

Doktore Tesia

**ERRESISTENTZIA MODERATUKO OHIKO
APLIKAZIOETAN ALTZAIRU ZUNTZEZ
INDARTURIKO HORMIGOI
AUTOTRINKOTZAILEAREN
ERABILERAREN OPTIMIZAZIOA**

Aimar Orbe Mateo
-k aurkeztua

Universidad del País Vasco
Euskal Herriko Unibertsitateko
Ingeniaritza Mekanikoa Sailean

Industri Ingeniari Doktore-Maila
eskuratzeko

Ramon Losada Rodríguez Dr.

Eduardo Rojí Chandro Dr.

Jaunek zuzendua.

Bilbon, 2013ko Urria

Nire hiru neskei,
tesi honek lapurtu didan denboragatik

Hizkuntza xaboiaren alderantzizkoa da:
zenbat eta gehiago erabili xaboa,
orduan eta urrituago eta xahutuago;
hitzak, ordea, alderantziz,
zenbat eta erabiliago orduan eta aberatsago.

Abdelfattah Kilito

No limits, Jonathan? he thought, and he smiled.
His race to learn had begun.

Jonathan Livingstone Seagull
Richard Bach

Laburpena

Doktore Tesi honen helburua altzairu zuntz laburren egitura-ahalmenak planteatzean datza hormigoi matrizearen indartze gisa, arrunki AZIH deitua, baldintza zehatzetan materialaren zenbait alderdi hobetzen dituzten propietate autotrinkotzaileak emateko aukerarekin bat, Altzairu Zuntzez Indarturiko Hormigoi Autotrinkotzailea (AZIHAT) deritzona sortuz, dokumentu honetan egiaztatzen diren ezaugarri eta propietateei esker.

Asmo horretarako eta ezagutzen ditugun beste esperientzia batzuek ez bezala, neurri handiko horma tartea (6 metroko luzera eta 3 metroko altuera) eraiki eta aztertzen da. Proposamen honek altzairu zuntzen antolamendua aztertu nahi du neurri handiko egitura-elementuaren baitan eta obrako baldintza errealean arabera eraikiz, materialaren portaera baldintzatzaile posible guztiak kontuan izanik zehazteko, horietako zenbait ez baitira laborategiko ikerketetan agertzen.

Egitura osatzen duen materialaren ezaugarritze xehatuak, hormaren zati-keta dakar tamaina ezberdineko 380 laginetan, etorkizun handiko entsegu ez-suntsitzaile eta ohiko entsegu suntsitzaileetan erabiliko direlarik. Eremu bien artean ezartzen diren erlazioek, materiala kaltetu gabe eta zeharkako eran alderdi erresistenteen zehaztapena dakarte, egiturarengan kalitate kontrola gauzatzeko bide interesgarriak irekiz.

Ondorengo analisia osatzeko, lanen egikaritze aurretik zuntzek hormigoi masa barruan izango duten norabidea zehazteko metodologia ezartzen da. Jariakinen Dinamika Konputazionalaren bitartez egindako simulazioek, materialaren hondar erresistentzien balioztapena ahalbidetzen dute aurreratu den zuntzen orientazioari esker, puntu ahul edo hormigoitze prozesu ezegokiak aurretiaz detektatuz.

Amaiera gisa, proposatzen den euste andel zilindrikoaren erabileraren ekonomia eta ingurumen jasangarritasun alderaketa egiten da, batetik hormigoi arrunt eta bestetik AZIHAT-aren bitartez egikaritutako bi adibiderentzat. Sistema bakoitzak bere abantaila eta desabantailak ditu, baina AZIHAT-a egitura-diseinu konbentzionala baino ekonomiko eta jasangarriagoa izan daitekeela ondorioztatzen da.

Lan hauek, Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatearen (UPV/EHU) barruko Ingeniaritza Mekanikoa Sailari atxikia dagoen Eraikuntza Ingeniaritza Jakintza Arloko ikerketan jardueren baitan burutu dira.

Aimar Orbe
Industria Ingeniaria
Bilbon, 2013ko Urria

Abstract

The aim of this Doctoral Thesis, focuses on the structural possibilities of short steel fibres as reinforcement of the concrete matrices, commonly referred as SFRC, along with the ability to provide self-compacting properties, which improve certain aspects of the material, forming the called Steel Fibre Reinforced Self Compacting Concrete (SFRSCC), under certain conditions, thanks to the properties and features that have been described in this document.

Unlike most of the previous experiences we know, a large wall section (6 metres-high and 3 metres-long) is cast and analysed. This approach allows to study the orientation of the steel fibres within the large structural element, cast in real on-site conditions, to determine the behaviour of the material taking into account all possible conditionings, some of which are not present on laboratory researches.

The exhaustive characterization of the material that composes the structure requires extracting 380 specimens of different sizes from the wall, which undergo promising non-destructive tests and more common destructive ones. The correlations established between both fields, allow to determine strength issues indirectly and without damaging the material, establishing new interesting avenues for developing quality control methods on the structure itself.

To complement the analysis, a methodology to determine the fibre orientation within the concrete matrix prior to the casting is established. Computational Fluid Dynamics simulations allow also the establishment of a set of estimations regarding the residual strength of the material, from the predicted fibre orientation, detecting weaknesses or inadequate casting processes.

In the culmination, a economical and environmental sustainability comparative study is performed, for the proposed retaining cylindrical tank, designed with conventional reinforced concrete on one hand and the SFRSCC on the other. Each system has its own advantages and disadvantages, but SRFSCC can be equal or even, more economical and sustainable than a conventional structure design.

This work has been carried out within the research activities of the Construction Engineering knowledge area attached to the Mechanical Engineering Department of the University of the Basque Country (UPV/EHU).

Aimar Orbe
Industrial Engineer
Bilbao, October 2013

Eskertzak

Lehendabizi nire Doktore tesi honen zuzendari biak eskertu nahi nituzke, Ramón eta Eduardo, lanaldi luze honetan erakutsi didaten laguntza eta pazientziagatik. Zuzen bideratu nauzue behar nuenean adoretuz eta erotzen nintzenean eutsiz.

Nire esker onak ere adierazi nahiko nizkieke, hurbiltasunaren arabera: Jesus, beti laguntzeko prest egoteagatik; Tomas, aholkulari paregabea izateagatik; Mikel eta Fran, egunerokotasunean tirabirarik gabe eta aldarte oneko burbuila bat sortzearren; Raul, erabili ditudan ehunka probeten hautsaz nirekin zikintzeagatik; Ingeniaritza Mekanikoa Saileko nire gainontzeko lankideei (Aitor, Unai, Mikel, Yokasta, Pedro, Ciprian, Gheorghe, etab.); Komunikazio Ingeniaritza Sailekoak (Amaia, Ivàn eta Àlvaro, AZIHAT-ean zehar seinaleek duten ahultzearen ikerketa paraleloaren ekarpena eginez) eta orokorrean, Bilboko IGET-eko lankide guztiei.

Era berean, David, Leire, Josu, Pello, Jesùs, Bengo eta Tecnaliako beste profesionalen lankidetzak eskertzen dut, emandako laguntza teknikoa eta lankide bikainak izateagatik.

Ezin ahaztu Universitat Politècnica de Catalunya-ko (UPC) kideak, Antonio, Albert, Pau, Ana eta Josep Maria, lehenengo bultzada, hasierako jakintzak eta lan nekez honi ekiteko tresnak emateagatik.

Aipatu beharra ditut Financiera y Minera (Italcementi Group) enoresako Jose Antonio Hurtado eta Santiago Beceiro profesional bikainak eta ArcelorMittal-eko (Wire Solutions) Javier Álamo, emandako laguntza tekniko eta materialagatik. Aldi berean, Bilbao Bizkaia Ur-Partzuergoko Carlos García Marcos eta Marcos Gregorioren adeitasuna eta interesa eskertu nahi nituzke.

Azterketa tomografikoa posible izan da Juan Manuel Manso eta Pedro Miguel Bravoren lankidetzari esker, Burgosko Unibertsitatearen (UBU) ordezkari gisa eta TAC 64 S.L. enpresari ere asko eskertzen diot.

Jariakinen Dinamika Konputazional tresna bidezko analisia, ezinezkoa litzateke Daniel Fuster eta Pièere Yves Lagrèe-ren (Institut Jean Le Rond D'Alembert UPMC) laguntza ordainezinagatik, Stephan Popinet (NIWA) eta orokorrean, Gerris programaren garatzaile komunitateari esker.

3Dslicer, Meshlab, Salomé, LibreOffice, Texmaker etab. programen garatzaileen ahaleginak ere eskertu behar ditut, ikerketa hau aurrera eramateko tresnak emateagatik.

Azkenik, ikerketa hau Zientzia eta Berrikuntza Ministerioak eta Bizkaiko Foru Aldundiak finantzatua izan da neurri batean, MIVES IV ref: BIA 2010-20789-C04-04 eta BIRGAITEK 7-12-TK-2009-10 proiektuen bitartez, hurrenez hurren, Doktore Tesi honen egileak bere eskerrik onenak adierazi nahi dizkielarik instituzio horiei. Horiekin batera, 2012 Uztailaren 4ko Aginduaren arabera, Eusko Jaurlaritzak onartutako IT781-13 Ikerketa Taldeari ere eskerrak agertu nahi dizkiot.

Ezin bukatu nire familia eta lagunak eskertu gabe eman didaten adorea, baina hala ere, hau guztia ez litzateke posible izango gauero etxean zain nituen irribarreak gabe.

Aurkibide Orokorra

Laburpena	iii
Abstract	vii
Eskertzak	xi
Aurkibide Orokorra	xv

I Aurrekariak 1

1 Sarrera	3
1.1 Tesiaren testuingurua	3
1.2 Ikerketaren helburuak	4
1.3 Metodologia eta prozedura	5
1.4 Dokumentuaren egitura	5

II Aldez aurreko ikerketak 9

2 Artearen Egoera	11
2.1 Sarrera	11
2.2 AZIH-aren ezaugarriak	11
2.2.1 Zuntz motak	14
2.2.2 AZIH-aren propietate mekanikoak	15
2.2.3 Modelo Eratzaileak	22
2.2.4 Kalitate kontrola	25
2.3 HATaren ezaugarriak	28
2.3.1 Diseinu metodoak	30
2.3.2 HATaren erreologia	31
2.3.3 Ezaugarriak egoera freskoan	33
2.4 Jariakinen dinamika konputazionala	34
2.4.1 Jariakin ez Newtondarrak	36
2.5 Egitura-adibideak	38
2.5.1 Fabrikazio eta obraratzea	39
2.6 Azken ondorioak	39

III	Laborategiko entsegu kanpaina	41
3	AZIHAT-aren aukeraketa	43
3.1	Sarrera	43
3.2	Zuntz motaren aukeraketa	43
3.2.1	Konfigurazio eta prozedura	45
3.2.2	Erauzte emaitzak	46
3.3	Hormigoia-aren formulazioa	47
3.3.1	Pasta zehaztea	48
3.3.2	Ale-eskeletoaren optimizazioa	49
3.3.3	Gehigarriak zehaztea	50
3.3.4	Nahasketa prozedura	53
3.3.5	Emaitzen onespena	53
3.4	Azken gogoetak	54
<hr/>		
IV	Eskala errealeko entsegu kanpaina	55
4	Egitura elementuaren egikaritzea	57
4.1	Sarrera	57
4.2	Plantako fabrikaziora estrapolatzea	57
4.2.1	Hezetasun kontrola	58
4.2.2	Prozedura eta nahasketa zikloak	58
4.3	Hormaren prestaketa	59
4.3.1	Enkofratua	60
4.3.2	Hormigoitze prozedura	60
4.3.3	Ontze prozesua	61
4.4	Egitura elementuaren gaineko entseguak	62
4.4.1	Ikusizko analisisa	62
4.4.2	Pultsu ultrasonikoak	63
4.5	Laginen aukeraketa eta entseguak	64
4.5.1	Egin beharreko entseguak	64
4.5.2	Laginen tamaina	65
4.5.3	Hormaren mozketa eskema	65
4.6	Azken gogoetak	68
5	Entsegu ez-suntsitzaileak (EES)	69
5.1	Sarrera	69
5.2	Pultsu ultrasonikoen abiadura	69
5.2.1	Entseguaren prozedura	70
5.2.2	Neurketen emaitzak	72
5.3	Metodo Estereologikoak	72
5.3.1	Ebaketa aurpegien azterketa	72
5.3.2	Norabide faktorearen balioztapena	75
5.4	Metodo magnetikoak	76
5.4.1	Entseguaren konfigurazioa	76
5.4.2	Lagin kubikoen azterketa	77
5.4.3	Lagin prismatikoen azterketa	83
5.4.4	Zuntz zenbatekoaren balioztapena	86

5.4.5	Norabide faktorearen balioztapena	87
5.5	Ardatz-tomografia konputerizatua	89
5.5.1	Azterketaren prozedura	89
5.5.2	Lagin txikien emaitzak	90
5.5.3	Lagin handien emaitzak	90
5.5.4	Zuntz zenbatekoaren balioztapena	92
5.5.5	Entsegu magnetikoen korrelazioa	94
5.6	Seinaleen ahultzea	94
5.7	Iragazkortasunaren zehaztapena	95
5.7.1	Entseguaren prozedura	96
5.7.2	Sartze emaitzak	96
5.8	Azken gogoetak	97
6	Entsegu suntsitzaileak (ES)	99
6.1	Sarrera	99
6.2	Konpresio entseguak	99
6.2.1	Laginen kokapena	100
6.2.2	Konpresio emaitzak	100
6.3	Bartzelona entsegua	102
6.3.1	Entseguaren konfigurazioa	102
6.3.2	Laginen kokapena	103
6.3.3	Bartzelona entseguaren emaitzak	103
6.4	Brasildar Entsegua	107
6.4.1	Entseguaren konfigurazioa	107
6.4.2	Brasildar entseguaren emaitzak	109
6.5	Ebakitzaile entseguak	110
6.5.1	Entseguaren konfigurazioa	110
6.5.2	Laginen kokapena	110
6.5.3	Ebakitzaile entseguaren emaitzak	111
6.6	Flexotrakzio entseguak	111
6.6.1	Entseguaren konfigurazioa	112
6.6.2	Laginen kokapena	112
6.6.3	Flexotrakzio entseguaren emaitzak	113
6.7	Azken gogoetak	129

V Orientazioaren aurreikuspena 133

7	CFD bidezko hormigoitzearen simulazioa	135
7.1	Sarrera	135
7.2	Navier-Stokes ekuazioen ebazpena	135
7.2.1	Erreologia parametroak	136
7.2.2	Modelo osoa	143
7.3	Simulazioaren emaitzak	145
7.3.1	Egiaztapen esperimentalak	146
7.3.2	Erresistentzien aurreikuspena	150
7.4	Materialaren lege eratzailaren aurreikuspena.	152
7.5	Azken gogoetak	153

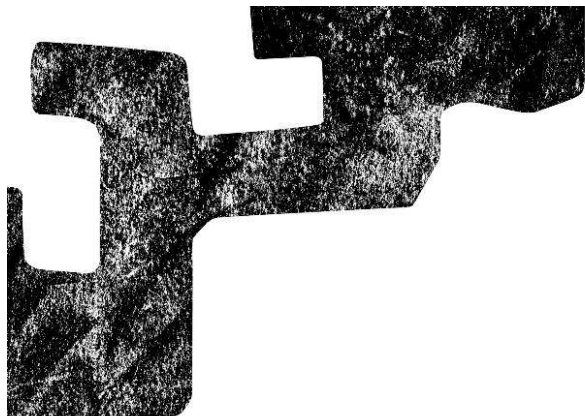
VI	Kasu praktikoek aplikazioa	157
8	Euste andel zilindrikoak	159
8.1	Sarrera	159
8.2	Erabilera adibideak	160
8.2.1	Neurri, armatu eta materialak	160
8.3	Azterketa kasua	164
8.3.1	Produktuaren kostua	167
8.3.2	Epeen murrizketa	171
8.4	Jasangarritasun indizea	171
8.4.1	Zementuaren optimizazio indizea	174
8.4.2	Agregakinen optimizazioaren ingurumen irizpidea. . .	175
8.4.3	Nahasketa uraren optimizazioaren ingurumen irizpidea.	176
8.4.4	Gehigarri erabileraren optimizazioaren ingurumen iriz- pidea.	177
8.4.5	Armatuaren optimizazioaren ingurumen irizpidea. . .	178
8.4.6	Inpaktu kontrolaren ingurumen irizpidea.	181
8.4.7	Egikaritze epeari buruzko ingurumen irizpidea.	181
8.4.8	Materialen kontrolari dagokion ingurumen irizpidea. .	183
8.4.9	Azterketa kasuen arteko alderaketa.	184
8.5	Azken gogoetak	185
<hr/>		
VII	Amaierako ondorioak	189
9	Ondorioak eta etorkizuneko aukerak	191
9.1	Ondorioak	191
9.2	Ikerketa ildo berriak	196
<hr/>		
	Erreferentziak	199
<hr/>		
	EranskinaA Pulsu ultrasonikoen abiadura	213
A.1	Neurketa osoa	213
	EranskinaB Metodo magnetikoa	227
B.1	Metodo magnetikoaren emaitza osoak	227
	EranskinaC Flexotrakzio entseguak	237
C.1	Emaitza eta diagramak	237
	EranskinaD Simulazio konputazionalak	305
D.1	BML biskometroarekiko alderaketa	305
<hr/>		
	Taulen Aurkibidea	307
	Irudien Aurkibidea	309

Notazioak eta akronimoak

313

Argitalpenak

319



I. ZATIA

Aurrekariak

1 • GAIA

Sarrera

1.1 Tesiaren testuingurua

Matrize hauskorraz osatzea bereizgarri duen materiala da hormigoia. Konpresio erresistentzia egokia aurkezten du, baina murriztua trakzioan. Bere jatorrietatik, hainbat material mota izan dira erabiliak hormigoia-egitura-ahalmena indartu eta osatzeko. Guzti horien artean, altzairu barrak (leunak hasieran batean eta korrugatuak ondoren) izan dira garapen gehiago jasan dutenak.

Hormigoia-egitura indartze horri, hormigoia-egitura armatua deitu izan ohi zaio. Ebakiduren tentsio-orekan hormigoia-egitura ekarpen handiagoa izan dezan, zerbitzu fasearen aurretik hormigoia konprimitzen duten atezatze teknika ezberdinak garatu dira. Era honetan, egitura-elementuen ebakiduren neurriak murriztu daitezke. Armatuaren tenkatze unearan arabera, teknika bi erabil daitezke; piezaren hormigoitza aurreko atezatzea eta hormigoitza-osteko atezatzea, hormigoia gogortuak erresistentzia nahikoa lortu duenean egiten dena. Alanbre bidezkoa da atezatze teknikekin uztartzen den armatu motarik ohikoena, hauen kiribiltze helikoidalez kordioak osatuz eta tendoiak, azken hauek, aurrekoak multzokatu.

Zuntzak dituen hormigoia-egitura hobekuntzari dagokionez, XIX. mendean amaiera eta XX. mendean hasiera artean patente anitz erregistratu ziren. Hala ere, hirurogeigarren hamarkada arte ez ziren Altzairu Zuntzez Indarturiko Hormigoia-egitura (AZIH) portaera aztertuko zituzten ikerketak burutuko, materialari bultzakada berria emanez.

Dosifikatzen den altzairu kantitateak, zailtasun eta harikortasun handiagoa eragiten du hormigoia-egitura hauskorrean. Onura hau, alabaina, zuntzek masaren barruan hartzen duten norabidearen arabera da. Diseinatu den hormigoia-egitura formulazioaren ondorioz, zuntzen ausazko banaketa lor daiteke espazioan, material isotropoa osatuz. Hormigoitza prozesuaren eraginez, posible da zuntzen antolamendua plano edo norabide zehatzean behartzea.

Materialaren trakziopeko erantzunari dagokionez, matrizea pitzatu ondoren erresistentzia galera gerta liteke (biguntzea) edo jasan daitekeen tentsio mailaren areagotzea (gogortzea). Zuntz kantitate handiek, ezaugarri nabarmeneko materiala era dezakete (1.1 Irudia), hormigoia-egitura pitzadura ugari eraginez.



(a) Hormigoi autotrinkotzailea (HAT) (b) Altzairu zuntzez indartutako hormigoia (AZIH)

1.1 Irudia: Ikerketan uztartzen diren hormigoiaren teknologiak.

Zuntzen erabilerak egitura-elementuen lodiera murriztea ahalbidetzen du, armatuen babesak bermatzeko beharrezkoak diren gutxieneko estaldurak ekin daitezkeelako. Bestalde, barra edo armatu parrilladura zurrunik ez izatea, itxura laurik ez duten egitura-elementuak erraztasun handiagoz eratzea bideratzen du. Aldi berean, zuntzen ugartasunari esker matrizea hobeto jos liteke, pitzaduraren kontrol handiagoa lortuz eta, ondorioz, iraunkortasuna hobetuz. Armaturak kokatu eta hormigoia dardaratu beharra saihestuz, posible da kostuak eta egikaritze epeak murriztea eta halaber obrako osasun eta segurtasun baldintzak hobetzea. Hori guztia dela eta, interesgarri gertatzen da ohiko armaturak zuntzekin ordezkatzea hein batean edo haren osotasunean.

Materialaren ezaguera nahikoa izan arren, lege-eratzaille gehienak laginengana egin diren entseguen emaitzetan oinarritzen dira. Aurreikuspen metodo berriek, AZIH-aren trakziopeko erantzuna ezartzea ahalbidetzen dute diseinu fasean, baina orientazio faktore orokorren bitartez.

Bere dosifikazioa hainbat alderdik baldintzatzen dute, beharrezkoa den erresistentzia, jasan beharreko giroa edo proiektuan zehaztu den trinkotasuna. Laurogeigarren hamarkadan hormigoi oso jariakorra garatu zen Japonian, enkofratuak bere pisuaz soilik betetzeko gai zena, kanpo dardaratze beharrik gabe. Are masaren mugimenduak zuntzen norabidea plano batean edo norabide nagusi batean behar dezake. Ezaugarri Handiko Hormigoia deitua hasiera batean, Hormigoi Autotrinkotzailea (HAT) deitu zen gero.

Jariakinen dinamika konputazionala aukera egoki eta interesgarria da zuntzek hartuko duten norabidea aurretiaz zehazteko edozein elementu-geometria eta hormigoitze prozesurako. Ikerketa eremu zabala da, gaurdaino asko sakondu ez dena.

1.2 Ikerketaren helburuak

Eskala errealeko hormigoi armatuzko egitura-elementuen matrize barneko zuntzen banaketa eta norabidearen azterketa da ikerketa honen helburu nagusia.

Gaurdaino burutu diren ikerketek, orokorrean, asmo horretarako molde-

katu diren laginengan aztertzen dute materiala, AZIH. Hauek, materialaren pitzadura ondorengo portaera ezaugarritzeko bidea eman dute. Baina obrako errealitatea ez dator bat, nabarmenki, ikerketa laborategian fabrikatu diren eskala txikiko elementuekin. Hortaz, AZIH-aren eskala handiko fabrikazioan eta zuntzen antolamendu eta banaketan, hautatzen den eraikitze-prozesutik eratorriz, eragina duten fenomenoek ulermen hobea beharrezkoa da.

Eskala errealeko azterketak obrako benetako egoeretan, hasierako hipotesien egokitasuna ezartzea ahalbidetzen du. Halaber, materialen kokapen zuzena bermatzeko, egituratik inolako laginik erauzteko beharrik ez duten iragarpen eta kontrol teknikak, aski zehatzak, eskuragarri izan beharko lirakeke. Hori dela eta, nagusiki trakziopean diharduten egitura-ardura duten elementuak, AZIHaren erabilerak atxikiak dituen abantailez gaudi daitezke.

Ondorioz, eskatzen zaizkion ezaugarriekiko, materiala egokia den ustekizuna du tesiak, egokitasun horren abantailak frogatuz.

1.3 Metodologia eta prozedura

Ikerketan ezarri diren helburuak erdiesteko, hurrengo azterketa metodologia jarraitu da:

Lehenengo, aztertu beharreko egiturak zein izan behar duen erabaki da, nagusiki trakzio esfortzuen eraginean izateagatik ezaugarritzen dena, diseinu baldintzatzaileak erraztuz. Behin elementua aukeratua izan dela, kalkulu tresna klasikoek bitartez balio-bizitzan zehar jasan behar izango dituen esfortzuak aztertuko dira.

Bigarren, erauzketa-saiakuntza kanpainaren emaitzetan oinarrituz, erabili beharreko zuntz mota erabakitzen da. Hormigoiaren dosifikazioa formulatzen da, hautatu den zuntz motarekin eta obraratze eratik eratortzen diren egoera freskoko propietateekin bat etorriz.

Hirugarren, eskala errealeko xafla-egitura eraikitzen da AZIHAT bitartez eta zehazten den prozeduraz. Egitura gogortu ostean, enkofratua kentzeari eta ondorengo maneiuari ekiten zaio ebaketa prozesu eta entseguetarako beharrezkoak diren laginak lortzeko.

Laugarren, entsegu suntsigarri eta ez suntsigarri kanpaina sakona burutu da egitura-elementuaren barruko kokapen eta tamaina ezberdineko laginetan. Lortutako emaitzak elkarrekin erlazionatzen dira benetako egituretan gara daitezkeen kontrol metodoak ezartzeko, laginik erauzteko beharrik gabe.

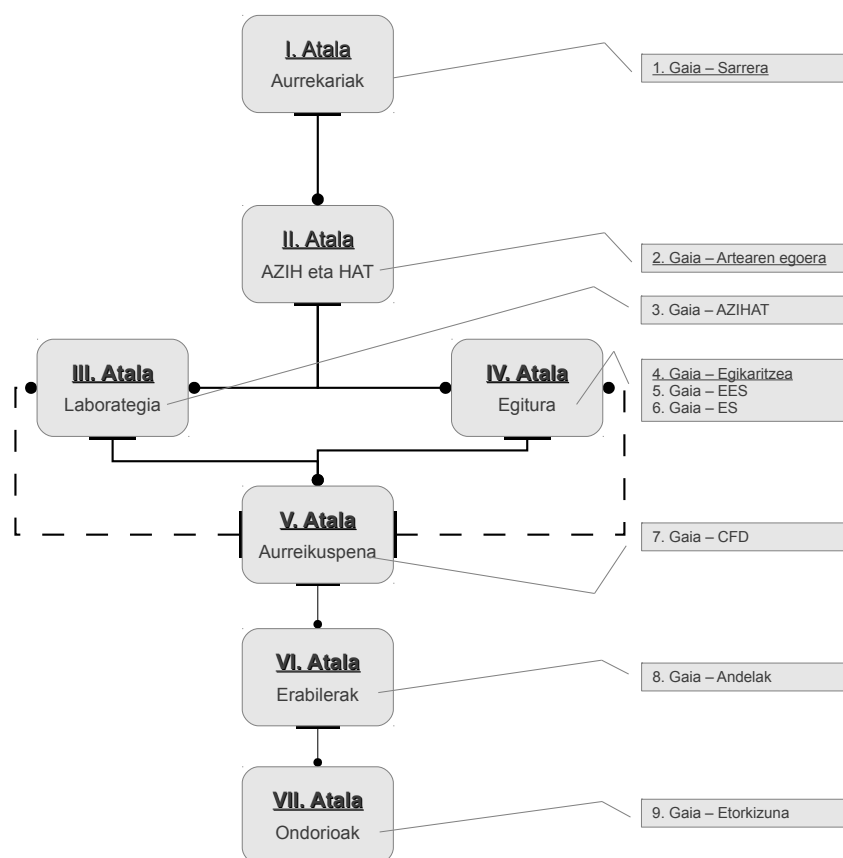
Bosgarren, jariakinen dinamika konputazional (CFD) bitartez hormigoi-tze prozesuaren modelizazioaren hurbilketa aurkezten da, diseinu fasean zuntzen norabidea aurrerata ahalbidetuz.

Seigarren, azkenik, euste andel zirkular baten kasu praktikoa aurkezten da. Ohiko eran eta zuntzez indartu diren egitura bana alderatzen dira, alderdi ekonomiko, egikaritze epe eta iraunkortasunari dagokionez.

1.4 Dokumentuaren egitura

Honako tesi hau 7 zatitan banatzen da, 1.2 Irudian irudikatzen den legez.

Doktore Tesian garatu den ikerketaren sarrera honek, dokumentuaren Lehenengo Zatia osatzen du.



1.2 Irudia: AZIHATaren optimizazioa - tesia osatzen duten 7 atalen ikuspegi orokorra.

Bigarren Zatiak erabili beharreko materialen azterketan jartzen du arreta, batetik AZIH-a, bestetik, HAT-a eta teknologi bien batasuna azkenik. Haien propietate eta egoera freskoan eta behin gogortuak direnean duten portaera aztertzen dira, baita zehaztapen horiek egiteko entsegu normalizatuak. Aldi berean, 2. Gaian jariatzen dinamik konputazioalari dagozkion ikerketa le-roak aztertzen dira. Modelizazio mota hau, zuntzen norabidea aurreratzeko baliu liteke.

Hirugarren Zatiak, AZIHAT-aren diseinua ezartzen da laborategi mailan. 3. Gaiak materialen aukeraketa xehatzen du (zuntz mota, zementu edukia, ur/zementu erlazioa, etab.). Egoera freskoan eta gogortuan neurtzen diren emaitzak, proposatutako erabileraren beharrezanekin erkatu egiten dira.

Doktore Tesi honen oinarriak Laugarren Zatiak biltzen dira. Eskala errealeko horma tarte baten egikaritze eta ondorengo maneiu eta mozketaren xehetasunak azaltzen dira bertan. Abiaburu gisa, 4. Gaian, erabiliko den hormigoia formulatzen da. Horma bera eta hartatik moztu diren laginengan burutu diren hainbat entsegu ez suntsitzaileen xehetasun oro zehazten dira 5. Gaian. Bestalde, 6. Gaian xafra-egituraren multzoan kokapen ezberdina duten laginetan egin diren entsegu suntsitzaileak islatzen dira.

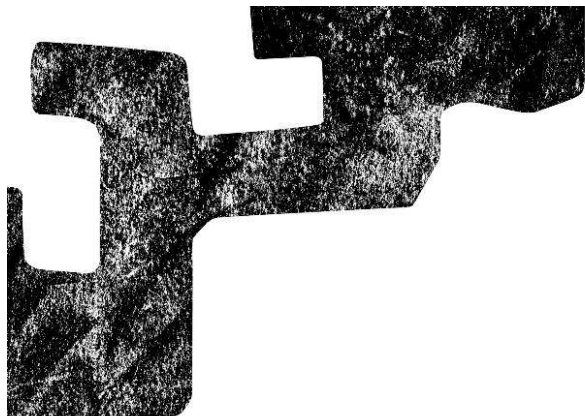
Bosgarren Zatia da gauzatu den ikerketan asmo handikoena. Bertan, 7. Gaiari zehar, CFD-a oinarri hartuz zuntzen norabidea aurrerako proposatzen den modelo biltzen da. Bere egokitasuna, neurketa erreologikoak eta ingeniari-entseguen emaitzak ezarri den modeloaz erkatuz egiaztatzen da.

Seigarren Zatia eta 8. Gaiaren barnean, ikuspuntu ekonomiko, egikaritze epe eta iraunkortasunari dagokionez, materialaren erabilera interesgarri eta egoki gerta daitekeen kasu praktikoa azaltzen da.

Azkeneko ondorioak, Zazpigarren eta azken Zatia laburbiltzen dira. Hala ere, 9. Gaiaren barruan, etorkizuneko ikerketa ildo berrientzako gomendioak ematen dira zuntzen norabidearen kontrol eta iragarpenari dagokionez.

Dokumentuaren azken puntu gisa, Doktore Tesi honen garapenean aipaturiko iturri kontsultatuak zerrendatzen dira.

Azkenik, tesia osatzen duten hainbat atalen edukiaren informazio osoa emateko asmoz, hiru eranskin gehitu dira, egin diren askotariko entseguen emaitzak era xehatuagoan biltzen direlarik.



II. ZATIA

Aldez aurreko ikerketak

2. GAIA

Artearen Egoera

2.1 Sarrera

Zuntzez indartutako hormigoi (ZIH) gisa, osaketan zenbait materialetako zuntz labur eta eten hartzen dituena zehazten da, ausaz banatuak masa barruan. Zuntzok, egitura-funtzioa izan dezakete, haien ekarpenak ohiko armatua murriztea edo, are, ordezkatzeko ahalbidetzen badu, Azken Muga Egoeren (AME) edo Zerbitzu Muga Egoeren (ZME) egiaztatzean kontutan izanez. Aitzitik, ez-egiturazko izaerak, su edo urradurarekiko erresistentzia, pitzatze-kontrola eta abar [EHE-08 (2008)] hobetzeko bakarrik kontutan hartzea dakar

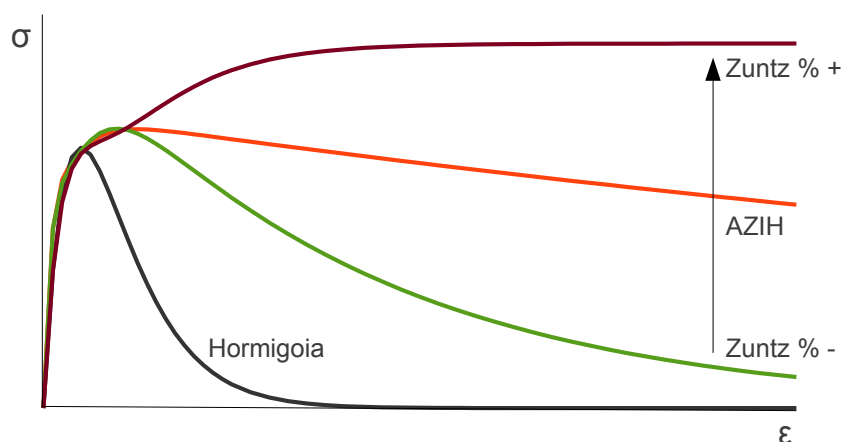
Hormigoi autotrinkotzailearen (HAT) ezaugarri nagusia, kanpo dardaraketa beharrik gabe, bere kabuz trinkotzeko ahalmena da. Haatik, zenbait egoerek kontu handiko dardaraldi arina behar izan lezakete [Self-Compacting Concrete European Project Group (2005)]. Dosifikazio egokiaren egiaztatzea egoera freskoan egiten da, aldiz, behin hormigoia gogortu dela bere portaera hormigoi arruntarena baino are hobea da. Hormigoi mota honek konpresio erresistentzia handiago eta porositate txikiagora jotzen du, ondo aztertutako formulazioa eta aregakin-zatiki finen erabilera handiagoa dela eta.

Altzairu zuntzez indartutako hormigoi autotrinkotzailea (AZIHAT) berriki aztertzen den materiala da, bi teknologien sinergiaz, autotrinkotasunaren eta zuntzen indartzearen abantailak uztartu nahi dituena. Obraratze erraztasunak, dardaraketa eta armatze faseak kentzearen ondorioz nagusiki, kostuak eta epeak nabarmenki murriztea dakar. Abantailekin batera, horrelako hormigoia formulatzeko zailtasunak ere batzen dira.

Gai honek, material bien eta haien konbinatzeari dagokion artearen egoera laburki biltzen ditu. Jarraian, gaur arteko egitura-erabileren iruzkin laburra egingo da.

2.2 AZIH-aren ezaugarriak

Hormigoiaren matrize hauskorra indartzearen beharra, bere trakzio erresistentzia mugatua dela eta, hainbat joeretan eratorri da. Zementu-matrizeetan zuntzak gehitzea XIX. mendearen amaieratik egitate bat da. XX. mendearen hasieran hainbat patente erregistratzeari ekin zitzaion ildo horretan. Baina



2.1 Irudia: Harikortasun gehitzea zuntz eduki ezberdinetarako.

1960ko hamarkada da, harrezkero materialaren ezagutzan sakontzeko egin diren ikerketen oinarriak ezartzen diren garaia.

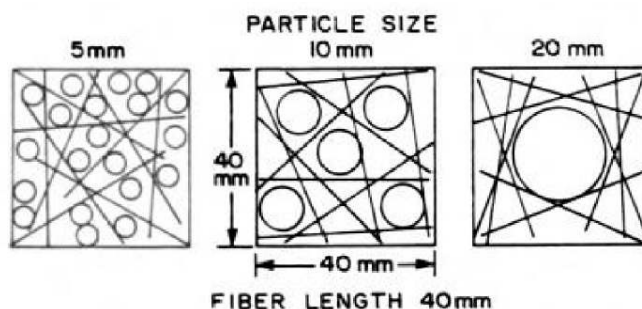
Indartze horrek, batetik materialaren trakzio erresistentzia handitu eta bestetik halako harikortasunaz hornitzen du. Zuntzek hormigoian sortzen diren pitzadurak josiz eta haietan zehar esfortzuak eusteko gai izanez lortzen dira alderdi biak. Hartzen den energia gehikuntza, pitzatutako plano zeharkatzen duten zuntz kopuruaren menpeko da neurri handi batean (2.1 Irudia).

Zenbait ikerketek [Wille et al (2011)] islatzen duten legez, zuntzek indartzen diren hormigoiak egitura-elementuak diseinatzeko eta are betekizun ultra-altuetarako egokiak izan daitezke. Horretarako, ezinbestekoa da zuntza matrizearen barnean zuzen ainguratu eta atxikitzea. Zenbait aldagaiek portaera hori baldintzatzen dute, hala nola hormigoia trinkotasunak, zuntzaren geometriak edo altzairuaren kalitateak, bat edo bat aipatzearen.

Kalitate handiagoko hormigoiek eta luzera gehiagoko eta geometria ez zuzeneko zuntzek, atxikitze eta ainguraketa hobea ahalbidetzen dute. Egitate hau kalterako izan daiteke altzairuaren erresistentzia ere handia ez baldin bada. Handitzat, 2000 MPa inguruko erresistentzia hartzen da, zuntzen fabrikazioan karbono eduki handiko altzairuak erabiliz lortzen dena. Zuntzek jasan beharreko esfortzuak bestela, gehiegizkoak izan litezke eta haien apurketa eragin. Zuntzaren irristatze ezak, ekiditea komeni den bat-bateko izaerako apurketa hauskorak eragingo lituzke elementuaren osotasunean.

Zuntzen norabideak ere betekizun nagusia du materialak egoera gogortuan izango dituen propietate mekanikoetan. Zuntz ehuneko handiagoko indartze gehiagoren kide da, ez beti berdin-berdina, antolaketa espazialean. Hala eta guztiz ere, 2.2.2.2 Atalean aurkeztu bezala zuntzak plano edo norabide nagusi batean orienta litezke.

Hormigoia osagaiak (zementua, ura eta agregakinak), hormigoia arrunt berdinak izan daitezke. Zuntzak zuzenean gehi daitezke plantako nahasgailuan edo hormigoiarekin nahastu hormigoia-kamioiaren upel barruan. AZIH-aren nahasketa denborak, hormigoia arruntak baino handiagoak izan ohi dira, zuntzen nahaste eta banaketa zuzenerako denbora estra behar baita; are



2.2 Irudia: Agregakinen gehienezko tamainaren eragina [Johnston (1996)].

gehiago zuntzok elkarren artean itsatsita hornitzen baldin badira [Kooiman et al (1999)]. Zuntzak paraleloki kolatutako multzotan horni daitezke, banaka beharrean, orrazi mota bat osatuz.

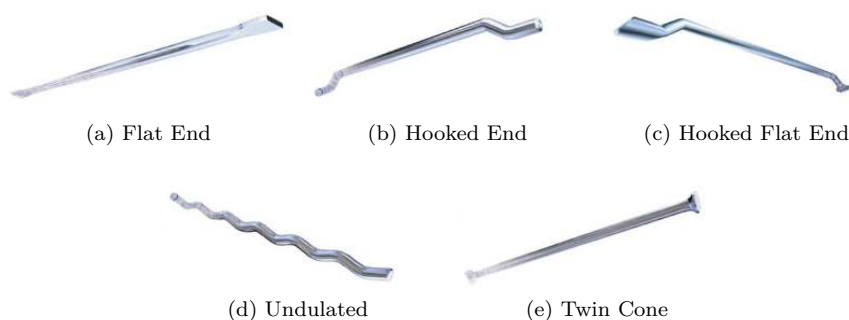
Altzairuzkoak moduko zuntz zurrunez, agregakin lodiak mugitzen dituzte material konposatuaren porositatea handituz, malguak aldiz, haien arteko hutsuneetara molda daitezke. Bestalde, zuntzak bezalako agregakin lerdin berri baten gehitzeak, hormigoiaren langarritasunaren murrizketa eragiten du. Matrizearen josteta efektuak, hormigoi gogortuan interesgarria, masa freskoan ere eragina du, nahiz eta neurri txikiagoan. Efektu hori indargabetzeko, agregakinen gehienezko tamaina murriztea gomendagarria da [Johnston (1996)]. 2.2 Irudiak, zuntzen banaketa eta orientazioaren hobekuntza azaltzen du agregakin lodi txikiagoak erabiltzean. Honela, hormigoitik bereizitako zuntzek bolak sortzeko aukerak murrizten dira, eskuarki *trikuak* deituak. Zuntz-pilaketa hauek ponpak blokeatzera hel daitezke eta are hormigoian hutsuneak sorrarazi. Trikuak zuntzak gehitzeko prozesuan sor daitezke elkarrekin trabatuz hormigoiarekin zuzen nahastera heldu aurretik edo nahasketa prozesuan zehar, hau luzeago baldin bada edo, hemen aipatu den bezala, materialen ezaugarriei lotutako beste arrazoiaren bat dela bitarteko. Superplastifikatzaileen erabilerak, portaera hori hobetzea laguntzen du. Erabili beharreko zuntz zenbatekoa sarri, egoera fresko eta gogortuko betekizunen arteko orekan oinarritzen da.

Hormigoi honen izendapena EHE-08 Instrukzioaren 14. Eranskinaren arabera, (2.1a) y (2.1b) adierazpenetan azaldu bezalakoa da.

$$T \sim R/f - R1 - R3/C/TM - TF/A \quad (2.1a)$$

$$T - D \sim G/f/C/TM/A \quad (2.1b)$$

Erabiltzen diren hizkiak, hormigoi arruntak izendatzeko ohikoak dira, T hizkiaren salbuespenarekin, zuntzez indarturiko hormigoi mota zehazten duelarik; HMF masa, HAF armatua eta HPF aurreatezatuarentzako. f hizkia aldiz, erabili beharreko zuntz motarekin erlazionatzen da, aukera dagoelarik altzairu (A), polimero (P) eta beirazkoak (V) erabiltzeko. $R1$ eta $R3$ -k flexotrakzio hondar erresistentzia adierazgarriak ($f_{R,1,k}$ y $f_{R,3,k}$) zehazten dituzte MPa-etan, eta TF -k zuntzaren gehienezko luzera mm-tan. Zuntzen egitura-ekarpina kontuan hartuko ez bada, ez dira flexotrakzio hondar erresistentzia adierazgarriak ($f-R1-R3$) zehaztuko eta eremua haien zereginaz ordezkatuko da, uzkurtze kontrola (CR), sute aurreko portaeraren hobekuntza (RF) edo beste



2.3 Irudia: Zuntz motak.

betebehar batzuk (O) izan daitezkeelarik. Harritzekoa da zuntzaren geometria zehaztu behar ez izatea, ezta diametro eta zenbatekoa, aurreragoa azalduko den bezala energia gehiago hartzeko ahalmenean betekizun garrantzitsua dutelarik (nahiz eta Baldintza Tekniko Partikularren Agirian agertu). Aukera dago dosifikazioa zehazteko ((2.1b) Ekuazioa), G hizkiaren bidez kg/m^3 -tan.

2.2.1 Zuntz motak

Material ezberdinetako zuntzak aurki daitezke, hala nola, altzairu, poli-propileno, poliester eta abarrekoak. Tesi honetan altzairuzko zuntzak erabili izan dira. Altzairuzko zuntzei dagokienez, hainbat dira fabrikazio prozesuak abiaburuko materialen arabera, hotzean luzatutako hari bidez, xafra moztuak, aterakin urtu, hotzeko konformazioz edo altzairu blokeetatik zerratuz (UNE-EN 14889-1). Zuntzen zeharkako ebakidura ondorioz, biribila, laukizuzena edo itxura irregularrekoak izan daitezke.

Diametro eta luzera askotariko aukera zabala dago merkatuan, baita halaber, altzairu kalitateak. Luzerak 20 eta 60 mm artean ibili ohi dira, diametroak 0.40 eta 1.30 mm artean eta kalitateak 900 eta 1900 MPa artean. Haien arteko geometriarik ohikoena 2.3 Irudian erakusten dira.

Itxura erlazio (l/d) izeneko zuntzaren ezaugarri nagusienetakoa da, l -k zuntzen luzera eta d -k diametroa adierazten dutelarik. Erlazio handiek *trikuak* sortzeko joera dute masaren barruan. Honek, zuzena ez den egikaritze eta indartzea adierazten du, homogeneoa ez den banaketa dela eta. Zuntz lerdenean erabilerak hortaz, arazo gehiago eragiten ditu [ACHE (1999)].

Zuntzak aske, zaku hidrosolubleetan edo sortaka kolatuak horni daitezke. Azpimarratu beharra dago, zaku eta kolatze material hauek hormigoia dardosifikazio ondo aztertuak alda edo honda ditzaketela, aire okludituaren edukia handituz, ur gehiago emanaz edo dosifikatutik zati bat xurgatuz. Nahasketa prozesuan zehar zuntzen gehitze erraztasunean datza zakuen abantaila. Zuntz kolatuek aldiz, itxura erlazio handiagoko zuntzak erabiltzea ahalbidetzen dute, trikuen sorrera saihestuz multzoak itxura erlazio bateratu txikiagoa baitu. Ezagun da, elkartze materialaren disoluzioa egiaztatu behar dela zuntzen banaketa egokia bermatzeko.

Zuntzek galbanizatze prozesua jasan dezakete edo altzairu herdoilgaitzetatik etorri. Eskuarki ez da zuntzak babestea beharrezkoa izaten, eskatzen duten estaldura txikia eta behin azaletik herdoildu direnean duten hedatze txikia dela

eta. Aldiz, estalketa edo material hauek erabiltzeak haien kostua nabarmenki handitzen du. Frogatua izan da gainera, zuntzen pasibazio ezegokiak hormigoia hantura sor dezakeela [Belleze et al (2004)].

2.2.2 AZIH-aren propietate mekanikoak

Zaila da hormigoi matrizean ausaz nahasten diren zuntz laburren indartzeak dakartzan abantailak kuantifikatzea. Hobekuntza hori, nagusiki, materialaren trakziopeko portaeran azaltzen da (2.6 Irudia), matrizea hautsita ere esfortzuak jasateko gai delarik, kargen transmisioa bermatzen duten zuntzek sortutako pitzadurak josi eta zubia egiten baitute. AZIH-aren erresistentzia ezaugarri buruzko informazioa eskuratzea ahalbidetzen duten entsegu normalizatu sorta zabala dago, zuzenak eta zeharkakoak.

- Konpresio erresistentzia

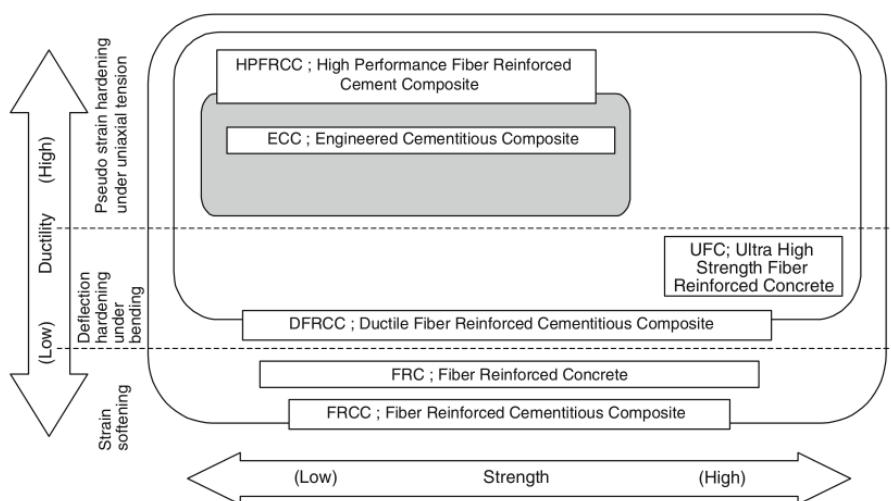
Hemen aztertzen den moduko zementu oinarritun materialak, konpresio esfortzuak jasateko ahalmen handia du, baina material hauskorra izaki, apurketa bat-batekoa da. Gaur artean egin diren ikerketek adierazten dutenez, zuntzak gehitzeak ez du material konposatuaren konpresio erresistentzia handitzen [Maidl (1995)]. Alabaina, har dezakeen hauste energia eta deformazio ahalmena handitzen dira zuntz bidezko indartzeari esker [König and Kützing (1999)]. UNE 83507 arauak AZIH laginen entsegu prozedura zehazten du.

- Trakzio erresistentzia

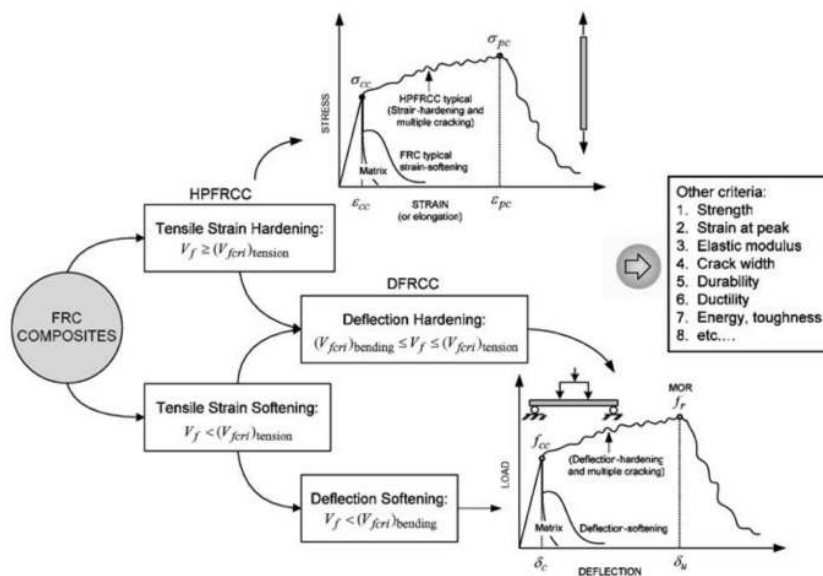
Arestian aipatu den bezala, hormigoi matrizearen barruan zuntzak indartze moduan sartzearen interesa, konposatuaren trakzio esfortzuekiko portaera hobetzean oinarritzen da. Konpresio entseguan gertatzen den legez, hormigoiak, material hauskorren gisara, harikortasunik gabeko apurketa agertzen du behin trakzio erresistentzia gainditu dela. Balio hau bere konpresio baliokidearekiko alderatuz oso txikia da, eskuarki gutxietsi egiten delarik.

Aurkez ditzakeen portaerak, erabilitako diseinu eta dosifikatutako zuntz kopuruaren arabera ezberdintzen dira (2.4 Irudia), zuntz zenbateko txikiez indartu diren hormigoi (FRC) edo betekizun handiko zuntzez indartu diren zementu konposatuen (HPFRCC) kasu, erresistentzia ultra-altuko zuntzez indarturiko hormigoietatik igaroz (UFC). Material hauetako bakoitza, erdietsi beharreko helburuen araberrako printzipio ezberdinetan oinarrituz diseinatzen da (2.4 Irudia). Material hauetako batzuek materialari halako harikortasuna ematea dute helburu, beste batzuek aldiz, haren iraunkortasuna hobetzera bideratzen dira edo erresistentzia goienak handitzera. Asmo horretarako mikropitzadura ugari sortzera jotzen dute, makropitzadura bakarria beharrean.

Era honetan, ZIH-etan tentsio galera izanik ere matrizearen pitzatze ostean, biguntze portaera deritzona, beste material konposatuek berriz, karga matrizearen trakzio erresistentziaz gaindi handitzea ahalbidetzen dute, materialari harikortasun handiagoa ekarriz bidenabar. 2.5 Irudiak zuntzez indartutako zementu konposatu ezberdinen tentsio-elongazio eta tentsio-deformazio erlazioak grafikoki erakusten ditu.



2.4 Irudia: ZIH-en sailkapen eskematikoa [Rokugo et al (2009)].



2.5 Irudia: ZIH-en sailkapen grafikoa [Naaman and Reinhardt (2006)].

Aipatu den materialaren trakzio erresistentzia, prozedura ezberdinen bidez neur daiteke. Hura ezaugarritzeko metodarik zuzenena trakzio uniaxial entsegua burutzean datza [Barr et al (2003a)] [Barragán (2002)]. Lagin zilindrikoak erabiltzen dira horretarako (15 cm-ko diametroa eta 30 cm-ko altuera) erdialdean hozkatuak perimetralki eta muturrak moztuak dituen horma-efektutik eratorritako fenomenoak saihesteko. Laginak entsegurako plateretan itsatsi egiten dira eta desplazamendu neurketa egiteko tresneria kokatzen da pitzaduraren irekidura zehazteko. Pitzadura hau hozkan sortuko da, hura baita multzoaren ebakidurarik ahulena.

UNE araudietan biltzen diren beste entsegu mota batzuk, balio hori zeharka zehaztea ahalbidetzen dute flexotrakzio entseguen bitartez (UNE 83509 eta UNE-EN 14651). Bi arauak entsegua burutzeko jarraitu beharreko prozeduran ezberdintzen dira. Lehenengoak hozkatu gabeko lagin prismatikoan karga ezarpen puntu bi, berme puntu bakoitzetik heren batera, erabiltzen dituen bitartean, bigarrenak hiru puntuko entsegua proposatzen du, karga piezaren erdian ezarriz, egin beharreko hozkaren bertikalean. Lehenengoak karga maximoa bakarrik aztertzen du, bigarrenak aldiz, karga zikloaren garapen osoa eta pitzadura irekidura (CMOD) aztertzen du, ondoren materialaren modelo eratzaila egokiago gertatzen delarik. Araudi ezberdinek irizpide ezberdinak erabiltzen dituzte flexotrakzio entseguei ekiterakoan, hiru edo lau puntuko konfigurazioetan oinarrituz.

Beste ikerketa batzuek bestalde, aurreko proposamenen artean, zuzenak edo zeharkakoak, oreka bilatzen dute, konplexutasuna gutxitu nahian material kantitate handiak erabili gabe, laginen tamaina murriztean. Haien artean, Brasildar entsegua eta arraildura entsegua aipatzekoak dira. Lehenengoaren konfigurazioa sinplea da, lagin zilindrikoak erabiltzen baititu konpresioa norabide erradialean ezarriz. Neurketa elementuek entseguan zehar hausten diren zirkuluerdi formako bi erdien desplazamendua zehaztea ahalbidetzen dute. Karga ezartzen den puntuetan konpresio esfortzuak kontzentratzen dira, trakzio tentsio konstantea agertuz gaineratiko laginean. Hala eta guztiz ere, matrizearen pitzaduraren ondoren makurdura esfortzuak azaltzen dira ezarritako kargaren eszentrikotasuna dela eta.

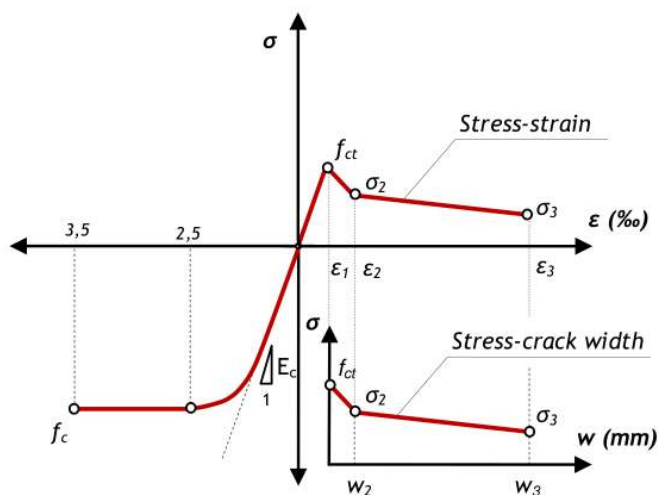
Antzeko beste prozedura batek, [Tschegg and Linsbauer (1986)]-ek garatua, arraildura bat sortzen du berariaz egindako lagin kubiko baten goiko aurpegian. Alabaina, bere erabilera ez da hedatu AZIH-aren trakzio erresistentzia zehazteko entsegu metodo gisa onartua izan dadin.

Bartzelona entseguak, puntzonaketa bikoitzeko entseguren [Molins et al (2009)] aldaera baten bitartez, trakzio erresistentzia balioesteko helburua du. Kasu honetan, laginaren albo bakoitzeko azalera txiki batean konpresio karga ezartzean datza. Horretara, ezarritako biela eta tirante modeloaren arabera, matrizea hausten duen barne trakzioa sortzen da. Entseguan zehar materialak hartzen duen energia, laginak dituen zuntz kopuru eta hauen norabideen arabera da [Mora (2008)] [Pujadas et al (2011)].

Badago diametro handiko panelengan entseguak egiteko aukera, [Bernard (2000)]-ek azaldu bezala (980 mm-ko diamentroraino) eta [Maturana (2013)]-k erabilia (2 metroko diametroaz). Espainiako lehenengo erabile-ra eraikuntza alorrean, LKS ingeniarietzako egoitza berriaren eraikinean gauzatu da, Arrasaten (Gipuzkoa), 0.3 metroko altuera eta 8 metroko luzera arteko lauza trinko bidezko forjatuak diseinatuz. AZIH-aren erresistentzia, delako panelen entseguren bitartez egiaztatuta da, erdian karga kontzentratua ezarriz eta sortutako haustura lerroak aztertuz.

- Ebakitzaile erresistentzia

Zuntzek esfortzu tangenzialen aurreko erresistentziaren hobekuntza mekanismoak ez dira guztiz aztertutak izan hainbat ikerketa egin arren [Sla-

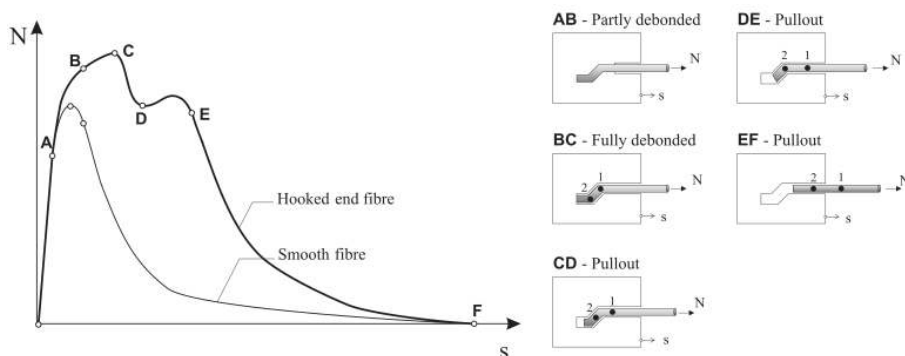


2.6 Irudia: AZIH-aren tentsio-elongazio $\sigma - \epsilon$ eta tentsio-pitzadura irekidura $\sigma - \omega$ diagramak [Laranjeira et al (2010)].

ter et al (2012)]. Erresistentzia ebakitzalearen gehikuntzarako zuntzen ekarpena, hondar erresistentziarekin era sinplifikatuan erlazionatua dagoela iritzi dio indarreko araudiak (EHE-08). Badira, hala ere, zuntzen indartzeak erresistentzia handitu egiten duela baieztatzen duten ikerketak, baina gehikuntza hori zuntzen norabidera baldintzatuta dago [Boulekbatche et al (2012)]. Indartze bakarra zuntz bidezkoa duten lauza trincoen puntzonaketaren aurreko portaera, arestian aipatu den panelen entseguaren bitartez egiazta daiteke [Michels et al (2012)].

Araudi eta instrukzio ezberdinek, entseguetan lortutako parametroetatik abiatuz, 2.6 Irudian azaltzen den bezalako lege eratzaileak erdiestean jartzen dute arreta. Trakzio zuzeneko entseguak intuitiboena ematen duen arren [van Mier and van Vliet (2002)], haren egikaritzeari datxekion zailtasunak orokorrean, balantza flexotrakzio entseguen alde makurrarazten du. Hauek alderantzizko analisia eskatzen dute, materialaren adierazgarria izango den tentsio-deformazio/pitzadura irekidura modelo baten transposizioa egiteko. [Kooiman (2000)]-ek hainbat irizpidetan oinarrituz, entsegu mota aukeratzeko adibidea ezartzen du. Bertan, konfigurazio, prestaketa eta egikaritzearen konplexutasuna eran haztatuan aztertzen da, entseguaren fidagarritasun, emaitzen prozesatze, onarpen, kostu eta errepikakortasunarekin batera, jarraian, entsegu Brasildarra errazena eta trakzio zuzeneko emaitzak era sinpleenean aztertzea ahalbidetzen duena izan arren, hiru puntuko flexotrakzio entsegua egokiena dela ondorioztatzen delarik.

Entseguetan lortutako balioetatik abiatuz, eta alderantziko analisiaren bitartez (2.2.3 Atala) orokorrean, materialaren lege eratzailea osatzen duten parametroak zehazten dira. Gogorarazi beharra dago, guztien dispertsioa handia dela. Aldi berean, laginaren tamaina, geometria eta mugalde-baldintzak aztertzen ari den elementuarenetara hurbildu behar dute. Materialak gara dezakeen trakzio erresistentzia ulertzeko abiapuntu gisa, banako zuntzen erauzte eta orientazioari dagokion portaeraren sarrera txikia aurkeztuko da jarraian. Ma-



2.7 Irudia: Karga-irristatze erlazioa erauzte entseguan zehar [Cunha (2010)].

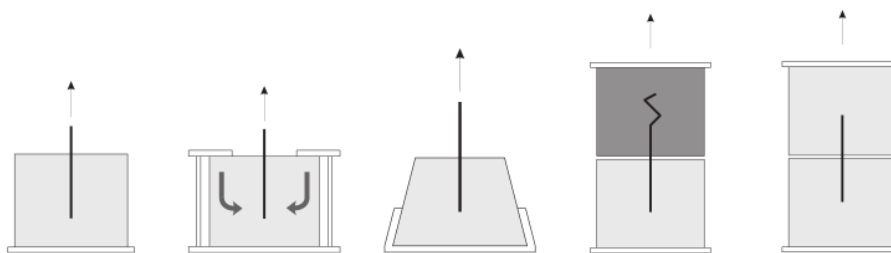
terialak aurkez ditzakeen propietate mekanikoen balizko gehikuntza, hurrengo ataletan garatzen diren ezaugarrien araberakoa da.

2.2.2.1 Erauzte aurkako portaera

Ikerketa ugari sakondu dute banako zuntzen erauzketaren analisisian, gertakari hori osatzen duten faseak zehazteko asmoz. Zuntzen erauzketa prozesuan parte hartzen duten mekanismoak, atxikidura, marruskadura, ainguraketa mekanikoa eta zuntzen korapilatzea dira [Naaman and Najm (1991)]. Zuntz eta matrizearen arteko atxikidura, matrize-zuntz faseartean trantsizio zonaldearen propietateen menpeko da hein handi batean. Mekanismo hau aktibatzen lehenengoa da, hormigoi eta altzairuak batera lan egiten dutelarik sorten diren trakzio esfortzuak jasateko. Horren hobekuntza lortzeko, interesgarri gertatzen dira ur/zementu erlazio laburrak [Wei et al (1986)] [Groth (2000)] dituzten eta trinkoagoak diren hormigoien erabilera. Hormigoi autotrinkotzaileak, adibidez, interesgarriak dira ikuspuntu horren arabera. Fasearteko trantsizio zonaldearen erresistentziaren gehikuntza, zuntzen apurketak mugatuko du erauzketak baino, kalterako izan daitezkeen emaitzak ager daitezkeelarik, elementuaren apurketan hartzen den energia txikiagoa kasu.

Karga gehikuntzak zuntz eta matrizea askatzea dakar, zuntza guztiz askatzen duen karga maximoaren baliora heldu arte. Orduan hurrengo mekanismoak hartzen du parte, marruskadurak, materialaren apurketa hauskorra ekiditen duelarik sortu den pitzadura handitu eta zuntza kanporantz irristatzen doan heinean. Gaur egun eraikuntzan erabiltzen diren zuntz motek geometria okerrak dituzte, materialak harikortasun handiagoa eta marruskadura hobea izatea laguntzen duen ainguraketa mekanikoa dutelako. Zuntzak hortaz, zuzena ez den bidetik irristatzen doazen heinean arteztu egiten dira, 2.7 Irudiak erakusten duen bezala. Azkenik eta zuntz eduki handietarako (bolumenaren $\approx 10\%$) [Homrich and Naaman. (1988)], zuntzak korapilatzea gerta liteke erauzketa erresistentzia handituz.

Materialaren ikuspuntutik portaeraren informazio handia dakar, baina egitura-ikuspuntutik ez da egokiena, AZIH-a den material konposatua bezala aztertua izan behar baita. Haustura plano batean, matrizean sortzen diren tentsioak gainjarri egiten dituzten hainbat zuntz topa litezke. Aldi berean, zuntzen orientazioak eragin aipagarria du, portaerak aztertu direnekin ez da-



2.8 Irudia: Eratzte entseguren konfigurazio motak [Cunha (2010)].

toz bat, zuntzean makurdura fenomenoak gertatu eta zuntz inklinatuen angelu kamutsean hormigoia ezkatatzen baitira. Ikerketa modeloak, entseguren analisia egiteko garatuz joan diren arren, emaitzak ez dira eskala handiko egitura-elementura estrapolagarriak.

Asko dira zuntzen eratzte modelo unibertsalak ezartzea zaildu egiten duten faktoreak. Horien artean, zuntz mota, haren orientazioa, matrizean sartutako luzera eta matrizearen berezko erresistentzia aipatzekoak dira. Entseguren konfigurazioak ere ugariak dira [Marković (2006)] [Grünewald (2004)] [Groth (2000)], nahiz eta metodo estandarrik ez dagoen asmo horretarako, ziurgabetasun handiagoa sortuz datuak erkatzerakoan.

2.2.2.2 Zuntzen orientazioa

Konpositearen propietate mekanikoen hobekuntza lortzeko, trakzio erresistentzia eta zailtasuna esaterako, eratzte portaera hobea erakusten duten zuntz motak erabiltzeaz gain, hauek egokiro lerrokatuak izan behar dute esfortzuaren norabidearekin nahikoa eraginkorrak izan daitezzen. Haustura plano batean, hura zeharkatzen duten baina eraginkorrak ez diren zuntzak are bereiz daitezke, hau da, apurketa-erresistentziarik ez dakartzatenak.

Zuntzen orientazioa hortaz, material konposatuaren ezaugarrien hobekuntzan alderdi giltzarrietako bat da. Trakzio esfortzuekiko zuntzen orientazioak, esfortzuen banaketa ahalbidetzen du ebakiduran zehar. Norabide hori alda dezaketen baldintzatzaileak aipatu beharra dago, hala nola, masaren mugimendua eta enkofratuak.

Banako zuntza aztertuz, inertzia efektu eta mugalde-baldintzen faltan, hau nahierara bira daiteke bere grabitate zentroarekiko eta espazioan edozein kokapen hartu. Zuntzen muturrek zuntzaren luzerako diametroa duen esfera baten azalera osatzen dute. Suposa daiteke zuntzen muturrak esfera horren edozein puntu izan daitezkeela probabilitate berdinarekin. Zuntzaren biraketa librea galaraziko duten zenbait mugalde-baldintza sartuz, kokatzea eragotziak dituen orientazio batzuk izango ditu zuntzak. Hau, adibidez, praktika errealean ezinbestekoak diren enkofratuen hurbiltasunean gertatzen da.

Kanpo azalaren hurbiltasunean, zuntzaren grabitate zentroa bere luzera erdia baino tarte txikiagoan kokatzen denean, azalera esferiko hori plano batek mugarriztatu eta ebakitzen du. Zuntzen kokapena handitu egiten da plano horrekiko paraleloak diren ardatzetan, ardatz normalaren kalterako. Elementu estuen kasuan edo zuntzak inguruko mugatik oso hurbil daudenean, zuntzak plano batean soilik bira dezake. Zirkulu bat osatzen da beraz zuntzen mutu-

rrekin, lehenago aipatu den esferaren orde. Hiru dimentsioko antolamendua, dimentsio bikora mugatzen da. Eta zeharkako norabideetako bat mugatuko balitz beste plano batekin, zuntzak norabide bakarrean lerroka litezke.

Hau da kasurik sinpleena eta horretatik hasita, zuntzen proiektzioak lor daitezke edozein ardatzetan. Zuntz multzoaren eraginkortasun horri [Rao (1979)], norabide faktorea deritzo. Norabide faktoreak zuntzen proiektzio ehunekoa adierazten du norabide zehatz batean, orokorrean, piezaren ardatz nagusiekiko hartzen dena. Parametro honek, zenbait egilek [Krenchel (1975)] behatu duten bezala, ebakidura baten zuntz kopuru osoa kalkulatzeko ahalbidetzen du. Argi dago, norabide faktorea norabide bakarreko kasuan 1 izan behar duela, beste kasuetan zuntzen proiektzioak integratu behar direlarik edozein inklinazio angelurentzako. Dimentsio biko kasuan orientazio guztiek probabilitate berdina duten arren, hiru dimentsiokoan ez da berdina gertatzen [Stroeve and Shah (1978)], ardatz batekiko inklinazio berdina duten zuntzek osatzen duten zirkulua handituz doalako angelua handitzen den heinean. Hau da, aukera gehiago dago zuntzak ardatz batekiko angelu handiekin topatzeko, ardatz horrekiko hobeto lerrotatuta daudenen aldean. Aztertzen den ardatzarekiko angelu berdina duten zuntzek osatzen dituzten azalera zilindriko diferentzialak integratuz ((2.2a) y (2.2b) Ekuazioak), dagokion norabide faktorea lortzen da, bi eta hiru dimentsioko kasuetarako hurrenez hurren.

