



Slovenská technická univerzita v Bratislave, Stavebná fakulta

Ing. Jaroslav Prokop

Autoreferát dizertačnej práce

Vplyv recyklovaných oceľových vlákien na vlastnosti vláknobetónu a šmykovú odolnosť
železobetónových prvkov bez šmykovej výstuže

na získanie akademického titulu „philosophiae doctor“, v skratke „PhD.“

v doktorandskom študijnom programe:

D-TKeIS4 teória a konštrukcie inžinierskych stavieb

v študijnom odbore:

stavebníctvo

Forma štúdia:

denná

Miesto a dátum: V Bratislave, máj 2025



Dizertačná práca bola vypracovaná na:

Katedra betónových konštrukcií a mostov, Stavebnej fakulty STU v Bratislave

Predkladateľ: Ing Jaroslav Prokop
Katedra betónových konštrukcií a mostov
Stavebná fakulta, STU v Bratislave
Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Školiteľ: doc. Ing. Ivan Hollý, PhD.
Katedra betónových konštrukcií a mostov
Stavebná fakulta, STU v Bratislave
Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Autoreferát bol rozoslaný dňa:

Obhajoba dizertačnej práce sa bude konať dňa..... o.....h na Katedre betónových konštrukcií a mostov (SvF, STU v BA), Radlinského 11, 810 05 Bratislava.

.....
prof. Ing. Stanislav Unčík, PhD.

Obsah

1. Úvod a súčasný stav problematiky	4
1.1. Problematika odpadových pneumatík	4
1.2. Výskum vláknobetónov	4
1.3. Základné pojmy	5
1.4. Šmyková odolnosť železobetónových prvkov bez šmykovej výstuže podľa výpočtových postupov	7
2. Ciele	11
3. Metodika	12
3.1. Výroba vzoriek a železobetónových fragmentov	12
3.2. Skúšanie betónových vzoriek a železobetónových fragmentov	15
4. Výsledky práce a diskusia	16
4.1. Materiálový výskum	16
4.2. Šmyková odolnosť železobetónových fragmentov bez šmykovej výstuže	20
5. Závery	25
6. Odporúčania pre prax	27
7. Odporúčania pre ďalší výskum	27
8. Zdroje	29

1. Úvod a súčasný stav problematiky

1.1. Problematika odpadových pneumatík

Hromadenie pneumatikového odpadu vo svete predstavuje významný problém pre ľudí a životné prostredie. Uskladňovanie opotrebovaných pneumatík na skládkach vedie k podpore rozvoja ekosystémov, ktoré sú priaznivé pre škodcov, ako sú komáre a potkany [1], [2]. Pneumatiky sú ťažko biologicky rozložiteľné a predstavujú riziká nielen pre životné prostredie, ale aj pre zdravie ľudí, ktorí pracujú v blízkosti skládok so starými pneumatikami. [3].



Obr. 1: Skládka odpadových pneumatík [4]

1.2. Výskum vláknobetónov

Komerčne vyrábané oceľové vlákna do betónu (angl. industrial steel fibers, skr. ISF) majú v porovnaní s recyklovanými oceľovými vláknami (angl. recycled steel fibers, skr. RSF) deklarované rozmery (dĺžku, priemer resp. hrúbku). Navyše je ich tvar optimalizovaný tak, aby bola súdržnosť s cementovým kompozitom čo najväčšia. Napriek ich dobrým vlastnostiam v spolupôsobení s cementovým kompozitom majú aj nevýhody, ktoré spočívajú vo vyššej cene, ktorá je minimálne dvojnásobná oproti cene RSF [5], [6], resp. ich veľkej uhlíkovej stope [7], [8].

Song a kol. [9] realizovali experimentálny výskum s ISF dávkou vlákien 0%, 0,5%, 1%, 1,5% a 2,0% z objemu hotového betónu, pričom pevnosť ISFRC v tlaku vzrástla oproti referenčným vzorkám bez vlákien o +7,5%, +11,7%, 15,3%, resp. 12,9%. Larsen a kol. [10] bolo zistené, že u väčšiny autorov narástla pevnosť vláknobetónu v tlaku v porovnaní s referenčnými betónmi bez oceľových vlákien. V prípade pevnosti v ťahu za ohybu bolo zistené, že s použitím vlákien s koncovými zvlneniami pevnosť v ťahu za ohybu narastá.

Pevnosť v tlaku betónu s dávkou RSF (RSFRC) vzrástla v prácach [11], [12]. Zhoršená pevnosť RSFRC v tlaku oproti referenčným betónom bez vlákien bola zaznamenaná v [13], [14]. V prácach [14], [12], sa zvýšila pevnosť betónu v ťahu za ohybu RSFRC.

Pri prekročení ťahovej pevnosti betónu v nosných prvkoch vznikajú pri podperách šikmé šmykové trhliny. Porušenie nosného prvku bez šmykovej výstuže nenastáva okamžite pri vzniku šmykovej trhliny, ale až po zlyhaní niektorého zo stabilizujúcich mechanizmov trhliny, ktorými sú tlačaná zóna betónového prierezu, efekt zaklinenia zŕn kameniva, reziduálna ťahová pevnosť v trhline a tzv. hmoždinkový účinok hlavnej pozdĺžnej výstuže prvku. Prítomnosť oceľových vlákien v cementovom kompozite môže prispievať k zväčšeniu tlačenej zóny betónového prierezu, zlepšiť zaklinenie zŕn kameniva, resp. zlepšiť účinok zakotvenia pozdĺžnej výstuže na ohyb. Z pohľadu praktického zhotovovania vystuženia môže použitie vláknotetónu s oceľovými vláknami poskytnúť alternatívu, ktorá je na rozdiel použitia strmeňovej výstuže menej prácna. To vytvára potenciál pre zrýchlenie výstavby nosných konštrukcií.

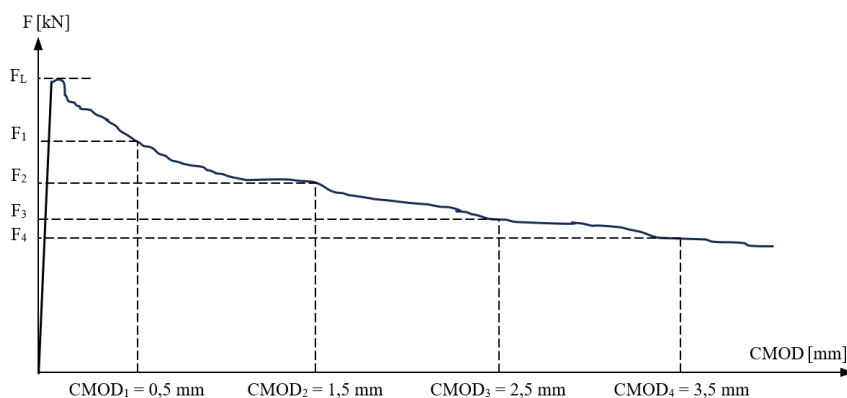
Tahenni a kol. [15] vykonali experimentálny výskum zameraný na šmykovú a ohybovú odolnosť železobetónových nosníkov s dávkami ISF 0,5%, 1,0%, 2,0% a 3,0% z objemu zatvrdnutého betónu. Percentuálny nárast odolnosti týchto nosníkov bol v porovnaní s nosníkmi, ktoré boli vyrobené z prostého betónu +47%, +54%, +58%, a +88%, pričom nosníky s dávkou ISF 1,0%, 2,0%, a 3,0% vykazovali ohybový model porušenia. V uvedenej práci bol na vyhodnocovanie pretvorení a priehybov použitý softvér na digitálnu koreláciu obrazu (Digital Image Correlation, skr. DIC). Hameed a kol. [16] vo svojich experimentoch používali betón s dávkami ISF 0,5%, 0,75% a 1,0%, pričom bolo pozorované, že nosníky s dávkou vlákien 1,0% zlyhali ohybovým modelom porušenia.

Výskum v oblasti železobetónových prvkov, ktoré majú v betónovej matrici dávku RSF, je aktuálne nedostatočný a existuje veľmi málo publikácií, ktoré opisujú správanie týchto železobetónových prvkov v ohybe a šmyku.

1.3. Základné pojmy

Reziduálne napätia

Hodnoty reziduálnych napätí f_{Rj} , napätia na medzi úmernosti f_{LOP} a o pevnosť v ťahu za ohybu $f_{ct,fl}$ je možné určiť z výsledkov ohybovej skúšky za pomoci normy EN-14651 [17], ktorá definuje spôsob odčítavania hodnôt v záujmových bodoch závislosti $F-CMOD$. Silu pre určenie hodnoty napätia na medzi úmernosti f_{LOP} je potrebné odčítať pri $CMOD = 0,05$ mm. Schéma so zobrazenými záujmovými bodmi závislosti $F-CMOD$ je zobrazená na Obr. 2-1 [17].



Obr.2-1: Zaujmové body pre výpočet reziduálnych napätí [17]

Odčítané hodnoty sa následne dosadia do vzťahov (2-1) a (2-2) nasledovne:

$$f_{ct,fl} = \frac{3 \cdot F_L \cdot l}{2 \cdot b \cdot h_{sp}^2} \quad (1-1)$$

$$f_{R,j} = \frac{3 \cdot F_j \cdot l}{2 \cdot b \cdot h_{sp}^2} \quad (1-2)$$

kde:

- F_L je odčítaná hodnota sily v momente vzniku prvej trhliny [N],
- F_j hodnota sily, ktorá je odčítaná pri špecifickej hodnote CMOD ($CMOD_1 = 0,5 \text{ mm}$ (f_{R1}); $CMOD_2 = 1,5 \text{ mm}$ (f_{R2}); $CMOD_3 = 2,5 \text{ mm}$ (f_{R3}); $CMOD_4 = 3,5 \text{ mm}$ (f_{R4})) [MPa],
- h_{sp} výška betónového prierezu v mieste zárezu [mm],
- b je šírka betónového prierezu [mm],
- l je statické rozpätie skúšanej vzorky [mm].

Lomová energia

Hodnotu lomovej energie G_F je možné podľa Hillerborga [18] a RILEM [19] určiť podľa vzťahu (2-3) nasledovne:

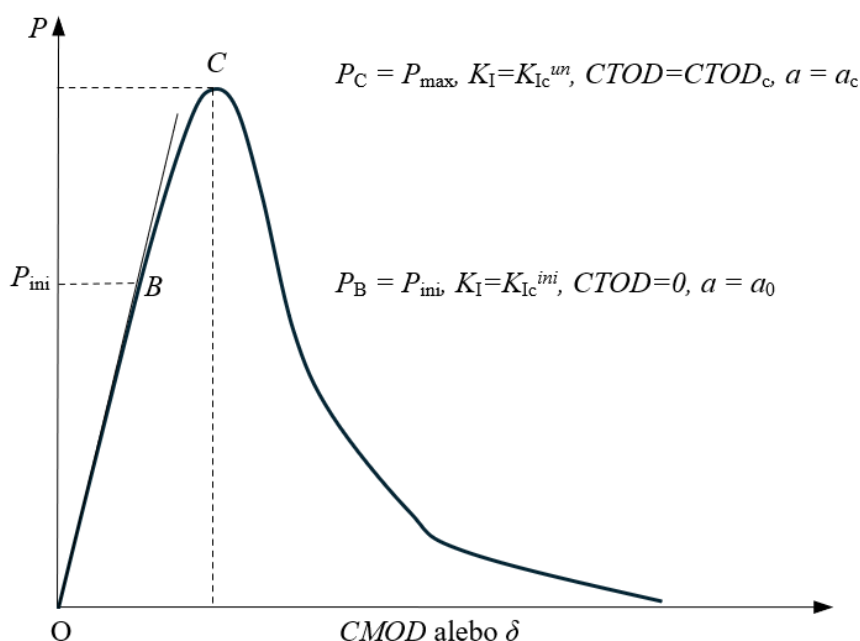
$$G_F = \frac{W_F + W_S}{A_{lig}} \quad (1-3)$$

kde:

- W_F je plocha pod krivkou v závislosti F - $CMOD$ [N.mm],
- W_S práca gravitačných síl, s ktorou sa uvažuje len pri veľmi hmotných telesách, pričom za hmotné teleso je možné považovať vzorku, ktorá svojou vlastnou tiažou spôsobí výraznú zmenu $CMOD$ [N.mm],
- A_{lig} plocha ligamentu (betónového prierezu nad zárezom) [mm²].

