

eman ta zabal zazu

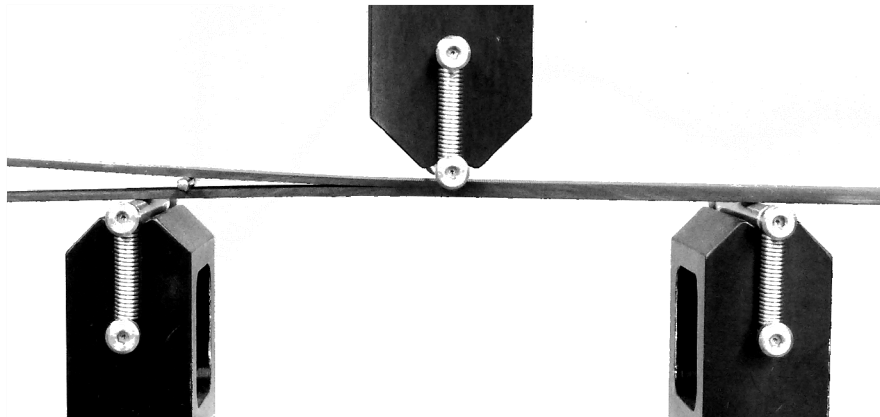


Universidad
del País Vasco

Euskal Herriko
Unibertsitatea

DOKTORETZA TESIA

LAMINARTEKO HAUSTURAREN I/II MODU MISTOA AZTERTZEKO SAIAKUNTZA KONFIGURAZIO BERRI BATEN ANALISIA



Ana Isabel Boyano Murillo

Vitoria-Gasteizen, 2016ko azaroan

“Neure kabuz egiten erakutsidazu”

MARIA MONTESSORI

*Tesia ez da beti jai, inoiz tritea ere bai.
Tesi hau nirekin batera sufritu eta disfrutatu duten guztiei.
Batez ere, etxekoei.*

LABURPENA

Laminatu konpositeen I/II haustura modu mistoa aztertzeko saiakuntza konfigurazio berri bat proposatzen da. Aurkeztutako konfigurazioa ENF saiakuntzan oinarrituta dago. Modu mistoa lortzearen, pitzaduraren bi besoen artean arrabola bat sartzen da. Modu II kanpoko kargaren bidez lortzen da, eta modu I, arrabola sartzegatik pitzadura irekitzean lortzen da.

Haustura aztertzeko energia askatze tasa erabili da. Modu bakoitzari dagokiona Engesser-Castiglianoren teorema aplikatuz analitikoki kalkulatu da. Emaitza analitikoak elementu finitoen bidezko kalkuluek lortutako emaitzekin erkatzen dira.

Lan esperimentalean, karbono zuntzez eta epoxi matrizez osatutako norabide bakarreko T300/F593 konposita erabili da. Pitzadura-luzeraren egokitasuna konprobatzen da probeta bera ENF konfigurazioan hedapenik gabeko saiakuntzak burutuz. Pitzadura-hedapenean zehar energia askatze tasaren balioak irudikatzen dira eta haustura irizpide egokia aukeratu da.

Bi moduen elkarrekintza barneratzen duen energia askatze tasa berri bat proposatzen da, eta konprobazio esperimentala burutzen da. Errore analisia egiten da, konpliantzaren neurketak pitzadura-luzeraren zehaztapenean izan dezakeen eragina aztertzeko. Pitzadura-hedapenaren egonkortasuna era analitikoan eta esperimentalean aztertzen da energia askatze tasa berriaren deribatuaren arabera.

Saiakuntzak egiteko gomendioak biltzen dira, egonkortasun baldintza betetzen dutenen artean eta errore analisia kontuan hartuz, baldintza hoberenak aukeratu.

AURKIBIDEA

LABURPENA	ix
AURKIBIDEA	xi
Irudien zerrenda	xv
Taulen zerrenda	xix
LABURDURA ETA SINBOLOAK.....	xxi
1. SARRERA	1
1.1 MATERIAL KONPOSITEAK	1
1.1.1 Orokortasunak.....	1
1.1.2 Konposite motak eta sailkapena	2
1.1.3 Material konpositeen ezaugarriak.....	3
1.1.4 Erabilera	5
1.2 LAMINATUAK.....	8
1.3 LAMINARTEKO HAUSTURA	9
1.4 TESIAREN HELBURUAK	10
2. LAMINARTEKO HAUSTURA KONPOSITETAN: BERRIKUSPEN BIBLIOGRAFIKOA.....	11
2.1 SARRERA.....	11
2.2 DESLAMINAZIOA EDO LAMINARTEKO HAUSTURA	12
2.3 HAUSTURA ELASTIKO LINEALAREN MEKANIKA.....	13
2.3.1 Tentsio kontzentrazioak, Inglis-en ekarpena.....	13
2.3.2 Energia irizpidea, Griffith-en ekarpena.....	14
2.3.3 Irwin-en eta Orowan-en aldaketak. Energia irizpidea edozein materialentzat..	16
2.3.4 Energia askatze tasa.....	17
2.3.5 Haustura moduak	21
2.3.6 Tentsio irizpidea	22
2.3.7 K eta G ren arteko erlazioa.....	23
2.4 ZENBAKIZKO METODOAK.....	24
2.4.1 Pitzadura birtualaren itxiera metodoa, VCCT	24

2.4.2	Gune kohesiboko modeloak	25
2.5	LAMINARTEKO HAUSTURA SAIKUNTZAK.....	26
2.5.1	Sarrera.....	26
2.5.2	I moduko saiakuntzak	27
2.5.3	II moduko saiakuntzak	29
2.5.4	I/II modu mistoko saiakuntzak.....	30
2.6	HAUSTURA IRIZPIDEAK I/II MODU MISTOAN.....	34
2.6.1	Sarrera.....	34
2.6.2	Potentziaren legearen irizpidea (<i>Power Law Criterion</i>)	35
2.6.3	Elkarrekintza irizpidea (<i>Interaction Criterion</i>)	35
2.6.4	Benzeggagh-Kenane irizpidea	35
2.6.5	Haustura irizpideen erabilera.....	36
3.	MATERIALA, FABRIKAZIOA ETA PROBETAK.....	39
3.1	SARRERA.....	39
3.2	ERABILITAKO MATERIALA.....	39
3.3	FABRIKAZIOA.....	41
3.4	TRESNERIA.....	47
4.	I/II MODU MISTOA AZTERTZEKO SAIKUNTZA: HURBILKETA ANALITIKOA.....	49
4.1	SARRERA.....	49
4.2	SAIAKUNTZAREN DESKRIBAPENA	52
4.3	PITZADURA BARNEKO INDARRAK ETA KONPLIANTZA.....	53
4.3.1	Arrabola kanpoaldean kokatuta.....	53
4.3.2	Arrabola euskarriaren gainean kokatuta	59
4.3.3	Arrabola barnealdean kokatuta.....	60
4.4	ENERGIA ASKATZE TASA.....	65
4.4.1	Arrabola kanpoaldean kokatuta.....	67
4.4.2	Arrabola barnealdean kokatuta.....	68
4.4.3	Arrabola euskarriaren gainean kokatuta	68
4.5	WILLIAMS-EN MODUEN DESKONPOSAKETA	69
4.6	MODU NAHASKETAREN ANALISIA.....	72
4.7	BALIOESPEN NUMERIKOA.....	75

4.8	EMAITZA ANALITIKOEN ETA NUMERIKOEN ARTEKO ALDERAKETA.....	77
5.	SAIAKUNTZAREN AZTERKETA ESPERIMENTALA	79
5.1	SARRERA.....	79
5.2	MAKURDURA ETA EBAKIDURA MODULUAK	80
5.3	PROBETEN PRESTAKUNTZA	84
5.4	HASIERAKO BALDINTZEN KALKULUA	85
5.5	PITZADURA-LUZERAREN NEURKETA.....	87
5.5.1	Pitzadura-luzeraren neurketa konpliantzaren aldakuntzan oinarrituz	87
5.5.2	Pitzadura-luzeraren neurketa optikoa	91
5.6	ENERGIA ASKATZE TASEN KURBAK, R-KURBAK	93
5.7	G_{Ic} ETA G_{IIc} -EN KALKULUA	97
5.8	EMAITZEN EZTABAIDA	103
6.	PITZADURA HEDAPENAREN ANALISIA	105
6.1	SARRERA.....	105
6.2	ENERGIA ASKATZE TASA BALIOKIDEA, G_{eq}	107
6.3	PITZADURA-HEDAPENAREN EGONKORTASUNA	108
6.3.1	Egonkortasunaren definizioa.....	108
6.3.2	Karga Kontrolatua	109
6.3.3	Desplazamendu Kontrolatua	112
6.4	PITZADURA-LUZERAREN ERAGINA.....	114
6.5	ATAL ESPERIMENTALA.....	118
6.5.1	Materialak eta tresnak	118
6.5.2	Baldintza esperimentalak.....	118
6.5.3	Modu-ratio normalizatuak eta G_{eq} kurbak.....	119
6.5.4	Egonkortasunaren balorazioa	121
6.6	SAIAKUNTZAK EGITEKO GOMENDIOAK	124
7.	ONDORIO OROKORRAK	125
8.	AURRERA BEGIRA	127
	BIBLIOGRAFIA.....	129

Irudien zerrenda

1.1 Irudia Boeing 787 Dreamliner hegazkinean erabilitako materialak [7]	5
1.2 Irudia Airbus A350 XWB hegazkinaren egituraren atal bat [8]	6
1.3 Irudia Beira zuntz errefortzudun plastikoz egindako Galea trenaren buruko atalak [9]....	6
1.4 Irudia Pala handien muntaia. Østerild, Danimarka [11].	7
1.5 Irudia Laminatu baten pilaketa sekuentziaren izendapena: +60°/0°/-60°	9
2.1 Irudia Hutsegite mikromekanismo desberdinak karga egoeraren arabera.....	13
2.2 Irudia Tentsio kontrentazioa zulo zirkular batean.....	14
2.3 Irudia Pitzadura hedapenaren eskema (a) Idealki hauskorra (b) Ia hauskorra.....	16
2.4 Irudia Pitzadura trakziozko tentsiopean dagoen plaka infinitu batean	17
2.5 Irudia Pitzadura hedapena karga konstantepean dagoen plaka batean	19
2.6 Irudia Pitzadura hedapena desplazamendu konstantepean dagoen plaka batean	19
2.7 Irudia Haustura moduak (a) I Irekitze modua (b) II Lerraketa modua (c) III Bihurdura modua	21
2.8 Irudia Koordinatu sistemaren definizioa pitzadura-puntan.....	22
2.9 Irudia Pitzadura hedapena elementu finitoen modeloan	25
2.10 Irudia DCB saiakuntza	27
2.11 Irudia WIF saiakuntza	28
2.12 Irudia ENF saiakuntza.....	29
2.13 Irudia ELS saiakuntza	30
2.14 Irudia MMB saiakuntza	31
2.15 Irudia MMB saiakuntza DCB eta ENF saiakuntzen gainjarpen bezala	32
2.16 Irudia CLS saiakuntza.....	33
2.17 Irudia ADCB saiakuntza.....	33
2.18 Irudia MMELS saiakuntza	34
3.1 Irudia Prepeg biribilkia	42
3.2 Irudia Erabilitako prepeg-ak.....	42
3.3 Irudia Teflon laminaren kokapena.....	44
3.4 Irudia Molde itxia prentsas.....	44
3.5 Irudia Prentsa Santec 30 t.....	45
3.6 Irudia Temperatura eta presio zikloa	46
3.7 Irudia (a) Diamantezko zerra (b) Leungailua	46
3.8 Irudia MTS saiakuntza makina elektromekanikoa.....	47

4.1 Irudia ENFR saiakuntzaren Deskribapena	52
4.2 Irudia Arrabola kanpoaldean kokatuta	53
4.3 Irudia Arrabola kanpoaldean kokatuta, pitzadura guneko indarrak eta momentuak	53
4.4 Irudia Indarrak pitzadura gabeko gunean	54
4.5 Irudia Indar unitarioa sistema estatiko determinatuan	56
4.6 Irudia Desplazamendu erlatiboa kalkulatzeko oinarritzko sistema.....	57
4.7 Irudia Karga-Desplazamendu grafika	58
4.8 Irudia Arrabola barnealdean kokatuta.....	61
4.9 Irudia Arrabola barnealdean kokatuta pitzadura guneko barne indar eta momentuak...	61
4.10 Irudia Arrabola barnealdean kokatuta, pitzadurarik gabeko gunean barne indar eta momentuak	62
4.11 Irudia Indar unitarioa sistema estatiko determinatuan, arrabola barnealdean dagoenean	63
4.12 Irudia Oinarritzko sistema, arrabola barnealdean dagoenean	64
4.13 Irudia Williams-en moduen deskonposaketa	69
4.14 Irudia Pitzadura puntan indarrak eta momentuak arrabola kanpoaldean dagoenean ..	70
4.15 Irudia Pitzadura puntan indarrak eta momentuak arrabola barnealdean dagoenean	71
4.16 Irudia Probetaren geometria	72
4.17 Irudia Arrabolaren erradioaren aldaketak duen eragina	74
4.18 Irudia Arrabolaren kokapenaren aldaketak duen eragina	75
4.19 Irudia Bi urratsen hedapen prozedura (TSEP)	76
4.20 Irudia Emaizta analitikoak eta numerikoak alderatzeko erabili den konfigurazioaren geometria.	77
5.1 Irudia Sistemaren zurruntasuna kalkulatzeko saiakuntza	80
5.2 Irudia Makurdura saiakuntzak. (a) 80 mm-ko argia, (b) 120 mm-ko argia.....	82
5.3 Irudia Argi errealak neurtzen	82
5.4 Irudia Aurrepitzaduraren hedapena II modu hutsean	85
5.5 Irudia Karga-desplazamendu hasierako baldintza esperimentalak.....	86
5.6 Irudia Konpliantza teorikoa eta esperimentalak modu mistoko saiakuntza batean	88
5.7 Irudia Saiakuntzaren konpliantza esperimentalak	89
5.8 Irudia ENF eta modu misto alderaketa pitzadura bisualki neurtzean	92
5.9 Irudia Modu misto saikuntzen R-kurbak	94
5.10 Irudia Ez linealtasun puntua karga-desplazamendu kurban	95
5.11 Irudia Energia askatze tasa totala pitzadura hedapenean zehar.....	96

5.12 Irudia Modu-ratioa pitzadura hedapenean zehar	97
5.13 Irudia Hedapenaren datuak modu-ratio ezberdinentzat.....	99
5.14 Irudia ENF saiakuntzak G_{IIc} kalkulatzeko.....	101
5.15 Irudia Hedapenaren datuak, modu-ratio normalizatuen arabera	102
5.16 Irudia Energia askatze tasa normalizatutak, balio kritikoen arabera.....	103
6.1 Irudia Pitzadura-hedapenaren egonkortasun teorikoa, karga kontrolatuaren menpe....	111
6.2 Irudia dG_{eq}/da karga kontrolatuaren menpe modu-ratioaren arabera.....	111
6.3 Irudia Pitzadura-hedapenaren egonkortasun teorikoa, desplazamendu kontrolatuaren menpe	113
6.4 Irudia dG_{eq}/da desplazamendu kontrolatuaren menpe modu-ratioaren arabera	113
6.5 Irudia Konpliantzaren errore erlatiboak pitzadura-luzeraren errore erlatiboan duen eragina	115
6.6 Irudia Pitzadura-luzeraren errore erlatiboaren eragina G_{eq} -ren errore erlatiboan.....	115
6.7 Irudia Konpliantza esperimentalaren errore erlatiboaren eragina G_{eq} -ren errore erlatiboan.....	116
6.8 Irudia K_{aG} K_{Ca} biderkaketaren balio absolutua G_{II}/G modu-ratioaren arabera	117
6.9 Irudia Modu-ratio normalizatuen batura pitzadura-hedapenean zehar	120
6.10 Irudia Energia askatze tasa baliokidearen balio esperimentalak.....	120
6.11 Irudia Karga-desplazamendu kurba esperimentalak.....	121
6.12 Irudia Pitzadura-luzera desplazamenduaren arabera.....	122
6.13 Irudia Egonkortasun baldintzaren ezarpen esperimentalak.....	123
6.14 Irudia Egonkortasun baldintza modu-ratioaren arabera.....	123

Taulen zerrenda

1.1 Taula. Zuntz errefortzudun konposite motak.....	3
1.2 Taula. Zuntzen abantailak eta desabantailak	4
3.1 Taula. Lan honetan erabilitako karbono zuntzaren propietate batzuk.....	40
3.2 Taula. Lan honetan erabilitako epoxi matrizearen propietate batzuk.....	40
3.3 Taula. Lan honetan erabilitako epoxi matrizearen propietate garrantzitsuenak.....	41
4.1 Taula. AS4/8552 materialaren ezaugarri mekanikoak.....	73
4.2 Taula. Kasu desberdinen baldintza kritikoak	77
4.3 Taula. Kasu desberdinen energia askatze tasak.....	78
5.1 Taula Argi errealak	82
5.2 Taula Probeten dimentsio errealak	83
5.3 Taula Erregresio lineala egiteko 4. probetaren datuak	83
5.4 Taula Moduluen emaitzak.....	84
5.5 Taula P_0 eta δ_0 neurtzen	87
5.6 Taula. Pitzadura luzeraren neurketen emaitzak, arrabolaren kokapena aldatuz.....	90
5.7 Taula. Pitzadura luzeraren neurketen emaitzak, arrabolaren erradioa aldatuz	91
5.8 Taula. Energia askatze tasa aztertze baldintza esperimentalen laburpena	94
5.9 Taula. G_{Ic} eta G_{IIc} kalkulatzeko erabilitako saiakuntzen laburpena	98
5.10 Taula. Doikuntza linealen emaitzak	100
6.1 Taula. F593/T 300 materialaren ezaugarri mekanikoak	110
6.2 Taula. Pitzadura-luzera hoberenak mm-tan.....	117
6.3 Taula. Baldintza esperimentalen laburpena	119
6.4 Taula. Hasierako modu-ratioen eta modu-ratio normalizatuen arteko erlazioa	119

LABURDURA ETA SINBOLOAK

a	Pitzadura luzera
c_i, c_o, c	Arrabolaren kokapena definitzen duen parametroa: pitzaduraren kanpoaldean, barnealdean eta euskarriaren gainean, hurrenez hurren
$b, 2h$	Probetaren zabalera eta lodiera, hurrenez hurren
C_{spec}, C_s, C_{exp}	Konpliantza: Probetarena, sistemarena eta esperimentalak, hurrenez hurren
k_s	Sistemaren zurruntasuna
δ_o, P_o	Hasierako desplazamendua eta karga, hurrenez hurren
δ	Indarraren aplikazio puntuaren desplazamendua
$\delta_{spec}, \delta_{exp}$	Indarraren aplikazio puntuaren desplazamendua: kalkulaturak eta esperimentalak, hurrenez hurren
E_f	Makurdura modulua
$G_{LT}, G_{LT'}$	in-plane shear modulus and out of plane shear modulus, hurrenez hurren
E_{11}, E_{22}, G_{12}	Luzetarako modulu elastikoa, zeharkako modulu elastikoa eta ebakidura modulua elastikoa.
G_I, G_{II}, G	Energi askatze tasa: I modua, II modua eta osoa, hurrenez hurren
G_{Ic}, G_{IIc}, G_c	Energi askatze tasa kritikoa: I modua, II modua eta osoa, hurrenez hurren
G_{eq}, G_{eqc}	Energi askatze tasa baliokidea eta energi askatze tasa kritiko baliokidea
K_{Ca}, K_{aG}	Errore koefizienteak: konpliantzaren neurketaren eragina pitzadura luzeran, eta pitzadura luzeraren eragina energia askatze tasan, hurrenez hurren.
L	Saiakuntzaren argi erdia
P	Aplikaturako karga
Y	Arrabolak egiten duen indarra
R	Arrabolaren erradioa
W, U, U^*	Kanpoko kargak egiten duten lana, deformazio energia eta deformazio energia osagarria, hurrenez hurren
ADCB	Habe landatu bikoitzeko saiakuntza ez simetrikoa
ASTM	Saikuntzen eta materialen elkarte amerikanoa
BTBR	Habeen teoria makurdura errotazioak kontuan hartuz

CBT	Zuzendutako habeen teoria
CLS	Ebakitzaile pitzaduradun saiakuntza
DCB	Habe landatu bikoitzeko saiakuntza
ELS	Bukaerako kargadun haustura saiakuntza
ENF	Hiru puntuko bukaerako pitzaduradun makurdura saiakuntza
ENFR	Bukaerako pitzaduradun makurdura arrabolarekin
FRP	Errefortzudun konposite polimerikoa
LEFM	Haustura elastiko linealaren mekanika
MMB	Modu mistoko makurdura saiakuntza
MMELS	Modu mistoko bukaerako kargadun haustura saiakuntza
TSEP	Bi urratsen hedapen prozedura
VCCT	Pitzadura birtualaren itxiera metodoa
WIF	Arrabola-txertatua duen saiakuntzan

1.

SARRERA

1.1 MATERIAL KONPOSITEAK

1.1.1 Orokortasunak

Orokorrean, material konpositeak bi fase edo gehiagoz osatutakoak dira. Ezaugarri mekanikoak garrantzitsuak direnean, material konposita bere ezaugarri mekaniko espezifikoak osagaiek banaka dituztenak baino hobekiak izan daitezten diseinatzen da. Materialaren fase bat ez-jarraia izan ohi da, zurrunagoa eta erresistenteagoa eta errefortzua deritza. Ahulagoa eta deformagarriagoa den faseari matrizea deritza. Batzutan, elkarrekintza kimikoak direla eta, edo fabrikazio efektuengatik, bi faseen arteko fasearte delakoa agertzen da. Material konposite baten ezaugarriek osagaien ezaugarriekin, beraien geometriarekin eta faseen antolamenduarekiko menpekotasuna dute. Errefortzuaren edo zuntzaren portzentaia parametro garrantzitsuenetariko bat da. Errefortzuaren banaketak material sistemaren homogeneotasuna edo uniformetasuna determinatzen du [1].

Zuntz errefortzuak mota askotakoak izan daitezke: beira, karbonoa, aramida, boroa, zuntz organikoak, e.a. Matrizeak 4 mota nagusitan sailka daitezke: polimerikoak, metalikoak, zeramikoak eta karbonoa. Matrize bat zuntz mota desberdinekin sendotzen denean, lortutako konpositari hibridoa deritza.

Material konpositeen faseak konposite motaren arabera eta aplikazioaren arabera diseinatzen dira. Baldintza mekanikoak zorrotzak ez direnean, zuntz laburrak edo partikulak erabiltzen dira. Hauek zurruntasuna handitzen dute eta errefortzuaren banaketaren arabera, erresistentziaren hobekuntza lokala eragiten dute. Ezaugarri espezifikoek garrantzia dutenean, materialak egituraren konpositeak izendatzen dira eta errefortzuaren

norabidean zurruntasun eta erresistentzia handia dute. Matrizeak, kanpoko karga zuntzei igortzeaz gain, zuntzak babestu, heldu eta zuntzen arteko tentsio transferentzia ahalbideratzen du. Fasearteak garrantzi handia izan dezake, haustura gainazalak, haustura zailtasuna eta orokorrean materialaren tentsio-deformazio jokaera kontrolatuz [2].

Materialak alderatzen direnean, pisu unitateko ezaugarriak erabiltzen dira, espezifikoak deritzonak. Egitura konpositeen kasuan, gerta daiteke, ezaugarri mekanikoak ingeniartzan erabili ohi diren materialen, esate baterako altzairuaren ezaugarriak baino txarragoak izatea, ezaugarri espezifikoak hobek direlarik. Egitura konpositeak ohiko materialak baino garestiagoak direnez pisua garrantzi handia duen kasuetan erabiltzen dira [3].

1.1.2 Konposite motak eta sailkapena

Bi faseko konpositeak hiru talde nagusitan bana daitezke, errefortzudun fasearen mota, geometria eta orientazioaren arabera:

- Partikula errefortzudunak: konposite hauek ia homogenoak eta ia isotropoak kontsidera daitezke makroeskala batean.
- Zuntz labur errefortzudunak: zuntz hauek ausazko eran orientatuz, propietate antzekoak lortzen dira konpositearen norabide guztietan.
- Zuntz luze errefortzudunak: Erresistentzia eta zurruntasunari dagokienez, egokienak dira. Zuntz guztiak paraleloak izan daitezke norabide bakarreko konpositea sortuz, edo angelu jakin batzutan orientatu daitezke, norabide anitzeko konpositea sortuz. Zuntzen norabideen arabekoak izango dira material erresultantearen propietateak.

Zuntz errefortzudun konpositeak erabilitako matrizearen arabera, lau talde nagusitan sailka daitezke, 1.1 Taulan ikus daitekeen moduan [4].

1.1 Taula. Zuntz errefortzudun konposite motak

Matrize izendapena	Zuntza	Matrize mota
Polimeroa	E-beira	Epoxy
	S-beira	Fenolikoa
	Karbonoa (grafittoa)	Polimidea
	Aramida (kevlar)	Bismaleimidea
	Boroa	Poliester Termoplastikoa (PEEK, e.a.)
Metala	Boroa	Aluminioa
	Borsika	Magnesioa
	Karbonoa (grafittoa)	Titanioa
	Siliziozko karburoa	Kobrea
	Aluminioa	
Zeramikoa	Silikonazko karbidea	Siliziozko karburoa
	Aluminioa	Alumina
	Siliziozko nitridoa	Beira-zeramika
		Siliziozko nitridoa
Karbonoa	Karbono	Karbono

1.1.3 Material konpositeen ezaugarriak

Zuntzek erresistentzia eta zurruntasuna igortzen dizkiote konpositari eta nekearen aurkako erresistentzia ere hobetzen dute. Matrizeak zuntzak elkartuta mantentzen ditu, kargak zuntz batetik bestera pasatuz. Horretaz gain, matrizeak urradura mekanikoaren eta ingurumenarekin kontaktuagatik sortzen den degradazio kimikoaren aurrean babesten ditu zuntzak. Matrizea eta zuntzen arteko lotura ahula bada, zeharkako norabidetan ezaugarrien galera gertatzen da. Ingurunearen eragina, tenperatura eta hezatasun aldaketek ere matrizeari kalte egin diezaiokete, matrizea eta zuntzen arteko lotura ahulduz [5].

Matrize polimerikoak bi motakoak izan daitezke: termoegonkorrak eta termoplastikoak. Berotzean urtu edo biguntzen direnak termoplastikoak dira. Hauen adibide batzuk dentsitate baxu eta altuko polietilenoak, poliestirenoa eta PMMA. Termoegonkorrak beroa, argia, agente fotokimiko eta agente kimikoen eraginez atzeraezinezko aldaketak jasaten dituzte. Molekulen konfigurazioa dela eta berotzean polimeroa gogorragoa eta zurrunagoa bihurtzen da. Matrize hauen abantaila nagusiak, dituzten zurruntasun eta erresistentzia altuagoaz gain tenperaturarekin tarte zabal batean portaera aldaketarik ez izatea da. Honez

gain, ondu aurretik duten biskositate baxuak zuntz luzez errefortzatutako laminatuak fabrikatzea errezten du.

Matrize polimerikoa duten konpositeak, (*Polymer matrix composites*, PMC), egitura materialtzat har daitezke, erredimendu handiko zuntzen bidez indartzerakoan, beraien ezaugarri mekaniko espezifikoak ohiko materialak baino hobekak baitira. Konposite mota hauen artean erabilera zabalagoa dutenak, beira zuntzen bidez indartutakoak dira. Egiturazko konpositeen artean garrantzitsuena, batez ere hegazkigintzan, karbono zuntzez indartutako polimerikoak dira [3].

Lan honetan soilik zuntz luzeak erabili dira. Egitura-mailan zuntzen orientazioa garrantzitsua da. Zuntz errefortzudun polimeroen ezaugarri mekanikoak luzetarako norabidean zeharkako norabidean baino hobekak dira. Konpositeak era hobean lan egin dezan, zuntzak kanpoko kargaren norabidean orientatuta egotea komeni da. Zuntz mota asko erabil daitezke errefortzu bezala. Bilatzen diren ezaugarriak erresistentzia altua, zurruntasun handia eta dentsitate erlatibo baxua dira. Matrize polimerikoetan gehien erabiltzen diren zuntzak hiru motatakoak dira: Beira-zuntzak, karbono-zuntzak eta zuntza sintetikoak, Kevlar edo Aramid bezalakoak.

1.2 Taulan errefortzu bezala erabiltzen diren zuntz batzuen abantailak eta desabantailak laburbiltzen dira [4].

1.2 Taula. Zuntzen abantailak eta desabantailak

Zuntza	Abantailak	Desabantailak
Beira	Erresistentzia handia Kostu baxua	Zurruntasun baxua Nekearen aurrean bizitza laburra Tenperatura altuekiko sentikortasuna
Aramid (Kevlar)	Trakzio-erresistentzia handia Dentsitate baxua	Konpresio-erresistentzi baxua Hezetasun xurgaketa handia
Karbono (AS4, T300, IM7)	Erresistentzia handia Zurruntasun handia	Kostu ez oso handia
Grafito (GY-70, pitch)	Zurruntasun oso handia	Erresistentzia ertaina Kostu altua

Konpositeen fabrikazioari dagokionean, prepregak oinarri bezala erabili ohi dira. Prepreg bat erretxina batez bustita, ehun forman edo norabide bakarrean kokatutako zuntzez osatuta dago. Prepregak hotzean biltegitratzen dira erretxinaren polimerizazioa berandutzeko.

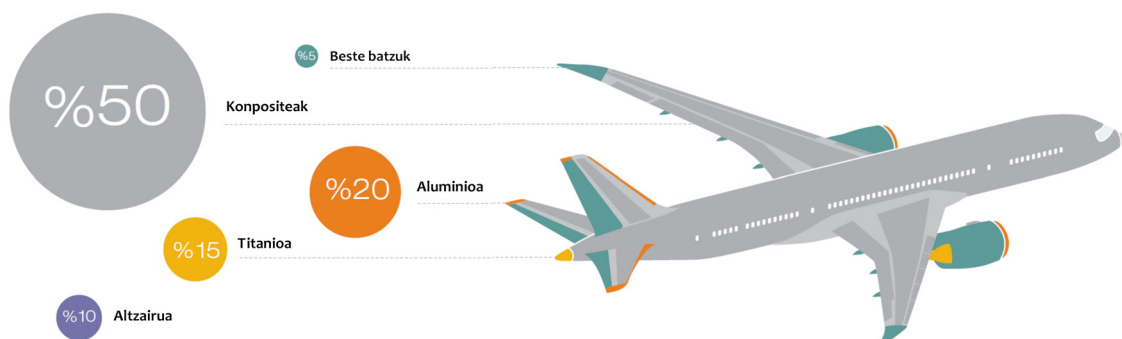
Material mota honetan zuntz/erretxina portzentaia oso kontrolatuta dago eta oso altua da. Bestalde, materiala dagoeneko erretxina izateak, in situ impregnatzearen beharra ekiditen du eta horrek laminazioaren prozesua erreztan du. Desabantailarik nagusia hotzean biltegitratze eta garraiatzea da, horrek prozesuaren prezioa igotzen baitu. Autoklabea erabiltzen da fibra bolumen handiko egiturazko konponenteak fabrikatzeko. Autoklabea beroa eta presioa era kontrolatuan aplikatzeko diseinatua dagoen ganbara itxia da [6].

1.1.4 Erabilera

Egun, konpositeen erabilera ugari dago eta hazten jarraitzen du. Konpositeak, besteak beste, industri aeroespazialean, hegazkinetan, automobilgintzan, itsasuntzietan, energia arloan, azpiegiturretan, biomedikuntzan, eta kirol aplikazioetan erabiltzen dira.

Egitura aeroespazialei dagokionez, antena espazialak eta tresneria optikoetan pisu arina eta oso zurrunka diren grafito konpositeaz baliatzen dira [1].

Konpositeen zurruntasun eta erresistentzia handiek hegazkinen lehen eta bigarren mailako egituretan erabiltzeko material aproposak egiten ditu. Esate baterako, 1.1 Irudian ikus daitekeen moduan, Boeing 787 “Dreamliner” hegazkinen % 50-a material konpositea da [7]



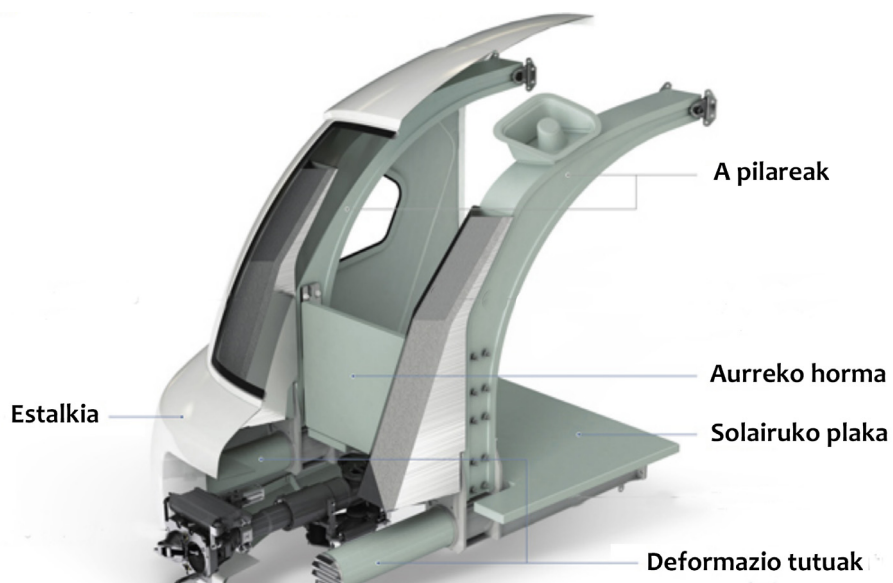
1.1 Irudia Boeing 787 Dreamliner hegazkinean erabilitako materialak [7]

Airbus A380 hegazkinean, egun fabrikatutako hegazkin handienean, konposite portzentai altua erabiltzen da. Egituraren %25-a konpositez eginda dago, %22-a karbono zuntz errefortzudun plastikoaz eta %3-a GLARE-z delakoa, beira/epoxy/aluminio konposite hibrido. Material hibrido honek konpositeen eta metalen abantailak bateratzen ditu. Airbus A350 XWB hegazkinean % 50 baino gehiago konpositez eginda dago, Airbus-en kasuan, lehenengo aldiz metalaren portzentaia konpositearena baino baxuagoa delarik [8].



1.2 Irudia Airbus A350 XWB hegazkinaren egituraren atal bat [8]

Garraio industrian ere konpositeak geroz eta gehiago erabiltzen dira. Ibilgailuen atalak edota trenbidetan. 1.3 Irudian ikus daitekeenez, hiriarteko trenbide garraiorako diseinatutako Galea ibilgailuaren burua gehinbat konpositez fabrikatuta dago, altzairuz egindakoekin konparatuz, askoz arinagoa delarik [9].



1.3 Irudia Beira zuntz errefortzudun plastikoz egindako Galea trenaren buruko atalak [9]

Haize-energia energia berriztagarrien baliabide garrantzitsu bat da. Aerosorgailuen palek gainazal sostengatzaile baten forma dute, hegazkin baten hegalararen antzekoa. Gainazal horren materialak gogorra, zurruna eta arina izan behar du. Baldintza horiek betetzeko, zuntz errofortzudun konposite polimerikoak egokienak dira. 1990urtetik aurrera, aerosorgailuen palen fabrikazioan zuntz errofortzudun konpositeen erabilera handituz doa. Gehien erabiltzen diren erretxin matrizeak bisfenol-A epoxia, poliester eta binilesterrak dira. Zuntzei dagokienez, erabilienak beira zuntzak dira. Beira zuntzez indartutako konpositeak karbono zuntzez indartutakoak baino merkeagoak dira. Hala ere, pala luzeak, beira eta karbono zuntzez fabrikatzen dira, masa txikiagotzeko. [10]. 1.4 Irudian Danimarkako aerosorgailu handiak saiatzeko zentru nazionalan aerosorgailu handi batean pala luzeen muntaia ikus daiteke [11].



1.4 Irudia Pala handien muntaia. Østerild, Danimarka [11].

Biomedikuntzari dagokionez, giza gorputzean inplanteak egiteko konposite polimerikoak bereziki erakargarriak dira, behar diren propietateak lortzeko fabrikatzeko prozesuak egokitu daitezkelako. Bestalde, biomaterial hauen desabantaila, epe luzeko iraunkortasuna eta fidagarritasuna konprobatu beharrekoak direla da [12].

Lan honetan erabili den materiala, matrize epoxidikoan oinarritutako karbono zuntz luzez errofortzatutako material konpositea da. Hexcel Composites enpresak ekoizten ditu eta nagusiki hegazkingintzan erabiltzen da.

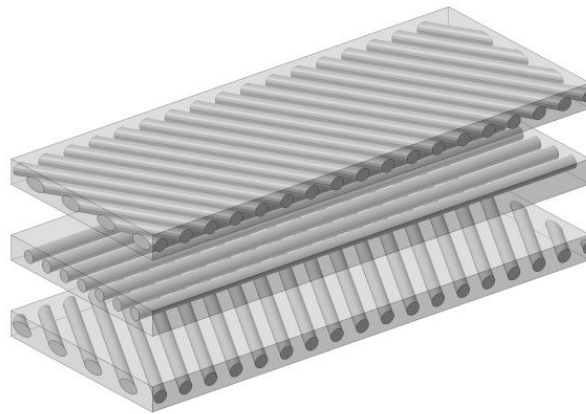
1.2 LAMINATUAK

Laminatu konpositeak beraien artean itsatsita dauden laminaz osatuta daude. Lamina bat matrize batean barneratuta dauden norabide bakarrean kokatutako zuntzez, edo ehun bat osatuz dauden zuntzez osatuta dago. Lamina baten ezaugarriak lodieran zehar ez direla aldatzen onartzen da. Lamina norabide bakarreko zuntzez osatuta badago norabide bakarreko lamina deitzen da. Orientazio bera duten norabide bakarreko lamina batzuk geruza bat osatzen dute. Laminatu konpositea pilaketa sekuentzia bat jarraituz lotzen diren bi lamina edo gehiagoz osatuta dago. Laminak material desberdinekoak badira, sortzen den konpositari hibridoa deritzo.

Matrize polimeriko termoeگونkorren kasuan, lamina hasieran malgua da, polimeroak erreakzionatu gabe daudelako. Beroketa prozesu baten ostean, polimeroaren biskositatea gutxiagotzen da eta erreakzio kimikoak gertatzen hasten dira, zuntzari lotua dagoen hiru dimentsiotako sarea sortuz. Laminatuaren fabrikazio prozesua presio eta temperatura aplikatzean datza. Presioaren bidez laminatuaren trinkotzea lortzen da eta tenperaturaren bidez matrizearen polimerizazioa gertatzen da.

Laminen pilaketaren ordena eta orientazioaren arabera, laminatuaren propietate mekaniko desberdinak lor daitezke. Plaka laminatuen teoriaren arabera, lamina bakoitzaren ezaugarriak ezagutuz, laminatuaren jokaera zehaztu daiteke. Beraz, material jakin bateko laminak izanda, laminatuaren propietateak defini daitezke, zuntz gehiago jarriz, solizitazio mekaniko handiagoa duen norabidean. Dena den, lamina bakoitzaren propietateek bukaerako laminatuaren propietateak mugatzen dituztenez lamina bakoitzaren ezaugarriak ezagutzea oinarritzkoa da. Laminak jasaten dituen kargak zuntzaren norabidean daudenean, luzetarako kargak izendatzen dira. Kargak elkartutak direnean, zeharkakoak, eta kargak eta zuntzen arteko angelua 0° edo 90° ez denean, kargak zehiarrak dira [2].

Laminatua izendatzeko, geruzen kopurua, mota, orientazioa eta pilaketa sekuentzia adierazten dira, 1.5 Irudian azaltzen den moduan. Materiala hibridoa bada, geruza bakoitzaren materiala zein den ere zehaztu behar da. Lan honetan erabiliko den laminatuaren izendapena $[0]_{16}$ da. Norabide bakarreko 16 geruzez osatua dagoela adierazteko.



1.5 Irudia Laminatu baten pilaketa sekuentziaren izendapena: +60°/0°/-60°

1.3 LAMINARTEKO HAUSTURA

Bigarren mundu gerra baino lehen, egiturak kalkulatzeko habeen teoria erabiltzen zen, materialaren trakzio erresistentzia parametro mugatzaile bakarra kontuan hartuz. Trakzio erresistentzia laborategietan neur zitezkeen eta material ezberdinen datuak liburuetan aurki zitezkeen. Hala ere, egituretan ustekabeko akatsak agertu ziren, batez ere zuloetan eta ertzetan agertzen ziren tentsio bilguneen ondorioz. Akats hauek hausturaren mekanikaren sorrera eragin zuten. Hausturaren mekanikak, akats edo pitzadura mikroskopikoen aurrean, haustura erresistentzia txikiagotzen dela agerian jartzen du [13].

Pitzadurak edo akatsak dituen egitura batek jasan dezakeen karga maximoa kalkulatzeko, edota pitzadura bat bere luzera kritikoa noiz heltzen den aurreikusteko hausturaren mekanika aplika daiteke. Aztertutako pitzaduradun egiturean, pitzadura puntaren inguruan ematen den deformazio inelastikoa txikia bada, Hausturaren Mekanika Elastiko Linealaren kontzeptuak erabiliko dira.

Zuntz errefortzudun konposite materialetan, zuntz errefortzuak laminatuaren planoan hobetzen ditu propietateak baina ez berarekiko elkartuta den planoan. Beraz laminartean pitzadura bat egonez gero, erraz heda daiteke matrizetik edota matrize-zuntz aldeartetik. Pitzadura hauen hedapenak propietate mekanikoen galtze garrantzitsua dakar, gaur egun zuntz errefortzudun konposite materialek egituretan erabiliak izateko duten eragozpen nagusia izanik.

1.4 TESIAREN HELBURUAK

Material konpositeetan modu hutsetan laminarteko haustura maizago gertatzen da. I/II modu mistoa da maizago ematen dena, modu horrek indar egoerak errealitateko egoera hobeki azaltzen du.

Tesi honen helburua material konpositeen I/II modu mistoko laminarteko haustura analizatzea da. Horretarako hiru puntuko makurduran oinarritutako saiakuntza konfigurazio berri bat proposatu nahi da. Konfigurazio horren modelo analitikoa garatu nahi da, barne indarra, desplazamenduak eta saiakuntzaren konpliantza kalkulatu. Gainera, energia askatze tasaren determinazioa, deformazio energia osagarriaren arabera kalkulatu da.

Energia askatze tasa eta moduen deskonposaketaren konprobazio numerikoa egin nahi da, horretarako elementu finitoen bidezko, bi urratsen hedapen prozedura aplikatu.

Behin azterketa analitikoa eta zenbakizkoa burututa, Hexcel Composites-ek igorritako prepregekin konpresioz fabrikatu eta ondoren mekanizatutako probetekin, azterketa esperimentalak burutuko da. Pitzadura-luzera determinatzeko, konpliantza esperimentalaren aldakuntzan oinarritutako prozedura balioztatu nahi da. Modu ratio desberdineko saiakuntzak burutu nahi dira, energia askatze tasaren balio esperimentalak lortu ahal izateko. I/II modu mistoaren haustura analizatzeko asmoz, haustura irizpide egokia bilatu nahi da. Pitzadura-hedapenaren egonkortasuna ere aztertuko da.

2.

LAMINARTEKO HAUSTURA KONPOSITETAN: BERRIKUSPEN BIBLIOGRAFIKOA

2.1 SARRERA

Azken urteetan material konpositeen eskaria handitu da. Erresistentzia eta zurruntasun espezifiko altuek pisua aldagai kritikoa den egiturentzat aproposak bihurtu dituzte. Ondorioz, hutsegite mekanismoen ezagutza beharrezkoa da, konposite egitura egokiak diseinatu eta ohiko materialen aurrean dituzten mugak ezagutu ahal izateko.

Material konpositeetan ematen diren hutsegite mekanismoak materiala aztertzen deneko eskalaren arabera sailka daitezke [14]:

- **Eskala mikroskopikoan** gertatzen diren hutsegiteak:

- Zuntzei dagokienez: trakziopean eta gilbordurapean apurketa; konpresiopean bihurdua.
- Matrizeari dagokienez: zeharkako apurketa, luzetarako apurketa eta geruzen arteko pitzadura angeluarraren ondorioz hutsegitea, (*angle-ply cracking*). Matrizearen degradazioaren ondorioz hutsegitea. Degradazio hau inguruneke erradiazioaren xurgaketa, tenperatura edo hezetasunaren ondorio izan daitez.
- Zuntza/matrizearen fasearteari dagokienez: zuntz-matrize labainketa (*debonding*).

- **Eskala makroskopikoan** material konpositea osatzen duten laminak ia homogeneousak kontsideratzen dira. Hutsegite mekanismo nagusiak laminarteko pitzaduraren sorrera eta hedapena dira. Materialaren laminarteko banaketa material konpositeen hutsegite nagusienetariko bat da. Mekanismo honi deslaminazioa deritzo.

Hausturaren mekanikak gorputzetan barneratuta dauden pitzaduren hazkundera aztertzen du bi hurbilpen nagusi erabiliz:

- **Energia irizpidea:** Pitzaduraren hedapenean askatutako energia neurtuz. Irizpide honen arabera, haustura emateko pitzaduraren hedapenerako erabilgarria den energiak materialaren erresistentzia gainditu behar du.
- **Tentsio intentsitate irizpidea:** Pitzaduraren puntan dauden tentsio egoera aztertu ondoren tentsio intentsitate faktorea determinatuz. Irizpide honen arabera, tentsio-intentsitate faktorea pitzaduraren hedapena zehazten duena da.