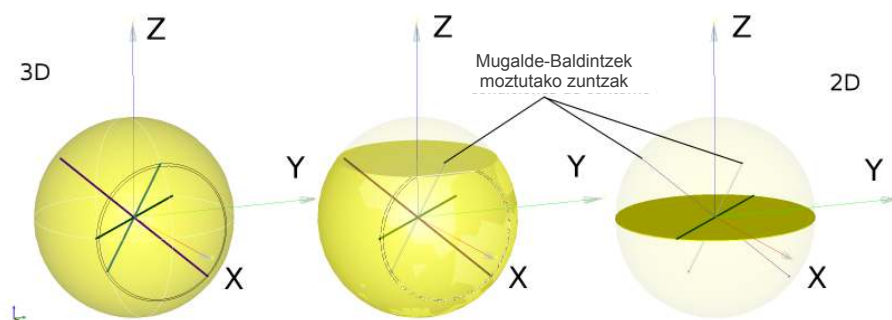
$$2D \rightarrow \nu_{\theta} = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \frac{\frac{l_f}{2} \cos(\theta)}{\pi \frac{l_f}{2}} d\theta = \frac{2}{\pi} \quad (2.2a)$$

$$3D \rightarrow \nu_{\theta} = \int_0^{\pi/2} \frac{\frac{\pi \cdot l_f^2}{2} \sin(\theta) \cos(\theta)}{2\pi \left(\frac{l_f}{2}\right)^2} d\theta = \frac{1}{2} \quad (2.2b)$$

Laburbilduz, hiru kasuetako norabide faktorea hurrengoa da: 1Dan 1, 2Dan $\pi/2$ eta 3Dan 0.50. Parametro adimentsionalak erabiltzen dira lortzen diren balioak zuntzaren luzerarekiko independente izan daitezen. Hala eta guztiz ere, erabat garrantzitsua da nabarmentzea lagin baten mugalde-baldintzak ez direla benetako egitura-elementuaren adierazgarri, baina bere zehaztapena sinple eta intuitiboa denez, ikertzaileek onartutako faktorea da. [Schölin (1988)]-ek egile ezberdinek eratorri dituzten norabide faktore ezberdinak biltzen ditu, hartu diren hipotesien arabera aurki daitezken balio ezberdintasunak nabarmenduz.

Enkofratuek ezartzen dituzten mugalde-baldintzez gain, masaren barnean zuntzen orientazioa aldatzen duten hainbat alderdi daude. Batetik, masa freskoari trinkotzeko ezartzen zaion dardaratzeak garrantzi aipagarria du [Edgington and Hannant (1972)] [Gettu et al (2005)]. Dardara motak, kanpotik mahai bibragailu bitartez edo barneko orratz bidez, zuntzen hasiera bateko norabidea aldatzen du era ezberdinean. Elementu aurrefabrikatuentzako, dardaratzearen kontrola errazagoa eta errepikakorra izan daiteke, in-situ egindako hormigoietan baino. Kasu honetan, langilearen trebezia oso kontutan hartzeko faktorea da.

Langilearen eragina saihestea ahalbidetzen duen beste aukera batek, dardaratzea alde batera uzten du hormigoitari propietate autotrinkotzaileak ematen dizkion dosifikazio optimizatuari esker. Hormigoia hauek haien berezko pisuaren ondorioz trinkotzeko propietatea dute. Oso jariakorrak gertatzen dira isurpen-tentsio txikiak eta biskositate handiagoak, duen zatiki finaren ehuneko



2.9 Irudia: Zuntzen biraketaren mugaketa 3Dtik 2Dra.

handiagoa dela eta. Halere, beste baldintzatzaille batzuk ezartzen dira, masaren egoera freskoko propietateetatik eratorriak. Hurrengo ataletan, alderdi bi horietan sakonduko da.

Hormigoi masaren barruko zuntzen banaketa eta norabidea zehazteko metodori zuzenena, mozketa bidez laginak eraztean datza. Moztutako aurpegi azterketatik ikerketa parametroak balioesten dira. Metodo estereologikoak aurretiaz frogatuak izan dira zenbait ikerketetan [Redon et al (1999)]. Jarraian, lagin hauek birrindu egiten dira zuntz guztiak atera arte, iman batez lagundu daitekeelarik (UNE-EN 14721). Ondoren, pisatu egiten dira eta metro kubiko bakoitzeko altzairu zenbatekoa zehazten da.

Zenbait egilek [Laranjeira et al (2011)] nabarmentzen dute norabide faktorea ez dela egokiena hainbat inklinazio angelu dituzten zuntz ezberdinen egitura-portaera zehazteko, apurketa entseguen emaitzen dispersioa altua delarik. Aldi berean, zuntzen orientazio profila proposatzen du ekoizpen, obrarazte eta enkofratuaren geometriarekin erlazionatuak dauden hainbat faktoreren menpe.

2.2.3 Modelo Eratzaileak

Materialarentzako entsegu arauak daudelarik ere, herrialde ezberdinetako araudiak ez datoz bat zenbait alderditan eta ez dago materialaren lege eratzaille bakarra onartzeko konpromisorik. Materialaren portaeran eragina duten parametro ugarien ondorio da hori. AZIH egiturak diseinatzeko ezinbestekoa da, elementu mekanikoen propietateak kalkulatzeko ahalbidetuko duten kalkuluoinarriak izatea.

Materialaren trakzio portaera zehazteko orduan hainbat irizpide daude, baina guztien artean ohikoena, modelo jarraitu ez diferentziagarriak dira tarte osoan, alderantzizko prozedura bitartez materialen entseguetatik diseinatuak. 2.10 Irudiak, era laburrean laburbiltzen ditu hainbat dokumentu tekniko eta instrukzioetan biltzen diren modeloak. Materialaren portaera era fidagarrian ezagutzera ematen duten metodo sinpleen bilaketan, maila mikroskopikoko ikerketek, hausturaren mekanikan oinarrituak, ikerketa makroskopikoei bide eman diete, elementuaren mailan. Tarteko aukera mesoeskala mailan datza, [van Mier and van Vliet (2002)], materiala partikula mailan aztertu, AZIH-aren kasuan zuntzen kopuru eta orientazioan oinarri daitekeena. Berdina gertatzen da analisi zuzenarekin, hormigoia osatzen duten materialen propietateetan [La-

Diagram	Parameters	Test configuration	Ref.
	$\sigma_1 = f_{ct,Rd} = 0,33 f_{R,3,d}$ $\epsilon_1 = \epsilon_u = [20\% \text{ bending}; 10\% \text{ tension}]$	3-point bending test UNE EN 14651 	EHE
	$\sigma_1 = f_{Fu} = f_{eq} / 3$ $\epsilon_1 = \epsilon_u = [20\% \text{ softening}; 10\% \text{ hardening}]$	4-point bending test UNI 11039 	CNR-DT 204
	$\sigma_1 = f_{eq,ctd,II} = f_{eq,ctk,II} \cdot \alpha_c^f \cdot \alpha_{sys} / \gamma_{ct}^f \leq f_{eq,ctd,I}$ $\epsilon_1 = \epsilon_u = 10\%$	4-point bending test NBN B 15-238 	DBV
	$\sigma_1 = f_{eq,ctd,I} = f_{eq,ctk,I} \cdot \alpha_c^f \cdot \alpha_{sys} / \gamma_{ct}^f$ $\sigma_2 = f_{eq,ctd,II} = f_{eq,ctk,II} \cdot \alpha_c^f \cdot \alpha_{sys} / \gamma_{ct}^f \leq f_{eq,ctd,I}$ $\epsilon_2 = \epsilon_u = 10\%$	4-point bending test NBN B 15-238 	DBV
	$\sigma_1 = f_{Rts} = 0,45 f_{eqI}$ $\sigma_2 = f_{Fu} = k [f_{Rts} - (W_u / W_{I2}) (f_{Rts} - 0,5 f_{eq2} + 0,2 f_{eq1})]$ $k = [0,7 \text{ pure tension}; 1 \text{ remaining cases}]$ $\epsilon_2 = \epsilon_u = [20\% \text{ softening}; 10\% \text{ hardening}]$	4-point bending test UNI 11039 	CNR-DT 204
	$\sigma_1 = f_{ctd}^f = \alpha_c^f \cdot f_{ctk,II} / \gamma_{ct}^f$ $\sigma_2 = f_{eq,ctd,I} = f_{eq,ctk,I} \cdot \alpha_c^f \cdot \alpha_{sys} / \gamma_{ct}^f$ $\sigma_3 = f_{eq,ctd,II} = f_{eq,ctk,II} \cdot \alpha_c^f \cdot \alpha_{sys} / \gamma_{ct}^f \leq f_{eq,ctd,I}$ $\epsilon_1 = \sigma_1 / E_{HRE}$ $\epsilon_2 = \epsilon_1 + 0,1\%$ $\epsilon_3 = \epsilon_u = 10\%$	4-point bending test NBN B 15-238 	DBV
	$\sigma_1 = 0,7 f_{ctm,fl} (1,6-d)$ $\sigma_2 = 0,45 \cdot K_N \cdot f_{R,1}$ $\sigma_3 = 0,37 \cdot K_N \cdot f_{R,4}$ $\epsilon_1 = \sigma_1 / E_{HRE}$ $\epsilon_2 = \epsilon_1 + 0,1\%$ $\epsilon_3 = \epsilon_u = 25\%$	3-point bending test RILEM TEST 	RILEM
	$\sigma_1 = f_{ct,d} = 0,6 f_{ct,fl,d}$ $\sigma_2 = f_{ctR1,d} = 0,45 f_{R,1,d}$ $\sigma_3 = f_{ctR3,d} = k_1 (0,5 f_{R,3,d} - 0,2 f_{R,1,d})$ $\epsilon_2 = 0,1 + 1000 \cdot f_{ct,d} / E_{c,0}$ $\epsilon_3 = 2,5 / l_{cs}$ (l_{cs} : critical length) $\epsilon_u = [20\% \text{ bending}; 10\% \text{ tension}]$	3-point bending test UNE EN 14651 	EHE

* The constitutive model from the FIB Model Code (2007) is equivalent to the Italian Standard (CNR-DT-204).

2.10 Irudia: AZIH-aren modelo eratazaileak [Blanco Álvarez et al (2010)].

ranjeira (2011)], aurretiazko entseguetan beharrean. Orokorrean modelo hauek zuntz zenbateko txikiekin indartuak diren hormigoiak erakusten dituzte, pitzadura ondoko biguntze portaera eragiten dutenak. Material harikorragoak dira hortaz, baina ez dute jatorrizko materialaren trakzio erresistentzia handitzen. Gaur eguneko joerak, ezaugarri altuko zuntzez indarturiko hormigoiak

diseinatuz, modeloak egokitzea eskatzen du. Jarraian, ohiko diseinu modeloak aipatzen dira.

- **Tentsio-deformazioa ($\sigma - \epsilon$):**

EHE-08ko 14. Eranskinean eta UNE-EN 14651 arauan ezarritakoaren arabera, Proporzionaltasun muga (F_L) eta 0.5 eta 2.5 mm-ko pitzadura irekiereri dagozkien hondar erresistentzien ($f_{R,1}$ eta $f_{R,3}$) arabera zehazten da. Hiru balio hauetako lehenengotik, flexotrakzio erresistentzia ($f_{ct,fl}$) lortzen da. Zuntzen ekarpena egitura-kalkuluan aintzat har dadin, flexotrakzio hondar erresistentziek $f_{R,1,k}$ eta $f_{R,3,k}$ proporzionaltasun mugaren %40 eta %20 gainditzea bete behar da, hurrenez hurren. Instrukzioak bi diagrama ezartzen ditu, bata laukizuzena eta sinplifikatua, bestea multilineala eta errealtatera hobeto egokitua (2.10 Irudia). Lehenengoak parametro bakarra erabiltzen du bere zehaztapenerako, bigarrenak aldiz, gehiago erabiltzen ditu materialaren portaera hobeto doitzeko.

Materialaren lege eratzaileren ezberdinen arteko alderik nagusia, erreferentzia entseguaren zehaztapenean datza (hiru [Barr et al (2003b)] edo lau [CNR-DT 200/2004 (2008)] [DBV-Stahlfaserbeton (2001)] puntuko flexotrakzio entsegua) eta entsegu horien emaitza eta datu ugarien arteko modeloen datu esanguratsuak zehazteko irizpideen ezberdintasuna (hondar erresistentziak, erresistentzia balioak, etab.). Guzti horiek, hala ere, erlazio jarraitu eta ez diferentziagarriak zehazten dituzte tarte guztian. Puntu gehiago eskatzen dituzten modeloak konplexuagoak dira, baina materialaren benetako portaeratik hurbilago daude.

- **Tentsioa-pitzadura irekidura ($\sigma - \omega$):**

Metodo hau, [Hillerborg et al (1976)]-ek ezarritako modeloan oinarritzen da, Itxurazko Pitzaduraren Modeloa (FCM) deritzona. Teoria honen arabera, esfortzuak pitzaduran zehar transmititu daitezke agregakinen kateatzeari esker eta pitzadura josten duten zuntzen bitartez, behin kateatze hori ahuldu egin denean. Karga gehikuntzek pitzaduraren irekidura eta sakonera handitzen dute, aztertutako prozesu-zonaldea zabalduz.

Modelo honek era berean, erlazio lineala ezartzen du tentsio-deformazio diagrama baten arabera matrizearen hausturaren eta pitzaduraren sorreraren aurreko zonaldean. Ondoren erlazioa, kohesio zonaldea deritzonarako ezartzen da pitzadura kritikoaren irekiduraraino eraginkorra dena. Luzera hori, zuntzen apurketa edo erauzketa eragiten duena da.

Metodo honetatik abiatuz hainbat ikerketek modeloak diseinatzeko bideak planteatu dituzte. Nagusienetako bat [Li et al (1993)]-ek ezarritako modelo mikromekanikoan oinarritzen da. Garatzen den modelo erdi analitikoak hartzen dituen faktoreen artean, hormigoia karga galea kurba, karga transmititzeko zuntzen ekarpena (matrize eta zuntzen marruskadura tentsioaren menpeko) eta zuntzek sorrarazten duten erreteztua, matritzetik guztiz askatu bitartean, daude.

Modelo zuzen hau oso konplexua izaki, zenbait alderantzizko hurbilketa ezarri izan dira [Stang et al (1995)] [Wolinski et al (1987)] [Roelfstra and Wittmann (1986)], sisteman askatasun gradu ezberdinak eranstean

dituztenak. Gero eta askatasun gradu gehiago, parametro gehiago ezarri behar dira, baina aldi berean, errealagoa gertatzen da modelizazioa.

2.10 Irudian azaltzen den bezala, hurbileko herrialdeetako Instrukzioek, salbuespenak salbu, tentsio-deformazio modeloari heltzen diote. Modelo hau interesgarria gertatzen da diagrama berdinen barruan materialaren portaera osoa adieraz baitaiteke, bai trakzioan zein konpresioan. Aldi berean, gainontzeko egitura-materialen lege eratzailleekiko parekagarria gertatzen da. Hala ere, modeloaren giltzarri diren tentsio eta elongazio parametroak kalkulatzeko irizpideak, aurretiazko entseguetan oinarrituak, ez dira garbiak gertatzen.

Bestalde tentsio-pitzadura irekidura erlazioa, AZIH bezalako materialaren izaerarekin bat datorrela iritzi da, hautsita ere esfortzuak eusten jarraitzen baitu. Azaldutako modelo mikromekanikoa interes handikoa da zientziarikuspuntutik. Materialaren portaera hausturaren mekanikan oinarrituz aztertzen da, baina hori dela eta, konplexua da proiektugileek kuantifikazio zaila duten parametro kopurua handia diseinu sistematikoetan ezartzea. Planteatu diren bakuntzeak izaera praktikoa dakarkite modeloari, baina materialaren portaeraz informazio garrantzitsua galtzen da [Kooiman (2000)].

Oso zaila da materialaren portaera modelo hauetan oinarrituz aurreikustea. Aldagai fisiko askok eragiten dute haren ezaugarrietan, hala nola materialen erresistentzia edo zuntzen luzera eta diametroa, baina horretaz gain nahasketa, garraioa, obraratzea, dardaratzea, elementuaren tamaina, mugalde-baldintzak, kargen iraupena edo erabiltzen diren segurtasun koefiziente ezberdinek ere, espero diren emaitzetan ezberdintasunak sorrarazten dituzte.

[Barragán (2002)]-ek salbu, matrizearen pitadura osteko tentsio galaren ondoren euste ahalmenean gehikuntza arina sartzen duena, hondar erresistentzietan dagokienez, modelo gehienek gainbehera konstantea erakusten dute punta-ostean. Materialaren lege eratzaillea osatzeko hiru edo sei aldagai erabiltzeak, zentzu fisikorik izan ez arren, biguntze konstante edo hobetuzko portaera azaltzea ahalbidetzen du.

2.2.4 Kalitate kontrola

AZIH-z egindako egituren kalitate kontrola egitea konplexua gertatzen da, elementuaren barnean zuntzen banaketa eta orientazioa bistaratzeko ezintasunaren ondorioz. Metodo ugari garatu dira gutxi gorabehera aztertzea ahalbidetzen dutenak. Hauek ezberdinak dira erabiltzen den teknika edo neurtzen diren parametroen arabera. Metodo hauek zuzen edo zeharkako eta suntziztaile edo ez suntziztaile gisa sailka daitezke.

Lehentasuna egitura-segurtasuna bermatzea denez, ohikoa da hormigoia erresistentzia zehazteko baliatuko diren apurketa entseguak burutzea. Zuntzak gehitzeak ez omen du konpresio erresistentzian gehikuntza nabarmenik eragiten [Bencardino et al (2008)]. Flexotrakzio entseguak, bere aldaera guztiekin (hiru puntuko entsegua, lau puntuko entsegua, etab.), materialaren portaera ezaugarritzeko sarrera datuak diren hondar erresistentziak zehaztea ahalbidetzen du, hautatu den modelo eratzaillearen arabera. Neurri handiko elementu batean ezaugarritze hori burutzeko zailtasunak, elementu errearen adierazgarri ez diren paraleloki hormigoitutako laginekin batera, teknika berrien garapena eskatzen dute.

Teknikok, masan zehar zuntzen antolaketa eta orientazioa zehaztea ahalbidetzen duten zeharkako metodo ez suntsitzaileen erabilpena sustatzen dute. Zuntzen zenbatekoa, hartzen duten norabidearen arabera, materialaren trakzio erresistentziaren proportzionala izanik, dagokion korrelazioa ezarri daitekeela iritzi da.

- Zuntzen erauzketa

Aurkeztuen arteko metodorik zuzenena, zuntzak masatik erauztean oinarritzen da, haien pisatzeari ekiteko eta jarritako zuntz zenbatekoa balioesteko [Soroushian and Lee (1990)] [Kooiman (2000)]. Prozedura hau masa freskoan zein hormigoi gogortuan jarrai daiteke, UNE-EN 14721 arauaren arabera. Pasta garbituz lehenengo kasuan eta laginak birrinduz bigarrenan, zuntzak hormigoiarekiko banatzea eta erauztea ahalbidetzen da, eskuz edo iman baten laguntzaz. Zuntzen zenbatekoa, haien pisu eta aztertutako hormigoi bolumenaren arteko zatiketaz lortzen da. Orientazioa zehaztea ezinezkoa suertatzen da metodo honen bitartez. Gainera masa freskoaren azterketak, erabiliko den egikaritze prozedurak zuntzen antolamenduan eragiten duen aldakortasuna ikertzea eragozten du.

- Metodo estereologikoak

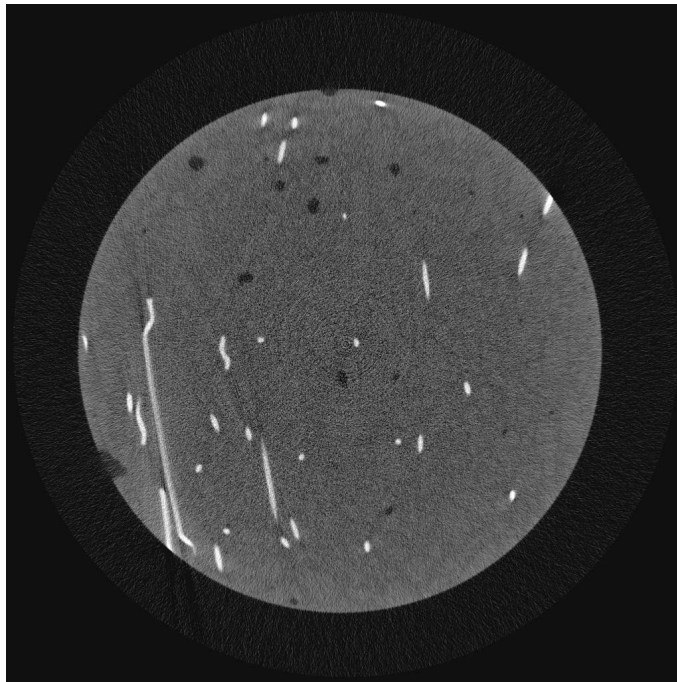
Metodo estereologikoen oinarriek [Stroeven (2009)], hormigoi piezaren barruko zuntzen zenbateko eta orientazioa zehazteko aukera ezartzen dute ebakidura lauen azterketan oinarrituz. Orokorrean, ebakidura hauek laginak mozterakoan sortzen diren aurpegiak dira, zenbait ikerketek elementuari egindako X izpi bidezko irudiak erabiltzen dituzten arren [Stroeven and Shah (1978)] [Robins et al (2003)] [Vandewalle et al (2008)]. Ondorengo ikerketetan, materialaren egitura-portaerarekin erlazionatzeko, erabiltzen den norabide faktore kontzeptua ezartzen duen metodo interesgarria da. Ezaugarri altuko hormigoiak garatzeko diametro txikiko zuntz zenbateko handien erabilerak, berez neketsua den entsegu prozedura motel dezake. Arazo horiek saihesteko, [Mlekusch (1999)]-ek aipatzen dituen irudi digitalen analisi tresnak erabil litezke.

- Tomografía Axial Computerizada

Beste aukerako teknika bat X izpi bidezko irudietan oinarritutako berrosatzean datza, Ardatz-Tomografia Konputerizatua (TAC) deritzona [Stähli et al (2008)] [Farhat et al (2007)] eta azterketa klinikoetan oso hedatua. Laginaren luzeran zehar lodiera txikiko ebakiduretan behin eta berriz hartutako irudien azterketan oinarritzen da. Irudi lau horien ondorengo prozesatze lanak, multzoaren hiru dimentsioko berrosatzea ahalbidetzen du (2.11 Irudia), laginaren edukia fidagarritasun osoz erakutsiz. Hala eta guztiz ere, haren kostu handiak eta neurri handiko elementuetan ezin erabiltzeak, kontrol teknika gisa bere erabilera mugatzen dute.

- Metodo magnetikoak

[Torrents et al (2012)] eta [Ferrara et al (2012)]-ek proposatutako metodo induktiboek AZIH-ko azalera-elementu eta lagin kubikoetan zuntzen zenbateko eta orientazioa aztertzea ahalbidetzen dute. Teknika sinplea da eta ez du konfigurazio konplexurik behar, ezta pieza eta tresneriaren arteko ahokatzeari. Hormigoian zehar eremu magnetikoa igaroaraztean eta



2.11 Irudia: AZIH laginaren TAC-a.

gertatzen den induktantziaren aldaketa neurtzean datza prozedura. Gero eta aldaketa handiagoa izan, handiagoa izango da ere zuntzen zenbatekoa, hauek eremu magnetikoa aldatzen baitute hormigoia “ikusezina” delarik.

- Korrontze aldizkatzaileko inpedantzia-espektroskopia (AC-IS)
AC-IS teknika alderdi askotan erabili liteke, hala nola hormigoia-aren osagaien hidratazioaren garapenean, poroen egitura, pitzatzea edo kloruro ioiaren difusibitatean [Ozyurt et al (2006a)]. Baina bere erabilerak AZIH-ko egitura-elementuen zuntzen orientazioa monitorizatzea ahalbidetzen du [Ozyurt et al (2006b)] [Ferrara et al (2008)]. Etorkizun handiko teknika dirudi, baina entseguaren konfigurazioa zuntz eta elementu tamaina bakoitzarentzako doitu beharra dago.
- Erresistibitate elektrikoa
Erresistibitate elektrikoa zenbait norabideetan aztertzeak, AZIH-ko elementuetako zuntzen orientazioa hautematea ahalbidetzen du [Lataste et al (2008)]. Elektrodoen ukipena, hauen intentsitate elektriko zuzenena estimulatzea ahalbidetzen duen elektrolito baten erabileraz hobetzen da. Beste elektrodo batzuk seinalea jasotzeaz arduratzen dira, emaitzak lortu ahal izateko prozesatzen dena. Islatze beste tekniken gisan, sentiberatasuna nabarmenki murrizten da elementuaren lodierarekin.
- Transmisio lerro ardazkidea zirkuitu irekian
Zirkuitu irekian amaitzen den transmisio lerro ardazkidean mikrouhin elektromagnetikoen islapenen neurketak [Van Damme et al (2004)], irekitako sentore ardazkideak aurretiaz igorritako uhin baten oinarrituz

aztertzen du islatutako uhina. Gaurdaino egin diren ikerketetan erabili diren sentsoreek, uhinaren sartzea mugatua dute haien berezko dimentsioen arabera. Hori dela eta, teknika honek aztertu beharreko elementuaren gainazaleko informazioa besterik ez du eskaintzen.

- Uhin gidari antenak

Uhin gidarien antenen bidez, AZIH bezalako ingurune bat zeharkatzean igorritako seinaleak duen aldaketa aztertzen da [Roqueta et al (2010)]. Konposatuaren propietate dielektrikoak hezetasuna, azterketa frekuentzia eta, batez ere, zuntz zenbatekoaren arabera ezberdinak dira. Azken hauek, azterketa inguruneari permitibitate aldakorra dakarkio. Nahiz eta oraindik zenbait muga erakutsi, elementuaren lodieran zehar antena igorle eta hargailuak alde banatan jarritz, egitura igorritako mikrouhinen bitartez aztertzeko gai den teknika interesgarria dirudi. Zuntz zenbateko ezberdina duten zonaldeak bereiz daitezke, baina haien orientazioa balioesteko datu nahikoren gabezia du.

Laburbilduz, ezaugarritu beharreko materialaren propietate elektriko eta magnetikoen analisiak, kontrol teknika berrien erabilera baimentzen du. Argi dago, metodo hauetako batzuk erabilgarri edo egokiagoak direla hormigoien indartzea zuntz ferromagnetikoen bitartez egiten denean, altzairuzkoen kasu. Uhin edo seinaleen aurreko erantzunak halako kontrastea behar du eta ezberdintasun hori nabarmenagoa da zuntz metaliko eta hormigoien artean. Guztiak berriak dira, era orokorrean ZIH-en inguruko ikerketen gorakada dela eta. Azpimarratu beharra dago metodo magnetikoen sarrera, egile honen ezagueran behintzat, bi ikerketa talde ezberdinek paraleloki ireki duten, baina berdina ez den, lerroa. Zenbait egilek [Pujadas et al (2011)], 150 mm-ko aldea duten lagin kubikoetan zuntzen zenbateko eta orientazioa zehazteko metodoaren egokitasuna frogatu dute. Beste batzuek [Faifer et al (2011)], antzeko teknika garatu dute lodiera txikiko lauzetan orientazio nagusiak antzemateko. Bi lerroen konbinaketak jarraitu beharreko bidea dirudi Doktore Tesi honetan azaldutako kasuak bezalakoentzako, azalera eta lodiera handiak erabiltzen baitira.

2.3 HATaren ezaugarriak

Hormigoi Autotrunkotzailea (HAT) Japonian garatu zen 1980ko hamarkadaren amaiera aldera [Self-Compacting Concrete European Project Group (2005)]. Jariakortasun handia eta enkofratua bete eta bere berezko pisuaren ondorioz trinkotzeko ahalmena duen hormigoia da. Guzti hori, nahi ez den masaren blokeoa gertatu gabe zonalde armatuak igarotzerakoan. Hormigoizko egituren iraunkortasuna hobetzeko interesean du jatorria, trinkotze egokia egingo zuen eskulan trebatua behar baitzen horretarako [Okamura and Ouchi (2003)]. HAT-aren lehenengo prototipoa Japonian diseinatu zen 1980an [Ozawa et al (1989)]. Bere erabilera ezberdina da herrialdearen arabera. Europan, iparraldeko herrialdeen bitartez sartu zen, Suedian HAT erabiliz osorik eraiki zen lehenengo zubia bezala, Japonetik kanpo egiten zen lehenengotzat hartzen dena [Billberg (1999)]. Hasiera batean, Ezaugarri Handiko Hormigoia deitua izan zen, ikerketa paralelo batzuek izendapena berdina erabili zuten arte ur/zementu txikiko iraunkortasun handiko hormigoientzako [Gagne and Pigeon

Mota	UNE 83.361-aren arabera
AC-E1	$550 \text{ mm} \leq D_f \leq 650 \text{ mm}$
AC-E2	$650 \text{ mm} < D_f \leq 750 \text{ mm}$
AC-E3	$750 \text{ mm} < D_f \leq 850 \text{ mm}$

2.1 Taula: Isurpen motak.

Mota	UNE 83.361-aren arabera	UNE 83.364-aren arabera
AC-V1	$2.5 \text{ s} \leq T_{50} \leq 8 \text{ s}$	$10 \text{ s} \leq T_v \leq 20 \text{ s}$
AC-V2	$2 \text{ s} < T_{50} < 8 \text{ s}$	$6 \text{ s} \leq T_v \leq 10 \text{ s}$
AC-V3	$T_{50} \leq 2 \text{ s}$	$4 \text{ s} \leq T_v \leq 6 \text{ s}$

2.2 Taula: Biskositate motak.

Mota	Eskakizuna	UNE 83.362 -aren arabera	UNE 83.363 -aren arabera
AC-RB1	TM > 20 mm edo 80 mm < tartea < 100 mm	$d_{Jf} \geq D_f - 50 \text{ mm}$ (12 barrako eraztuna)	≥ 0.80 (barra 2)
AC-RB2	TM \leq 20 mm edo 60 mm < tartea < 80 mm	$d_{Jf} \geq D_f - 50 \text{ mm}$ (20 barrako eraztuna)	≥ 0.80 (3 barra)

2.3 Taula: Blokeo erresistentzia motak.

(1990)]. Gaur egun, hormigoi mota hau ezagunagoa da bere autotrinkotasun propietateen arabera. Hormigoi hauen garapena, sektore kimikoaren ikerketei lotua etorri da, jarduera handiko ur-murriztaile gehigarri berrien arloan sakondu baitu partikulen flokulazioa murrizteko asmoz, zementua dispersatuz.

Hormigoi hauen nabarmentasuna egoera freskoan betetzen dituen baldintza batzuei zor zaio. Hormigoiak, enkofratua betetzeko gai izan behar du akabera maila altuaz eta kanpoko laguntzarik gabe, ezaugarri honi betetze ahalmena deritzolarik. Aldi berean, egitura-elementuan dagoen indartze armatuaren arretik igaroarazi egiten da, tamaina handieneko agregakinen blokeoa gertatu gabe, igarotze ahalmena izanik propietate hori. Eta bete beharreko hirugarren propietatea segregazioaren erresistentzian datza, mugimenduan zehar eta behin geldirik dagoela konposaketaren homogeneitatea bermatuz. Indarrean dagoen EHE-ko 17. Eranskinaren arabera, hormigoi hauen izendapena, hormigoi arruntan antzekoa da, jariakortasun handiagoa trinkotasunaren eremuan zehaztuz (2.3a Ekuazioa). Era osagarrian, posible da eskatutako propietateen maila zehaztea (2.3b Ekuazioa). Azken kasu honetan, motak 2.1, 2.2 eta 2.3 Taulen arabera zehaztuko dira.

$$T - R/AC/TM/A \quad (2.3a)$$

$$T - R/(AC - E + AC - V + AC - RB)/TM/A \quad (2.3b)$$

Hormigoiaren teknologia berri honek, hormigoiaren dardaratze fasea ekidin dezake, are hormigoiaren kalitatea hobetuz, konplexuago eta landuagoa den dosifikaziori esker. Onura horiez gain, alderdi ekonomiko (eskulan murrizpe-

na), denborazko (epeen murrizketa), ingurumen (obrako zaraten murrizketa) eta laneko segurtasun eta osasunean (hatz zuriaren sindromea) hobekuntzak ekar ditzake. Hormigoi horiei ematen zaizkien jariakortasun handiek eragin ditzaketen segregazioak indargabetzeko, masako osagai guztien arteko kohesio handia beharrezkoa da. Aipatu diren abantailez gain, egitura-ikuspuntutik ere interes handia hartzen du bere mikroegitura hobetu egiten baita [Skarendahl (2003)].

Zementua hidratatzen den heinean, HAT-aren propietate erreologikoak aldatuz doaz jariakortasuna galduz. Hasierako jariakortasun handiagonek, bultzada handiagok eragiten ditu enkofratuetan. HAT material tixotropikotzat hartzen da, ekuru egonik egitura berrosatzen duena, baina energia ekarpenak bere jariakortasun ahalmena aktibatze ahalbidetzen duena.

Zuntzek agregakin bat gehiago osatzen dute, itxura erlazio handiaz legar eta harearen formarekiko ezberdina dena. Zuntzak hormigoi matrizean gehitzeak, bere langarritasuna nabarmenki murriztea dakar, bere autotrinkotasuna nekezago bihurtuz.

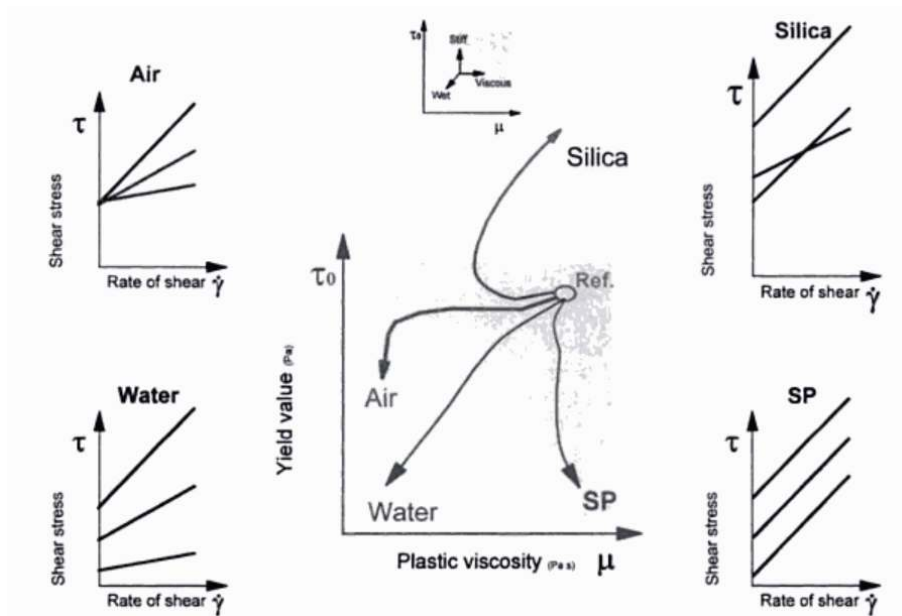
2.3.1 Diseinu metodoak

Eskualde bakoitzak berezko diseinu metodoak garatu ditu, enpirikoak orokorrean, jariakortasun handiko propietateak dituzten hormigoiak dosifikatzeko, baina arestian aipatu diren baldintzak betez. Abiapuntu bezala, HAT-ak diseinatzeko hormigoi arruntetan ohikoak diren lehengaiak erabil daitezke. Nahiz eta, adibidez, egokiagoa den errekarri biribildua birrindutako agregakinak baino, jarioari erresistentzia gutxiago eskaintzen baitiote. Guztien oinarria ale eskeletoaren optimizazioan datza, matrizeko agregakinen arteko hutsuneak murrizteko. Horretarako, ohikoena agregakin lodiarren zenbatekoa eta tamaina murriztea da. Aldi berean, partikula finen kantitatea handia behar da, zementu, filler edo errauts hegalarri, silize-ke, etab. moduko gehitzeen bitartez lor daitekeena. Gehigarri superplastifikatzaileek zatiki finaren ur eskaria murriztea ahalbidetzen dute, biskositate-aldatzaile gehigarriek aldiz, zatiki finaren kantitatea $250\text{-}500\text{ kg/m}^3$ bitartera murriztea ahalbidetzen dute [ACHE (2008)].

Ohikoa da agregakinek (harea eta legarra) osatzen duten ale eskeletoa optimizatzea batetik eta asmo horretarako diseinatu den pastarekin (ura, gehigarriak eta zatiki fina) konbinatzea bestetik. Pasta horrek agregakinak lubrikatzen ditu, bolumen txikiagokoak azken hauek, haien arteko marruskadura gutxitzeko eta masaren mugimendu osoa jariakortasun nabariarekin baimentzeko. Iraunkortasun edota erresistentzia irizpideek gehienezko ur/zementu erlazioak ezartzen dituzte, beharrezko jariakortasuna aipatutako gehigarri superplastifikatzaileen bitartez lortuko delarik. Hormigoiaren osagai garestienak zementua eta gehigarriak izaki, aukera ekonomikoek haien ehunekoa murriztea bilatzen dute.

[Petersson et al (1996)]-n arabera, granulometria zehatz bateko hutsuneak betetzeko eta agregakinen azalera estaltzeko behar den gutxieneko pasta edukia baliostatzen da lehendabizi. Jarraian, pasta horren osaketa zehazten da, biskosimetro baten bitartez gehigarrien edukia doitzeko eta ondoren, entseguen bidez hormigoien gaineko emaitzak egiaztatzeko.

Metodo hau [Okamura and Ouchi (2003)] lanetik abiatzen da HAT-aren aintzindari bezala. Proposatzen den metodo razionalak, agregakin lodiarren



2.12 Irudia: HAT-aren zenbait osagairen eragina [Wallevik (2003)].

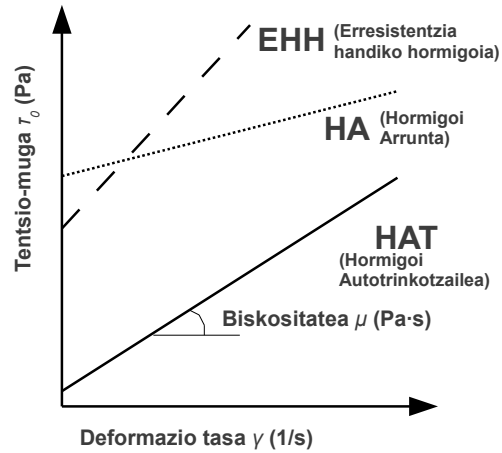
(bolumen solido osoaren %50a) eta agregakin zatiki finaren (mortero bolumenaren %40a) kantitatea zehazten du hasieratik. Eskatutako propietateak bermatzeko, superplastifikatzaile kantitatea zehazten dituzten pastaren gaineko entseguak burutzen dira.

Badira beste zenbait metodo, [Domone et al (1999)] edo [Gomes et al (2001)]-enak bezala, prozedura ezberdinen bitartez HAT diseinatzeko erabiltzen dituztenak era gutxi-asko eraginkorrenak. Berriki, eta AZIHAT-aren abantailak ikusirik, haien dosifikazioaren diseinua aztertzen duten zenbait ikerketa argitaratu dira [Ferrara et al (2007)], pastaren modelo erreologikoan oinarrituz [Bui et al (2002)].

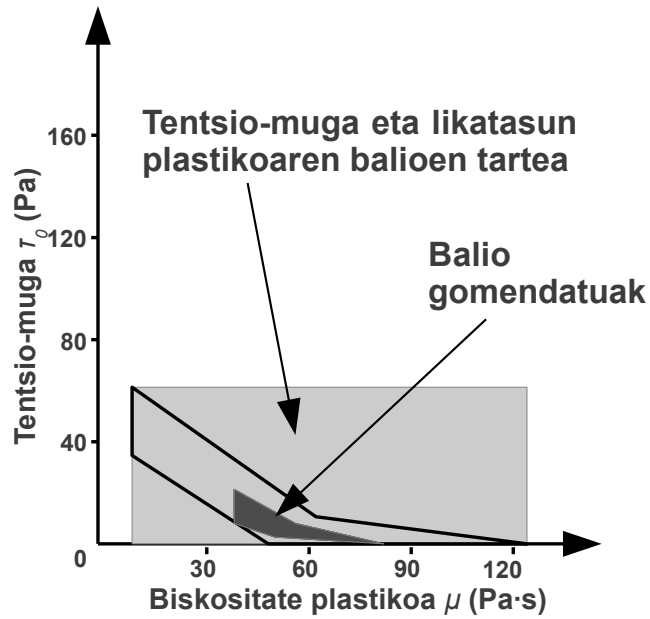
2.3.2 HATaren erreologia

Behin hormigoi hauen dosifikazioaren oinarritzko alderdiak ezarri direla, nabarmenak dira bere erreologiako zenbait ezaugarri. 2.13 Irudiak erakusten duen bezala, hormigoi autotrinkotzailearen isurpen-tentsioa, hormigoi arruntetan baino askoz txikiagoa da, bere mugikortasuna ahalbideatzeko. Aldi berean, eta erabilitako zatiki finaren kantitate handiagoari esker, biskositatea handitu egiten da masari kohesioa emateko eta segregazioa ekiditeko.

Isurpen-tentsioak zenbait hamarreko izaten ditu gehienez eta are nulua ere izan daiteke. Azpimarratu beharra dago parametro biak ia elkarrekiko baztertzailak direla, hau da, isurpen-tentsio handietarako ($\tau_0 \approx 60$ Pa) biskosite oso txikia da ($\mu \approx 15$ Pa·s), biskosite handietan ($\mu \approx 120$ Pa·s) berriz, isurpen-tentsio nulua da edo ia (2.14 Irudia). Hormigoiaren egonkortasuna bermatzeko giltzarriak, bere segregazioa ekidinez, isurpen-tentsio altua izatea, biskositate handia izatea, materialaren tixotropia, *lattice* efektua edo deformazio tangentzialeko zonaldeetara migratzeko ahalmen murrizta dira [Wallevik (2003)].



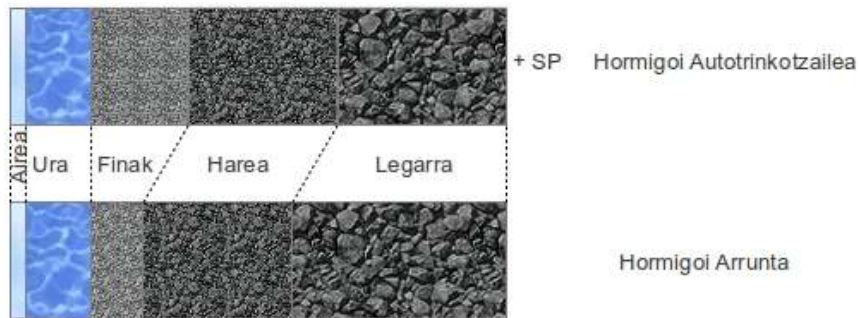
2.13 Irudia: Zenbait hormigoiren erreologiaren erkaketa [Wallevik (2003)].



2.14 Irudia: HAT-arentzako balio egokien tartea [Wallevik (2003)].

Ezinbestekoak diren gehigarri superplastifikatzaileen gaindosiak, masaren segregazioa ekar lezake.

Ohikoa da hormigoia erreologia osoa aztertzea ahalbidetzen duten erreometroak erabiltzea, biskosimetroekin ez bezala. Hala ere, arrazoi ekonomiko eta praktikoek, eskatutako parametroak balioesteko balio duten entsegu sinpleak (isurpena, V inbutua, etab. erabiltzera bideratzen dute. Balio horien



2.15 Irudia: HAT eta hormigoi arruntaren dosifikazioa.

zehaztapenerako entsegu mota hauen erabileraren gaitzesleen aurrean, aipatu behar da tresna horiek ez dutela balio zehatzik ematen, haien arteko emaitzak ezberdinak baitira [Ferraris and deLarrard (2001)]. Hala eta guztiz ere, erreometro ezberdinekin aztertutako hormigoiaren balio tartekak mantendu egiten dira [Roussel (2007b)]. Erreometro ohikoen artean BML [Wallevik and Gjorv (1990)] eta BTRHEOM-a [de Larrard et al (1998)] aipa daitezke. Lehenengoak ardazkidek diren bi zilindroko geometria erabiltzen du, bigarrenak aldiz, paraleloak diren bi plateretan oinarritzen du diseinua.

2.3.3 Ezaugarriak egoera freskoan

Hormigoi autotrinkotzaileek egoera freskoan bete beharreko alderdi nagusiak igarotze ahalmena, betetze ahalmena eta segregazio erresistentzia dira. Hormigoiak enkofratu osoa bete eta armatuaren artean igarotzeko gai izan behar du, matrizearen uniformetasuna galdu gabe.

Hormigoi arruntan ez bezala, hormigoi autotrinkotzaileak zatiki fin ehu-neko handi goa eta agregakin lodi zenbateko txiki goa ditu, 2.15 Irudiaren arabera. Zatiki fin hori zementu gisa eman daiteke proportzio handi goan edo filler minerala, errauts hegalaria, etab. mortero pasta osatuz. Pasta horrek eskatutako deformagarritasuna izan dezan, beharrezkoa da superplastifikatzaileen erabilera, egoera freskoan masaren biskositatea alda dezaten. Zuntzak gehitzeak, bestalde, hormigoiaren langarritasunean murrizketa nabarmena eragiten du, haren autotrinkotagarritasuna eragotziz.

Bere propietateen ezaugarritzea entsegu metodo ezberdinen bitartez egiten da. Normalizazio eta UNE arauen barnean sartzeari dagokionez, isurpen entsegua (UNE 83.361), isurpena eraztun Japoniarrarekin (UNE 83.362) (2.16 Irudia), L kutxa (UNE 83.363) eta V inbutua (UNE 83.364) hartzen dira kontutan. Entsegu hauetaz gain, badira beste zenbait (U kutxa, U tutua, zutabearen entsegua, Orimet entsegua, betetze kutxa, bahe egonkortasuna, %100-ko kontrol entsegua, etab.) hainbat ikerketetan [Bartos (1993)] [Yurugi and Sakai (1998)] zabal bildu direnak.

Isurpen entsegua ohikoena da, egiteko Abrams-en konoa erabiltzen baita. Hormigoi arruntaren trinkotasun entsegua berregitean datza, baina oraingoan, hormigoiak 500 mm-ko zirkunferentzia osatzeko behar duen denbora (T_{50}) eta jariora amaitzen denean amaierako diametro (D_f) neurtuz (2.1 Taula), asentua



(a) Isurpena



(b) Eratzun Japonoiarra

2.16 Irudia: HAT-aren fresko egoerako entseguak.

kuantifikatzea baino, oso handia baita. Prozedura honek izan daitezkeen segregazioak antzemateko balio du, haren jariakortasuna balioztatzearekin batera. Entsegu horretan hormigoia bidean eratzun Japonoiarra tartekatuz gero, bere igarotze ahalmena aztertzea ahalbidetzen da (2.2 Taula). Igarotze ahalmena edo blokeoarekiko erresistentzia V inbutu eta L kutxarekin aztertu daiteke era osagarrian egoera ezberdinetarako.

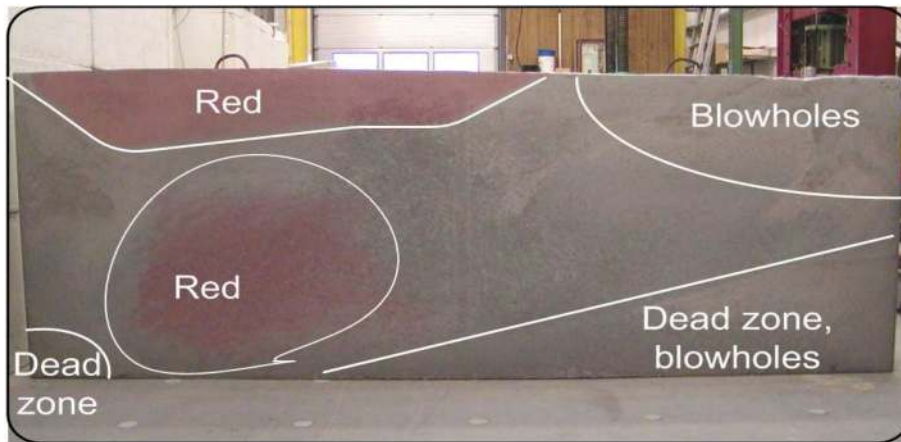
2.4 Jariakinen dinamika konputazionala

Doktore Tesi honi dagokionez, Jariakinen Dinamika Konputazionalera (CFD) jotzen da HAT-aren mugimendua ebazteko. Hainbat teknika daude jariakin baten, partikula eten edo ingurune baten esekiak dauden partikulen azterketan arreta jartzen dutenak [Gram and Silfwerbrand (2011)]; guztiek jarraian aipatuko diren alde onak eta txarrak dituztelarik.

- Jariakin homogenea

Jariakin bakarrarekin egiten den simulazioa, Navier-Stokes-en ekuazioak ebaztean datza, masa, momentu eta energiari dagokionez, ebazpide numerikoen erabileraren bitartez. Emaitza gisa abiadura, presio eta temperatura eremuak lortzen dira. Jariakinen sarrera datu parametroak dentsitatea, biskositatea, bero espezifikoa eta eroankortasuna izan ohi dira. Diskretizazio metodoek Jariakin Bolumenaren Metodoa, Elementu Finituen Metodoa eta Ezberdintasun Finituen Metodoa hartzen dituzte kontuan [Wendt (2009)]. Galdaketa [Tie et al (2006)] [Lewis et al (1997)], plastiko [Luoma and Voller (2000)] eta abarren azterketan joriki erabili den ikerketa lerroa da

Hormigoia dagokionez, bere matrize heterogeneoa dela eta, ikerketa konplexuagoak izan dira. [Tanigawa and Mori (1986)] izan ziren hormigoia jarioa simulatzen lehenak Elementu Biskoplastiko Finituen Metodoaren (VFEM) bitartez eta, ondoren, Elementu Biskoplastiko Zatituen Metodoa (DVEM) erabiliz bi dimentsioko jarioarentzako. Gainazal librea sarearen deformazioari dagokio lehenengo kasuan eta markatzaile birtualen desplazamenduari bigarrenean. Berriki, [Thrane (2007)]-k hormigoia bolumen nabarmeneko hormaren hormigoitza simulatu du, Bingham



2.17 Irudia: HAT-zko hormaren hormigoitzea [Thrane (2007)].

portaeradun jariakin bakarria modelizatuz. Entseguren benetako emaitza 2.17 Irudian ikus daiteke, haren gaineko azterketan bildu diren oharrekin batera. Ohikoa da VOF (Jariakin Bolumena) teknika erabiltzea [Hirt and Nichols (1981)] sare deformaezin batekin batera, hormigoitu aurretik enkofratuan dagoen airea eta hormigoia izan daitezkeen bi faseren azterketa egiteko.

- Partikula etenak

Hasiera batean pikor-material lehorren azterketarako garatuak (siloak, elikagaigintza, etab.) [Vu-Quoc et al (2000)] [Fortin et al (2005)], bere erabilerak mugak gainditu ditu hormigoia modelizatzeko. HAT-ari dagokionez, bere portaera pikor-material baten ezberdina da, dosifikazio fasean agregakin finen gehikuntza dela eta, agregakin lodien kalterako. Agian egokiagoa litzateke hurbilketa hau hormigoi arruntentzako, portaeran pikor-partikula zenbateko handiagoa nagusitzen baita. Hala ere, zenbait ikerketek HAT-aren jariora simulatzeko egokitzat jotzen dute.

Ondorengo garapenak Elementu Ezberdin edo Etenen Metodoan (DEM) eratortzen dira hormigoi fasea, mortero pasta eta agregakin lodian banatuz elementu bereizien gisara [Chu and Machida (1998)]. DEM metodoak, partikulen ibilbidea aztertzen du era independentean. Haien artean talkarik egonez gero, kontaktu indarrak zehazten dira jatorrizko ibilbidearekiko desbideratzea ezagutzeko. Deformazio handietarako egokia den arren, ez dago partikulen arteko loturarik. [Noor and Uomoto (1999)]-ek 2.3.3 Atalean azaltzen diren entsegu adierazgarrienak simulatu dituzte HAT-aren egoera freskoko propietateak zehazteko, [Chu et al (1997)]-ek egindako lanetatik abiatuz. Morteroa 7.5 mm baino txikiagoak diren partikulentzat bereizten da, gainontzekoak modeloaren zatiki lodia osatzen duelarik. Ondoren, [Pettersson and Hakami (2001)] eta [Pettersson (2003)]-ek ikerketa gehiago egin dituzte ildo horretan.

Partikula Barreiatzaileen Dinamikak (DPD), jariakinen dinamika eta erreologia simulatzen ditu, simulazio teknika mesoskopiko baten bitartez [Hoogerbrugge and Koelman (1992)], jariakina eta agregakinak be-

reizirik aztertze erabilia ere izan dena [Martys and Ferraris (2002)]. [Satoh and Majima (2005)] biskositatearen balio teorikoak eta metodo honen erabileraz lortu dituzten emaitzak erlazionatzen saiatu dira. Metodoaren beste ikerketa batzuk eta haien erabilera HAT-an, [Ferraris and deLarrard (2001)] eta [Ferraris et al (2001)]-n biltzen dira.

- Ingurunean esekitako partikulak

HAT-aren benetako portaera, mortero pasta baten barnean dauden tamaina txikiko agregakinen antzekoa denez, beste azterketa aukera bat jariakin likatsu baten barruan esekita dauden partikulen simulazioan datza. Ildo honetan, [Mori and Tanigawa (1992)] Esekita Elementu Biskoplastikoen Metodoan (VSEM) oinarritzen dira hormigoia jarioa simulatzeko, mortero fasean esekita dauden partikula esferikotzat hartuz agregakinak. Era berean, [Moresi et al (2003)]-ek Elementu Finituen Metodo (FEM) aski ezagunak eraldatzen dituzte, partikula lagrangiarrek sartuz, era orokorrean geomaterial biskoplastikoen deformazio handiak simulatzeko asmoz (FEM-LIP). [Dufour and Pijaudier-Cabot (2005)] metodo honetan oinarritzen dira hormigo mota ezberdinak (hormigo arrunta, autotrunkotzailea eta erresistentzia altukoa) simulatzeko, Bingham modeloaren bitartez eta sare euluarrean partikula lagrangiarren integrazioan oinarriturik. Horretarako, isurpen eta L kutxa entseguak errepikatzen ditu. Bestalde, [Laure et al (2007)]-ek LSM metodoa eta deskribapen Euleriar batekin, isurpen entseguan zehar zuntzen orientazio aldaketak zehazten dituzte, Newtondar jariakin eta Herschell-Bulkley modeloak simulatuz. [Švec et al (2012)]-ek beste bide bat hartzen dute, Navier-Stokes-en ekuazioak ebatzi beharrean, Lattice-Boltzman (LBM) modeloa ezarriz. Asmo honetarako, Muga Murgilduaren Metodoaren (INM) aldaera bat erabiltzen dute, VOF eta LSM metodoak beharrean. isurpen entsegura egokituz.

Orokorrean metodo horiek, literatura adibide eta HAT-aren ohiko laborategi entseguekin erabili eta alderatu dira [Roussel (2006)] [Roussel and Coussot (2005)]. Jariakin sinpleen simulazioak erabiltzen dituzten metodoek, konputazio-kostu gutxiago behar dute, haien ebazpena arinagoa delarik. Partikula etenen modelizazioak mesoeskalan egindako azterketekin bat datozela dirudite [Gram and Silfwerbrand (2011)]. Aldiz, konplexua bihurtzen da erabilitako parametroek esanahi fisikorik ez dutelako. Ingurune batean esekitako partikulak aukerarik errealena dirudite eta materialaren izaera hoberen islatzen dutenak, nahiz eta oraindik garapen gehiago behar duten [Roussel (2007a)].

2.4.1 Jariakin ez Newtondarrak

Jariakin ez-Newtondarrak eta badirenak, tentsio balio kritikoa agertzen dutelako ezberdintzen dira, honen azpitik jariakinaren mugimendurik ez dagoelarik. Material hauek biskoplastikoak ere deituak dira. Masa, momentu eta energiaren kontserbazio ekuazioak dira masa konprimiezinen mugimendua arautzen dutenak jario laminarrean. Bingham eta Herschell Bulkley modeloak simulazioetan gehien erabiltzen direnak dira. (2.4a) eta (2.4b) Ekuazioek, lege ez-jarraituen bidez tentsio-deformazio portaera adierazten dute.

$$[Bingham] \rightarrow \tau = \tau_0 + \mu \cdot \gamma \quad (2.4a)$$

$$[Herschell - Bulkley] \rightarrow \tau = \tau_0 + K \cdot \gamma^n \quad (2.4b)$$

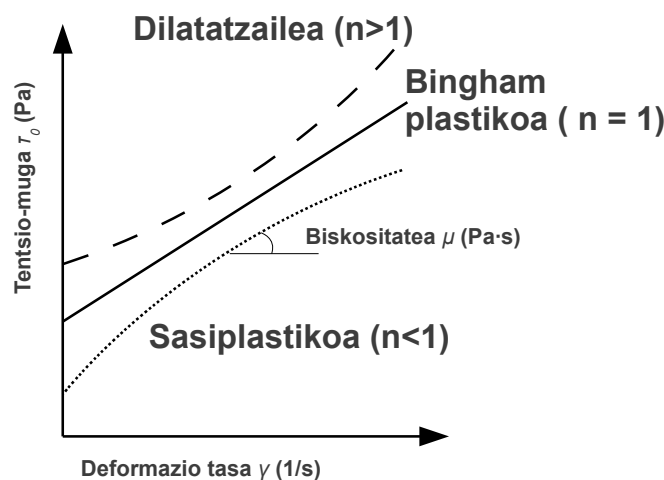
Modelo biak zabal erabiliak dira hormigoia ezaugarritzeko. Bingham modeloak biskositatea eta isurpen-tentsioa erabiltzen ditu sarrera parametro gisa. Herschell-Bulkley modeloaren K eta n parametroek aldiz, ez dute esanahi fisikorik eta era esperimentalean zehaztu beharra dute. Beharrezko datuen zentzu fisikoak, Bingham modeloaren erabilera handiagoa dakar gehienetan hormigoia dagokionez. Ikerketa askok hormigoia isurpen-tentsioa zehazteko ekuazioak ezartzen saiatu dira isurpen entsegu, L kutxa, LCPC [Rousel (2007b)] kutxa eta hainbat simulazio konputazionalen bitartez. [Zerbino et al (2009)] eta [Sedran and de Larrard (1999)]-en ekuazioetatik, (2.5a) eta (2.5b) Ekuazioak hurrenez hurren, isurpen entseguaren D_f balio handietarako, Bingham modeloaren isurpen-tentsio negatiboa gertatzen dela ondorioztatzen da, fisikoki ezinezkoa dena. Modelo horrek tentsio tangentialaren balioa gutxiesten duela uste da, baina Herschell-Bulkley modeloak berriz, dilatatzailea izanez gero, isurpen-tentsioa neurritz kanpo balioztatzen omen du [Feys et al (2007)]. Bingham modeloaren linealtasuna nabarmena da Herschell-Bulkley modeloaren aldean, n parametro esponenzialak jaria kin dilatatzailea dela adierazten duelarik $n > 1$ denean edo sasiplastikoa $n < 1$ denean. $n = 1$ izatekotan, Bingham modeloa bihurtzen da. Jariakin dilatatzaileek biskositatearen gehikuntza agertzen dute tentsio tangentialaren balioak handiagoak diren heinean, sasiplastikoez berriz, alderantzizko portaera azaltzen dutelarik. Hainbat egilek portaera dilatatzailea antzeman duten HAT-an [Heirman et al (2009)] [Feys et al (2009)]. Biskositatea gero eta handiagoa izan, hormigoiak jario motelagoa izateko joera du eta isurpen-tentsio gero eta handiagoa izan, mugimenduaren mugimendua mugatuagoa dago. Hormigoia arrunt eta hormigoia autotrinkotzaileen arteko ezberdintasuna parametro hauen ezberdintasunean datza. HAT-aren jaria kortasuna, materialaren isurpen-tentsio baxuagoari dagokio. Aldi berean, zatiki finaren garrantziak dosifikazioan, masa likatsua sorrarazten du. [Zerbino et al (2009)], [Sedran and de Larrard (1999)] eta [Kokado et al (1997)]-enak bezalako zenbait ikerketek, formulak ezartzen dituzte isurpen-tentsioa isurpen entseguaren amaierako diametrotik balioztatze (2.5a), (2.5b) eta (2.5c) Ekuazioak).

$$\tau_0 = 0.46 \cdot (649 - D_f) \quad (2.5a)$$

$$\tau_0 = (\rho + g/11740) \cdot (808 - D_f) \quad (2.5b)$$

$$\tau_0 = \frac{225 \cdot \rho \cdot g \cdot Vol^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot D_f^5} \quad (2.5c)$$

Beste hainbat ikerketek aldatetako egiten dituzte modelo bietan, metodoek dituzte arazoak gainditzeko. Alde batetik, [Papanastasiou (1986)]-ek m parametro esponenziala ezartzen du, denbora dimentsioekin, tentsioaren hazkunde esponenziala kontrolatzen duelarik modeloen ez-jarraitasunak saihesteko. m -ren balioa gero eta handiagoa izan, hobeto egokituko da jatorrizko modelora. [Feys et al (2007)]-ek Bingham modeloa aldatzen dute bigarren mailako elementua sartuz, bigarren mailako Taylorren segidaren garapen gisa har daitekeelarik



2.18 Irudia: Jariakin ez-Newtondarren modeloak.

ere. [de Larrard et al (1998)] -ek Herschell-Bulkley modeloaren ezezagunak hirutik bira murrizten dituzte, modeloaren K eta n parametroak erlazionatuz. Emaitza hauek erreometro ezberdinekin egindako hormigoien entseguetatik lortu izan dira.

2.5 Egitura-adibideak

AZIH-aren erabileren barruan, gehienak zoladura elementuetan eta tunelen sostenguei dagozkie. Eremu hauetatik at, gutxi dira literaturan [ACHE (1999)] aurki daitezkeen urtegi isurbide, labe erregogorak, etab. Berriki hala ere, altzairu zuntzez indartutako hormigoietan egin diren ikerketen gorakadari esker, eraikuntza alorrean sona handiko obra aipatu beharra dago. Espainia mailan forjatuentzako AZIH-zko lauza trinkoak erabiltzen dituen lehen eraikina, LKS ingeniari-tza enpresak eraiki du, Arrasaten (Gipuzkoa) duen egoitza nagusirako eta zabal azaldutako dago [Maturana (2013)]-n.

HAT-ari dagokionez, bere erabilera hedatuagoa izan da material gazteagoa den arren. Ohiko armatua erabili eta egoera gogortuan bere portaerak aldatuta handirik jasaten ez duelako izan da hori, eta bestela gertatuz gero beti onerako baita. Bere dosifikazioa konplexua den arren, bere erabilerak onura handiak dakartza obraratzeari (egoera freskoa) dagokionez. Eraikuntza alorrean oso erabilia den materiala da, baina batez ere obra zibilean adibide ugariarekin [ACHE (2008)].

AZIHAT-ak teknologia bien ezaugarriak uztartzen dituen materiala da eta are aurreko ahapaldian aipatu den materiala baino berriagoa. Lagin tamaina eta laborategi girotik kanpoko bere erabilerari dagokionez, egileak topa dituen aipamen eskasak dira, eskorlatze aurreatezatutako pieza edo tunelen sostengurako dobelak [Grünwald (2004)] edo forjatuen zaharberritzea [Klein et al (2011)] bakarrik aurki daitezkeelarik. Doktore Tesi honek hortaz, AZIHAT-ari dagokion jakintzaren hutsune hori betetzeko asmoa du.

2.5.1 Fabrikazio eta obraratzea

Ez dago laborategiko emaitzak obraren errealitatera estrapolatzen dituen ikerketa aipagarririk. Eta are gutxiago, altzairu zuntzez indarturiko hormigoia-ri dagokionez. Gainera, erabiltzen diren dosifikazioak ezberdinak dira herrialdeen artean. Japonia, Suedia eta Herbehereetan, pastaren kostua handia dela eta, isurpen-muga txiki eta biskositate handiko dosifikazioak erabiltzen diren bitartean, beste herrialde batzuek, Danimarka adibidez, alderantzizko bidea jorratzen dute [Wallevik (2003)].

Hormigoia-aren propietateak hobetzen dituzten nahasketa mailakatu teknika ezberdinak daude. Aipatzen diren prozedurak hormigoia-aren bi edo hiru faseko nahastean oinarritzen dira. Lehenengo kasuan, morteroa nahasten da ondoren legar lodia gehitzeko; bigarrenean, zementu pasta bat lortzen delarik, harea gehitu ondoren morteroa lortuz eta azkenik, agregakin lodiarekin nahastuz. Nahiz eta teknikek halako zementu aurrezpen bat ekarri, ez dago horren aipamenik ezta dakarren aurrezpen ekonomikoarena [Saeed (1995)].

Hormigoi-kamioetik irtetea ebakidura tasa oso handia da, 10 rad/s gutxi gorabehera. Balio horrekin isurpen-mugak ez du eragin nabarmenik masaren mugimenduan. Tasa murriztagoa denean aldiz (0.2 rad/s gutxi gorabehera), isurpen-tentsioak mugimendua eragozten du segregazioaren aurkako egonkortasunean laguntzeaz gain. Isurpen-tentsioa 10 Pa baino txikiagoa denean, mespretxagarritzat har daiteke [Wallevik (2003)]. Hortaz, ponpatutako hormigoiek uste baino jariakortasun handiagoa azaltzen dute, ponparen pistoiak ematen duen energia dela eta. Masaren abiadura gutxitzen doan heinean, deformazio tentsorearen bigarren inbariantea gutxitzen da. Honek isurpen-tentsio balioak hormigoia-aren erreologian duen eragina handitzen du, irristatzearen aurka erresistentzia gehituz.

Hormigoia obraraino garraiatzen den bitartean, masaren erreologia aldatu egiten da. Hormigoi arruntarekin gertatzen den ez bezala, gehigarriak hormigoiek haien langarritasuna murrizten dute era nabarmenagoan, mugimendua mantentzen baldin bada [Torralles-Carbonari et al (2003)].

2.6 Azken ondorioak

Gai honetan zehar AZIH eta HAT-aren jatorrien ikerketa egin da eta baita ondorengo garapenarena ere, ikerketa ugari eta sektoreko gaur eguneko erabilerrari esker. Altzairu zuntzen gehikuntzari dagokionez hormigoizko matrize hauskorren indartze gisara, azpimarratu beharra dago mekanikoki material konposatuak esfortzu handiak euts ditzakeela frogatua dagoela, edozein erabilera motarako egokiak diren ezaugarriak azalduz. Horretarako, AZIH-aren ohiko izendapen sinplea aldatzen joan da Ezaugarri Altu bezalako terminoak erabiltzeraino, bere egitura-izaera nabarmena adierazten dutenak.

Hala eta guztiz ere, ezinezkoa da zuntz kontaezinak nahierara kokatzea hormigoi masaren barruan eta behin hormigoia gogortu dela haien antolamendu eta kokapena ikustea. Are hormigoi freskoaren propietateak aldatzen dituzte, kasurik txarrean, obraratze akastunak eraginez. Hori dela eta, ikerketa ildo berriek puntu kritiko horietan jartzen dute arreta; hots, zuntzen orientazioaren aurreikuspen eta ondorengo kontrola.

Kontrol teknika berriek, ikuspuntu berria dakarkioten materialari eta laborategiko girotik kanpo egoten diren neurri handiko elementuetan hipotesi eta

emaitzak alderatzea ahalbidetzen dute. Argi dago, era sistematikoan erabilizteko aukera izan dadin oraindik ere heldutasun maila nahikoa lortu behar dutela.

Molde bidezko lagin eta eskala handiagoko elementuen portaera erresistenteen artean aurkitu diren ezberdintasunak eta materialaren lege eratzaillea ezartzerako orduan dauden irizpide kontrajarriak batuz, interesgarria dirudi [Laranjeira et al (2010)]-k irekitako bidea prozedura zuzenean oinarritua edo are ildo honetan kontrol metodo berrietako baten emaitzekin erlazionatutakoa.

Hormigoiaeren autotrinkotasun propietateak bestalde, beranduago sustatzen dira baina erabilera adierazgarriago eta merkaturako sarrera zuzenagoaz. Hormigoio mota hauek eskaintzen dituzten abantailak, beharrezko eskulan eta egikaritze epeen murrizketan bihurtzen dira orokorrean. Alabaina, bere formulazioak halako konplexutasuna dakar eta zatiki finaren, zementua orokorrean, eta gehigarri kimikoen erabilera handiagoak eragiten duen kostu gehikuntzari lotuaz, ohiko erabileran negatiboki eragiten du.

