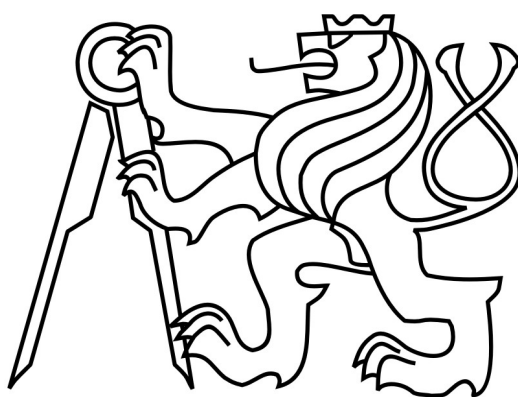


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Studie orientace vláken v cementovém kompozitu
pomocí magnetického pole**

2017

Kristýna Takáčová

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Experimentální centrum

**Studie orientace ocelových vláken v cementovém
kompozitu pomocí magnetického pole**

Analysis of steel fibers orientation in cementitious
composite caused by magnetic field

Bakalářská práce

Autor: Kristýna Takáčová

Vedoucí práce: Ing. Jindřich Fornůsek, Ph.D.

Akademický rok: 2016/2017

Prohlašuji, že jsem vypracovala předloženou práci samostatně, a že jsem uvedla veškerou použitou literaturu.

Dále prohlašuji, že nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

Praha, 23.května 2017

.....

Kristýna Takáčová

Poděkování

Ráda bych poděkovala svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Jindřichu Fornůskovi, Ph.D. za jeho odborné vedení a cenné rady. Dále bych ráda poděkovala konzultantům, Ing. Karlu Künzelovi, CSc. a Ing. Michalu Márovi za to, že si vždy našli čas na konzultace a připomínky k tématu. Poděkování patří také mému vedoucímu projektu na Fakultě elektrotechnické Ing. Václavu Papežovi, CSc. Rovněž děkuji pracovníkům laboratoře LVR za vyhotovení CT scanů.

Abstrakt

Práce se zabývá možnostmi orientace feromagnetických (ocelových) vláken UHPFRC v magnetickém poli. Vyšetřuje orientaci vláken v magnetickém poli pomocí počítačové simulace v programu ANSYS. Výsledky jsou experimentálně ověřovány na standardizovaných tělesech. V práci jsou ukázány a experimentálně ověřeny metody vyhodnocení množství a orientace feromagnetických vláken ve vzorku pomocí měření činitele jakosti cívky se vzorkem. Pro ověření výsledků je použita metoda rentgenových snímků zpracovaných do 3D modelu. V rámci práce bylo ověřeno, že pomocí magnetického pole, lze v čerstvé matrici cementového kompozitu ocelová vlákna úspěšně orientovat.

Klíčová slova: cementový kompozit, magnetické pole, ocelová vlákna, orientace, UHPFRC

Abstract

The paper deals with possibilities of orientation of ferromagnetic (steel) fibers of UHPFRC in the magnetic field. Computer simulation in AnSys software is used for to examine fiber orientation. The results are verified experimentally on standardized specimens. Methods for evaluating the amount and orientation of fibers are presented in this work. These methods are based on measurement of Q-factor. The 3D X-ray method is used to validate the results. It was verified that steel fibers in cementitious composite can be oriented by magnetic field.

Keywords: cementitious composite, magnetic field, steel fibers, orientation, UHPFRC

OBSAH

1	Úvod	1
1.1	Motivace a cíl práce.....	2
2	Magnetizmus.....	3
2.1	Magnetické pole.....	3
2.2	Magnetické vlastnosti materiálů	4
2.3	Elektromagnetismus.....	6
3	Magneticky upravená voda	8
4	Reologické vlastnosti čerstvého betonu.....	10
4.1	Základní pojmy	10
4.2	Na čem závisí reologické vlastnosti čerstvého betonu.....	13
4.3	Měření reologických vlastností	15
5	Orientace ocelových vláken v cementových kompozitech	17
5.1	Vliv reologických vlastností na orientaci vláken v cementových kompozitech.....	17
5.2	Mechanická orientace ocelových vláken v cementových kompozitech	17
5.2.1	Efekt stěn bednění.....	18
5.3	Magnetická orientace vláken v cementových kompozitech	19
6	Měření orientace a množství vláken v cementových kompozitech	22
6.1	Přímé metody měření množství a orientace vláken.....	22
6.1.1	EN 14721:2005+A1:2007	22
6.1.2	Image analysis	23
6.2	Nepřímé metody zjišťování orientace ocelových vláken v cementových kompozitech	23
6.2.1	Induktivní metoda	24
6.2.2	AC- IS (alternating current – impedance spectroscopy).....	28
7	Experimentální část	29
7.1	Úvod do problematiky experimentů	29

7.2	Vlastnosti vláken.....	30
7.3	První experimentální fáze.....	31
7.3.1	Výsledky a vyhodnocení první experimentální fáze	34
7.4	Simulace v programu ANSYS	38
7.5	Jiné soustavy magnetů	39
7.5.1	Soustava magnetů 2, Žehlička	39
7.5.2	Soustava magnetů 3 a 3'	41
7.5.3	Soustava magnetů 4	42
7.5.4	Závěr experimentů týkajících se jiných soustav magnetů.....	42
7.6	Orientace vláken v cementové matrici.....	43
7.7	Měření orientace vláken pomocí činitele jakosti cívky Q.....	44
7.8	CT-SCANY	46
8	Závěr	49
	Seznam použité literatury:	51

Seznam obrázků

Obr. 1 Průběh magnetických indukčních čar u tyčového magnetu [14]	3
Obr. 2 Weissovy domény před orientací, Weissovy domény po orientaci	4
Obr. 3 Hysterezní křivka [14]	5
Obr. 4 Průběh odmagnetování [14]	5
Obr. 5 Pravidlo pravé ruky [16], Obr. 6 Magnetické pole, siločáry cívky [14]	6
Obr. 7 Stanovení severního pólu cívky [14]	6
Obr. 8 Pokles úhlu mezi atomy vodík v molekule vody při vystavení magnetickému poli [22]	8
Obr. 9 Obrázek Mechanismus zmagnetizování vody [22]	9
Obr. 10 Mikroskopické snímky hydratace cementu [21]	9
Obr. 11 Křivka tekutostibinghamovské kapaliny [23]	11
Obr. 12 Křivka tekutosti newtonovské kapaliny [23]	11
Obr. 13 Křivka tekutosti newtonovské kapaliny [23]	11
Obr. 14 Vysvětlení tixotropie pomocí energeticky potenciální jámy [27]	12
Obr. 15 Grafický výsledek vlivu příměsí na viskozitu směsi [32]	14
Obr. 16 Grafický výsledek vlivu příměsí na smykové napětí [32]	14
Obr. 17 Porovnání průběhů viskozity v čase při dávce příměsí 30 % z hmotnosti cementu [23]	15
Obr. 18 Rotační viskozimetr (Brookfield DV-II+Pro)	16
Obr. 19 BTRHEOM rheometr [26]	16
Obr. 20 Preferovaná orientace vláken pro cementové kompozity [3]	18
Obr. 21 Efekt stěn bednění [3]	18
Obr. 22 Rychlostní proudový profil [7]	19
Obr. 23 Prostorový graf znázorňující lokální koncentraci vláken v prvku [36]	19
Obr. 24 Magnetická orientace ocelových vláken v sonogelové matrici [3]	20
Obr. 25 U.S. Patent 4,062,913, [37]	21
Obr. 26 Přístroj pro orientaci vláken dle patentu US 2006/0244168 A1 [38]	21
Obr. 27 Zařízení pro orientaci a vzájemné propojení vláken [39]	22
Obr. 28 Naměřené hodnoty průběhu síly [3]	23
Obr. 29 Induktivní metoda dle UNE 83512-1:2005 [33]	24
Obr. 30 Směry měření vzorků [42]	25
Obr. 31 (a) Uniform continuous coil, (b) Non-uniform continuous coil, (c) Discontinuous coil [42]	25
Obr. 32 Charakteristiky cívek [42]	26
Obr. 33 Rozdělení prvku na 16 částí [36]	26
Obr. 34 Magnetická sonda [36]	27
Obr. 35 Měření indukčnosti v závislosti na frekvenci [36]	27

Obr. 36 Nyquistův graf [41]	28
Obr. 37 Umístění elektrod pro zjištění orientace vláken pomocí metody AC-IS [45]	29
Obr. 38 Magnetické pole cívky, kritické oblasti pro magnetickou orientaci	29
Obr. 39 Měření vláken stav po výrobě	30
Obr. 40 Řetízování zmagnetizovaných vláken	31
Obr. 41 Funkční model zajišťující rovnoměrný pohyb vzorku	32
Obr. 42 Drátkodráha - skutečné provedení	33
Obr. 43 Připravené neorientované vzorky 3	34
Obr. 44 Neorientované vzorky 3	35
Obr. 45 Zorientovaný vzorek 3 ohodnocen známkou 1	35
Obr. 46 Zorientovaný vzorek 2 ohodnocen známkou 2	36
Obr. 47 Zorientovaný vzorek 3 ohodnocen známkou 3	36
Obr. 48 Zorientovaný vzorek 1 ohodnocen známkou 4	37
Obr. 49 Řez soustavou magnetů Drátkodráhy	38
Obr. 50 Simulace působení magnetického pole na vlákno v programu AnSys	38
Obr. 51 Schéma soustavy magnetů Žehlička	39
Obr. 52 Experimentální ověření soustavy magnetů – Žehlička	40
Obr. 53 Výsledná orientace vláken při pokusu Žehlička	40
Obr. 54 Simulace tvaru magnetického pole Žehliček v programu AnSys	40
Obr. 57 Simulace tvaru magnetického pole soustavy 3 v programu ANSYS	41
Obr. 55 Soustava magnetů 3	41
Obr. 56 Soustava magnetů 3'	41
Obr. 58 Soustava magnetů 4	42
Obr. 59 Měření činitele jakosti cívky pro jádro s cementovou maticí s 1,5 % objemem vláken	45
Obr. 60 Měření činitele jakosti cívky pro jádro s cementovou maticí s 0,75 % objemem vláken	45
Obr. 61 CT-Scan, 3D pohled neorientovaného vzorku s 0,75 % objemem vláken	46
Obr. 62 CT-Scan, 3D pohled neorientovaného vzorku s 0,75 % objemem vláken	46
Obr. 63 CT-Scan, řez neorientovaného vzorku s 1,5 % objemem vláken	47
Obr. 64 Scan, řez zorientovaného vzorku s 1,5 % objemem vláken	47
Obr. 65 Scan, řez zorientovaného vzorku s 0,75 % objemem vláken	48
Obr. 66 Scan, řez zorientovaného vzorku s 0,75 % objemem vláken	48

Seznam tabulek

Tabulka 1 Výsledky první experimentální fáze	34
Tabulka 2 Hmotnosti jednotlivých složek pro výrobu vzorku T40 s 1,5 % objemu vláknny.....	44

1 Úvod

Vláknobeton je znám již od starověku, kdy naši předci přidávali do hliněných cihel koňské žíně a slámu pro zlepšení vlastností materiálu. První moderní alternativou bylo přidání azbestových vláken roku 1900. Až do roku 1950 vývoj stagnoval. Poté se začaly používat jiné typy vláken, ocelová, skleněná, polymerní, uhlíková, celulózová a další. V roce 1955 Shi a Chung[1] zjistili, že přidáním kancelářských sponek v množství 5 % do betonu se výrazně zlepší magnetické stínící vlastnosti kompozitu. Kolem roku 1970 se začalo pohlížet na FRC (Fiberreinforcedconcrete) jako na alternativní náhradu vyztuženého betonu ocelovými pruty [2], [3]. Podle Casanovy přidáním 1,25 % (objemu) ocelových vláken je shodné s vyztužením 1,1 % (objemu) konvenční výztuží [4].

Použití FRC a UHPFRC (Ultra-High Performance Fiber-ReinforcedConcrete) ve stavebních konstrukcích je na vzestupu. Díky technologickému pokroku a vývoji se předpokládá v budoucnu použití pouze UHPC (Ultra-high performance concrete), proto se tato práce dále zabývá především UHPFRC [5]. Se zvyšujícími znalostmi o tomto kompozitním materiálu, se rozvíjí použití i pro nosné stavební konstrukce. Nyní se tento materiál používá především pro betonáž průmyslových podlah, základových desek obytných domů, chodníků, stěnových panelů, prefabrikovaných střešních konstrukcí, mostních konstrukcí, vodohospodářských staveb nebo ve stříkané podobě pro ostění tunelů [6]. Potenciální využití je ale daleko širší.

Výhodami UHPFRC oproti klasickému železobetonu jsou omezení smršťovacích trhlin a tím zvýšení odolnosti proti průniku vody, omezení deformací, zlepšení houževnatosti a únavové pevnosti. Ocelová vlákna v kombinaci s UHPC negují jeho hlavní nevýhodu, a to křehkost. Také se tento kompozit řadí mezi materiály se zvýšenou odolností vůči extrémnímu zatížení.

Nevýhodou ocelových vláken je snížení pevnosti betonu v tlaku. Dle Boulebakchea kol. [7] v průměru o 7 % pro běžný FRC, o 6 % pro SCFRC a o 10 % pro UHPFRC.

Hlavním problémem pro nahrazení konvenční ocelové výztuže v nosných stavebních prvcích je návrh a kontrola kvality UHPFRC. Pro návrh konstrukce je důležité znát finální vlastnosti použitého materiálu. Finální vlastnosti UHPFRC závisí nejen na složení cementové matrice, ale i na vláknech konkrétně na jejich průřezu, délce, tvaru, oceli ze které jsou vyrobeny (modulu pružnosti), disperzi v cementové matrici, hmotnostnímu (objemovému) procentuálnímu zastoupení ve směsi, spolupůsobení s cementovou matricí (směs a úprava povrchu vláken) a v neposlední řadě na jejich orientaci. Pro správný návrh a statické posouzení musí být všechny tyto parametry známé kontrolovatelné.

Americanconcrete institute vydal zprávu pojednávající o vlastnostech FRC [8]. Zpráva se zabývá smrštěním, elektrickými vlastnostmi, teplenou vodivostí, mechanickými a dalšími vlastnostmi. Tato zpráva mimo jiné poskytuje další informační zdroje ohledně FRC.

1.1 Motivace a cíl práce

Výhod UHPRFC oproti konvenčnímu železobetonu je mnoho. Avšak hlavní nevýhodou a zároveň překážkou UHPFRC pro plné nahrazení konvenčního železobetonu je problém s navrhováním konstrukcí. V současné době se vlákna pro návrh UHPFRC uvažují jako rovnoměrně rozptýlená, což ve skutečnosti není přesné. Poloha a orientace vláken je ovlivněna mnoha parametry - tvarem bednění, tekutostí směsi, způsobem plnění a mnoha dalšími. Z toho vyplývá, že zajistit isotropii takového kompozitu je prakticky nemožné. Pokud není známa přesná poloha a orientace vláken, nelze určit výsledné mechanické vlastnosti kompozitu, což je nutností pro správný návrh konstrukcí.

Cílem této práce je zjištění, zdali lze v matici vysokohodnotného cementového kompozitu cíleně orientovat feromagnetická vlákna pomocí magnetického pole. Lze předpokládat, že pomocí magnetického pole je možné cíleně určit polohu i směr feromagnetických (ocelových) vláken. Umístěním vláken do míst a směru tahového napětí, nebo naopak zabránění jejich výskytu v tlačené části prvku, kde snižují tlakovou pevnost cementové matrice, lze neefektivněji využít pozitivních vlastností vláken v kompozitu. Navíc podle některých autorů [9]–[11], lze zmagnetizováním dipólové molekuly záměsové vody ovlivnit tuhnutí betonu, a tím zvýšit jeho tlakovou pevnost.

Magnetická orientace vláken funguje na jednoduchém principu. Pokud umístíme feromagnetikum, neboli v našem případě ocelové vlákno, do magnetického pole, feromagnetikum se zmagnetizuje. Po zmagnetizování, se bude vlákno chovat jako malý magnet a bude mít tendenci se orientovat se směru siločar magnetického pole, kterému bylo vystaveno. V případě, že pole bude působit na vlákno silou větší, než je potřeba pro překonání odporu prostředí, v němž se vlákno nachází (odpor cementové matrice), vlákno se zorientuje podle siločar magnetického pole.

Magnetickou orientací vláken by byla možná rychlá výroba libovolně vyztužených prvků. Z důvodů nepotřeby armování a tedy i vazače, by se snížily kvalifikační požadavky na pracovníky ve výrobě. Tato technologie by mohla značně zlevnit a zefektivnit výrobu nejen prefabrikovaných betonových prvků.

Dále by se dalo využít principu magnetické orientace vláken pro 3D tisk betonových vyztužených konstrukcí. V Číně, i jiných státech, se již 3D tisk betonových konstrukcí a prvků využívá pro stavbu menších objektů [12], avšak vždy se jedná o tisk pouze prostého betonu, který neumožňuje výstavbu vodorovných konstrukcí.

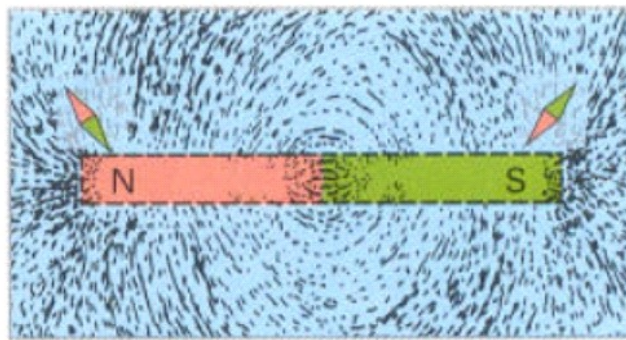
2 Magnetismus

Pro lepší pochopení principů magnetické orientace vláken, a elektrických metod měření, jsou v následujících kapitolách stručně vysvětleny základní pojmy a principy týkající se magnetismu.

2.1 Magnetické pole

Magnetické pole se vytváří kolem permanentních magnetů, vodičů, jimiž protéká elektrický proud a kolem jakéhokoliv pohybujícího se elektrického náboje. Magnetické pole může být stacionární, nebo nestacionární (např. vodič napájený proměnným proudem nebo pohybující se magnet) [13].

Rychlost šíření magnetického pole závisí na permitivitě a permeabilitě prostředí.



Obr. 1 Průběh magnetických indukčních čar u tyčového magnetu [14]

Magnetické pole se zobrazuje pomocí magnetických indukčních čar. Tyto čáry jsou vždy uzavřené, vždy směřují od severu k jihu a vždy jsou orientovány kolmo k povrchu. Např. pokud bychom na skleněnou desku nasypali železné piliny nebo ocelová vlákna, a pod tuto desku umístili permanentní magnet, železné piliny by se zmagnetizovaly (z každé piliny by se vytvořil malý magnet) a zorientovaly podle magnetických indukčních čar, viz (Obr. 1)[14].

Magnetická indukce B je vektorová veličina charakterizující silové účinky magnetického pole.

Má směr tečny magnetické indukční čáry. Jednotkou je Tesla [**T**]. Můžeme ji změřit pomocí Hallovy sondy. Například Země indukuje magnetické pole okolo $40 \mu\text{T}$.

Magnetický indukční tok Φ . Souhrn magnetických indukčních čar na jednotku plochy, kolmou k magnetickým indukčním čárám. Jednotkou je weber [**Wb**].