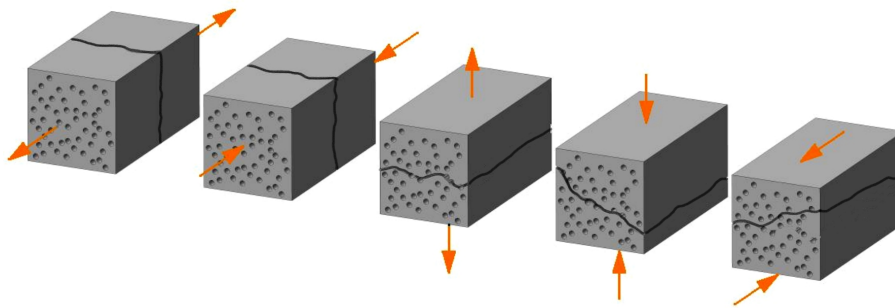
2.2 DESLAMINAZIOA EDO LAMINARTEKO HAUSTURA

Deslaminazioa edo laminen arteko bereizketa, erretxina altuko eskualdeetan gertatzen ohi da, eta matrizearen laminarteko pitzadura bezala defini daiteke. Akats mota hau, fabrikazio akatsa izan daiteke, edo objektu batekin talka baten ondorioz sortutakoa, edota egituraren ez-jarraitasun batean agertutako laminarteko tentsio batengatik, esate baterako: zuloak, lodieraren bapateko murrizketa bat, itsatsitako loturak [15].

Zuntz errefortzudun konpositeetan, zuntz errefortzuak laminatuaren planoan hobetzen ditu propietateak baina ez berarekiko elkartuta den planoan. Hortaz, laminartean pitzadura bat egonez gero, erraz heda daiteke matritzetik edota matrize-zuntz aldeartetik. Zuntz errefortzudun konposite materialek egituretan erabiliak izateko duten eragozpen nagusia laminarteko hausturarekiko duten tolerantzia urria da.

Egitura material gehienetan, hutsegite prozesu fisiko nagusi bakarra ohi dago. Zuntz errefortzudun material polimerikoetan, (*Fiber Reinforced Polymers*, FRP) materialen kasuan berriz, hutsegite mekanismo fisiko desberdinek eragina dute, guztien artean nagusia aplikatutako kargetikiko menpekotasuna duelarik, 2.1 Irudian ikus daitekeen moduan. Zuntzekiko paraleloak diren trakziozko tentsioengatik sortzen den haustura, zuntzen trakzio mugak kontrolatzen du. Zuntzetan zehar dauden konpresio tentsioek haustura eragiten dute, zuntzak konpresioz makurtzen direlako. Mekanismo honek zuntzen

orientazioarekin eta matrizearen ebakidura-erresistentziarekiko menpekotasuna du. Zuntzekiko elkartuta den trakzio tentsioengatik sortutako haustura harikorra da, eta matrize polimerikoaren hausturarekin eta zuntz-matrize faseartean hausturarekiko menpekotasuna du. Zuntzekiko elkartuta den konpresio tentsioak berriz, deformazio handiak sortzen ditu, matrizea konpresiopean edo ebakiduraren menpe dagoenean duen erantzun ez-lineala dela eta [16]. Gainera, laminatu konpositeak lamina desberdinen pilaketaren bidez fabrikatzen dira, zuntz orientazio desberdinekin. Mikromekanismo guzti hauek laminatu berean ager daitezke, karga mota bakar baten menpe, zuntzen orientazioa alda daitekelako lamina bakoitzean.



2.1 Irudia Hutsegite mikromekanismo desberdinak karga egoeraren arabera

Deslaminazioaren hazkundera elementuaren erresistentzia eta zurruntasunaren murriztapen nabarmena sortzen du, eta horrek egituraren kolapsoa eta hutsegite katastrofikoak eragin dezake. Gainera, ikusapenean antzematea zaila da. Beraz, laminarteko hausturaren portaera ezagutzeko derrigorrezkoa da material konpositeak lehen mailako egituretan erabili ahal izateko.

2.3 HAUSTURA ELASTIKO LINEALAREN MEKANIKA

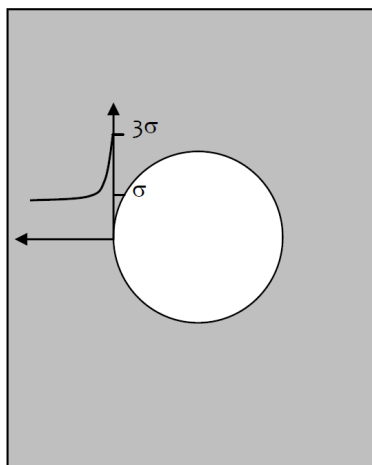
2.3.1 Tentsio kontzentrazioak, Inglis-en ekarpena.

Hausturaren mekanikak, materialetan agertzen diren akats edo imperfekzioen eraginpean gertatzen den apurketa aztertzen du. Akats horietatik abiatuta eta kanpoko kargen ondorioz pitzadurak ager daitezke. Hausturaren mekanikak, pitzadura bat daukan elementu batean haustura gertatzeko behar den tentsioa iragartzea edo esfortzu jakin baten eraginpean dagoen elementuaren haustura ez gertatzeko akatsaren tamaina kritikoa kalkulatzeko ahalbidetzen du [13].

Hausturaren mekanikaren garapena 1913an, Inglis-en lanarekin hasi zen [17]. Inglis-en arabera, tentsiopean dagoen plaka baten zulo edo ertz baten inguruan agertzen diren tentsio lokalak, plakan aplikatutako tentsioaren batzbestekoa baino hainbat aldiz handiagoak dira. Ertz zorrotzen bat, koskaren bat, edo pitzaduraren baten agerpenak aplikatutako tentsioak puntu hauetan kontzentratzea eragiten du. Inglis-ek Elastikotasunaren teoria erabiliz, tentsiopean dagoen plaka baten zuloaren ertzan tentsioaren handiagotze mailak, zuloaren kurbaduraren erradioarekiko menpekotasuna zuela erakutsi zuen. Zenbat eta kurbadura-erradio txikiagoa, orduan eta tentsio bilgune handiagoa. Inglis-en arabera, zulo eliptiko baten kasurako tentsio kontzentrazio faktorea honakoa da:

$$k = 1 + 2\sqrt{\frac{c}{\rho}} \quad (2.1)$$

Non c , zuloaren erradioa den eta ρ zuloaren puntaren kurbadura erradioa. Oso estua den zuloaren kasurako, k 1 baino askoz handiago izan daiteke. Zulo zirkular batentzat, (2.1) ekuazioaren emaitza $k=3$ da, 2.2 Irudian ikus daitekeen moduan.



2.2 Irudia Tentsio kontzentrazioa zulo zirkular batean

2.3.2 Energia irizpidea, Griffith-en ekarpena.

1920an Griffith-ek karga aldakorren menpe zeuden makinaren ataletan urradurek eta gainazal-akaberek erresistentzian zuten eragina aztertu zuen. (2.1) ekuazioaren arabera $\rho=0$ bada, infinitu zorrotza den zuloaren kasurako, tentsio infinitua egongo da. Ez dago tentsio infinitua jasan dezakeen materialik. Beraz, Inglis-en teoriaren arabera, oso zorrotza den pitzadura bat agertzen bada, materialak hutsegingo du. Hori argitu nahian, Griffith-ek

[18] energia potentzial minimoaren ikuspuntutik hausturaren azterketa teorikoa burutu zuen. Bere esanetan, pitzadura baten eraketan gertatzen den energia elastikoaren murriztapenak, pitzadura gainazal berriak sortzeko beharrezkoa den gainazal energiaren berdina izan behar du. Pitzadura hedatzeko bi baldintzak beharrezkoak dira:

- Pitzaduraren puntako loturak hutsegin arte tentsionatu behar dira. Pitzaduraren puntako tentsioak tentsio kontzentrazio faktoreariko menpekotasuna du, faktore hau kurbadura erradioa eta luzeraren arteko erlazioaren arabera delarik.
- Pitzadura hedapenaren hazkunde batentzat, askatutako energia elastikoak pitzaduraren bi gainazal berriak sortzeko behar den gainazal energia baino handiagoa edo berdina izan behar du.

Bigarren baldintza, matematikoki hurrengo eran adieraz daiteke:

$$\frac{dU_s}{da} \geq \frac{dU_\gamma}{da} \quad (2.2)$$

Non U_s energia elastikoa den, U_γ gainazal energia eta da pitzadura gehikuntza. Griffith-en arabera, σ tentsio uniformearen menpe dagoen lodiera unitateko plaka infinitu batean, $2a$ luzerako pitzadura sartzean askatutako energia elastikoa eta luzera duten bi gainazal berriak sortzeko gainazal energia honakoak dira hurrenez hurren:

$$U_s = \frac{\pi\sigma^2 a^2}{E} \quad (2.3)$$

$2a$ honakoa da:

$$U_\gamma = 4\gamma_s a \quad (2.4)$$

Non γ_s solidoaren gainazal-hausturaren energia den. (2.3) eta (2.4) ekuazioen a -rekiko deribatua eginez, energia askatze tasa (J/m) kalkula daiteke. Pitzaduraren hedapena gertatzeko baldintza kritikoa ondo jarri:

$$\frac{\pi\sigma^2 a}{E} \geq 2\gamma_s \quad (2.5)$$

(2.5) ekuazioaren arabera energia askatze tasa pitzadura gehikuntzarekiko funtzio lineala da eta gainditu behar den gainazal energia tasa konstante bat da. (2.5) ekuazioa Griffith-en energia irizpidearen adierazpena da, haustura tentsioaren arabera adieraziz:

$$\sigma = \left(\frac{2E\gamma_s}{\pi a} \right)^{1/2} \quad (2.6)$$

2.3.3 Irwin-en eta Orowan-en aldaketak. Energia irizpidea edozein materialentzat

Griffith-ek proposatutako (2.6) ekuazioko haustura tentsioa material hauskorrentzat soilik baliogarria da, metalen kasuan adibidez, haustura tentsioa askoz handiago da. Irwin-ek [19] eta Orowan-ek [20] bakoitzak bere aldetik, fluxu plastikoa duten materialentzat tentsioaren adierazpena aldatu zuten, honako eran adieraziz:

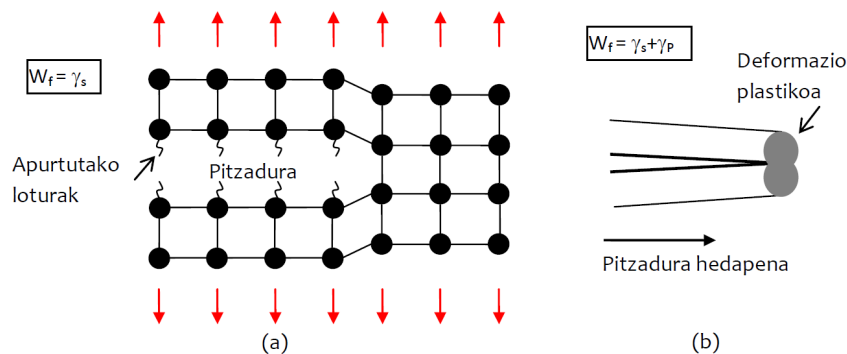
$$\sigma = \left(\frac{2E(\gamma_s + \gamma_p)}{\pi a} \right)^{1/2} \quad (2.7)$$

Non γ_p sortutako gainazalaren azalera unitateko lan plastikoa den eta γ_s baino askoz handiago izan ohi da. Material hauskorren kasuan, pitzadura sor daiteke soilik lotura atomikoen apurketagatik eta γ_s gaiak, azalera unitateko apurtutako loturen energia osoa adierazten du. Metal batean zehar pitzadura bat hedatzean berriz, pitzaduraren puntaren inguruan, dislokazio mugimendu bat gertatzen da, energi gehigarriaren disipazioa gertatzen delarik.

Guzti hori kontutan hartuz, Griffith-en eredua edozein materialarentzat orokortu daiteke hurrengo eran adieraziz:

$$\sigma = \left(\frac{2Ew_f}{\pi a} \right)^{1/2} \quad (2.8)$$

Non w_f eragin plastikoak, biskoelastikoak edo biskoplastikok barneratzen dituen haustura energia den. 2.3 Irudian pitzadura-hedapenaren eskema irudikatzen bi haustura mota desberdinetan.



2.3 Irudia Pitzadura hedapenaren eskema (a) Idealki hauskorra (b) Ia hauskorra

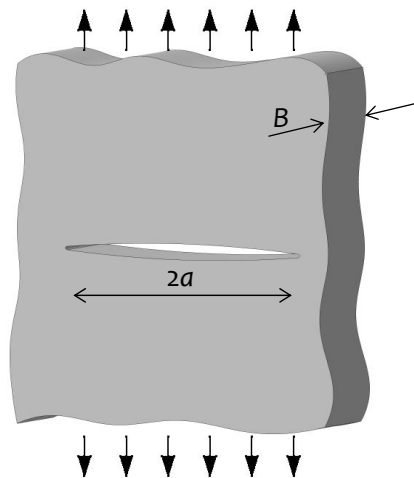
Azaldu den moduan, material hauskorak ezik, pitzaduradun gorputz batean edozein karga aplikazioak, pitzadura-puntaren inguruan deformazio inelastiko bat sortuko du, bertan agertzen diren tentsio kontzentrazioak direla eta. Ondorioz, analisi elastikoaren erabilgarritasuna pitzaduradun gorputz erreale baten kasurako, inelastikoki deformatu den eremuaren tamainarekiko menpekoa da. Eremu horrek txikia izan behar du, pitzaduraren tamainarekin konparatuz. Baldintza hau betetzen duen deformazio inelastikoari eskala txikiko muga (*small scale yielding*) deritzo. Kasu horietan haustura elastiko linealaren mekanika, (*linear elastic fracture mechanics*, LEFM) aplikatu daitezke [21].

2.3.4 Energia askatze tasa

1956-ean Irwin-ek [22], Griffith-en energia irizpidean oinarrituta, ingeniariaritzaren arazoak era egokiago batean ebazteko, energia askatze tasaren kontzeptua proposatu zuen. Irwin-en arabera, energia askatze tasa, pitzadura hazkunde bat gertatzeko eskuragarri dagoen energia bezala da, bere adierazpena honakoa delarik:

$$G = -\frac{d\Pi}{dA} = -\frac{1}{B} \frac{d\Pi}{da} \quad (2.9)$$

Non Π energia potentziala den, B kontsideratzen ari den plakaren lodiera, $2a$ pitzaduraren luzera, eta A pitzaduraren azalera, kasu honetan $2aB$, 2.4 Irudian ikus daitezkeen moduan. Kasu honetan, tasa hitzak ez du denborarekiko aldakuntzarekin zerikusirik, pitzadura azalera unitateko potentzial baten aldaketarekin baizik. Energia askatze tasari, potentzial baten deribatua denez, pitzadura indar bultzagilea ere deitzen zaio.



2.4 Irudia Pitzadura trakziozko tentsiopean dagoen plaka infinitu batean

Griffith-en energia irizpidearen arabera, 2.4 Irudian agertzen den plakaren kasurako, energia askatze tasa honako eran adieraz daiteke:

$$G = \frac{\pi\sigma^2 a}{E} \quad (2.10)$$

Pitzaduraren hedapena gertatzeko, (2.5) ekuazioko baldintzaren arabera eta (2.8)ekuazioko edozein materialarentzat orokortasuna kontutan hartuz, G -k balio kritiko bat berdindu edo gainditu behar du:

$$G_c = 2W_f \quad (2.11)$$

Non G_c balio kritiko hori den, materialaren ezaugarria den **haustura zailtasuna** hain zuzen ere. Beraz, pitzadura hedapena gertatzeko baldintza kritikoa hurrengo eran adieraz daiteke:

$$G \geq G_c \quad (2.12)$$

Baldintza kritiko horrek haustura prozesuaren hiru alderdi garrantzitsuren arteko erlazioa deskribatzen du: alde batetik materiala haustura zailtasunaren bidez, beste alde batetik, jasandako tentsioa σ -ren bidez, eta azkenik pitzaduraren tamaina a -ren bidez. Egitura baten diseinu prozesuan, antzeman daitekeen pitzadura minimoa zehaztu ondoren, eta material jakin batentzat, G_c ezaguna den kasurako, σ tentsio onargarria zehaztu daiteke [21].

Gorputz elastiko lineala kontsideratuz, aplikatutako **karga konstante mantentzen denean**, 2.5 Irudia, gorputzaren energia potentziala honakoa da:

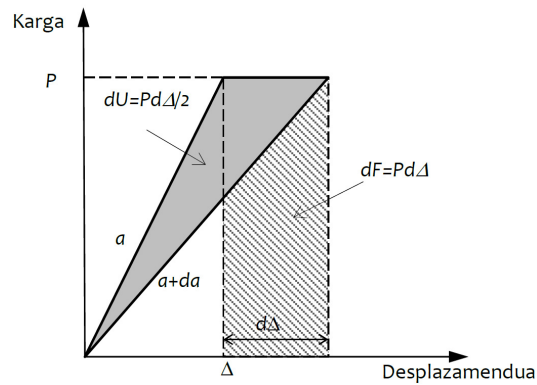
$$\Pi = U - F = U - P\Delta = -U^* \quad (2.13)$$

Non F kanpoko indarrek egiten duten lana den, U eta U^* deformazio energia eta deformazio energia osagarria diren hurrenez hurren. Clapeyron-en teoremaren arabera $U=P\Delta/2$, orduan (2.13) ekuaziotik:

$$\Pi = -\frac{P\Delta}{2} = -U = U^* \quad (2.14)$$

(2.14) ekuazioaren adierazpena G -ren (2.9) ekuazioan ordezkatuz:

$$G = \frac{1}{B} \left(\frac{\partial U^*}{\partial a} \right)_{P=kte} = \frac{P}{2B} \left(\frac{\partial \Delta}{\partial a} \right)_{P=kte} \quad (2.15)$$



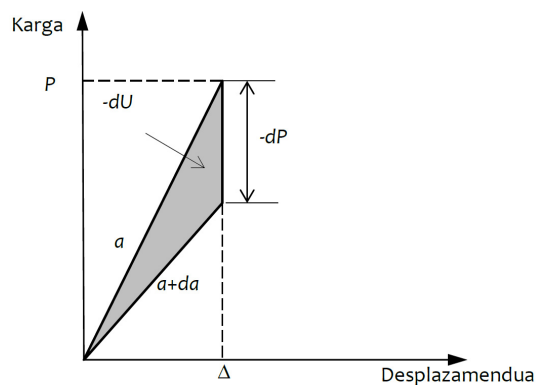
2.5 Irudia Pitzadura hedapena karga konstantepean dagoen plaka batean

Indarraren aplikazio-puntuaren desplazamendua Δ finkoa bada, **desplazamendua konstante mantentzen bada** alegia, 2.6 Irudia, $F=0$ izango da, indarrak ez duelako lanik egingo eta energia potentziala honakoa da:

$$\Pi = U = \frac{P\Delta}{2} \quad (2.16)$$

(2.16) ekuazioa, G-ren (2.9) ekuazioan ordezkatzuz, energia askatze tasa desplazamendu kontrolaren kasurako honakoa da:

$$G = -\frac{1}{B} \left(\frac{\partial U}{\partial a} \right)_{\Delta=kte} = -\frac{\Delta}{2B} \left(\frac{\partial P}{\partial a} \right)_{\Delta=kte} \quad (2.17)$$



2.6 Irudia Pitzadura hedapena desplazamendu konstantepean dagoen plaka batean

Gorputz elastiko lineal batentzat, zurruntasunaren alderantziakoa den konpliantza hurrengo eran defini daiteke [23]:

$$C = \frac{\Delta}{P} \quad (2.18)$$

Konpliantza gorputzaren geometriaren eta konstante elastikoen menpekoa da. (2.18) ekuazioa konpliantza, energia askatze tasaren (2.15) eta (2.17) ekuazioetan ordezkaturik, G konpliantzaren arabera hurrengo eran adieraz daiteke:

$$G = \frac{P^2}{2B} \frac{dC}{da} = \frac{1}{2B} \frac{\Delta^2}{C^2} \frac{dC}{da} \quad (2.19)$$

Beraz, energia askatze tasak kargaren aplikazio erarekiko menpekotasuna ez duela ondoriozta daiteke eta hurrengo erlazioa beteko da:

$$\left(\frac{dU}{da} \right)_{P=kte} = - \left(\frac{dU}{da} \right)_{\Delta=kte} \quad (2.20)$$

(2.20) ekuazioa grafikoki frogatu daiteke, 2.5 Irudian eta 2.6 Irudian ikusten diren P - δ kurbak aztertuz.

Karga konstante denean, da pitzadura hazkunde batean, energia elastikoaren handiagotze bat gertatzen da, kanpoko kargak egiten duen lanagatik:

$$(dU)_{P=kte} = Pd\Delta - \frac{Pd\Delta}{2} = \frac{Pd\Delta}{2} \quad (2.21)$$

Desplazamendua konstante denean, $dF=0$, ez dago lanarik, eta energia elastikoa askatzen da eta beraz txikiagotzen da:

$$(dU)_{\Delta=kte} = \frac{\Delta dP}{2} \quad (2.22)$$

Non dP negatiboa den. 2.5 Irudian eta 2.6 Irudian ikus daitekeenez, energia aldaketa hauen balio absolutoen arteko diferentzia $dPd\Delta/2$ da, arbuiatu daitekeelarik. Beraz:

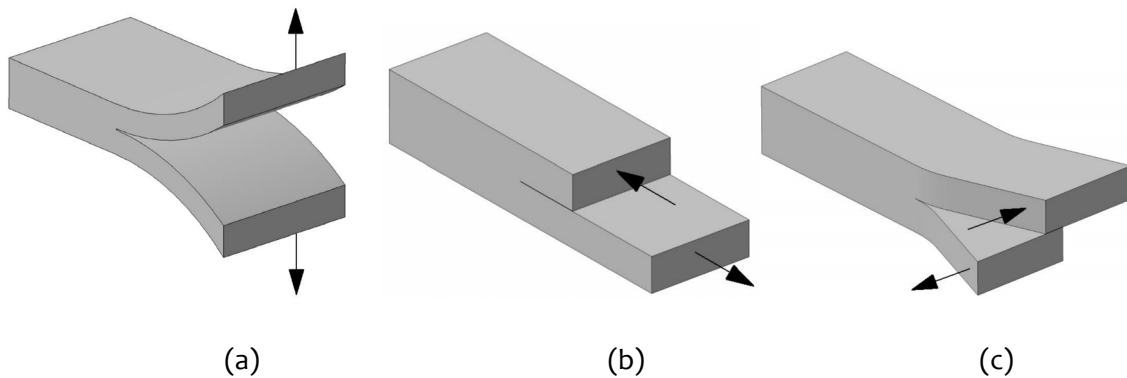
$$(dU)_{P=kte} = - (dU)_{\Delta=kte} \quad (2.23)$$

(2.23) ekuazioaren arabera, karga konstante eta desplazamendu konstantearen bitarteko edozein kurba kontuan hartzean, energia aldakuntza berdina izango da.

G ren adierazpenak (2.15) eta (2.17) ekuazioak eta 2.5 Irudia eta 2.6 Irudia aztertuz, energia aldakuntza hori $GBda$ dela esan daiteke kasu guztietan. Beraz, G espermentalki zehazteko beste bide bat irekitzen da: pitzadura luzera antzekoak dituen gorputzaren P - Δ kurben arteko azalera neurtuz hain zuzen ere [21].

2.3.5 Haustura moduak

Haustura mekanikaren arabera, laminarteko pitzadura baten hedapena hiru modutan gerta daiteke 2.7 Irudian ikus daitekeen bezala: I modua (irekitze modua), II modua (lerraketa modua) eta III modua (bihurdura modua) [24].



2.7 Irudia Haustura moduak (a) I Irekitze modua (b) II Lerraketa modua (c) III Bihurdura modua

I moduan pitzaduraren bi besoak pitzaduraren planoarekiko elkartuta den norabidean irekitzen dira. II moduan bi besoen arteko lerraketa gertatzen da pitzaduraren planoan eta hedapenaren norabidean. III moduan, bi besoen arteko lerraketa pitzaduraren planoan ere gertatzen da, baina hedapenaren elkartuta den norabidean. I modua eta II moduan planoan delako moduak dira, III modua planotik kanpo delako modua delarik. Pitzadura modu horretako baten menpe hedatzean haustura modu horrekin identifikatzen da. Karga egoera orokor baten menpe, hiru moduen konbinazioa izaten da. Egoera horri, orokorrean, modu mistoa deritzo, eta gertatzen den haustura, haustura mistoa [25].

Modu bakoitzari dagokion energia askatze tasa G_I , G_{II} eta G_{III} dira, hurrenez, hurren. Indar aplikazio egoera orokor batean, pitzadura hedapena hiru haustura moduen arteko edozein konbinaziotan gerta daiteke. Kasu orokorrean, beraz, energia askatze tasa osoa hiru haustura moduen energia askatze tasen batura izango da:

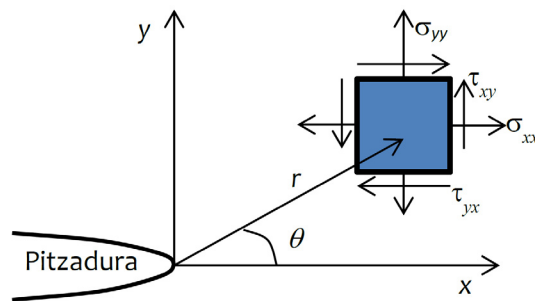
$$G = G_I + G_{II} + G_{III} \quad (2.24)$$

Modu bakoitzari dagokion haustura zailtasuna G_{Ic} , G_{IIc} eta G_{IIIc} dira. Haustura zailtasuna materialaren ezaugarria da eta haustura modu bakoitzari balio bakarra dagokio. Material isotropoen kasuan I moduko haustura zailtasunak du balio txikiena. Pitzaduraren hedapena beste edozein modutan hasi arren, pitzadurak desbideratu eta I moduan hedatzeko joera du [26].

2.3.6 Tentsio irizpidea

Haustura aztertzeko beste hurbilketa pitzaduraren puntaren inguruan tentsioen banaketaren azterketa egitea da, portaera isotropiko elastiko lineala suposatuz. Pieza batean pitzadura bat izandakoan, kanpoko kargek sortutako tentsio-egoera aldatu egiten da. 2.4 Irudian ikusten den plakaren kasurako, pitzadura-puntaren ondoan koordinatu polarrak erabiliz (2.8 Irudia), tentsio egoera Irwin-en [27] arabera honakoa da:

$$\begin{aligned}
 \sigma_x &= \sigma \left(\frac{a}{2r} \right)^{1/2} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left(1 - \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right) \right) \\
 \sigma_y &= \sigma \left(\frac{a}{2r} \right)^{1/2} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left(1 + \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right) \right) \\
 \tau_{xy} &= \sigma \left(\frac{a}{2r} \right)^{1/2} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right) \\
 \tau_{xz} &= \tau_{yz} = 0 \\
 \sigma_z &= 0 && \text{tentsio-egoera} && \text{laua} \\
 \sigma_z &= \nu(\sigma_x + \sigma_y) && \text{deformazio-egoera} && \text{laua}
 \end{aligned}
 \tag{2.25}$$



2.8 Irudia Koordinatu sistemaren definizioa pitzadura-puntan

Non ν Poisson-en ratioa den. (2.25) ekuazioaren arabera pitzadura-puntan tentsio lokala $\sigma\sqrt{\pi a}$ gaiaren menpekoa da. Plaka amaigabearen kasurako, K tentsioen intentsitate-faktorea honoko eran definitzen da:

$$K = \sigma\sqrt{\pi a}
 \tag{2.26}$$

(2.25) ekuazioa hurrengo eran berridatzi daiteke:

$$\begin{aligned}
\sigma_x &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left(1 - \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right)\right) \\
\sigma_y &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \left(1 + \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sin\left(\frac{3\theta}{2}\right)\right) \\
\tau_{xy} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) \cos\left(\frac{3\theta}{2}\right) \\
\tau_{xz} &= \tau_{yz} = 0 \\
\sigma_z &= 0 \quad \text{tentsio-egoera} \quad \text{laua} \\
\sigma_z &= \nu(\sigma_x + \sigma_y) \quad \text{deformazio-egoera} \quad \text{laua}
\end{aligned} \tag{2.27}$$

Beraz, tentsio-egoera, r eta θ parametro geometrikoen gain, K_I intentsitate-faktorearen bidez definitua dago (I moduan). Ondorioz, pitzadura-puntaren ondoan dauden tentsio lokalak definitu ahal izateko nahikoa izango da K_I -en balioa ezagutzea. I moduan erabilitako prozedura berberari jarraituz, II eta III moduko pitzadura-puntaren inguruan diharduten tentsioak definitu daitezke.

τ tentsio ebakitzaile baten pean dagoen plaka amaiezinareen kasuan II modurako eta III modurako hurrenez hurren, intentsitate-faktoreak, K_{II} eta K_{III} ondoko ekuazioaren bidez definiturik daude:

$$K = \tau \sqrt{\pi a} \tag{2.28}$$

Hortaz, nahiz eta pitzadura-luzera edota aplikatutako tentsioak desberdinak izan, tentsioen intentsitate faktorearen balioa berdina bada, pitzadura-puntaren tentsio-egoera beti berdina izango dela ondoriozta daiteke [28].

Tentsio-intentsitate-faktore kritikoari, K_c deritzo eta materialaren ezaugarri bat da.

2.3.7 K eta G ren arteko erlazioa

Material isotropoen zailtasun balioak tentsio intentsitate faktore kritikoa K_c erabiliz neurtzen dira. Laminatu konpositen laminarteko haustura zailtasunak berriz, askatutako energia tasa kritikoaren bitartez, neurtzen dira.

G eta K parametroen arteko erlazioa solido elastiko isotropo baten kasurako honako eran adieraz daiteke:

$$\begin{aligned}
 G_I &= \frac{K_I^2}{E} && \text{tentsio} && \text{laua} \\
 G_I &= \frac{K_I^2}{E} (1 - \nu^2) && \text{deformazio} && \text{laua}
 \end{aligned}
 \tag{2.29}$$

Tentsio intentsitate faktore kritikoa, pitzadura puntaren eremu lokalaren menpeko izanik, material konpositeen ez homogeneotasuna dela eta, K ren benetako balioa lortzeko zailtasunak daude [29]. Pagano eta Schoeppner-en arabera [30], konpositeen kasuan hurbilketa analitikoetan, G -ren erabilera K -ren erabilera baino sendoagoa da.

Deslaminazioak konpositetan aztertzen duten lan gehienetan, eta lan honetan ere, pitzaduraren hedapena iragartzeko, energia askatze tasa kritikoa G_c erabiltzen da.

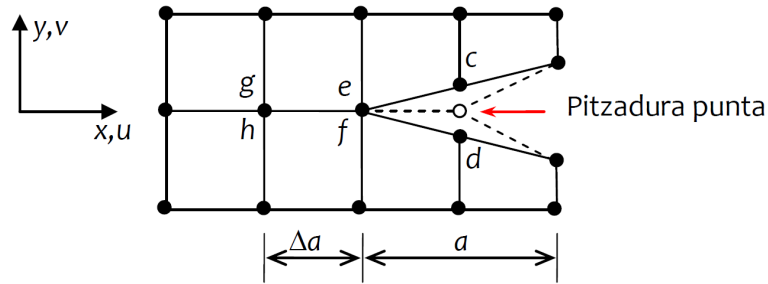
2.4 ZENBAKIZKO METODOAK

2.4.1 Pitzadura birtualaren itxiera metodoa, VCCT

Egun, konposite laminatuen deslaminazioa elementu finituen metodoa eta beste zenbakizko metodoak erabiliz maiz aztertzen da. Oso erabilia den zenbakizko metodo bat, pitzadura birtualaren itxiera metodoa, (*virtual crack closure technique*, VCCT) da. Metodo hau Irwin-en hipotesian oinarrituta dago: pitzadura baten hedapen txikia gertatzean askatutako energia, bere hasierako egoerara bueltatzeko pitzadura ixteko behar den lanaren berdina da. Azalera unitateko askatutako energia, G , balio kritiko, G_c baten berdina edo handiago bada, orduan pitzadura hedatuko da [31].

2.9 Irudian ikus daitekeen elementu finituko modeloan, G zehazteko, pitzadura punta ixteko nodoetan aplikaturiko indarrek egiten duten lana kalkulatu behar da, honakoa izanik:

$$\begin{aligned}
 G_I &= \frac{1}{2b\Delta a} F_{cd}^y (v_c - v_d) \\
 G_{II} &= \frac{1}{2b\Delta a} F_{cd}^x (u_c - u_d) \\
 G_{III} &= \frac{1}{2b\Delta a} F_{cd}^z (w_c - w_d)
 \end{aligned}
 \tag{2.30}$$



2.9 Irudia Pitzadura hedapena elementu finitoen modeloan

Non b probetaren lodiera den eta F_{cd}^y , F_{cd}^x eta F_{cd}^z , c eta d nodoetan aplikatuta dauden indar pareak y , x eta z norabideetan hurrenez hurren. Eta u_c , v_c , w_c eta u_d , v_d , w_d , c eta d nodoak elkartu aurretik desplazamendu nodalak diren. Azterketa bi urratsetan egin daiteke, lehenengo urratsean c eta d nodoak elkarrekin mantentzenko beharrezkoak diren F_{cd}^y , F_{cd}^x eta F_{cd}^z indar nodalak kalkulatu, eta bigarren urratsean c eta d nodoen arteko desplazamendu erlatiboaren osagaiak kalkulatu. Hala ere, Rybicki eta Kanninen-ek [32] egindako suposaketa erabiliz prozesua sinplifikatu daiteke, (2.30) ekuazioko indar nodalak dagozkien indar nodalen osagaiez ordezkatu, F_{ef}^y , F_{ef}^x eta F_{ef}^z alegia.

Pitzaduraren hedapena gertatuko da, kalkulaturako energia askatze tasak, materialaren haustura zailtasuna, G_c berdinu edo gainditzen duenean.

Metodo honen abantaila nagusia energiaren kalkuluan oinarrituta dagoela da, tentsioen kalkuluan izan beharrean. Desabantailarik nagusia, berriz, VCCT metodoa auto antzeko hedapenean oinarrituta dagoela, hau da, F_{ef}^i eta F_{cd}^i indarrak berdinak direlako suposaketan. Beraz, pitzadura laburren hasiera eta hedapena ezin da aztertu, soilik hedapena.

2.4.2 Gune kohesiboko modeloak

Deslaminazioaren zenbakizko simulaziorako beste hurbilketa bat kaltearen mekanikaren barruan garatu daiteke. Kaltearen mekanikako kontzeptuak erabiltzen dituzten modeloak pitzadura-eredu kohesiboan oinarrituta daude. Eredu horretan kalte gune kohesibo bat garatzen da pitzadura frontearen inguruan. Modelo kohesiboen garapena 60. hamarkadan hasi zen. Lehengoz Dugdalek [33] aurkeztu zuen eta Goodier eta Field-ek [34] aplikatu zuten. Ondoren Barenblatt-ek [35] tentsio muga ordezkatu zuen lege kohesibo batez sare atomikoen dekohesioa modelizatzeko. Horrela, gune plastikoa, kaltea eta haustura

gertatzen zeneko prozesu gune batez ordezkatzeko zen. Hau da egun erabiltzen den modelo kohesiboaren oinarria [36].

Gune kohesiboko modeloak pitzaduraren hasieran eta hedapenean laminen pitzatze sekuentziak duen eragina, edota zulo baten inguruan sor daitekeen kaltea edo deslaminazioa, besteak beste, aztertzeko baliogarriak dira baita deslaminazio progresiboa duten egituren erresistentzia iragartzeko ere [37].

2.5 LAMINARTEKO HAUSTURA SAIKUNTZAK

2.5.1 Sarrera

Konposite laminatuen kasuan, laminarteko haustura zuntz errefortzudun geruzen artean egotera mugatzen da, beraz, material hauen kasuan, pitzaduraren hedapena hiru haustura moduen arteko edozein konbinaziotan gerta daiteke. Material konpositeen laminarteko haustura, I modu hutsean, II modu hutsean eta I/II modu mistoan aztertu ohi da orokorrean, III moduak laminarteko hausturan duen eragina arbuia garritzat jotzen baita [23].

Lan honetan I moduko, II moduko eta I/II modu mistoko saikuntzen inguruko berrikuspen bibliografikoa egingo da. Hemendik aurrera modu mistoa aipatzean, I/II modu mistoaz ari garela esan nahi du.

Arestian aipatu bezala, haustura zailtasuna materialaren hausturaren aurkako erresistentzia neurtzeko erabili ohi da. Konpositetan haustura zailtasuna energia askatze tasa kritikoaren bidez adierazten da. Energia askatze tasaren neurketa esperimental eta bere normalizazioa funtzeskoak dira, egituren segurtasunaren azterketan hausturaren mekanika aplikatzeko [38].

Energia askatze tasa habe motako probetak erabiliz neurtu ohi da, non pitzadura geruzekiko paralelo hedatzen den. Saiakuntzan zehar, aplikatutako indarra eta honi dagokion desplazamendu totala neurtzen dira. Material konpositeen laminarteko pitzaduraren hedapena aztertzeko, aplikatutako karga lortutako desplazamenduarekin nola aldatzen den aztertu behar da. Datu esperimental hauen bitartez, pitzadura luzera determinatu eta G kalkulatu daitekeelarik. Haustura saikuntzen helburu bat erresistentzia kurba lortzea da, haustura portaera karakterizatzeko asmoz. Erresistentzia kurba (R-kurba)

pitzaduraren hedapen egonkorrekiko energia askatze tasaren aldaketaren erregistro jarrai bezala definitzen da [39].

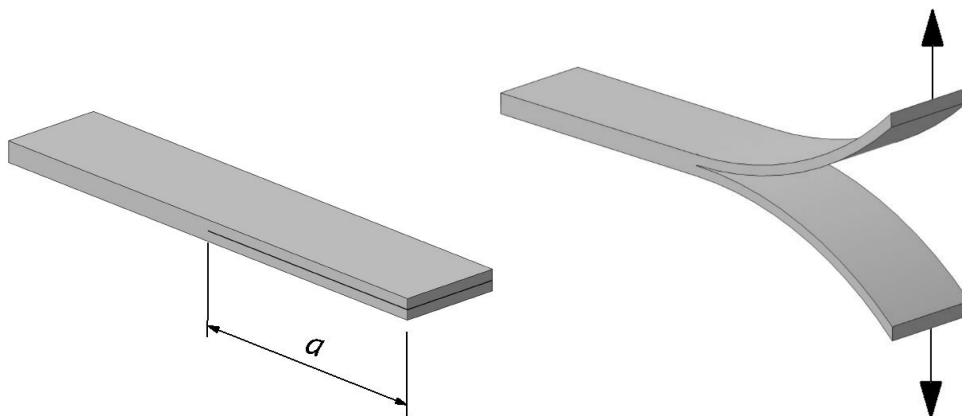
Konpositetan haustura saiakuntzak burutzeko, probeta mota desberdinak erabili dira. Beraien ezaugarri nagusia akats artifiziala barneratzen dutela, pitzadura eran. Saiakuntza konfigurazio batzuk egun arautuak daude.

Lan honetan I/II modu mistoa aztertzeko saiakuntza konfigurazio bat aztertzen da, **Bukaerako Pitzaduradun Makurdura Arrabolarekin**, BPMA, ingelesez, *End Notched Flexure with Roller*, ENFR delakoa.

2.5.2 I moduko saiakuntzak

- **Habe Landatu Bikoitzeko *Double Cantilever Beam* (DCB)**

Norabide bakarrekiko konpositeen I moduko laminarteko erresistentzia aztertzeko gehien erabiltzen den saiakuntza Habe Landatu Bikoitzeko, (*Double Cantilever Beam*, DCB) saiakuntza da. Saiakuntzen eta materialen elkarte amerikanoa, (*American Society for Testing and Materials*, ASTM)-k proposatzen duena da [40]. 2.10 n DCB saiakuntzaren konfigurazioa agertzen da. Ez itsasgarria den film txertatu batek sortarazten du hasierako pitzadura. Pitzadura aldeko bi habeek, trakzio indarra jasaten dute, hasierako pitzadura ireki eta laminarteko haustura eraginez.



2.10 Irudia DCB saiakuntza

Pitzadura luzera begi bistaz determinatzen da probetaren ertzetan zuzenketa likidoa erabiliz. Hala ere, batzutan pitzadura-punta ondo zehaztea zaila izaten da eta honek erroreak sor ditzake emaitzetan. Mikroskopia erabiltzea gomendatzen da neurketa zehatzagoak egiteko.

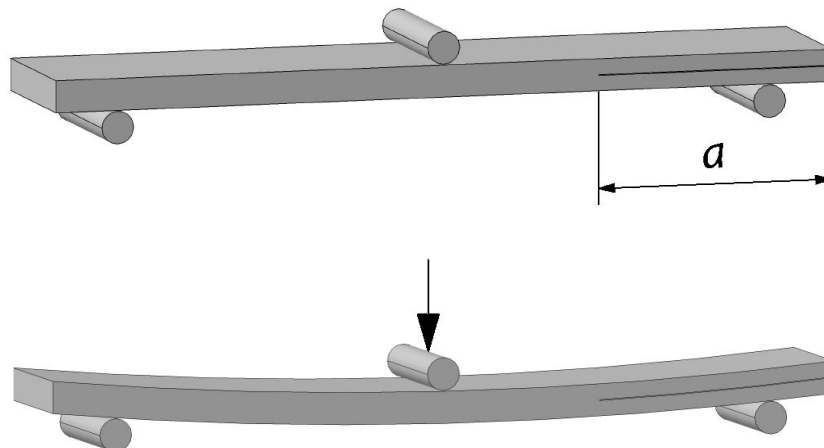
kalkulatzeko, marruskadura indarrak eta txertatutako ziriaren diametroa kontuan hartu beha dira.

2.5.3 II moduko saiakuntzak

- **Bukaerako pitzaduradun makurdura saiakuntza hiru puntutan *Three-point End Notched Flexure test (ENF)***

II modua pitzaduraren bi gainazalen arteko lerraketarekin zerikusirik du. Konpositetan II moduan hedatzen den pitzadurak kalte-gune bat sortzen du. Hala nola, pitzaduraren puntan bukaeran fusionatzen diren matrizearen mikropitzadurak. Ondorioz, benetazko pitzadura-luzera definitzea zaila da.

II modua aztertzeko, ASTM D7905/D7905M-14 arauaren arabera [48] proposatutako saiakuntza, 2.12 n irudikatzen den bukaerako pitzaduradun makurdura saiakuntza hiru puntutan, (*Three-point End Notched Flexure test, ENF*) da.



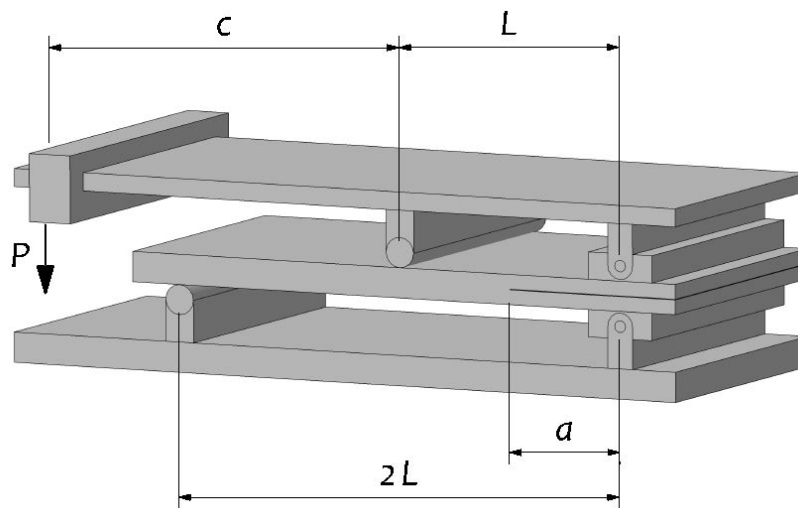
2.12 Irudia ENF saiakuntza

ENF saiakuntzaren abantailarik nagusia bere sinpletasuna da, azken finean hiru puntuko makurdura saiakuntza da, probetak pitzadura mutur batean duelarik. Desabantailarik nagusienak pitzadura-hedapenaren ezegonkortasuna eta pitzadura-luzeraren neurketaren zailtasuna dira [49-53]. Carlsson et al.-ek [54] ENF saiakuntza garatu zuten habeen teoriar oinarrituz. Probetak fabrikatzerakoan lodieran zentratuta, ez itsagarria den film txertatu batez sortarazten da hasierako pitzadura. Beraien esanetan, pitzadura hedapen egonkor bat lortzeko $a/L > 0.7$ izan behar da. L , bi euskarrien arteko argiaren erdia delarik.

Modu ratioa edo modu nahasketa G_I eta G_{II} tasen ekarpena definitzen duen erlazioa da. Modu desberdinean adieraz daiteke G_I/G_{II} eta G_{II}/G gehien erabiltzen diren adierazpenak direlarik [60]. Lan honetan erabiliko den modu ratioa G_{II}/G izango da, $G = G_I + G_{II}$, bi moduen energia askatze tasen batura izanik. Beraz, modu ratioa II moduaren ekarpena eta energia askatze tasa totalaren arteko erlazioa izango da.