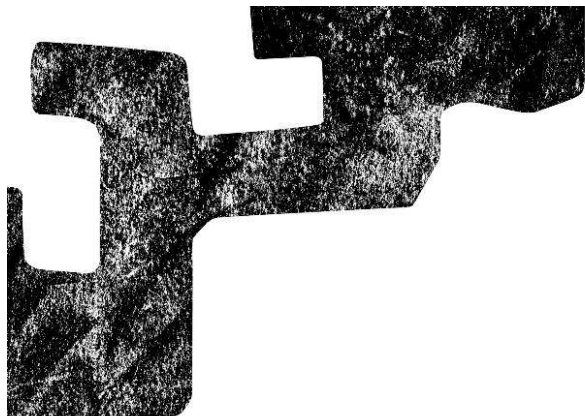
AZIH eta HAT arteko sinergia interesgarri suertatzen da teknologia bien abantailak elkartzeko aukera dela eta. Bakoitzari berezko zaizkion zailtasunak ez dira nabarmenki handitzen elkartze honen ondorioz. Gainera, HAT-ari eskatzen zaion jariakortasunak hein batean, zuntzen orientazioa behartzea ahalbidetzen du, materialaren erreologia azterketak eta obraratzearen simulazioak, ezezagun hori ebazteko aukera ematen dutelarik. Materialaren diseinu erresistenteari begira dakarren ezagutzaz gain, elementuaren egitura-kalkuluaren arabera gehien behar den guneetan orientazio hobea lor daiteke.

Tesiak hortaz, egitura-ardura handiko elementuentzako zuntz bidezko in-dartzearen egokitasuna frogatu nahi du ohiko erabileretan, euste andel zilindrikoetan erabiltzea proposatzen delarik. Zuntzen orientazioa aurreikusteko tresna konputazionalen gaitasuna eta lagin eta egitura gaineko kalitate kontrolen metodoen fidagarritasuna frogatu nahi da, proposatutako materialaren euste ahalmena izango lituzkeen esfortzuekin alderatzen den bitartean.

Lerro hauetan, aipatu diren teknologia bien konbinaketaz egindako hormigoizko hormaren azterketa proposatzen da, AZIHAT osatuz, obraratzeko erreal baten berezko baldintzen arabera. Esperientzia honek, etorkizuneko gauzatzeko egikaritzeko kontutuan izan beharreko oinarriak ezartzen lagun dezake. Aldez aurreko pausu gisa, hurbileko lehengai horniketa eta egitura zehatzen eskakizunen, egoera freskoan zein gogortuan, araberrako dosifikazio metodologia ezartzen da. Ondoren, entsegu ez-suntsitzaile kanpaina sakona gauzatzen da hormaren eta bertatik mozketak bidez erauzi diren 380 laginetan. Entsegu hauek, suntsitzaileak diren beste batzuekin osatzen dira, materialaren propietate mekanikoak era kuantitatiboan ezaugarritzeko baliagarriak direnak eta erabilitako hainbat kontrol metodoekin korrelazio kualitatiboa egiteko.

Horman zehar kokapen ezberdina duten laginetan erresistentzia maila ezberdinak agertzekotan, masa jariakorraren mugimenduak zuntzek hartzen duten orientazioan duten eragina nabarmendu egingo litzateke. CFD tekniken bidezko simulazioak oinarri gisa hartzen dira abiadura eremu eta kokapen ezberdinetan agertzen diren erresistentzia balioak erkatzeko.

Azkenik, Doktore Tesi honetan oinarri gisa hautatu den egitura-elementuaren antzeko erabileren bilketa egiten da. Alderdi ekonomiko, egikaritze epe eta jasangarritasunari dagokionez konparaketa arina egiten da andel tradizional eta ikerketa honetan aurkeztutako proposamenaren artean, haren egokitasuna erakusteko.



III. ZATIA

**Laborategiko entsegu
kanpaina**

3. GAIA

AZIHAT-aren aukeraketa

3.1 Sarrera

Material ezberdinetako zuntzak (beira, polipropilenoa, etab.) egon arren, ikerketa honetan erabili diren zuntzak altzairuzkoak dira, aproposagotzat hartzen baitira proposatzen den egitura-erantzukizunerako. Zenbaiten artean zuntz mota aukeratzeko erabili den metodologia eta hormigoia-aren formulazioa aurkezten dute hurrengo atalek, zuntzak eta beharrezko autotrinkotasun propietateak uztartuz.

3.2 Zuntz motaren aukeraketa

2.2.1 Atalean azaldu den bezala, merkatuan egitura-zuntz mota asko topa daitezke. Zuntz mota bakoitzak dosifikazio ezberdina eska dezake, propietate erreologiko eta erresistente oso ezberdineko hormigoiak osatuz. Ikerketa honen helburua zuntz eta hormigoi konbinaketa guztien azterketa parametrikoa egitea ez denez, luzera ezberdineko zuntz mota bi soilik aztertzea erabaki da. Bi zuntz mota hauek aurreko esperientzien ondorioz [Maturana (2013)] [Cunha et al (2010)] [Robins et al (2002)] aukeratuak izan dira, azterketari abantailaz aurre egiteko halako ezagutza ekarri dutelarik.

Hortaz, muturrak konformatuak dituzten zuntzak eta zuntz uhinduak hautatu dira, 50 eta 60 mm-ko luzerarekin bi kasuetan. Zuntzak ArcelorMittal-ek hornitu ditu, haien izendapen eta propietateak 3.1 Taulan laburbiltzen direlarik.

3.1a y 3.1b Irudietan erakusten diren hiru dimentsioko modeloetan hautesman daitekeen bezala, matrizearekiko zuntzek dituzten ainguraketa mekanikoaren mekanismoak nabarmenki ezberdinak dira. HE zuntzek zuntza hormigoian finkatzeaz arduratzen den mutur konformatua duten bitartean, Tabix zuntzek eginkizun horretaz arduratzen diren hainbat uhin dituzte.

HE motako zuntzetan, mutur konformatuaren neurriak ez dira aldatzen aztertutako diren bi luzeren artean. Luzera handiagokoan hobekuntza, itsaskortasun mekanismoari dagokionez bakarrik izango delakoaren ustekizuna dago. Tabix zuntzen kasuan, uhinaren neurriak ere ez dira aldatzen. Zuntz mota honentzako, zuntza gero eta luzeagoa izan, handiagoa izango da euts dezakeen trakzio

Izendapena	HE 1/50	HE+ 1/60	Tabix 1/50	Tabix+ 1/60
Geometria	Ertz Konformatuak		Uhindua	
Luzera (mm)	50	60	50	60
Diametroa (mm)	1.00	1.00	1.00	1.00
Uhin luzera (mm)	N/A	N/A	8	8
Uhin anplitudea (mm)	N/A	N/A	0.40-0.65	0.40-0.65
Gako luzera (mm)	1-4	1-4	N/A	N/A
Gako Sakonera (mm)	1.80	1.80	N/A	N/A
Itxura erlazioa	50	60	50	60
Trakzio erresistentzia (MPa)	1100	1450	1100	1450
Zuntz kopurua Kg-ko	3100	2600	3100	2500
Sartutako luzera (mm)	1.25	1.50	1.25	1.50

3.1 Taula: Hautatu diren zuntzen ezaugarriak.



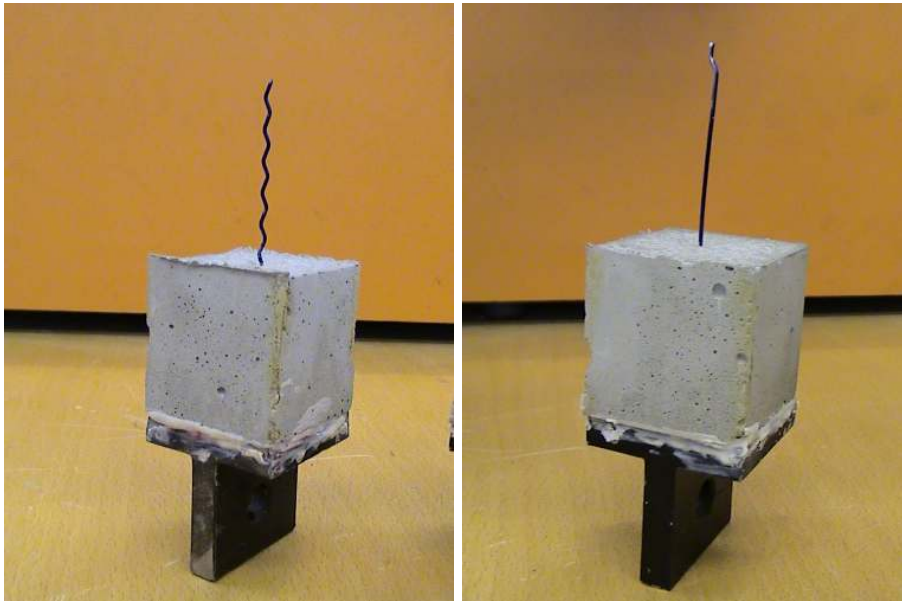
(a) HE

(b) Tabix

3.1 Irudia: Entseguetan erabili diren zuntzen hiru dimentsioko modeloak.

indarra, itsaskortasun luzeraren gehikuntzaz gain, ainguraketa hobetuko duten uhin gehiago daudelako.

Proposatzen den erabilerarentzako zuntz mota egokienaren hautaketa, erazte entsegu sorta baten emaitzetan oinarrituko da. Agerian jarri behar da, hala ere, entsegu hauek, aurreikusten diren baldintzekiko zuntzik egokiena zein den zehazteko baliagarria direla, baina ez dira AZIHAT-aren adierazgarria. Hots, emaitzok ez dira material konposatuaren diseinurako baliagarriak, osotasunean



(a) Tabix 1/50

(b) HE 1/50

3.2 Irudia: Zuntzak morteroan eta lokailu tresneria.

aztertua izan behar baitu.

3.2.1 Konfigurazio eta prozedura

Zuntzen erauzketaren entsegurako konfigurazio ezberdinak daude [Cunha (2010)]. Jarraian deskribatzen diren entseguetan, zuntzak morteroan sartzeari ekin zaio eta azken hau entsegu-makinan finkatuko den tresnerian itsastea, 3.2 Irudian azaltzen den legez. Zuntzaren mutur librea zildai batez estutzen da eta harengandik tiraka burtzen da entsegua. Zuntz guztiak kargaren norabidearekin lerrokatzen dira.

Hormigoian pitzadura bat sortzen denean, haustura plano zeharkatzen duten zuntzak irristatu egiten direnez hormigoian gutxien sartuta dagoen aldeetik, luzera hori gehienez zuntzaren erdia izan daiteke. Materialaren solizitazio handieneko guneetan, ebakidura ahulenean agertzen da pitzadura. Hainbat aldagairen konbinaketaren menpekota da guzti hori, hala nola, zuntz kopurua, zuntzen kokapena (alderdi trakzionatua edo konprimitua), matrizearen erresistentzia, zuntzen erresistentzia, zuntzek hormigoian sartuta duten luzera, etab.

Pitzaduran zehar eta aipatu den bezala, hormigoian gutxien sartuta dagoen muturrean zuntzaren luzera, gehienez zuntzaren luzeraren erdia izango da. Baina gutxienez, luzera hori zero izango da. Arrazoi hori dela eta, entseguak batez besteko luzera bat sartuz egin dira, zuntzaren luzeraren laurdena, hein batean kokapen onuragarriena ekidinez.

Zuntz mota bakoitzeko, 10 erauzte entsegu zehazten dira orduan kanpaina experimental moduan. Mortero barruan kokapen zuzena lortzeko, zuntzak luma-kartoi xafra batzuetan zintzilikatu dira. Entseguak 30 KN ahalmena duen LLOYD M5K (3.3 Irudia) makinan gauzatu dira. 5 KN-eko HBM karga-zelula



3.3 Irudia: Zuntzen erauzketarako entsegu-makina.

gehitu egin da, neurketetan doitasun gehiago lortzeko. Karga, desplazamenduzko kontrol bidez ezarri da, 0.5 mm/min-ko abiaduraz karga maximora heldu arte eta 4 mm/min-ko abiaduraz ondoren, zuntza guztiz erauzi arte.

3.2.2 Erauzte emaitzak

Zuntz mota bakoitzaren portaerak dispertsio handia erakusten du. Karga-desplazamendu kurba erraz erasana izan daiteke zuntzaren inklinazio edo sartutako luzeran aldaketa arinak izanez gero. Hala eta guztiz ere, aurreko atalean aipatu diren zenbait alderdi baieztatu egiten dira lortutako balioak ikusiz.

Aurretiazko ikerketek [May (2008)] zuntz uhinduek, mutur konformatuak dituzten zuntzen emaitzekiko, karga transmisio ahalmen handiagoa dutela egiaztatzen dute, luzera handiei dagokienez.

Alabaina, ikerketa honetan erabili diren luzera txikietarako, ezberdintasunak nabarmenki murrizten direla berresten dute emaitzek. Esan bezala, zuntz mota bakoitzean erauzte portaeraren osagai mekanikoa era ezberdinean aldatzen delako gertatzen da. Uhindun zuntzek, luzera gehiago behar behar dute hormigoi barruan, bere ahalmen guztia garatzeko, hau da, uhin gehiago hormi-

goi barruan, eta mutur konformatudun zuntzek ordea, gakoarekin nahiko dute ainguraketa egokia izateko eta luzera handiagoekin ez dute euste ahalmenaren gehikuntza nabarmenik agertzen, [Cunha et al (2010)]-k ere aipatu bezala.

Azpitarratu beharreko beste alderdi bat, zuntzek pairatzen duten deformazio plastikoa da, matrizearen bide zuzenetik igarotzean arteztu egiten direlarik. Muturrak konformatuak dituzten zuntzetan, gakoa da arteztu egiten den bakarra, aldiz, uhin erako zuntzetan haietako bakoitza da zuzendu egiten dena. Hau ez da aipatzen proposatu den erabilerarako, edukiaren kanporanzko irazketa handitu egin daitekeelako.

3.4 Irudian laburbiltzen dira egindako erauzketa entsegu guztiak. Emaizak zuntz mota eta luzeraren arabera taldekatzen dira (lerro etenak) eta aldi berean, emaitzen batez bestekoa (lerro jarraituak) adierazten dira mota bakoitzarentzako. Zuntz mota bakoitzaren altzairuaren erresistentziari dagokionez, zuntzaren irristatzea, bere apurketa eragingo luketenak baino balio nabarmenki txikiagoko kargekin gertatzen da. Hori dela eta, nahiago da karbono eduki txikiagoa duen altzairua erabiltzea.

Ondorioz, eta arestian esan den guztiarekin bat, luzera txikiena duten mutur konformatuko zuntzak erabiltzea erabaki da, haien izendapena HE 1/50 izanik bere fabrikatzailearen arabera.

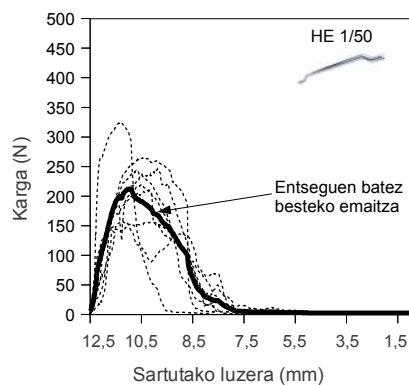
3.3 Hormigoiaren formulazioa

Altzairu zuntzez indarturiko hormigoi autotrinkotzailea, aurretiaz aipatu den euste andel zilindrikoaren erabilerak eskatzen dituen betekizunen arabera dosifikatu da. Egoerarik txarrean, euste egitura saneamendu azpiegituren esparrura xedatuko balitz, materialarentzako giro erasokorra izaki, iraunkortasun eskakizunek garrantzi handia hartuko lukete, oinarrizko betebeharren ezarpenean sarrera datu gisa.

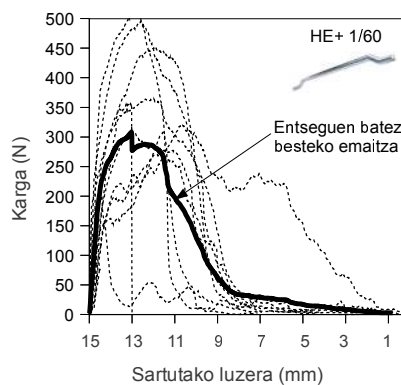
Aldi berean, haren bideragarritasuna ikusarazi nahi denez merkatuko benetako egoera batean, hasieratik aintzat hartu beharreko zenbait baldintzatzaile daude. Proiektuaren balizko kokapena zehaztean datza hori, gune geografiko bakoitzeko hormigoi horniketa plantek ezaugarri, zenbait kasutan, guztiz ezberdineko lehengaiak erabiltzen baitituzte.

Arazoi hori dela eta, hormigoiaren formulazioa, Italcementi taldeko Financiera y Minera (FyM) enpresarekin harreman estuan garatu da. Horma, Erandioko (Bizkaia) Kukularra plantaren eragin gunean eraikiko dela erabakitzen da. Horrela, erabili beharreko agregakinak plantan erabili ohi direnak dira eta hormigoiaren fabrikazioa, kudeaketa sisteman ezarrita dauden ohiko prozeduren arabera gauzatuko da. Hortaz, birrintze bidezko kareharri agregakinak eskuragarri daude 0/4 tamainako harez eta 4/11 legarrez. Zementua CEM II motakoa da, mistoa eta kareharrizko fillera eta siderurgia-zepa gehikuntzaz, 42.5 MPa-eko konpresio erresistentzia adierazgarria eta hasierako erresistentzia altuak (CEM II/A-M(S-L) 42,5R). Zuntzak HE 1/50 izendapena dutenekin bat datoz, 3.2) Atalean adierazi bezala hautatuz eta ArcelorMittalek hornituak.

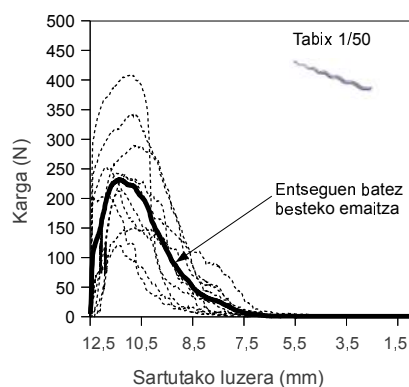
[Garcia (2004)]-k adierazten duen bezala, hainbat dosifikazio metodo izan da ere, hauek ezin dira orokortu eta arloko enpresek haien metodologiak ezarri dituzte lehiakortasunaren ikuspuntutik hobekuntzak lortzeko. Jarraian, nabarrena izango da, jardunbidea 2.3 Atalean zehaztu direnekiko ezberdina dela, egiten den lehendabiziko gauza, beste metodoetan ez bezala, pastaren osake-



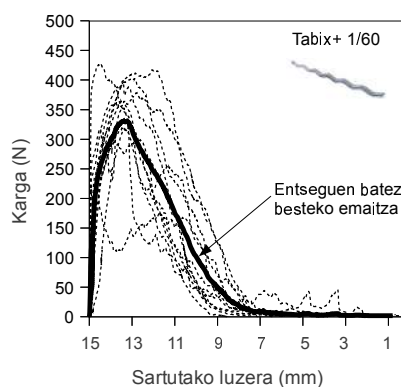
(a) HE 1/50



(b) HE+ 1/60



(c) Tabix 1/50



(d) Tabix+ 1/60

3.4 Irudia: Zuntz mota ezberdinen karga-desplazamendu kurbak.

ta ezartzea delarik, ondoren beharrezko agregakin lodi kopurua eta gehigarri portzentajeak zehazteko.

3.3.1 Pasta zehaztea

Enpresak urteetan zehar batu duen esperientzian oinarrituz, ingurunean erabiltzen diren agregakinentzako, hormigoi autotrinkotzaile metro kubiko bakoitzak 1000 kilogramo pasta izan behar ditu. Pasta hau zementu, ur eta milimetro bateko bahe irekiduratik igarotzen den harea zatikiaz osatzen da.

Proposatzen den erabileraren ondorioz, erasokortasun mailaren arabera Q_b o Q_c esposizio mota espezifikoek dagokien giroen arabera dosifikatu behar da hormigoia. Egiturazko Hormigoi Instrukzioak (bere 37.3.2.a Taulan), bi kasuetarako 350 kg/m^3 -ko gutxieneko zementu edukia eta gehieneko ur/zementu erlazioa ezartzen ditu, zorrotzagoa bigarren kasurako, 0.45-eko balioaz. Agre-

Bahea	Harea 0/4	Legarra 4/11	Konbinatua
31.5	100.00	100.00	100.0
25	100.00	100.00	100.0
22.4	100.00	100.00	100.0
20	100.00	100.00	100.0
16	100.00	100.00	100.0
14	100.00	100.00	100.0
12.	100.00	93.50	97.5
10	100.00	52.60	81.5
8	100.00	19.70	68.7
4	100.00	5.10	63.0
2	66.10	2.20	41.2
1	42.30	2.00	26.6
0.5	27.90	1.50	17.6
0.25	19.70	1.50	12.6
0.125	14.80	1.50	9.6
0.063	11.40	1.70	7.6

3.2 Taula: Agregakinen granulometria.

gakinen granulometriak (3.2 Taula) adierazten duenez, hareak bere pisuaren %42.3-a ematen dio pastari.

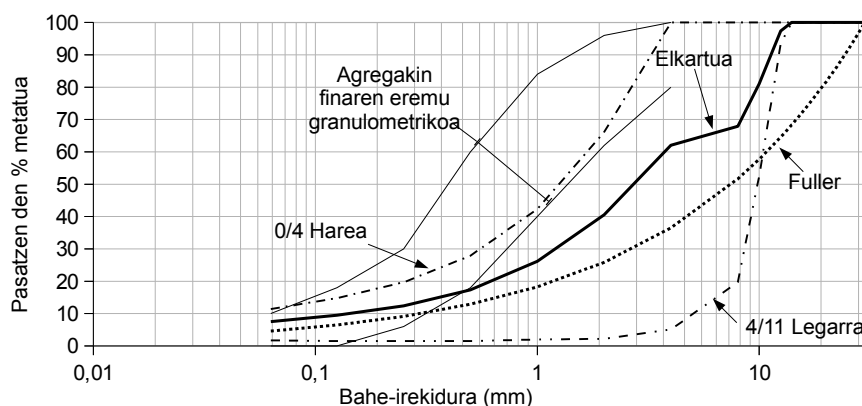
Amaierako hormigoian nahi diren ezaugarrien arabera, harearen zatia 1000 eta 1500 kg artean dabilela onartuz, 1100 kg harea erabiltzea erabakitzen da, horietatik 465 kg pastaren parte izango direlarik. Hasiera batean aipatu diren pastaren 1000 kg-etara hurbiltzeko, zementu eta ur kantitatearekin iteratu beharra dago, gutxieneko zementu eduki eta gehienezko ur/zementu erlazioaren mugak gainditu gabe. Horrela, 3.3 Taulan agertzen diren zenbatekoak ezartzen dira. Balio horiekin, gutxi gora behera 1070 kg-ko pasta pisua jotzen da, harea kantitatea ezarri diren mugen barruan dagoelarik.

Beste gomendio batzuek [ACHE (2008)], guztira 450-600 kg/m³ inguruko fino edukia behar dela adierazten du, kasu honetan ere bete egiten delarik 590 kg/m³ ingururekin. Haren granulometriak, araudian ezartzen diren goi eta behe mugei dagozkien baldintzak betetzen ditu, ez delarik, orokorrean, jatorri silizeoko eta 0/1 tamainako zuzenketa harearik erabili behar.

3.3.2 Ale-eskeletoaren optimizazioa

Hormigoi metro kubiko bakoitzeko 50 kg zuntz erabiltzea zehaztu denez diseinuz, beste agregakin bat bezala hartzen da kontuan ale-eskeleto trinkoaren bilaketan, ezaugarri egokidun hormigoia lortzeko asmoz, erresistentzia eta iraunkortasuna esaterako. Abiapuntu gehigarri bezala, aurreko atalean zehaztu den harea kantitatea egokitu egin beharko da agregakin lodiaren zenbateko ezberdinetarako, hutsune ehuneko txikiena lortzeko helburuaz. Agregakinen proportzio hauek, Fuller-en parabolarekin ahalik eta gehien doituz ezartzen dira (3.5 Irudia).

Asmo hori lortzeko ASTM C29/C29M arauak ezartzen duen jarraibideak hartzen dira aintzat, agregakinak lehorrean nahastu, pisu eta bolumen eza-guneko ontzian sartu, trinkotu eta ondoren pisatuz. Trinkotasun handiena



3.5 Irudia: Fuller parabola eta kurba konbinatua.

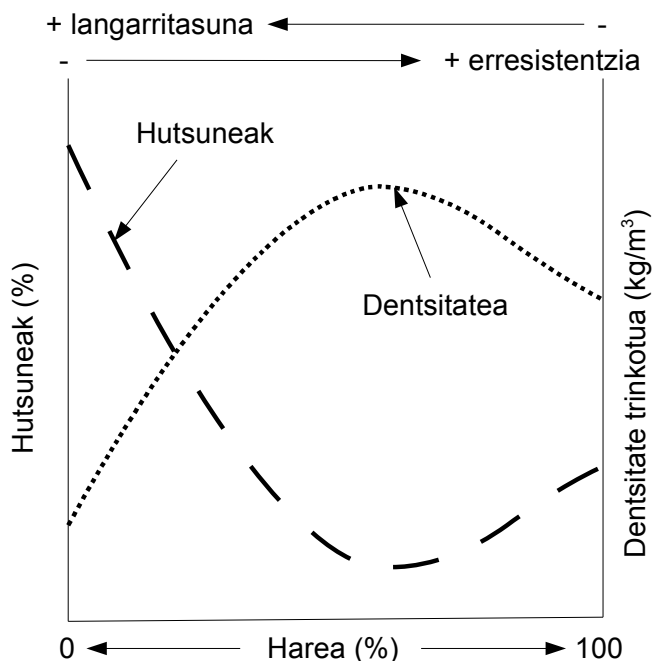
densitate altuena agertzen duen proportzioari dagokio, edo baliokidea dena, hutsune bolumen txikiena, 3.6 Irudian azaltzen den legez.

Egia esan, pausu honetan zuntzak bezalako agregakinaz borrokatu behar da, forma lerdeneoak itxura erlazioaren arabera, inguruko agregakinen kopena aldarazten baitute. Azpimarratzekoa da ez dela harea/legar erlazio aproposena hautatu trinkotasunari dagokion ikuspegitik. Balio ezin hobe horrek, harearekiko legar erlazio handiagoa behar luke, agregakin lodienak tamaina handiagoa izanez gero, gehiago baitira tarteko neurria duten agregakinak, paketatzea optimizatzeko [Garcia (2004)]. Hormigoari eskatutako autotrinkotasun ezaugarrien ondorioz gertatzen da desadostasun hau, ohikoa baino harea eduki handiagoa ezartzen baitute, agregakinen gehienezko tamaina mugatuaz batera. Joera honek, masa freskoaren langarritasunaren gehikuntza dakar, erresistentziaren kalterako, harea eduki hori ere mugatu behar delarik masa gogortuaren propietate mekanikoak era drastikoan murriztuz ez daitezken. Horretaz gain, birrindutako kareharria agregakin gisa erabiltzearen ondorioz, harea proportzioa handiagoa izango da agregakin biribilduek eskatzen dutenarekin alderatuz gero, kokatze eta marruskadurak eragiten duten masaren langarritasunaren murrizketa dela eta.

Agregakin jakin batzuentzako izan litekeen gutxieneko pasta edukitik urruntzak, ekoizpen eta ingurumen kostuen gehikuntza dakar, zementuaren erabilera handitzen baita, beste fino batzuen erabileraz orekatua izan daitekeen arren. Hala eta guztiz ere, proposatzen den erabilerak zementu eduki handiak ezartzen ditu aurretiaz.

3.3.3 Gehigarriak zehaztea

Gehigarrien zehaztapena era enpirikoan egiten da, ohiko hormigoi auto-trinkotzaileen ezaugarritze entseguen bitartez, kasu zehatz honetan, isurpen entsegua eta V inbutua erabili direlarik. Fase honetan bi gehigarri gehitzen dira masan, bata polifuntzionala eta beste superplastifikatzailea, jardun handiko ur murriztaile egitekoa betetzen duena. Bien arteko konbinazioak, amaierako emaitza optimizatzea ahalbidetzen du.

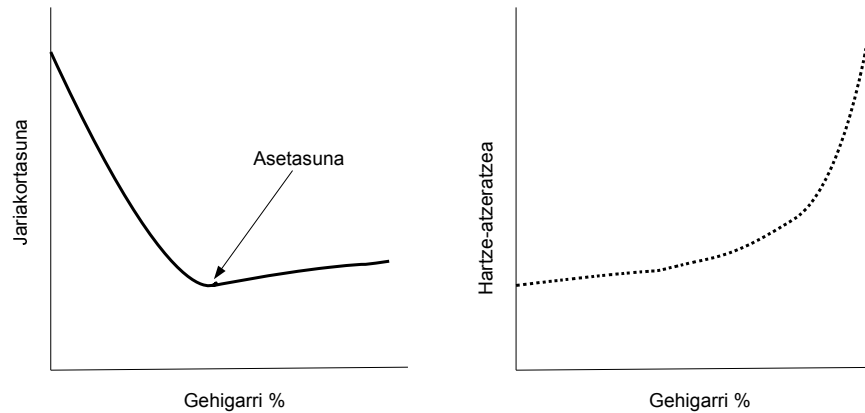


3.6 Irudia: Trinkotasun, erresistentzia eta langarritasuna harea ehunekoaren arabera.

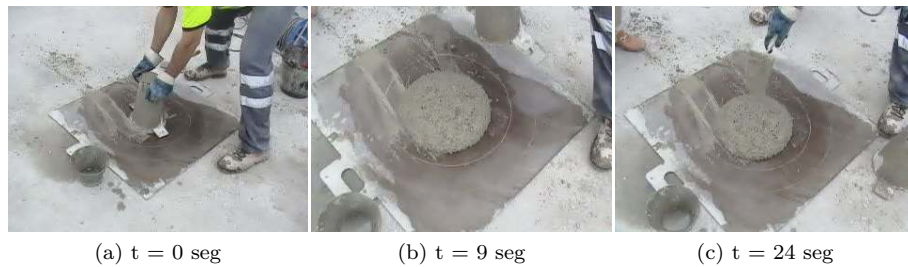
Proposatu den erabilerak, izango duen giroaren erasokortasunaren arabera, araudiak ezartzen dituen ur/zementu erlazio baxuak eta gutxieneko zementu eduki altuak (0.50-tik 0.45-ra eta 325-etik 350 kg/m³-ra, hurrenez hurren Q_a -tik Q_c -rainoko giroetarako), jatorrizko matrizeari, trinkotasun lehorraren arabera, asentu txikia izateko joera eragingo diote. Oinarri polikarboxilikodun gehigarri superplastifikatzailearen xede nagusia, zementu partikulen dispersioan datza masaren jariakortasuna handitzeko, ur/zementu erlazio baxua erabili arren, autotrinkotasun zehaztapenen barruko isurpen diametroa (ikus 2.1 Taula) lortzen delarik.

Zementuaren dispersio altuak, haren hidratazio azkarra eragiten du, masak duen likatasunarekin batuz gogortze hasiera goiztiarra ager dezakeelarik, elementuaren egikaritze egokia eragotzi dezakeena. Efektu negatibo hori orkatzeko gehigarri polifuntzionalaz osatzen da, aurrekoa baino askoz merkeagoa, aireztatzaile eta gogortze atzeratzaile lana egiten duena. Aire barneratzeak, masaren erreologia hobetzen eta balizko segregazioak, nagusiki zuntzenak lerdunenak izaki, ekiditen laguntzen du. Gehigarri mota bakoitzaren proportzioak, nahasketa egiten den urtaroaren, hotz ala bero, menpeko da ere, gogortzearen gehiegizko atzeratzea gerta daitekeelako, onargarria ez delarik.

Egindako entseguen emaitzek zehazten dute, propietate ezin hobeak gehigarri polifuntzional eta superplastifikatzailearen konbinaketaz lortzen direla, zementuaren pisuaren % 0.93 eta % 1.12, hurrenez hurren (3.3 Taula). Aldi berean, erresistentzia eta iraunkortasun egokia bermatzen da, nahasketan ur kantitate murriztua erabili baita. Gehigarri polifuntzional proportzioa bere goi mugatik hurbil aurkitzen da, superplastifikatzaile-aireztatzaile gisara lan



3.7 Irudia: Asetasuna eta gogortzearen atzeratzea gehigarri gaindosia dela eta.



3.8 Irudia: Isurpen eskasa Gehigarri superplastifikatzaile gabezia dela era.

eginez, baina atzerapen edo aire sartze handiegirik eragin gabe. Gehiegizko gehigarri kantitateak ez du mugagabe hariakortasuna handitzen, asetasun puntu bat dagoelako, gaindituz gero konstante mantentzen delarik eta nahi ez den atzeratzea eragin dezakeena (3.7 Irudia). Bestalde, komenigarria da superplastifikatzaile portzentajea kontrolatzea bere kostu altua dela eta, gaindosiak agregakinen segregazioa ekar dezakeelarik ere. Hormigoiaren airearen ehunekoak, % 2-ra mugatzen da.

3.8a-tik 3.8c-rainoko Irudien segidak erakusten duen bezala, gehigarri superplastifikatzaile dosifikazio laburrak zementu partikulen dispersio egokia galarazten duela egiaztatzen da, autotrinkotasun baldintzak lortzea ezinezko bihurtuz. Atariko froga honetan, hormigoi masak ez du 500 mm-ko diametro lerroa zeharkatzen, nahiz eta igaro den denbora araudiak zehazten duen gehienezko denbora baino askozaz handiagoa izan. Neurketa denborak oso laburrak dira eta haien doitasuna, kontrolaz arduratzen diren langileen erantzunaren menpeko da, neurketetan halako ziurgabetasuna ezarriz. Hura murrizteko ahalik eta erarik hobereana, balioen zehaztapena, T_{50} adibidez, entseguan zehar grabatutako bideoen edizioaren bitartez egitea da.

Osagaia	Zementua II 42.5R	Harea 0/4	Legarra 4/11	Zuntzak HE 1/50	Ura	Gehigarriak Poli. SP	
Kg/m^3	430	1100	725	50	175	4.00	4.80

3.3 Taula: Dosifikazio teorikoa.



3.9 Irudia: Laborategiko nahastearen isurpena.

3.3.4 Nahasketa prozedura

Erabilitako nahasketa prozedura, harea eta legarra nahastuz hasten da. Ondoren, zementua gehitu egiten da eta nahasketak lehorrean dirau. Banaketak homogeneo dirudienean, uraren $3/4$ eransten dira eta nahasketak jarraitzen du. Gehigarriak, gainerako urarekin jartzen dira eta zenbait minutuz nahasten da gehigarriek eragina izan dezaten. Azkenik, zuntzak gehitzen dira eta nahasketarekin jarraitzen da, haien banaketa oso eta zuzena izan dadin hormigoi matrizearen barnean.

3.3.5 Emaitzen onspena

Hormigoia blokeatu eta V inbutuaren entseguan ahoa zeharkatzeko denbora nahiko behar izan arren, metatutako masak gauzatzen duen presio gehikuntzari esker, hormigoia bultzatzen da. Alabaina, badira zenbait adibide [Nemegeer (1999)], irekidura zuntzaren luzeraren bikoitzera handituz, blokeo aukerak nabarmenki murrizten direla frogatzen dutenak. Inbutuaren irekidurak 65 ± 1 eta 75 ± 1 mm-ko neurriak ditu, ponpaketa tutuaren diametroa 140 mm-tako izango denean, inbutuaren irteera bikoiztuz eta zuntzaren luzera ia hirukoiztuz.

3.9 Irudiak laborategian diseinatutako dosifikazio teorikoaren isurpen entseguren hasiera, 500 mm-ko diametroa (T_{50}) iristen den unea eta lortutako amaierako diametroari (D_f) dagozkien segida erakusten du. T_{50} -eri dagokion zirkunferentzia gainditzeko masak behar duen denbora, araudiak baimendua baino apur bat handiagoa da, baina bolumen handiagoa fabrikatzeko zenbait doiketa arin egin beharra aurreikusten denez, onargarritzat hartzen da portae-ra.

Bestalde, ez da beharrezkoa aparteko erresistentzia erabilera honetan, hortaz harea/legar erlazio altuek eragin ditzaketen konpresio erresistentzia murrizpenak ez dira garrantzitsuak. Aldi berean zementu eduki altuek berez, erresistentzia nahikoa dakarkio hormigoari. Abiapuntu bezala 325 eta 350 kg/m^3 arteko gutxieneko zementu edukia ezarri da eta gehienez 0.50 eta 0.45

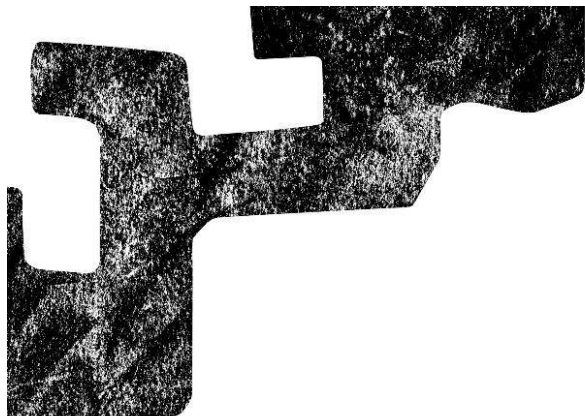
arteko ur/zementu erlazioa, giro kimiko erasokorrari dagokion esposizio mota espezifikorekin bat (Q_a , Q_b edo Q_c), ur-zikinak izateko aukera baitago, proposatzen den andel zilindrikoaren erabilera kasu. Horrek, orokorrean, 30 edo 35 MPa-eko konpresio erresistentzia lortzera bideratzen du. Beraz, erresistentzia moderatuko hormigoia diseinatzen da, hormigoi autotrinkotzaileen dosifikazioaren ondorioz eta egitura eraginpean izango duen giroari buruz aipatu denaz gain, araudiak baimentzen dituen behe mugak baino erresistentzia altuagoak izateko joera dagoela oinarri moduan hartuz.

3.4 Azken gogoetak

Aztertu diren zuntzak, eraikuntza alorrean erabiltzen diren ohikoenen artean aurkitzen dira. Hormigoian sartutako luzera laburrei dagokienez, biek ala biek dute antzeko erauztearen aurreko erresistentzia. Halaber, zuntzen tenkaketa argi eta garbi hautematen da behin hormigoi matrizetik erauziak izan direnean. Nahiz eta merkatuan elastikotasun-muga handia duten zuntzak eskuragarri izan, karbono eduki txikiko zuntzak erabiltzeko hautua egiten da erauzketa mekanismoa, apurketa mekanismoari nagusitzen baitzaio aztertutako erabileran. Forma gorabehera, itxura erlazioa da dosifikazioa eta nahasketan zuntz-trikuak sortzeko aukeran eragin handiena duen parametroetako bat. Zuntz mota ohikoenen itxura erlazio tartea, 38 eta 80 artean izan ohi da, luzera eta diametroaren arabera. Erabili den zuntza, tarte horren erdialdean aurkitzen da. Beraz, zuntz laburrago eta ugariagoak erabiltzea egokiago iritzi da, pitzaduraren kontrolean eta trakzio erresistentzian ekarpen eraginkorragoa dutelarik aldi berean.

Dosifikazioari dagokionez, zuntzek masaren langarritasuna murrizten dute, baina hormigoi autotrinkotzailea izanik, gehigarri superplastifikatzaileen erabilera egokiaz eragin hori indargabetua izan daiteke. Ondorioz, HAT-a dosifikatzearen zailtasuna ez da areagotzen, nahiz eta zuntzak bezalako agregakin lerdaren erabilera kontutan hartu behar den. Forma koefiziente baxuak eta lauza indize altuak aurkezten dituzten orri edo orratz itxurako agregakinen kasuan bezala, lar lerdanak diren zuntzek zementu kantitate handiagoa eskatzen dute eta nahasketa okerra eta hormigoi gogortuaren propietateetan eragin negatiboak sor ditzakete. Gaurdaino, halabeharrezkoa da dosifikazioa entsegu normalizatuen bidez egiaztatzea, materialaren portaera erreologiko egokia ziurtatuz, auresatea zaila baita.

Azpimarratu beharra dago, laborategi eta plantan egindako lanaren ezberdintasunaz jakitun izan behar dela. Esparru baten eta bestearen baldintzatzaileek, halako ezberdintasun bat agertzen dute lortutako emaitzetan. Hauek eta beste alderdi batzuk 4 Atalean aztertuko dira.



IV. ZATIA

**Eskala errealeko entsegu
kanpaina**

4 • GAIA

Egitura elementuaren egikaritzea

4.1 Sarrera

Ikerketa honen garrantzia, eskala errealeko egitura baten analisi eta esperimentazioan datza. Neurri honetako esperientzia gutxi aurki daitezke literaturan. Gai honetan, obraratzearen alderdi guztiak laburbiltzen dira. Ikerketak 3 metroko garaiera, 6 metroko luzera eta 0.15 metroko lodiera duen horma tarte zuzen baten eraikuntza du hizpide. Gai honen ekarpena interesgarri izan daiteke beraz, ondorengo ikerketen baitan etorkizunean izan daitezkeen egikaritzeentzako.

4.2 Plantako fabrikaziora estrapolatzea

Eskala industrialean ekoizpen prozesuak ezartzen dituen aldagaien inguruko ikerketa gutxi samar dago [Aitcin and Mehta (1990)]. Azterketa gehienak, laborategiko giro kontrolatuan nahastu den materialaren propietate mekanikoen ikerketan oinarritzen dira.

Zementua, adizio mineralak eta gehigarri kimikoak orokorrean aldaketa txikia duten produktu industrializatuak dira. Agregakinak, zatiki fin eta lodia, kontrol gehiago behar duten hormigoia osagaiak dira. Ezaugarrien aldakuntza ezberdina da neurri handi batean, kokapen geografikoaren ondorioz eta zehatzago, erauzi diren harrobiaren menpeko. Zatiki finaren kantitate handiago eta ur proportzio txikiagoak, tixotropia handiagoko masak sortzen ditu hormigoi autotrunkotzaileen kasuan, hormigoi arrunt batek baino energia gehiago behar duelarik homogeneizatzeko [Toralles-Carbonari et al (2003)].

Ohiko biltegi, pisatze eta dosifikazio tresneriez hornitua dagoen plantan fabrikatu da hormigoiak. Etengabe automatikoki kontrolatua dagoen 3 m³-ko edukiera duen nahasgailu finkoa erabiltzen da, agregakinak, zementua, ura, gehigarriak eta zuntzak gehitzen zaizkiolarik aipatutako ordenan. 4 m³ material fabrikatu direla kontuan hartuta, bi txandatan nahastu dira, bakoitzaren ostean hormigoi kamioira isuriz. Nahasketa-denbora handitu egiten da hor-

migoi arruntarekiko alderatuz, zatiki finaren kantitatearen ondorioz lehenbizi eta superplastifikatzailearen jardun sakabanatzailea bermatzeko beharra dela eta bigarrenez. Momentu eragileak egin beharreko potentzia, hormigoiaren jariakortasunaren adierazle ona da. Bestalde, zuntzak gehitzeak denbora hori luzatzea dakar indartzearen banaketa homogenea lortzeko.

4.2.1 Hezetasun kontrola

Hezetasun kontrola giltzarria da propietate autotrinkotzaileak dituen hormigoi baten dosifikazioari dagokionez. Masari gehitu zaion ur bolumenaz gain, ezinbestekoa da agregakinen hezetasun maila eta xurgatze ahalmena ezagutzea.

Hormigoi autotrinkotzaileen ur/zementu erlazioa, halabeharrez, mugatua da. Baitezpadakoa gertatzen da hortaz, osagaien aldetik, eta batez ere agregakinen, ur xurgatze edo gehitze oro kontrolatzea. Asmo horretarako, ezinbestekoa da neurketa tresneria egokiak izatea, plantan biltegiratutako material siloetan.

Hormaren egikaritzean erabili den dosifikazioak ur/zementu erlazio txikia ($a/c = 0.41$) du, baina hezetasun aldaketa arinek balio horretatik urrundu dezakete.

4.2.2 Prozedura eta nahasketa zikloak

Nahasketa prozedura laborategi entseguetan jarraitu den berdina da, lehendabizi lehorrean egiten delarik nahasketa, ondoren ura eta gehigarriak gehitze-ko. Zuntzen gehitzea salbu, eskuz egin baita zuzenean nahasgailura botaz, prozesu guztia automatizatua dago eta plantaren aginte kontrolatik monitorizatzen da. Zuntzak hormigoi kamioan gehitzea baztertu da, ez litzatekeelako nahasgailuaren ardatzaren motorrak egindako momentuaren balioa bezalako informazio baliagarriak bilduko, gehigarriek eragina izan duten eta masaren erreologia aldatu duten jakiteko beharrezko informazioa.

4 m³ AZIH eskatu direnez eta hormigoi-makinak 3 m³-ko bolumena duenez soilik, 2 m³-ko nahasketa ziklo bitan banatu dira, ondoz ondo hormigoi kamioan hustuz. Bide batez, ziklo bien artean, prozesuaren monitorizazioan zehar detektatu diren desbideratzeak zuzen daitezke.

Plantan ohikoa den nahasketa prozedura mantentzearen hautua egin da. Baztertu egin da beraz, 2.5.1 Atalean aipatu bezala, masaren propietateak hobetzen dituzten edozein motako nahasketa mailakatua erabiltzea.

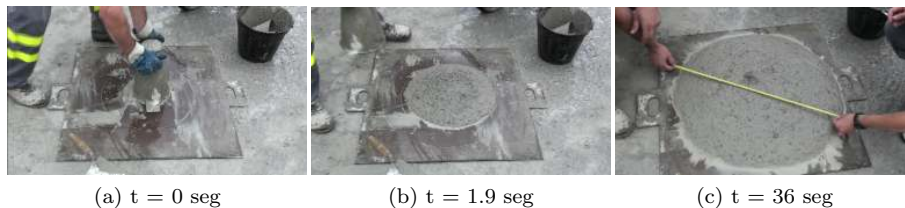
Azkenean dosifikatu den hormigoiak propietate autotrinkotzaileak aurkezten ditu, jariakortasun handiaz. Plantako nahasgailuaren errendimendu altuagoak eta produkzio arrazoiak direla medio, dosifikazioan egin behar izan diren aldaketek, erreologia ezberdina eman diote hormigoiari. Materialen kontsumo jarraituak, orokorrean propietate ezberdineko agregakinen etengabeko horniketa ekartzen du. Astero harea baliokidea balioztatzeko entseguak eta analisi granulometrikoak egiten dira plantan. Autotrinkotasun propietateekin bat datorren trinkotasun handiagoa lortze aldera, laborategian ezarritako hasierako dosifikazioa (3.3 Taula) aldatu egin da.

4.1 Taulan nahasketan eta horman azkenik erabilitako dosifikazioa laburbiltzen da.

Lortu den azkeneko diametroa 765 mm-koa da, 1.9 segundo behar direlarik 500 mm-ko diametroa iristeko. Agregakinen toberan sentzorarik ez egotea,

Osagaia	Zementua II 42.5R	Harea 0/4	Legarra 4/11	Zuntzak HE 1/50	Ura	Gehigarriak Poli. SP	
Kg/m^3	434	1141	626	50	178	4.43	5.02

4.1 Taula: Benetako dosifikazioa.



4.1 Irudia: Behin betiko nahastearen isurpena.

haien hezetasuna zehaztasunez neurtzea ezinezkoa egin du. Hormigoi autotrinkotzailea oso sentibera da hezetasun aldaketekiko. Agregakinen hezetasun maila handiagoak eragin ditzake aldaketa horiek.

4.1a eta 4.1c Irudiek altzairu zuntzez indartutako hormigoi autotrinkotzailearen isurpenaren segida erakusten dute. Entseguaren hasiera, 500 mm-ko diametroa iristen den unea eta entsegu amaitzean lortu den azken diametroa ikus daitezke irudietan.

4.3 Hormaren prestaketa

Hormaren prestaketa zenbait alderditan sinplifikatzen da, aldi berean beste zailtasun batzuk sortzen direlarik. Armatze fasea alde batera uzteak, prestaketa denbora nabarmenki murriztea ahalbidetzen du. Hormaren indartzea plantan bertan nahas daitezkeen altzairu zuntzez soilik osatzen dela kontuan harturik (kasu honetan izan den bezala), obrako lana nabarmenki murrizten da. Hortaz, ohiko barra korrugatuaren muntaia, gainjartzea eta lotura ekiditen dira eta baita estaldurak bermatzeko beharrezko diren banatzaileen kokatzea.

Egikaritze fasean zehar hormaren egonkortasunak bi alderdi ditu. Lehenengoa, hormigoiaren egoera freskoari dagokionez, 4.3.1 Atalean aitatzen da. Bigarrenak hormigoiaren egoera gogortuari egiten dio aipamen; hau da, behin hormigoiari enkofratua kendu zaiola. Planteatu den diseinuan bilatzen diren abantailek, altzairuzko barra korrugatu bidezko ohiko armatua kentzen dute. Beraz, ez da hormako armatuarekin gainjartzeko, zimendutik agerian itxarote armaturik behar. Horma eta zimendua konektatzen dituen armatu korrugatua jarri behar ez izateak dakartzan denbora eta lan aurrezpenak, hormak jasan beharreko makurdura esfortzuen balio absolutuen gorakada arina eragiten du. Proposatutako erabilerak osatzen duen itxura zilindrikoa dela eta, nagusiki trakzio esfortzuak agertuko dira makurdurek eragindakoak baino handiagoak izango direnak. Hormaren oinarriko giltzaduraren ondorioz zurruntasun galera eragiten da zimenduarekiko loturan. Hormaren egonkortasuna bermatzeko, bere desplazamendua loturan, ebakitzaille-giltza batekin galaraz daiteke, biraketa behin behineko elementuz eragozten delarik.

Proposatutako erabileraren multzoa, euste andel zilindrikoa, egonkorra den bitartean, beharrezko eskorak prest izan behar dira junturen arteko horma tarte bakoitza eusteko. Are gehiago, planteatu den ikerketan bezala, hormaren lodiera txikia denean beste bi neurriekiko. Elementu hau ez da inongo zimendurekin lotu, ezta ebakitzaille-giltzarik jarri, nabe baten barruan estalpean eraiki delarik. Gainera, ondorengo entsegu normalizatuak egiteko laginak erauzteko, andelaren kurbadura-erradioa alboratu da, 6 metroko luzera, 3 metroko garaiera eta 0.15 metroko lodiera dituen horma tarte zuzena egikaritzuz.

Hormaren neurriak bete beharreko ezaugarri, manei u eta ondorengo mozketaren adostasunaren arabera ezarri dira. Luzera nahikoa hautatu da tarte handia ibiliz segregazioaren informazioa eskuratzeko. Altuera nahikoa iritzi da masaren mugimendu bertikala aztertze eta lodiera, kontutan hartutako entsegu arauen arabera mugatua dator (4.5.1 Atala). Ez da interesgarritzat hartu altuera lar gehitzea, hormigoi freskoaren bultzada handiagoa eutsi beharra eragingo lukeelako eta, ondorioz, enkofratu bereziak erabili behar izatea.

Hormaren egikaritze eta mozketaren industria eraikin baten barruan gauzatu da (4.2 Irudia), hein batean behintzat, kanpoko baldintza klimatikoetatik isolatzea ahalbidetu duelarik. Aldi berean, ez dira enkofratua eta horma eze-gonkortzen lagunduko luketen haize bultzadarik sortu.

4.3.1 Enkofratua

Dosifikatutako hormigoiak propietate autotrinkotzaileak dituela kontuan hartuz, egikaritze eta azken emaitza alda dezaketen zenbait faktore aintzat hartu beharrekoak dira. Batetik hormigoi autotrinkotzaileek aurkeztu ohi duten akabera hobea, erabilitako enkofratuen kalitatearen arabera da neurri handi batean. Bestetik, enkofratu panelen junturak ondo zigilatu behar dira, hormigoi horien jariakortasun handiak kanporantz iragaztea eragin baitiezaiolke. Poliuretano kordoia nahikoa izan daiteke. Aztertutako kasuan, hormaren altuera txikia (3 metro) dela eta, ez dira bultzada eusteko enkofratu edo eskoratze berezirik erabili izan behar.

Bestela, enkofratu eta beste osagarriek (lotura-elementuak, eskora, etab.) hormigoi mota honek eragiten duen bultzada handiagoa eusteko diseinatuak egon beharko lukete, [Khayat and Omran (2007)]-ek azaltzen duten bezala. Alderdi honetan egindako akatsak, istripu larriak ekar ditzake egikaritzean zehar.

4.3.2 Hormigoitze prozedura

Hormigoitze prozesua ere erraztua gertatzen da neurri batean. Ohiko armatu, banatzaile eta abarren ezak, nahi den puntutik hormigoitzea ahalbidetzen du, oztopo barik enkofratuaren barrutik mugi daitekeelarik. Teknologia biak elkartuz, aldi berean hormigoi masa dardartzeko beharra ekiditen da. Horrekin, langileentzako obran sortzen diren zarata eta eragozpenak murrizten dira.

Aزتutako hormaren kasu zehatzean, era jarraituan hormigoitu da ezkerreko behe ertzetik ponpatuz. Hormigoiak hormaren luzera guztia ibiltzen du, alde batetik bestera eta aldi berean, enkofratua behetik gora betez. Isurketa operazioa 8 minutura mugatzen da. Ez da inolako dardaratzetik behar.



4.2 Irudia: Enkofratu eta junta zigilatuen ikuspegia.

Era honetan, zuntzen orientazioa behartu nahi da luzetarako norabidearekiko, materialaren anisotropia eraginez ardatz horren mesedetan. Planteamendu hau koherentea da euste andel zilindrikoen diseinu esfortzuekin. Horietan, esfortzu nagusia edukiaren bultzadaren ondorioz sortzen den trakzio perimetrala da.

Horma erdiko puntutik hormigoitzeko aukera logikoa baztertzen da, azterketa hormigoi barruko zuntzen balizko segregazio dinamikoaren analisisira ere bideratua baitago, masak ibili behar duen tarte luzeagoaren arabera. Era honetan, materialarentzako onargarria den gehienezko hormigoitze luzera zehazteko asmoa dago. Muga hori, isurketa puntutik urrun, zuntzik gabe edo nahikoa ez den indartzea azaltzen duten laginen kokapenak ezarriko du. Zuzenagoa litzateke ere, isurketa puntua altxatzea hormigoi mailak gorantz egiten duen neurrian. Era berean ikerketan zehar, masaren mugimenduaren eragina eza-gutu nahi izan da, kasu honetan norabide bertikalean, indartzeari eskatutako orientazio horizontalean.

4.3.3 Ontze prozesua

Altzairu zuntzez indartutako hormigoi autotrinkotzailearen dosifikazioaren diseinua eta obraratze prozedurak, batez ere, orientazio zehatza eragiten du eta, ondorioz, materialaren erresistentzia baldintzatzen. Argi dago beraz, egitura-elementu bakoitzak berezko azterketa zehatua behar duela. Planteatutako kasuan, aztertu den hormaren erabilera gisa, euste andel zilindrikoaren baitan integratzea proposatzen da.

Erabilera horren mugak topatzeko asmoz, edozein ontze prozesu baztertzea



(a) UPV/EHU Logotipoa

(b) IGET Logotipoa

4.3 Irudia: Uzkuetze pitzadurak hormaren goialdean.

erabaki da. Hori kentzeak, uzkuetze pitzadurak sor ditzake, Azken eta Zerbitzu Muga Egoeretan (AME eta ZME, hurrenez hurren) negatiboki eragin dezakeelarik, azterketa honetan segurtasunaren aldetik joz.

Materialaren erresistentzia murrizten duten uzkuetze termikoak gerta litezke egin ezean, matrizea pitzatu egiten baita kargak eutsi aurretik ere. Era berean, likidoak edukitzekotan egitura honi eskatzen zaion iragazgaitasun eskakizuna ere, murriztua gerta daiteke.

Aipatutako propietateak kuantitatiboki egiaztatzen dira hurrengo Gaietan (5.7 eta 6.6 Atalak). Aldez aurretik hala ere, behaketa kualitatiboa egiten da 4.4.1 Atalean.

4.4 Egitura elementuaren gaineko entseguak

Zuntzez indartutako hormigoiaren ohiko kontrol metodoak, lagin eta neurri txikiko elementuetarako diseinatuta daude. Beharrezkoa iritzi da zenbait tekniken garapena, Doktore Tesi honetan zehar aipatuko direnak, egitura edo eskala errealerara egokitzeke.

Dena den, zenbait entsegu kualitatibo egiten dira horman, hala nola, ikusizko analisia eta pulsu ultrasonikoen neurketa.

4.4.1 Ikusizko analisia

Enkofratua kendu ostean, hormaren gainazalaren azterketa sakona egin da. Alde batetik, ontzerik izan ez delako izan litekeen pitzaduren arrastorik ote dagoen ikusteko asmoz. Bestetik, hormigoiaren gainazalaren akabera aztertzen da, benetako erabileretarako egokitasuna egiaztatzeke (zuntzak ote dauden kanpoaldean, hutsuneak hormigoian, etab.).

4.4 Irudiak horma erakusten du enkofratua kendu ondoren. Zenbait enkofratu panelen kalitate eskasaren ondorio diren akabera ezberdintasunak antze-man daitezke bertan. Begi hutsez hala ere, ez da aurretik aipatu diren bezalako akats aipagarriak begiztatzen. Gainazalean zuntzik ez izateak eta hutsuneen tamaina txikiak, egitura-elementu multzoaren eta zatien portaera zuzena ziurtatzen dute.



4.4 Irudia: Hormaren ikuspegia enkofratua kendu ostean.

Azpimarratu beharra daude alabaina, obraratze prozesuan zehar gertatu diren zenbait gertakizun. Batetik, ondo aztertua zegoen hormigoia dosifikazioa aldatu egin da ponpaketa makinak toberan zuen bazkatzeko urarekin nahastu ondoren. Horrek segregazio arina ekarri du, hasiera batean zementuesnea ponpatu delarik. Zementu-esne honek, hormigoia gainean igeri egiten du hormaren goialdean pilatuz. Zonalde horretan barra bidezko armatu ezak, zementu kantitate handi eta ontze prozesurik egin ez izanarekin batera, uzurtze termikoaren ondoriozko pitzaduren sorrera erraztu du hormaren buruan zehar. Akatsik nabarmenenak enkofratu barruan jarritako logotipoen inguruan gertatzen da, 4.3 Irudian ikus daitekeenez. Hormaren goialdeko pitzadura arin hori, zuntzen segregazioak eta logotipoek eragiten dute, ebakidura ahulagoa dela eta. Gogoratu behar da gainera, hormigoitza hormaren behealdetik egin dela. Guzti honi lotua, hormaren goialdeak lurrunketa bidez ura galtzeko joera duen gunea da, efektua nabarmenagoa gertatzen delarik. Hala ere, hormaren oinarria zimenduari lotua ez dagoenez, haren uzurtze mugimendua ez dago galarazita eta ondorioz, libreki gertatzen da, arrazoi horregatik tentsio edo pitzadurarik sortu gabe. Bere portaera beraz, aurrefabrikatu batenaren antzekoa bihurtzen da, haren abantailetakoz batzuk hartuz. Bestalde, ponpaketa presioa handi samarra dirudi, hormigoia gainazalean txertatuta geratu diren ildoak ikusirik, 4.5 Irudian argi ikusten denez.

4.4.2 Pultsu ultrasonikoak

Lehenengo ikusizko azterketaren ondoren, UNE-EN 12504 arauaren arabera hormigoia gogortuan luzetarako uhin pulsu ultrasonikoen hedatzearen abiadura



4.5 Irudia: Tutuaren muturreko forma moldeatua ponpaketa presioa dela eta.

zehazteari ekin zaio. Azterketa elementuaren neurriak direla eta, haztagailuak hormaren alde berdinean jartzea erabaki da, zeharkako edo gainazaleko transmisioa gauzatzuz.

Zeharkako transmisio kokapena ezegokiena eta sentikortasun gutxien duena izan arren hormigoia trinkotasuna balioesteko, kasu honetan helburua, zuntz bidezko indartzeak neurketan eragina ote duen aztertzea da, gainazal-elementuaren norabide nagusietan (luzera eta altuera) indartze ezberdintasunik antzematen ote den egiaztatzeko. Aldi berean, kokapen hori interesgarria gertatu ohi da hormigoi matrizean pitzadurak antzemateko.

Balio numeriko eta ondorio guztiak, 5.2.2 Atalean laburbiltzen dira.

4.5 Laginen aukeraketa eta entseguak

Hurrengo atalean, hormaren neurriak arrazoituko dira egin beharreko entseguen arabera. Laginen oinarritzko neurriak ezartzeak, ondorioz, hormaren modulazioa zehaztea dakar.

4.5.1 Egin beharreko entseguak

Hasiera batean, entsegu kanpaina handinahia ezarria zegoen, zenbait alderditan aldatu egin behar izan dena. Jarraian, laginetan egindako entseguak zerrendatzen dira eta bakoitzari dagokion araua aipatzen.

- UNE 83507:2004 Hormigón con fibras. Rotura por compresión.

- UNE 83511:2005 Hormigón con fibras. Determinación de la resistencia a cortante.
- UNE-EN 14651:2007+A1 Método de ensayo para hormigón con fibras metálicas. Determinación de la resistencia a la tracción por flexión (límite de proporcionalidad (LOP), resistencia residual).
- UNE-EN 14721:2006+A1 Métodos de ensayo para hormigón con fibras metálicas. Determinación del contenido en fibras en el hormigón fresco y en el endurecido.
- UNE-EN 12390-8:2009 Ensayos de hormigón endurecido. Parte 8: Profundidad de penetración de agua bajo presión.
- UNE-EN 12504-4:2006 Ensayos de hormigón en estructuras. Parte 4: Determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos.

4.5.2 Laginen tamaina

Aurretiaz esan bezala, hormaren lodiera 150 mm-ra mugatu da entsegu guztien izendatzaile komuna ezartzeko asmoz. Entsegu normalizatu guztiek 150 mm-ko laginak erabiltzea baimentzen dute. Laginen tamaina hortaz, egin beharreko entsegu ezberdinen araudiak ezarriak dira.

Hormaren lodiera 150 milimetrora modulatu denez, beste neurri biek (luzera eta altuera) proportzionalak izan behar dute. Bi lagin neurri ezartzen dira, era berean entsegu mota bat baino gehiagorako balio dutenak. Alde batetik, 150 mm-ko aldean duten lagin kubikoak erauzteko beharrezko mozketak egiten dira eta, bestaldek, mozketa bidez 150 mm-ko ebakidura karratua eta 600 mm-ko luzeradun lagin prismatikoak lortuko dira.

4.5.3 Hormaren mozketa eskema

Hormaren mozketa eskemaren diseinuan, egitura osoaren adierazgarritasun egokia lortu nahi izan da. Lagin kubiko eta prismatiko zutabe uniformeak ezarri dira mozketa fasea errazteko. Pulsu ultrasonikoen emaitza ikusirik (5.2.2 Atala), lagin kubikoak erdiko zonaldearen eskumatara bildu dira.

Lagin kubikoen kopuru handiagoak, mozketa aurpegi gehiago adierazi nahi du eta metodo magnetikoak bertan erabiltzeko aukera. Asmo honek, zuntzen zenbateko eta orientazioa ziurtasun osoz zehaztea du helburu, ultrasoinu metodoaren bitartez lortu diren emaitza ezberdinekin alderatzeko.

Planteatutako mozketa eskema hortaz, 4.6 Irudian islatzen da. Bertatik lagin kopuruaren informazioa lortzen da. Moztuko diren 240 lagin kubikoen artetik, bazterreko bi zutabeak eta haien albokoak ezegokiak iritzi dira entsegu askotarako, estankotasun junturak txertatu baitira bertan. Lagin prismatikoei dagokienez, isurketa zonaldean, erdialdean eta amaierako eremuan aurkitzen dira. Guztira 140 lagin dira horman zehar banatuak daudenak.

Horretarako, horma etzan da horizontalki. Egiturarengan esfortzuak ekiditeko, profil metaliko bidezko egitura kokatu da hormaren alde banatan, haien artean zurrunki lotuak, enkofratuen panelak elkarri lotzeko erabili diren zuloetatik (4.4 Irudia). Egituraren iraulketa garabi autobulkatu baten bitartez gauzatu da, profilen egitura goitik oratu delarik, era suabe eta kontrolatuan jaitsiaraziz (4.7 Irudia).

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	15 cm
20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	15 cm
39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	15 cm
58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	15 cm
77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	15 cm
96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	15 cm
115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	15 cm
134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	15 cm
153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	15 cm
172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	15 cm
191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	15 cm
210	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228	15 cm
229	230	231	232	233	234	235	236	237	238	239	240	241	242	243	244	245	246	247	15 cm
248	249	250	251	252	253	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266	15 cm
267	268	269	270	271	272	273	274	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285	15 cm
286	287	288	289	290	291	292	293	294	295	296	297	298	299	300	301	302	303	304	15 cm
305	306	307	308	309	310	311	312	313	314	315	316	317	318	319	320	321	322	323	15 cm
324	325	326	327	328	329	330	331	332	333	334	335	336	337	338	339	340	341	342	15 cm
343	344	345	346	347	348	349	350	351	352	353	354	355	356	357	358	359	360	361	15 cm
362	363	364	365	366	367	368	369	370	371	372	373	374	375	376	377	378	379	380	15 cm

4.6 Irudia: Hormaren mozte eskema eta probeten banaketa.



4.7 Irudia: Egituraren iraultzea garabi bidez.



(a) Horma-mozketa sistema



(b) Horma zatiketa

4.8 Irudia: Hormaren mozketa prozedura.

Behin horma horizontalean kokatu dela, gaineko profil egitura askatu egin da. Mozketa egiteko eta laginak eskemaren arabera erauzteko, horma-mozketa sistema erabili da diamante diskoz hornitua. Finkatze errailak behealdeko profil egiturari lotu zaizkio 4.8 Irudian erakusten den bezala. Prozedura honekin, horma 6 zatitan banatu da, jarraian bakoitzaren lerroak moztuz hormaren luzetarako norabidean. Alboz-alboko laginen mozketa disko ebakitzaille simple eta ekonomikoagoaz egin da.

4.6 Azken gogoetak

Lehenengo ondorio gisa, obrako ohiko egoerako benetako egituraren egikaritzea eta laborategiko giro kontrolatuan egiten den lanaren arteko ezberdintasun nabarmena azpimarratu beharra dago. Eragile askoren parte hartzeak zaildu egiten du, eta sarri ezinezko bihurtu, guztien arteko komunikazio egokia kasu askotan. Ikerketa honetan batzen den esperientziak, interes handiagoa du hortaz, etorkizuneko gauzatze eta ikerketek akats berdinak egin ez ditzaten.

Egikaritze azkartasuna nabarmenki handitu egiten da, armatze eta dardaratze lanak batez ere ekiditean. Enkofratu irazgaitz eta behin behineko eskora elementuen kokapenak ez du inolaz ere sistemaren denbora laburtzea aldatzen. Kostua ere murriztu egiten da fase horiek kentzean, nahiz eta ez horren nabarmenki materialen prezioen gehikuntza dela eta. Zuntzen erabilerak altzairu zenbatekoa metro kubikoan murriztea ahalbidetzen dute, pitzaduren kontrollean duten portaera hobearen ondorioz, baina aldiz, gaur egun haien prezioa barra korrugatuena baino handiagoa da. Aldi berean, autotrinkotasun eskakizunek, zementu edo zatiki finaren kantitate handiagoa erabiltzera behartzen dute, dagozkien gehigarri superplastifikatzaileekin batera, hormigoia garestitzen dutelarik.

Soilki ikusizko alderdiari erreparatuz, hormaren egikaritzeak zuzena dirudi. Erabili diren enkofratu batzuen kalitate eskasaren ondorio diren zonalde batzuetako akaberak salbu, gainontzekoak akabera ona du eta ez da zuntzik agerian ikusten gainazalean. Nahiz eta arazorik ez den egitura-ikuspuntutik, haien herdoiltzeak multzoaren estetika kaltetuko luke.

Egin diren entseguetan zehar, pultsu ultrasonikoen metodoa zuntzen banaketa edota orientazioa antzemateko egokia ez dela egiaztatuko da. Neurtutako balioek ez dute argi adierazten hasierako hipotesietan aurreikusitako orientazioa eta hurrengo ataletan egiaztatu egiten dena (5 eta 6 Gaiak).

5. GAIA

Entsegu ez-suntsitzaileak (EES)

5.1 Sarrera

Entsegu ez-suntsitzaileak (NDT) materialen osagai eta propietateak aztertzeko tekniketari oinarritzen dira, laginean aldaketarik eragin gabe. Ezinbestekoa da haien garapena, egitura-elementu errealean erabiltzeko. Azken emaitza alda dezaketen baldintzatzaile guztiak direla eta, laborategi azterketa eta obran bertan egindakoen artean aldea izanik, egituraren egokitasuna zalantzarik gabe egiaztatu behar da, egitura- eta funtzionaltasun ikuspuntutatik.

Egindako esperimentu-kanpainak, aipatu den interesean du jatorria. Lehen-tasuna du hortaz, era zuzen edo zeharkakoan indartzearen kokapena, eta ondorioz zerbitzu eta azken muga egoeren aurreko portaera, zehaztea ahalbidetzen duten metodoen bilaketak.

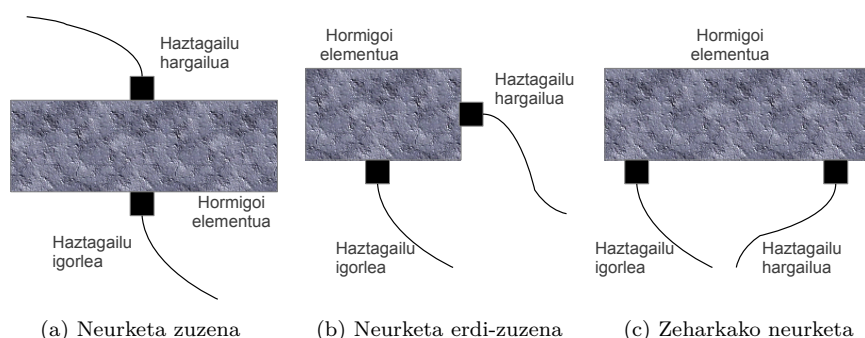
Jarraian horietako zenbait entseguren emaitzak deskribatzen eta biltzen dira, nola hala, pultsu ultrasonikoak, metodo estereologikoak, ardatz-tomografia konputerizatua, metodo magnetikoak eta azkenik, hormigoia iragazkortasun zehazpena.