Intenzita magnetického pole H vyjadřuje míru silových účinků magnetického pole

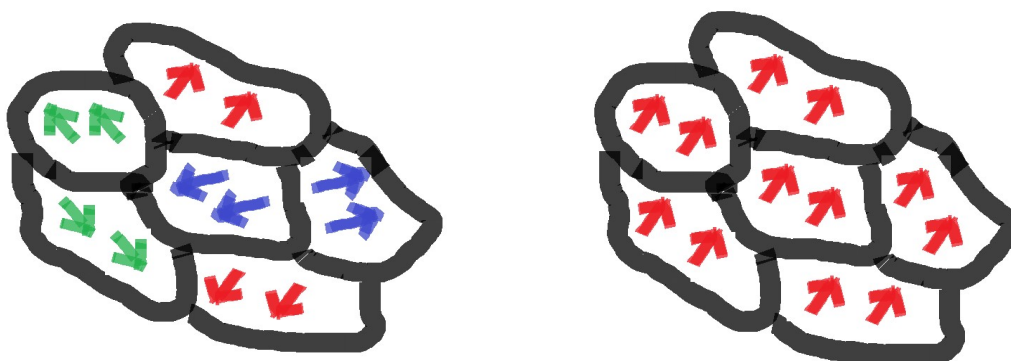
$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H$, kde μ_0 je permeabilita vakua a μ_r poměrná permeabilita látky. Látky s $\mu_r < 1$ magnetické pole zeslabují, látky s $\mu_r > 1$ magnetické pole zesilují.

2.2 Magnetické vlastnosti materiálů

Magnetické vlastnosti látky, respektive její permeabilitu, určují její atomy. Podle teorie kvantové mechaniky každá elementární částice, elektron či kvark, mají kromě svého náboje a hmotnosti i takzvaný vnitřní magnetický moment. Tento moment způsobuje, že se částice chová jako malý magnet, tedy že má severní a jižní pól. Protože elektrony mají magnetické vlastnosti řádově tisíckrát významnější než protony, určují hlavní magnetické vlastnosti atomu. Tomu napomáhá i skutečnost, že se elektrony pohybují ve svých energetických hladinách a tím indukují magnetické pole (jako když vodičem protéká proud) [15]. Podle uspořádání valenčních elektronů v atomu se buď magnetické pole vyruší úplně, pak je atom diamagnetický, nebo se vyruší jen částečně, pak je atom paramagnetický [13]. Látky s diamagnetickými atomy jsou látky **diamagnetické** a mají $\mu_r < 1$.

Avšak to, že je atom paramagnetický neznamena ještě, že látka má dobré magnetické vlastnosti. Pokud se atomy uspořádají v krystalech tak, že jejich magnetické pole se vyruší, pak jsou tyto látky **paramagnetické**, jejich μ_r je o něco málo vyšší než 1 a magnetické pole mírně zesilují. Orientace vnějším magnetickým polem není možná z důvodů tepelného pohybu částic [16].

Feromagnetické látky mají paramagnetické atomy, jejichž uspořádání magnetické pole zesiluje a jejichž μ_r je větší než 1. Ani tyto látky se nemusí chovat jako magnet. Toto chování je příčinou Weissových domén (oblasti, v nichž jsou magnetické dipóly shodně orientovány) a vzájemného vyrušení jejich magnetických polí viz (Obr. 2) vlevo. Orientace těchto domén je způsobena výměnnými silami mezi sousedními atomy [17].



Obr. 2 Weissovy domény před orientací

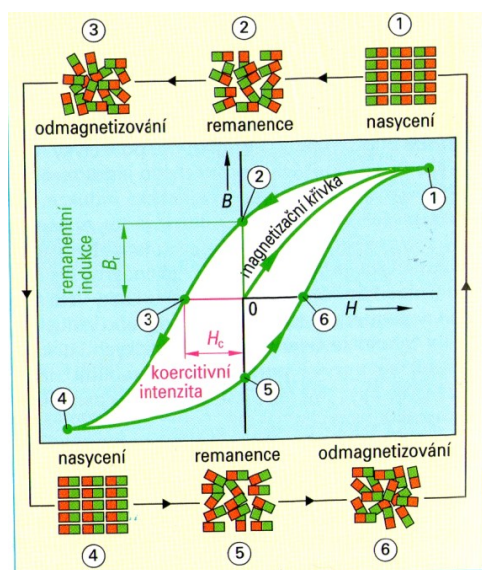
Weissovy domény po orientaci

Pokud feromagnetickou látku vystavíme vnějšmu magnetickému poli, Weissovy domény se zorientují, viz (Obr. 2) vpravo a látka se pak chová jako magnet. Tento proces se nazývá **zmagnetizování**. Některé látky si tuto orientaci, po ukončení působení vnějšho magnetického pole, uchovávají více (magneticky tvrdé látky), a některé méně (magneticky měkké látky).

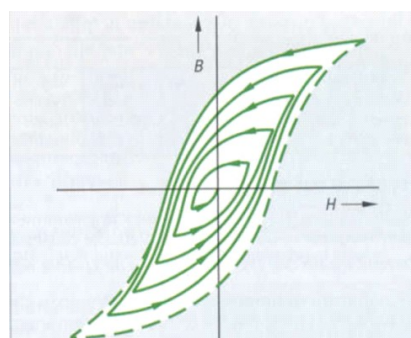
Po vystavení feromagnetických látek Curieově teplotě, pozbývají tyto látky magnetické vlastností, což souvisí s rozpadem krystalických mřížek feromagnetického materiálu.

Hysterezní smyčka znázorňuje závislost magnetické indukce na intenzitě magnetického pole při magnetizaci (popř. odmagnetizování). Z bodu 0 do bodu 1, viz (Obr. 3), probíhá zmagnetizování materiálu. Z bodu 1 do bodu 2 jsme vyňali feromagnetický materiál z magnetického pole, tato látka si uchovala do jisté míry orientaci i po ukončení působení vnějšího magnetického pole. Tato zbytková orientace vytváří takzvanou remanentní magnetickou indukci. Z bodu 2 do bodu 3 jsme materiál vystavili vnějšímu magnetickému poli s obrácenou polaritou, tím jsme materiál zbavili **remanentní indukce**, avšak v materiálu se objeví zbytková magnetická intenzita pole, která se nazývá **koercitivní intenzita**.

Pokud bychom materiál vystavovali i nadále působení vnějšího pole s opačnou intenzitou, pak bychom dospěli až do bodu 4, tedy plnému nasycení, zmagnetizování materiálu, obráceně než tomu bylo v bodě 1.



Obr. 3 Hysterezní křivka [14]



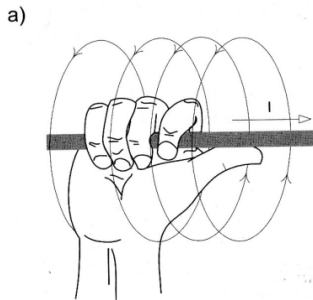
Obr. 4 Průběh odmagnetování [14]

Odmagnetizování, neboli znovu nastolení neuspořádaného stavu. Tohoto procesu lze docílit umístěním předmětu do magnetického pole cívky, jež je napájena střídavým proudem (=demagnetizátor). Postupným snižováním tohoto proudu dojde k demagnetizaci předmětu. Podobně postupným oddalováním předmětu z tohoto pole, docílíme stejných účinků, což je způsobeno větší vzdáleností magnetických indukčních čar, a tím i klesající intenzitou magnetického pole. Průběh odmagnetizování je dobře patrný z hysterezní smyčky při odmagnetizování viz (Obr. 4).

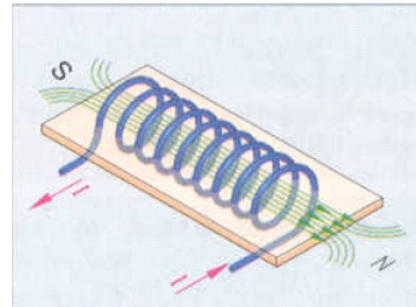
Přitažlivá síla mezi magnety závisí na intenzitě magnetického pole H a magnetickém indukčním toku, tedy tyto dvě veličiny nejvíce ovlivňují magnetickou orientaci vláken.

2.3 Elektromagnetismus

Jak už bylo zmíněno výše, kolem každého vodiče, jímž protéká elektrický proud, se indukuje magnetické pole. Indukční čáry tohoto pole mají tvar soustředných kružnic a jejich směr si jednoduše odvodíme podle pravidla pravé ruky (Obr. 5)[16].

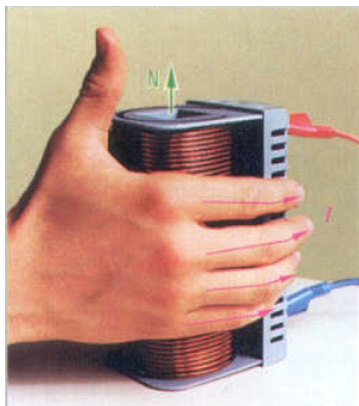


Obr. 5 Pravidlo pravé ruky [16]



Obr. 6 Magnetické pole, siločáry cívky [14]

Účinky magnetických sil, mezi dvěma rovnoběžnými vodiči závisí na směru proudu, který v nich protéká. Pokud ve vodičích protéká proud opačnými směry, magnetické účinky mezi vodiči se zvyšují. Tohoto principu využívá cívka. Výsledné magnetické pole cívky ukazuje (Obr. 6).



Obr. 7 Stanovení severního pólu cívky [14]

Toto pole má za následek, že se cívka chová jako „magnet“, tedy na jednom svém konci má severní pól a na druhém jižní. Orientaci pólu snadno určíme z Ampérova pravidla pravé ruky, které je názorně ukázané na (Obr. 7). Síla, kterou cívka působí na předmět umístěný v jejím magnetickém poli, je přímo úměrná proudu a počtu závitů cívky. Tato síla se označuje jako magnetomotorická síla $F_m = I \cdot N$. Kde I je proud, kterým je cívka napájena a N počet závitů. Jednotkou magnetomotorické síly je ampér [A].

Intenzita magnetického pole H cívky závisí na magnetomotorické síly a na střední délce účinných indukčních čar.

Vlastnosti cívky

Pokud je vodič vystaven nestacionárnímu magnetickému poli, tedy poli, ve kterém se magnetický indukční tok v čase mění, potom se budou ve vodiči tvořit elektrické proudy, které budou mít vírový charakter. Tyto proudy indukují napětí a vytváří magnetické pole, které působí proti změně magnetického indukčního toku (Lenzovo pravidlo) [14].

V případě, že umístíte sekundární cívku do magnetického pole primární cívky a primární cívka bude napájena střídavým proudem, nebo bude napájena stejnosměrným proudem, ale bude střídavě zapínána a vypínána, potom se bude v sekundární cívce indukovat napětí. Faradayův zákon říká, že toto napětí vzrůstá s počtem závitů, s velikostí změny magnetického toku a s kratší dobou změny toku.

Vlastnosti cívky jsou dány, jejím tvarem, počtem závitů, průměrem drátu, materiálem drátu, jádrem cívky, okolím, napětím a proudem, kterým je napájena, v případě střídavého proudu, také jeho frekvencí. Jednou z možností jak měřit vlastnosti cívky, je pomocí činitele jakosti.

Činitel jakosti Q je definován:

$$Q = \frac{\omega L}{R}$$

Příčemž:

ω	úhlová frekvence [$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$]
R	ztrátový odpor cívky pro sériové náhradní zapojení [Ω]
L	indukčnost cívky [H]

Odpor R pro náhradní sériové zapojení vyjadřuje všechny ztráty energie v cívce, způsobené odporem vodiče, z něhož je zhotoveno vinutí, hysterezní ztráty v jádře, ztráty v jádře vířivými proudy, dielektrické ztráty v izolaci vodiče atd.

Nejčastěji se činitel jakosti měří rezonanční metodou. K měření se používá přístroj Q-metr.

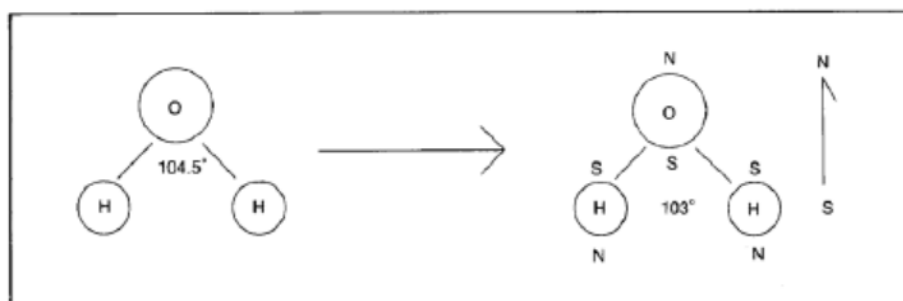
“Q-metr obsahuje oscilátor, ladící kondenzátor s malými ztrátami (obvykle vzduchový) a voltmetr, schopný měřit s požadovanou přesností střídavé napětí v celém frekvenčním rozsahu Q-metru [18].“

3 Magneticky upravená voda

Magneticky upravená voda, neboli zkráceně MUV, je velmi kontroverzní téma. První zařízení pro magnetickou úpravu vody bylo sestrojeno roku 1945 podle belgického patentu T. Vermairena. Princip zařízení je jednoduchý, jedná se pouze o soustavu magnetů, nebo elektromagnetů osazených na vodovodní potrubí. Magnetické pole je buď střídavé, nebo stejnosměrné. Zařízení bylo účelně sestrojeno pro pozdržení vytváření vápenatých usazenin a rozrušení stávající inkrustace [19]. Tato funkce zařízení pro MUV byla potvrzena, avšak záleží na mnoha faktorech, aby zařízení bylo funkční, jako např.: pH a teplota vody, správnost osazení zařízení a v neposlední řadě na samotném zařízení[20]. Podle testu v časopisu „EinSchlaginsWasser“ byly funkční jen tři přístroje ze třinácti [19].

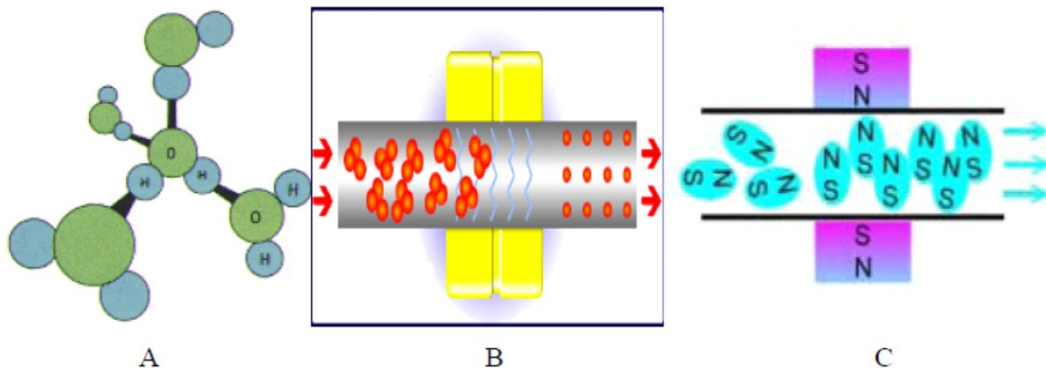
V roce 1962 Wulachoufuski a Alnanina začali s výzkumem použití MUV v souvislosti s betonem[8]. K přípravě MUV většina autorů použila speciální zařízení pro magnetickou úpravu vody [9]–[11], [21], Reddy[22] pro výrobu MUV použil skleněnou nádobu obklopenou magnety. Síla magnetického pole se většinou pohybovala okolo 0,1 T.

Molekula vody je dipólová tedy má svůj severní a jižní pól, po vystavení vody magnetickému poli, budou mít molekuly vody tendenci se zorientovat v daném směru. Dojde k poklesu úhlu mezi atomy vodíku, čímž se mění i tvar celé molekuly [10].



Obr. 8 Pokles úhlu mezi atomy vodík v molekule vody při vystavení magnetickému poli [22]

Magnetickou orientací molekul vody dochází k roztrhání, nebo alespoň k zmenšení počtu shluků molekul vody [9]. MUV má menší povrchové napětí [11], Sadam M. Ahmed[10] tvrdí že MUV se liší i pH, menší viskozitou, elektrickou vodivostí a permeabilitou tlaku od neupravené vody. Hlavní výhodou MUV je, že díky svým vlastnostem je schopna daleko lépe prostoupit mezi zrna cementu, lépe ho obalit, aby cement mohl lépe zhydratovat, což vede především ke zvýšení pevnosti betonu v tlaku, ale i ke změně reologických vlastností čerstvého betonu, lepší zpracovatelnosti a vyšší hodnotě sednutí kužele [9]–[11].



Mechanism of magnetic water: A. water cluster; B. breakage of cluster; C. orientation.

Obr. 9 Obrázek Mechanismus zmagnetizování vody [22]

Magnetickou orientací molekul vody dochází k roztrhání, nebo alespoň k zmenšení počtu shluků molekul vody [9]. MUV má menší povrchové napětí [11], Sadam M. Ahmed[10] tvrdí, že MUV se liší i pH, menší viskozitou, elektrickou vodivostí a permeabilitou tlaku od neupravené vody. Hlavní výhodou MUV je, že díky svým vlastnostem je schopna daleko lépe prostoupit mezi zrna cementu, lépe ho obalit, aby cement mohl lépe zhydratovat, což vede především ke zvýšení pevnosti betonu v tlaku, ale i ke změně reologických vlastností čerstvého betonu, lepší zpracovatelnosti a vyšší hodnotě sednutí kužele [9]–[11].

Su a Wu[21] pořídili mikroskopické snímky hydratace cementu s obyčejnou kohoutkovou vodou a MUV. Na snímcích je dobře patrný rozdíl, hydrataci s obyčejnou vodou ovlivňují shluky molekul vody. Hydratace, pak probíhá ve tvarech shluků, výsledný tvar je pak ve tvaru hexagonálních plátů. Zatímco při použití MUV jako záměsové vody je ze snímku viditelný vznik vícero menších krystalických zrn. Tento rozdíl vysvětluje zvýšení pevnosti v tlaku s použitím MUV.

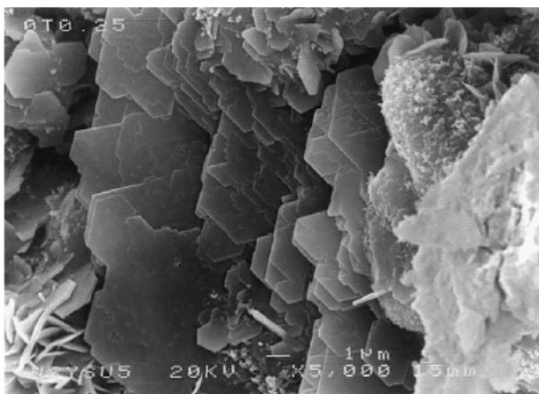


Fig. 8. SEM micrograph of calcium hydroxide crystals in pastes prepared with tap water (5000×).

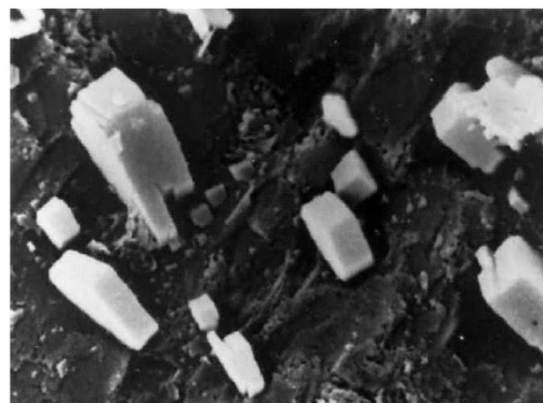


Fig. 9. SEM micrograph of calcium hydroxide crystals in pastes prepared with MFTW (5000×).

Obr. 10 Mikroskopické snímky hydratace cementu [21]

Ve zjištění o kolik se zvýší pevnost v tlaku betonu, se autoři článků dost liší. Su, Wu[21] konstatují zvýšení pevnosti v tlaku o 15 až 20 %, Ahmed [10] o 10 až 20 %,Gholizadeh a Arabshahi[11] až o 23 % a Afshin a kol.[9] tvrdí, že pokud je obsah cementu menší než $400 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ betonu, nemá MUV žádný vliv na pevnost betonu a pokud je vyšší, zvyšuje se i pevnost betonu cca o 18 %. Neoptimističtější jsou Reddy a kol.[22], kteří tvrdí, že použitím destilované MUV jako záměsové vody lze docílit zvýšení tlakové pevnosti betonu až o 55 %.

