

Soka sintetikoak*

Jose Ramon Sarasua

Euskal Herriko Unibertsitatea
Meatz eta Metalurgi Ingeniaritza eta Materialen Zientziaren Saila
Bilboko Ingeniaritza Goi Eskola
48013 BILBAO
email: iipsaoij@bi.ehu.es

Aurkezpena: Sokak ezinbesteko tresna bilakatu dira hainbat erabilpenetarako, lan askotan izaten baita premia objektuak jaso, tenkatu, birarazi, edo eusteko. Egun sokak egiteko gehien erabiltzen diren aitzin-materialak estrusio + tiraketa prozesuez lortutako polimerozko hari-zuntz sintetikoak dira. Sokak egiteko, hari-zuntzak multzoka txirikordatu behar izaten dira; hala, hainbat motatako geometriak diseina daitezke. Soken funtzio nagusia mekaniko-erresistikorra den aldetik, lan honetan, soken eta hari-zuntzen propietate mekanikoak aztertuko dira, beren egitura-berezitasun eta fabrikazio-prozesuekin batera.

Laburpena: Izaera eta diseinuaren arabera soken ezaugarriak ulertzeko asmoz, trakzio-ko propietate mekanikoez aritu gara. Hala, erabilpen-kasu jakin bateko mekanika-ariketa aztertu dugu: mendiko eskaladan balizko erorketa baten ondorengo gelditze-prozesua. Honekin batera, soken ezaugarri mekanikoak aztertu eta soka sintetikoek beste batzuen aurrean dituzten abantailez jabetzeko aukera izan dugu. Bestetik, lan honen xedeak betetzeko, sokak egiteko erabilitako aitzin-materialen izaera eta egiturari dagozkion ezaugarriak aztertu ditugu. Hari-zuntz sintetikoak norabide batean orientatutako polimeroak diren aldetik, norabidetutako polimeroen egitura-ezaugarri eta performantzia mekanikoaren arteko erlazioak aztertu ditugu, baita egitura-ezaugarri horiek lortzeko behar izan diren fabrikazio-prozesuak ere.

SARRERA

Gizakiak zibilizazioaren hasieratik bertatik izan du beharra objektu pisudunak kontrolatzeko. Jada aspaldi batean, naturan erraz eskura zitezkeen hari-zuntzak hartu, era berezian elkartu eta objektu pisudunak kontrolatzeko egokia den tresna asmatu zuen: soka. Hortaz, ez da harritzekoa esatea

* Lan hau UEUko Fisika Sailak antolaturiko *Nola demontre dabil traste hau* jardunaldietan aurkeztu zen, Iruñean 2001eko uztailaren 25ean.

Egiptoko piramideak edota azteken etxebizitzak eraikitzea ez zatekeela posible izan hari-zuntz naturalez egindako soka erresistikorren laguntzarik gabe [1].

Onar dezagun honako definizioa. Makina: *indarrak, mugimendua, eta energia era jakin batean eta helburu jakin batekin transmititzeko zati desberdinen antolaketa*. Orduan, soka ere bada makina. Makina edo tresna honetan hainbat pieza edo zati baitaude (hari-zuntzak), eta modu desberdinetan konbina eta antola baitaitezke helburuaren arabera: pisua, erresistentzia, luzapena, urradura, torkea edo bestelako irizpide bati jarraituz.

Industria mailako soka sintetikoak dira nagusi egungo merkatuan. Soka sintetikoak erabilpen-eremu zabalak aurkitu dituzte industri jarduera arruntetan (eraikuntzan edo nekazalgintzan pisuak jasotzeko-eta, esate baterako), baita beste batzuetan ere, adibidez itsaso-erabilpenetan (itsasontzi eta txalupak ainguratzeko edota petrolio plataformak amarratzeko), arrantzan (sareak egiteko, zuntz haribakun gisa ere bai), aisialdian (eskalada, itsasoko kirolak), etab.

Beste edozein tresnarekin gertatzen den bezala, soken funtzionamendurako garrantzitsua da soken ezaugarri nagusiak zeintzuk diren ulertzea. Edozein sokaren funtsezko ezaugarria da trakziopeko kargak jasateko propietate mekaniko egokiak izatea. Bestelako ezaugarriak ere garrantzitsuak izan daitezke. Adibidez, arintasuna. Kasu batzuetan ezaugarri bereziak ere eskatu ohi zaizkie: itsasoko erabilpenetarako, esate baterako, korrosioaren aurkako tratamendu egokiak.

Zuntz polimerikoak dira sokak egiteko aitzin-materialak; polimerozko zuntz haribakun edo monofilamentuak, zehazkiago esateko. Hauek elkartu eta lokarri harianitzak egiten dira lehen urrats batean (maiz, zuntz haribakunak elkarrekin bihurrituz). Bigarren urratsean, lokarriak bata bestearekin txirikordatu eta sokak egiten dira. Hala, askotariko diseinu-geometriak antola daitezke.

Izaeraren eta diseinuaren arabera performantzia desberdinetako sokak eskura daitezke merkatuan egun, erabilpen desberdinetarako. Lan honetan egungo soken eta aitzin-materialen ezaugarri mekaniko eta egiturazkoak aztertuko ditugu, hauek fabrikatzeko prozesuekin batera.

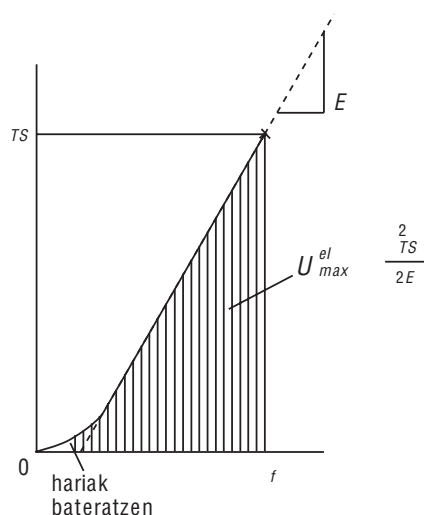
SOKEN PROPIETATE MEKANIKOAK

Propietate mekanikoei erabakitzen dute tentsio mekanikoen eraginpean dagoen material baten erantzuna nolakoa den: zurruna, malgua, erresistikorra, deformakorra, hauskorra, etab. Sokek, ohiko erabilpenetan trakziopean lan egiten dutenez, trakzioko propietate mekanikoak aztertuko ditugu atal honetan.