Model Dvojitě-K

V roku 1999 bol navrhnutý výskumnou skupinou okolo Reinhardt a Xu [20] nový aproximatívny model Dvojité-K. Na Obr. 2-2 je zobrazená výsledná krivka závislosti P - $CMOD$ resp. P - δ , ktorú je možné získať z lomovej trojbodovej skúšky s ohybom, pričom v strede rozpätia vzorky je vytvorený koncentrátor napätí. Medzi bodmi B a C je pozorovateľná odchýlka dotyčnice od počiatkovej dotyčnice (vychádzajúcej z bodu O). Je známe, že bod B predstavuje vznik FPZ a začínajú sa objavovať mikrotrhliny v betónovej matrici. Medzi bodmi O a B sa teleso správa lineárne pružne a počiatková hĺbka zárezu nerastie. S týmto predpokladom možno uvažovať, že zaťaženie pôsobiace v bode B je iniciačné s označením P_{ini} a príslušný faktor intenzity napätí je nazývaný ako počiatková lomová húževnatosť materiálu K_{Ic}^{ini} . Najviac nestabilný stav je dosiahnutý v bode C, v ktorom pôsobí maximálne zaznamenané zaťaženie P_{max} , v ktorom dĺžka trhliny a a roztvorenie kĺčka trhliny ($CTOD$) dosahujú kritických hodnôt a_c , resp. $CTOD_c$. Názov modelu Dvojité-K vzniklo z toho, že výsledkom analýzy vstupov sú výsledky hodnoty iniciačnej lomovej húževnatosti K_{Ic}^{ini} a (celkovej) lomovej húževnatosti K_{Ic}^{un} , teda dvoch lomových húževnatostí. Na Obr. 2-2 [21] je uvedené grafické znázornenie horeuvedeného popisu bodov.



Obr.2-2: Grafické znázornenie charakteristických bodov pre model Dvojité-K [21]

1.4. Šmyková odolnosť železobetónových prvkov bez šmykovej výstuže podľa výpočtových postupov

V tejto kapitole sú uvedené normy a smernice, ktoré poskytujú predikciu šmykovej odolnosti prvkov bez šmykovej výstuže na základe lomovo-mechanických parametrov vláknobetónu. Za tieto parametre možno považovať pevnosť betónu v tlaku, pevnosť betónu v ťahu, a taktiež aj hodnoty

reziduálnych napätí, získané priamo v experimentálnom skúmaní alebo určené pomocou empirických vzťahov.

MC 2010 [22]

$$V_{Rd,F} = \left\{ \frac{0,18}{\gamma_c} \cdot k \cdot \left[100 \cdot \rho_l \cdot \left(1 + 7,5 \cdot \frac{f_{Ftuk}}{f_{ctk}} \right) \cdot f_{ck} \right]^{\frac{1}{3}} + 0,15 \cdot \sigma_{cp} \right\} \cdot b_w \cdot d \quad (1-4)$$

kde:

γ_c je parciálny súčiniteľ pre betón bez vlákien [-],
 k súčiniteľ zohľadňujúci rozmerový efekt vypočítaný nasledovne [-]:

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0 \quad (1-5)$$

d účinná výška prierezu [mm],
 ρ_l stupeň vystuženia pozdĺžnou výstužou vypočítaný nasledovne:

$$\rho_l = \frac{A_{sl}}{b_w \cdot d} [-], \quad (1-6)$$

A_{sl} prierezová plocha pozdĺžnej výstuže, ktorej prúty sú účinne zakotvené do betónu [mm²],
 f_{Ftuk} charakteristická hodnota reziduálneho napätia pre otvorenie trhliny $w_u = 1,5$ mm [MPa],
 f_{ctk} charakteristická hodnota ťahovej pevnosti pre betón bez vlákien [MPa],
 f_{ck} charakteristická hodnota valcovej pevnosti betónu [MPa],
 σ_{cp} priemerná hodnota normálového napätia pôsobiaca na betónový prierez z osovej sily od predpätia [MPa],
 b_w najmenšia šírka prierezu v jeho ťahanej oblasti [mm].

MC 2020 – II. úroveň aproximácie [23]

II. úroveň aproximácie ModelCodu 2020 platí pre prvky, ktoré majú efektívnu šmykový výšku z_v menšiu ako 800 mm, pričom je možné šmykovú výšku z_v určiť podľa vzťahu (1-7) ako:

$$z_v = 0,9 \cdot d \quad (1-7)$$

Návrhová šmyková odolnosť nosného prvku bez šmykovej výstuže sa určí podľa (2-8) nasledovne:

$$V_{Rd} = V_{Rd,c} + V_{Rd,FRC} \quad (1-8)$$

kde:

- V_{Rd} je návrhová hodnota šmykovej odolnosti [kN],
 $V_{Rd,c}$ návrhová hodnota príspevku betónu na šmykovú odolnosť prvku [kN],
 $V_{Rd,FRC}$ návrhová hodnota príspevku reziduálnej ťahovej pevnosti súvisiaca s vláknami [kN].

Pričom:

$$V_{Rd,c} = k_{v,FRC} \cdot \frac{\sqrt{f_{ck}}}{\gamma_c} \cdot z_v \cdot b_w \quad (1-9)$$

Pre prvky s efektívnou šmykovou výškou $z_v \leq 800$ mm nesmie byť hodnota $\sqrt{f_{ck}}$ väčšia ako 8 $\sqrt{\text{MPa}}$. Pokiaľ je táto hodnota výpočtovo prekročená, volí sa hodnota 8 $\sqrt{\text{MPa}}$.

$$z_v = 0,9 \cdot d \quad (1-10)$$

$$V_{Rd,FRC} = \frac{k_s \cdot f_{FTU}}{\gamma_F} \cdot \cot \theta_F \cdot z_v \cdot b_w \quad (1-11)$$

$$f_{FTU} = \frac{f_{R3k}}{3} \quad (1-12)$$

kde:

- f_{ck} je charakteristická hodnota valcovej pevnosti betónu v tlaku [MPa],
 f_{FTU} charakteristická hodnota ťahovej pevnosti vláknotetónu určená z ťahovej skúšky (namáhanie tzv. psej kosti centrickým ťahom), možno ju určiť aj pomocou empirických vzťahov [MPa],
 k_s súčiniteľ s hodnotou 0,64,
 θ_F sklon tlakového poľa vo vláknotetóne [°].

II. Úroveň aproximácie definuje nasledovné vzťahy pre návrh a posúdenie šmykovej odolnosti:

$$k_{v,FRC} = \frac{0,4}{(1+1500 \cdot \varepsilon_x) + \zeta} \cdot \frac{1300}{1000 + k_{dg} \cdot z_v} \quad (1-13)$$

$$\zeta = (20 - 14000 \cdot \varepsilon_x) \frac{f_{FTU}}{f_{ck}} \geq 0 \quad (1-14)$$

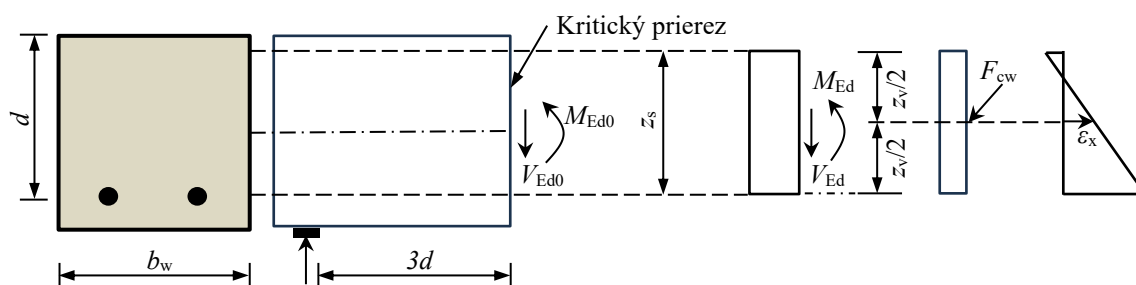
$$k_{dg} = \frac{32}{16 + d_g} \geq 0,75 \quad (1-15)$$

$$\theta = 29^\circ + 7000 \varepsilon_x \quad (1-15)$$

kde:

- d_g veľkosť maximálneho zrna kameniva [mm].

Šírka trhlín, ktoré vplyvajú na zaklinenie kameniva a príspevok vlákien zaistujúcich ťahovú odolnosť súvisia s pozdĺžnym pretvorením v strede výšky prierezu prvku ε_x . Vzťah (1-16) opisuje výpočet pretvorenia v strede výšky prierezu prvku ε_x . Grafické vysvetlenie významu ε_x je zobrazené na Obr. 1-3 [23]. Kritické prierezy pre výpočet ε_x sa nachádzajú v mieste najväčšej hodnoty ohybového momentu (v pôsobisku zaťaženia).



Obr. 1-3: Schéma pre vysvetlenie pojmov a označení [23]

$$\varepsilon_x = \frac{1}{2 \cdot E_s \cdot A_{sl}} \cdot \left(\frac{M_{Ed}}{z_v} + V_{Ed} \cdot \cot \theta \right) \geq 0 \quad (1-16)$$

kde:

M_{Ed}	je	návrhová hodnota ohybového momentu v kritickom reze [N.m],
V_{Ed}		návrhová hodnota šmykovej sily v priečnom reze [N],
θ		sklon šmykovej trhliny, pre prvotný odhad $\cot \theta = 2,0$,
E_s		hodnota modulu pružnosti pozdĺžnej výstuže [MPa],
A_{sl}		prieřezová plocha pozdĺžnej výstuže [mm ²].

EC2_1G [24]

$$V_{Rd,c} = \left[C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} \right] \cdot b_w \cdot d \quad (1-17)$$

kde:

$$C_{Rd,c} \text{ je } C_{Rd,c} = \frac{0,18 \text{ MPa}}{\gamma_c} \quad (1-18)$$

EC2_2G [25]

$$\tau_{Rd,cF} = \eta_{cF} \cdot \tau_{Rd,c} + \eta_F \cdot f_{Ftud} \geq \eta_{cF} \cdot \tau_{Rd,c,min} + \eta_F \cdot f_{Ftud} \quad (1-19)$$

kde:

$\tau_{Rd,cF}$	je	šmyková odolnosť vláknotetónového nosného prvku bez šmykovej výstuže [MPa],
$\tau_{Rd,c}$		šmyková odolnosť bez šmykovej výstuže [MPa], ktorá je definovaná vzťahom:

$$\tau_{Rd,c} = \frac{0,66}{\gamma_v} \cdot \left(100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck} \cdot \frac{d_{dg}}{d} \right)^{\frac{1}{3}} \geq \tau_{Rd,c,min} \quad (1-20)$$

kde:

d_{dg}	parameter zohľadňujúci druh betónu a vlastnosti jeho kameniva (16 mm) [mm],
γ_v	parciálny súčiniteľ pre odolnosť v šmyku a v pretlačení bez šmykovej výstuže,
$\tau_{Rd,c,min}$	minimálna šmyková odolnosť, ktorá dovoľuje vyhnúť sa podrobnému overovaniu šmyku [MPa],

η_F súčiniteľ s hodnotou 1,0.

