

Laminarteko hausturaren I/II modu mistoa aztertzekeo saiakuntza konfigurazio berri bat

(New test configuration for analyzing mixed-mode I/II interlaminar fracture)

Ana Boyano*¹, Juan Luis Osa¹, Unai Fernandez-Gamiz², Leyre Torre³,
Faustino Mujika¹

¹ Ingeniaritza Mekanikoa Saila

² Ingeniaritza Nuklearra eta Jariakinen Mekanika Saila

³ Meatze eta Metalurgia Ingeniaritza eta Materialen Zientzia Saila

Euskal Herriko Unibertsitatea UPV/EHU

* ana.boyano@ehu.eus

DOI: 10.1387/ekaia.17895

Jasoa: 2017-05-31

Onartua: 2017-12-01

Laburpena: Lan honetan, laminatu konpositeen I/II haustura modu mistoa aztertzekeo, saiakuntza konfigurazio berri bat aurkezten da. Konfigurazioa *End Notched Flexure* saiakuntzan oinarrituta dago. Pitzaduraren bi besoen artean, metalezko arrabola bat sartzen da modu mistoa lortzearente. II modua kanpoko kargaren bidez lortzen da, eta I modua, arrabola bat sartuz pitzadura irekitzean lortzen da. Haustura aztertzekeo, energia askatzearen tasa erabiltzen da. Haustura modu bakoitzari dagokion tasa, analitikoki kalkulatu ondoren, elementu finituen bidezko kalkuluetan lortutako emaitzekin erkatzen da. Lan esperimentalean, karbono zuntzez eta epoxi matrizez osatutako norabide bakarreko T300/F593 konpositea erabiltzen da. Pitzadura luzera egoki neurtuta dagoen egiaztatzen da, energia askatzearen tasaren balioak irudikatzen dira, eta haustura irizpide egokia aukeratu da. Gainera, GIc eta GIIC parametroak ere kalkulatu dira.

Hitz gakoak: laminarteko haustura, modu mistoa, energia askatzearen tasa, pitzadura neurketa.

Abstract: This study describes a new test configuration, based on an End Notched Flexure test configuration. A metallic roller is inserted between the two arms of the crack in order to get a mixed mode fracture. The external load application gives the mode II, and the opening of the crack is get by means of the inserted roller. Energy release rate is the parameter used for analyzing interlaminar fracture. Each mode energy release rate is determined analytically and the results are compared with the ones ob-

tained by finite element method. Experimental tests are performed with specimens of F593/T300 carbon/epoxy unidirectional composite. The procedure to determine crack length is checked, energy release rate curves are determined and a failure criterion is validated. Moreover, the values of G_{Ic} and G_{IIc} are determined.

Keywords: interlaminar fracture, mixed-mode, energy release rate, crack length determination.

1. SARRERA

1.1. Material konpositeak

Eskuarki, material konpositeak bi fasez edo gehiagoz osatuak dira. Ezaugarri mekanikoak garrantzitsuak direnean, material konpositea diseinatzen da ezaugarri mekaniko espezifikoak osagaiek banaka dituztenak baino hobekiago izan daitezkeen. Materialaren fase bat ez-jarraitua izan ohi da, zurrunagoa eta erresistenteagoa, eta errefortzu deritzo. Ahulagoa eta deformagarriagoa den faseari matrize deritzo [1]. Zuntzek erresistentzia eta zurruntasuna ematen dizkiote konpositeari, eta nekearen aurkako erresistentzia ere hobetzen dute. Matrizeak zuntzak elkartuta mantentzen ditu, kargak zuntz batetik bestera pasatuz [2]. Materialak alderatzen direnean, pisu unitateko ezaugarriak erabiltzen dira, espezifiko deritzenak. Egitura konpositeen kasuan, gerta daiteke ezaugarri mekanikoak ingeniaritzan erabili ohi diren materialen ezaugarriak (esate baterako, altzairuarenak) baino txarragoak izatea, ezaugarri espezifikoak hobekiago izanik. Egitura konpositeak, ohiko materialak baino garestiagoak direnez, pisua garrantzi handikoa denean erabiltzen dira [3]. Laminatu konpositeak itsatsitako laminaz osatuta daude. Matrize batean barneratuta dauden norabide bakarrek zuntzez osatuta dago lamina bat, edo ehun bat eratzen duten zuntzez. Orientazio bera duten norabide bakarrek lamina batzuek geruza bat osatzen dute. Laminatu konpositea pilaketa sekuentzia bati jarraituz lotzen diren bi laminak edo gehiagok osatzen dute; laminatua norabide bakarrek edo norabide anitzekoa izan daiteke.