Trakziopeko tentsio/deformazio portaera

Soken propietate mekanikoak ezaugarritzeko ohiko saiakuntza da trakzio-saiakuntza. Bertan, sokak jasaten duen deformazioa neurtzen da, trakzio-karga (norabide batean egindako tiraketa-indarra) jarraitu eta hazkor baten eraginpean dagoenean. Indar-zelula baten bitartez unean uneko kargaren (T) balioa ezagutzen da, eta hala, unean uneko tentsioa () erraz kalkula daiteke, $\sigma = T/A$ baita, non A eta T aipatutako tentsioa eta karga baitira hurrenez hurren, eta A trakzio-indarra jasaten duen probetaren zehar-ebakiaren azalera. Bestetik, estentsometro baten bitartez, probetak jasaten duen unean uneko desplazamendu edo luzapena neurtzen da, eta hala, deformazio unitarioaren balioa kalkulatzeko era honetan: $\epsilon = u/l$, non u unean uneko deformazio unitarioa (edo luzapen erlatiboa), l probetaren hasierako luzera (estentsometroari ezarritako irekiduraren balioa) eta u probetaren unean uneko l -rekiko luzapen absolutua edo desplazamendua baitira.

Saiakuntza hauetako tentsio eta deformazioaren balioak ezagututa, soken ingeniartzako trakzio-kurbak irudika daitezke eta propietate mekanikoak defini. 1 irudian lokarri anitzeko soken ohiko tentsio/deformazio trakzio-kurba aurkezten da. Hasiera batean, behe-deformazioetan, kurbaren itxura zertxobait ahurra bada ere (elkarrekin txirikordatutako lokarrietako zuntzak ez daudelako saiakuntzaren norabidearekiko erabat tenkatuta), zuntzak luzatu ahala, malda zorroztu eta tentsio-deformazio portaera elastiko lineala dela dakusagu, elastikotasun-muga heldu bitarteko deformazio-tarte osoan. Kontuan hartu behar da, hala ere, sokek elastikotasun-muga



E = Elastikotasun-modulua, T_S = Trakzio-erresistentzia, U_{\max}^{el} = Energia elastiko maximoa.

1. irudia. Lokarri harianitzez eratutako soken tentsio-deformazio (-) kurba ohikoa.

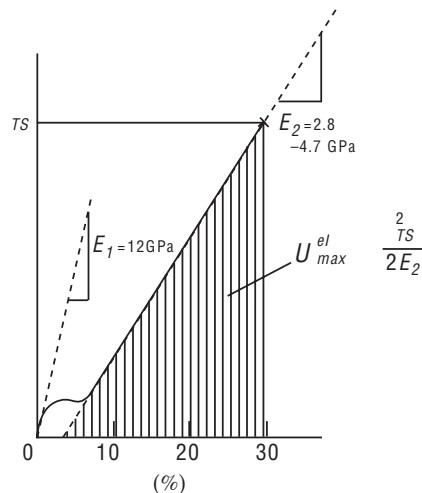
gainditutakoan deformazio iraunkorra erakusten dutela gehienetan (biskoe-lastikoa, edo plastikoa, maila handiago ala txikiagoan materialaren arabera), eta puntu honetan, hondatuztat (praktikan, hautsitzat) har ditzakegu.

Trakziopean dauden soken portaera mekanikoa ezaugarritzeko behean definitzen diren propietate mekaniko hauek erabili ohi dira. *Elastikotasun-modulua* (E): trakzio-kurbako eskualde elastiko linealean deformazio-aldakuntza jasateko behar den tentsio-aldakuntza, Hookeren legearen arabera ($\Delta = E \cdot \Delta$); hala, Elastikotasun-moduluaren bidez materialen zurruntasun maila finkatzen da. *Trakzio-erresistentzia* (σ_{TS}) eta *deformazio erabilgarria* (ϵ_f): elastikotasun-mugako edo sokak elastikoki deformatuz jasan dezakeen tentsio maximoaren balioa, eta hari dagokion deformazioa, hurrenez hurren. *Energia elastikoa* (U_{max}^{el}): sokak elastikoki deformatzean, pilatzen duen energia adierazten du (bestela esanda, sokak, praktikan hondatu edo hautsi aurretik beregana dezakeen energia elastiko maximoa). Haren balioa 1 irudiko ϵ_f triangeluaren azalerarena da.

Behe-tentsioetako portaera kontuan hartzen ez badugu sokak bolumen unitateko beregana dezakeen energia elastiko maximoa, era honetan kalkulatu genezake Hookeren legetik abiatuta:

$$U_{max}^{el} = \int_0^{\epsilon_f} \sigma \cdot d\epsilon = \frac{1}{E} \int_0^{\sigma_{TS}} \sigma \cdot d\sigma \quad U_{max}^{el} = \frac{(\sigma_{TS})^2}{2E} \quad (1)$$

non aldagai guztiak, integraleko mugak barne, gorago definitu ditugun.



E_1 = Elastikotasun-modulua jatorrian; E_2 = Elastikotasun-modulua eskualde elastiko linealean; σ_{TS} = Trakzio-erresistentzia; U_{max}^{el} = Energia elastiko maximoa.

2. irudia. Armiamaren sarea eratzen duen zuntz haribakunaren tentsio-deformazio ($\sigma - \epsilon$) kurba.

2 irudian armiarma-sareko zuntz haribakunaren tentsio/deformazio portaera ageri da. Armiarmarena, erdiamorfo erdi-kristalinoa den zuntz polimerikoa da, soka sintetikoetan ditugun zuntzen izaera makromolekularrekoa. Ikus daitekeenez, armiarmaren sareko zuntzaren behe-tentsioko portaera sokenetik nahiko urrun dago, baina deformazio-tarte osoa oro har hartuta, portaera funtsean elastiko lineala da honetan ere, eta hala, armiarmaren hari-zuntzak trakzioz deformatzean pilatzen duen energia elastikoa, soken kasuan bezala, goiko ekuazioaz emana datorrela onar daiteke.