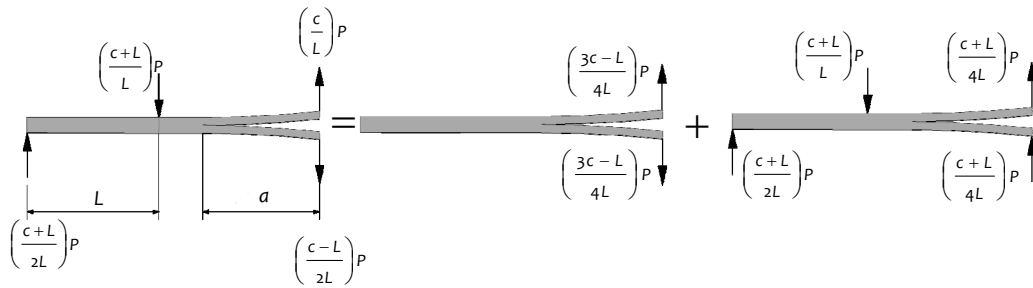
- **Modu mistoko makurdura saiakuntza, *Mixed-Mode Bending test (MMB)***

I/II modu mistoa aztertzeko, ASTM-k [60] proposatutako saiakuntza, 2.14 n irudikatzen den modu mistoko makurdura saiakuntza, (*Mixed-Mode Bending test, MMB*), da. ASTM D6671-01 arauan proposatutako saiakuntza bankua, Crews eta Reeder-ek proposatutako baten modifikazioa da [61-63].



2.14 Irudia MMB saiakuntza

MMB saiakuntzan, pitzadura zentratua duen probeta erabiltzen da. DCBn erabiltzen denaren antzekoa. Haustura zailtasuna kalkulatzeko ahalbidetzen du ia I modu hutsetik II modu hutsera doan modu ratio tarte zabalean. Modu ratio desberdinak lortzeko, aplikazio puntuaren distantzia alda daiteke edo palankaren bermapuntuaren kokapena. Palankaren besoan beheranzko indarra aplikatzean, probetaren erdiko puntuan beheranzko indar bat aplikatzen da, eta probetaren muturrean itsatsita dagoen blokeak gora egiten du. 2.15 n irudikatzen den moduan, MMB saiakuntza, DCB eta ENF saiakuntzen gainjarpena bezala kontsidera daiteke, 2.15 Irudian irudikatzen den moduan.



2.15 Irudia MMB saiakuntza DCB eta ENF saiakuntzen gainjarpen bezala

Habeen teoria sinplearen arabera G_I eta G_{II} ren adierazpenak honakoak dira [61]:

$$G_I = \frac{9P^2 a^2}{16E_{11} b^2 h^3} \left(\frac{c+L}{L} \right)^2 \tag{2.31}$$

$$G_{II} = \frac{9P^2 a^2}{16E_{11} b^2 h^3} \left(\frac{3c-L}{L} \right)^2$$

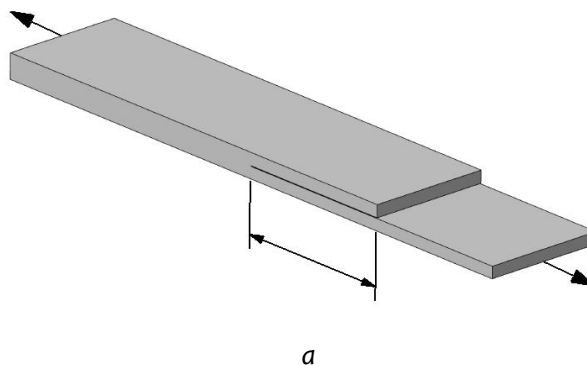
(2.31) ekuaziotik modu ratioa kalkulatu

$$\frac{G_{II}}{G_I} = \frac{(3c-L)^2}{[(c+L)^2 + (3c-L)^2]} \tag{2.32}$$

(2.32) ekuazioaren arabera MMB saiakuntzan modu ratioa konstantea da, hau da G_{II}/G_I zatiketarik ez du pitzadura-luzerarekiko menpekotasunik. Egoera horri modu ratio finkoa deritzen. MMB saiakuntzarentzat, beste saiakuntzen kasuan bezala, habeen errotazioak eta desplazamendu handiak kontuan hartzeko hainbat zuzenketa faktore proposatu dira [63,64].

▪ **Ebakitzailen pitzaduradun saiakuntza Crack Lap Shear (CLS)**

Modu mistoa aztertzeko proposatutako beste beste saiakuntza bat, pitzaduradun ebakitzailen saiakuntza, (Crack Lap Shear, CLS) da [65]. 2.16 n kasu daitekeenez luzera ezberdineko bi habeen trakzioan oinarritzen da.

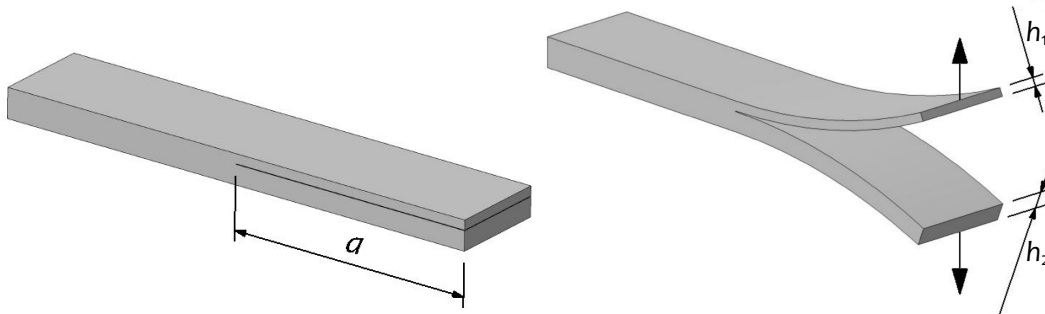


2.16 Irudia CLS saiakuntza

Nahiz eta CLS saiakuntzaren konfigurazioa sinplea izan, ez da gehiegitan erabili kargaren eszentrikotasunagatik sortutako habeen errotazio handiengatik. Horrek suposatzen du modu ratioa kalkulatzeko analisi ez-lineala burutu behar dela. Gainera modu ratioa desberdinak lortzeko, probetaren fabrikazioan lamina pilaketa prozesu desberdinak egin behar dira.

- **Habe landatu bikoitzeko saiakuntza ez simetrikoa *Asymmetric double-cantilever beam (ADCB)***

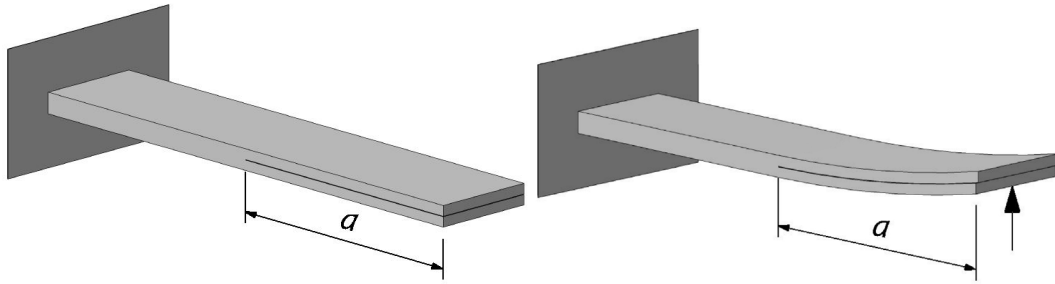
Bradley and Cohne-ek [66] habe landatu bikoitzeko saiakuntza ez simetrikoa, (*Asymmetric double-cantilever beam, ADCB*), proposatu zuten. Proposamen horretan DCB probeta batean habe bakoitzean karga desberdina aplikatzen zen. Desabantaila nagusia karga-aplikazio sistema konplexua behar dela da. ADCB-n beste bertsio batean, DCBn erabiltzen den probeta antzeko bat erabiltzen da, baina pitzadura plano ez dago lodieran zentratuta, 2.17 Irudian ikus daitekeen moduan, eta horrek I/II modu mistoa sortzen du pitzadura-puntan.



2.17 Irudia ADCB saiakuntza

- **Modu mistoko bukaerako kargadun haustura saiakuntza, *Mixed-Mode End Load Split test (MMELS)***

MMELS saiakuntza, 2.18 Irudia, modu ratio finkodun modu mistoko saiakuntza, (*fixed-ratio mixed-mode, FRMM*) bezala ere ezagutzen da. Saiakuntza honetan, soilik habe batean aplikatzen da indarra bestea kargarik gabe mantentzen den bitartean. Era horretan, laminarteko pitzadura modu mistoan hedatzeko behartuta dago. Saiakuntzaren konfigurazioa DCB eta ELS ren arteko nahasketa bat da [67].



2.18 Irudia MMEELS saiakuntza

Pitzaduraren bi besoen lodiera berdina denean, hau da, $h_1 = h_2 = h$, habeen teoria sinplea aplikatuz, energia askatze tasak honakoak dira:

$$\begin{aligned} G_I &= \frac{3P^2 a^2}{E_{11} b^2 h^3} \\ G_{II} &= \frac{9P^2 a^2}{4E_{11} b^2 h^3} \end{aligned} \quad (2.33)$$

(2.33) ekuazioatik $G_{II}/G_I = 3/7$, modu ratioa balio finko bat. MMB-ren kasuan gertatzen zen bezala, modu ratioak ez duela pitzadura-luzerarekiko menpekotasunik ondoriozta daiteke. Gainera, konfigurazio honetan modu ratio desberdinak lortzeko $h_1 \neq h_2$ izan behar da. Dena den, (2.33) ekuazioko adierazpenak habeen teoria sinplea aplikatuz lortu dira. Hurbilketa zehatzago bat burutz, G_I eta G_{II} ren arteko erlazioa pitzadura-hedapenarekin aldatzen dela ikus daiteke [29].

2.6 HAUSTURA IRIZPIDEAK I/II MODU MISTOAN

2.6.1 Sarrera

I modu hutsean eta II modu hutsean pitzaduraren hastapena eta hazkundera materialaren ezaugarria den haustura zailtasunarekin erlazionatuta daude. Beraz, modu hutsetan pitzaduraren hasiera, puntu kritikoa alegia, sistemaren energia askatze tasak materialaren energia askatze tasa kritikoa gainditzen duenean emango da. Hortaz, modu hutsetan haustura gertatzeko baldintza kritikoa honakoa da:

$$\begin{aligned} G_I &\geq G_{Ic} \\ G_{II} &\geq G_{IIc} \end{aligned} \quad (2.34)$$

Hala ere, modu mistoan, hau da, I moduak eta II moduak aldi berean parte hartzen dutenean, energia askatze tasa $G = G_I + G_{II}$ da. Aitzitik, $G_C \neq G_{Ic} + G_{IIc}$. Haustura irizpidea egokia aukeratzeko, modu ratio desberdinei dagozkien G_I eta G_{II} ren balio esperimentalak behar dira puntu kritikoan, hau da, pitzadura hedatzen denean. Haustura irizpide gehienetan, modu hutsei dagozkien G_{Ic} eta G_{IIc} balioak ezagutu behar dira eta haustura irizpidearen adierazpen matematikoan agertzen diren beste parametroak lortzen dira doikuntza metodoren bat datu esperimentalei aplikatuz. Beste kasu batzutan, G_{Ic} eta G_{IIc} balioak haustura irizpidea aplikatuz lor daitezke.

Modu mistoarentzat haustura irizpide egokia definitzeko adierazpen desberdinak erabili dira [68]. Segidan, gehien erabiltzen direnen artean hiru irizpide laburki azalduko dira:

2.6.2 Potentziaren legearen irizpidea (*Power Law Criterion*)

Potentziaren legea, (*Power Law Criterion*) hurrengo eran adieraz daiteke [69]:

$$\left(\frac{G_I}{G_{Ic}}\right)^m + \left(\frac{G_{II}}{G_{IIc}}\right)^n = 1 \quad (2.35)$$

m eta n datu esperimentalei karratu txikien bidezko doikuntza aplikatuz lortzen diren parametroak izanik. $m=n=1$ denean, irizpide honi haustura irizpide lineala deritzo. $m=n=2$ denean, irizpidea honi haustura irizpide kuadratikoa deitzen zaio.

2.6.3 Elkarrekintza irizpidea (*Interaction Criterion*)

Williams-en arabera [70], elkarrekintza irizpidea hurrengo eran defini daiteke:

$$\left(\frac{G_I}{G_{Ic}} - 1\right)\left(\frac{G_{II}}{G_{IIc}} - 1\right) - l \frac{G_I}{G_{Ic}} \frac{G_{II}}{G_{IIc}} = 0 \quad (2.36)$$

Non l elkarrekintza parametroa den, $l=0$ denean ez dago elkarrekintzarik, eta $l=1$ denean, moduen ekarpenen batuketa sinplea izango da. Aurreko kasuan bezala l karratu txikien bidezko doikuntza aplikatuz lortzen da.

2.6.4 Benzeggagh-Kenane irizpidea

Benzeggagh-Kenane irizpidea [71], B-K izendatzen da. Honako eran adieraz daiteke:

$$G = G_{Ic} + (G_{IIc} - G_{Ic}) \left(\frac{G_{II}}{G}\right)^t \quad (2.37)$$

t, aurreko kasuetan bezala, datu esperimentalei karratu txikiaren bidezko doikuntza aplikatuz lortzen den parametroa izanik.

2.6.5 Haustura irizpideen erabilera

Mohan et al.-ek [72], ko-onduta eta itsatsitako bigarren mailako junturen hauste-portaeraren desberdintasunak ikertu zituzten. ADCB saiakuntzaren bidez, hiru modu-ratioko saiakuntzak burutu zituzten. Horrez gain I modua DCBn eta II modua ELS saiakuntzen bidez aztertu zituzten. Pitzadura-luzera neurtzeko mikroskopia bat erabili zuten eta G -ren kalkulua egiteko hurbilketa analitikoa zuzendutako habeen teoriarin oinarrituta zegoen.

Bi haustura irizpide alderatu zituzten Hashemi-k garatutakoa eta B-K. Hedapena aztertzean, modu II ren portzentai altuetan G osoa handiagoa zela ikusi zuten. Probeta batzuetan G_I -en kurbak hasieran igoera bat zutela ikusi zuten. R-kurba analizatuz, Hashemi-ren irizpidea hobe zela ondorioztatu zuten.

Anh et al.-ek [73] ia hauskorra den egurrezko material batean, I moduko saiakuntzak DCBn, II moduko saiakuntzak ENFn eta 7 modu ratio desberdineko saiakuntzak MMBn burutu zituzten. Pitzaduraren lehenengo 10 mm ko hedapenean, G_I eta G_{II} ren arteko proportzioa aldatzen zela ikusi zuten, nahiz eta MMB konfigurazioan modu ratioa konstantetzat hartu.

Potentziaren legea irizpidea erabili zuten 3 kasu desberdinak alderatuz: lineala, kuadratikoa eta semikuadratikoa $m=1$ eta $n=2$ erabiliz. Datu esperimentalei hobekin egokitzen zena irizpide lineala zela ondorioztatu zuten. Bestalde, optimizazio prozesu bat burutu zuten, G_{Ic} eta G_{IIc} parametroak lortzeko. Modu hutsetan lortutako balioekin adostasuna aurkitu zuten, baina beti pitzadura hedapenaren lehenengo 10mm horien datuak baztertuz.

Phan et al.-ek [74], egurrezko materialean ere modu mistoaren haustura irizpidea aztertu zuten. Irizpide lineala egokia zela ondorioztatu zuten, pitzaduraren hedapenean zehar G_I eta G_{II} -ren balio egonkorak irudikatzeko eta baita hasierako goranzko joera irudikatzeko ere.

Mathews-ek [75] berrikuspen bibliografiko bat egin zuen haustura irizpideen inguruan. Argitaratutako emaitza batzuen artean desadostasunak aurkitu zituen, datuen erredukzioarekin erlazionatuta beti. AS5/3501-6 materiala erabiliz DCBn I moduko saiakuntzak, ENF-n eta ELS-n II moduko saiakuntzak, eta 3 modu ratio desberdineko saiakuntzak MMBn burutu zituzten. Bere helburua G_I en hasierako hazkunde hori

konprobatzea zen. Bere hitzetan G_I -ek ez du hasieran goruntz egiten. Alderatzen dituen irizpideak lineala, potentzia legea eta B-K dira. Emaitz hobeak potentziarekin lortzen ditu. B-K irizpidearekin emaitzak antzekoak dira eta bera aplikazioa errezagoa. Gainera B-K aplikatzean modu ratioa versus G osoa irudikatzean, modu ratioa handitzean G osoa handitzen dela antzeman daitekela dio.

Liu eta Zhang-ek, [76] haustura irizpide berri bat proposatu zuten, Tsa-Wung teorian oinarrituta. Irizpide hori, arestian argitaratutako emaitz esperimentalei aplikatu zioten eta egokia zela ondorioztatu zuten. Alde batetik modu hutsak adierazten zituelako eta bestalde G_I -en portaera ere egokiro barneratzen zuelako, bai hasierako igoera hori zegoenean eta ez zegoenean ere. Nahiz eta emaitz batzuetan aldeak nabariak aurkitu. Alde horiek zuntz zubiengatik (*fibre bridging*) zirela esan zuten.

Vandellos et al.-ek [77] modu mistoa aztertzeako konfigurazio berri bat proposatu zuten. Pitzaduradun gorputzan trakziozko makurdura saiakuntza, *The Tensile Flexure test on Notched Specimen* (TFNS). Pitzadura luzera neurtzeko mikroskopia bat erabili zuten. Haustura irizpideari dagokionez, potentzia legea eta B-K irizpideak alderatu zituzten eta B-K-n oinarritutako beste irizpide bat proposatu zuten, aurreko biak ez baitzuten emaitz egokiak ematen. TFNS saiakuntzan modu ratioa aldakorra izatea abantailatzat jotzen zuten, horrela saiakuntza bakar batek G_{Ic} eta G_{IIc} lortzen ahalbidetzen duelako, proposatutako haustura irizpidea betetzen bada. Sentikortasun analisi bat ere burutu zuten, eta energia askatze tasa kritikoaren kalkuluan modulu elastikoaren eta pitzadura luzeraren eragina oso handia zela ondorioztatu zuten.

3.

MATERIALA, FABRIKAZIOA ETA PROBETAK

3.1 SARRERA

Kapitulu honetan, saiakuntza esperimental desberdinetan erabili diren laminatu konpositeen probeten fabrikazio-prozesua azaltzen da.

Lan esperimentalean erabilitako T-300a/F593 materiala Hexcel Composites enpresak prepreg moduan igorritakoa da: T300 karbono-zuntza eta F593 da matrize epoxia. Erabili diren probetak prepregetatik abiatu eta konpresio beroz ondutako plaketatik lortu dira, ezarritako fabrikazio-zikloari jarraituz. Pilaketa prozesuan teflon lamina bat barneratu da, hasierako pitzadura eragiteko asmoz.

Materiala bukatutako laminatu moduan erabili denean, probetak laminatuetatik moztu dira diamantatuta dagoen zerra zirkular baten bidez. Ondoren, arrakadurak kentzeko leungailu batean leundu direlarik.

Saiakuntzak MTS saiakuntzako makina burutu dira hiru puntuko makurdura tresneriarekin. Azterketa esperimentalak hasi baino lehen, probeta bakoitzaren modulu elastikoak kalkulatu dira.

3.2 ERABILITAKO MATERIALA

Lan honetan erabili den materiala karbono zuntz luzez errefortzatutako eta epoxi matrizean oinarritutako norabide bakarreko konpositea da. Aztertu den materiala

T300/F593 da: T300 karbono zuntza du errefortzu moduan. F593 matrize epoxia termoplastiko batez eraldatua dago, hausturarekiko zailtasuna hobetzeko asmoz. T300 karbono zuntza PAN (poliacrilonitrilo) aintzindaria erabiliz fabrikatzen da. Orokorrean karbono zuntzen propietate fisiko eta mekanikoak erabilitako aintzindariaren menpeko dira. PAN-oinarri duten karbono zuntzek, orokorrean erresistentzia altua, modulu altua eta dentsitate baxua izan ohi dute [78]. Propietate nagusienak 3.1 Taulan azaltzen dira eta Toray en web gunetik lortutakoak dira [79].

3.1 Taula. Lan honetan erabilitako karbono zuntzaren propietate batzuk

Propietateak	T300
Trakzio Erresistentzia (MPa)	3530
Trakzio Modulusa (GPa)	230
Trakzio Deformazioa (%)	1,5
Dentsitatea (g/cm ³)	1,76
Diametroa (10 ⁻⁶ m)	7

F953 matrizeari dagokionean, laminatu propietate egokiak lortzea ahalbidetzen duen fluxu baxuko epoxi sistema eraldatua da. F953 I moduko laminarteko haustura propietate bikainak ditu. Ezaugarri nagusiak 3.2 Taulan azaltzen dira eta Hexcel Composites-en web gunetik lortu dira [80].

3.2 Taula. Lan honetan erabilitako epoxi matrizearen propietate batzuk

Propietateak	F593
Trakzio Erresistentzia (MPa)	60,4
Trakzio Modulusa (MPa)	2960
Trakzio Deformazioa (%)	2
Hausturarekiko Zailtasuna, GIc (J/m ²)	420
Beira Transizio Tenperatura (°C)	177
Gelifikazio Denbora 177 °C-tan (min)	9-17

T300/F593 konpositearen ezaugarri mekanikoak, giro tenperaturari eta %60 zuntz portzentaiari dagozkionak, 3.3 Taulan biltzen dira [79].

3.3 Taula. Lan honetan erabilitako epoxi matrizearen propietate garrantzitsuenak

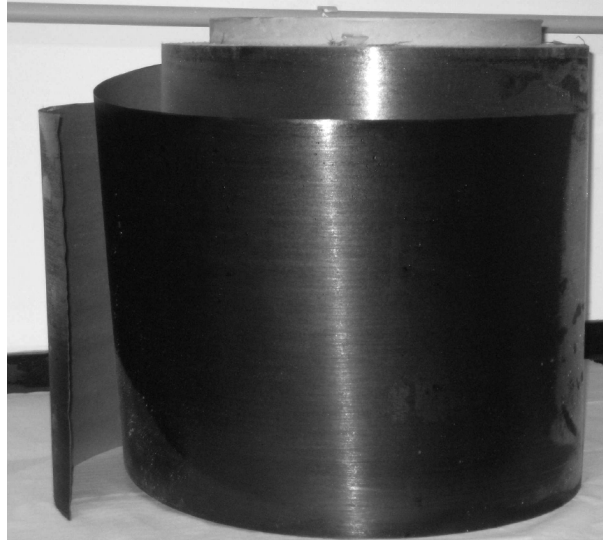
Propietateak	T300/F593
0°, Trakzio Erresistentzia (MPa)	1760
0°, Trakzio Modulua (GPa)	130
0°, Konpresio Erresistentzia (MPa)	1570
0°, Konpresio Modulua (GPa)	125
0°, Makurdura Erresistentzia (MPa)	1810
0°, Makurdura Modulua (GPa)	125
0°, Laminarteko Erresistentzia (MPa)	108

Probetak, prepregetatik hasita konpresioz fabrikatu direnean, fabrikazio prozesu bera zehaztasunez aztertu behar izan da.

3.3 FABRIKAZIOA

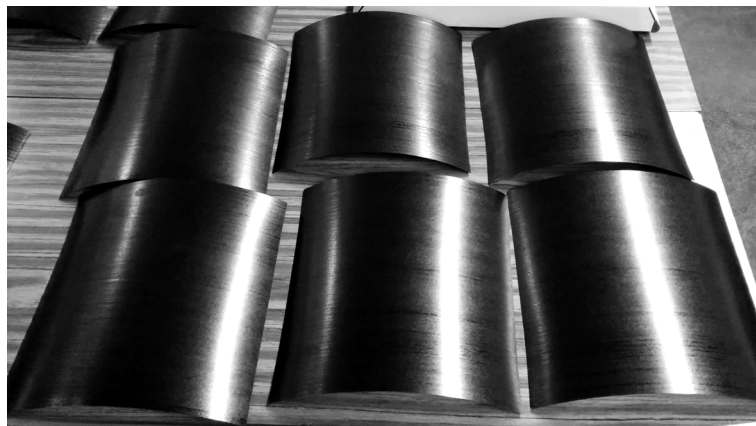
Prepregak, egoera aurrekatalizatuan dagoen erretxin matrizez bustitako zuntz errefortzu ehunak edo norabide bakarrekoak dira. Hexcel Composites-ek igorritako prepregak karbono zuntz luze errefortzua duten bereziki formulatutako erretxin matrize sistemak dira.

Prepregak erretxina matrizearekin blaitutako errefortzu-zuntz oihalak dira auresendatutako egoera batean. Temperatura altuen eraginpean dagoenean, erretxina termoegonkorran erreakzio kimikoak gertatzen dira, preprega iraunkortasun altuko egiturazko material solido, iraunkor, temperaturarekiko erresistente, bereziki zurrun eta arina bihurtuz [78]. Prepregak biribilki itxuran hornitzen dira, 3.1 Irudian irudikatzen den moduan eta izotzeratuz biltegitratzen dira erretxinari barneratutako katalizatzaileak latentzia-egoeran mantentzeko biltegitratze denboran zehar.



3.1 Irudia Prepeg biribilkia

Prepregen manipulazioa, desizoztu ondoren, eranskortasun bat duten giroan egiten da, geruzen pilaketa eta lerrokatze egokia ahalbidetzeko. Bibilkiaren altuera 295 mm-koa da eta $220 \times 280 \text{ mm}^2$ -ko azalera duten prepegak moztu dira gillotina baten bidez, 3.2 Irudian ikus daitekeenez.



3.2 Irudia Erabilitako prepeg-ak

Geruza kopuru handiak ezartzen direnean konpaktazioa burutu behar da tarteka, hutsean edota presio arina aplikatuz. Konpaktazioa errazago burutzen da tenperaturak ohiko girokoak baino zerbait altuagoak direnean. Ontze prozesua, igorleak ezarritako tenperatura eta presio zikloa jarraituz burutzen da.

Tenperatura altutan eta presiopean ondu ondoren, prepegak osagai moldatu zurrun eta erresistenteak osatzen dituzte. Nahiz eta hainbat erretxin ezberdin erabiltzen diren errefortzuak bustitzeko, lan honetan erabili den prepegak epoxi erretxina dute.

Laminatuen fabrikazioa autoklabean edo prentsan egin daiteke, behar den presio eta temperatura zikloak ezarriz.

Autoklabea hutsune kopuru txikia eta fibra bolumen handidun kalitate altuko egitura osagaiak fabrikatzeko erabiltzen da. Autoklabea konpositearen ontzea ahalbidetzen duen presio kamara bat da. Presioa eta temperatura kontrolatzen dira, presioa isostatikoa izanik, hots, norabide guztietan presioaren balioa bera da. Erretxina likido egoeran dagoenean hutsunea eraginez, barnean dituen gas burbuiloak atera daitezke. Autoklabeetan, ohial bereziak erabiltzen dira soberan den erretxinak alde egin dezan.

Lan honetan erabili den materiala, prentsa beroan fabrikatu da. Prentsako presioa, autoklabekoa ez bezala, norabide bakarrekoa da, fabrikazio prozesuan aldeetarako fluxua eragiten duelarik. Fluxu nagusia, zuntzekiko elkarzuta den norabidean gertatzen da. Prentsan erretxinaren biskositatea baxua denean, presioa aplikatzeak aire burbuiloak erraz ateratzea ahalbidetzen du, baina erretxinaren fluxua eta honek arrastratutako zuntzena handia da. Aldiz, erretxinaren biskositatea oso altua bada, aldamenetarako fluxua txikia izango da baina burbuiloak ateratzea berriz zailagoa da. Ondorioz bi egoera hauen arteko konpromezua topatu behar da, aire burbuiloak egokiro kanporatzea ahalbidetuko duen eta fluxu onargarria eragingo duen presio eta temperatura zikloa definituz.

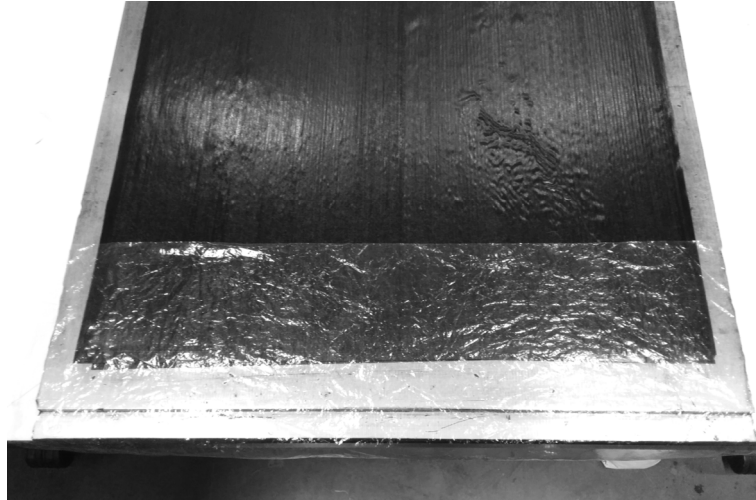
Gelifikazio puntua erretxina likido biskoso izatetik solido bigun eta elastikoa izatera pasatzen deneko puntua bezela definitzen da, hau da, biskositateak infiniturantz jotzen duen unea. Gelifikazioaren ondoren, ez da aldameneko fluxurik ematen eta ez dago moldeatutako produktuan aldaketarik egiterik. Beraz, gas burbuiloak atera ahal izateko presioa gelifikazio inguruan burutuko da, hemen erretxinaren biskositatea egokia baita erretxinaren fluxu handia ekiditeko gas burbuilak ateratzea eragotzi gabe.

Fabrikazioarako presioa (P) eta temperatura (T) zikloak definitzerakoan, fabrikatzaileak gelifikazio ondoren gomendatzen dituen 2 orduko ontze denbora, 180°C-ko ontze temperatura eta 7 bar-eko presioa erabili dira [80].

Plaka laminatuak fabrikatzeko presio eta temperatura kontrolatuko platerak dituen Metrotec etxeko prentsa erabili da, 3.5 Irudian irudikatzen den moduan.

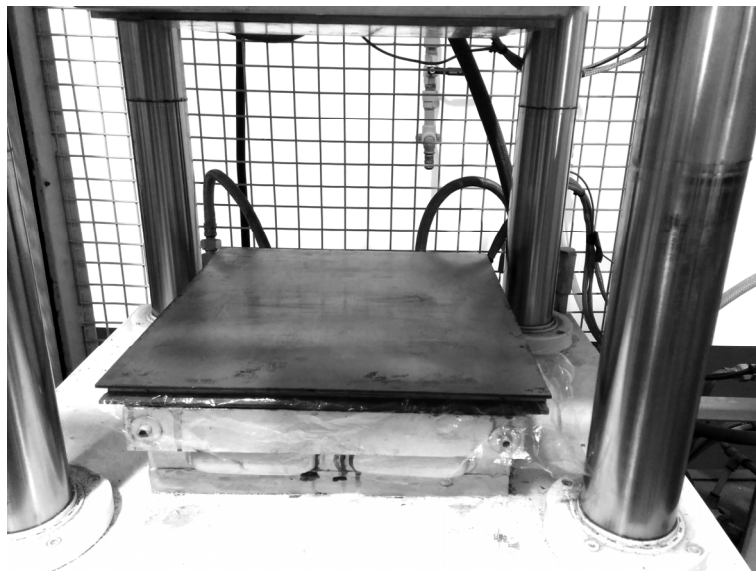
T300/F593 materialarentzat 16 laminako norabide bakarrekoko laminatuak, [0]₁₆, fabrikatu dira. Frekote erabili da desmoltatzaile bezala. Laminatuen pilaketa eta lerrokatzea burutzeko, aipatutako dimentsiotako 16 prepregak molde ireki baten beheko plateran

kokatu dira. Pilaketa prozesuaren erdian, 8. prepega kokatu ondoren, hasierako pitzadura eragiteko asmoz, teflon lamina bat barneratu da, plakaren zabalera osoan, 40 mm-ko sakoneran, 3.3 Irudian irudikatzen den moduan.



3.3 Irudia Teflon laminaren kokapena

Behin pilaketa burutu ondoren, prepregen gainean neurri bereko kuprezko plaka bat kokatzen da, emango den material fluxua errazte asmoz.



3.4 Irudia Molde itxia prentsan

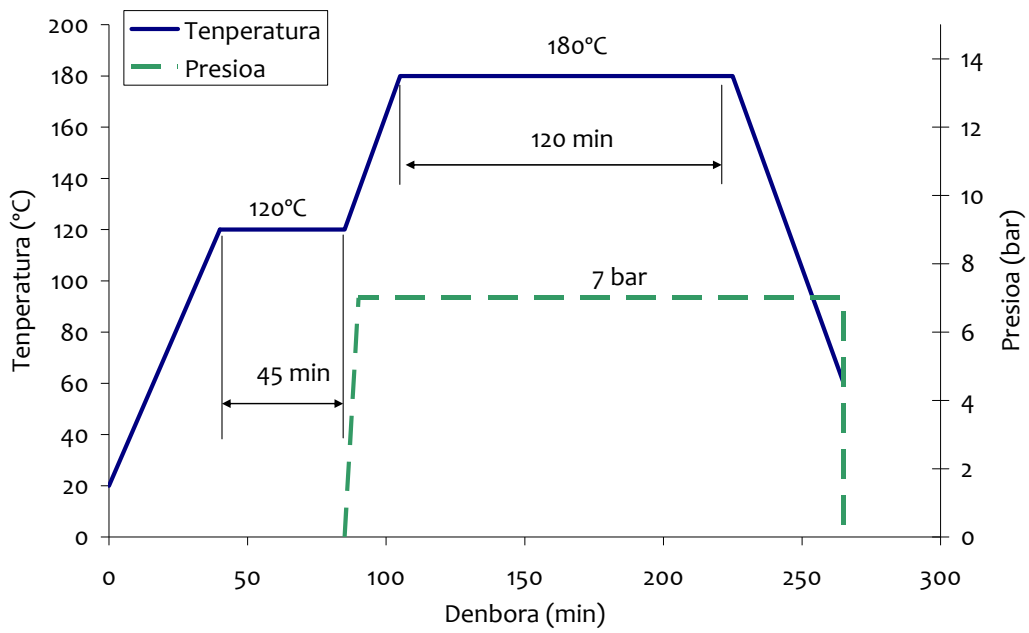
Behin moldea itxita, lehenengo trinkoketa burutzen da hotzean, 7 bar-eko 5 konpresio labur burutuz, prepregen arteko gasa neurri batean ateratzeko. Ondoren moldea prentsan barneratzen da, 3.5 Irudian irudikatzen den moduan, eta prentsa berotzen jartzen da 120°

temperatura lortu arte, berotze abiadura maximoa $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$ izanik eta presiorik aplikatu gabe.



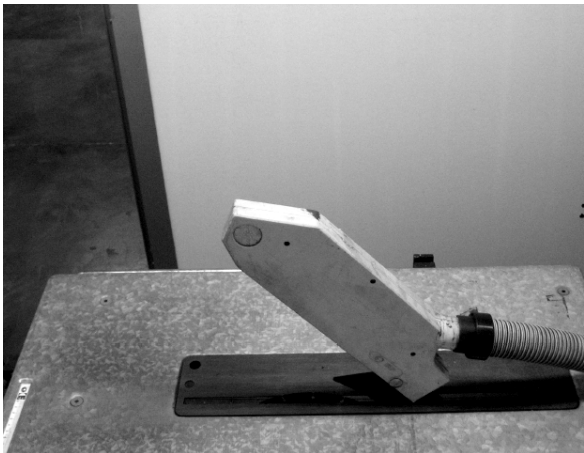
3.5 Irudia Prentsa Santec 30 t

Tarte honetan, temperaturak gora egiten duen bitartean, konpresio laburrak egiten dira, hauek ere 7 bar-ko presioraino burutzen direlarik. Behin 120°C -tan prentsaren platerak moldearekin kontaktuan direla baina presiorik ezarri gabe 45 minutuz mantentzen da gelifikaziora hel dadin. Behin 45 minutuak igaro ondoren, presioa aplikatzen zaio 7 bar-era iritsi arte. Materialaren trinkoketa eragiteko, presio hau zikloaren amaierararte mantentzen da. Presioak 7 bar-eko baliora heltzean temperatura 180°C -tara handitzen da, berotze abiadura maximoa kasu honetan ere $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$ izanik. 180°C -tan bi ordu igaro ondoren, hozte prozesua jartzen da martxan, $3^{\circ}\text{C}/\text{min}$ abiadura maximoarekin, 60°C iritsi arte. Hozte abiadura mugaren arrazoia, temperatura aldaketa azkarrago batek eragin ditzaken tentsioak ekiditea da. Hozte prozesuan presioa 7 bar-etan mantentzen da, temperatura 60°C izan arte. 3.6 Irudian azaldutako presio eta temperatura zikloa ikus daiteke.



3.6 Irudia Temperatura eta presio zikloa

Laminatuak fabrikatu ondoren, diamantezko zerra zirkular bat erabiliz moztu dira. Probeten zabalera homogenea izan dadin eta zerrak utz ditzazkeen arrakadurak kentzeko probetak Metkon etxeko Porcipol 300 leungailu batean leundu dira.



(a)

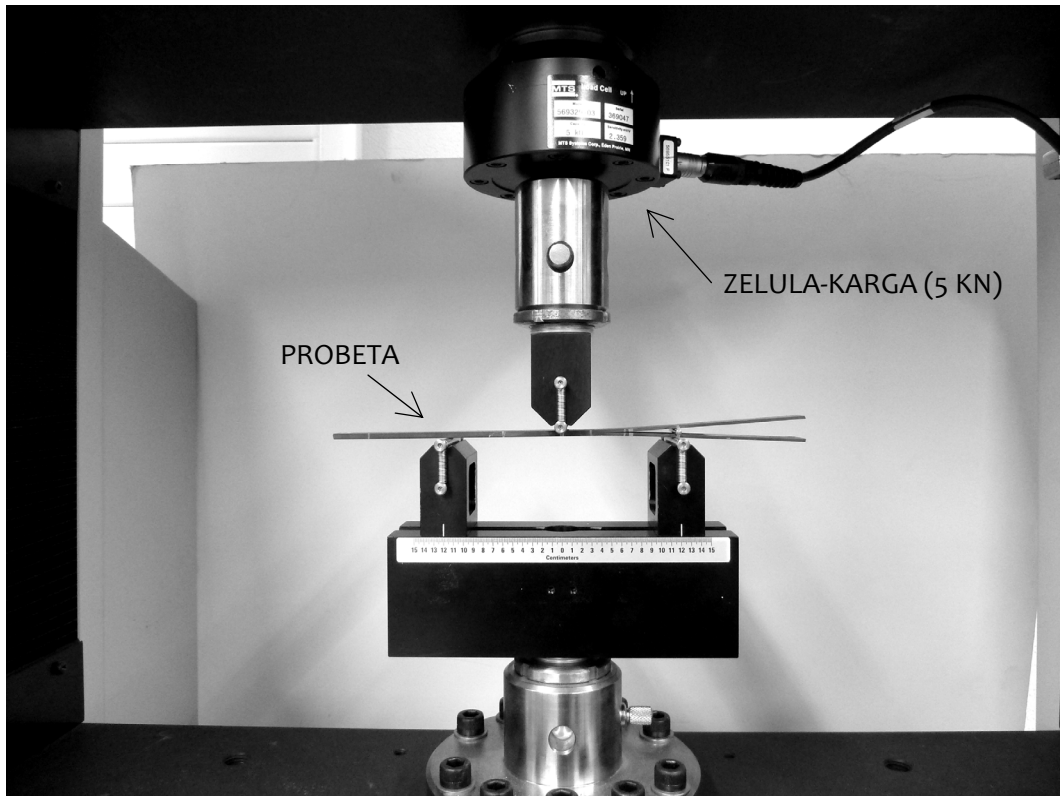


(b)

3.7 Irudia (a) Diamantezko zerra (b) Leungailua

3.4 TRESNERIA

Saiakuntza mekanikoak MTS Insight 100 KN-eko saiakuntza makina batean burutu dira, 3 puntuko makurdurarako tresneria erabiliz 3.8 Irudian ikus daitekenez. Makinak aplikatutako indarra neurtzeko zelula-karga 5 KN-ekoa da. Saiakuntzak egiterakoan desplazamenduaren abiadura definitu behar denez, desplazamendu kontrolatuko saiakuntzak direla esaten da.



3.8 Irudia MTS saiakuntza makina elektromekanikoa

4.

I/II MODU MISTOA AZTERTZEKO SAIKUNTZA: HURBILKETA ANALITIKOA

4.1 SARRERA

Konpositeetan, laminarteko haustura hutsegite modu ohikoenetako bat da. Deslaminazioa maiz modu mistoan ematen denez, modu nahasketa desberdinetan materialaren haustura zailtasuna ezagutzea beharrezkoa da [56,64,81].

2001ean, American Society for Testing and Materials (ASTM)-k, modu mistoko haustura zailtasuna karakterizatzeko araua argitaratu zuen. Estandarizatutako saiakuntza metodoari modu mistoko makurdura saiakuntza, *the mixed-mode bending* (MMB) deritzo [60]. Arauan proposatutako saiakuntza bankua, Crews eta Reeder-ek arestian proposatutako baten modifikazioa da [62]. MMB konfigurazioa askotan erabilia izan da [82-84].

Chen eta al-ek, MMB saiakuntza bankuaren aldaketa bat egin zuten, G ren kalkulua errezteko asmoz, palankaren pisuaren gaia saihesteko [85]. Blanco et al.-ek, palanka-besoaren distantzia zehaztasun hobearekin kalkulatzeko soluzio bat definitu zuten [86]. Tenchev-ek eta Falzon-ek, hurbilketa analitiko bat proposatu zuten, pitzadura habearen erditik haratago hedatzen denerako [87].

MMB saiakuntzan, modu I eta modu II-ren arteko erlazioa, modu-nahasketa alegia, konstante mantentzen da. Modu mistoko bukaerako kargadun haustura saiakuntzan *Mixed-Mode End Load Split test* (MMELS) [67], berriz, modu nahasketak pitzaduraren

luzerarekiko menpekotasuna du. Saiakuntza hau, bukaerako kargadun haustura saiakuntzaren, *End Loaded Split test* (ELS)-en aldaketa bat da, non laminarteko pitzadura, modu mistoan hedatzera behartuta dagoen. Saiakuntza honen inguruan, Hashemi et al.-ek [57] eta Kinloch et al.-ek [64] burututako lanak, Williams-ek [88] proposatutako habeen teoriarik oinarrituta daude. Lan horietan, hurbilketa analitiko desberdinak proposatzen dituzte MMELS saiakuntza karakterizatzeko. Blanco et al.-ek [67] habeen teoria egokia dela MMELS saiakuntza modelizatzeko frogatu zuten, pitzadura lodieran zentratuta badago.

I/II modu mistoko haustura aztertzeke asmoz, beste saiakuntza konfigurazioak proposatu dira. Hala nola, Habe landatu bikoitzeko saiakuntza ez simetrikoa, *Asymmetric double-cantilever beam* (ADCB), non pitzadura-planoa laminatuaren erdiko planotik at dagoen, pitzadura-puntan hasten den karga misto egoera bat sortuz [89-91]. Mangalgiri et al. [92]. ADCB aplikatzen lehenengoak izan ziren. The European Structural Integrity Society (ESIS) TC4 taldeak [93], saiakuntza konfigurazio hori aztertu zuen 90. hamarkadan. Ducept et al.-ek [94], beira zuntzez errefortzatutako epoxi matrizedun konpositeetan saiakuntzak burutu zituzten, eta lortutako emaitzak, emaitz analitikoekin eta numerikoekin alderatu zituzten. Bennati et al.-ek [95-97] hobetutako habeen teoriarik oinarritutako modelo bat garatu zuten Ducept et al.-ek aurretik burututako lan esperimentalean oinarrituta. Bonhomme et al.-ek [98] bi urratsen hedapen prozeduraren, (*Two-Step Extension Procedure*, TSEP) proposatu zuten. Prozedura hori, pitzadura-birtualaren itxiera teknikaren, (*Virtual Crack Closure Technique*, VCCT)-ren alternatiba gisa erabiltzen da. Mollón et al.-ek [99] ADCB-ren bidez lortutako G ren emaitz esperimentalak, eraldatutako habeen teoriarik oinarritutako metodo analitikoaz murriztutako emaitzekin eta TSEP metodoaren bidez lortutako zenbakizko emaitzekin alderatu zituzten. Aztertutako metodo guztien artean adostasuna aurkitu zuten.

Rikards et al.-ek [100] 1998an, trakzio saiakuntza trinkoa, (*Compact Tension Test*, CTS) konfigurazioa erabili zuten modu mistoko haustura zailtasuna ikertzeke. Jamali et al.-ek [101], 2015ean CTS saiakuntzaren bidez ere polimero puru baten modu mistoko haustura aztertu zuten eta hainbat faktoreen eragina haustura zailtasunean.

Tracy et al.-ek [102] habe bakarreko lau puntuko makurdura saiakuntza, (*Single-Leg Four Point Bending Test*, SLFPB) proposatu zuten modu mistoa aztertzeke.

Szekrenyes-ek I/II modu mistoa aztertzeke hiru saiakuntza konfigurazio desberdinak proposatu ditu: Bi aurretentsionatutako probetak, bata ENF saiakuntzan oinarrituta [49],

eta bestea ELS saiakuntzan oinarrituta [103]. Bi konfigurazio hauen ezaugarri nagusia honakoa da: I haustura modua lortzeko, altzairuzko arrabola bat pitzaduraren bi besoen artean sartzen da. Hirugarren proposamena, Szekrenyes-ek eta Uj-ek garatutakoa, habe gaineko makurdura saiakuntza da, *Over Leg Bending* (OLB), zeina habe bakarraren makurdura saiakuntzaren, *Single Leg Bending*, (SLB) ren aldaketa den, karga eszentrikoki aplikatuz.

Aliha et al.-ek [104], modu mistoa aztertzeke hiru puntuko makurdura saiakuntza erabiltzen zuten, baina modu mistoa lortzeko probetaren geometria aldatzen zuten, hau da, habe motako probetak izan beharrean, triangeluarrak eta zirkuluerdi-formakoak ziren. Probeta motak haustura zailtasunaren emaitzetan eragin handia zuela ondorioztatu zuten.