Problematika MUV je stále předmětem sporů a diskuzí. Je třeba střízlivě a vědecky zhodnotit vlivy a vycházet z jednoznačně prokazatelných a opakovatelných experimentů.

4 Reologické vlastnosti čerstvého betonu

4.1 Základní pojmy

Vznik reologie jako samostatné vědy, se datuje roku 1928. Za její zakladatele jsou považováni prof. E.C.Bingham a prof. M. Reiner. Reologie je věda zkoumající vztahy mezi chemickým složením a mechanickými vlastnostmi látky [23]. Dále se zabývá deformací, tokem hmoty a vztahy mezi deformací, napětí, rychlosti deformace a času [24]. Základní dělení kapalin dle jejich reologických vlastností je na kapaliny newtonovské a kapaliny nenewtonovské.

Newtonovské kapaliny jsou typické tím, že jejich deformace neboli smykové přetvoření je přímo úměrná velikosti napětí, tedy smykovému napětí. Toto lze vyjádřit newtonovým zákonem viskozity:

$$\tau = \eta \frac{du}{dx}$$

Příčemž:

τ	smykové napětí [Pa]
η	dynamická viskozita [Pa·s]
$\frac{du}{dx}$	gradient rychlosti [s^{-1}]

Newtonovské kapaliny mají lépe předvídatelné změny viskozity v závislosti na teplotě a tlaku. S klesající teplotou jejich viskozita roste [3]. Mezi newtonovské kapaliny se řadí například voda nebo med.

Nenewtonovské kapaliny jejich deformace není přímo úměrná napětí. Mění své chování při působení vnějších sil. Toto chování způsobuje uspořádání částic v kapalině, které se mění s měnící se silou

působící na kapalinu, čímž se mění i viskozita kapaliny. Dle této změny se kapaliny dělí na zobecněné newtonovské kapaliny, viskoelastické kapaliny a kapaliny s časovou závislostí.

Zobecněné newtonovské kapaliny se pak dále dělí na Binghamovské, pseudoplastické a dilatantní [25]. Čerstvý beton je vícefázový materiál, jedná se tedy o disperzi pevných částic ve viskózní kapalině, kterou představuje cementová pasta. Většina autorů [23], [24], [26],[27] se shoduje, že čerstvý beton se řadí mezi Binghamovské kapaliny.

Binghamovské kapaliny

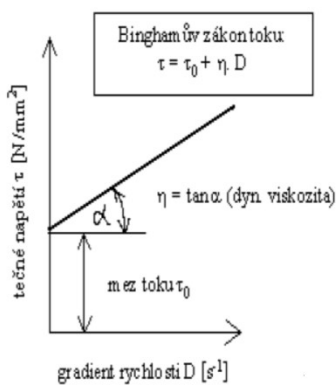
Binghamův materiálový model je definován následovně[28]:

$$\tau = \tau_0 + \eta \dot{\gamma}$$

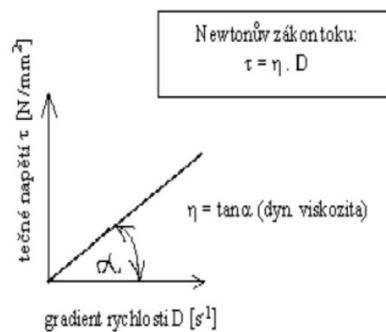
Přičemž:

τ	smykové napětí [Pa]
τ_0	mez kluzu [Pa]
η	plastická viskozita [Pa·s]
$\dot{\gamma}$	smyková rychlost deformace [s^{-1}]

Jeich viskozita s působící silou klesá. Vyznačují se zmenšením viskozity při působení vnější síly a mezí kluzu, respektive mezí toku. Tyto kapaliny jsou schopné téct až po překročení této meze.



Obr. 11 Křivka tekutostibinghamovské kapaliny[23]



Obr. 12 Křivka tekutosti newtonovské kapaliny [23]

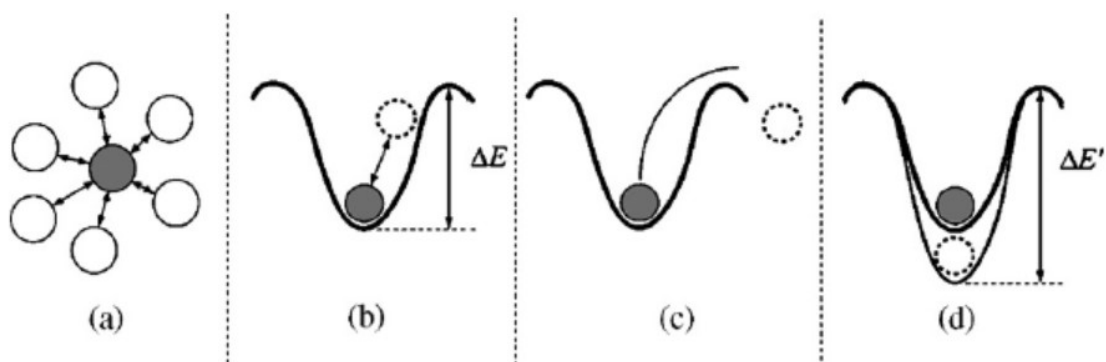
Mez toku

„Příčinou meze toku je rozdílné chemické složení zrn cementu a jemných podílů, které za přítomnosti vody vede k tvorbě opačných nábojů na povrchu zrn a vzniku prvních hydratačních produktů, a to způsobuje shlukování (aglomeraci) zrn. Tyto relativně stabilní aglomeráty vytváří prostorovou síť, v níž bývá uzavřeno větší množství vody. Ta pak neslouží k přesunu jednotlivých zrn v suspenzi. Vnesením zhušňovací energie však dochází k překonání vzájemných sil mezi zrny a tím se uvolní uzavřená voda a dojde k rozrušení aglomerátů“ [23].

Smykové napětí τ čerstvého betonu se pohybuje od 50 do 200 Pa [26]. Pokud je flokulace a deflokulace plně vratná, alespoň v krátkém časovém úseku, nazývá se tato vlastnost tixotropie [24].

Tixotropie

Jediným zdrojem tixotropního chování v betonu je cementová pasta [3]. Nejlépe uchopitelné vysvětlení tixotropie jako fyzikálního jevu poskytuje Roussel [27], který tento jev zjednodušeně popisuje pomocí energeticky potenciální jámy. Každá částice se nachází v energeticky potenciální jámě, v níž se částice nachází v rovnovážné poloze (a). Pokud je do systému dodávána energie menší než energie potřebná pro opuštění jámy ΔE , částice v jámě zůstává a po ukončení dodávky této energie se vrací na svou původní polohu (b). Pokud je dodaná energie větší, než ΔE částice opouští tuto energetickou jámu a dochází k toku směsi (c). Díky Brownovu pohybu a vývoji interakcí mezi koloidními částicemi, se tato jáma s časem prohlubuje. Tedy energie potřebná pro opuštění částice z jámy se zvětšuje $\Delta E'$ (d). Avšak po překročení této energie $\Delta E'$ se částice vrací do počáteční jámy s hloubkou ΔE [3], [27].



Obr. 14 Vysvětlení tixotropie pomocí energeticky potenciální jámy [27]

Viskozita

Viskozita (také vazkost) je fyzikální veličina, udávající poměr mezi tečným napětím a změnou rychlosti v závislosti na vzdálenosti mezi sousedními vrstvami připroudění skutečné kapaliny. Viskozita je veličin

a charakterizující vnitřní tření a závisí především na přitažlivých silách mezi částicemi. Kapaliny s větší přitažlivou silou mají větší viskozitu, větší viskozita znamená větší brzdění pohybu kapaliny nebo těles v kapalině. Pro ideální kapalinu má viskozita nulovou hodnotu (taková kapalina se zařazuje jako další skupenství- tzv. supertekutina). Kapaliny s nenulovou viskozitou se označují jako viskózní (vazké)[29].

Viskozita je pro čerstvý beton důležitá. Pokud je viskozita příliš nízká, dochází k sedimentaci kameniva a tento efekt je nežádoucí. Čím je viskozita nižší, tím rychleji beton může téct [23]. Viskozita čerstvého betonu se pohybuje od 70 do 500 Pa·s[26].

4.2 Na čem závisí reologické vlastnosti čerstvého betonu

Reologické vlastnosti čerstvého betonu závisí na tvaru, velikosti, distribuci, koncentraci a specifickém povrchu zrn. Velikost, geometrie a rozmístění agregátů ve směsi hraje také důležitou roli [24],[30]. Lapasin[30] tvrdí, že reologické chování cementových past plně závisí na částicích menší než 100 μm . Na druhou stranu Banfill [31] ve své práci tvrdí, že smykové napětí a viskozita se zvětšuje s velikostí zrna a obsahem kameniva. Reologie čerstvého betonu závisí na složení směsi, tedy na cementu, vodě, objemu jemné a hrubé frakce, vodním součiniteli, přísadách a příměsí.

Cement

Viskozita a mez toku přímo úměrně vzrůstá se vzrůstající specifickým povrchem zrn cementu, tedy reologie betonu závisí také na jemnosti mletí cementu [30]. Cementové pasty s nízkým poměrem C_3S/C_2S a C_3A/C_4AF mají vyšší viskozitu.

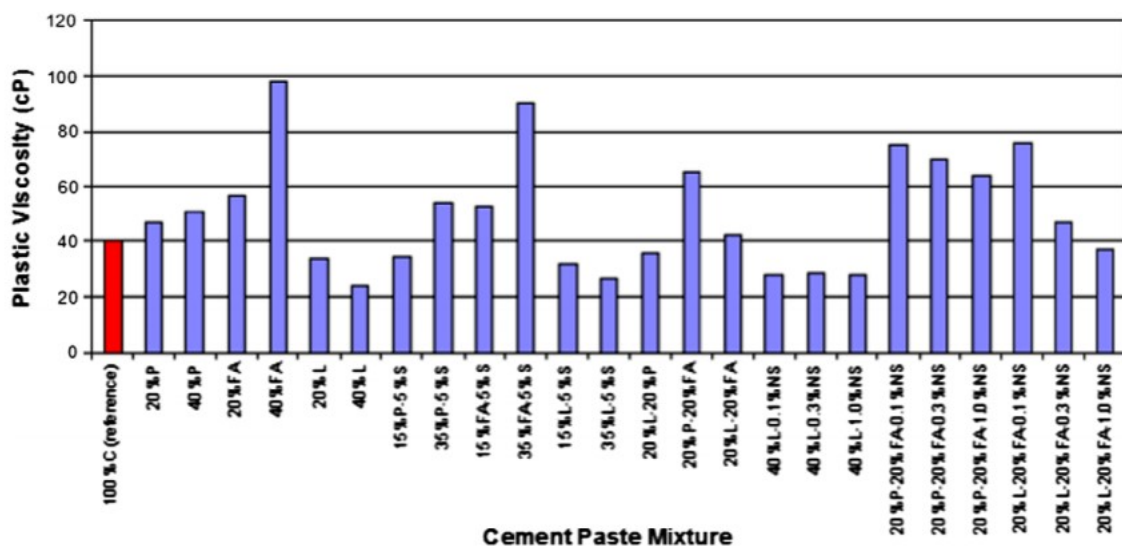
Voda

Je zřejmé, že i složení vody bude mít zásadní vliv na reologické vlastnosti betonu, například viz výše zmagnetizovaná voda. S klesajícím vodním součinitelem vzrůstá viskozita a mez toku [26].

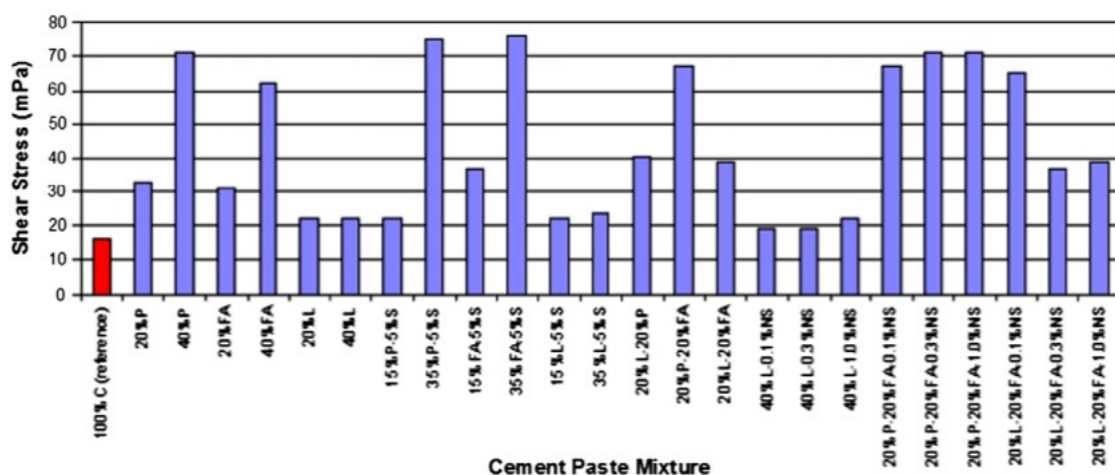
Příměsí a přísady

Použitý typ přísady či příměsí zásadně ovlivňuje reologické vlastnosti čerstvého betonu. U přísad je to především chemické složení a u příměsí, které nehydratují, hraje zejména roli velikost zrna.

N. Diamantonis a spol. [32] zjišťovali vliv náhrady cementu CEM I pevnostní třídy 42,5 jednou nebo dvěma příměsími na reologické vlastnosti. Obsah příměsí byly maximálně do 40 % hmotnosti cementu. Byly zjišťovány změny viskozity a smykové napětí. Konkrétně se jednalo o příměsí mikrosiliky, vápence, přírodního pucoánu, popílku a nanosiliky. Přidáním 40 % vápence můžeme dosáhnout nižší viskozity. Při kombinaci 20 % vápence a 20 % popílku bylo dosaženo nejlepší hutnosti, tzn. nejmenšího objemu pórů [32].

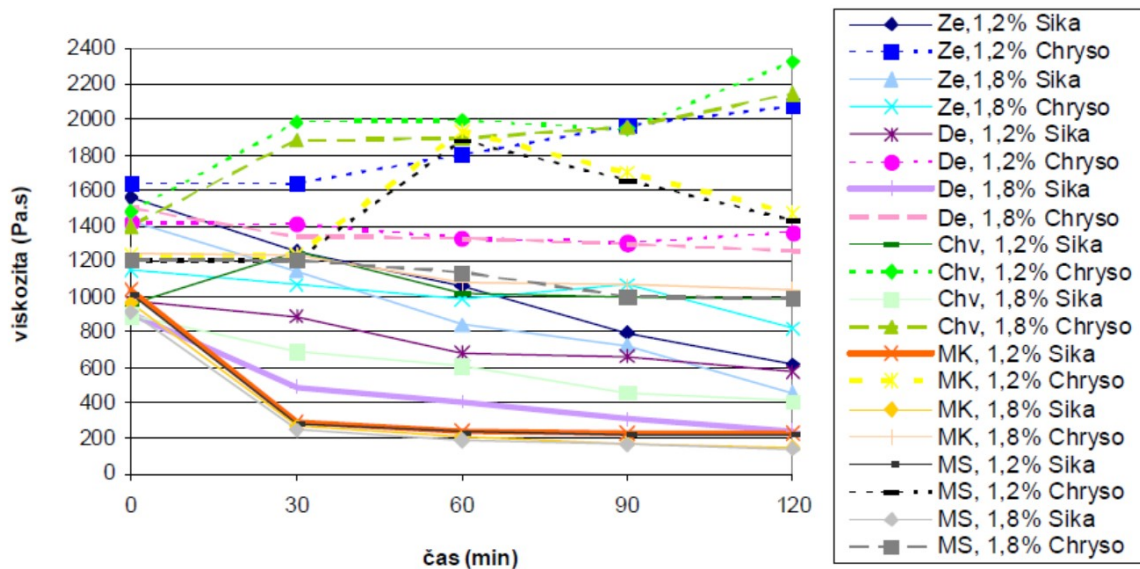


Obr. 15 Grafický výsledek vlivu příměsí na viskozitu směsi [32]



Obr. 16 Grafický výsledek vlivu příměsí na smykové napětí [32]

Vliv přísad a příměsí na reologické vlastnosti čerstvého betonu potvrdil také Hela[23], který použil stejný typ cementu jako N. Diamantonis a spol.[32], ale příměsí byly pouze v dávkách do 15 % a 30 % z hmotnosti cementu. Hela [23] ve svém experimentu zvolil tyto typy příměsí: kamenný filer (Ze), elektrárenský černouhelný popílek (De), elektrárenský hnědouhelný popílek (Chv), metakaolín (MK) a mikrosilika (MS). Dále použil 2 typy superplastifikátorů (přísad) na bázi polykarboxylátů (výrobce SIKA a CHRYSO) v dávkách 1,2 % a 1,8 %. Vyhodnocení výsledků vlivu příměsí a přísad na viskozitu v závislosti na čase ukazuje (Obr. 15).



Obr. 17 Porovnání průběhů viskozity v čase při dávce příměsi 30 % z hmotnosti cementu [23]

Fakt, že reologické vlastnosti jsou závislé na složení směsi, byl tedy autory mnoha článků potvrzen. Autoři Hu a Larrard[26] dokonce přišli s rovnicí, která na základě přesného složení, včetně objemů jednotlivých složek, je schopna předpovídat plastickou viskozitu s chybou do 20 %.

Reologické vlastnosti závisí také na okolních podmínkách, teplotě, tlaku. Například pokud na směs začneme působit silou, tedy například vibrací můžeme snížit smykové napětí až o 50 %. Avšak plastická viskozita zůstává i během vibrace stejná nebo jen s minimální změnou [26].

4.3 Měření reologických vlastností

K měření reologických vlastností lze použít mnoho metod a přístrojů. Avšak ne všechny metody a přístroje, respektive hodnoty, které nám poskytnou, jsou srovnatelné. V podstatě to znamená, že hodnoty, které naměříme na jednom přístroji, nemusíme naměřit na jiném. Například některé rheometry zobrazují vyšší smykové napětí než jiné [31].

Nejpoužívanější zkouškou reologických vlastností, používanou jak v laboratořích, tak na staveništi, je zkouška sednutí kužele, dle ČSN EN 12350-2. Pro tekutější směsi, tedy pro samozhutnitelné betony je tato zkouška irelevantní a používá se zkouška rozlitím dle ČSN EN 12350-5. Podle těchto zkoušek lze stanovit konzistenci betonu. Hu a Larrard[26] vyzorovali, že viskozita betonů se stejným sednutím kužele, se liší od jedné do čtyř v relativních hodnotách. Nicméně zkouška sednutí kužele se pro určení viskozity nepoužívá.

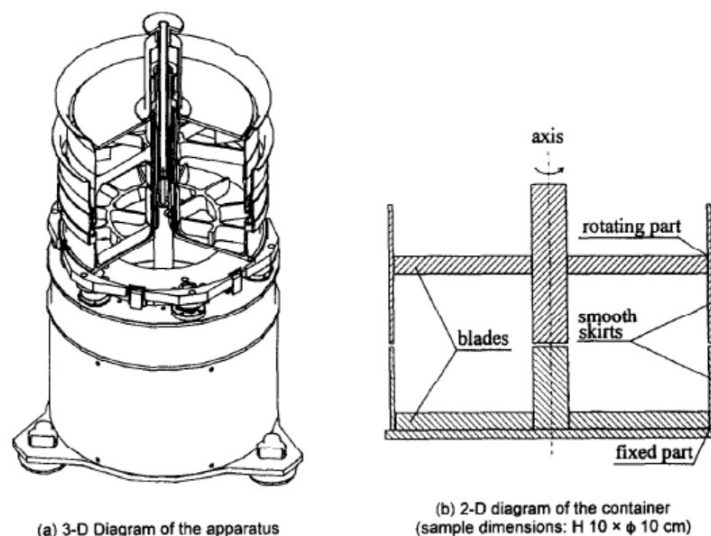
Pro měření viskozity se na trhu vyskytuje spousta přístrojů založených na různých principech. Například kapilární viskozimetr, tělískový viskozimetr, vibrační viskozimetr a nejpoužívanější rotační viskozimetr.

