

M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Újszerű geometriai kialakítású, 2 és 3 dimenzióban megmunkált acélszalak fejlesztése és hatékonyságának összehasonlítása betonban

TDK dolgozat

Kerekes Péter
harmadéves építőmérnök hallgató

Konzulens:

Dr. Borosnyói Adorján
egyetemi docens, BME Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék

Budapest, 2014

Tartalomjegyzék

1) Bevezetés, célkitűzés	3
2) Szakirodalom	
2.1 Történeti áttekintés, felhasználási területek	4
2.2 Erő-elmozdulás diagramok, törési összenyomódás	7
2.3 Szálerősítésű és nagy teljesítőképességű beton	8
2.4 Szálak tapadása	10
2.5 Szívósság	11
2.6 Húzó- és hajlító-húzószilárdság	12
3) A megmunkáló szerkezet és az acélszálak fejlesztése	
3.1 Az egyedi geometriájú szálak legyártásához készített szerkezet	13
3.2 A gyártáshoz szükséges kiegészítő eszközök	16
3.3 Az egyedi geometriával rendelkező szálak ismertetése, a gyártási technológia bemutatása	18
3.3.1 PETIX	19
3.3.2 PETIX V45	21
3.3.3 PETIX V90	23
3.3.4 PETIX S45	25
3.3.5 PETIX S60	27
3.4 Összegzés	29
4) Kísérletek, eredmények	
4.1 Kísérletek ismertetése	30
4.1.1 Hagyományos hárompontos hajlító vizsgálat	30
4.1.2 Zsanéros száلكihúzó vizsgálat	31
4.2 Eredmények	33
5) Összegzés	
5.1 Összegzés	49
5.2 Megállapítások	49
6) Köszönetnyilvánítás	50
7) Felhasznált irodalom	50

1) Bevezetés, célkitűzés

A szálerősítésű betonok térhódítása az elmúlt néhány évtizedben jelentős növekedésnek indult. Az acélszál erősítésű betonokat előszeretettel alkalmazzák ipari padlók építésekor, de előre gyártott homlokzatburkoló elemekhez is kiváló választás. Legnagyobb előnye, hogy kisebb a munkaigénye, mint egy hagyományos vasalás beépítésének, kisebb a repedésérzékenysége, és a beton szívóssága fokozható ezzel. TDK kutatásomban kizárólag acélszálakkal foglalkoztam.

A szálaknak az egyik, ha nem a legmértékesebb tulajdonsága a geometriai kialakítása. Ettől függ a szál tapadása és ez hatással van a szálerősítésű beton szívósságára, és repedésáthidaló képességére. Széleskörű felhasználásának ellenére nem biztos, hogy kellő figyelmet fordítanak ezen szálak kiaknázatlan geometriai lehetőségeire.

TDK dolgozatomban 2 és 3 dimenzióban megmunkált acélszálak közti különbség vizsgálatával foglalkoztam. Egyedi geometriájú szálakat fejlesztettem ki és gyártottam le, és tulajdonságaikat összehasonlítottam egymással és egy Magyarországon gyártott, Dramix-típusú kampós végű referenciaszállal. Vizsgáltam a különböző szálak hozzáadásával készült betonok viselkedését hajlító igénybevétel esetén, egy egyedi kísérlettel az egyes szálak kihúzó ellenállását, és csomósodásra való hajlamát.

Megfigyeléseim segíthetnek még jobban előrelendíteni ezt a virágzó szakterületet, nagyobb hangsúlyt fektetni a szálak geometriai kialakításának fontosságára, és egyúttal új kutatási és fejlesztési irányok is kijelölhetők.

2) Szakirodalom

2.1 Történeti áttekintés, felhasználási területek

Az emberiség több évezredes tapasztalata szerint a különféle szálak bekeverésével csökkenthetjük az építőanyagok ridegségét és repedésérzékenységét. A 60-as évek óta ezt az elvet betonra is sikerrel alkalmazzuk.

Igazolódott, hogy a szálak javítják a beton mechanikai jellemzőit, és esetenként lehetővé teszik a hagyományos vasalás részleges vagy teljes helyettesítését. A mechanikai jellemzők javulása mellett technológiai előnyökre is számíthatunk, amelyek nem csak a gazdaságosságot fokozzák, hanem a munkafázisok egyszerűsítését és az építési idő lerövidítését is eredményezik.

A száltípusok kínálata az elmúlt időszakban jelentősen kiszélesedett. A kezdeti próbálkozásoknál felhasznált, sima felületű, egyenes acélszálak mellett megjelentek a különböző geometriai kialakítású acélszálak, valamint a műanyag-, üveg-, aramid- és szénszálak is (2.1 ábra). Az alak megválasztásának egyik célja a jó lehorgonyzó képesség biztosítása. Mivel a szálak mechanikai jellemzői eltérőek, a bekeverésükkel kapott szálerősítésű betonok tulajdonságai is eltérőek lesznek (fib, 1999).



[Balázs L. György: BMEEOEMAS04 segédlet a BME Építőmérnöki Kar hallgatói részére, HEFOP/2004/3.3.1/0001.01]

2.1 ábra: Acél és műanyag szálak betonhoz

A szálerősítésű anyagok ötlete évezredekre nyúlik vissza. Már az egyiptomiak szalmát és állati eredetű szőrszálakat keverték az agyaghoz, hogy a vályogtéglák szívósságát és tartósságát javítsák (2.2 ábra). A beton esetén hasonló hatást szeretnénk elérni (fib, 1999).

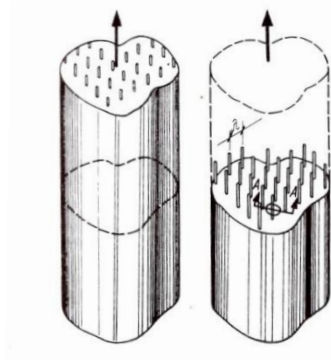


2.2 ábra: Vályogtéglák készítése

A szálerősítésű beton használatának kezdetét 1874. évre teszik, amikor is A. Berand fémhulladékot kevert a betonba, és ezt az eljárást szabadalmaztatta (Nemegeer, Teutsch, 1993). A fejlődés első periódusa 1960-ig tartott, és azt a szálerősítésű beton ritka alkalmazása jellemezte (Kausay, 2014).

Acélszálak alkalmazását betonban Romualdi és Batson (1963) valamint Romualdi és Mandel (1964) kísérletei alapozták meg a 60-as évek elején.

Romualdi és Batson (1963) gerendakísérletei során (amelyeket az irodalom az elsők között említ) még egymással párhuzamosan végigfutó 0,9 ill. 1,6 mm átmérőjű acélszálakat alkalmaztak (2.3 ábra). A kísérleti eredmények kedvezőek voltak mind a repedéstágasság, mind pedig a törőteher szempontjából. A további vizsgálatok során mind ők, mind pedig mások már nem irányított, hanem véletlenszerűen elhelyezkedő szálakat alkalmaztak. A szálak kezdetben a legkönnyebben hozzáférhető, sima felületű acélszálak voltak (fib, 1999).



2.3 ábra: Drótbetetes betonelem elvi ábrája az irodalomban elsők között számon tartott szálerősítésű betonkísérletekhez (Romualdi, Batson 1963)

Hazánkban mind az alkalmazás, mind a publikálás, mind a szabvány készítés terén dr. Szabó Iván mutatott példát (Szabó 1976) és akadtak követői is (Dombi 1976). Egyre szélesebb körben végeztek kutatásokat (Kausay 1993, 1994) és napjainkra a szálerősítésű beton sokféle alkalmazását dolgozták ki és valósították meg (Kausay, 2014).



2.4 ábra: Frissen lőtt beton acélszálakkal

Az acélszálak elsősorban a szilárd beton tulajdonságait befolyásolják kedvezően.

Acélszálak fő felhasználási területei:

ipari padlók, alagútépítés, lakásépítés (pincefalak, alapok), páncéltermek (2.4-2.5 ábrák) (Balázs, 2004).

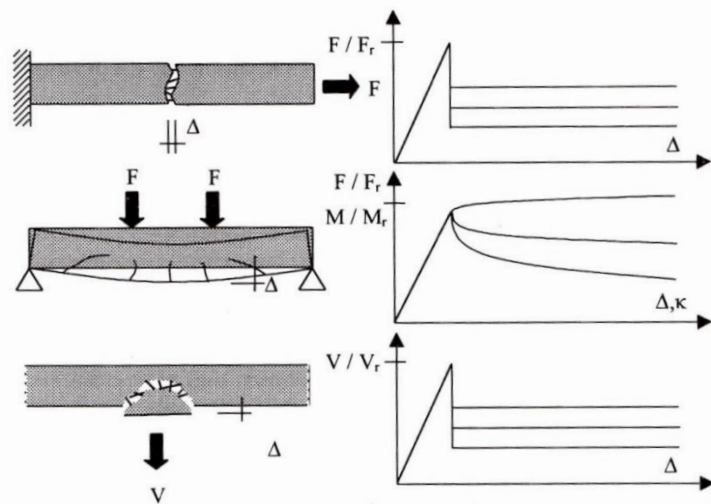


2.5 ábra: Ipari padló

2.2 Erő-elmozdulás diagramok, törési összenyomódás

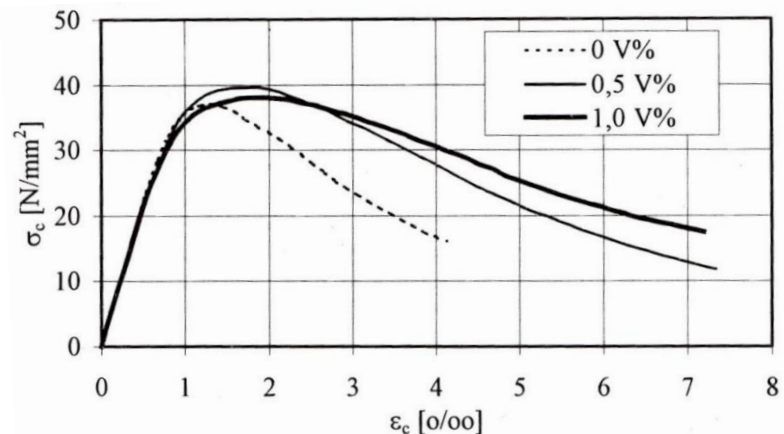
A 2.6 ábrán bemutatjuk a tengelyirányú húzó, a hajlító és a tengelyre merőleges húzó igénybevételek esetén kapható erő-elmozdulás jelleg diagramokat. Látható, hogy a berepedést követően a húzófeszültség nem esik le zérusra, hanem közel konstans értéken állandósul. A gerenda erő-lehajlás vagy nyomaték-görbület ábrája közel rugalmas-képlékeny viselkedésű, esetleg annál kissé lejjebb vagy följebb fut a szál típusától, de főleg a mennyiségétől függően. A maradó húzószilárdságnak azért nagy a jelentősége, mert ezzel csökkenthetjük (néhány esetben kiküszöbölhetjük) a beton viszonylag kis húzószilárdságából (és a húzószilárdság nagy szórásából) eredő nehézségeket (fib, 1999).

2.6 ábra: Szálerősítésű betonelemek erő-elmozdulás ábrái 40 kg/m³ acélszál alkalmazása esetén. Sematikus ábrák. (Falkner, 1998 alapján)



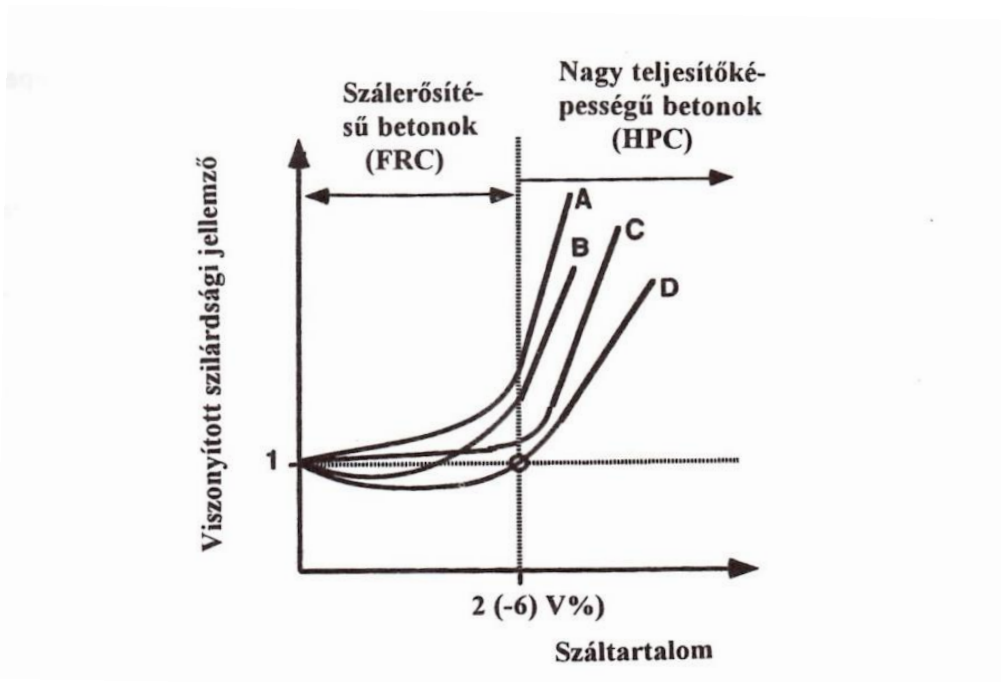
A szál nélküli és a szálerősítésű betonok nyomó vizsgálati eredményein (2.7 ábra) azt is megfigyelhetjük, hogy a szálmennyiség növelésével nő a törési összenyomódás és a σ - ϵ ábra alatti terület, ami az anyag szívósságának, vagyis energiaelnyelő képességének növekedésére utal (fib, 1999).

2.7 ábra: A törési összenyomódás és az energiaelnyelő képesség növekedése a száltartalom növelése esetén, acélszál: DRAMIX ZC 30/.5 (Balázs, Erdélyi 1996)



2.3 Szálerősítésű és nagy teljesítőképességű beton

A száltartalom függvényében megkülönböztetünk kis és nagy száltartalmú betonokat (2.8-2.9 ábrák). A kis száltartalmú betonokat tekintjük hagyományos értelemben vett szálerősítésű betonoknak, amelyek kevesebb, mint 2 V% acél-, műanyag-, üveg-, ill. szén- (vagy vegyesen acél- és műanyag-) szálat tartalmaznak hagyományosan (feszített vagy nem feszített) vasalással együtt vagy anélkül. A száltartalom jellemzően 0,1-2,0 V%, de vannak olyan termékek is (pl. vékony, üvegszálás lemezek), amelyek száltartalma 5-6 V%. A 2-6 V% közötti adagolást így átmeneti tartománynak tekinthetjük (2.8 ábra). Dolgozatomban a 0,1-2 V% száltartalmú betonokkal foglalkozom.



2.8 ábra: A szilárdsági jellemzők megváltozása a száltartalom növelésével. Sematikus ábra – A, B, C, D: különféle szálak, ill. bedolgozási viszonyok esetén. (Naaman, Paramasivan, Balázs et al., 1996)

Mint látni fogjuk, jellemzőjük, hogy a beton tulajdonságait már sokféle vonatkozásban megváltoztatják, de jelentős szilárdságnövekedést általában nem eredményeznek.

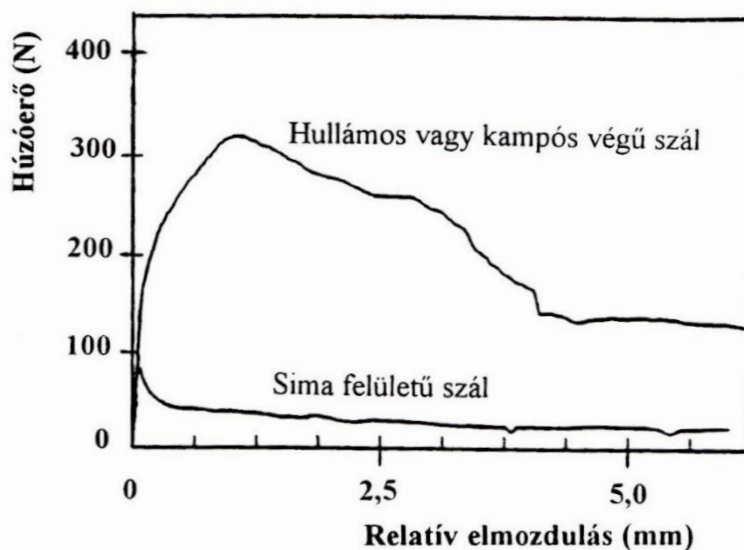
Ha a száltartalmat erősen megnöveljük (2, ill. 6-tól 27 V%-ig), akkor a szilárdság lényeges növekedésére is számíthatunk (az ár érezhető növekedésével egyidejűleg). Ezeket a betonokat a nagy teljesítőképességű betonokhoz (HPC, angolul: high performance concrete) soroljuk (2.9 ábra) (fib, 1999). Ez utóbbi nem képezi tárgyát a dolgozatomnak.

JELLEMZŐK	SZÁLERŐSÍTÉSŰ BETONOK (FRC)	NAGY TELJESÍTŐKÉPESSÉGŰ BETONOK (HPC) pl. SIFCON, SIMCON
Száltartalom:	kis száltartalom: 0,1-2 (6) V%	nagy száltartalom: 2 (6)-27 V%
Szálak:	acélszálak műanyag-, üveg-, ill. szénszálak vagy acél- és műanyagszálak vegyesen	elsősorban acélszálak
Adalékanyag:	d_{\max} : 4, 8, 16 vagy 32 mm	d_{\max} : 4 mm
Vasalás:	Hagyományos feszített vagy nem feszített vasalás egyidejűleg lehetséges.	Hagyományos vasalás nem lehetséges.
Szilárdsági jellemzők:	A szilárdsági jellemzők általában nem változnak jelentősen.	A szilárdsági jellemzők jelentős növekedése várható.
Bedolgozás:	A szálak adagolása a betonhoz.	A beton (habarcs) adagolása a szálákhoz.

2.9 ábra: Kis és nagy száltartalmú betonok fő jellemzőinek megkülönböztetése (fib, 1999)

2.4 Szálak tapadása

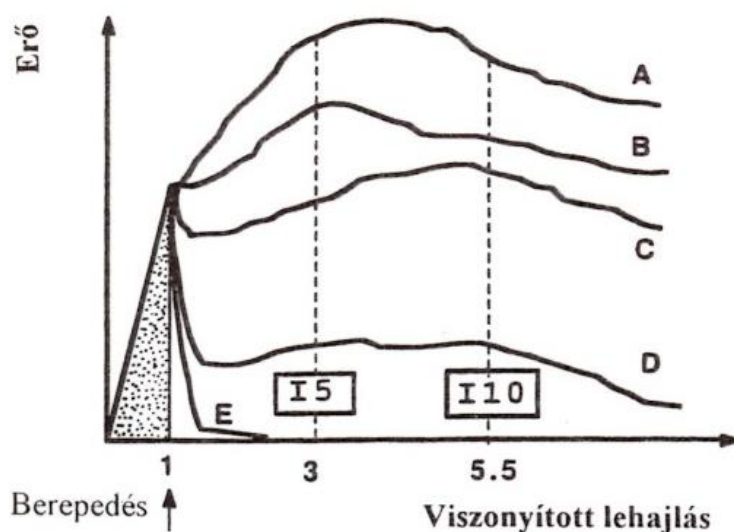
Alig van a szálerősítésű betonnak olyan tulajdonsága, amely nem függ a szálak tapadásától (Naaman, Najm, 1991). A szálak tapadása elsősorban a szálak anyagától, alakjától, felületi kialakításától, a beton mechanikai jellemzőitől, a száltartalomtól, és a terhelés sebességétől függ. Egyenes acélszál esetén a húzóerő közel lineárisan növekszik a szál megcsúszásáig, majd visszaesik és csekély mértékben csökken a kihúzóerő (relatív elmozdulás) növekedésével (2.10 ábra). Hullámos, bordás vagy kampós végű szálak tapadási szilárdsága a sima szál 3-4-szeresét is eléri, s így a kihúzóerőhöz szükséges energia is közel ilyen arányban növekszik. Ha a szálvégi kampó a kihúzás közben leszakad, akkor a tapadóerő hirtelen leesik, és a kihúzóerős viselkedés továbbiakban a sima száléhoz hasonló lesz. A maximális kihúzóerőből kísérletileg kapott kapcsolati szilárdság sima szál esetén $1,0-2,8 \text{ N/mm}^2$, kampós végű szál esetén $3,5-7,0 \text{ N/mm}^2$ és bordás szál esetén $2,8-6,7 \text{ N/mm}^2$ volt (Naaman, Najm, 1991) (fib, 1999).