I/II modu mistoko saiakuntzak, konposite laminatuetan ez ezik, honako materialen haustura aztertzeke ere erabiltzen dira: (egurra [73,105-107], itsasgarrien bidez lotutako probetak [108-110], hezurak [111], grafenoa [112], eta polimero morteroa, [113]). Polimero morteroa zementu gabeko polimero bat da.

Kapitulu honetan, I/II haustura modu mistoa aztertzeke laminarteko haustura saiakuntza konfigurazio berri baten hurbilketa analitikoa aurkezten da. ENF-ren konfigurazioaren antzekoa da, baina probetan arrabola bat pitzaduraren bi besoen artean kokatzen da, modu mistoa eragiteke, **ENFR** [114,115]. Konfigurazio hau, arestian Szekrenyes-ek proposaturikoa da [49], arrabolaren kokapena euskarriaren gainean dagoeneko kasu bereziarentzat. Lan honetan, konfigurazioa orokortu egin da arrabolaren edozein kokapententzat.

Hurbilketa analitikoaren barruan, ENFR saiakuntzako haustura modu bakoitzari dagokion energia askatze tasaren hurbilketa analitikoa aurkezten da. Lortutako emaitzak William's - en moduen deskonposaketarekin [88] eta Szekrenyes-ek [49], arrabola euskarriaren gainean kokatuta dagoeneko konfigurazioarentzat aurkeztutakoekin alderatzen dira.

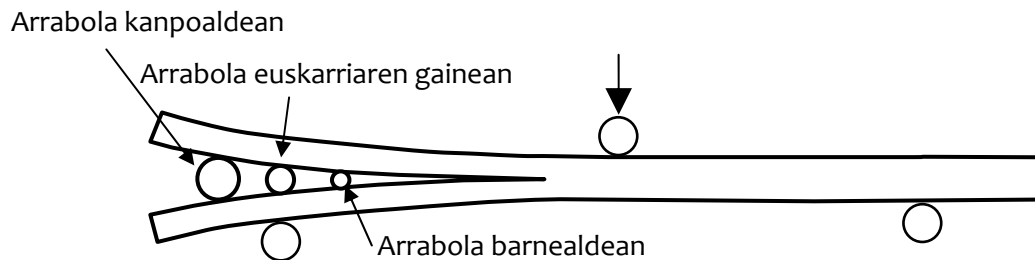
Modu mistoari dagokionean, modu nahasketaren analisi teorikoa garatzen da, saiakuntzaren parametro desberdinen arabera, hala nola, arrabolaren erradioa eta arrabolaren kokapena. Ondoren, G ren kalkuloaren zenbakizko balidazioa burutzen da, Bonhomme et al.-ek [98] proposatutako bi urratsen hedapen prozeduraren, *Two-Step Extension Procedure* (TSEP)-en bidez.

4.2 SAIKUNTZAREN DESKRIBAPENA

Modu mistoa aztertzeko saiakuntzari dagokionean hurrengo baldintzak betetzea komeni da:

- Modu ratio zabala lortzeko aukera izatea
- Tresneria sinplea erabiltzea
- Datu esperimentalak modu errezean aztertu ahal izatea
- Material desberdinentzat aplikagarria izatea

Lan honetan proposatzen den saiakuntza konfigurazioa baldintza horiek betetzeko asmoz garatzen da. Saiakuntzaren konfigurazioa ENF saiakuntzan oinarrituta dago. Modu mistoa lortzearen, pitzaduraren bi besoen artean arrabola bat sartzen da. II modua kanpoko kargaren bidez lortzen da, eta I modua, arrabola sartzeagatik pitzadura irekitzean lortzen da, 4.1 Irudian irudikatzen den moduan. Szekrényes-ek [49] arrabola euskarriaren gainean dagoeneko kasu partikularra aztertu du. Lan honetan, arrabolaren kokapena pitzaduraren kanpoaldean eta barrualdean aztertuz saiakuntzaren azterketa orokortzen da 4.1 Irudian ikus daitekeen moduan.



4.1 Irudia ENFR saiakuntzaren Deskribapena

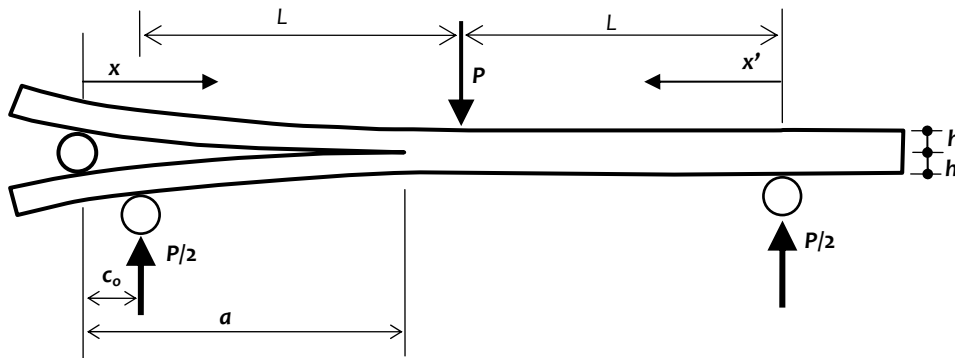
Hurbilketa analitikoan, makurdura errotazioak txikiak direneko hipotesia kontuan hartzen da. Probeta eta euskarrien kontaktu puntuen aldaketa dela eta gertatzen den argiaren murrizketa arbuaitu daiteke, lan honetan euskarrien arrabolen erradioa 2.5 mm-koa delako [55]. Arrabola eta probetaren arteko marruskadura ere ez da kontuan hartu.

4.3 PITZADURA BARNEKO INDARRAK ETA KONPLIANTZA

4.3.1 Arrabola kanpoaldean kokatuta

a) Arrabolak eragindako indarra

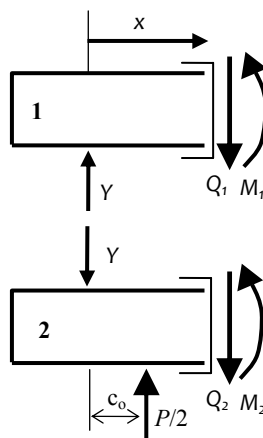
4.2 Irudian arrabola kanpoaldean kokatuta dagoenean saiakuntzaren antolaketa irudikatzen da. Arrabolaren kokapena zehazteko c_0 parametroa erabili da.



4.2 Irudia Arrabola kanpoaldean kokatuta

Lan honetan, pitzadura probetaren erdiko planoan dagoela kontsideratu da, beraz $h_1 = h_2 = h$ dira eta pitzaduraren bi besoen inertzia momentuak eta gainazal azalerak ere berdinak dira.

Arrabola, desplazamendua sortzen duten Y indarrez ordezkaturik, eta $P/2$ euskarriko erreakzioa izanik, 4.3 n pitzadura guneko momentu makurtzaileak eta indar ebakitzailak irudikatzen dira.

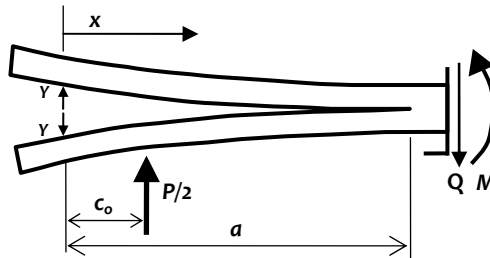


4.3 Irudia Arrabola kanpoaldean kokatuta, pitzadura guneko indarrak eta momentuak

Pitzaduraren goiko besoa 1 zenbakiz izendatu da eta beheko besoa, berriz, 2 zenbakiz. Pitzadura guneko barne indar ebakitzailak eta momentu makurtzaileak honakoak dira

$$\begin{aligned}
 0 < x < c_0 \\
 Q_1 &= Y & M_1 &= Yx \\
 Q_2 &= -Y & M_2 &= -Yx \\
 \\
 c_0 < x < a \\
 Q_1 &= Y & M_1 &= Yx \\
 Q_2 &= \left(\frac{P}{2} - Y\right) & M_2 &= \left(\frac{P}{2} - Y\right)x - \frac{P}{2}c_0
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

Makurdura momentuak eta indar ebakitzzaileak pitzadura gabeko gunean, 4.4 Irudian ikus daitezke.



4.4 Irudia Indarrak pitzadura gabeko gunean

Oreka ekuazioak aplikatuz honako hau lortzen da

$$\begin{aligned}
 a < x < c_0 + L \\
 Q &= \frac{P}{2} & M &= \frac{P}{2}(x - c_0)
 \end{aligned}
 \tag{4.2}$$

Indarrak eta momentuak probetaren beste aldean honakoak dira

$$\begin{aligned}
 0 < x' < L \\
 Q &= -\frac{P}{2} & M &= \frac{P}{2}x'
 \end{aligned}
 \tag{4.3}$$

Arrabolak eragiten duen indarra Castigliano-Engesser-en teorema [116] aplikatuz lor daiteke, honako berdintza idatziz

$$\frac{\partial U^*}{\partial F_i} = \int_L \frac{M}{E_j I} \frac{\partial M}{\partial F_i} dx + \int_L \frac{6Q}{5G_{LT} A} \frac{\partial Q}{\partial F_i} dx = \delta_i
 \tag{4.4}$$

Non U^* deformazio energia osagarria, F_i aplikaturiko indar independentea eta δ_i indar horren aplikazio puntuaren desplazamendua indar horren norabidean direlarik, hurrenez hurren.

Arrabolak eragindako indarren arteko desplazamendu erlatiboa $2R$ da, R arrabolaren erradioa izanik. Hortaz, deformazio energia osagarriaren deribatua Y indar hiperestatikoarekiko honakoa da

$$\frac{\partial U^*}{\partial Y} = 2R \quad (4.5)$$

(4.1) ekuazioko momentuak eta indar ebakitzailiaz gain beraien deribatu partzialak (4.4) ekuazioko integraletan ordezkatzuz barne indarra honakoa da:

$$Y = \frac{2R + P \left[\frac{(a - c_o)^2 (2a + c_o)}{E_f b h^3} + \frac{3(a - c_o)}{5G_{LT} b h} \right]}{\frac{8a^3}{E_f b h^3} + \frac{12a}{5G_{LT} b h}} \quad (4.6)$$

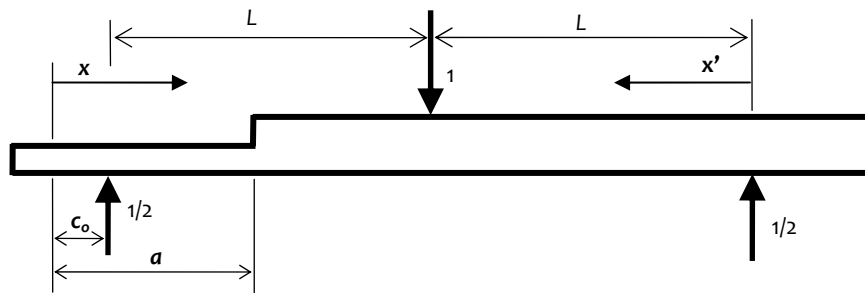
a pitzadura luzera, E_f makurdura modulua, G_{LT} laminatuaren plano-barneko ebakidura modulua, zeina laminatuaren plano-kanpoko ebakidura modulua, G_{LT} -ren, berdina kontsideratzen den, materialak zeharkako isotropia duela suposatuz, R arrabolaren erradioa, b probetaren zabalera eta $2h$ probetaren lodiera osoa. Makurdura soilik kontsideratuz, Y indarra honakoa da

$$Y = \frac{R E_f b h^3}{4 a^3} + \frac{P(a - c_o)^2 (2a + c_o)}{8a^3} \quad (4.7)$$

(4.7) ekuazioaren arabera, Y indarra beti positiboa izango da, arrabolaren edozein kokapenentzat.

b) Indarraren aplikazio puntuaren desplazamendua

Barne indarraren balioa lortu ondoren, Engesser-Castiglianoren teorema eta indar unitarioaren metodoa erabili dira indarraren aplikazio puntuaren desplazamendua kalkulatzeko. Y indarra hiperestatikoa izanik, oinarritzko sistema, hasierakoa arrabola gabe izango da. Izan ere, indar unitarioa aplikatzean, pitzaduraren goiko besoa ez da kontutan hartu indarrak gabeko habe landatua baita. Oinarritzko sistema 4.5 Irudian irudikatzen da.



4.5 Irudia Indar unitarioa sistema estatiko determinatuan

Beraz, momentu eta indar ebakitzailen deribatuak tartean bakoitzean honakoak dira:

$$\begin{aligned}
 & c_0 < x < a \\
 & q_2 = \frac{1}{2} \quad m_2 = \frac{1}{2}(x - c_0) \\
 & a < x < c_0 + L \\
 & q = \frac{1}{2} \quad m = \frac{1}{2}(x - c_0) \\
 & 0 < x' < L \\
 & q = -\frac{1}{2} \quad m = \frac{1}{2}x'
 \end{aligned} \tag{4.8}$$

Indarraren aplikazio puntuaren desplazamendua kalkulatzeko Engesser-Castiglianoren teorema honakoa da:

$$\delta = \int_0^a \frac{M_1 m_1}{E_f I_1} dx + \int_0^a \frac{6Q_1 q_1}{5G_{LT} A_1} dx + \int_a^{c_0+L} \frac{Mm}{E_f I_0} dx + \int_a^{c_0+L} \frac{6Qq}{5G_{LT} A_0} dx + \int_a^L \frac{Mm}{E_f I_0} dx' + \int_a^L \frac{6Qq}{5G_{LT} A_0} dx' \tag{4.9}$$

(4.1), (4.2), (4.3) eta (4.8) ekuazioko momentuak, indar ebakitzailak eta beraien deribatuak (4.9) ekuazioan ordezkaturik, desplazamendua honakoa da:

$$\delta = \frac{1}{8E_f b h^3} \left[P(7(a - c_0)^3 + 2L^3) + 8Y(3a^2 c_0 - 2a^3 - c_0^3) \right] + \frac{3}{5G_{LT} b h} \left[\frac{P}{4}(a - c_0 + 2L) - Y(a - c_0) \right] \tag{4.10}$$

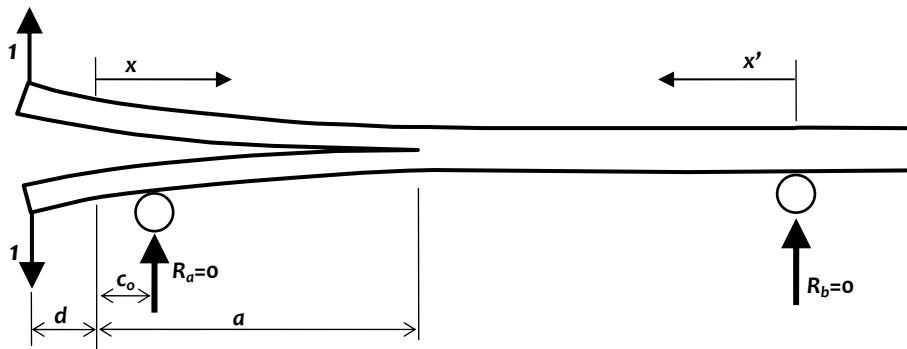
(4.7) ekuazioko Y indarraren adierazpena (4.10) ekuazioan ordezkaturik, eta soilik makurduraren eragina kontutan hartuz, aplikazio puntuaren desplazamendua honakoa da

$$\delta = \frac{P}{8E_f b h^3} \left[\frac{(3a^3 + c_0^3 + 3ac^2)(a - c_0)^3}{a^3} + 2L^3 \right] - \frac{R(a - c_0)^2(2a + c_0)}{4a^3} \tag{4.11}$$

Kargarik gabe, hau da $P = 0$ denean, arrabola sartzean, indarraren aplikazio puntuaren desplazamendua negatiboa da, (4.11) ekuazioko bigarren gaien ikusten den moduan. Kontuan hartu den indar unitarioa beherantz denez, desplazamendu negatiboa gorantz da.

c) Pitzaduraren bi besoaren arteko desplazamendu erlatiboa

Arrabola pitzaduran sartzean, bi besoak banatzen dira. Bien arteko desplazamendu erlatiboa kalkulatu da beraien arteko kontaktua gertatzen denentz aztertzearen. Kontrako noranzkoa duten bi indar unitario aplikatuko dira, sistema estatiko determinatuan, 4.6 Irudian ikusten den moduan. Arrabola sartuta dagoen kokapena x distantziaren jatorria da. Hortik, probetaren muturraraino dagoen distantziari d izena eman zaio. Distantzia hau aldagaitzat hartuko da, bi besoak elkartzekotan zenbateko d distantziara egingo duten kalkulatzeko.



4.6 Irudia Desplazamendu erlatiboa kalkulatzeko oinarriko sistema

Pitzadura gunean deribatuak honakoak dira

$$\begin{aligned} 0 < x < a \\ q_1 &= 1 & m_1 &= x + d \\ q_2 &= -1 & m_2 &= -(x + d) \end{aligned} \quad (4.12)$$

(4.1) eta (4.12) ekuazioko momentuak, indar ebakitzailak eta beraien deribatuak (4.9) ekuazioko Engesser-Castiglianoren teoremako adierazpenean ordezkaturik, pitzaduraren bi besoaren arteko desplazamendu erlatiboa honakoa da

$$\delta_{rel} = -P \left[\frac{(a - c_o)^2 (2a + c_o + 3d)}{E_f b h^3} + \frac{3(a - c_o)}{5G_{LT} b h} \right] + Y \left[\frac{4a^2 (2a + 3d)}{E_f b h^3} + \frac{12a}{5G_{LT} b h} \right] \quad (4.13)$$

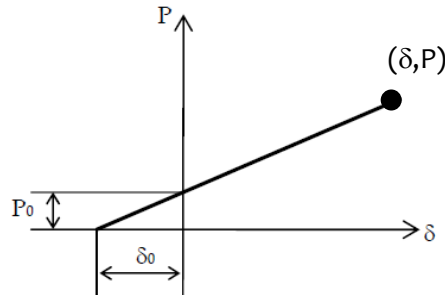
(4.7) ekuazioko Y indarraren adierazpena (4.13) ekuazioan ordezkaturik, eta soilik makurduraren eragina kontutan hartuz, desplazamendu erlatiboa honakoa da

$$\delta_{rel} = P \left[\frac{3(a-c_0)^2 c_0 d}{2aE_f b h^3} \right] + R \left(\frac{2a+3d}{a} \right) \quad (4.14)$$

Desplazamendu erlatiboa positiboa bada, pitzaduraren bi besoak aldentzen dira. Desplazamendu erlatiboa zero, edo negatiboa bada, orduan bi besoen arteko kontaktua gertatzen da. (4.14) ekuazioaren arabera, desplazamendu erlatiboa $a > c_0$ denean positiboa izango denez, ez da pitzaduraren bi besoen arteko kontaktua gertatuko.

d) Konpliantza

Arestian aipatu den bezala, arrabola pitzaduran sartzean, kargarik gabe, hasierako desplazamendu negatiboa gertatzen da kargaren aplikazio puntuan. Are gehiago, desplazamendua zero denean, karga positibo bat dago, 4.7 Irudian ikus daitekeen moduan.



4.7 Irudia Karga-Desplazamendu grafikoa

Hasierako baldintza horiek, desplazamenduaren (4.11) ekuazioan $P = 0$ eta $\delta = 0$ ordezkatzuz lor daitezke, honakoak izanik:

$$\begin{aligned} \delta_0 &= -\frac{R(a-c_0)^2(2a+c_0)}{4a^3} \\ P_0 &= -\frac{R(a-c_0)^2(2a+c_0)}{4a^3} 8E_f b h^3 \left[\frac{(a-c_0)^3(3a^3+3ac_0^2+c_0^3)}{a^3} + 2L^3 \right]^{-1} \end{aligned} \quad (4.15)$$

Karga-desplazamendu kurbako 4.7 Irudiaren arabera, konpliantza hurrengo eran adieraz daiteke

$$C = \frac{\delta}{P-P_0} = \frac{\delta_0}{P_0} = \frac{\delta-\delta_0}{P} \quad (4.16)$$

δ_0 balore negatiboa izanik. (4.15) ekuazioko adierazpenak, (4.16) ekuazioan ordezkatzuz, konpliantza honakoa da:

$$C = \frac{1}{8E_f b h^3} \left[\frac{(a - c_o)^3 (3a^3 + 3ac_o^2 + c_o^3)}{a^3} + 2L^3 \right] \quad (4.17)$$

(4.17) ekuazioaren arabera, konpliantzak ez du arrabolaren erradioarekiko menpekotasunik.

4.3.2 Arrabola euskarriaren gainean kokatuta

Arrabola euskarriaren gainean kokatuta dagoeneko kasu bereziari dagokionez, hau da, $c_i = c_o = 0$ denean, (4.6) eta (4.28) ekuazioetako Y indarra berdina da, honakoa delarik

$$Y = \frac{P}{4} + \frac{R/2}{\left(\frac{2a^3}{E_f b h^3} + \frac{3a}{5G_{LT} b h} \right)} = \frac{P}{4} + \frac{R E_f b h^3}{4 a^3} \left[1 + \frac{3}{10} \left(\frac{h}{a} \right)^2 \frac{E_f}{G_{LT}} \right]^{-1} \quad (4.18)$$

$R = 0$ bada, saiakuntza ENF saiakuntzan bihurtzen da, eta $Y = P/4$ da, ENF saiakuntzaren barne indarrarekin bat datorrelarik [55].

Indarraren aplikazio puntuaren desplazamenduari dagokionez, $c_i = c_o = 0$ denean, (4.10) eta (4.31) ekuazioek emaitz berdina ematen dute, honakoa izanik

$$\delta = \frac{1}{8E_f b h^3} \left[P(7a^3 + 2L^3) - 16Ya^3 \right] + \frac{1}{20G_{LT} b h} \left[P(3a + 6L) - 12Ya \right] \quad (4.19)$$

(4.18) ekuazioko Y indarra, (4.19) ekuazioan ordezkatuz, desplazamendua honakoa izango da

$$\delta = P \left[\left(\frac{3a^3 + 2L^3}{8E_f b h^3} \right) + \left(\frac{3L}{10G_{LT} b h} \right) \right] - \frac{R}{2} \quad (4.20)$$

(4.13) eta (4.33) ekuazioetan $c_i = c_o = 0$ ordezkatuz, pitzaduraren bi besoen arteko desplazamendua erlatiboa honakoa da

$$\delta_{rel}(c_i = c_o = 0) = -P \left[\frac{a^2(2a + 3d)}{8E_f b h^3} + \frac{3a}{5G_{LT} b h} \right] + Y \left[\frac{4a^2(2a + 3d)}{E_f b h^3} + \frac{12a}{5G_{LT} b h} \right] \quad (4.21)$$

(4.14) eta (4.34) ekuazioetan $c_i = c_o = 0$ ordezkatuz, soilik makurduraren eragina kontuan hartuz, desplazamendu erlatiboa hurrengoa da

$$\delta_{rel} = R \left(\frac{2a + 3d}{a} \right) \quad (4.22)$$

(4.22) ekuazioaren arabera, desplazamendu erlatiboa beti positiboa da. Ondorioz, edozein d distantziarako bi besoak beti aldentuta mantenduko dira.

Hasierako desplazamendua eta hasierako indarra, desplazamenduaren (4.20) ekuaziotik lor daitezke honakoak direlarik

$$\begin{aligned} \delta_0 &= -\frac{R}{2} \\ P_0 &= \frac{R}{2} \left(\frac{3a^3 + 2L^3}{8E_f b h^3} + \frac{3L}{10G_{LT} b h} \right)^{-1} \end{aligned} \quad (4.23)$$

(4.23) ekuazioko adierazpenak, (4.16) ekuazioan ordezkatuz, arrabola euskarriaren gainean dagoenean, saiakuntzaren konpliantza honakoa da

$$C = \frac{3a^3 + 2L^3}{8E_f b h^3} + \frac{3L}{10G_{LT} b h} \quad (4.24)$$

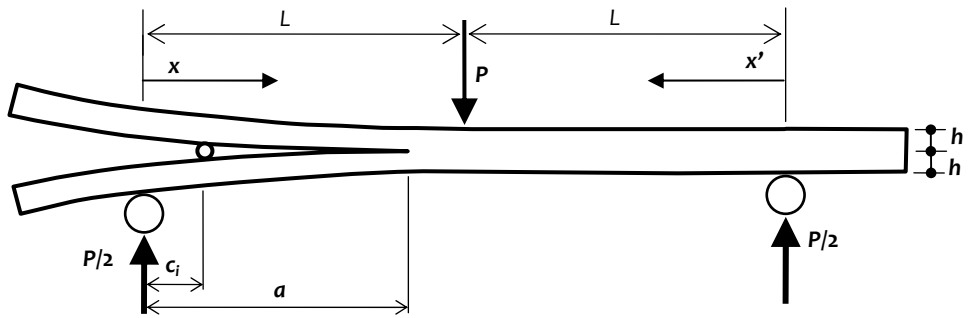
(4.24) ekuazioaren arabera, arrabola euskarriaren gainean dagoenean saiakuntzaren konpliantza eta ENF saiakuntzaren konpliantza berdinak dira eta ez dute arrabolaren erradioarekiko menpekotasunik. Pitzaduraren luzera isolatu daiteke honakoa izanik

$$a = \left(\frac{8E_f b h^3}{3} C - \frac{2}{3} L^3 - \frac{4E_f h^2 L}{5G_{LT}} \right)^{1/3} \quad (4.25)$$

4.3.3 Arrabola barnealdean kokatuta

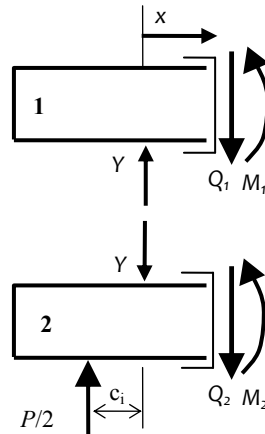
a) Arrabolak eragindako indarra

Kasu honetan, arrabolaren kokapena definitzeko c_1 erabili da, 4.8 Irudian irudikatzen den moduan.



4.8 Irudia Arrabola barnealdean kokatuta

Pitzaduraren goiko besoa 1 zenbakiz izendatu da eta beheko besoa, berriz, 2 zenbakiz.



4.9 Irudia Arrabola barnealdean kokatuta pitzadura guneko barne indar eta momentuak

Momentuak eta indarrak pitzadura gunean, 4.9 Irudiaren arabera, honakoak dira

$$0 < x < c_i$$

$$Q_1 = 0 \quad M_1 = 0$$

$$Q_2 = \frac{P}{2} \quad M_2 = \frac{P}{2}x$$

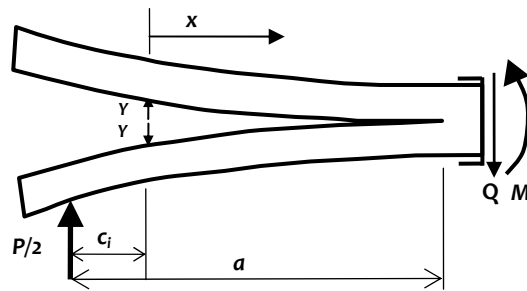
(4.26)

$$c_i < x < a$$

$$Q_1 = Y \quad M_1 = Y(x - c_i)$$

$$Q_2 = \left(\frac{P}{2} - Y \right) \quad M_2 = \frac{P}{2}x - Y(x - c_i)$$

Makurdura momentuak eta indar ebakitzailak pitzadura gabeko gunean, 4.10 Irudian ikus daitezke.



4.10 Irudia Arrabola barnealdean kokatuta, pitzadurarik gabeko gunean barne indar eta momentuak Momentuak eta indarrak pitzadurarik gabeko gunean, eta probetaren beste erdialdean honakoak dira

$$\begin{aligned}
 a < x < L \\
 Q &= \frac{P}{2} & M &= \frac{P}{2}x \\
 0 < x' < L \\
 Q &= -\frac{P}{2} & M &= \frac{P}{2}x'
 \end{aligned}
 \tag{4.27}$$

Aurreko atalean jarraitutako prozeduraz, Y barne indarra hurrengo eran adieraz daiteke:

$$Y = \frac{2R + \frac{P(a-c_i)^2(2a+c_i)}{E_f b h^3} + \frac{3P(a-c_i)}{5G_{LT}bh}}{\frac{8(a-c_i)^3}{E_f b h^3} + \frac{12(a-c_i)}{5G_{LT}bh}}
 \tag{4.28}$$

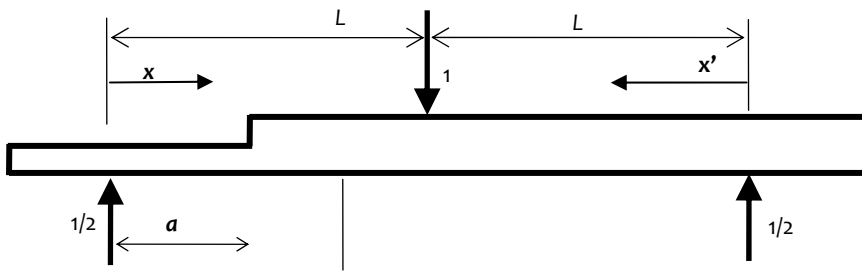
akurdura soilik eraginak kontsideratuz honakoa da:

$$Y = \frac{R}{4} \frac{E_f b h^3}{(a-c_i)^3} + \frac{P(2a+c_i)}{8(a-c_i)}
 \tag{4.29}$$

Y indarra beti positiboa da arrabolaren edozein kokapenarentzat, $a > c_i$ delako, 4.8 Irudian ikus daitekeen moduan.

b) Indarraren aplikazio puntuaren desplazamendua

Indar unitarioa aplikatzean, pitzaduraren goiko besoa ez da kontutan hartu indarririk gabeko habe landatua baita. Arrabola barnealdean kokatuta dagoenean, oinarritzko sistema 4.11 Irudian irudikatzen da.



4.11 Irudia Indar unitarioa sistema estatiko determinatuan, arrabola barnealdean dagoenean

Momentuen eta indar ebakitzailen deribatuak honakoak dira tarte bakoitzean

$$\begin{aligned}
 &0 < x < a \\
 &q_2 = \frac{1}{2} \quad m_2 = \frac{1}{2}x \\
 &a < x < L \\
 &q = \frac{1}{2} \quad m = \frac{1}{2}x \\
 &0 < x' < L \\
 &q = -\frac{1}{2} \quad m = \frac{1}{2}x'
 \end{aligned} \tag{4.30}$$

(4.26), (4.27) eta (4.30) ekuazioko momentuak, indar ebakitzailak eta beraien deribatuak Castigliano-Engesser teoremako (4.4) ekuazioan ordezkaturik, indarraren aplikazio puntuaren desplazamendua honakoa da:

$$\delta = \frac{1}{8E_f bh^3} \left[P(7a^3 + 2L^3) - 8Y(a - c_i)^2(2a + c_i) \right] + \frac{1}{20G_{LT} bh} \left[P(3a + 6L) - 12Y(a - c_i) \right] \tag{4.31}$$

(4.29) ekuazioko Y indarraren adierazpena (4.31) ekuazioan ordezkaturik, eta soilik makurduraren eragina kontutan hartuz, desplazamendu erlatiboa honakoa da

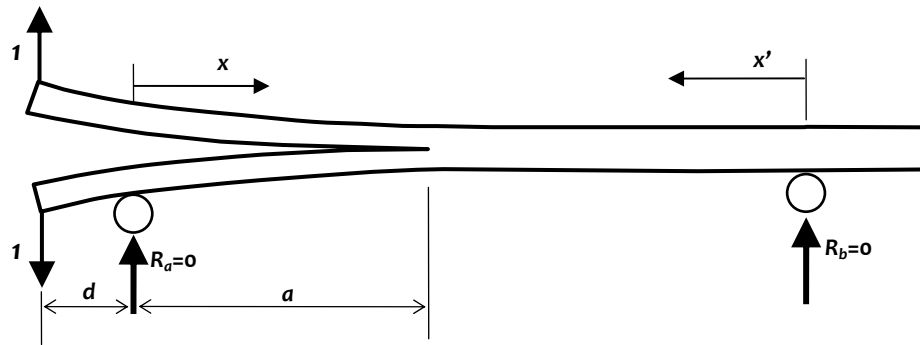
$$\delta = \frac{P}{8E_f bh^3} (3a^3 + 2L^3 + c_i^3 + 3ac_i^2) - \frac{R(2a + c_i)}{4(a - c_i)} \tag{4.32}$$

(4.32) ekuazioaren arabera, kargarik gabe arrabola sartzean hasierako desplazamendua negatiboa izango da eta beraz, gorantz da.

c) Pitzaduraren bi besoen arteko desplazamendu erlatiboa

Kontrako noranzkoa duten bi indar unitario aplikatuko dira, pitzaduraren habe bakoitzean, beraien arteko desplazamendu erlatiboa kalkulatzeko asmoz, 4.12 Irudian ikus daitekeen

moduan. Kasu honetan, d distantzia probetaren muturretik euskarriraino dagoen distantzia bezala definitzen da. Indar unitarioaren teorema aplikatzean, oinarritzko sistema, 4.11 Irudian irudikatzen dena bezalakoa da.



4.12 Irudia Oinarritzko sistema, arrabola barnealdean dagoenean

Pitzadura gunean deribatutak (4.30) ekuazioak dira. (4.26) eta (4.12) ekuazioko indarrak eta momentuak Castigliano-Engesser teoremako (4.4) ekuazioan ordezkaturik, pitzaduraren bi aldean arteko desplazamendu erlatiboa honakoa da:

$$\delta_{rel} = -P \left[\frac{a^2(2a+3d)}{E_f b h^3} + \frac{3a}{5G_{LT} b h} \right] + Y \left[\frac{4(a-c_i)^2(2a+c_i+3d)}{E_f b h^3} + \frac{12(a-c_i)}{5G_{LT} b h} \right] \quad (4.33)$$

(4.29) ekuazioko Y indarraren adierazpena (4.33) ekuazioan ordezkaturik, eta soilik makurduraren eragina kontutan hartuz, desplazamendu erlatiboa honakoa da

$$\delta_{rel} = -P \left[\frac{c_i [3a(c_i+d) + c_i(c_i+3d)]}{2E_f b h^3} \right] + R \left(\frac{2a+c_i+3d}{a-c_i} \right) \quad (4.34)$$

Arrabola barnealdean kokatuta dagoenean, beraz, (4.34) ekuazioaren arabera, $\delta_{rel} = 0$ izan daiteke eta hori izango da kontaktua izateko baldintza. Hemendik, 4.12 Irudian agertzen den d distantzia kritiko bat definitu daiteke honakoa hau izanik

$$d_{interf} = \frac{c_i^2(-a+c_i)(3a+c_i)P + 2b(2a+c_i)E_f h^3 R}{3(a-c_i)c_i(a+c_i)P - 6E_f b h^3 R} \quad (4.35)$$

Hortaz, $d < d_{interf}$ bada, ez da kontakturik gertatuko pitzaduraren bi besoen artean, $d > d_{interf}$ bada, berriz, bai. Kontaktua gertatzen denean, hurbilketa analitiko ez da baliogarria.

d) Konpliantza

Karga eta desplazamenduko hasierako baldintzak, aplikazio-puntuaren desplazamenduko (4.32) ekuazioan $P = 0$ eta $\delta = 0$ ordezkatzuz lor daitezke, honakoak izanik

$$\begin{aligned}\delta_0 &= -\frac{R(2a + c_i)}{4(a - c_i)} \\ P_0 &= \frac{2RE_f b h^3 (2a + c_i)}{(a - c_i)(3a^3 + c_i^3 + 2L^3 + 3ac_i^2)}\end{aligned}\quad (4.36)$$

(4.36) ekuazioko hasierako balioak, (4.16) ekuazioan ordezkatzuz, arrabola kanpoaldean dagoenean konpliantza honakoa da

$$C = \frac{3a^3 + 2L^3 + c_i^3 + 3ac_i^2}{8E_f b h^3}\quad (4.37)$$

Kasu honetan, aurreko kasuan gertatzen zen bezala, konpliantzak ez du arrabolaren erradioarekiko menpekotasunik.

4.4 ENERGIA ASKATZE TASA

Termodinamikaren lehenengo printzipioaren arabera, pitzadura-hedapen infinitesimal batean, energiaren oreka honakoa da:

$$dW = dU + Gbda\quad (4.38)$$

Non dW kanpoko indarrek egiten duten indarra den, dU deformazio energiaren aldaketa, G pitzaduraren hedapena gertatzeko behar den gainazal unitateko energia, b pitzadura gunean probetaren zabalera, eta da pitzadura hedapenaren diferentziala. Kanpoko indarrek F_i egiten duten lan diferentziala, dagozkien desplazamenduen δ_i norabideetan, $dW = F_i d\delta_i$ da, indize errepikatuen irizpidea kontuan hartuz. Hortaz, (4.38) ekuazioa:

$$dU = F_i d\delta_i - Gbda\quad (4.39)$$

Nahiz eta pitzaduraren hedapena prozesu itzulezina izan, aldaketa elemental batean, deformazio energia diferentzial zehatza dela suposatuko da. Bestalde, (4.39) ekuazioaren arabera, egoera aldagaiak δ_i eta a dira, eta ondorioz:

$$dU = \frac{\partial U}{\partial \delta_i} d\delta_i + \frac{\partial U}{\partial a} da \quad (4.40)$$

(4.39) eta (4.40) ekuazioetako lehenengo gaiak erkatuz gero, $\partial U / \partial \delta_i = F_i$ lortzen da, gai hori Castiglianoren lehenengo teorema izanik. Bigarren gaiak erkatuz:

$$G = -\frac{1}{b} \left(\frac{\partial U}{\partial a} \right)_{\delta_i = \text{cte}} \quad (4.41)$$

Beste alde batetik U^* deformazio energia osagarria honako eran definitzen da:

$$U^* = F_i \delta_i - U \quad (4.42)$$

(4.42) ekuazioa deribatuz eta energiaren orekaren (4.39) ekuazioan ordezkatur:

$$dU^* = \delta_i dF_i + G b da \quad (4.43)$$

Kasu honetan, egoera aldagaiak F_i eta a dira, ondorioz:

$$dU^* = \frac{\partial U^*}{\partial F_i} dF_i + \frac{\partial U^*}{\partial a} da \quad (4.44)$$

(4.43) eta (4.44) ekuazioetako lehenengo gaiak erkatuz gero, (4.4) ekuazioko Engesser-Castiglianoren teorema lortzen da. Bigarren gaiak erkatuz:

$$G = \frac{1}{b} \left(\frac{\partial U^*}{\partial a} \right)_{F_i = \text{cte}} \quad (4.45)$$

Kasu honetan bi indar dira lana egiten dutenak: Y eta P . Y indarrak egindako lana arrabolak inposatzen duen deformazio finituari dagokio. P indarrak egindako lana ohiko karga aplikazioari dagokiona da. Gainera, Y indarrak P -rekiko menpekotasuna du. (4.45) ekuazioaren arabera, G zehazteko, deformazio energia osagarria erabili behar da, indarrak direlako egoera aldagaiak. Sistema elastiko lineal batean, deformazio energia osagarria eta deformazio energia berdinak dira. Makurdura eta indar ebakitzaila jasaten duen habearen kasuan:

$$U^*(F_i, a) = \frac{1}{2} \int_l \frac{M^2}{E_f I} dx + \frac{1}{2} \int_l \frac{6Q^2}{5G_{LT} A} dx \quad (4.46)$$

Pitzadura luzerarekiko deribatua kalkulatzean, limiteek parametro horrekiko menpekotasuna dutenez, Leibniz-en erregela egokia da [117]. Erregela honek honakoa ezartzen du integrala z parametroarekiko deribatzen denean:

$$\frac{\partial}{\partial z} \int_{a(z)}^{b(z)} f(x, z) dx = \int_{a(z)}^{b(z)} \frac{\partial f}{\partial z} dx + f(b(z), z) \frac{\partial b}{\partial z} - f(a(z), z) \frac{\partial a}{\partial z} \quad (4.47)$$

Karga konstante mantentzen denez, deribatua egiterakoan $U^* = U^*(x, a)$ suposatzen da.

(4.47) ekuazioko erregela (4.46) ekuazioari aplikatuz:

$$\frac{\partial U^*}{\partial a} = \int_{u(a)}^{v(a)} \frac{M}{E_f I} \frac{\partial M}{\partial a} dx + \int_{u(a)}^{v(a)} \frac{6Q}{5G_{LT} A} \frac{\partial Q}{\partial a} dx + U^*(v(a), a) \frac{\partial v}{\partial a} - U^*(u(a), a) \frac{\partial u}{\partial a} \quad (4.48)$$

M-k eta Q-k ez dutenez a-rekiko menpekotasunik, (4.48) ekuazioko eskuineko lehenengo eta bigarren gaiak zero dira.

4.4.1 Arrabola kanpoaldean kokatuta

Pitzadura guneko, (4.1), (4.2) eta (4.3) ekuazioetako indarrak eta momentuak, (4.46) ekuazioan ordezkaturik U^* lortzen da. Eta ondoren, (4.48) ekuazioko erregela (4.45) ekuazioari aplikatuz, energia askatze tasa honakoa da

$$G = \frac{21P^2(a - c_o)^2 - 96PYa(a - c_o) + 192Y^2a^2}{16E_f b h^3} + \frac{3(P - 4Y)^2}{40G_{LT} b^2 h} \quad (4.49)$$

(4.7) ekuazioko Y indarraren adierazpena (4.49) ekuazioan ordezkaturik, eta soilik makurduraren eragina kontuan hartuz, G hurrengo eran adieraz daiteke

$$G = \frac{3R^2 E h^3}{4a^4} - \frac{3PRc_o(a^2 - c_o^2)}{4a^4 b} + \frac{3P^2 c_o^2(a^2 - c_o^2)^2}{16a^4 E_f b^2 h^3} + \frac{9P^2(a - c_o)^2}{16E_f b^2 h^3} \quad (4.50)$$

$R=0$ eta $c_o=0$ badira, nulua ez den gai bakarria azkena da eta ENF saiakuntzako emaitza izango litzateke. Beraz, energia askatze tasaren moduen deskonposaketa honakoa da

$$G_I = \frac{3R^2 E h^3}{4a^4} - \frac{3PRc_o(a^2 - c_o^2)}{4a^4 b} + \frac{3P^2 c_o^2(a^2 - c_o^2)^2}{16a^4 E_f b^2 h^3} \quad (4.51)$$

$$G_{II} = \frac{9P^2(a - c_o)^2}{16E_f b^2 h^3}$$

Aipagarria da, arrabola kanpoaldean dagoenean, $(a - c_0)$ balioa, ENF saiakuntzan neurtutako ohiko pitzadura luzera dela, 4.2 Irudian ikus daitekeen moduan.

4.4.2 Arrabola barnealdean kokatuta

Aurreko atalean jarraitutako prozedura berdina jarraituz, pitzadura guneko (4.26) eta (4.27) ekuazioetako indarrak eta momentuak, (4.46) ekuazioan ordezkaturik U^* lortzen da. Eta ondoren, (4.48) ekuazioko araua (4.45) ekuazioari aplikaturik, energia askatze tasa honakoa da

$$G = \frac{21P^2a^2 - 96PYa(a - c_i) + 192Y^2(a - c_i)^2}{16E_f b^2 h^3} + \frac{3(P - 4Y)^2}{40G_{LT} b^2 h} \quad (4.52)$$

(4.29) ekuazioko Y indarraren adierazpena (4.52) ekuazioan ordezkaturik, eta soilik makurduraren eragina kontutan hartuz, G hurrengo eran adieraz daiteke:

$$G = \frac{3R^2 E_f h^3}{4(a - c_i)^4} + \frac{3PRc_0}{4b(a - c_i)^2} + \frac{3P^2 c_i^2}{16E_f b^2 h^3} + \frac{9P^2 a^2}{16E_f b^2 h^3} \quad (4.53)$$

$R=0$ eta $c_i=0$ direnean, zero ez den gaia azkena da, eta hori izango da modu II-ri dagokion energia askatze tasa, beraz, moduen deskonposaketa honako eran adieraz daiteke

$$G_I = \frac{3R^2 E_f h^3}{4(a - c_i)^4} + \frac{3PRc_i}{4b(a - c_i)^2} + \frac{3P^2 c_i^2}{16E_f b^2 h^3} \quad (4.54)$$

$$G_{II} = \frac{9P^2 a^2}{16E_f b^2 h^3}$$

4.4.3 Arrabola euskarriaren gainean kokatuta

Arrabola euskarriaren gainean kokatuta dagoeneko kasu bereziari dagokionez, hau da, $c_i = c_0 = 0$ denean, (4.51) eta (4.54) ekuazioetako modu bakoitzari dagokion energia askatze tasak berdinak dira, honakoak direlarik

$$G_I = \frac{3R^2 E_f h^3}{4a^4} \tag{4.55}$$

$$G_{II} = \frac{9P^2 a^2}{16E_f b^2 h^3}$$

(4.55) ekuazioko emaitzak, Szekrenyes-ek [49] lortutakoen berdinak dira. Kanpoko kargaren aplikazioa hasi baino lehen, arrabola pitzadura sartzen da. Bertan Y indarra agertzen delarik, eta $2R$ -ko desplazamendua sortzen duelarik. Beraz, hasierako, edo saiakuntza hasi aurreko, deformazio energia osagarria hurrengo eran adieraz daiteke

$$U = U^* = 2 \left(\frac{1}{2} Y_0 R \right) \tag{4.56}$$

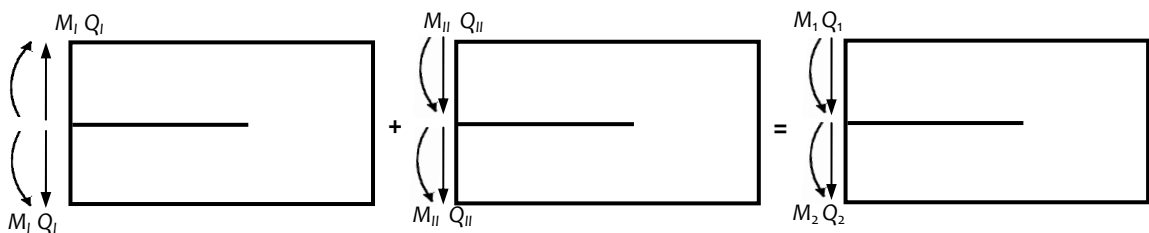
Non Y_0 , Y indarraren balioa den $P=0$ denean. Y_0 -ren balioa (4.18) ekuaziotik lortuz, eta (4.56) ekuazioan ordezkatuz, G (4.45) ekuazioaren arabera kalkula daiteke, eta ondorioz:

$$G_{\text{Hasierakoa}} = \frac{3R^2 E_f h^3}{4a^4} \tag{4.57}$$

(4.57) ekuazioko emaitza, (4.55) ekuazioko modu I-eri dagokion energia askatze tasarekin bat dator.