Rotační viskozimetr měří torzní síly. Těleso ve tvaru válce, nebo disku je ponořené do kapaliny a přes kalibrovanou pružinu připevněné k rotoru přístroje. Síly v pružině, neboli její deformace je pak přímo úměrná třecím silám působícím na těleso v kapalině.



Obr. 18 Rotační viskozimetr (BrookfieldDV-II+Pro)

Reologické vlastnosti čerstvého betonu jsou určeny dvěma, respektive čtyřmi veličinami, viskozitou a smykovým napětím, respektive viskozitou a smykovým napětím během vibrace. Pokud tedy chceme stanovit všechny tyto parametry co nejpřesněji, je žádoucí použít rheometr. BTRHEOM rheometr je založen na principu měření torzní síly a rychlosti otáčení. Horizontální prstenec betonu se otáčí kolem vertikální osy mezi dvěma prstenci betonu, které jsou fixovány.



Obr. 19 BTRHEOM rheometr [26]

5 Orientace ocelových vláken v cementových kompozitech

K orientaci vláken v cementových kompozitech dochází cíleně i necíleně. Cílené orientace lze dosáhnout mechanicky a magneticky.

Orientace vláken v kompozitu výrazně ovlivňuje výsledné vlastnosti materiálu. Pokud jsou vlákna orientována ve směru hlavních napětí, jejich účinnost v kompozitu je maximální. Při vychýlení do 30° od tohoto směru, účinnost mírně klesá. Při vychýlení o úhel větší než 30° od směru hlavních napětí, účinnost vláken výrazně klesá [3].

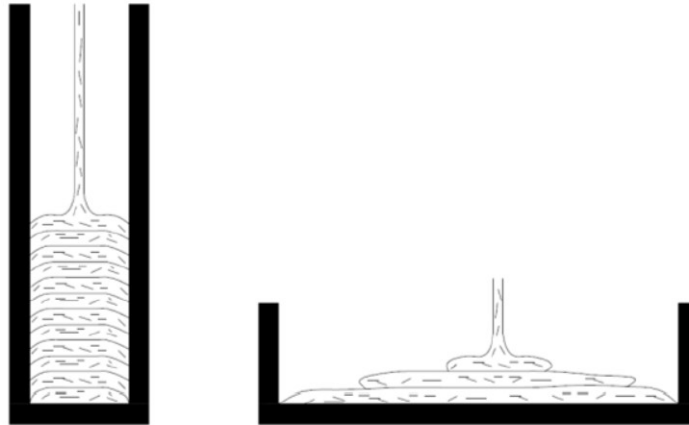
5.1 Vliv reologických vlastností na orientaci vláken v cementových kompozitech

Významnou roli při orientaci vláken a to ať mechanické či magnetické, hrají reologické vlastnosti cementové matrice, viskozita a mez kluzu kapaliny. Sepeher [33] se domnívá, že viskozita matrice nemá žádný vliv na výslednou orientaci vláken, ale výrazně ovlivňuje distribuci vláken. Toto potvrzuje i Boulekbache a kol. [7], jenž ve své práci zdůrazňuje vliv meze kluzu cementové matrice na výslednou orientaci vláken v kompozitu. U cementových matric s nižší mezí kluzu lze snadněji dosáhnout dobré orientace vláken.

5.2 Mechanická orientace ocelových vláken v cementových kompozitech

Orientace je ovlivněna mnoha parametry. Mezi ně se řadí geometrie vláken a jejich vzájemná interakce mezi sebou i okolím, tekutost betonu, zpracovatelnost betonu, (reologické vlastnosti, viz výše), tvar formy, do které je kompozit ukládán a způsobu ukládání [7].

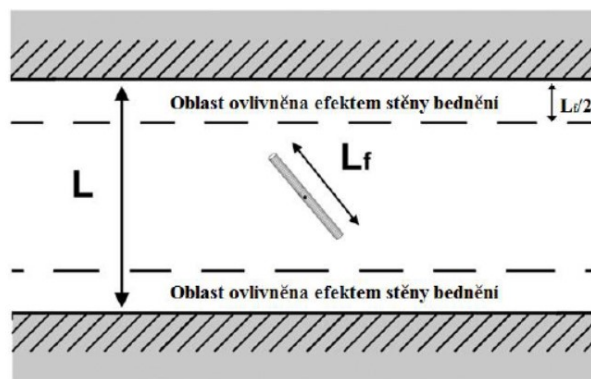
Vlákna mají tendenci se orientovat kolmo na směr lití. Tohoto principy využil Tvarog[3] ve své práci, kde použil stejnou velikost formy, ale různé způsoby plnění viz (Obr. 20). Preferovanou orientaci poté nepřímou ověřil pomocí zkoušky ohybem.



Obr. 20 Preferovaná orientace vláken pro cementové kompozity [3]

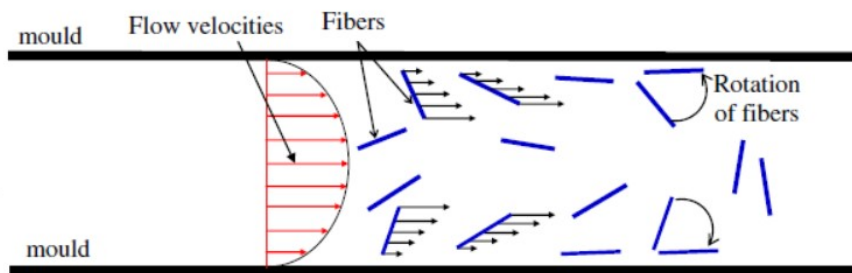
5.2.1 Efekt stěn bednění

Geometrie vláken výrazně ovlivňuje orientaci. Ve vzdálenosti menší než polovina délky vlákna, je nemožné aby se vlákno nacházelo kolmo ke stěně bednění [34].



Obr. 21 Efekt stěn bednění [3]

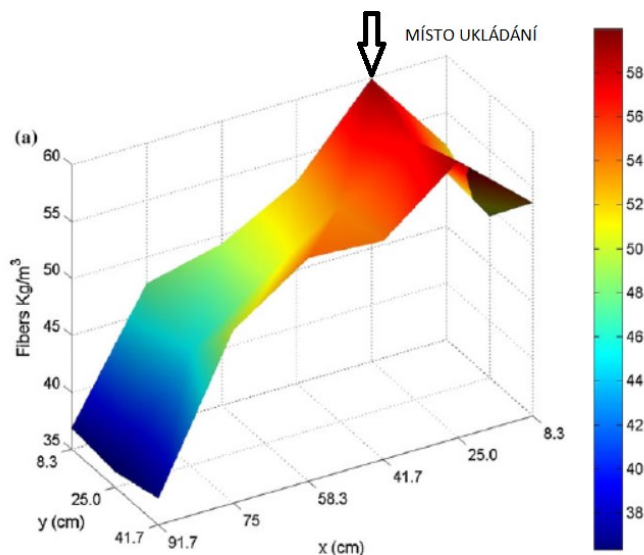
Vlákna se orientují vždy ve směru proudění. Tato orientace je zapříčiněna rychlostním proudovým profilem (Obr. 22), ten jasně ukazuje, že rychlost proudění u stěn formy je výrazně menší než rychlost proudění ve středu proudu. Snížení rychlosti u stěn formy způsobuje tření mezi tekoucí směsí a stěnou formy. Proto výsledná orientace závisí také na povrchu, ze kterého je forma vyrobena. Při ukládání do forem s hladším povrchem dochází k lepší orientaci vláken[35]. Rozdílná rychlost způsobuje rozdílné působení sil na vlákna a z momentové podmínky rovnováhy pak vyplývá, že vlákna se orientují ve směru proudění.



Obr. 22 Rychlostní proudový profil [7]

Doba potřebná pro orientaci většiny vláken je kratší než doba potřebná pro uložení směsi u většiny prvků. Proto lze orientaci vláken předvídat z proudových linií, podle kterých se orientují [34].

Ukládání směsi ovlivňuje také distribuci vláken. Ferrara a kol. naměřili pomocí nedestruktivní magnetické metody největší koncentraci vláken v místě ukládání [36].

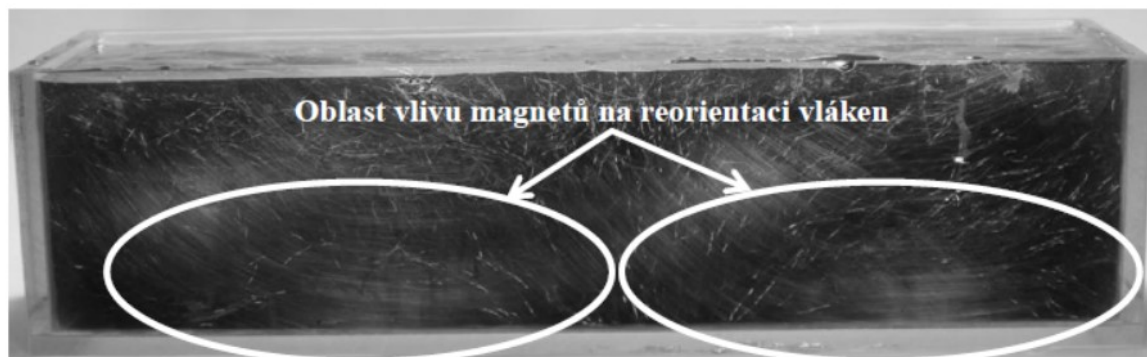


Obr. 23 Prostorový graf znázorňující lokální koncentraci vláken v prvku [36]

5.3 Magnetická orientace vláken v cementových kompozitech

Magnetickou orientací vláken v cementových kompozitech se bohužel mnoho autorů nezabývá. Princip magnetické orientace je jednoduchý. Pokud kompozit s ocelovými vlákny, tedy s vlákny z feromagnetického materiálu, vystavíme působení elektromagnetického pole, vlákna se zmagnetizují a zorientují ve směru siločár elektromagnetického pole. Toto nastane jen v případě, že pole je dostatečně silné, aby vlákna překonala odpor cementové matrice.

Tohoto jevu si také povšimnul Tvarog[3] při pokusech se sonogelem a ocelovými vlákny. Směs sonogelu a ocelových vláken byla uložena do formy a vibrována na vibračním stole, při zapnutí pomocných elektromagnetů se vlákna zorientovala podle siločar elektromagnetického pole.



Obr. 24 Magnetická orientace ocelových vláken v sonogelové matici [3]

Jedním z mála nalezených dokumentů, řešící tuto problematiku, je americký patent, zabývající se metodami vyztužení betonu vlákny, z roku 1977. Patent[37] popisuje metodu rovnání, distribuci a ovlivnění koncentrace ocelových vláken v betonu pomocí elektromagnetů. Vlákna byla vmíchána do směsi před uložením do formy, nebo byla rozmístěna na povrchu a pomocí elektromagnetů vtažena dovnitř již uložené směsi (Obr. 25). Uložené vzorky s tloušťkou do 40mm pak byly protaženy šestkrát tam a zpět cívkou o 1000 závitů, čímž došlo k preferované orientaci vláken. Různou koncentraci vláken v prvku lze dosáhnout regulací rychlosti procházení cívkou. Na krajích prvku, kde je prvek nejvíce namáhán, může být zajištěna větší koncentrace vláken a tím lépe a efektivněji využít způsob vyztužení ocelovými vlákny. Pokud je cívka napájena střídavým proudem, dochází zároveň k magnetickému vibrování směsi, což může být více než žádoucí.

Jiný americký patent US 2006/0244168 A1[38] popisuje zařízení pro cílenou orientaci feromagnetických vláken v materiálech na bázi past. Zařízení ve tvaru křídla se sestává ze stacionární části a části pohyblivé. Pohyblivá část je tvořena soustavou magnetů, tak aby tvar magnetického pole co nejlépe a nejúčinněji plnil účel zařízení. V přední části zařízení dochází k přitahování vláken. Vlákna jsou pak zorientována. Zadní část přístroje je konstruována tak aby po průchodu, místem působení, byla vlákna ponechána v zorientované poloze (Obr. 26).

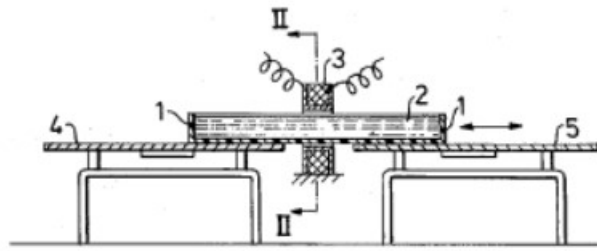


FIG. 1

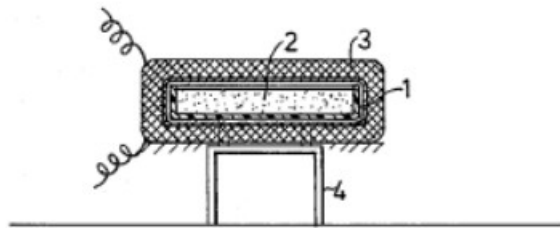


FIG. 2

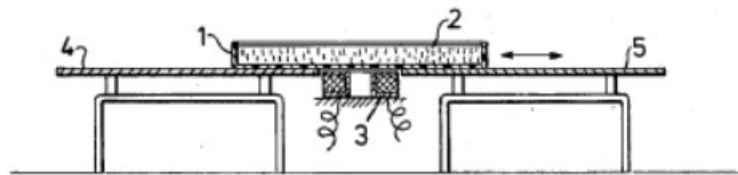


FIG. 3

Obr. 25 U.S. Patent 4,062,913, 1-forma z neferomagnetického materiálu, 2-cementová matrice s ocelovými vlákny, 3-elektromagnet, cívka, 4,5 – mechanické vibrátory[37]

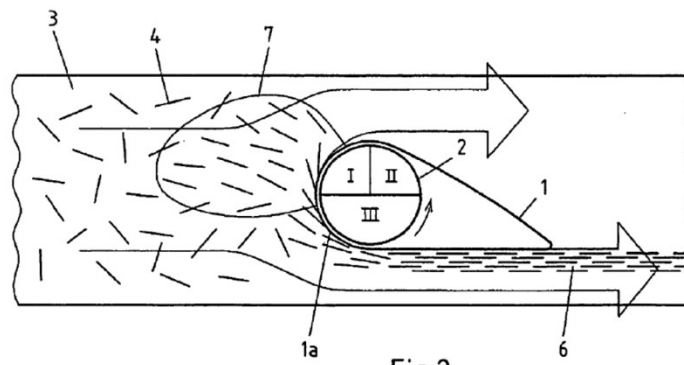
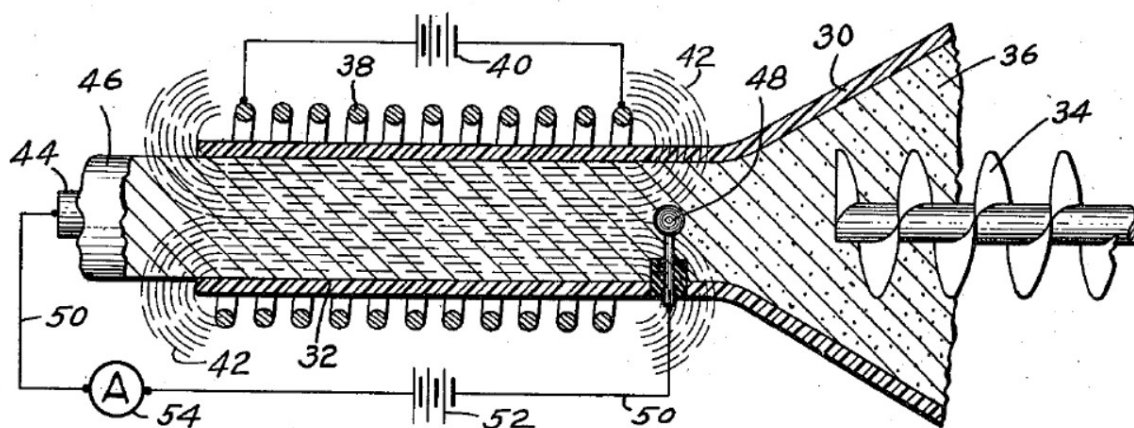


Fig.2

Obr. 26 Přístroj pro orientaci vláken dle patentu US 2006/0244168 A1[38]

Za zmínku stojí i patent [39]. Tento patent se sice nezabývá magnetickou orientací vláken v cementových kompozitech, ale v plastech, avšak princip je stejný. Zařízení pro kontinuální plnění se sestává ze samotného pláště, cívk, dvou elektrod a plnicího šneku. Tekutá směs plastu a feromagnetických vláken je transportována cívkou, čímž dochází k cílené orientaci vláken. Pomocí elektrod, repetitivě průchodu elektrického proudu, mohou být zorientovaná vlákna mezi sebou navzájem svařena.



Obr. 27 Zařízení pro orientaci a vzájemné propojení vláken [39]

6 Měření orientace a množství vláken v cementových kompozitech

Množství a orientace vláken v cementových kompozitech hraje důležitou roli ve výsledných vlastnostech materiálu. Proto je nutno tuto vlastnost kontrolovat jak při výrobě tak i u vyhotovených prvků. Metody měření lze rozdělit na přímé a nepřímé.

6.1 Přímé metody měření množství a orientace vláken

Tyto metody jsou většinou destrukčního charakteru a jejich hlavní nevýhodou je časová náročnost a vysoká cena. Přímé metody jsou EN 14721:2005+A1:2007, Image analysis, rentgenová detekce a CT-scan.

6.1.1 EN 14721:2005+A1:2007

Evropská norma EN 14721:2005+A1:2007, nebo její český překlad ČSN EN 14721+A1 [40] stanovuje metodu měření obsahu vláken pro čerstvý a zatvrdlý beton. Bohužel žádná norma pro měření orientace vláken v cementových kompozitech neexistuje. Obsah vláken dle norem se určí z hmotnosti vláken a objemu vzorku. Metoda A se zabývá zatvrdlým betonem. Vzorek (jádrový vrt) je rozdrcen a vlákna jsou poté odseparována pomocí magnetu a zvážena. Metoda B pro čerstvý beton využívá techniky vymývání, vlákna se pak musí očistit, vysušit a zvážít.

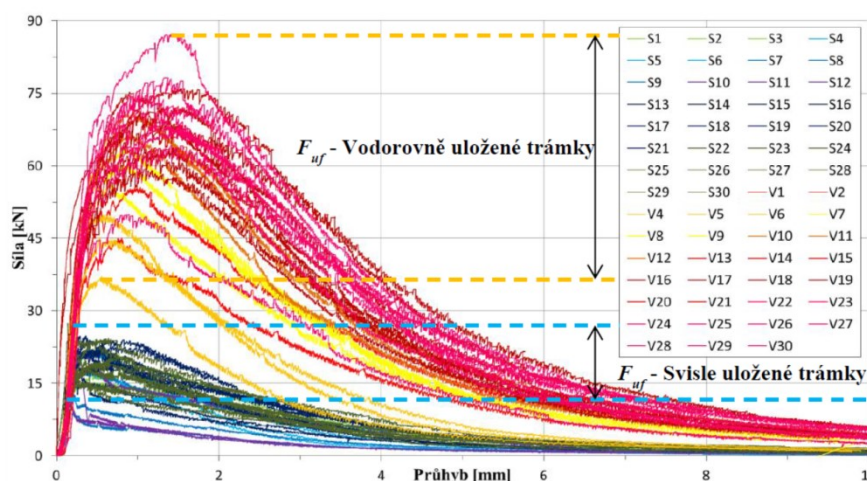
6.1.2 Image analysis

Vzorky většinou standardizovaných velikostí trámčů o rozměrech 400 mm × 150 mm × 150 mm jsou rozřezány alespoň ve dvou, nebo třech směrech. Plochy řezů jsou vyhlazeny brusným papírem pro zvýšení kontrastu vláken a cementové matrice. Připravené plochy řezů jsou pak digitálně nasnímány a pomocí počítačové analýzy je stanoven obsah vláken a podle ploch řezů vláken je dopočítána jejich orientace [41].