2.10 ábra: Sima és kampós végű acélszálak kihúzóerő-relatív elmozdulás ábrái (Naaman, Najm, 1991)

2.5 Szívósság

A szálak alkalmazásának egyik elsődleges célja, hogy növeljük a beton energiaelnyelő képességét, amely az erő-lehajlás vagy a σ - ε függvény integráljával jellemezhető. A megnövelt szívósság jelenti egyúttal a duktilitást, a fáradási szilárdság és a lökészerű teher alatti teherbírás növekedését is. A szívósság jellemzésére a szívóssági indexet használjuk (Erdélyi A., 1993, 1997). A szívóssági index definíciója az ASTM C-1018 szerint az erő-lehajlás ábra területe az első repedés megjelenésekor mért lehajlás 3-, ill. 5,5-szöröséig osztva az első repedésig kapott ábra területével. Az utóbbit tekintik a rugalmas energiárésznek. Így kaphatók az I5 és I10, stb. jelű szívóssági indexek (2.11 ábra). Ez a definíció természetesen kiterjeszhető húzott és nyomott elemre is. Kutatók használják a szívóssági indexet a szálerősítésű és a szál nélküli betonok teljes erő-elmozdulás ábrája alatti területek hányadosaként is. A szívóssági index jól felhasználható a felkeményedő tulajdonság jellemzésére. Kampós végű vagy hullámos acélszálakkal kedvezőbb szívósság érhető el, mint a sima acélszálakkal (fib, 1999).

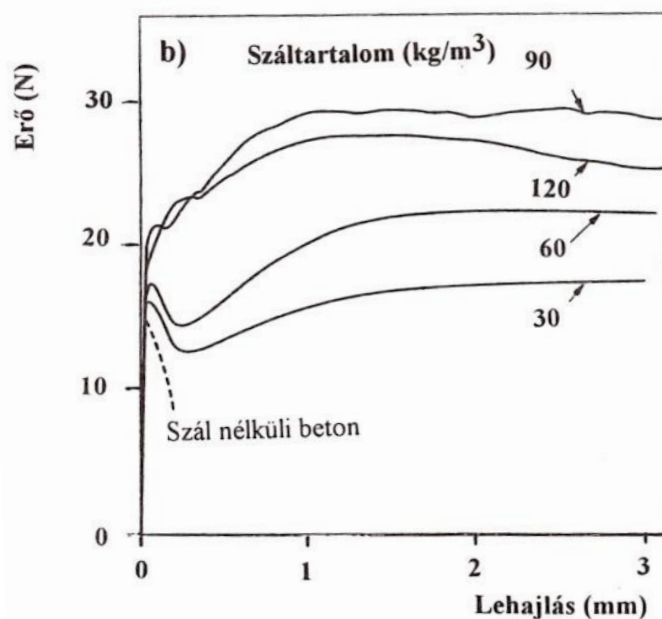


2.11 ábra: A szívóssági index (I5 és I10) meghatározása hajlított gerenda terhelőerő-lehajlás ábrájából. A, B, C és D: eltérő típusú és száltartalmú szálerősítésű betonok (Naaman, Reinhardt, 1996)

2.6 Húzó- és hajlító-húzószilárdság

A húzószilárdság vizsgálatát végezhetjük tiszta húzásként, kiszélesedő végű húzó próbatesten vagy hasító vizsgálatként hengeres próbatesten. Tiszta húzásra a 2.6 ábrán mutattunk be példát, ami felhívta a figyelmet a szálerősítésű beton azon előnyére, hogy az első repedés megjelenésekor a húzófeszültség nem esik le zérusra. A maradó húzószilárdság a szál típusának és a száltartalomnak a függvénye.

Balaguru és Shah (1992) azt javasolták, hogy a hajlító-húzószilárdság növekedést 90 kg/m^3 acélszál tartalomig hanyagoljuk el a tervezés során (2.12 ábra). Kísérleteikben az energiaelnyelő képesség növekedése a $0\text{-}30 \text{ kg/m}^3$ száladagolás tartományban adódott relatíve a legnagyobbra. 30 és 60 kg/m^3 száladagoláskor a berepedést követően az erő visszaesett, majd stabilizálódott (30 kg/m^3) vagy enyhén növekedett (60 kg/m^3). 90 és 120 kg/m^3 száladagolással visszaesés már nem volt tapasztalható. Vagyis a repesztő erő utáni erőnövekedés vagy visszaesés a száltartalom függvénye (Erdélyi A., 1994, 1995; fib, 1999).



2.12 ábra: Szálerősítésű beton nyomási és hajlítási viselkedése kampós végű acélszálak alkalmazása esetén, $l=50 \text{ mm}$ (Balaguru, Shah, 1992)

F-a ábrák $100 \times 100 \times 350 \text{ mm}$ -es gerendán, harmadpontos terheléssel, $l_{ef}=300 \text{ mm}$

3) A megmunkáló szerkezet és az acélszalak fejlesztése

3.1 Az egyedi geometriájú szalak legyártásához készített szerkezet

Számomra bármilyen tudományos tevékenységben, kutatásban az jelenti a kihívást, ha valami új dologgal foglalkozhatok, újat alkothatok. Ezért döntöttem az egyedi geometriájú szalak kifejlesztése mellett. A szakirodalom tanulmányozása közben megismertem a régen és most használatos különböző szálajtákat. Kezdetben csak 1 fajta általam tervezett szalát vizsgáltam volna, de ez a szám végül 5-re nőtt. Ezeknek az alapkonceptiója ugyanaz, de az 5 különböző megmunkálási mód mégis 5 különböző geometriát eredményezett.

Ezeknek a szalaknak a legyártásához egy megmunkáló szerkezetet kellett építenem. A szerkezet megtervezése után nagypapám műhelyében kezdtem el azt megépíteni. Fiatalabb koromban nagyon sokat voltam nagypapámmal, aki lakatosként dolgozott, és megtanított nekem számos dolgot a szakmájáról.

A szerkezet gyártását a legnagyobb pontosságot igénylő, és egyben legfontosabb részével kezdtem; a nyomópofákkal (3.1-3.2 ábrák). Egy nagy keménységű, négyzet keresztmetszetű, tömör acélrudat választottam erre a célra, hogy a lehető legkevesebb deformációt szenvedje el majd a használatkor. Az elem legyártásához sarokcsiszolót, köszörűgépet, és a végén reszelőt használtam a finom megmunkáláshoz.



3.1 ábra: A nyomópofák alapanyaga



3.2 ábra: A nyomópofák alakja



Következő lépésben a nyomópofák aljzatát kellett legyártani, amire rá lehetett a nyomópofákat hegeszteni. A felül lévő pofa aljzatához hozzá hegesztettem egy kör keresztmetszetű, tömör acélrúd, ami belekerült egy szintén kör keresztmetszetű gyűrűbe, ami lehetővé teszi az elfordulást. Majd kapott egy kart is, ami lehetővé teszi a megmunkáló szerkezet manuális működtetését (3.3 ábra).

3.3 ábra: Nyomópofák elrendezése

Ezután a szerkezetnek azon része következett, amelyre rákerült a szálmegmunkáló egység, és az alapanyag tartó. A szálakhoz használt huzal alapanyag fel volt tekercselve, így egy forgó szerkezeti részt kellett kialakítanom, amely megkönnyíti a száladagolást (3.4 ábra).



3.4 ábra: A megmunkáló szerkezet tartóváza

Ezt követően egy 3 tagból álló csapágysor következett, amely a tekercsben lévő huzal kiegyenesítéséért volt felelős. A csapágysor egy fémlapra lettek erősítve, 2 fixen, 1 pedig állítható foglalatba került. Erre azért volt szükség, hogy különböző átmérőjű szálakhoz lehessen igazítani (3.5 ábra). A huzal be-, és elvezetését a csapágysorról két, furattal ellátott terelőelemmel oldottam meg (3.6 ábra).

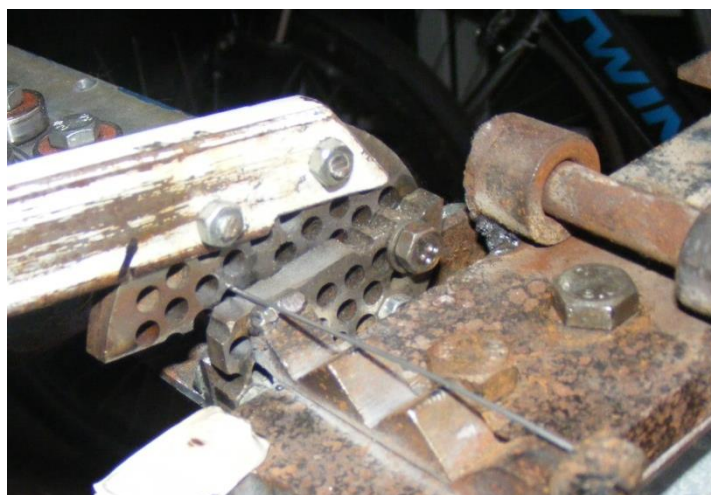


3.5 ábra: A csapágysor elrendezése



3.6 ábra: Az egyengető csapágysor működés közben

A szálegyengető csapágsor és a megmunkáló szerkezeti egység közé be kellett tenni egy olyan elemet, amely a szálak méretre vágásáért felelős. Erre a célra egy húsdaráló rostélyt használtam. Azért volt ideális a feladatra, mert nagyon kemény, rideg anyagból készült, és ezáltal könnyen el tudja metszeni a vékony acélhuzalt. A rostélyt félbevágtam, az egyik végénél összecsavartam, és ráerősítettem egy kart, amelynél fogva működtethető a vágószerszám (3.7 ábra).



3.7 ábra: Vágószerszám



3.8 ábra: A kész megmunkáló szerkezet

Az egész szerkezet ezután kapott 3 lábat (3.8 ábra). Ezek kényelmes magasságba emelik a megmunkáló szerkezetet, amely megkönnyíti a szálmegmunkálási folyamatot. Az egyes szerkezeti elemek leszerelhetőek, így a szerkezet könnyen szállítható, tárolható. Ha esetleg egy újabb geometriájú szálra lenne szükségünk, akkor csak a nyomópofás darabot kell lecserélni az adott elgondolásnak megfelelő elemre.

3.2 A gyártáshoz szükséges kiegészítő eszközök

A 3 dimenzióban történő megmunkáláshoz kiegészítő eszközöket kellett konstruálnom. Ezek épp oly egyszerűek, mint maga a szerkezet. Semmilyen alapanyagért nem mentem el boltba, abból dolgoztam, ami rendelkezésemre állt a műhelyben. Ebből kifolyólag ezek a szerszámok is így készültek.

-Az egyes szálak gyártási technológiáját később részletezem (3.3 fejezet).

Elsőként a legelőször kigondolt száltípusomhoz gyártottam le a megmunkáló eszközt. Ez egy elég egyszerű szerszám; egy téglalap keresztmetszetű fémrúd. Ezen kialakítottam egy bevágást, amibe majd bele fog kerülni a szálnak azon része, amelyet az adott munkafolyamatban megmunkálni kívánok. Ami ennél fontos volt, az a bevágás mérete, és magának az eszköznek a hossza. (3.9 ábra).



3.9 ábra: A PETIX V45 kialakításához használt szerszám



3.10 ábra: A PETIX V90 kialakításához használt szerszám

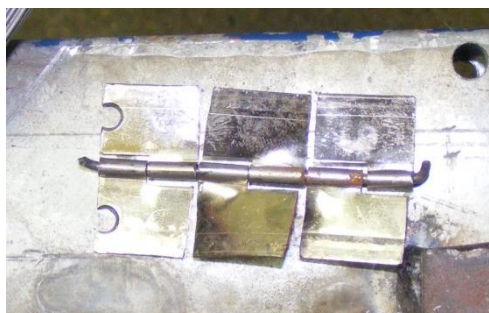
A következő egy, az előbb említetthez nagyon hasonló eszköz. Funkciójában sem tér el tőle, mindössze annyi a különbség, hogy ezzel nagyobb mértékben tudjuk deformálni a szálát a kívánt alak eléréséhez (3.10 ábra).

A szálak méretre vágásához először egy csípőfogót akartam használni, amihez ráhegesztettem egy ütközőt (3.11 ábra), amely segített volna, hogy ugyanakkora darabok készüljenek, de ennek a használata nagyon körülményes lett volna, és helyette készítettem el a már említett húsdaráló rostélyból készült darabolót (3.7 ábra).



3.11 ábra: Vágószerszám

Egyes szálam spirális kialakításához is kellett egy eszköz. Egy olyanra gondoltam, amibe be tudom szorítani a szálát, és bizonyos részeit elforgatva létrehozható ez a kialakítás. Találtam a műhelyben zsanérokat, amik pont optimálisak voltak a feladat elvégzésére. Méretre vágtam, majd felfűztem egy merev drótra őket (3.12-3.13 ábrák). De mikor kipróbáltam, és meghajlítottam az első szálát, kiderült, hogy a szálak megmunkálásához sokkal nagyobb erő kell, mint amit a zsanér el tud viselni, és az lett a vége, hogy a megmunkálóeszköz jobban deformálódott, mint maga az acélszál. Láttam, hogy ez nem egy járható út, úgyhogy másik szerszámot kellett erre a munkafolyamatra gyártanom. A következő eszközt ennek a helyettesítésére fejlesztettem ki.



3.12 ábra: Zsanéros megmunkáló eszköz nyitott állapotban



3.13 ábra: Zsanéros megmunkáló eszköz összezárt állapotban

A 3.14-3.15 ábrákon látható szerszámmal egy kicsit több munka volt. Egy laposfogót alakítottam át úgy, hogy pontosan be tudjam vele fogni a szálak megmunkálni kívánt részét. Ehhez le kellett köszörülni a fogó végéből egy akkora részt, hogy be lehessen oda hegeszteni egy adott oldalhosszúságú lemezdarabot, de még össze is lehessen szorítani kellő mértékben. A lemezdarabokra ráragasztottam egy szivacsos anyagot, amelynek feladata a szálak könnyebb elhelyezésének biztosítása volt.



3.14 ábra: A szivacsos anyag benne a szál formáját felvevő mélyedéssel



3.15 ábra: Az átalakított fogó

3.3 Az egyedi geometriával rendelkező szálak ismertetése, a gyártási technológia bemutatása

A szálak geometriai kialakításán nagyon sokat gondolkoztam. Az foglalkoztatott, hogy vajon milyen alakú szálaknak lehetnek a legkedvezőbb tulajdonságai mindközül. Még mielőtt a pontos geometriát kitaláltam volna, ezek voltak a szálakhoz fűzött elvárásaim:

- jelentős lehorgonyzó képesség
(A geometriai kialakítás miatt nagy legyen a beton és az acélszál között fellépő súrlódási erő, számottevően növelve ezzel a szálak kihúzó-ellenállását.)
- ne csomósodjon
(A szálaknak az a kedvezőtlen tulajdonsága, mikor összeállnak egy acélszál labdává, így nem keverednek el kvázi homogén módon a betonban. Ez a jelenség jelentősen csökkentheti a beton szilárdságát, hisz ezen a helyen egy nagy légbuborék keletkezik.)
- nagymértékben növelje a beton szívósságát
(Szívósság alatt a beton energiaelnyelő képességét értjük.
A megnövelt szívósság jelenti egyúttal a duktilitást, a fáradási szilárdság és a lökésszerű teher alatti teherbírás növekedését is (fib, 1999).
- gyártása viszonylag könnyen kivitelezhető legyen, mind az általam használt, mind pedig az esetleges későbbi ipari gyártástechnológiával
- többféle geometriai kialakítást tegyen lehetővé
(Mivel elsődleges célom a 2 és 3 dimenzióban megmunkált szálak tulajdonságainak összehasonlítása volt, az alap szálak olyannak kellett lennie, amelyet többféle módon lehet megmunkálni, így ugyanabból az alapszálból teljesen más alakú szálakat lehetett létrehozni.)

3.3.1 PETIX

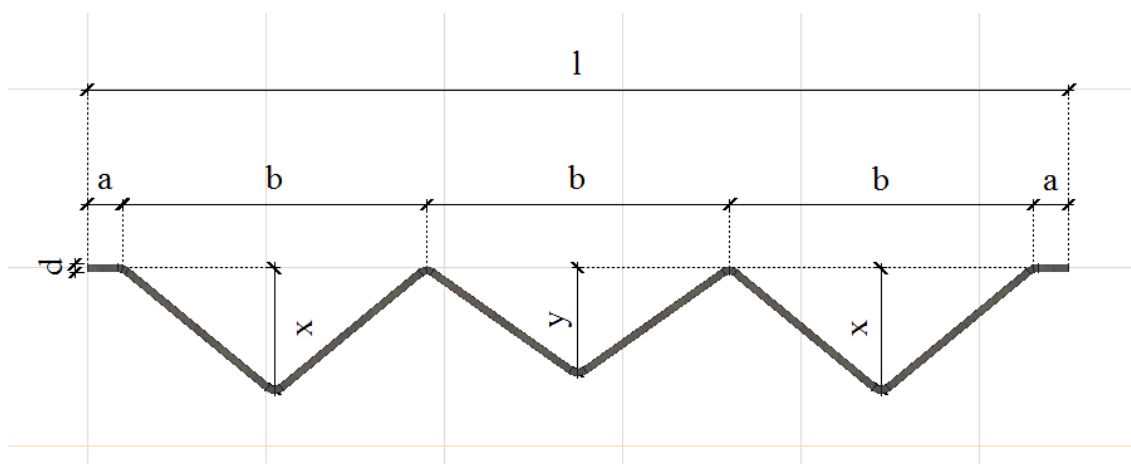
Sok ötletelés után végül megszületett a megfelelő szálgeometria. Pontos geometriai adatokat viszont nem adok meg, csak paraméteresen, mert a kutatásnak bizonyos részei még folyamatban vannak.

Egy olyan geometria mellett döntöttem, ami elképzeléseim szerint a 3.3-as pontban említett elvárások mindegyikének megfelel. A PETIX fantázianevű az alapszál (3.16-3.17 ábrák), amelyből a másik 4 különböző geometriájú szálát kialakítottam. Az általam gyártott szálak közül ez az egyetlen, amely csak 2 dimenzióban megmunkált.