4.5 WILLIAMS-EN MODUEN DESKONPOSAKETA

Williams-en esanetan [88] laminatu baten energia askatze tasa pitzaduraren puntan aplikatuta dauden momentuetan oinarrituz determinatu daiteke. Moduen deskonposaketa, G osoaren zatiketa irekitze osagaian G_I -ean, eta lerraketa osagaian, G_{II} -n, deskonposatzean datza, $G = G_I + G_{II}$ izanik. 4.13 Irudian irudikatzen den kasua kontsideratuz, irekitze moduak soilik kontrako noranzkoan dauden momentuak behar ditu, hala nola, $-M_1$ goiko besoan eta M_1 beheko besoan. Modo II hutsa, bi besoan kurbadura berdina denean lortuko da.



4.13 Irudia Williams-en moduen deskonposaketa

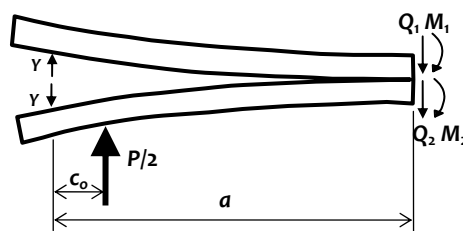
Modu bakoitzari dagozkien momentuen eta indarren eta pitzadura puntan dauden momentuen eta indarren arteko erlazioa honakoa da

$$\begin{aligned}
 M_1 &= M_{II} - M_I \\
 M_2 &= M_{II} + M_I \\
 M_I &= \frac{M_2 - M_1}{2} \\
 M_{II} &= \frac{M_2 + M_1}{2} \\
 Q_2 &= Q_{II} + Q_I \\
 Q_I &= \frac{Q_2 - Q_1}{2}
 \end{aligned}
 \tag{4.58}$$

Beraz, moduen deskonposaketa, b sekzioaren zabalera, eta $2h$ sekzioaren altuera izanik hurrenez hurren, hurrengo eran adieraz daiteke

$$\begin{aligned}
 G_{I_M} &= \frac{12M_I^2}{E_f b^2 h^3} \\
 G_{I_Q} &= \frac{6Q_I^2}{5G_{LT} b^2 h} \\
 G_{II} &= \frac{9M_{II}^2}{E_f b^2 h^3}
 \end{aligned}
 \tag{4.59}$$

Arrabola kanpoaldean dagoenean, pitzadura puntan dauden indarrak eta momentuak, 4.14 Irudian ikus daitezke



4.14 Irudia Pitzadura puntan dauden indarrak eta momentuak arrabola kanpoaldean dagoenean

Momentuak eta ebakidura indarrak ondorioz

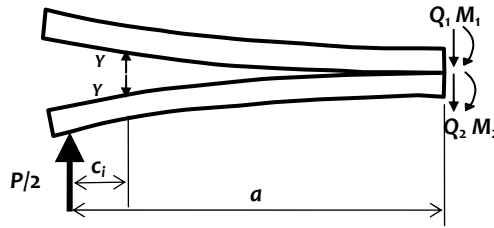
$$\begin{aligned}
 Q_1 &= Y & M_1 &= -Ya \\
 Q_2 &= \frac{P}{2} - Y & M_2 &= Ya - \frac{P}{2}(a - c_0)
 \end{aligned}
 \tag{4.60}$$

(4.60) ekuazioko balioak, (4.59) ekuazioan ordezkatzuz, energia askatze tasa honakoa da

$$G = \frac{21P^2(a - c_o)^2 - 96PYa(a - c_o) + 192Y^2a^2}{16E_f b h^3} + \frac{3(P - 4Y)^2}{40G_{LT} b^2 h} \quad (4.61)$$

(4.61) ekuazioan lortutako emaitza, (4.49) ekuazioan lortutako energia askatze tasarekin bat dator.

Arrabola barnealdean kokatuta dagoenean, 4.15 Irudian ikus daitekeen bezala, pitzadura puntan dauden indarrak eta momentuak honakoak dira



4.15 Irudia Pitzadura puntan indarrak eta momentuak arrabola barnealdean dagoenean

$$\begin{aligned} Q_1 &= Y & M_1 &= -Y(a - c_i) \\ Q_2 &= \frac{P}{2} - Y & M_2 &= Y(a - c_i) - \frac{P}{2}a \end{aligned} \quad (4.62)$$

(4.62) ekuazioko balioak, (4.59) ekuazioan ordezkatzuz, energia askatze tasa honakoa da

$$G = \frac{21P^2a^2 - 96PYa(a - c_i) + 192Y^2(a - c_i)^2}{16E_f b^2 h^3} + \frac{3(P - 4Y)^2}{40G_{LT} b^2 h} \quad (4.63)$$

(4.63) ekuazioan lortutako emaitza, (4.52) ekuazioan lortutakoarekin bat dator.

Hortaz, lan honetan lortutako G-ren balioak Williams-en moduen deskonposaketa aplikatuz lortutakoekin bat datoz.

Aipagarria da, ENFR saiakuntzaren kasuan, konpliantzaren deribatuan oinarritutako Irwin-Kies-en hurbilketa [21] ez dela egokia, lana ez duelako indar bakar batek egiten, bik baizik. Arrabola kanpoaldean kokatuta dagoeneko (4.17) ekuazioko konpliantzaren deribatua eginez:

$$G = \frac{P^2}{2b} \frac{dC}{da} = \frac{3P^2 c_o^2 (a^2 - c_o^2)^2}{16a^4 E_f b^2 h^3} + \frac{9P^2 (a - c_o)^2}{16E_f b^2 h^3} \quad (4.64)$$

(4.64) ekuazioan, energia askatze tasaren (4.51) ekuazioko G_r-eri dagozkion bi batugai ez dira agertzen.

Arrabola barnealdean kokatuta dagoeneko kasurako, (4.37)ekuazioko konpliantzaren deribatua aplikatuz:

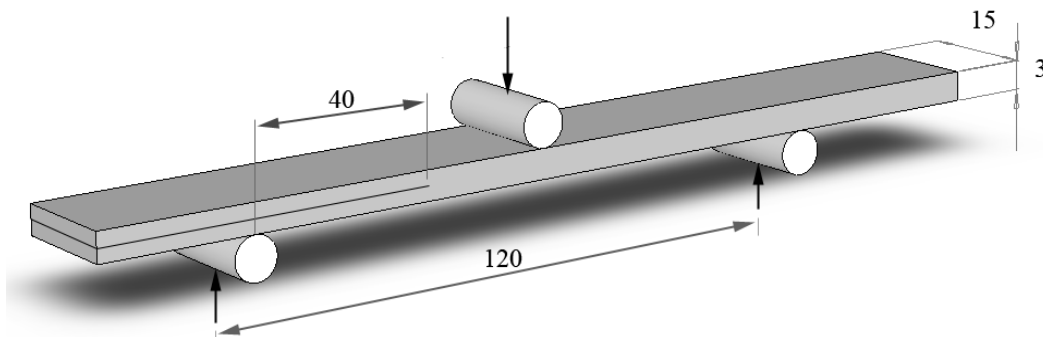
$$G = \frac{P^2}{2b} \frac{dC}{da} = \frac{9P^2 a^2}{16E_f b^2 h^3} + \frac{3P^2 c_i^2}{16E_f b^2 h^3} \quad (4.65)$$

(4.65) ekuazioan, energia askatze tasaren (4.54) ekuazioko bi batugai ez dira agertzen.

Beraz, konpliantzaren deribatuan oinarritutako ekarpena ez da baliogarria. Kanpoko lana indar bakar batek egiten duen kasuan egokia dela ondoriozta daiteke.

4.6 MODU NAHASKETAREN ANALISIA

Probetaren geometria jakin batentzat eta hasierako pitzadura finko batentzat, 4.16 Irudian irudikatzen den bezalako, eta material jakin batentzat, modu nahasketa desberdinak lortzeko bi dira alda daitezkeen parametroak: arrabolaren erradioa eta arrabolaren kokapena.



4.16 Irudia Probetaren geometria

Azterketa analitikoa eta numerikoa egiteko erabili den materiala HexPly AS4/8552 RC34, Hexcel Composites-ekoa izan da. Bere propietateak, 4.1 Taulan azaltzen direlarik. Laminatu honek Hexcel 8552 errendimendu altuko epoxi matrizea du, haustura zailtasuna hobetzeko asmoz eraldatua.

4.1 Taula. AS4/8552 materialaren ezaugarri mekanikoak

Propietatea	Balioa
E_{11} (MPa)	144000
E_{22} (MPa)	10600
G_{12} (MPa)	5360
ν_{12}	0,34
G_{Ic} (J/m ²)	250
G_{IIc} (J/m ²)	791

Lan honetan, modu nahasketa edo modu-ratioa G_{II}/G bezala definituko da, hau da, modu II-ko energia askatze tasa eta energia askatze tasa osoaren arteko erlazioa. Beraz, modu-ratioak, modu II-ren ekarpena adieraziko du.

Arrabolaren kokapen bakoitzari dagokion energia askatze tasaren ekuazioa kontuan hartuz, (4.51) (4.54) eta (4.55) ekuazioetatik, G_I eta G_{II} ren balioak kalkulatzeko, materialaren ezaugarri mekanikoak eta probetaren geometria ez ezik, aplikatuta dagoen karga ere behar da. Pitzadura hedatzen hasten deneko puntuari, puntu kritikoa edo inimizazio puntua deritzo, eta puntu horretan aplikatuta dagoen karga zein den jakiteko, haustura irizpide bat behar da.

Literaturan askotan erabilia izateagatik [68], eta bere erabilera errazagatik, irizpide lineala erabiltzea erabaki da, honakoa izanik.

$$\frac{G_I}{G_{Ic}} + \frac{G_{II}}{G_{IIc}} = 1 \quad (4.66)$$

Beraz, karga puntu kritikoa, P_c lortzeko, 4.1 Taulan agertzen diren materialaren ezaugarriak eta 4.16 Irudia parametro geometrikoak (4.66) ekuazioan ordezkatuz lortuko da, iterazio-prozesu bat jarraituz.

Bestalde, G_I kalkulaterakoan, pitzadura luzera zuzendu behar da, pitzaduraren besoek, pitzaduraren puntan duten errotazioak kontuan hartzeko. Williams-en esanetan [45], puntaren errotazioa modelizatu daiteke, pitzaduraren luzerari Δa balioa gehituz, balio hori honakoa izanik .

$$\frac{\Delta a}{h} = \sqrt{\frac{E_{11}}{11G_{12}} \left[3 - 2 \left(\frac{\Gamma}{1 + \Gamma} \right)^2 \right]} \quad \Gamma = 1,18 \frac{\sqrt{E_{11}E_{22}}}{G_{12}} \quad (4.67)$$

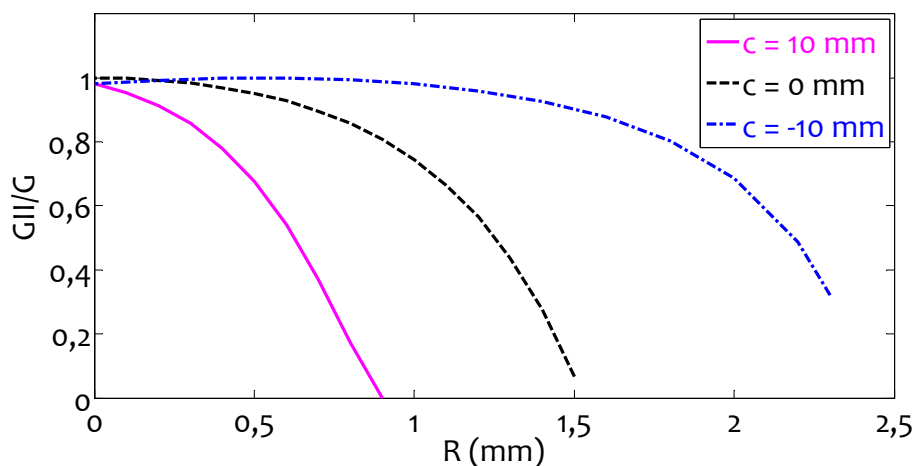
Zuzenketa horretan, modu I-en eragina soilik agertu behar denez, G_I kalkulaterakoan erabili den pitzadura luzera honakoa da

$$a_i = a + \frac{G_I}{G} \Delta a \quad (4.68)$$

G_{II} kalkulaterakoan, berriz, pitzadura luzera nominala, $a = 40$ mm erabiliko da, 4.16 Irudian ikus daitekeen moduan.

Hurrengo irudietan azaltzen den modu-ratioa, hortaz, puntu kritikoari dagokiona da. Puntu horretan G_I eta G_{II} ren balioak lortuz, G_{II}/G zehaztuko da.

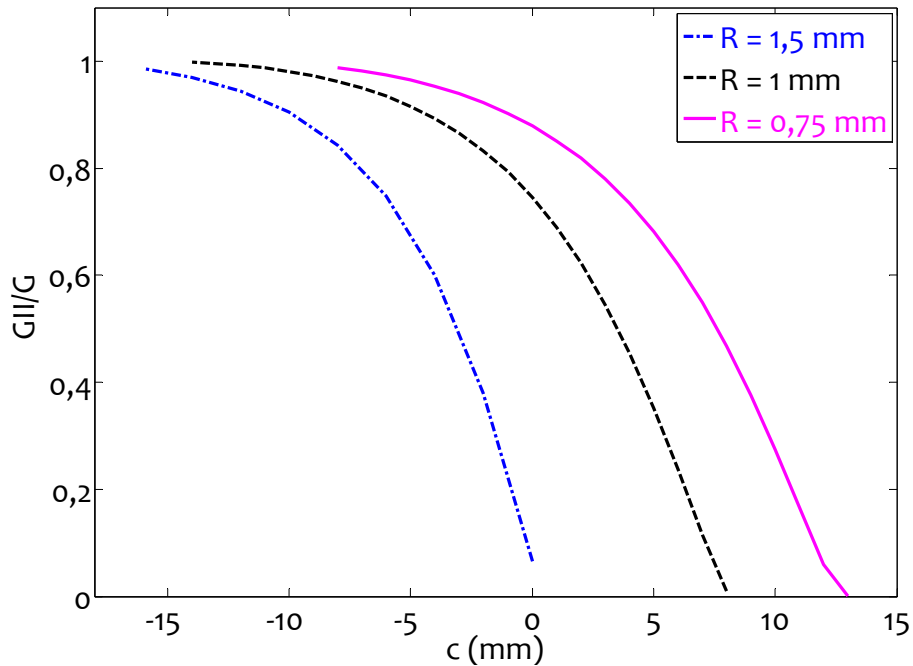
4.17 Irudian, arrabolaren erradioaren aldaketak duen eragina irudikatzen da, hiru kokapen desberdinentzat. Kokapen bakoitzari dagokion kurban, modu-ratioa nola aldatzen den ikusten da. Arrabola euskarriaren gaineko kokapena, $c=0$ bezala definitzen da, arrabola barnealdean kokatuta, euskarritik 10 mm-ra dagoeneko kokapena $c=10$ bezala definitzen da, eta azkenik, arrabola kanpoaldean, euskarritik 10 mm-ra dagoeneko kokapena $c=-10$ bezala.



4.17 Irudia Arrabolaren erradioaren aldaketak duen eragina

4.17 Irudian ikus daitekeen bezala, arrabolaren erradioa handitzean, modu-ratioa txikiagotzen da. Hau da, modu I en eragina handituz doa. Arrabola pitzaduraren barnealdean kokatuta dagoenean, arrabolaren erradioa 0 mm-tik 0,8 mm-ra aldatuz, modu-ratio guztiak lor daitezke.

4.18 Irudian, hiru erradio desberdinentzat, arrabolaren kokapenaren aldaketaren eragina irudikatzen da. Berriz, kokapen bakoitzari dagokion kurban, modu-ratioaren aldaketa irudikatzen da.



4.18 Irudia Arrabolaren kokapenaren aldaketak duen eragina

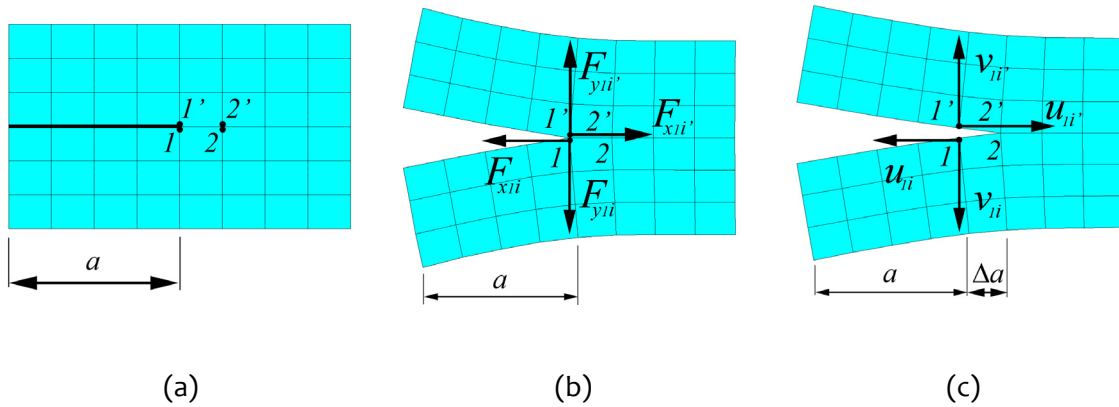
Erradio jakin batentzat, arrabola pitzaduraren barnealderantz mugitzean, modu-ratioa txikiagotzen doa, irekiera handiagoa eragiten delako. Arrabolaren erradioa 1 mm denean, modu-ratio guztiak lor daitezke kokapena euskarritik kanpoalderantz 14 mm-tik, euskarritik barnealderantz 8 mm-ra mugituz.

Bi parametro hauetaz gain, hasierako pitzadura luzera aldatuz modu-ratioa ere aldatu daiteke. Beraz, saiakuntza konfigurazio honekin c , R eta a parametroak aldatuz modu-ratio guztiak lor daitezke.

4.7 BALIOESPEN NUMERIKOA

Modu deskonposaketa egokia denentz konprobatzeko balioespen numerikoa beharrezkoa da. Atal honetan Oviedoko Unibertsitateko bi kideen laguntza izan dugu. Mollón eta Bonhomme doktoreek zenbakizko kalkuluak egiteko Ansys programa erabili dute, G_I eta G_{II} energia askatze tasak kalkulatzeko bi urratsen hedapen prozedura, (TSEP) prozedura aplikatuz. Metodo honetan, pitzadura-ibilbidea modelizatzen da, kointzidentek diren nodo pare bat elkarrekin akoplatuta kontsideratuz, 4.19 Irudian azaltzen den moduan. Lehenengo urratsean, ezarritako kargak edo desplazamenduak bere balio kritikora iristean (P_c , δ_c), pitzadura puntako indarrak 4.19 Irudian azaltzen den moduan kalkulatu dira. Bigarren

urratsean, probetan ezarritako desplazamendua (δ_c) mantentzen da eta pitzadura puntako 1-1' nodoen akoplatutako askatasun mailak askatzen dira, 4.19 Irudian azaltzen den moduan. Orduan, desplazamenduak, bigarren urrats honetan kalkulatu dira.



4.19 Irudia Bi urratsen hedapen prozedura (TSEP)

1-1' nodo pare berean lehenengo urratsean lortutako indarrak eta bigarren urratsean kalkulatuak desplazamenduak kontutan hartuz, energia askatze tasa kalkulatu da honako adierazpen hauen arabera:

$$G_I = \frac{1}{2b\Delta a} \sum_{i=1}^n F_{y1i}(v_{1i} - v_{1'i})$$

$$G_{II} = \frac{1}{2b\Delta a} \sum_{i=1}^n F_{x1i}(u_{1i} - u_{1'i})$$
(4.69)

Non:

- F_{x1i}, F_{y1i} : pitzadura puntako indarrak (1-1' nodoak), $F_{x1i} = F_{x1i'}$ eta $F_{y1i} = F_{y1i'}$ izanik
- u_{1i}, v_{1i} : askatutako nodoen desplazamendu horizontalak eta bertikalak (1-1' nodoak)
- Δa : pitzadura hedapena

i atzikiak 3D sistema baterako hedapena kontutan hartzen du, non i nodoak pitzadura aurrealdean zehar kokatuta dauden.

Modeloan erabilitako elementua PLANE 42 da, deformazio laua aukeratuta. Elementuaren tamaina 0,1 mm-koa da.

Kalkulu numerikoetan, δ_c erabili da ezarritako desplazamendutzat. 4.2 Taulan, kasu desberdinentzat, analitikoki eta numerikoki lortutako P_c , Y_c , eta δ_c balioak azaltzen dira.

Arrabola zenbat eta barrurago kokatu, orduan eta modu I-en ekarpena handiagoa da. Horrek suposatzen du, haustura lehenago gertatuko dela $G_{Ic} < G_{IIc}$ delako, eta behar diren karga kritikoa eta desplazamendu kritikoa txikiagoak direla. Adibidez, 4.2 Taularen arabera, 2. kasua eta 4. kasua konparatuz, puntu kritikora iristeko behar den indarra eta puntu horretan ematen den desplazamendua, erdia baino gutxiago da, arrabola barrurago sartuta dagoenean, euskarriaren gainean dagoenarekin alderatuz. Bestalde, indarrei dagokienez, P_c eta Y_c ren balio analitikoak eta numerikoak bat datoz, errore erlatiboak % 3 eta % 5 baino txikiagoak direlarik, hurrenez hurren.

Energia askatze tasen balioak ere alderatu dira. Modu nahasketa aztertzerakoan egin zen moduan, P_c karga kritikoa, (4.51) (4.54) eta (4.55) energia askatze tasen ekuazioetan ordezkaturik, G_I eta G_{II} -ren balioak zehaztuko dira. Beti ere, G_I -en kasuan pitzadura luzera zuzendua erabiliz, (4.67) eta (4.68) ekuazioak kontuan hartuz. G_{II} zehazteko, 4.20 Irudian ikusten den pitzadura luzera nominala, $a=40$ mm, erabiliko da. **4.3 Taulan** proposatutako bost kasu horien energia askatze tasen balioak azaltzen dira. Arrabola kanpoaldean dagoenean, I moduren ekarpena oso txikia denez, soilik erradio bat $R=1.5$ mm-koa aztertu da.

4.3 Taula. Kasu desberdinen energia askatze tasak

Kasua	R (mm)	c (mm)	Analitikoa $G_I(J/m^2)$	FEM $G_I(J/m^2)$	Errorea $G_I(\%)$	Analitikoa $G_{II}(J/m^2)$	FEM $G_{II}(J/m^2)$	Errorea $G_{II}(\%)$	Analitikoa $G_{II}/G(\%)$
1	0,5	0	34,5	40,6	-5,2	681,9	676,5	0,8	95
2	0,7	0	66,5	69,9	-4,9	580,5	574,7	1,0	90
3	0,5	10	150,6	140,9	6,9	314,6	313,6	0,3	68
4	0,7	10	210,6	208,1	1,2	124,5	126,1	-1,3	37
5	1,5	-10	62,4	65,6	-5,0	593,6	587,9	1,0	90

4.3 Taularen arabera, G_I -eri dagokionez, errore erlatibo txikiena, % 1,2koa, 4. kasuan ematen da, modu I-en eragina nagusiagoa denean. Izan ere, Y_c ren errore erlatiboa kasu horretan ere txikiena da. G_{II} -ri dagokionez, errore erlatiboa aztertutako kasu guztietan % 1en inguruan dago.

Emaitzen arabera, energia askatze tasen balio analitikoak eta numerikoak bat datoz, eta ondorioz modu deskonposaketaren baieztapena burutu da.

5.

SAIAKUNTZAREN AZTERKETA ESPERIMENTALA

5.1 SARRERA

Zuntz errefortzudun konposite materialek egituretan erabiliak izateko duten eragozpen nagusia laminarteko hausturarekiko duten tolerantzia urria da. Beraz, deslaminazioaren hasiera eta hazkundea karakterizatzeko hausturaren mekanika lineala-elastikoa (LEFM) orokorki onartuta dago [39].

Deslaminazioaren hedapena, laminarteko haustura zailtasunak zehazten du [59]. Haustura zailtasuna, energia askatze tasaren arabera adierazten bada, pitzadura hedatuko da energia askatze tasa balio kritikoa erdiesten duenean, hau da, G_C .

Hausturaren mekanikaren helburuetako bat, energia askatze tasaren balio kritikoa modu ratioaren arabera esperimentalki lortzea da, eta horrela haustura irizpidea definitzea [29,68,71,81,107,118-120].

Haustura saiakuntzetan, pitzadura luzera neurtzea da arazo nagusienetako bat, batez ere II modua agertzen denean [49,51,52,60], pitzadura-luzera neurtzeko eskaner berezia erabiltzeraino iritsiz [121]. Adhesiboetan ere arazo hau aipagarria da [110].

Atal esperimental honen helburuetako bat, neurketa optikorik egin gabe pitzadura luzeraren zehaztapena da. Pitzadura luzeraren neurketa, hedapenean gertatzen den

konpliantza esperimentalaren aldaketan oinarrituta dago, Arrese et al.-ek [55] ENF saikuntzarako garatutako Haben Teoria Makurdura Errotazioekin, (BTBR) metodoa aplikatuz.

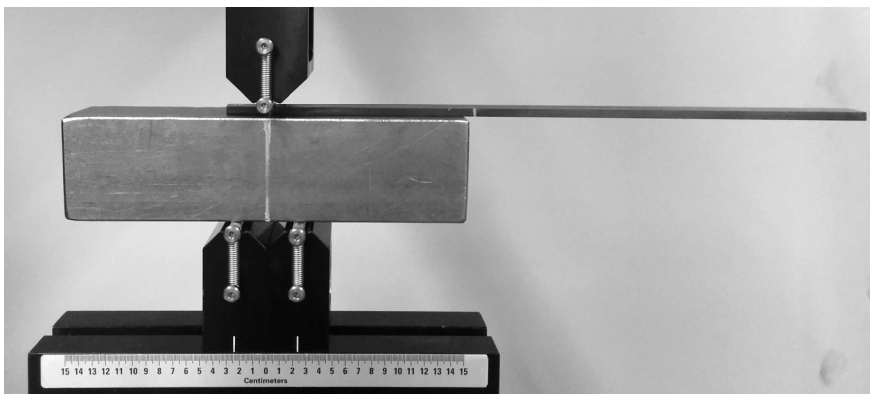
Kapitulu honetan, modu-ratio desberdineko saiakuntzetan hedapenean zehar, energia askatze tasa aztertzen dira. Horrela, pitzadura-hedapenaren arabera, G_I eta G_{II} -ren kurbak, R-kurbak, irudikatzen dira. Hedapenean zehar, G_I eta G_{II} ezagutuz, energia askatze tasa kritikoa modu-ratio desberdinetan adierazten da haustura irizpidea definitzeko asmoz [75,122]. Atal experimental honen beste helburu bat, haustura irizpidea baiezte da, eta lortutako G_{Ic} eta G_{IIc} energia askatze tasa balio kritikoak, modu hutsen saiakuntzetan lortutako balio kritikoekin alderatzea.

5.2 MAKURDURA ETA EBAKIDURA MODULUAK

Lan esperimentalean erabili diren probetak karbono zuntzez eta epoxi matrizez osatutako norabide bakarreko T300/F593 konpositeaz fabrikatu dira.

Propietate elastikoei dagokienean, makurdura modulua probeta bakoitzean neurtu da. E_T -ren kalkulua, ebakitzaila, deformazio lokalak eta makurdura errotazioak kontuan hartuz burutu da. G_{LT} lortzeko, aztergai ditugun kasuetan L/h erlazioa 30 baino handiagoa denez, propietate elastiko hauek eragiten duten errorea txikia da. Beraz, Mujikak [123] proposatutako prozedura erabiliko da, bost argi ezberdinentzat hiru puntuko makurduran oinarrituta. Probetak euskarrietan mugitzen dira pitzadura gabeko gunean saiatuz.

5.1 Irudian ikus daitekeen moduan, probeta bat altzairuzko bloke lodi baten gainean bost aldiz saiatu ondoren, sistemaren zurruntasunaren batazbesteko balioa $k_s = 24$ kN/mm izan da.



5.1 Irudia Sistemaren zurruntasuna kalkulatzeko saiakuntza

Mujika-ren arabera [123], ebakitzailera, deformazio lokalak eta makurdura errotazioak kontuan hartuz, indarraren aplikazio-puntuaren desplazamendua hurrengo eran adieraz daiteke:

$$\delta_c = \frac{P(2L_0)^3}{4E_f b(2h)^3} \left[\left(1 - \frac{3r}{2h} \varepsilon \right) + \frac{6}{5} \frac{E_f}{G_{LT'}} \left(\frac{2h}{2L_0} \right)^2 \left(1 - \frac{r}{2h} \varepsilon \right) + 4 \frac{E_f b}{k_s} \left(\frac{2h}{2L_0} \right)^3 \right] \quad (5.1)$$

Non $2L_0$ saiakuntzaren hasierako argia den, ε deformazio maximoa eta r euskarriaren arrabolaren erradioa. Bi puntuen arteko desplazamenduen kenketa kalkulatu ondoren, makurdura modulua kalkulatzeko adierazpena hurrengoa da:

$$E_f = \frac{m(2L_0)^3}{4b(2h)^3} \left[\left(1 - \frac{3r}{2h} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \right) + \frac{6}{5} \frac{E_f}{G_{LT'}} \left(\frac{2h}{2L_0} \right)^2 \left(1 - \frac{r}{2h} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \right) + 4 \frac{E_f b}{k_s} \left(\frac{2h}{2L_0} \right)^3 \right] \quad (5.2)$$

Saiakuntzak egiteko deformazio tarte finkoa denean, E_f , $G_{LT'}$ eta k_s kalkulatzeko hurrengo adierazpena erabil daiteke:

$$y = A_1 + B_1 x^2 + Cx^3 \quad (5.3)$$

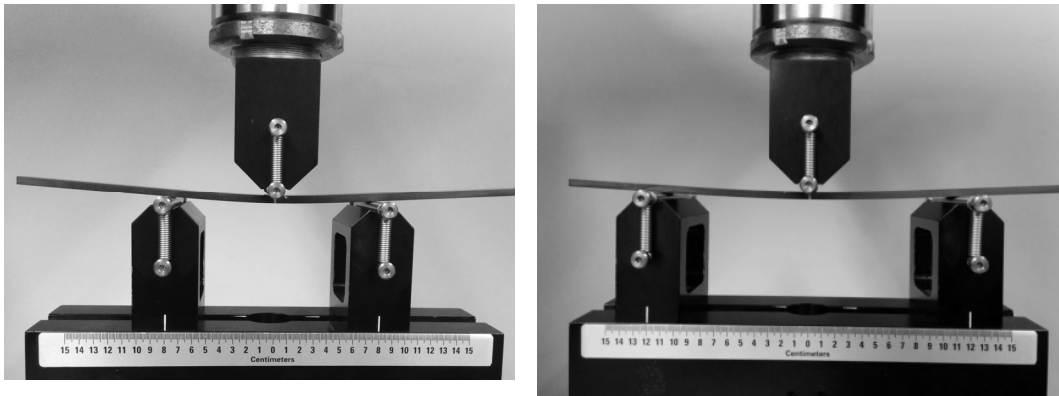
Non, x , y eta A_1 , B_1 eta C koefizienteak, hurrengoak diren:

$$\begin{aligned} A_1 &= E_f^{-1} \left(1 - \frac{3r}{2h} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \right) & B_1 &= \frac{6}{5} G_{LT'}^{-1} \left(1 - \frac{r}{2h} (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \right) & C &= 4 \left(\frac{k_s}{b} \right)^{-1} \\ x &= \frac{2h}{2L_0} & y &= E_{3P}^{-1} = \left(\frac{m(2L_0)^3}{4b(2h)^3} \right)^{-1} \end{aligned} \quad (5.4)$$

Non m , 1 eta 2 puntuen arteko karga-desplazamendu kurbako malda den. (5.4) ekuazioko C koefizientea ezaguna da, sistemaren zurruntasuna, k_s , aurretik kalkulatu baita. Beraz, (5.3) ekuazioko adierazpen kubikoa, adierazpen linealean bihurtu daiteke hurrengo eran:

$$y = A_1 + B_1 x^2 = A_1 + B_1 z \quad (5.5)$$

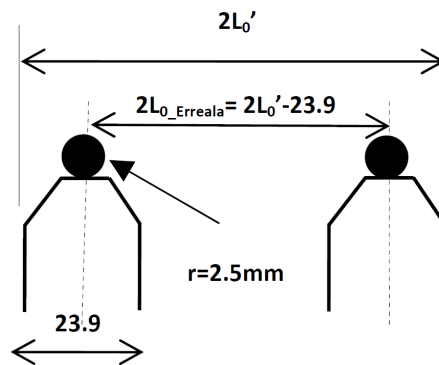
Makurdura saiakuntzak pitzadurarik gabeko gunean burutu dira, arrabolarik gabe, 5.2 Irudian irudikatzen den moduan, eta erabilitako argia nominalak 70, 80, 90, 100 eta 120 (mm) izan dira. Probeta bakoitzarentzat, argi bakoitzeko 3 saiakuntza burutu dira.



5.2 Irudia Makurdura saiakuntzak. (a) 80 mm-ko argia, (b) 120 mm-ko argia

Argi erreala zehazteko asmoz,

5.3 Irudia $2L_0'$ neurria kalibrearen bidez neurtzen da. Ondoren bi euskarrien arteko distantzia finkoa, 23,9 mm, kentzen zaio.



5.3 Irudia Argi errealak neurtzen

5.1 Taulan argi nominal bakoitzari dagokion argi erreala ikus daiteke.

5.1 Taula Argi errealak

Argi nominala (mm)	Argi erreala (mm)
70	70,55
80	79,55
90	89,6
100	99,7
120	119,95

Probeten dimentsioei dagokienean, probeten luzera 200 mm-koa da. Lodiera ($2h$) eta zabalaren (b) balio nominalak, 3 mm eta 15 mm hurrenez hurren. Dimentsio errealak neurtzeko asmoz, lodiera mikrometro baten bidez neurtu da, eta zabalera kalibrearekin. Pitzadura gabeko gunearen erdiko puntuaren inguruan hiru neurketa egin dira. 5.2 Taulan probeta bakoitzari dagozkion lodiera eta zabalera errearen batzbestekoak ikus daitezke.

5.2 Taula Probeten dimentsio errealak

Probeta	b (mm)	$2h$ (mm)
1	15,3	2,95
2	14,1	2,91
3	14,5	2,96
4	14,4	3,01
5	15,1	3
6	14,6	2,98
7	15,1	2,88

Erabili den deformazio tartea $\varepsilon_1=\%0,1$ eta $\varepsilon_2=\%0,3$ izan da. Saiakuntza bakoitzean, karga-desplazamenduaren malda kalkulatzeko 1 eta 2 puntuak soilik hartu dira kontuan. Desplazamendua, sistemaren zurruntasunak eragindako desplazamendua kontuan hartuz zuzendu da. Beraz, saiakuntza bakoitzarentzat maldaren adierazpena hurrengoa da:

$$m = \frac{P_2 - P_1}{\left(\delta_2 - \frac{P_2}{k_s}\right) - \left(\delta_1 - \frac{P_1}{k_s}\right)} \quad (5.6)$$

5.3 Taula Erregresio lineala egiteko 4. probetaren datuak

Argi nominala (mm)	m (N/mm)	$x=h/L_0$	$y=E_{3p}^{-1}$ (MPa) ⁻¹
70	468,7	4,27E-02	9,54E-06
80	327,0	3,78E-02	9,54E-06
90	231,4	3,36E-02	9,43E-06
100	169,7	3,02E-02	9,33E-06
120	98,5	2,51E-02	9,24E-06

Argi bakoitzarentzat, burututako 3 saiakuntzen emaitzen batzbestekoa egiten da. Adibide bezala, 5.3 Taulan, 4. probetari dagozkion batzbesteko datuak ikus daitezke.

Probeta guztientzat prozedura berdina jarraituz, (5.5) ekuazioko A_1 eta B_1 koefizienteak kalkulatzeko erregresio lineala egiten da. Ondoren, (5.4) ekuaziotik E_f eta $G_{LT'}$ kalkula daitezke. 5.4 Taulan lortutako moduluen emaitzak ikus daitezke:

5.4 Taula Moduluen emaitzak

Probeta	E_f (GPa)	$G_{LT'}$ (GPa)
1	106,2	4,2
2	108,1	4,2
3	107,3	4,8
4	108,8	4,4
5	106,2	4,8
6	109,4	3,5
7	105,6	4,3

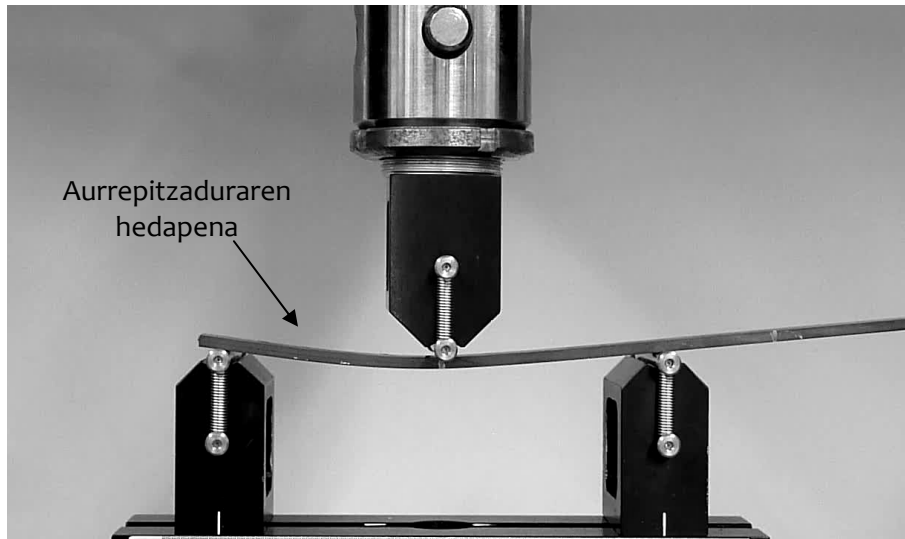
Lortutako moduluen batzbesteko balioak eta desbideratze tipikoaren balioak honakoak dira:

$$E_f = 107,4 (\pm 1,4) \text{ GPa}$$

$$G_{LT'} = 4,3 (\pm 0,4) \text{ GPa}$$

5.3 PROBETEN PRESTAKUNTZA

Baieztapen esperimentalaren saiakuntzak hasi baino lehen, probeta bakoitzean, pitzadura puntan ematen den erretxin bilgunearen, (*resin pocket*), eragina ekiditeko aurrepitzadura hedatzen da [124]. Hedapen hori arrabolarik gabe egiten da, hau da II modu hutsean 5.4 Irudian ikus daitekeen moduan.



5.4 Irudia Aurrepitzaduraren hedapena II modu hutsean

Ondoren, BTBR metodoan oinarrituz, pitzadura-luzera neurtzen da eta pitzadura-punta markatzen da. Saiakuntza guztiak MTS saiakuntza makinan burutu dira, desplazamendu kontrolatuan.

5.4 HASIERAKO BALDINTZEN KALKULUA

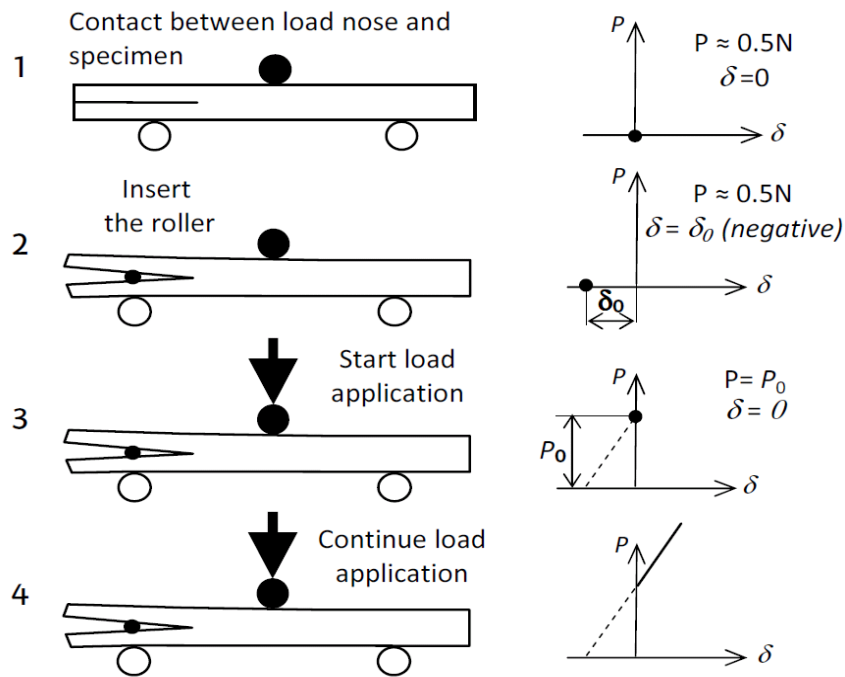
Desplazamendu esperimentalak (δ_{exp}), probetaren desplazamendua (δ_{spec}) eta sistemaren zurruntasunak eragindako desplazamendua $C_s = k_s^{-1}$ barneratzen ditu.

$$\delta_{\text{exp}} = \delta_{\text{spec}} + \delta_s \quad (5.7)$$

Beraz, probetaren konpliantza honakoa da:

$$C_{\text{spec}} = C_{\text{exp}} - C_s \quad (5.8)$$

4.7 Irudian irudikatzen den karga-desplazamendu kurbako hasierako baldintzak esperimentalki lortzeko asmoz, desplazamendu esperimentalaren jatorria, indar-arrabola eta probetaren arteko kontaktua gertatzen denean definituko da, 5.5 Irudian (1) ikus daitekeen moduan. Berez, kontaktua, indarra 0.5 N denean definitu da. Pitzaduran arrabola sartzean, hasierako desplazamendu negatiboa gertatuko da, δ_0 , izeneko, kargarik gabe 5.5 Irudia (2). Kargaren aplikazioa hasiko da, eta desplazamendu esperimental berrero zero denean, dagoen kargari P_0 deritzo 5.5 Irudian (3). Une horretatik aurrera, bai karga, bai desplazamendua positiboak izango dira 5.5 Irudian (4).



5.5 Irudia Karga-desplazamendu hasierako baldintza esperimentalak

Baldintza esperimental desberdinetan P_0 eta δ_0 neurtu dira eta (4.15) (4.36) eta (4.23) ekuazioetako balio teorikoekin alderatu dira. 5.5 Taulan lortutako emaitza batzuk ikus daitezke. Aipagarria da $c=0$ kasurako, $\delta_0 = -R/2$ denez oso erraz konprobatu daiteke hasierako desplazamenduaren zehaztasuna.

Saiakuntzak izendatzeko erabili den nomenklatura honakoa da: ai-Rj-ck. ai hasierako pitzadura luzera izanik, Rj arrabolaren erradioa, eta ck arrabolaren kokapena definitzen duen parametroaren balioa. Balioa positiboa izango da arrabola pitzaduraren barruan kokatuta dagoenean, eta negatiboa aldez, arrabola pitzaduraren kanpoaldean dagoenean. Adibidez: a40-R1-c8 izanik, 40 mm-ko hasierako pitzadura luzera, R=1 mm-ko erradioko arrabola eta 8 mm pitzaduraren barrurantz sartuta.

5.5 Taulan ikus daitekeenez, P_0 neurtzean errore erlatibo maximoa, aztertutako 7 kasuentzat % 7 baino txikiagoa da eta δ_0 neurtzean errore erlatibo handiena % 8 da. Aztertutako kasuan hasierako desplazamenduan % 8-ko errore erlatiboak, 0,02 mm-ko errore absolutoa esan nahi du. Beraz, (4.15) (4.36) eta (4.23) ekuazioetako P_0 eta δ_0 adierazpen analitikoak egokiak direla baieztatu daiteke. Ondorioz, (4.11) (4.32) eta (4.20) ekuazioetako indarraren aplikazio-puntuaren desplazamenduaren hurbilpen analitikoak ere egokia dela.