6.2 Nepřímé metody zjišťování orientace ocelových vláken v cementových kompozitech

Nepřímé metody jsou destruktivní a nedestruktivní.

Nepřímé destruktivní metody jsou založeny na testování vzorků zkouškou ohybem. Využití vláken roste od 30 % pro náhodně orientovaná vlákna až na 100 % pro vlákna orientovaná ve směru hlavního napětí[3]. Při zkoušce ohybem se projevuje orientace vláken až od první trhliny, do té doby orientace vláken nehraje významnou roli. Po vzniku první trhliny prvky s vlákny orientovanými ve směru hlavního napětí vykazují reziduální tahovou pevnost. Vlákna jsou tedy schopna i nadále přenášet zatížení i po výskytu trhliny. Tvarog[3] ve své práci naměřil maximální zatížení F_{uf} pro trámce z UHPFRC s vlákny orientovanými ve směru hlavních napětí (kolmo na zatížení) od 37 kN do 87 kN a pro trámce z UHPFRC s vlákny orientovanými kolmo na směr hlavních napětí (ve směru zatížení) od 10 kN do 27 kN. Rozdíl v mezi únosnosti je tedy více než patrný. Lze tedy určit preferovanou orientaci vláken prvku pro daný kompozit na základě naměřených hodnot ze zkoušky ohybem (Obr. 28).



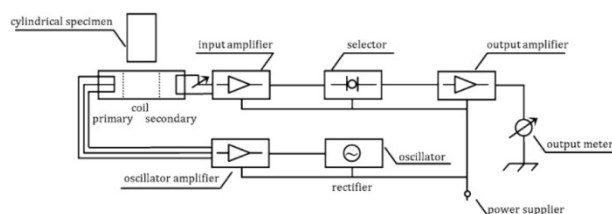
Obr. 28 Naměřené hodnoty průběhu síly v závislosti na průhybu směsi UHPFRC pro svisle (modro-zelené) a vodorovně (červeno-žluté) ukládané trámky velikosti 100mm x 100mm x 400 mm [3]

Orientace vláken byla zajištěna mechanickou cestou, různým způsobem lití betonu, svisle a vodorovně, do stejných forem trámů. Vláknina se vždy orientovala kolmo na směr lití [3].

Nepřímé nedestruktivní metody jsou více sofistikované. Jsou nejčastěji založené na principu rozdílných magnetických vlastností vláken a betonu. Permeabilita betonu bez feromagnetického plniva je stejná jako permeabilita vakua, a proto magnetické vlastnosti vzorku budou ovlivněny především obsahem a orientací vláken. Pokud jsou vlákna orientována ve směru magnetického pole efektivní permeabilita je maximální, na druhou stranu pokud jsou orientována kolmo k siločárám elektromagnetického pole, efektivní permeabilita je minimální [42].

Mezi nepřímé nedestruktivní metody se řadí měření impedance AC-IS, měření elektrického odporu a měření magnetické indukce.

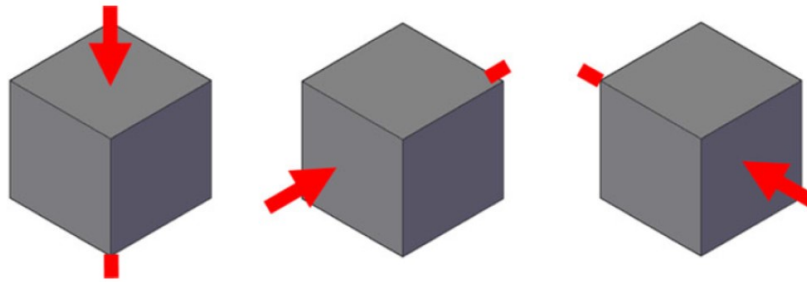
Španělská norma UNE 83512-1:2005, kterou již dnes nahradila norma evropská EN 14721:2005+A1:2007, velmi krátce popisovala princip indukční metody pro válcové vzorky. Ten byl založen na principu transformátoru. Primární cívka napájená proudem indukovala elektromagnetické pole a magnetický tok. Pokud byl tento tok proměnný, indukoval v sekundární cívkou proud. Vztah mezi magnetickým tokem primární cívky a proudem vyvolaným sekundární cívkou vyjadřuje vzájemný indukční koeficient. Koeficient závisí na tvaru a vzdálenosti cívek, stejně jako na permeabilitě materiálu v blízkosti pole, který magnetický tok oslabuje nebo zesiluje [42].



Obr. 29 Indukční metoda dle UNE 83512-1:2005 [33]

6.2.1 Indukční metoda

Autoři článků [42], [43] ve svých pracích inovují postupy indukční metody. Orientaci a obsah vláken měří na standardizovaných vzorcích tvaru krychle o rozměrech 150mm × 150 mm × 150 mm. Vzorky jsou vkládány do hranatého přípravku, na kterém je navinutá cívka. Pomocí analyzátoru impedance (HP4192A nebo Agilent U1732) měří vlastní indukci cívky na frekvenci 100 Hz. Měření se provádí ve všech třech směrech.



Obr. 30 Směry měření vzorků [42]

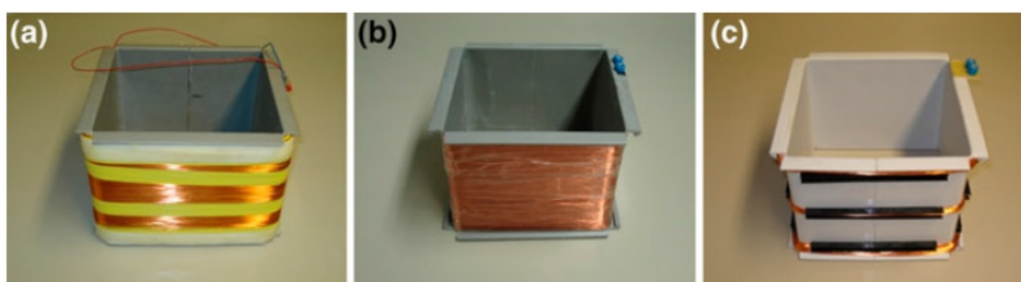
Cívka mění svou indukčnost na základě vložení jádra, neboli vzorku a permeability vzorku. Permeabilita je ovlivněna přítomností vláken a jejich orientací, dtto.

Torrents a kol.[42] prováděli měření se třemi různými cívkami, *Uniformcontinuouscoil*, *Non-uniformcontinuouscoil* a *Discontinuouscoil*.

Uniform continuous coil, neboli běžně navinutá cívka. Nevýhodou této cívky je, že indukuje nerovnoměrné elektromagnetické pole, což způsobuje, že vlákna stejného obsahu a orientace ovlivňují vlastní indukci cívky jinak, jsou-li ve středu a jinak jsou-li na kraji vzorku.

Non-uniformcontinuouscoil tloušťka navinutí na krajích byla vyšší než ve středu cívky, což řeší problém s nerovnoměrností pole. Elektromagnetické pole této cívky je rovnoměrnější, a proto příspěvek vlákna k vlastní indukčnosti cívky nezávisí na poloze vlákna.

Discontinuous coil nerovnoměrně navinutá cívka umožňuje konstantní magnetické pole uvnitř podle osy symetrie.



Obr. 31 (a) *Uniformcontinuouscoil*, (b) *Non-uniformcontinuouscoil*, (c) *Discontinuouscoil* [42]

Characteristics	Uniform continuous coil	Non-uniform continuous coil	Discontinuous coil
Geometry	15 × 17 × 17 cm	15 × 17 × 17 cm	15 × 17 × 17 cm
Turn shape	Square (289 cm ²)	Square (289 cm ²)	Square (289 cm ²)
Number of turns	8,800	2,200	2,354
Wire length	5,632 m	1,408 m	1,600 m
Diameter cable	0.3 mm	0.2 mm	0.2 mm
Turns	Positive	Positive	Positive
Magnetic field	Non-uniform	Non-uniform	Uniform
Theoretical inductance (L)	12 H	0.56 H	1.2 H
Module (Z)	8,106 Ω	760 Ω	1,189 Ω
Phase (Z)	79.1 DG	27.6 DG	39.9 DG
Resistance (R)	1,540 Ω	673 Ω	920 Ω
Resonant frequency (f_{res})	2 kHz	5 kHz	20 kHz
Equivalent stray capacitance (C)	0.50 nF	2.00 nF	0.05 nF
Weight	4.70 kg	0.95 kg	1.15 kg

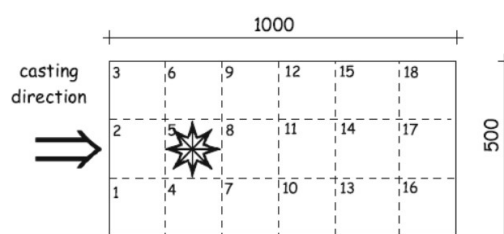
Obr. 32 Charakteristiky cívek [42]

Měření na jednotlivých cívkách vyvrátilo závislost cívky na měření a proporciální změna indukčnosti byla u všech třech cívek stejná.

Výsledky obsahu vláken získané induktivní metodou byly srovnány s výsledky získanými podle EN 14721:2005+A1:2007. Chyba měření induktivní metodou byla menší než 2 kg/m³.

Juan-García a kol.[43] se zaměřují na problematiku parametrů, které měření induktivní metodou ovlivňují. Podle této práce je nutno při použití induktivní metody zohlednit geometrii použitých vláken. Tuto geometrii zohledňuje takzvaný tvarový koeficient, definovaný jako poměr indukčnosti vlákna paralelně a kolmo k magnetickému toku. Tvarový koeficient redukuje chybovost okolo 25 %. Vliv teploty ovlivňující měření byl potvrzen, avšak pokud se teplota pochybuje mezi 10 °C až 30 °C, je chyba měření do 1 %. Vliv teploty tedy lze zanedbat.

Ferrara, Faifer a Toscani[36] prováděli měření orientace a obsahu vláken na prvcích o velikosti 1000 mm × 500mm × 25 mm. Prvek byl rozdělen na šestnáct stejných částí.



Obr. 33 Rozdělení prvku na 16 částí [36]

Každá jednotka byla pak pětkrát měřena, ve dvou směrech. Paralelně a kolmo k ukládání, induktivní metodou pomocí magnetické sondy.

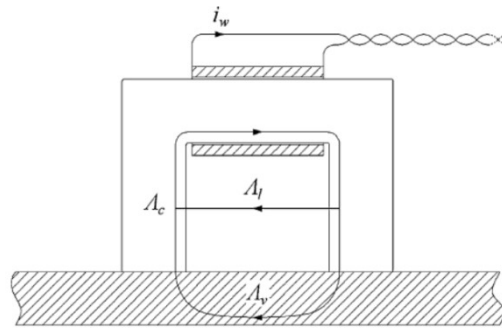
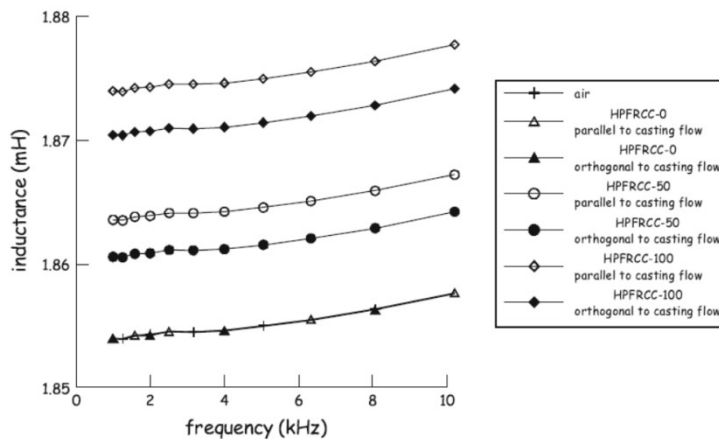


Fig. 3 Schematic of the magnetic probe

Obr. 34 Magnetická sonda [36]

Magnetická sonda se skládala z feritového jádra N87 tvaru C. Sonda dosahovala do maximální hloubky 25 mm. Měření bylo prováděno na rozsahu frekvencí od 1 kHz do 10,2 kHz a byla měřena indukčnost, respektive její změna v závislosti na měřeném materiálu.



Obr. 35 Měření indukčnosti v závislosti na frekvenci [36]

Z paralelnosti křivek na (Obr. 35) lze vyčíst, že měření orientace a obsahu vláken na základě indukčnosti nezávisí na frekvenci.

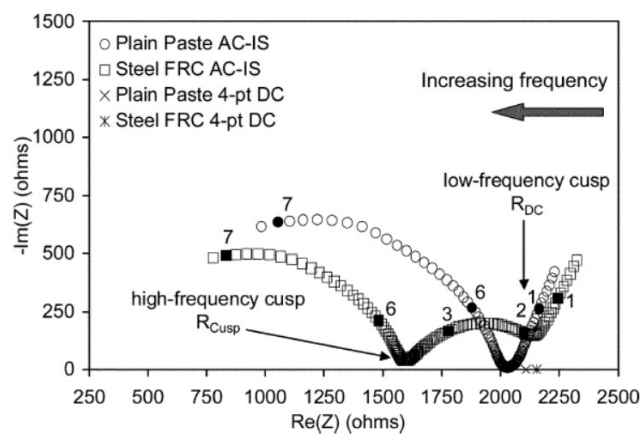
Všechny vzorky pak byly dále podrobeny mechanickým zkouškám Double Edge Splittin test [44] paralelně a kolmo na směr ukládání. Výsledky pojednávající o mechanických zkouškách (tahové lomové houževnatosti materiálu) autoři prezentují v druhé části své práce. Kde se dále zaměřují na využití výsledků, poskytující nedestruktivní magnetická induktivní metoda, pro správný návrh konstrukce či posouzení stávajících konstrukcí a jejich mechanických vlastností.

Po mechanických zkouškách byla spočtena vlákna, respektive jejich plochy v ploše zlomu, z čehož byla hrubě odhadnuta orientace vláken. Pro všechny vzorky se stanovil obsah vláken podle EN 14721:2005+A1:2007. Vzorky byly rozdrceny, vlákna byla odseparována a zvážena.

V závěru své práce publikují, že výsledky všech metod a měření byly srovnatelné s minimální odchylkou. Také potvrzují, že vlákna mají tendenci se rovnat kolmo na směr ukládání.

6.2.2 AC- IS (alternatingcurrent – impedance spectroscopy)

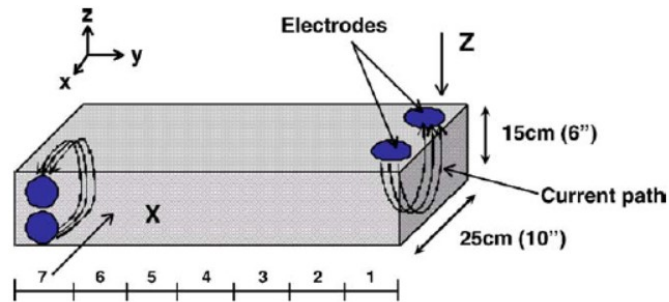
AC-IS je metoda měřící impedanci střídavým proudem. AC-IS zahrnuje měření impedance v určitém rozsahu frekvencí. Rozsah frekvencí se většinou pohybuje od 100 mHz do 11 MHz. Data jsou pak převedena na imaginární a reálnou část impedance a prezentována v Nyquistově grafu. Elektricky vodivá vlákna se pod stejnosměrným proudem (DC), nebo střídavým proudem (AC) nízkých frekvencí chovají jako izolant. Tento jev je způsoben tenkou vrstvou oxidů na povrchu vláken, nebo polarizační vrstvou na rozhraní vláken a elektrolytu. Proto se pro měření metodou AC-IS používá střídavý proud vyšších frekvencí.



Obr. 36 Nyquistův graf[41]

Typická charakteristika pro UHPFRC má dva oblouky, (Obr. 36) představuje Nyquistův graf s jedním obloukem R_{DC} pro vzorek bez vláken, zatímco křivka s dvěma oblouky R_{DC} a R_{Cusp} odpovídá UHPFRC. R_{DC} reprezentuje použité elektrody.

AC-IS je metoda kterou lze použít pro určení orientace, množství a disperze vláken. Tato metoda je srovnatelná s přímou metodou image analysis a nepřímou metodou ohybových zkoušek. Lze jí použít i v průmyslovém měřítku [41],[45].



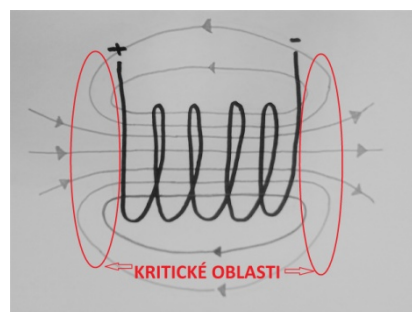
Obr. 37 Umístění elektrod pro zjištění orientace vláken pomocí metody AC-IS [45]

Pro zjištění orientace pomocí AC-IS je nutné aplikovat měření ve více směrech, viz (Obr. 37). Také lze využít tuto metodu pro detekci trhlin a porušení v prvku [46].

7 Experimentální část

7.1 Úvod do problematiky experimentů

Před začátkem všech experimentů bylo nutno zohlednit všechny parametry, které ovlivňují magnetickou orientaci vláken. Magnetická orientace vláken bude záviset zejména na tvaru magnetického pole, tedy na směru siločar magnetického pole, podle kterých se budou vlákna orientovat. Problém by mohl nastat například, pokud by byl kompozit orientován pomocí cívky. Ve středu cívky je pole homogenní, avšak na stranách cívky, u krajů, pole mění svůj směr viz (Obr. 37). Vlákna v čerstvé směsi by se ve středu cívky zorientovala v požadovaném směru, ale po průchodu směsi cívkou, v kritických oblastech (oblasti), by mohla vlákna změnit svoji polohu a orientaci v nežádoucím směru.



Obr. 38 Magnetické pole cívky, kritické oblasti pro magnetickou orientaci

Důležitým parametrem pro magnetickou orientaci vláken bude také rychlost průchodu směsí magnetickým polem, neboli čas potřebný pro úplnou, nebo požadovanou, orientaci vláken. Zároveň intenzita magnetického pole musí být dostačující. Jinými slovy síla působící na vlákno musí mít takovou velikost, aby vlákno překonalo odpor cementové matrice. Tento odpor bude záviset především na viskozitě a mezi kluzu cementové matrice.

Dalšími problémy, které by mohly během experimentů nastat, je shlukování a zbytková remanence vláken. Po zmagnetizování se každé feromagnetické vlákno chová jako malý magnet. Vlákna by se proto mohla začít přitahovat mezi sebou a shlukovat, což by bylo pro naše účely nežádoucí. Po ukončení působení magnetického pole na feromagnetikum, tedy vlákno, si feromagnetikum ponechává do určité míry své magnetické vlastnosti, takže se do určité míry stále chová jako malý magnet. Tomuto chování se říká zbytková remanence a závisí na materiálu, ze kterého je feromagnetikum vyrobeno. Pokud by vlákna výrazně pozbývala magnetických vlastností, mohl by větší objem vláken v konstrukci, respektive kolem konstrukce, vytvářet magnetické pole. Tento jev by mohl být pro běžné užívání konstrukcí nepříjemný a v některých situacích i nebezpečný, například pro osoby s kardiostimulátory.

7.2 Vlastnosti vláken

Pro mé experimenty jsem použila vlákna z vysokopevnostní oceli **Weidacon FM** tažená za studena s mosaznou úpravou na povrchu. Délka vláken $L_f = 13$ mm, průměr vláken $d = 0,15$ mm. Pevnost v tahu vláken je 2800 MPa.



Obr. 39 Měření vláken stav po výrobě

Pro zjištění přesných vstupních údajů pro naše experimenty byla měřena magnetická indukce ocelových vláken před vystavením magnetickému poli, tedy stav po výrobě, a po vystavení magnetickému poli. Měření magnetické indukce bylo prováděno gausmetrem, model 410 LakeShore.