1 taulan zuntz naturaleko (kalamua), zuntz sintetikoko (nylona, poliesterra eta polipropilenoa) eta altzairu-soken propietateak ageri dira, altzairu-hari bakunaren eta armiarma-zuntz haribakunarekin batera. Zuntz sintetikoaren propietateak eta armiarma zuntzarenak, hari bakunak diren aldetik, antzekoak dira, nork bere propietate mekanikoak gorabehera. 1 taulan baieztza dezakegunez, zuntz hariaritzeko lokarritz eratutako soken propietateak, aldiz, zuntz haribakunaren propietateetatik urrun daude. Adibidez, taulako datuen arabera, zenbait hariz eratutako altzairu-sokaren erresistentzia, zurruntasuna, eta dentsitatea, altzairu bereko zuntz haribakunaren erdia dira, gutxi gora behera. Bi arrazoi hauengatik: 1. zuntzek sokaren zehar-ebakiaren %70a betetzen dutelako soilik, eta 2. lokarri anitzeko soketan hari bakunak helikoidalki bihurrituta eta txirikordatuta daudenez, hariak ez dutelako tentsioa zuzen jasaten beren ardatz nagusian, desorientazio-angelu batekin baizik.

1. taula. Soka eta haribakunaren propietate mekanikoak.

Materiala	T_S (MPa)	f (%)	E (GPa)	(g/cm ³)
Kalamu-soka	85	10	0.85	0.7
Nylon-soka	264	40	0.66	0.6
Poliester-soka	204			0.6
Polipropileno-soka	174			0.45
Altzairu-soka	900	1-2	100	4
Altzairu haribakuna	1.800	0.85	212	7.9
Armiarma haribakuna	870-1.420	30	2.8-4.7 (E_2)	1.26

T_S : trakzio-erresistentzia; f : deformazio elastiko erabilgarria; E : elastikotasun-modulua, eta : dentsitatea.

Energia xurgatzeko gaitasunari dagokionez, 1 taulako propietateen datuak lekuazioan ordezkatzuz gero, soka desberdinek hautsi aurretik bereganatzen dezaketen energia elastiko maximoa zenbatekoa den kalkulatu dezakegu. Balio hauek 2 taulan aurkezten dira kalamu-soka (naturala), nylon-soka (sintetikoa) eta altzairu-sokarako, armiarma-sarearen zuntz haribakunarekin batera. Balio hauek oinarrituz ulertuko dugu, behean azalduko den erabilpenerako (mendiko eskaladarako sokak), zergatik den erabat de-

segokia altzairu-soka, eta zergatik ez diren egokiak garai batean erabili izandako kalamu-sokak ere. Egun, nylonezko soka sintetikoak erabiltzen dira, aipatutakoen artean, energia elastikoa pilatzeko gaitasun handiena daukatenak haiek baitira.

2. taula. Zenbait soka eta harien energia elastiko maximoa (U_{\max}^{el}).

Materiala	$U_{\max}^{\text{el}} = \frac{2}{2E} \frac{TS}{2E} \text{ (J cm}^{-3}\text{)}$	$U_{\max}^{\text{el}} / \rho = \frac{2}{2E} \frac{TS}{2E} \text{ (kJ kg}^{-1}\text{)}$
Kalamua	4.25	6.1
Nylona	52.8	88
Altzairua	4.05	1
Armiarma-haria	135-216	107-171

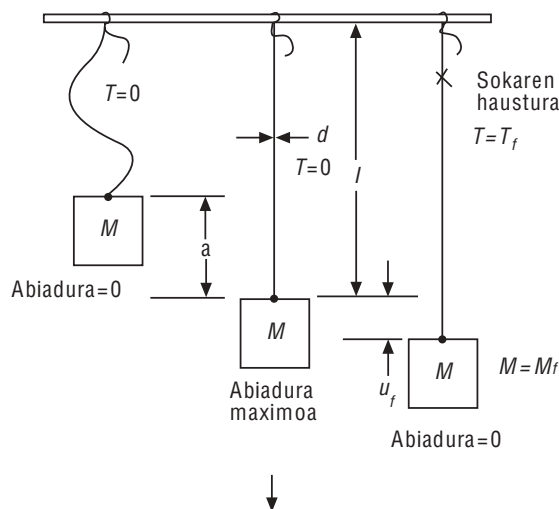
Erabilpen adibide bat: mendiko eskaladako sokak

Egungo eskalatzaileek segurtasun-prozedura estandarrak erabiltzen dituzte haitzak eta paretak igotzeko. Bikoteka igotzen dira gehienetan, 45-50 m luzerako nylon-sokarekin elkarri lotuta. Hasiera batean behean gelditzen dena, haitzari ongi iltzatzen zaio finkapen-sistema egoki batez, eta besteak igoerari ekiten dio. Behean paretari itsatsita dagoenak etengabe elikatzen dio soka bidean gora doanari. Oso litekeena da ibilbidean gora doan eskalatzaileak, une batean, segurtasunagatik, paretan finkapen-sistema bat iltzatu eta mosketoi esaten zaion metalezko eraztun itxura duen pieza bat finkapen-sisteman paratzea. Ondoren beheko lagunak elikatzen dion soka mosketoi barrutik sartuko du; eroriz gero, altuera horretan ipini duen finkapen-sistema dela-eta, erorketa-distantzia txikiagoa izango da eta ondorioz kolpe txikiagoa jasango du. Eskalatzaileak mosketoiak ibilbideko hainbat puntutan ipin ditzake, harik eta soka erabat luzatuta daukan arte.

Demagun bidean gora doan eskalatzaileak mosketoi bat ipini duela beheko laguna paretari iltzatu zaion tokitik 25 m-ra, eta puntu horretatik 10 m gorago, beheko lagunarengandik 35m-ra alegia, huts egin eta erori egiten dela. Jaustean mosketoi dagoen puntua gainditu eta beste 10 m beherago eroriko da. Mosketoi ipini ez balu (edo paretarekiko finkapen-sistemak huts egin balu) 20 m-ko erorketaren ordean, beheko laguna dagoen puntua baino beste 35 m beherago eroriko litzateke, 70m-ko erorketa bortitza jasanez. Une horretan, sokak geratzen du haren erorketa. Lagunak, tentsio-egoera leuntzeko, sokari tinko eutsi beharko lioke (eskularruez babesturik behar bada, sokaren erredura saihesteko). Halako balizko istripu batean jokoan den gelditze-prozesua aztertzeko fisikako kontzeptu batzuk ekarriko ditugu gogora.