5.5 Taula P_0 eta δ_0 neurtzen

NOMENKLATURA	P_0 (N) NEURTUTA	P_0 (N) ANALITIKOA	Errore erlatiboa (%)	δ_0 (mm) NEURTUTA	δ_0 (mm) ANALITIKOA	Errore erlatiboa (%)
a40-R0,5-c0	19,4	19,81	-2,1	-0,27	-0,25	8,0
a47-R0,925-c0	26,7	28	-4,6	-0,47	-0,46	2,2
a40-R1-c0	32,5	34,74	-6,4	-0,51	-0,5	2,0
a43-R1,5-c0	47,7	46,7	2,1	-0,73	-0,75	-2,7
a40-R1-c5	38,5	41,3	-6,8	-0,61	-0,61	0,0
a43-R1-c8	44,0	41,3	6,5	-0,72	-0,67	7,5
a40-R0,7-c10	35,7	36,5	-2,2	-0,54	-0,52	3,8

Konpliantzari dagokionez, (4.16) ekuazioko adierazpen teorikotik abiatuz, saiakuntzako puntu bakoitzean konpliantza esperimentalak honakoa izango da

$$C_{\text{exp}} = \frac{\delta_{\text{exp}} - \delta_0}{P} \quad (5.9)$$

Balio hori, (5.8) ekuazioan ordezkaturik, probetaren konpliantza

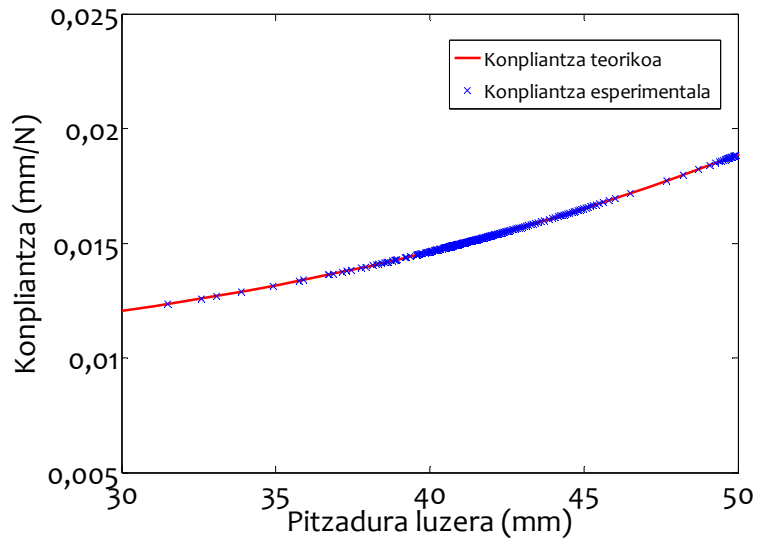
$$C_{\text{spec}} = \frac{\delta_{\text{exp}} - \delta_0}{P} - C_s \quad (5.10)$$

5.5 PIZADURA-LUZERAREN NEURKETA

5.5.1 Pitzadura-luzeraren neurketa konpliantzaren aldakuntzan oinarrituz

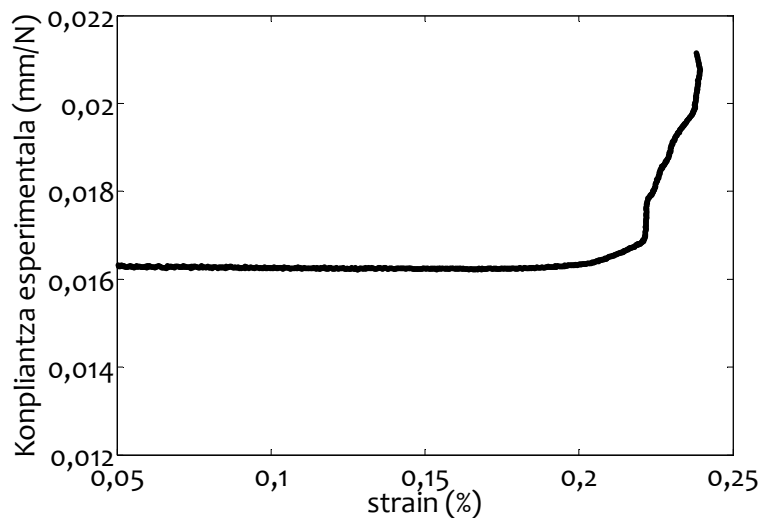
Datu esperimentaletik pitzadura-luzera kalkulatu ahal izateko, materialen ezaugarri elastikoak barneratzen dituen konpliantzaren ekuaziotik a gaia, askatu behar da: (4.17) ekuaziotik arrabola kanpoaldean kokatuta dagoenean, (4.37) ekuaziotik arrabola barnealdean kokatuta dagoenean eta (4.24) ekuaziotik arrabola euskarriaren gainean dagoenean. Azken kasuan, arrabola, euskarriaren gainean dagoenean, $c = 0$ denean alegia, a gaia askatzea posiblea da (4.25) ekuazioan ikus daitekeen bezala. Baina $c \neq 0$ denean, ezin da adierazpen esplizitua lortu. Kasu horietan, saiakuntzaren puntu bakoitzean, (4.17) eta (4.37) ekuazioetako konpliantza teorikoa, eta (5.9) ekuazioko konpliantza esperimentalak,

berdinak izan daitezzen a ren balioa bilatzen da, 5.6 Irudian irudikatzen den bezala. Horrela, a zehaztu daiteke, P eta δ balioak neurtzen diren saiakuntzaren puntu guztietan.



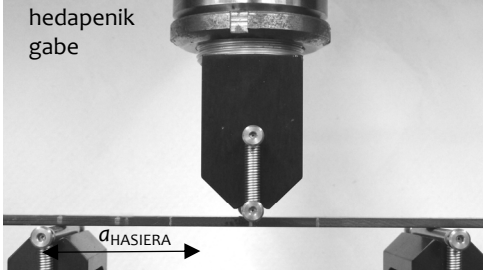
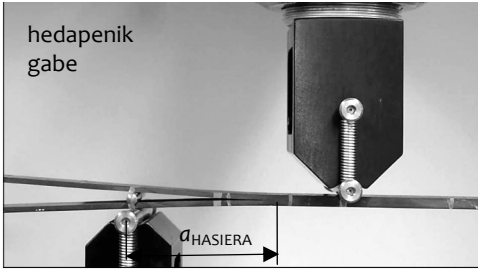
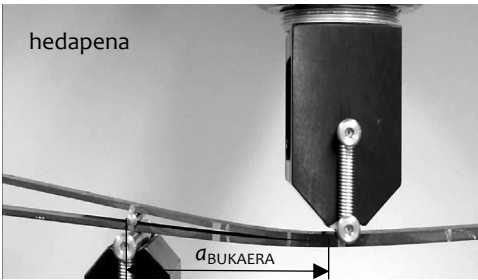
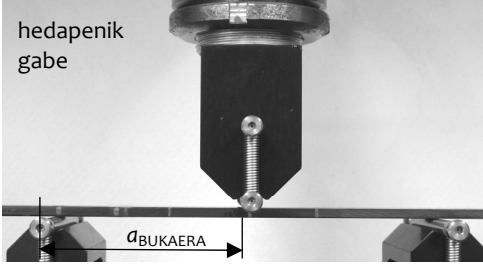
5.6 Irudia Konpliantza teorikoa eta esperimentalak modu mistoko saiakuntza batean

Saiakuntzak hasierakoan, probeta bakoitzean aurrepitzadura hedatzen da ENF saiakuntza bat eginez, pitzadura puntan ematen den erretxin bilgunearen, (*resin pocket*) eragina ekiditeko. Pitzadura luzeraren neurketaren egokitasuna aztertzeko, ENF saiakuntzak burutzen dira, BTBR metodoa egiaztapen metodo bezala erabiliz [55]. 5.7 Irudian ikus daitekeenez pitzadura-hedapena gertatu baino lehen konpliantza konstante mantentzen da, probeta eta euskarrien arteko kontaktuaren aldaketari dagokion konpliantza murrizketa gertatu gabe. Ondorioz, modu mistoko saiakuntzetan makurdura errotazioen eragina ez da kontuan hartu.



5.7 Irudia Saiakuntzaren konpliantza esperimentalta

Hurrengo prozedura esperimentalta jarraitu da:

1. urratsa	 <p>hedapenik gabe</p> <p>a_{HASIERA}</p>	<p>ENF saiakuntza pitzadura hedapenik gabe.</p> <p>BTBR metodoa aplikatuz, pitzadura luzeraren zehaztapena.</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>hedapenik gabe</p> <p>a_{HASIERA}</p>	<p>ENFR saiakuntza pitzadura hedapenik gabe.</p> <p>BTBR metodoa aplikatuz, pitzadura luzeraren zehaztapena. 1. urratsean lortutako emaitzarekin alderaketa.</p> <p>Hasierako pitzadura luzera : a_{HASIERA}</p>
4. urratsa	 <p>hedapena</p> <p>a_{BUKAERA}</p>	<p>ENFR saiakuntza pitzadura hedapena.</p> <p>BTBR aplikatuz azken puntuko pitzadura luzeraren zehaztapena.</p> <p>Bukaerako pitzadura luzera: a_{BUKAERA}</p>
5. urratsa	<p>Arrabola atera, probeta bere lekutik mugitu gabe</p>	
6. urratsa	 <p>hedapenik gabe</p> <p>a_{BUKAERA}</p>	<p>ENF saiakuntza pitzadura hedapenik gabe.</p> <p>BTBR metodoa aplikatuz, bukaerako pitzadura luzeraren zehaztapena. 4. urratsean lortutako emaitzarekin alderaketa.</p> <p>Bukaerako pitzadura luzera : a_{BUKAERA}</p>

5.6 Taulan eta 5.7 Taulan pitzadura luzera neurtzeko egindako saiakuntzen emaitzak azaltzen dira. Saiakuntza Mota delako zutabeetan, "h. gabe" izendapena erabili da hedapenik

gabe dela adierazteko, eta “heda” erabili da hedapenarekin egindako saiakuntza dela adierazteko.

5.6 Taula. Pitzadura luzeraren neurketen emaitzak, arrabolaren kokapena aldatuz

NOMENKLATURA	URRATSA	SAIAKUNTZA MOTA	a_{HASIERA} (mm)	a_{BUKAERA} (mm)
a40-R1-c0	1. Urratsa	ENF h. gabe	40,4	
	3. Urratsa	ENFR h. gabe	40,4	
	4. Urratsa	ENFR heda	40,4	47,1
	6. Urratsa	ENF h. gabe	47,0	
a40-R1-c5	1. Urratsa	ENF h. gabe	39,3	
	3. Urratsa	ENFR h. gabe	39,8	
	4. Urratsa	ENFR heda	39,8	45,2
	6. Urratsa	ENF h. gabe	45,3	
a30-R1-c8	1. Urratsa	ENF h. gabe	30,5	
	3. Urratsa	ENFR h. gabe	30,2	
	4. Urratsa	ENFR heda	30,2	35,1
	6. Urratsa	ENF h. gabe	35,5	

5.6 Taulan ikus daitekeen moduan, erradio berdinentzat, $R = 1$ mm, hiru kokapen desberdin aztertu dira. Hedapenik gabeko ENF saiakuntzaren emaitzak (1. urratsa), modu mistoko hedapenik gabeko saiakuntzen emaitzekin (3. urratsa) konparatuz, hasierako pitzadura luzeran desberdintasuna 0,7 mm baino txikiagokoa da, % 2 baino gutxiago. Desberdintasun hau, arrabola sartzean, probeta bere lekutik atera delako izan daiteke (2. urratsa). Nahiz eta kokapen markak egin, ezin da segurtatu kokapen beran egongo denik. Bestalde, modu mistoko saiakuntzak egin ondoren (4. urratsa), arrabola probetatik atera daiteke, probeta bere kokapenetik mugitu gabe. Saiakuntza-makinarekin indar txiki bat aplikatuz, probeta bere lekuan mantentzen da, eta arrabola atera daiteke ezer mugitu gabe (5. urratsa). Beraz, 4. urratsean neurtutako bukaerako pitzadura luzerek, 6. urratsean neurtutako pitzadura luzeren berdina izan behar dute eta tauletan letra lodiz idatzita daude. Kasu honetan, errore maximoa 0,4 mm-koa da, % 1 baino gutxiago.

5.7 Taula. Pitzadura luzeraren neurketen emaitzak, arrabolaren erradioa aldatuz

NOMENKLATURA	URRATSA	SAIAKUNTZA MOTA	a HASIERA (mm)	a BUKAERA (mm)
a40-R0,5-co	1. Urratsa	ENF h. gabe	39,8	
	3. Urratsa	ENFR h. gabe	39,8	
	4. Urratsa	ENFR heda	39,8	58,7
	6. Urratsa	ENF h. gabe	58,8	
a44-R0,9-co	1. Urratsa	ENF h. gabe	44,2	
	3. Urratsa	ENFR h. gabe	44,2	
	4. Urratsa	ENFR heda	44,2	57,8
	6. Urratsa	ENF h. gabe	58,3	
a45-R1,5-co	1. Urratsa	ENF h. gabe	44,9	
	3. Urratsa	ENFR h. gabe	45,7	
	4. Urratsa	MIX heda	45,7	55,7
	6. Urratsa	ENF h. gabe	57,1	

5.7 Taulan, arrabolaren kokapena finkatuta dago euskarriaren gainean, hau da, $c = 0$ eta hiru erradio desberdinekin saiakuntzak burutu dira. 1. urratseko emaitzak 3. urratseko emaitzekin konparatuz, errore maximoa 0,8 mm-koa da, % 2 baino gutxiago. Bukaerako luzerari dagokionez, errore maximoa 1,4 mm-koa da, % 3 baino gutxiago. 5.6 Taulan eta 5.7 Taulan ikus daitekeenez, orduan, modu mistoan neurtutako pitzadura luzeraren eta BTBR metodoaren bidez neurtutakoaren arteko adostasuna nabarmena da. Hortaz, konpliantza esperimentalaren aldakuntzan oinarrituz pitzadura luzeraren neurketa egokia dela ondoriozta daiteke.

5.5.2 Pitzadura-luzeraren neurketa optikoa

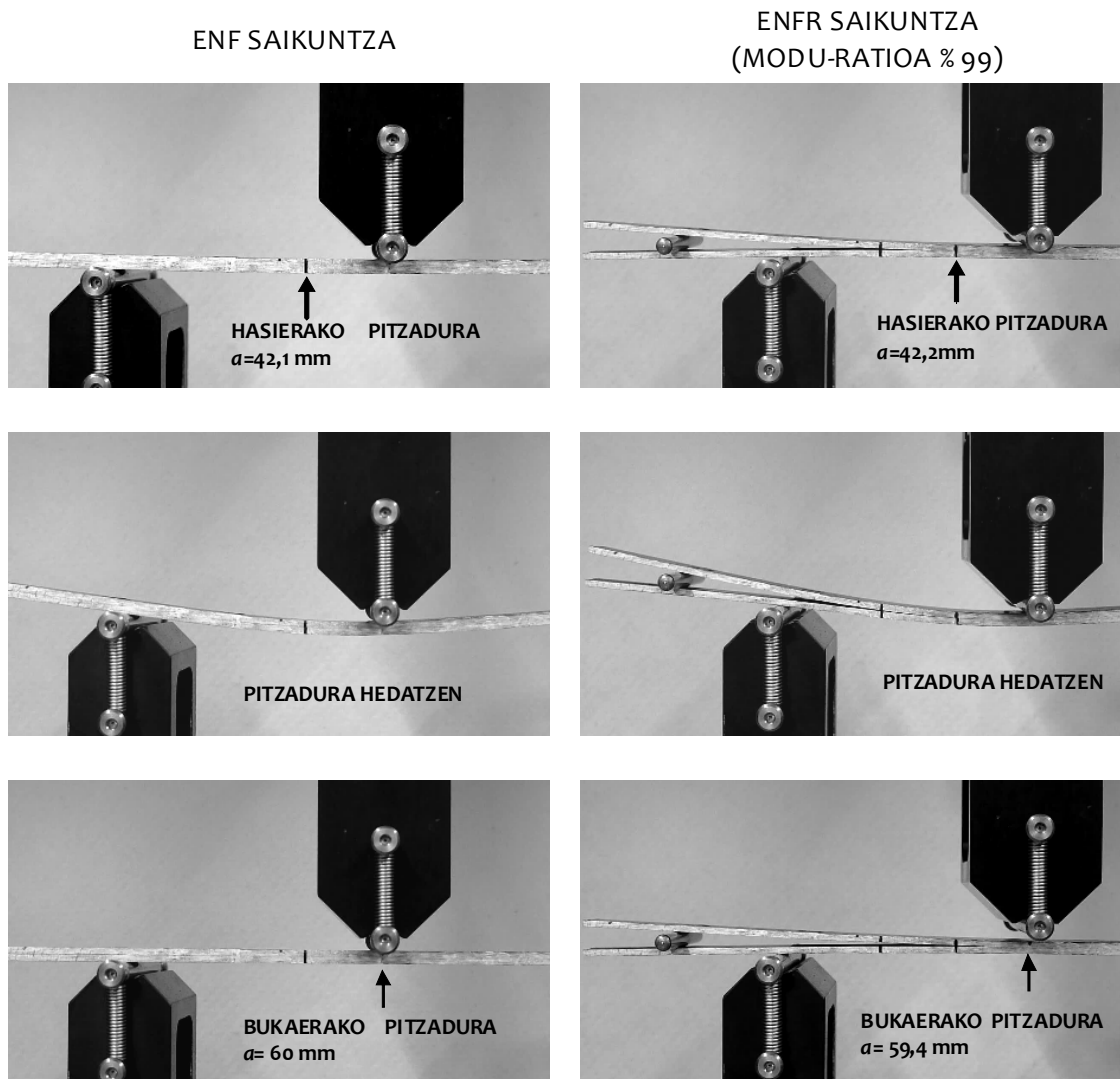
Proposatutako saiakuntza konfigurazioa, arrabola kanpoaldean kokatuz, pitzadura irekitzeko erabil daiteke. Kanpoaldean kokatzean, modu II-ren ekarpena oso handia da, ia modu II hutsa delarik. Suposa daiteke, pitzadura puntaren hedapena, ENF saiakuntzan baino errezago jarraituko dela bisualki neurtu nahi izanez gero. 5.8 Irudian bien arteko alderaketaren sekuentzia ikus daiteke. Ezkerreko zutabeen, ENF konfigurazioan hedapen saiakuntza baten hiru aldiune azaltzen dira:

- Saiakuntza hasi baino lehen: hasierako pitzadura markatuta

- Saiakuntzan zehar: pitzadura hedatzen ari denean
- Saiakuntza bukatu ondoren: bukaerako pitzadura markatuta.

Esan behar da, bai hasierako pitzadura, bai bukaerakoa, BTBR metodoa aplikatuz neurtu direla, eta gero probeta markatu dela, neurketa bisualen egokitasuna ezin baita ziurtatu.

Ondoren, pitzaduraren bi besoen artean arrabola sartu da, kanpoaldean kokatuz. Probeta euskarrietan mugitu da, hasierako pitzadura-luzera ENF-n burututakoaren antzekoa izan dadin. % 99-ko modu ratioko saiakuntza bat burutu da, arrabola kendu gabe, eta 5.8 Irudia eskuineko zutabeen hiru aldiune berdinak irudikatu dira. Kasu honetan, pitzadura-puntaren kokapena ere ez da bisualki markatu. ENFR saiakuntzaren konpliantzaren esperimentalaren aldakuntzan oinarritutako metodoa aplikatuz baizik.



5.8 Irudia ENF eta modu misto alderaketa pitzadura bisualki neurtzean

Arrabola sartzean, saiakuntza modu mistokoa izan arren, modu-ratioa % 100etik hurbil dago, hasierako pitzaduraren luzera eta arrabolaren kokapena direla eta. Beraz, modu II-ko saiakuntza bezala kontsidera daiteke. Modu II aztertzeko normak [48] gomendatzen duen konfigurazioa ENF da. Pitzadura bisualki neurtzea zaila da [51] eta askotan mikroskopiaok, irudien tratamendua edo sensore optikoak (FBG) erabiltzen dira [52,125,126]. ENFR konfigurazioan arrabola sartzean, pitzaduraren bi besoak aldentuta geratzen dira eta horrek pitzadura bisualki neurtzeko ohituta dagoenari lagundu diezaioke pitzaduraren neurketa optikoaren prozesuan 5.8 Irudian ikus daitekeenez.

5.6 ENERGIA ASKATZE TASEN KURBAK, R-KURBAK

Erresistentzia kurba (R-kurba) material konpositeen haustura portaera ebaluatzeko erabiltzen da, [21,39] R-kurbak haustura zailtasuna eta pitzadura hedapenaren arteko erlazioa azaltzen du. Oso garrantzitsua da R -kurba egokiro lortzeko metodo bat ezartzea, haustura zailtasuna aldatu egiten baita pitzadura hedatzen den heinean [78].

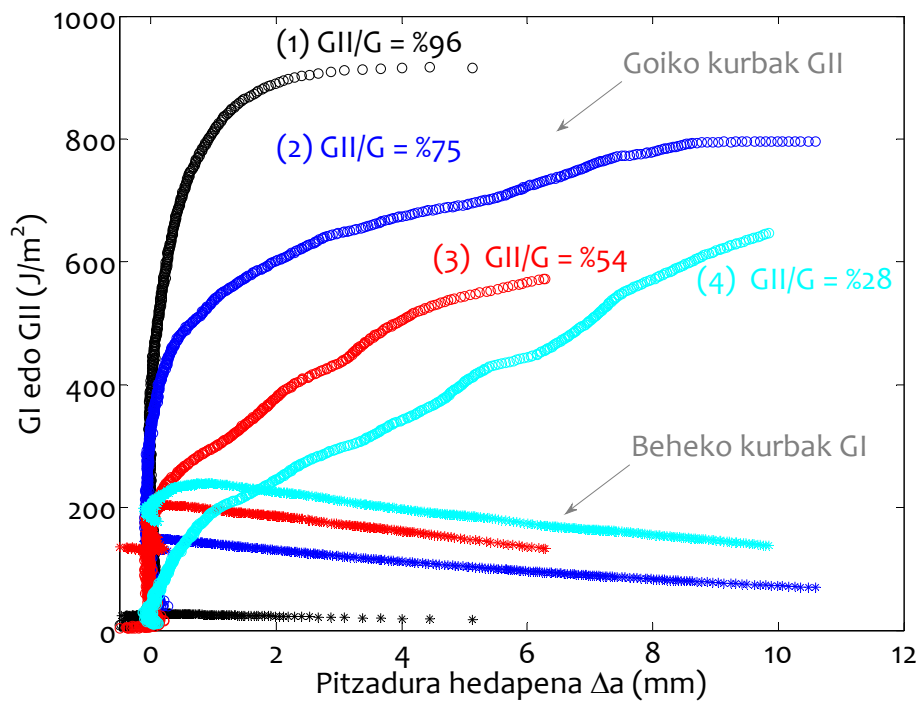
P eta δ ezagunak diren puntuetan pitzadura luzera kalkulatu ahal izanak, puntuz-puntu, energia askatze tasak kalkulatzeko ahalbidetzen du, R-kurbak definituz. Hau da, saiakuntzaren puntu bakoitzean α -ren balioa izanda, eta modulu elastikoak eta probetaren geometria ezagunak direlarik, Y indarraren balioa lortzen da, (4.6), (4.28) eta (4.18) ekuazioetatik. Ondoren, (4.67) eta (4.68) ekuazioetako pitzadura luzera zuzenketa G_I -en kalkulurako kontuan hartuz, parametro guztiak, energia askatze tasen (4.51), (4.54) eta (4.55) ekuazioetan ordezkatuz G_I eta G_{II} -en balioak zehazten dira. Aipagarria da, datu esperimentalekin burututako kalkulu guztiek ebakitzailaren eraginak barneratzen dituzte, energia askatze tasen (4.49) eta (4.52) ekuazioetan agertzen diren adierazpenak erabiliz. Hala ere, azalpenak argiagoak izan daitezen, arestian makurduraren eragina soilik barneratzen duten ekuazioak azaldu dira.

Lau modu-ratio desberdineko saiakuntzak erabili dira energia askatze tasen azterketa esperimentalak burutzeko asmoz eta 5.8 Taulan aurkezten dira.

5.8 Taula. Energia askatze tasa aztertzeko baldintza esperimentalen laburpena

ID	NOMENKLATURA	HASIERAKO G_{II}/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

5.9 Irudian, modu mistoko saiakuntzen R-kurbak azaltzen dira. Arrabola erradio desberdinak kokapen desberdinetan erabili dira, era askotako modu nahasketak lortzeko asmoz.



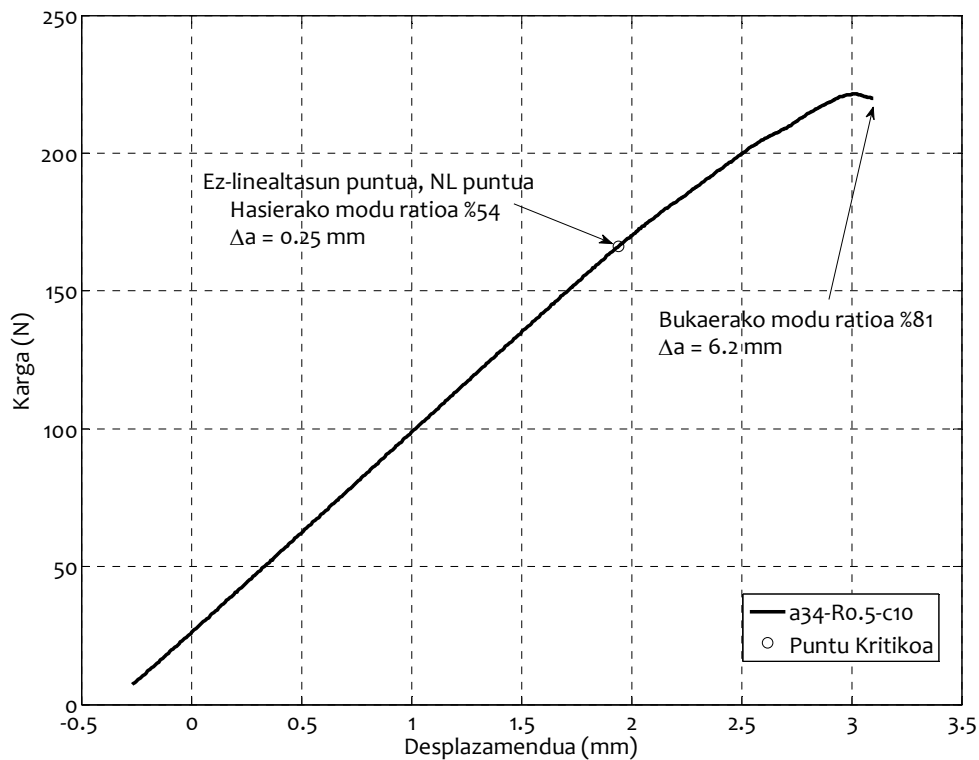
5.9 Irudia Modu misto saiakuntzen R-kurbak

Goiko kurbak G_{II} -ri dagozkie eta behekoak, G_I -eri. Modu-ratio berdinari dagozkien G_I eta G_{II} kurbak kolore berdinarekin irudikatu dira. Pitzadura hedatzean, G_I en kurbak astiro txikiagotzen doaz, aldi berean G_{II} kurbak gorantz egiten dutelarik. Horrek esan nahi du, modu-ratioa, G_{II}/G saiakuntzan zehar aldatuz doala.

Modu mistoa aztertzeko hainbat saiakuntzetan, MMB esate baterako, edozein pitzadura luzerarentzat modu-ratioa konstante mantentzen dela onartzen da [61]. Hala ere,

konposite laminatu batean pitzadura hedatzen denean hori ez da benetazko egoera. Orokorrean, deslaminazioa irekitze modua nagusia delarik hasten da, eta pixkanaka lerraketa modurantz aldatuz doa. Beraz, benetazko hedapen batean modu ratioa aldakorra da pitzadura luzerarekin [29]. ENFR saiakuntzan, 5.9 Irudian ikus daitekeenez, G_{II} handituz doa a handitzean, eta beraz, laborategiko baldintzetan ematen den pitzadura-hedapena benetazko laminatuetan ematen denaren antzekoagoa bilakatzen da.

Pitzaduraren hasiera puntua edo puntu kritikoa, pitzadura hedapena zero deneko azken puntua bezala definitzen da. Hortaz, G_I eta G_{II} -ren hasierako balioak lortzeko, kurben eta ardatz bertikalaren elkargunea bilatu behar da. Puntu horretan data dispersio handia dagoenez, hasierako balioa edo inimizazio balioa, pitzadura hedapena $\Delta a = 0,25$ mm denean definitu da. Puntu hori ez linealtasun puntuarekin bat dator 5.10 Irudian ikus daitekeen bezala, modu mistoko arauaren [60] arabera hori delarik inimizazioa definitzeko irizpidetako bat. Puntu horretan, beraz, hasierako modu-ratioa definitzen da, % 54 delarik. Bukaerakoa kasu honetan, $\Delta a = 6,2$ mm denean eman da, modu-ratioa % 81 delarik.

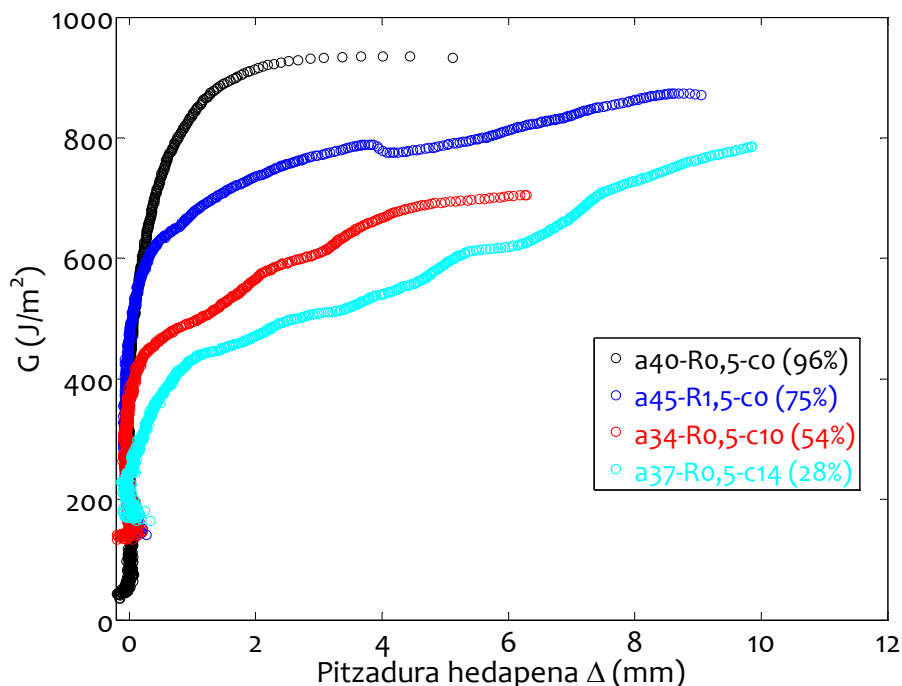


5.10 Irudia Ez linealtasun puntua karga-desplazamendu kurban

Pitzadura luzeraren kalkulua, konpliantza experimentalaren aldaketan oinarritzen denez, karga-desplazamendu kurban linealtasun galera pitzadura hedatzerakoan gertatuko dela espero da, konpliantza experimentalaren 5.7 Irudian ikus daitekeen bezala.

5.9 Irudian irudikatutako energia askatze tasen kurben modu-ratio handiena % 96 da eta txikiena % 28 da. Modu nahasketaren azterketa analitikoa egitean, 4.6 atalean, modu-ratio guztiak lor zitekeela ondorioztatu zen. Hala ere, lan experimentalean zehar, modu-ratio txikiak lortzeko arazoak aurkitu dira. Arrabolaren erradio handiak edo arrabola barnerago sartzean, pitzadura irekitzen dela ikusi da, karga aplikatu gabe, soilik arrabola pitzaduran sartzearekin. Ezin izan dira modu nahasketen 4.17 Irudian eta 4.18 Irudian azaltzen diren saiakuntza baldintzak lortu. Alde batetik arrabola kanpoaldea kokatzean, erradio handiek ez linealtasun geometrikoak sor ditzakete. Beste aldetik, arrabola barnealdean gehiegi sartzeak, pitzaduraren hedapen espontaneoak dakar. Beraz, modu nahasketa desberdinak lortzeko, arrabola euskarriaren bertikalean ($c = 0$) edo barnealdean ($c > 0$) kokatu da, eta erabili den erradio maximoa $R = 1,5$ mm izan da.

Energia askatze tasa osoaren kurbak, hau da $G = G_I + G_{II}$, 5.11 Irudian ikus daitezke.

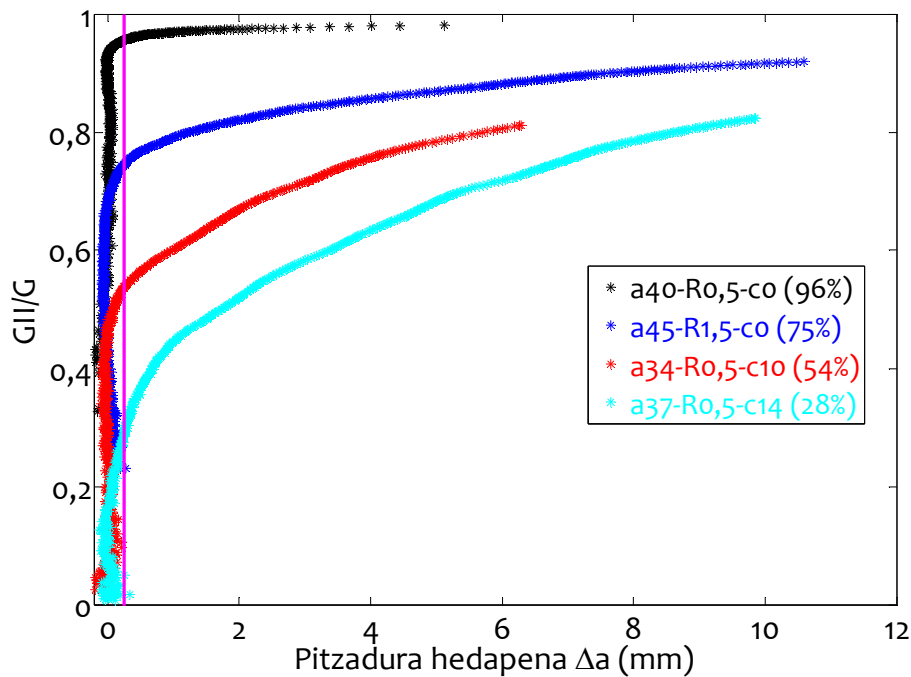


5.11 Irudia Energia askatze tasa totala pitzadura hedapenean zehar

5.11 Irudiaren arabera, modu II nagusiena denean, G -k balio konstante baterantz jotzen du. Modu I-en ekarpena handia denean, (% 28ko hasierako modu-ratioa), energia askatze tasa osoak gora egiten jarraitzen du. Joera horiek, modu hutsen emaitzekin bat datoz, izan ere,

ENF saiakuntzako R -kurban balio konstante bat lortzen da [55] eta DCB saiakuntzaren R -kurba etengabe handiagotzen jarraitzen du [46], hurrenez hurren.

Arestian komentatu den moduan, modu-ratioa aldakorra da, 5.12 Irudian, modu-ratioaren balioa saiakuntzako puntu guztietan azaltzen da. Lerro bertikal arrosak markatzen du puntu kritikoa edo pitzadura hedapenaren hasiera, hor zehazten baita hasierako modu-ratioa.



5.12 Irudia Modu-ratioa pitzadura hedapenean zehar

Hedapenean zehar modu II-ren eragina txikiagotzen eta modu I-ena handiagotzen denez, modu-ratioa aldatzen doa, handitzen doa, 5.12 Irudian ikusten den moduan. Hortaz, haustura saiakuntza bakar batekin, modu-ratioaren arabera haustura zailtasunaren bilakaera lor daiteke.

5.7 G_{Ic} ETA G_{IIc} -EN KALKULUA

Lan honetan, (4.66) ekuazioko haustura irizpidea lineala aukeratu da. Hasierako modu-ratio desberdinak dituzten saiakuntzetan, hedapenaren puntu guztiak kontuan hartuz, G_I energia askatze tasa, G_{II} ren arabera irudikatzen da, irizpide lineala erabiltzean egiten ohi den bezala [68,70], bi helbururekin:

- Irizpide lineala haustura deskribitzeko egokia den konprobatzea
- Lortutako G_{Ic} eta G_{IIc} , modu hutsei dagozkien energia askatze tasa kritikoekin alderatzea

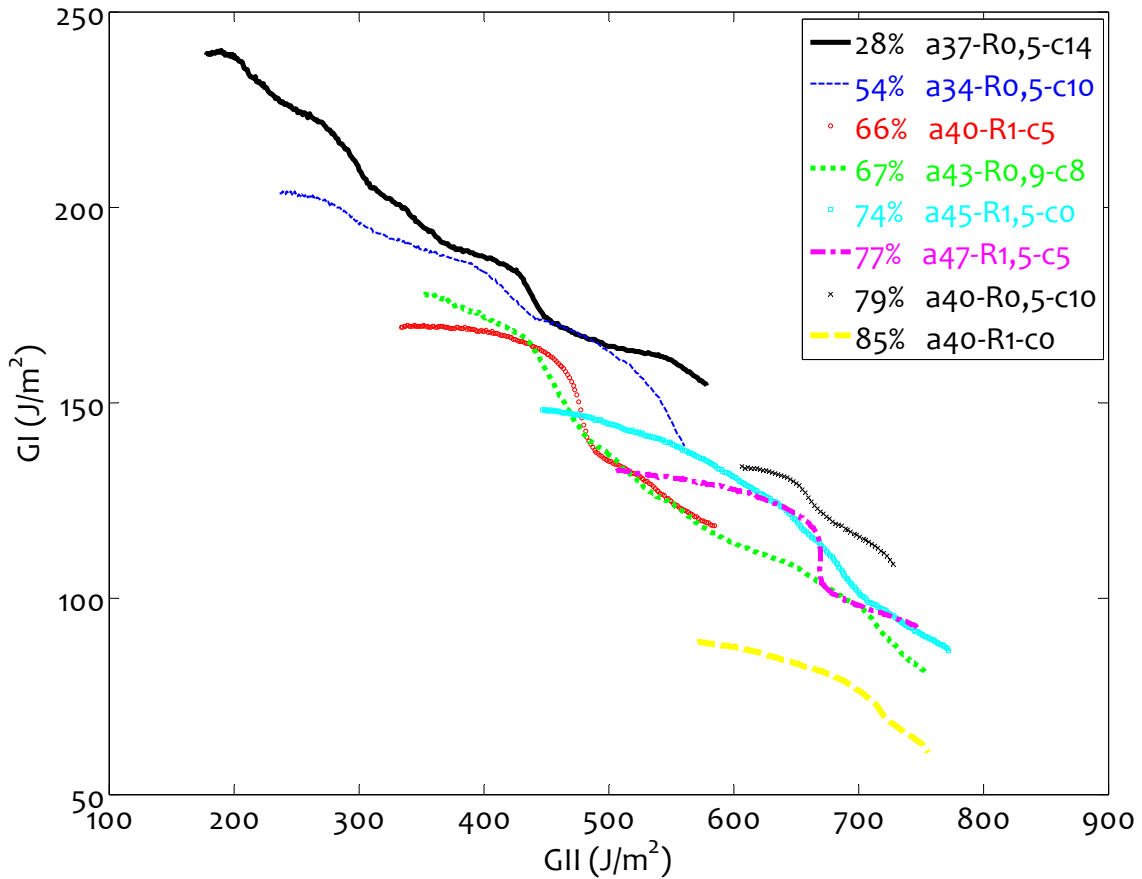
Konprobazio hauek egokiro egiteko asmoz, zortzi saiakuntza desberdinak hartuko dira kontuan. 5.9 taulan saiakuntzen baldintzak laburtzen dira.

5.9 Taula. G_{Ic} eta G_{IIc} 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

Energia askatze tasen kurben 5.9 Irudian ikus daitekeenez, modu-ratioa baxua denean, G_I -en kurbak hasieran goruntz egiten du. Gero, gehiengo balioaren ondoren, beheruntz doa saiakuntza bukatu arte. Esate baterako, hasierako % 28ko modu-ratioaren kasuan, urdin argiz irudikatuta, G_I -en jaitsiera, $\Delta a = 0,85$ mm denean hasten da, eta hor modu-ratioa %43 da.

5.13 Irudian, modu-ratio desberdineko G_I - G_{II} grafikak agertzen dira. Bertan, hedapenaren datuak G_I -en jaitsieratik aurrera, irudikatzen dira. Grafikaren legendan agertzen diren modu-ratioak hasierakoak dira.



5.13 Irudia Hedapenaren datuak modu-ratio ezberdinentzat

Haustura irizpide linealaren egokitasuna aztertzeko asmoz, R2 mugatze koefizientea erabiliko da, hurrengo eran definitua dagoena [127]

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{RES}}{SS_{TOT}}$$

$$SS_{RES} = \sum_i^n (G_{IIexp_i} - G_{IIcalculated_i})^2$$

$$SS_{TOT} = \sum_i^n (G_{IIexp_i} - G_{IIexpBATAZBESTEKO})^2$$
(5.11)

Aipagarria da R koefizientearen balio berdinak lortzen direla G_I -ren adierazpena eta G_{II} -ren adierazpena erabiltzean. Hasierako % 28 modu-ratiodetik, % 85 modu-ratiora arteko doikuntza linealen emaitzak, 5.10 Taulan azaltzen dira.

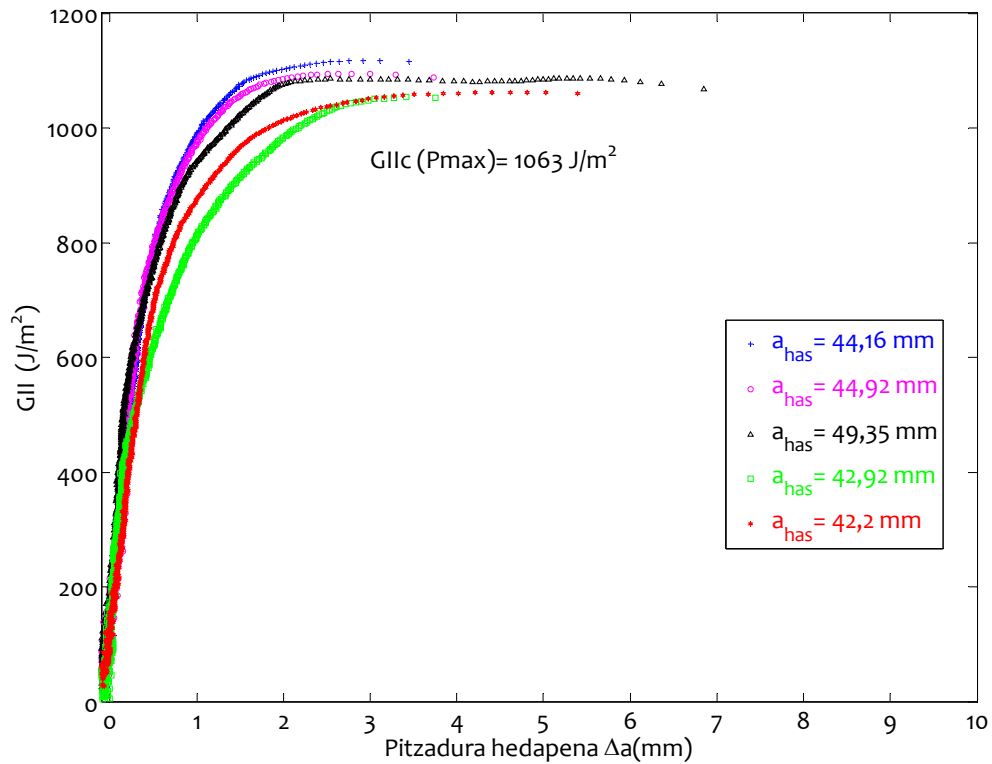
5.10 Taula. Doikuntza linealen emaitzak

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	1251	0,983
54	55	81	256	1328	0,961
66	67	83	275	1012	0,892
66	67	90	268	1071	0,977
74	75	91	261	1159	0,965
77	77	89	258	1154	0,860
79	79	87	278	1198	0,969
85	85	93	225	1045	0,991
BATAZBESTEKO BALIOA			263 ± 16	1152 ± 100	

5.10 Taulan ikus daitekeenez, R_2 koefizientearen emaitzen arabera, haustura irizpide lineala egokia dela ondorioazta daiteke, R_2 -ren balio guztiak 0,86 baino handiagoak baitira. Emaitz hau, argitaratutako beste lan batzuekin [107] bat dator. Honez gain, aipagarria da zortzi probetei dagozkien G_{Ic} -ren eta G_{IIc} -ren desbideratze tipikoaren balioak baxuak direla, % 10 baino txikiagoak.

Modu I hutsaren haustura zailtasunari dagokionez, ASTM arauaren arabera [40], G_{Ic} zehazteko gomendatzen den definizioa, ez-linealtasun puntua da, NL point delakoa. DCB saiakuntzaren R-kurba aztertuz [46], G_{Ic} -ren balioa NL puntuan, 240 J/m² da, **5.10 Taulan** agertzen den emaitzarekin bat datorrelarik.

