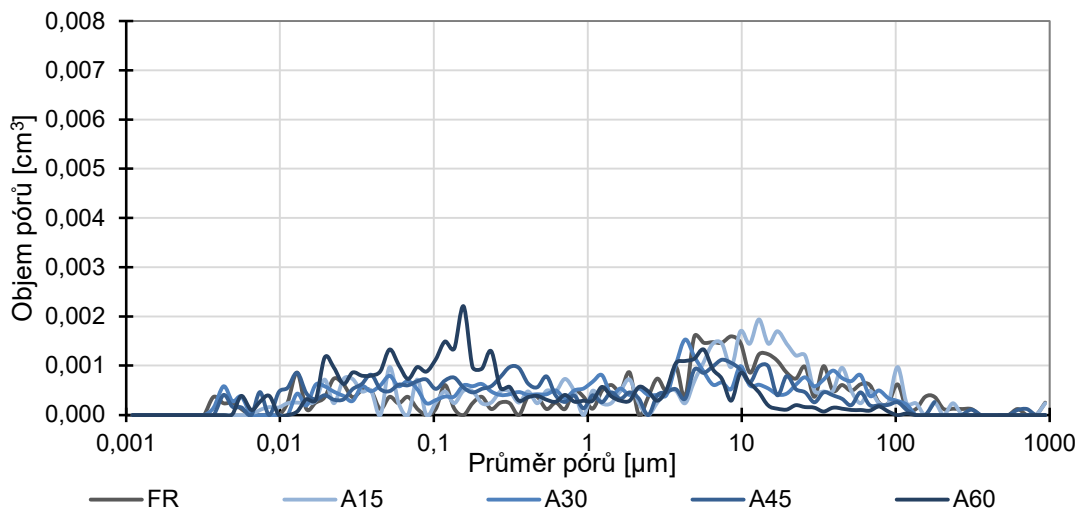
Pro úplnou charakterizaci pórového systému při běžných teplotách byla využita metoda rtuťové porozimetrie. Výsledkem jsou grafy zobrazující závislost průměru pórů na jejich objemu. Pro přehlednost jsou grafy opět rozděleny dle složení navržených směsí.

V referenčním vzorku byly zastoupeny téměř všechny měřené velikosti pórů. Výraznější píky se pohybují v intervalu okolo 0,05 μm a nejvyšší objem pórů je o průměru cca 10 μm . Na obr. 20 jsou zobrazeny výsledky směsí obsahující pouze cihelný prach. Směsi s obsahem cihelného prachu zvýraznily trend křivky referenčního vzorku a množství pórů rostlo zejména ve výše zmíněných intervalech. Vyšší dávkování cihelného prachu u směsí C45 a C60 navíc způsobil výrazný nárůst objemu pórů o průměru 100 μm . Tyto směsi dosahovaly v předchozím měření nejvyšší pórovitosti ze všech studovaných materiálů (obr. 19).



obr. 20: Výsledek rtuťové porozimetrie – vzorky s CP

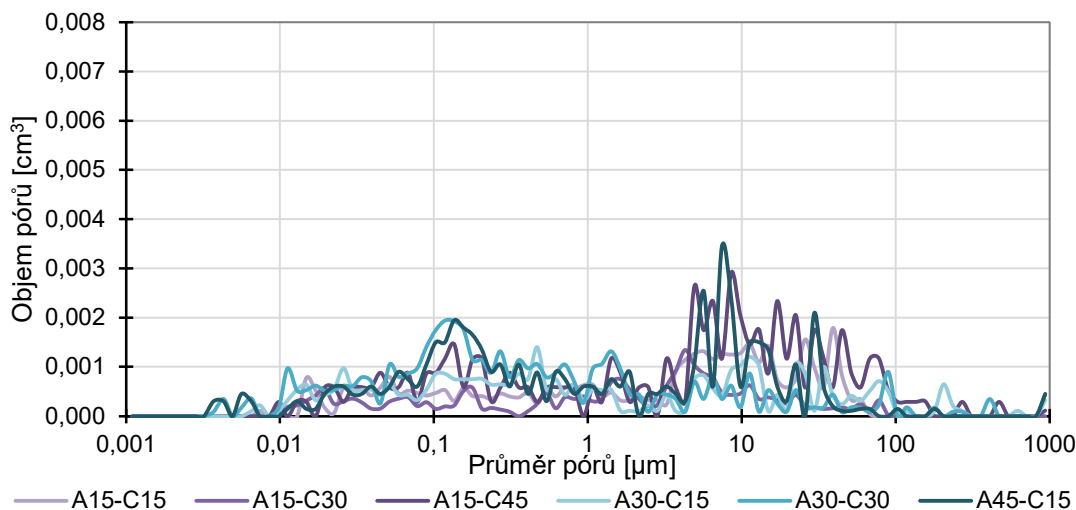
Výsledky směsí s různým poměrem reaktivní aluminu jsou zobrazeny na obr. 21. Při porovnání s obr. 20 je na první pohled patrné, že póry o průměru 100 μm se u vzorků s RA téměř nevyskytovaly. Výsledky vzorků A15 a A30 přibližně kopírují křivku referenčního vzorku a nejvyšší objemy pórů dosahují průměru okolo 10 μm. S rostoucím dávkováním se velikost pórů spíše zmenšuje a vzrůstá množství pórů v intervalu od 0,01 μm do 1 μm.



obr. 21: Výsledek rtuťové porozimetrie – vzorky s RA

V případě kombinování příměsí cihelného prachu a reaktivní aluminu se potvrzují trendy z předchozích grafů a nejčtenější velikosti pórů se i nadále pohybují okolo hodnot 0,1 μm a 10 μm. U směsí A15-C45 a A45-C15 byla v předchozích měřeních zaznamenána

vyšší pórovitost než u ostatních vzorků (obr. 19). Vyšší hodnota pórovitosti souvisí zejména se zvýšeným objemem pórů o velikosti 10 μm . Vlivem RA se opět zvýrazňovaly píky v oblasti velikosti pórů okolo 0,1 μm , zatímco vliv CP nevykazoval zřetelnou závislost.