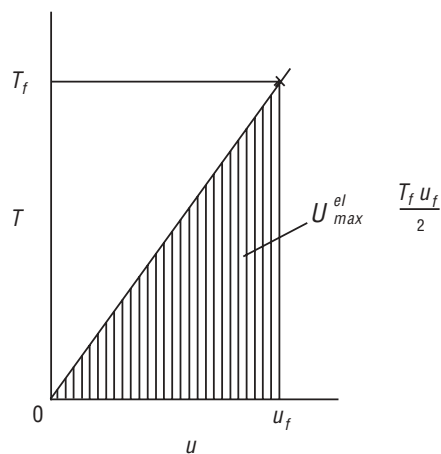
Gelditze-prozesuaren mekanika [2]

Mendiko eskaladan huts egin eta jaustearen azterketa mekanikoa, M masadun gorputz baten erorketa askearen analisiaren bitartez egin dezakegu (3 eta 4 irudiak).



d = sokaren diametroa; l = sokaren luzera; T = karga-indarra; u = luzapena l -rekiko; T_f = hausturako karga; u_f = hausturako luzapena.

3. irudia. M masadun gorputz baten erorketa askearen gelditze prozesuaren irudikapena.



T = karga-indarra; u = luzapena l -rekiko; T_f = hausturako karga; u_f = hausturako luzapena.

4. irudia. Sokak pilatutako energia elastikoa haustura-puntuan (U_{\max}^{el}).

Izan bitez T une bakoitzean sokak jasaten duen karga-indarra eta a erorketa gertatzen den puntutik bigarren eskalatzailea paretari iltzatuta dagoen punturainoko (balizko erorketan abiadura maximoa lortzen den puntua) distantzia. Puntu honetan d diametroko soka bat bere osotasunean dago luzatuta eta bere l luzerarekiko u luzapen absolutua edo desplazamendua definitzen dugu. Hausturako unea (soka hondatzen denekoa elastikotasun mugan) f azpiindizeak adierazten badu, T_f soka hausteko behar den karga izango da, M_f haustura gertatzeko gorputzaren masa kritikoa, eta u_f haustura-puntuan sokak hasierako luzerarekiko jasan duen luzapena.

Sokak, apurtuko ez bada, tentsioaren aurrean elastikoki deformatu eta gai izan behar du, altuera jakin batetik erortzen den masaren energia potentziala (soka erabat luzatuta dagoen abiadura maximoan unean energia zinetiko bihurtu da) osoki energia elastikoan eraldatzeko. Zehazki esan, ordea, sokaren deformazioa ez da osoki elastikoa, elastikotasun-muga bat gainditu eta gero berreskura ezina den deformazio iraunkorreko eskualde bat izaten baitu gehienetan. Baina kalkuluak egiteko eremu elastiko lineala erabiliko dugu soilik, zeren eta ikuspegi praktikoa batetik aurrikuspina izango baita elastikotasun-muga hori ez gainditzea; elastikotasun-muga gainditzen duten erorketen eraginez metatzen doazen deformazio iraunkorrek hausturako puntua gero eta gehiago gerturatzen dutela kontutan izanik.

Guri soka elastikotasun-mugara ez heltzeko (zerbitzutik kanpo ez gertatzeko, edo, zentzu praktikoa esan dugunez, *ez hausteko*) baldintza kritikoak interesatzen zaizkigu eta onartuko dugu elastikotasun-muga eta hausturakoa bat datozela. Beraz, sokaren balizko apurketa praktikoa gertatuko litzatekeen kasurako energi balantzea aplikatuz, idatziko dugu sistemaren energia mekanikoa eskalatzailea jausten hasten denean (energia potentziala) deformazioagatik energia elastiko bihurtuko dela soka hausteko mugan dagoenean. Hots:

$$M_f g (a + u_f) = \frac{T_f u_f}{2} \quad (2)$$

non aldagai guztiak gorago definitu baitira, salbu g grabitatea. Adierazpen honetan ezkerreko atalak energia potentziala adierazten du eta eskuinekoak sokak deformatzerakoan xurgatzen duen energia elastikoa (ikus 4 irudia).

Bestalde, aurreko atalean tentsio eta deformazioak nola definitu ditugun kontuan hartuta, badakigu u_f sokaren elastikotasun-mugako luzapena eta T_f elastikotasun-mugako karga-indarra (praktikan, esan bezala, hausturakoak), trakzio-saiakuntzetatik ezagunak zaizkigun materialaren propietateekin erlaziona ditzakegula era honetan:

$$u_f = \epsilon_f \cdot l \quad (3)$$

$$T_f = A_{TS} \left(\frac{d^2}{4} \right) \quad (4)$$

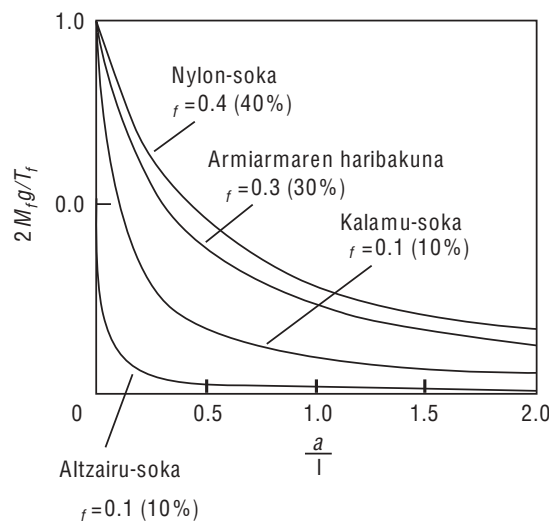
non f eta f , sokaren elastikotasun-mugako deformazioa eta tentsioa (trakzio-erresistentzia) baitira, A sokaren zehar-ebakiaren azalera, eta l eta d sokaren luzera eta diametroa, hurrenez hurren.

Hortaz, balio hauek 2 ekuazioan ordezkaturaz, honako adierazpenera helzen gara:

$$\left[\frac{1}{f} \left(\frac{a}{l} \right) + 1 \right]^{-1} = \frac{2M_f g}{T_f} \quad (5)$$

non aldagai guztiak gorago definitu baitira.