Pričom hodnota súčiniteľa η_{cF} sa určí podľa vzťahu (1-21):

$$\eta_{cF} = \max\{1, 2 - 0,5 \cdot f_{Ftuk}; 0,4\} \quad (1-21)$$

f_{Ftud} je návrhová hodnota reziduálnej ťahová pevnosti pri zohľadnení orientácie vlákien [MPa], ktorá sa určuje nasledovne:

$$f_{Ftu,ef} = \kappa_O \cdot \kappa_G \cdot 0,33 \cdot f_{R3k} \quad (1-22)$$

$$f_{Ftud} = \frac{f_{Ftu,ef}}{\gamma_{SF}} \quad (1-23)$$

kde:

f_{Ftuk} charakteristická hodnota reziduálnej ťahovej pevnosti pri zohľadnení orientácie vlákien [MPa].

$f_{Ftu,ef}$ efektívna hodnota reziduálnej pevnosti betónu v ťahu [MPa],

γ_{SF} parciálny súčiniteľ pre oceľové vlákna,

κ_O súčiniteľ zohľadňujúci orientáciu vlákien (0,5),

κ_G vplyv veľkosti prvku na koeficient variácie určený podľa vzťahu:

$$\kappa_G = 1,0 + A_{ct} \cdot 0,5 \leq 1,5 \quad (1-24)$$

f_{Ftud} je návrhová hodnota reziduálnej ťahovej pevnosti pri zohľadnení orientácie vlákien [MPa], ktorá sa určuje nasledovne:

$$f_{Ftu,ef} = \kappa_O \cdot \kappa_G \cdot 0,33 \cdot f_{R3k} \quad (1-25)$$

$$f_{Ftud} = \frac{f_{Ftu,ef}}{\gamma_{SF}} \quad (1-26)$$

2. Ciele

Hlavné ciele dizertačnej práce sú:

- Skúmanie vplyvu recyklovaných a priemyselne vyrábaných oceľových vlákien na lomovo-mechanické vlastnosti betónu.
- Analyzovať lomovo-mechanické vlastnosti betónu použitím pokročilého softvérového vybavenia stavebnej mechaniky.
- Skúmanie šmykovej odolnosti železobetónových fragmentov vyrobených z betónu s dávkou recyklovaných oceľových vlákien a ich porovnanie so šmykovou odolnosťou železobetónových nosníkov z priemyselne vyrábaných vlákien.
- Analyzovať vznik a rozvoj trhlin na prvkoch s využitím DIC metódy.
- Porovnanie experimentálne získaných hodnôt šmykovej odolnosti prvku s podielom recyklovaných a priemyselne vyrábaných oceľových vlákien s hodnotami šmykovej odolnosti podľa rôznych normových predpisov.

3. Metodika

3.1. Výroba vzoriek a železobetónových fragmentov

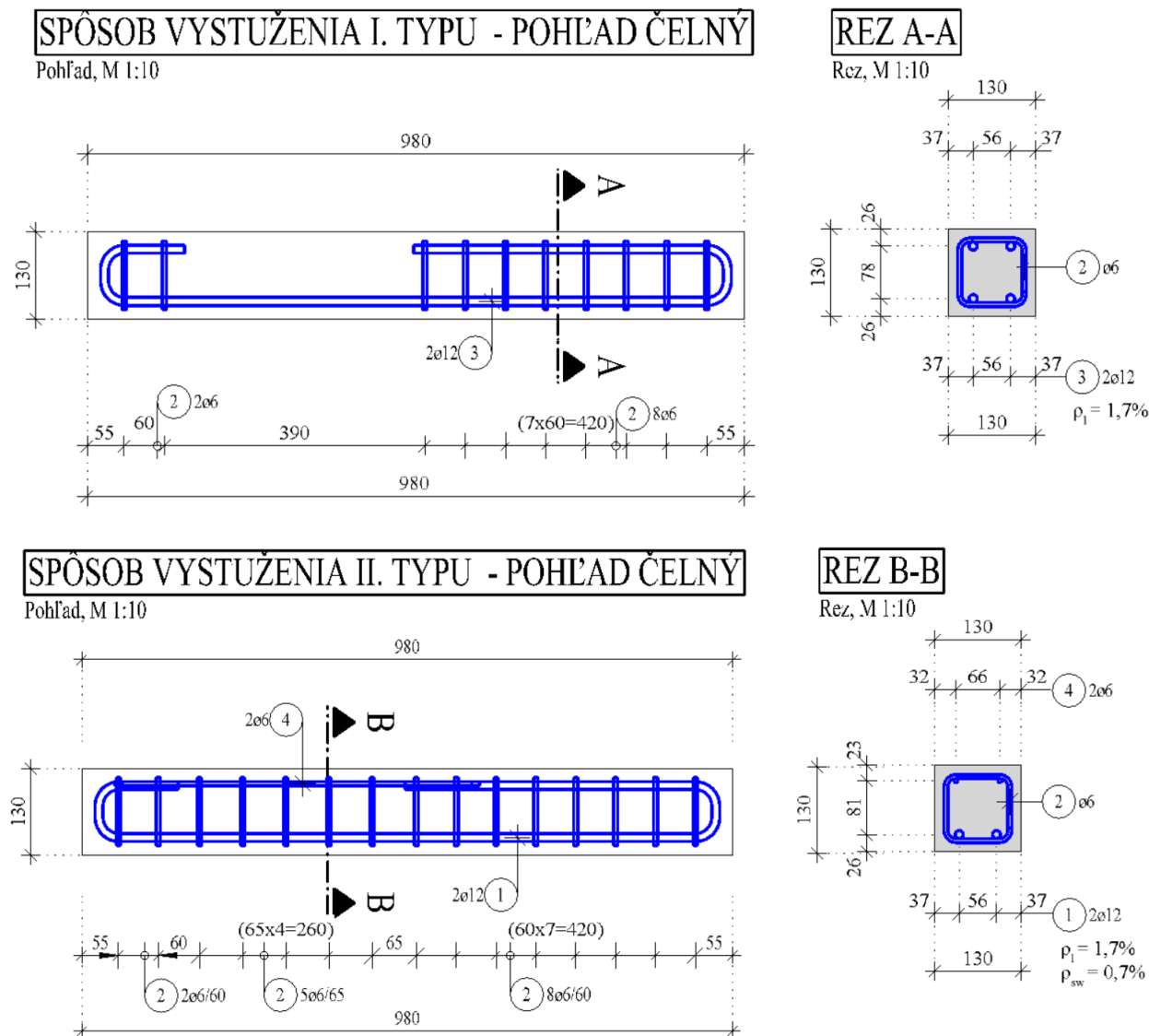
Betónové vzorky použité pre materiálový výskum s uvedené v Tab. 3-1. Miešanie betónových zmesí bolo realizované v gravitačnej miešačke. Pred začiatkom betonáže bol povrch bubna miešačky zvlhčený a prebytočná voda bola z bubna miešačky odstránená. Na začiatku miešania boli do bubna vložené suché zložky – kamenivo a cement, ktoré boli riadne premiešané. Po premiešaní suchých zložiek bola pridaná polovičná dávka vody, ktorá sa premiešala so suchými zložkami a následne bola pridaná zvyšná dávka vody spolu s plastifikačnou prísadou. Po pridaní zvyšnej dávky vody prebiehalo miešanie 5 minút. Po uplynutí tohto času boli za súčasného miešania betónovej zmesi pridané vlákna potrebnej dávky a následne miešanie pokračovalo ďalšie 4 minúty. Po ukončení miešania bola realizovaná skúška sadnutia kužeľa v súlade s normou STN EN 12350-2 [26]. Po vykonaní skúšky bol betón zo skúšky sadnutia kužeľa vrátený späť do miešačky a počas krátkej doby opätovne premiešaný. Betón bol do foriem pre vzorky na materiálové skúšky ukladán po vrstvách, pričom každá vrstva bola riadne zhutnená na vibračnom stole. Betón bol tiež ukladán do debnenia železobetónových fragmentov dosiek a zhutňovaný po vrstvách pomocou ponorného vibrátora

Tab. 3-2: Receptúra betónových zmesí

Vzorka	Rozmer	Skúška (počet ks na receptúru)
Kocka	150x150x150 mm	Pevnosť v tlaku (3), pevnosť v priečnom ťahu (3)
Valec	Priemer 150 mm, dĺžka 300 mm	Pevnosť v tlaku (3)
Hranol	100x100x400 mm	Modul pružnosti a pevnosť v tlaku (3), lineárne zmrašťovanie (3)
Hranol so zárezom	150x150x550 mm	Skúška ohybom a $F-CMOD$ (4)
Železobetónový fragment	130x130x980 mm	Skúmanie šmykovej odolnosti (4)

Železobetónové fragmenty pozostávajú z viazanej betonárskej výstuže. Spôsob vystuženia I. typu bol zvolený tak, aby predurčoval šmykový model zlyhania železobetónového fragmentu, kým typ vystuženia B definuje ohybový model porušenia (vystuženie strmeňmi zabezpečuje dostatočnú šmykovú odolnosť). V oboch typoch vystuženia bolo zvolené krytie pozdĺžnej výstuže 20 mm. Stupeň vystuženia pozdĺžnou výstužou je pri oboch typoch vystuženia $\rho_l = 1,7\%$.

V záujmovej oblasti železobetónových fragmentov s vystužením II. typu bol stupeň vystuženia šmykovou výstužou $\rho_{sw} = 0,7\%$. Vystuženie fragmentov je uvedené na Obr. 3-1.



Obr.3-1: Spôsoby vystuženia železobetónových fragmentov

Metodika označovania jednotlivých receptúr v Tab. 3-2 vychádzala z dávky vlákien pridanej dodatočne do mernej jednotky hotového betónu, ktorá bola vyjadrená číselným označením 0 – receptúra bez vlákien, 2 – receptúra s dávkou vlákien 20 kg na 1 m³ betónu, 4 – receptúra s dávkou vlákien 40 kg na 1m³ betónu) a typu oceľového vlákna (R – recyklované oceľové vlákno, A – vlákno od spoločnosti ArcelorMittal, B – vlákno Dramix 3D, C – vlákno Dramix 4D, viď. Obr. 3-2). Výber rozmerových variantov priemyselne vyrobených vlákien (typ A, B a C) bol podmienený priemerným štíhlostným pomerom l/d_f použitých recyklovaných oceľových vlákien. Dôvodom tohto výberu bola snaha o dosiahnutie podobnej spracovateľnosti čerstvého betónu. Voľba receptúry betónu bola podmienená hodnotou sadnutia kužeľa,

ktorá by zabezpečila dostatočnú spracovateľnosť vláknobetónu a pevnosť betónu v tlaku a v súdržnosti s vláknami. Samotné vlákna sú pridávané do hotovej objemovej jednotky betónovej zmesi dodatočne. Tento spôsob dávkovania simuluje skutočnú realizáciu betonárskych prác, kde sú vlákna dávkané do betónu až na samotnej stavbe. Je potrebné poznamenať, že receptúra ST bola použitá pri betonáži železobetónových fragmentov s vystužením II. typu.