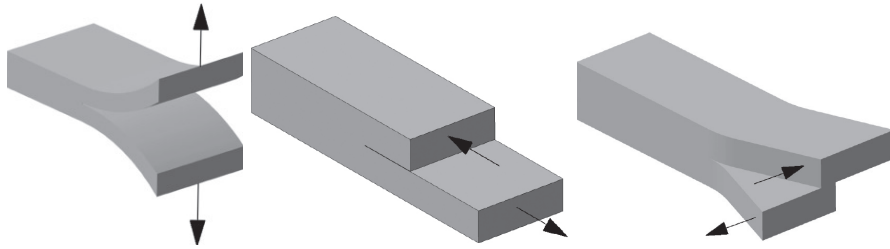
1.2. Laminarteko haustura

Pitzadurak edo akatsak dituen egitura batek jasan dezakeen karga maximoa kalkulatzeko, edota pitzadura bat bere luzera kritikora noiz heltzen den aurreikusteko, hausturaren mekanika aplikatu daiteke. Aztertutako pitzaduradun egituraren, pitzadura puntaren inguruan agertzen den deformazio inelastiko txiki bat bada, Hausturaren Mekanika Elastiko Linealeko kontzeptuak erabiliko dira. Deslaminazioa edo laminen arteko bereizketa erretxina ugariko eskualdeetan gertatu ohi da, eta matrizearen laminarteko pitzadura gisa defini daiteke [4]. Zuntz errefortzudun material konpositeetan,

zuntz errefortzuak laminatuaren planoan hobetzen ditu propietateak, baina ez berarekiko elkarzuta den planoan. Beraz, laminartean pitzadura bat egonez gero, erraz heda daiteke matritzetik edota matrize-zuntz tartetik. Pitzadura horien hedapenak propietate mekanikoen galera nabarmena dakar, eta, gaur egun, horixe da zuntz errefortzudun material konpositeek egituretan erabiliak izateko duten eragozpen nagusia.

Hausturaren Mekanika Elastiko Linealeko hurbilketa energetikoak gorputzetan barneratuta dauden pitzaduren hazkundera aztertzen du pitzaduraren hedapenean askatutako gainazal unitateko energia (G parametroa) neurtuz. G parametro horri energia askatzearen tasa deritzo, eta pitzadura hazkundera bat gertatzeko eskuragarri dagoen energia da [5].

Hausturaren mekanikaren arabera pitzadura hiru modutan handitu daiteke, hurrengo irudian ikus daitekeen bezala.



1. irudia. Haustura moduak: (a) I irekitze modua (b) II lerraketa modua (c) III bihurtura modua.

Pitzadura, modu horietako baten arabera hedatzean, haustura modu horrekin identifikatzen da. Karga egoera orokor batean, hiru moduen konbinazio bat gertatzen da. Egoera horri, eskuarki, modu misto deritzo, eta gertatzen den hausturari, haustura misto [5]. Modu bakoitzari dagozkion energia askatzearen tasak G_I , G_{II} eta G_{III} dira, hurrenez hurren. Indar aplikazioko egoera orokor batean, pitzaduraren hedapena hiru haustura moduen arteko edozein konbinaziotan gerta daiteke. Kasu orokorrean, beraz, energia askatzearen tasa osoa hiru haustura moduen energia askatzearen tasen batura izango da. Modu bakoitzari dagozkion haustura zailtasunak G_{Ic} , G_{IIc} eta G_{IIIc} dira, hurrenez hurren. Haustura zailtasuna materialaren ezaugarria da, eta haustura modu bakoitzari balio bakarra dagokio. Modu hutsetan, sistemen energia askatzearen tasak materialaren energia askatzearen tasa kritikoa gainditzen duenean hasiko da pitzadura (puntu kritikoa, alegia). Hortaz, modu hutsetan, haustura gertatzeko baldintza kritikoa honako hau da:

$$\begin{aligned} G_I &\geq G_{Ic} \\ G_{II} &\geq G_{IIc} \end{aligned} \tag{1}$$

Hala ere, modu mistoan, hau da, I moduak eta II moduak aldi berean parte hartzen dutenean, energia askatzearen tasa $G = GI + GII$ da. Aldiz, $GC \neq GIc + GIIc$. Haustura irizpide egokia aukeratzeko, modu ratio desberdinei dagozkien GI-en eta GII-ren balio esperimentalak behar dira puntu kritikoan, hau da, pitzadura hedatzen hasten denean. Haustura irizpide gehienetan, modu hutsei dagozkien GIc-ren eta GIIc-ren balioak ezagutu behar dira, eta, hala, haustura irizpidearen adierazpen matematikoan agertzen diren beste parametroak lortzen dira, doikuntza metodoen bat datu esperimentalei aplikatuz. Beste kasu batzuetan, GIc-ren eta GIIc-ren balioak haustura irizpidea aplikatuz lor daitezke.