Azpimarratu beharra dago guzti horien artean, pultsu ultrasonikoen zehaztapena soilik dela benetan ez-suntsitzailea den bakarra, horman bertan gauzatu baita enkofratua kendu ostean. Gainontzeko guztiak laginetan erabiltzen dira, entseguan zehar suntsituak ez izan arren, hormatik mozketa bidez erauzi baitira.

5.2 Pultsu ultrasonikoen abiadura

Pultsu elektrikoaren sorgailuaren bidez, luzetarako hainbat dardara pultsu igortzen dira hormigoia gainazalarekin kontaktuan dagoen haztagailu igorle bati esker, hura zeharkatzen eta bigarren haztagailu batek jasotzen dira, seinale elektrikoetan bihurtzen dituelarik ibilbidean emandako denbora neurtuz jarraian.

Haztagailuen kokapena era zuzenean, erdi-zuzenean eta zeharka edo gaina-



5.1 Irudia: Haztagailuen kokapena.

zalekoa izan daiteke. Pultsuak egin beharreko ibilbidean datza ezberdintasuna, zuzena izan daitekeena haztagailuak neurtu beharreko elementuaren kontrako aldeetan kokatuz, makoa alboko aurpegietan ezartzen badira eta gainazalekoa aurpegi berdinean baldin badaude (5.1 Irudia).

Azterketa honen helburua, hormaren norabide nagusi bietarako (luzera eta altuera), zuntzen orientazioan ezberdintasunik detektatu ote daitekeen zehaztea da, ondoren gainontzeko entseguekin erkatuko direlarik. Hipotesi honen oinarria, zuntz gehiago lerrotatuak dauden norabideetan materialaren balizko eroangarritasun hobean datza. Egitate honek, *in situ* obren kalitate kontrollean bide berria ireki lezake. Bistan denez, uste hori aztertua bezalako egitura-elementuentzako da baliagarria, aztertutako norabide biek hirugarren ardatzari, lodiera, dagokiona baino neurri askoz handiagoak dituztelako eta xfla elementutzat har baitaitezke, zuntz bidezko indartzea norabide laburrenean mespretxagarria izan daitekeelarik.

5.2.1 Entseguaeren prozedura

Pulstu ultrasonikoen abiaduraren neurketa egiteko, 30 x 30 cm-ko aldea duen lauki-sare zenbakituz zatitu da horma, 5.2 Irudian erakusten den bezala. Lauki bakoitzaren barruan, 5 neurketa puntu ezarri dira. Lehenengo puntuan, laukiaren erdiari dagokiona, igorlea kokatzen da bertatik alboko laukiekiko neurketak egiteko, bai horizontalki zein bertikalki. Marraztutako beste 4 puntuek, lehenengoa inguratzen dute ezker, eskuin, goian eta behean banaturik 5 cm-ko tartetaz. Puntu hauek, erdikoarekin batera, amaierako hargailua kokatzeko eta neurketa egiteko balio dute.

Dagokion arauan gomendatzen den bezala (UNE-EN 12504-4), zeharkako transmisiorako zenbait neurketa egin dira haztagailuak tarte ezberdinetan kokatuz. Ibilbidearen luzera zehatzari dagokionez, igorle eta hartzaileen taiminak eragiten duen ziurgabetasuna ezabatzeko aukera ematen da horrela.

Erabilitako prozedurak beraz, laukiaren erdiko puntutik igorritako eta alboko laukian lehenengoarekin lerrotatuta dauden hiru puntutan jasotako seinalearen neurketa ezartzen du, azken hauek beste erdiko puntua eta 5 cm-ra distantziakide diren albo banatako beste bi puntuak direlarik. Hiru puntu hauek lerro bertikala osatuko dute neurketa bata bestearen gainean dauden bi laukiren artean egiten denean eta horizontalki lerrotatuta egongo dira, luzeta-



(a) Neurketa puntuak

(b) Ultrasoniu tresneria

5.2 Irudia: Neurketa puntuak eta tresneria.

rako ardatzaren arabera alboz-albo dauden bi laukiren arteko neurketak egiten direnean.

Batutako emaitzetara (denbora eta tartea) hobeto egokitzen den erregresio lerroaren tangentea, aztertutako zonaldearen abiaduratzat hartu behar da. Mugatze-koefiziente (R^2) baxua lortzekotan, pitzadura edo hutsune eran azaltzen den ez-jarraitasun baten ondorio izan daiteke.

Hortaz, aztertu beharreko puntu bakoitzeko 6 neurketa egin dira, haztagailu igorlea laukietako baten erdiko puntuan kokatuz eta jarraian, haztagailu hartzailea alboko laukietako baten hasierakotik 250 mm, 300 mm eta 350 mm-ra aurkitzen diren beste puntuetan. Segida bi aldiz errepikatu da zehaztutako 6 neurketak osatu arte.

Seinalearen igorketa beti egin da ezkerretik eskuinera edo goitik behera hormaren altxaera nagusiari dagokionez. Era honetan, pultsua erdiko puntuetako batetik kitzikatu egiten da eta bata bestearen segidan jasotzen da alboko laukiaren 5 puntuen multzoan neurketa bakoitzarentzat; ezkerreko, erdiko eta eskuineko puntuetan azterketa horizontalari dagokionez eta goiko, erdiko eta beheko puntuetan analisi bertikalaren kasuan.

Hurrengo atalean adieraziko den bezala, teknikak ez du hormako zuntzen indartze banaketa eta orientazioaz datu argigarririk lortzeko biderik ematen. Hormaren mozketara prozedurarekin jarraitzeko interes handiagoa dela eta, ez da beharrezkoa iritzi egitura guztia aztertzea, hau elementuaren zenbait errenkada eta zutabera mugatu delarik. Azterketa guneak horman zehar banatu dira, ahalik eta neurketa adierazgarrienak lortzeko asmoz.

5.2.2 Neurketen emaitzak

5.3 eta 5.4 Irudietan, pulsu ultrasonikoen hedatze abiaduren emaitzak azaltzen dira, denbora-tartea binomiaren balioetara hobeto egokitzen den erregresio lerroak bertikalarekiko osatzen duen angeluaren tangentean oinarrituz balioetsiak.

Azpimarratu beharra dago dagokion araudian proposatzen den metodologia ez dela guztiz egokia, aztertu diren puntu askok larregizko balioak baitituzte. Egindako zenbait neurketek puntu bakoitzean egindako 6 neurketentzako antzeko denborak balioesten dituztelako gertatzen da, seinaleak jarraitu beharreko ibilbidearen luzera gorabehera eta baita egindako neurketaren balioarekiko askea ere.

Egoera honetan, erregresio lerroaren malda oso txikia da, abiadura balio handia dakarrena eta bat ez datorrena ultrasoinu tresneriaz neurtu den denborarekin, azken honekiko independentea izan litekeelarik. Zuzenagoa dirudi hedatze abiadura hori, distantziaren arabera neurtu diren sei balioen artean zehaztu den batz besteko aritmetikokoan oinarrituz ezartzea. Balio guztiak eta arauan ezarritakoaren eta proposatutakoaren arteko ezberdintasuna A Eranskinean biltzen dira.

Fase honen ondorio zuzenena, eta egin bitartean antzeman zitekeena, egindako neurketen dispertsio eta desadostasuna dira. Hormaren goialdean zuntz segregazio arina aurreikusten zenez egikaritze prozesuaren ondorioz, metodoak abiadura balio ezberdinak eman behar izan zituen hormaren goi eta behe aldean artean, islatua izan ez dena. Aldiz, ardatzen batekiko zuntz lerrokadura handiagoa espero zen zonaldeetan, trantsizio denbora handiak izan dituzte emaitza gisa.

5.3 Metodo Estereologikoak

Estereologia, ebakidura lauen analisisian datza, aztertutako kasuaren laginen mozketa aldeak izan daitezkeelarik, hiru dimentsioko multzoa osatuz haietan oinarrituz. Doktore Tesi honetan, lagin bakoitzaren zuntz zenbatekoa ezagutu nahi da mozketa aurpegietan dauden moztutako zuntz kopuruaren arabera.

Hasierako datu gisara, ezinbestekoa da 2.2.2.2 Atalean zehaztutako norabide faktorea ezagutzea. Aurkako bidea ere egin daiteke eta zuntz zenbatekoa eta norabide faktorea ezagutuz, ebakidura baten zuntz kopurua zehaztea, [Dupont and Vandewalle (2005)]-ek egin duen bezala.

Ia ezinezkoa gertatzen denez tamaina errealeko egitura batean indartze mota hau uniforme izatea, ikerketa honetan lehenengo bidea hartuko da mozketetan agerian dauden zuntzak zenbatuz.

5.3.1 Ebaketa aurpegien azterketa

380 laginen mozketa ondoan, ugariak dira zuntzak zenbatu daitezkeen aldeak. Lagin kubikoak aztertzeari ekin zaio, antzeko aldeko geometriak egokiak egiten baititu asmo honetarako. Horien artean, hormaren erdiko zutabe bat hautatu da, masaren mugimenduen adierazgarri izan daitekeena.

Hormaren ardatz nagusien arabera, hormigoia ezkerreko behe ertzetik onpatu da luzetarako norabidea edo X ardatzean zehar enkofratu osoa ibiliz. Y ardatza zeharkako norabideari dagokio, Z ardatzak bertikalarekin bat egin

1,12		6,59	1,88	0,56	
0,96		5,42	1	0,89	
1,33		4,96	1,71	1,01	
1,15		5,55	2,26	1,02	
3,02		3,63	1,07	2,1	
2,51		4,4	2,37	1,61	
1,81		5,44	0,98	1,34	
2,46		2,51	0,36	1,75	
1,02		3,59	0,84	1,52	

5.4 Irudia: Zonaldekako pulsu ultrasoinikoen hedatze abiadurak (norabide bertikalak).



(a) Mozketa plano bertikala



(b) Mozketa plano horizontala

5.5 Irudia: Ebakidura plano normaletan moztu diren zuntzak.

duen bitartean. Ezarri den prozeduraren arabera, 17 laginen eskumako, X positiboak, eta goiko, Z positiboak, aurpegietan moztu diren zuntzak zenbakitu dira 5.5 Irudian erakusten den bezala. Bertan aurrerago deskribatzen diren metodo magnetikoen datuak gehitu dira lagin bakoitzak duen zuntz zenbatekoa zehazteko. Balio horietatik abiatuz, dagokion norabide faktorea kalkulatzeko nahia dago.

5.3.2 Norabide faktorearen balioztapena

Zuntzen orientazioa obra erreal bateko egoeran, eskala txikiko laborategiko azterketa kontrolatutik oso bestelakoa da, segregazio aukerak eta masaren mugimendu norabideak mugatuta daudelako hein batean. Ondorioz, ezinezkoa da norabide faktorea bakarra izatea horma guztiarentzako, laginekin gertatu ohi den ez bezala. Aldi berean, zuntzen banaketak aldaketak jasan dituzenez, 5.1 Taulan agertzen dira lagin bakoitzaren zenbatekoak gainontzeko balioekin.

5.1 Taulan bildu diren datuetatik, luzetarako norabideari dagokionez norabide faktorea 0.69-koa dela ondorioztatzen da, %11-ko aldakuntza-koefizienteaz. Emaiza hauek bat datoz literaturan [Dupont and Vandewalle (2005)]-ek aurkitutakoekin noranzko biko orientazioetarako. Lortutako balioak are handiagoak dira, hasierako hipotesien arabera X edo hormaren luzetarako norabidean aurrez erabakitako orientazioa behartu nahi baitzen.

Norabide bertikalak orokorrean, faktore txikiagoa du abiadura eremua ez baita horren bizia norabide horretan. Azpimarratzekoa da, zutabe aztertuen erdi-goialdean, eremu hori indartsuagoa izan dela eta ondorioz, zuntzak Z norabidean ere lerrotatu dira. Guztiz norabide bakarreko orientazioa ez izan arren, behealdean zuntzak nagusiki luzetara antolatzen dira eta antzera beste bi norabideetan. Goialdean aldiz, badirudi norabide bertikalak garrantzi handiagoa hartu duela luzetarakoaren kalterako, nahiz eta azken honek nagusi izaten jarraitu.

Metodo magnetiko (5.4 Atala) eta jariakinen dinamika konputazional (7 Gaia) bidezko ondorengo analisisiek, atal honetako emaitzak berresten saiatuko dira.

Lagin Zbk.	Zuntz kop. mozketan		Zenbatekoa (Kg/m ³)	Norabide faktorea	
	bertikala	horizontala		X	Z
66	11	27	6	0.53	1.30
85	45	53	22	0.61	0.72
104	91	35	41	0.63	0.24
123	123	87	54	0.69	0.49
142	138	63	63	0.63	0.29
161	167	47	66	0.75	0.21
180	146	66	63	0.64	0.29
199	150	96	53	0.81	0.52
218	113	68	52	0.62	0.37
237	90	67	41	0.63	0.47
256	126	93	48	0.72	0.53
275	135	48	48	0.79	0.28
294	198	74	70	0.79	0.30
313	197	54	76	0.73	0.20
332	169	44	63	0.74	0.19
351	192	41	74	0.72	0.15
370	215	N/A	78	0.76	N/A

5.1 Taula: Norabidea faktorearen balioztapena.

5.4 Metodo magnetikoak

Berriki, 2.2.4 Atalean azaltzen diren teknika ez-suntsitzaile berriak indarrez sartu dira, horman zuzenean erabil daitezkeenak elementu txikien kasuan eta laginak behar izanik benetako erabileretan. Guzti horien artean, ikerketa honetan erabilitako metodo magnetikoa iritzi da interesgarriena.

Entsegu hau eremu magnetiko bat sortzean datza, AZIHAT laginak bertan tartekatuz eremuan eragiten den aldakuntza balioztatze. Zehazki, eremuaren induktantzia (L) da neurtu beharreko aldagaia.

Eremu magnetikoan tartekatzen diren material ferromagnetikoen, altzairu zuntzen kasu, hura alda dezaketela aski ezaguna da. Hormigoia eta beste indartze material batzuek, zuntz polimerikoak adibidez, ikusezinak dira metodo honentzako.

5.4.1 Entseguaren konfigurazioa

AZIHAT-aren propietate magnetikoen azterketa, eremu magnetiko ezberdinek sortzen dituzten hiru haril erabiliz gauzatu da. Luzera ezberdineko kobre biluzia harilduz eraiki dira lauki baten inguruan. 5.2 Taulak, laukien neurri eta harildu den kablearen ezaugarriak laburbiltzen ditu.

1. eta 2. harilek antzeko ezaugarriak dituzten arren, 2. harilaren fabrikazio prozesua nahiko bakuna izan da, horrek lortu diren emaitzetan eragin nabarmenik izan lezakeen zehazteko. Kablearen luzera ere aldatu egin da 3. harilean, intentsitate ezberdineko eremuetan hartu diren neurketen arteko erlaziorik ote dagoen egiaztatze. 5.6 Irudiak hiru harilak erakusten ditu entseguak egiten diren bitartean.

Aldi berean, erabili diren neurketa tresneriak ere ezberdinak izan dira zehaztasunari dagokionez. 1. harilaren neurketetan AGILENT U1732A inpedantzia

Haril Zbk.	Aldea (mm)	Altuera (mm)	Kable diametroa (mm)	Kable mota	Itzuli kopurua	Induktantzia (H)
1	170	150	0,30	Kobrea biluzia	8800	12.3
2	170	150	0,30	Kobrea biluzia	8800	13.4
3	170	150	0,30	Kobrea biluzia	6600	8.16

5.2 Taula: Marko eta harilaren ezaugarriak.

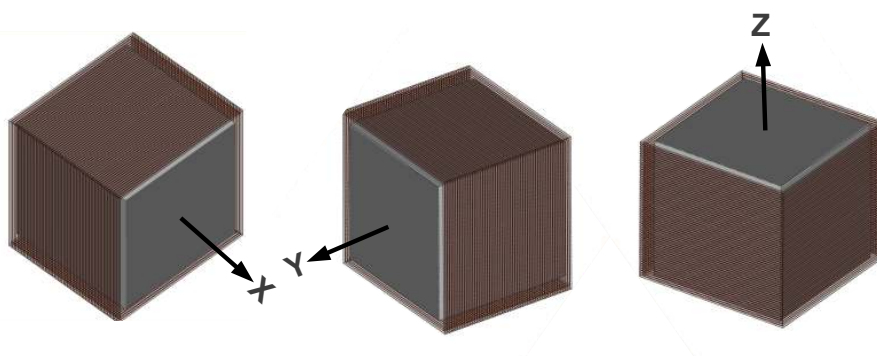


(a) 1 Harila

(b) 2 Harila

(c) 3 Harila

5.6 Irudia: Entseguetan erabilitako harilak.



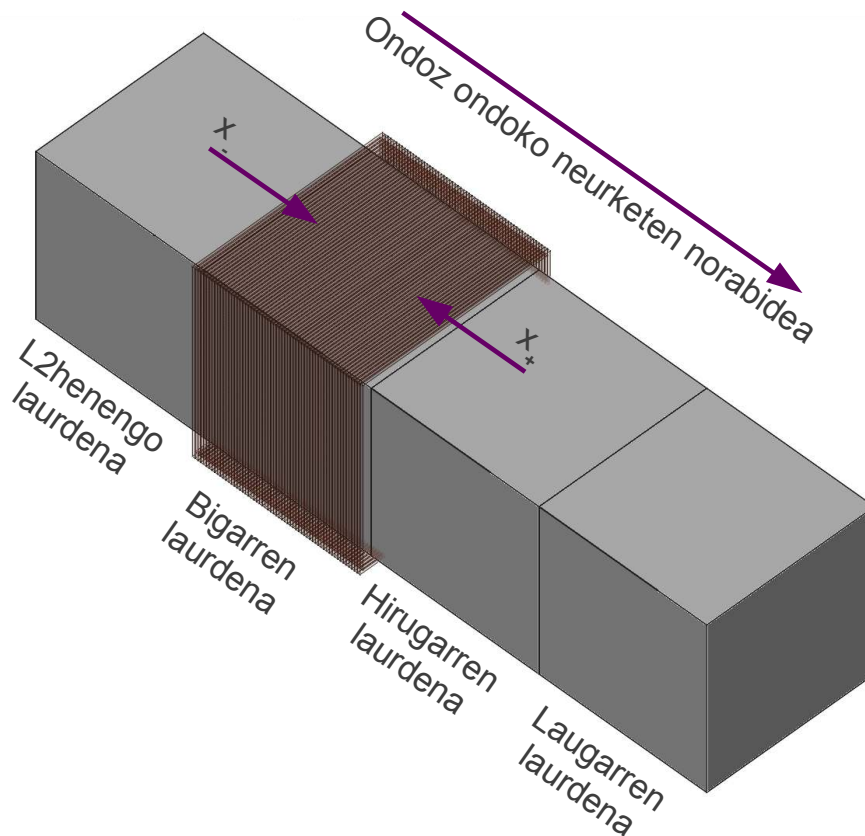
5.7 Irudia: Lagin kubikoak neurtzeko prozedura.

analizagailua erabili da, 2. eta 3. harilen balioetarako LCR 2821A zurbia erabili den bitartean.

Neurketa horiek, ia hormaren osotasunean egin dira, 195 lagin kubiko eta 97 prismatiko aztertuz, 5.9 Irudian azaltzen den bezala.

5.4.2 Lagin kubikoen azterketa

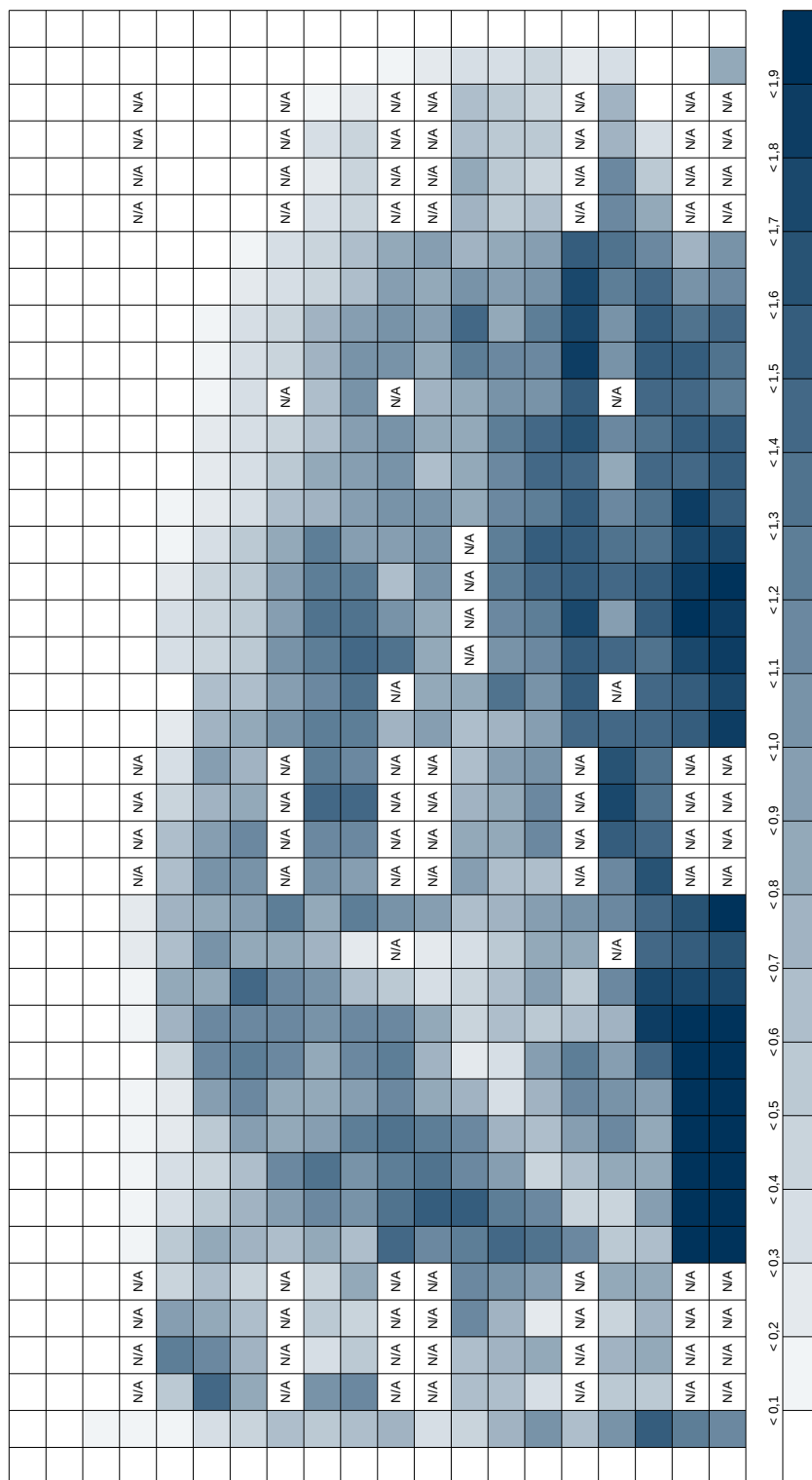
Aurreko atalean azaldu bezala, lagin kubikoetan hiru neurketa egin dira, ardatz nagusi bakoitzeko bana. 5.10-tik 5.13-rako Irudiek, ardatz bakoitzarekiko detektatzen den zuntzen orientazio proportzioa eta neurketa horien batz bestekoa erakusten dute kolore kodearen bitartez. Neurketa guztien balioak B.1 Eranskinean biltzen dira.



5.8 Irudia: Lagin prismatikoak neurtzeko prozedura.

15 cm	15 cm	60 cm	60 cm	60 cm	15 cm	15 cm	60 cm	15 cm	15 cm	60 cm	15 cm	15 cm	15 cm	60 cm	60 cm	15 cm	15 cm	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38
39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57
58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76
77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95
96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114
115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133
134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152
153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171
172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190
191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209
210	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228
229	230	231	232	233	234	235	236	237	238	239	240	241	242	243	244	245	246	247
248	249	250	251	252	253	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266
267	268	269	270	271	272	273	274	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285
286	287	288	289	290	291	292	293	294	295	296	297	298	299	300	301	302	303	304
305	306	307	308	309	310	311	312	313	314	315	316	317	318	319	320	321	322	323
324	325	326	327	328	329	330	331	332	333	334	335	336	337	338	339	340	341	342
343	344	345	346	347	348	349	350	351	352	353	354	355	356	357	358	359	360	361
362	363	364	365	366	367	368	369	370	371	372	373	374	375	376	377	378	379	380

5.9 Irudia: Metodo magnetikoan erabili diren laginak (beltzez).



5.10 Irudia: X norabidearekiko induktantzia aldaketaren adierazpen grafikoa.

Argi eta garbi antzematen da, zuntzek hartzen duten orientazioa luzetarako norabidearekin bat datorrela, X ardatza, masaren mugimendua dela eta. Zenbait tokitan, mugimenduaren osagai bertikalak zuntzak Z ardatzarekin gehiago lerrokarazi ditu.

Aztertutako zonaldea gorabehera, zeharkako norabidea, edo Y ardatza, induktantzia aldakuntza gutxiena aurkezten duena da, espero izatekoa izanik hormaren lodiera txikia eta enkofratuek eragiten dituzten horma-efektuak direla eta.

Azaldu diren balioak ikusirik, hasierako hipotesi guztiak frogatutzat har daitezke. Hormigoiaren ponpaketa ertz batetik eginez, zuntzak hormaren luzeran zehar lerrokatzera behartzen dira. Tutua igo ez denez hormigoitze prozesuan zehar, nahi den norabidea zenbait lekutan alda dezaketen mugimendu bertikalak ere gertatzen dira. Gune hauek hormigoitze tutuaren albo banatan aurkitzen dira nagusiki, batez ere haren ezker aldean, hormaren albo eta barruan dagoen tutuaren artean dagoen tarte txikia dela eta, masa goranzko norabidean bakarrik behartzen duelarik.

Obra egoerak nabarmenki baldintzatu du hormaren egikaritzea. Masa freskoa ponpatzeak dakartzan abantailak, hormaren goialdean eragin den segregazioak baliozabetu du. Ponpaketa makinaren toberak barnean zuen bazkatze ura AZIHAT-arekin homogeneoki nahastu ez denez, hormaren goialdera igeri egin duen mortero-esnea sortu da. Hori da hormaren goiko zatian dauden laginek, edozelan kokatuak ere, eragiten dituen eremu magnetikoa ez aldatzearen arrazoia.

Laborategian oso tresneria zehatzarekin egiten diren neurketa kontrolatuak, obran bertan eskuzko haril eta tresneriaz baliatuz egiten diren neurketekin erlazionatu ahal izateko eta beharrezko liratekeen kalibraketa eredu batzuk ezartzeko aukera zehazteko asmoz, 2. eta 3. harilekin errepikatu dira neurketak.

Zenbait probeta apurketa entseguetan baliatu direnez, ezinezkoa izan da beste harilekin neurketa guztiak errepikatzea, baina erabili den lagin kopurua hormaren adierazgarri izaten darrai. 5.14a eta 5.14b Irudiek, egin diren neurketa guztien artean proportzionaltasunik badela frogatzen dute. Neurketa guztien balioak B.1 Eranskinean biltzen dira.

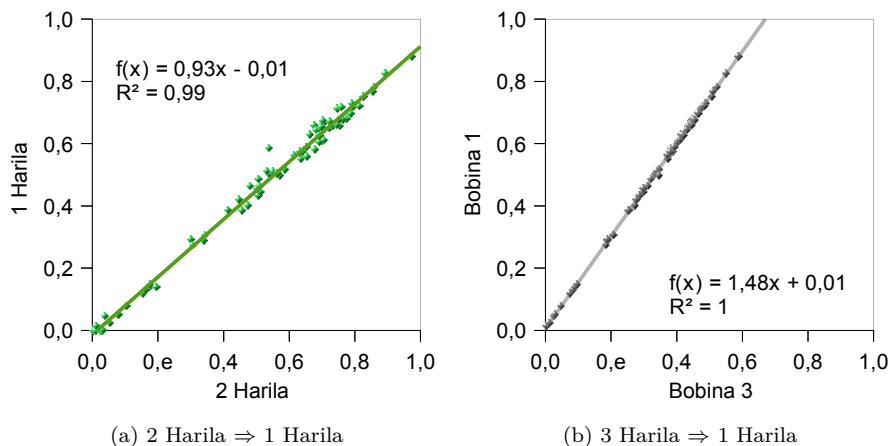
2. eta 3. harilekin egin diren neurketen balioak 1. harilaren eskalara balioetara transformatzeko kalibraketa faktoreak beraz, 0.93 eta 1.48 dira, hurrenez hurren. Koefiziente hauek alderatu nahi diren harilen arteko induktantzia erlazioen oso antzekoak dira. Erlazio eta kalkulatu diren faktoreen arteko ezberdintasunak, %1.9 eta %1.6-ko errore onargarria eragiten du hurrenez hurren.

5.4.3 Lagin prismatikoaren azterketa

Aldi berean, metodo magnetikoa lagin prismatikoetan ere erabilia izan da. Laginaren tamaina eta harilaren itxura dela eta, luzetarako norabide edo X ardatzaren arabera bakarrik egin litezke neurketok.

Prozedura honekin, materialaren propietate magnetiko eta erresistenteak erlazionatu nahi dira, azken hauek laginen flexotrakzio entseguaren bitartez ezagutu direlarik (6.6 Atala). Proposamen honek ez du batzorde teknikoaren gehiengo zabalak onartzen duen flexotrakzio entseguaren ordezkatzea lortu nahi, lagina eskuragarri izanez gero, aproposagoa baita era zuzenean proportzionaltasun muga eta hondar erresistentziak kuantifikatzeko.

Hala ere, propietate biak erlazionatzen dituen ekuazioa lortzea onuraga-



5.14 Irudia: Harilen ezberdinen neurketen arteko korrelazioa.

ria izan daiteke metodo magnetikoen garapenerako, obra bertan erabiltzeari begira, laginik ez baitago bertan, eskala errealeko egitura-elementuak baizik. Proposamen hau, guztiz bat dator gaurdaino egindako beste ikerketa batzuekin [Orbe et al (2012)].

Hortaz, sei neurketa egiten dira lagin bakoitzeko; bana laginaren laurden bakoitzean eta beste bi kanpotik; hau da, laginaren alboan baina hau harilaren kanpoan dagoelarik. Era honetan, alboko laurdenean baina hariletik kanpo dauden zuntzen eragina, eremu magnetikoaren kasuan induktantzia aldakuntza, balioesteko neurketa gehigarriak izango direlarik.

Hasierako neurketa beraz, zuzendu egin behar dira zuzenketa faktore baten bitartez, kanpo eraginak baztertu eta aztertzen den laurdenean dauden zuntzen ondorio den benetako balioa lortzeko. Faktore horiek era esperimetal eta analitikoan lortuko dira. Bide esperimentalean lagin prismatikoak lau lagin kubikotan moztea behar da eta horien neurketa egin, 5.4.1 Atalean azaldu bezala.

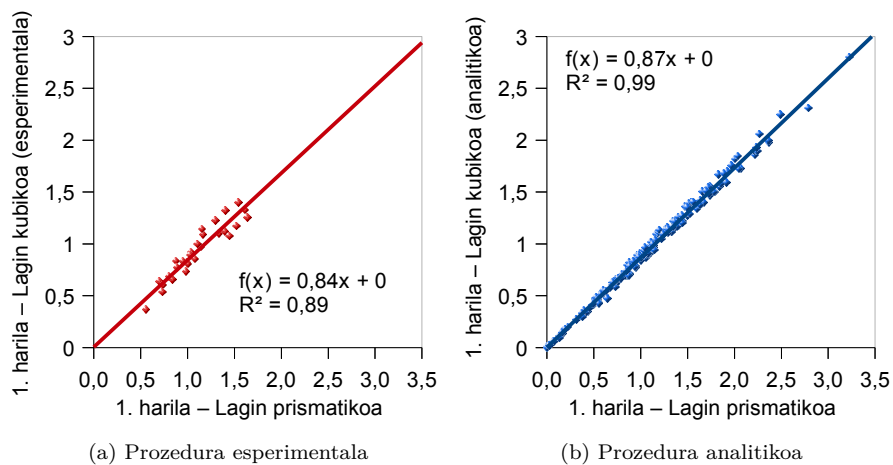
$$\begin{pmatrix} H_{x0-,prism} \\ H_{x1,prism} \\ H_{x2,prism} \\ H_{x3,prism} \\ H_{x4,prism} \\ H_{x0+,prism} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & x_+ & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & x_+ & 0 & 0 & 0 \\ 0 & x_- & 1 & x_+ & 0 & 0 \\ 0 & 0 & x_- & 1 & x_+ & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x_- & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_- & 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} H_{x0-,cub} \\ H_{x1,cub} \\ H_{x2,cub} \\ H_{x3,cub} \\ H_{x4,cub} \\ H_{x0+,cub} \end{pmatrix} \quad (5.1)$$

Aukera analitikoak 5.1 Ekuazioan agertzen den matrizea ebatzen du. Lagin prismatikoan neurtu diren balioetatik abiatuz eta iterazioz ekuazio guztiak betetzen dituzten zuzenketa faktoreak zehazteari ekiten zaio. Harilaren fabrikazioaren ondorio ager litezkeen ezberdintasunak kontuan izateko, bi zuzenketa faktore erabiltzeko hautua egiten da, bata harilaren aurreko zuntzen eragina balioesteko eta bestea, harilaren atzekoena.

B.1 Eranskinen B.2 Taulak, induktantzia aldakuntzaren neurketen balioak azaltzen ditu 48 lagin prismatikoentzako, horietako 7tik moztuak izan diren ku-



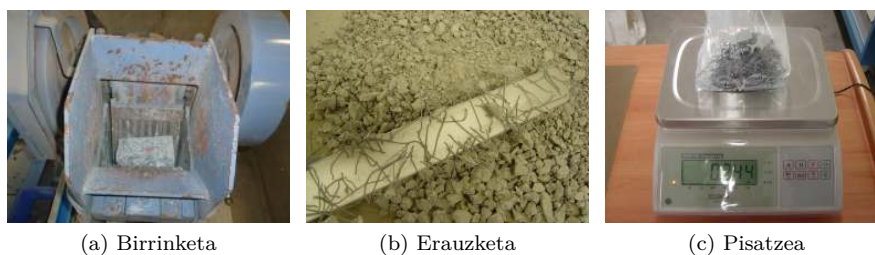
5.15 Irudia: Lagin prismetikoen neurketa.



5.16 Irudia: Lagin prismetiko eta kubikoen neurketen arteko korrelazioa.

boentzako eta prozedura analitikoaren bitartez balioetsi direnak. Aldi berean, aintzat hartu beharreko zuzenketa faktoreak ezartzen dira. Faktoreok, 5.16 Irudian erakusten dira eta bide biak ala biak egokiak direla frogatzen da. Kasu bietan lortu diren emaitzak oso antzekoak dira elkarren artean. Are metodo analitikoak zehatzagoa dirudi, baina elementu kubiko gisa neurtu aurreko laginen mozketan gal daitekeen altzairu masaren ondorio izan daiteke.

Lagin prismetikoengan neurtzen diren balioak %13 eta %17 bitartean mu-

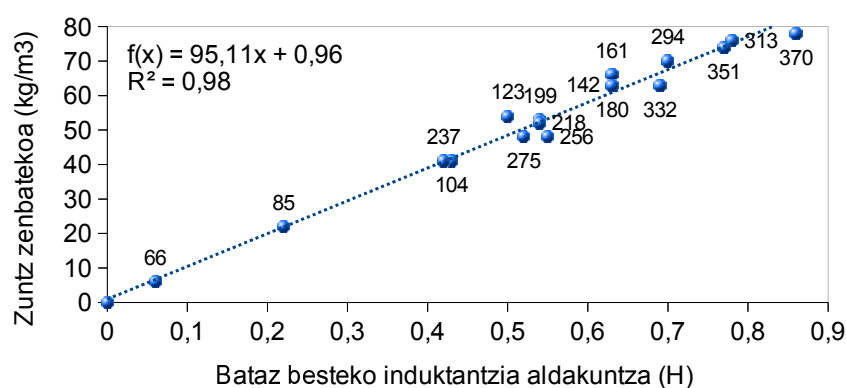


(a) Birrinketa

(b) Erauzketa

(c) Pisatzea

5.17 Irudia: Laginen birrinketa eta barneko zuntzen erauzte eta pisaketa.



5.18 Irudia: Induktantzia aldaketaren bataz besteko balio eta zuntz zenbatekoaren arteko erlazioa.

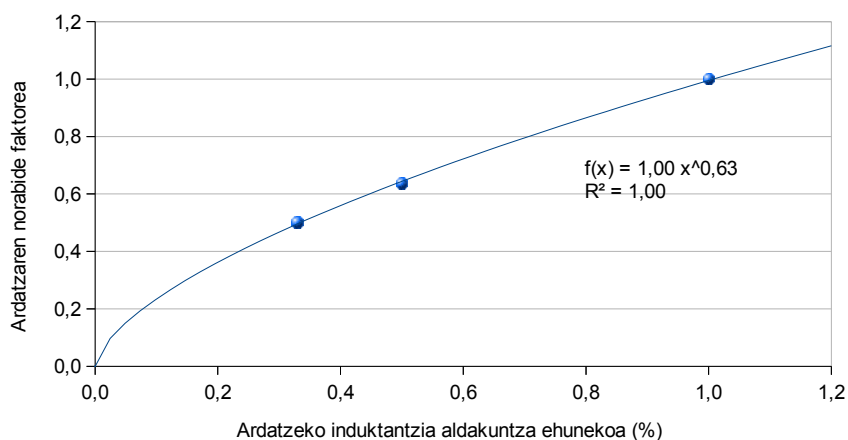
rriztu behar direla ondorioztatzen da, azterketa gunearen alboan dauden zuntzen efektu batukaria baliogabetzeko.

5.4.4 Zuntz zenbatekoaren balioztapena

Hormaren luzera eta altuera guztian zehar kokapen ezberdinetan neurtu diren induktantzia aldakuntzaren balio ezberdintasunek, aldakuntzaren bataz bestekoa zuntzen indartzearen zenbatekoarekin (kg/m^3 -tan) erlazionatzen duen kalibraketa kurba zehaztea ahalbidetu dute. Horretarako, lagin ezberdinak aukeratu eta birrindu egin dira altzairu zuntzak hormigoi matritzetik banatu ahal izateraino. Erauzketa hori iman baten laguntzaz egin da eta ondoren lagin bakoitzak zuen altzairua pisatu egin da (5.17 Irudia).

5.18 Irudiak, zuntz zenbatekoaren balioak erakusten ditu 1. harilarekin neurtuak izan diren bataz besteko aldakuntzaren balioekiko. Parametro bien arteko erlazioa lineala dela antzeman daiteke, determinazio koefizienteak (R^2) ia bateko balioa hartzen duelarik, lortu den ekuazioaren doitasuna berresten duena.

Aurreko ataletan azaldu diren erlazioekin (5.4.2 Atala), zuntzen zenbatekoa zehatz liteke kalkulatu den formularen oinarrituz. Ematen diren datuekin posiblea da zuntz bidezko indartzean 1 kg/m^3 -ko aldakuntza detektatzea, $0,01$



5.19 Irudia: Norabide faktorearen zuzenketa kurba.

H-ko batz besteko inдукtancia aldakuntzaren arabera.

5.4.5 Norabide faktorearen balioztapena

Zuntz zenbatekoa bezala, neurtutako inдукtancia ehunekoen arabera laginek duten norabide faktorea baliozta daiteke. 2.2.2.2 Atalean, faktore horrek adierazten dituen printzipioak eta dimentsiobakar, dimentsio biko eta hiru dimentsioko orientazioaren kasu ohikoen balioak ezartzen dira.

Jarraitu den prozedura, lagin kubikoetan aztertu diren hiru ardatz nagusietako bakoitzean izan den inдукtancia aldakuntza ehunekoa zehaztean datza metodo magnetikoaren bitartez eta izaera potentzialeko kurbaren arabera haren zuzenketa egitea. Zuzenketa hau, elementu bakoitzean eman daitezkeen dimentsio egoera ezberdinak (1D, 2D eta 3D) neurketetan aintzat hartzeko egiten da. Hau da, ehunekoetatik lortu diren faktoreen baturak 1 izan behar du zuntzek norabide bakarra izan dezaketenean kasurik simpleenean, 1.272 zuntzak plano baten arabera lerroka daitezkeenean eta 1.5 orientazio espaziala izan daitezkeen kasuetarako. 5.19 Irudia lehenago aipatu diren kasu berezien datuen arabera osatu da.

5.3.2 Atalean batu diren emaitzekin alderatuz, oso antzekoak diren balioak lortzen dira. Desbideratze estandarrek oso neurrikoak dira X eta Y ardatzetarako, norabide bertikalari dagokionez, Z ardatza, apur bat handiagoak izanik. Antzeko egoera egiaztatzen da metodo estereologikoen bidez balioetsi diren balioen araberako ratioa aztertzean, 5.3 Taulan agerian jartzen den bezala.

Hurbilketa bien arteko ezberdintasunak hasierako datuak oinarritzeko eran izan dezakete jatorria. Metodo estereologikoen gainazalean agertzen diren zuntzak aztertzen dituzten bitartean, metodo magnetikoak, eta are gehiago oraingo konfigurazioaz, pisu handiagoa ematen die laginaren barnealdean dauden zuntzei. Hala ere, ez bairik gabe, norabide faktorea ezin daiteke errealitatean balio konstantea izan horma guztian zehar eta aztertutako bolumenaren araberakoa da, beti izango direlarik ezberdintasun txikiak. Hala eta guztiz ere, balioak hurbilekoak dira eta hasieratik ezarritako aurreikuspenekin bat datoz zuntzen

Lagin zbk.	ΔL (%)			Norabide faktorea			bal/mag ratioa	
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Z
66	50	18	33	0.64	0.34	0.49	0.83	2.64
85	45	16	39	0.61	0.31	0.55	1.01	1.31
104	56	16	27	0.69	0.32	0.44	0.91	0.55
123	55	18	27	0.68	0.34	0.44	1.01	1.11
142	54	19	27	0.68	0.35	0.43	0.93	0.67
161	66	14	20	0.77	0.30	0.36	0.98	0.59
180	67	13	21	0.77	0.27	0.37	0.83	0.78
199	49	13	39	0.63	0.27	0.55	1.27	0.94
218	56	14	29	0.70	0.29	0.46	0.89	0.81
237	51	12	37	0.65	0.27	0.54	0.97	0.87
256	48	13	39	0.63	0.28	0.55	1.15	0.96
275	64	14	22	0.75	0.29	0.38	1.04	0.73
294	67	18	15	0.77	0.34	0.30	1.02	0.97
313	64	18	18	0.75	0.34	0.34	0.97	0.59
332	69	19	12	0.79	0.35	0.27	0.94	0.73
351	68	21	11	0.78	0.37	0.25	0.91	0.61
370	70	20	10	0.80	0.36	0.23	0.95	N/A
Bataz beste				0.71	0.32	0.41	0.98	0.93
Desb. Est. (%)				9.16	10.75	26.21	11.21	53.98

5.3 Taula: Norabide faktorearen balioztapena metodo magnetikoen bitartez.

orientazioari dagokionez.

Taularen balioen arabera, lehenasunezko orientazioak hormaren luzetarako ardatzarekin bat datorrela frogatzen da, zenbateko txikiagoa izanik norabide bertikalean eta, batez ere, zeharkakoan. Aztertutako laginen zutabeko bataz besteko norabide faktoreak, hormaren erdialdetik dagoelarik, dimentsiobakarreko orientaziorako joera argia du. Bataz besteko norabideak X ardatzarekiko osatuko lukeen angelua, beste bi ardatzekiko izango lukeena baino txikiagoa da. Angelu hauek, (5.2) Ekuazioaren arabera baliozta daitezke. Ardatz bakoitzaren induktantzia aldakuntza ehunekoa ($\Delta L_{i,\%}$) erabiliz, ardatz horrekiko bataz besteko orientazio angelua ($\theta_{i,m}$) lortzen da.

$$\theta_{i,m} = \arccos\left(\sqrt{\frac{\Delta L_{i,\%}}{100}}\right) \cdot \frac{180}{\pi} \quad (5.2)$$

Zenbait ikerketek [Laranjeira (2011)], bataz besteko orientazio angelua norabide faktorearekin ($\eta_{i,\theta}$) erlaziontzen dute (5.3) Ekuazioaren arabera, baina balio horiek benetakoak baino handiagoak direla egiaztatu da. Hiru dimentsioko kasu garbiari dagokionez, zuntzak inolako murrizketarik ez duelarik espazioan edozein angelutan kokatzeko, bataz besteko orientazioa berdin-berdina izan beharko luke hiru ardatz nagusietarako, 54.736°-ko angeluaz. [Laranjeira et al (2010)]-ek proposatzen duen hurbilketa erabiliz, faktoreak 0.577 balioa izango luke, hiru dimentsioko kasuan izan beharko lukeena baino handiagoa.

$$\eta_{i,\theta} = \cos\left(\theta_{i,m} \cdot \frac{\pi}{180}\right) \quad (5.3)$$



(a) Y CT



(b) TAC 64

5.20 Irudia: Ikerketan erabilitako tomografoak.

5.5 Ardatz-tomografia konputerizatua

Paraleloki, laginen barnealdea bistaratzeko beharra sortzen da, gainontzeko entseuetan batu diren datuak egiaztatzeko. Ardatz tomografia konputerizatua (TAC), laginaren luzeran zehar behin eta berriz X izpi bidez lortzen diren lodiera txikiko ebakiduren irudien azterketan oinarritzen da. Irudi lauon ondorengo prozesatzeak, multzoaren hiru dimentsioko berrosatzea ahalbidetzen du laginaren edukari dagokion fidagarritasun osoz.

Ikerketa honen entseugarako, tomografo ezberdin bi erabili dira. Batetik, tamaina txikiko piezen azterketarako, lagin kubikoetatik txikiago batzuk erazi eta Burgoseko Unibertsitatean aztertu dira YXN etxeko Y.CT Compact tomografoaren bitartez (5.20a Irudia). Bestetik, TAC64 S.L.-k darabilen GE Healthcare-n LightSpeed VCT medikuntza tomografoa erabili da (5.20b Irudia), neurri handiagoko laginak aztertzeko, hormatik atera den prismatikoetako (150 x 150 x 600 cm) bat aztertuz.

5.5.1 Azterketaren prozedura

Tomografo bien ezaugarriak oso bestelakoak dira elkarren artean, bakoitza erabilera ezberdinerako diseinatu baita. X izpien iturri eta hargailua lortzen den laginaren ebakiduraren plano berean aurkitzen dira, erradiografietan ez bezala. X izpien iturriak seinalea igortzen du, azterketa elementua zeharkatu ostean, hargailuak hartzen duena halako ahultzearekin. Modeloaren hiru dimentsioko berrosatzea irudi lauetatik (pixelak) abiatzen da, voxelak osatuz, aztertutako elementuaren barnealdea irudikatzen dutenak.

Gertatutako ahultzeak, iturri igorlearen potentzia eta intentsitate, piezaren tamaina edo zeharkatutako materialaren propietate fisikoen menpeko da neurri handi batean. Pixel bakoitzak gris-eskalako kolore bat hartzen du, konbentzionalki beltza delarik ahultze gutxi edo bat ere ez erakusten duena eta zuria materialaren aldetik seinalearen xurgatze maila gehiena adierazten duen kolorea.

Y CT modeloaren neurri txikiko makina trinkoa da eta azter daitekeen gorputza tamaina eta pisuz mugatua dago. Bertan, igorle eta hargailua estatiko

mantentzen dira, azterketa pieza delarik bertikalki higitzen dena bere ardatz bertikalarekiko biratzen duen bitartean. Horrela, datuak angelu ezberdinetatik hartzen dira.

Bestalde, LightSpeed VCT tomografoa ahoz gora geldi dauden giza eriengan ardatz tomografia konputerizatuak egiteko erabiltzen da, iturria eta hargailua direlarik kasu honetan lekualdatzen eta biratzen dutenak azterketa gunearen luzeran zehar.

5.5.2 Lagin txikien emaitzak

Lagin txiki gisa, 273 eta 292 lagin kubikoen aurrealdetik erauzi diren pieza txikiagoak erabili dira. Lehenengoaren kasuan, 50 mm-ko diametroa eta 150 mm-ko luzera duen zilindroa zulatu da, bigarreanean aldiz, diametroa 100mm-koa izan da luzera berdina delarik. Laginen zulaketa aurreko aldetik atzeraino egin da, Y ardatz edo hormaren zeharkakoarekin bat. Luzera noski, hormaren lodierak mugatzen du.

Diametroen ezberdintasuna, erdialdean X izpien balizko gehiegizko ahultzearen ondorio da. Hori dela eta, frogak egin dira neurri ezberdinekin. Hala ere, tutuaren potentzia nahikoa izan da lagina zehaztasun nahikoarekin zeharkatzeko kasu bietan.

Laginak bertikalki higitu eta biratzen duen euskarri baten gainean kokatzen dira, igorle eta hargailua geldi dauden bitartean. X izpi bidez irudiak hartzen dira 0.25mm-ro berariazko softwarearen bitartez berrosatuz.

5.21 eta 5.22 Irudietan erakusten diren ikuspegietan, zuntz gehienak ezkerretik eskuinera lerrokatzen direla antzematen da, norabidea, luzetarako ardatzarekin eta hasieran ezarritako hipotesiekin bat datorrelarik. Zilindroaren neurri txikiak direla eta, zuntz asko ebakiak azaltzen dira.

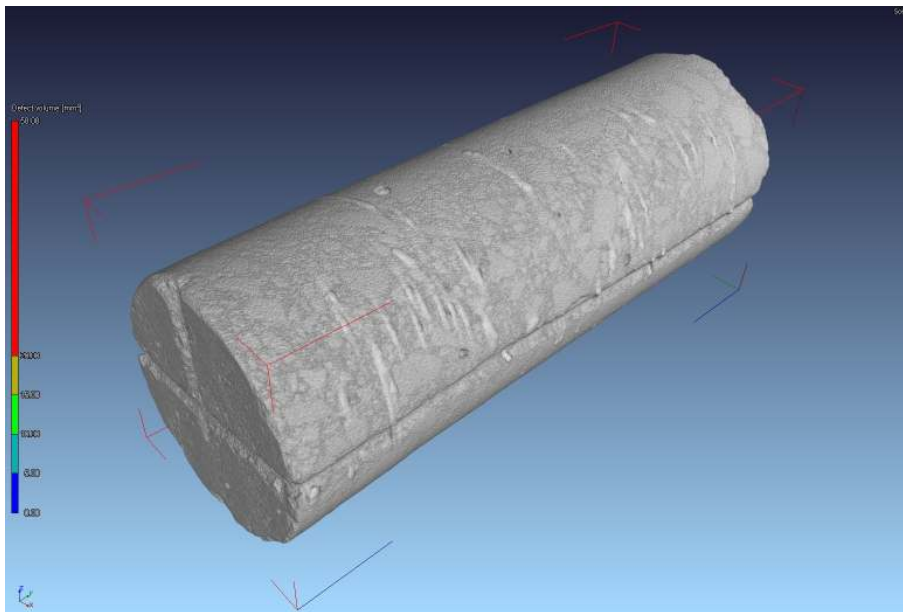
Hartutako irudien ondorengo prozesatzeak, zuntz kopurua eta bolumena eta laginaren porositatea neurtzeko aukera ematen du. 5.4 Taulan laburbiltzen diren balioen arabera, balioztatu den zuntz zenbatekoa eta porositatea bat datoz espero zenarekin.

5.5.3 Lagin handien emaitzak

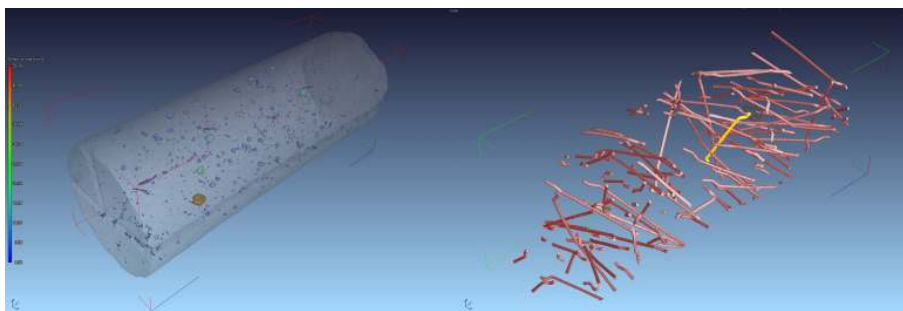
Lagin txikietan lortu diren emaitzak egiaztatzeko asmoz, lagin prismatiko batengan beste tomografia bat egitea pentsatu da. Hormaren elementu adierazgarriago batean zuntzen lehentasunezko orientazioa bistaratzeko helburua dago. Aztertutako lagina, 328 zenbakiduna, behealdean kokatzen da ponpaketa puntutik gertu.

Laginaren tamaina dela eta, medikuntza tomografoa erabili da industrialara beharrean. Kasu honetan, lagina geldi dago eria balitz bezala, igorlea eta hargailua bere luzera guztian higitzen eta biratzen diren bitartean. Tomografoak potentzia txikiagoko tutua du eta ebakiduren artean izan daitekeen gutxieneko tartea ezin da 0.60 mm-tik beherakoa izan. Alabaina, hiru dimentsioko modeloa aldaketa nabarmenik gabe berrosatzeko nahikoa da.

5.23 Irudian argiago ikusten da zuntzek hartzen duten orientazioa laginen X ardatzarekin lerrokatzeko joera duela. Are horma-efektuak bereiz daitezke enkofratuen hurbiltasunean. Zuntzen bolumena ezin izan da egoki neurtu, irudiek halako zarata portzentaje bat erakusten baitzuten zuntzen perimetroan.

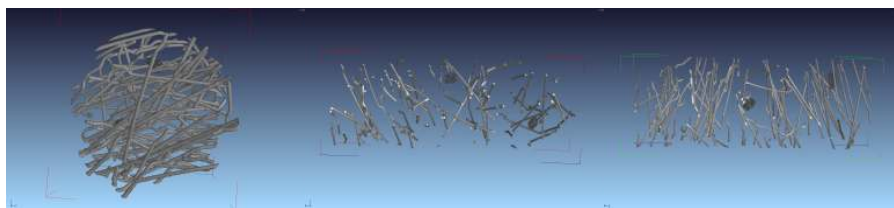


(a) Bista isometrikoa



(b) Poroak > 0.1 mm

(c) Zuntzak



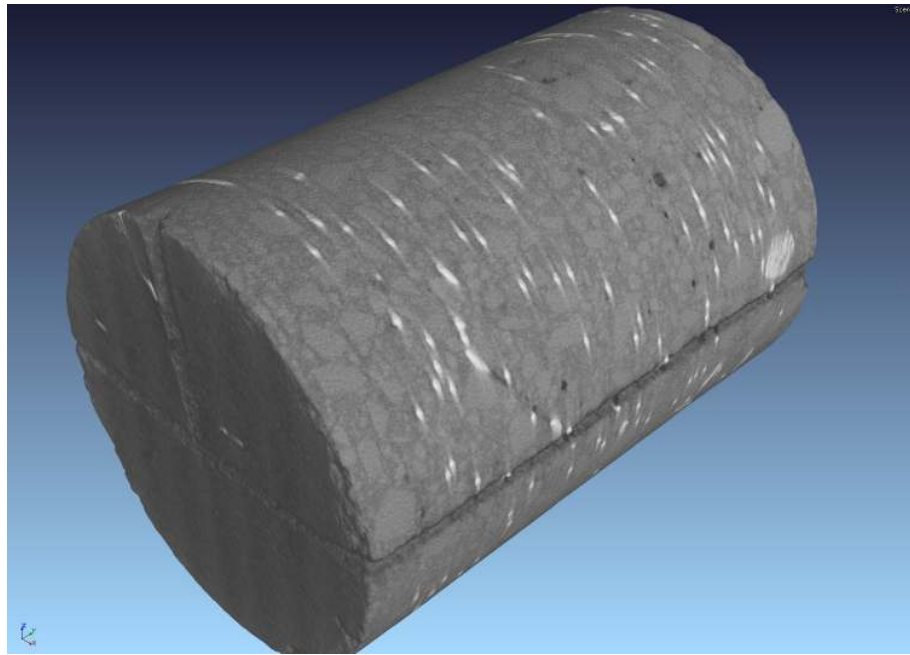
(d) Aurretiko bista

(e) Albotiko bista

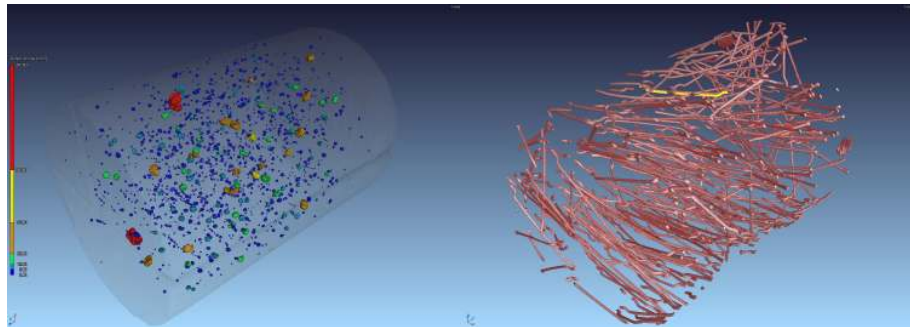
(f) Goitiko bista

5.21 Irudia: 292. lagina.

Hala ere, eskaintzen duen informazio kualitatiboa oso baliotsua izaten darrai zuntzen antolamendu eta lehentasunezko orientazioak balioesteko.

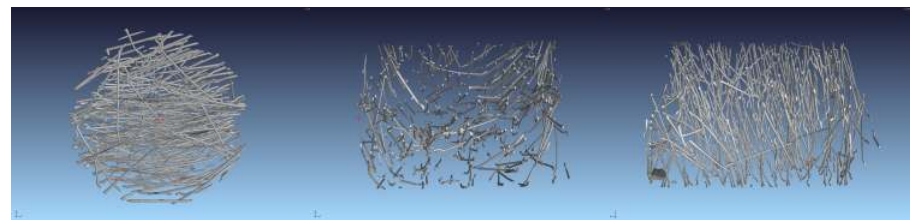


(a) Bista isometrikoa



(b) Poroak > 0.1 mm

(c) Zuntzak



(d) Aurretiko bista

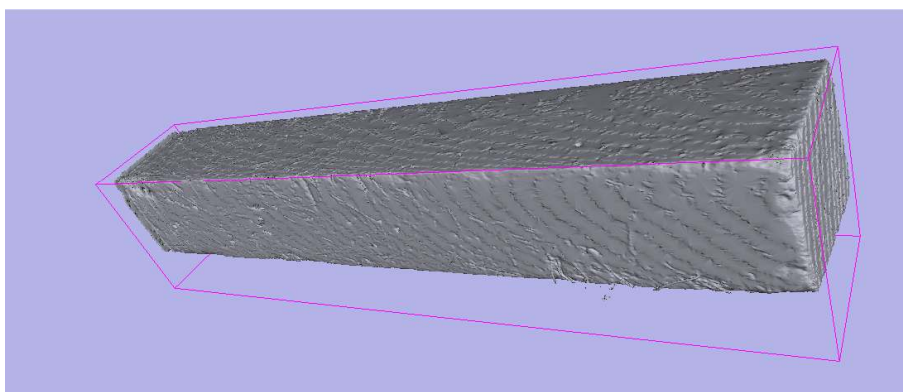
(e) Albotiko bista

(f) Goitiko bista

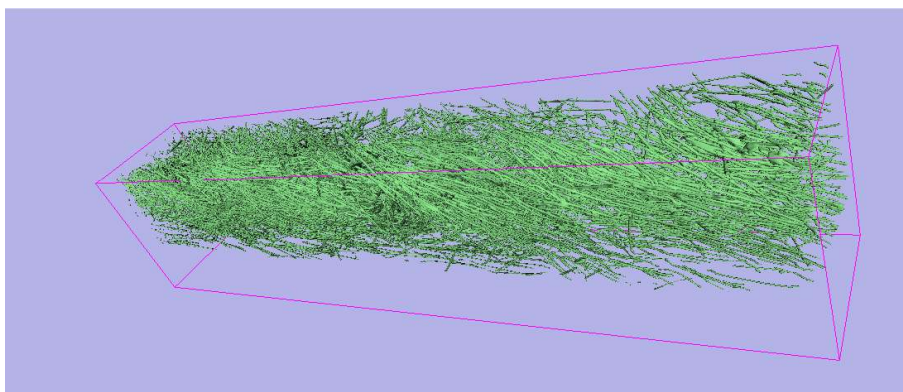
5.22 Irudia: 273. lagina.

5.5.4 Zuntz zenbatekoaren balioztapena

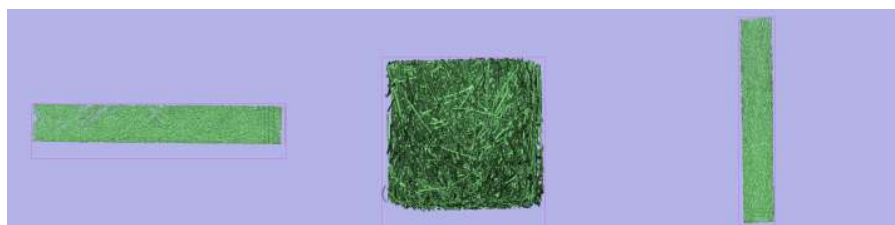
Sortu diren modeloek, zuntz bolumena, poroak eta lagina osatzen duen zementu pasta zehaztu eta kuantifika ditzakete. 5.4 Taulak lagin txikien datuak



(a) Bista isometrikoa



(b) Zuntzak



(c) Aurretiko bista

(d) Albotiko bista

(e) Goitiko bista

5.23 Irudia: 328. lagina

biltzen ditu. Erradiografia bakoitzean X planoek ebakitzen dituzten zuntzen azaleraren batukaria txikiena dela antzematen da. Zuntzak X ardatzarekiko paraleloki lerrokatuak izatean, haien ardatzarekiko era elkarzutean moztzen dira, luzetara moztuko balira baino azalera txikiagoa agertuz, hormaren luzetarako norabidean duten lerrokatze nagusia adieraziz.

Datu hauen arabera, 273 laginetik erauzitako piezak aztertutako bolumenaren %1.02-ari dagokion zuntz zenbatekoa du, 292 laginari dagokionak, %0.77-ko zuntz bolumena duen bitartean bere barnean.

Lagin zbk.	273	292
Diametroa (mm)	100	50
Luzera (mm)	150	150
Lagin bolumena (mm ³)	1083594	286538
Poros bolumena (mm ³)	2661	381
Zuntz bolumena (mm ³)	11096	2206
ΣX (mm ²)	5515.73	1513.05
ΣY (mm ²)	12665.92	2548.57
ΣZ (mm ²)	10579.94	2331.72

5.4 Taula: TAK emaitzak lagin txikietan.

Lagin zbk.	273	292
ΔL_x	0.101	0.500
ΔL_y	0.012	0.068
ΔL_z	0.025	0.152
ΣX (%)	0,19	0.24
ΣY (%)	0,44	0.40
ΣZ (%)	0,37	0.36

5.5 Taula: Azterketa magnetiko eta analisi tomografikoaren datuak.

5.5.5 Entsegu magnetikoen korrelazioa

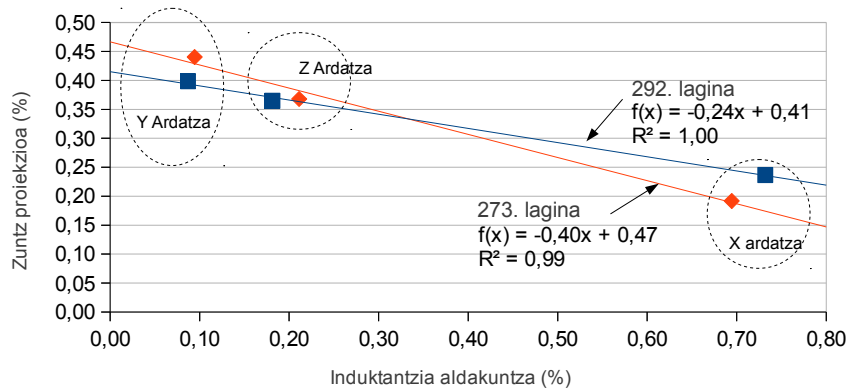
Laginengan tomografiak egin aurretik eta lagin kubikotik erauzi ondoren, xehetasunez beteriko azterketa egin zaie aurretiaz azaldutako metodo magnetikoaren bitartez. 5.5 Taulak lagin bien inдукtantzia aldakuntza balioak erakusten ditu eta baita entsegu tomografikoaren bidez lortu diren ardatz bakoitzarekiko ebakidura bakoitzeko zuntzen proiektzioaren batukariak adierazten duen ehuneko ere.

Azterketa bietan lortu diren balioen artean erlazio zuzena dagoela frogatzen da, bistan denez alderantziz proportzionalak direlarik inдукtantzia aldakuntza, edo zuntzen orientazio handiagoa ardatz batekiko, eta tomografiako ebakidura bakoitzean detektatu diren zuntzen azaleraren batura. Erlazio hori 5.24 Irudian azaltzen da, erlazioa arautzen duen ekuazioa eta doitasun parametro ezin hobearekin batera.

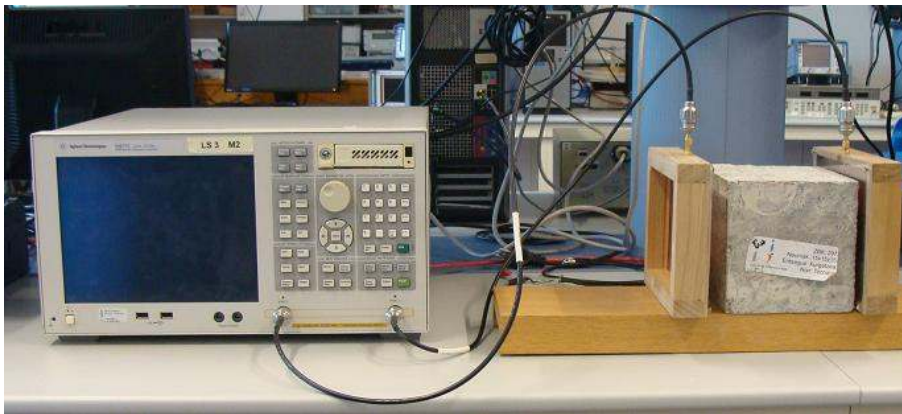
5.6 Seinaleen ahultzea

Paraleloki, Bilboko IGET.eko lankideek erabilitako materiala ezaugarritzeko neurketa sistema inplementatu eta diseinatzeko ikerketa garatu dute. Hasiera batean, sistemak lan egin dezakeen frekuentzia tartea zein den zehaztu da *microstrip* antenen neurriak zehaztu ahal izateko. Horretarako, kondensadore baten funtzionamendua simulatzen duen sistema eraiki da *host*-aren permitibitatea ezartzeko asmoz.

Lagin kubikoetan zehar igortzen diren seinaleek jasaten dituzten ahultze eta atzeratzea kalkulatzeko, 5.25 Irudian ikus daitekeen arkitekturako sistema diseinatu da. Emaitzetatik ondoriozta daiteke, zuntz zenbatekoa gero eta



5.24 Irudia: Metodo magnetiko eta ardatz-tomografia konputerizatuaren arteko erlazioa.



5.25 Irudia: Neurketa sistemaren arkitektura.

handiagoa izan, handiagoa dela seinaleak jasaten duen ahultzea. Hala ere, zenbateko txikietan dispersioa handiagoa da, zenbateko aldaketa arinek ahultzean aldaketa nabarmenak ekar ditzaketela adieraziz. Badirudi, atzeratzeak berdinak direla hiru ardatzetan zuntz zenbatekoa nominalaren azpitik dagoenean, orientazio hobea duen ardatza gorabehera, baina zenbateko handiagoetarako atzeratzea areagotu egiten da zuntz gehiago lerrokatuak dituen ardatzaren arabera. Entsegu horien emaitzak, aipatutako erreferentzian aurkitzen dira.

5.7 Iragazkortasunaren zehaztapena

Ikerketa honen hasieratik egitura-erabilera zehatza pentsatu da benetako elementu baten azterketa egiteko. Erabilera hau, kasu honetan, euste andel zilindrikoen diseinuan datza. 6. Gaiari aipatuko diren entsegu suntsitzailen bitartez, eta gai honetan azaldutako beste batzuekin osatuz, aztertuko diren alderdi mekaniko guztiez gain, ezinbestekoa da andelaren funtzionamendu zu-



(a) 91. lagina

(b) 86. lagina

5.26 Irudia: Laginak eta sartze frontearen neurketa.

zena. Bestela, materialaren barnealdera iragazketak sortuko dira hainbat kalte eragin dezaketelarik, altzairu eta hormigoiari eraso kimikoak orokorrean. Okerrenean, andelaren erabileraren arabera, irazte horiek kanpoan azalera daitezke multzoaren estetikan aldaketak eraginez eta are ingurumen eta giza osasunean kalteak ere.

Hormigoi araudi ezberdinek azaltzen duten bezala EHE-08 (2008), beharrezkoa da pitzadurak kontrolatzea aipatutako kalteak ekiditeko. Ikerketa honetan, diseinatu den hormigoiaren iragazkortasuna zehaztu da, zerbitzu fasean zehar portaera egokia izango duenetz egiaztatzeko.