Tab. 3-2: Receptúra betónových zmesí

Receptúra	Cement CEM II/A- LL 42.5 R [kg/m ³]	Voda [l/m ³]	Kamenivo			Plastifikátor Stachement 2014 [l/m ³]	Vlákna [kg/m ³]
			0-4 [kg/m ³]	4-8 [kg/m ³]	8-16 [kg/m ³]		
S0						1,75	0
2R						1,75	20
4R						1,75	40
2A						1,75	20
4A	350	165	1010	320	540	1,75	40
2B						1,75	20
4B						1,93	40
2C						1,75	20
4C						2,48	40
ST						1,75	0

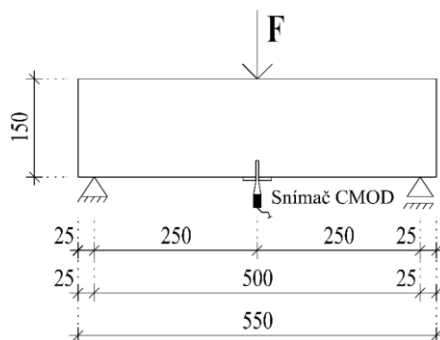


Obr. 3-2: Typy použitých vlákien

3.2. Skúšanie betónových vzoriek a železobetónových fragmentov

Experimentálne overovanie betónových vzoriek

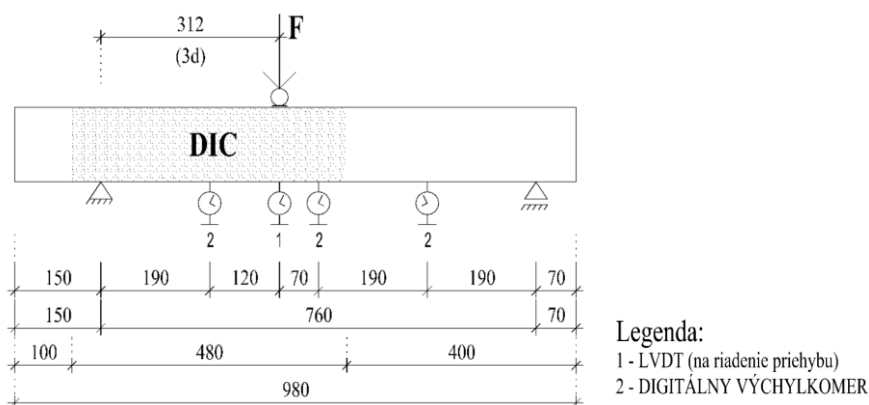
Skúška spracovateľnosti a skúšky mechanických vlastností zatvrdnutého betónu boli vykonané v súlade s technickými normami. Vzorka a experimentálna zostava pre skúšku ohybom zodpovedala požiadavkám normy STN EN 14651+A1 [27]. Vzorky boli zaťažované prírastkom $CMOD$, do hodnoty $CMOD = 0,5 \text{ mm}$ bola rýchlosť $CMOD$ $0,7 \text{ } \mu\text{m/s}$, a po prekročení tejto hodnoty bol časový prírastok $CMOD = 1,5 \text{ } \mu\text{m/s}$. Uloženie vzorky so zárezom do skúšobnej zostavy je zobrazené na Obr3-3. V prípade ak je vzorka pripravená správne, nad koncentrátorom napätí sa rozvíja len jedna viditeľná trhlinka, pričom konečné štádium skúšania je obmedzené rozsahom merania snímača roztvorenia čela trhliny alebo krehkým lomom.



Obr. 3-3: Zaťažovacia zostava pre skúšky ohybom

Experimentálne overovanie železobetónových fragmentov

Experimentálna zostava na skúšanie šmykovej odolnosti železobetónových fragmentov je zobrazená na Obr. 3-4. Priebeh skúšky bol riadený prírastkom prihybu v mieste pod silou pomocou LVDT snímača (angl. linear variable differential transformer). Časový prírastok prihybu pod silou F bol $3 \text{ } \mu\text{m/s}$. V čase odčítavania hodnôt z výchylkomerov a značenia trhlín bol prírastok prihybu pod silou F $0,3 \text{ } \mu\text{m/s}$.



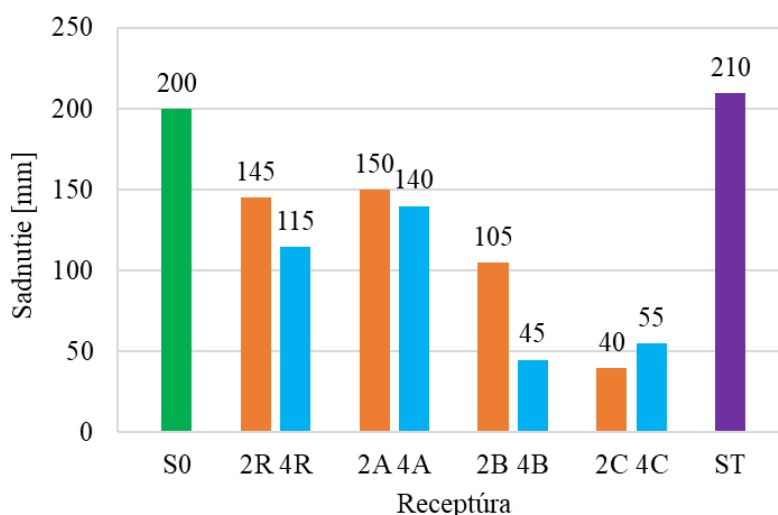
Obr.3-4: Zaťažovacia zostava pre experimentálne overovanie železobetónových fragmentov

4. Výsledky práce a diskusia

4.1. Materiálový výskum

Spracovateľnosť

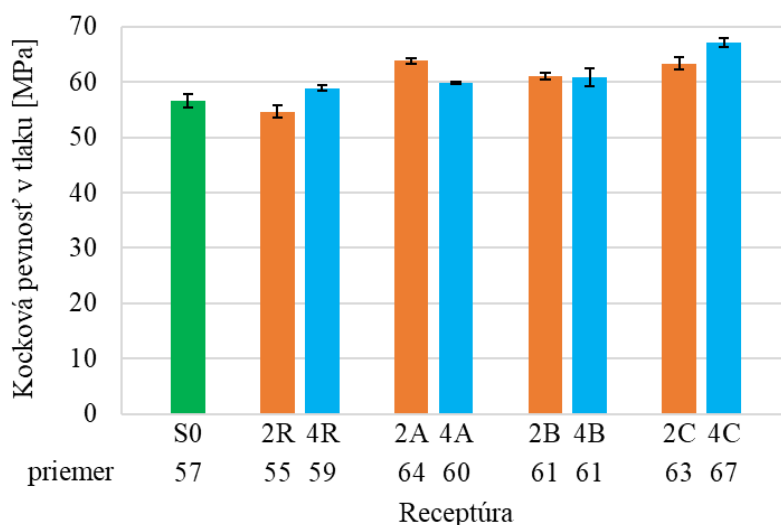
Pri porovnaní spracovateľnosti receptúr s vláknami typu B a C, recyklované vlákna typu R výrazne menej zhoršujú spracovateľnosť čerstvého betónu. Z tohto pozorovania je možné stanoviť záver, že použitie kratších vlákien s priemyselne upravovanými zakončeniami vlákien zhoršujú spracovateľnosť viac ako dlhé vlákna s priemyselne upravovaným zakončením resp. recyklované vlákna bez upravovaného zakončenia. Výsledky spracovateľnosti sú uvedené na Obr. 4-1.



Obr.4-1: Spracovateľnosť čerstvého betónu

Kocková pevnosť betónu v tlaku

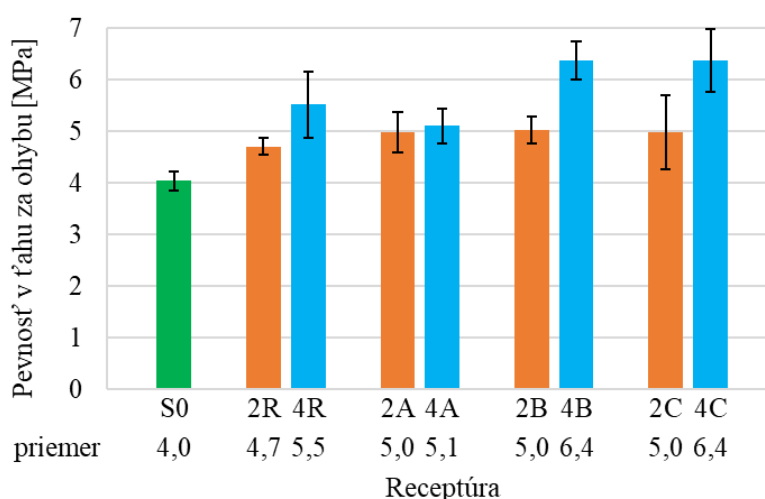
V prípade vláknobetónu s dávkou vlákien 40 kg na m³ pri receptúre 4R bola priemerná kocková pevnosť v tlaku betónu 58,9 MPa. Všetky skúmané receptúry (okrem 2R s poklesom pevnosti 3,6%) vykazovali vyššiu pevnosť v tlaku ako referenčný betón bez vlákien s označením S0. Podľa výsledkov kockovej tlakovej pevnosti dosahovali receptúry s označením R najnižšie tlakové pevnosti z pomedzi vláknobetónov. Na základe získaných výsledkov je možné konštatovať, že výberová smerodajná odchýlka (St. Dev.) a variačný koeficient (CoV) dosahujú pomerne nízke hodnoty, čo znamená malý rozptyl dielčích výsledkov. Priemerné výsledné hodnoty kockovej pevnosti betónu v tlaku sú uvedené na Obr. 4-2.



Obr.4-2: Výsledky kockovej pevnosti betónu v tlaku

Pevnosť betónu v ťahu za ohybu

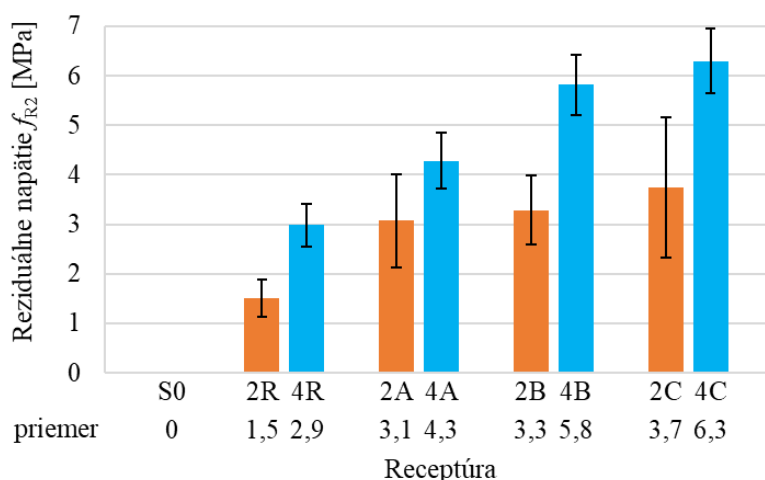
Z uvedených výsledkov $f_{ct,fl}$ na Obr 4-3 možno konštatovať, že s pridaním vlákien do betónu sa v každej skúmanej receptúre zvýšila priemerná hodnota $f_{ctm,fl}$. Priemerná hodnota $f_{ctm,fl}$ v prípade referenčnej receptúry S0 bola 4,0 MPa. Najvyššie hodnoty pevnosti boli zaznamenané pri receptúre 4C s pevnosťou 6,4 MPa (+57,9% v porovnaní s S0). V prípade dávky RSF 20 kg na $1m^3$ betónu boli priemerné hodnoty $f_{ctm,fl}$ podobné ako v prípade výsledkov z receptúr s dávkou ISF. Táto konzistencia výsledkov bola eliminovaná v prípade betónov s dávkovaním vlákien 40 kg na $1m^3$ betónu, kde $f_{ctm,fl}$ dosahovalo najnižšie hodnoty pri receptúrach 4A a 4R.