3.16 ábra: A közel 2000 darab PETIX acélszál

Adatok: $l_0 = 69 \text{ mm}$ l_0 : megmunkálatlan hossz
 $l = 57 \text{ mm}$
 $d = 0,88 \text{ mm}$
 $m = 0,3334 \text{ g}$
 $l_0/d = 78$

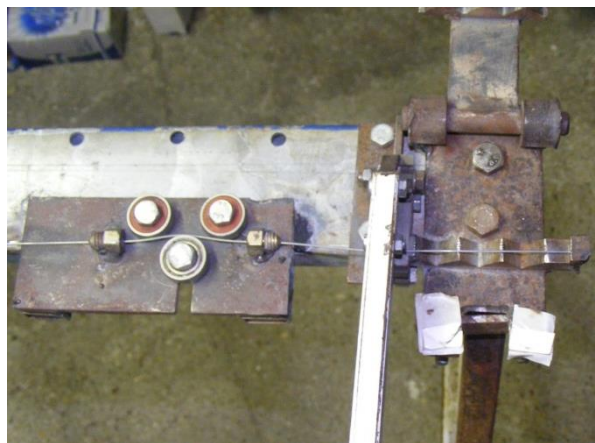


3.17 ábra: A PETIX alapszál geometriai kialakítása

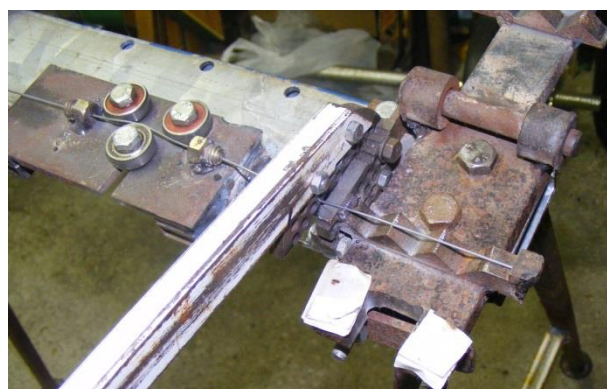
A gyártási folyamat lépései a következők. A nyomópofa felnyitását (3.18 ábra) követően az alapanyagot az egyengető szerszám csapágsorán keresztül be kell húzni a nyomópofák közé (3.19 ábra). A megmunkálendő szál méretre vágása a vágószerszám karjának lenyomásával történik (3.20 ábra). Végül a szál geometriai megmunkálása a nyomópofák összezárásával valósul meg, amelyhez a felső nyomópofára erősített kar lenyomása szükséges (3.21 ábra). A véglegesre megmunkált szál alakját a felnyitott nyomópofák között a 3.22 ábrán mutatom be. A PETIX alapszál geometriájának sémáját, illetve egy szárról készült fényképet a 3.23-3.24 ábrákon illusztrálók.



3.18 ábra: Nyomópofa felnyitása



3.19 ábra: Szál behúzása a nyomópofák közé



3.20 ábra: Szál méretre vágása



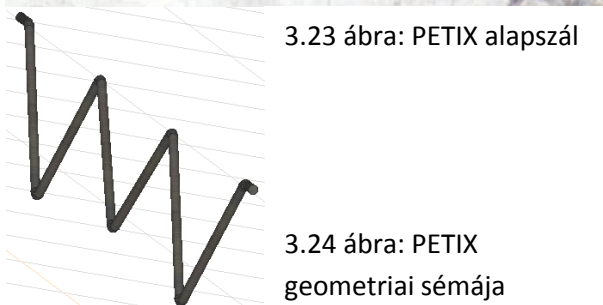
3.21 ábra: Szál alakítása



3.22 ábra: Az elkészült szál



3.23 ábra: PETIX alapszál



3.24 ábra: PETIX geometriai sémája

3.3.2 PETIX V45

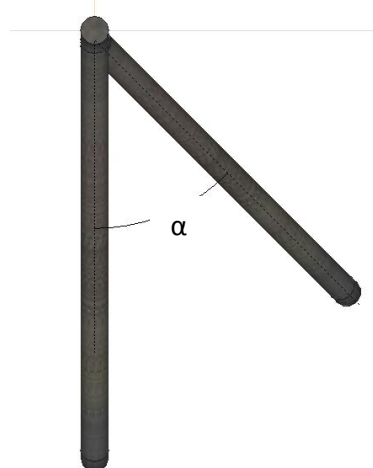
Az első szálam, amely 3 dimenzióban megmunkált (3.25 ábra). Ezt a geometriát gondoltam ki legelőször, emiatt kezdtem el az egész kutatást. A szakirodalomban sehol nem találtam 3 dimenziós szálat, és felvetődött bennem a kérdés, hogy vajon van-e viselkedésbeli különbség a 2 és 3 dimenzióban megmunkált szálat között.



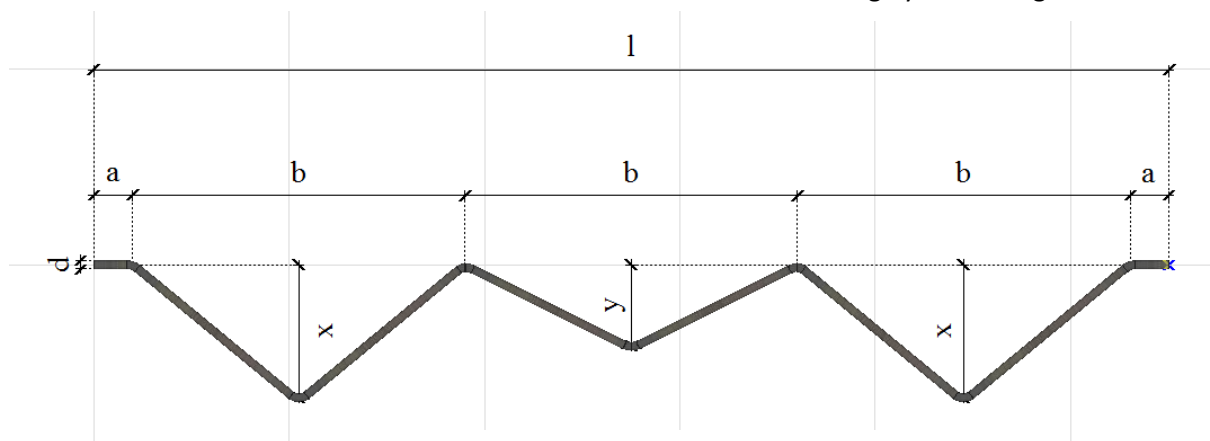
3.25 ábra: A közel 2000 darab PETIX V45 típusú acélszál

Ennél a szálnál annyi a különbség az előbb említett PETIX-hez képest, hogy a középső hullám a szál síkjára merőleges irányban ki van hajlítva 45° -os szögben (3.26-3.27 ábrák).

Adatok: $l_0 = 69 \text{ mm}$
 $l = 57 \text{ mm}$
 $d = 0,88 \text{ mm}$
 $m = 0,3333 \text{ g}$
 $l_0/d = 78$
 $\alpha = 45^\circ$

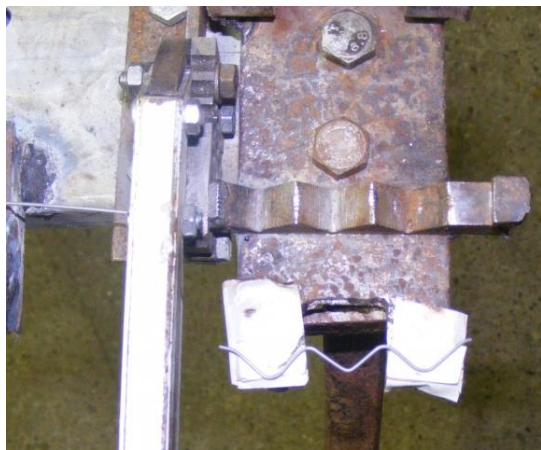


3.26 ábra: PETIX V45 acélszál
hossztengelyre merőleges nézete



3.27 ábra: A PETIX V45 acélszál geometriai kialakítása

A gyártási folyamat lépései a következők. A PETIX V45 szál kiindulási anyaga a PETIX alapszál. A nyomópofából a megmunkáló felületre kiemelt PETIX alapszálát a 3.28 ábrán láthatjuk. Ebben a pozíciójában kell a szálát a 3.9 ábrán bemutatott célszerszámmal megfogni (3.29 ábra), majd a nyomópofa leszorításával a következő megmunkálási lépéshez rögzíteni (3.30 ábra). A V45 szál végleges geometriájának kialakításához a célszerszámot ütközésig kell nyomni, a csavarral állítható ütközőig (3.31 ábra). A PETIX V45 szál geometriájának sémáját, illetve egy szárról készült fényképet a 3.32-3.33 ábrákon illusztrálók.



3.28 ábra: Szál elhelyezése a megmunkáló vállakon



3.29 ábra: Szál megfogása a célszerszámmal



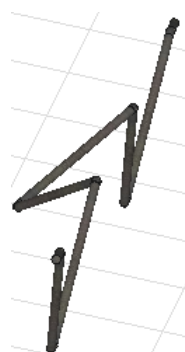
3.30 ábra: Szál beszorítása



3.31 ábra: Szál megmunkálása



3.32 ábra: PETIX V45



3.33 ábra: A PETIX V45 geometriai sémája

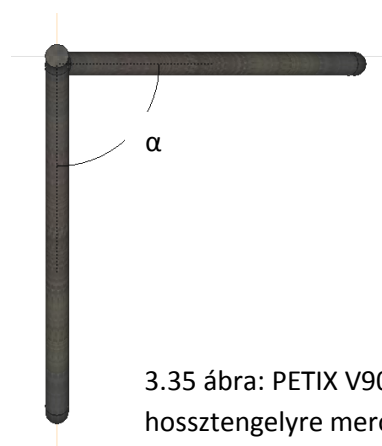
3.3.3 PETIX V90

Az előbb említett száltípusnál a 45° -ot találomra vettem fel. Semmi elképzelésem nem volt arról, hogy a középső hullám síkból való elfordulásának mértéke mennyiben befolyásolja a szálak tulajdonságát a betonban. Ezért kifejlesztettem egy, az előzőhöz nagyon hasonló száltípust (3.34 ábra), amelynél a középső hullámrész a szál síkjából 90° -os szöggel tér ki (3.35-3.36 ábrák).

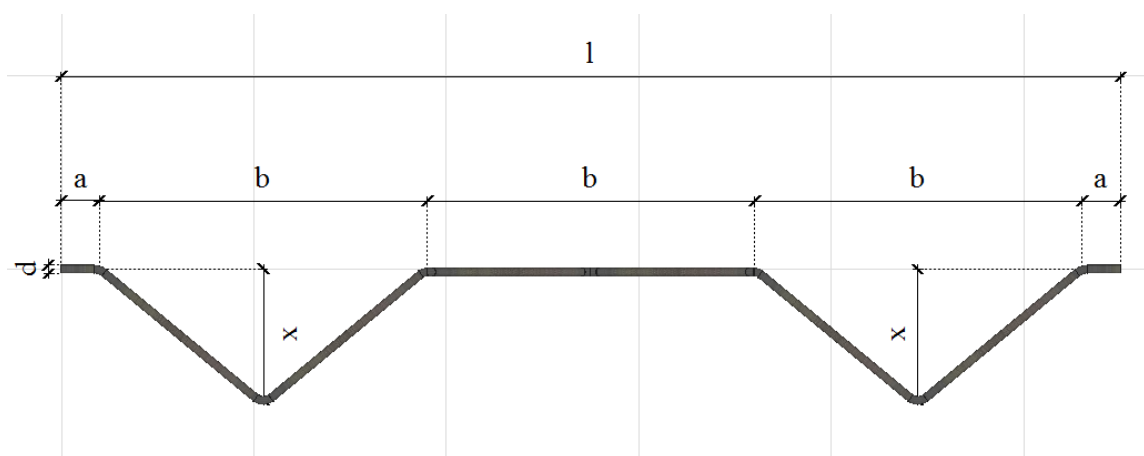


3.34 ábra: A közel 2000 darab PETIX V90 típusú acélszál

Adatok: $l_0 = 69 \text{ mm}$
 $l = 57 \text{ mm}$
 $d = 0,88 \text{ mm}$
 $m = 0,3336 \text{ g}$
 $l_0/d = 78$
 $\alpha = 90^\circ$



3.35 ábra: PETIX V90 acélszál
hossztengelyre merőleges nézete



3.36 ábra: A PETIX V90 geometriai kialakítása

A gyártási folyamat lépései a következők. Ugyanaz a folyamat, mint a PETIX V45-nél, annyi különbséggel, hogy a megmunkáláshoz a derékszögben meghajlított fogójú eszközt használtam (3.10 ábra), hogy nagyobb mértékben tudjam meghajlítani a kívánt részt (3.37-3.40 ábrák). A PETIX V90 szál geometriájának sémáját, illetve egy szárról készült fényképet a 3.41-3.42 ábrákon illusztrálok.



3.37 ábra: Szál elhelyezése a megmunkáló vállakon



3.38 ábra: Szál megfogása a célszerszámmal



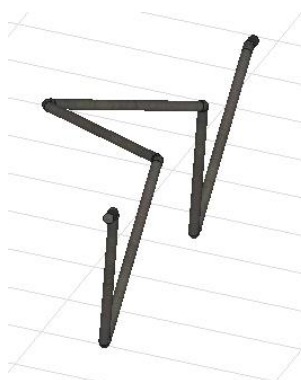
3.39 ábra: Szál beszorítása



3.40 ábra: Szál megmunkálása



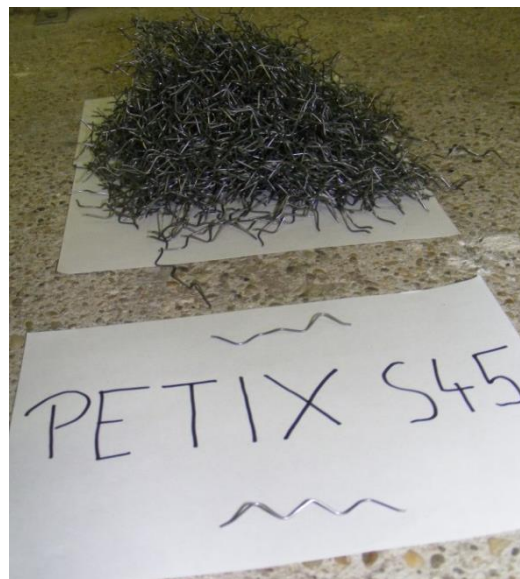
3.41 ábra: PETIX V90



3.42 ábra: A PETIX V90 geometriai sémája

3.3.4 PETIX S45

Ezt a száltípust is a kíváncsiság hozta létre. A V-sorozatnál a 3-ból csak 1 hullám tért ki a szál síkjából, és felmerült bennem a kérdés, hogy vajon változik-e bármilyen tulajdonsága a szálerősítésű betonnak, ha a benne lévő szál egy kvázi spirál formát ölt magára. Ez azt jelenti, hogy a kezdeti alapsíkhoz képest a második és harmadik hullámot különböző mértékben elforgattam (3.43-3.45 ábrák).

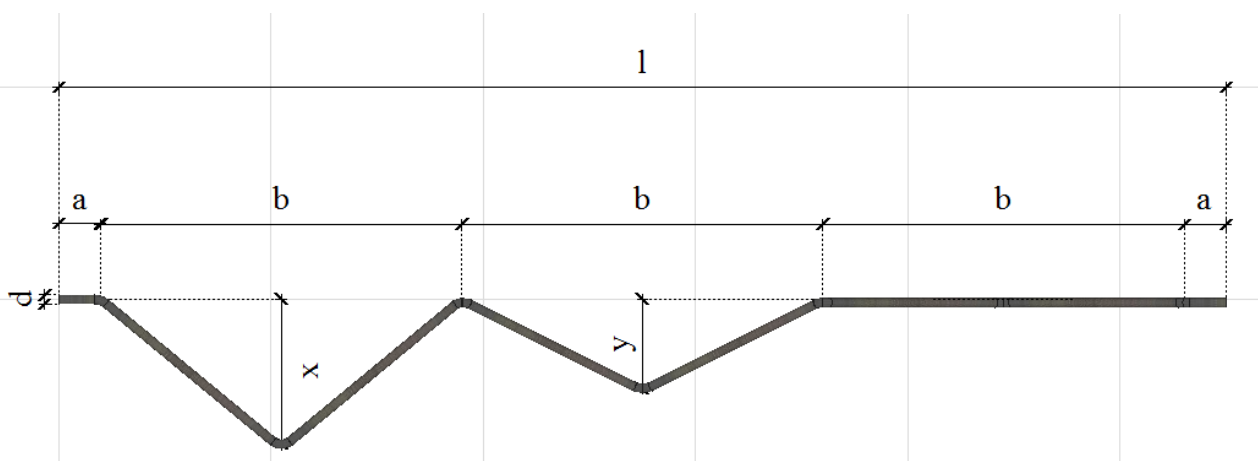


3.43 ábra: A közel 2000 darab PETIX S45 típusú acélszál

Adatok: $l_0 = 69 \text{ mm}$
 $l = 57 \text{ mm}$
 $d = 0,88 \text{ mm}$
 $m = 0,3339 \text{ g}$
 $l_0/d = 78$
 $\alpha = 45^\circ$



3.44 ábra: PETIX S45 acélszál hossztenegelyre merőleges nézete



3.45 ábra: A PETIX S45 geometriai kialakítása

A gyártási folyamat lépései a következők. Az S-sorozatnak a megmunkálása már nagyobb fejtörést okozott. Nehéz volt olyan eszközt létrehozni, amely képes lett volna egyszerűen létrehozni ezt a fajta geometriai kialakítást. Több próbálkozásom volt, de ezeknek nagy része nem jutott túl a tervezőasztalon. Ami eljutott a kivitelezés fázisba, az sem hozott sok sikert (3.12-3.13 ábrák). Az egyszerűség ellenére a 3.46-3.49 ábrákon bemutatott fogós megoldás bizonyult a legjobbnak, így ezt alkalmaztam. A PETIX S45 szál geometriájának sémáját, illetve egy szárról készült fényképet a 3.50-3.51 ábrákon illusztrálok.



3.46 ábra: Szál elhelyezése a speciális fogóban



3.47 ábra: Szál egyik szélő hullámának kialakítása



3.48 ábra: Szál másik szélő hullámának kialakítása



3.49 ábra: A kész szál



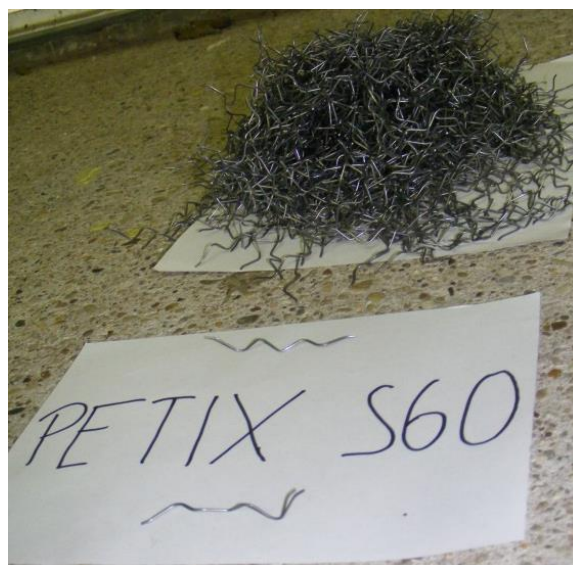
3.50 ábra: PETIX S45



3.51 ábra: A PETIX S45 geometriai sémája

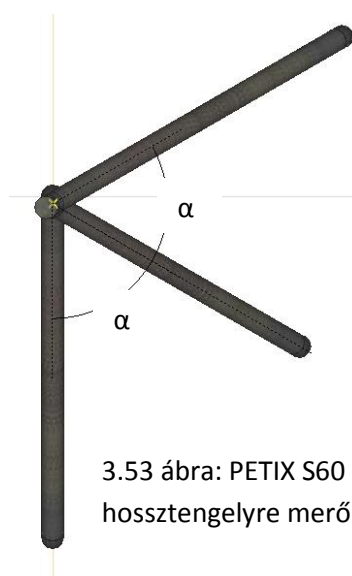
3.3.5 PETIX S60

Ugyanúgy, mint a V-sorozatnál, itt is kíváncsi voltam, hogy az egyes hullámok elfordulásának mértéke mennyiben befolyásolja a szál tulajdonságait. Így született meg ez a szál (3.52 ábra), amelynek kialakítása ugyanolyan spirális, mint az előbb említett szálé, ám itt az egyes hullámok egymáshoz képesti relatív elfordulása 60° (3.53-3.54 ábrák).