5.7.1 Entseguaren prozedura

150 mm-ko alde duen lagin kubikoak erabili dira iragazkortasunaren azterketa gauzatzeko, UNE-EN 12390-8 arauaren arabera. Entseguaren prestakuntza eta egikaritze arau horren arabera egiten da salbuespen bakar batekin. Aztertutako egitura erabilera zehatz batekin erlazionatzeko asmoa dagoenez, euste andel zilindrikoak kasu honetan, arrazoizkoa iritzi da presioa enkofratuak izan diren aurpegietan egitea, arauak dioen ez bezala.

Bertan dio ez dela akabera aurpegian ezarri behar, baina ikerketa honetan funtsezkoa iritzi da hormaren lodieran zehar iragazgaitasuna bermatzea, andelaren edukia irazteko bidea baita hori. Egiaztapen hau, zenbait giro erasokorretan egiten da, III eta IV esposizio mota orokorren arabera eta esposizio mota espezifikorik ezartzen den kasuetan. 5.26 Irudian lagin biren ur sartze frontea erakusten da.

5.7.2 Sartze emaitzak

Entseguetan erabili diren laginetan presiopean ur sartzearen balioak 5.6 Taulan azaltzen dira. 310 laginak isuriak ditu entseguan zehar, ez delarik baliagarritzat hartu. Egitura Hormigoiaren Instrukzioaren (EHE-08) arabera, txarrenean hel daitekeen gehieneko sakonera 30 mm-koa da, 20 mm-ko bataz bestekoaz. Aztertutako kasu guztietan bete egiten da egiaztapena.

5.21b eta 5.22b Irudietatik, laginetako hormigoiak elkarri ez oso lotuak dauden poro gutxi dituela ondoriozta daiteke, materialaren joera sartze aurreko

Lagin zbk.	86	91	196	200	205	310	314	319
Sartzea (mm)	25	30	18	18	20	N/A	20	17

5.6 Taula: Presiopeko ur-sartze balioak.

portaera egokia erakustea izan behar duelarik. 1 mm^3 baino handiagoak diren akatsei 273 eta 292 laginen bolumenaren %0.24 eta %0.13 dagokie, hurrenez hurren. Balio horiek txikitzat har daitezke.

Aurretiaz aipatu den bezala (4.4.1 Atala), nahiz eta ontze ezegokia egin, oinarri giltzatuak eskaintzen dion askatasunak, bere propietate iragazgaitzei dagokienez ez dago materiala ahulduko duen inolako pitzadurarik eragiten horman.

5.8 Azken gogoetak

Hainbat neurketa teknika aztertu, zuzenak eta zeharkakoak, eta hormatik erauzi diren laginen analisisan erabili dira. Gai honetan adierazi den guztia-
ren arabera, erabili diren metodo guztien artean ekonomia, fidagarritasun eta sinpletasun alderdiak erarik eraginkorrean uztartzen dituen aukera, metodo magnetikoena da zalantzarik gabe.

Pultsu ultrasonikoen abiaduraren neurketak ez dakar informazio argirik hormigoi matrize barruko zuntzen orientazioaren inguruan. Hori laginen moz-
keta aurpegi guztien ikusizko analisiaren bitartez egiaztatu da. Aldi berean, er-
dialdeko zonaldearen eskumatara lortu diren balio arraroek ez datoz bat zehaz-
tutako zuntz zenbateko eta orientazioarekin. Metodo estereologikoak bestalde,
baliagarriak izan arren, ez dira interesgarriegiak egitura moztea eskatzen bai-
tute azterketa egiteko.

Ardatz tomografia konputerizatua erakargarria da erakusketa ikuspuntutik,
baina obran bertan erabiltzeko erraztasun eza nabarmena da. Irudi berrosatuek
matrize barnealde osoa ikustea ahalbidetzen dute, zuntz indartze balioesten eta
are porositatea ere. Aldiz, bere kostu handia eta makina konplexuak garestiegi
bihurtzen dute bere erabilera sistematikoa, lagin eskalan ere.

Induktantziaren aldakuntza neurtzea erabat interesgarria gertatzen da ha-
ren sinpletasun, fidagarritasun eta ekonomia dela eta. Entsegu teknika bezala
onartua izateko beharrezko alderdi guztiak betetzen ditu. Aurretiaz egiaztatu-
tako kalibraketa eredueta oinarrituz, zuntzen zenbateko eta orientazioa zehaz-
teko egokia da. Gainera, ikerketa ildo berriek gainazal-elementuetan ezartzeko
bidea bilatzen dute, tamaina handiko egitura-elementuetan erabiltzeko aukera
emanez.

Azkenik, entsegu ez-suntsitzailen gai honetan, materialaren iragazgaitza-
sun maila egiaztatu da uraren presiopean. Espero zen bezala, hormigoi auto-
trinkotzaileak eskatzen duen zatiki finan aberatsa den dosifikazioak, matrize
trinko eta gutxi porotsua sortzen du, proposatzen den erabileran iragazpen
arriskua murrizten duena. Gogoratu beharra dago berriro, egiturak ez due-
la inolako ontze prozesurik jasan, zuntz gehiketa izan daitekeelarik ur sartze
horren murriztuaren arrazoia, pitzadura minimoa izan dela onartuz masaren
gogortzean zehar.

6. GAIA

Entsegu suntsitzaileak (ES)

6.1 Sarrera

Entsegu suntsitzaileen helburua, formulatu den AZIHAT-aren propietate mekanikoak era normalizatuan kuantifikatzean datza. Apurketa entseguak, laginengan esfortzu tangenzialez gain, trakzio edo konpresio indarrak hainbat eratan ezarri eta eragitean oinarritzen dira, euste andel zilindrikoen egitura-erabileraren egokitasuna frogatzeko asmoa baitago.

Deskribatuko diren entseguak eta jarraian azalduko diren emaitzak, hormigoiei dagokien ezaugarritze mekanikoan kokatzen dira, eta bereziki zuntzez indarturikoei dagokienean. Alde batetik, ohikoak diren konpresio entseguak gauzatu dira hura ezaugarritzeko. Bestalde, zuntzek dakarten hondar erresistentzia edota zailtasun gehikuntza kuantifikatuko duten berariazko entseguak erabiliko dira.

Zuntzez indartzearen ekarpen handiena, materialak trakzio esfortzuak eusteko ahalmena da behin matrizea hautsi dela. Bistan denez, hobekuntza horren balioa aurretiaz aipatu diren faktore askoren arabera izango da (2 Gaia). Araudi ezberdinetan dauden aldaerak gorabehera, eskuarki onartua dagoen flexotrakzio entseguaz gain, Bartzelona entsegua ere erabili da (ikus 6.3 Atala) hainbat laginetan. Prozedura horren egokitasuna frogatu nahi da, burutzeko teknika sinpleagoa baita. Ikerketa osatzeko, ebakitzailen entseguak ere egin dira esfortzu tangenzialen aurreko erresistentzia gehikuntza zehazteko.

6.2 Konpresio entseguak

Egoera gogortuan dagoen hormigoiaaren propietate mekanikoak ezaugarritzeak, konpresio erresistentzia kuantifikatzea eskatzen du. Horretarako, entsegu horren kontsulta araudia, UNE 83507 (2004), erabili da. Laginak horman zuten kokaera berberarekin jarri dira makinan, hau da, konpresio karga norabide bertikalean ezarri da, Z ardatzarekiko paralelo.

16 cm		16 cm		60 cm		60 cm		60 cm		16 cm		16 cm		60 cm		60 cm		16 cm		16 cm	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41
42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63
64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85
86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107
108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129
130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151
152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173
174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195
196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210	211	212	213	214	215	216	217
218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231	232	233	234	235	236	237	238	239
240	241	242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253	254	255	256	257	258	259	260	261
262	263	264	265	266	267	268	269	270	271	272	273	274	275	276	277	278	279	280	281	282	283
284	285	286	287	288	289	290	291	292	293	294	295	296	297	298	299	300	301	302	303	304	305
306	307	308	309	310	311	312	313	314	315	316	317	318	319	320	321	322	323	324	325	326	327
328	329	330	331	332	333	334	335	336	337	338	339	340	341	342	343	344	345	346	347	348	349
350	351	352	353	354	355	356	357	358	359	360	361	362	363	364	365	366	367	368	369	370	371
372	373	374	375	376	377	378	379	380	381	382	383	384	385	386	387	388	389	390	391	392	393
394	395	396	397	398	399	400	401	402	403	404	405	406	407	408	409	410	411	412	413	414	415

6.1 Irudia: Konpresio-apurketa entseguan erabili diren probeta kubikoen kokapena (beltzez).

Zbk.	25	29	34	143	148	253	257	262	367	371	376
f_c (MPa)	58.7	55.3	60.9	73.4	64.5	55.7	68.1	66.7	56.6	57.8	56.9
f_{cm} (MPa)	61.3										
CV (%)	9.77										
Zuntzak (kg/m ³)	0	0	0	56	N/A	62	65	57	66	85	76

6.1 Taula: Probeta kubikoen konpresio erresistentziaren emaitzak.

6.2.1 Laginen kokapena

6.1 Irudiak konpresioz apurtu diren lagin erauzien kokapena islatzen du. Horman zehar banatuak dauden 11 lagin aukeratu dira, zuntzen zenbateko eta norabide ezberdinek hobekuntza ohargarri eskaintzen duten frogatzeko. Aldi berean, obraratze prozesuak ezaugarri hori nabarmenki aldatzen duen egiaz-tatzeko, hormaren egikaritzearekin batera moldeatu diren 16 laginen entsegua egin da. Lagin hauek zilindrikoak dira eta 3 ($f_{cm,3}$), 7 ($f_{cm,7}$), 14 ($f_{cm,14}$) eta 28 ($f_{cm,28}$) egunera apurtu dira.

6.2.2 Konpresio emaitzak

6.1 Taulan, erauzi diren laginen entseguen emaitzak laburbiltzen dira. Ber-tan, laginen konpresio erresistentzia balioak zuntz zenbatekoarekin erlaziona-tzen dira. Azken hau 5.4 Atalean azaldu den prozeduraren bitartez balioetsi da.

Lagin kubikoen apurketa eredu, espero zen erarekin bat dator, 6.2 Irudian ikus daitekeen bezala. Eredu hori, dagokion entsegu araudian islatzen da, en-tseguren baliozkotasuna onartzea erraza izan dadin. Zuntzak gehitzeak ez du

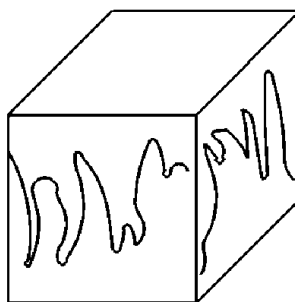
Hormigoiaren adina (egun)	f_c				f_{cm} (MPa)	CV (%)
3	42.3	42.3	41.8	43.3	42.4	1.48
7	50.0	49.2	50.7	51.0	50.2	1.60
14	55.2	53.2	54.7	43.8*	54.4	1.99
28	61.0	59.6	59.0	56.8*	59.9	1.71

* Lagin akastuna

6.2 Taula: Probeta zilindrikoen konpresio erresistentziaren emaitzak.



(a) 34. laginaren apurketa



(b) Apurketa askiesgarriaren adibidea

6.2 Irudia: Laginen apurketa konpresio entseguaren ondoren.

eskema aldatzen, espero zen legez, zuntzek ez baitute konpresio erresistentzian gorakada nabarmenik eragiten. Karga matrizearen hausturaren ondoren haritzen dutenez gehienbat, lortzen den balio eta apurketaren forma hormigoiaren propietateen araberakoa da soil-soilik ia.

Hormigoiak 60 MPa inguruko bataz besteko erresistentzia erdiesten du, lagin bakoitzak duen zuntz indartzearekiko ageriko erlaziorik gabe. Zenbait ikerketen ondorioetan azaldutakoarekin bat [Grünwald (2004)], zuntzak gehitzeak ez du materialaren konpresio erresistentzia nabarmenki eragiten. Lagin kubikoentzako, aurrez ikus zitekeen bezala, lagin zilindrikoetan baino balio handiagoak lortu dira haien lerdentasun txikiagoa dela eta, baina ez dago alde larregirik (%2.3-a). Araudi askok (EHE-08, ACI-318, etab.) lagin mota bien arteko erresistentzien artean bihurtze faktoreak ezartzen dituzte, %70 eta %90-a bitartean daudenak, edo are 1 erresistentzia handiko hormigoiaren kasuan (> 80 MPa) [EHE-08 (2008)]. Azterketa kasuak antzeko balioak agertzen ditu lagin mota bientzako, haien artean %3-a baino ezberdintasun txikiagoa dagoelarik.

Hasierako usteekin bat datorren konpresio erresistentzia balioak lortu dira. Hormigoiaren formulazioak bete behar dituen autotrinkotasun baldintzen ondorio da hori, zatiki finaren kantitate handiak eskatzen baitira eta kasu honetan gehienbat, zementu gisa eman direnak (430 kg/m^3). Ikerketa honetan erabili den formulazioaren deskribapena 3. Gaian biltzen da. Bestalde, 1993 eta 2003 artean hainbat ikerketa taldek fabrikatu dituzten 68 HAT-ren azterketan, kasuen %80-a baino gehiagok 40 MPa-eko konpresio erresistentzia gainditzen dutela zehazten du [Domone (2006)]-ek. Hortaz, konpresio erresistentziari dagokionez, arrazoizkoa dirudi ikerketa honetan diseinatu den AZIHAT-a, HAT batek lortzen dituen balioen beheko tartean dagoela baieztatzea.

AZIH-aren homogeneousutasuna horman zehar lortu diren emaitzetan nabarmentzen da, ez delarik hormaren goialdean detektatu den zuntz segregazioaren eraginik nabaritzen gehienezko konpresio erresistentziari dagokionez. Bestalde, azpimarratzekoa da zuntzek zailtasun gehikuntza dakartela [Bencardino et al (2008)]-ek esan bezala, sortzen diren pitzadurak lotu eta haietan zehar karga transmititzen jarraituz. Gaitasun hori lagin bakoitzak duen zuntz zentratekoaren araberkoa da, indartze gabeko hormigoia dagozkionek, energia xurgatzeko ahalmenik gabeko bat-bateko apurketa agertzen dutelarik matrizea hautsi ondoren.

Balio hauek, hormigoitze eta betetze prozesuen ondorioz hormatik erauzi direnen, bestelako orientazioa izango duten lagin moldeatuetan lortutakoekin erkatuz, batz besteko konpresio erresistentziak arras antzekoak direla antzematen da.

6.3 Bartzelona entsegua

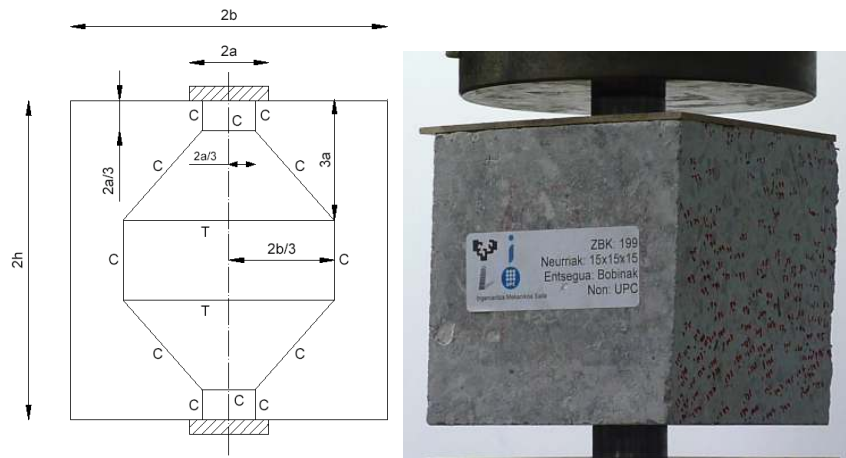
Materialaren trakzio erresistentzia zehazteko flexotrakzio entseguaren hautabide bezala, zenbait ikerketek [Pujadas et al (2011)] Bartzelona entseguaren erabilera sustatzen dute. Entsegu honetan material gutxiago erabiltzen da lagin txikiagoak behar baitira, ingurumenaren onerako delarik.

Espainiar Instrukzioak entsegu hori erabiltzeko aukera agertzen du, UNE 83515 arauaren arabera normalizatua dagoelarik. Entsegu honek ohiko flexotrakzio entsegua edo materialaren zailtasunaren neurketari dagozkionak ordezkatzeko ahalbidetzen du. Interesgarria da laginak koroa zilindrikoen bidez erauzten direnean, haien geometria ez baita ohikoena entsegu mota horietarako. Ikerketa honetan, entseguaren aldaera bat erabiltzen da [Pujadas (2013)]-en jarraibideak hartuz lagin kubikoak aztertzeke.

6.3.1 Entseguaren konfigurazioa

Entsegua, [Chen (1970)]-ek ezarritako puntzonaketa bikoitzeko entseguaren aldaera da. [Mora (2008)]-k egindako azterketa parametrikoko zabaletik abiatuz, kontaktu azalera eta karga ezarpen abiadura ezarri dira. Arauak esaten duena ez bezala, erabili diren laginak ez dira zilindrikoak ezta moldeatuak, baizik eta hormatik erauzitako kubikoak. Horren ondorioz, ezinezkoa da zeharkako deformazioa neurtzea materialaren zailtasuna zehazteko. Horretarako, entsegu makinak biltzen dituen bere egituraren desplazamenduaren datuetan oinarritzea erabaki da.

Laginek horma barruan zuten kokaera berberarekin jarriko dira entsegu makinan (kargaren ezarpena beraz, norabide bertikal edo Z ardatzaren arabera egingo da). Behin egoera honetan dagoela, 37.5 mm-ko diametroa duten zilindro txiki bana tartekatuko dira lagin eta karga-plateren artean. Garrantzitsua da pieza biak ondo erdiratuak egotea laginaren ardatzarekiko eta bertikal berdinean. Jarraian, karga ezarri egiten da 0.5 mm/min-ko abiaduraz 6 mm-ko desplazamendua neurtu arte. Ezarri den gehienezko karga eta pistoiaren desplazamendu ezberdinei dagozkienak erregistratu egiten dira, zuntz bidezko indartzeak harikortasuna eskaintzen baitio materialari. Beraz, onar daitekeen gehienezko karga eta zuntzek ematen duten zailtasuna aztertzeke helburua dago.



6.3 Irudia: Biela eta tiranteen modeloa [Mora (2008)] eta egindako entseguaren konfigurazioa.

Kanpoko indarrak, goikoak eta behekoak, orekatzeko laginaren barruan garatzen den biela eta tiranteen eskema, 6.3 Irudian ikus daiteke. Modelo hori are sinplifika liteke puntzoi azpiko egoera triaxiala mespretxatuz gero [Mora (2008)].

6.3.2 Laginen kokapena

Bartzelona entsegua egiteko aukeratu diren laginak egituraren erdiko zutabe baten biltzen dira nagusiki, 6.4 Irudian erakusten den bezala. Aukeraketa horren arrazoia, metodo inductiboaren bidez egiaztatu den bezala (5.4 Atala) masaren mugimenduaren ondorioz zuntzek altueraren arabera har dezaketen norabide ezberdinean oinarritzen da. Aldi berean, altueran zehar gertatu den segregazioa entsegu honen bidez agerian ipin daiteke.

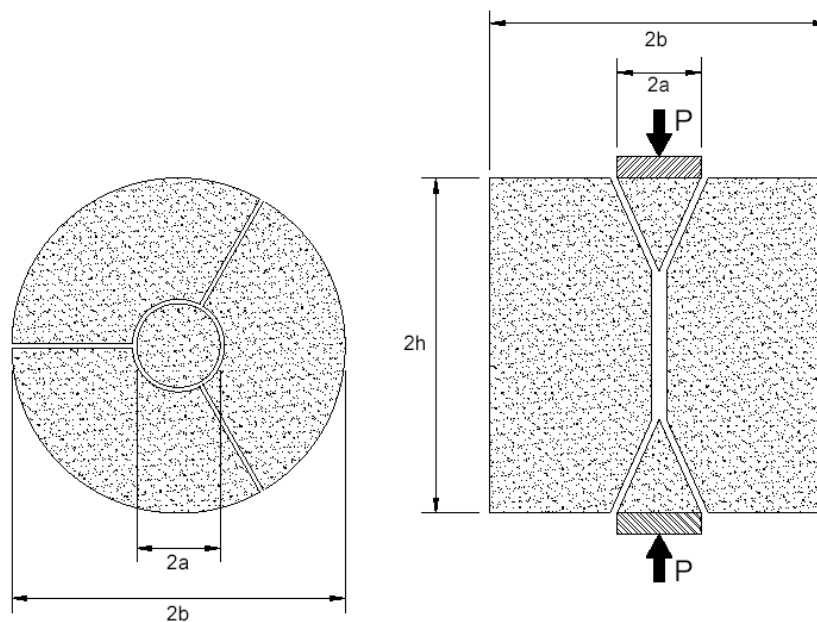
6.4 Irudian erdiko zutabe batean kokatzen diren laginetan, metodo magnetikoen (5.4 Atala) gain teknika estereologikoak (5.3 Atala) ere erabili izan dira, mozketak aldeetako zuntz kopuruaren arabera eta ondoren, birrindu egin dira zuntzak erazteko eta balio guzti hauen arteko alderaketa egiteko.

6.3.3 Bartzelona entseguaren emaitzak

Bartzelona entseguaren emaitzak ez dira aipatutako dosifikazio eta obraratzeari izan duen materialaren adierazgarri, hartu den entsegu prozeduraren arabera. Aurreko ikerketen laginetan [Mora (2008)] sortu izan ohi diren hiru apurketa planoen ordez, kasu honetan alboz-albo dauden bi plano besterik ez dira agertzen. Bertikalean eta batez ere luzetarako norabidean zuntzek duten orientazio nabarmenaren ondorio da. Zeharkako norabideak, edo hormaren lodierak, norabide faktore txikiagoa du aurretiaz aipatu den inductantzia aldakuntzaren neurketaren arabera, nabarmenki zuntz gutxiago dituelarik le-rrokatuak. Proposatutako euste andel zilindrikoen erabilerak ez du armatu handirik behar norabide horretan.

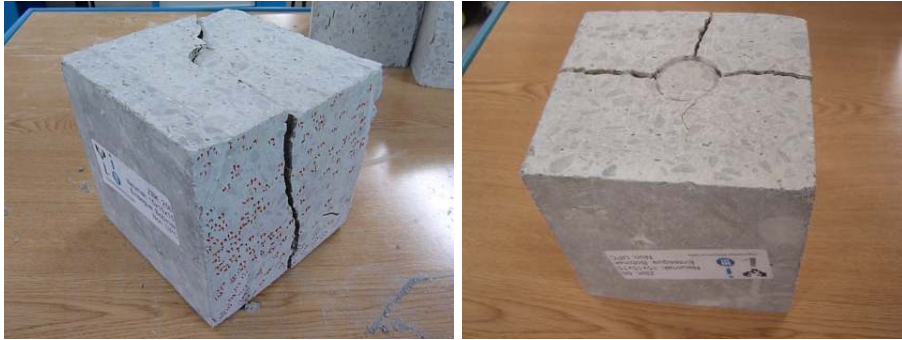
16 cm		16 cm		60 cm		60 cm		60 cm		16 cm		16 cm		60 cm		60 cm		16 cm		16 cm	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	15 cm		
20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	15 cm		
39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	15 cm		
58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	15 cm		
77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	15 cm		
96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	15 cm		
115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	15 cm		
134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	15 cm		
153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	15 cm		
172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	15 cm		
191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	15 cm		
210	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228	15 cm		
229	230	231	232	233	234	235	236	237	238	239	240	241	242	243	244	245	246	247	15 cm		
248	249	250	251	252	253	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266	15 cm		
267	268	269	270	271	272	273	274	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285	15 cm		
286	287	288	289	290	291	292	293	294	295	296	297	298	299	300	301	302	303	304	15 cm		
305	306	307	308	309	310	311	312	313	314	315	316	317	318	319	320	321	322	323	15 cm		
324	325	326	327	328	329	330	331	332	333	334	335	336	337	338	339	340	341	342	15 cm		
343	344	345	346	347	348	349	350	351	352	353	354	355	356	357	358	359	360	361	15 cm		
362	363	364	365	366	367	368	369	370	371	372	373	374	375	376	377	378	379	380	15 cm		

6.4 Irudia: Punzonaketa bikoitzeko entseguan erabili diren lagin kubikoen kopurua (beltzez).



6.5 Irudia: Apurketa mekanismo idealizatuak, banaketa eta irristaketa [Mora (2008)].

Hori dela eta, lortu diren balioak (6.3 Taula) materialak gara ditzakeenak baino txikiagoak dira [Pujadas et al (2011)]. Kargaren ezarketari elkarzuta zaion planoan dauden zuntzak dira sortzen diren trakzio indarrak eusteko arduraren dutenak. 6.3 Taulako inductantzia aldakuntza balioak aztertuz, gehien indartutako ardatzak X eta Z direla egiaztatzen da. Entsegua Z norabidearen arabera egiterakoan, X eta Y ardatzeko zuntzak dira tenkatzen direnak, biga-



(a) Banaketazko apurketa plano bi

(b) Banaketazko hiru apurketa plano

6.6 Irudia: Orientazio ezberdinak dituzten laginen apurketa eredua.

Lagin zbk.	P_{max} (KN)	$T_{\delta=1}$ (N·m)	$T_{\delta=2}$ (N·m)	Zailtasuna				Δ Induktantzia		
				$T_{\delta=3}$ (N·m)	$T_{\delta=4}$ (N·m)	$T_{\delta=5}$ (N·m)	$T_{\delta=6}$ (N·m)	L_x (H)	L_y (H)	L_z (H)
9*	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0.00	0.00	0.00
28	141.7	47.5	89.6					0.00	0.00	0.00
47	147.3	33.2	97.9					0.00	0.00	0.00
66**	168.9	43.9	128.8					0.09	0.03	0.06
85**	161.7	41.6	132.8	157.5				0.30	0.10	0.26
104**	156.6	40.8	135.0	168.6	187.6			0.72	0.21	0.35
123**	158.1	25.3	136.9	198.6	241.8			0.82	0.27	0.40
142	155.1	31.0	143.5	213.1	262.2	301.9	337.1	1.02	0.36	0.50
161**	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	1.25	0.27	0.37
180	171.3	38.8	160.5	191.2	215.3	233.8	248.5	1.26	0.24	0.39
199	167.5	38.5	157.2	178.6	190.0	199.2	207.9	0.78	0.21	0.62
218	166.4	41.8	135.7	153.0	162.4	169.4	175.1	0.92	0.23	0.48
237	155.3	44.9	125.7	146.9	161.7	174.2	186.4	0.63	0.15	0.46
256	173.9	42.0	151.4	167.7	182.3	194.9	206.9	0.79	0.22	0.66
275	183.5	35.3	168.2	225.3	264.7	292.1	315.7	0.99	0.22	0.34
294	201.4	30.5	176.9	280.1	339.9	381.9	419.5	1.49	0.38	0.32
313	190.6	34.5	175.7	263.7	324.4	368.7	405.3	1.49	0.42	0.42
332	184.2	0.1	6.4	92.4	206.1	254.7	289.5	1.42	0.39	0.25
351	161.2	46.8	161.3	204.2	232.4	253.2	270.2	1.57	0.50	0.26
370	154.4	28.2	145.0	242.5	297.5	337.4	368.6	1.81	0.52	0.26

* Lagin akastuna

** Entsegu akastuna

6.3 Taula: Bartzelona entseguaren emaitzak.

rrren ardatzeko zuntzen kopurua, oro har, askoz txikiagoa delarik. Hala ere, argi dago zuntzen indartzeak harikortasuna dakarkiola materialari, matrizearen hausturaren ostean energia beretuz. Zuntzik gabeko goialdeko laginek (28 eta 47 zenbakidunak) bat-batean egiten dute eztanda, puntzonaketa bikoitzak barnean sortzen duen trakzioa dela eta. Azpimarratu beharra dago, banaketa eta irrastatze planoak (6.5 Irudia) ez direla guztiz garatzera heltzen kasu gehienetan, zuntzek eragiten duten joste-efektuaren ondorioz.

66, 85, 104 eta 123 laginen entseguak ez dira zuzen programatu eta ezin izan dira neurketa guztiak erregistratu, 161. laginaren kasuan balio bat ere ez delarik hartu. 28 eta 47 laginek aldiz, eztanda egin dute trakzioaren ondorioz,

inolako indartzerik ez baitzuten.

Materialaren trakzio erresistentzia erregistratu den gehienezko kargaren arabera baliozta daiteke, sortutako arrakala kopurua gorabehera, (6.1a) Ekuazioaren bidez, P karga maximoa, h laginaren altueraren erdia eta a lagin eta karga-plateren artean kokatutako puntzoi zilindrikoen erradioa direlarik. Teorikoki, balio hori (6.1b) Ekuazioaren bitartez lor daiteke. 6.3 Taularen arabera, erregistratutako karga maximoen batz bestekoa 166.6 KN-ekoa da, 4.19 MPa-eko trakzio erresistentziari dagokiona (%9.31-ko aldakuntza-koefizientearekin [C.V.]). Aurretiazko entseguetan lortu den eta 6.1 Taulan biltzen den hormigoien batz besteko konpresio erresistentziaz abiatuz, 4.25 MPa-eko batz besteko trakzio erresistentzia ($f_{ct,m}$) lortzen da. Bi balioen arteko antzekotasunak eta aldakuntza-koefiziente txikiak, entseguaren egokitasuna frogatzen dute materiala ezaugarritzeko. 6.7 Irudian azaltzen diren zailtasunen hasierako balioen parekotasunak, antzeko deformazioan apurketa kargek elkarren antzeko balioak lortzen dituztela adierazten du.

$$f_t = \frac{P}{9 \cdot \pi \cdot h \cdot a} \quad (6.1a)$$

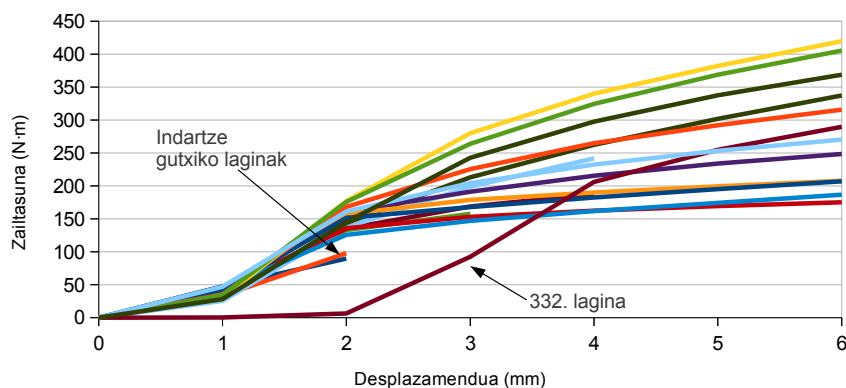
$$f_{ct,m} = 0.30 \cdot f_{ck}^{2/3} \quad (6.1b)$$

Trakzio erresistentziak desbideratze mugatua duen bitartean, ez da berdina gertatzen lagin bakoitzean neurtutako zailtasunarekin. Kasu honetan, dispertsioa handiagoa da, 285.9 N·m-ko batzbesteko balioaz eta %29.6-ko C.V.-arekin, 6.7 Irudian ikus daitekeen bezala. Desadostasun honen arrazoia, materialaren erantzunean era nabarmenean eragiten duten zuntzen zenbateko eta orientazio ezberdinetan datza. Azpimarratu beharra dago, 332. laginak bestekiko oso bestelakoak diren balioak agertzen dituela. Kargak ezartzeko aurpegietan izan litekeen irregulartasunen batek, mozte eta erauzketa fasearen ondorio, erantzuna alda izan dezakeela uste da, besteen aldean bere barnealdeko tentsioen sorrera atzeratuz eta baita egituraren 6 mm-ko ibiltarteari dagokion zailtasun balioa ere, bere zuntz zenbatekoaren arabera espero zitekeena baino txikiagoa izanik.

Behin emaitzak aztertuta, kanpaina plano bitan antzeko norabide faktorea duten laginetara handitzea erabaki da. Arestian aipatu diren metodo magnetikoetan oinarrituz, 6.4 Irudian horman sakabanaturik agertzen diren laginak hartu dira. Kasu honetan, kargaren ezarpena zeharkako norabidearen arabera egiten da, Y ardatzean zehar. Aldaketa honen arrazoia, materialak gara dezakeen gehienezko ahalmenaren adierazgarritasunik handiena bilatzean datza. Argi dago, perimetroko trakzioa izanik proposatu den materialaren erabileran eutsi beharreko indarrik handiena, beharrezkoa dela erresistentzia X ardatzaren arabera zehaztea. Hortaz, karga edozein norabidetan ezar daiteke X ardatzean izan ezik, materialaren portaera ardatz horren arabera kargatuz aztertuz gero, trakzioa beste bietan agertuko litzatekeelako.

Antzeko zenbatekoak, baina orientazio ezberdinak, dituzten laginen emaitzak arreta gehiagorekin aztertuz (6.4 Taula), apurketa kargek zuntz zenbateko eta orientazioaren menpeko ez direla egiaztatzen da, azken zailtasunak trakzio esfortzuak agertzen diren planoaren ardatz bietako zuntz kopuruaren gehikuntzaz handitu egiten diren bitartean.

6.8 Irudian hasiera batean apurtutako hainbat laginen emaitzak alderatzen dira, trakzionatutako ardatz bietan antzeko orientazioa duten laginekiko. Ez-



6.7 Irudia: Materialaren zailtasuna.

Lagin zbk.	P_{max} (KN)	$T_{\delta=1}$ (N·m)	$T_{\delta=2}$ (N·m)	Zailtasuna						Δ Induktantzia		
				$T_{\delta=3}$ (N·m)	$T_{\delta=4}$ (N·m)	$T_{\delta=5}$ (N·m)	$T_{\delta=6}$ (N·m)	L_x (H)	L_y (H)	L_z (H)		
127	156.3	14.5	116.1	172.5	199.6	218.7	232.9	0.34	0.18	0.36		
224	170.6	16.8	118.4	199.5	243.6	277.2	302.6	0.76	0.25	0.81		
235	150.3	13.5	114.1	182.4	227.8	264.4	294.6	0.64	0.24	0.64		

6.4 Taula: Bartzelona entseguren emaitzak Y norabidean.

kerreko grafikoek azken zailtasuna antzekoa dela erakusten dute, edo are hobea, antzeko zuntz zenbateko eta orientazio ezberdinak dituztenak baino. baina batez ere, X ardatzean antzeko orientazioa, baina trakzionatutako ardatz zutean askoz txikiagoa duten laginekin alderatuz gero, antzematen da ezberdintasuna, eskumako grafikoan argi ikusten den bezala.

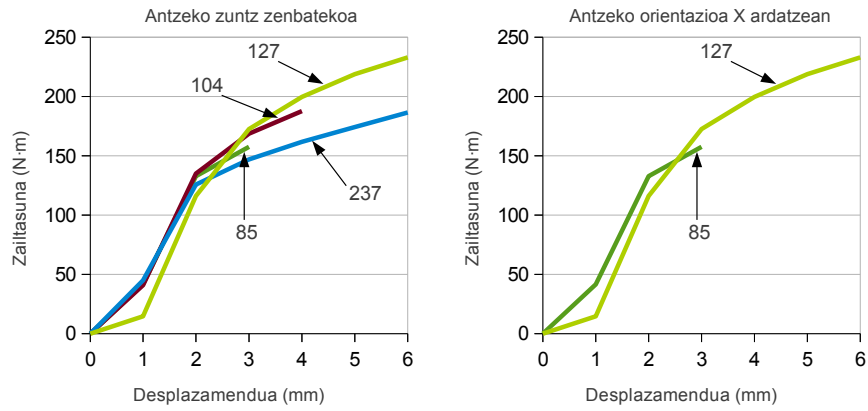
6.6 Irudia ikusirik eta azaldu denaren aurka, antzeko zuntz orientazio duten bi ardatzekiko era zutean eginez gero entsegua, edozein ardatzekiko paralelo izanik ahultzat har daitekeen planorik ez dagoenez, apurketa piezaren diagonalean zehar gertatzen da (6.9 Irudia).

6.4 Brasildar Entsegua

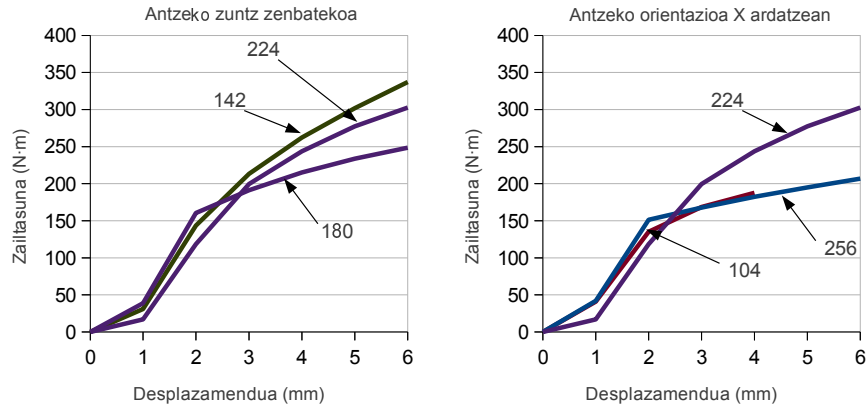
Lehenago lortu den materialaren trakzio erresistentzia balioa erkatzeko asmoz, zenbait zeharkako trakzio entsegu egin dira ezaguna den Brasildar entseguan oinarrituz, UNE-EN 12390-6 arauaren arabera. Horretarako, hiru probeta zilindriko erabili dira (150 mm-ko diametroa eta 300 mm-ko altuera) hormaren egikaritzearekin eta adin ezberdinetan konpresio erresistentzia zehazteko erabili direnekin batera moldeatu direnak,

6.4.1 Entseguren konfigurazioa

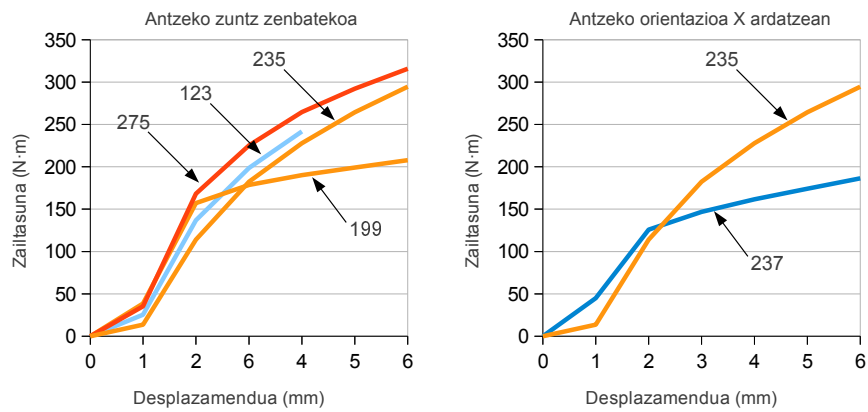
Laginen apurketa norabide erradialean ezartzen den kargaren bidez ematen da. Horretarako, probeta horizontalki kokatzen da erabili beharreko makinaren



(a) 127. lagina

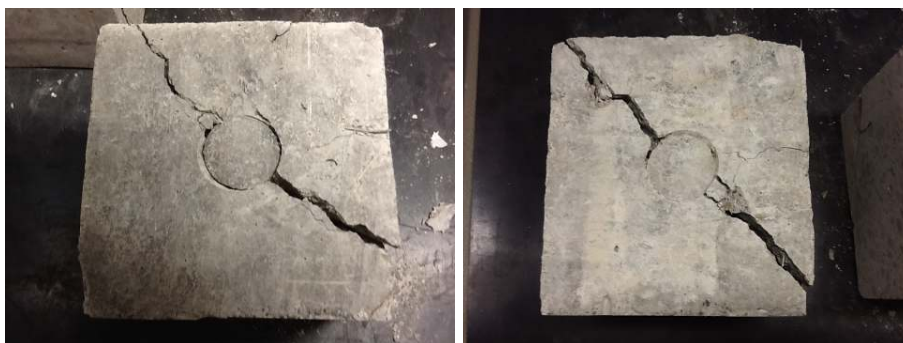


(b) 224. lagina



(c) 235. lagina

6.8 Irudia: Antzeko zuntz zenbateko eta X norabideko orientazioa duten laginen arteko alderaketa.



(a) 127. lagina

(b) 224. lagina

6.9 Irudia: Antzeko orientazioa duten laginen apurketa eredua.

Lagina	1	2	3
f_{ct} (MPa)	5.44	5.14	5.84
$f_{ct,m}$ (MPa)	5.47		
C.V. (%)	6.42		

6.5 Taula: Lagin zilindrikoen zeharkako erresistentziaren emaitzak.

karga-plateren artean. Tentsioa era zuzenean sorrarazteko, zuntz prentsatzuko euskarri bandak tartekatu dira lagin eta plateren artean.

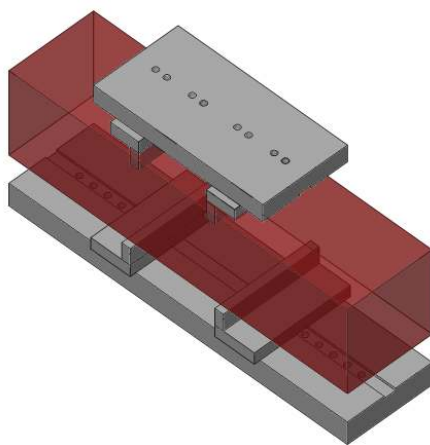
Jarraian karga ezartzen da era konstantean lagina apurtu arte, lortu den karga maximoaren balioa erregistratuz. Kasu honetan, materialaren trakzio erresistentzia soilik aztertzeke helburua dagoenez, zuntzek dakarten harikortasuna aztertu eta multzoaren tentsio-pitzadura irekidura edo tentsio-elongazio portaera ezaugarritu gabe, asmo horretarako datuak hartzeko desplazamendu transduktoreen instalakuntza baztertu da. 2.2.2 Atalean aipatu den legez, [Kooiman (2000)]-en arabera Brasildar entsegua da egiteko errazena.

Bestalde, UNE-EN 12390-6 arauaren A Eranskinean azaltzen den prozedura erabil liteke, entseguaren aldaera deskribatzen duena hormatik erauzi direnak bezalako lagin kubikoetan erabili ahal izateko. Ikerketa honetan, hormigoia indartze gisara zuntzek ematen duten zailtasun gehigarria balioesteko, Bartzelona entsegua erabiltzeko erabakia hartu da (6.3 Atala), Brasildar entsegua baino are sinpleagoa baita.

6.4.2 Brasildar entseguaren emaitzak

Laginen apurketa karga maximoaren arabera, materialaren zeharkako trakzio erresistentzia zehaztu da. 6.5 Taulak, entseguetan erabili diren hiru laginetako bakoitzaren datuak laburbiltzen ditu, batuz besteko eta aldakuntza-koefizientearekin batera.

Emaitza hauek 6.3.3 Atalean lortutakoekin alderatuz, Brasildar entsegua eta Bartzelona entseguaren bitartez lortu diren erresistentzien arteko erlazioa 1.31-koa dela ondorioztatzen da, horietatik lehenengoak beti balio handiagoa agertuz. Koefiziente honek entsegu biak erlazionatzen ditu eta trakzio erresistentzia aztertzea ahalbidetzen du Bartzelona entseguaren bitartez. Era ho-



(a) Entsegurako tresna



(b) Entsegu ondoko apurketa

6.10 Irudia: Ebakitzaila entseguaren gauzatzea.

netan, posiblea da tamaina txikiagoko laginak erabiltzea, beharrezko material kantitatea murriztuz.

6.5 Ebakitzaila entseguak

Ebakitzaila entseguaren bitartez, esfortzu tangenzialekiko materialaren erresistentzia azter daiteke ebaketa bikoitz bidez. Zuntz gehitzeak apurketa mota ezberdinekiko zailtasuna handitzeaz gain, esfortzu mota honekiko erresistentzia ere handitzen du.

6.5.1 Entseguaren konfigurazioa

Entsegua UNE 83511 arauaren arabera egiten da, 150 x 150 mm-ko eba-kidura eta 600 mm-ko luzera duten lagin prismatikoetan. Horretarako, 6.10 Irudian erakusten den tresna erabiltzen da, azertu beharreko lagina bertan tartekatzen delarik.

Sortuko den arrakala tresnaren hortzen artean izan behar du laginaren aldeetako batean. Bestela, ondorengo analisietarako emaitzak baztertu behar dira.

6.5.2 Laginen kokapena

Proposatutako euste andel zilindrikoen erabilerak, ez du esfortzu ebakitzaila handiegirik eragiten egiturarengan. Hori dela eta, esfortzu tangenzialen aurreko erresistentziaren zehaztapena era murriztuan egiten da, 6.11 Irudian erakusten den hormaren kokapenetik erauzitako 8 lagin prismatiko entseguetarako baliatuz. Konpresio erresistentzia ezaugarritzeko entseguan bezala, hormaren egikaritzearekin bat moldeatu diren beste 6 lagin prismatiko ere entseguetan erabili dira, lortutako emaitzak erkatzeko balioko dutenak.

15 cm		15 cm		60 cm		60 cm		60 cm		15 cm		15 cm		60 cm		60 cm		15 cm		15 cm																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228	229	230	231	232	233	234	235	236	237	238	239	240	241	242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266	267	268	269	270	271	272	273	274	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285	286	287	288	289	290	291	292	293	294	295	296	297	298	299	300	301	302	303	304	305	306	307	308	309	310	311	312	313	314	315	316	317	318	319	320	321	322	323	324	325	326	327	328	329	330	331	332	333	334	335	336	337	338	339	340	341	342	343	344	345	346	347	348	349	350	351	352	353	354	355	356	357	358	359	360	361	362	363	364	365	366	367	368	369	370	371	372	373	374	375	376	377	378	379	380

6.11 Irudia: Ebakitzaille entseguan erabili diren lagin kubikoen kokapena (beltzez).

Lagin moldeatuak	Lagin erauziak	
τ_v (MPa)	Lagin zbk.	τ_v (MPa)
7.39	41	5.64
7.85	55	3.70
8.6	193	6.31
8.51	198	7.58
10.05	207*	6.41
6.73	345	7.55
	350	11.21
	359	5.55

* Lagin akastuna

6.6 Taula: Probeten ebakitzaille erresistentziaren emaitzak.

6.5.3 Ebakitzaille entseguren emaitzak

[Boulekbache et al (2012)]-ek zehazten dute, konpresio erresistentzia, lehen-dabizi, eta, bigarren, zuntz zenbatekoa direla materialaren ebakidura erresistentzia neurri handiagoan hobetzen duten aldagai nagusiak. Erlazio itxurak eragin gutxiago du gehikuntza horretan. Ez da parametro hauek aztertutako materialean zelan eragiten duten antzeman, baina 6.6 Taulari erreparaturaz, entseguetan neurtu diren balioak, proposatutako egiturak zerbitzuan izango litzuzkeenak baino handiagoak direla ondorioztatzen da.

6.6 Flexotrakzio entseguak

Materialaren lege eratzaila balioztatzeke beharrezko parametroak ezartzeke asmoz, araudi gehienak flexotrakzio entseguan oinarritzen dira. Atal honetan, egindako entseguen prozedura, lortutako emaitzak eta beste parametro batzuekiko erlazioak azalduko dira, materialaren erantzuna aurreikustea bidegarri egin dezaketenak.



(a) Entseguren konfigurazioa

(b) Entseguren emaitza

6.12 Irudia: Flexotrakzio entseguren gauzatzea.

15 cm	15 cm	60 cm	60 cm	60 cm	15 cm	15 cm	60 cm	15 cm	15 cm	60 cm	15 cm	15 cm	15 cm	60 cm	60 cm	15 cm	15 cm	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38
39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57
58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76
77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95
96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114
115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133
134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150	151	152
153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171
172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190
191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209
210	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225	226	227	228
229	230	231	232	233	234	235	236	237	238	239	240	241	242	243	244	245	246	247
248	249	250	251	252	253	254	255	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266
267	268	269	270	271	272	273	274	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285
286	287	288	289	290	291	292	293	294	295	296	297	298	299	300	301	302	303	304
305	306	307	308	309	310	311	312	313	314	315	316	317	318	319	320	321	322	323
324	325	326	327	328	329	330	331	332	333	334	335	336	337	338	339	340	341	342
343	344	345	346	347	348	349	350	351	352	353	354	355	356	357	358	359	360	361
362	363	364	365	366	367	368	369	370	371	372	373	374	375	376	377	378	379	380

6.13 Irudia: Flexotrakzio entseguan erabili diren probeta kubikoen kokapena (beltzez).

6.6.1 Entseguren konfigurazioa

Gauzatu den entsegua UNE-EN 14.651 arauan azaldutakoa da, hiru puntu-ko flexotrakzio entseguan oinarrituz (6.12a Irudia). Lagina, haren erdigunearreko distantziakideak diren euskarri biren gainean kokatzen da, 500 mm-ko tartea dagoelarik haien artean. Aurretiaz, laginari hozka bat egin zaio erdiguneko ebakiduraren behealdetik. Hozka horren sakonerak $25 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ -takoa izan behar du.

6.6.2 Laginen kokapena

Entseguetan erabili diren 74 laginen kokapena 6.13 Irudian ikus daitekeena da. Agerian denez, hormaren osotasuna aztertu da ia, txandakako errenkaketan, altuera guztian zehar. Ondorengo jarduerak, irudi berdinean azaltzen diren beste lagin batzuetara zabalduta dute azterketa.

6.6.3 Flexotrakzio entseguaren emaitzak

Uste zen bezala, emaitzen dispertsioa handia izan da. Are gehiago, laginak ez direlako laborategian baldintza berdinen arabera moldeatu, haien barneko zuntz zenbateko eta orientazioa hormaren egikaritzeak ezarritako baldintza-tzaileen ondorio delarik. Materialaren erantzuna 6.14a-tik 6.14f-rako Irudietan ikus daiteke.

Laginaren erdiguneko inductantzia aldakuntza emaitzak eta flexotrakzio entseguan duten portaera alderatuz, erlazio nabarmena dagoela dirudi. Hala ere, badira lagin bi ez dutenak espero zen maila eman, apurketa entsegu eta inductantzia neurketari dagozkien alderdien ondorio izan daitekeena. Batetik, lagin osoarengan neurtu da inductantzia, entseguak laginen erdiguneko behealdean hozka bat egitea eskatzen duen bitartean, pitzadura irekidura aurretiaz zehaztutako ezarri dagoen tokian neurtu ahal izateko. Horrek zenbait zuntzen mozketak ekar lezake, argi denez, eraginkorrak izateari utziko lioketenak. Bestetik, sortzen den eremu magnetikoak aztertutako ebakidura guztia zeharkatzen du, ezinezkoa delarik eragina duten zuntzak, laginaren goialdean edo behealdean aurkitzen diren zehaztea, trakzio esfortzuak eusteko duten aukeran eragina izanik. Alderdi konprimituan edo trakzio gutxiko guneetan dauden zuntzek, laginaren goialdea kasu, ez dute fisuren josketan parterik hartzen, ez dutelarik trakzio esfortzurik eusten ia. Ustea dago, aldaketa guzti hauek eragin gutxiago izango dutela neurri handiagoko elementu osoetan.

Lagin zbk	$f_{ct,L}^f$	$f_{R,1}$	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$	$f_{R,4}$	Zuntzak (ud)	ΔL_m (H)
60	3,97	3,21	2,83	2,68	1,72	N/A	N/A
61	3,00	0,83	0,85	0,68	0,71	10	0,2
62	3,99	0,69	0,73	0,45	0,31	7	0,2
65	3,34	0,84	0,80	0,76	0,61	8	N/A
68**	0,66	0,63	0,17	0,12	0,11	3	0,07
73	3,37	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0
74	2,89	0,46	0,02	0,02	0,02	0	N/A
98	4,78	2,39	2,21	2,04	1,81	70	1,141
99	4,32	4,60	5,09	3,46	0	50	0,641
100	5,66	7,92	6,45	5,46	5,07	87	1,369
103	6,07	5,64	7,92	4,30	-1,53	59	1,002
106	4,13	3,19	3,54	3,24	3,33	26	0,523
111	4,62	1,16	0,87	0,34	-0,09	N/A	0,113
112	3,80	0,03	-0,03	0,00	0,00	0	0,008
119	6,26	10,13	6,52	5,07	4,57	N/A	1.445***
136	5,56	2,63	2,41	2,42	2,42	26	N/A
137	3,77	5,43	6,02	4,75	4,08	69	1,227
138	6,51	7,12	6,28	4,62	4,04	71	1,376
141	5,21	8,82	6,63	5,69	5,65	70	N/A
144	5,00	7,98	8,74	8,21	7,29	85	1,099
149	4,35	3,49	2,98	2,43	2,31	31	0,475
150	3,34	1,36	1,35	1,59	1,58	12	N/A
156**	0,78	1,27	1,06	0,98	0,91	N/A	1.427***
160	7,61	6,39	5,46	5,01	4,03	N/A	1.462***
163	4,46	5,71	6,15	4,40	3,77	N/A	1.512***
168	4,42	2,28	2,08	1,90	1,93	N/A	0.662***
169	3,38	1,99	2,24	2,27	2,11	N/A	0.436***

Hurrengo orrialdean jarraitzen du

* Lagin akastuna

** Entsegu akastuna

*** Erdiguneko balioa

Taula 6.7 – aurreko orrialdetik dator

Lagin zbk	$f_{ct,L}^f$	$f_{R,1}$	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$	$f_{R,4}$	Zuntzak (ud)	ΔL_m (H)
174	4,93	2,08	1,08	1,11	1,02	38	0,645
175	7,10	10,52	9,07	6,21	0,51	86	1,278
176	6,53	11,08	8,68	7,12	5,65	94	1,338
179	6,03	9,70	10,37	8,73	7,30	100	1,489
182	5,58	9,00	6,71	6,49	5,99	86	1,531
187	5,76	5,35	5,78	3,20	1,05	83	0,996
188	5,42	2,76	2,73	2,92	2,56	41	0,504
201	4,86	4,55	5,28	1,12	4,01	N/A	0,914***
212	4,75	3,65	2,41	1,57	1,57	28	N/A
213	5,97	9,57	8,23	6,63	5,03	87	1,681
214	4,61	4,14	4,14	4,14	4,15	59	0,914
217	5,73	5,35	5,06	4,51	4,34	67	N/A
220	5,46	9,00	8,86	8,45	7,36	87	1,183
225	4,65	5,99	6,02	4,14	4,04	53	1,072
226	5,28	4,84	3,81	3,92	3,87	42	N/A
233	4,31	0,95	0,89	0,64	0,58	N/A	0,344***
236	4,64	4,88	5,00	3,79	3,54	N/A	0,952***
244	6,28	6,64	5,90	4,31	3,67	N/A	1,478***
250	5,20	2,37	1,84	1,75	1,70	39	0,895
251**	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	79	1,323
252	4,56	1,81	2,32	2,38	1,83	N/A	0,603
255	5,72	5,90	6,08	5,82	5,14	58	1,001
258	6,30	10,28	10,00	9,36	8,05	106	1,463
263	6,77	9,00	8,79	7,64	7,16	90	1,068
264	6,61	3,79	3,96	3,5	3,29	N/A	0,645
289	3,52	2,66	2,65	2,69	2,61	39	0,74
290	4,66	7,78	6,9	5,76	4,59	71	1,139
293	6,53	9,49	9,37	8,63	7,33	86	N/A
296	6,12	9,17	9,33	8,29	7,43	127	1,98
301	6,94	10,66	10,84	9,49	8,89	117	2,058
302	6,47	11,40	9,19	7,97	7,83	95	N/A
320	6,39	9,48	9,17	8,00	4,62	N/A	1,388***
326	5,78	8,52	7,34	6,88	5,75	76	0,967
327	5,87	6,19	4,77	3,8	3,51	65	1,112
328	7,30	9,09	7,17	5,08	4,42	N/A	1,975
331	5,97	8,48	8,78	7,82	7,24	108	1,735
334	6,79	7,94	8,79	0,58	0,58	141	1,85
339	6,90	11,51	11,08	9,29	7,79	99	1,707
340	5,68	5,16	4,52	3,11	2,02	34	0,585
347	7,34	11,97	10,96	8,34	7,38	N/A	2,584***
364	9,89	13,01	13,01	11,72	11,67	124	N/A
365*	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
366	7,87	11,12	11,88	10,55	9,45	154	2,367
369	8,64	10,36	9,65	8,89	8,69	135	N/A
372	5,18	7	9,49	8,68	7,62	155	2,232
377	5,81	9,58	8,86	7,32	6,13	88	1,588
378	5,41	6,31	6,92	5,99	5,44	65	N/A

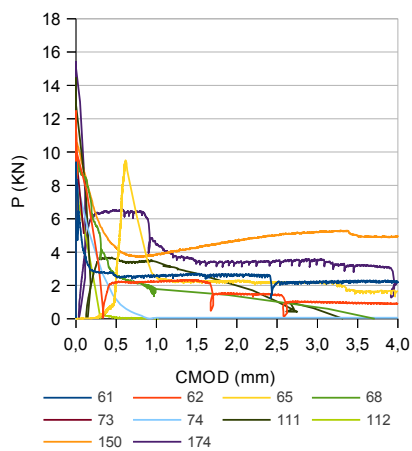
6.7 Taula: Laginen flexotrazio erresistentziaren emaitzak.

* Lagin akastuna

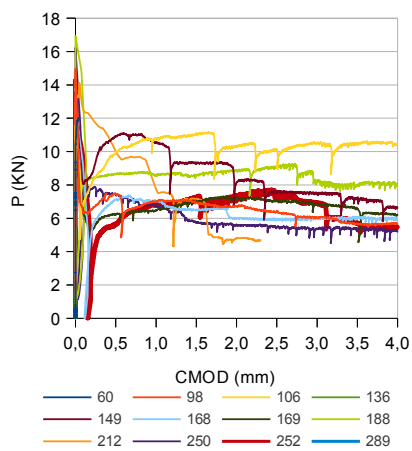
** Entsegu akastuna

*** Erdiguneko balioa

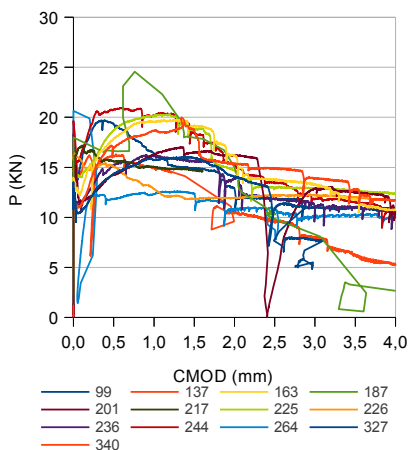
Gune ezberdinen portaera (6.14 Irudia) hormaren osotasunean (6.15 Irudia) irudikatuz, 5.10 Irudiarekiko antzekotasunik badela hautematen da, erresistentzien gutxitzea antzemanaz masaren goranzko jarioaren arabera, zuntzak



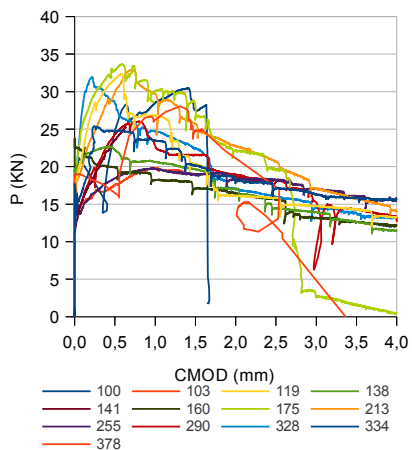
(a) 1. zonaldea



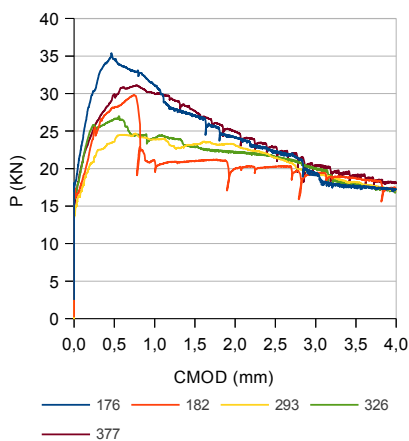
(b) 2. zonaldea



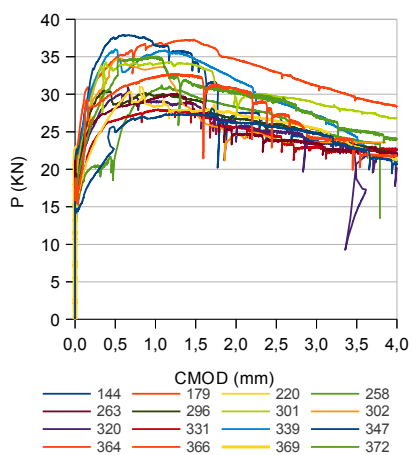
(c) 3. zonaldea



(d) 4. zonaldea



(e) 5. zonaldea



(f) 6. zonaldea

6.14 Irudia: Portaera mekanikoen arabera taldekatutako laginak.

Hormigoiazen ponpaketa										
	60	61	62		65		68		73	74
	96	99	100		103		106		111	112
			119							
	136	137	138		141		144		149	150
					160		163		168	169
	174	175	176		179		182		187	188
							201			
	212	213	214		217		220		225	226
					236				244	
	250		252		255		258		263	264
		289	290		293		296		301	302
	326	327	328		331		334		320	
			347						339	340
	364		366		369		372		377	378

Hormigoiazen jarria

6.15 Irudia: Egituraren baitan laginen portaera mekanikoaren irudikapena.

norabide bertikalean lerrotatzen dituelarik horizontalean beharrean.

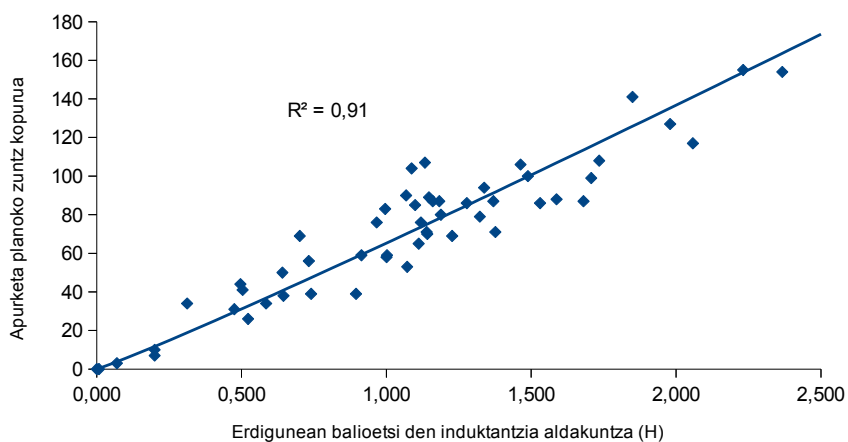
6.6.3.1 Entsegu magnetikoekiko erlazioa

Aurreko ataletan aipatu izan den bezala (5.4 Atala), lagin prismatikoengan metodo magnetikoak erabili izan dira, emaitzak 6.7 Taulan biltzen direlarik. Atal honetan, apurketa ebakiduran azaltzen diren zuntz kopuruaren balioztapen zuzena frogatzeko asmoa dago. Laginen gehiengoan, induktantzia aldakuntza laurden bakoitzean neurtu izan denez soilik, eta ez piezaren erdigunean, egindako hozkaren ondorioz apurketa espero den lekuan, erdiko laurden bietan lortu diren balioak linealki interpolatu dira erdiguneko ebakiduraren batz besteko balioa lortzeko.

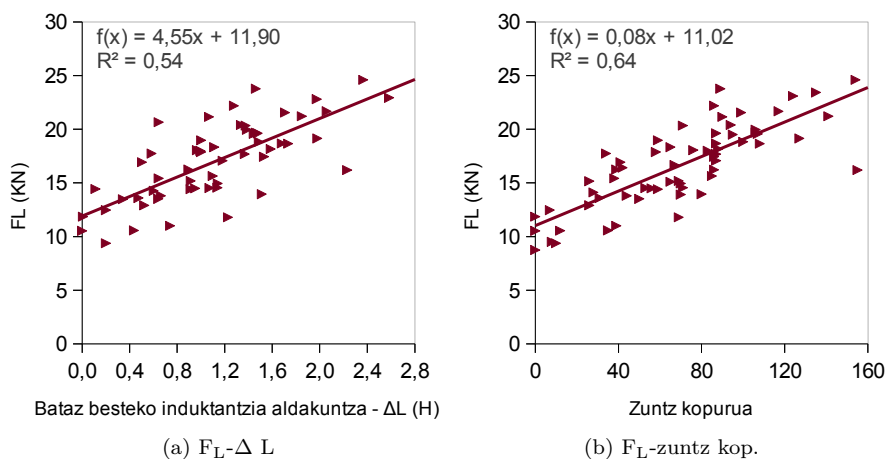
6.16 Irudiak oso linealtasun maila egokia agertzen du, apurketa ebakiduran aurki daitezkeen zuntz kopurua balioesteko entsegu magnetikoan lortutako balioetan oinarrituz. Determinazio-koefizientea ($R^2 = 0.91$) oso handia da eta ikus daitezkeen dispertsioa, eremu magnetikoan eragina izanik ere, laginaren hozkaren zonaldean aurkitzean banaka zenbatu ez diren zuntzen ondorio izan daiteke. Horri gehituta, nabarmendu beharra dago entseguan zehar zenbait ezkatatze fenomeno, edo *spalling*, gertatzen direla hormigoiazen matrizean zuntzen bat edo besteren askatzea ere eragin dezaketenak. Aldi berean, apurtutako gunetik hurbilago egindako induktantzia aldakuntza neurketek, balio zehatzagoak ekar litzakete.

Lortu diren emaitzetan oinarrituz, posible da beraz, edozein harilekin lagin prismatiko baten erdigunean induktantzia aldakuntza neurtzea, zuzenketa faktoreen bitartez haren balioa egokitu eta kalibraketa ereduarekin alderatzea. Horrek zuntz zenbatekoaren balioztapena bideragarria egingo luke.

Erlazio hori onargarritzat hartuz eta apurketa ebakiduran aurkitzen den zuntz kopurua materialaren erantzun mekanikoan eragin handiko parametro dela onartuz, orduan, onargarria da induktantzia aldakuntza balioek, neurri batean, flexotrakzio entsegua materialaren erantzuna balioesteko erabil daitezkeela esatea. Benetan eta aurretiaz azpimarratzen ari den bezala, induktantzia aldakuntzak apurketa ebakiduran dauden zuntz kopuruaren informa-



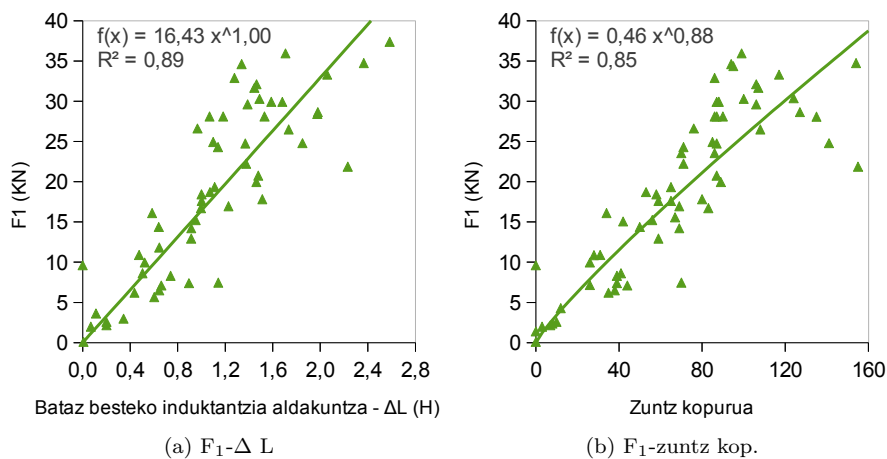
6.16 Irudia: Induktantzia aldakuntza eta apurketa planoaren zuntz kopuruaren arteko erlazioa.



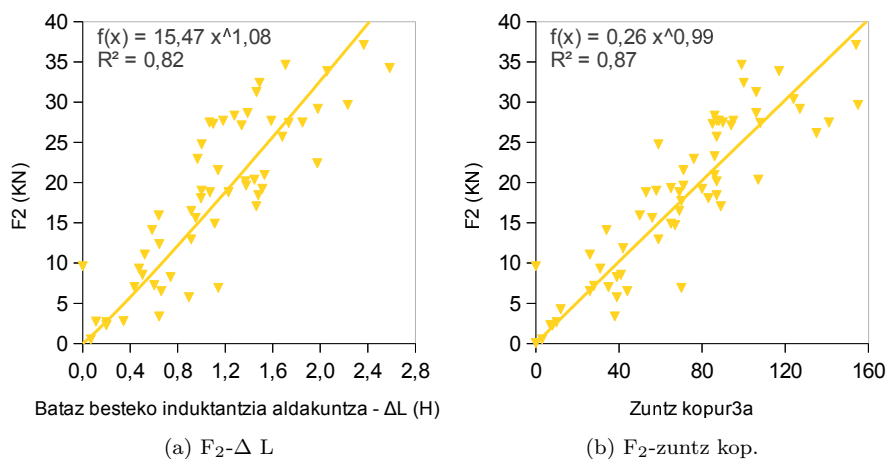
6.17 Irudia: Karga-induktantzia eta karga-zuntz kopuruaren arteko erlazioak F_L -rentzat.

zioa eman dezake, baina ez behealdean edo goialdean kokatzen diren, zonalde trakzionatua edo konprimitua hurrenez hurren egindako entseguaren arabera. Proporzionaltasun Muga (LOP) eta pitzadura irekidura ezberdinentzako kargak batetik, eta apurketa ebakiduran zenbatutako zuntz kopurua bestetik, induktantzia aldakuntza balioekin alderatu egiten dira 6.17-tik 6.21-rainoko Irudietan, esponentzial laukoitz modeloak (6.6.3.2 Atala) beharrezko dituen parametroak ezartzea ahalbidetzen duten erregresio kurbak lortzen direlarik.