4-3: Výsledky pevnosti v ťahu za ohybu

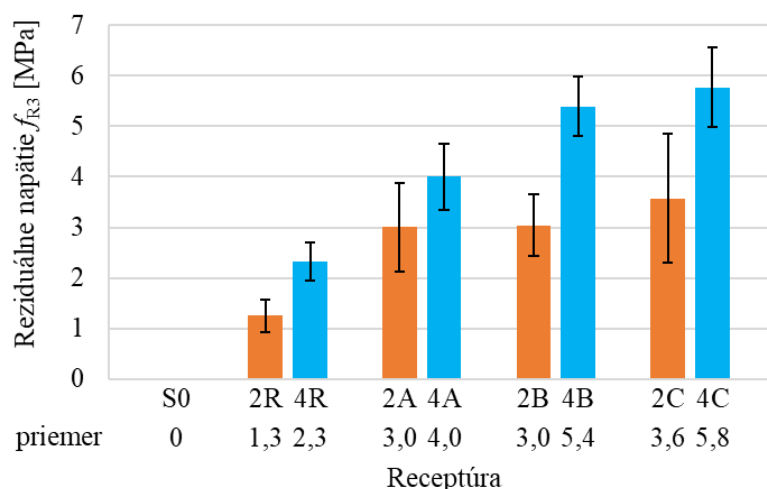
Reziduálne napätia

Reziduálne napätia f_{R2} (určené pri $CMOD = 1,5 \text{ mm}$) sú potrebné na predikciu Šmykovej odolnosti podľa výpočtového postupu MC 2010. V prípade výsledkov reziduálnych napätí f_{R2} , uvedených na Obr. 4-4, bol pozorovaný trend, kde s narastajúcou dávkou vlákien narastala hodnota reziduálneho napätia. Najnižšie dosiahnuté hodnoty reziduálnych napätí f_{R2} boli v prípade dávkovania vlákien 20 kg na m^3 pri receptúre 2R s hodnotou napätia $1,5 \text{ MPa}$, a najvyššie dosiahnuté reziduálne napätia pri receptúre 2C s hodnotou napätia $3,7 \text{ MPa}$. Výsledky vzoriek pri dávkovaní vlákien 40 kg na m^3 vykazovali pre f_{R2} najnižšie priemerné hodnoty v prípade receptúry 4R s hodnotou napätia $2,9 \text{ MPa}$ a najvyššie priemerné hodnoty pre f_{R2} v prípade receptúry 4C s hodnotou $6,3 \text{ MPa}$. Nakoľko bola v prípade S0 zistená priemerná hodnota $f_{R2} = 0 \text{ MPa}$, nebolo možné realizovať percentuálne porovnanie, pretože delenie nulou nie je možné. Rovnako ako pri reziduálnom napätí f_{R1} , tak aj pri reziduálnom napätí f_{R2} boli najnižšie priemerné hodnoty zaznamenané v prípade receptúr s RSF. Výrazný nárast týchto napätí bol spôsobený zvýšenou schopnosťou vlákien premost'ovať širšie trhliny, a to vďaka optimalizovanému ukončeniu vlákien pomocou ohybov vytvorených v štádiu výroby ISF.



4-4: Výsledky reziduálnych napätí pri $CMOD = 1,5 \text{ mm}$

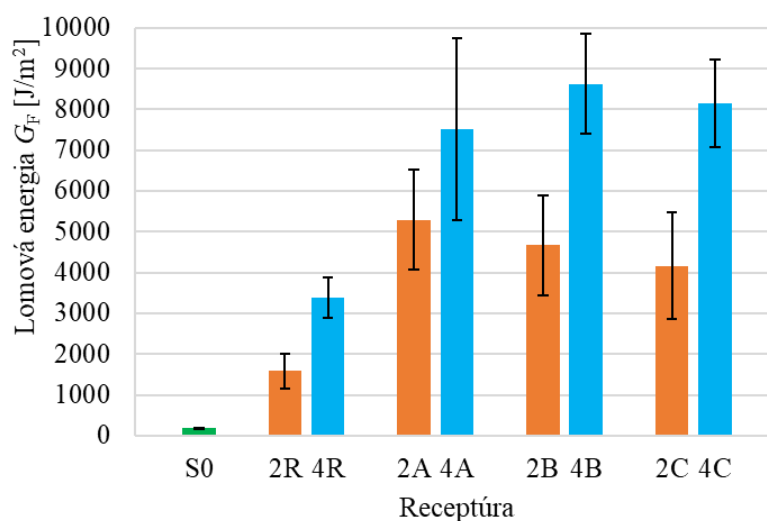
Rovnaké závislosti, ako boli pozorované v prípade reziduálnych napätí f_{R2} boli pozorované aj v prípade reziduálnych napätí f_{R3} (napätie v ohybe pri $CMOD = 2,5 \text{ mm}$) ktoré sú uvedené Na Obr. 4-5. Motiváciou pre skúmanie reziduálnych napätí f_{R3} je možnosť ich využitia vo vzťahov na predikciu šmykovej podľa smernice MC 2020 a normy EC2_2. V prípade priemerných hodnôt f_{R3} boli pri dávke vlákien 20 kg na m^3 zaznamenané najnižšie hodnoty pri receptúre 2R s reziduálnym napätím $1,3 \text{ MPa}$. Najvyššie hodnoty reziduálnych napätí boli zaznamenané pri receptúre 2C s hodnotou $3,6 \text{ MPa}$. Pri dávke vlákien 40 kg na m^3 bola zaznamenaná najnižšia hodnota f_{R3} pri receptúre 4R s hodnotou $2,3 \text{ MPa}$, zatiaľ čo pri receptúre 4C bolo zaznamenané najvyššie reziduálne napätie s hodnotou $5,8 \text{ MPa}$.



4-5: Výsledky reziduálnych napätí pri $CMOD = 2,5$ mm

Lomová energia

Na Obr. 4-6 sú zobrazené priemerné hodnoty lomových energií, ktoré boli určené ako súčet experimentálneho výsledku a extrapolácie závislosti $F-CMOD$. Pojem extrapolácia znamená v danom prípade odhad, resp. napodobnenie priebehov $F-CMOD$ na základe konkrétnych identifikovaných priebehov $F-CMOD$ v 2D FEM softvéry FiCubS Application pre vybrané receptúry. Uvedené hodnoty lomových energií predstavujú súčet lomových energií získaných z experimentálneho testovania a z extrapolácie. Z výsledkov uvedených na Obr. 4-6 možno usúdiť, že s narastajúcou dávkou vlákien v betónovej matrici narastá hodnota lomovej energie. Najnižšie hodnoty $G_{F,avg}$ pri dávkovaní vlákien 40 kg na m^3 zaznamenané pri receptúre 4R s hodnotou $3387,0 \text{ J/m}^2$ (+1720,2% v porovnaní s S0). Najvyššia priemerná hodnota lomovej energie bola zaznamenaná pri receptúre 4B s hodnotou $8619,5 \text{ J/m}^2$ (+4532,3% v porovnaní s S0). Hodnoty štatistických ukazovateľov St.Dev sú priamo úmerné výške hodnôt $G_{F,avg}$. Výnimku predstavuje receptúra 2C, kde hodnota $G_{F,St.Dev.}$, resp. $G_{F,CoV}$ bola $2131,7 \text{ J/m}^2$, resp. 51,2%.

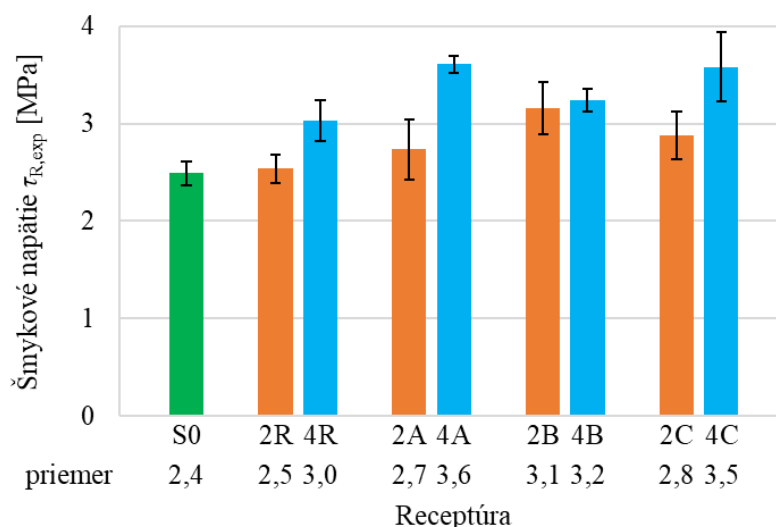


4-5: Výsledky lomových energií

4.2. Šmyková odolnosť železobetónových fragmentov bez šmykovej výstuže

Výsledná šmyková odolnosť

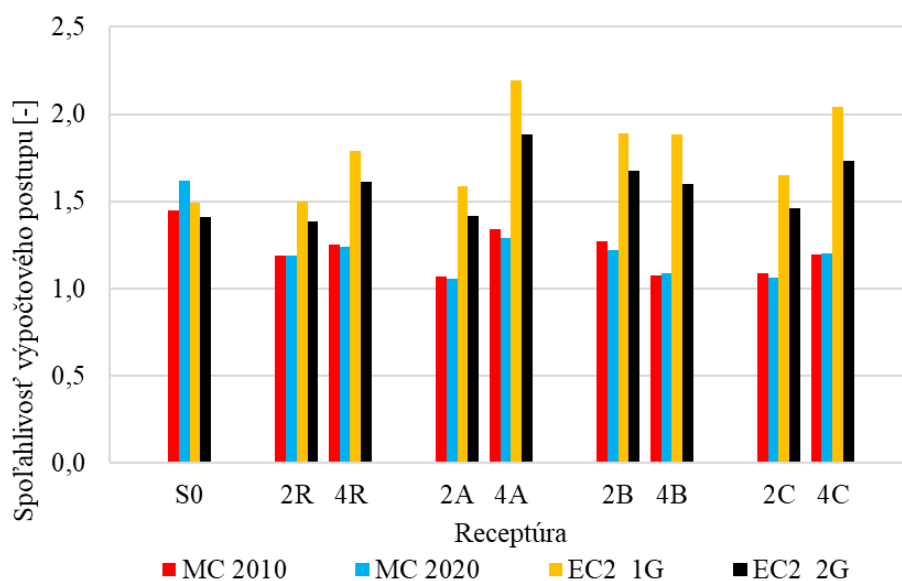
Z analyzovaných výsledkov na Obr. 4-6 vyplynulo, že s rastúcou dávkou vlákien sa zvyšuje aj priemerná hodnota šmykovej sily na medzi porušenia šmykom $V_{R,exp,avg}$, resp. šmykové napätie na medzi porušenia (odteraz šmyková odolnosť) $\tau_{R,exp,avg}$. V prípade vláknotbetónových receptúr s dávkou vlákien 20 kg na m³ bola zaznamenaná najnižšia hodnota priemernej šmykovej sily na medzi porušenia šmykom $V_{R,exp,avg}$ pri receptúre 2R s hodnotou $V_{R,exp,avg}$ ($\tau_{R,exp,avg}$) rovná 32,3 kN (resp. 2,54 MPa), čo predstavuje zmenu $\tau_{R,exp,avg}$ oproti receptúre S0 o +1,7%. Na druhej strane, najvyššia zaznamenaná hodnota $V_{R,exp,avg}$ pri spomínanej dávke vlákien bola pri receptúre 2B s hodnotou 40,6 kN (resp. 3,16 MPa), čo znamená, že zmena $\tau_{R,exp,avg}$ oproti receptúre S0 bola +26,7%. Vláknotbetónové receptúry s dávkou vlákien 40 kg na m³ dosahovali najnižšiu šmykovú silu na medzi porušenia šmykom v prípade receptúry 4R s hodnotou 38,4 kN (3,03 MPa). Najvyššia priemerná hodnota šmykovej sily na medzi porušenia bola zaznamenaná v prípade receptúry 4C s hodnotou $V_{R,exp,avg} = 46,0$ kN (3,58 MPa). Vzhľadom k variabilite rozmerov priečného rezu železobetónového fragmentu neboli najväčšie priemerné hodnoty šmykovej odolnosti $\tau_{R,exp,avg}$ zaznamenané pri receptúre 4C, ako by sa dalo očakávať podľa priemernej hodnoty šmykovej sily na medzi porušenia šmykom $V_{R,exp,avg}$, ale v receptúre 4A s hodnotou $\tau_{R,exp,avg} = 3,61$ MPa, čo predstavovalo zmenu oproti receptúre S0 o +43,6%.