obr. 22: Výsledek rtuťové porozimetrie – kombinace

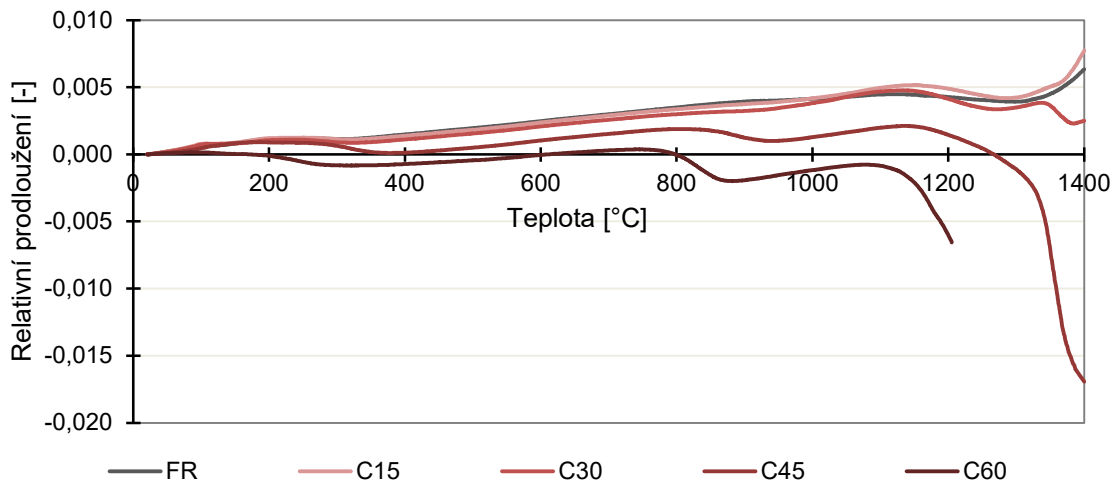
2.4.1.5 Teplotní dilatace

Teplotní dilatace má významný vliv na výslednou použitelnost kompozitu v praxi. Při zahřívání se betonový kompozit rozpíná nebo smršťuje, což způsobuje vnitřní napětí a mohou vznikat trhliny.

Výsledky relativního prodloužení materiálu v závislosti na teplotě jsou zobrazeny na následujících grafech. Pro přehlednost byly výsledky rozděleny do tří samostatných grafů dle složení jednotlivých kompozitů.

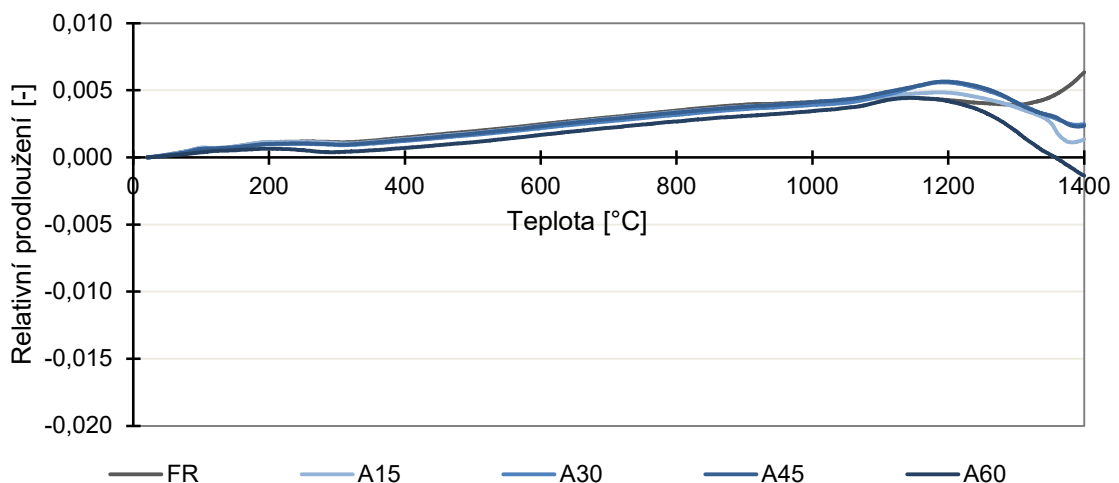
Na obr. 23 jsou zobrazeny hodnoty relativního prodloužení pro vzorky obsahující pouze příměs cihelného prachu. Vzorky s 15 % a 30 % CP dosahovaly podobných hodnot jako referenční vzorek, tedy hodnoty jejich relativního prodloužení konstantně stoupaly až do teploty 1300 °C. V případě vzorku C45 došlo při teplotě 1200 °C ke slinutí mikrostruktury a po dosažení této teploty se vzorek začal prudce smršťovat. Z tohoto důvodu by praktická aplikace této směsi byla vhodná do teploty maximálně 1200 °C. Na druhou stranu při nižších teplotách tato směs vykazovala menší objemové změny než referenční vzorek. Relativní prodloužení v případě směsi C60 bylo do teploty 800 °C téměř nulové.

Při vyšších teplotách se však vzorek začal prudce smršťovat a při teplotě 1200 °C muselo být měření ukončeno.



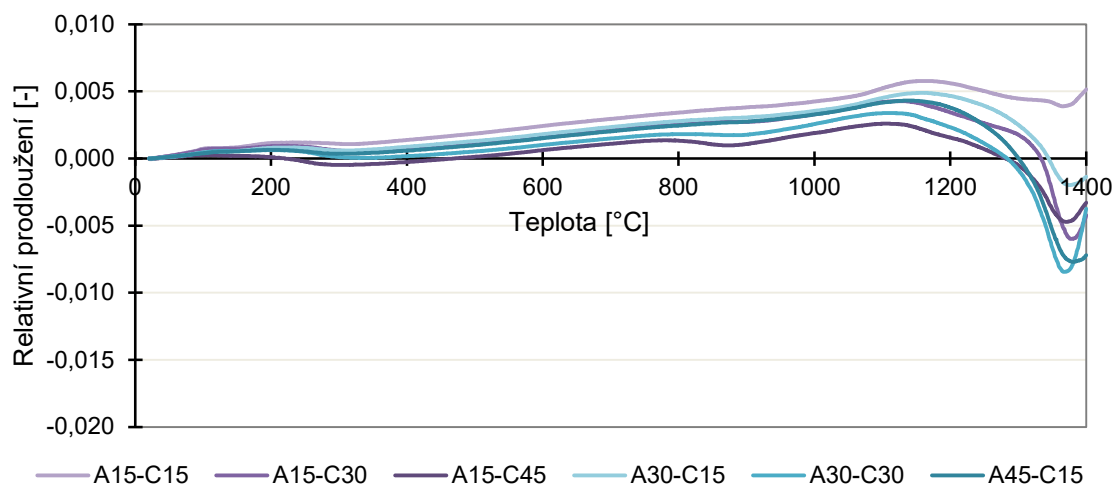
obr. 23: Relativní prodloužení – vzorky s CP