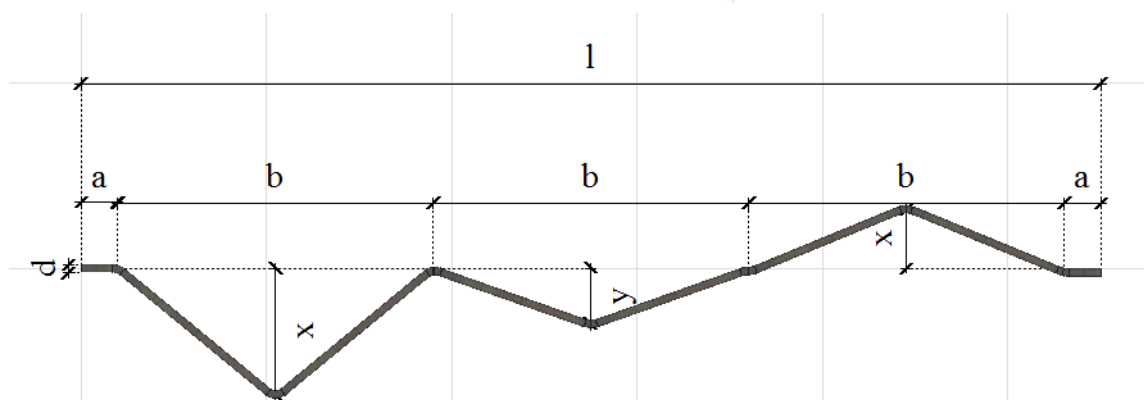


3.52 ábra: A közel 2000 darab PETIX S60 típusú acélszál

Adatok: $l_0 = 69 \text{ mm}$
 $l = 57 \text{ mm}$
 $d = 0,88 \text{ mm}$
 $m = 0,3332 \text{ g}$
 $l_0/d = 78$
 $\alpha = 60^\circ$



3.53 ábra: PETIX S60 acélszál hossztengetyre merőleges nézete



3.54 ábra: A PETIX S60 geometriai kialakítása

A gyártási folyamat lépései a következők. A gyártás eszközei megegyeznek a S45-nél használtakkal, a folyamatban annyi a különbség, hogy itt nem 45, hanem 60°-al csavartam el a szál egyes hullámain. A munkafolyamatokat a 3.55-3.58 ábrákon mutatom be. A PETIX S60 szál geometriájának sémáját, illetve egy szárról készült fényképet a 3.59-3.60 ábrákon illusztrálok.



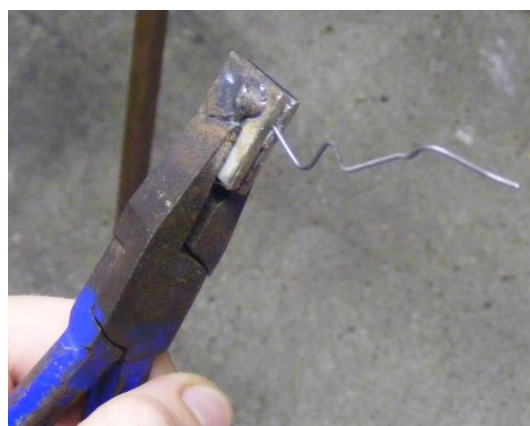
3.55 ábra: Szál elhelyezése a speciális fogóban



3.56 ábra: Szál egyik szélső hullámának kialakítása



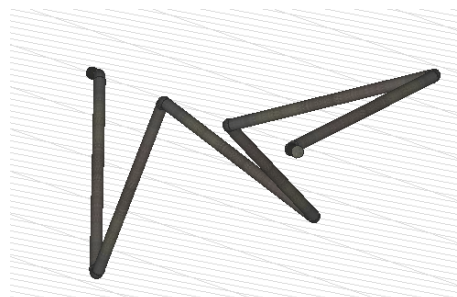
3.57 ábra: Szál másik szélső hullámának kialakítása



3.58 ábra: A kész szál



3.59 ábra: PETIX S60



3.60 ábra: A PETIX S60 geometriai sémája

3.4 Összegzés

Az 5 féle kialakítású acélszál legyártásával közel 65 órát töltöttem. Ez a tiszta munkaidő, amelybe a pihenők nem számítottak bele. Ezalatt a 65 óra alatt közel 10 000 darab acélszálat vágtam le, és munkáltam meg. A manuális szálmegmunkálás rávilágított arra, hogy a munkafolyamatok gépesítése mennyire fontos.

1 darab szál legyártásához szükséges átlagos idő:	PETIX:	8 másodperc
	PETIX V45:	27 másodperc
	PETIX V90:	27 másodperc
	PETIX S45:	23 másodperc
	PETIX S60:	23 másodperc

Kezdetben a gyártás nem volt zökkenőmentes, de egy pár óra után egészen belejöttem, a végére pedig már szinte komolyabb figyelmet nem is kellett fordítani a gyártási folyamatra, mert annyira belém idegződött. Körülbelül 40 óra gyártás után kíváncsi voltam, hogy mennyi az a legkevesebb idő, ami alatt le tudok gyártani 1 darab alapszálat. Ez a legrövidebb idő 4,8 másodperc volt.

Mivel minden egyes szálat kézzel gyártottam, mindet le tudtam ellenőrizni, hogy olyan-e amilyennek lennie kell, megfelelően van-e megmunkálva, így garantáltan, szinte tized milliméter pontosságra ugyanolyanok voltak a szálaim. Köszönhetően a több lépcsőben, megmunkálás közben élesben kipróbált megmunkáló eszközeim konstrukciójának a megmunkált szálak között a selejtarány az 1%-ot sem érte el. Ha megmunkálás közben durva geometriai pontatlanság alakult ki, azt azonnal észrevettem, és a selejtet ki lehetett dobni.

4) Kísérletek, eredmények

4.1 Kísérletek ismertetése

4.1.1 Hagyományos hárompontos hajlító vizsgálat

Mivel elsősorban az egyes szálak lehorgonyzó képességére, tapadására voltam kíváncsi, a szálerősítésű betonból készült próbatestek hárompontos hajlító vizsgálata tűnt ideálisnak. A vizsgálat kiváló a beton szívósságának megállapítására. A különböző geometriával rendelkező acélszálak mindegyik fajtájából 12 darab $7 \times 7 \times 25$ centiméteres hasábot készítettem. Ennyi próbatest már reális képet tud adni az egyes szálak teljesítőképességéről.

A kísérletek során 30 kg/m^3 -es száladagolással dolgoztam. A szálakat a száraz adalékanyag és cement keverékhez adagoltam, amely a szálak homogén eloszlását segítette elő. A keverés után a betont a $7 \times 7 \times 25$ -ös hasáboknál használatos szabvány szerint 2 rétegben tömörítettem. A próbatesteket 24 óras korban zsaluztam ki, és helyeztem víz alá.

A vizsgálatot 14 napos korban végeztem minden próbatestnél. Azért nem volt szükség 28 vagy 56 napos vizsgálatokra, mert nem a beton szilárdságára voltam kíváncsi (amelyre jelentős hatással van, hogy hány napos korban vizsgáljuk), hanem az acélszálak hatékonyságára.

A vizsgálatot a 4.1 ábrán látható gépen végeztem a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék laboratóriumában.

A kísérletek közben feljegyeztem 2,5 milliméterenként az adott lehajláshoz tartozó erőket. A beton megrepedése után kizárólag a szálak kihúzóához szükséges erőt mutatta a gép. Minél több erő kell ahhoz, hogy a szálak kihúzódjának, annál szívósabb az adott beton. A vizsgálatot 200 mm-es támaszközzel, 20 mm-es lehajlásig végeztem.



4.1 ábra: Hajlító gép

4.1.2 Zsanéros száلكihúzó vizsgálat

A szálerősítésű betonoknál, ha a szálak adagolása szakszerűen történik, homogén száleloszlást feltételezünk. A valóságban ennek ellenére jelentős különbségek lehetnek az egyes keresztmetszetek száltartalmai között. Ennek kiküszöbölése végett egy olyan vizsgálatot akartam elvégezni, amely nagy pontossággal meg tudja adni az egyes szálak kihúzó-ellenállását. Ennek a vizsgálatához egy egyedi kísérleti módszer született meg.

A kísérlet abból állt, hogy irányítottan, ismert helyre helyeztem el 3 darab acélszálát egy 4×4×16 centiméteres habarcschasámban, és ezt hárompontosan terhelve a szálak zavartalanul elkezdtek kihúzódni. Zavartalanul alatt azt értem, hogy semmilyen más erő nem lesz jelen, amely megmásítaná az eredményt, pusztán a szálak kihúzásához szükséges kvázi tiszta húzóerő.



4.2 ábra: Zsalu előkészítése

Ezt úgy értem el, hogy a hasábot közepén egy 7 mm vastag polisztirol darabbal elválasztottam (4.2 ábra), így a habarcs hajlító-húzó szilárdsága nem lesz jelen a kísérletben. Ennek a polisztirol elemnek más funkciója is van; ebbe került bele a 3 darab acélszál (4.3 ábra), és tartotta egy helyben, míg bele nem került a habarcsba. Majd végül egy teherelosztóként funkcionáló zsanér került a hasáb tetejére. Ezt különböző méretű csavarokkal rögzítettem a habarcsba úgy, hogy azok ne érjenek hozzá a szálakhoz, de legyenek benne olyan mélyen, hogy ne szakadjanak ki. A csukló pont a polisztirol elem fölé került, ennek köszönhetően



4.3 ábra: Az acélszálak és a polisztirol elemek

tudjuk a hasábot a polisztirollal egy vonalban terhelni, így a terhelés központos lesz. A tömörítést nem lehetett a vibrosztalon végezni, mert a szálak elmozdultak volna, így ezt manuálisan oldottam meg. A tömörítést 2 rétegben végeztem. Először csak a szálak magasságáig (alulról 1,5 cm) töltöttem fel habarccsal, és tömörítettem, hogy a szálak biztosan a helyükön maradjanak, majd teljesen megtöltöttem a zsalut, és újra tömörítettem. Ezután a zsanért helyeztem rá.

A rögzítésként használt csavarokat nem csak belenyomtam a habarcsba, hanem csavartam. Ezzel azt próbáltam meg elérni, hogy minél kevesebb levegő kerüljön a keverékbe.

Minden szálfajtából 4 darab próbatestet készítettem, tehát az 5 különböző kialakítású szálam, és a 2 referencia szál összesen 28 darab próbatestet eredményezett. A próbatesteket 1 napos

korban zsaluztam ki, majd helyeztem vízbe. 7 nap után kivettem a vízből, és 6 napig szobahőmérsékleten tároltam őket. A vizsgálatot 14 napos korban végeztem a 4.4 ábrán látható gépen. Egy elmozdulás mérőt is használtam a méréshez, amely segítségével az adott lehajlás mértékéhez erőt tudtam párosítani. Mivel ez a gép nem képes az erő-elmozdulás egyidejű detektálására,



4.4 ábra: Hárompontos habarcs hajlító gép

ezt nekem kellett megtennem. Ezt úgy oldottam meg, hogy minden egyes kísérletet rögzítettem videokamerával, majd később kielemeztem. A méréseket 18 mm lehajlásig végeztem, annak ellenére, hogy maximum 2-5 milliméterig hat a szálakra kvázi tiszta húzás. Ennél nagyobb mértékű lehajlásnál már olyan mértékű hajlítás is jelen van, amelyet nem lehet figyelmen kívül hagyni.

A gépre még rászereztem egy 2 tükörből álló rendszert (4.5-4.6 ábrák), amellyel az volt a



4.5 ábra: Kijelző tükrözése



4.6 ábra: A második tükör

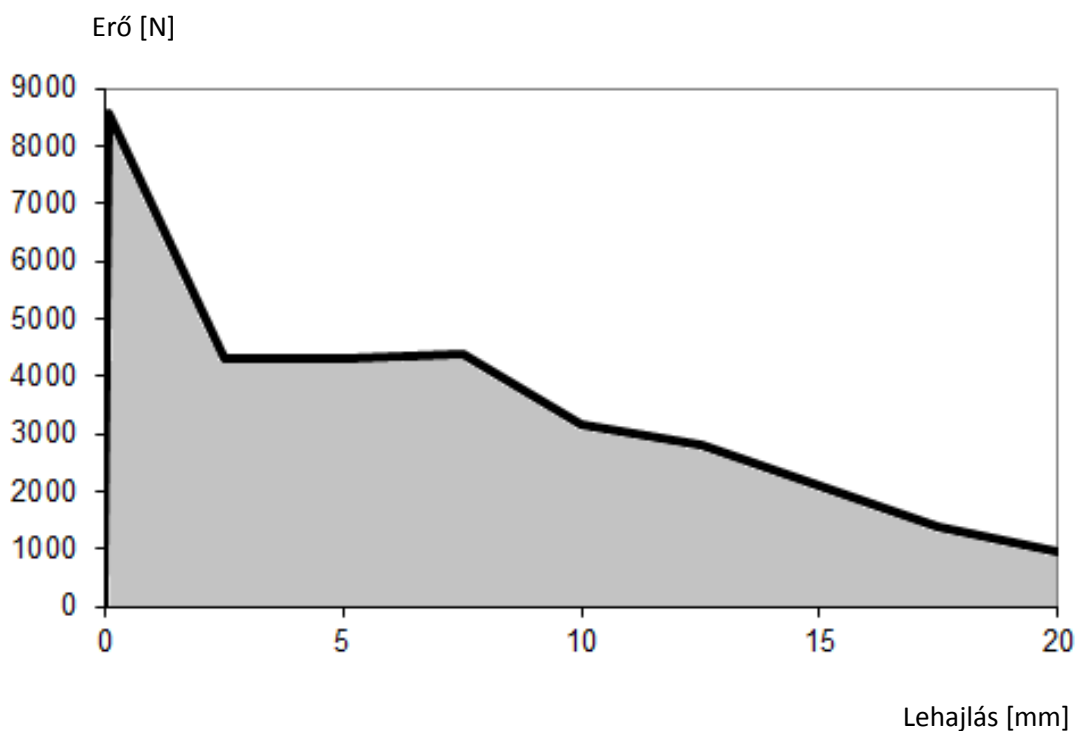
célom, hogy a kijelző képe az elmozdulás mérőhöz minél közelebb legyen, így kisebb területet kelljen a kamerával felvennem (4.7 ábra), hogy az értékek jobban, élesebben látszódjanak majd a felvételen. Ennek köszönhetően elég jól láthatóak lettek az eredmények a videón, így azok elemzésekor nem volt értelmezési problémám.



4.7 ábra: A vizsgálat a kamera szemszögéből

4.2 Eredmények

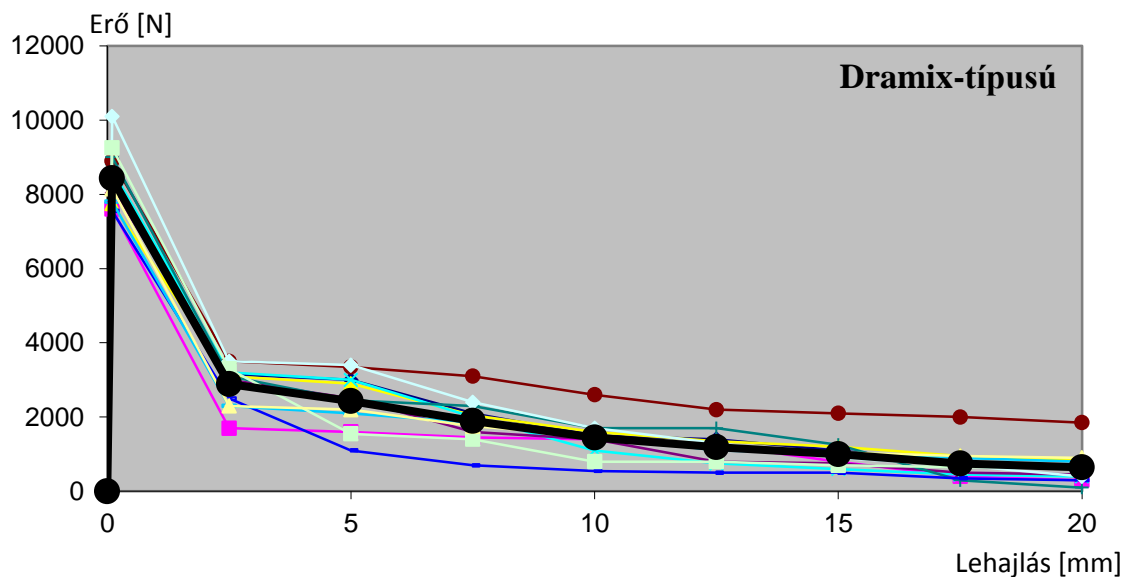
A hárompontos hajlító kísérletek több szempontból is pozitív eredményt hoztak. Először is bebizonyosodott, hogy a 3 dimenzióban megmunkált szálak szívósabbá teszik a betont, mint 2 dimenzióban megmunkált szálak. Másodszer pedig, hogy az egyedi kialakítású acélszálaim szinte mindegyike jobban teljesített, mint a Dramix-típusú kampós végű referencia szál. A különböző szálak mindegyikéből 12-12 darab $7 \times 7 \times 25$ cm-es próbatestet öntöttem, amelyeknek erő-elmozdulás diagramjait itt ismertetem.



4.8 ábra: Szívóssági index értelmezése

A 4.8 ábrán a szürkével jelölt terület adja meg az ábra alatti terület értelmezését. Az ábra alatti területet tekintem dolgozatomban a szálerősítésű betonok szívóssági indexének.

Az egyes szálfajták erő-elmozdulás diagramjait a 4.9-4.20 ábrákon mutatom be.