Obr.4-6: Porovnanie hodnôt šmykovej odolnosti železobetónových fragmentov

Predikcia šmykovej odolnosti

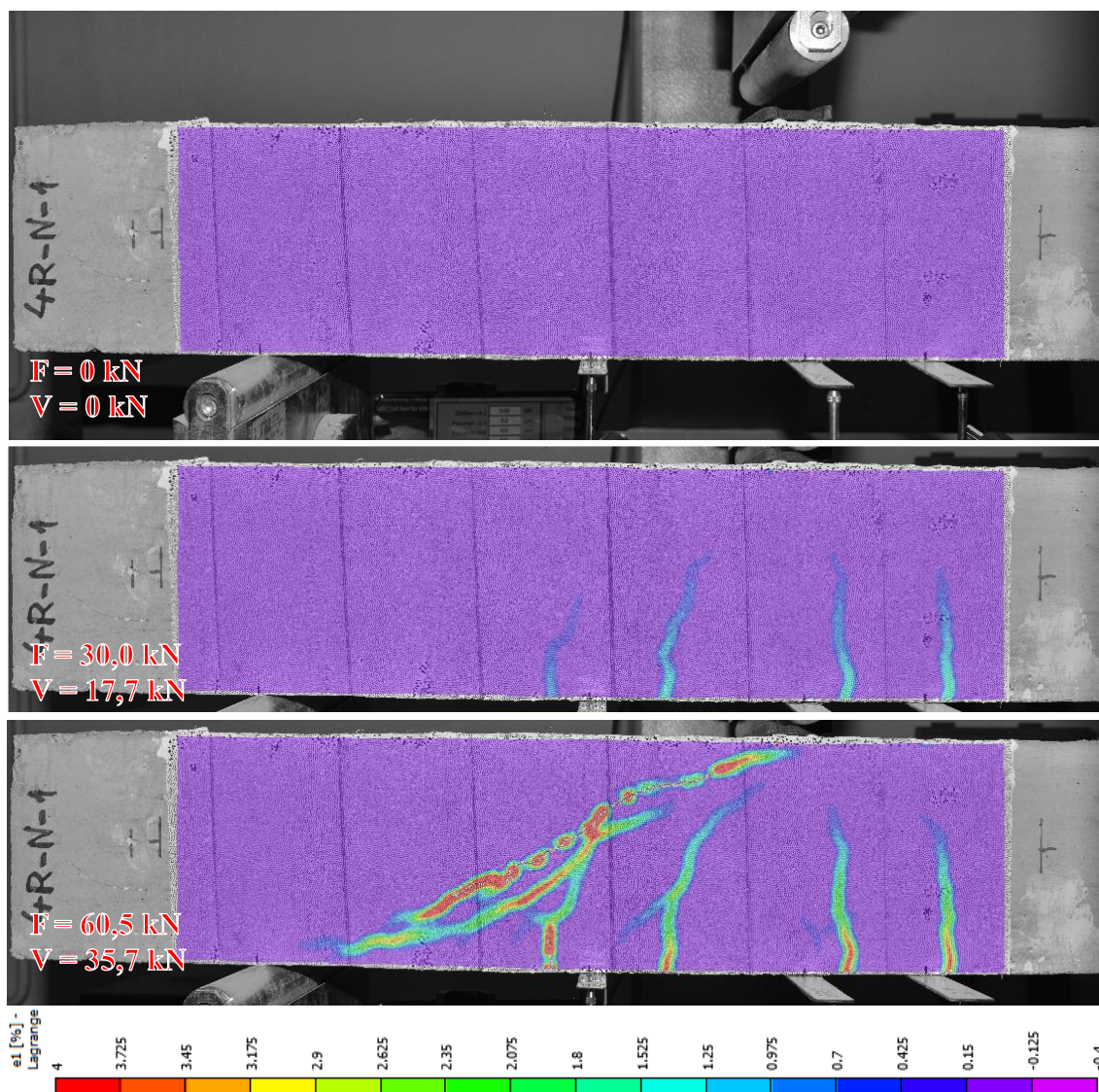
V Tab. 5-25 sú uvedené výsledne priemerné hodnoty šmykovej odolnosti $\tau_{R,exp,avg}$, získané z experimentálneho overovania železobetónových fragmentov a hodnoty $\tau_{R,calc,exp,avg}$, ktoré boli určené prostredníctvom vzťahov na výpočet šmykovej odolnosti prvkov bez šmykovej výstuže uvedených v ModelCode 2010 [22] a ModelCode 2020 [23]. V rámci ModelCode 2020, táto kapitola analyzuje výsledky, ktoré boli vypočítané pomocou II. úrovne aproximácie. Na základe podielu $\tau_{R,exp,avg}/\tau_{R,calc,avg}$ je možno určiť spoľahlivosť pre jednotlivé smernice. Tzn., čím je bezrozmerná hodnota spoľahlivosti nižšia, tým je návrh nosného prvku podľa tejto smernice menej spoľahlivý, pričom musí zároveň platiť, že prvok je spoľahlivý vtedy, ak je hodnota podielu $\tau_{R,exp,avg}/\tau_{R,calc,avg} \geq 1,0$. Zo spomínanej tabuľky vyplýva, že bezpečnejší je ModelCode 2010 nakoľko hodnoty spoľahlivosti presahovali hodnotu 1,0 pri všetkých skúmaných receptúrach, a zároveň boli hodnoty spoľahlivosti vyššie ako v prípade II aproximácie MC 2020 (s výnimkou receptúry bez vlákien S0). Najvyššia spoľahlivosť bola zistená z oboch verzií ModelCode-ov pri receptúre S0 s hodnotou spoľahlivosti 1,45 resp. 1,62. V prípade vláknobetónových receptúr bola zistená najväčšia spoľahlivosť pri receptúre 4A s hodnotou 1,34, resp. 1,29 a najmenšia spoľahlivosť pri receptúre 2A s hodnotou 1,07, resp. 1,06. Všetky hodnoty spoľahlivosti dosiahli v prípade použitia smerníc ModelCode 2010 a ModelCode 2020 hodnôt väčších ako 1,0, preto je možno považovať obe smernice za bezpečné pre návrh vláknobetónových železobetónových fragmentov bez šmykovej výstuže.



Obr.4-7: Porovnanie spoľahlivosti železobetónových fragmentov na šmyk podľa noriem

DIC analýza

Na Obr. 4-8 a Obr. 4-9 sú zobrazené grafické výsledky hlavných pretvorení ε_1 na 2D ploche referenčných železobetónových fragmentov z receptúry 4R a 4C. Hlavnou úlohou týchto výsledkov je porovnať vývoj trhlín na železobetónovom fragmente. V DIC analýze predstavovala prvá snímka, na ktorej bol železobetónový fragment bez pôsobiaceho zaťaženia referenčné štádium. Druhá v poradí prezentovaná snímka reprezentuje stav, pri ktorom sa hodnota aplikovaného zaťaženia rovnala približne polovičnej hodnote maximálneho zaťaženia pri zlyhaní $F_{\max}$, resp. polovici z maximálnej hodnoty sily, pri ktorej softvér VIC 2D bol schopný spracovať obrazové dáta. Tretia snímka v poradí predstavovala stav, pri ktorom bolo dosiahnuté maximálne zaťaženie pri zlyhaní $F_{\max}$, resp. zodpovedal maximálnej hodnote sily, pri ktorej softvér VIC 2D bol schopný spracovať obrazové dáta. Prvá snímka v poradí predstavuje hodnoty pomerného otvorenia trhliny w a druhá snímka predstavuje hodnoty pomerného preklzu trhliny s . Z grafických výstupov DIC analýzy vyplýva, že pri polovičnej hodnote $F_{\max}$ nevznikali šikmé šmykové trhliny, s výnimkou železobetónového fragmentu s označením 4C- N-2, pričom táto trhlina mala v tomto štádiu zaťažovania taký veľký sklon, že nesmerovala k najbližšej podpere. Pri tomto štádiu zaťažovania boli v pokročilom štádiu rozvinuté ohybové trhliny. Horizontálna vzdialenosť medzi ohybovými trhlínami bola zmeraná pomocou meracích nástrojov v softvéri VIC 2D.



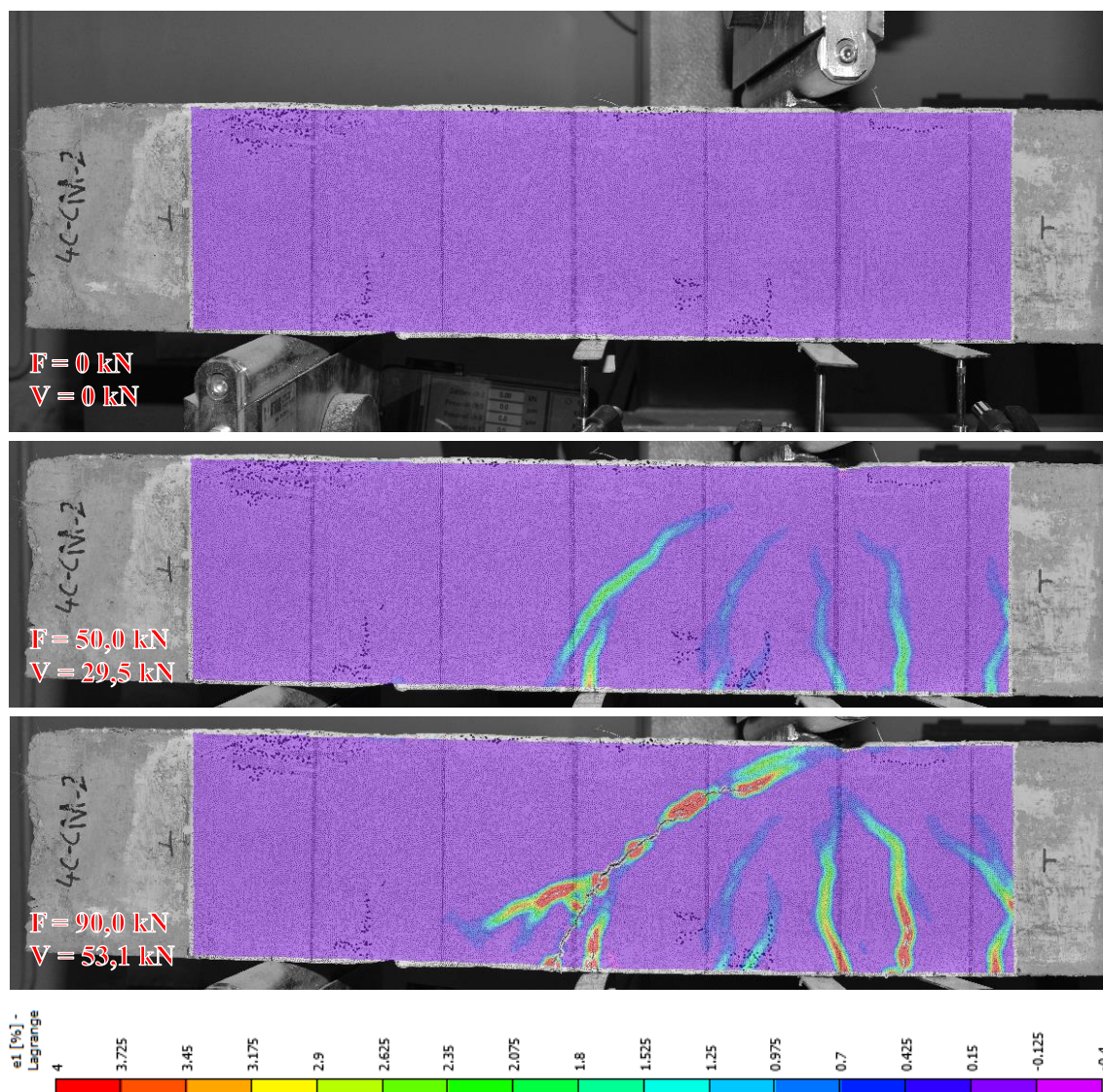
Kinematika
pomerného
otvorenia
trhliny w