5 irudian 5 ekuazioko eskuineko terminoa a/l aldagaiaren (erorketa-faktore esaten zaio mendiko hizkuntzan) funtzioan aztertzen da nylon-, kalamu- eta altzairu-soketarako, armiarmaren sareko hari-bakunarekin batera. Irudikapena $a = 2l$ balioan moztu da, hori baita erabilpen kasu honetan balizko erorketan lor daitekeen erorketa-distantsia maximoa. Soka desberdinen erresistentziak (T_{TS}) trakzio-saiakuntzetatik lortutako datuak direnez, beren diametroaren arabera sokak hausteko behar duen karga-indarra (T_f) kalkula daiteke 4 ekuazioaz, eta balio hori finkatuz a/l erorketa-faktore



5. irudia. 5 ekuazioko eskuineko atala (ordenatuetan) erorketa-faktorearen (a/l) aurrean deformazio erabilgarri (f) desberdineko soketarako.

bakoitzarako, soka bakoitzaren deformazio erabilgarria ere (ϵ_f) ezaguna denez, 5 ekuazioaz (edo 5 irudiaz) soka bakoitzak hausteko behar duen masa kritikoa (M_f) lor. Hala, soka desberdinen eta hari bakunen segurtasun faktoreak era honetan kalkula ditzakegu S.F. = M/M_f , non S.F. segurtasun-faktorearena adierazpena baita eta M erorketa-gorputzaren masa, $M = 90$ Kg giza gorputzaren kasurako eta $M = 0,65 \cdot 10^{-3}$ Kg armiarmaren zuntz hari-bakunaren kasurako onartuz (3 taula).

3 taulako segurtasun-faktoreak aztertuz, honako ondorioak atera ditzakegu: 1. erorketa-faktorea (a/l) handitzen den heinean, soka hondatzeko behar den erorketa-objektuaren masa kritikoa txikiagoa egiten dela, 2. beharpen hau azkarragoa dela deformakortasun mugatuko materialetan —altzairu sokaren deformakortasuna %1ekoa da eta nylon-sokarena % 40ekoa—, 3. Kalamuaren portaera ez dela oso egokia —bere deformazio elastikoa %10 da—, eta 4) *erorketa-faktorea* (a/l) zerora hurbiltzen doan heinean honako hau betetzen dela:

$$\left[\frac{1}{f} \left(\frac{a}{l} \right) + 1 \right]^{-1} = 1 - \frac{2M_f g}{T_f} = 1 - 2 \cdot M_f \cdot g = T_f$$

Hau da, a zenbateraino txikia denarekiko aske, talka moduko tentsio-modu honek soka zamaten duela erorketa objektuaren masaren pisu hila bikoiztuz.

3. taula. Karga erabilgarria (T_f) eta Segurtasun Faktoreak (S.F. = M/M_f) hainbat sokatan.

Soka mota	T_f (Kg)	S.F. ($a/l = 0$)	S.F. ($a/l = 0.1$)	S.F. ($a/l = 0.5$)	S.F. ($a/l = 2$)
12 mm nylon	3.000	16.7	13.3	7.3	2.7
2 12 mm kalamua (bikoitza)	2 1.000	11.1	5.5	1.9	0.5
5 mm-ko altzairua	1800	10	0.9	0.2	0.05
Armiarmaren haribakuna	0,001	0.77	0.57	0.29	0.10

(M : masadun erorketa-gorputza. Kalkuluetan giza gorputzerako $M = 90$ Kg eta armiarmarentzat $M = 0.65$ g balioak erabili dira. M_f : soka hausteko masa kritikoa).

Eskalatzeko soken segurtasun-faktoreak

Orain erantzun diezaiozun eskalatzailleentzat hain garrantzitsua den galdera honi: zer-nolako segurtasun-tartearekin jokatzen da erorketa batean? Segurtasuna kuantifikatzeko S.F. = M_f/M erlazioa definitu dugu, M eror-

tzen den gorputzaren masa izanik. Soka desberdinen segurtasuna a/l erorketa-faktorearen arabera ageri da 3 taulan.

Eskalatzailearentzat 90 Kg-ko pisua eta armaiarmarentzat 0,65 g-koa onartzuz, kasurik larrienean ere ($a = 2l$), ikus daiteke S.F. = 2.7-ko segurtasun-faktorea ateratzen zaiola nylonari. Baldintza berberetan kalamua hautsi egiten da eta honek esan nahi du kasu honetan beheko lagunaren balaztala beharko litzatekeela istripu larria saihesteko. Altzairu-soka askoz eskasagoa da (5 mm-ko diametroko altzairu-soka segurtasunetik kanpo dago jada $a/l = 0.1$ baliorako). Bestetik, harrigarria da ikustea armaiarmarearen zuntz haribakuna segurtasun eremutik kanpo dagoela zeinahi a/l baliotarako. Ziur aski honen arrazoia da armaiak ez duela sekula erorketa liberrik jasaten, hau da, errealitatean, talka-karga dinamikoak ez dituela inoiz pairatzen: askoz ere era kontrolatuagoan jasaten ditu.

AITZINDARIA: HARI-ZUNTZA

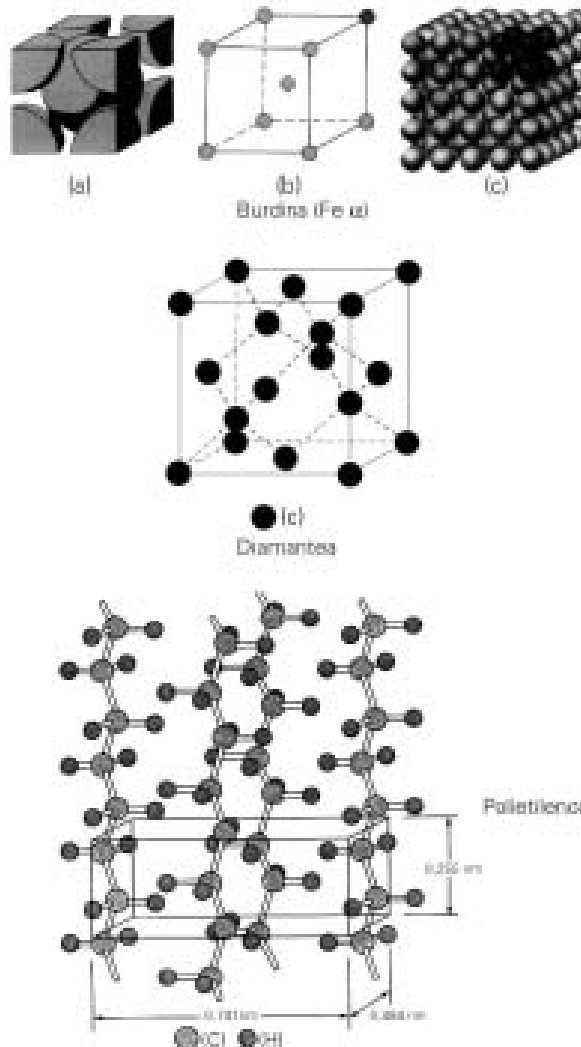
Soketarako erabilpen-eskakizunak mekanikoak direla ikusi dugu. Egun aplikazio gehienetan erabiltzen direnak polimero-soka sintetikoak dira. Hasi batean pentsa genezake polimeroak ez direla ez aski zurrun ezta erresistikorrak ere. Polimeroen zurruntasuna 1-7 GPa tartean izaten da; balio hau nahiko urrun dago, esate baterako, aluminioa bezalako metal arin baten (65 GPa) edo altzairuaren zurruntasunetik (210 GPa). Hala ere, polipropilenoa, polietilenoa, nylonak edo poliesterrak bezalako polimero termoplastikoak dira erabilpen erresistikorretarako sokak egiteko erabiltzen diren materialak. Zer dela eta?