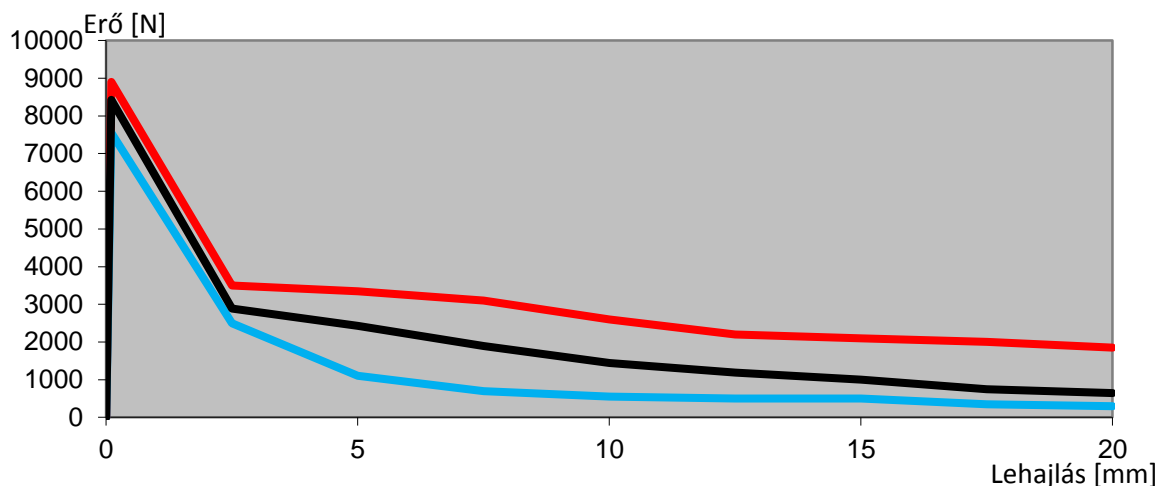


4.9 ábra: A 12 próbatest vizsgálatából származó erő-lehajlás diagramok, és a diagramok átlag értéke Dramix-típusú szál adagolásával

A 4.9 ábrán lévő feketével jelölt vonal a 12 kísérlet eredményének az átlaga. Ennek értékeit az 4.1 táblázat mutatja, amelynek felső sorában a lehajlás mértéke milliméterben, az alsó sorában pedig az erő mértéke látható Newton-ban (az első erő érték a repesztőerő):

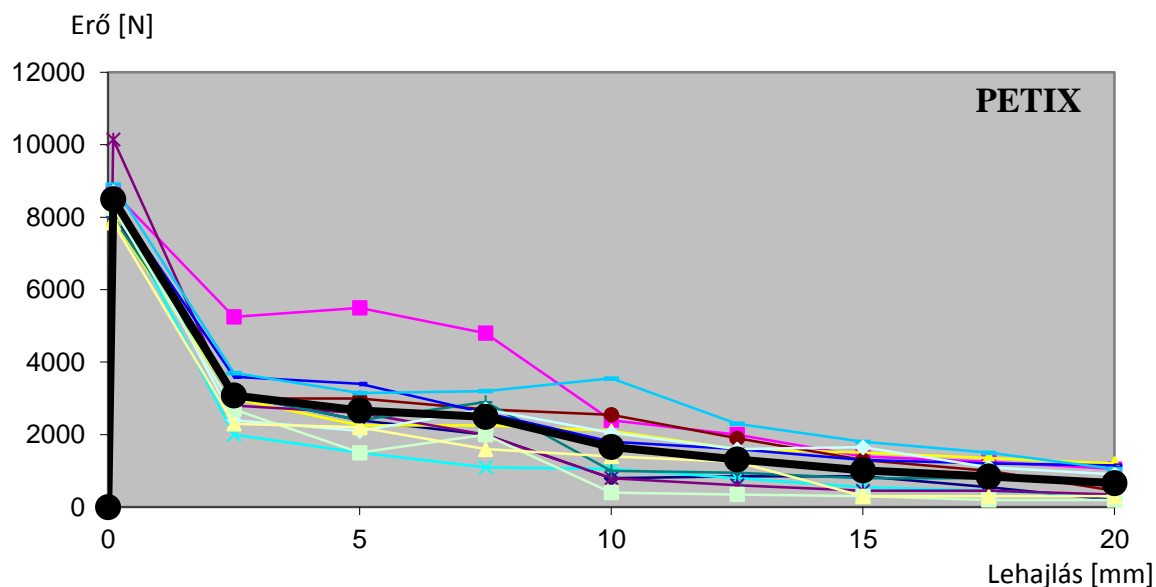
	2,5 mm	5 mm	7,5 mm	10 mm	12,5 mm	15 mm	17,5 mm	20 mm
8429 N	2888 N	2429 N	1892 N	1446 N	1192 N	1000 N	746 N	642 N

4.1 táblázat: Összetartozó terhelőerő és lehajlás értékek a Dramix-típusú szálnál



4.10 ábra: A legnagyobb, legkisebb és a 12 próbatestre vonatkozó átlagolt szívósság

A 4.10 ábrán piros vonallal jelenítem meg a legnagyobb szívósságot mutató próbatest erő-lehajlás diagramját, kék vonallal jelenítem meg a legkisebb szívósságot mutató próbatest erő-lehajlás diagramját, míg fekete vonallal a 4.9 ábrán is fekete vonallal jelölt, a 12 próbatestre vonatkozó átlagolt erő-lehajlás diagramot ábrázolom.

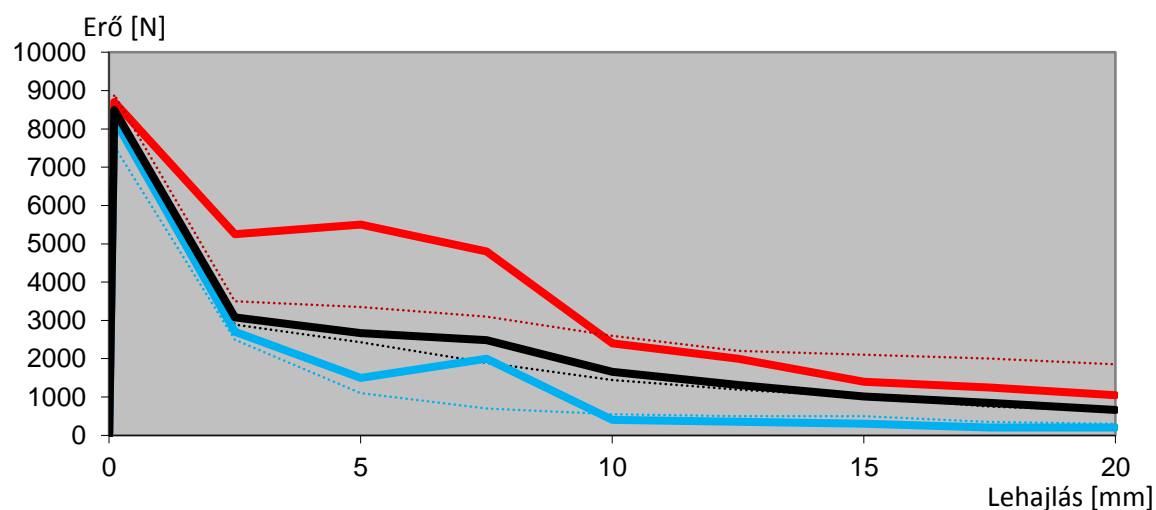


4.11 ábra: A 12 próbatest vizsgálatából származó erő-lehajlás diagramok, és a diagramok átlag értéke PETIX szál adagolásával

A 4.11 ábrán lévő feketével jelölt vonal a 12 kísérlet eredményének az átlaga. Ennek értékeit az 4.2 táblázat mutatja, amelynek felső sorában a lehajlás mértéke milliméterben, az alsó sorában pedig az erő mértéke látható Newton-ban (az első erő érték a repesztőerő):

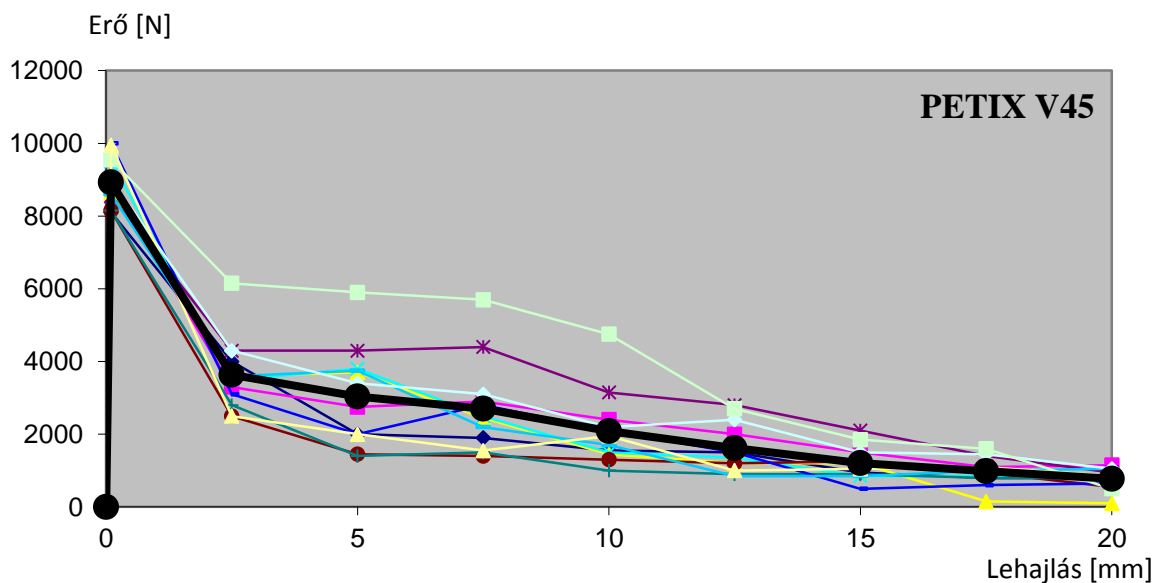
	2,5 mm	5 mm	7,5 mm	10 mm	12,5 mm	15 mm	17,5 mm	20 mm
8492 N	3079 N	2667 N	2488 N	1658 N	1317 N	1017 N	846 N	658 N

4.2 táblázat: Összetartozó terhelőerő és lehajlás értékek a PETIX szálnál



4.12 ábra: A legnagyobb, legkisebb és a 12 próbatestre vonatkozó átlagolt szívósság

A 4.12 ábrán piros vonallal jelenítem meg a legnagyobb szívósságot mutató próbatest erő-lehajlás diagramját, kék vonallal jelenítem meg a legkisebb szívósságot mutató próbatest erő-lehajlás diagramját, míg fekete vonallal a 4.11 ábrán is fekete vonallal jelölt, a 12 próbatestre vonatkozó átlagolt erő-lehajlás diagramot ábrázolom. A 4.12 ábrán vékony vonallal megjelenítem a Dramix-típusú szállal készített próbatestek eredményeit a 4.10 ábráról.

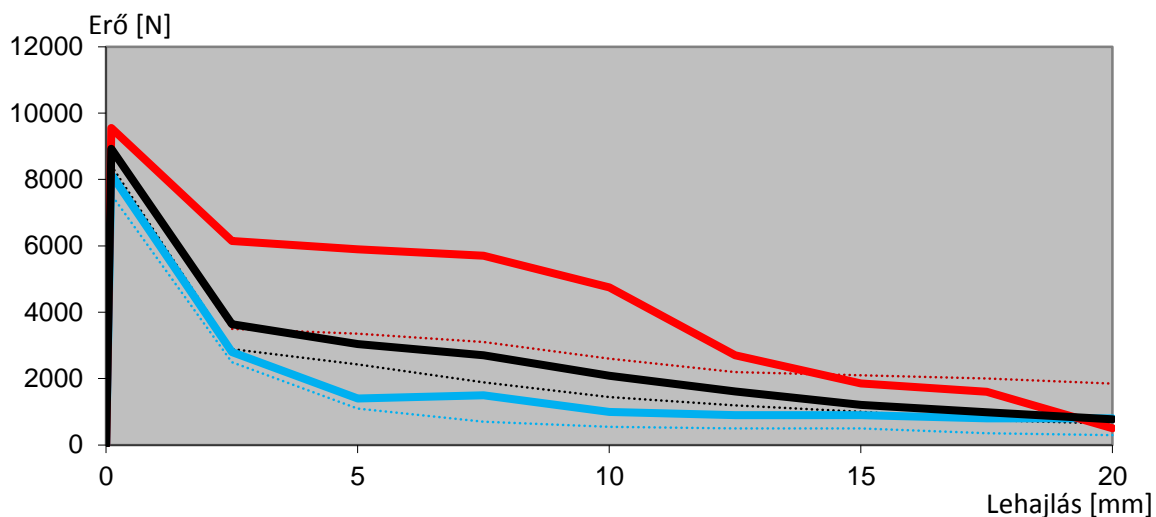


4.13 ábra: A 12 próbatest vizsgálatából származó erő-lehajlás diagramok, és a diagramok átlag értéke PETIX V45 szál adagolásával

A 4.13 ábrán lévő feketével jelölt vonal a 12 kísérlet eredményének az átlaga. Ennek értékeit az 4.3 táblázat mutatja, amelynek felső sorában a lehajlás mértéke milliméterben, az alsó sorában pedig az erő mértéke látható Newton-ban (az első erő érték a repesztőerő):

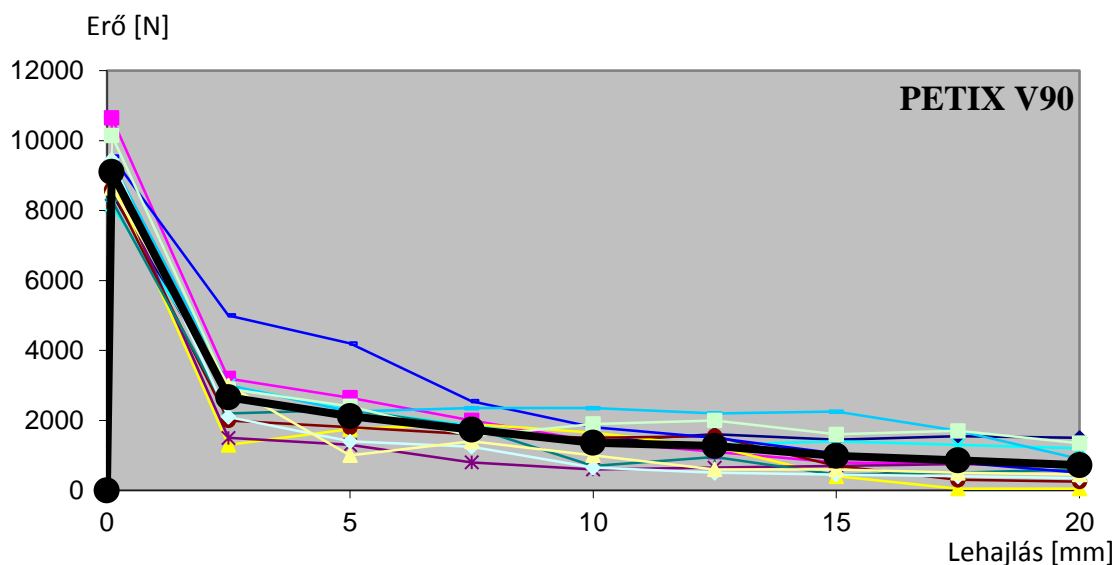
	2,5 mm	5 mm	7,5 mm	10 mm	12,5 mm	15 mm	17,5 mm	20 mm	
	8425 N	3638 N	3038 N	2700 N	2088 N	1617 N	1208 N	983 N	775 N

4.3 táblázat: Összetartozó terhelőerő és lehajlás értékek a PETIX V45 szálnál



4.14 ábra: A legnagyobb, legkisebb és a 12 próbatestre vonatkozó átlagolt szívósság

A 4.14 ábrán piros vonallal jelenítem meg a legnagyobb szívósságot mutató próbatest erő-lehajlás diagramját, kék vonallal jelenítem meg a legkisebb szívósságot mutató próbatest erő-lehajlás diagramját, míg fekete vonallal a 4.13 ábrán is fekete vonallal jelölt, a 12 próbatestre vonatkozó átlagolt erő-lehajlás diagramot ábrázolom. A 4.14 ábrán vékony vonallal megjelenítem a Dramix-típusú szállal készített próbatestek eredményeit a 4.10 ábráról.

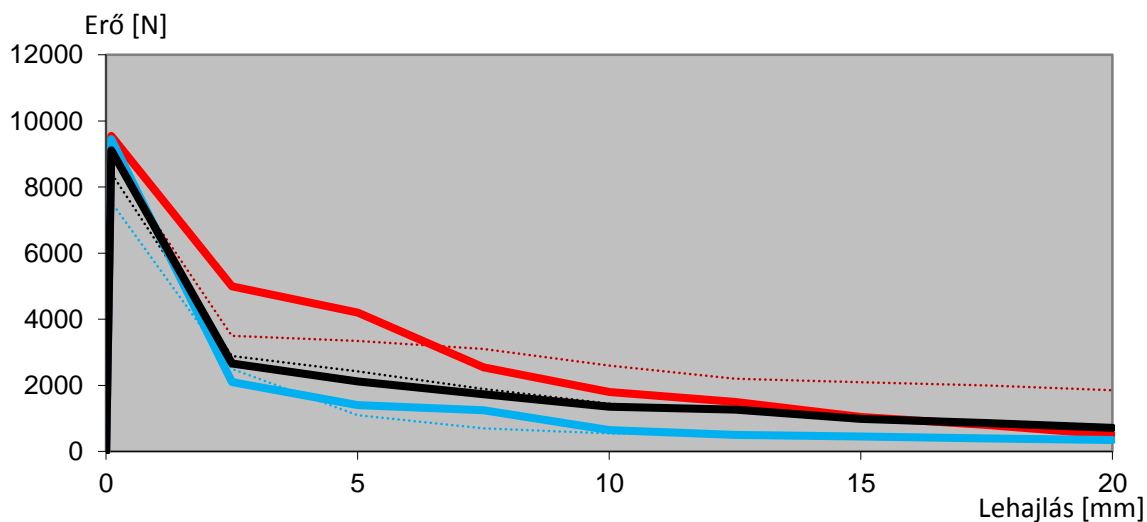


4.15 ábra: A 12 próbatest vizsgálatából származó erő-lehajlás diagramok, és a diagramok átlag értéke PETIX V90 szál adagolásával

A 4.15 ábrán lévő feketével jelölt vonal a 12 kísérlet eredményének az átlaga. Ennek értékeit az 4.4 táblázat mutatja, amelynek felső sorában a lehajlás mértéke milliméterben, az alsó sorában pedig az erő mértéke látható Newton-ban (az első erő érték a repesztőerő):

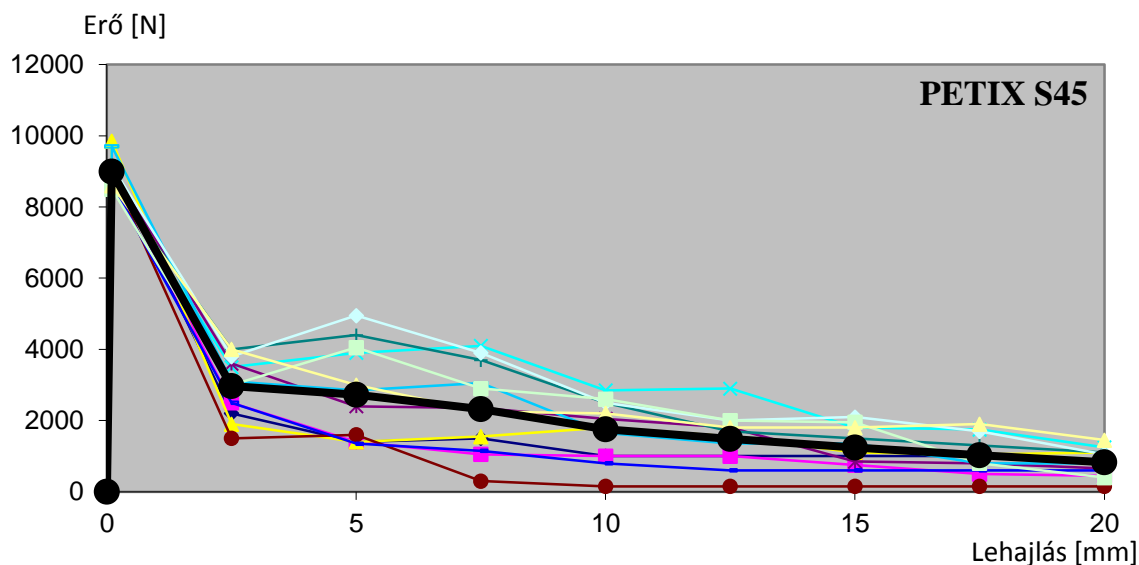
	2,5 mm	5 mm	7,5 mm	10 mm	12,5 mm	15 mm	17,5 mm	20 mm
9108 N	2658 N	2121 N	1738 N	1358 N	1267 N	988 N	858 N	721 N

4.4 táblázat: Összetartozó terhelőerő és lehajlás értékek a PETIX V90 szálnál



4.16 ábra: A legnagyobb, legkisebb és a 12 próbatestre vonatkozó átlagolt szívósság

A 4.16 ábrán piros vonallal jelenítem meg a legnagyobb szívósságot mutató próbatest erő-lehajlás diagramját, kék vonallal jelenítem meg a legkisebb szívósságot mutató próbatest erő-lehajlás diagramját, míg fekete vonallal a 4.15 ábrán is fekete vonallal jelölt, a 12 próbatestre vonatkozó átlagolt erő-lehajlás diagramot ábrázolom. A 4.16 ábrán vékony vonallal megjelenítem a Dramix-típusú szállal készített próbatestek eredményeit a 4.10 ábráról.