Na obr. 24 jsou znázorněny hodnoty relativního prodloužení pro vzorky, ve kterých byl hlinitanový cement částečně nahrazován reaktivní aluminou. Zpočátku vzorky vykazují velmi podobné chování jako referenční vzorek a jejich relativní prodloužení mírně stoupalo až do teploty 1100 °C. Po dosažení teploty kolem 1200 °C se vzorky začaly mírně smršťovat vlivem slinování. Nejvýraznějšího smrštění bylo pozorováno u vzorku A60 s nejvyšším podílem RA, což je pravděpodobně způsobeno vznikem minerálu hibonitu (CA_6) při vyšších teplotách [38]. Naopak u FR nedošlo téměř k žádnému smrštění.



obr. 24: Relativní prodloužení – vzorky s RA

Podobné chování lze pozorovat i u vzorků obsahujících kombinace CP a RA (obr. 25). Do teploty 1100 °C byl tvar křivky u všech směsí velmi podobný. Nejmenší objemové změny do cca 1300 °C byly pozorovány u vzorků A15-C45 a A30-C30, u kterých byl hlinitanový cement nahrazen z 60 %. U většiny vzorků došlo ke slinování při teplotě okolo 1200 °C, což vedlo k následnému prudkému smrštění. Se zvyšujícím se poměrem příměsí byl prudký pokles relativního prodloužení výraznější. Nejméně se smrští vzorek A15-C15.

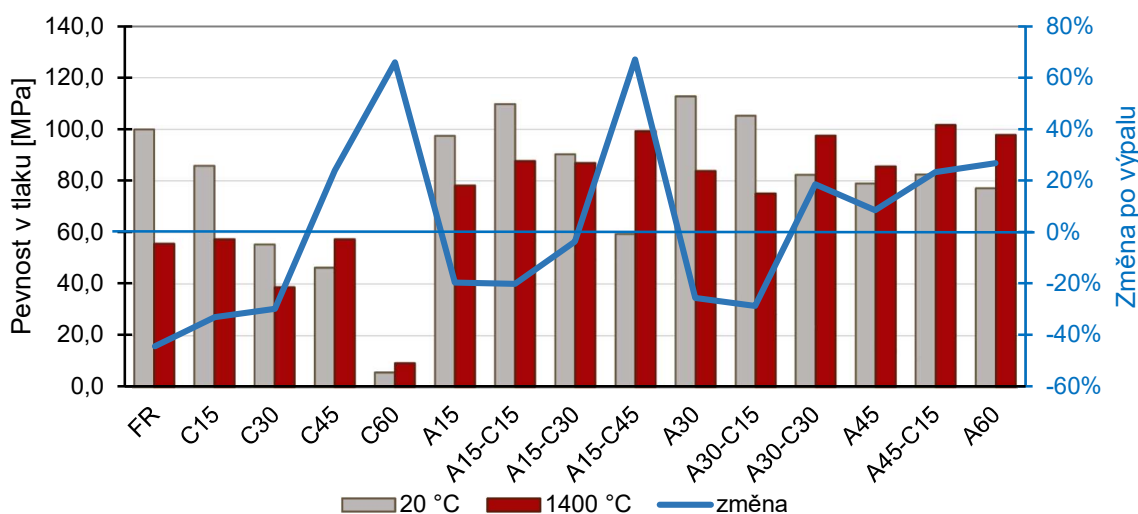


obr. 25: Relativní prodloužení – kombinace

2.4.2 Mechanické vlastnosti

2.4.2.1 Pevnost v tlaku

Pevnost v tlaku betonu je jednou ze základních a zároveň nejvíce vypovídajících parametrů používaných v praxi. Jedním z negativních jevů může být ztráta pevnosti betonu při vysokých teplotách. Proto je důležité porovnávat nejen pevnosti směsí mezi sebou, ale i jejich změny v rámci jedné směsi v závislosti na teplotě. Naměřené hodnoty pevnosti v tlaku jsou shrnuty v obr. 26.



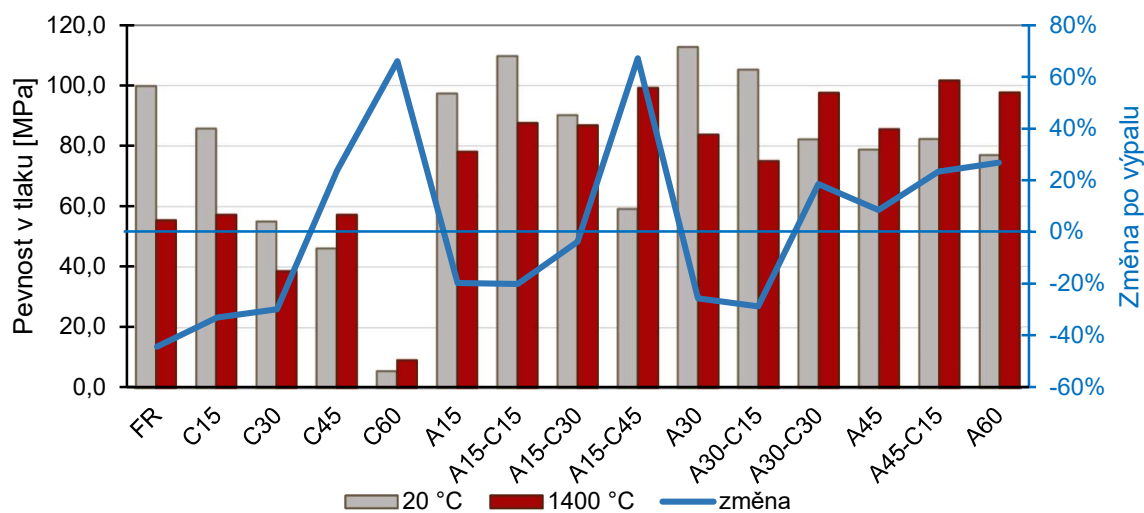
obr. 26: Pevnost v tlaku

Pevnost v tlaku při 20 °C

Referenční směs dosáhla za běžné teploty pevnosti v průměru okolo 100 MPa a vyšší pevnosti dosáhly pouze tři směsi A15-C15, A30 a A30-C15.