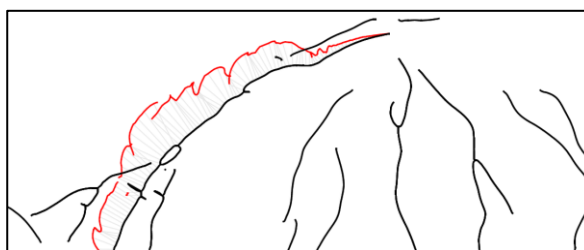
Kinematika
pomerného
preklzu
trhliny s



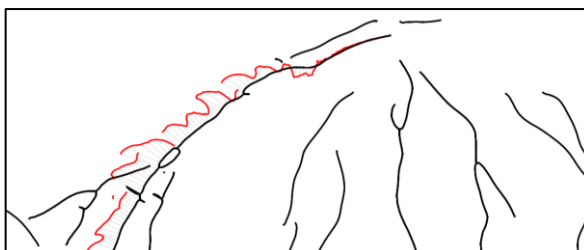
Obr.4-8: Hlavné pretvorenia a kinematika trhlín železobetónových fragmentov z receptúry 4R



Kinematika
pomerného
otvorenia
trhliny w



Kinematika
pomerného
preklzu
trhliny s



Obr.4-9: Hlavné pretvorenia a kinematika trhlín železobetónových fragmentov z receptúry 4C

5. Závery

Výsledky experimentálneho overovania skúšobných telies a železobetónových fragmentov možno stručne vyjadriť v nasledujúcich záveroch:

- S narastajúcou dávkou vlákien klesala spracovateľnosť čerstvého betónu. V prípade receptúr s recyklovanými vláknami bolo pozorované mierne zhoršenie spracovateľnosti, v podobe menšieho sadnutia kužeľa, a to o 42,5% pre 4R a 27,5% pre 2R. Pri receptúrach s ISF typu B a C bolo pozorované výrazné zhoršenie spracovateľnosti (zmena o 77,5% pre 4B, resp. 80% pre 2C).
- S narastajúcou dávkou vlákien bol pozorovaný nárast objemovej hmotnosti. Vplyv pórovitosti vzoriek bol pozorovaný na výsledkoch kockových pevnosti betónu v tlaku.
- Použitie vlákien vo forme rozptýlenej výstuže v betónovej matrici výrazne neovplyvnil hodnotu lineárneho zmrašťovania betónu po 112 dňoch a nebolo možné jednoznačne stanoviť vplyv RSF a ISF na hodnotu lineárneho zmrašťovania. Najnižšia zaznamenaná hodnota lineárneho zmrašťovania bola v prípade receptúry 4R (436 $\mu\text{m}/\text{m}$) a najvyššia hodnota v receptúre 2B (510 $\mu\text{m}/\text{m}$).
- S rastúcou dávkou vlákien sa zvyšovala (okrem typu A) kocková pevnosť betónu v tlaku. Najvyššia zaznamenaná kocková pevnosť v tlaku bola v prípade RSF pri receptúre 58,9 MPa s nárastom oproti S0 o 3,9% a pri receptúre s dávkou ISF s označením 4C s hodnotou 67,1 MPa, čo predstavovalo nárast oproti referenčnej receptúre S0 o 18,4%.
- Hodnoty sečnicového modulu pružnosti korelujú s výsledkami objemovej hmotnosti s výnimkou receptúry 4C, pričom s narastajúcou dávkou vlákien sa zásadne nemenia hodnoty sečnicového modulu pružnosti. Najnižšia hodnota sečnicového modulu pružnosti bola zaznamenaná pri receptúre s dávkou RSF s označením 2R (38,0 GPa) a najvyššia pri receptúre 2C (41,2 GPa). Hodnoty sečnicových modulov pružnosti pri receptúrach s dávkou RSF boli nižšie ako moduly pružnosti pri receptúrach s vláknami typu B a C.
- Hodnoty modulu pružnosti, ktoré boli určené pomocou trojbodovej skúšky ohybom zo závislosti $F-CMOD$ v makre TPBT_G_F sú spoľahlivejšie, ako moduly určené zo závislosti $F-\delta$. Hodnoty modulu pružnosti určené z ohybovej skúšky dosahujú pomerne nízke odchýlky oproti výsledkom sečnicového modulu pružnosti.
- S narastajúcou dávkou vlákien bol pozorovaný pokles pevnosti betónu v priečnom ťahu. Tento trend možno vysvetliť orientáciou vlákien, ktoré prechádzali pozdĺž lomovej plochy. Na základe tejto skutočnosti nemožno pripisovať RSF ani ISF priaznivý alebo nepriaznivý príspevok k pevnosti v priečnom ťahu.
- Pevnosť v ťahu za ohybu narástla priamo úmerne s dávkou pridaných vlákien. Najvyššie hodnoty pevnosti betónu v ťahu za ohybu boli dosiahnuté pri receptúrach s dávkou ISF s označením 4B (+57,8% v porovnaní s S0) a 4C (+57,8% v porovnaní s S0). V prípade receptúr s dávkou RSF bola

zaznamená najväčšia hodnota pevnosti v ťahu za ohybu pri receptúre 4R (+36,6% v porovnaní s S0). Najmenšia pevnosť v ťahu za ohybu bola zaznamenaná pri referenčnej receptúre S0.

- S narastajúcou hodnotou otvorenia čela trhliny (*CMOD*) plynule klesali hodnoty reziduálnej pevnosti. Výnimka sa vyskytla pri receptúrach 2C a 4C, kde bola hodnota reziduálneho napätia pri *CMOD* = 0,5 mm (f_{R1}) menšia ako v prípade reziduálnej pevnosti pri *CMOD* = 1,5 mm (f_{R2}). Tento jav možno vysvetliť tým, že ISF typu C majú vyššiu schopnosť premost'ovať širšie trhliny vďaka vlnkovému ukončeniu vlákien. Takýto nárast reziduálneho napätia nebol pri receptúrach s dávkou RSF prítomný kvôli absencii vlnkového ukončenie vlákien.
- V modeli Dvojitě-K bol analyzovaný pomer K_{Ic}^{ini}/K_{Ic}^{un} , charakterizujúci odolnosť proti stabilnému šíreniu trhliny, lomová húževnatosť K_{Ic}^{un} a modul pružnosti E . Zo získaných výsledkov vyplýva, že rozdiely v modul pružnosti boli minimálne. Naopak, lomová húževnatosť K_{Ic}^{un} s narastajúcou dávkou vlákien mierne narastala (hodnota). Výrazné zlepšenie nastalo v prípade pomeru K_{Ic}^{ini}/K_{Ic}^{un} , ktorého hodnota signifikantne zvýšila s narastajúcou dávkou vlákien ISF, najviac v receptúre 4B (o 201% viac v porovnaní s receptúrou S0). V prípade receptúr s dávkou RSF bol najvyšší percentuálny nárast pozorovaný pri receptúre 4R s hodnotou 178%.
- Efektívna dĺžka trhliny a_e dosahovala podobné priemerné hodnoty v prípade receptúr s vláknami typu R (cca 85 mm) a A (cca 83 mm). V prípade receptúr s vláknami typu B a C s dávkou vlákien 40 kg na m³ narástla aj priemerná hodnota efektívnej dĺžky trhliny a_e na 103,2 mm, resp. 96,6 mm.
- Priemerná hodnota šmykového napätia na medzi porušenia $\tau_{R,exp,avg}$ narastala priamo úmerne s pridanou dávkou vlákien. Najvyššia zaznamenaná hodnota $\tau_{R,exp,avg}$ bola v prípade receptúr z ISF s označením 4A (+44,8%) a 4C (+43,6%), zatiaľ čo pri receptúrach s dávkou RSF bola najvyššia priemerná hodnota $\tau_{u,avg}$ zaznamenaná v prípade referenčnej receptúry 4R (nárast 21,5% v porovnaní s S0).
- S rastúcou dávkou vlákien bola pozorovaná vyššia duktilita v závislosti $F-\delta_{skut}$, ktorá bola určená použitím celkovej lomovej práce W_{total} . Najvyššia hodnota W_{total} bola zaznamenaná pri železobetónových fragmentoch bez šmykovej výstuže, ktoré boli vyrobené z receptúry s dávkou ISF s označením 4C (+484,6%) s v prípade receptúr s RSF pri receptúre 4R s nárastom 157,8%.
- Smernica ModelCode 2010 a normy EC2_1G a EC2_2G vykazujú hodnoty spoľahlivosti $\tau_{R,exp,avg}/\tau_{R,calc,avg}$ väčšie ako 1,0. Návrh železobetónového fragmentu bez šmykovej výstuže podľa ModelCode 2010 a EC2_2G predstavuje ekonomický a zároveň bezpečný spôsob navrhovania.
- Norma EC2_1G predstavovala konzervatívny a menej ekonomický spôsob návrhu a posúdenia prvkov bez šmykovej výstuže. Nová generácia EC2_2G umožňuje ekonomicky návrh prvkov bez šmykovej výstuže vďaka uvažovaniu pôsobenia ťahovej pevnosti betónu a reziduálnych napätí.
- Dávka vlákien v betónovej matrici a spôsob ukončenia vlákien mali zásadný vplyv na vzdialenosť ohybových trhlín. Najmenšie priemerné hodnoty vzdialenosti boli zaznamenané v prípade

receptúry s dávkou ISF s označením 4B (44 mm). Recyklované oceľové vlákna nemali žiaden vplyv na vzdialenosť ohybových trhlín.

- Na železobetónových fragmentoch vznikli od namáhania ohybové trhliny, ktoré sa rozširovali až do okamihu vzniku prvej šmykovej trhliny. To neplatilo pri železobetónových fragmentoch s viazanou strmeňovou výstužou s označením ST (typ vystuženia B), kde bolo rozširovanie šmykovej trhliny kontrolované strmeňovou výstužou, čo spôsobilo porušenie ohybovým modelom zlyhania.
- Použitím DIC metódy boli pozorované približne o 10% menšie ako priehyby ako pri LVDT snímačoch. Tento rozdiel je spôsobený zatlačením betónu do podpery a poddajnosťou rámu skúšobného zariadenia.

6. Odporúčania pre prax

Pred zavedením vláknotetónu ako materiálu pre výrobu železobetónových prvkov bez šmykovej výstuže je nutné vyriešiť nasledujúce problémy:

- Na zabezpečenie ukladania vláknotetónu do debnenia a jeho zhutnenie je nutné používať takú receptúru betónu, aby po primiešaní dávky vlákien o množstve 40 kg na m³ vykazoval vláknotetón hodnotu sadnutia kužeľa minimálne 100 mm, čo je dolná hranica pre klasifikovanie betónu do S3.
- Pri návrhu železobetónových prvkov bez šmykovej výstuže, ktoré budú vyrobené z vláknotetónu sa odporúča použiť smernicu ModelCode 2010, ModelCode 2020 alebo druhú generáciu Eurokódu 2.