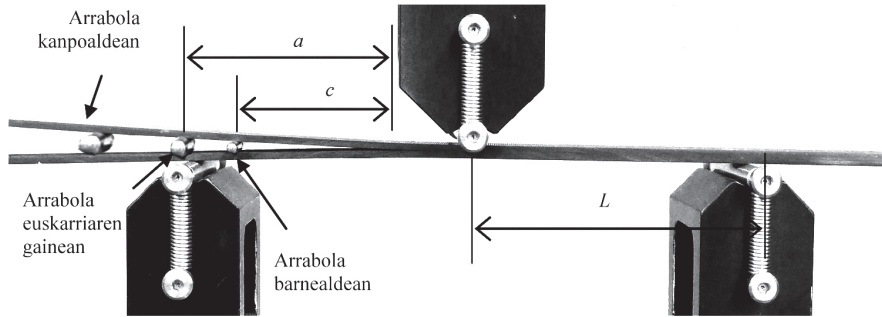
1.3. Arloko egoera

Material konpositeetan, modu hutsetan, laminarteko haustura gertatzea ez da ohikoena. I/II modu mistoa da maizen agertzen dena; modu horretako indar egoerak errealitateko egoera hobeki azaltzen du. 2001ean, *American Society for Testing and Materials* (ASTM) elkarteak, modu mistoko haustura zailtasuna karakterizatzeko araua argitaratu zuen. Estandarizatutako saiakuntza metodoari Modu Mistoko Makurdura saiakuntza (the *Mixed-Mode Bending*, MMB) deritzo [6]. Arauan proposatutako saiakuntza bankua, Crews eta Reeder-ek berriki proposatutako baten aldaera da [7]. MMB konfigurazioa askotan erabilia izan da. I/II modu mistoko haustura aztertzeko asmoz, beste saiakuntza konfigurazio batzuk proposatu dira. Adibidez, Habe Landatu Bikoitzeko Saiakuntza Ez-simetrikoa (*Asymmetric Double-Cantilever Beam*, ADCB), non pitzadura plano laminatuaren erdiko planotik at dagoen eta pitzadura puntan hasten den karga mistoko egoera bat sortzen duen [8]. Szekrenyes-ek, I/II modu mistoa aztertzeko, saiakuntza konfigurazio batzuk proposatu ditu: aurretentsionatutako bi probeta, bata *End Notched Flexure test* (ENF) saiakuntzan oinarritua [9], eta bestea, *End-Loaded Split* (ELS) saiakuntzan oinarritua [10]. Bi konfigurazio horien ezaugarri nagusia honako hau da: I haustura modua lortzeko, altzairuzko arrabola bat pitzaduraren bi besoen artean sartzen da.

2. ENFR SAIKUNTZAREN DESKRIBAPENA

Lan honetan proposatzen den saiakuntza konfigurazioa baldintza horiek betetzeko asmoz garatzen da. Saiakuntzaren konfigurazioa *End Notched Flexure test* (ENF) saiakuntzan oinarrituta dago. Modu mistoa lortzearen, pitzaduraren bi besoen artean metalezko arrabola bat sartzen da. II modua kanpoko kargaren bidez lortzen da, eta I modua, arrabola sartuta pitzadura irekitzean, 1. irudian erakusten den moduan. Szekrényes-ek [9] arrabola euskarriaren gainean daukan kasu partikularra aztertu du. Lan honetan, arrabolaren kokapena pitzaduraren kanpoaldean eta barrualdean aztertuz, saiakuntzaren azterketa orokortzen da, 2. irudian ikus daitekeen mo-

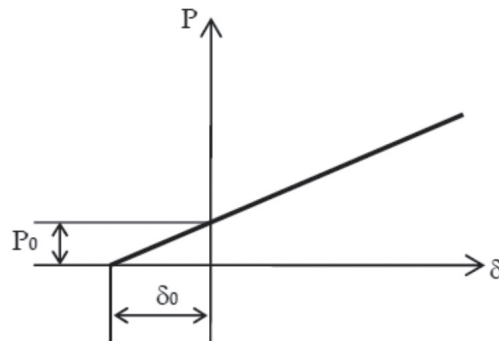
duan. Saiakuntzari Bukaerako Pitzadura Makurdura Arrabolarekin (*End Notched Flexure with Roller, ENFR*) deritzo.



2. irudia. ENFR saiakuntzaren konfigurazioa.

Arrabolaren kokapena zehazteko c parametroa erabili da; a pitzadura luzera da, eta $2L$, saiakuntzaren argia. Lan honetan, pitzadura probetaren erdiko planoan dagoela jo da.

Arrabola pitzadura sartzean, kargarik gabe, hasierako desplazamendu negatiboa gertatzen da kargaren aplikazio puntuan. Are gehiago, desplazamendua zero denean, karga positibo bat dago, 3. irudian ikus daitekeen moduan.



3. irudia. Karga-desplazamendu grafikoa.