Nahrazení hlinitanového cementu pouze cihelným prachem mělo na výsledné mechanické vlastnosti zřetelně negativní vliv. S rostoucím dávkováním CP hodnoty pevnosti v tlaku prudce klesaly. Výrazně nejhorších výsledků dosáhla směs C60, čemuž nasvědčovaly i předchozí měření (největší souvislost lze obecně pozorovat s pórovitostí). Pokud se zachovalo stejné dávkování CP a část CAC se nahradila reaktivní aluminou, pevnost se ve všech případech zvýšila. Pokud ale srovnáme směsi se stejným dávkováním RA, lze opět pozorovat spíše negativní vliv CP na zhoršení pevnosti. Na obr. 27 jsou porovnány směsi, ve kterých je zachováno stejné množství RA a mění se pouze obsah CP. V případě 15% obsahu RA se pevnost přidáním 15 % CP

zvýšila, ale vyšší dávkování již působilo negativně. Směs A15-C45 dosáhla jedné z nejnižších pevností.



obr. 27: Pevnost v tlaku vzorků s 15 % RA

U směsí obsahujících jako příměs pouze reaktivní aluminu se za běžné teploty pevnost v tlaku zvýšila pouze v případě 30% dávkování. Směs A30 dosáhla ze všech navržených směsí nejvyšší pevnosti za běžných teplot. Naopak směsi A45 a A60 vykazovaly spíše nižší pevnosti v tlaku.

Pevnost v tlaku po vypálení na 1400 °C

Přestože za běžné teploty vykazoval referenční vzorek jednu z nejvyšších hodnot pevnosti, po vypálení jeho pevnost výrazně klesla. Vlivem příměsí nebyl pokles po vypálení u žádného vzorku natolik výrazný. Naopak vysoký vzrůst pevnosti byl pozorován u směsí C60 a A15-C45. I přesto byly výsledky směsi C60 ze všech nejhorší.

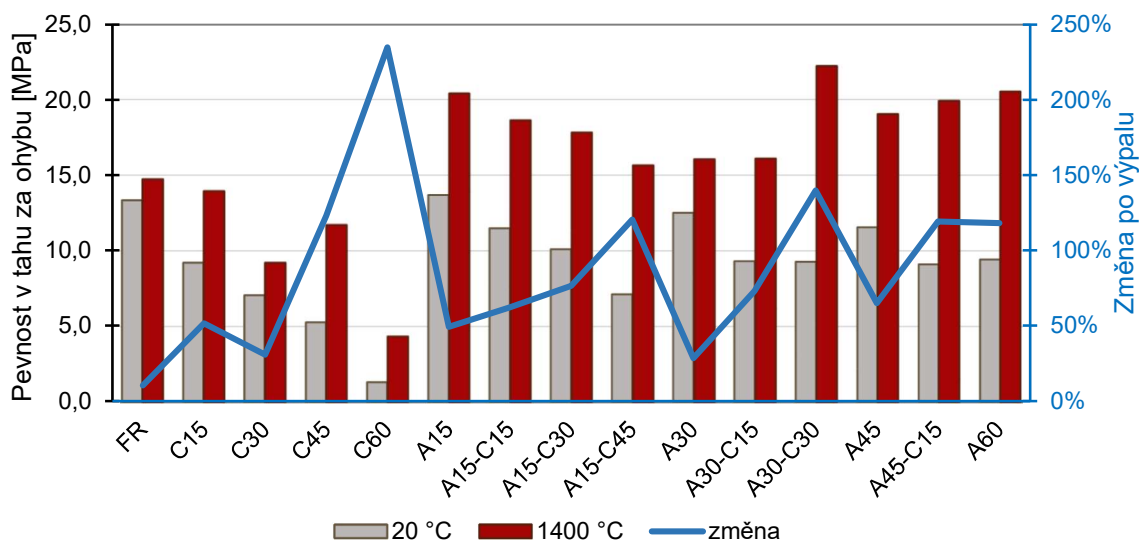
Je zřejmé, že použití CP zmírňuje pokles mechanických vlastností (v grafu znázorněno jako křivka „změna“). Se zvyšujícím se podílem CP se pokles pevnosti postupně snižuje. Tento jev lze pozorovat jak u směsí pouze s CP, tak i u směsí kombinujících CP a RA (např. na obr. 27). Pokud bylo ve směsi obsaženo 45 % nebo 60 % CP, změna byla dokonce u všech směsí kladná. Nicméně zvýšení pevnosti po výpalu nemusí být nutně pouze vlivem množství CP, ale obecně nahrazením velkého podílu CAC.

Pokud se však zaměříme pouze na výsledné pevnosti, tak nejvyšších hodnot dosahují směsi s nejvyšším obsahem příměsí. První čtyři nejvyšší pevnosti v tlaku (okolo 100

MPa) byly naměřeny u směsí, ve kterých bylo nahrazeno 60 % hlinitanového cementu. Na druhou stranu 60% nahrazení pomocí CP mělo nejhorší výsledek.