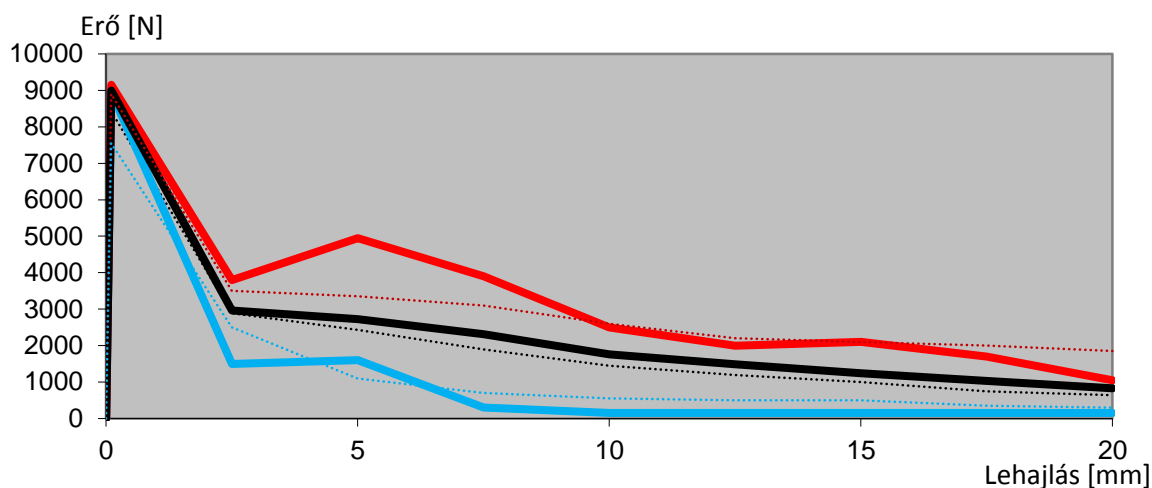


4.17 ábra: A 12 próbatest vizsgálatából származó erő-lehajlás diagramok, és a diagramok átlag értéke PETIX S45 szál adagolásával

A 4.17 ábrán lévő feketével jelölt vonal a 12 kísérlet eredményének az átlaga. Ennek értékeit az 4.5 táblázat mutatja, amelynek felső sorában a lehajlás mértéke milliméterben, az alsó sorában pedig az erő mértéke látható Newton-ban (az első erő érték a repesztőerő):

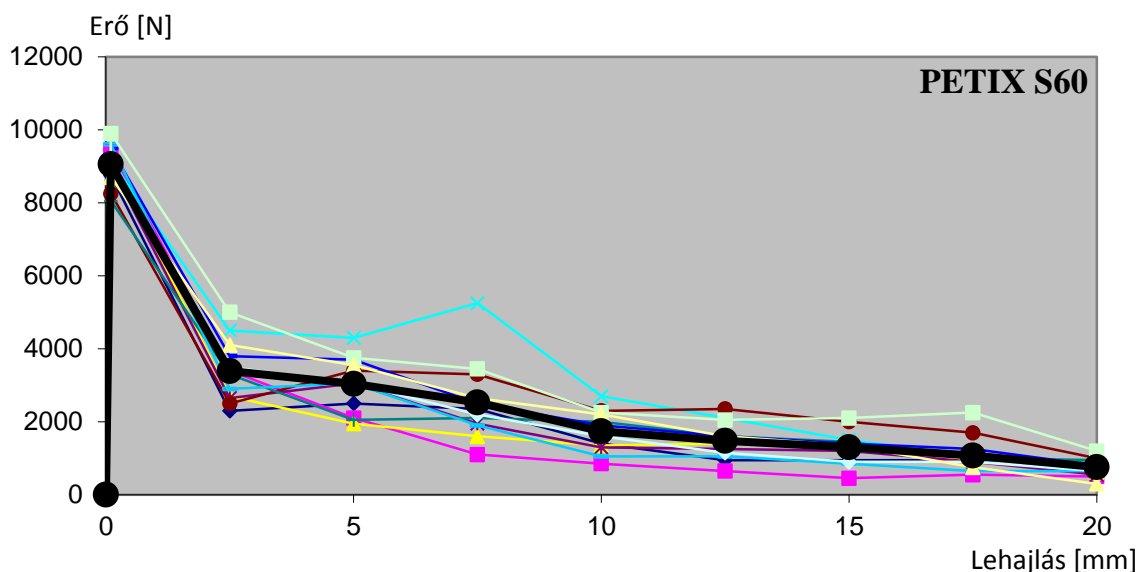
	2,5 mm	5 mm	7,5 mm	10 mm	12,5 mm	15 mm	17,5 mm	20 mm
	8996 N	2967 N	2725 N	2317 N	1758 N	1488 N	1246 N	825 N

4.5 táblázat: Összetartozó terhelőerő és lehajlás értékek a PETIX S45 szálnál



4.18 ábra: A legnagyobb, legkisebb és a 12 próbatestre vonatkozó átlagolt szívósság

A 4.18 ábrán piros vonallal jelenítem meg a legnagyobb szívósságot mutató próbatest erő-lehajlás diagramját, kék vonallal jelenítem meg a legkisebb szívósságot mutató próbatest erő-lehajlás diagramját, míg fekete vonallal a 4.17 ábrán is fekete vonallal jelölt, a 12 próbatestre vonatkozó átlagolt erő-lehajlás diagramot ábrázolom. A 4.18 ábrán vékony vonallal megjelenítem a Dramix-típusú szállal készített próbatestek eredményeit a 4.10 ábráról.

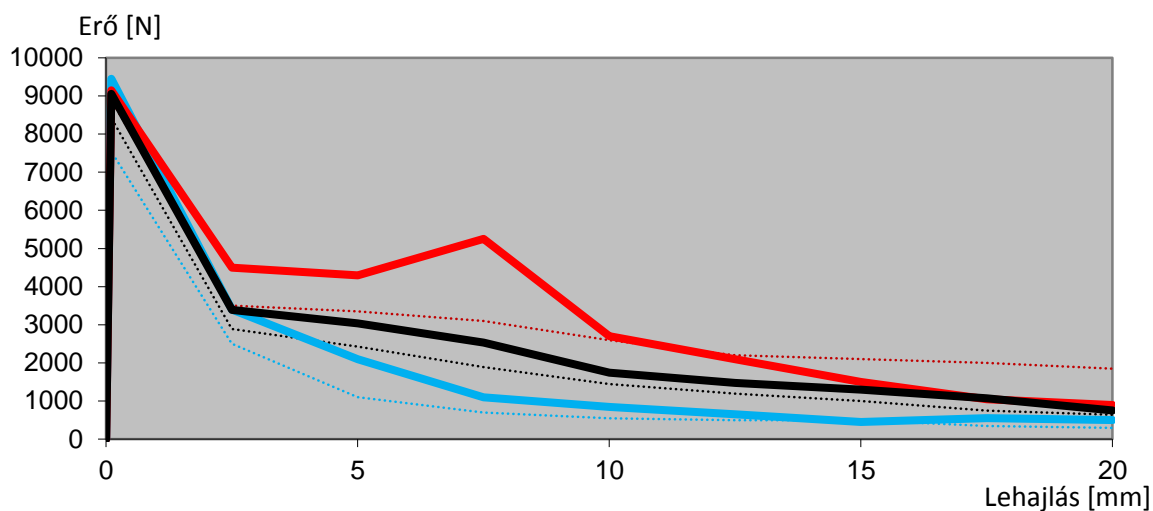


4.19 ábra: A 12 próbatest vizsgálatából származó erő-lehajlás diagramok, és a diagramok átlag értéke PETIX S60 szál adagolásával

A 4.19 ábrán lévő feketével jelölt vonal a 12 kísérlet eredményének az átlaga. Ennek értékeit az 4.6 táblázat mutatja, amelynek felső sorában a lehajlás mértéke milliméterben, az alsó sorában pedig az erő mértéke látható Newton-ban (az első erő érték a repesztőerő):

	2,5 mm	5 mm	7,5 mm	10 mm	12,5 mm	15 mm	17,5 mm	20 mm
9054 N	3388 N	3038 N	2529 N	1742 N	1479 N	1300 N	1071 N	754 N

4.6 táblázat: Összetartozó terhelőerő és lehajlás értékek a PETIX S60 szálnál

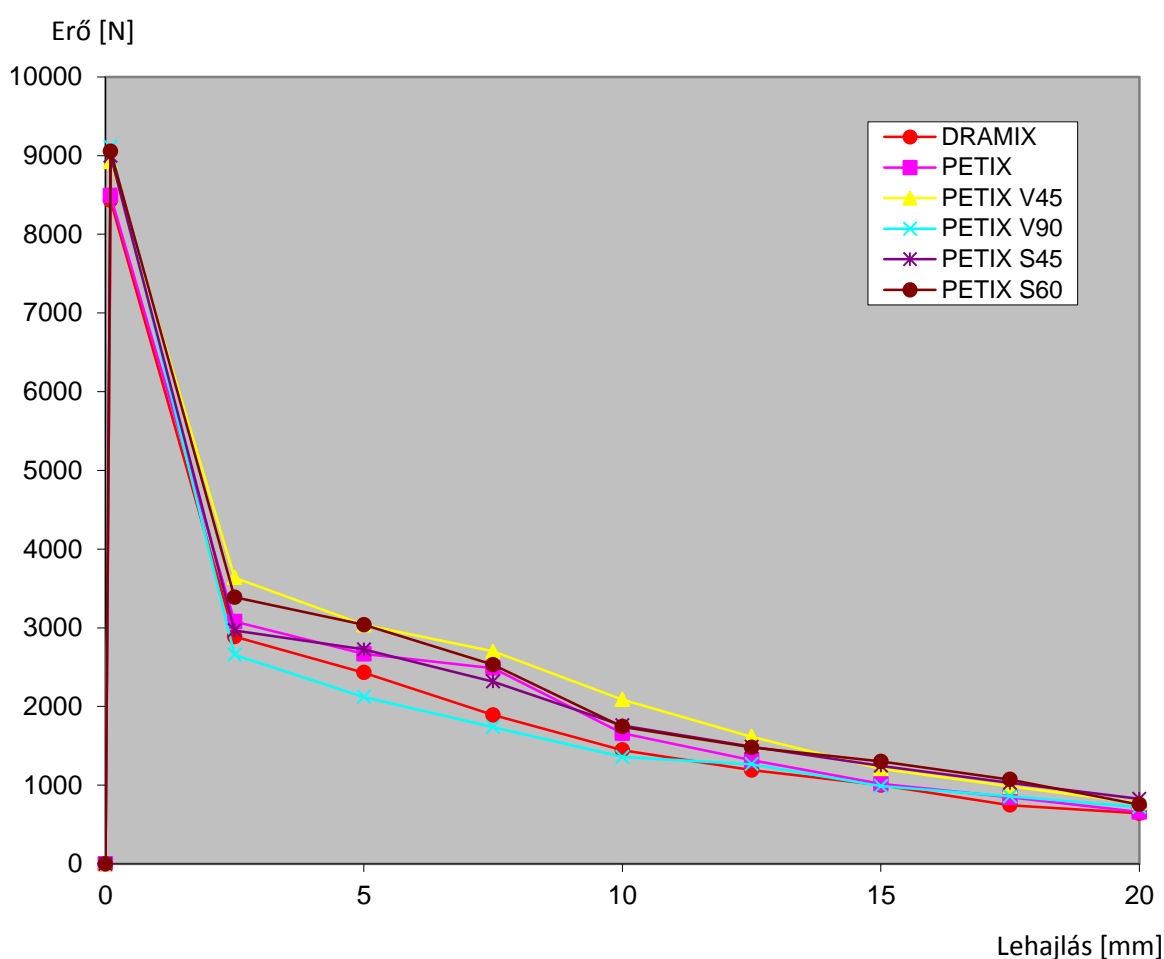


4.20 ábra: A legnagyobb, legkisebb és a 12 próbatestre vonatkozó átlagolt szívósság

A 4.20 ábrán piros vonallal jeleníttem meg a legnagyobb szívósságot mutató próbatest erő-lehajlás diagramját, kék vonallal jeleníttem meg a legkisebb szívósságot mutató próbatest erő-lehajlás diagramját, míg fekete vonallal a 4.19 ábrán is fekete vonallal jelölt, a 12 próbatestre vonatkozó átlagolt erő-lehajlás diagramot ábrázolom. A 4.20 ábrán vékony vonallal megjeleníttem a Dramix-típusú szállal készített próbatestek eredményeit a 4.10 ábráról.

A PETIX-sorozatnál egy érdekes jelenségre lehetünk figyelmesek; a lehajlás mértékének növekedésével egyetemben erőnövekményt is felfedezni vélünk. A saját szálakkal készített próbatestek több mint 90%-nál megfigyelhető ez a jelenség, míg a kampós végű szálakkal készületeknél egyiknél sem. Ennek ellenére a 12 törés átlagánál ez nem mutatkozik meg egyik fajta szálnál sem. Az oka, hogy ez a tulajdonság minden egyes próbatestnél máshol, előre megjósolhatatlan lehajlási mértéknél jelentkezik. Több esetben már közvetlenül a beton megrepedése után egy felkeményedő szakasz következett, máshol viszont a felkeményedés később, 5-10 mm-es, de akadt olyan is, amelynél 15 mm-es lehajlásnál volt megfigyelhető.

Elméletben minél nagyobb a lehajlás, annál kisebb a szálak kihúzó ellenállása. Ez figyelhető meg a kampós végű szálaknál. Ezzel szemben a hullámos szálaknak a lehorgonyzó képessége olyan nagymértékű, hogy képesek a fent leírt felkeményedést okozni. A lehajlás növekedésével a szálak már hajlításnak is ki vannak téve, amely olyan mértékű súrlódásnövekedést eredményezhet, amely képes felkeményedést okozni.

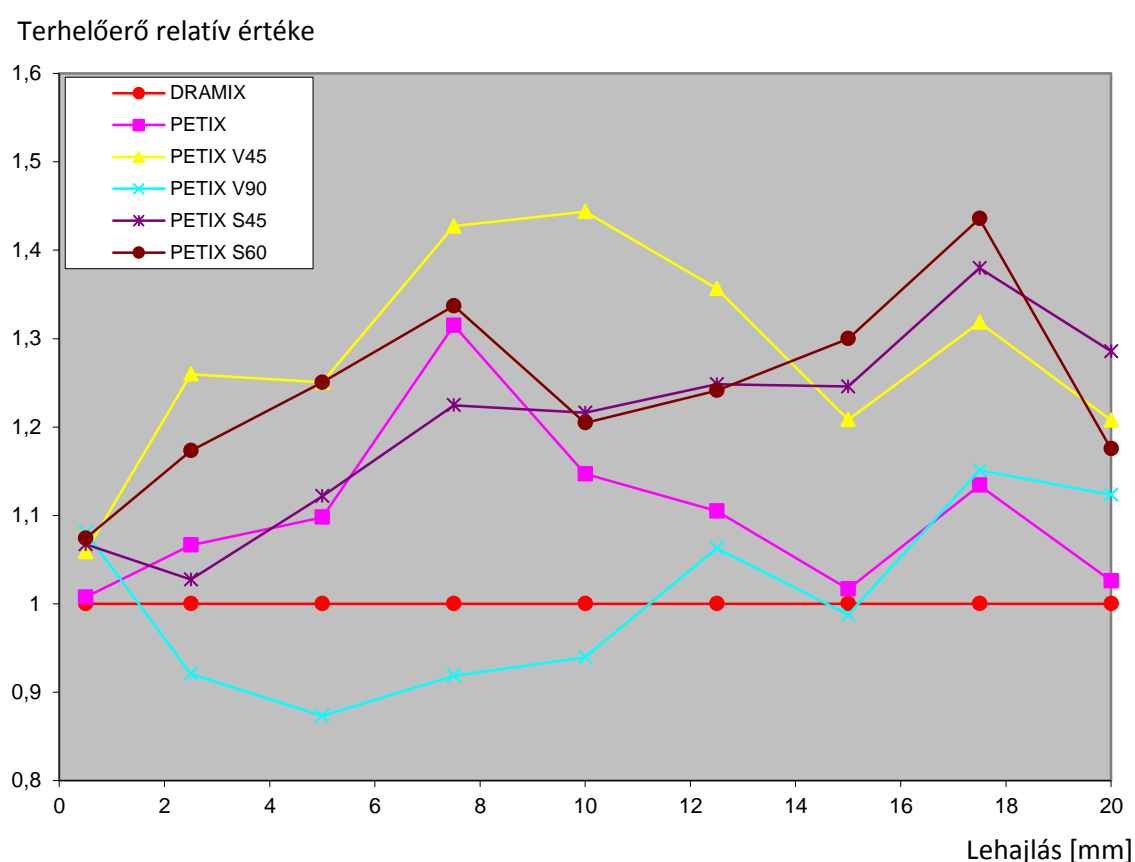


4.21 ábra: A különböző szálakkal készült próbatestek vizsgálati eredményei; átlagolt erő-lehajlás diagramok

A 4.21 összegző ábra a különböző szálakkal készült beton 12 próbatestének töréseinek átlagát mutatja. Látszik, hogy a PETIX V90-en kívül az összes többi szál jobban teljesített a referenciaszálnál, de ami talán még figyelemre méltóbb az az, hogy a 3 dimenzióban megmunkáltak grafikonja a 2 dimenziós PETIX fölött helyezkedik el.

Ami még érdekes, hogy a legjobb eredményt a PETIX V45 hozta, a leggyengébbet pedig a V90. Ennek oka az lehetne, hogy a hasonló kialakítás ellenére a V90-nél a középső hullám relatív elfordulása nagyobb, ám az egymáshoz képesti relatív szögtörése kisebb, mint V45-ös társának. Ezek szerint ez a szögtörés csökkenés ilyen leromlást eredményezett.