Beraz, saiakuntzaren malgutasuna edo konpliantza hurrengo eran defini daiteke:

$$C = \frac{\delta}{P - P_0} = \frac{-\delta_0}{P_0} = \frac{\delta - \delta_0}{P} \quad (2)$$

Arrabolaren hiru kokapenatarako erdiko puntuaren desplazamendua kalkulatu, eta, δ_0 eta P_0 balioak lorturik, konpliantzaren adierazpena hau da [11]:

$$\begin{aligned} C_{\text{kanpoaldean}} &= \frac{1}{8E_f b h^3} \left[\frac{(a - c_o)^3 (3a^3 + 3ac_o^2 + c_o^3)}{a^3} + 2L^3 \right] \\ C_{\text{barnealdean}} &= \frac{3a^3 + 2L^3 + c_i^3 + 3ac_i^2}{8E_f b h^3} \\ C_{c=0} &= \frac{3a^3 + 2L^3}{8E_f b h^3} \end{aligned} \quad (3)$$

Non a pitzadura-luzera, E_f makurdura-modulua, R arrabolaren erradioa, b probetaren zabalera, eta $2h$ probetaren lodiera osoa diren.

Energia askatzearen tasaren kalkulua deformazio energia osagarrian dago oinarrituta, adierazpen honen arabera [11]:

$$G = \frac{1}{b} \left(\frac{\partial U^*}{\partial a} \right)_{F_{\text{kite}}} \quad (4)$$

Non U^* deformazio energia osagarria den eta ∂a pitzadura hazkunde diferentziala. Indarrak, momentuak eta deformazio energia osagarria habeen teoriaren bidez kalkulatu, eta aurreko adierazpenean ordezkatu, arrabolaren hiru kokapenatarako energia askatzearen tasak honela adieraz daitezke [11]:

Kanpoaldean

$$G = \frac{3R^2 E h^3}{4a^4} - \frac{3PRc_o(a^2 - c_o^2)}{4a^4 b} + \frac{3P^2 c_o^2 (a^2 - c_o^2)^2}{16a^4 E_f b^2 h^3} + \frac{9P^2 (a - c_o)^2}{16E_f b^2 h^3}$$

Barnealdean

$$G = \frac{3R^2 E_f h^3}{4(a - c_i)^4} + \frac{3PRc_i}{4b(a - c_i)^2} + \frac{3P^2 c_i^2}{16E_f b^2 h^3} + \frac{9P^2 a^2}{16E_f b^2 h^3}$$

$c = 0$

$$G = \frac{3R^2 E_f h^3}{4a^4} + \frac{9P^2 a^2}{16E_f b^2 h^3} \quad (5)$$

$R = 0$ eta $c = 0$ direnean, zero ez den gaia azkena da, zeina arrosa kolorez adierazita dagoen, eta hori izango da II moduari dagokion energia askatzearen tasa. Beraz, gainontzeko gaiak I moduari dagozkionak izango dira; beltzez adierazita daudenak, hain zuzen ere. Modu deskonposaketa egokia den egiaztatzeko, zenbakizko balioespena egin da. Horretarako, GI eta GII energia askatzearen tasak kalkulatzeko bi urratsen hedapen prozedura delako elementu finituen bidezko metodoa (*Two step extension procedure*, TSEP) aplikatu da [11]. Energia askatzearen tasen balio analitikoak eta zenbakizkoak bat datoz, eta, ondorioz, modu deskonposaketa baietsi da.

3. AZTERKETA ESPERIMENTALA

3.1. Materialaren fabrikazioa eta probetak

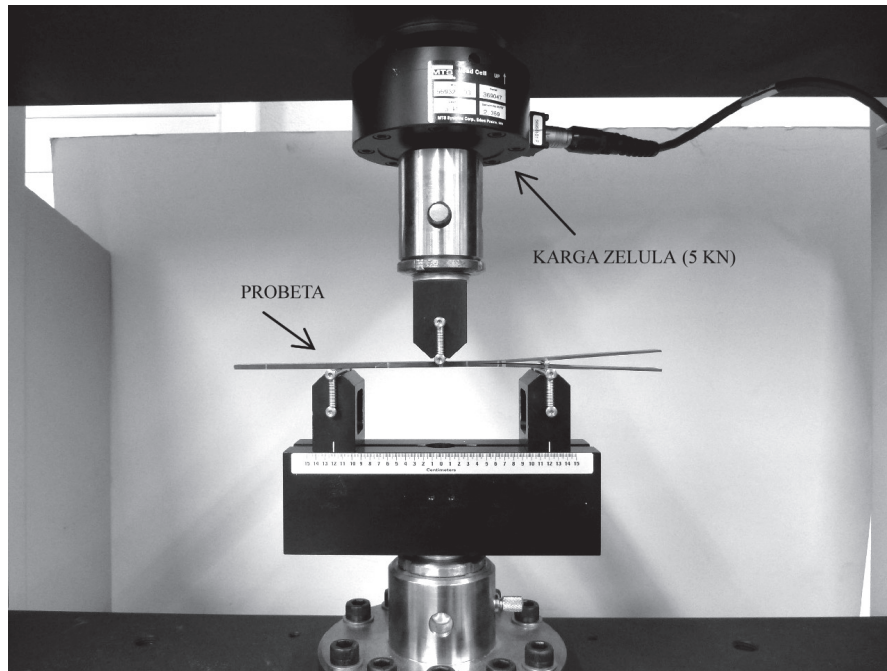
Lan esperimentalean erabili diren probetak karbono zuntzez eta epoxi matrizez osatutako norabide bakarreko T300/F593 konpositeaz fabrikatu dira. Erabili diren probetak Hexcel Composites-ek igorritako prerregekin abiatu eta konpresio beroz ondutako plaketatik lortu dira, ezarritako fabrikazio-zikloari jarraituz. Pilaketa prozesuan tefloi lamina bat barneratu da, hasierako pitzadura eragiteko asmoz. Bukaerako materiala laminatu moduan erabili denean, probetak laminatuetatik moztu dira zerra zirkular diamentedun baten bidez. Ondoren, zerraren markak kentzeko leungailu bat erabili da. Propietate elastikoei dagokienez, Mujikak [12] proposatutako prozedura erabili da. Lortutako moduluen batez besteko balioak eta desbideratze tipikoaren balioak honako hauek dira:

$$E_f = 107.4 (\pm 1.4) \text{ GPa}$$

$$G_{LT} = 4.3 (\pm 0.4) \text{ GPa}$$

Probeten dimentsioei dagokienez, probeten luzera 200 mm-koa da. Lodiaren (2h) eta zabaleraren (b) balio nominalak, 3 mm eta 15 mm, hurrenez hurren. Saiakuntza guztiak 120 mm-ko argiarekin (2L) egin dira. Saiakuntzak MTS saiakuntza makinan egin dira, desplazamendu kontrolatua aplikatuz, 4. irudian erakusten den moduan.

Pitzadura luzeraren neurketa malgutasun esperimentalaren aldakuntzan oinarritzen da. Izan ere, pitzadura haztean probetaren zurruntasuna gutxia-
gotzen da, eta, beraz, malgutasuna aldatzen da. Prozedura horrek saiakuntzaren edozein puntutan pitzadura luzera zein den zehazteko aukera ematen du, neurketa optikorik gabe [13].



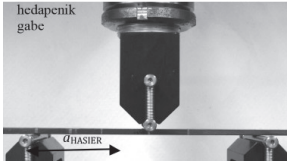
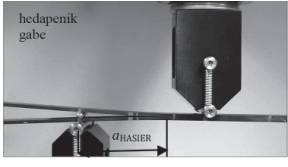
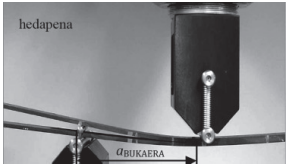
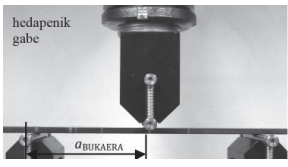
4. irudia. Probeta makinan ipinita.

3.2. Pitzadura luzeraren neurketa konpliantzaren aldakuntzan oinarriturik

Pitzadura luzeraren neurketaren egokitasuna aztertzeko, ENF saiakuntzak egiten dira, Habeen Teoria Makurdura Errotazioduna (*Beam Theory including Bending Rotation effects* BTBR) metodoa egiaztapen metodo gisa erabiliz [14]. BTBR metodoa probetaren konpliantza esperimentalaren aldakuntzan oinarrituta dago, eta balioztatua da. Lan honetan, ENFR saiakuntzan metodo hori ere aplikatu nahi da, eta horregatik egiten da egiaztapena.

Kasu desberdinak aztertu dira: arrabolaren erradioa aldatuz eta arrabolaren kokapena aldatuz. Emaitzen arabera [13], hasierako pitzadura luzeran desberdintasuna 0,7 mm baino txikiagoa da, % 2 baino gutxiago. Bestalde, bukaerako pitzadura luzerek 6. urratsean neurtutako pitzadura luzeraren berdinak izan behar dute. Kasu horretan, errore maximoa 0,4 mm da, % 1 baino gutxiago. Hortaz, konpliantza esperimentalaren aldakuntzan oinarrituz pitzadura luzeraren neurketa egokia dela ondoriozta daiteke.

1. taula. Pitzadura luzeraren egiaztapena egiteko prozedura [13].