Har dezagun polietilenoa adibide gisa. Jadanik duela hirurogei urte fabrikatzen da polietilenoa. 1930.eko hamarkadan, likido eta gas organikoetan presioak nola eragiten zuen aztertzen ari zirela Britainia Handiko I.C.I.-ko ikertzaileak ohartu ziren ontziaren azpialdean argizari moduko bat ausaz eratu zitzaiela. Polietilenoa zen. Harez geroztik bilakaera lasterra izan zuen material honek, eta denbora laburrean termoplastiko arrunt gisa garatu eta hainbat erabilpenetako merkatuetan sartu zen: enpaketzeko produktuak (filmak, botilak...), injekziozko piezak, etab.

Halaber, polietilenoaren kristal-egitura aspalditik da ezaguna. 1938. urtean X izpien difrakzioaren gaineko esperimenduek frogatu zuten $\text{CH}_2\text{-CH}_2$ unitate errepikakorraz eratutako polimero-kateak konformazio luzean gelsa ortorronbikoetan sar zitezkeela. Hala ere, kristal-egitura laster ezagutu zen arren, oraindik berrogei bat urte behar izan ziren benetan ohartzeko polimero honek aurkez zitzakeen propietate mekanikoak erakutsi ohi dituenak baino askoz handiagoak izan zitezkeela. Ohartze honetarako funtsezkoa izan zen arreta ongi ipintzea, polietilenoaren, eta oro har polimeroen izaera makromolekularrean eta kristal-morfologiaren ezaugarrietan.

Polimeroen solido egoera

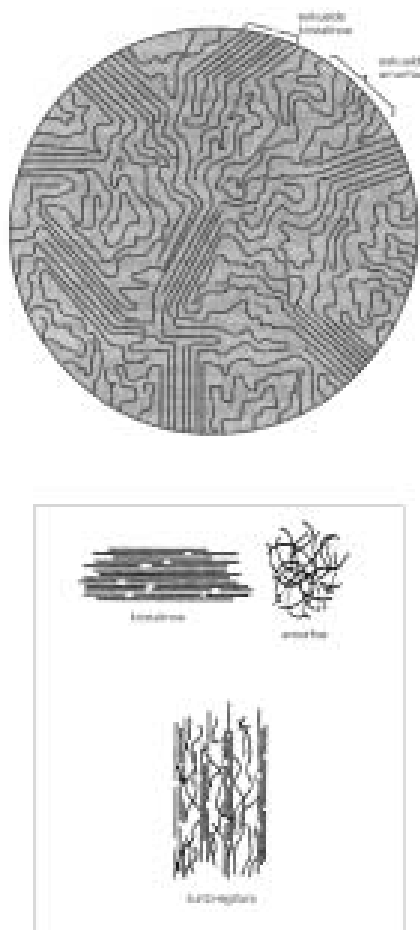
Materia gas, likido zein solido egoeran aurki daiteke. Materialak, termodinamikoki hala esan ohi da, solidoak izaten dira beren urtze puntuaren azpitik; metalek, zeramikek eta pisu molekular behereko substantzia organikoek, urtze-puntu jakin bat erakutsi ohi dute, gorago ala beherago, beren atomoen arteko lotura-energiaren arabera. Likido egoeran atomoen ordenamendu-maila irispén laburrekoa da, baina solido egoeran, materialen atomoak oso ordenatuta egoten dira, elkarri tinko loturik. Kasu honetan esan ohi da, barne-egituraren ezaugarri nagusia *irispén luzeko* ordenamendua



6. irudia. Zenbait materialen kristal egiturak [3].

dela (kristal egoera). Hortaz, solido kristalinoak gai dira lehen mailako trantsizio termodinamikoa (fusio edo urtzea) eta X izpien difrakzioa aurkezteko. Teknika honi esker materialen kristal-egiturak ezagunak zaizkigu gaur egun. 6 irudian burdinaren (Fe), diamantearen eta polietilenoaren kristal-egiturak aurkezten dira, adibide gisa.

Polimeroen solido egoera nahiko berezia da. Alde batetik, metalak edota pisu molekular beheko substantzia organikoak ez bezala, polimero arruntak ez dira %100 kristalkorrak izaten; berezkoa zaien izaera molekular erraldoia dela-eta solidotze prozesuetan ia beti izaten baita eragotzita, maila handiago ala txikiagoan, atomoen *irispén luzeko* ordenamendua. Beste era batera esanda: polimeroetan, urtze-puntuaren azpitik, ia beti aurkitzen dira likido egoera gogoratzen dituzten ordenamendu-maila txikiko eskualdeak: eskualde amorfoak (7 irudia).

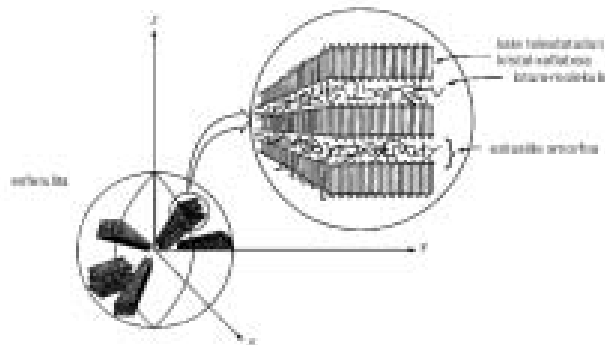


7. irudia. Polimero erdikristalkorren adierazpena [3].

Urtutako polimero kristalkor bat bere urtze-puntutik behera hoztuz gero, esferulitak deritzan egiturak eratzen dira; hortaz, polimero kristalgarrien solido-egoerako morfologia esferulitikoa dela esan ohi da. Esferulitak (ikus 8 irudia) erradioaren norabidean hazitako hainbat *xaflatxo*z eratutako agregatu polikristalinoak dira non *xaflatxo*ak (irispen luzeko atomo-ordenamendua duten *monokristalak*) elkarri lotuta mantentzen baitira eskualde amorfoko katei esker.