7. Odporúčania pre ďalší výskum

Na základe skúseností z výroby skúšobných telies a železobetónových fragmentov, resp. ich experimentálneho overovania, je možné stanoviť nasledovné odporúčania pre ďalší výskum:

Výroba:

- Vzhľadom na skutočnosť, že v porovnaní s betonážou na stavbe sa jednalo o malú betonáž, rozdrúžovanie recyklovaných oceľových vlákien (typ R) bolo možné realizovať manuálne. Pred uvedením recyklovaných vlákien do praxe je potrebné zistiť účinok/použitelnosť v súčasnosti dostupných rozdrúžovačov pre recyklované vlákna.
- Vyvinúť receptúru, ktorá bude mať aj s dávkou vlákien hodnotu sadnutia kužeľa viac ako 100 mm, čo zjednoduší výrobu skúšobných telies a vzoriek.
- Z dôvodu vyhotovenia vzoru pre DIC používať odolné druhy debnení, ktoré sú schopné opakovane vytvárať povrch s vysokou kvalitou pohľadovosti.

Experimentálne overovanie mechanických vlastností:

- Zaistiť pri skúške betónu v priečnom ťahu takú pozíciu kocky, aby vlákna prechádzali kolmo na lomovú plochu
- Pri vzorkách na skúšanie ohybu a závislosti $F-CMOD$ odporúčam vyhotovovať zárezy s hĺbkou preddefinovaného zárezu do 1/3 výšky vzorky (namiesto s hĺbkou preddefinovaného zárezu 25 mm) z dôvodu multiaxialite napätí v okolí trhliny.
- Pri experimentálnom overovaní ohybu na trojbodovej schéme je potrebné okrem zaznamenávania závislosti $F-CMOD$ potrebné zaznamenávať aj závislosť $F-\delta$.
- Experimentálne overovať železobetónové fragmenty bez šmykovej výstuže na rôznych šmykových rozpätiach a s rôznym stupňom vystuženia pozdĺžnou výstužou ρ_l a vytvoriť model Kaniho údolia pre vláknobetón.

Experimentálne overovanie dlhodobých vlastností:

- Vykonať urýchlené skúšky karbonatácie, expozíciu chloridov a iných chemických látok na preukázanie trvanlivosti prvku s recyklovanými oceľovými vláknami a jeho súčastí v stavebnej konštrukcii.
- Overiť správanie sa vláknobetónu recyklovanými oceľovými vláknami vystaveného vysokým teplotám, prípade zmrazovacím cyklom.

8. Zdroje

- [1] TURER, Ahmet. Recycling of Scrap Tires [online]. InTech, 2012 [cit. 2024-01-25]. Dostupné z: doi:10.5772/32747
- [2] Rubber Manufacturers Association, Scrap Tire Markets in the United States: 9th biennial report. In: Scrap tire markets in the United States [online]. 2009 [cit. 2024-01-26]. Dostupné z: https://www.ustires.org/sites/default/files/MAR_024_USTMA.pdf
- [3] HAMDI, Amin, Gamal ABDELAZIZ a Khatib Zada FARHAN. Scope of reusing waste shredded tires in concrete and cementitious composite materials: A review. Journal of Building Engineering [online]. 2021, 35 [cit. 2024-01-25]. ISSN 23527102. Dostupné z: doi:10.1016/j.jobbe.2020.102014
- [4] World's biggest tyre graveyard: Incredible images of Kuwaiti landfill site that is home to SEVEN MILLION wheels and so huge it can be seen from space. Dailymail [online]. [cit. 2025-01-21]. Dostupné z: <https://www.dailymail.co.uk/news/article-2337351/Worlds-biggest-tyre-graveyard-Incredible-images-Kuwaiti-landfill-site-huge-seen-space.html>
- [5] MASTALI, M., A. DALVAND, A.R. SATTARIFARD a M. ILLIKAINEN. Development of eco-efficient and cost-effective reinforced self-consolidation concretes with hybrid industrial/recycled steel fibers. Construction and Building Materials. 2018, 166, 214-226. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.01.147
- [6] BDSV. Markt&preise [online]. In: . [cit. 2025-02-24]. Dostupné z: <https://www.bdsv.org/unser-service/markt-preise/>
- [7] GHORPADE, V.G. a Rao H SUDARSANA. Strength and permeability characteristics of fibre reinforced recycled aggregate concrete with different fibres. Nature Environment and Pollution Technology [online]. 2010, 9, 179-188 [cit. 2024-01-25].
- [8] LIEW, K.M. a Arslan AKBAR. The recent progress of recycled steel fiber reinforced concrete. Construction and Building Materials. 2020, 232. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.117232

- [9] SONG, P.S a S HWANG. Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials* [online]. 2004, 18(9), 669-673 [cit. 2025-01-22]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2004.04.027
- [10] LARSEN, Ingrid Lande a Rein Terje THORSTENSEN. The influence of steel fibres on compressive and tensile strength of ultra high performance concrete: A review. *Construction and Building Materials* [online]. 2020, 256 [cit. 2025-01-22]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.119459
- [11] CENTONZE, G., M. LEONE a M.A. AIELLO. Steel fibers from waste tires as reinforcement in concrete: A mechanical characterization. *Construction and Building Materials* [online]. 2012, 36, 46-57 [cit. 2023-12-04]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.04.088
- [12] PAJĄK, Małgorzata, Małgorzata KRYSTEK, Mateusz ZAKRZEWSKI a Jacek DOMSKI. Laboratory Investigation and Numerical Modelling of Concrete Reinforced with Recycled Steel Fibers. *Materials* [online]. 2021, 14(8) [cit. 2023-12-04]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma14081828
- [13] AIELLO, M.A., F. LEUZZI, G. CENTONZE a A. MAFFEZZOLI. Use of steel fibres recovered from waste tyres as reinforcement in concrete: Pull-out behaviour, compressive and flexural strength. *Waste Management* [online]. 2009, 29(6), 1960-1970 [cit. 2023-12-04]. ISSN 0956053X. Dostupné z: doi:10.1016/j.wasman.2008.12.002
- [14] LEONE, M., G. CENTONZE, D. COLONNA, F. MICELLI a M.A. AIELLO. Fiber-reinforced concrete with low content of recycled steel fiber: Shear behaviour. *Construction and Building Materials* [online]. 2018, 161, 141-155 [cit. 2023-12-04]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.11.101
- [15] TAHENNI, T., M. CHEMROUK a T. LECOMPTE. Effect of steel fibers on the shear behavior of high strength concrete beams. *Construction and Building Materials* [online]. 2016, 105, 14-28 [cit. 2025-01-22]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.12.010

- [16] HAMEED, Ali Ammar a Mohannad Husain AL-SHERRAWI. Influence of Steel Fiber on the Shear Strength of a Concrete Beam. Civil Engineering Journal [online]. 2018, 4(7), 1501-1509 [cit. 2025-01-22]. ISSN 2476-3055. Dostupné z: doi:10.28991/cej-0309190
- [17] EN-14651. Test method for metallic fibered concrete - Measuring the flexural tensile strength. Brusel: European committee for standardization, 2005.
- [18] HILLERBORG, A. The teoretical basis of a method to determine the fracture energy G_F of concrete. Material and structures. 1985, 18(4), 291-296.
- [19] RILEM Draft recommendation (TC50-FMC), Determination of fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bent test on notched beams. Materials and structures. 1985, 18(4), 287-290.
- [20] XU, S. a H. W. REINHARDT. Determination of double-K criterion of crack propagation in quasibrittle fracture. International Journal of Fracture. 1999a, 98(2), 111-149. ISSN 1573-2673.
- [21] HAVLÍKOVÁ, Ivana. Vyhodnocení lomových testů těles z vybraných stavebních materiálů pomocí modelu Dvojitý-K. Brno, 2016. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [22] Fib Model Code 2010: Final draft. 2010. ISBN 978-2-88394-095-6.
- [23] Fib Model Code 2020: Final draft. 2023. ISBN 978-2-88394-095-6.
- [24] STN EN 1992-1-1. Eurokód 2 : navrhovanie betónových konštrukcií. Časť 1-1., Všeobecné pravidlá a pravidlá pre budovy. Bratislava: Slovenský ústav technickej normalizácie, 2006.
- [25] STN EN 1992-1-1. Eurokód 2: Navrhovanie betónových konštrukcií. Bratislava: Úrad pre normalizáciu, metrológiu a skúšobníctvo Slovenskej republiky, 2023.
- [26] STN EN 12350-2 (731312) Testing fresh concrete. Part 2: Slump test. Bratislava: Úrad pre normalizáciu, metrológiu a skúšobníctvo SR, 2020.
- [27] STN EN 14651+A1 (731306) Test methods for concrete reinforced with metal fibers. Measurement of tensile strength in bending (limit of proportionality (LOP), residual strength). 2008.

- [28] MASTALI, M., A. DALVAND, A.R. SATTARIFARD a M. ILLIKAINEN. Development of eco-efficient and cost-effective reinforced self-consolidation concretes with hybrid industrial/recycled steel fibers. *Construction and Building Materials* [online]. 2018, 166, 214-226 [cit. 2023-12-06]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.01.147
- [29] CAGGIANO, Antonio, Paula FOLINO, Carmine LIMA, Enzo MARTINELLI a Marco PEPE. On the mechanical response of Hybrid Fiber Reinforced Concrete with Recycled and Industrial Steel Fibers. *Construction and Building Materials* [online]. 2017, 147, 286-295 [cit. 2023-12-04]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.04.160
- [30] MASTALI, M. a A. DALVAND. Use of silica fume and recycled steel fibers in self-compacting concrete (SCC). *Construction and Building Materials* [online]. 2016, 125, 196-209 [cit. 2023-12-04]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.08.046
- [31] SHAH, Syed Haroon Ali, Babar ALI, Ghafur H. AHMED, Syed Muhammad Talal TIRMAZI, Mohamed Hechmi EL OUNI a Iqrar HUSSAIN. Effect of recycled steel fibers on the mechanical strength and impact toughness of precast paving blocks. *Case Studies in Construction Materials* [online]. 2022, 16 [cit. 2023-12-04]. ISSN 22145095. Dostupné z: doi:10.1016/j.cscm.2022.e01025
- [32] ZHANG, Yancong a Lingling GAO. Influence of Tire-Recycled Steel Fibers on Strength and Flexural Behavior of Reinforced Concrete. *Advances in Materials Science and Engineering* [online]. 2020, 2020, 1-7 [cit. 2023-12-04]. ISSN 1687-8434. Dostupné z: doi:10.1155/2020/6363105
- [33] BARICEVIC, Ana, Dubravka BJEGOVIC a Marijan SKAZLIC. Hybrid Fiber-Reinforced Concrete with Unsorted Recycled-Tire Steel Fibers. *Journal of Materials in Civil Engineering* [online]. 2017, 29(6) [cit. 2023-12-04]. ISSN 0899-1561. Dostupné z: doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001906
- [34] MODARRES, Aghout a Mansour GHALEHNOVI. Comparison of the mechanical performance of concrete reinforced with recycled steel fibers from waste tires and hooked-end steel fibers at ambient and high temperatures. *Civil Engineering Infrastructures Journal* [online]. 2023, 1-33 [cit. 2023-12-05]. Dostupné z: doi:10.22059/cej.2023.349788.1877

[35] GEHRI, Nicola, Jaime MATA-FALCÓN a Walter KAUFMANN. Automated crack detection and measurement based on digital image correlation. *Construction and Building Materials* [online]. 2020, 256 [cit. 2025-03-26]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.119383

[36] GEHRI, Nicola, Jaime MATA-FALCÓN a Walter KAUFMANN. Refined extraction of crack characteristics in large-scale concrete experiments based on digital image correlation. *Engineering Structures* [online]. 2022, 251 [cit. 2025-03-26]. ISSN 01410296. Dostupné z: doi:10.1016/j.engstruct.2021.113486