1. urratsa		<p>ENF saiakuntza pitzadura hedapenik gabe.</p> <p>BTBR metodoa aplikatuz, pitzadura luzera zehaztu.</p> <p>Hasierako pitzadura luzera: a_{HASIERA}</p>
2. urratsa		<p>Arrabola sartu pitzaduran, saiakuntza bankutik kanpo.</p> <p>Probeta saiakuntza bankuan kokatu</p>
3. urratsa		<p>ENFR saiakuntza pitzadura hedapenik gabe.</p> <p>BTBR metodoa aplikatuz, pitzadura luzera zehaztu. 1. urratsean lortutako emaitzarekin alderatu.</p> <p>Hasierako pitzadura luzera:</p> <p>a_{HASIERA}</p>
4. urratsa		<p>ENFR saiakuntza pitzadura hedapena.</p> <p>BTBR aplikatuz azken puntuko pitzadura luzera zehaztu.</p> <p>Bukaerako pitzadura luzera: a_{BUKAERA}</p>
5. urratsa		<p>Arrabola atera, probeta bere lekutik mugitu gabe</p>
6. urratsa		<p>ENF saiakuntza pitzadura hedapenik gabe.</p> <p>BTBR metodoa aplikatuz, bukaerako pitzadura luzera zehaztu. 4. urratseko emaitzarekin alderatu.</p> <p>Bukaerako pitzadura luzera: a_{BUKAERA}</p>

3.3. Energia askatzearen tasen kurbak, R-kurbak

Erresistentzia kurba (R-kurba) material konpositeen haustura portaera ebaluatzeko erabiltzen da [15]. R-kurbak haustura zailtasunaren eta pitzadura hedapenaren arteko erlazioa azaltzen du. Oso garrantzitsua da R-kurba egokiro lortzeko metodo bat ezartzea, haustura zailtasuna aldatzen baita pitzadura hedatzen den heinean.

P eta δ ezagunak diren puntuetan pitzadura luzera kalkulatu ahal izateak aukera ematen du energia askatzearen tasak puntuz puntu kalkulatzeko, R-kurba definituz. Lau modu ratioko saiakuntzak erabili dira energia

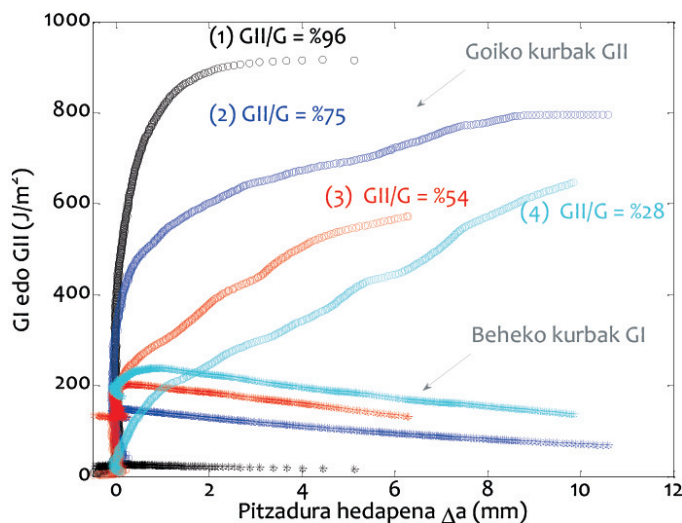
askatzearen tasen azterketa esperimentalta egiteko asmoz, eta 2. taulan aurkezten dira. Lan honetan erabili den nomenklatura honako hau da: ai-Rj-ck. ai hasierako pitzadura luzera izanik, Rj arrabolaren erradioa, eta ck arrabolaren kokapena definitzen duen parametroaren balioa.

2. taula. Energia askatzearen tasa aztertzeke baldintza esperimentalen laburpena.

ID	Nomenklatura	Hasierako GII/G (%)
1.	a40-R0,5-c0	96
2.	a45-R1,5-c0	75
3.	a34-R0,5-c10	54
4.	a37-R0,5-c14	28

5. irudian, modu mistoko saiakuntzen R-kurbak azaltzen dira. Arrabola erradio desberdinak kokapen desberdinetan erabili dira, era askotako modu konbinazioak lortzeko asmoz.

Goiko kurbak GII-ei dagozkie, eta behekoak, GI-ei. Modu ratio berdinari dagozkion GI eta GII kurbak kolore berdinarekin irudikatu dira. Pitzadura hedatzean, GI-en kurbak astiro txikiagotuz doaz, GII kurbak gorantz egiten duen heinean. Horrek esan nahi du GII/G saiakuntzan zehar aldatuz doala modu ratioa.



5. irudia. Modu mistoko saiakuntzen R-kurbak.

3.4. GIc-ren eta GIIC-ren kalkulua

Lan honetan, haustura irizpide lineala aukeratu da, eta hurrengo eran adieraz daiteke:

$$\frac{G_I}{G_{IC}} + \frac{G_{II}}{G_{IIC}} = 1 \quad (6)$$

Hasierako modu ratio desberdinak dituzten saiakuntzetan, hedapenaren puntu guztiak kontuan hartuz, GI energia askatzearen tasa GII-ren arabera irudikatzen da, irizpide lineala erabiltzean egin ohi den bezala [16]. Irizpidea baliagarria den ala ez aztertzeke asmoz, zortzi saiakuntza hartuko dira kontuan. 3. taulan saiakuntzen baldintzak laburtzen dira.