8a



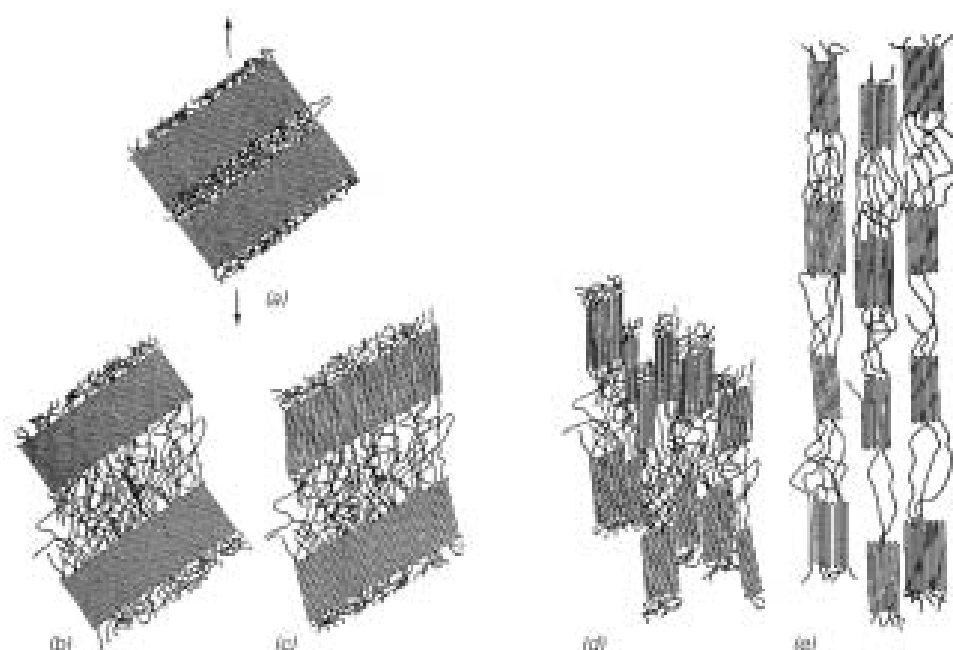
8b

8. irudia. Polimero kristalkorren morfologia esferulitikoa.

a) Mikroskopia optikoan hartutako morfologia esferulitikodun polimero kristalkor baten argazkia. b) Esferuliten egituraren irudikapena [3].

Hari-zuntz polimerikoak polimero erdi-kristalkorretatik lortzen dira eta, beraz, haien egiturak hauen egituratik eratortzen dira. Horregatik, 1960.eko hamarkadan polietileno-zuntzekin ari ziren ikertaldeek lanak ain-

tzat hartuz, polietilenoaren egitura erdikristalinoaren baitako azterketetan murgildu zen Charles Frank 1969. urtean. Gizon hau kristal egituretan aditua zen eta polietileno-zuntzen eta diamantearen egituren arteko erlazioak aztertuz polietilenoaren potentzialitate mekaniko osoa aurrean ahal izan zuen, ohartu baitzen makromolekulak ahalik eta gehien orientatu eta erabat luzatutako konformazioan edukitzea posible izanez gero polietilenoa diamantearen propietateak izatera hurbilduko zela [4]. Orduz geroztik, hainbat ikerketa abiatu dira polimero termoplastikoak norabide batean deformatu (9 irudia) eta hari-zuntzak ahalik eta orientatuen lortzeko.



9. irudia. Polimero kristalkorren deformazioaren irudikapena [3].

a) Elkarren ondoko bi xaflatxo kate tolestaturik tartean material amorfoko eskualde batez lotuta. b) Eskualde amorfoko kateen luzapena. c) Xaflatxoaren lerrokatzea aplikatutako tentsio mekanikoaren norabidearekiko. d) Bloke kristalinoen banaketa segmentu desberdinetan. e) Blokeen eta haien lotura egiten duten luzatutako kateen lerrokatzea tentsioaren norabidean.

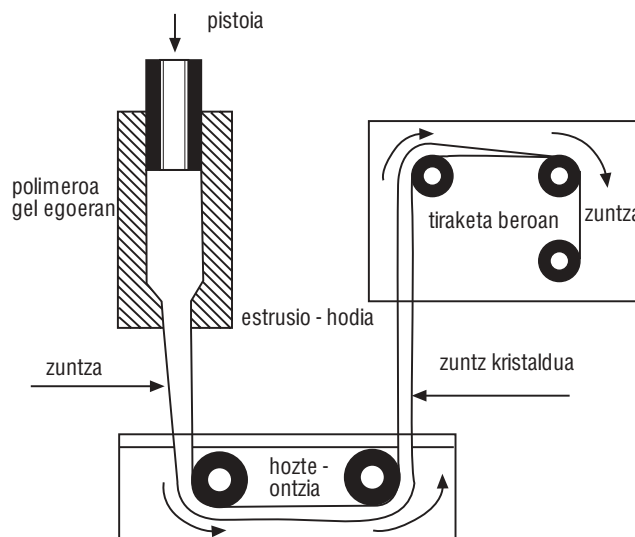
Zuntz polimerikoak lortzeko prozesuak: hariketa

Zuntz sintetikoak aspalditik erabili izan dira ehungintzan. Hariketa deritzen prozesuez lortu ohi dira. Hariketean, lehenik, polimeroaren estrusioa egiten da. Diametro txikiko zuloak dituen hari-hodia zeharkatzen behartzen zaio polimeroari, eta bertatik atera bezain laster, tiraketa mekanikoaren bidez

luzapen prozesu bat eragin eta orientazioa ematen zaio. Prozesu honen ondorioz, materialaren zurruntasuna eta erresistentzia handitu egiten dira.