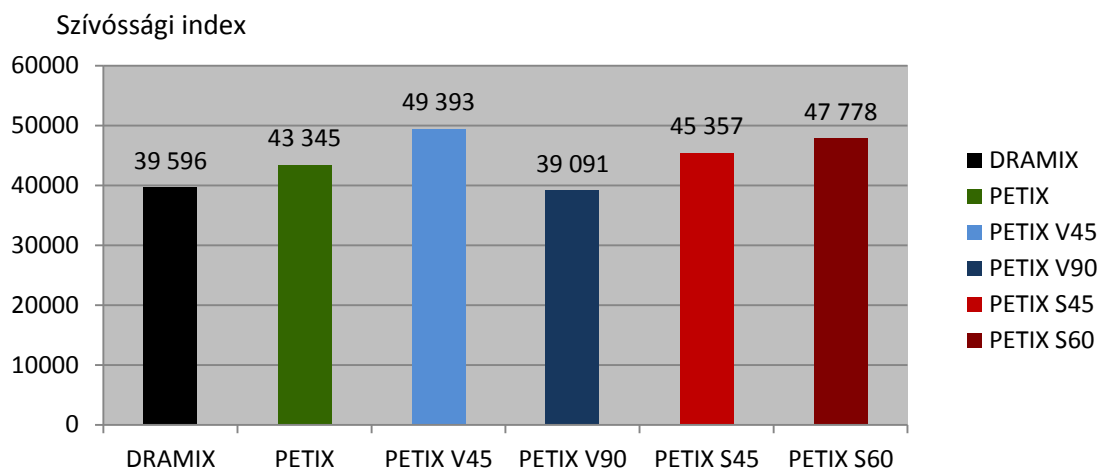
Egy későbbi diagramnál még kitérek eme két szál közti jelentős különbségre.



4.22 ábra: A különböző szálakkal készült próbatestek vizsgálati eredményei; átlagolt relatív terhelőerő-lehajlás diagramok a referenciaszállal készült próbatestek átlagolt erő-lehajlás diagramjára vonatkoztatva

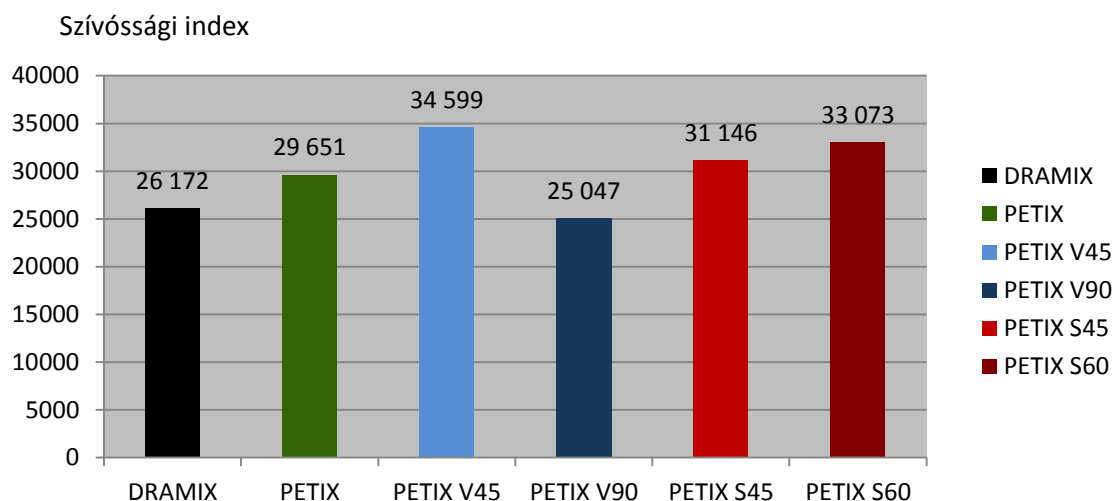
A 4.22 ábra annyival szemléletesebb a 4.21 ábránál, hogy itt még szembetűnőbb a szálak közti különbség. A 4.22 ábra azt mutatja, hogy az egyes szálak hányszor akkora erőt vesznek fel az adott lehajlásnál, mint a referenciaszál. A PETIX és a PETIX V90-en kívül a többi fajta nem igazán megy a referencia szál által kifejtett kihúzó ellenállás 1,2-szerese alá, és van, hogy még az 1,4-szerese fölé is megy. A PETIX V45 például a 10 mm-es lehajlásnál 1,44-szer

annyi erőt vesz fel, mint a kampós végű szál, de az S60 is eléri az 1,44-szeres értéket, csak a 17,5 mm-es lehajlásnál. Az ábrán az is jól látszik, hogy a V90-es szál körülbelül 11 mm-es lehajlásnál a referencia szál fölé kerül.



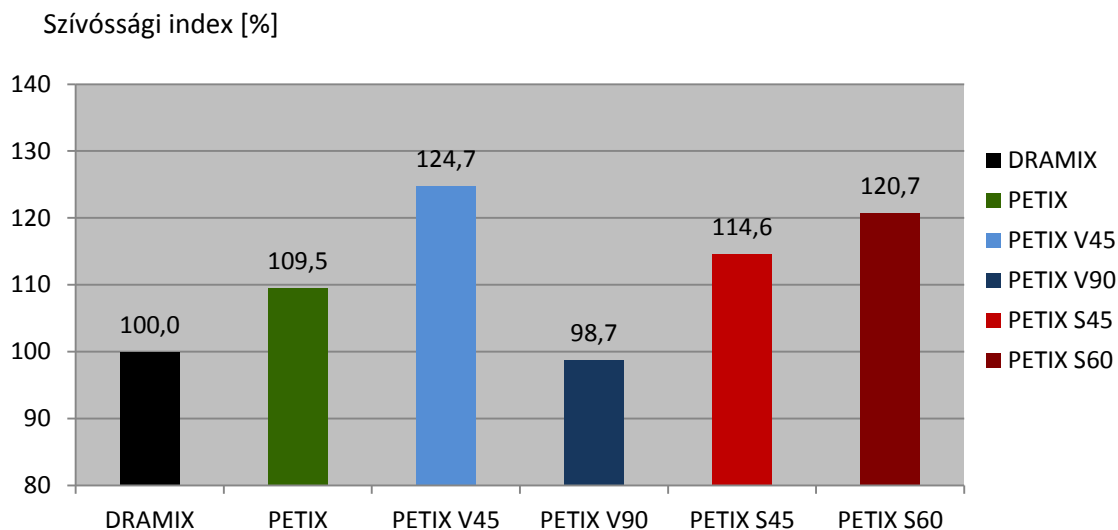
4.23 ábra: Szívóssági indexek száltípusonként a teljes erő-lehajlás grafikonra vonatkozóan

Mint azt korábban említettem, a szálerősítésű betonok szívóssága alatt az erő-elmozdulás diagram alatti területet értjük. Az egyes szálakhoz tartozó erő-elmozdulás ábrák alatti területek a 4.23 ábrán láthatók. Ez a grafikon a teljes ábra alatti területeket mutatja, ami azt jelenti, hogy a repesztőerő is benne van, ami pedig szinte kizárólag betontulajdonság.



4.24 ábra: Szívóssági indexek száltípusonként a 2,5-20 mm lehajlás közti erő-lehajlás grafikonra vonatkozóan

A 4.24 ábra nem tartalmazza a repesztő erőhöz tartozó ábrarész területét, mert az betontulajdonság, és nem a szálaktól függ. Ezek a területek 2,5-20 mm lehajlás közti ábrarészek alatti területek.

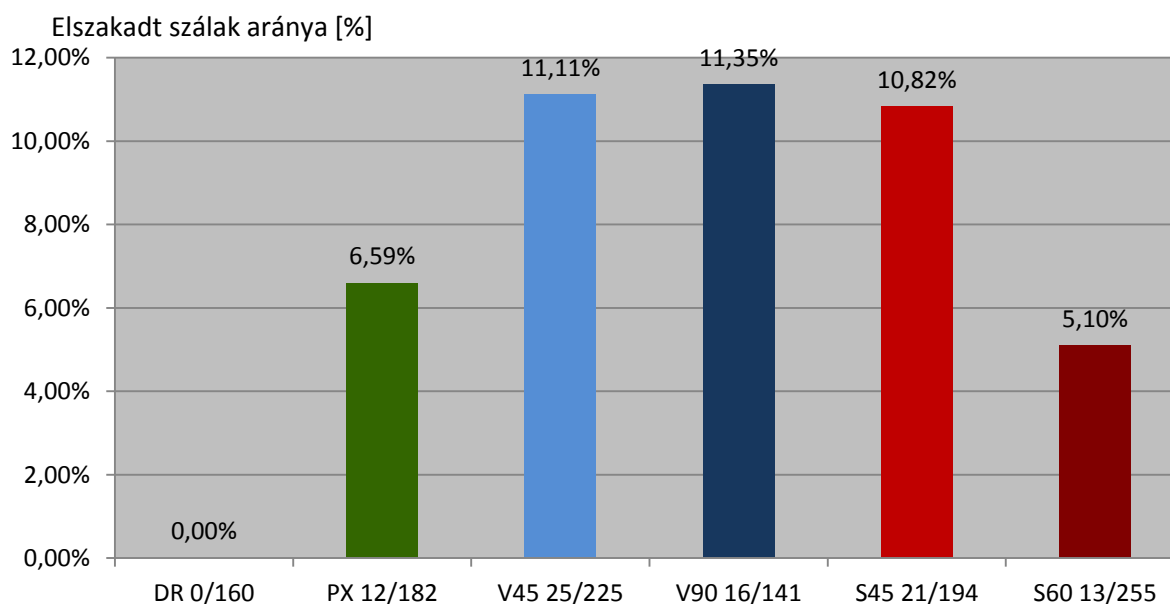


4.25 ábra: Szívóssági indexek száltípusonként a 2,5-20 mm lehajlás közti erő-lehajlás grafikonra vonatkozóan a referenciaszállra vonatkoztatva

A 4.25 ábra jobban szemlélteti az egyes szálak közti különbségeket. A diagram az ábra alatti területek százalékos arányát mutatja a referenciaszállhoz viszonyítva. Az ábrán látszik, hogy a V45 közel 25%-al szívósabbá teszi a betont, mint a Dramix-típusú szál. A V90, amely mondhatni a leggyengébben szerepelt a vizsgálatok során, nem marad el sokkal a referenciaszálltól.

A szakirodalom szerint a szálak eloszlását a betonban homogénnek feltételezzük, amelyet a vizsgálataim eredményei alapján csak meglehetősen közelítő jellegű kijelentésnek tekinthetünk. A szálak eloszlása a betonban függ maguknak a szálaknak az alakjától, a bedolgozási folyamatától, és függhet az adalékanyag frakcióitól is, mert a nagyobb szemcsék, kavicsok már hatással lehetnek a szálak helyezkedésére.

Minden próbatestnél megszámláltam, hogy hány darab szál van a repedés keresztmetszetében, és ezek közül a kísérlet során mennyi szakadt el. Ha egy ilyen kísérletnél a szálak elszakadnak, az azt jelenti, hogy a szálnak a lehorgonyzó képessége olyan nagy volt, hogy az acél a kihúzó helyett elérte a szakítószilárdságát, amely jelen esetben 1 400 MPa.

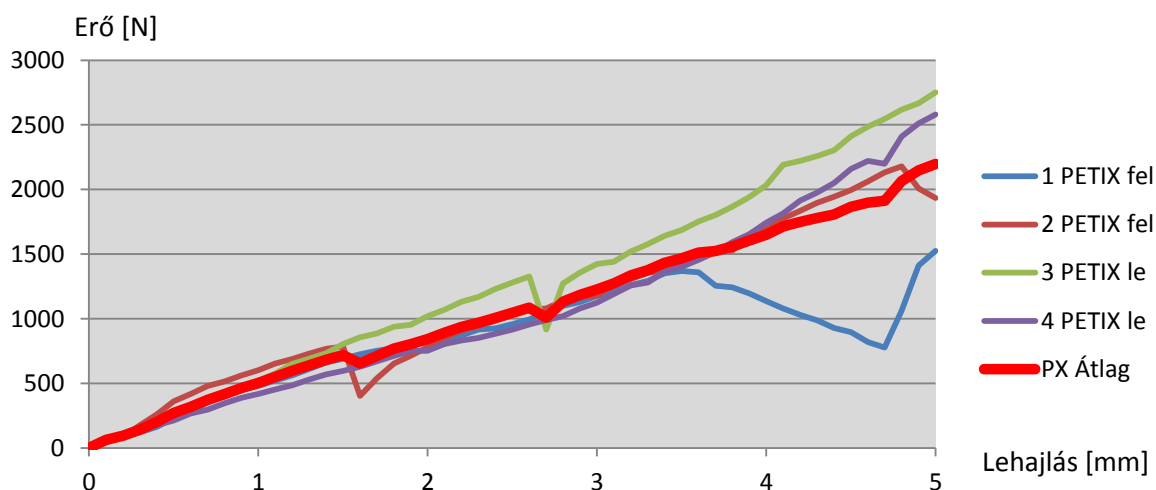


4.26 ábra: Az elszakadt szálak aránya a repedési keresztmetszetben levő összes szálhoz viszonyítva

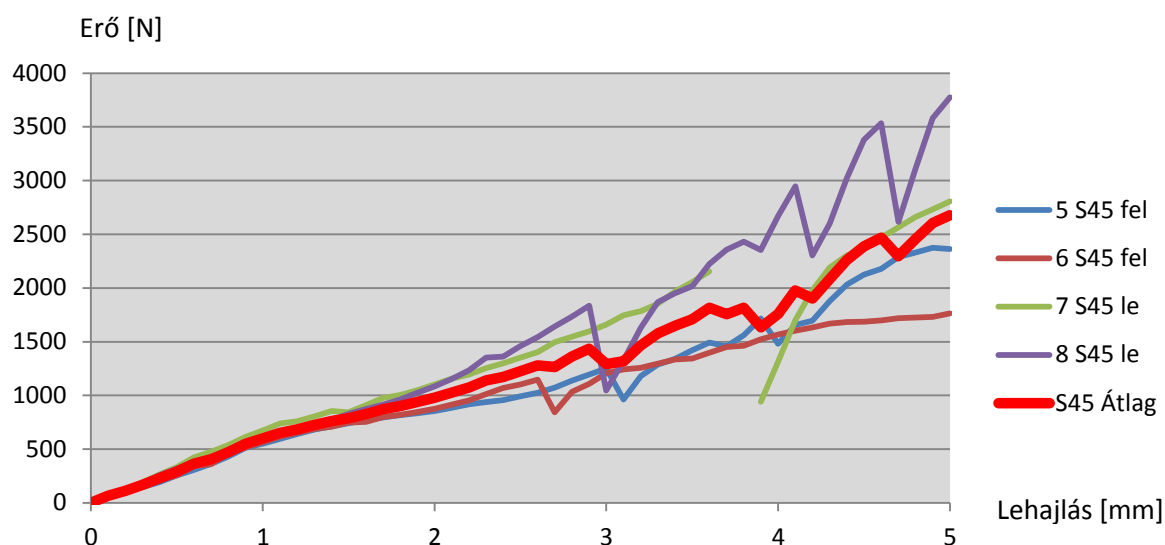
A 4.26 ábrán több érdekesség is megfigyelhető. Ami elsőre szembetűnik, az az, hogy a kampós végű szálak közül egy sem szakadt el. Ennek a szálnak nem olyan jó a lehorgonyzó képessége, hogy az acél elérje a szakítószilárdságát, és elszakadjon. A következő figyelemre méltó dolog, az az egyes keresztmetszetekben lévő szálmennyiség. Másfélszeres eltérések vannak darabszámban az egyes szálfajták között, annak ellenére, hogy minden próbatestet teljesen ugyanúgy készítettem el, ugyanakkora száladagolással, ugyanolyan betonkeverékkel, tömörítési és utókezelési technikával. Mindezek ellenére ekkora eltérés lett a keresztmetszeti száltartalomban. A harmadik érdekesség, hogy a legnagyobb elszakadt szál / összes keresztmetszeti szál arányszámmal a leggyengébben teljesítő V90 rendelkezik, annak ellenére, hogy a legkevesebb keresztmetszetben lévő acélszál is ebben az esetben figyelhető meg. Habár csomósodást egyik próbatestnél sem tapasztaltam, meglehet, hogy a V90 középső hullámának nagymértékű térbeli kitérése kedvezőtlenül befolyásolta a szálak eloszlását, így meglehetősen nagy eltérés keletkezett az egyes keresztmetszetek száltartalma között. Ezt az adat is alátámasztja, hogy a legkevesebb szál, ami a törési keresztmetszetben volt az 6 darab, a legtöbb pedig 21 darab. A többi száltípusnál is voltak esetenként számottevő eltérések, viszont azoknál a száleloszlás kedvezőbb volt, amelyre a repedés keresztmetszetében lévő nagyobb mennyiségű szálból következtettem.

A zsanéros szálkihúzó kísérletek alátámasztották a hárompontos hajlító kísérlet eredményeit, miszerint a 3 dimenzióban megmunkált szálak teljesítőképessége jobb a 2 dimenziósakénál. Ennél a kísérletnél két száltípust használtam referenciaként. Az egyik a hárompontos hajlító kísérleteknél használt Dramix-típusú szál, a másik pedig egy általam készített szál, amelyet pontosan a Dramix-típusú szál mintájára készítettem, a gyártmánykatalógusban megadott geometriai adatok alapján. Azért készítettem ilyen szálakat, hogy legyen referencia szálam, amely ugyanabból az anyagból készült, amelyből a PETIX szálak is, hogy pusztán a geometriai kialakításuk térjen el egymástól, és az eredményeket ne befolyásolják az anyagbeli különbségek. A szál jelölése DR.88.

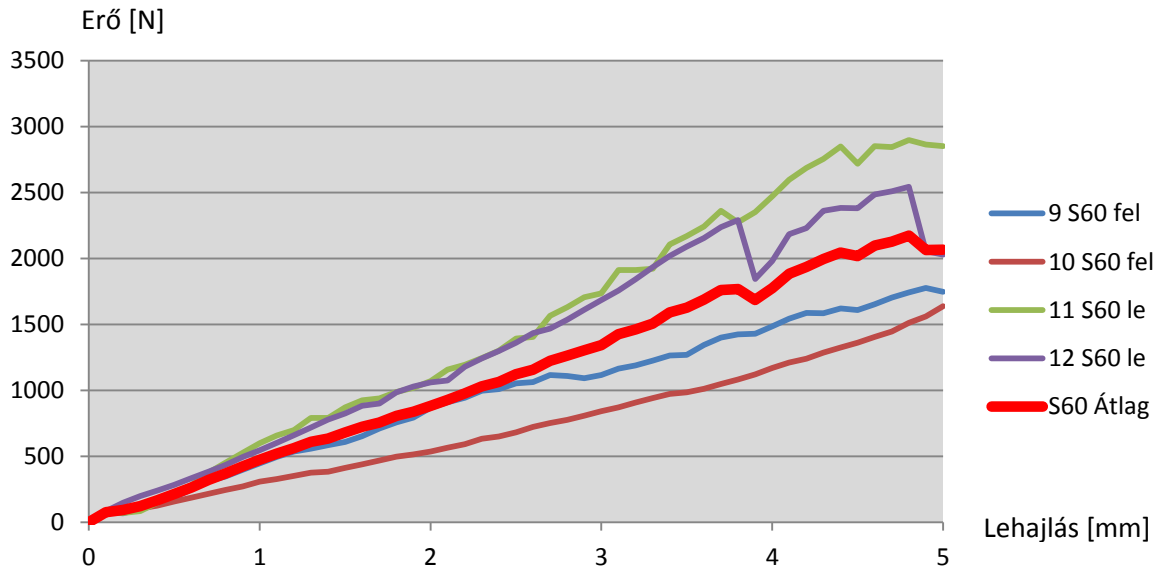
A különböző száltípusok zsanéros vizsgálataiból megkapható erő-lehajlás diagramokat a 4.27-4.34 ábrákon mutatom be.