Ve stavu po výrobě byla naměřena magnetická indukce 0,04 mT, protože pozadí odpovídající magnetickému poli Země je nenulové, lze tuto hodnotu považovat za nulovou. Poté byla vlákna vystavena magnetickému poli 44 mT a po vyjmutí z tohoto pole bylo měření zopakováno. Indukce naměřená v blízkosti vláken se pohybovala okolo 1,16 mT, tímto byla prokázána zbytková remanence vláken. Hodnota zbytkové remanence byla daleko nižší, než byla očekávána, a proto by tento jev neměl nijak významně ovlivnit užívání konstrukcí vytvořených z kompozitů, jejichž vlákna jsou zorientovaná magnetickou metodou.

Dále bylo zjištěno, že po magnetizaci, mají vlákna tendenci se řetízkovat (Obr. 39). Tento jev může zvýšit pevnost betonu v tahu, a je tedy žádoucí.



Obr. 40 Řetízkování zmagnetizovaných vláken

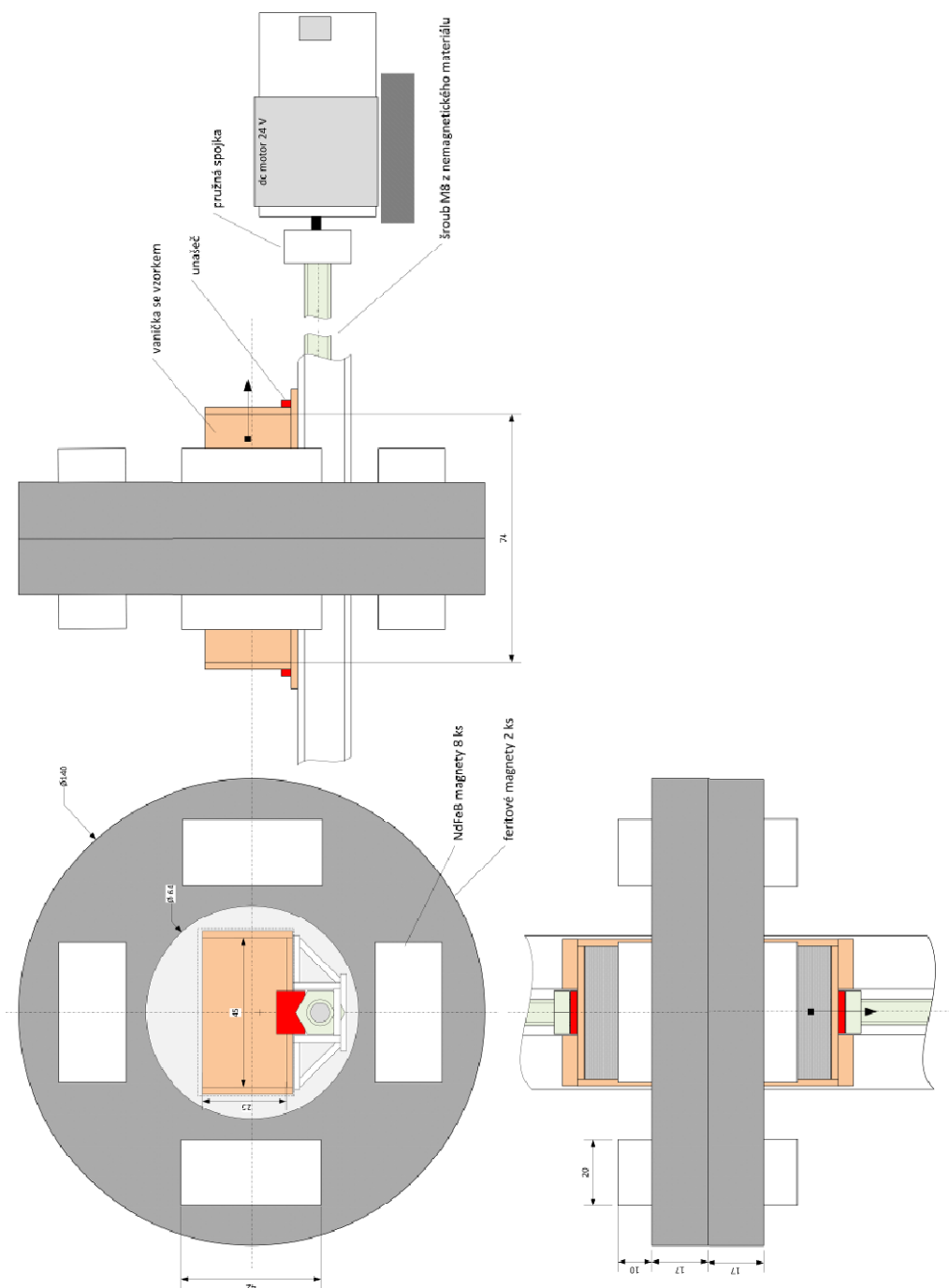
7.3 První experimentální fáze

Úkolem prvních pokusů bylo ověřit, zda je orientace pomocí magnetického pole vůbec možná. Jako náhrada za cementovou matici byl zvolen sonogel, neboť vykazuje obdobné reologické chování jako cementový tmel [47], zejména z hlediska tixotropie a viskozity. Navíc díky své transparentnosti dovoluje pozorovat orientaci vláken. Předpoklad zněl, že míra orientace bude záviset na rychlosti pohybu vzorku magnetickým polem, na viskozitě vzorku a na síle magnetického pole, tedy jeho intenzitě. Aby všechny tyto aspekty byly správně ověřeny, byl v rámci spolupráce s fakultou elektrotechnickou s pomocí Ing. Karla Künzela, CSc., sestaven funkční model zajišťující rovnoměrný pohyb vzorku magnetickým polem, pod pracovním názvem „Drátkodráha“, viz (Obr. 41, Obr. 42).

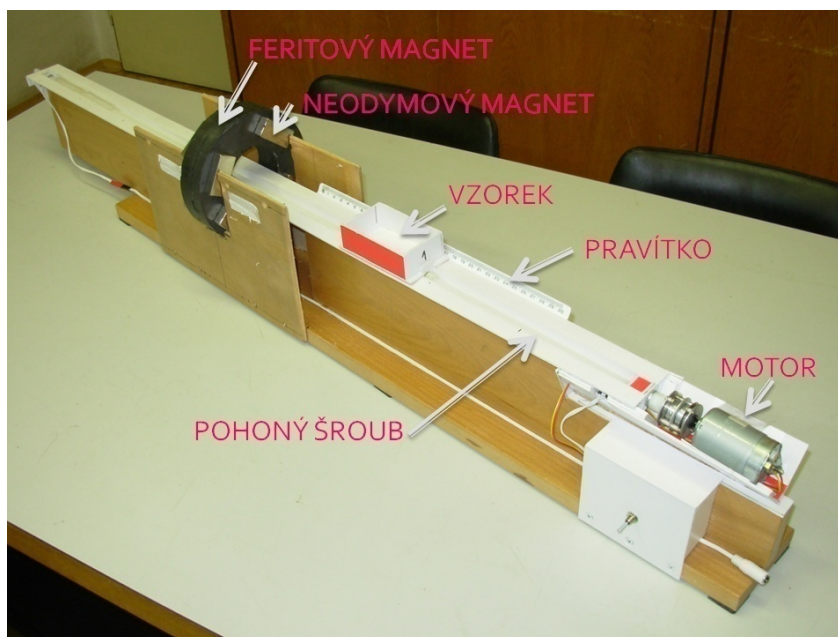
Pomocí nemagnetického šroubu a motoru byl vzorek dopravován magnetickým polem vytvářeným soustavou magnetů - dvou feritových prstenců a osmi neodymových magnetů viz (Obr. 40). Nazveme ji soustavou magnetů 1. Tato soustava magnetů měla podle předpokladů generovat magnetické pole, které je svým tvarem velmi podobné magnetickému poli, které je vytvářené cívku napájenou

elektrickým proudem. Změnou počtu neodymových magnetů bylo možno upravit magnetickou indukci v prostoru, kterým se pohybovaly vaničky se vzorkem.

Permanentní magnety byly použity namísto cívky z důvodu jejich jednoduchosti, trvanlivosti, nepotřeby napájení elektrickým proudem a dalších odpadajících problémů souvisejících se zajištěním dodávky elektrického proudu.



Obr. 41 Funkční model zajišťující rovnoměrný pohyb vzorku



Obr. 42 Drátkodráha - skutečné provedení

Rychlost posuvu vzorku byla volitelná regulací napájecího napětí pohonného motoru. Každý průchod magnetickým polem byl snímán kamerou. Ze zaznamenaného času a polohy vaničky vzorku byla vyhodnocena rychlost pohybu vzorku.

Pro experiment byly použity čtyři rozdílné vzorky, se stejným hmotnostním procentem zastoupení vláken 1,5 %. Byla použita ocelová vlákna (viz kapitola Vlastnosti vláken). Vzorky se lišily v obsahu vody, kterou byl sonogel ředěn. Poměr 1 : 0,566 (sonogel : voda) byl použit z důvodů shodných hodnot viskozity - naměřených v práci Lovichové a kol. [47] - s použitou cementovou maticí v následujících experimentech. U všech vzorků byla naměřena viskozita pomocí rotačního viskozimetru Brookfield DV-II+Pr. Viskozita vzorků byla měřena bez vláken. Poté byla do vzorků přidána vlákna a vzorky byly připraveny do vaniček, o rozměrech 45 mm × 75 mm × 23 mm, které se pohybovaly zvolenou rychlostí magnetickým polem. Byla sledována míra orientace vláken v závislosti na intenzitě magnetického pole a na rychlosti pohybu vaničky.

Poloha vláken byla vyhodnocována vůči ose magnetického pole (shodné s osou pohybu). Výsledná poloha vláken v rozmezí $\pm 30^\circ$ od osy pohybu byla míra uspořádání vláken klasifikována známkou 1, pokud se poloha vláken při průchodu magnetickým polem prakticky nezměnila, byla míra uspořádání (nebo orientace) vláken klasifikována známkou 5 atd.

7.3.1 Výsledky a vyhodnocení první experimentální fáze

Tabulka 1 Výsledky první experimentální fáze

Číslo vzorku	Poměr sonogel : voda	Viskozita [Pa.s]	Intenzita magnetického pole [mT]	Rychlost [cm/s]	Míra orientace
1	1:00	452,4	55	2	1
			55	3,33	1
			30	4	4-5
			55	10	4
2	1:0,566	371,2	55	2	1
			30	2	3-4
			40-50	2	3
			55	3,33	1
			55	2,66	2
3	1:0,35	482,4	55	4	2
			55	2	1
			55	4	2-3
			55	2	3
4	1:0,15	380,8	55	2	1
			55	2	1-2
			55	2	1



Obr. 43 Připravené neorientované vzorky 3



Obr. 44 Neorientované vzorky 3



Obr. 45 Zorientovaný vzorek 3 ohodnocen známkou 1



Obr. 46 Zorientovaný vzorek 2 ohodnocen známkou 2



Obr. 47 Zorientovaný vzorek 3 ohodnocen známkou 3

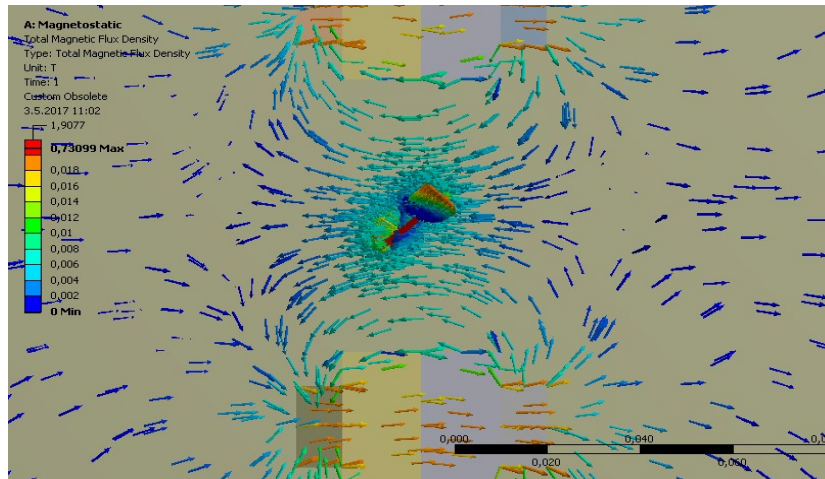


Obr. 48 Zorientovaný vzorek 1 ohodnocen známkou 4

Z výsledku prvního experimentu vyplynulo, že magnetická orientace ocelových vláken je reálná a skutečně závisí na rychlosti, viskozitě a intenzitě magnetického pole. Neoptimálnější rychlost, pro úplnou orientaci neboli orientaci klasifikovanou známkou 1, byla rychlost 2 cm/s. Při ponechání pouze feritových magnetů byla intenzita pole 30 mT. Soustava feritového mezikruží a 4 neodymových magnetů, indukovala pole o intenzitě 40 mT až 50 mT, avšak obě tyto sestavy se ukázaly jako nedostačující pro orientaci vláken v jakémkoliv vzorku o různé viskozitě. Nejmenší intenzita pole pro úplnou orientaci klasifikovanou známkou 1, byla intenzita magnetického pole o hodnotě 55 mT, úplná sestava feritové mezikruží a 8 neodymových magnetů, pro zorientování vzorku o nejvyšší viskozitě 452,4 Pa.s. Obavy z orientace v nesprávném směru při opouštění vzorku v krajních oblastech kolem magnetu se nepotvrdily.

7.4 Simulace v programu ANSYS

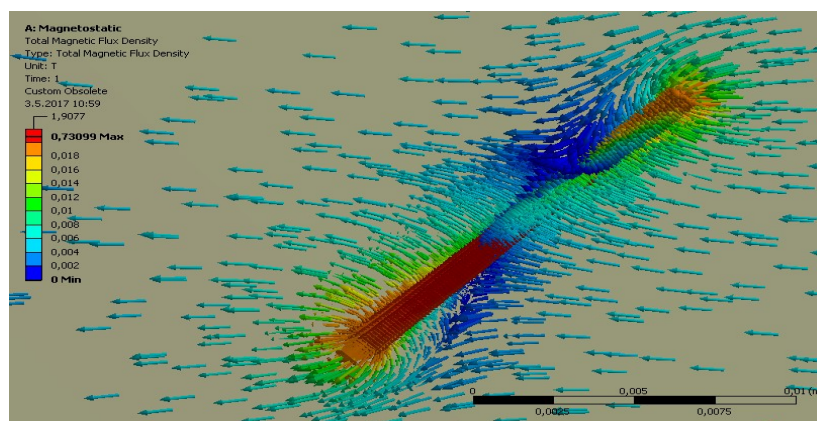
Pomocí programu ANSYS byly prováděny simulace magnetického pole pro lepší pochopení jeho tvaru, intenzity a jeho vlivu na vlákna.



Obr. 49 Řez soustavou magnetů Drátkodráhy

Na (Obr. 48) je zobrazený řez Drátkodráhou s vlákny uprostřed soustavy magnetů. Simulace potvrdila očekávání i experiment, a to sice, že daná soustava magnetů - feritové mezikruží s přidávanými neodymovými magnety - vytváří magnetické pole, které svým tvarem velmi připomíná tvar magnetického pole cívky napájené elektrickým proudem.

Jednou z nejdůležitějších informací, která byla z těchto simulací získána, byla, jakou roli hraje množství vláken na jejich magnetickou orientaci. Pomocí simulací bylo zjištěno, že zmagnetizováním vlákna a jeho orientací intenzita magnetického pole zesílí. Tedy při vyšším objemu vláken je zesílení výraznější. Při vyšším objemu vláken si tedy budou vlákna více napomáhat k magnetické orientaci a bude zapotřebí menší vstupní intenzity magnetického pole. Vstupní intenzitou magnetického pole je myšlena intenzita soustavy magnetů bez vláken.



Obr. 50 Simulace působení magnetického pole na vlákno v programu AnSys

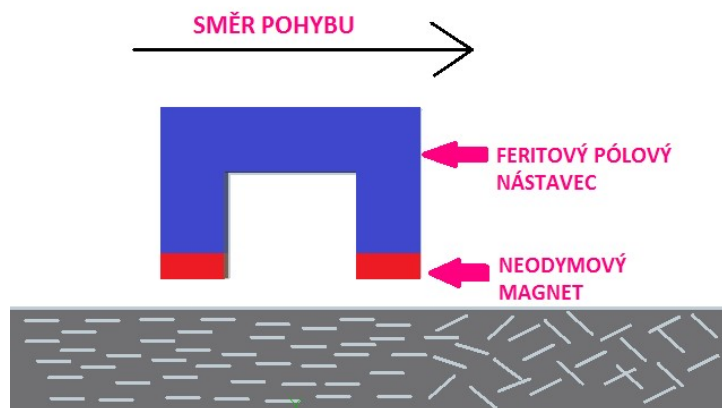
7.5 Jiné soustavy magnetů

Nevýhodami použité soustavy magnetů 1 (feritový prstenec s přidanými neodymovými magnety), v prvním pokusu, jsou omezená velikost vzorku pro magnetickou orientaci daná vnitřním průměrem feritového prstence a fakt, že prvek musí být protahován prstencem. Z důvodu těchto nevýhod byla hledána jiná soustava magnetů.

7.5.1 Soustava magnetů 2, Žehlička

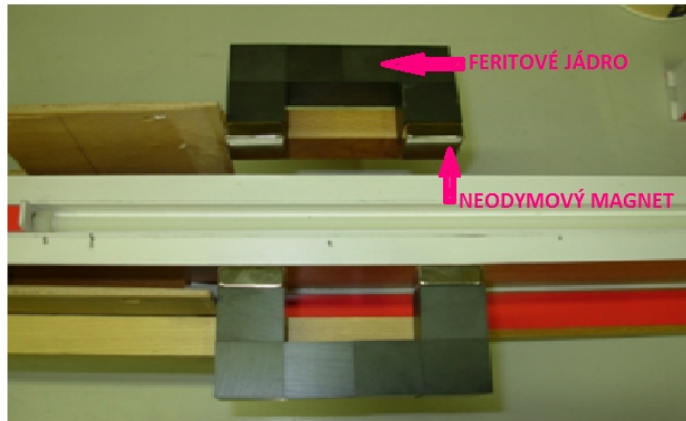
Hlavní výhodou této soustavy by byla možnost magnetické orientace vláken v prvku o libovolné velikosti, pouze s omezením vlastní penetrace, tedy hloubky ovlivnění vláken. Další výhodou by byla možnost orientace vláken ve více směrech a tímto způsobem vyztužit například křížem pnuté desky. Soustava magnetů 2, s názvem Žehlička, se sestávala s feritového pólového nástavce tvaru C, se dvěma neodymovými magnety N38 o rozměrech 25 mm × 25 mm × 10 mm na koncích nástavce. Pólový nástavec byl sestaven s feritových kostek o rozměrech 25 mm × 25 mm × 25 mm, konkrétně z materiálu CF 139.

Představa, jak by probíhala magnetická orientace pomocí této soustavy magnetů, byla následující. Směs by byla nejprve uložena do bedně z nemagnetického materiálu. Poté by byl prvek při povrchu ovlivněn soustavou magnetů 2, Žehličkou, čímž by docházelo k cílené orientaci vláken (Obr. 50).