2.4.2.2 Pevnost v tahu za ohybu

Pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku jsou obvykle provázané parametry které spolu úzce souvisí. Naměřené výsledky jsou zobrazeny na obr. 28.



obr. 28: Pevnost v tahu za ohybu

Pevnost v tahu za ohybu při 20 °C

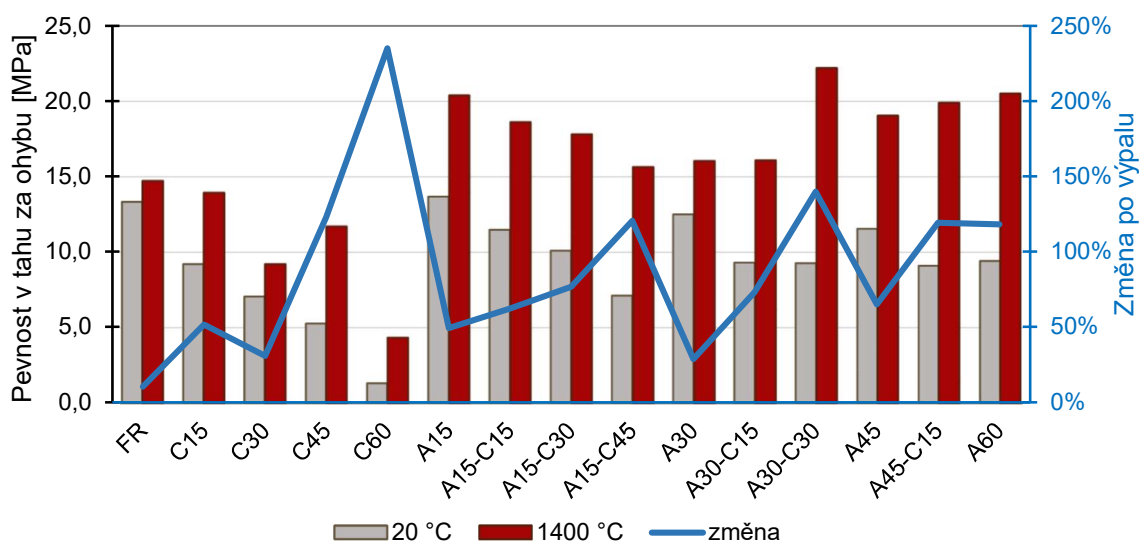
Při měření pevnosti za ohybu byly zaznamenány podobné výsledky jako při předchozích zkouškách. Za běžné teploty dosahovaly nejlepších výsledků referenční vzorky FR a vzorky obsahující pouze RA. Pevnosti v tahu za ohybu se opět snižovaly s množstvím použitého cihelného prachu. Vyšší podíl RA výsledné hodnoty také spíše snižoval, což u pevnosti v tlaku nebylo natolik zřetelné. Ze směsí kombinujících CP a RA dosáhla nejnižších hodnot v tlaku i v tahu za ohybu směs A15-C45 (což přímo odpovídá i vysoké pórovitosti z obr. 19).

Pevnost v tahu za ohybu po vypálení na 1400 °C

Po vypálení vzorků se hodnota pevnosti v tahu za ohybu u všech směsí zvýšila (na rozdíl od pevnosti v tlaku). Nicméně křivka zobrazující změnu vlastností po výpalu je velmi podobná předchozímu grafu (obr. 27), tedy po vypálení byl vliv na obě tyto vlastnosti srovnatelný. Vzorky obsahující pouze cihelný prach měly po výpalu v porovnání

s referenčním vzorkem FR horší výsledky, zatímco všechny směsi doplněné reaktivní aluminou dosahovaly vyšších hodnot než FR. Nejvýraznější změny po výpalu (kromě směsi C60) byly pozorovány opět u směsí A15-C45 a A30-C30.

Při srovnání pouze pevností po výpalu je chování vzorků s CP podobné jako při měření pevnosti v tlaku. Naopak směs A15 dosáhla jedné z nejvyšších pevností za ohybu, zatímco jeho pevnosti v tlaku byly spíše podprůměrné. U směsi A15-C45 došlo k přesně opačnému případu a jeho pevnosti za ohybu jsou jedny z nejnižších. Nutno ale podotknout, že rozdíly mezi jednotlivými vzorky se pohybují v hodnotách kolem 5 MPa.



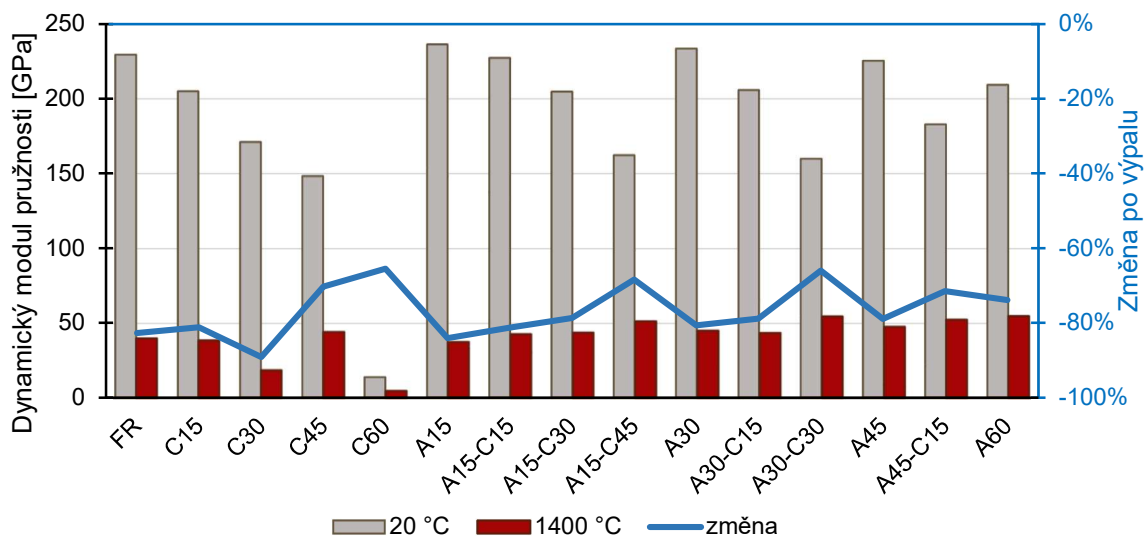
obr. 29: Pevnost v tahu za ohybu

2.4.2.3 Dynamický modul pružnosti

Dynamický modul pružnosti vykazoval velmi podobné chování jako výsledky pevnosti v tlaku a pevnosti v tahu za ohybu.