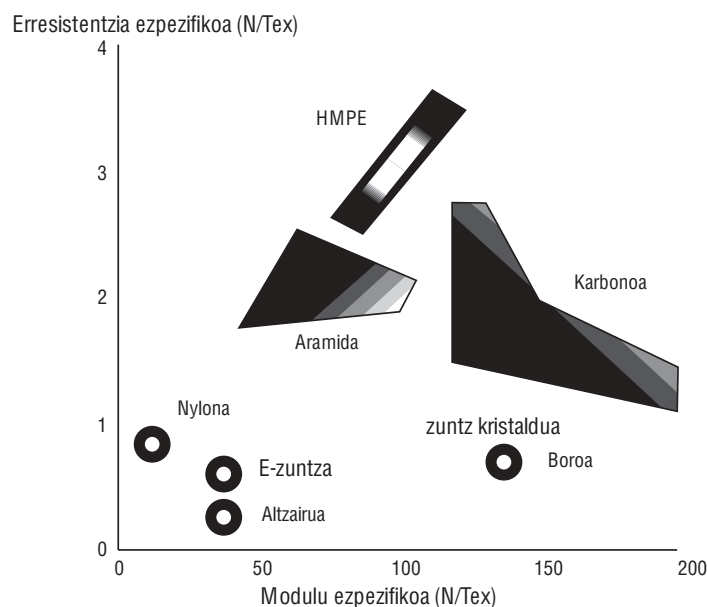
Hari-zuntzak fabrikatzeko ohiko metodoak hiru dira funtsean:

- Hariketa urtu egoeran: errazena da, baina polimeroak bere urtze puntuaren gainera egonkorra behar du izan. Nylon 6,6 zuntza adibide ona da: materialari, urtu eta gero behartzen zaio 50-500 zulotxo dituen hari-hodi bat zeharkatzera. Hozten den bitartean luzapena eragingo dion sistema bat edo gehiagoz tenkatzen da eta, hala, orientazioa ematen zaio.
- Hariketa lehorra: polimeroa disolbatzaile batean disolbatzen da. Adibide bat poliakrilonitriloarena (PAN) izan daiteke. Hariak lortzeko, lehenik, polimeroa dimetil formamidan disolbatzen da. Ondoren, polimero-disoluzioa hari-hodiko zulotxoetatik estruitzen da. Hortik atera bezain laster disolbatzailea lurrunarazten da, nahiko azkar. Amaitzeko, luzapen-prozesu mekanikoa ezarri, orientazioa ematen zaio materialari.
- Hariketa hezea: hemen polimero-disoluzioa koagulatzailez betetako ontzi batean harikatzen da. Adibidez, zelulosa-xantato/%7 ur-disoluzioa estruitzen da hari-hodi batetik, zeina azido sulfuriko beteta dagoen (sodio eta zink sulfatoak daramatza) ontzi baten barruan sartuta baitago. Zink- eta sodio-ioiek xantato taldeekin behin-behineko loturak eratzen dituzte eta, hala, kateak lotuta mantentzen dituzte; bitartean azido sulfurikoak, xantato taldeekin erreakzionatuz, hauek askatzen ditu eta, era horretan, polimeroaren prezipitazioa eragiten du. Honi, ondoren orientazioa ematen zaio. Azken emaitza *rayon* deritzan zuntza da.



10. irudia. Gel egoerako estrusioaren irudikapena.

Hari-zuntzen performantzia hobetzeko asmotan, azken urteotan hariketa egiteko metodoetan aldaera berriak agertu dira. Adibidez, hariketa gel egoeran (ikus 10 irudia) eginez posible izan da modulu oso altuko polietilenoa (UHMPE: UltraHighModulusPolyEthylene) fabrikatzea, zeina soka oso sendoak egiteko material oso preziatua bilakatu baita. Prozesu honek dakarren aurrerapena da pisu molekular oso-oso altuko polimero-gel bat estruiazarazi behar izaten dela hainbat zulotxo dituen hari-hoditik. Hortaz, polimeroaren kristal-ezaugarriak optimizatuta, ondoren beroan egingo den tiraketa prozesuan lortutako zuntzen orientazio-mailarekin batera zurruntasuna eta erresistentzia asko hobetzen dira (11 irudia).



Unitateak: N, Newton; Tex, ehungintzan dentsitate lineala adierazteko erabiltzen den unitatea (1 Kmko luzeradun hari bateko gramo kopurua).

11. irudia. HMPE eta bestelako zuntzen erresistentzia espezifikokoaren (/) eta modulu espezifikokoaren ($E/$) balioak.

Beraz, ikusten dugu plastikoetan arrunt eta merkeenetakoa den polietilenotik abiatuta, teknologi egokiaren bidez lortutako polietileno zuntzetuak zurruntasun eta erresistentzia maximoak eskain ditzakeela. Industria mailan, teknologia berria garatu eta zurruntasun-modulu oso altuko polietilenoa (UHMPE) 1990. urtean agertu zen lehen aldiz Dutch State Mines (DMS) etxearen eskutik eta, *Dyneema* izena eman zioten. Estatu Batuetan *Spectra* esaten diote material honi. Material zurruna, erresistikorra eta oso arina da. Beti izango du muga bat goi-tenperaturetako erabilpenari dago-

kionez, baina itsasoko erabilpenetarako sokak egiteko, esate baterako, aitzin-material egokienetakoa da egun.

SOKA MOTAK

Orientazio-maila handiak lortzea posible den hainbat polimero termo-plastikoak erabiliz fabrikatzen dira zuntzak egun: polietilenoa, polipropilenoa, poliesterrak, nylonak, polisulfona, poliakrilonitriloa, etab. Zuntzen izaera eta zuntzei dagozkien egitura-ezaugarriak desberdinak diren aldetik aitzin-materialen performantziak desberdinak izaten dira, baita beren salneurria eta erabilpena ere. Soka mota desberdinak izateko aukera ez da ordea soilik hari-zuntzen berezko ezaugarrietatik eratortzen. Hari-zuntzak el-



12. irudia. Soketarako erabiltzen diren diseinu batzuk [5].

kartuz lokarriak egiten dira, eta lokarri multzoak txirikordatuz sokak diseinatzeko hainbat modu daude. Gogora dezagun sekzio erresistikorraren azaleraren handitzea dela-eta betetzen dutela sokek beren funtzio mekanikoa, eta beraz, haien performantzia sokaren diseinu-geometriaren arabera izango da maila handi batean (12 irudia).

ERREFERENTZIAK

- [1] THE CORDAGE INSTITUTE «The machines for all ages», *www.ropecord.com*
- [2] JONES, D.R.H. 1993. «Failure of mountaineering ropes», *Engineering Materials*, **3**, pp. 3-12.
- [3] CALLISTER, W.D. 1994. *Materials science and engineering, an introduction*. John Wiley Ed.
- [4] MACKLEY, M. 1997. «The scientific and technological route to the manufacture of High-Modulus Polyethylene», *MRS Bulletin*, Sept., **47-50**.
- [5] AMERICAN BUREAU OF SHIPPING ABS. 1999. «The application of synthetic ropes for offshore mooring».