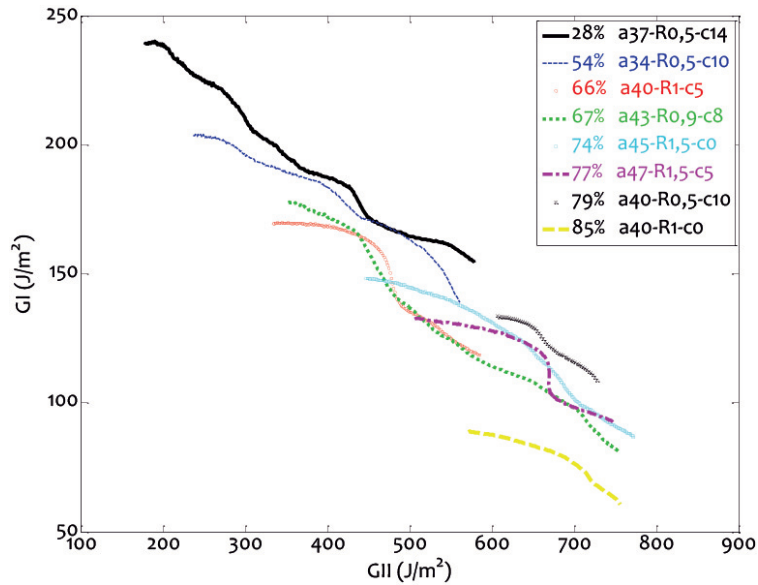
3. taula. GIc eta GIIC kalkulatzeko erabilitako saiakuntzen laburpena.

Nomenklatura	Hasierako G_{II} / G (%)
a37-R0,5-c14	28
a34-R0,5-c10	54
a40-R1-c5	66
a43-R0,9-c8	66
a45-R1,5-c0	74
a47-R1,5-c5	77
a40-R0,5-c10	79
a40-R1-c0	85

6. irudian modu ratio desberdineko GI-GII grafikoak agertzen dira. Hor, GI-en jaitzieratik aurrera irudikatzen dira hedapenaren datuak. Grafikoaren legendan agertzen diren modu ratioak hasierakoak dira.

Haustura irizpide linealaren egokitasuna aztertzeke asmoz, R^2 mugatze koefizientea kalkulatu da [17]. Hasierako %28 modu ratioetik %85 modu ratioa arteko doikuntza linealen emaitzak 4. taulan azaltzen dira.

4. taulan ikus daitekeenez, R^2 koefizientearen emaitzen arabera, haustura irizpide lineala egokia dela ondoriozta daiteke, R^2 -ren balio guztiak 0,86 baino handiagoak baitira. Emaitza hori bat dator argitaratutako beste lan batzuekin [18]. I modu hutsaren haustura zailtasunari dagokionez, ASTM arauaren arabera [19], GIc zehazteke gomendatzen den definizioa ez-linealtasun puntua da, NL point delakoa. Habe Landatu Bikoitzeko (*Double Cantilever Beam*) DCB saiakuntzaren R-kurba aztertuz [20], GIc-ren balioa NL puntuan 240 J/m^2 da, 4. taulan agertzen den emaitzarekin bat etorritik. II modu hutsaren energia askatzearen tasa kritikoari dagokionez,



6. irudia. Hedapenaren datuak zenbait modu ratiotarako.

ASTM arauaren arabera, G_{IIc} karga maximoko puntuan kalkulatu da. ENF konfigurazioan, 120 mm-ko argiko bost probetatan egin dira saiakuntzak. Karga maximoko puntuan lortutako G_{IIc} -ren batez besteko balioa, BTBR metodoa aplikatuz, $G_{IIc} = 1.063 \pm 25,1 \text{ J/m}^2$ izan da, 4. taulan agertzen den emaitzarekin bat etorritz. Beraz, modu hutsen saiakuntzetan oinarrituta, irizpide linealaren egokitasuna egiaztatu ondoren, modu mistoko saiakuntza bakar batekin G_{Ic} eta G_{IIc} balioak lor daitezke.

4. taula. Doikuntza linealen emaitzak.