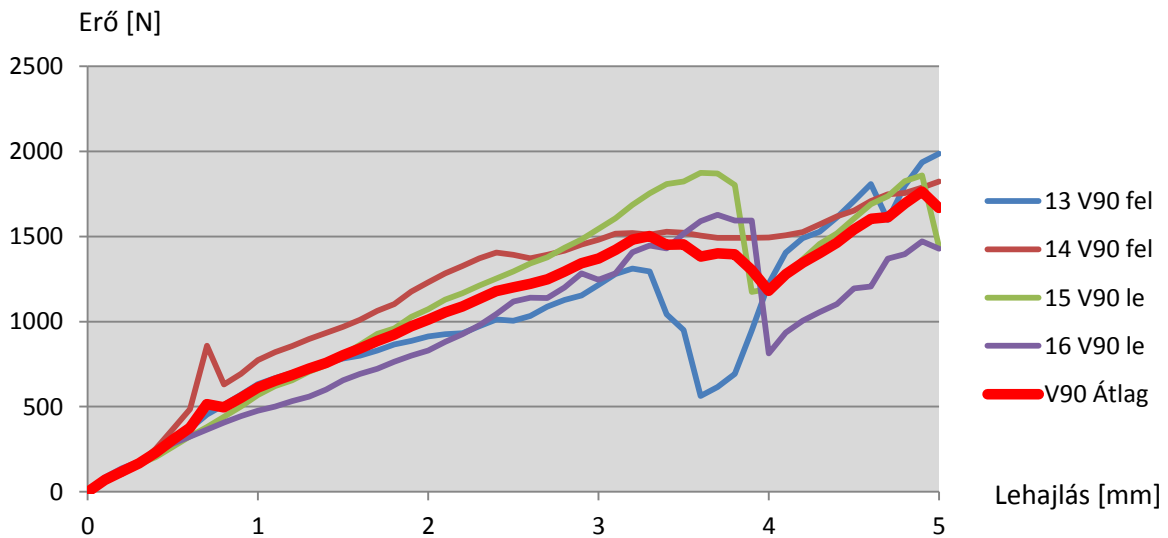
4.27 ábra: A PETIX szállal készült zsanéros próbatestek erő-lehajlás diagramjai



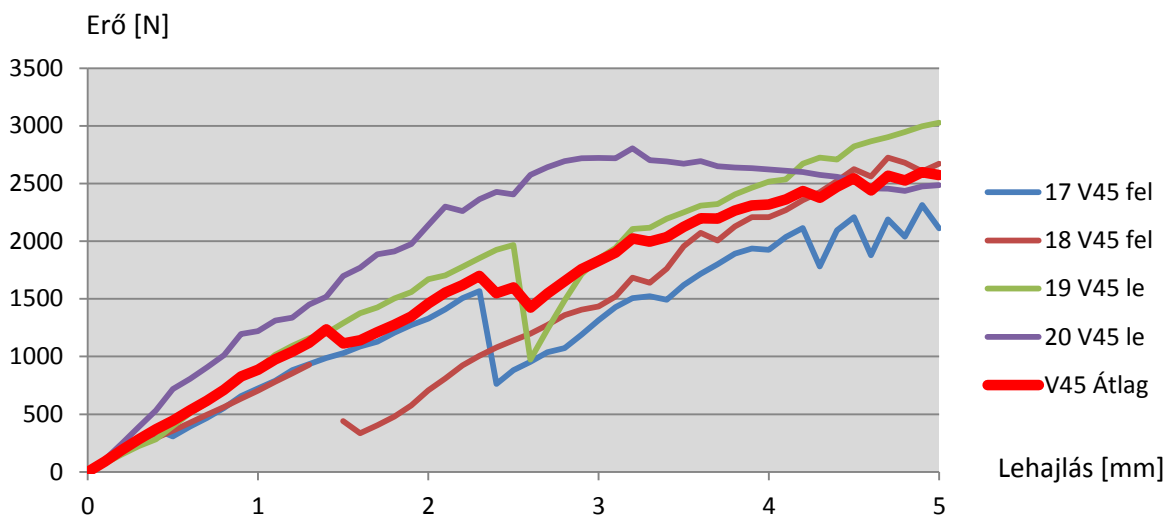
4.28 ábra: A PETIX S45 szállal készült zsanéros próbatestek erő-lehajlás diagramjai



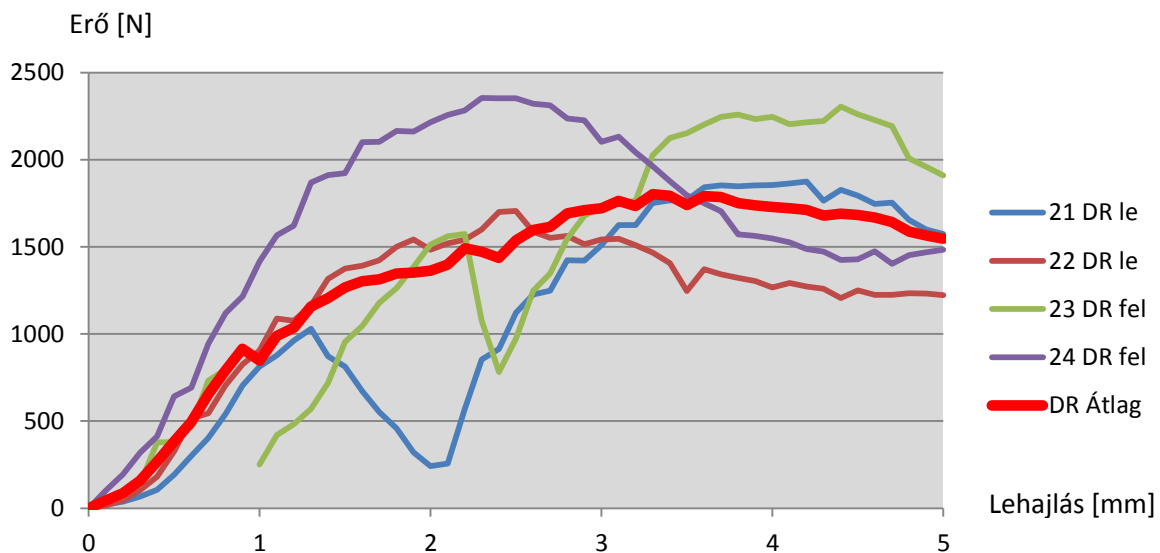
4.29 ábra: A PETIX S60 szállal készült zsanéros próbatestek erő-lehajlás diagramjai



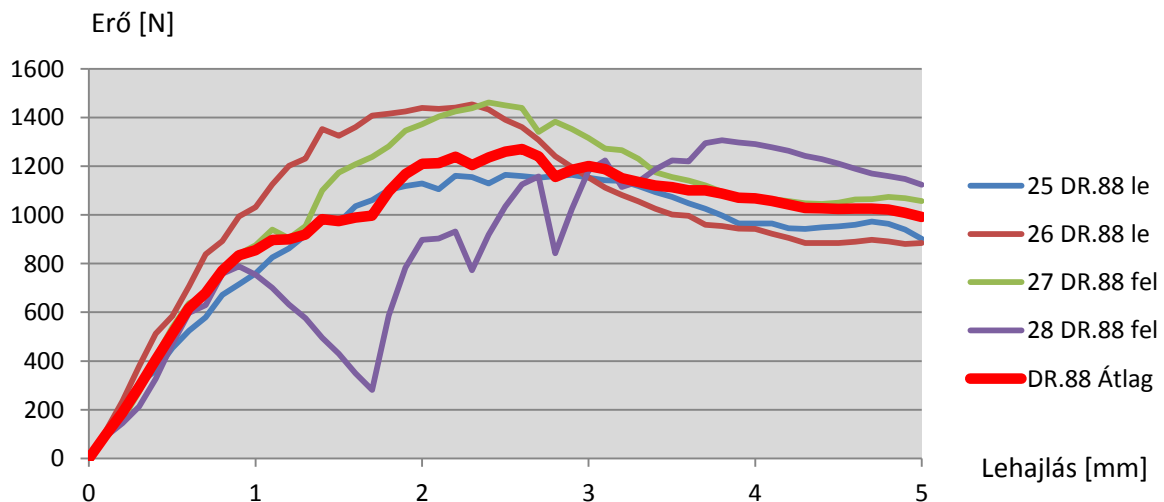
4.30 ábra: A PETIX V90 szállal készült zsanéros próbatestek erő-lehajlás diagramjai



4.31 ábra: A PETIX V45 szállal készült zsanéros próbatestek erő-lehajlás diagramjai

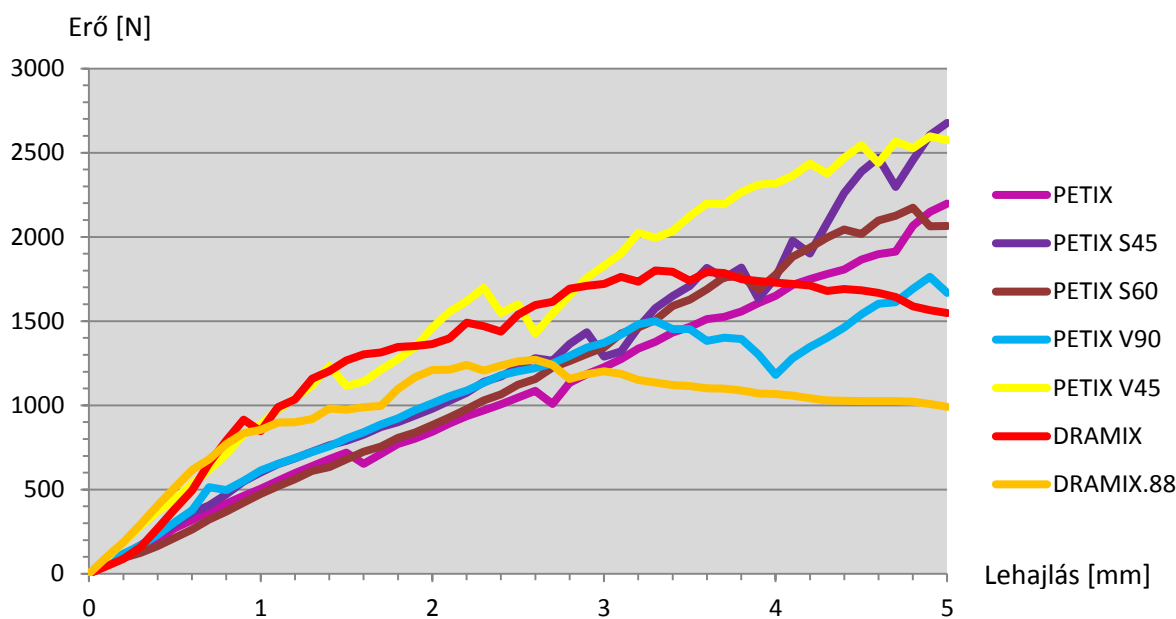


4.32 ábra: A Dramix-típusú szállal készült zsanéros próbatetek erő-lehajlás diagramjai



4.33 ábra: A 0,88 mm-es átmérővel rendelkező Dramix-típusú szállal készült zsanéros próbatetek erő-lehajlás diagramjai

Az egyes szálakhoz tartozó próbateteket még fajtájukon belül is 2 csoportra bontottam az alapján, hogy a szálaknak a végei felfelé, vagy lefelé néznek a habarcsban bedolgozás közben. Pusztán kísérleti céllal döntöttem emellett az elhelyezés mellett, de végül az eredmények azt hozták, hogy az általam készített fajták mindegyikénél a végükkel lefelé forduló szálak minden esetben nagyobb kihúzó-ellenállással rendelkeztek, mint amelyeknek a végei felfelé néztek. A Dramix-típusú és az általam a Dramix-típusú szálak mintájára készített szálakkal készült próbateteknél ez nem volt megfigyelhető.



4.34 ábra: Az egyes szálakkal készült zsanéros próbatetek vizsgálatainak eredményeül szolgáló erő-lehajlás diagramok

A 4.34 ábra az egyes szálak zsanéros kísérletének a próbatest típusonként átlagolt eredményeit mutatja. Az eredményeket nem lehetett minden típusnál 1 szárra fajlagosítani, mert voltak szálak, amelyek elérték szakítószilárdságukat, és elszakadtak. Megfigyelhető volt szál szakadás az egész kutatás során jól teljesítő V45-ös szálból készült próbatestnél, és az egyik V90-esnél. Mindkét esetben a háromból a középső szál szakadt el. A tény, hogy nem csak a hárompontos hajlító vizsgálat során fordult elő szál szakadás, hanem a zsanéros kísérleteknél is, arra enged következtetni, hogy nagyobb szál átmérővel (1-1,2 mm) is készülhetnének hasonló geometriai kialakítású acélszálak, hiszen a lehorgonyzó képességük nagyobb, mint amekkorát az acél szakadás nélkül el tudna viselni.

A Dramix-típusú és Dramix.88 szálakhoz tartozó ábrák hasonló alakúak. A Dramix-típusú szálhoz tartozó ábra azért vesz fel nagyobb erő értékeket, mert azoknak a szálaknak 1 mm az átmérőjük, míg az összes többinek 0,88 mm. Emiatt a Dramix-típusú szálak merevebbek, érthető, hogy a vizsgálat elején a kihúzóerő miatt a szál végén lévő kampó deformációjához nagyobb erő kell, mint a kisebb keresztmetszetű szálak esetén. De körülbelül 2,5 mm-es lehajlásnál a geometriai kialakításból eredő előny mérvadóbbá válik, mint a szálátmérő hatása.

A többi típust mind ugyanabból a 0,88 mm átmérőjű, $1\,400\text{ N/mm}^2$ szakítószilárdságú alapanyagból készítettem, így a köztük lévő teljesítménybeli különbség pusztán a különböző geometriai kialakításuknak köszönhető.

5) Összegzés

5.1 Összegzés

A kutatások eredményesen záródtak, de ami még ennél is fontosabb, hogy rengeteg dolgot tanultam az adott témáról, és sok tapasztalatot szereztem a munkám során, amelyet a későbbiekben biztosan tudok majd hasznosítani. Bepillantást nyertem abba, hogy hogyan is zajlik egy kutatás, hogyan zajlanak a laboratóriumi vizsgálatok.

5.2 Megállapítások

A kísérletek bebizonyították, hogy az acélszálak geometriai kialakítása milyen nagymértékben képes hatni a szálerősítésű betonok tulajdonságaira. Ennek ellenére ezen a területen számos kiaknázatlan lehetőség van, amelyeket nem használ ki az ipar. Több évtizede túlnyomórészt ugyanazokat a geometriai kialakítású acélszálakat használjuk. Ha több odafigyeléssel kezelnénk a szálak geometriai jelentőségét, az hosszútávon sokkal kifizetődőbb lehetne, hiszen a jobb lehorgonyzású acélszálak alkalmazása csökkenthetné az alkalmazott száltartalmat, egyben a költségeket is.

A szálak geometriai kialakításának tervezésénél azt is figyelembe vettem, hogy a folyamatot lehessen akár gépesíteni is. A manuálisan történő szálgyártás lehetősége az építőiparban felhasznált hatalmas mennyiségeket szem előtt tartva teljesen kizárt. Az általam kifejlesztett szálak geometriája nem annyira komplikált, hogy ne lehessen a megmunkálására egy gépet készíteni, amely mind mennyiségben, mind minőségben képes lenne ellátni az ipart acélszálakkal.

Az általam kifejlesztett szálaknak átlagban, a V90 kivételével mind 1,2-1,5-szer nagyobb volt a kihúzó-ellenállása, mint a kampós végű referenciaszálak. Ugyanolyan száladagolás mellett a betont szívósabbá tették a PETIX-sorozat szálai, mint a Dramix-típusú kampós végű szálak, amelyet két különböző kísérlettel is igazoltam. A két kísérlet egyhangúlag azt is alátámasztotta, hogy a 3 dimenzióban megmunkált acélszálaknak a betonban lévő teljesítő képessége jobb, mint a 2 dimenzióban megmunkáltakénak.

Elsődleges célom az acélszálak geometriai kialakításának jelentőségére való figyelemfelhívás volt, amely célt érzésem szerint sikerült elérnem, és a kutatásaimat, valamint a további acélszálak fejlesztésére tett törekvéseimet szeretném a jövőben is folytatni.

6) Köszönetnyilvánítás

Szeretném megköszönni a BME Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszék laboratóriuma munkatársainak a próbatestek elkészítése és vizsgálata során nyújtott segítségét és köszönettel tartozom az OTKA T 109233 nyilvántartási számú kutatási projektnek, hogy a vizsgálataimhoz szükséges egyes anyagok beszerzését lehetővé tette, valamint köszönettel tartozom Lehóczki Zoltán Úrnak, a D&D Drótáru Zrt. MEO vezetőjének, hogy kutatásomhoz alapanyagokat bocsátott rendelkezésemre.

Név szerint is szeretném megköszönni konzulensemnek, Dr. Borosnyói Adorján egyetemi docensnek a dolgozatom elkészítése közben nyújtott segítségét és tanácsait, Takács Krisztián technikusnak, valamint Juhász Zsófia Eszter és Szijártó Anna egyetemi hallgatóknak a próbatestek elkészítéséhez nyújtott segítségét.

Külön szeretném megköszönni nagypapámnak, Fajth Jánosnak a pótolhatatlan közreműködését, amelynek során egyrészt lehetővé tette a műhelyében a dolgozatban említett összes eszköz elkészítését, miközben ellátott engem értékes tanácsaival – és nem elfelejtve azt az elmúlt mintegy 2 évtizedet, amelynek során a tanításait élvezhettem. Ő az, akinek a fizikai, műszaki tevékenység megismerését és szeretetét köszönhetem, és akinek eme iránymutatása nélkül a dolgozatom alapötletei sem fogalmazódtak volna meg.

7) Felhasznált irodalom

fib (1999) Szálerősítésű Betonok – a kutatástól az alkalmazásig, Konferenciakiadvány, fib Magyar Tagozata, szerk.: Balázs L. Gy., 1999. március 4-5. Budapest, 288. p.

Kausay (2014) Szálerősítésű betonok szabványosított vizsgálatai és néhány tulajdonsága, <http://www.betonopus.hu/notesz/szalerositesu/szalerositesu.pdf>, Dr. Kausay Tibor honlapja, hozzáférés: 2014. augusztus 10.

Balázs L. Gy. (2004) BMEEOEMAS04 segédlet a BME Építőmérnöki Kar hallgatói részére, HEFOP/2004/3.3.1/0001.01 http://www.epito.bme.hu/eat/oktatas/feltoltesek/BMEEOEMAS04/blgy-hefop-epitoanyagok_ii_-_1_kotet.pdf, hozzáférés: 2014. július 21.

Kovács, I., Balázs, G. L. (2004) Structural performance of steel fibre reinforced concrete, Műegyetemi Kiadó, 233. p.

Kerekes Péter: *Újszerű geometriai kialakítású, 2 és 3 dimenzióban megmunkált acélszálak fejlesztése és hatékonyságának összehasonlítása betonban*, BME Építőmérnöki Kar, TDK dolgozat, 2014. 10. 22.