6.17-tik 6.21-rainoko Irudietan, determinazio-koefizientea altua dela antzematen da 0.5 eta 1.5 mm-ko irekiduren kargentzako, F_1 y F_2 hurrenez hurren,



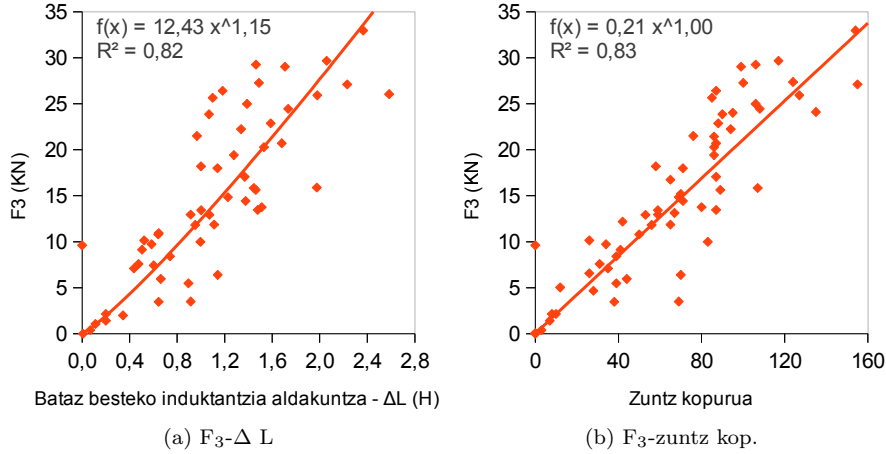
6.18 Irudia: Karga-induktantzia eta karga-zuntz kopuruaren arteko erlazioak F_1 -rentzat.



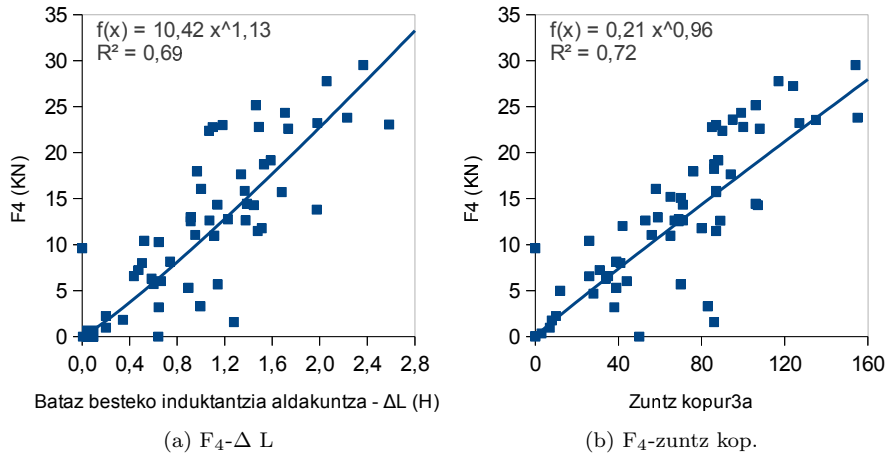
6.19 Irudia: Karga-induktantzia eta karga-zuntz kopuruaren arteko erlazioak F_2 -rentzat.

gutxitzen doalarik irekidura handiagoetan entseguaren dispersioa areagotzen denean. Doitasun handieneko joera lerroek kurba potentzial itxura hartzen dute hondar erresistentzien kasuan, zuntzik ez duten eta ondorioz, eremu magnetikoa aldatzerik ez duten hormigoien matrizearen hausturaren ostean, erresistentziarik aurkez ez dezaketela kontuan hartuz.

Hala eta guztiz ere, probeta guztiek ez dute horren antzekotasun nabarmenik erakusten. Beharrezkoa da gogoratzea, harilak gaur egungo konfigurazioarekin, erdiguneko 15 cm-tan neurtzen duela inductantzia aldakuntza. Horretatik haustura ebakidura gurutzatzen duten zuntzen kopurua baliozta



6.20 Irudia: Karga-induktantzia eta karga-zuntz kopuruaren arteko erlazioak F_3 -rentzat.



6.21 Irudia: Karga-induktantzia eta karga-zuntz kopuruaren arteko erlazioak F_4 -rentzat.

daiteke, masan nahastu diren zuntz zenbateko eta espero den norabide faktorearen arabera. Baina entseguaren ondorioz apurketa planoan ager daitezkeen zuntz kopurua ezberdina izan daiteke, neurketa luzera handiagoan egin baita. Gainera, proposatu den metodoak ez du zuntz kokapena bereizten ebakiduran zehar, elementuaren zonalde konprimituan egon daitezkeelarik trakzionatuan beharrean, haien ekarpena eraginkorra izango ez delarik.

Apurketa ebakiduran zenbatu diren zuntz kopuruari dagokionez, induktantzia aldakuntzaren neurketa baino metodo nekez eta, agian, anbiguoagoa izan daiteke. Zaila da zehaztea agerian geratu diren zuntzek mekanismo erresis-

tentean parte hartu dutenez eta, hortaz, eraginkorrak izan diren, neurketa egiteko beharrezkoa den laginaren zati bien banaketa prozesuan, zuntzak askatzeko aukera dagoelarik gainera.

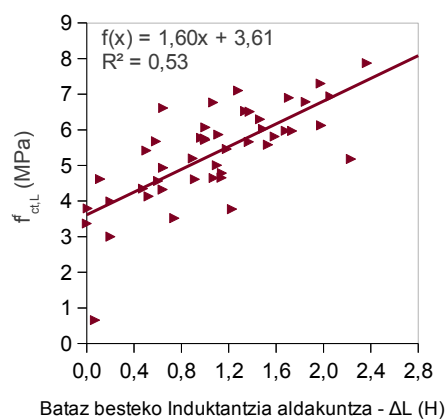
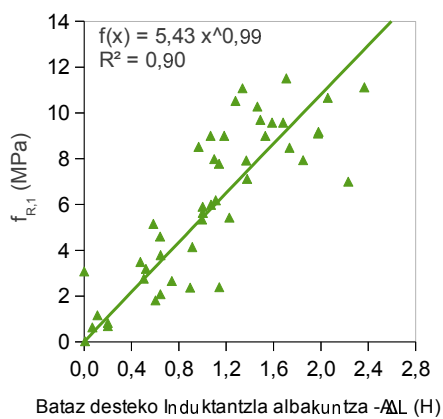
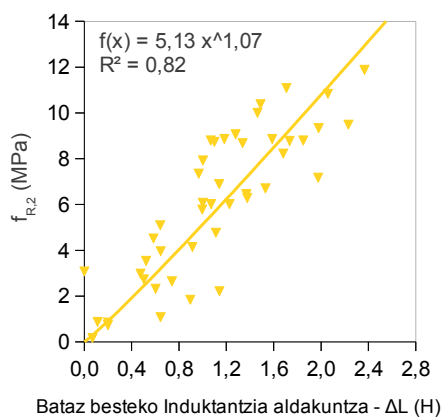
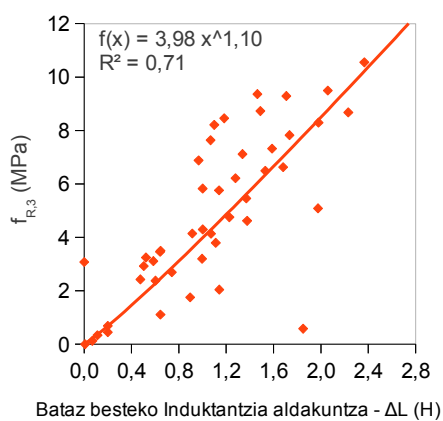
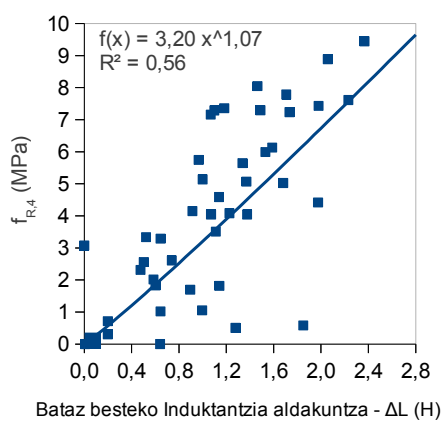
Proporzionaltasun mugari dagokion kargak ere, R^2 txikia aurkezten du, baina balio hori hartzeko prozedura ere kontuan hartu beharrezkoa da. Araudiaren arabera, pitzadura irekidura 0.05 mm-raino izan den kargarik handiena zehaztu behar da, horrek, hainbat arrazoi direla eta tarte horretatik kanpo gera litezkeen beste balio adierazgarriago batzuk bazter ditzakeelarik. Horien artean, laginaren gainazaleko akatsen ondoriozko euskarri eta karga aplikazio puntu eta laginaren arteko egokitze ezegokia, zuntzen kokapen eta norabidea eta abar aipa litezke. Gainera, zuntz zenbateko edo induktantzia aldakuntzak, bere balioan eragin mugatua dutela antzematen da. Joera hori adierazteko erarik egokiena erlazio lineal baten bidez da, indartu gabeko hormigoietan ere matrizeak halako trakzio erresistentzia duelako.

Erregresio lerro horien erabilera aipatu diren parametroak aurreikusteko egokia dela frogatzeko, geroago apurtu diren beste 11 lagin prismatikoetan aurreikusitako eta entsegu bidez lortutako hondar erresistentzien arteko alde-raketa egingo da jarraian. Neurtutako induktantzia aldakuntza eta flexotrakzio entseguaren arabera erregistratutako erresistentzien arteko erlazioak 6.22a-tik 6.22e-rainoko Irudietan agertzen dira. Espero den legez, Proporzionaltasun Mugaren balioak ez zaizkio egoki doitzen erregresio lerroari, zuntzek eragin txikia baitute matrizearen trakzio erresistentzian. Zuntzen ekarpena nabarmena denez behin matrizea hautsi dela, hondar erresistentzietan dagozkien erregresio lerroen maldak aurrekoa baino handiagoak dira. Aldi berean, ezarri den doiketarako determinazio-koefizientearen balio hobeak agertzen dituzte.

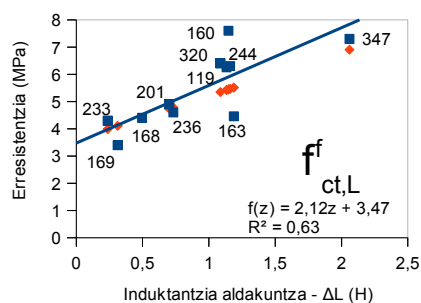
Antzeko portaera antzematen da *a posteriori* apurtu diren 11 laginetan. 6.23a-tik 6.23e-rainoko Irudietan lagin horien flexotrakzio entseguen emaitzak biltzen dira, erresistentzia bakoitzarentzako aurreikusitako balioekin gainjarririk. Adierazten diren erregresio lerroek antzekotasun handia agertzen dute. Balio segida bien arteko ezberdintasunak ez dira handiak. Tarte bien arteko ratioa kontuan hartuz, zenbait alderdi interesgarri hautematen dira. 6.8 Taulak erresistentzia guztientzako ratio horiek laburbiltzen ditu eta baita bataz bestekoa eta aldakuntza-koefizientea ere.

Kasu isolatuak salbu, balio asko bataren ingurukoak dira. 201. laginak aldiz, erresistentzia galera aurkezten du hirugarren hondar erresistentzian, behala berreskuratuz espero zen maila. Bataz besteko balioa ere bataren inguruko da, aurreikusitako balio eta esperimentalki lortu direnen artean ezberdintasun handirik ez dagoenaren seinale. Nahiz eta aldakuntza-koefiziente handi iruditu, azpimarratu beharra dago hormaren portaera mekanikoa, hura osatzen duen azalera handi bateko elementuen sostengu-ahalmenaren batura dela, lagin isolatu batena baino. Hiru puntuko flexotrakzio entseguari berezkoa zaion dispertsioa ezaguna da, [Parmentier et al (2008)]-en arabera batzuetan %20-a baino handiagoa ere izan daitekeen aldakuntza-koefizientea dagoelarik. Hala eta guztiz ere, onartua dago ere, ohiko lagin prismatikoak baino neurri handiagoko elementuetan murriztu egiten direla balio horiek. Aldi berean, entsegu araudiak eskatzen duen hozkak, ezberdina den zuntz kopurua mozten du lagin bakoitzean, dispertsioa handituz. Ondorioz, nahiz eta gutxien diren zonaldeak egon, badira arinki balio handiagoa eman zaiena ere, osotara hartuta, portaera aurreikusia eta erreala doitu egiten direlarik.

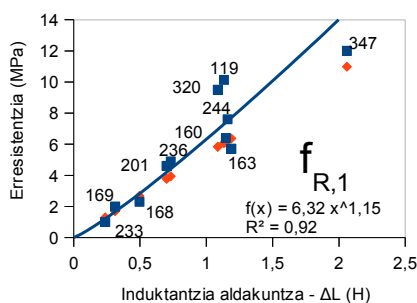
Hasierako laginentzako eta ondoren aztertu diren 11 laginentzako lortu di-

(a) $f_{ct,L} - \Delta L$ (b) $f_{R,1} - \Delta L$ (c) $f_{R,2} - \Delta L$ (d) $f_{R,3} - \Delta L$ (e) $f_{R,4} - \Delta L$

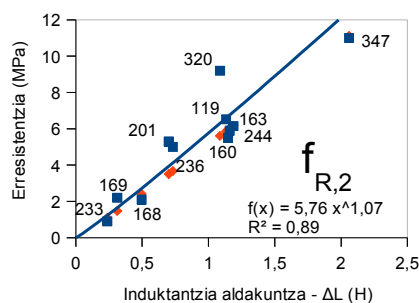
6.22 Irudia: Induktantzia eta erresistentzien arteko erlazioa.



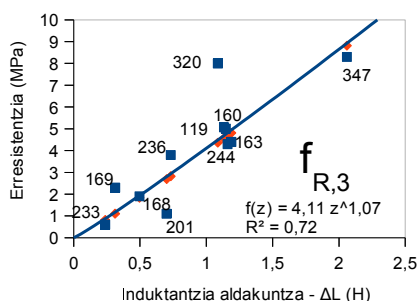
(a) Proporzionaltasun muga



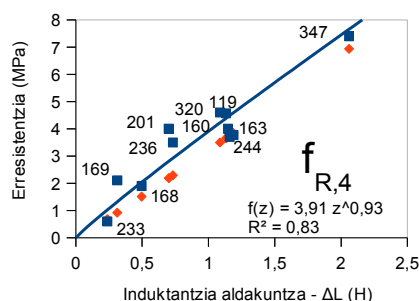
(b) 1. hondar erresistentzia



(c) 2. hondar erresistentzial



(d) 3. hondar erresistentzia



(e) 4. hondar erresistentzia

6.23 Irudia: Flexotrakzio entseguen (lauki urdinak) emaitzak eta balio aurreikusiak (erronbo gorriak).

ren erregresio lerroak berdin-berdinak ez diren arren, ezberdintasuna ez da horren nabarmena. Lagin bakoitzak, hasiera eta amaierako erregresio lerroen arabera, flexotrakzio entseguan zehaztutako erresistentzia lortzeko eragin beharko lukeen induktantzia aldakuntza 6.9 Taulak azaltzen da. Azpimarratu beharra dago, Proporzionaltasun Mugari dagokion erresistentzia baztertu egin dela, zuntz kantitatearekin horren erlazio esturik ez duelako. Lagin guztien batz besteko balioa nahiko antzekoa da lerro bientzako. Ezberdintasunek 0.14 Henrioko batez besteko balioa dute, %9-ko aldakuntza-koefizientearekin. Aldakuntza koefizienteak nahikoa txikiak dira, 201 eta 233. laginentzako ezik, aurretiaz

Lagina	ΔL (H)	$f_{ct,L}^f$	$f_{R,1}$	$f_{R,2}$	$f_{R,3}$	$f_{R,4}$
119	1.133	0.87	0.60	0.90	0.90	0.80
160	1.147	0.72	0.96	1.08	0.93	0.93
163	1.188	1.24	1.12	1.00	1.09	1.02
168	0.496	1.00	1.17	1.15	1.97	0.80
169	0.312	1.21	0.85	0.67	0.48	0.44
201	0.701	0.97	0.82	0.66	2.45	0.55
233	0.237	0.93	1.29	1.22	1.36	1.14
236	0.732	1.04	0.80	0.73	0.74	0.65
244	1.160	0.87	0.82	1.02	1.09	1.01
320	1.087	0.84	0.61	0.61	0.55	0.75
347	2.060	0.95	0.92	1.01	1.05	0.94
Bataz bestekoa	0.96	0.90	0.91	1.05	0.82	
C.V. (%)	16	24	23	50	26	

6.8 Taula: Erresistentzia erreal eta aurreikusien arteko ratioa.

Lagina	$f_{R,1}$ (H)	$f_{R,2}$ (H)	$f_{R,3}$ (H)	$f_{R,4}$ (H)	BB (H)	C.V. (%)	
119	Hasiera	1.88	1.25	1.25	1.40	1.44	21
	Amaiera	1.59	1.14	1.17	1.22	1.28	16
160	Hasiera	1.18	1.06	1.23	1.24	1.18	7
	Amaiera	0.99	0.94	1.16	1.05	1.03	9
163	Hasiera	1.05	1.19	1.10	1.17	1.12	6
	Amaiera	0.88	1.07	1.01	0.97	0.98	8
168	Hasiera	0.42	0.43	0.51	0.62	0.50	19
	Amaiera	0.34	0.30	0.42	0.39	0.36	14
169	Hasiera	0.36	0.46	0.60	0.68	0.53	27
	Amaiera	0.29	0.33	0.50	0.45	0.39	25
201	Hasiera	0.84	1.03	0.32	1.24	0.85	46
	Amaiera	0.70	0.90	0.23	1.05	0.72	50
233	Hasiera	0.17	0.19	0.19	0.20	0.19	7
	Amaiera	0.13	0.08	0.11	-0.03	0.07	96
236	Hasiera	0.90	0.98	0.96	1.10	0.98	9
	Amaiera	0.75	0.85	0.87	0.90	0.84	8
244	Hasiera	1.23	1.14	1.07	1.14	1.14	5
	Amaiera	1.03	1.02	0.99	0.94	1.00	4
320	Hasiera	1.76	1.72	1.89	1.41	1.69	12
	Amaiera	1.48	1.63	1.87	1.24	1.56	17
347	Hasiera	2.22	2.03	1.96	2.18	2.10	6
	Amaiera	1.88	1.97	1.95	2.10	1.98	5

6.9 Taula: Hasiera eta amaierako erregresio lerroen arabera aurreikusten diren induktantzia aldakuntzaren arteko ezberdintasunak, hondar erresistentziei dagokioenez.

aipatu den bezala. Era kontserbadorean luzetara lerrokatu den zuntz zenbatekoa, X ardatzari dagokiona. %50-ekoa dela onartuz, hiru ardatzentzako induktantzia aldakuntza gutxi gora behera 0.09 Henriokoa izan beharko luke. 5.18 Irudiaren arabera, induktantzia aldakuntza eta zuntz zenbatekoa erlaziona dai-

tezke, zuntz edukiaren ezberdintasuna 9.5 kg/m^3 -koa izango litzateke ondorioz, onargarritzat har daitekeena diseinuz 50 kg/m^3 -ko bataz besteko zuntz zenbatekoa baita. Ezberdintasun askoz txikiagoak lortzen dira hasierako erregresio lerro linealak erabiliz potentzialak beharrean. Hala ere, egoera irrealak sortuko lirateke, parametro konstanteak hondar erresistentzia mailak ezartzen baititu indartu gabeko matrizeetan ere, aldakuntza-koefiziente handiagoekin batera. Ondorioz, erresistentzia aurreikusteko abiapuntu gisa erabilitako erregresio lerro potentzialek indartze zenbatekoa gutxiesten dute, baina segurtasunaren aldetik dagoelarik eta era konstanteagoan, diseinurako zuzenketa parametroak sartzea erabat posible izanik.

6.6.3.2 Flexotrakzio entseguaren emaitzaren aurreikuspena

Egindako aurreikuspenen doitasun onargarriari buruz aurreko atalean azaldukoaren arabera, edozein pitzadura irekidurarentzako materialaren portaera mekanikoa aurreikus daiteke. Ikerketa honetan egin den bezalako, hiru puntuko flexotrakzio entseguan lagin prismatikoek izango luketen portaerara hurbiltzeko, neurketa tarte guztian jarraitua eta diferentziagarria den funtzioa behar da, (6.2) Ekuazioaren araberrako esponentzial laukoitz modeloa hartu delarik horretarako. Atal honetan, hura zehazteko sarrera datuak eta jarraibideak azalduko dira hortaz.

$$f(x) = c_1(e^{-c_2x} - e^{-c_3x}) + c_4(e^{-c_5x} - e^{-c_6x}) \quad (6.2)$$

Ekuazio hau kurba esponentzial bien batura gisa adieraz daiteke era sinplifikatuan, (6.3) Ekuazioan ikus daitekeen bezala. F_{pre} -k hausturaren aurreko portaera nagusia adierazten du, F_{post} -ek grafikoaren ondorengoan gailentzen den bitartean.

$$F_{pre}(x) = c_1(e^{-c_2x} - e^{-c_3x}) \quad (6.3a)$$

$$F_{post}(x) = c_4(e^{-c_5x} - e^{-c_6x}) \quad (6.3b)$$

$$f(x) = F_{pre}(x) + F_{post}(x) \quad (6.3c)$$

Esponentzial laukoitz modeloarentzako, eredu zko puntu biren karga eta pitzadura irekidura zehaztea beharrezkoa izango da, bata matrizearen haustura baino lehenago kokatzen da eta bestea, behin pitzatu dela. Aldi berean, kurba esponentzialen forma kontrolatzen duten parametro bi ezarri behar dira, α_{pre} eta α_{post} izendatuak. Eredu puntu gisa F_L eta F_1 -ri dagozkien balioak hartzea erabaki da, apurtutako laginengan egin den analisi erregresiboaren arabera lortuak ((6.4a) eta (6.4b) Ekuazioak), materialaren aurretiazko ezaugarritzearentzako era zuzenean lor daitezten.

$$P_{pre-fisuración} = 4.55 \cdot \Delta L + 11.90 \quad (6.4a)$$

$$P_{post-fisuración} = 16.43 \cdot \Delta L^1 \quad (6.4b)$$

P_{pre} eta P_{post} -en balioak lortzeko, kontuan hartutako erresistentzien CMOD balioei dagozkien x_{pre} eta x_{post} -en balioak, 0.05 eta 0.5 hurrenez hurren. Bestalde, α_{pre} y α_{post} parametroak 1.001 eta 100 balioekin finkatzen dira, gainontzeko parametroak hauen arabera kalkulatzeko direlarik, (6.5a)-tik (6.5f)-rainoko Ekuazioei jarraiki.

$$c_1 = \frac{P_{pre} - F_{post}(x_{pre})}{\left(\left(\frac{1}{1 - \alpha_{pre}} \right)^{\alpha_{pre}} - \left(\frac{\alpha_{pre}}{1 - \alpha_{pre}} \right)^{\alpha_{pre}} \right)} \quad (6.5a)$$

$$c_2 = \frac{\ln \alpha_{pre}}{x_{pre}(\alpha_{pre} - 1)} \quad (6.5b)$$

$$c_3 = \alpha_{pre} \cdot c_2 \quad (6.5c)$$

$$c_4 = \frac{P_{post}}{\left(\left(\frac{1}{1 - \alpha_{post}} \right)^{\alpha_{post}} - \left(\frac{\alpha_{post}}{1 - \alpha_{post}} \right)^{\alpha_{post}} \right)} \quad (6.5d)$$

$$c_5 = \frac{\ln \alpha_{post}}{x_{post}(\alpha_{post} - 1)} \quad (6.5e)$$

$$c_6 = \alpha_{post} \cdot c_5 \quad (6.5f)$$

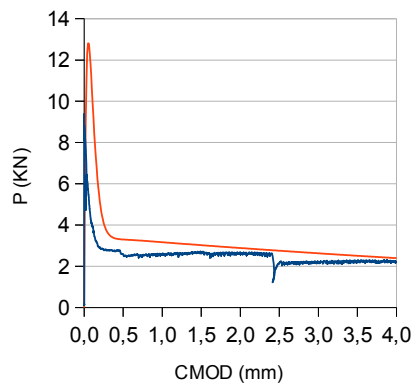
Esponentzial laukoitz modelo honen ezarketak, ez du flexotrakzio entsegu normalizatua ordeztu nahi, baizik eta osatu. Trakzio esfortzuak eusteko ahalmenari dagokionez, entsegurik hedatuena izanik materialaren ezaugarritze mekanikoa gauzatzeko eta entsegu sunsitzzailea izaki, zeharka bada ere, materialaren erresistentzia baieztatzeko metodo ez-sunsitzzailearen batekin erlazionatzea interesgarria da. Honen bitartez, metodo magnetikoen garapena susta daiteke egitura-elementu errealean gaineko kalitate kontrola *in situ* berme nahikoarekin egin ahal izateko.

6.24a-tik 6.24d-rainoko Irudietan, lagin sail baten entseguen emaitza eta esponentzial laukoitz modeloaren aurreikuspenaren arteko antzekotasuna erakusten da. Aztertutako lagin guztien alderaketa, banaka, C Eranskinean agertzen dira. Zenbait entseguk, guztiz egokitzen ez diren grafikoak erakusten dituzte, baina horren arrazoiak, (6.4a) eta (6.4b) Ekuazioetako erlazioak LOP-a balioes- teko aipatutako irizpideen arabera lortu izana da, geroago lortzen diren tentsio balio maximoak baztertzen baitituzte.

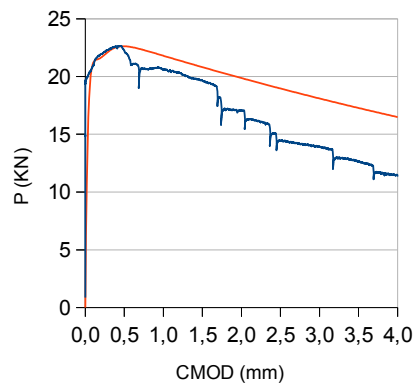
6.6.3.3 Materialaren lege eratzzailearen aurreikuspena

2.2.3 Atalean deskribatu diren materialaren portaera modelo guztien artean, tentsio-elongazio erlazioan oinarritzen direnak dira egitura-kalkuluetan arduradun diren ingeniarietzako ohikoenak. Hori dela eta, tentsio esfortzu normalen aurreko materialaren portaera adierazteko tentsio-elongazio modelo multilineala (6.25 Irudia) ezartzea erabakitzen da, beste materialetan bezala erantzun mekanikoa ezaugarritzeko. Egitura Hormigoia Instrukzioaren [EHE-08 (2008)] 14. Eranskinean azaldu bezala zehazten da lege eratzzaile hau. Erabilgarri dauden hainbat dokumentu teknikoetan azaltzen diren modelo guztien artean, proposatu den erabileraren inguruko diseinuak, inguruko eremuan indarrean dagoen araudiaren arabera eutsi ahal izateko aukeratu da hau.

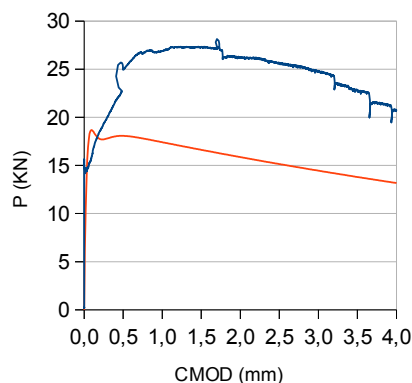
Diagrama multilinealeko giltzarriak diren puntuen elongazioak lortzeko, araudiak berak *Luzera Kritikoa* (I_{cs}) deritzon balioa erabiltzen da. Literaturan,



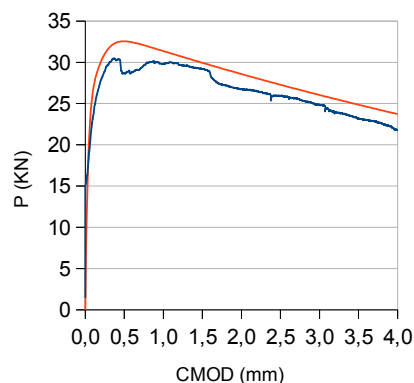
(a) 60. lagina



(b) 138. lagina



(c) 144. lagina



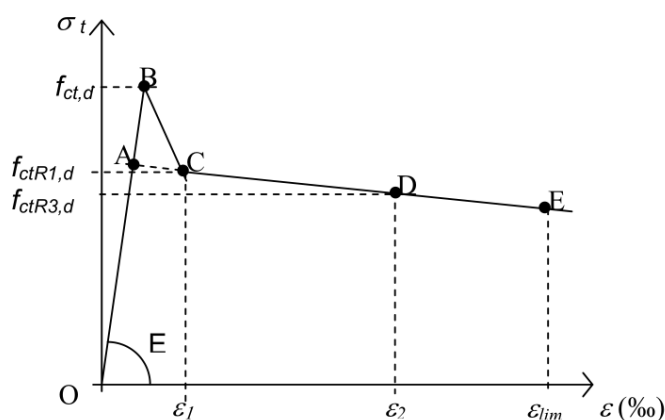
(d) 296. lagina

6.24 Irudia: Flexotrakzio entseguren emaitzak (urdinez) eta hurbilketa esponentziala (gorriz).

parametro honek *Luzera Adierazgarri* izendapena hartzen du eta modelo bien (tentsio-elongazio eta tentsio-pitzadura irekidura) arteko erlazioa adierazten du (6.6) Ekuazioaren bitartez. Aldagai honen zehaztapenak hala ere, ikerketa sakonagoa behar du oraindik [di Prisco and Colombo (2006)].

$$\epsilon = \frac{w}{I_{cs}} \quad (6.6)$$

EHE-08 Instrukzioak luzera adierazgarri horren balio bezala, pitzaduren arteko batzaz besteko tarte eta ardatz neutrotik trakzionatuen dagoen muturre-raino dagoen tartearen arteko balio txikiena hartzen du. Hortaz, beharrezkoa da ardatz neutroaren sakonera zehaztea, prozedura zaildu egiten duen zeregina delarik. Ebakiduraren indar oreka zehaztea zaila da, beharrezkoa baita trakzio erresistentzia ezagutzea eta hasiera batean behintzat, ezezaguna den



6.25 Irudia: Diagrama multilinealetik [EHE-08 (2008)].

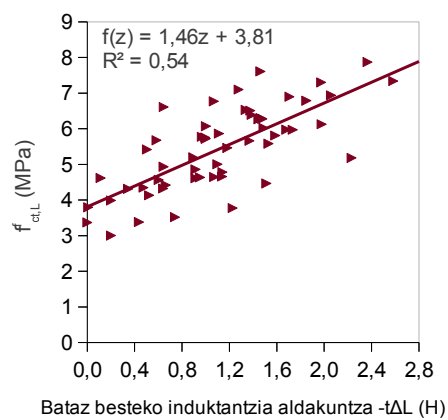
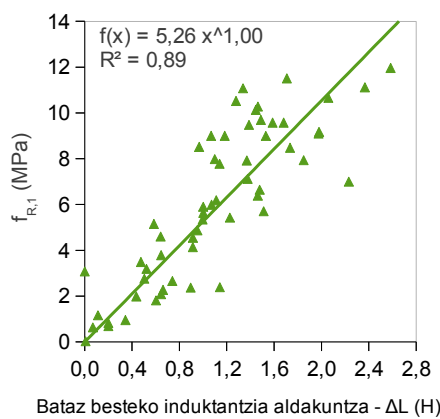
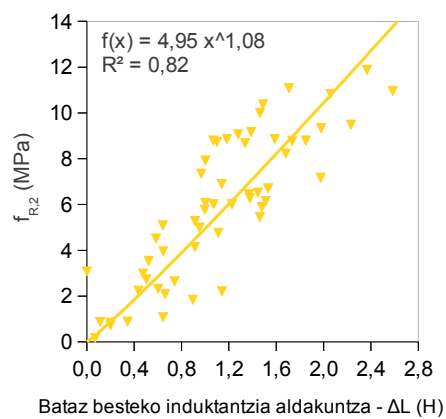
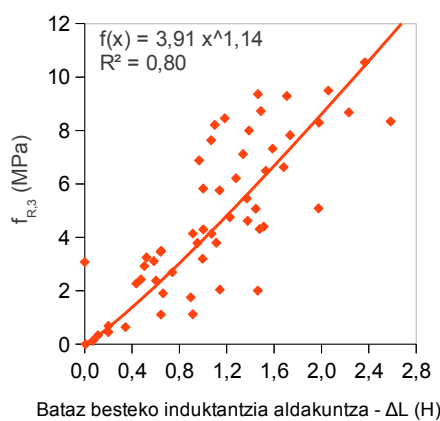
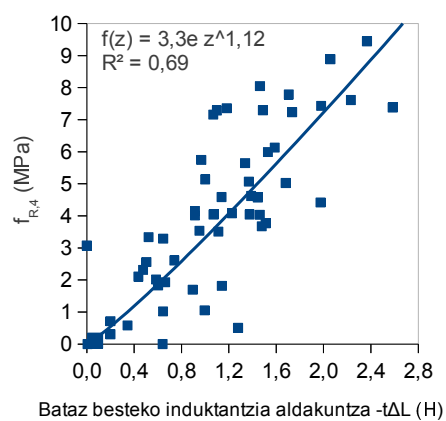
ΔL (H)	x_{pre} (mm)	σ_{pre} (MPa)	$\alpha 1$	x_{post} (mm)	σ_{post} (MPa)	$\alpha 2$
$\lesssim 1.00$	0.005	$f_{ct,L}^f \cdot 0.61$	1.001	0.5	$f_{R,1} \cdot 0.33$	10
$\gtrsim 1.00$	0.01	$f_{ct,L}^f \cdot 0.67$	100	0.5	$f_{R,1} \cdot (-0.19 \cdot \Delta L + 0.68)$	10

6.10 Taula: Materialaren portaera aurreikusteko sarrera parametroak.

balioa da. Hala eta guztiz ere, biguntze portaeren kasuan ($f_{R,1}$ eta $f_{R,3} < f_L$) pitzadura arteko banaketa lagainaren altueraren berdina dela suposatzea baimentzen du Instrukzioak, kasu honetan 125 mm-ko hozka dela eta. Balio hau onargarria da matrizea hautsi ondoren tentsio galera aurkeztzen duten lagainentzat, LOP-a baino hondar erresistentzia balio txikiagoak agertzen dituztenak. Balio hau hartzea segurtasunaren aldean dago, diagramaren buztana horren etzana ez izatea behartzen baitu, erresistentzia ahalmenaren txikiagotze tasa handiagoak eraginez.

Aurretiaz egin denaren antzera, 6.26a-tik 6.26e-rainoko Irudiek batuz beste inдукtantzia aldakuntza eta LOP ($f_{ct,L}^f$) eta ondorengo makurdura bidezko trakzio hondar erresistentzien ($f_{R,i}$) arteko erlazioak adierazten dituzte. Kasu honetan, aurreko atalean aztertu diren lagin prismatiko guztiak kontuan hartu dira.

6.10 Taulan bildutako datuekin, alderantzizko prozeduraren bitarteko modelo multilinealetik ezar daiteke aztertu diren lagin guztiarentzat. 6.27a-tik 6.27d-rainoko Irudietan, horietako batzuentzako emaitzak erakusten dira. Aldi berean, alde aurretik lortu diren metodo magnetikoen emaitzetatik abiatuz, materialaren lege eratzaila zehatz daiteke, 6.6.3.1 Atalean azaldutako antzeko prozedura erabiliz. Kasu honetan, modelo multilinealetik eraketarako eskatzen diren eraketara egokitzen dira sarrera parametroak, proportzionaltasun muga ($f_{ct,L}^f$) eta neurtutako 0.5 mm-ko pitzadura irekidurari dagokion hondar erresistentziaz ($f_{R,1}$) abiatuz. Funtsezkotzat hartu da kurbak ahalik eta egokien doitzera erresistentzia maximoko zonaldean, proposatzen den erabilera zerbitzu fasean pitzaduren kontrol zorrotza behar baitu. Gainera, zenbait egilek [Blanco et al (2013)] egitura-erantzuna gehien eragiten duten parametroei da-

(a) $f_{ct,L}^f - \Delta L$ (b) $f_{R,1} - \Delta L$ (c) $f_{R,2} - \Delta L$ (d) $f_{R,3} - \Delta L$ (e) $f_{R,4} - \Delta L$

6.26 Irudia: Induktantzia eta erresistentzien arteko erlazioa.

gokiela adierazten dute. Hori da lehenengo hondar erresistentzia aukeratzearen arrazoia, eskuarki haustura ondoko egoeran zehar balio handiena izatearekin batera. Haustura aurreko erresistentzien murrizketa parametroak konstantetzat hartzen dira, zuntz bidezko indartzearen eraginak ez baitu matrizearen portaera nabarmenki aldatzen. Haren haustura ondoko erresistentzia balioei dagokionez, indartze gutxiago duten laginentzako konstantea den parametroaren bitartez murrizten dira, ez baita indartze mailarekiko (edo induktantzia aldakuntzarekiko kasu honetan) erlazio doiturik lortu. Hala ere, indartuago dauden beste lagin sailari dagokionez, alderdi bien arteko eragina nabarmena izan da aldakorra den murrizketa parametroa hartuz, induktantzia aldakuntzarekin batera handituz doana. Kurba esponentzialen forma kontrolatzen duten parametroak, α_{pre} eta α_{post} izendatuak, aldatzen doaz oraingoan, balioetsi den indartzearen arabera. Modeloan erabilitako trazio erresistentzia maximoa elongazio balioak ere, indartze mailari egokitzen zaizkio. C Eranskinean, entseguetan erabili diren lagin multzoaren emaitza guztiak biltzen dira.

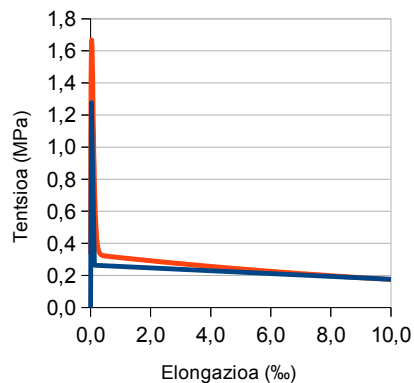
Hurbilketa horiek aztertuz, orokorrean, indartze gutxien duten laginek (1.00 Henrio baino gutxiagoko induktantzia aldakuntza) hormigoia hausturaren ondoren tentsio galera erakusten dutela egiaztatzen da. Muga hori ez da guttiz garbia, aurreikuspen mota batera hobeto egokitzen diren laginak topatuz, bestea dagokien arren. Aldi berean, erdiguneko planoaren alboetako laurdenetan indartze (edo induktantzia aldakuntzaren neurketa) ezberdinak agertzen dituzten laginek, instant batean bat-bateko erresistentzia galera erakusten dute, jatorrizko joera berreskuratuz berehala. Lege eratzaillearen aurreikuspenetan uste zen bezalako doiketa ez lortzea eragiten du horrek.

$$F_{\text{post}}(x) = c_4(e^{-c_5x}) \quad (6.7)$$

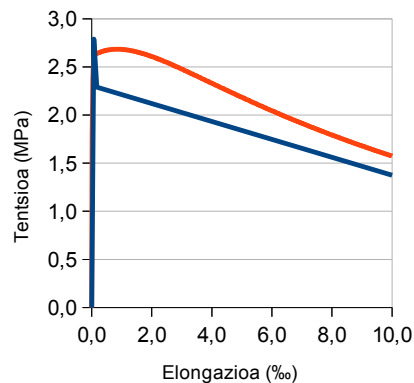
Esponentzial laukoitz modeloaren aldaera biren bitartez egiten da hortaz, portaera horien hurbilketa. Planteamendu bien arteko ezberdintasuna, EHE-08 Instrukzioak diagrama multilineala osatzeko erabiltzen duen eran datza. Lehenengo funtzio esponentzialak, hormigoi matrizearen ekarpena deskribatzen du, bigarren funtzio esponentzialak aldiz, hausturaren ondoko uneen portaeraz arduratzen da. Indartzea nahikoa ez den kasuetan, zenbateko zein norabidearen ondorioz izan daitekeelarik, biguntze portaera nabarmenagoa agertzen da erresistentzia maila eta malda gutxiagoko gunea sortuz. Portaera horretara egokitzeko, bigarren funtzio esponentzialaren osagaiak (6.7) Ekuazioan erakusten dena murrizten dira. Indartze maila handiko portaera hobetuaren kasuetan, (6.5a)-tik (6.5f)-rainoko Ekuazioetan azaldu bezala parametroak hartzeari ekingo zaio. Azpimarratu beharra dago, α_{post} eta c_5 parametroen balioak aldatu egiten direla bi hurbilketetarako, [Lee and Barr (2004)]-ek azaldutakoa ez bezala.

6.7 Azken gogoetak

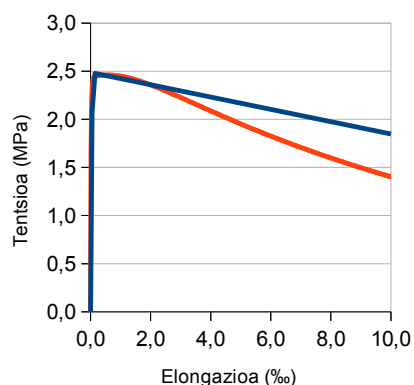
Entsegu suntsitzaileen kanpaina esperimentalak dakartzan datuak, materialak konpresio erresistentzia balio uniformea duela frogatzen dute horma gutxian zehar. Balio hau neurritsua da hasierako baldintzatzaileetatik abiatuz gero, erabilia moduko hormigoi autotrinkotzailearen dosifikazioa ezartzen duena. Zuntzak gehitzeak ez du materialak lortu dituen erresistentzia balioetan eragin



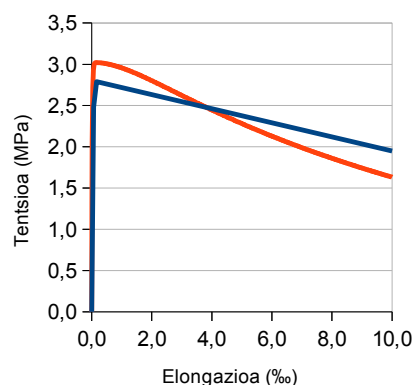
(a) 61. lagina



(b) 138. lagina



(c) 144. lagina



(d) 296. lagina

6.27 Irudia: Diagrama multilineala (urdinez) eta hurbilketa esponentziala (gorriz).

nabarmenik, hormatik erauzi diren lagin kubiko eta aldi berean moldeatu diren lagin prismatikoen artean antzeko balioak lortu direlarik.

Trakzio erresistentziari dagokionez, proposatu den erabilerarentzako egokitasuna egiaztatzen da hainbat metodo eta entseguen bitartez. Alde batetik, Bartzelona entsegua eta Brasildar entseguak dispertsio handirik gabeko gehieneko trakzio erresistentzia balioak aurkezten dituzte 1.31-ko erlazioaz, handiagoak izanik bigarren metodoaz lortu diren emaitzak lehenengokoak baino. Konpresio erresistentzia adierazgarritik abiatuz bataz besteko trakzio erresistentzia lortzeko ohiko formulak, Bartzelona entseguaren bitartez esperimentalki lortutakoen oso antzekoak emaitzak ematen ditu.

Puntzonaketa bikoitzeko entseguaren aldaeraren bitartez materialaren zailtasuna aztertzen da, zuntzen orientazioak batez ere eta zuntz zenbatekoak bigarren maila batean, lortu diren gehieneko balio eta apurketa ereduatan

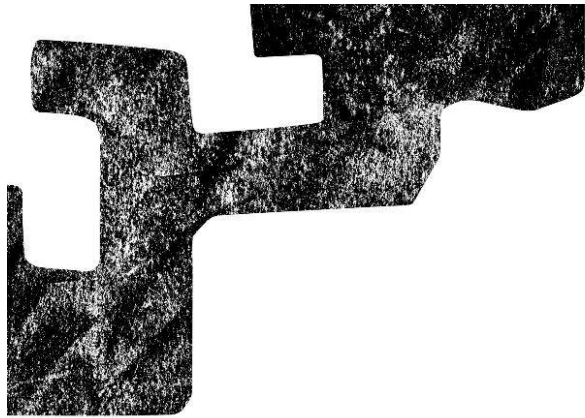
betekizun garrantzitsua dutela frogatuz. Zuntzen eragin hau era sakonagoan aztertzen da flexotrakzio entseguen bitartez. Azken hauek materialaren lege eratzailea lortzea ahalbidetzen dute, Egitura Hormigoiaren Instrukzioan [EHE-08 (2008)] azaltzen den tentsio-elongazio modelo baten arabera.

Materialak, trakzio erresistentzia eta hondar erresistentzietan dagokienez, sostengu ahalmen nabarmena lor dezakeela frogatu da, zuntz indartzeari esker gehitu egiten den harikortasuna erakutsiz. Dena dela, hormigoitze edo isurtze prozedurak zuntzek hartuko duten norabidean eragin handia du, piezaren ardatz bakoitza era ezberdinean indartuz. Altzairu zuntzez indartutako hormigoi autotrinkotzailea (AZIHAT) ez da beraz, material isotropoa, bere propietateak norabide bakoitzean aldakorrak direlarik.

Nahiz eta hormaren egikaritzea egoki izan ez, portaera hori aztertzeko eta enkofratuan zehar masak izan duen mugimenduaren efektuak sortu dituen aldaketak balioesteko aukera eman du. Era osagarrian, erresistentzia balioak laginetan zehar sortu den eremu magnetikoaren inдукtantzia aldakuntza balioekin erkatu dira, bien artean erlazioa ezarri daitekeela ondorioztatuz. Flexotrakzio entseguaren aurreko materialaren erantzuna eta EHE-08-aren arabera dagokion $\sigma - \epsilon$ epsilon diagrama aurreikusteko prozedurak era askiesgarrian ezartzen dira, aipatutako metodo magnetikoaren emaitzetatik abiatuz. Baiez-tapen hau zeharo garrantzitsua da, eskala errealean eraiki diren egiturentzako kalitate kontrol egokirako bidea eman baitezake, proiektuak eskatzen dituen erresistentzia ahalmenak, egitura erreal berari ezartzen zaion eremu magnetikoaren aldaketen arabera. Horretarako, diseinatzen diren geometrietara egokitzeko diren tresneria garatu behar da.

Are gehiago, jariakinen dinamika konputazional metodoetan oinarritzen diren simulazioen bitartez lortutako masaren mugimenduaren emaitzekin erlazionatuz gero, zuntzen orientazioa baliozta daiteke, materialaren lege eratzailea era zuzenean ezar daitekeelarik, inongo lagin moldeaturen aurretiazko entsegurik egin gabe. 7.4 Atalean alderdi honetan sakonduko da.

Azkenik, esfortzu tangentialak eusteko materialak duen ahalmena aztertu da, alderdi honetan zuntzen eraginaren inguruan datu argigarriak topatu ez delarik.



V. ZATIA

Orientazioaren aurreikuspena

7 • GAIA

CFD bidezko hormigoitzearen simulazioa

7.1 Sarrera

Jariakinen Dinamika Konputazionala (CFD), eskala errealean materialaren diseinu zuzena gauzatzeko garatu beharreko teknika bezala har daiteke. Dokto-re Tesi honetan zehar frogatu egin da, masaren mugimenduak zuntzek hartzen duten norabidean eragina duela eta neurri batean aurreikusia izan daitekeela. Argi dago horma-efektua edo hormigoi arrunten dardaratze bezalako alderdiek ere zuntzen norabidea alda dezaketela, baina oraingoan analisi konputazional honen helburuetatik kanpo daude. Gai honetan, hormaren hormigoitzearen simulazioa egiteko garatu den prozedura azalduko da eta aurretiazko entsegu suntsitzaile (6 Gaia) eta ez-suntsitzaileen (5 Gaia) emaitzekin egindako egiaz-tapena ere.

Metodo numeriko egokien erabileraren bitartez materialaren portaera erreolo-gikoaren azterketa egin daiteke. Ikerketa honetan egindako Navier-Stokes-en ekuazioen ebazpidean oinarritzen den simulazioaren egokitasuna frogatzen da, Gerris Flow Solver programaren laguntzaz.

Gerris [Popinet (2003)] kode irekiko programaren erabileraren bitartez egin da simulazioa. Jariakin konprimiezinen mugimendua zehazten duten ekuazioak ebazten dira bertan, Jariakin Bolumen (VOF) teknikaren bitartez dentsitate aldakorreko fase anitzeko jarioen mugimendua deskribatzen da 2.4 Atalean azaldu den bezala.

7.2 Navier-Stokes ekuazioen ebazpena

Navier-Stokes-en ekuazioak Newton-en bigarren legearen aplikazioz sortzen dira eta jariakin baten mugimendua deskribatzen duten ekuazio diferentzialak dira. Biskositate konstantearen kasuan, (7.1) Ekuazioan adierazten den bezala garatzen dira.

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \nabla u \right) = -\nabla p + \nabla(2\eta|\gamma|) + \rho g \quad (7.1)$$

(7.1) Ekuazioko berdintzaren lehenengo zatiak, inertzia indarrak adierazten ditu, ρ jariakinaren dentsitatea izanik, eta bigarren zatiak presio gradienteak, biskositatea ($|\gamma|$ deformazio gradientearen tentsorea delarik) eta azkenik, grabitatea agertzen ditu.

Temperaturaren efektuak mespretxagarriak direnez, aurrekoari gehituta, jariakin konprimiezinean masa kontserbazioa bakarrik zehaztea eskatzen da, edo zehatzago esanda bolumena kasu honetan, (7.2) Ekuazioaren arabera.

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (7.2)$$

Simulazio barnean parte hartzen duten fase bien gainazal librearen arrastoari jarraitzeko eta kokatzeko, VOF (Jariakin Bolumena) bezala ezaguna den teknika numerikoa erabiltzen da ((7.3) Ekuazioa). Programak euleriar teknika hau aplikatzea ahalbidetzen du sare moldatzaileari esker, inguratzailearen itxura hartzen duena. Masaren kontserbazioa bermatzeko metodo onargarria da hau, topologia aldaketetara zuzenki egokituz.

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \nabla(cu) = 0 \quad (7.3)$$

Multifase simulazioa, fase biak banatzen dituen c trazatzailea sartuz egiten da, $c = 0$ izanik aire fasearentzako eta $c = 1$ hormigoiarentzako. Tarteko balioek interfasea edo kontrol bolumenaren gradienteak adierazten dute. (7.4a), (7.4b) eta (7.4c) Ekuazioek jariakinen propietateak ezartzen dituzte bolumen zatiki bakoitzarentzako. Horietan, h eta a azpi-indizeak hormigoia eta aire faseei dagozkien hurrenez hurren.

$$\rho = \rho_h \cdot c + \rho_a \cdot (1 - c) \quad (7.4a)$$

$$\mu = \mu_h \cdot c + \mu_a \cdot (1 - c) \quad (7.4b)$$

$$\tau_0 = \tau_{0,h} \cdot c + \tau_{0,a} \cdot (1 - c) \quad (7.4c)$$

Bingham jariakin homogeneoekin ((2.4a) Ekuazioa) parekatuz modelizatzen da hormigoia, Horretarako beharrezkoa da materialaren itxurazko biskositatea (η) ezartzea, (7.5) Ekuazioaren arabera isurpen-tentsio (τ_0) eta biskositate dinamikoak (μ) osatzen duten binomioan oinarrituz, inertzia efektuak mespretxagarri suposatuz. Azpimarratu beharra dago kasu honetan erabili den formulazioan, deformazio tentsorearen bigarren inbarianteen (II_γ) sarrera ohikotik aldentzen dela, [Lagrée et al (2011)]-ek ezarritako irizpidea jarraitu delarik ((7.5) Ekuazioa). Egindako simulazioetan ez da beharrezkoa izan [Papanastasiou (1986)] proposatutako hurbilketa.

$$\eta = \mu + \frac{\tau_0}{\sqrt{2}II_\gamma} \quad (7.5)$$

7.2.1 Erreologia parametroak

Problemaren ebazpenerako beharrezkoak diren sarrera datuak materialaren propietate fisiko eta erreologikoei dagozkienak dira. Batetik, hormigoia

isurpen-tentsio eta biskositate plastikoa ezagutu behar dira. Parametro hauek, arestian aipatu bezala, masaren mugimendua baldintzatzen dute, kasu honetan, bere autotrinkotasun propietateak emanez.

Hura ezaugarritzeko erreometro egoki baten gabezia dela eta, isurpen entseguren zenbait simulazioen arabeko balioak hartu izan dira, [Zerbino et al (2009)]-ek masa freskoarengan egindako isurpen entsegu eta entsegu erreologiko ugariekin erkatuz. Hortaz, dimentsio biko 9 simulazio egin dira isurpen-tentsio eta biskositate balioak mailaka aldatuz, lortutako azken diametro eta 500 mm-ko lerroa gainditu arte igarotako denboraren hurbilketa matematikoa lortuz.

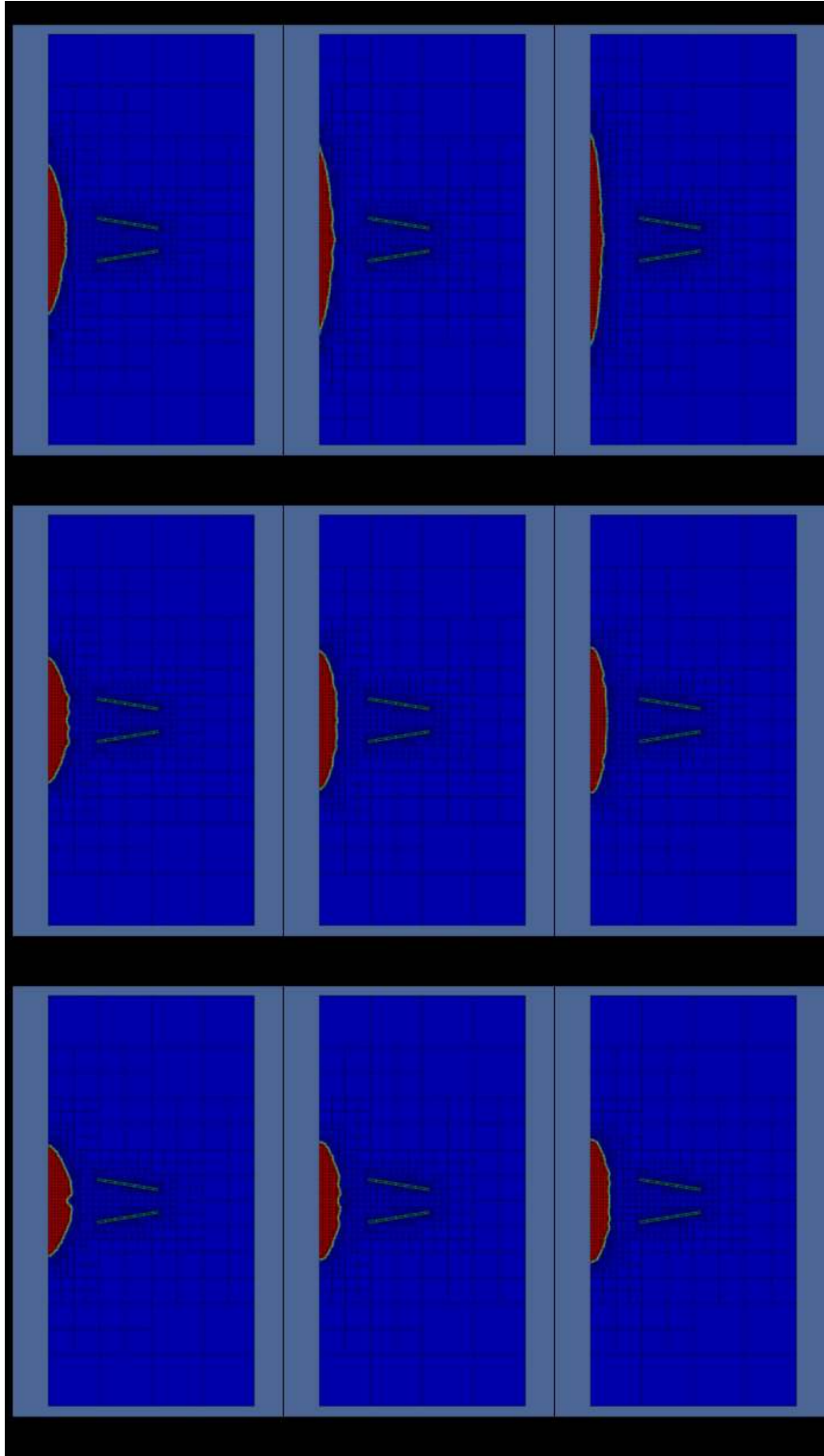
7.1 Irudiak, egindako konbinaketa guztien gainjartzearen argazkia erakusten du. Irudi horretan, zutabe bakoitzeko hormigoiek biskositate berdina dute, isurpen-tentsioa handituz zenbat eta beherago, errenkadetan bien bitartean, isurpen-tentsioa konstante mantentzen da eta eskumakoen biskositatea gero eta handiagoa da. Era honetan, kasuistika ugariaren azterketa zabala egiten da, neurtu beharreko datuekiko parametro hauetako bakoitzak duen eragina argi eta garbi ikus daitekeelarik.

Gaurdaino egindako simulazioak ez bezala, hormigoia isurpen entseguari dagokionez kasu honetan, Abrams-en konoa bera sartu egin da simulazioan bertan, 7.2 Irudiak erakusten duen bezala masaren mugimendua baldintzatzen duelarik, batez ere masa likatsuetan. Irudi horrek, denbora une berdinerako erakusten du hormigoia-aire interfasea, argi eta garbi antzeman daitekeelarik solidoak oraindik barruan duen masaren alboetarako desplazamendua galarazten duela. Fenomeno hau era nabarmenagoan hautematen da biskositate handiagoko masetan. Azpimarratzekoa da, neurtutako T_{50} denbora eta lortutako azken diametroaren (D_f) balioen ezberdintasuna, konoaren altxatze abiadura eta are gerta daitezkeen konoaren alboetarako mugimenduek alda dezaketela. [Gettu et al (2004)]-ek aipatzen dute, hormigoia autotrinkotzaileen entseguetako maniobrak egin eta denborak neurtzen dituen langileari egotz dakizkioken ezberdintasun arinak badirela.

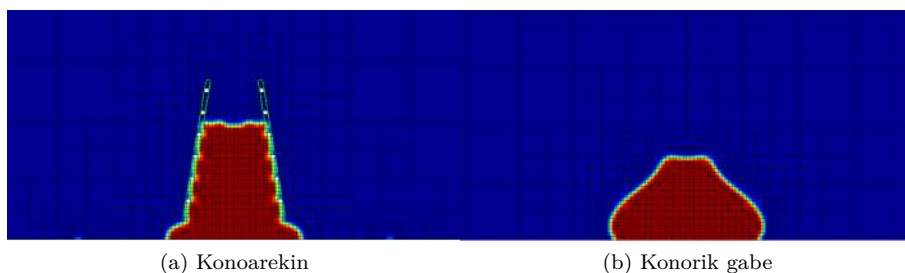
Parametroak aldagai adimentsional bihurtzen dira simulazioan parte hartzen duten material bien, hormigoia eta airea, dentsitate eta biskositateen arteko ratio handia dela eta. Azterketa eremuak metro bateko altuera eta metro bateko zabalera duen dimentsio biko espazioa osatzen du, hormigoia eta konoaren erreboluzio ardatza eremuaren albo baten jarri delarik, simulaziotik at dagoen zatia simetriaz ebatziz. Sistema internazionalako unitateen arabera, aldagai adimentsional berriak hurrengo itxura hartzen dute, denbora $\tilde{t} = t/\sqrt{b/g}$, abiadura $\tilde{v} = v/\sqrt{b \cdot g}$, biskositate dinamikoa $\tilde{\mu} = \mu/(\rho_c \cdot b^{1.5} \cdot g^{0.5})$ eta isurpen-tentsioarentzako $\tilde{\tau}_0 = \tau_0/(\rho_c \cdot b \cdot g)$, b izanik azterketa eremuaren aldea eta g grabitatearen indarra.

Prozesuan zehar baliabideak optimizatzen laguntzen duen sarearen fintze dinamikoa inplementatzen du modeloak. Era honetan, fase bien arteko interfasea eta hormigoia dagokiona findu egiten dira aurretiaz ezartzen diren irizpideen arabera. Konputazio-kostua neurrigabe gehitu ez dadin, prozesuan zehar sarea era iteratiboan optimizatzeko aukera dago. Kodean beraz, hormigoia fasean fintze handiagoa eragingo duten irizpideak ezartzen dira eta are handiagoa hormigoia eta aire arteko interfasean, kurbaturaren arrastoa era eraginkorragoan jarrai dadin.

7.1 Taulan konoarekin eta kono gabeko simulazioen ezberdintasunak agertzen dira. Argi eta garbi ikusten da, konorik ez egoteak mugimendu arinagoa dakarrela kasu guztietan, denbora gutxiago behar delarik 500 mm-ko diame-



7.1 Irudia: Abrams-en kono bidezko isurpen entseguaren simulazioa hainbat isurpen-tentsio eta biskositate konbinaketarentzat.



7.2 Irudia: Masaren mugimenduaren ezberdintasuna konoaren hertsatzea dela eta.

troa adierazten eta T_{50} denbora neurtzen den lerrora heltzeko. Aldi berean, azpimarratzekoa da espero bezala, joera hori ez dela isurpen-tentsioaren gehitzearekin nabarmenki aldatzen. Hala ere, isurpenaren azken diametroaren (D_f) neurketak emaitzetan halako dibergentzia azaltzen du. Espero zen bezala ere, isurpen-tentsioa da lortutako diametroan eragin gehien duen parametroa, baina biskositate gutxiko masentzako diametroa handitzen den bitartean, biskositatea handitzen doan heinean balio maximoak atzerakada agertzen du. Masaren bat-bateko erorikoaren ostean energia disipazio handia gerta litekeelako izan daiteke, konoaren azpian irekitako zirrikitutik hasten den mugimenduan gertatzen ez delarik eta motelagoa izan arren, konstanteago dena. Zuzenagoa dirudi beraz, mugitzen den elementu solidoa simulazio barruan gehitzea, bistan denez, hura konplexuago bihurtuz eta mantsotuz. Hormigoiares adbekezioa ebazteaz gain, konoa simulatzen duen elementu solidoaren barnean dauden gelaxkena ere konputatu behar da.

Era honetan 7.3 eta 7.4 Irudietan ikus daitezkeen grafikoak osatu dira, bertikalki mugitzen den konoa solido moduan barnean hartzen duen simulazioan parametro bien aldakuntzen eragina antzeman daitekeelarik bertan. Propietate biek neurketak aldatzen dituzte arren, argi dago isurpen-tentsioak lortutako azken diametroaren murrizketan garrantzi handiagoa duela abiaduraren gehitzean baino (7.3b eta 7.4b Irudiak), biskositateak alderantzizko eragina duelarik, isurpen abiaduran neurri handiangoan eraginez azken diametroa nabarmenki aldatu gabe (7.3a eta 7.4a Irudiak).

Propietate erreologikoen eraginen joerak entsegu normalizatuekiko aztertuz, hormigoi freskoaren portaera zehazteko (7.6a) eta (7.6b) Ekuazioak planteatu daitezke.

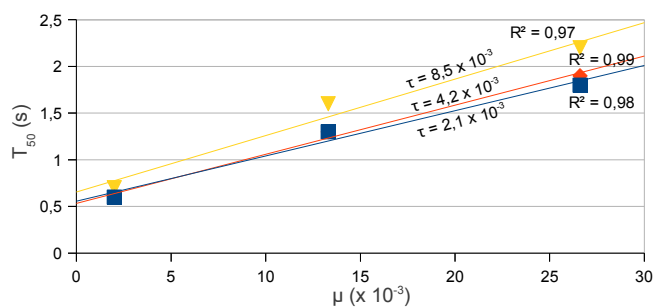
$$T_{50} = (0.044 + 0.0018 \cdot \tilde{\tau}_0 \cdot 10^{-3}) \cdot \tilde{\mu} \cdot 10^{-3} + (0.017 \cdot \tilde{\tau}_0 \cdot 10^{-3} + 0.495) \quad (7.6a)$$

$$D_f = (54 + 0.8 \cdot \tilde{\mu} \cdot 10^{-3}) \cdot \tilde{\tau}_0 \cdot 10^{-3} + (-9 \cdot \tilde{\mu} \cdot 10^{-3} + 1108.09) \quad (7.6b)$$

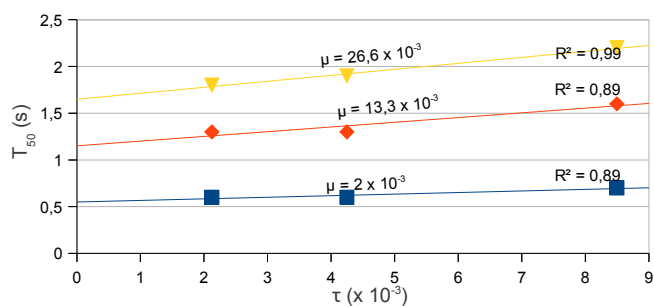
Isurpen-tentsio eta biskositate balio hauek, egindako jaria kinaren norabide biko simulazioan erabilitakoei dagokie. Merkatuan dauden biskosimetro eta erreometroek ematen dituzten balioez bestelakoak erabili dira, baina aurretik esan bezala, balio horiek ere elkarren artean oso ezberdinak dira [Hu (1995)]. Simulazioaren neurketak hormigoizko masa errealean neurketekin erlazionatzeko, [Zerbino et al (2009)]-ek egindako ikerketaren emaitzak erabili dira eta (7.6a) eta (7.6b) Ekuazioen arabera entseguetan neurketa berdinak

	$\tilde{\tau}_0$ (10^{-3})	$\tilde{\mu}$ (10^{-3})	T_{50} (s)	D_f (mm)
Konoarekin	2.1	2	0,6	1030
	2.1	13.3	1,3	890
	2.1	26.6	1,8	812
	4.2	2	0,6	812
	4.2	13.3	1,3	780
	4.2	26.6	1,9	734
	8.5	2	0,7	678
	8.5	13.3	1,6	608
	8.5	26.6	2,2	608
Kono gabe	2.1	2	0,3	1078
	2.1	13.3	0,5	780
	2.1	26.6	1,1	764
	4.2	2	0,5	874
	4.2	13.3	0,6	718
	4.2	26.6	1,2	718
	8.5	2	0,3	858
	8.5	13.3	0,7	608
	8.5	26.6	1,5	592

7.1 Taula: Konoarekin eta konorik gabeko simulazioen neurketen ezberdintasunak.

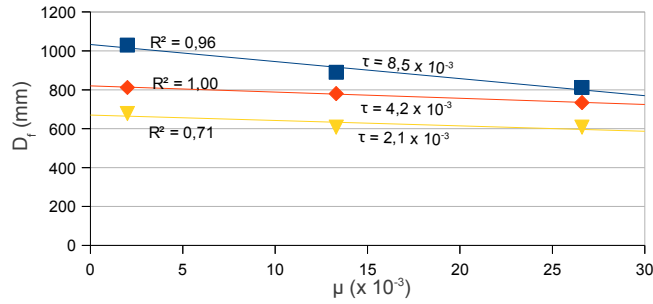
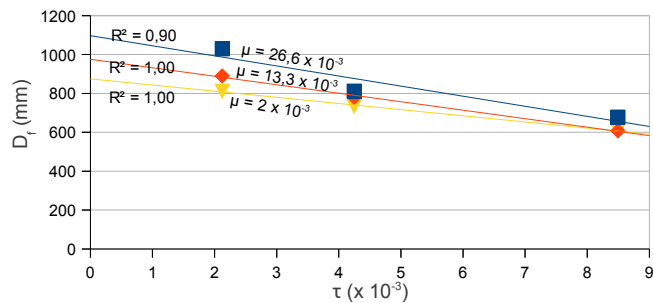


(a) T_{50} -ren aldakuntza $\tilde{\mu}$ -rekiko $\tilde{\tau}_0$ -ren balio ezberdinetarako



(b) T_{50} -ren aldakuntza $\tilde{\tau}_0$ -rekiko $\tilde{\mu}$ -ren balio ezberdinetarako

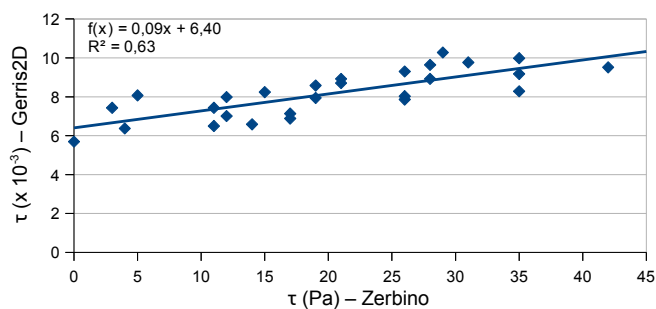
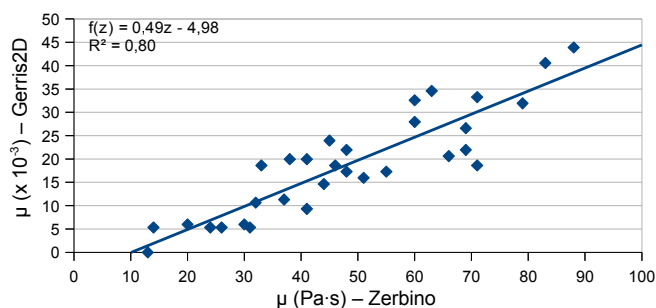
7.3 Irudia: T_{50} -ren aldakuntza $\tilde{\mu}$ eta $\tilde{\tau}_0$ -ren arabera.