Hasierako modu ratioa (%)	G_I -en jaitsiera hastean modu ratioa (%)	Bukaerako modu ratioa (%)	G_{Ic} (J/m ²)	G_{IIc} (J/m ²)	R ²
28	43	82	279	1.251	0,983
54	55	81	256	1.328	0,961
66	67	83	275	1.012	0,892
66	67	90	268	1.071	0,977
74	75	91	261	1.159	0,965
77	77	89	258	1.154	0,860
79	79	87	278	1.198	0,969
85	85	93	225	1.045	0,991
Batez besteko balioa			263 ± 16	1.152 ± 100	

4. ONDORIOAK

I/II modu mistoa aztertzeke konfigurazio berri bat proposatu da. Konfigurazio hori ENF saiakuntzan oinarrituta dago. Modu mistoa lortzearren, pitzaduraren bi besoen artean arrabola bat sartzen da. Hurbilketa analitikoan deformazio energia osagarriaren bidez kalkulatuako modu deskonposaketa egokia dela ondorioztatu da zenbakizko balioekin alderatu ondoren.

ENFR konfigurazioaren azterketa esperimental egiteko asmoz, karbono zuntzez eta epoxi matricez osatutako norabide bakarreko T300/F593 konpositea erabili da. Konpliantza esperimentalaren aldetan oinarrituz, pitzadura luzera zehazteke prozedura egokia da, BTBR metodoa egiaztatze metodo gisa erabiliz. Puntuz puntu pitzadura luzera kalkulatu ahal izateke energia askatzearen tasak kalkulatzeko modua ematen du, eta modu ratioa hedapenean zehar aldakorra dela ondorioztatu da. Haustura irizpide lineala erabili da probeten eta baldintza esperimentalen datu esperimentalak doitzeko, eta esan daiteke ENFR saiakuntzarako aztertutako probeta geometriaren eta aztertutako materialaren haustura adierazteke egokia dela. Beste material baten kasurako, ENFR saiakuntza GIc eta GIIC kalkulatzeko modu hutsen saiakuntzen osagarri gisa balia daiteke, betiere irizpide lineala betetzen dela egiaztatu ondoren.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] GIBSON RF. 1994. *Principles of composite material mechanics*. McGraw-Hill.
- [2] HULL D. 1987. *Materiales compuestos*. Reverté.
- [3] CHAWLA KK. 2012. *Composite materials*. Springer.
- [4] KAW AK. 1997. *Mechanics of composite materials*. CRC Press.
- [5] ANDERSON TL. 2005. *Fracture mechanics: fundamentals and applications*. 3rd ed. CRC Press.
- [6] ASTM D6671-01. 2006. Standard test method for mixed mode I-mode II interlaminar fracture toughness of unidirectional fiber-reinforced polymer matrix composites.
- [7] REEDER JR, CREWS JH. 1990. «Mixed-Mode Bending Method for Delamination Testing». *AIAA JOURNAL*; **28**:1270-6.
- [8] SUNDARARAMAN V, DAVIDSON BD. 1997. «An unsymmetric double cantilever beam test for interfacial fracture toughness determination». *Int J Solids Structures*. **34**:799-817.
- [9] SZEKRENYES A. 2006. «Prestressed fracture specimen for delamination testing of composites» *Int J Fract*; **139**:213-37.
- [10] SZEKRENYES A. 2010. «Prestressed composite specimen for mixed-mode I/II cracking in laminated materials» *J Reinf Plast Compos*; **29**:3309-21.

- [11] BOYANO A, MOLLÓN V, BONHOMME J, DE GRACIA J, ARRESE A, MUJIKA F. 2015 «Analytical and numerical approach of an End Notched Flexure test configuration with an inserted roller for promoting mixed mode I/II» *Eng Fract Mech*;143:63-79.
- [12] MUJIKA F. 2007 «On the effect of shear and local deformation in three-point bending tests» *Polym Test*;26:869-77.
- [13] BOYANO A, DE GRACIA J, ARRESE A, MUJIKA F. 2016. «Experimental assessment of an End Notched Flexure test configuration with an inserted roller for analyzing mixed-mode I/II fracture toughness» *Eng Fract Mech*;163:462-75.
- [14] ARRESE A, CARBAJAL N, VARGAS G, MUJIKA F. 2010. «A new method for determining mode II R-curve by the End-Notched Flexure test» *Eng Fract Mech*;77:51-70.
- [15] KANNINEN MF, POPELAR CL. 1985. *Advanced fracture mechanics*. New York: OXFORD UNIVERSITY PRESS.
- [16] REEDER JR. 1992 «An evaluation of mixed-mode delamination failure criteria» *NASA technical memorandum* 104210 Langley Research Center, Hampton, VA.
- [17] WALPOLE RE, MYERS RH, MYERS SL, YE KE. 2012. *Probability & Statistics for Engineers & Scientists*. 9th ed. Pearson Education.
- [18] YOSHIHARA H. 2013 «Initiation and propagation fracture toughness of solid wood under the mixed Mode I/II condition examined by mixed-mode bending test» *Eng Fract Mech*;104:1-15.
- [19] ASTM D5528-01 2001. Standard Test Method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites..
- [20] DE GRACIA J, BOYANO A, ARRESE A, MUJIKA F. 2015 «A new approach for determining the R-curve in DCB tests without optical measurements» *Eng Fract Mech*;135:274-85.