Obr. 51 Schéma soustavy magnetů Žehlička

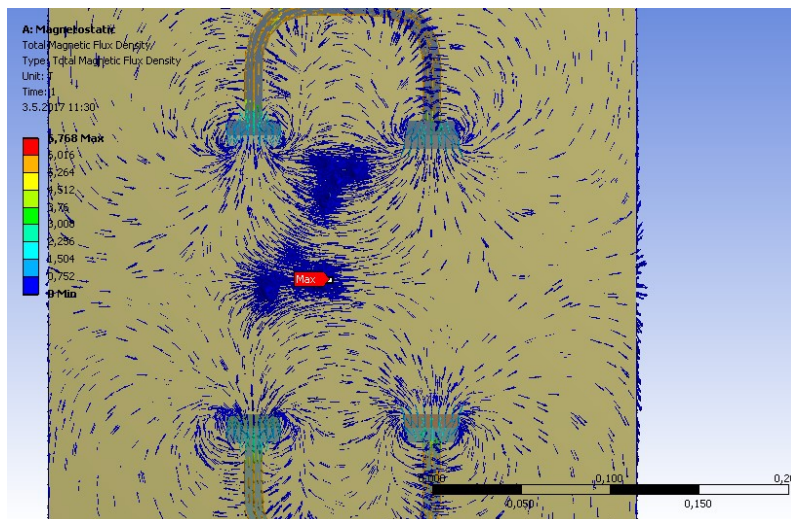
Tato soustava magnetů byla experimentálně ověřena pomocí funkčního modelu zajišťujícího rovnoměrný pohyb vzorku magnetickým polem (Obr. 52). Výsledky experimentů potvrdily předchozí obavy ze simulací v programu ANSYS, které ukazovaly směr siločar v blízkosti magnetů kolmo na požadovaný směr orientace, viz (Obr. 53). Požadovaná orientace vláken proběhla pouze ve středu vzorku. Po stranách vzorku byla vlákna zorientovaná kolmo na požadovaný směr, jak je zvýrazněno na fotografii zorientovaného vzorku pomocí soustavy magnetů Žehlička, viz (Obr. 53).



Obr. 52 Experimentální ověření soustavy magnetů – Žehlička



Obr. 53 Výsledná orientace vláken při pokusu Žehlička



Obr. 54 Simulace tvaru magnetického pole Žehliček v programu AnSys

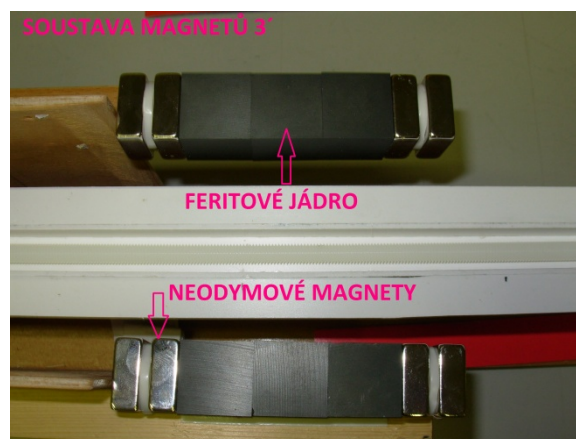
Z důvodů nežádoucí orientace vláken po stranách vzorků, v blízkosti magnetů, bylo od experimentů s touto soustavou magnetů opuštěno.

7.5.2 Soustava magnetů 3 a 3'

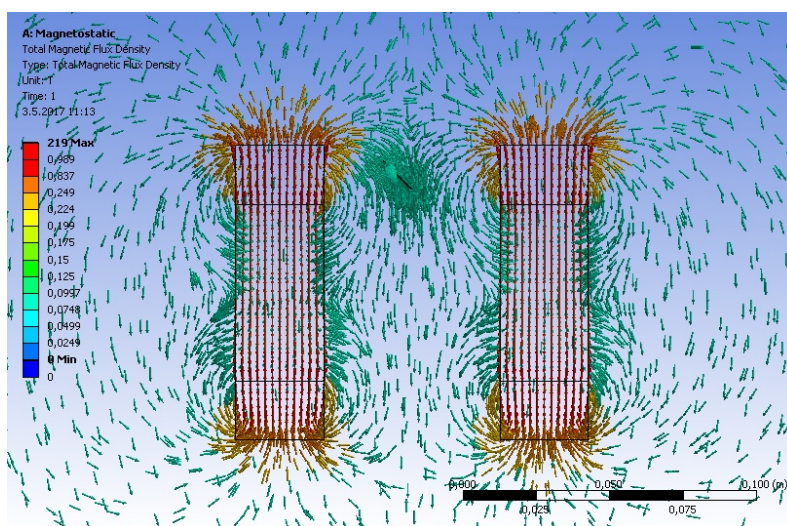
Jednalo se o soustavu magnetů a feritů ve tvaru tyče. Jedna tyč, soustavy magnetů 3, se sestávala ze tří feritových jader CF 139, o rozměrech 25 mm × 25 mm × 25 mm, a dvou neodymových magnetů N38 o rozměrech 25 mm × 25 mm × 10 mm, na koncích (Obr. 55). U soustavy magnetů 3' byly přidány dva neodymové magnety na koncích soustavy 3 (Obr. 56). Tato soustava magnetů byla experimentálně ověřena pomocí funkčního modelu zajišťující rovnoměrný pohyb vzorku magnetickým polem.



Obr. 55 Soustava magnetů 3



Obr. 56 Soustava magnetů 3'



Obr. 57 Simulace tvaru magnetického pole soustavy 3 v programu ANSYS

Pro ověření správného tvaru magnetického pole a směru siločár, byly provedeny simulace v programu ANSYS. Na (Obr. 57) můžeme vidět, že siločáry magnetického jsou orientovány paralelně s tyčemi, což bylo žádoucí. Ačkoliv správnost tvaru magnetického pole byla posléze potvrzena experimenty, byla během nich také zaznamenána příliš nízká intenzita magnetického pole. Magnetické pole tudíž

na vlákna nepůsobilo dostačující silou a vlákna ve středu vzorku nijak nezměnila svoji polohu vůči počátečnímu stavu před orientací.

7.5.3 Soustava magnetů 4

Tato soustava byla tvořena čtyřmi celky. Každý celek byl tvořen čtyřmi neodymovými magnety N38 o rozměrech 30 mm × 30 mm × 7,5 mm. Tato soustava magnetů byla experimentálně ověřena pomocí funkčního modelu zajišťující rovnoměrný pohyb vzorku magnetickým polem (Obr 57).



Obr. 58 Soustava magnetů 4

Ačkoliv tato soustava generovala pole správného tvaru a silnější intenzity, než soustav magnetů 3 a 3', byla intenzita magnetického pole stále nedostačující pro správnou magnetickou orientaci vláken.

7.5.4 Závěr experimentů týkajících se jiných soustav magnetů

Z výsledků všech experimentů týkajících se různých soustav magnetů, a tedy i tvarů magnetické pole, nám vyplynula jako nejlepší možná varianta pro magnetickou orientaci soustava magnetů 1, použitá v prvním experimentu. Z tohoto důvodu byla soustava 1 doplněna dalšími 8 neodymovými magnety N38 o rozměrech 25 mm × 25 mm × 10 mm pro zvýšení intenzity magnetické pole a takto doplněná soustava magnetů 1' byla použita pro následující experimenty. Intenzita magnetického pole soustavy 1' byla 60 mT.

7.6 Orientace vláken v cementové matrici

Po ověření funkčnosti modelu zajišťujícího rovnoměrný pohyb vzorku magnetickým polem pro magnetickou orientaci vláken v sonogelu, byly zahájeny experimenty s cementovou matricí. Pro výrobu vzorku byla použita suchá prefabrikovaná směs UHPFRC, navržená a používaná Experimentálním centrem ČVUT v Praze[48].

Složení suché prefabrikované směsi, množství vyjádřené v hmotnostních podílech pojivové složky:

- 1 hmotnostní díl cementu 42,5 R
- 0,1 hmotnostního dílu amorfního SiO_2 , mikrosiliky
- 0,25 hmotnostního dílu křemičité moučky se střední velikostí zrna 6 μm
- 1,6 hmotnostního dílu čistého křemičitého písku plynulé granulometrie 0,1 až 1,2 mm, střední velikosti zrna $d_{50} = 500 \mu\text{m}$
- 0,01 hmotnostního dílu plastifikační přísady
- 0,001 hmotnostního dílu odpěňovací přísady

Výroba vzorků:

Vzorky byly vyrobeny ve dvou velikostech, 45 mm × 75 mm × 23 mm pro první experiment a 40 mm × 160 mm × 40 mm odpovídající normové velikosti zkušebního trámečku pro ověření mechanických vlastností směsi pro další experimenty. Velikost trámečků 40 mm × 160 mm × 40 mm, dále jen T40, je také maximální velikost vzorku, který může být použit pro magnetickou orientaci vláken pomocí soustavy magnetů 1'. Směs pro vzorky T40 byla připravena vždy v dávce pro jeden vzorek, z důvodu zamezení odchylky objemového množství vláken ve vzorku.

Do suché prefabrikované směsi byla přidána pitná voda, která svým hmotnostním zastoupením odpovídala vodnímu součiniteli $v = 0,3$. Směs byla poté tři minuty míchána ručně, a po třech minutách byla přidána vlákna v objemu 1,5 %, nebo 0,75 %, nebo 0,45 %. Směs s vlákny byla pak ještě minutu ručně míchána a poté byla naplněna do formy z nemagnetického materiálu. Vlákna ve vzorku pak byla zorientována v požadovaném směru shodném se směrem pohybu vzorku. Pro zorientování byl použit funkční model zajišťující rovnoměrný pohyb vzorku magnetickým polem-Drátkodráha se soustavou magnetů 1'. Orientace vláken byla posléze ověřena měřením elektrických parametrů cívky a pomocí rentgenové diagnostiky vyhodnocené jako CT scany.

Tabulka 2 Hmotnosti jednotlivých složek pro výrobu vzorku T40 s 1,5 % objemu vlákný

Složka	Hmotnost
suchá prefabrikovaná směs	625 g
Voda	61 g
vlákna 13 mm × 0,15 mm	35 g

7.7 Měření orientace vláken pomocí činitele jakosti cívky Q

Měření orientace vláken pomocí činitele jakosti cívky bylo prováděno ve spolupráci s Fakultou elektrotechnickou (FEL), ČVUT v Praze. Vzhledem k mezioborovému charakteru práce autorka práce absolvovala předmět na FEL a zpracovala projekt na téma: "Měření orientace vláken v drátkobetonu", pod vedením prof. Ing. Václava Papeže, CSc. Nazákladě doporučení, prof. Ing. Václava Papeže, CSc., byla orientace zjišťována měřením jakosti cívky Q , čímž se naše měření lišila od měření jiných autorů, zmíněných v kapitole "Nepřímé metody zjišťování orientace ocelových vláken v cementových kompozitech", kteří měřili indukčnost nebo impedanci.

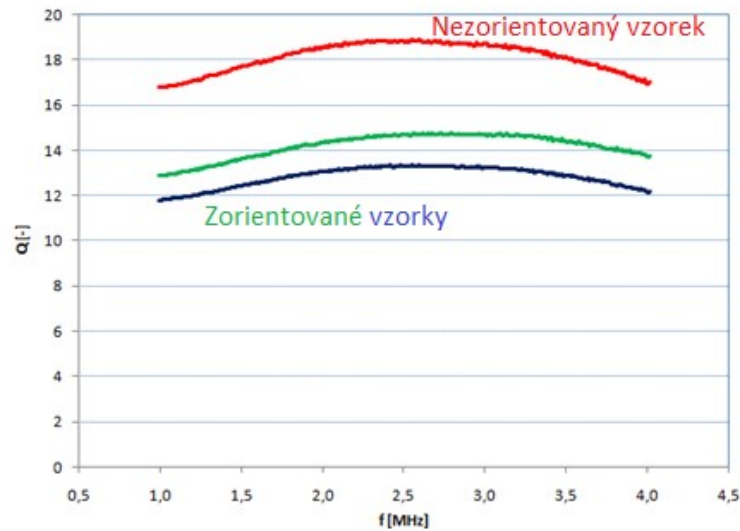
Vlastnosti cívky jsou dány jejím tvarem, počtem závitů, průměrem drátu, materiálem drátu, jádrem cívky, okolím, napětí a proudem, kterým je napájena, v případě střídavého proudu, také jeho frekvencí. Jednou z možností jak měřit vlastnosti cívky, je pomocí činitele jakosti.

Činitel jakosti Q byl měřen pomocí měřiče impedance, konkrétně Agilent E4991A. Měření bylo prováděno pomocí cívky o dvaceti sedmi závitech, tvořenými měděným drátem o průměru 1,8 mm, na rozsahu frekvencí od 1 Hz – 3 MHz.

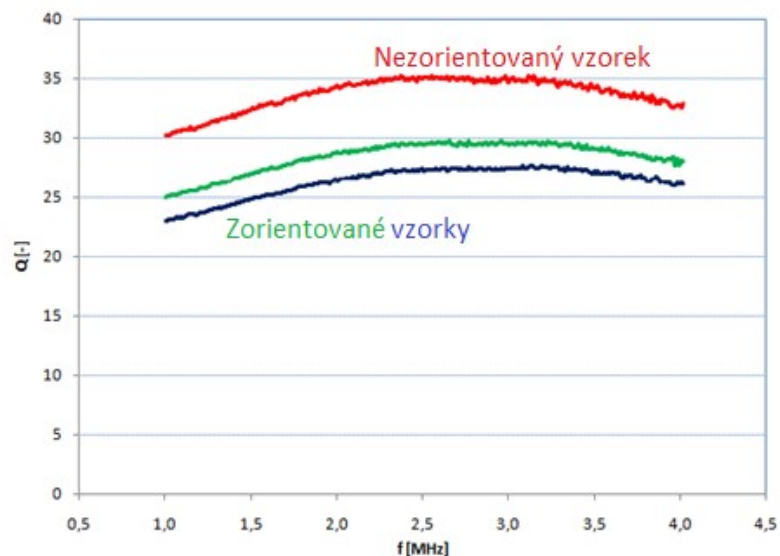
Během měření bylo sledováno, jak jádro cívky, tedy betonový vzorek s ocelovými vlákny, ovlivňuje činitel jakosti cívky. Bylo předpokládáno, že čím více budou vlákna orientována, tím více poklesne činitel jakosti cívky. Tento předpoklad byl potvrzen. Také bylo ověřeno, že permeabilita prostého betonu nebo prostého sonogelu bez vláken, je prakticky stejná jako permeabilita vzduchu, tedy po vložení betonového (sonogelového) vzorku bez vláken do cívky, se činitel jakosti nijak výrazně nezměnil.

Měření se provádělo na začátku, uprostřed a na konci vzorku T40. Začátek a konec je uvažován ve směru pohybu vzorku soustavou magnetů. Z naměřených hodnot vyplynulo, že objem vláken na začátku vzorku je menší, než na konci. Tento jev je způsoben přitažlivými silami, které po průchodu vzorku soustavou magnetů přitahují vlákna zpět k sobě. Měření bylo potvrzeno dvouboulovou charakteristikou – Ozyurt [41].

Měření bylo nejprve prováděno na vzorcích se sonogelovou maticí, kde byl ověřen pokles činitele jakosti cívky Q při zorientovaném stavu vláken (měřeno ve směru vláken). Posléze bylo měření aplikováno na betonové vzorky, kde byla opět potvrzena výrazná závislost orientace vláken na činiteli jakosti cívky Q . Stáří betonu nemá na měřené výsledky významný vliv.



Obr. 59 Měření činitele jakosti cívky pro jádro s cementovou maticí s 1,5 % objemem vláken

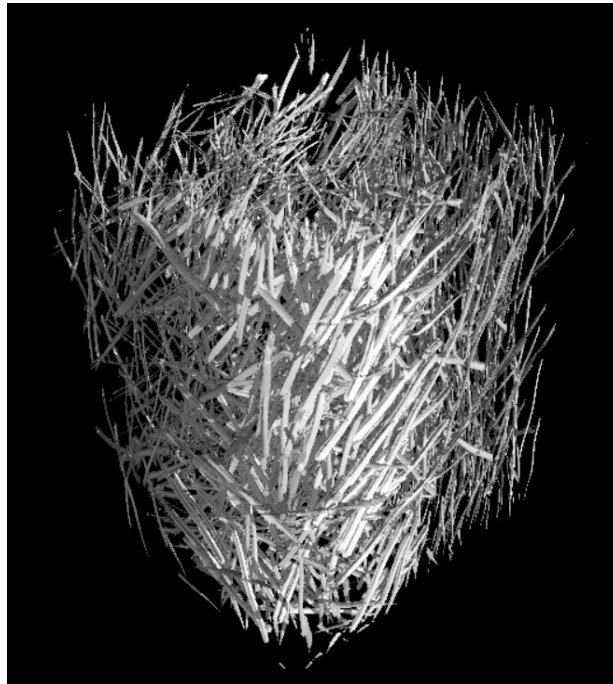


Obr. 60 Měření činitele jakosti cívky pro jádro s cementovou maticí s 0,75 % objemem vláken

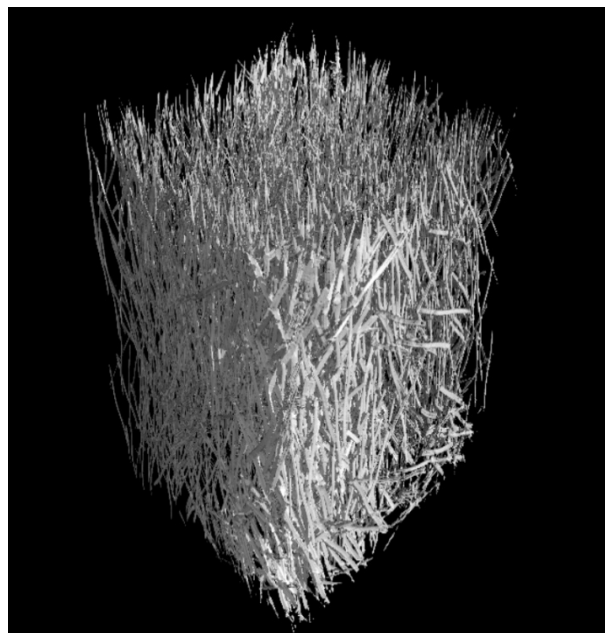
Rozdíl poklesu činitele jakosti mezi nezorientovaným a zorientovaným stavem, byl pro obsah vláken 0,75 % větší, než pro obsah 1,5 % objemu vláken. Tento fakt může být vysvětlen tím, že při větším objemu vláken dochází k omezení pohybu jednotlivých vláken, a proto dochází k orientaci menšího počtu vláken, než u vzorku s nižším objemem vláken.

7.8 CT-SCANY

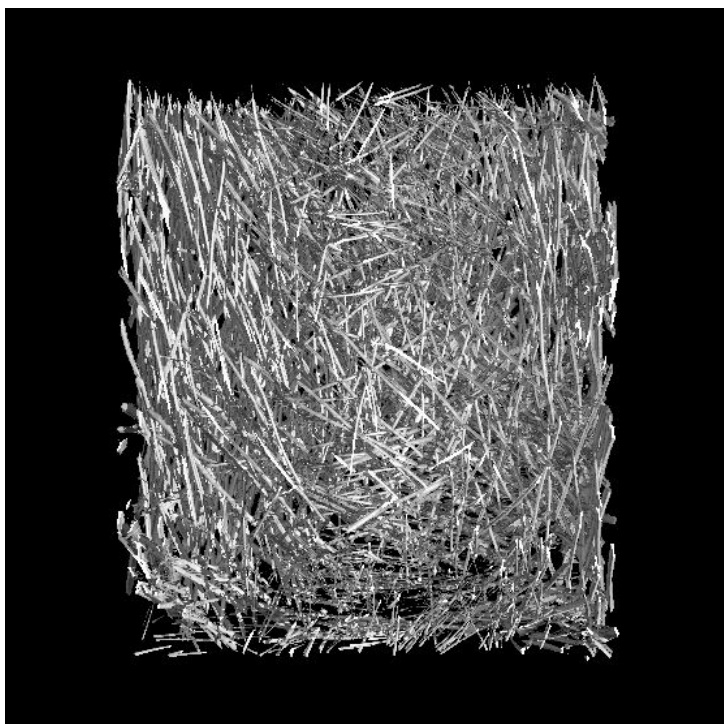
Orientace vláken v betonových vzorcích T40 byla dále ověřena pomocí rentgenové diagnostiky v laboratoři LVR na Fakultě elektrotechnické ČVUT v Praze. Vzorek byl nasnímán ve formě 3D matice zpracované metodou počítačové tomografie v programu myVGL2.2. Tato metoda byla použita jako referenční pro ověření úspěšnosti orientace vzorků a ověření výsledků získaných měřeními elektromagnetických vlastností.