(a) D_f -ren aldakuntza $\tilde{\mu}$ -rekiko $\tilde{\tau}_0$ -ren balio eznerdinetarako(b) D_f -ren aldakuntza $\tilde{\tau}_0$ -rekiko $\tilde{\mu}$ -ren balio ezberdinetarako7.4 Irudia: D_f -ren aldakuntza $\tilde{\mu}$ eta $\tilde{\tau}_0$ -ren arabera.

lortzeko beharrezkoak diren propietateak zehaztu dira. Aipatutako artikuluan, 40 hormigoi lagin aztertzen dira gehienentzako (25) isurpen entsegu eta parametro erreologikoen zehaztapena errepikatuz. Hala ere, masa nahastu berrien balioak bakarrik hartu dira kontuan, gogortzearen hasiera bezalako beste fenomeno batzuk baztertzeko, alderaketan dispersio gehiago eragingo luketelako. Balio tarte bien linealtasunak, BML biskosimetroaren bidez aztertu den masaren parametro erreologikoak bihurtzea ahalbidetzen du, ondoren Gerris bidez modelizatzeke.

D Eranskineko D.1 Taulak emaitzak biltzen ditu eta 7.5 Irudiak kasu bien arteko erlazioak agertzen ditu. Isurpen-tentsio nuluko neurketak errealak, simulaziokoekiko alderdi negatiboan aurkitzen direla antzeman daiteke. Hau da, jariakortasun handiko masek isurpen-tentsio balio negatiboak aurkezteko joera dute, 2.4 Atalean aipatu izan den bezala, eta fisikoki ezinezkoa denez neurketa tresneriak balio nulua ematen du. Neurketa horiek, eta era gehigarrian isurpen-tentsio baxua duen besteren bat, irudikapen grafikotik baztertuak izan dira korrelazio egokia lortzea eragozten baitzuten.

Horman hustu den altzairu zuntzez indartutako hormigoi autotrinkotzaillean egindako isurpen entseguan, batetik neurtutako 500 mm-ko diametroa (T_{50}) gaingitzeko abiadura eta azken diametroa (D_f) eta bestetik orain arte ezarritako erlazioen arabera, 0 Pa-eko isurpen-tentsio eta 63 Pa-s-ko biskositatea hartu dira hurrenez hurren. Hormigoiaren dentsitatea 24 KN/m³-tan ezartzen da. Aldi berean, gas faserako, airea, 12 KN/m³-tako dentsitatea eta

(a) $\tau_0 - \tilde{\tau}_0$ (b) $\mu - \tilde{\mu}$

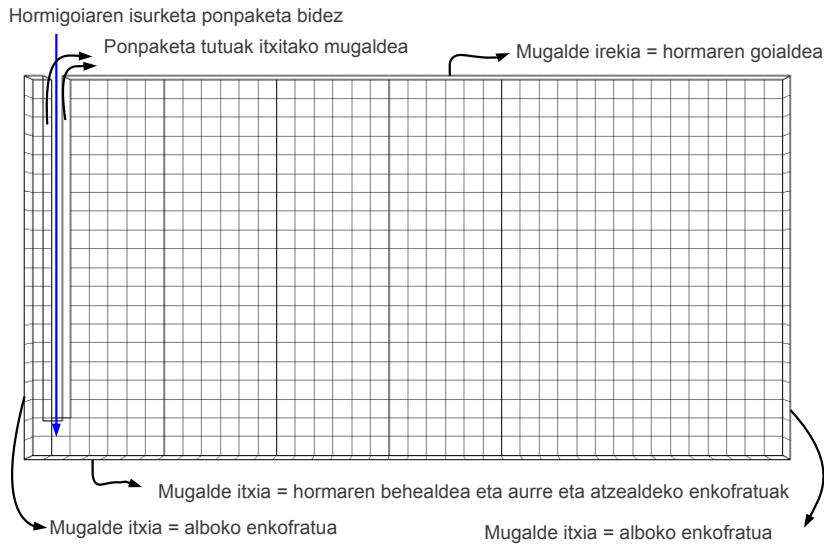
7.5 Irudia: BML biskosimetroko $\tilde{\tau}_0$ eta $\tilde{\mu}$ -ren eta CFD simulazioen $\tilde{\tau}_0$ eta $\tilde{\mu}$ -ren neurketen arteko erlazioa.

$1.81 \cdot 10^{-5}$ Pa·s-tako biskositatea hartu dira.

Balio hauek hortaz, hormaren hormigoitze osoaren simulazioaren sarrera datuak dira, abiadura eremuak aztertuko direlarik gainontzeko entseguez balioetsi diren zuntzen orientazioaz alderatzeko.

Fase honetan, garbi utzi da Bingham modeloak hormigoi autotrinkotzailea moduko materialentzako aurkezten duen muga. Isurpen entseguaren dimentsio biko (2D) simulazioak isurpen-tentsioaren balio positiboak ematen ditu beti, hiru dimentsioko (3D) modelo eta axisimetrikoetan balio horiek neurritz kanpo balioztatzen dituzten bitartean. Dimentsio biko modeloen eta axisimetrikoen arteko balio adierazgarrien ezberdintasun hau, eta honen azalpena, aurreko ikerketetan [Dufour and Pijaudier-Cabot (2005)] agerian ipinia izan da.

Isuritako hormigoiaeren erreologia ezaugarritzeko prozedura ezartzen da beraz, masa freskoan egindako Abrams-en konoaren entsegua eta haren simulazio konputazionalen arteko alderaketan datzalarik. Aurretiaz aipatutakoari jarraiki, hormigoia autotrinkotzaile gisa hartzeko, indarreko araudiak adierazten duen isurpen tarte guztia erregistratzea ahalbidetzen duen dimentsio biko simulazioa egitea interesgarriagoa da. Ondoren, simulazioan lortutako balioak BML biskosimetroaren bidez erregistratutako balioekin bat datozenetara estrapolatzen dira, 7.5 Irudian erakusten den erlazioaren arabera.



7.6 Irudia: Hormaren eta bere ugaldetako baldintzen simulazio modelo.

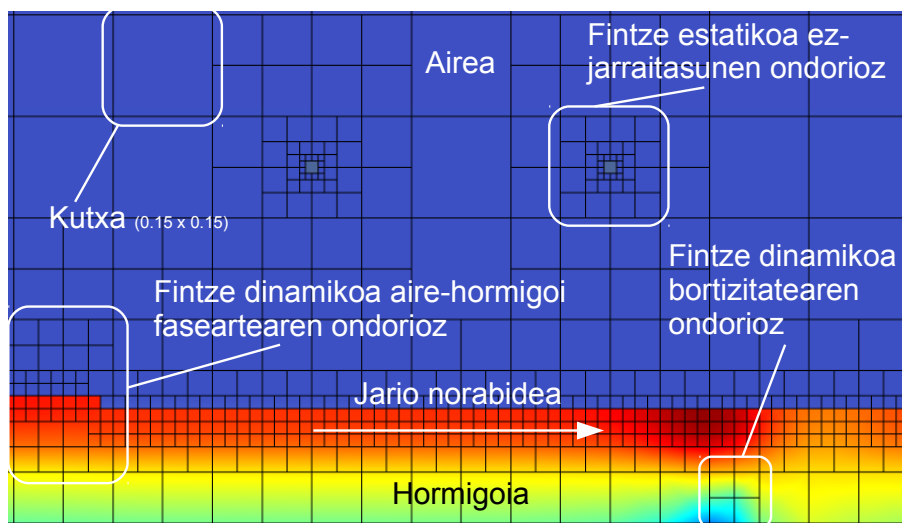
7.2.2 Modelo osoa

Diseinatu den analisi modeloak (7.6 Irudia) hormaren osotasuna berregiten du 0.15 m-ko aldea duten azterketa unitateen bitartez, lagin kubikoak bailiran modulatzeko aukera ematen baitute. Hormaren neurri nagusiei jarraiki (luzera, altuera eta lodiera) 800 kutzatan banatzen da, baina horietako zenbait balio gabetu egin dira ponpaketa tutuak betetzen duen espazioa simulatzeko. Hitz batez, hormigoi freskoa 782 kutzatik ibiltzen da guztira. Hainbat solido gehitu dira aurre eta atzealdeko enkofratuak elkar lotzen dituzten elementuak simulatzeko, eragin lezaketaren jarioaren aldaketa kontuan har dadin.

Hormigoitze operazioak iraun duen denboraren arabera ezartzen da ponpaketa emaria. Prozesu guztiak 8 minutu irauten ditu, $0.3375 \text{ m}^3/\text{min}$ -ko behar direlarik 2.7 m^3 -ko enkofratua betetzeko. Enkofratuaren hormetan irristatzerik ez dagoela suposatzen da, haiekin kontaktuan dagoen hormigoia abiadura nulua izatea eragiten duelarik. Enkofratuok, hormen eraikuntzan erabiltzen diren ohikoak dira, enkofratu-olioz inpregnatuak ondoren kendu ahal izateko.

Hormigoia behealdeko ezker ertzetik isurtzen da enkofratu barruan sartu den ponpaketa tutaren bidez eta ezkerretik eskuinera ibiltzen da, behetik gora, molde osoa bete arte. Aldi berean, multzoaren goiko aldea irekia dago airearen irteera errazteko, masaren barruan harrapatua gelditu gabe. Ponpatzeko erabiltzen den tutuak 150 mm-ko diametroa du, aurre eta atzealdeko enkofratu panelen artean primeran egokitzen delarik, alde bakoitzean espazio bereziak sortuz.

Hormigoitze errearen prozesuarekin koherentea den eran gauzatu da simulazioa, ponpaketa tutua aldi oro behealdean sartua mantenduz. Prozedura hau hala ere, ez zen hasiera batean ezarritakoa, hormigoia frontea igo ahala tutuaren altzate abiadura zehazten baitzen. Ikerketa honek, bestalde, lehen-tasuna ematen dio ahalik eta errearen diren egikaritze baldintzak ezartzeari, kasu honetan gertatu den bezala, parte hartzen duten eragile guztien arteko



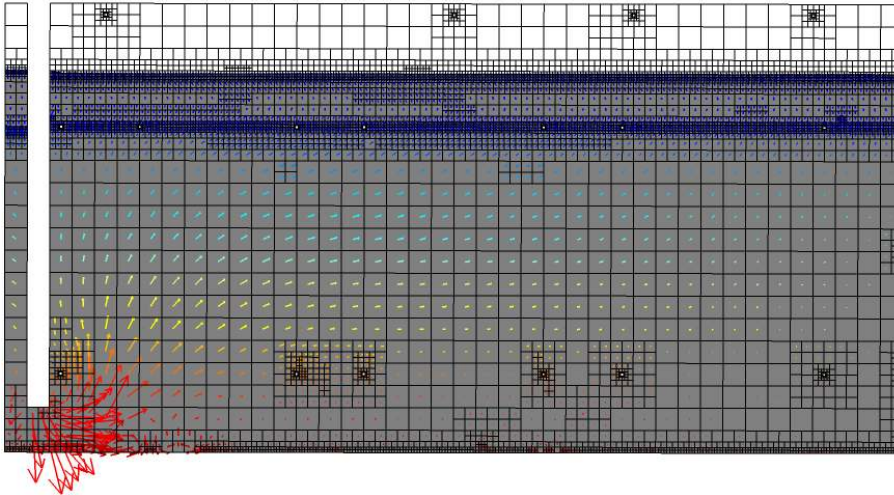
7.7 Irudia: Fintze maila eta irizpideak.

komunikazioa ez delarik izan beharko lukeen bezain eraginkorra. Ondorioz, hormigoia-aren obraratze baldintzak zehatz-mehatz errepikatzen ditu entseguak.

Nahiz eta prozedura eta emaitzak bestelakoak izan hasiera batean, aztertutako kasu zehatzera egokitu da simulazioa. Bada hala ere, hormaren egikaritze prozesu eta haren simulazioaren artean ezberdintasun arin bat, azken honetan ez baita islatu beharrezkoak diren ponpaketa tresneriaren kentzea. Tutuaren ateratze horrek masaren halako mugimendua eragin du, batez ere norabide bertikalean, isurketa puntuaren hurbiltasunean zuntzen orientazioa alda leza-keena. Horma osoaren portaera mekanikoari dagokionez garrantzi gutxi duela suposatu denez, simulazioa hormigoia-aren ponpaketa sinplera murriztea erabaki da. Era berean, ez dira kontuan hartu, zalantzarik gabe hormigoia-aren jarioa oztopatu duten alboetako zutabe bien ar-eme junturak eta PVC-zko estankotasun bandak. Kasu errealetako andelen diseinuak, erabili dena baino gutxienezko lodiera handiagoa ezartzen du, aztertu den kasuko alboetako arazoak ez direlarik zuzenean estrapolagarriak izango.

Egindako isurpen entseguaren simulazioan bezala, modeloak ere sarearen finte dinamikoaren inplementatzen du. Kasu honetan, hormigoia-aren fasea finteza saihestu da bere bolumen handiagoak kostu konputazional handiagoa leka-keelako simulazioan zehar, informazio garrantzitsurik eman gabe. Hormaren azterketa eremua lagin kubikoekin pareka daitekeenez, ez da xehetasun maila handiagorik behar emaitzak, adibidez, metodo magnetikotik eratorri direnekin alderatzeko.

Aldiz, Abrams-en konoaren simulazioan ezarritako finte irizpideak aldatzen dira, interfaseaz gain bortizitate handiko gunetan masaren mugimendua- ren hurbilketa hobea sustatuz, horman zehar zuntzek hartzen duten norabidean eragin handiagoa baitu. Enkofratuen arteko lokailuek ez-jarraitasun geometri-koak ezartzen dituzte sarea horren zulo txiki-tara egokitu behar delarik. *Kutxa* deituriko hasierako azterketa eremutik, 0.15 x 0.15 metroko aldeak dituen, 3 finte dinamiko edo estatiko maila lortzen dira aipatu diren irizpideen arabera. Modeloaren gune murriztu batean jatorrizko unitatea eta sarearen egokitzape-



7.8 Irudia: Hormigoiz betetako zonaldea eta sarearen fintzea.

na eragiten duten egoerak ikus daitezke 7.7 Irudian. Hala eta guztiz ere, sarea ez da konoren entseguan bezain beste findu, azterketa eskala handiagoan egiten baita, harri-agregakinen tamaina baino handiagoa.

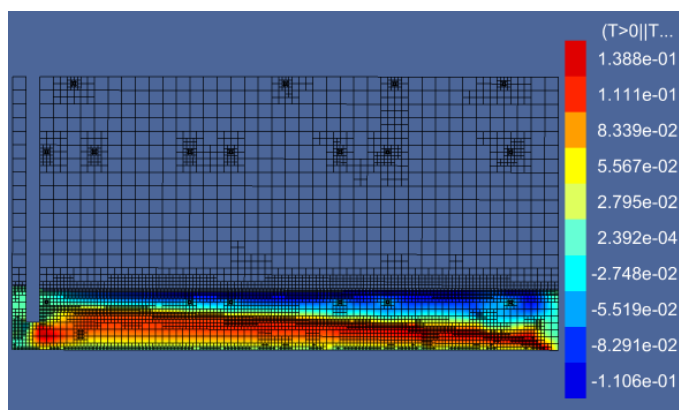
Denbora une bakoitzean trazatzailearen kokapenaz gain, hormigoitze prozesu guztian zehar fase bien presio eta abiadura eremuak lortzen dira emaitza gisa. Azterketak hormigoiz masa freskoaren mugimendua duenez oinarri, gas fasearen emaitzak baztertu dira dokumentu honetan.

7.8 Irudian, sarearen fintzea ikus daiteke faseen arteko gradientean eta bortizitate handiko guneeetan eta baita, bolumen zati bat betetzen duen hormigoiz masaren abiadura eta intentsitatea adierazten duten jario lerroak ere. Irudi honetan fintze handiago duten maila bi ikusten dira, aipatu den segregazioaren (4.4.1 Atala) ondoriozko hormigoiz mota biren hormigoitze frontea mugatzen dutenak. Beharrezkoa gertatzen da hortaz, parte hartzaile guztien interesa azken emaitza ezin hobea izan dadin. Benetako prozesua simulatzeko asmoz, 7.2.1 Atalean deskribatu diren ezaugarriak dituen hormigoizaren aurretik, dentsitate eta biskositate gutxiago duen beste hormigoiz bat sartu da, ponpaketa makinaren bazkatze urak eragin duen segregazioa simulatzeko.

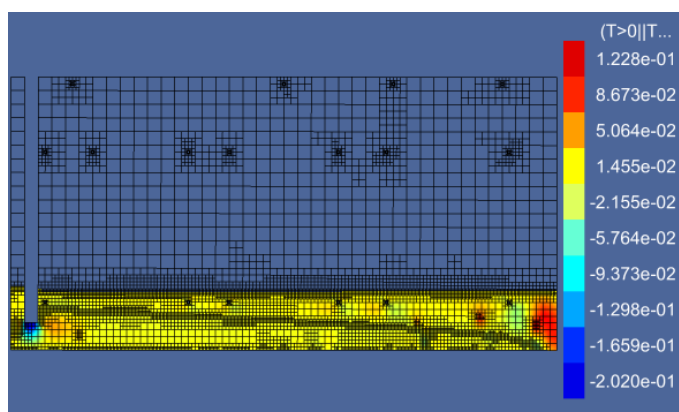
7.3 Simulazioaren emaitzak

Isurketa prozesua eta enkofratuaren betetzea errepikatuz egin den horma osoaren simulazioak, hormaren zonalde bakoitzeko abiadura eremu ezberdinak erakusten ditu. Hormigoitze hasieran hormaren behealdean masa horizontalki dabil inolako eragozpenik gabe, luzetarako ardatzarekiko abiaduraren osagaia nagusi izanik, baina egikaritzeak aurrera egiten duen heinean, jarioa egonkortu egiten da gelditzeko joera izanik. Egoera hau 7.9 eta 7.10 Irudietan islatzen da denbora une birentzako, hormigoitze hasieratik zenbatuta 112 segundu eta 439 segunduri dagozkienak, hain zuzen ere.

Hori dela eta, hormigoitze tutuaren eskumatara jario bertikala sortzen hasten da, hasierako uneetan betetako bolumenak mugimendu horizontala galaraz-



(a) Abiadura horizontala



(b) Abiadura bertikala

7.9 Irudia: Abiadura eremuak $t = 112$ s denean.

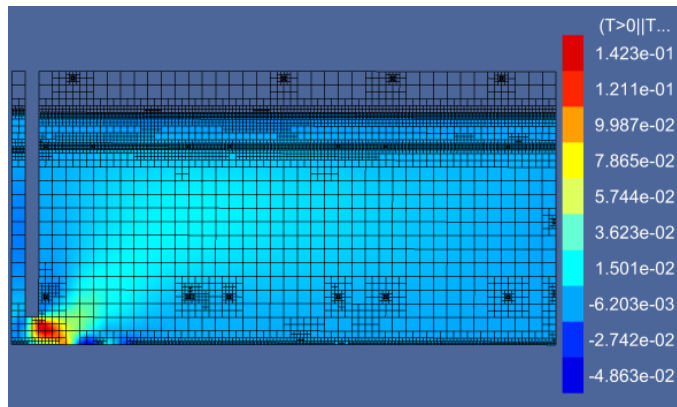
ten baitio hormigoiri. Hormigoia, frontearen goialdera iristen denean, abiadura horizontala gradienteaz ezartzen da berriro ere. Hala ere, *kutxa* gero eta gorago egon, handiagoa da osagai bertikal eta horizontalen arteko ratioa.

Enkofratuan hormigoia kantitate handiagoa isurtzen den heinean, masaren abiadura balioek gutxitzeko joera dute, zailagoa baita aurretik isuri den boluena mugiaraztea, baina hala ere, abiadura eremuen ereduak konstante darrai.

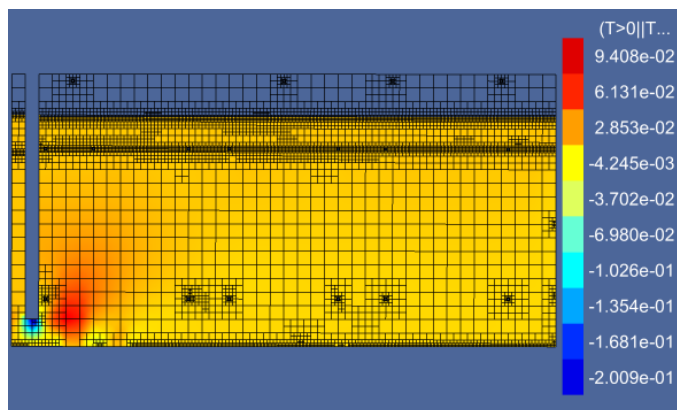
7.3.1 Egiaztapen esperimentalak

Beharrekoa gertatzen da simulazioaren emaitzak benetako egitura batekin alderatzea. Asmo horretarako batez ere, aurretik zehaztutako (5.4 Atala) entsegu magnetikoetan pilatutako datuak erabiliko dira. Masaren mugimenduaren norabideak zuntzen orientazioan nola eragin duen ikus daiteke horietan.

7.9a eta 7.10b Irudietan aldiz, ia-ia horizontala den jario gunea eta osagai bertikal nabarmena dituen antzeman daitezke hurrenez hurren. Eremu magnetikoan sartutako laginen zuntzek luzetarako norabidean (X) agertzen duten orientazioarekin bat dator erabat, 5.10 Irudiak adierazten duen bezala. Planteatu den bezala, hasierako jarioak enkofratu osoa ibiltzen du luzetarako



(a) Abiadura horizontala



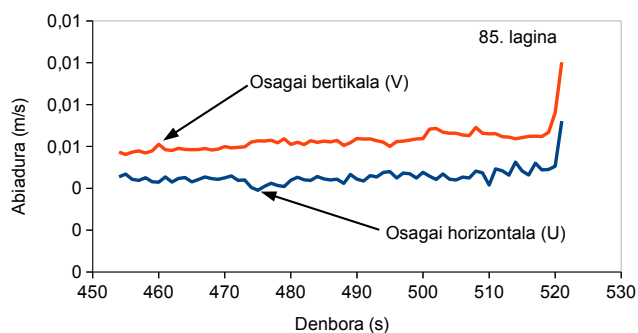
(b) Abiadura bertikala

7.10 Irudia: Abiadura eremuak $t = 439$ s denean.

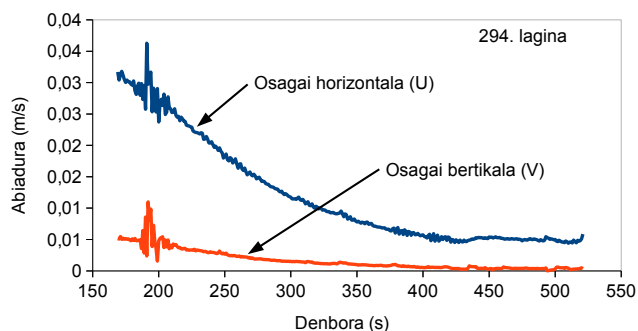
norabidean eragozpenik gabe. Hau ez da horrela gertatzen hormigoi kantitate gehiago isurtzen denean, altueraren heren bat gutxi gora behera. masa igotzera behartzen duelarik, ondoren horizontalean mugitzen jarraitu ahal izateko gainazaletik hurbil.

Abiadura eremuak *kutxa* bakoitzeko aztertu dira simulazio osoan zehar. Zenbait zonalde xehetasun handiagoz aztertuz, zehazki 85 eta 294. lagin kubikoei dagozkienak, denbora une bakoitzean erregistratu diren abiadura eremuak 7.11 Irudian azaltzen dira. Osagai horizontala nagusi da behealdeko kutxetarako, nahiz eta simulazioan zehar abiadurak arin murrizteko joera duen. Goialdeko kutxetan, abiadura osagai biak, horizontala eta bertikala, antzekoagoak dira eta joera horrek hormigoitzearen amaierararte dirau. Hormigoi faseak denbora gehiago behar du goialdeko kutxetara iristeko, behealdekoetan baino eragin gutxiago duelarik simulazioan.

Jariakinen simulazio metodo konputazionalen bitartez egindako aurreikuspenak erkatzeko, 5.4 Atalean erabilitako metodo magnetikoen emaitzekin alderatzen dira. Probetei dagokien orientazioa, induktantzia aldakuntza ardatz guztietan neurtu ahal izan diren kasuetan soilik erakusten da. Hori dela eta, lagin kubikoentzako bakarrik azaltzen dira datuok eta metodo magnetikoen



(a) 85. lagina



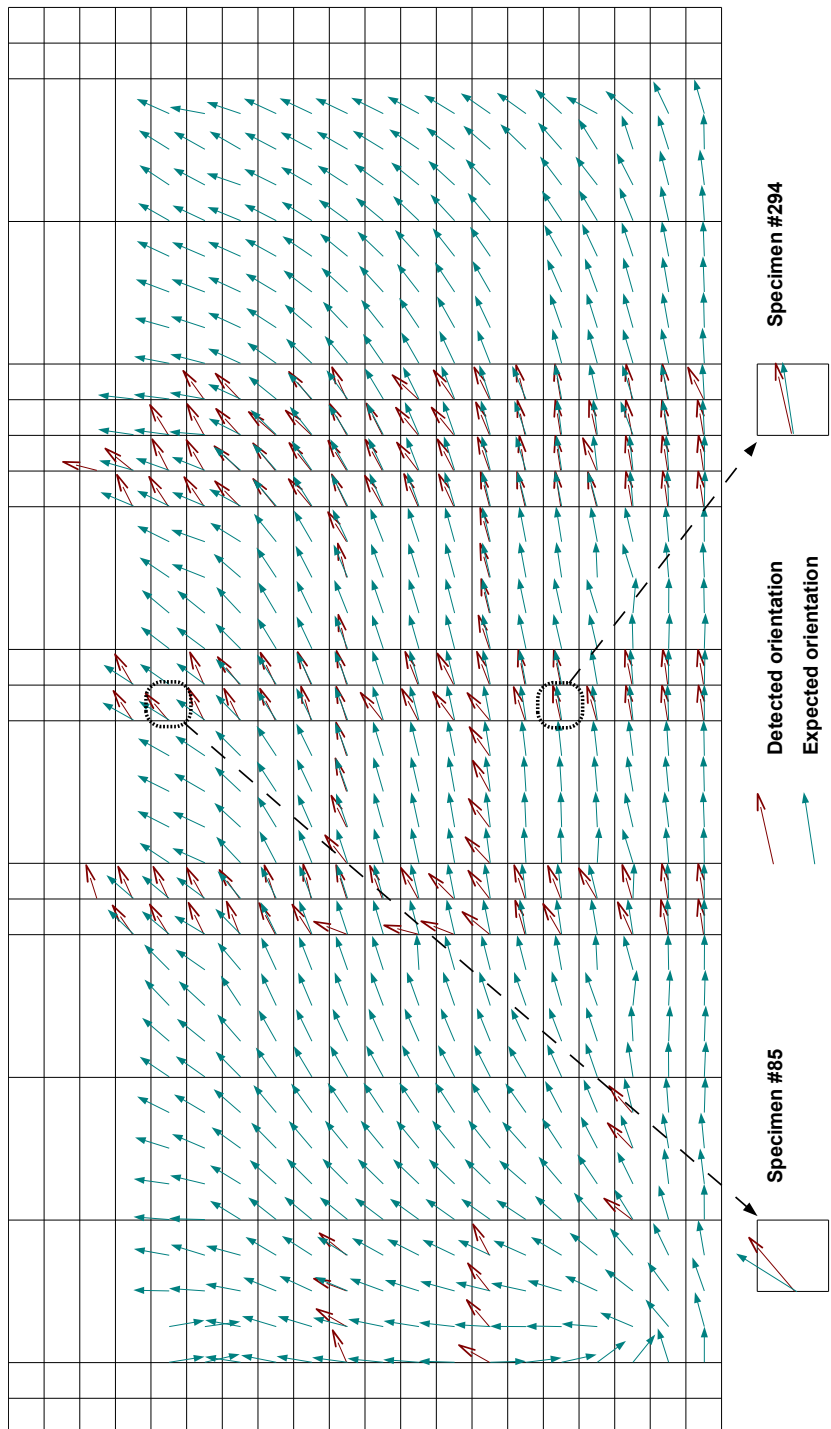
(b) 294. lagina

7.11 Irudia: Abiadura eremuen aurreratzea 85 eta 294. laginetan.

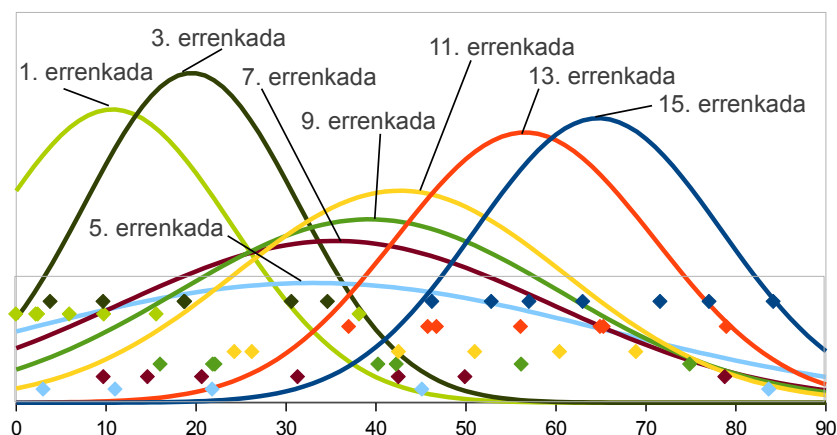
erabilgarritasunari buruz informazio gehiago lortzearen (5.4.3 Atala) kubotan moztutako lagin prismatikoetatik zazpirentzako ere. 7.12 Irudian ikus daitezke konputazio-modeloaren arabeko orientazioak (berdez) eta entsegu ez-suntsitzailen emaitzen bidez lortutakoak (gorriz). Nabarmena da kasu askotan, nahiz eta guztietan ez, zuntzen norabideek doitasun nahikorekin datozela bat.

Orientazioen banaketa horma guztian zehar, banakuntza normal baten birtartez hurbil daiteke errenkada bakoitzeko 7.13 Irudian erakusten denaren arabera. Behe eta goialdeko guneek orientazio uniformeagoak dituzte, desbideratze estandar baxuekin (%12-13 gutxieneko balioa). Erdialdeko errenkadetan zuntzen orientazioa aldakorra da aurretiaz aipatu diren fenomenoak direla eta. Sortutako trantsizio zonaldeak, isurketa puntutik gertu osagai nagusia bertikala duten guneak eta puntu horretatik urrun horizontalak nabarmenago diren abiadura eremuak islatzen ditu, jarria egonkortzen den heinean. Azken kasu honetan, desbideratze estandarra %32-raino igotzen da, aurreikusitakoaren arabera.

Aldi berean, erantzun mekanikoa ere zuntzek matrize barruan hartzen duten orientazioak eragiten du. 6.15 Irudia aztertuz, isurketa puntutik diagonalean eskumatarantz igotzen den igarobidea antzematen da, laginek hondar



7.12 Irudia: Aurreikusitako orientazio eta metodo magnetikoen bitartez detektatutakoak.



7.13 Irudia: Orientazioen Gaussiar banaketa.

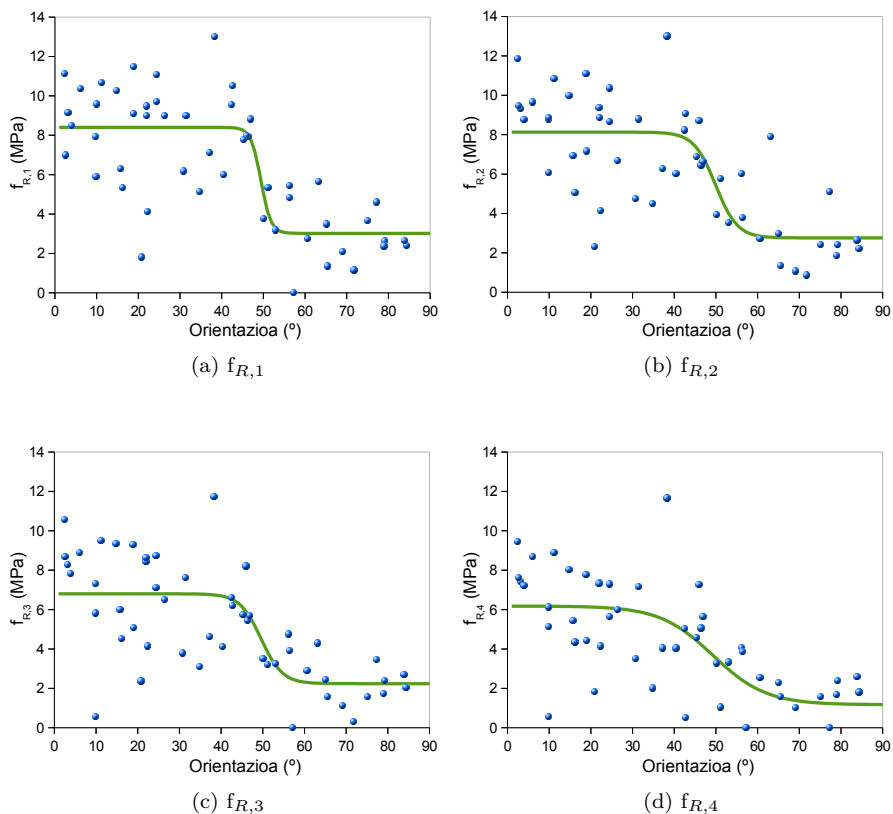
erresistentzia balio txikiagoak dituztelarik bertan. Zonalde hori masaren mugimendu simulatuarekin bat dator antzekotasun nahiko handiarekin.

7.3.2 Erresistentzien aurreikuspena

Doktore Tesi honetan zehar entsegu mekaniko ezberdinak (6 Atala) egin birtartean, apurketa planoekiko zuntzen orientazioak materialaren erresistentzia ahalmenean eragin handia duela frogatu da. Beraz, trakzio esfortzuen norabidearekin hobeto lerrokaturik dauden zuntzek hondar erresistentzia handiagoak ematen dituzte. Materialaren portaera mekanikoaren aurreikuspena egin daitekeela uste da, jariakinaren dinamikaren konputazio-simulazioaren arabera aurreikusi diren orientazioen arabera. 6.6.3 Atalean 74 lagin prismatikoetan erregistratu diren emaitzetatik 7.14 Irudian ikus daitezkeen hurbilketak ezartzen dira. Lagin bakoitzaren erdiko planoan aurreikusten diren orientazioak erakusten dira bertan, hondar erresistentzia ($f_{R,i}$) guztiei dagokienez. Azpimarratu beharra dago, proportzionaltasun muga (LOP) ez dela adierazi, zuntzen ekarpena nabarmena baita behin hormigoitza matritzea hautsi dela. Uste bezala, angelu txikiek erresistentzia balio handiak dakartzate. Gainera, lortu diren gehieneko balioak plano horizontalekoak baino angelu apur bat handiagoei dagozkiela argi ikusten da, [Robins et al (2002)]-ek frogatu zuten bezala banakako zuntzen erauzte entseguetan. Agerian dauden zuntzen inguruan gertatzen diren matritzearen apurketak eta lehenengoen artezketak [Bartos and Duris (1994)] dira gehikuntza horren arrazoiak. Aldiz, trakzio esfortzuekiko lerrokaturik ez dauden angeluetan sostengu ahalmen eskasa gertatzen da.

Aurreko ataletan aipatu izan da (6.6.3.1 Atala) flexotrakzio entseguaren bezko dispersioa, datuak ez direlarik era isolatuan hartu behar lagin bakoitzaren arabera, baizik eta ikuspegi zabalagoaz egituraren portaera osoa ezagutzea.

Nahiz eta banakako lagin kopuru handiarentzako hondar erresistentzia balioak aurreikustea zehatzena ez izan, posible da erregresio lerro bat hurbiltzea egitura-elementuaren gune ezberdinetako portaera mekanikoa kualitatiboki adierazteko. Era honetan, egitura-elementuaren ezaugarri geometriko eta en-



7.14 Irudia: Simulatutako orientazioen bidezko hondar erresistentzien aurreikuspena.

kofratuentzako hormigoitze prozedura ezegokien ondorio diren gune ahulak detekta daitezke. Hori guztia, benetako egikaritzearen aurretik, horrek dakarren denbora eta kostu aurrezpenarekin. Interesgarria da funtzio jarraitu bakarra eta tarte guztian diferentziagarria dena ezartzea, materialaren erresistentzia-portaera deskribatzeko edozein zuntz orientazio eta are haustura ondoko egoerarako. (7.7) Ekuazioak joera hori ezartzeko erabiltzen den funtzio sigmoidea zehazten du.

$$y = A_b \cdot \frac{A_t - A_b}{\left(1 + \exp\left(\frac{x - x_0}{w}\right)\right)} \quad (7.7)$$

Emaitzen dispersioaren ondorioz, Levenberg-Marquardt Algoritmoa (LMA) erabiltzen da kurbaren doiketa ez lineala egiteko. Prozedura iteratibo honek, desbideratzeen karratua arras gutxitzen du minimo karratuen metodoa erabiliz, ahalik eta hurbilketa zehatzena lortzeko asmoz. Funtzioan erabiltzen diren parametroen esanahi fisikoak, materialaren portaera mekanikoaren alderdi

Parametroa	A_b	A_t	x_0	w
$f_{R,1}$	3.02	8.40	49.42	1.19
$f_{R,2}$	2.76	8.13	49.02	2.61
$f_{R,3}$	2.24	6.80	49.59	2.55
$f_{R,4}$	1.17	6.18	49.28	6.37

7.2 Taula: Funtzio sigmoideen abiapuntu parametroak.

esanguratsuenak azaltzen ditu. Horrela, A_b eta A_t lortuko diren gutxieneko eta gehienezko balioei dagozkien funtzioaren asintotak dira. Hurbilketa kontserbadore honetan inklinazio txikiei dagokien karga gehikuntza arina mespretxatu dela azpimarratu beharra dago. x_0 eta w balioek inflexio puntu eta trantsizio zonaldearen zabalera mugatzen dute, hazkunde esponentzial joera alderantzikatu egiten delarik, dezeleraziora bideratuz funtzioaren kurbatura aldaketa dela eta. Portaera bi nabarmenki ezberdintzen dira trantsizio zonaldeak osatzen duen irudimenezko mugaren ondorioz. 50 gradu baino txikiagoak diren orientazioek hondar erresistentzia maila egokia azaltzen dute, trakzio esfortzuekin nabarmenki lerrokaturik ez dauden zuntzak dituzten laginetan balioak txikiagoak diren bitartean. Aldaketa bat-batekoa da hasierako hondar erresistentzientzako, inklinazio handia duten zuntzen sostengu-ahalmena eraginkorra baita pitzadura irekidura handietan. 7.2 Taulak, kasu bakoitzean funtzioa erabiltzeko beharrezko hasiera datuak laburbiltzen ditu.

Lortu diren hondar erresistentzietatik abiatuz, EHE-08 Instrukzioan adierazitako prozedura jarrai daiteke materialaren lege eratzaillea osatu eta egitura modeloen emaitzekin alderatzeko. Era honetan eta elementuaren egikaritze eta hormigoitzearen aurretik, akzioekiko dagoen segurtasun tarte egiazta daiteke. Aipatu den legez, egokiagoa da analisis elementuaren osotasunean egitea. Indarreko araudiak hondar erresistentziak beste era batean kalkulatu balitu, balioen korrelazioa lortzeko prozedura antzekoa litzateke.

7.4 Materialaren lege eratzaillearen aurreikuspena.

Atal honetan, egitura hormigoitu barik eta harengan edo bere zatiren batean, inolako entsegurik (suntsitzaile zein ez) egin gabe materialaren lege eratzaillea ere aurreikusteko aukera ezartzen da. Hau da, modelo konputazionalengan egindako simulazioetatik bakarrik abiatuz, posible da materialaren erantzun mekanikoa hurbiltzea egituraren edozein puntutan. Materialaren $\sigma - \epsilon$ kurba adierazteko moduak, neurri handi batean, metodo magnetiko ez-suntsitzaileen bitartez neurtu den induktantzia aldakuntza balioetatik egindako aurreikuspenaren prozedura errepikatzen du (6.6.3.3 Atala). Atal horretan azaldutako egoeraz bestela, kasu honetan simulaziotik eratortzen diren datu bakarrak elementuan zehar zuntzen orientazioari dagokie. Zuntzak gehitzeak materialaren trakzio erresistentzia eragin zehatzik ez duela sortzen onartuz, Proporzionaltasun Mugari (LOP) dagokion erresistentzia (7.8) Ekuazioaren bitartez lortuko da.

$$f_{ct,L}^f = 0.21 \cdot \sqrt{f_{ck}^2} \quad (7.8)$$

Diagramaren lehen zatiari dagokionez, trakzio erresistentziaren balio adie-

razgarria erabiltzea proposatzen da. Era honetan, erresistentziaren balio txikiagoa (%5-eko kuantila) erabiltzen da, euste andean portaera hauskorra izan dezaketen guneetan pitzaduren agertzea ziurtasun gehiagorekin kontrolatzeko asmoz. Hormaren behealdeko gune indartuagoetan bestalde, batzaz besteko trakzio erresistentzia erabiltzeak emaitza doituagoak ematen dituela antzeman da. Alderdi honetan dagoen beste salbuespena, erresistentziaren murrizketa faktoreetan datza, inolako baliorik eragiten ez diolarik, balio adierazgarriak diseinukoetan bihurtzeko ohikoa den segurtasun koefiziente partziala ezik, noski.

Materialaren haustura-ondoko portaera modelizatzeko, beharrezkoa da kalibraketa ereduia izatea $f_{R,1}$ dagokion erresistentzia balioa lortzeko orientazioa edozein dela ere, 7.14a Irudian egiten den bezalaxe. Erlazio hori 7.2 Taulan agertzen diren parametroen bitartez lortzen da material horrek izan dezakeen gehieneko eta gutxieneko balioen arabera. Azpimarratzekoa da, erresistentzia ezberdineko matrizean sartuta dauden zuntz mota ezberdinek bestelako balioak emango dituztela. Kalibraketa ereduak ezartzeko lana nekeza da oso, zuntz/matrize konbinaketa ugari baitaude. Gainera, balio horiek lortzeko abiapuntu gisa erabiltzen den flexotrakzio entseguari buruz aipatu den dispertsioaz gain, planteatu den simulazio modeloak gune guztiek indartze bera dutela hartzen du, gerta litezkeen segregazioak gorabehera, benetan ezinezkoa delarik.

Adibide gisa 7.15a-tik 7.15d-rainoko Irudiak erakusten dira, EHE-08 Instrukzioak ezartzen duen diagrama multilineala eta kalibraketa eredu eta simulazio konputazionalen bidez lortutako parametroen arabera egin den hurbilketa esponentziala batera agertuz.

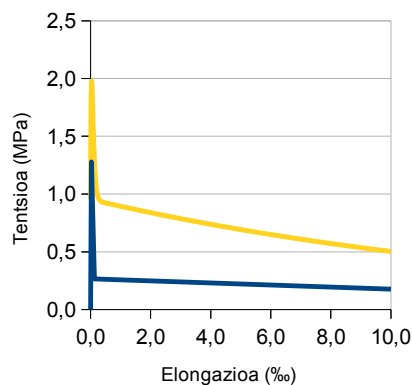
Kasurik gehienetan materialaren trakzio erresistentzia gutxiesten bada ere, prozedura egokia da materialaren portaera aurrean edota egituraren puntu ahulak antzemateko. Goialdeko zenbait laginetan pitzadura ondoko portaerari balio handiegia ematen zaio, baina ezberdintasun horren jatorria egikaritze akatsean datza, gehiegizko bazkatze uraren ondorioz hormaren goialdean zuntz segregazioa gertatu baita, eta ez behealdeko muga asintotikoaren balioztapean ezegokian.

7.5 Azken gogoetak

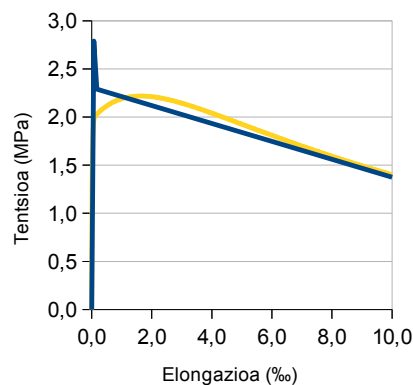
Jariakinen dinamika konputazionalen teknika, hormigoia indartzea zuntz bidez inplementatzeko jarduketaren eremu interesgarriena har daiteke, orientazioaren aurreikuspenari dagokionez. VOF metodo bidezko multifase azterketek hormigoia portaera bereiz dezakete, enkofratua bete ahala. Masan sartutako zuntzek desplazamendu erlatiboa antzemateko, beharrezkoa da lagangiar partikulak edo antzeko prozedurak erabiltzea. Partikula hauek zuntzak ordezkatzeko dituzte, azken hauen ezaugarriak (luzera, dentsitatea, etab.) eman dakizkielarik eta hormigoia simulatzen duen jariakinaren barruan duten biraketa aztertu.

Adierazi den Bingham modeloaren mugak, beste modelo batzuen erabilerari dagokionez (Herschel-Bulkley, Bingham aldatua, etab.) azterketa zehatzagoak eskatzen ditu, autotrinkotasun espektro osoan onargarria izanik, balio enpirikoekin bat datozenak. Interesgarria dirudi Gerris, Navier-Stokes ekuazio ebazle programan sartu beharreko parametro sorta eta merkatuan dauden beste tresneria batzuen, adibidez BTRHEOM, arteko korrelazio ezberdinak ezartzea.

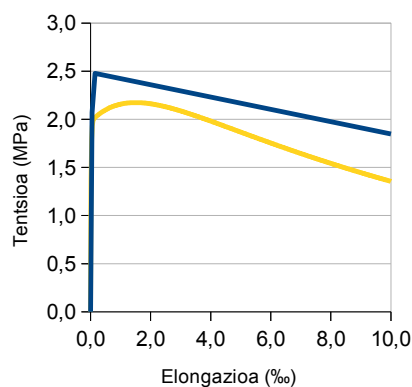
Era sinplifikatua hala ere, hormigoitze prozesuan zehar sortzen diren abia-



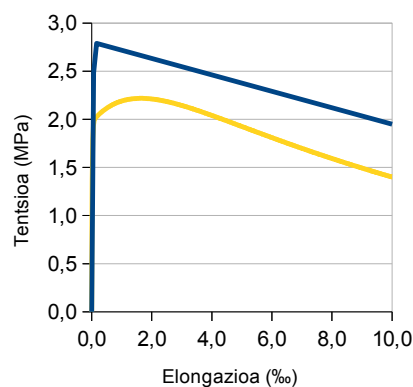
(a) 61. lagina



(b) 138. lagina



(c) 144. lagina



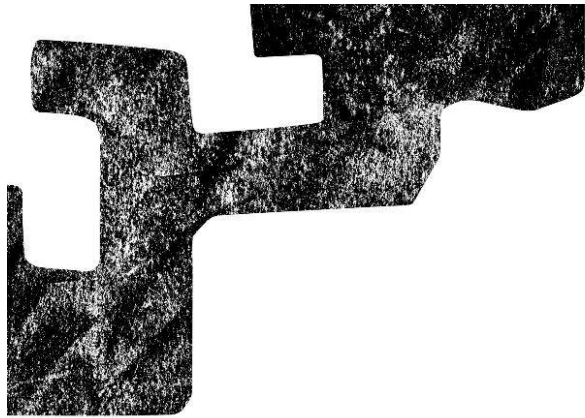
(d) 296. lagina

7.15 Irudia: Diagrama multilineala (urdinez) eta hurbilketa esponentziala (horiz).

dura eremuetan oinarrituz zuntzen orientazioa zehatz liteke. Hau posible bihurtzen da zuntz indartzea hormigoi autotrinkotzailean egiten denean. Laborategiko tamaina txikiko laginak egin beharrez, neurri handiko elementua erakitzeko, ezinezkoa egiten du orientazioari buruz aieruz aritzea, balio gehiago aitortzen dielarik lortutako emaitza egokiei. Zuntzen orientazioek, metodo magnetikoen bitartez detektatuekiko antzekotasun egokia dutela egiaztatu da, azken hauen egokitasuna ikerketa honetan zehar frogatua izan delarik. Materialaren portaera mekanikoa aldakorra denez zuntzek hartzen duten norabidearen arabera, egitura-elementuaren baitan portaera ezegokia izango duten gune zehatzak bereiz daitezke. Hormigoi arrunten kasuan orientazioa, masaren kanpoko zein barneko dardaratze tresneriak aldatzen duena, ezin da CFD metodoen bitartez era zuzenean simulatu.

Simulazioaren bitartez aurreikusten diren orientazioetatik abiatuz, kokapen

bakoitzeko materialaren portaera mekanikoa zehazteko baliagarria izango den hurbilketa egin liteke. Nahiz eta emaitza ezberdintasunak egon zenbait guneetan, orokorrean, emaitza askiesgarritzat har daiteke, ezberdintasun horien arrazoiak zeintzuk izan daitezkeen jakiteko azterketa zehatzagoa egin behar den arren, ponpaketa tutuaren irteeran izan daitekeen jario zurrunbilotsua kasu. Prozedura honek aurrezpen ekonomiko handia dakar, geometria edo obraratze prozedura ezegokiak egitura-elementua egikaritu aurretik ezagut daitezkeelako.



VI. ZATIA

Kasu praktikoen aplikazioa

8. GAIA

Euste andel zilindrikoak

8.1 Sarrera

Doktore Tesi honetan islatzen den ikerketaren idazketan zehar, hemen azal dutako altzairu zuntzez indartutako hormigoi autotrinkotzailearen erabilerarako egokiak izan daitezkeen erabilera industrialen bilaketa azpimarratu da. Atal honetan, ikerketa honen epizentrotik geografikoki gertu dauden euste andel zilindrikoen aipamen laburra egingo da, jasangarritasun alderdiak ere kontuan har daitezzen.

Ezaugarri geometriko eta mekanikoak aipatuko dira eta AZIHAT-aren bidez eraikitako beste aukera batzuekin alderatuko dira ekonomia, gizarte eta ingurumen ikuspuntuari dagokionez, azaltzen duten jasangarritasun maila handiago edo txikiagoaren arabera.

Alderdi ekonomikoari begira, barra korrugatu bidezko armatu pasiboa duten hormigoi armatuzko ohiko egiturekin alderatuz irtenbide interesgarria da. Aurrezpena egitura osoaren egikaritzean ikus daiteke, materialen gehikuntza arinak eskulan eta epe murrizketarekin orekatuz, baita lodiera txikiko elementuen obraratze egokiagoa ere. Faktore horietatik zenbait, era kualitatiboan 8.1 Taulan ikus daitezke.

Zuntz bidezko indartzeak pitzaduraren kontrol hobea dakar, araudietan zehazten diren gutxieneko zenbateko geometrikoak murriz daitezkeelarik. Zuntzen gailuz arina beraz, era honetan oreka daiteke. Horrezaz gain, armaturari geometria makotua eman beharra aurrezten da, haren kokatzerako denbora eta lana ere aurrezten delarik.

Hormigoi autotrinkotzailearen jarioakortasun handiak dituen abantailek, batetik zementu gehiago erabili beharra dakarte eta bestetik, azken belaunaldiko gehigarri superplastifikatzaileak erabiltzeko beharra ezartzen dute, garestitu egiten dutelarik. Hala eta guztiz ere, giro erasotzaileak jasan behar dituzten euste andel zilindrikoetako hormigoiaren giro orokor eta espezifikoez, gutxieneko zementu edukia handitu eta ur/zementu erlazioa txikitzea eskatzen dute.

Faktorea	Kostu gehikuntza	Kostu gutxitzea
Material osagaiak	Neurritsua (10-15%)	
Fabrikazioa (nahasketa denbora)	Txikia	
Enkofratua	Txikia	
Kalitate kontrola	Handia (hasieran)	
Laguntza teknikoa eta I+G	Handia (hasieran)	
Eskulana		Handia ($1/2$ g.g.b.)
Tresneria osagarri eta makineria		Neurritsua
Egikaritze epea		Handia ($1/3$ g.g.b.)
Akabera kalitatea eta egikaritze akatsak		Neurritsua/handia *
Zarata murrizketa		Neurritsua/handia ^{*,◊}
Laneko segurtasun eta osasuna		Neurritsua
Malgutasuna diseinuan		Neurritsua/handia *

* Erabileraren arabera
◊ Gaueko lana baimentzen du

8.1 Taula: HAT-aren kostuan zenbait faktorek duten kostu erlatiboa [Garrido (2004)].

8.2 Erabilera adibideak

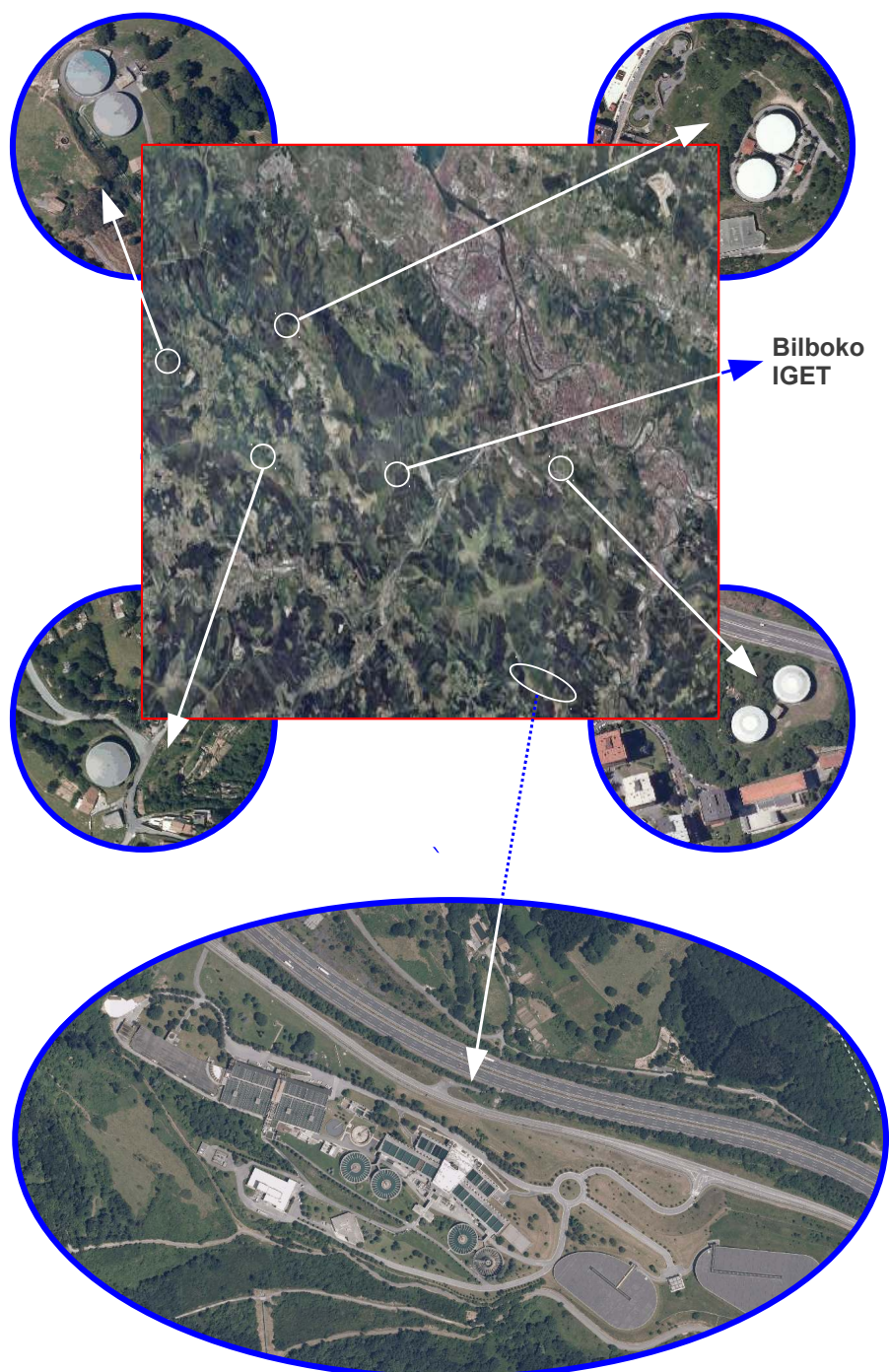
Elementuaren geometria eta obraratzearen arabeko zuntzen orientazioaren inguruan, ikerketa honetan frogatu diren berezitasunek, argi eta garbi murrizten dituzte AZIHAT-aren bitartez izan daitezkeen erabilera egokiak. Hau da, ardatz batekiko orientazio oso behartuak, egokiak dira norabide horren arabeko esfortzuak besteekiko baino handiagoak badira. Bestela, materialaren portaerari dagokionez zenbait muga azal daitezke. Zalantzarik gabe hala ere, aztertutako materialak gaitasun interesgarriak erakusten ditu, ohiko armatuaz indartuak dauden hormigoizko egiturekin uztar daitezkeenak, bistan denez, barra korrugatu eta zuntzen artean gerta litekeen blokeoa saihesteko kontrol zorrotzagoa izanik. Doktore Tesi honetan ez da zuntzen blokeo arriskua lar azpimarratu, proposatzen den erabileran hormigoia indartzeko zuntzak besterik ez baitira erabiltzen.

8.1 Irudian, Bilboko Ingeniaritza Goi Eskola Teknikoaren inguruan aurkitzen diren zenbait andelen kokapena erakusten da. Guztiak Bilbao-Bizkaia Ur Partzuergoaren ur hornikuntza instalakuntzei dagozkie, inguruko udalerrri askori ur edangarria hornitzeko arduraduna dena.

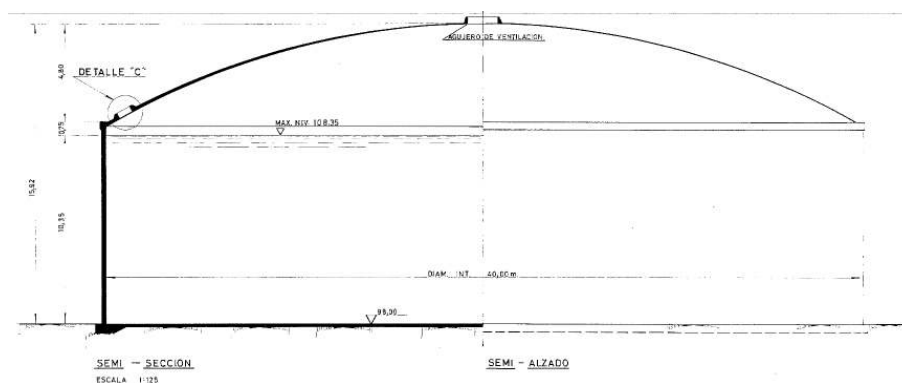
Era isolatu edo elkartuan sestra gainetik kokatzen diren euste andel zilindrikoak dira, Beteluriko Edateko Uren Tratamendutegiko hornikuntza sistemaren beste egitura batzuekin batera.

8.2.1 Neurri, armatu eta materialak

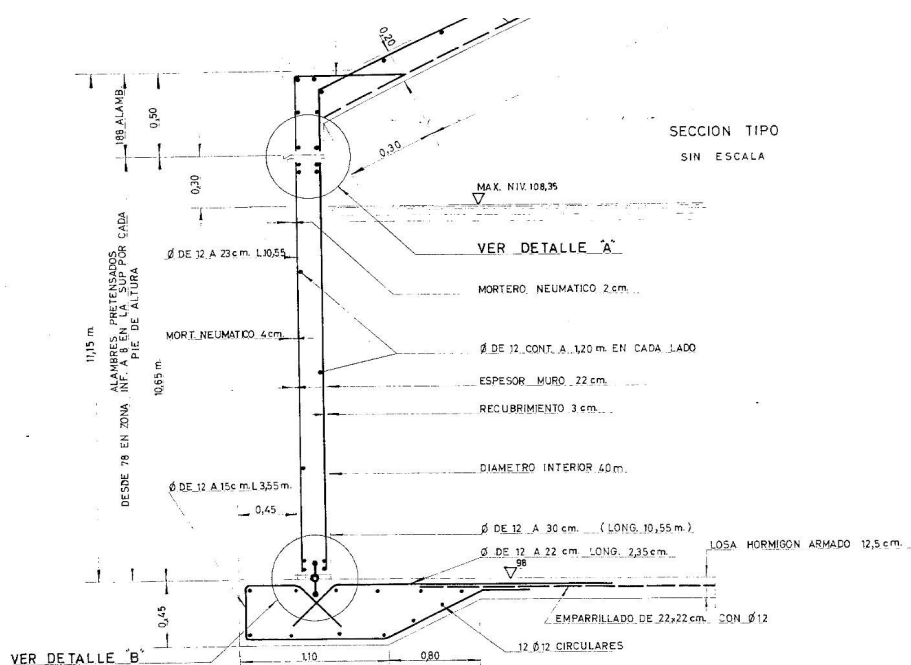
Era isolatuan kokatzen diren egiturek 30 eta 40 metro bitarteko diametroak dituzte, gutxi gorabehera 10 metroko altuerarekin. Beteluriko E.U.T.-an, hornikuntza sistemaren baitan zeregin ezberdinak betetzen dituzten andel kopuru handiagoa dago, lohiak loditzeko tangak (23 metro barruko aurpegien artean), bitarteko andela (6 metro libreko diametroaz) edo dekantazio-tangak (39 metroko barne-diametroa).



8.1 Irudia: Bilboko Ingeniaritza Goi eskola Tekniko inguruan dauden zenbait euste andel zilindrikoen kokapena.



8.2 Irudia: Egitura ereduaren ebakidura geometrikoa.



8.3 Irudia: Egitura ereduaren armatua.

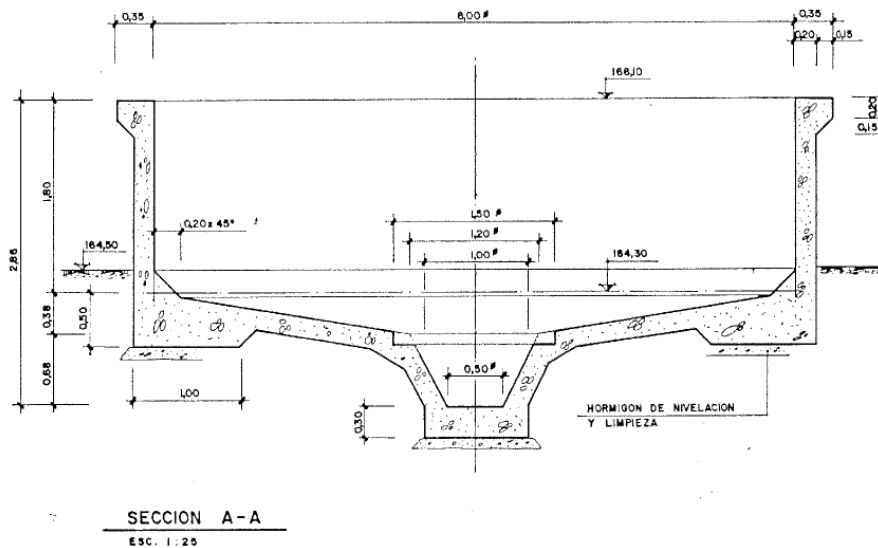
8.2 Irudiak 40 metroko andelaren ebakidura erakusten du, 10 metro baino zertxobait gehiagoko ur altuera eutsi behar duenak. Horretarako, 0.22 metroko lodiera duten hormak diseinatzen dira eta 8.3 Irudian azaltzen diren armatuak kokatzen.

Bestalde, bitarteko andelek neurri txikiagoak dituzte 8.5 Irudian erakusten den bezala eta haren diseinuan hurrengo 8.6 Irudian ikusten den armatua zehaztua dago.

Geografian zehar banatuak dauden andel erregulatzailerik, gango formako hormigoi armatuzko lauza dute estalki gisa osasungarritasunarekin lotutako alderdiak direla eta. Estalki hauek eta beheko zolarriak, AZIH-az gauza daitezke aparteko arazorik gabe, hedatuago dagoen materiala baita eta bere erabilerekin



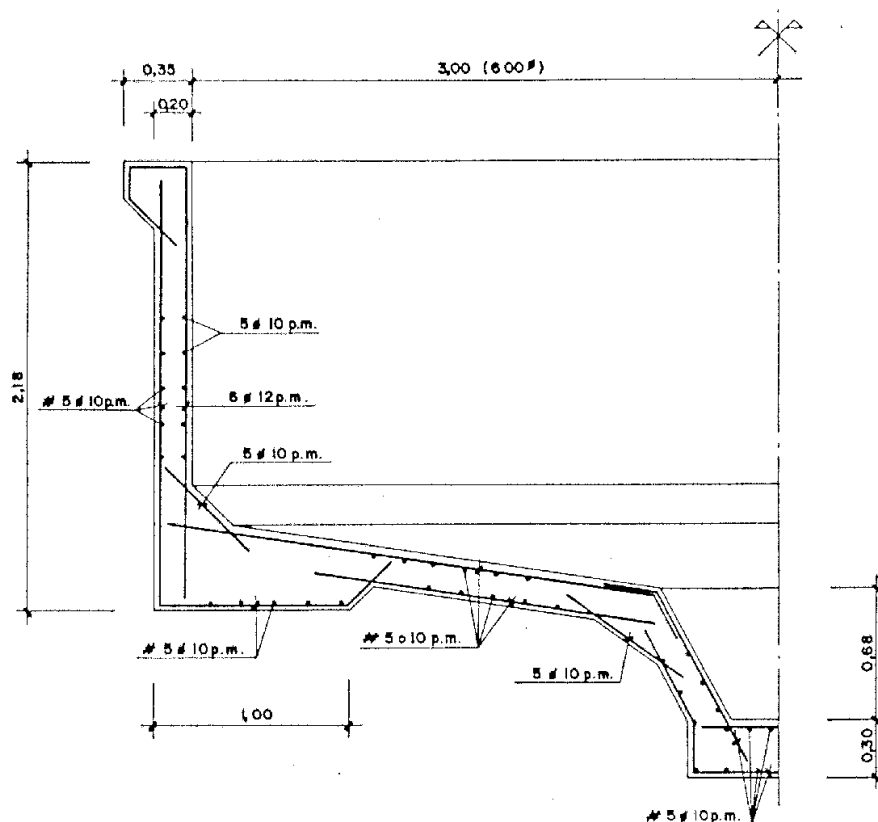
8.4 Irudia: Lotura eta euskarri giltzatuen berariazko xehetasunak.



8.5 Irudia: Tarteko andelaren zehaztapen geometrikoa.

aipamen nahikoa baitago [Serna et al (2009)] [Maturana (2013)]. 8.4 Irudiaran arabera, elementu hauen eta hormen arteko loturak euskarri simple gisa diseina daitezke, loturaren zurruntasuna bermatuko duten armatuen beharrik gabe. Haien geometria erregularragoa denez, eutsi beharreko kargen aurrean andel zilindrikoak aldeko portaera du, euste andel laukizuzenen aldean hormen lodiera murriz daitekeelarik. Berretsi egiten da hortaz, egitura horietan hormigoia indartze moduan barra korrugaturik ez erabiltzeko aukera. Oinarrian landatuta dauden beste horma batzuekiko ezberdintasuna, makurdura momentu eta ebakitzailearen balio absolutuaren murrizketan datza, perimetroko trakzio indarraren gehikuntza arin baten kalterako. Esfortzu ezberdintasun hauek 8.7 Irudian ikus daitezke argi eta garbi. Egingo den alderaketak beraz, andelaren hormak AZIHAT-aren bidez egikaritzea du oinarri.

Egitura hauetako zenbaitetan kokatu den aurreateatzeko armatuak, hormigoian konpresioa eragiten du materialean zehar gerta litekeen edozein irazte murrizteko helburuaz. Zalantzarik ez badago junturak egokiro iragazgaiztu behar direla, AZIHAT-aren obraratzek ere arreta egokia eta ontze nahikoa



8.6 Irudia: Tarteko andelaren eraikuntzan behar den armatua.

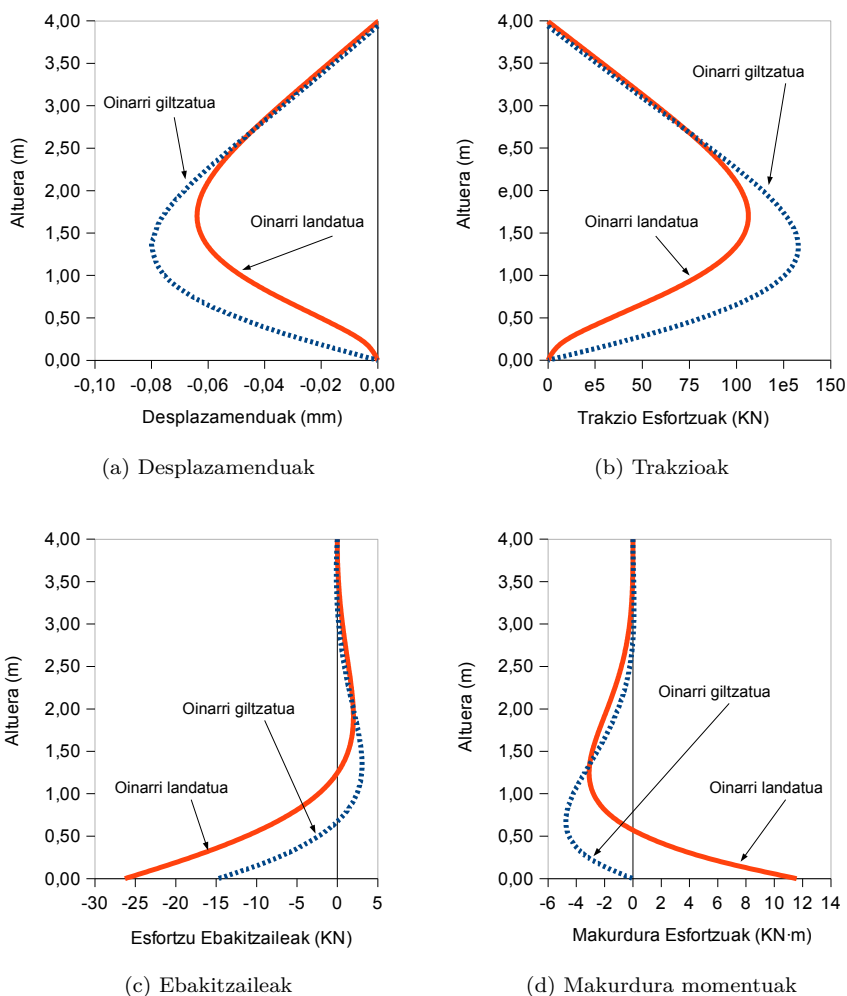
behar du, hormigoi autotrinkotzaileak eman dezakeen trinkotasun handia eta zuntz indartze jarraituari esker lortzen den pitzadura kontrolaz baliatzeko.