Za běžné teploty byly nejvyšší hodnoty naměřeny u referenční směsi a u vzorků s příměsí pouze RA. Se zvyšujícím se dávkováním modul pružnosti klesal obdobně jako hodnoty z předchozích měření. Výraznější změna oproti předchozím měřením byla pozorována u směsí A30-C30 a A45-C15, jejichž moduly pružnosti jsou o něco nižší, než by se dalo předpokládat dle předchozích podobností s jinými vzorky. V ostatních případech moduly pružnosti odpovídají předpokladům vycházejících z hodnot pevnosti v tahu za ohybu.

Hodnoty modulu pružnosti u všech vzorků po výpalu výrazně klesly, nicméně křivka změny po výpalu je téměř totožná s předchozími grafy. Hodnoty po tepelném zatížení velmi přesně odpovídají hodnotám pevnosti v tlaku. Výjimkou je směs A60, která dosáhla o něco málo vyšší hodnoty, než tomu bylo u směsi A45-C15.



obr. 30: Dynamický modul pružnosti

3 Závěr

Cílem této práce bylo najít využití cihelného prachu jako částečné náhrady hlinitanového cementu a zjistit možnosti dalšího možného využití tohoto odpadního materiálu. Pro svou vysokou reaktivitu a potenciální zlepšení vlastností výsledné směsi byla jako další příměs používána reaktivní alumina.

Bylo navrženo celkem 14 kompozitů na bázi hlinitanového cementu, ve kterých byl obměňován poměr jednotlivých příměsí. Experimentální měření bylo provedeno na vzorcích měřených za běžných podmínek a na vzorcích vypálených na teplotu 1400 °C.

Výsledky ukázaly, že použití cihelného prachu bez dalších aktivních příměsí není příliš vhodné. Negativní vliv se projevil zejména na hodnotách pórovitosti, což mělo za následek i nízké hodnoty pevnosti v tlaku a v tahu za ohybu. Se zvýšeným dávkováním cihelného prachu se pórovitost materiálu úměrně zvyšovala.

Naopak kombinace cihelného prachu s reaktivní aluminou prokázala synergický efekt a tyto látky se vzájemně pozitivně ovlivňují. Během zkoušek při běžných teplotách dosahovaly kompozity výsledků srovnatelných s referenčním materiálem bez příměsí. Po tepelném zatížení vykazovaly všechny směsi, které kombinovaly cihelný prach a reaktivní aluminu, vyšší hodnoty pevností v tlaku i tahu za ohybu než referenční směs. Přítomnost cihelného prachu měla sice při běžných teplotách spíše negativní vliv na mechanické vlastnosti, avšak ve zkouškách provedených po výpalu vzorku byl prokazatelně pozorován pozitivní vliv na menší poklesy pevností vlivem tepelného zatížení. V případě směsí A30-C30 nebo A45-C15 se s dobrými výsledky podařilo nahradit až 60 % hlinitanového cementu. Směs A15-C30 vykazovala rovněž velmi dobré mechanické vlastnosti, zejména s ohledem na použití minimálního množství reaktivní aluminu.

U většiny testovaných materiálů se prokázal potenciál využití cihelného prachu při částečném nahrazování hlinitanového cementu. Téměř ve všech případech byla zjištěna schopnost odolat teplotám až 1400 °C bez výrazné ztráty mechanických vlastností. Použitím cihelného prachu se může dosáhnout jak ekologického přínosu, tak i ekonomických úspor.

4 Citovaná literatura

- [1] SMITH, A. Korelace mezi hydratačním mechanismem a ultrazvukovým měřením v hlinitanovém cementu: Vliv nastavení času a teploty na časnou hydrataci. *Časopis Evropské keramické společnosti*. nedatováno, **2002**(22).
- [2] SVOBODA, Luboš. *Stavební Hmoty*. JAGA Group s.r.o. 2007.
- [3] NOVÁK, Jakub. *Chování betonu a betonových konstrukcí při tepelném namáhání*. B.m., nedatováno. b.n.
- [4] POKORNÝ, Marek a Petr HEJTMÁNEK. *Požární bezpečnost staveb. Syllabus pro praktickou výuku*. 2021. vyd. B.m.: Česká technika - nakladatelství ČVUT, nedatováno.
- [5] ČSN EN 1363-1 *Zkoušení požární odolnosti – Část 1: Základní požadavky*
- [6] ČSN 73 0810 *Požární bezpečnost staveb – Společná ustanovení*. 2016
- [7] KUPILÍK, Václav. *Stavební konstrukce z požárního hlediska*. 2006. vyd. B.m.: Praha: Grada Publishing, a.s., nedatováno.
- [8] ZADRAŽIL, Tomáš, František VODÁK a Hana KLOKOČNÍKOVÁ. Změny struktury a pevnosti betonu vyvolané tepelným namáháním. *Stavební obzor*. 2005, (5), 142.
- [9] HORNÍKOVÁ, Kateřina, Lenka SCHEINHERROVÁ, Radek ŠTEFAN a Marek FOGLAR. Experimental investigation of physical, thermal, hygral and mechanical properties of cementitious composites at high temperatures. *Construction and Building Materials* [online]. 2020, **255**, 119244. ISSN 0950-0618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.119244
- [10] PROCHÁZKA, Jaroslav, Radek ŠTEFAN a Jitka VAŠKOVÁ. *Navrhování betonových a zděných konstrukcí na účinky požáru*. 1. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2010.
- [11] MACHÁČ, Michal. *Experimentální a numerická analýza pórového tlaku v betonu vystaveném vysokým teplotám*. B.m., nedatováno. ČVUT.
- [12] KLINGSCH, Eike W. *Explosive spalling of concrete in fire*. 2014.
- [13] ŠTEFAN, Radek. *Fire Resistance of Concrete Structures. Prezentace při SDZ*. B.m., 2010. b.n.
- [14] ROVNANÍKOVÁ, Pavla, Patrik BAYER a Lubomír VÍTEK. *Hlinitanový cement jako pojivo konstrukčního betonu- Stav betonu z konstrukce mostu po padesáti letech*. 2007
- [15] FS ČSFR 1990-1992, tisk 110 [online]. [vid. 2023-03-23]. Dostupné z: https://www.snemovna.cz/eknih/1990fs/tisky/t0110_00.htm