Modu II hutsaren energia askatze tasa kritikoari dagokionez, ASTM arauaren arabera, G_{IIc} karga maximoko puntuan kalkulatzen da. 5.14 Irudian, ENF konfigurazioan, 120 mm argian entsaiatutako bost probeten R-kurbak azaltzen dira. Karga maximoko puntuan lortutako G_{IIc} -ren batzbesteko balioa, BTBR metodoa aplikatuz, $G_{IIc} = 1063 \pm 25,1$ J/m² izan da, **5.10 Taulan** agertzen den emaitzarekin bat datorrelarik. Beraz, modu hutsen saiakuntzetan oinarrituta, irizpide linealaren egokitasuna egiaztatu ondoren, modo mistoko saiakuntza bakar batekin G_{Ic} eta G_{IIc} balioak lor daitezke. Haustura irizpide lineala baietsi denez, bere adierazpena aztertutako materialarentzat eta ENFR test konfigurazioarentzat, honela berriatut daiteke



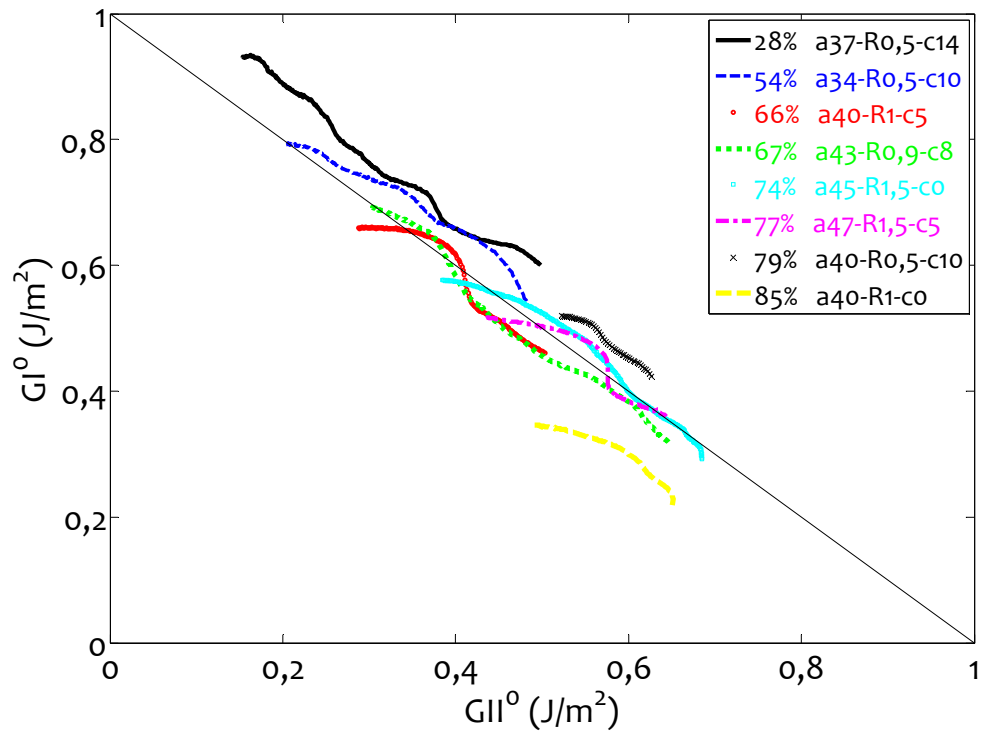
5.14 Irudia ENF saiakuntzak G_{IIc} kalkulatzeko

$$\frac{G_I}{263} + \frac{G_{II}}{1152} = 1 \quad (5.12)$$

Modu bakoitzaren ekarpena kontsideratuz, modu-ratio normalizatuak hurrengo eran defini daitezke

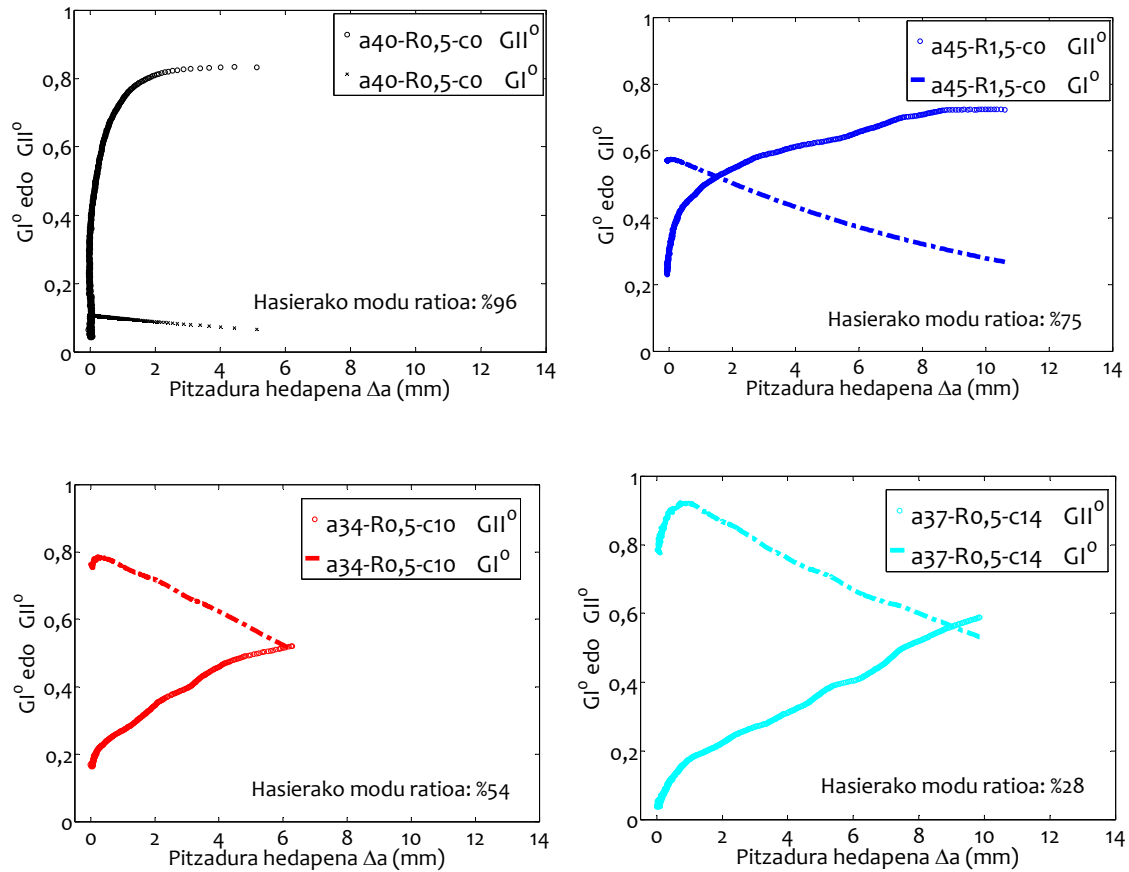
$$\frac{G_I}{G_{Ic}} = G_I^o \quad \frac{G_{II}}{G_{IIc}} = G_{II}^o \quad (5.13)$$

5.15 Irudian, 5.13 Irudia datuak, (5.13) ekuazioko modu-ratio normalizatuaren arabera azaltzen dira.



5.15 Irudia Hedapenaren datuak, modu-ratio normalizatuen arabera

Irudikatutako lerro zuzena, (5.12) ekuazioko irizpide linealaren adierazpena da. Bestalde, 5.9 Irudian agertzen diren R-kurbak, modu normalizatuen arabera azaltzen dira 5.16 Irudian . Argiago ikusteko, modu-ratio bakoitzari dagozkion saiakuntzak irudi desberdinetan irudikatzen dira.



5.16 Irudia Energia askatze tasa normalizatutak, balio kritikoaren arabera

5.16 Irudiaren arabera, modu II nagusia denean, G_{II}^0 kurba G_I^0 kurbaren gainetik dago, R-kurbetan bezala. Hala ere, % 28ko hasierako modu-ratioarentzat, G_I^0 kurba G_{II}^0 kurbaren gainetik dago, ia hedapen guztian, R-kurbetan ez bezala. Parametro normalizatu hauek haustura modu bakoitzaren eragina hobeto adierazten dute, R-kurbak baino.

5.8 EMAITZEN EZTABAIDA

Haustura irizpide lineala erabili da baldintza desberdinak dituzten zortzi saiakuntzen datu esperimentalak doitzeko. Alde batetik doikuntzaren kalitatearen adierazten duen R mugatze koefizientea 0,86 baino handiagoa da aztertutako kasu guztietan. Beste aldetik, lortutako G_{IC} eta G_{IIc} -en batzbesteko balioak bat datoz modu hutsen saiakuntzetatik lortutako balioekin, horrez gain, desbideratze tipikoaren balioak baxuak dira, % 10 baino txikiagoak.

Guzti hori kontuan hartuz, irizpide lineala ENFR saiakuntzarako, aztertutako materialaren haustura adierazteko egokia dela esan daiteke. Beste material baten kasurako, ENFR saiakuntza G_{Ic} eta G_{IIc} kalkulatzeko modu hutsen saiakuntzen osagarri gisa kontsidera daiteke, beti ere irizpide lineala betetzen dela konprobatu ondoren.

6.

PITZADURA HEDAPENAREN ANALISIA

6.1 SARRERA

Materialaren haustura-zailtasuna, energia askatze tasa kritikoaren bitartez, G_c zehaztu daiteke. Pitzadura-hedapena eman dadin, energia askatze tasak balio kritiko horretara heldu behar du. Beraz, haustura saiakuntzen helburu nagusietako bat, askatutako energia tasa kritikoa zehaztea da. Pitzadura-hedapen egonkorra beharrezkoa dela suposatzen da, energia askatze tasen kurbak egokiro irudikatzeko [23].

Azken hamarkadetan hainbat konfigurazio garatu dira I/II modu mistoa aztertzeko. Hala ere, modu mistoko pitzadura-hedapenaren egonkortasuna ez dago arauan definituta. Arauan egiten den aipamen bakarra, modu ratio altua deneko kasuetan, pitzadura-hedapena maiz ezegonkorra dela da eta horrek eragozten duela haustura zailtasunaren hedapen balioak zehaztea. Horretaz gain, arauan aipatzen da hasierako pitzadura-luzera handiagoek, hedapen egonkorra izateko joera handitzen dutela [60]. I eta II modu hutsei dagokienez, DCB konfigurazioa beti egonkortzat hartzen da [40], eta ENF konfigurazioa $a/L > 0.7$ denean egonkorra dela esaten da [48,54].

Philips-ek eta Wells-ek [128], konpositeetan zeharkako pitzaduren egonkortasuna aztertu zuten. Egonkortasun muga zehazteko, tentsioaren pitzadura luzerarekiko deribatua egin zuten, balio kritikoa lortzeko asmoz. Hasierako pitzadura-luzera balio kritikoa baino txikiagoa bada, hasierako haustura energiak determinatzen duen tentsio balioarekin, pitzadura ezegonkorki hedatzen da, eta karga beherakorrekin pitzadura espontaneoki

hazten da. Aitzitik, hasierako pitzadura balio kritikoa baino luzeagoa bada, bere hedapena egonkorra izango da, eta bakarrik haziko da karga handitzen bada.

Allix-ek eta Corigliano-k [129], I/II modu mistoko pitzadura-hedapenaren simulazioaren erronkari ekin zioten. Hausturaren mekanika lineala-elastikoaren (LEFM) hipotesiak aplikatuz lortutako emaitza analitikoak, ELS asimetriko konfigurazioaren pitzadura-egonkortasunaren emaitza numerikoekin alderatu zituzten. Emaitza analitikoen arabera, karga kontrolatuko saiakuntzetan, pitzadura-hedapena beti da egonkorra, eta desplazamendu kontrolatuko saiakuntzetan, egonkortasun baldintza $a/L > 0.42$ da. Proposatutako modelo ez linealaz lortutako emaitzen arabera, desplazamendu kontrolatuko kasuan, egonkortasun baldintza $a/L > 0.435$ da, emaitza analitikoarekin bat datorrena.

Szekrenyes-ek [130], behaketa esperimentalen bidez, konpliantzaren ohiko irizpidea egiaztatu zuen, energia askatze tasaren deribatuan oinarrituz. Material gardenak erabili zituen, pitzadura-luzera eta pitzadura-hedapena bistaz neurtzeko. Pitzadura salto baten aurreko unea definitu zuen egonkortasunetik ezegonkortasunerako iragate baldintza bezala. Sistemaren egonkortasunak, desplazamendu kritikoaren deribatuarekiko menpekotasuna zuela ikusi zuen. Desplazamendu kritikoa pitzaduraren hasieran, karga aplikazio-puntuaren desplazamendua delarik. Hainbat konfigurazio eta probeta desberdinetan, hasierako pitzadura-luzera desberdinez egindako saiakuntzen bidez, desplazamendu kritikoa eta pitzadura-luzeraren arteko erlazioa zehaztu zuen. Pitzadura-luzera kritikoa, datu esperimentalen doikuntza egin ondoren lortutako kurbak diferentziazatuz zehaztu zuen. Egonkortasun muga desplazamendu kritikoak bere balio txikiena hartzen zuen puntuan zegoela ondorioztatu zuen.

Kapitulu honetan, I/II modu mistoan pitzadura-hedapenaren jarduketa aztertzen da ENFR konfigurazioa erabiliz. Pitzadura-hedapeneran egonkortasun baldintza, lan honetan garatutako energia askatze tasa baliokide baten hurbilketaren deribatuan oinarrituz zehazten da. Bestalde, errore analisi bat burutzen da, konpliantzaren neurketak pitzadura-luzeraren kalkuloan eta energia askatze tasa baliokidean duen eragina aztertzeko.

Hedapenan zehar datu esperimentalak aztertuz, energia askatze tasa baliokidearen hurbilketa balioztatzen da, eta pitzadura-hedapenaren egonkortasuna aztertzen da.

Azkenik, ENFR konfigurazioan baldintza onenetan saiakuntzak egiteko gomendioak azaltzen dira.

6.2 ENERGIA ASKATZE TASA BALIOKIDEA, G_{eq}

Pitzadura-hedapena soilik gertatzen da, eskuragarri dagoen energia, G , nahikoa bada, pitzadura hazkunderak behar duen energiaren hornitzeko [23]. Pitzadura handitzeko behar den energiari, energia askatze tasa kritikoa deritzo, G_c . Modu hutsentzat, pitzadura-hedapenaren baldintza kritikoa, hau da, hazkundera gertatuko deneko baldintza honakoa da:

$$\begin{aligned} G_I &\geq G_{Ic} \\ G_{II} &\geq G_{IIc} \end{aligned} \quad (6.1)$$

Hala ere, modu I-ek eta modu II-k parte hartzen dutenean, energia askatze tasa $G = G_I + G_{II}$ da. Baina $G_c \neq G_{Ic} + G_{IIc}$, material bakoitzarentzat eta saiakuntza konfigurazio bakoitzarentzat, dagokion haustura irizpidea kontuan hartu behar da. Horrek suposatzen du energia askatze tasa kritikoa G_c , modu ratioarekiko menpekotasuna duela. Izan ere, modu ratio handia duen saiakuntza batean, G_c -ren balioa, G_{IIc} balioaren antzekoa izango da, eta modu ratio txikia denean, berriz, G_c -ren balioa G_{Ic} balioaren antzekoa izango da. Beraz, nahiz eta G_{Ic} eta G_{IIc} materialaren ezaugarriak izan, G_c ez da.

Lan esperimentalaren 5.7 atalean aipatu bezala, irizpide lineala baietsi da pitzadura-hedapena adierazteko, aztertutako materiala eta ENFR saiakuntza konfiguraziorako. Beraz, pitzadura-hedapena baldintza honako eran adieraz daiteke:

$$\frac{G_I}{G_{Ic}} + \frac{G_{II}}{G_{IIc}} \geq 1 \quad (6.2)$$

(6.2) ekuazioa, (6.1) ekuazioko antzeko eran adieraziz, pitzadura-hedapena baldintza orduan:

$$G_I G_{IIc} + G_{II} G_{Ic} \geq G_{Ic} G_{IIc} \quad (6.3)$$

(6.3) ekuazioko ezkerreko gaia pitzadura hazkundera gertatzeko eskuragarri dagoen energia da, eta eskuineko gaia, pitzadura-hedapena gertatzeko, energia horren balio kritikoa da. (6.1) ekuazioa eta (6.3) ekuazioa erkatuz, energia askatze tasa baliokidea G_{eq} , eta energia askatze tasa baliokide kritikoa G_{eqc} hurrengo eran defini daitezke:

$$\begin{aligned} G_{eq} &= (G_I G_{IIc} + G_{II} G_{Ic})^{1/2} \\ G_{eqc} &= (G_{Ic} G_{IIc})^{1/2} \end{aligned} \quad (6.4)$$

Beraz, esan daiteke pitzadura hedatuko dela, hurrengo baldintza betetzen denean:

$$G_{eq} \geq G_{eqc} \quad (6.5)$$

6.3 PITZADURA-HEDAPENAREN EGONKORTASUNA

6.3.1 Egonkortasunaren definizioa

Sistema bat egonkorra dela esaten da, sistema horretan sarrera-parametroen aldaketa mugatu batek ez badu irteera-parametroen aldaketa infinitu bat eragiten [131]. Saiakuntza makinetan burututako haustura saiakuntzei dagokienez, sarrera-parametroak makinak eragindako indarra edo desplazamendua dira, eta irteera-parametroa pitzadura luzera da. Beraz, haustura saiakuntza bat, pitzadura-hedapenean zehar, egonkorra da, makinak eragindako kargaren edo desplazamenduaren aldaketa infinitesimal batek, pitzadura-luzeran ez badu aldaketa infinitu bat eragiten.

Schwalbe et al.-en arabera [36], desplazamendu kontrolatuaren menpeko saiakuntzei dagokienez, pitzadura hazkunde bat egonkorra da, eragindako desplazamendua konstante mantentzean, pitzadura gelditzen bada.

Lan honetan, egonkortasunaren baldintza G_{eq} energia askatze tasa baliokideari aplikatzen zaio:

$$\frac{dG_{eq}}{da} \leq \frac{dG_{eqc}}{da} \quad \text{eta} \quad G_{eq} = G_{eqc} \quad (6.6)$$

Pitzaduraren hedapenean zehar G_{eqc} konstantea dela onartuz, (6.6) ekuazioko egonkortasun baldintza, honako eran sinplifika daiteke:

$$\frac{dG_{eq}}{da} \leq 0 \quad (6.7)$$

(6.4) ekuaziko energia askatze tasa, (6.7) egonkortasun baldintzan ordezkatzuz:

$$\frac{dG_{eq}}{da} = \frac{1}{2} (G_I G_{IIc} + G_{II} G_{Ic})^{-1/2} \left(\frac{dG_I}{da} G_{IIc} + \frac{dG_{II}}{da} G_{Ic} \right) \leq 0 \quad (6.8)$$

(6.8) ekuazioko emaitza positiboa bada, pitzadura hazkundera ezegonkorra da, askatutako energia, gainazal azalera berria sortzeko behar den energia baino gehiago delako. Emaitza negatiboa bada, kanpoko lana aplikatu beharko zaio pitzaduraren hedapena mantentzeko.

6.3.2 Karga Kontrolatua

Arrabola barnealdean kokatuta dagoeneko kasurako, $G_I = G_I(a,P)$ eta $G_{II} = G_{II}(a,P)$ kontsideratuz, modu bakoitzari dagokion energia askatze tasaren deribatu osoa, pitzadura luzerarekiko honako eran adieraz daiteke:

$$\begin{aligned}\frac{dG_I}{da} &= \frac{\partial G_I}{\partial a} + \frac{\partial G_I}{\partial P} \frac{\partial P}{\partial a} \\ \frac{dG_{II}}{da} &= \frac{\partial G_{II}}{\partial a} + \frac{\partial G_{II}}{\partial P} \frac{\partial P}{\partial a}\end{aligned}\quad (6.9)$$

Karga konstantearen baldintza aplikatu ondoren, eta (4.54) ekuazioko G_I eta G_{II} ren adierazpenak, (6.9) ekuazioan ordezkatuz:

$$\begin{aligned}\left(\frac{dG_I}{da}\right)_{p_{kte}} &= \frac{\partial G_I}{\partial a} = -\frac{3E_f h^3 R^2}{(a-c)^5} - \frac{3PRc}{2b(a-c)^3} \\ \left(\frac{dG_{II}}{da}\right)_{p_{kte}} &= \frac{\partial G_{II}}{\partial a} = \frac{9P^2 a}{8E_f b^2 h^3}\end{aligned}\quad (6.10)$$

Hortaz, (6.8) ekuazioko egonkortasun baldintza honako eran adieraz daiteke:

$$\left(\frac{dG_{eq}}{da}\right)_{p_{cte}} = \frac{1}{2} \left(\left(\frac{3R^2 E_f h^3}{4(a-c)^4} + \frac{3PRc}{4b(a-c)^2} + \frac{3P^2 c^2}{16E_f b^2 h^3} \right) G_{IIc} \right)^{-1/2} \left(\left(-\frac{3E_f h^3 R^2}{(a-c)^5} - \frac{3PRc}{2b(a-c)^3} \right) G_{IIc} + \frac{9P^2 a}{8E_f b^2 h^3} G_{Ic} \right) \leq 0 \quad (6.11)$$

Azterketa analitikoa egiteko erabili den materiala karbono zuntzez eta epoxi matrizez osatutako norabide bakarreko T300/F593 konpositea da. Bere ezaugarriak, 6.1 Taulan azaltzen dira. G_{Ic} eta G_{IIc} -ren **5.10 Taularen** emaitzak dira (6.4) ekuazioko energia askatze tasa baliokide kritikoa G_{eqc} balio horiekin kalkulatu dago.

Probeten dimentsioei dagokienean, probeten luzera 200 mm-koa da. Lodiera ($2h$) eta zabalaren (b) balio nominalak, 3 mm eta 15 mm hurrenez hurren. Saiakuntza guztiak 120 mm argiarekin ($2L$) burutu dira.

6.1 Taula. F593/T 300 materialaren ezaugarri mekanikoak

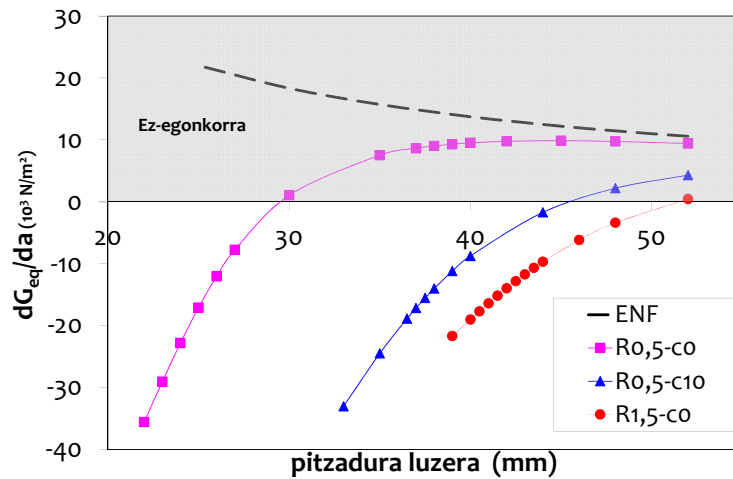
Propietatea	Balioa
E_{1f1} (MPa)	107,4
E_{22} (MPa)	10,6
G_{12} (MPa)	4,3
G_{Ic} (J/m ²)	263
G_{IIc} (J/m ²)	1152
G_{eqc} (J/m ²)	550

(6.11) ekuazioko egonkortasunaren baldintzan, materialaren ezaugarriak eta probetaren geometria ez ezik, aplikatuta dagoen karga ere behar da. Egonkortasunaren azterketa burutzeko, puntu kritikoa aukeratu da. Beraz, P_c lortzeko, arestian baieztatu den irizpide lineala erabiliko da. (4.54) ekuazioko G_I eta G_{II} ren adierazpenak, irizpide linealaren (4.66) ekuazioan ordezkatzuz iterazio-prozesu bat jarraituz.

Material jakin baterako eta probetaren geometria jakin baterako, G_{II}/G modu-ratio eremu zabal bat lortzeko asmoz, arrabolaren erradioa eta bere kokapena alda daitezke.

Konpliantzaren (4.37) ekuazioan ikus daitekekeen moduan, ezin da a/L , pitzadura-luzera normalizatuaren adierazpen esplizitu bat lortu, beraz, (6.11) ekuazioko G_{eq} -ren deribatua a luzera desberdinen arabera irudikatzen da 6.1 Irudian.

Irudien legendetan agertzen den nomenklatura honakoa da: R_j - c_k . R_j arrabolaren erradioa izanik eta c_k arrabolaren kokapena definitzen duen parametroaren balioa. Adibidez: $R_{0,5-c10}$ izanik, $R=0,5$ mm-ko erradioko arrabola eta euskarririk 10 mm-ra pitzaduraren barrurantz sartuta.

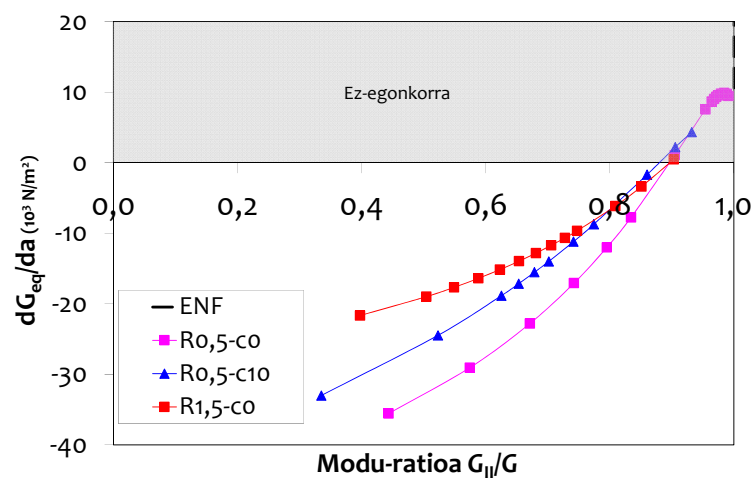


6.1 Irudia Pitzadura-hedapenaren egonkortasun teorikoa, karga kontrolatuaren menpe

6.1 Irudian ikus daitekeen moduan, arrabolaren kokapen berarentzat, adibidez $c=0$, arrabolaren erradioa handitzean, G_{eq} -ren deribatua negatiboa da pitzadura-luzera eremu zabal batean. Erradio berarentzat, $R=0.5$ mm, ezegonkortasuna pitzadura-luzera handiago batean hasten da, pitzadura puntatik hurbilago kokatuta dagoenean. Beraz, R edo c handitzean, saiakuntza egonkorra deneko pitzadura luzera eremua handiagoa da.

Modu II hutsaren kasuan, ENF kasuan, saiakuntza beti ezegonkorra da. Emaitza hau, ENF saiakuntzaren egonkortasunaren analisiarekin bat dator [54]. Gainera, kurba guztiek deribatuaren balio positibo batera jotzen dute, beraz, ezegonkortasunerako joera dutela dirudite.

6.2 irudian, G_{eq} -ren deribatuaren kurbak irudikatzen dira, modu-ratioaren arabera.



6.2 Irudia dG_{eq}/da karga kontrolatuaren menpe modu-ratioaren arabera

G_{II}/G modu ratioa handitzean, saiakuntza ezegonkorragoa bihurtzen da. Izan ere, 0.85 modu ratiotik aurrera, deribatuaren balioa positiboa da, eta beraz, ezegonkorra.

6.3.3 Desplazamendu Kontrolatua

Saiakuntza makinan burutu diren saiakuntzak, desplazamentu kontrolatuaren menpe burutuak direla kontsideratzen da [23]. G_I eta G_{II} -ren deribatuen (6.10) ekuazioan agertzen den $\frac{\partial P}{\partial a}$ deribatu partziala egin ahal izateko, karga, pitzadura-luzera eta desplazamenduaren arabera adierazi behar da, hau da, $P=(a, \delta)$. Indarraren aplikazio-puntuaren desplazamenduaren (4.32) ekuaziotik, karga honako eran adieraz daiteke:

$$P = \left(\delta + \frac{R(2a+c)}{4(a-c)} \right) \left(\frac{8E_f b h^3}{3a^3 + 2L^3 + c^3 + 3ac^2} \right) \quad (6.12)$$

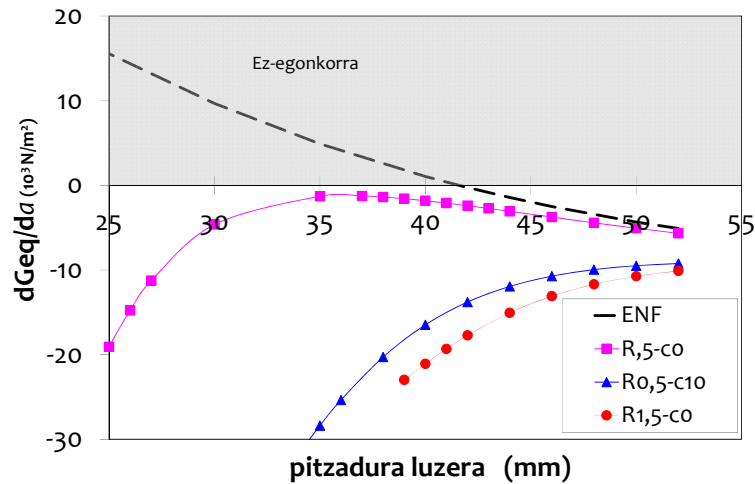
(4.54) ekuazioko G_I eta G_{II} -ren balioak eta (6.12) ekuazioko kargaren adierazpena (6.10) ekuazioan ordezkatuz, energia askatze tasen deribatuak:

$$\begin{aligned} \left(\frac{dG_I}{da} \right)_{\delta kte} &= \left(-\frac{3E_f h^3 R^2}{(a-c)^5} - \frac{3PRc}{2b(a-c)^3} \right) - \frac{9(P(a-c)^2 c + 2RE_f b h^3)^2}{8E_f b^2 h^3 (a-c)^4 (3a+c)} \\ \left(\frac{dG_{II}}{da} \right)_{\delta kte} &= \left(\frac{9P^2 a}{8E_f b^2 h^3} \right) - \frac{9Pa^2}{8E_f b^2 h^3} \left(\frac{9Pa^2}{3a^3 + 2L^3} \right) = \frac{9P^2 a}{4E_f b^2 h^3} \left(\frac{-3a^3 + L^3}{3a^3 + 2L^3} \right) \end{aligned} \quad (6.13)$$

(6.13) ekuazioko eskuineko lehenengo gaiak, G_I eta G_{II} -ren deribatuak dira karga kontrolatuaren menpe, (6.10) ekuazioan ikus daitekeen moduan. Gainontzeko gaiak negatiboak dira, ondorioz pitzadura-hedapena desplazamendu kontrolatuaren menpe, karga kontrolatuaren menpe baino egonkorragoa da. Aipagarria da, G_{II} -ren deribatuaren emaitza bat datorrela, ENF saiakuntzaren egonkortasunaren analisiarekin [54]. (6.13) ekuazioko adierazpenak, egonkortasun baldintzaren (6.8) ekuazioan ordezkatuz, desplazamendu kontrolatuaren menpe egonkortasun baldintza honako eran adieraz daiteke:

$$\left(\frac{dG_{eq}}{da} \right)_{\delta kte} = \frac{1}{2} \left[\left(\left(\frac{dG_I}{da} \right)_{Pkte} - \frac{9(P(a-c)^2 c + 2RE_f b h^3)^2}{8E_f b^2 h^3 (a-c)^4 (3a+c)} \right) G_{IIc} \right. \\ \left. + \left(\left(\frac{dG_{II}}{da} \right)_{Pkte} - \frac{9Pa^2}{8E_f b^2 h^3} \left(\frac{9Pa^2}{3a^3 + 2L^3} \right) \right) G_{Ic} \right]^{-1/2} \quad (G_I G_{IIc} + G_{II} G_{Ic}) \leq 0 \quad (6.14)$$

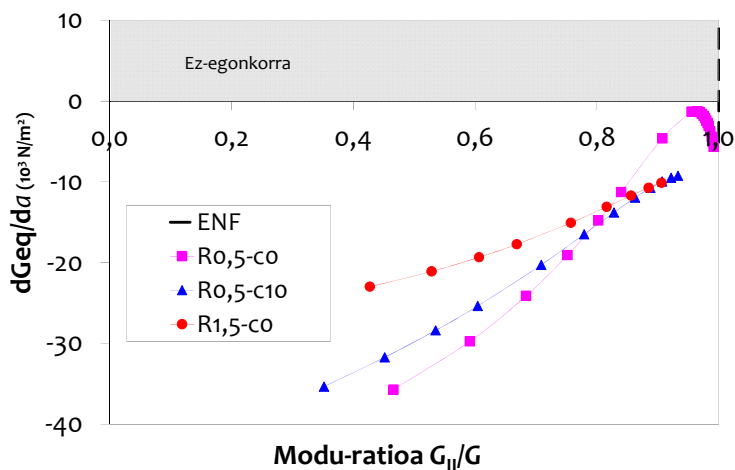
6.3 Irudian, baldintza desberdinei aplikaturiko (6.14) ekuazioko emaitzak irudikatzen dira.



6.3 Irudia Pitzadura-hedapenaren egonkortasun teorikoa, desplazamendu kontrolatuaren menpe

ENF saiakuntza izan ezik, aztertutako saiakuntza guztiak egonkorak dira. ENF kasuan, egonkortasun limitea, $a=42$ mm denean ematen da, $a/L=0,7$ balioari dagokiona [54]. Are gehiago, kurba guztiak deribatuaren balio negatibo batera jotzen dute, beraz, egonkortasunerako joera dutela dirudite. R0,5-c0 kasuan, kurba zerotik hurbil dagoen balio maximo bat du pitzadura luzera 35 mm inguru denean. Suposa daiteke R txikiago batekin, deribatuaren balioa positiboa izan daitekeela.

6.2 irudian dG_{eq}/da irudikatzen da, modu-ratioaren arabera.



6.4 Irudia dG_{eq}/da desplazamendu kontrolatuaren menpe modu-ratioaren arabera

R eta c finkoak izanik, modu-ratioa baxuagoa izango da pitzadura luzera txikiagoa denean. Modu-ratio balio txikiarentzat, deribatuaren balioa negatibagoa da.

Beraz, desplazamendu kontrolatuaren menpe, 0,5 mm eta 1,5 mm arteko erradioentzat, eta $c=0$ eta $c=10$ mm arrabolaren kokapenentzat, modu-ratioa 0,35-tik 0,98-ra tartean egonik, saiakuntzak egonkorrak direla kontsidera daitezke.

6.4 PITZADURA-LUZERAREN ERAGINA

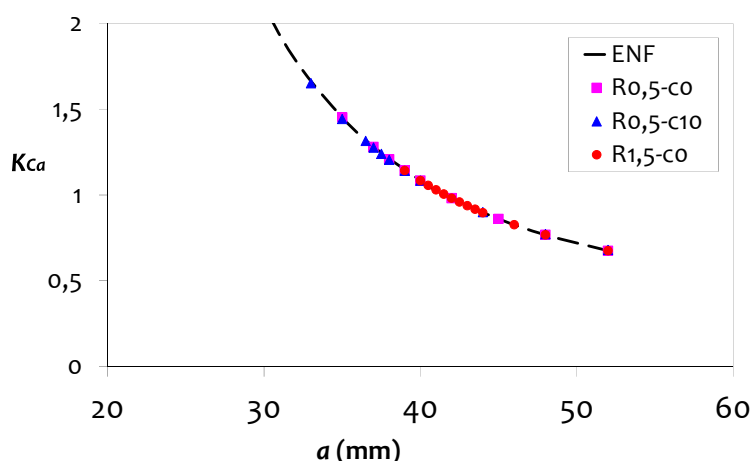
Atal honetan, konpliantza esperimentalaren neurketak, pitzadura-luzeraren kalkuloan izan dezakeen eragina aztertzen da. Gainera, pitzadura-luzeraren kalkuloak izan dezakeen eragina G_{eq} ren zehaztapenean ere aztertzen da. Horretarako, soilik makurduraren eragina kontuan harzen duen konpliantzaren (4.37) ekuazioa eta energia askatze tasa baliokidearen (6.4) ekuazioa erabili dira, a -rekiko deribatu partzialak honakoak izanik:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial a} &= \frac{9a^2 + 3c^2}{8E_f b h^3} \\ \frac{\partial G_{eq}}{\partial a} &= \frac{1}{2} (G_I G_{IIc} + G_{II} G_{Ic})^{-1/2} \left(\left(-\frac{3E_f h^3 R^2}{(a-c)^5} - \frac{3PRc}{2b(a-c)^3} \right) G_{IIc} + \frac{9P^2 a}{8E_f b^2 h^3} G_{Ic} \right) \end{aligned} \quad (6.15)$$

a -ren aldakuntza txikia dela kontsideratuz, termino diferentzialak gehikuntza termino kontsidera ditzakegu. Bestalde, a -ren kalkuloa konpliantza esperimentalaren aldaketan oinarrituta dagoela kontuan hartuz, errore erlatiboak honako eran adieraz daitezke:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta a}{a} &= K_{Ca} \left[\frac{\Delta C}{C} \right]_a & K_{Ca} &= \frac{8E_f b h^3}{9a^2 + 3c^2} \frac{C}{a} = \frac{3a^3 + 2L^3 + c^3 + 3ac^2}{9a^3 + 3ac^2} \\ \left[\frac{\Delta G_{eq}}{G_{eq}} \right]_a &= K_{aG} \frac{\Delta a}{a} & K_{aG} &= \frac{a}{2} (G_I G_{IIc} + G_{II} G_{Ic})^{-1} \left(\left(-\frac{3E_f h^3 R^2}{(a-c)^5} - \frac{3PRc}{2b(a-c)^3} \right) G_{IIc} + \frac{9P^2 a}{8E_f b^2 h^3} G_{Ic} \right) \end{aligned} \quad (6.16)$$

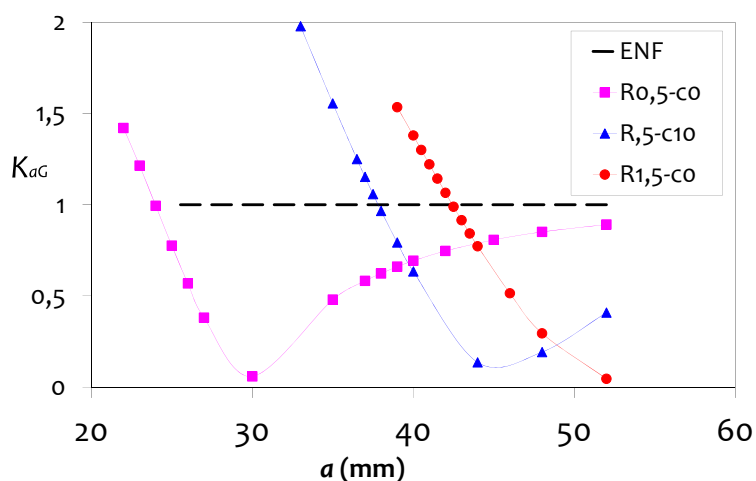
(6.16) ekuazioko K_{Ca} koefizientearen balio absolutoak, pitzadura-luzeraren errore erlatiboa adierazten du, C -ren neurketaren errore erlatiborekiko. Esate baterako, $K_{Ca}=1$ bada, a -ren kalkuloan egindako errore erlatiboa, C -ren neurketan egindako errore erlatiboaren berdina da. (6.16) ekuazioko K_{aG} koefizientearen balio absolutoak, G_{eq} -ren errore erlatiboa adierazten du, a -ren errore erlatiboarekiko. Eragin horiek aztertzeko asmoz, 6.1 Taulako materiala eta 6.3 ataleko probetaren neurriak eta saiakuntza baldintza berdinak hartuko dira kontuan.



6.5 Irudia

Konpliantzaren errore erlatiboak pitzadura-luzeraren errore erlatiboan duen eragina

6.5 irudian ikus daitekeenez, K_{Ca} koefizienteak balio bera du saiakuntza konfigurazio guztientzat. Bere balioa 1 baino txikiagoa da hasierako pitzadura-luzera 42 mm baino handiagoa denean. Horrek esan nahi du, a -ren kalkuloaren errore erlatiboa, konpliantza esperimentalak neurtzean egindako errore erlatiboa baino txikiagoa dela. Hasierako pitzadura-luzera oso txikia bada, 35 mm baino txikiagoa, K_{Ca} -ren balioa nabarmenki handiagotzen da.



6.6 Irudia

Pitzadura-luzeraren errore erlatiboaren eragina G_{eq} -ren errore erlatiboan

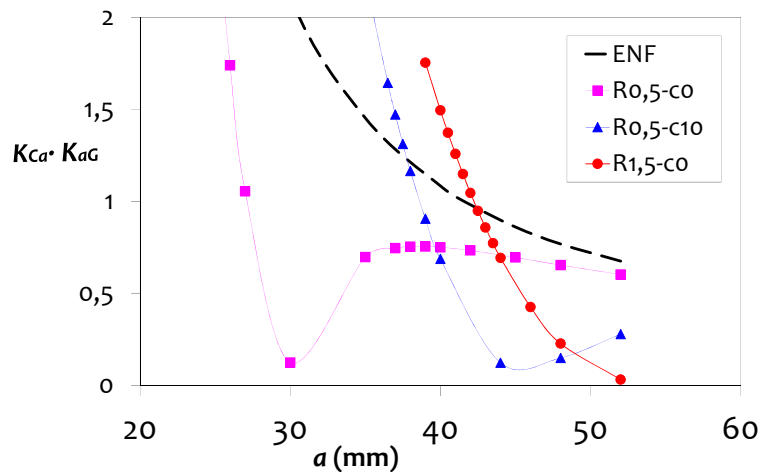
6.6 irudian K_{aG} koefizientearen balio absolutoa irudikatzen da saiakuntza konfigurazio desberdinentzat. ENF-ren kasuan, $K_{aG} = 1$ pitzadura luzera guztientzat. R0,5-c0 kasuan, $a > 24$ mm denean, K_{aG} -ren balio absolutoa 1 baino txikiagoa da. Are gehiago, $a = 30$ mm denean, koefizientearen balio minimo bat dago. R0,5-c10 kasuan, kurbak antzeko forma du, baina

errore koefizientearen balio absolutoa 1 baino txikiagoa izateko, $a > 39 \text{ mm}$ izan behar du, eta K_{aG} -ren balio minimoa ematen da $a = 45 \text{ mm}$ denean. Azkenik, R1.5-c10 kasuan, $a > 43 \text{ mm}$ denean ematen da koefizientearen balio absolutoa 1 baino txikiagoa, eta balio minimoa $a = 52 \text{ mm}$ denean. Hortaz, R edo c handitzean, $K_{aG} < 1$ izan dadin, pitzadura-luzera minimoa ere handitzen da.

(6.16) ekuazioaren arabera, konpliantzaren errore erlatiboak G_{eq} -ren errore erlatiboan duen eragina honako eran azter daiteke:

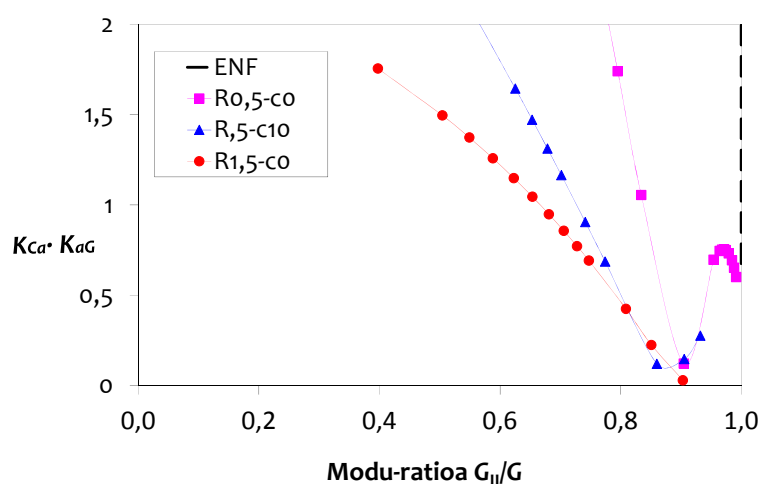
$$\left[\frac{\Delta G_{eq}}{G_{eq}} \right]_a = K_{aG} K_{Ca} \left[\frac{\Delta C}{C} \right]_a \quad (6.17)$$

6.7 irudian $K_{aG} K_{Ca}$ koefizienteen biderkaketaren balio absolutua irudikatzen da.



6.7 Irudia Konpliantza experimentalaren errore erlatiboaren eragina G_{eq} -ren errore erlatiboan

Balioa 1 baino txikiagoa ematen da, K_{aG} koefizientea aztertzean pitzadura-luzeraren balio antzekoetan. Saikuntza konfigurazio optimo bat bilatzeko asmoz, $K_{aG} K_{Ca}$ biderkaketa hartu behar da kontuan. 6.8 irudian $K_{aG} K_{Ca}$ koefizienteen biderkaketaren balio absolutua moduratioaren arabera irudikatzen dira.



6.8 Irudia K_{aG} K_{Ca} biderkaketaren balio absolutua G_{II}/G modu-ratioaren arabera

Modu-ratioa handia denean K_{aG} K_{Ca} -ren balio absolutua txikiagoa da, c eta R finkoetarako pitzadura-luzera handiagoekin erlazionatuta dagoena. Ondorioz, G_{eq} -ren errore erlatiboa txikiagotzen da, konpliantza esperimentalaren errore erlatiboarekin konparatuz.

Laburpen gisa, 6.2 taulan pitzadura-luzerak izan dezakeen balio hoberenak irizpide desberdinen arabera azaltzen dira.

6.2 Taula. Pitzadura-luzera hoberenak mm-tan

NOMENKLATURA	EGONKORTASUN BALDINTZA		ERRORE ANALISIA		
	Karga kontrolatua	Desplazamendu kontrolatua	$K_{Ca} < 1$	$K_{aG} < 1$	$\frac{K_{aG}}{K_{Ca} < 1}$
ENF	Ezgonkorra	$a > 42$	$a > 42$	$K_{aG} = 1$	$a > 42$
R0.5-c0	$a < 30$	egonkorra	$a > 42$	$a > 24$	$a > 27$
R0.5-c10	$a < 45$	egonkorra	$a > 42$	$a > 38$	$a > 39$
R1.5-c0	$a < 51$	egonkorra	$a > 42$	$a > 43$	$a > 43$

Saiakuntza baldintza hoberenak aukeratzekoan, egonkortasun baldintza betetzen dutenen arteko pitzadura-luzera aukeratu behar da G_{eq} -ren errore erlatiboa txikiena egiten duena.