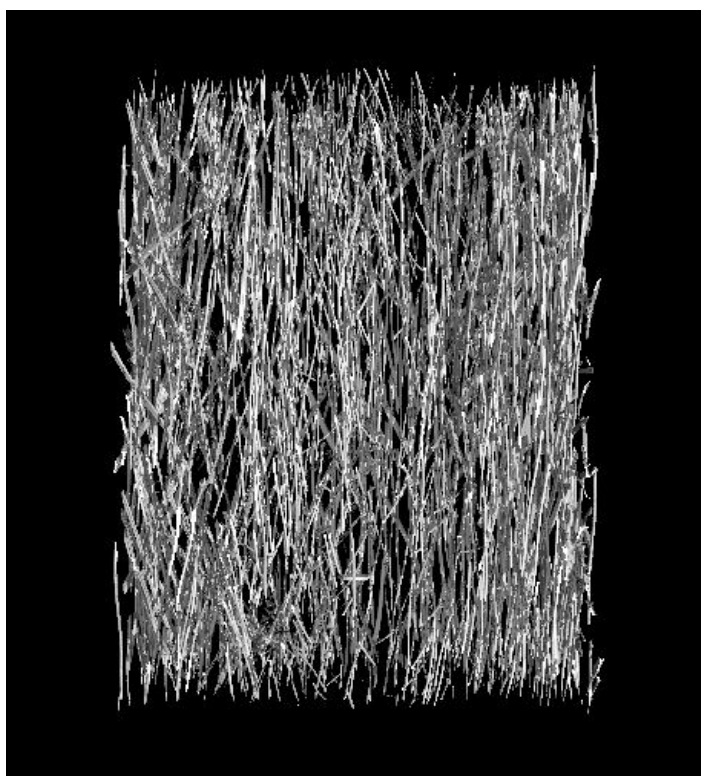
Obr. 61 CT-Scan, 3D pohled nezorientovaného vzorku s 0,75 % objemem vláken



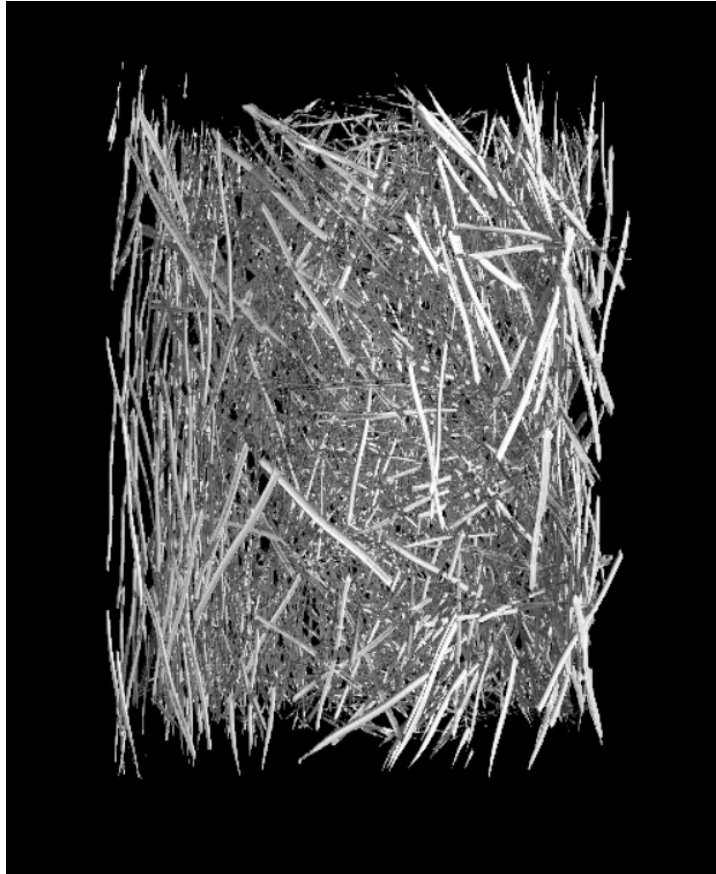
Obr. 62 CT-Scan, 3D pohled nezorientovaného vzorku s 0,75 % objemem vláken



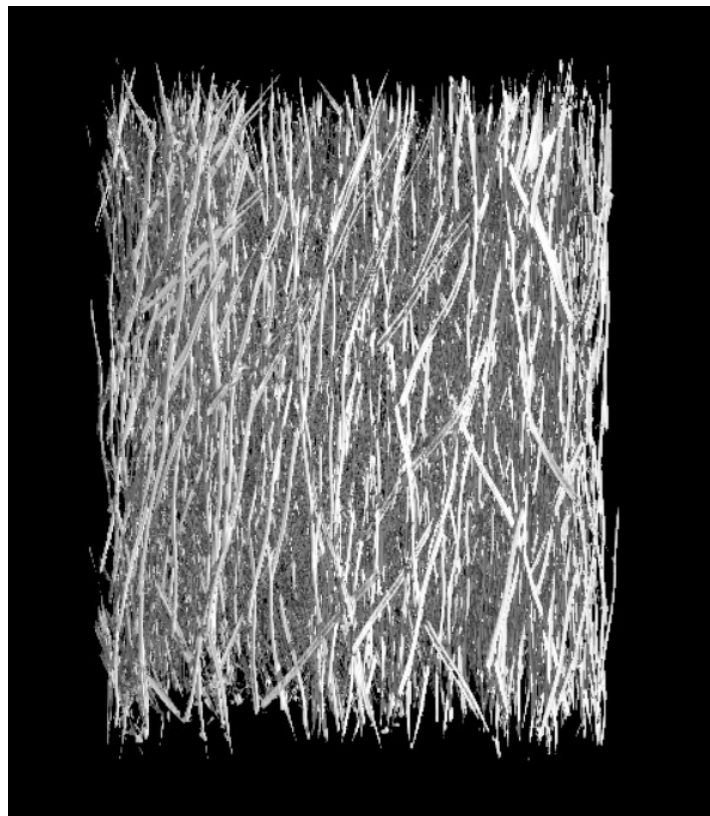
Obr. 63 CT-Scan, řez nezorientovaného vzorku s 1,5 % objemem vláken



Obr. 64 Scan, řez zorientovaného vzorku s 1,5 % objemem vláken



Obr. 65 Scan, řez zorientovaného vzorku s 0,75 % objemem vláken



Obr. 66 Scan, řez zorientovaného vzorku s 0,75 % objemem vláken

Skenovány byly oblasti zorientovaných vzorků trámeček T40 na začátku, uprostřed a na konci. Velikost snímané oblasti byla 40 mm × 40 mm × 40 mm. Rozlišení prostorového snímku bylo 1000 × 1000 × 1000 bodů. U neorientovaných vzorků byl snímán pouze střed o stejné velikosti se stejným počtem snímků.

Z CT-Scanů je dobře viditelný rozdíl mezi neorientovaným a zorientovaným vzorkem. Cílená orientace byla tímto potvrzena.

8 Závěr

Práce je zaměřena na možnosti orientace feromagnetických (ocelových) vláken UHPFRC pomocí magnetického pole a využití elektromagnetických principů pro měření a vyhodnocení míry orientace. Byly ověřeny principy používané v pracích autorů [38] a [37].

V práci byla potvrzena zbytková remanence ocelových vláken **Weidacon FM**, avšak naměřené hodnoty nijak neovlivní užívání konstrukcí vyrobených pomocí magnetické orientace vláken.

Dále studie potvrdila závislost magnetické orientace ocelových vláken na intenzitě magnetického pole, viskozitě prostředí, v němž se vlákna nacházejí, a rychlosti průchodu vzorku magnetickým polem. Nejnižší nutná intenzita magnetického pole musí být 55 mT pro zorientování ocelových vláken v nezředitelném sonogelu o viskozitě 452,4 Pa·s a optimální rychlost se rovná 2 cm/s. Bezpečná intenzita magnetického pole pro zorientování ocelových vláken v použité směsi UHPC je 60 mT.

Studie se zabývala vlivem tvaru a intenzity magnetického pole na orientaci vláken. Z tohoto důvodu byly provedeny simulace magnetického pole v programu ANSYS.

Soustava magnetu 1' byla zhodnocena jako nejlepší možné řešení pro magnetickou orientaci ocelových vláken, sestavené z permanentních magnetů.

Ověření úspěšné orientace bylo prováděno na standardních zkušebních tělesech. Měření vlivu množství a orientace vláken na elektromagnetické vlastnosti, zejména změnu indukčnosti (například [42], [43], [49]), bylo doplněno o měření činitele jakosti cívky s měřeným vzorkem. Citlivost tohoto parametru na množství a orientaci feromagnetických vláken jednoznačně prokázala výhodnost jeho použití.

Validace výsledků orientace vláken i použité měřicí metody, byla jednoznačně potvrzena na základě analýzy rentgenových snímků zpracovaných pomocí CT.

Měření orientace ocelových vláken pomocí elektromagnetických vlastností bylo zpracováno pomocí mezioborové spolupráce na Fakultě elektrotechnické v rámci individuálního projektu pod vedením Ing. Václava Papeže, CSc.

Další možné pokračování výzkumu vlivu magnetického pole na orientaci ocelových vláken:

- Objektivní zhodnocení scanů získaných z laboratoře LVR pomocí počítačové obrázkové analýzy.
- Provedení zkoušky ohybem na zorientovaných vzorcích, včetně tlakových zkoušek. Zkoušení pevnosti v tlaku z důvodů potvrzení či vyvrácení vlivu magnetů na záměsovou vodu a zvýšení pevnosti v tlaku betonu.
- Bude vhodné se zaměřit se na výrobu vzorků o větších rozměrech.
- Ověření chování směsi při kontinuálním proudění magnetickým polem z hlediska shlukování.
- Sestrojení zařízení pro měření orientace ocelových vláken.
- Návrh speciální směsi UHPFR pro účely magnetické orientace ocelových vláken.

Seznam použité literatury:

- [1] Z.-Q. Shi a D. Chung, „Concrete for magnetic shielding“, *Cem. Concr. Res.*, roč. 25, č. 5, s. 939–944, 1995.
- [2] B. D, „THE HISTORY OF FIBRE REINFORCEMENT“, 05-čvc-2015. [Online]. Dostupné z: <https://www.linkedin.com/pulse/history-fibre-reinforcement-bharathi-d>. [Viděno: 03-dub-2017].
- [3] Bc. Michal Tvarog, „DIPLOMOVÁ PRÁCE Vliv orientace vláken na mechanické vlastnosti cementových kompozitů“. České vysoké učení technické, experimentální centrum. Vedoucí práce Ing. Jindřich Fornůsek, 2016.
- [4] P. Casanova, P. Rossi, a I. Schaller, „Can steel fibers replace transverse reinforcements in reinforced concrete beams?“, *ACI Mater. J.*, roč. 94, č. 5, s. 341–354, 1997.
- [5] P.-C. Aïtcin, *Vysokohodnotný beton*. Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) a Českou betonářskou společnost vydalo Informační centrum ČKAIT, 2005.
- [6] V. C. Li, „Large volume, high-performance applications of fibers in civil engineering“, *J. Appl. Polym. Sci.*, roč. 83, č. 3, s. 660–686, 2002.
- [7] B. Boulekbache, M. Hamrat, M. Chemrouk, a S. Amziane, „Flowability of fibre-reinforced concrete and its effect on the mechanical properties of the material“, *Constr. Build. Mater.*, roč. 24, č. 9, s. 1664–1671, 2010.
- [8] ACI Committee 544 a American Concrete Institute, *Report on the physical properties and durability of fiber-reinforced concrete*. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, 2010.
- [9] H. Afshin, M. Gholizadeh, a N. Khorshidi, „Improving Mechanical Properties of High Strength Concrete by Magnetic Water Technology“, *ResearchGate*, roč. 17, č. 1, led. 2010.
- [10] S. M. Ahmed, „Effect of Magnetic Water on Engineering Properties of Concrete“, *ResearchGate*.
- [11] M. Gholizadeh a H. Arabshahi, „The Effect of Magnetic Water on Strength Parameters of Concrete“, *ResearchGate*, roč. 6, č. 1, s. 66–69, led. 2011.
- [12] Off Grid World, *10 Houses Printed in 24 Hours - 3D Printed Concrete Homes*. 2014.
- [13] E. Svoboda, *Přehled středoškolské fyziky*. Praha: Prometheus, 2014.
- [14] K. Tkotz, *Příručka pro elektrotechnika*. Praha: Europa-Sobotáles, 2006.
- [15] minutephysics, *MAGNETS: How Do They Work?* 2013.
- [16] J. Doleček, *Moderní učebnice elektroniky. rezistor, kondenzátor, cívka 1. díl, 1. díl.*. Praha: BEN - technická literatura, 2005.
- [17] Martin Šerý, „DIPLOMOVÁ PRÁCE Vlastnosti permanentních magnetů“. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ, 2013.
- [18] „Q-metr“, *Wikipedie*. 11-lis-2015.
- [19] Ing. Jaroslav Blažík a Ing. Václav Mergl, CSc., „Magnetická úprava vody“. Vodárenská akciová společnost, a.s.Brno.
- [20] MUDr. František Kožíšek, CSc., „Stanovisko Národního referenčního centra (NRC) pro pitnou vodu k přístrojům na úpravu vody na bázi magnetické úpravy“. STÁTNÍ ZDRAVOTNÍ ÚSTAV CENTRUM HYGIENY ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ Šrobárova 48, 10042 Praha 10, 29-bře-2002.
- [21] N. Su a C.-F. Wu, „Effect of magnetic field treated water on mortar and concrete containing fly ash“, *Cem. Concr. Compos.*, roč. 25, č. 7, s. 681–688, jen 2003.

- [22] B. S. K. Reddy, V. G. Ghorpade, a H. S. Rao, „Influence of Magnetic Water on Strength Properties of Concrete", *Indian J. Sci. Technol.*, roč. 7, č. 1, s. 14–18, led. 2014.
- [23] R. Hela, Vysoké učení technické v Brně, a Ústav technologie stavebních hmot a dílců, *Problematika čerstvých samozhutnitelných betonů = Problems of fresh self-compacting concrete: teze přednášky k profesorskému jmenovacímu řízení v oboru Fyzikální a stavebně materiálové inženýrství*. Brno: VUTUM, 2010.
- [24] „The Rheology of Fresh Cement and Concrete - A Review by PFG Banfill". [Online]. Dostupné z: <https://www.scribd.com/document/92854372/The-Rheology-of-Fresh-Cement-and-Concrete-A-Review-by-PFG-Banfill>. [Viděno: 11-pro-2016].
- [25] H. Valouchová, M. Růčka, „Nenewtonovské kapaliny". Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, Břehová 7, 115 19 Praha 1.
- [26] C. Hu a F. de Larrard, „The rheology of fresh high-performance concrete", *Cem. Concr. Res.*, roč. 26, č. 2, s. 283–294, nor 1996.
- [27] N. Roussel, „A thixotropy model for fresh fluid concretes: Theory, validation and applications", *Cem. Concr. Res.*, roč. 36, č. 10, s. 1797–1806, jen 2006.
- [28] F. Mahmoodzadeh a S. E. Chidiac, „Rheological models for predicting plastic viscosity and yield stress of fresh concrete", *Cem. Concr. Res.*, roč. 49, s. 1–9, ervenec 2013.
- [29] „Viskozita", *Wikipedie*. 07-úno-2017.
- [30] R. Lapasin, V. Longo, a S. Rajgelj, „Thixotropic behaviour of cement pastes", *Cem. Concr. Res.*, roč. 9, č. 3, s. 309–318, kvě. 1979.
- [31] P. F. G. Banfill, „Rheology of Fresh Cement and Concrete", *ResearchGate*, led. 1991.
- [32] N. Diamantonis *et al.*, „Investigations about the influence of fine additives on the viscosity of cement paste for self-compacting concrete", *Constr. Build. Mater.*, roč. 24, č. 8, s. 1518–1522, srp. 2010.
- [33] M. Sepehr, G. Ausias, a P. J. Carreau, „Rheological properties of short fiber filled polypropylene in transient shear flow", *J. Non-Newton. Fluid Mech.*, roč. 123, č. 1, s. 19–32, 2004.
- [34] L. Martinie a N. Roussel, „Simple tools for fiber orientation prediction in industrial practice", *Cem. Concr. Res.*, roč. 41, č. 10, s. 993–1000, 2011.
- [35] O. Švec, G. Žirgulis, J. E. Bolander, a H. Stang, „Influence of formwork surface on the orientation of steel fibres within self-compacting concrete and on the mechanical properties of cast structural elements", *Cem. Concr. Compos.*, roč. 50, s. 60–72, 2014.
- [36] L. Ferrara, M. Faifer, a S. Toscani, „A magnetic method for non destructive monitoring of fiber dispersion and orientation in steel fiber reinforced cementitious composites—part 1: method calibration", *Mater. Struct.*, roč. 45, č. 4, s. 575–589, dub. 2012.
- [37] A. I. Miller a F. R. Bjorklund, „Method of reinforcing concrete with fibres", pro. 1977.
- [38] S. Zhang, „Method and device for orienting magnetizable particles in a kneadable material", lis. 2006.
- [39] M. J. Peterman, „Method of aligning magnetic particles in a non-magnetic matrix", srp. 1958.
- [40] „ČSN EN 14721 +A1 (723432) - Náhled normy". [Online]. Dostupné z: <https://nahledy.normy.biz/n.php?i=81115>. [Viděno: 03-dub-2017].
- [41] N. Ozyurt, L. Y. Woo, T. O. Mason, a S. P. Shah, „Monitoring fiber dispersion in fiber-reinforced cementitious materials", *ACI Mater. J.*, roč. 103, č. 5, s. 340–347, 2006.

- [42] J. M. Torrents, A. Blanco, P. Pujadas, A. Aguado, P. Juan-García, a M. Á. Sánchez-Moragues, „Inductive method for assessing the amount and orientation of steel fibers in concrete", *Mater. Struct.*, roč. 45, č. 10, s. 1577–1592, říj. 2012.
- [43] P. Juan-García, J. M. Torrents, R. D. López-Carreño, a S. H. P. Cavalaro, „Influence of Fiber Properties on the Inductive Method for the Steel-Fiber-Reinforced Concrete Characterization", *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, roč. 65, č. 8, s. 1937–1944, srp. 2016.
- [44] M. di Prisco, M. Lamperti, a S. Lapolla, „On double edge wedge splitting test: preliminary results", prezentováno v Proceedings FraMCoS, 2010, roč. 7, s. 1533–1540.
- [45] N. Ozyurt, T. O. Mason, a S. P. Shah, „Non-destructive monitoring of fiber orientation using AC-IS: an industrial-scale application", *Cem. Concr. Res.*, roč. 36, č. 9, s. 1653–1660, 2006.
- [46] M. Niemuth, „Using impedance spectroscopy to detect flaws in concrete", Purdue University, 2004.
- [47] R. Lovichová¹, J. Fornůšek, L. Soukupová, a J. Valentin, „Ultrasound gel as suitable tool for simulation of the fiber orientation in the fiber reinforced concrete", in *Experimental Stress Analysis 2016*, Plzeň, 2016, roč. 2016.
- [48] Karel Kolář doc. Ing., CSc., Praha 6, CZ, Zdeňka Bažantová Ing. arch., CSc., Praha 4, CZ, a Petr Konvalinka prof. Ing., CSc., Praha 10, CZ, „Užitný vzor: Suchá prefabrikovaná směs multifunkčního silikátového kompozitu". České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Praha 6, CZ, 01-zář-2015.
- [49] L. Ferrara, M. Faifer, a S. Toscani, „A magnetic method for non destructive monitoring of fiber dispersion and orientation in steel fiber reinforced cementitious composites—part 1: method calibration", *Mater. Struct.*, roč. 45, č. 4, s. 575–589, 2012.