- [16] HOLČAPEK, Ondřej. *Experimentální analýza vláknových kompozitů zatížených vysokými teplotami*. B.m., 2019. ČVUT.
- [17] STANCU, Cristina, Nicolae ANGELESCU a Vasile BRATU. The hydration of super aluminous cement and the mechanical strength development. *The Scientific Bulletin of VALAHIA University – MATERIALS and MECHANICS*. 2012.
- [18] JOGL, Marcel. *Development of Lightweight Refractory Composites Based on Aluminous Cement*. B.m., 2021. ČVUT.
- [19] PELLANT, Chris a Helen PELLANT. *Horniny a minerály*. B.m.: Osvěta, 1994. ISBN 978-80-217-0582-1.
- [20] KOŇÁKOVÁ, Dana. *Thermal Resistance of Calcium Aluminate Cement Based Composites*. B.m., 2018. ČVUT.
- [21] TŮMOVÁ, Veronika. *Pojivové systémy na bázi aluminasilikátů*. B.m., 2008. VUT.
- [22] ŠÁDKOVÁ, Kateřina. *Aplikace druhotného materiálu při návrhu nízkocementového pojiva pro tepelně odolné kompozity*. B.m., 2022. ČVUT.
- [23] ŠÁDKOVÁ, Kateřina, Dana KOŇÁKOVÁ, Vojtěch POMMER, Robert ČERNÝ a Eva VEJMELKOVÁ. Application of secondary calcined shale in the design of low-cement binder for thermal-resistant composites. *Ceramics International* [online]. 2023, **49**(9, Part A), 13452–13468. ISSN 0272-8842. Dostupné z: doi:10.1016/j.ceramint.2022.12.220
- [24] EGER, Lukáš. *Aktivace příměsí do betonu*. B.m., 2012. Bakalářská práce. VUT.
- [25] VEJMELKOVÁ, Eva. Vápenné omítky s pucolánovými příměsmi. nedatováno.
- [26] COLLEPARDI, M., S. MONOSI a P. PICCIOLI. The influence of pozzolanic materials on the mechanical stability of aluminous cement. *Cement and Concrete Research* [online]. 1995, **25**(5), 961–968. ISSN 0008-8846. Dostupné z: doi:10.1016/0008-8846(95)00091-P
- [27] IDREES, Maria, Ozgur EKINCIOGLU a Muhammad Sarmad SONYAL. Hydration behavior of calcium aluminate cement mortars with mineral admixtures at different curing temperatures. *Construction and Building Materials* [online]. 2021, **285**, 122839. ISSN 0950-0618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.122839
- [28] CHENG, Xiaowei, Qingguang DONG, Yong MA, Chi ZHANG, Xianshu GAO, Yongjin YU, Zhajun WEN, Chunmei ZHANG a Xiaoyang GUO. Mechanical and thermal properties of aluminate cement paste with blast furnace slag at high temperatures. *Construction and Building Materials* [online]. 2019, **228**, 116747. ISSN 0950-0618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.116747
- [29] ADESANYA, Elijah, Amarachi EZU, Hoang NGUYEN, Christine RÖSSLER, Harisankar SREENIVASAN, Katja OHENOJA, Paivo KINNUNEN a Mirja ILLIKAINEN. Hydration of blended ladle slag and calcium aluminate cement. *Journal of Building Engineering* [online]. 2023, **66**, 105855. ISSN 2352-7102. Dostupné z: doi:10.1016/j.job.2023.105855

- [30] MOHAMMADI, Hossein, Mohammad Reza NILFOROUSHAN a Morteza TAYEBI. Effect of nanosilica addition on bioactivity and in vivo properties of calcium aluminate cement. *Ceramics International* [online]. 2020, **46**(4), 4335–4343. ISSN 0272-8842. Dostupné z: doi:10.1016/j.ceramint.2019.10.156
- [31] PODE, R. Potential applications of rice husk ash waste from rice husk biomass power plant. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2016, **53**, 1468–1485. ISSN 1364-0321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2015.09.051
- [32] WANG, J., J. XIAO, Z. ZHANG, K. HAN, X. HU a F. JIANG. Action mechanism of rice husk ash and the effect on main performances of cement-based materials: A review. *Construction and Building Materials* [online]. 2021, **288**. ISSN 0950-0618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.123068
- [33] WU, Kai, Hao HAN, Christiane RÖSSLER, Linglin XU a H. M. LUDWIG. Rice husk ash as supplementary cementitious material for calcium aluminate cement – Effects on strength and hydration. *Construction and Building Materials* [online]. 2021, **302**, 124198. ISSN 0950-0618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.124198
- [34] IRISAWA, Keita, Inés GARCIA-LODEIRO a Hajime KINOSHITA. Influence of mixing solution on characteristics of calcium aluminate cement modified with sodium polyphosphate. *Cement and Concrete Research* [online]. 2020, **128**, 105951. ISSN 0008-8846. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconres.2019.105951
- [35] NAWAZ, Ahmad, Naru KIM, Joonho SEO, S. Z. FAROOQ a H. K. LEE. Hydration and phase conversion of MgO-modified calcium aluminate cement. *Construction and Building Materials* [online]. 2023, **369**, 130425. ISSN 0950-0618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2023.130425
- [36] KOŇÁKOVÁ, D. a E. VEJMELOVÁ. Effect of metashale as SCM on mechanical and thermal properties in concrete production. *Appl. Mech. Mater.* 2015, **763**, 41–46.
- [37] KOŇÁKOVÁ, D., V. HOVORKOVÁ, E. VEJMELOVÁ, M. KEPPERT a R. ČERNÝ. Influence of metashale as cement replacement on the hygric transport properties of concrete. *Advanced Materials Research* [online]. 2014, **1054**, 188–193. ISSN 1022-6680. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.1054.188
- [38] KOŇÁKOVÁ, Dana, Vojtěch POMMER, Miloš JERMAN, Martin KEPPERT, Robert ČERNÝ a Eva VEJMELOVÁ. Utilization of ceramic powder, calcined shale and sintered mullite as partial replacements of calcium aluminate cement. *Construction and Building Materials* [online]. 2022, **326**, 126824. ISSN 0950-0618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2022.126824
- [39] *Density: Helium Pycnometry | Materials Research Institute* [online]. Dostupné z: <https://www.mri.psu.edu/materials-characterization-lab/characterization-techniques/density-helium-pycnometry>
- [40] KEPPERT, Martin. Distribuce velikosti pórů ve stavebních materiálech – charakterizace a význam. nedatováno.