6.5 ATAL ESPERIMENTALA

6.5.1 Materialak eta tresnak

Pitzadura-hedapenaren ihardueraren azterketa esperimentalak burutzeko, karbono zuntzez eta epoxi matrizez osatutako norabide bakarrekotako T300/F593 konpositea erabili da. Propietate elastikoei dagokienean, E_f makurdura modulua eta G_{LT} probeta bakoitzean neurtu dira. Lortutako balioak honakoak izanik:

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

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

Probeten dimentsioei dagokienean, probeten luzera 200 mm-koa da. Lodiera ($2h$) eta zabaleraren (b) balio nominalak, 3 mm eta 15 mm hurrenez hurren. Saiakuntza guztiak 120 mm argiarekin ($2L$) burutu dira. Saiakuntzak MTS saiakuntza makinan burutu dira, desplazamentu kontrolatua aplikatuz.

6.5.2 Baldintza esperimentalak

Hainbat I/II modu mistoko saiakuntzak burutu dira pitzadura-hedapenaren aztertzeko asmoz. Arestian aipatu bezala, arrabola pitzaduran sartzean indarraren aplikazio-puntuaren desplazamendu negatibo bat gertatzen da. Hasierako karga eta desplazamendu baldintzak, 5.4 atalean azaltzen den prozeduraren arabera kalkulatu dira. ENFR saiakuntzan, pitzadura-luzera neur daiteke neurketa optikorik gabe, P eta δ ezagunak diren puntuetan, konpliantza esperimentalaren aldaketan oinarrituta. Nahiz eta ekarpen analitikoan, argitasunagatik, adierazpen batzuetan soilik makurdura agertzen den, datu esperimentalekin burutatuko kalkuloetan ebakiduraren eragina barneratuta dago.

Saiakuntzan zehar, modu-ratioa aldakorra denez, pitzadura hedapenaren hasierako puntuan, edo puntu kritikoan, modu-ratioaren balioa aukeratutako da modu mistoko saiakuntza mota definitzeko parametroa bezala.

6.3 Taulan aztertutako baldintza esperimentalen laburpena agertzen da.

6.3 Taula. Baldintza esperimentalen laburpena

ID	NOMENKLATURA	HASIERAKO G_{II}/G (%)
1.	a40-R0,5-c0	96
2.	a31-R0,5-c0	90
3.	a45-R1,5-c0	74
4.	a43-R0,9-c8	66
5.	a38-R0,7-c8	59

6.5.3 Modu-ratio normalizatuak eta G_{eq} kurbak

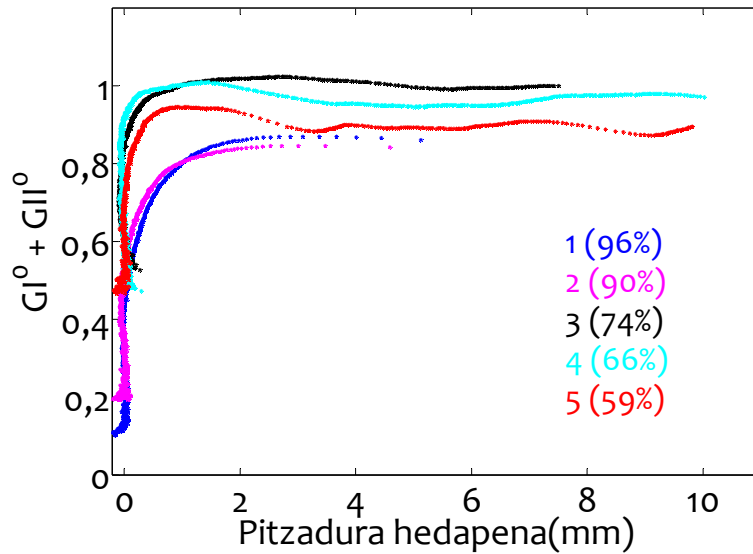
Energia askatze tasen emaitza esperimentalak aztertzean, (5.12) ekuazioko irizpide lineala egokitzat hartu da ENFR saiakuntzaren pitzadura-hedapena adierazteko eta **5.10 Taulan** agertzen diren G_{IC} eta G_{IIc} zehazteko.

Aztertutako materialaren kasuan G_{IIc} -ren balioa, G_{IC} -ren balioa baino lau aldiz handiago da, 6.1 Taulan ikus daitekeen moduan. Beraz, modu bakoitzaren ekarpena hobeto zehazteko, (5.13) ekuazioko modu-ratio normalizatuak kontsideratzen dira.

6.4 Taula. Hasierako modu-ratioen eta modu-ratio normalizatuen arteko erlazioa

ID	HASIERAKO MODU- RATIO (G_{II}/G) (%)	HASIERAKO MODU-RATIO NORMALIZATUA (G_{II}^0) (%)
1.	96	51
2.	90	45
3.	74	37
4.	66	30
5.	59	22

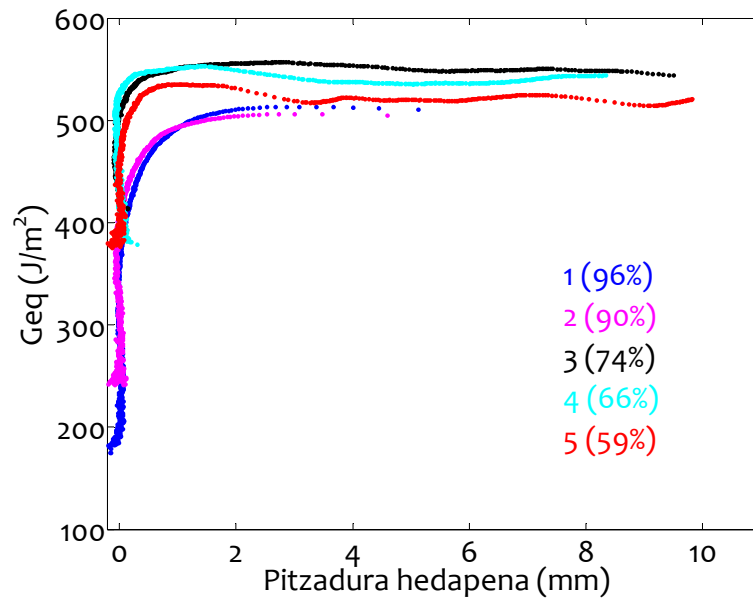
Modu-ratio normalizatuak irizpide linealaren batugaiak dira, (5.12) eta (5.13) ekuazioen arabera, beraz, 6.9 Irudian azaltzen den $G_I^0 + G_{II}^0$ baturak 1-en inguruan egon behar du, pitzadura-hedapenean zehar.



6.9 Irudia Modu-ratio normalizatuaren batura pitzadura-hedapenean zehar

Kurben batzbesteko balioa 0,85 baino handiagoa da hedapenean zehar, eta 3. eta 4. saiakuntzen kasuan batzbesteko balioa 1-etik oso hurbil dago. Desbideraketa handiena modu II hutsetik hurbilen dauden saiakuntzetan gertatzen da, 1. eta 2. saiakuntzetan hain zuzen ere. Errore erlatibo maximoa irizpide linealarekiko kasu horietan % 15-a da.

Lan honetan proposatzen den (6.4) ekuazioko G_{eq} ren balio esperimentalak azaltzen da puntuz-puntu 6.10 Irudian.

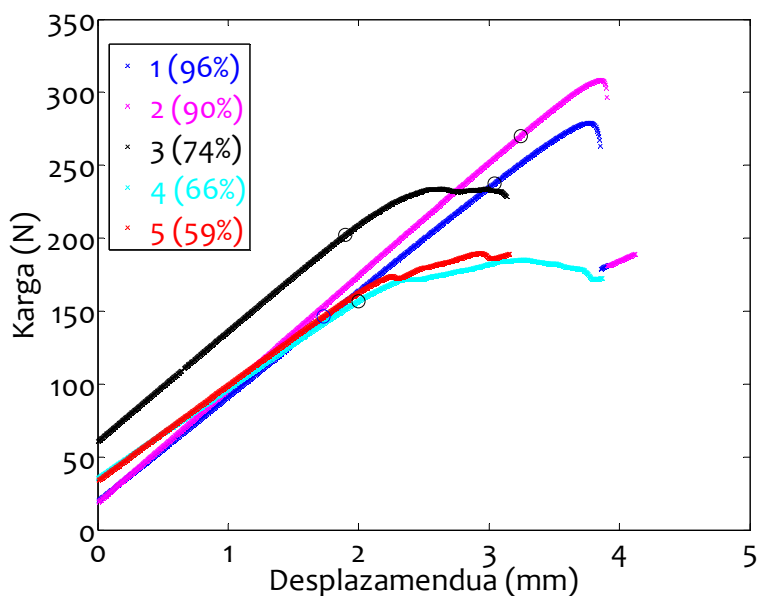


6.10 Irudia Energia askatze tasa baliokidearen balio esperimentalak

Energia askatze tasa baliokidearen kurba guztiek balio konstante baterantz jotzen dute. Kurben batazbesteko balioak 505 eta 555 (J/m^2) tartean daude hedapenean zehar. Kurben balio konstante hori, 6.1 Taulan agertzen den $G_{ceq}=550$ (J/m^2) balio teorikoarekin bat dator. Energia askatze tasa baliokideari dagokionez, desbideraketa maximoa 1. eta 2. saiakuntzetan ematen da berriro ere, eta errore erlatibo maximoa % 8,5 da, balio teorikoarekin alderatuz. Beraz, proposatutako energia askatze tasa baliokidearen hurbileta, ENFR saiakuntzako pitzadura-hedapenaren baldintza definitzeko egokia kontsidera daiteke.

6.5.4 Egonkortasunaren balorazioa

Pitzadura-hedapen ezegonkorra, karga-desplazamendu jakin batentzat karga bat batean erortzen denean gertatzen dela kontsideratu da, lan esperimentalak burutzerakoan. 6.11 Irudian 6.3 Taulako saiakuntzen karga-desplazamendu kurbak irudikatzen dira. Markatzaile zirkularrak pitzadura-hedapenaren hasierako puntua, NL puntua adierazten du.

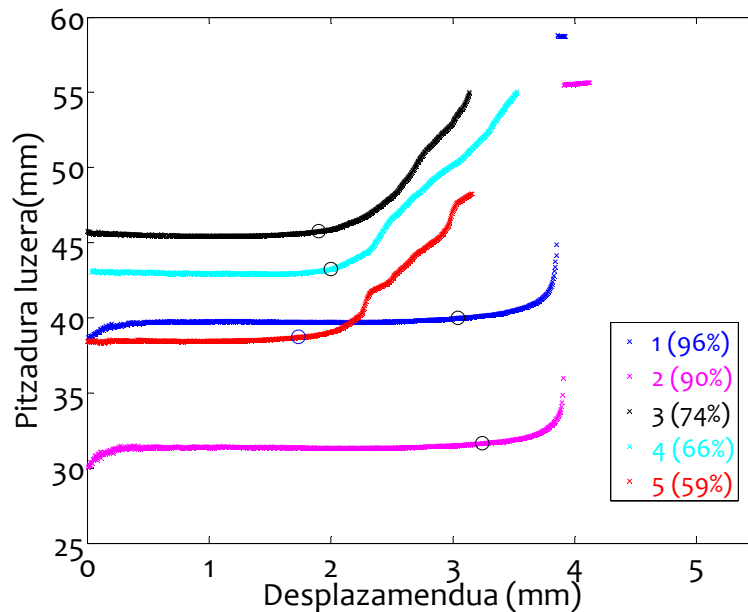


6.11 Irudia Karga-desplazamendu kurba esperimentalak

Hasierako modu-ratioa modu II hutsetik hurbil dagoenean, 1. eta 2. saiakuntzen kasuan hain zuzen, pitzadura-hedapena hastean, karga handiagotzen da. Horrek esan nahi du, modu egonkor batean hedatzen ari dela. Karga bere gehienezko baliora iritsi eta gero, bat-batean gutxitzen da. Horretaz gain, bi saiakuntzen kurbetan saltoak agertzen dira. Hortaz, 1. eta 2. saiakuntzak hedapen gehienezko zehar egonkortzat har daitezke, baina bukaeran ezegonkor

bilakatzen dira. Gainontzeko saiakuntzen kasuetan, ez dago karga saltorik ez eta bat-bateko jaitsierarik eta beraz, hedapen guztian zehar egonkorak direla ondoriozta daiteke.

6.3.1 atalean aipatu den egonkortasunaren definizioa kontuan hartu da datu esperimentalak aztertzeko. Definizio horren arabera, pitzadura-hedapena egonkorra da, desplazamenduaren aldaketa infinitesimal batek ez duenean aldaketa finito bat sortzen pitzadura-luzeran.

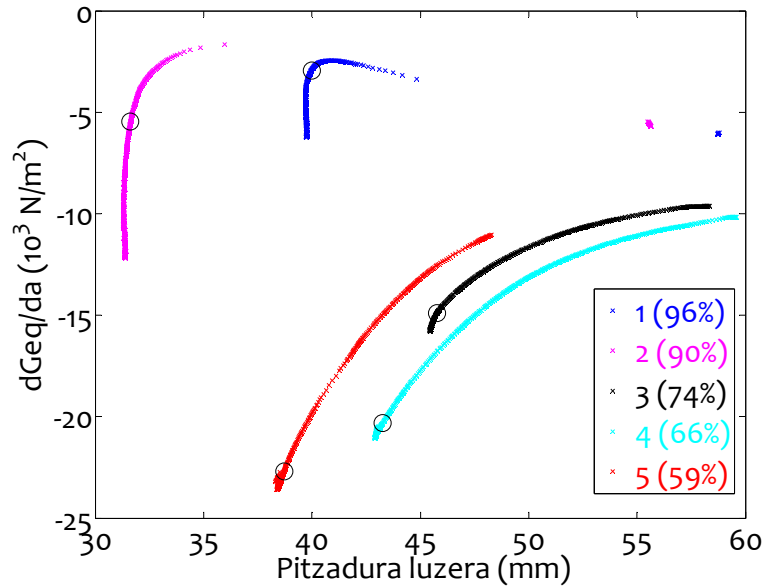


6.12 Irudia Pitzadura-luzera desplazamenduaren arabera

6.12 Irudian ikus daitekeen moduan, 1. eta 2. saiakuntzeko kurbetan, hedapenaren hasierako fasean, desplazamenduaren aldaketa mugatu batek, pitzadura luzeran aldaketa mugatu bat eragiten du, eta hortaz egonkortzat har daitezke. Hala ere, hedapenaren azken fasean, desplazamenduaren aldaketa txiki batek, pitzadura-luzeran aldaketa askoz handiago bat eragiten du, eta gainera kurban saltoak agertzen dira. Beraz, ezegonkor bihurtzen da.

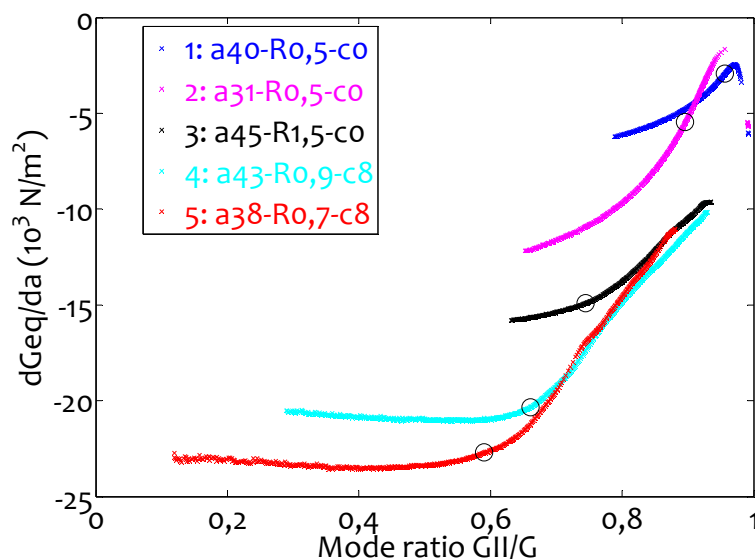
Gainontzeko kurbetan ikus daitekeenez, pitzadura-hedapena lehenago hasten da, eta kurben maldak antzekoak dira, ondorioz desplazamenduan aldaketa bat behar da pitzadura-luzeran aldaketa bat izateko. Beraz, definizioaren arabera egonkorak dira.

Saiakuntzak desplazamendu kontrolatuan burutu direnez, (6.14) ekuazioko G_{eq} -ren deribatuaren ezarpen esperimentalak erabiliko da, egonkortasun baldintza teorikoa balioztatzeko asmoz.



6.13 Irudia Egonkortasun baldintzaren ezarpen esperimentalak

6.13 Irudian azaltzen denez, 1. eta 2. saiakuntzen kasuan, G_{eq} -ren deribatuaren balioa hedapenean zehar, zerotik hurbil daude. Hala eta guztiz ere, saiakuntza guztiek egonkortasun baldintza betetzen dute, deribatuaren balioa hedapen osoan zehar negatiboa baita. Hasierako modu-ratio txikia duten saiakuntzen kasuan, deribatuaren balio negatiboa handiagoa da, eta beraz egonkorragoak ematen dute. Deribatuaren adierazpena modu-ratioaren arabera, 6.14 Irudian ikus daiteke.



6.14 Irudia Egonkortasun baldintza modu-ratioaren arabera

Pitzadura hazten denean, modu-ratioa handiagotzen da eta nahiz eta G_{eq} -ren deribatua negatiboa izaten jarraitu, balio positibora hurbiltzen da. Analisi hau bat dator,

desplazamendu kontrolatuaren menpeko 6.3 Irudian azaltzen den egonkortasun azterketa teorikoarekin.

Ondorio orokor gisa, ENFR saiakuntzarako proposatutako egonkortasun baldintza definizio desberdinetan oinarrituta dagoen egonkortasun esperimentalarekin bat datorrela esan daiteke.

6.6 SAIKUNTZAK EGITEKO GOMENDIOAK

Saiakuntzak egiterakoan, probeta geometria jakin batentzat, hiru dira aurretik definitu behar diren parametroak: hasierako pitzadura-luzera, arrabolaren erradioa eta arrabolaren kokapena. Hiru parametro hauen konbinazio desberdinek, modu-ratio desberdinak sortuko dituzte. Bestalde, pitzadura-hedapenaren egonkortasuna eta pitzadura-luzeraren neurketan ager daitezkeen erroreak dira kontuan hartu behar diren alderdiak.

Desplazamendu kontrolatuaren menpe burututako saiakuntzei dagokienez, egonkortasunaren azterketa teorikoa eta esperimentalaren emaitzak, 6.3 Irudian eta 6.13 Irudian ikus daitezke, hurrenez hurren. Arrabolaren erradioa 1,5 mm edo txikiagoa izan behar da ezlinealtasun geometrikoak ager ez daitezen. Pitzadura-luzeraren neurketan ager daitezkeen erroreak kontuan hartuz, hasierako pitzadura luzera 35mm baino handiago izatea egokiena da.

Guzti hori kontuan edukiz, ENFR saiakuntzak burutzerakoan hauek dira proposatzen diren parametroen tartekak:

- Hasierako pitzadura-luzera: $35 < a < 52$ mm
- Arrabolaren erradioa: $0,5 < R < 1,5$ mm
- Arrabolaren kokapena: $0 < c < 10$ mm

Proposatutako balio horien konbinazioen artean erizpide lineala hobekien betetzen dituen saiakuntzak aukeratuko dira, hasierako modu ratioa %65 eta %75 bitartekoak dituztenak direlarik, 5.13 Irudian ikus daitezkeen hedapenaren datu esperimentalak aztertuz, eta 6.10 Irudian ikus daitezkeen G_{eq} -ren balio esperimentalen arabera.

7.

ONDORIO OROKORRAK

I/II modu mistoa aztertzeko konfigurazio berri bat proposatu da. Konfigurazio hau ENF saiakuntzan oinarrituta dago. Modu mistoa lortzearen, pitzaduraren bi besoen artean arrabola bat sartzen da, **Bukaerako Pitzaduradun Makurdura Arrabolarekin**, *End Notched Flexure with Roller*, ENFR delakoa.

Hurbilketa analitikoan deformazio energia osagarriaren bidez kalkulatu energia askatze tasak Williams-en deskonposaketaren bidez kalkulatuakekin bat datoz. Are gehiago, arrabola euskarriaren gainean dagoenean eta soilik makurdura eraginak kontuan hartzean lortutako emaitzak, Szekrenyes-ek konfigurazio horretarako arestian lortutakoekin berdinak dira. Bestalde, konpliantzaren deribatuan oinarritutako Irwin-Kies-en hurbilketa ez da egokia energia askatze tasa kalkulatzeko, lana ez duelako indar bakar batek egiten, bik baizik.

Energia askatze tasen balio analitikoak eta elementu finitoen bidezko bi urratsen hedapen prozedura (TSEP) aplikatuz lortutako zenbakizko emaitzak bat datoz, ondorioz modu deskonposaketa egokia da. Gainera, puntu kritikoan indarrak eta desplazamenduak ere alderatu dira, emaitza analitikoak eta zenbakizkoak adostasuna azaltzen dutelarik.

ENFR konfigurazioaren azterketa esperimentalak burutzeko asmoz, karbono zuntzez eta epoxi matrizez osatutako norabide bakarreko T300/F593 konposita erabili da.

Konpliantza esperimentalaren aldaketan oinarrituz, pitzadura-luzera zehazteko prozedura egokia da, BTBR metodoa egiaztatze-metodoa bezala erabiliz ENF konfigurazioan hedapenik gabeko saiakuntzekin lortutako emaitzak berdinak baitira.

Puntuz-puntu, pitzadura luzera kalkulatu ahal izanak, energia askatze tasak kalkulatzeko ahalbidetu du eta modu ratioa hedapenean zehar aldakorra dela ondorioztatu da. Modu-ratio txikiak lortzeko arazoak aurkitu dira. Arrabolaren erradio handiak edo arrabola barnerago sartzean, pitzadura irekitzen dela ikusi da, karga aplikatu gabe, soilik arrabola pitzaduran sartzearekin. Beraz, modu nahasketa desberdinak lortzeko, erabili behar den erradio maximoa $R = 1,5$ mm da.

Haustura irizpide lineala erabili da probeta desberdinen eta baldintza esperimental desberdinen datu esperimentalak doitzeko. Alde batetik doikuntzaren kalitatearen adierazten duen R mugatze koefizientea 0.86 baino handiagoa da aztertutako kasu guztietan. Beste aldetik, lortutako G_{Ic} eta G_{IIc} -en batzbesteko balioak bat datoz modu hutsen saiakuntzetatik lortutako balioekin, desbideratze tipikoaren balioak baxuak direlarik.

Ondorioz, irizpide lineala ENFR saiakuntzarako, aztertutako probeta geometriaren eta aztertutako materialaren haustura adierazteko egokia dela esan daiteke. Beste material baten kasurako, ENFR saiakuntza G_{Ic} eta G_{IIc} kalkulatzeko modu hutsen saiakuntzen osagarri gisa kontsidera daiteke, beti ere irizpide lineala betetzen dela konprobatu ondoren.

Bi moduen elkarrekintza barneratzen dituen proposatutako energia askatze tasa baliokidearen G_{eq} balio esperimentalak pitzadura-hedapenean zehar balio konstante baterantz jotzen du, eta beraz, materialaren ezaugarria kontsidera daiteke.

ENFR konfigurazioan, desplazamendu kontrolatuan egindako saiakuntza guztiak egonkorak direla ondorioztatu da, energia askatze tasa baliokidearen deribatua pitzadura-luzerarekiko pitzadura-hedapenean zehar negatiboa mantentzen delako.

ENFR saiakuntzarako baldintza hoberenak, pitzadura-neurketaren egokitasuna eta pitzadura-hedapenaren egonkortasuna kontuan hartuz, hasierako modu ratioa %65-75 bitartean dauden saiakuntzek dituzte. Haustura irizpide linealaren betetzearen arabera, egokienak direla kontsidera daiteke. Beraz, ENFR konfigurazioarekin modu nahasketa tarte zabal batean saiakuntza egonkorak burutu daitezke, energia askatze tasa baliokide kritikoa determinatzeko.

8.

AURRERA BEGIRA

Tesi honetan hasitako lanari jarraipena emango dioten etorkizuneko zenbait ikerketa-ildo proposatzen dira jarraian:

- Hurrengo urratsa, norabide bakarreko beste material batekin haustura linealaren egokitasuna konprobatzea litzateke, eta horrela modu bakoitzari dagokion energia askatze tasa kritikoa kalkulatzeko.
- Material konpositeen laminarteko hausturan sakontzen jarraitzea beharrezkoa da, azterketa norabide anitzeko laminatuen kasura zabalduz.
- Arrabola-txertatua duen saiakuntzan, *wedge inserted test*-en (WIF) oinarrituz, pitzadura-luzeraren kalkulua garatzea, konpliantza esperimentalaren aldaketan oinarrituz, neurketa optikorik gabe, lan honetan egin den moduan. Eta hotik G_{Ic} lortzeko beste bide bat lantzea.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Gibson RF. Principles of composite material mechanics. : McGraw-Hill, 1994.
- [2] Mujika F. Mecánica de laminados composites. Bilbao, Spain: KOPIAK, S.A., 2011.
- [3] Chawla KK. Composite materials. : Springer, 2012.
- [4] Daniel IM, Ishai O. Engineering mechanics of composite materials. Second Edition ed. : Oxford university press New York, 2006.
- [5] Hull D. Materiales compuestos. : Reverté, 1987.
- [6] Miravete A, Larrodé E, Castejón L, Clemente R, Jiménez MA, Lizaranzu M et al. Materiales Compuestos. BARCELONA: REVERTÉ S.A., 2007.
- [7] <http://www.boeing.com>. ;2016.
- [8] www.airbus.com. ;2016.
- [9] <http://www.compositesworld.com>. ;2016.
- [10] Brondsted P, Lilholt H, Lystrup A. Composite materials for wind power turbine blades. Ann Rev Mater Res 2005;35:505-38.
- [11] <http://www.vindenergi.dtu.dk/>. ;2016.
- [12] Ramakrishna S, Mayer J, Wintermantel E, Leong KW. Biomedical applications of polymer-composite materials: a review. Composites Sci Technol 2001;61:1189-224.
- [13] Fischer-Cripps AC. Introduction to contact mechanics. 2nd ed. : Springer US, 2007.
- [14] Daniel I. Failure Mechanisms in Fiber-Reinforced Composites. 1978.
- [15] Kaw AK. Mechanics of composite materials. : CRC Press, 1997.
- [16] LLorca J, Gonzalez C, Molina-Aldareguia JM, Segurado J, Seltzer R, Sket F et al. Multiscale Modeling of Composite Materials: a Roadmap Towards Virtual Testing. Adv Mater 2011;23:5130-47.
- [17] Inglis CE. Stresses in a plate due to the presence of cracks and sharp corners. Trans Inst Nav Archit London 1913;55:219-2230.

- [18] Griffith AA. The Phenomena of Rupture and Flow in Solids. Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character 1921;221:163-98.
- [19] Irwin G. Fracture Dynamics. Fracturing of metals, American Society for Metals 1948:147-66.
- [20] Orowan E. Fracture and strength of solids. Reports on Progress in Physics 1948;XII:185,&.
- [21] Kanninen MF, Popelar CL. Advanced fracture mechanics. New York: OXFORD UNIVERSITY PRESS, 1985.
- [22] Irwin GR. Onset of Fast Crack Propagation in High Strength Steel and Aluminium Alloys. SagamoreResearch Conference Proceedings 1956;2:289-305.
- [23] Anderson TL. Fracture mechanics :fundamentals and applications. 3rd ed. : CRC Press, 2005.
- [24] Knott JF. Fundamentals of fracture mechanics. London: Butterworth, 1973.
- [25] Kundu T. Fundamentals of fracture mechanics. : CRC Press, 2008.
- [26] Hodgkinson JM. Mechanical testing of advanced fibre composites. : Elsevier, 2000.
- [27] Irwin GR. Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate. Journal of Applied Mechanics 1957;24:361-4.
- [28] Rodríguez Ibabe JM. Hausturaren mekanika :(injinerutzarako materialetan). : Elkar, 1990.
- [29] Blanco N. Variable mixed-mode delamination in composite laminates under fatigue conditions. 2004;Ph.D. thesis, Universitat de Girona.
- [30] Pagano N, Schoeppner G. Delamination of polymer matrix composites: problems and assessment. Comprehensive composite materials 2000;2:433-528.
- [31] Krueger R. Virtual crack closure technique: History, approach, and applications. Applied Mechanics Reviews 2004;57:109-43.
- [32] Rybicki EF, Kanninen MF. A finite element calculation of stress intensity factors by a modified crack closure integral. Eng Fract Mech 1977;9:931-8.

-
- [33] Dugdale DS. Yielding of steel sheets containing slits. *J Mech Phys Solids* 1960;8:100-4.
- [34] Goodier J, Field F. *Fracture of Solids*. Interscience, New York 1963:103.
- [35] Barenblatt GI. The Mathematical Theory of Equilibrium Cracks in Brittle Fracture. *Adv Appl Mech* 1962;7:55-129.
- [36] Schwalbe K, Scheider I, Cornec A. *Guidelines for applying cohesive models to the damage behaviour of engineering materials and structures*. : Springer Science & Business Media, 2012.
- [37] Turon A. Simulation of delamination in composites under quasi-static and fatigue loading using cohesive zone models. 2006; Ph. D. thesis, Universitat de Girona.
- [38] Zhu X, Joyce JA. Review of fracture toughness (G, K, J, CTOD, CTOA) testing and standardization. *Eng Fract Mech* 2012;85:1-46.
- [39] Broek D. *Elementary engineering fracture mechanics*. : Springer Science & Business Media, 2012.
- [40] ASTM D5528 – 01 Standard Test Method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites. 2001.
- [41] Hashemi S, Kinloch AJ, Williams JG. Corrections needed in double-cantilever beam tests for assessing the interlaminar failure of fibre-composites. *J Mater Sci Lett* 1989;8:125-9.
- [42] Kanninen M. An augmented double cantilever beam model for studying crack propagation and arrest. *Int J Fract* 1973;9:83-92.
- [43] Kanninen M. A dynamic analysis of unstable crack propagation and arrest in the DCB test specimen. *Int J Fract* 1974;10:415-30.
- [44] WILLIAMS J. Large Displacement and End Block Effects in the Dcb Interlaminar Test in Mode-i and Mode-li. *J Composite Mater* 1987;21:330-47.
- [45] Williams JG. End corrections for orthotropic DCB specimens. *Composites Sci Technol* 1989;35:367-76.
- [46] De Gracia J, Boyano A, Arrese A, Mujika F. A new approach for determining the R-curve in DCB tests without optical measurements. *Eng Fract Mech* 2015;135:274-85.

- [47] Kusaka T, Hojo M, Mai Y, Kurokawa T, Nojima T, Ochiai S. Rate dependence of mode I fracture behaviour in carbon-fibre/epoxy composite laminates. *Composites Sci Technol* 1998;58:591-602.
- [48] ASTM D7905/D7905M-14 Standard Test Method for Determination of the Mode II Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites. 2014.
- [49] Szekrenyes A. Prestressed fracture specimen for delamination testing of composites. *Int J Fract* 2006;139:213-37.
- [50] Brunner AJ, Blackman BRK, Davies P. A status report on delamination resistance testing of polymer–matrix composites. *Eng Fract Mech* 2008;75:2779-94.
- [51] Blackman BRK, Williams JG. Crack length determination difficulties in composites-their effect on toughness evaluation. *Int Conf Fract , ICF* 2005;2:915-20.
- [52] Sans D, Stutz S, Renart J, Mayugo JA, Botsis J. Crack tip identification with long FBG sensors in mixed-mode delamination. *Compos Struct* 2012;94:2879-87.
- [53] de Moura MFSE, de Morais AB. Equivalent crack based analyses of ENF and ELS tests. *Eng Fract Mech* 2008;75:2584-96.
- [54] Carlsson LA, Gillespie JW, JR, Pipes RB. On the Analysis and Design of the End Notched Flexure (ENF) Specimen for Mode II Testing. *Journal of Composite Materials* 1986;20:594-604.
- [55] Arrese A, Carbajal N, Vargas G, Mujika F. A new method for determining mode II R-curve by the End-Notched Flexure test. *Eng Fract Mech* 2010;77:51-70.
- [56] Hashemi S, Kinloch AJ, Williams JG. Mechanics and mechanisms of delamination in a poly(ether sulphone)—Fibre composite. *Composites Sci Technol* 1990;37:429-62.
- [57] Hashemi S, Kinloch AJ, Williams JG. The Analysis of Interlaminar Fracture in Uniaxial Fiber-Polymer Composites. *Proc R Soc London Ser A-Math Phys Eng Sci* 1990;427:173-99.
- [58] Wang Y, Williams JG. Corrections for mode II fracture toughness specimens of composites materials. *Composites Sci Technol* 1992;43:251-6.
- [59] Robinson P, Hodgkinson J. Interlaminar fracture toughness. Cambridge (UK): Woodhead Publishing, 2000.

-
- [60] ASTM D6671-01. Standard test method for mixed mode I-mode II interlaminar fracture toughness of unidirectional fiber-reinforced polymer matrix composites 2006.
- [61] Crews JJH, R. RJ. A Mixed-Mode Bending Apparatus for Delamination Testing. 1998.
- [62] Reeder JR, Crews JH. Mixed-Mode Bending Method for Delamination Testing. AIAA JOURNAL 1990 1990;28:1270-6.
- [63] REEDER J, CREWS J. Redesign of the Mixed-Mode Bending Delamination Test to Reduce Nonlinear Effects. J Compos Technol Res 1992;14:12-9.
- [64] Kinloch AJ, Wang Y, Williams JG, Yayla P. The mixed-mode delamination of fibre composite materials. Composites Sci Technol 1993;47:225-37.
- [65] Ramkumar R, Whitcomb J. Characterization of mode I and mixed-mode delamination growth in T300/5208 graphite/epoxy. In: Anonymous Delamination and debonding of materials: ASTM International; 1985.
- [66] Bradley WL, Cohen RN. Matrix deformation and fracture in graphite-reinforced epoxies. In: Anonymous Delamination and debonding of materials: ASTM International; 1985.
- [67] Blanco N, Gamstedt EK, Costa J, Trias D. Analysis of the mixed-mode end load split delamination test. Composite Structures 2006;76:14-20.
- [68] Reeder JR. An evaluation of mixed-mode delamination failure criteria. NASA technical memorandum 104210 Langley Research Center, Hampton, VA 1992.
- [69] Whitcomb JD. Parametric analytical study of instability-related delamination growth. Composites Sci Technol 1986;25:19-48.
- [70] Williams JG. The fracture mechanics of delamination tests. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design 1989;24:207-14.
- [71] Benzeggagh ML, Kenane M. Measurement of mixed-mode delamination fracture toughness of unidirectional glass/epoxy composites with mixed-mode bending apparatus. Composites Sci Technol 1996;56:439-49.
- [72] Mohan J, Ivanković A, Murphy N. Mixed-mode fracture toughness of co-cured and secondary bonded composite joints. Eng Fract Mech 2015;134:148-67.

- [73] Anh PN, Stéphane M, Myriam C, Jean-Luc C. R-curve on Fracture Criteria for Mixed-mode in Crack Propagation in Quasi-brittle Material: Application for Wood. *Procedia Materials Science* 2014;3:973-8.
- [74] Phan NA, Morel S, Chaplain M. Mixed-mode fracture in a quasi-brittle material: R-curve and fracture criterion – Application to wood. *Eng Fract Mech* 2016;156:96-113.
- [75] Mathews MJ, Swanson SR. Characterization of the interlaminar fracture toughness of a laminated carbon/epoxy composite. *Composites Sci Technol* 2007;67:1489-98.
- [76] Liu Y, Zhang C, Xiang Y. A critical plane-based fracture criterion for mixed-mode delamination in composite materials. *Composites Part B: Engineering* 2015;82:212-20.
- [77] Vandellos T, Hautier M, Carrere N, Huchette C. Development of a new fracture test to identify the critical energy release rate: The Tensile Flexure test on Notched Specimen. *Eng Fract Mech* 2012;96:641-55.
- [78] Arrese A. Laminarteko hausturaren analisia material konpositetan. Ph.D Dissertation. The University of the Basque Country. 2009.
- [79] www.toray.com. ;2016.
- [80] www.hexcel.com. ;2016.
- [81] Charalambides M, Kinloch A, Wang Y, Williams J. On the Analysis of Mixed-Mode Failure. *Int J Fract* 1992;54:269-91.
- [82] de Morais AB, Pereira AB. Mixed mode I + II interlaminar fracture of glass/epoxy multidirectional laminates – Part 1: Analysis. *Composites Sci Technol* 2006;66:1889-95.
- [83] Kim BW, Mayer AH. Influence of fiber direction and mixed-mode ratio on delamination fracture toughness of carbon/epoxy laminates. *Composites Sci Technol* 2003;63:695-713.
- [84] Shahverdi M, Vassilopoulos AP, Keller T. Mixed-mode quasi-static failure criteria for adhesively-bonded pultruded GFRP joints. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 2014;59:45-56.
- [85] Chen JH, Sernow R, Schulz E, Hinrichsen G. A modification of the mixed-mode bending test apparatus. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 1999;30:871-7.

-
- [86] Blanco N, Turon A, Costa J. An exact solution for the determination of the mode mixture in the mixed-mode bending delamination test. *Composites Sci Technol* 2006;66:1256-8.
- [87] Tenchev RT, Falzon BG. A correction to the analytical solution of the mixed-mode bending (MMB) problem. *Composites Sci Technol* 2007;67:662-8.
- [88] Williams JG. On the calculation of energy release rates for cracked laminates. *Int J Fract* 1988;36:101-19.
- [89] Sundararaman V, Davidson BD. An unsymmetric double cantilever beam test for interfacial fracture toughness determination. *Int J Solids Structures* 1997;34:799-817.
- [90] Yoneyama S, Morimoto Y, Takashi M. Automatic Evaluation of Mixed-mode Stress Intensity Factors Utilizing Digital Image Correlation. *Strain* 2006;42:21-9.
- [91] Prombut P, Michel L, Lachaud F, Barrau JJ. Delamination of multidirectional composite laminates at 0 degrees/theta degrees ply interfaces. *Eng Fract Mech* 2006;73:2427-42.
- [92] Mangalgiri P, Johnson W, Everett R. Effect of Adherend Thickness and Mixed-Mode Loading on Debond Growth in Adhesively Bonded Composite Joints. *J Adhesion* 1987;23:263-88.
- [93] European Structural Integrity Society (ESIS). Determination of the mixed-mode I/II delamination resistance of unidirectional fibre-reinforced polymer laminates using the asymmetric double cantilever beam specimen (ADCB). 2000.
- [94] Ducept F, Gamby D, Davies P. A mixed-mode failure criterion derived from tests on symmetric and asymmetric specimens. *Composites Sci Technol* 1999;59:609-19.
- [95] Bennati S, Fiscaro P, Valvo PS. An enhanced beam-theory model of the mixed-mode bending (MMB) test-Part I: Literature review and mechanical model. *Meccanica* 2013;48:443-62.
- [96] Bennati S, Colleluori M, Corigliano D, Valvo PS. An enhanced beam-theory model of the asymmetric double cantilever beam (ADCB) test for composite laminates. *Composites Sci Technol* 2009;69:1735-45.

- [97] Bennati S, Colleluori M, Corigliano D, Valvo PS. Erratum to “An enhanced beam-theory model of the asymmetric double cantilever beam (ADCB) test for composite laminates” [Compos Sci Technol 2009;69(11–12):1735–1745]. Composites Sci Technol 2012;72:1791.
- [98] Bonhomme J, Argüelles A, Castrillo MA, Viña J. Computational models for mode I composite fracture failure: the virtual crack closure technique versus the two-step extension method. Meccanica 2010;45:297-304.
- [99] Mollón V, Bonhomme J, Viña J, Argüelles A. Theoretical and experimental analysis of carbon epoxy asymmetric dcb specimens to characterize mixed mode fracture toughness. Polym Test 2010;29:766-70.
- [100] Rikards R, Buchholz F-, Wang H, Bledzki AK, Korjakin A, Richard H-. Investigation of mixed mode I/II interlaminar fracture toughness of laminated composites by using a CTS type specimen. Eng Fract Mech 1998;61:325-42.
- [101] Jamali J, Fan Y, Wood JT. The mixed-mode fracture behavior of epoxy by the compact tension shear test. Int J Adhes Adhes 2015;63:79-86.
- [102] Tracy GD, Feraboli P, Kedward KT. A new mixed mode test for carbon/epoxy composite systems. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 2003;34:1125-31.
- [103] Szekrenyes A. Prestressed composite specimen for mixed-mode I/II cracking in laminated materials. J Reinf Plast Compos 2010;29:3309-21.
- [104] Aliha MRM, Bahmani A, Akhondi S. Mixed mode fracture toughness testing of PMMA with different three-point bend type specimens. European Journal of Mechanics - A/Solids 2016;58:148-62.
- [105] Oliveira JMQ, de Moura MFSF, Morais JLL. Application of the end loaded split and single-leg bending tests to the mixed-mode fracture characterization of wood. Holzforschung 2009;63:597-602.
- [106] de Moura MFSF, Oliveira JMQ, Morais JLL, Xavier J. Mixed-mode I/II wood fracture characterization using the mixed-mode bending test. Eng Fract Mech 2010;77:144-52.
- [107] Yoshihara H. Initiation and propagation fracture toughness of solid wood under the mixed Mode I/II condition examined by mixed-mode bending test. Eng Fract Mech 2013;104:1-15.

-
- [108] da Silva LFM, Esteves VHC, Chaves FJP. Fracture toughness of a structural adhesive under mixed mode loadings. *Materialwiss Werkstofftech* 2011;42:460-70.
- [109] Stamoulis G, Carrere N, Cognard JY, Davies P, Badulescu C. On the experimental mixed-mode failure of adhesively bonded metallic joints. *Int J Adhes Adhes* 2014;51:148-58.
- [110] Chaves FJP, da Silva LFM, de Moura MFSF, Dillard DA, Esteves VHC. Fracture Mechanics Tests in Adhesively Bonded Joints: A Literature Review. *J Adhesion* 2014;90:955-92.
- [111] Silva FGA, de Moura MFSF, Dourado N, Xavier J, Pereira FAM, Morais JJJ et al. Mixed-mode I+II fracture characterization of human cortical bone using the Single Leg Bending test. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* 2016;54:72-81.
- [112] Datta D, Nadimpalli SPV, Li Y, Shenoy VB. Effect of crack length and orientation on the mixed-mode fracture behavior of graphene. *Extreme Mechanics Letters* 2015;5:10-7.
- [113] Martínez-López M, Martínez-Barrera G, Nunes LCS, Reis JML, da Costa Mattos HS. Mixed mode fracture analysis in a polymer mortar using the Brazilian disk test. *Eng Fract Mech* 2016;154:140-51.
- [114] Boyano A, Mollón V, Bonhomme J, De Gracia J, Arrese A, Mujika F. Analytical and numerical approach of an End Notched Flexure test configuration with an inserted roller for promoting mixed mode I/II. *Eng Fract Mech* 2015;143:63-79.
- [115] Boyano A, De Gracia J, Arrese A, Mujika F. Experimental assessment of an End Notched Flexure test configuration with an inserted roller for analyzing mixed-mode I/II fracture toughness. *Eng Fract Mech* 2016;163:462-75.
- [116] Oden JT, Ripperger EA. *Mechanics of elastic structures*. 2nd ed. : McGraw-Hill etc., 1981.
- [117] Kaplan W. *Advanced calculus*. 4th ed. : Addison-Wesley, 1991.
- [118] REEDER J. A Bilinear Failure Criterion for Mixed-Mode Delamination. *Composite Materials: Testing and Design - Eleventh Volume* 1993;1206:303-22.
- [119] Zhang C, Xu J, Lu Z, Liu Y. General Fracture Criterion for Mixed-mode Delamination in Composite Materials. In: Anonymous : American Institute of Aeronautics and Astronautics; 2012.

- [120] Davidson BD, Zhao W. An Accurate Mixed-mode Delamination Failure Criterion for Laminated Fibrous Composites Requiring Limited Experimental Input. *Journal of Composite Materials* 2007;41:679-702.
- [121] Korin I, Larrainzar C, Ipina JP. Crack length and stable crack extension measurements from images acquired by means of a conventional flatbed scanner. *Fatigue Fract Eng Mater Struct* 2008;31:876-84.
- [122] Marat-Mendes RM, Freitas MM. Failure criteria for mixed mode delamination in glass fibre epoxy composites. *Compos Struct* 2010;92:2292-8.
- [123] Mujika F. On the effect of shear and local deformation in three-point bending tests. *Polym Test* 2007;26:869-77.
- [124] Carlsson LA, Gillespie JW. Mode II interlaminar fracture of composites. In: Pipes RB, editor *Application of Fracture Mechanics to Composite Materials* Elsevier 1989:113-157.
- [125] Ben Salem N, Jumel J, Budzik MK, Shanahan MER, Lavelle F. Analytical and experimental investigations of crack propagation in adhesively bonded joints with the Mixed Mode Bending (MMB) test Part I: Macroscopic analysis & Digital Image Correlation measurements. *Theor Appl Fract Mech* 2014;74:209-21.
- [126] Liu P, Groves RM, Benedictus R. 3D monitoring of delamination growth in a wind turbine blade composite using optical coherence tomography. *NDT E Int* 2014;64:52-8.
- [127] Walpole RE, Myers RH, Myers SL, Ye KE. *Probability & Statistics for Engineers & Scientists*. 9A ed. : Pearson Educación, 2012.
- [128] Phillips D, Wells G. The Stability of Transverse Cracks in Fiber Composites. *J Mater Sci Lett* 1982;1:321-4.
- [129] Allix O, Corigliano A. Modeling and simulation of crack propagation in mixed-modes interlaminar fracture specimens. *Int J Fract* 1996;77:111-40.
- [130] Szekrenyes A. Crack Stability of Fracture Specimens used to Test Unidirectional Fiber Reinforced Material. *Exp Mech* 2010;50:473-82.
- [131] Bazant Z, Cedolin L. *Stability of structures: elastic, inelastic, fracture, and damage theories* Oxford University Press. Inc, New York 1991.