- [41] ČSN EN 1015-11 *Zkušební metody malt pro zdivo - Část 11: Stanovení pevnosti zatvrdlých malt v tahu za ohybu a v tlaku*
- [42] ČSN 73 1371 *Nedestruktivní zkoušení betonu - Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu*
- [43] GHAFFARI MOGHADDAM, Farid, Abbas AKBARPOUR a Afshin FIROUZI. Dynamic modulus of elasticity and compressive strength evaluations of modified reactive powder concrete (MRPC) by non-destructive ultrasonic pulse velocity method. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering* [online]. 2022, **21**(2), 490–499. ISSN 1346-7581. Dostupné z: doi:10.1080/13467581.2020.1869020
- [44] BROŽOVSKÝ, Jiří. Využití ultrazvukové impulsové metody pro zjišťování pevnosti v tlaku různých druhů cihel. *TZB-info* [online]. 2018. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/cihly-bloky-tvarnice/17190-vyuziti-ultrazvukove-impulsove-metody-pro-zjistovani-pevnosti-v-tlaku-ruznych-druhu-cihel>
- [45] KERNEOS INC. Secar 71, list výrobce. 2006.
- [46] EDMONDS, R. N. a A. J. MAJUMDAR. The hydration of Secar 71 aluminous cement at different temperatures. *Cement and Concrete Research* [online]. 1989, **19**(2), 289–294. ISSN 0008-8846. Dostupné z: doi:10.1016/0008-8846(89)90093-8
- [47] KOČMÁNEK, Tomáš. *Cihelný prach vznikající při broušení pálených zdících tvarovek a možnosti jeho využití*. B.m., 2020. VUT.
- [48] VEJMELKOVÁ, E., D. KOŇÁKOVÁ, M. ČÁCHOVÁ, M. ZÁLESKÁ, P. SVORA, M. KEPPERT, P. ROVNANÍKOVÁ a R. ČERNÝ. High-strength concrete based on ternary binder with high pozzolan content. *Structural Concrete* [online]. 2018, **19**(5), 1258–1267. ISSN 1464-4177. Dostupné z: doi:10.1002/suco.201700173
- [49] GÜREL, S. Berrin a Akın ALTUN. Reactive alumina production for the refractory industry. *Powder Technology* [online]. 2009, **196**(2), 115–121. ISSN 0032-5910. Dostupné z: doi:10.1016/j.powtec.2009.07.007
- [50] *Pálené lupky - obecné informace : ČLUZ a.s.* [online]. [vid. 2023-05-12]. Dostupné z: <https://www.cluz.cz/cz/palene-lupky-obecne-informace>
- [51] ČSN EN 206+A2 (732403) *Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*

Seznam použitých zkratk

CAC	Hlinitanový cement
CP	Cihelný prach
CSH	Vápeno-křemičitanové hydráty
DSC	Diferenční skenovací kalorimetrie
PC	Portlandský cement
RA	Reaktivní alumina
SCM	Částečná náhrada cementu
SEM	Skenovací elektronový mikroskop
XRD	Rentgenová difrakce

Seznam obrázků

obr. 1: Charakteristický průběh požáru v uzavřeném prostoru [4].....	6
obr. 2: Závislost pevnosti betonu na teplotě [7].....	8
obr. 3: Vznik pórového tlaku v betonu [13].....	10
obr. 4: Schematické znázornění výrobních procesů [16].....	14
obr. 5: Pevnost v tlaku u vzorků s čistým CAC [26].....	17
obr. 6: Pyknometr Pycnomatic Evo.....	22
obr. 7: Porozimetr Pascal 140+440 Evo	23
obr. 8: Teplotní horizontální dilatometr	24
obr. 9: Vzorky před a po měření teplotní dilatace	24
obr. 10: Schéma tříbodové zkoušky v tahu za ohybu.....	25
obr. 11: Průběh zkoušky pevnosti v tlaku	26
obr. 12: Měření dynamického modulu pružnosti	27
obr. 13: Granulometrická křivka kameniva.....	31
obr. 14: Výroba směsi	32
obr. 15: Trojúhelníkový diagram složení navržených kompozitů.....	33
obr. 16: Hustota matrice	36
obr. 17: Objemová hmotnost kompozitů s RA.....	37
obr. 18: Objemová hmotnost všech vzorků.....	37
obr. 19: Pórovitost vzorků.....	39
obr. 20: Výsledek rtuťové porozimetrie – vzorky s CP	40
obr. 21: Výsledek rtuťové porozimetrie – vzorky s RA	40
obr. 22: Výsledek rtuťové porozimetrie – kombinace	41
obr. 23: Relativní prodloužení – vzorky s CP	42
obr. 24: Relativní prodloužení – vzorky s RA	42
obr. 25: Relativní prodloužení – kombinace.....	43
obr. 26: Pevnost v tlaku.....	44
obr. 27: Pevnost v tlaku vzorků s 15 % RA.....	45
obr. 28: Pevnost v tahu za ohybu	46
obr. 29: Pevnost v tahu za ohybu	47
obr. 30: Dynamický modul pružnosti.....	48

Seznam tabulek

tab. 1: Třídy reakce na oheň pro stavební výrobky [4]	7
tab. 2: Přehled změn probíhajících v betonu při zahřívání [10]	9
tab. 3: Rozdělení hlinitanových cementů [18]	13
tab. 4: Průběh hydratace v závislosti na teplotě[20].....	15
tab. 5: Chemické složení cementu [%].....	28
tab. 6: Mineralogické složení cementu [%]	28
tab. 7: Chemické složení cihelného prachu [%]	29
tab. 8: Mineralogické složení cihelného prachu	29
tab. 9: Chemické složení reaktivní aluminy [%].....	30
tab. 10: Mineralogické složení reaktivní aluminy [%].....	30
tab. 11: Kompozice výsledného kameniva.....	31
tab. 12: Složení navržených kompozitů	33