Alderdi honetan, [Riba (2005)]-k egindako azterketa interesgarria aipa daiteke, andel laukizuzenek zilindrikoekin eduki txikietan bakarrik lehia daitezkeela ondorioztatzen duena. Era berean, andel zilindriko armatuak interesgarriak dira eduki tarte guztirako, batez ere estalki gabe bolumen handietan ($> 10.000 \text{ m}^3$). Egoera honetan, estalkien kostu proportzionala murriztea interesgarria da, bolumen berdineko andela eraikiz diametro txikiago eta altuera gehiagoren bitartez, andel zilindriko aurreatezatuen abantaila nabarmenduz. Hau guztia dela eta, hurrengo ataletan zehazten den erabilera, bolumen neurritsua duen andelari dagokio.

8.3 Azterketa kasua

Ikuspegi ekonomikotik alderaketa kuantitatiboa ezartzeko asmoz, beharrezkoa da diseinatu eta aztertu beharreko egitura mota zehaztea, hormigoi arrunt zein AZIHAT-aren bitartez egikaritzeko. 8.2.1 Atalean aipatu diren egituren arabera oinarri giltzatua, 10 metroko diametroa, 4 metroko altuera eta 0.25 metroko lodiera dituen andel zilindrikoa hartzen da azterketa kasu gisa.

Hormigoi eta altzairuarentzako erasotzailea izan daitekeen jariakina euste-



8.7 Irudia: Oinarri landatu eta giltzatuko andelen desplazamendu eta esfortzu ezberdintasuna.

ko, 10 KN/m^3 -ko dentsitatea duela suposatuz, horman sortzen diren esfortzuak xaflen teoriaren bitartez zehazten dira, [Timoshenko and Woinosky-Krieger (1959)]-ek planteatutako (8.1) Ekuazioa ebatziz. Ekuazio horretan x -k, R erradio eta e lodierako andelaren barneko aurpegietan, Z^* presioaren ondorioz norabide erradialean δ desplazamendua duen ebakiduraren altuera zehazten du, eraikitze-materialaren luzetarako deformazio modulua E izanik.

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(D \frac{\partial^2 \delta}{\partial x^2} \right) + \frac{E \cdot e}{R^2} \cdot \delta = Z^* \quad (8.1)$$

Horma lodiera konstanteetarako, adierazpena era sinplifikatuan garatu egingen da (8.2a) Ekuazioa lortuz. Aipatu diren aldagaiak λ eta D konstanteetan multzokatzen dira (8.2b) eta (8.2c) Ekuazioen arabera, itxura koefiziente zilindrikoa eta xaflaren makurdura zurruntasuna adierazten dutelarik, hurrenez

Altuera (m)	Desplazamendua (mm)	Trakzioa (KN)	Ebakitzailea (KN)	Makurdura (KN · m)
0	0	0	-14.72	0
0.71	0.06	105.36	0.39	-4.74
1.33	0.08	132.78	3.05	-3.12

8.2 Taula: Esfortzu maximoak.

hurren. Aldagai berria agertzen da, materialaren Poisson koefizientearekin bat datorrena.

$$\frac{\partial^4 \delta(x)}{\partial x^4} + 4\beta^4 \delta(x) = \frac{Z^*(x)}{D} \quad (8.2a)$$

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{E \cdot e}{4 \cdot R^2 \cdot D}} = \sqrt[4]{\frac{3 \cdot (1 - \nu^2)}{R^2 \cdot e^2}} \quad (8.2b)$$

$$D = \frac{E \cdot e^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \quad (8.2c)$$

(8.2a) Ekuazioarentzako ebazpide orokorra (8.3) Ekuazioan azaltzen de bezala planteatzen da, A, B, C eta D parametroak mugalde-baldintzen menpeko integrazio konstanteak direlarik. Azkeneko terminoa ebazpen partikularrari dagokio.

$$\begin{aligned} \delta(x) = & C_1 \cdot e^{\beta x} \cdot \cos(\beta x) + C_2 \cdot e^{\beta x} \cdot \sin(\beta x) + C_3 \cdot e^{-\beta x} \cdot \cos(\beta x) \\ & + C_4 \cdot e^{-\beta x} \cdot \sin(\beta x) - \frac{\rho \cdot (H - x) \cdot R^2}{E \cdot e} \end{aligned} \quad (8.3)$$

Euskarri giltzatu eta goiko mutur libreari dagozkien mugalde-baldintzak ezarriz (desplazamendu eta makurdura nuluak oinarrian eta makurdura eta ebakitzaile nuluak hormaren gailurrean), hormaren desplazamendu legea lor daiteke. Horretatik abiatuz trakzio esfortzuak kalkulatu dira eta hurrenez hurrengo deribazioen bitartez biraketa, makurdurak momentu eta esfortzu ebakitzaileen legeak ebakidura bakoitzean. 8.2 Taulan ebakidura ezberdinek jasaten dituzten esfortzu nagusiak azaltzen dira. Ezarritako kanpo baldintzekiko koherentea den eran, oinarriak ez du desplazamendu ez makurdurarik, esfortzu tangentialak maximoak direlarik. Bestalde, altueraren herenean gehieneko trakzio balioa lortzen da, zertxobait azpitik makurdura momentuak balio maximoa lortzen duen bitartean.

Ohiko kalkulu prozedura [Arroyo et al (2009)], pitzadura kontrolatzeko beharrezkoa den barra korrugatu erako armatuan oinarritzen da gehienbat. Armatu bertikalari dagokionez, k pitzadura modulua deritzonaren bitartez pitzadura irekidura balio mugatuen azpitik mantentzeko, beharrezkoa den gutxieneko zenbatekoa zein den egiaztatzeko joera dago. Aldiz, armatu horizontala perimetroko trakzio indarraren ondorioz zehazten da, altzairuaren tensio onargarria 100 MPa-etara murriztuz. Honek altzairua alferrik galtzea dakar, batez ere ohikoena kalitate handiagokoak erabiltzea denean, 400 eta 500 MPa-etako elastikotasun mugarekin (bigarreneko joera handiagoa izanik).

Osagaia		Hormigoi Arrunta	AZIHAT
Zementua	kg/m ³	350	430
Harea 0/4	kg/m ³	814	1100
Legarra 4/11	kg/m ³	298	650
Legarra 11/22	kg/m ³	764	—
Ura	l/m ³	156	175
Zuntzak HE 1/50	kg/m ³	—	50
Polifuntzionala	l/m ³	4.20	4.48
Superplastifikatzailea	l/m ³	—	5.03

8.3 Taula: Dosifikazio alderaketa.

Egitura-seguritasuna bermatzeko, ϕ 12-ko armatua 0.20 metrero kokatuz norabide bertikal eta horizontalean, hormaren intrados eta estradosean, hormigoi arruntaren kasurako. Diseinu hau 70 kg/m³-ko zenbatekoari baliokide zaion altzairuari dagokio.

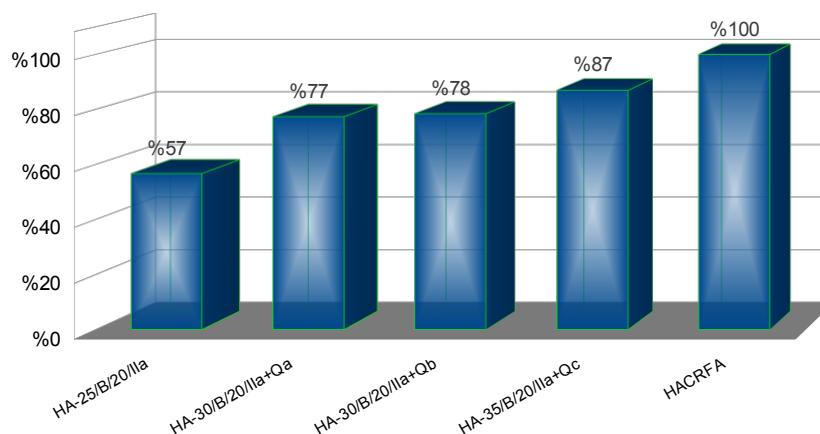
Zuntzen indartzeari dagokionez, ($f_{ctR,d}$) kalkulu trakzio hondar erresistentziak, edukiak eragiten duen tentsioa gaintitzen ote duen egiaztatzen da. Trakzioa izanik esfortzu nagusia, haren gehienezko balioa hormaren altueraren herenean aurkitzen da, ebakidura kritikoan 0.50 MPa baino zertxobait handiagoa den zerbitzuko tentsio normala sortzen delarik. 6.7 Taula aztertuz, [EHE-08 (2008)]-an azaltzen den modelo laukizuzena era sinplifikatuan erabiliz eta hirugarren hondar erresistentziatik ($f_{R,3}$) abiatuz, probeta gehienak (batez ere oinarritik hasita altueraren herenean kokatzen direnak). 8.2 Taularen arabera kalkulatu den diseinu tentsioa gaintitzen dutela egiaztatzen da. AZIHAT-arentzako beraz, 6.6.3 Ataleko emaitzak ikusirik, arrazoizkoa dirudi 50 KN/m³-ko zenbatekoa nahikoa izan daitekeela pentsatzea aipatutako trakzio esfortzuak eusteko.

Hormigoiaren ikuspuntutik, egitura hauen esposizio espezifikoa mota ohikoenak (Q_a , Q_b edo Q_c), 325 eta 350 kg/m³ bitarteko gutxieneko zementu edukia ezartzen du. Egitura kombentzionala gutxieneko eduki horrekin diseinatuko da, AZIHAT-an 433 kg/m³ behar izan diren bitartean. Hau da, giro erasotzaileentzako, iraunkortasun arrazoiek gutxieneko zementu eduki handia eskatzen dutenean eta ur/zementu erlazio txikia, hormigoi arrunten dosifikazioa neurri batean HAT-enetara hurbiltzen dira, azken hauek osagaiaren eduki handiak dituztelarik masari autotrinkotasun propietateak eskaintzeko asmoz.

Agregakinei dagokionez, AZIHAT-ak gehienezko tamaina txikiagokoak erabili behar ditu, 11 mm-raino, hormigoi arruntean izan daitekeen 25 mm-ko gehienezko tamainarekin alderatuz, materialaren kostuan eragiten duelarik. Era berean, erabili beharreko gehigarrien gehikuntza da, zementuarekin batera, neurri handiagoan hormigoiaren prezioan eragina duena. 8.3 Taulak, hormigoi arrunt eta AZIHAT-arentzako erabili diren dosifikazioak erakusten ditu.

8.3.1 Produktuaren kostua

Hormigoiaren ikuspuntutik, argi dago HAT hormigoi arrunta baino garestiagoa dela. Hala eta guztiz ere, zementu eduki handiak eta ur/zementu erlazio txikiak behar dituzten esposizio mota espezifikoa duten erabileretan, ezberdintasuna nabarmenki murrizten da. Erabilitako materialak eta haien merkatuko



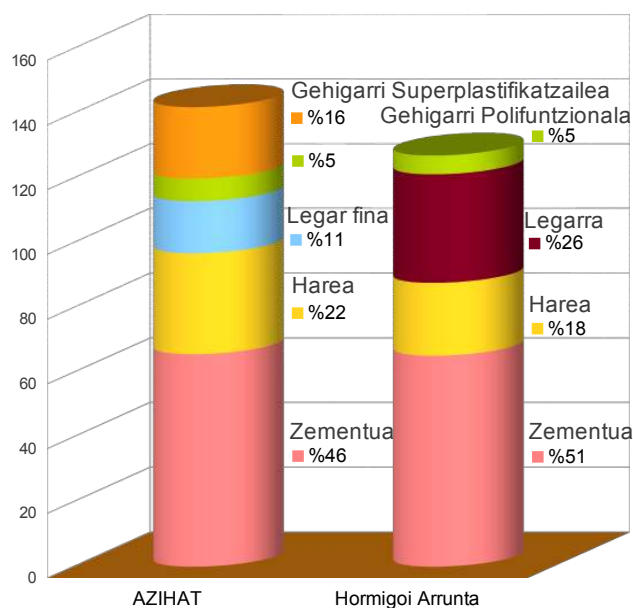
8.8 Irudia: Hainbat esposizio generiko eta espezifikoaren arabera zementu eduki ezberdineko eskakizuna duten hormigoien prezioa.

balioa ikusirik, gehikuntza hau %13 ingurukoa da, handiagoa delarik erreferentzia hormigoiak ez duenean azterketa kasu honetan bezainbesteko eskakizun zorrotzik gutxieneko zementu eduki eta ur/zementu erlazioari dagokionez (8.8 Irudia). Atal honetan erakutsitako prezioak eraikuntzako datu baseetan aurki daitezkeenekin bat datoz, administrazio edo beste erakunde publiko edo pribatuek eskuragarri jarri eta inguruko ingeniariak enpresek erabili ohi dituztenak.

8.9 Irudiak, proposatutako erabilera hormigoi arrunt eta AZIHAT-aren osagaien arteko kostu proportzionalaren alderaketa erakusten du. Antzematen den bezala, masari jariakortasun handiagoa ekarriko dioten gehigarri superplastifikatzaileak erabili beharrik, banaketa aldarazten du azken kostuan gehiago eraginez. Era berean ale eskeletoaren aldaketak, harea edukia handituz agregakin lodieren bolumenaren kalterako, banaketa hori aldatzen du. Nahiz eta birrintze maila handiagoa duten agregakinen erabilera handitu, harea eta legar fina kasu, bere erabilera interesgarria da zatiki finaren ekarpena dela eta, lehengai horien kostuaren gehitzea dakarren arren. Proportzionalki haien ekarpena ez da horren nabarmena, erabili beharreko gehigarrien kostua nabarmenki handiagoa baita. Hormigoi arruntaren prezioa baino handiagoa den arren, ezberdintasunak nabarmenki murrizten dira dosifikazioak giro oso erasotzaileetara egokitu behar direnean.

Azpimarratu beharra dago hormigoiari emandako propietate autotrinkotzaileari dagokion kostu diferentzia, fabrikazio plantan ezarritako prozeduren aldaketa eragiten duen beharrez ere sortzen dela. Ondorioz, langileen formakuntza eta tresnerian, lehengaien hezetasuna neurtzeko adibidez, inbestitzea beharrezko bihurtzen da, hormigoi zorrotzagoaren fabrikazio optimizatua posible eginez.

Altzairuzko indartzeari buruz, zuntzen prezioak armatu korrugatuarena %18-an gaintzen du, baina ikerketa honetan frogatu den bezala, zenbatekoa murrizt daiteke diferentzia hein batean urtuz. Eraikitze-prozesuaren ikuspegi orokorragoak hala ere, agerian uzten du zenbait egoeratan erabat lehiakorra

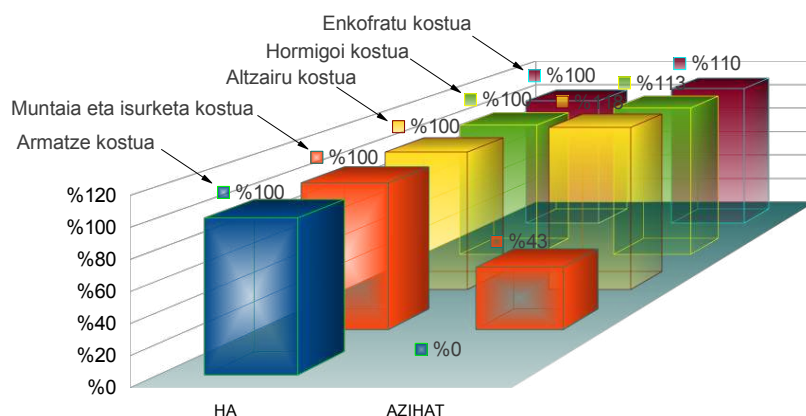


8.9 Irudia: Giro esposizio maila berdina duten hormigoiaren osagaien ehuneko kostuaren alderaketa.

delara, proposatutako erabilera kasu. Barren altzairuaren kostuaz gain, zuntzen aukerak armatuaren muntaketa lanak erabat kentzen ditu, kostu eta epe murrizketa lortuz, 8.10 Irudian ikus daitekeen bezala. Gainontzeko eskulana ere asko murrizten da isurketa operazioa nabarmenki sinplifikatu egiten baita, era jarraituan gauzatuz, kubiloteak etengabe bete, geruzatan hormigoitu ezta haiek dardaratzten egon gabe. Ponpatutako hormigoi bi alderatzekotan, eskulan kostuen arteko diferentzia %15 inguru murriztuko litzateke.

Material eta eskulan kostuaz gain, egikaritzeko beharrezkoak diren baliabide osagarrian material berriak duen eragina azter daiteke. Enkofratuei dagokienez, HAT-aren jariaortasun handiagoak enkofratuetan eragiten duen bultzada gehitzea dakar. Normalean bultzada hori hormigoia dentsitate berdineko jariakinen eragiten duen presio hidrostatiarekin parekatzen da. Hori ez da guztiz zuzena, presio askoz txikiagoko kasuak egiaztatu direlarik, isurketa abiadura eta puntuaren (behe edo goialdea) arabera [Brameshuber and Uebachs (2003)], enkofratuaren zimurtasuna [Arslan et al (2005)] [Tchamba et al (2008)] [Kwon et al (2011)], erabilitako enkofratu-olioa [Djelal et al (2002)], tenperatura [Assaad and Khayat (2006)], armatu konbentzionala [Perrot et al (2009)], erabilitako zatiki fina [Kim et al (2012)], eta abar. Altuera mugatuetan (< 3 metro), enkofratu sistema konbentzionalak gai dira bultzada gehikuntza hori eusteko. Hala ere, andel zilindrikoei dagokienez, ohikoa da altuera handiagoak erabiltzea, gorabehera handiagoko esfortzuekin bat datozen sistemak erabili behar direlarik.

Dosifikazioa, eskatutako propietateak (egoera fresko zein gogortuan) dituen hormigoia diseinatzeko beharrezkoa dena izango denez, ez da enkofratuen pre-



8.10 Irudia: Eskulan eta materialen ehuneko kostuen ezberdintasunak.

sioa bide honetatik murriztea kontuan hartu. Aldi berean, armatu korrugaturik ez izatean, ez dago aldagai hori gogoan hartzerik eta tenperatura aldaketak presioak murrizten baditu ere, hasierako uneetan baino denboran zehar izan ohi du eraginik nabarmenena [Assaad and Khayat (2006)].

Abiadurarekin bat isurketaren kokapena eta enkofratuaren ezaugarriak dira, neurri handiagoan, aldatzeko interesgarrien diren aldagaiak. Isurketa abiadura erraz alda daiteke, haren kokapena behealdetik izatea gomendatuena den bitartean (enkofratu berezi edo ponpaketa tutua beheraino sartuz). Horrela, masaren barruan harrapatua gerta litekeen aire kopurua murrizten laguntzen da, nahiz eta frogatua dagoen enkofratuengan sortzen den presioa handitzen duela.

Zimurtasun handiko enkofratuak erabiltzeko interesik ez dago, nahiz eta enkofratuetan eragindako presioa gutxitu, HAT-ak eskaini dezakeen akabera ona kaltetu baitezake, beste aukera bat erabiltzea planteatzen da. Iragazkortasun Kontrolatuko Enkofratuak (CPF ingelesezko hizkietan) ohiko enkofratuen gainean ehunak ezartzean datzate [Arslan (2002)], uren soberakina drainatzea eta aire burbuilen irteera ahalbidetuz. Zementu-pasta partikulak gainazalean mantentzen dituztenez, ur/pasta erlazioa murriztuz, elementuaren iraunkortasuna hobetzen dute haren trinkotasuna handitzean [Coutinho (2003)]. Iragazkiak pastaren hidratazio zuzena bermatzeko hezetasun nahikoa ematen dio. Aldi berean, CPF-ek hormigoiak enkofratuetan eragiten duen presioa ere murrizten dute [Coutinho (1998)].

CPF mota ezberdinak daude [Price (2000)]-ren arabera, II motakoak aipa daitezkeelarik horien artean, obran tenkatu behar den geruza bakarraz osatzen direnak eta III motakoak, fabrikazioan zehar aurreatezatu egiten den sare batean geruza bi jarritz osatzen direnak. Lehenengo mota erabilera bakarrekoa da eta bere kostua 5 €/m^2 ingurukoa da, bigarrena garestiago izan arren 10 €/m^2 bi aldiz ere erabil daitezke [Figueiras et al (2009)], bere kostu erlatiboa murriztuz. Honetaz gain, enkofratu-olio erabileran aurrezpena dakar, sistema berri honek ez baitu haien beharrik eta gerta litezkeen hutsuneak konpontzeko

beharra ere murrizten da, gainazaleko akaberaren hobetzea dela eta.

Proposatzen den aukerak beraz, enkofratuaren kostu gehikuntza materialaren akabera kalitatearen hobekuntzaren onurarako izatean datza. Hormigoiaren bultzada handiagoa eusteko enkofratu sendoagoak erabiltzeak, ez dio balio erantsirik gehitzen elementuari. Hala ere, gehikuntza horren zati bat CPF-en erabilerara bideratzeak, ohiko enkofratuak erabiltzen jarrai daiteke eragiten duten presio murrizketa dela eta, akabera eta, ondorioz, elementuaren iraunkortasuna hobetzen duten bitartean. Iraunkortasunari dagozkion zenbait parametroren hobekuntza hau, %40 eta %50-a artean balioesten da [Figueiras et al (2009)]. Etorkizuneko ikerketa eta proposatutako erabileraren prototipoek, ehun horiek gehi ditzakete haien diseinuan.

Aukera hau hala eta guztiz ere, enkofratuarekin kontaktuan egon daitezkeen zuntzen portaera zuzena ziurtatzen duten ikerketa sakonen menpe dago, ehunarekin tratatuta gera daitezkeelarik eta halako blokeoa sortu edo horma-efektuen ondorioz espero zen orientazioa aldatu.

8.3.2 Epeen murrizketa

AZIHAT-aren abantaila nagusia, masaren dardaratze aurreztu eta armatze fasea kentzean datza. Lehenengo kasuan, berekin dakarren denbora eta kostuak aurrezteaz gain, laneko osasun eta segurtasun aldetik ere abantailak lortzen dira. Sortzen duen zarata kentzeak eta langileak dardara egiten duten tresneria erabili behar ez izateak, hobekuntza nabarmena dakarte, nahiz eta zaila izan bere lan baldintzetan kuantifikatzea.

Dardaratzeak berez denbora askorik behar ez izan arren, hormigoi autotrinkingotzailearen erabilerak elementuaren hormigoitze jarraitua ahalbidetzen du. Dardarazi behar diren geruzen hormigoitzea ekiditeak, isurketa puntua mugitu behar izan gabe ere, isurketa denboraren %65-a gutxi gorabehera murrizketa dakar [Choi et al (2012)]. Hormigoi arrunta ponpatu beharrean kubilote bidez isuriz gero, ezberdintasun hau handitu egiten da.

Bestalde, armatua egituraren geometria kurbora egokitu behar da, nabarmenago gero eta kurbatura erradio txikiagoa izan. Indartze moduan barra korrugaturik jarri behar ez izateak eta erantzukizuna hormigoiarekin nahastu diren zuntzen esku uzteak, prestaketa denbora murriztea eta enkofratuaren muntaia zuzenean egin ahal izatea dakarte. Era honetan, posible da armatze denborak %100-an murriztea.

8.4 Jasangarritasun indizea

Berriki, eraikuntza sektoreak eragiten duen ingurumen aztarnari dagokion sentiberatzea nabarmenki gehitu da. Horrek, egiturarekin erlazionatutako gizarte, ingurumen eta ekonomia-irizpideak kontuan eduki, sustatu eta balioztatzea du helburu. Horren ondorioz, araudiaren eremuan zenbait aurrerapauso eman dira egiturek sortzen duten inpaktua balioesteko. Egitura Hormigoiaren Instrukzioak [EHE-08 (2008)], adibidez, Ingurumen Jasangarritasun Indizean (ISMA) oinarrituz Egituraren Jasangarritasun Ekarpen Indizea (ICES) kalkulatzeko oinarriak ezartzen dituen Atal berria gehitu du, 13. Eranskina hain zuzen ere. Egitura Altzairuaren Instrukzioak [EAE-2011 (2011)] ere, dagokion Eranskina gehitu du, 11.a kasu honetan, Egituraren Jasangarritasun Ekarpen Indizearen zehaztapenaren inguruan. Instrukzio biek, egitura ezberdinen

artean alderaketa egin ahal izateko zenbait adierazle zehazten dituzte, hormigoizkoak alde batetik eta altzairuzkoak bestetik aztertu behar direlarik.

Adierazle horiek xehetasunez aztertuz, egitura sistema bi alderatzeko diseinatuak direla ikus daiteke, baina obran parte hartzen duten edo materialak hornitzen dituztenak, ingurumen sinestamendu edo bereizgarrien jabe izatearekin erlazionatzen diren alderdiak azpimarratzen dira gehiago. Hau da, kokapen ezberdinetan, enpresa ezberdinek, egitura sistema ezberdinekin baina material berdinarekin egindako obran jasangarritasun indizeak balioesten dira, emaitzari balio erantsi handiena ematen diotenak adieraziz. Prozedura hau ezartzeko errazagoa da, bere alderdiak era erraz eta objektiboan froga baitaitezke. Eraikitze sistema eta erabilitako materialen eragina, hein batean, urtu egiten da.

Hori dela eta, atal honetan adierazle berrien ezartzea azaltzen da, aipatu diren Instrukzioetan daudenak neurri baten aldatuz eta azterketa kasura egokituz. Era honetan, erabilitako eraikitze eta egitura-sistema zuzenean alderatzen da, eraikuntza enpresa berdinak egina, material hornitzaile berdinekin (barra korrugatu edo zuntz eta hormigoi fabrikatzaileak) eta kokapen geografiko berdinean.

Adierazle hauek erabilitako baliabideen kontsumoen analisisan oinarritzen dira, ikuspuntu ekonomiko zein ingurumenaren aldetik. Hau da, baliatzen diren obra-unitateen neurketak murriztea bultzatzen da, baina era haztatuan, fabrikazio edo hondakinen kudeaketan zehar eragiten duten ingurumen inpaktuaren arabera.

Bestalde, jarduera horretan diharduten langileen lan baldintzei dagozkien gizarte alderdiak, hala nola gertuko bizilagunenak ere, azaldutako irizpideen bitartez ere ordezkatuak daude.

ISMA-ren kalkulua [(8.4a) Ekuazioa] era konbentzionalean egiten da, altzairu zein hormigoi Instrukzioetan erabilitakoaren parean, ICES-ean [(8.4b) Ekuazioa] ere antzera jokaturik.

$$ISMA = \sum_{i=1}^{i=n} \alpha_i \cdot \beta_i \cdot \gamma_i \cdot V_i \quad (8.4a)$$

$$ICES = A + B \cdot ISMA \quad (8.4b)$$

α , β eta γ koefizienteek, V_i balio-koefizienteak haztatzen dituzte, 8.4 Taulan ezartzen diren parametroen arabera. Koefiziente horien erlazio eta hierarkia era eskematikoan adierazten da 8.11 Irudian. Batetik, materialei lotutakoak aurkitzen dira, hormigoi eta altzairuan banatuak, bestetik egikaritzetik zuzenean eratortzen direnak erlazionatzen direlarik.

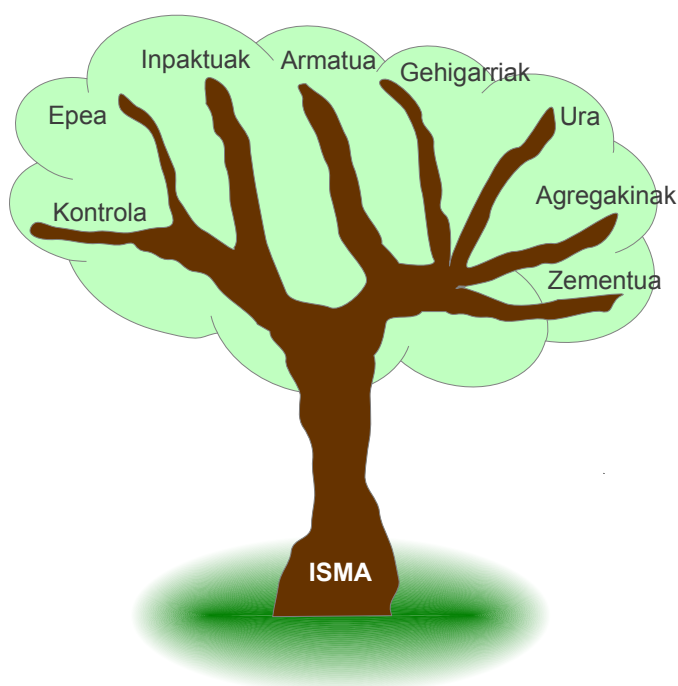
$$V_i = K_i \left(1 - e^{m_i \left(\frac{P_i}{A_i} \right)^{n_i}} \right) \quad (8.5)$$

Adierazle bakoitzarentzako balio-koefizienteak, (8.5) Ekuazioaren arabera kalkulatu dira. Bertan, K_i , m_i , A_i eta n_i parametroak 8.5 Taulan biltzen eta adierazle bakoitzari lotutako koefizienteak direlarik. Parametro hauek, amaierako emaitzan adierazle bakoitzaren eragina aldatzen dute, P_i -ren arabera funtzio adierazgarriak hartzen duen balioaren menpe.

Hurrengo ataletan, zehaztutako ingurumen irizpide bakoitzaren funtzio adierazgarriak ezartzen dira. Era berean, horietako bakoitzak hartzen duen itxura zehazteko jarraitu diren irizpideak aipatzen dira.

Ingurumen eskakizuna	Haztatze koefizientea		
	α_i	β_i	γ_i
Zementuaren optimizazioa			0.60
Agregakinen ezaugarriak			0.20
Uraren kudeaketa	0.60	0.70	0.10
Gehigarri kimikoen ezaugarriak			0.10
Indartzearen optimizazioa		0.30	1.00
Inpaktu kontrola		0.25	1.00
Egikaritze epea	0.40		0.40
Materialaren kontrol maila		0.75	0.60

8.4 Taula: Planteatutako haztatze koefizienteak.



8.11 Irudia: Adierazleen eskema eta ISMA zehazteko hierarkia.

Ingurumen eskakizuna	K_i	m_i	n_i	A_i
Zementuaren optimizazioa	1.21	-0.25	40	2.1
Agregakinen ezaugarriak	1.05	-0.4	50	2.9
Uraren kudeaketa	1.05	-0.40	40	2.2
Gehigarri kimikoen ezaugarriak	10.5	-0.1	100	2.0
Indartzearen optimizazioa	1.20	-0.4	55	2.5
Inpaktu kontrola	10.5	-0.001	1	1.0
Egikaritze epea	1.21	-1.05	50	0.75
Materialaren kontrol maila	1.21	-0.40	40	1.6

8.5 Taula: Haztatze koefizienteak.

Esposizio mota		$\lambda_{1,j}$										
		Zementu edukia kg/m ³										
Gen.	Esp.	250	275	300	325	350	375	400	425	450	475	500
I		100	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
II _a		—	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10
II _b		—	—	100	90	80	70	60	50	40	30	20
III _a		—	—	100	90	80	70	60	50	40	30	20
III _b		—	—	—	100	90	80	70	60	50	40	30
III _c		—	—	—	—	100	90	80	70	60	50	40
IV		—	—	—	100	90	80	70	60	50	40	30
	Q _a	—	—	—	100	90	80	70	60	50	40	30
	Q _b	—	—	—	—	100	90	80	70	60	50	40
	Q _c	—	—	—	—	100	90	80	70	60	50	40
	H	—	—	100	90	80	70	60	50	40	30	20
	F	—	—	—	100	90	80	70	60	50	40	30
	E	—	—	100	90	98	70	60	50	40	30	20

8.6 Taula: Zementu edukiaren optimizazioa.

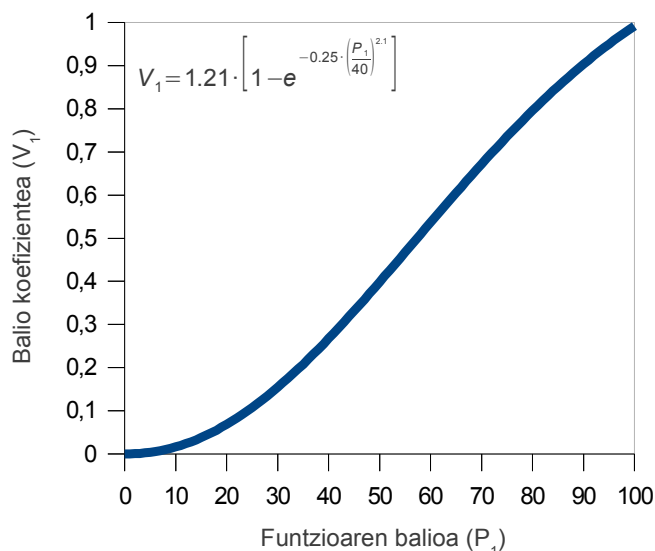
8.4.1 Zementuaren optimizazio indizea

Adierazle honek zementu edukiaren murrizketa eta zementuan adizioen erabilerrari dagokion ingurumen ekarpena balioztatzen du, azken hau EHE-08-ren 37.3.2.a Taula eta esposizio orokor eta espezifikotz moten arabera araudiak eskatzen dituen eduki minimoekin azpitik mugatua dagoelarik. Zementu eduki txikiagoa sustatzen da hortaz, betiere egiturak jasan beharreko giroaren arabera, araudiak ezartzen duenarekin bat. Adierazle honen funtzio adierazgarria (8.6) Ekuazioan zehazten da.

$$P_1 = \frac{1}{100} \sum_{j=1}^{j=n} p_{1,j} \cdot \lambda_{1,j} \quad (8.6)$$

(8.6) Ekuazioan, $p_{1,j}$ -k erabilitako hormigoi ehuneko adierazten du kantidad osoarekiko, haren zementu edukia $\lambda_{1,j}$ parametroari lotua dagoelarik 8.6 Taularen arabera. Erabilitako tarteko kantidadeei dagozkien balioak interpolazio linealez lor daitezke.

8.12 Irudian kurba izurtu itxura (funtzio sigmoidea) duen balio-funtzioa ikus daiteke, adierazle honen araberrako proiektuaren ingurumen sentikortasunaren hazkundea erakusten duena. Zementu edukiaren balio handiak, $\lambda_{1,j}$ balio txiki edo nuluekin zigortzen dira, gehieneko baliora (100) hurreratuz, esposizio mota zehatzerako araudiak ezartzen duen gutxieneko zementu edukitik gero eta hurbilago egon. Hasierako hazkundea gutxi gorabehera esponentziala da, balio kritikoa gainditzeak hazkunde tasaren gutxitzea dakarrelarik. Hazkundea, nahiz eta apurka txikiagotzen joan, ez da inoiz gelditzen, irizpidea asetzera beti baita interesgarri ingurumen aldetik, zementu edukiaren murrizketa. Adierazle honen balio adierazgarriak 65 zifrara heldu behar du, balio-koefizienteak gutxienez, 0.50-eko balio lor dezan. Hau da, funtzio sigmoidearen inflexio puntua eskumatara lekualdatua dago zementu gutxiagoren erabilera sustatzeko. Mugatu egiten da hortaz, onar daitezkeen zementu soberakina, esposizio mota



8.12 Irudia: Zementu optimizazioaren balio-funtzioa.

Agregakinen gehienezko tamaina (mm)	8	10	12	16	20	25
$\lambda_{2,j}$	0	35	55	75	90	100

8.7 Taula: Agregakin tamainaren optimizazioa.

bakoitzaren arabera behar den gutxienezko zementu edukiaren %25 eta %35 bitarteko baliora.

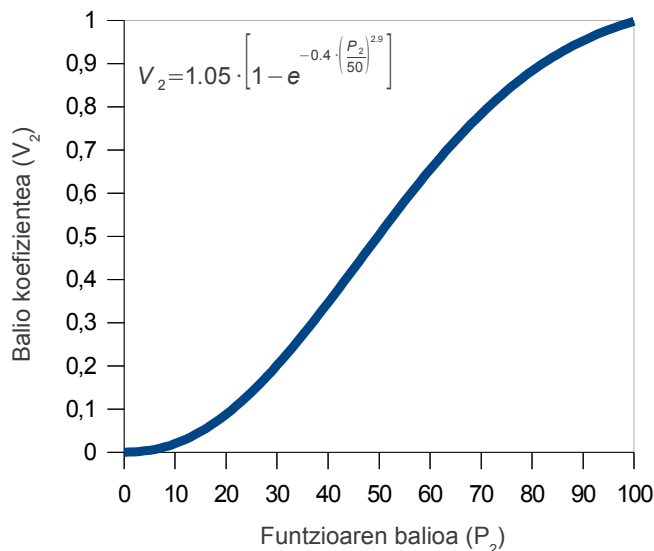
8.4.2 Agregakinen optimizazioaren ingurumen irizpidea.

Beste adierazle honek, hormigoian erabilitako agregakinen tamainaren ingurumen eragina kuantifikatzen du. Zatiki lodien gehienezko tamainaren murrizketa eta zatiki finen erabilera handiagoak, irizpide honen bitartez zigortu egiten den energia kontsumo handiagoa dakar. Irizpide honek (8.7) Ekuazioan erakusten den funtzio adierazgarria azaltzen du.

$$P_2 = \frac{1}{100} \sum_{j=1}^{j=n} p_{2,j} \cdot \lambda_{2,j} \quad (8.7)$$

(8.7) Ekuazioan $p_{2,j}$ eta $\lambda_{2,j}$ parametroek, 8.7 Taularen arabera gehienezko agregakin tamainarekin nahastu diren hormigoieko ehunekoak eta taulatik lortutako koefizienteak adierazten dituzte.

Agregakinei dagokienez, balio-funtzioa ere simetrikoa ez den kurba sigmoideaz osatzen da, 8.13 Irudian argi eta garbi ikus daitezkeen bezala. Irizpide



8.13 Irudia: Agregakin tamainaren optimizazioaren balio-funtzioa.

honen arabera ingurumen sentikortasuna, agregakinak birrintzeko energia kontsumoaren murrizketarekin lotua dago. Hori dela eta, $\lambda_{2,j}$ parametroak, gutxieneko 0 balio eta gehienezko 100 balioaren artean izaten dira, 8 eta 25 mm arteko gehienezko agregakin tamaintentzako, hurrenez hurren. Hormigoi arruntetan eman ohi den bezala, zatiki finaren eduki txikiagoa eta ahalik eta tamaina handieneko agregakin lodiaren aldi bereko erabilera saritu egiten da. Balio-funtzioak aurreko kasuetan bezala, hasierako hazkunde esponentziala erakusten du murrizketa nabarmena eragiten duen inflexio punturaino. Horren ondorioz, agregakin tamaina handien arteko ezberdintasunak ez dira handiak, baina bai tamaina txikiak. Egoera honetan aurkitzen da HAT-a, agregakin tamaina txikiez gain, multzoari jariakortasun eta egonkortasuna eman ahal izateko behar den pasta osatzeko harea proportzio handiagoa behar duelako. Birrintze lanak murriztearren, hondarpeak dituzten harrobietatik datozen lehengaiz hornitzea ere interesgarria da.

8.4.3 Nahasketa uraren optimizazioaren ingurumen irizpidea.

Irizpide honek, nahasketa ur kontsumoaren optimizazioaren arabera, ingurumen sentikortasunari dagokion balioespena ezartzeko asmoa du. Ura gero eta urriagoa den baliabidea izanik, bolumen txikiagoa erabiltzen duten dosifikazioak dira interesgarrienak, gehigarri egokiek batera, hormigoi trinko, langarri, erresistente eta iraunkorragoa dakartelako. Adierazle honen funtzio adierazgarria (8.8) Ekuazioan ikus daiteke.

Esposizio mota		$\lambda_{3,j}$ Ur edukia l/m ³										
Gen.	Esp.	145	150	155	160	165	170	175	180	185	190	195
I		90	85	80	75	75	65	55	45	35	25	15
II _a		95	90	85	80	75	65	55	45	35	25	15
II _b		95	90	85	80	75	65	55	45	35	25	15
III _a		75	75	65	55	45	35	25	15	5	0	0
III _b		90	85	80	75	75	65	55	45	35	25	15
III _c		85	80	75	75	65	55	45	35	25	15	5
IV		90	85	80	75	75	65	55	45	35	25	15
	Q _a	90	85	80	75	75	65	55	45	35	25	15
	Q _b	100	100	95	90	85	80	75	65	55	45	35
	Q _c	85	80	75	75	65	55	45	35	25	15	5
	H	95	90	85	80	75	65	55	45	35	25	15
	F	90	85	80	75	75	65	55	45	35	25	15
	E	80	75	65	55	45	35	25	15	5	0	0

8.8 Taula: Nahasketa uraren optimizazioa.

$$P_3 = \frac{1}{100} \sum_{j=1}^{j=n} p_{3,j} \cdot \lambda_{3,j} \quad (8.8)$$

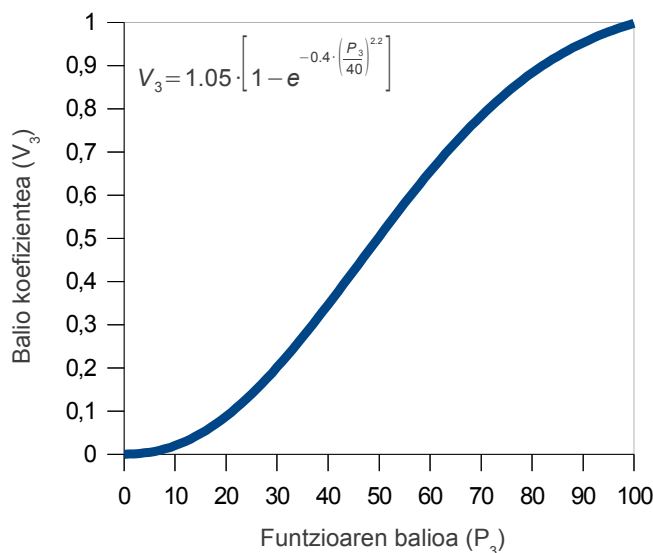
(8.8) Ekuazioko $p_{3,j}$ eta $\lambda_{3,j}$ parametroak, ur kantitate ezberdinekin nahastu diren hormigoï ehunekoak eta 8.8 Taulan lortutako koefizientei dagozkie.

8.14 Irudiak, adierazle honi dagokion balio-funtzioa adierazten du. Funtzio sigmoide hau guztiz simetrikoa da, 50-eko balio adierazgarriak, 0.50-eko balio-koefizientea hartzen duelarik. 8.8 Taulako balioak ezartzerakoan, Instrukzioak eskatzen duen gutxieneko zementu eduki eta gehienezko ur/zementu erlazioari dagokion behar-beharrezko ur kantitatea erabiltzen denean, $\lambda_{3,j}$ parametroak 75 balio har dezala erabaki da. Balio horretatik aurrera, edozein ur gehikuntzak, emaitza hobeak lortzea eragozten du, eta alderantziz. Aldi berean horrek, hormigoïaren erresistentzia murrizketak eta iragazkortasuna handitzea ekar lezake, azken hau oso lotua dagoelarik bere iraunkortasunarekin eta atal honetan biltzen diren indizeak ezartzeko oinarriekin.

8.4.4 Gehigarri erabileraren optimizazioaren ingurumen irizpidea.

Adierazle honek, obran erabilitako hormigoïen dosifikazioan gehigarri kimikoen erabilerarekin erlazonatutako ingurumen sentikortasuna hartzen du kontuan. Produktu hauek materialaren egoera fresko zein gogortuan propietate asko hobe ditzaketen arren, haien erabilerak berezkoa duten arriskua lotua dakar, nahiz eta oso mugatua egon erabiltzen diren proportzio txikiak direla eta. Irizpide honen funtzio adierazgarria (8.9) Ekuazioan erakusten da.

$$P_4 = \frac{1}{6 \cdot 100} \sum_{j=1}^{j=n} p_{4,j} \cdot \lambda_{4,j} \quad (8.9)$$



8.14 Irudia: Nahasketa uraren optimizazioaren balio-funtzioa.

(8.9) Ekuazioan, $p_{4,j}$ -k gehigarri ezberdinekin nahastu den hormigoi ehunekoak adierazten du, $\lambda_{4,j}$ parametroari dagozkion balioak 8.9 Taulan ikus daitezkeelarik. Ur disoluzioetako osagai aktiboen arrisku eta biodegradarritasunaren arabera zehaztu dira hauek. Tarteko zementu pisuaren araberrako ehunekoei dagozkien balioak, interpolazio linealez lortzen dira.

8.15 Irudian ikus daitekeen balio-funtzioak itxura ahurra du erabiltzen diren gehigarri kimikoen arabera. Kasu honetan, ez dago hazkunde tasa murriztuko duen inflexio punturik, erabilera ahalik eta txikiena izan, inpaktua ere txikiagoatzen hartuz. Balio-koefizienteak 0 eta 100 arteko balioak har ditzakeen arren, behealdeko muga ia iritsiezina da, horien erabilera ezegoki eta gehiegizkoa izan beharko bailuke. Bistan denez, osagai horien erabilerari lotuak dauden zenbait hobekuntza daude, baina hauek dagozkien adierazleetan balioztatzen dira.

8.4.5 Armatuaren optimizazioaren ingurumen irizpidea.

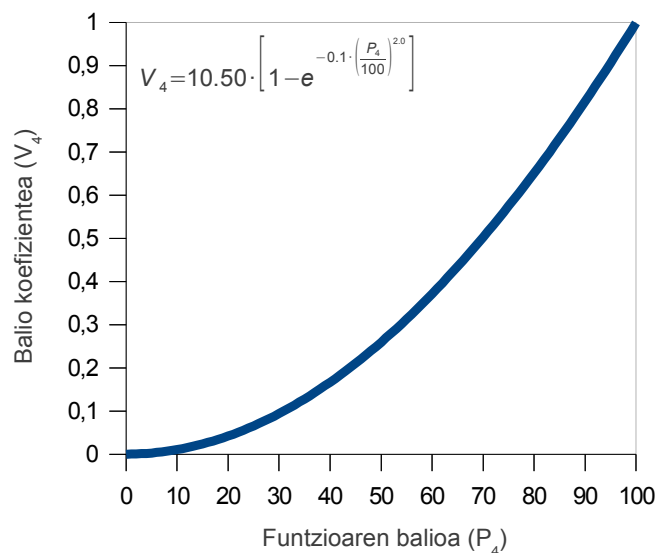
Armatuaren optimizazioa eta haren ingurumen ekarpena atal honetan azaltzen den irizpidearen arabera zuzentzen da. Erabilitako altzairu zenbatekoak optimizatzen dituzten neurriak hartzea sustatzen da, nola hala obran muntatzeko erabilitako baliabideen murrizketa eta sinplifikatzea. Adierazle honen funtzio adierazgarria (8.10) Ekuazioan zehazten da. $\lambda_{5,j}$ -ren balioak, 8.10 Taulatik lortzen dira erabilitako armatu mota eta haien ezaugarrien arabera.

$$P_5 = \sum_{j=1}^{j=3} \lambda_{5,j} \quad (8.10)$$

Azpi-irizpidea	Dosia (zpa %)	$\lambda_{4,1}$	$\lambda_{4,2}$	$\lambda_{4,3}$	$\lambda_{4,4}$	$\lambda_{4,5}$	$\lambda_{4,6}$
Plastifikatzailea Polifuntzionala	0	100					
	0.25	90					
	0.50	80					
	0.75	65					
	1.00	40					
	>1.25	0					
Superplastifikatzaileak	0		100				
	0.50		80				
	1.00		60				
	1.50		40				
	2.00		20				
	>2.50		0				
Atzeragarriak	0			100			
	0.50			90			
	1.00			80			
	1.50			65			
	2.00			40			
	>2.50			0			
Bizkorgarriak	0				100		
	3				60		
	5				35		
	7				20		
	9				10		
	>12				0		
Airea okluditzekoak	0					100	
	0.05					90	
	0.10					80	
	0.15					65	
	0.20					40	
	>0.25					0	
Hidrofugatzaileak	0						100
	0.50						90
	1.00						80
	1.50						65
	2.00						40
	>2.50						0

8.9 Taula: Dosifikazioan erabilitako gehigarri kimikoen optimizazioa.

8.16 Irudiak irizpide honentzako ezarri den balio-funtzioa adierazten du. Adierazle honen arabera, haien luzapenetan gainjartzerik behar ez duten tamaina handiko sareen erabilera sustatzen da, erabilitako altzairuan gehikuntza dakarrelako. Armatu korrugatu konbentzionalen arteko lotura sistemak ere aztertzen dira, soldaketa gabeko lotura sinpleak bultzatuz. Kasu honetan, $\lambda_{5,j}$ parametroen bereizketa egiten da zutabe bitan, hormigoi armatuzko eta, Doktore Tesi honekin bat, AZIHAT bidezko egituren erabilerari dagozkienak. Zuntz bidezko indartzeak ez du inongo gainjartzeren beharrik ezta armatua lantzerik, gehienezko balioak hartuz zuzenean. Funtzio sigmoideak eskumata-ra lekualdatua dagoen inflexio puntua du, ingurumen eraginaren hobekuntzari

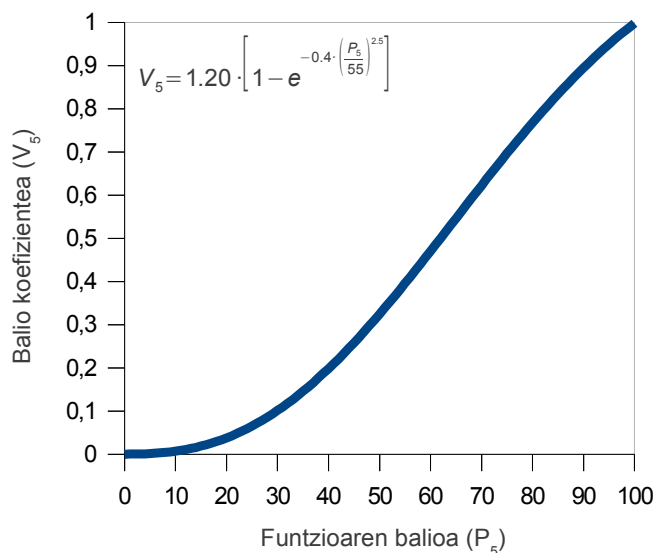


8.15 Irudia: Erabilitako gehigarri kantitatearen optimizazioaren balio-funtzioa.

Azpi-irizpidea	1. Kasua			2. kasua		
	Hormigoi armatua			AZIHAT		
	$\lambda_{5,1}$	$\lambda_{5,2}$	$\lambda_{5,3}$	$\lambda_{5,1}$	$\lambda_{5,2}$	$\lambda_{5,3}$
	0			34		
Teilakatze	1			28		
horizontal	2			21		
eta bertikal	3			14		34
kopurua	4			7		
	5			0		
Lotura	Soldaketa		0			
sistema	lotura mekanikoa edo antzekoak		32		32	
	0		0			
UNE 36.831	20		7			
arauaren arabera	40		14			
egindako	60		21			34
armatu %	80		28			
	100		34			

8.10 Taula: Armatuaren optimizazioa.

begira jarduketa mugatuak gutxiesten baitira.



8.16 Irudia: Armatuaren optimizazioaren balio-funtzioa.

8.4.6 Inpaktu kontrolaren ingurumen irizpidea.

Obrak ingurumenean eta langileen osasunean eragindako inpaktuak (material plastikoaren erabilera murrizketa, ondorengo eskuzko lanen beharra, kutsadura akustikoa, laneko osasuna eta istripu arriskuak), hurrengo irizpidean balioztatzen dira. Irizpide honek hartzen dituen balioak (8.11) Ekuazioan adierazten den funtzio adierazgarriaren arabera zehazten dira. (8.11) Ekuazioko $p_{6,j}$ eta $\lambda_{6,j}$ parametroak 8.11 Taulatik lortzen dira.

$$P_6 = \sum_{j=1}^{j=6} p_{6,j} \cdot \lambda_{6,j} \quad (8.11)$$

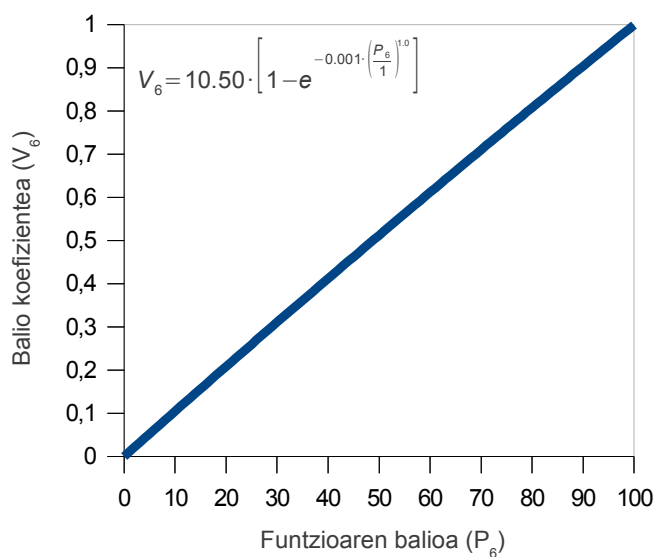
8.11 Taulan ezarritako azpi-irizpideen inpaktuak ezarpen erraztasunaren arabera haztatu dira. Hala ere, horien arabera lortzen den balio adierazgarriak erlazio lineala erakusten du balio-koefizientearekin (8.17 Irudia). Ildo honetan hartutako edozein neurrik, giza-, ingurumen eta langileen osasun eta segurtasunean obraren mutur sartzea era antzekoan hobetzen du.

8.4.7 Egikaritze epeari buruzko ingurumen irizpidea.

Irizpide honek, egikaritze epe eta, ondorioz, horrek dakartzan eragin guztien murrizketa bideratzen duten material eta eraikitze-sistemen ingurumen ekarpena balioztatzen du. Horren balioztatpena, (8.12) Ekuazioan zehazten den funtzio adierazgarriaren bitartez gauzatzen da. 8.12 Taulak, (8.12) Ekuazioan sartu beharreko $\lambda_{7,j}$ koefizienteen balioak biltzen ditu.

Azpi-irizpidea	$p_{6,j}$	$\lambda_{6,j}$
Babes elementu osagarrien murrizketa (perretxiko motako babes tapoiak, etab.)	1	20
Langilearen eragina murrizten duten sistemak erabiltzea ondorengo konponketa lanak ekiditeko (hutsuneak, etab.)	1	20
Zaraten murrizketa (dardaratzea ekiditea)	1	20
Segurtasun gehitzea (erorikoen arriskua murriztu, etab.)	1	20
Laneko osasunaren hobekuntza (azaleko gaitzak, belarriak, etab.)	1	20

8.11 Taula: Inpaktu kontrola.



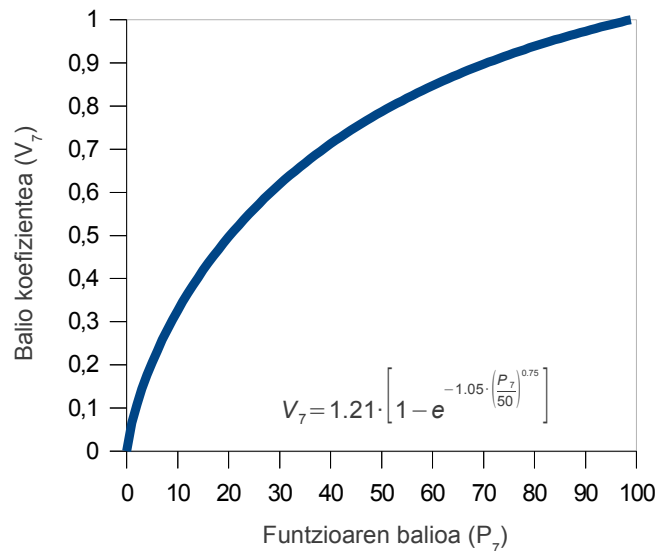
8.17 Irudia: Inpaktu kontrolaren balio-funtzioa.

$$P_7 = \sum_{j=1}^{j=3} \lambda_{7,j} \quad (8.12)$$

8.18 Irudiak irizpide honentzako zehaztu den balio-funtzioaren itxura ganbila erakusten du. Kasu honetan, epearen murrizketarako ezartzen den neurri txikienak ere, amaierako emaitzan eragin oso positiboa duela antzematen da, balio-koefizientearen gehikuntza nabarmenaz. Kurbaren hazkunde tasa mu-

Sistema aurrefabrikatuen erabilera obran		Denbora aurrezten duten beste sistemen erabilera egikaritzean	
%	$\lambda_{7,1}$	HAT $\lambda_{7,2}$	AZIH $\lambda_{7,3}$
0	0	10	10
20	20	10	10
40	40	10	10
60	60	10	10
80	80	10	10
100	100	—	—

8.12 Taula: Egikaritze epeen murrizketa.



8.18 Irudia: Egikaritze epearen balio-funtzioa.

rizten doa aztertutako tartean zehar gelditu gabe.

8.4.8 Materialen kontrolari dagokion ingurumen irizpidea.

Irizpide honek, egikaritze zuzena ziurtatzeko materialengan egindako kontrolak sortzen duen inpaktua balioztatzen du. Adibide gisa, entsegu suntsitzailer bidez edo, metodo magnetiko edo zenbait seinale edo uhinen igorketa eta harreran oinarritzen diren metodo ez-suntsitzailerak erabiliz, hormigoi matrize barnean altzairu zuntzen zenbateko eta orientazioa zehazteko aukera adierazten da. Era berean, propietate mekanikoen kontrola, bai konpresio zein trakzioan, hormigoi eta sufre bolumena murrizten duten lagin kubikoen bitar-

Zehaztapena		Hormigoi Armatua			AZIHAT		
		$\lambda_{8,1}$	$\lambda_{8,2}$	$\lambda_{8,3}$	$\lambda_{8,1}$	$\lambda_{8,2}$	$\lambda_{8,3}$
Konpresio erresistentzia	Lagin zilindrikoak	0			0		
	Lagin (150 mm) kubikoak (100 mm)	60			30		
	UNE-EN 14721	100			40		
Zuntz edukia	-ren arabera				0		
	Metodo ez-suntsitzaileak				20		
	Lagin prismatikoak				0		
Trakzio erresistentzia	Lagin kubikoak				30		
	Metodo ez-suntsitzaileak				40		

8.13 Taula: Egindako kalitate kontrol entseguak.

tez egin daiteke, Egitura Hormigoiaren Instrukzioak (EHE-08), 10 cm-ko aldea duten lagin kubikoen erabilera baimentzen du, 50 MPa edo gehiagoko konpresio erresistentzia adierazgarria (f_{ck}) duten hormigoientzako, baldin eta gehienezko agregakin tamainak 12 mm baino gehiago ez badu, erabili den hormigoiarekin bat datorrelarik. Bestalde, Bartzelona entsegua erabat interesgarria izan daiteke AZIH-aren trakzio erresistentzia ezaugarritzeko [Pujadas (2013)] material kantitate gutxiago erabiliz. Bere propietate eta ezaugarriak zehazteko metodo ez-suntsitzaileen (NDT) erabilera saritzen da. Altzairu zuntzez indartutako hormigoientzako (AZIH) berariazko atal honetan, EHE-08-ko 13. Eranskinen azaltzen den hondakin kudeaketaren ingurumen irizpidearekin elkar daiteke. Irizpide honen funtzio adierazgarria (8.13) Ekuazioan zehazten da.

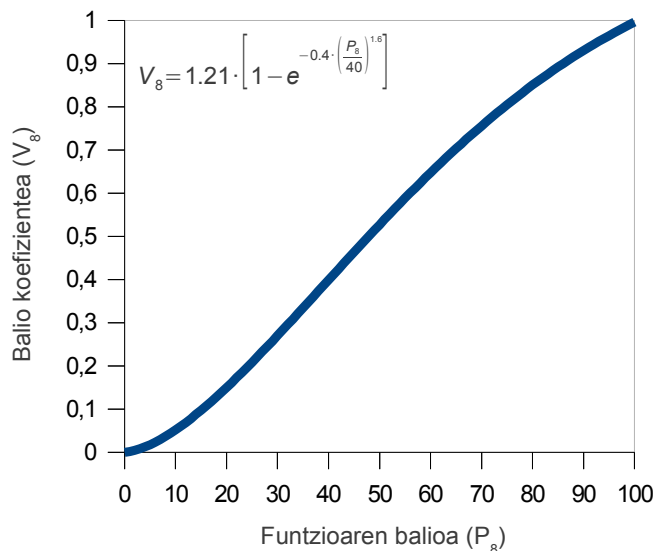
$$P_8 = \sum_{j=1}^{j=3} \lambda_{8,j} \quad (8.13)$$

$\lambda_{8,j}$ koefizientearen balioa 8.13 Taulan ematen da. Armatu optimizazioaren ingurumen irizpidean bezala (8.4.5 Atala), hormigoi armatu eta AZIHAT-aren erabilerrari lotutako kasu bi bereizi dira. Lehenengoan noski, ez da matrizearen trakzio erresistentzia ezaugarritzen, ezta zuntz edukia zehazten (ez baitaude). Edozein kasutan ere, tamaina txikiagoko laginen erabilera eta are, kontrolerako material kontsumo eta, ondorioz, hondakin murrizketa dakartzaten, propietate eta ezaugarri mekanikoen zehaztapenerako entsegu ez-suntsitzaileez baliatzea sustatzen da.

8.19 Irudian erakusten den balio-funtzioak, luzera guztian antzeko hazkundera duen kurba sigmoidearen itxura hartzen du. Inflexio puntua arinki ezkerretara lekualdatua dagoenez, zenbait neurri hartzea bultzatzen da, azpi-irizpide guztiak bete beharrik izan gabe.

8.4.9 Azterketa kasuen arteko alderaketa.

8.3 Atalean eman diren datuen arabera, diseinu aukera bakoitzari dagozkion ISMA-ren balioak ezar daitezke, obrako egoera berdinetarako ICES ezberdinak lortuz. Eskuarki zehazten diren alderdi askorentzako, kasu bietako edozein lar



8.19 Irudia: Sortutako hondakinen optimizazioaren balio-funtzioa.

zigortuko ez duten aldeko egoerak hartzea erabaki da, itxurazko ezberdintasunak sor ez daitezen.

Argi antzematen da ingurumenean nabarmenki eragiten duten zenbait alderdi daudela, zementuaren erabilera handiagoa kasu. Hala ere, AZIHAT-aren erabilerak beste baldintzatzaile batzuk ditu alde, amaierako irtenbidearen ingurumen ekarpena antzekoa edo are hobea delarik.

8.5 Azken gogoetak

Gai honetan, (AZIHAT) altzairu zuntzez indartutako hormigoi autotrintotzailearen balizko erabileraren azterketa egin da. Materialaren kokapen eta erantzunak, lurperatu gabeko euste andel zilindrikoen eraikuntzan erabiltzeko portaera egokia erakusten du.

Ahalezko erabilerak sustatzeko, alderdi erreologiko eta erresistenteez gain, hormigoi arrunt eta AZIHAT bidez eraikitzen den kasu errealaren konparaziozko azterketa egiten da. Ekonomia, denbora eta kalitatearen ikuspuntutik, aztertutako materiala lehiakorra da eta are, zenbait egoeratan, ohiko sistemari gailentzen zaio, baldintza jasagarrien hobekuntzaz gain.

Hormigoi eta altzairuaren kostuaren gehikuntza, etorkizunean zuntzen prezioan gerta daitekeen murrizketak eta eraikuntzarako denbora eta eskulanaren gutxitze nabarmenak arindu egiten du. Kostuaren gehikuntza, giro erasotzaileak jasateagatik zementu eduki handiak behar dituzten egiturentzat arindu egiten da ere. Gainera, egitura-elementuaren kalitatearen hobekuntzak (trinkotasun, akabera, iragazgaitasuna), iraunkortasun handiagoa dakar.

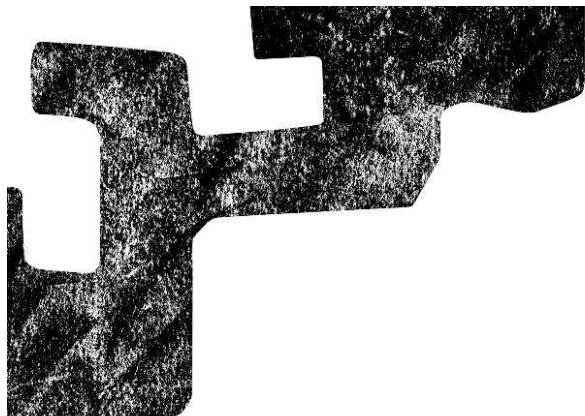
Alde ekonomikoari gehituta, material erabileraren ingurumen alderdiak egi-

1. kasua Hormigoi Armatua			Irizpidea		2. kasua AZIHAT			
ISMA	V_i	P_i	$\lambda_{i,j}$		$\lambda_{i,j}$	P_i	V_i	ISMA
			100	$\lambda_{1,1}$	68			
		100		P_1		68		
	1.00			V_1			0.65	
			95	$\lambda_{2,1}$	45			
		95		P_2		45		
	0.98			V_2			0.44	
			75	$\lambda_{3,1}$	40			
		75		P_3		40		
	0.84			V_3			0.35	
			90	$\lambda_{4,1}$	60			
			100	$\lambda_{4,2}$	40			
			100	$\lambda_{4,3}$	100			
			100	$\lambda_{4,4}$	100			
			100	$\lambda_{4,5}$	100			
			100	$\lambda_{4,6}$	100			
		98.3		P_4		83.3		
	0.97			V_4			0.70	
			28	$\lambda_{5,1}$	34			
			32	$\lambda_{5,2}$	32			
			34	$\lambda_{5,3}$	34			
		96		P_5		100		
	0.96			V_5			1.00	
			0	$\lambda_{6,1}$	20			
			0	$\lambda_{6,2}$	20			
			0	$\lambda_{6,3}$	20			
			0	$\lambda_{6,4}$	20			
			0	$\lambda_{6,5}$	20			
		0		P_6		100		
	0.00			V_6			1.00	
			0	$\lambda_{7,1}$	0			
			0	$\lambda_{7,2}$	10			
			0	$\lambda_{7,3}$	10			
		0		P_7		20		
	0.00			V_7			0.50	
			0	$\lambda_{8,1}$	20			
			—	$\lambda_{8,2}$	30			
			—	$\lambda_{8,3}$	0			
		0		P_8		50		
	0.00			V_8			0.53	
0.58				ISMA				0.68

8.14 Taula: Aztertutako kasuen alderaketa.

turaren jasangarritasun ekarpen indizearen gehitzea eragiten du, hormigoi eta armatu konbentzionalekin alderatuz. Zementua bezalako material erabilera gehikuntzaren ondorio den alderdi negatiboa, inpaktuen murrizketarekin orekatzen da, zarata maila eta obrak sortzen duen inpaktu osoaren iraupena gutxituz. Aldi berean, entsegu ez-suntsitzaile metodo berrien erabilera, hondakin

bolumen gutxiago sortzen dituzten entsegu metodoen (Bartzelona entsegua) garapenarekin batera, onuragarri gertatzen da.



VII. ZATIA

Amaierako ondorioak

9. GAIA

Ondorioak eta etorkizuneko aukerak

9.1 Ondorioak

Gai honek, Doktore Tesian zehar bildu diren ekarpen eta ondorio guztiak laburbiltzen ditu. Ikerketa honetan, altzairu zuntzez indarturiko hormigoi autotrinkotzaileaz (AZIHAT) eskuratu den jakintza biltzen da, oinarri giltzatuak duten euste andel zilindriko ez lurperatuen erabilpen zehatzean erabiltzeko asmoz, beste mota bateko esfortzuak nagusi diren bestelako egitura egoera batzuetan erabiltzeko eragozpenik izan gabe.

Dokumentuak kronologikoki islatzen ditu garatu diren ikerketaren faseak. Argi dago, egitura-elementuaren benetako egikaritzeak eta materialaren diseinu eta erabilerak, eman den ordenan programaketa alderantzizkoa izan beharko lukeela, hormigoi masa freskoaren mugimenduaren arabera zuntzen norabidea joz lehendabizi; bigarrenik, erantzun mekaniko egokia lortzeko beharrezko zuntz zenbatekoa zehaztuz ondoren, autotrinkotasuna eta segregazio eza bermatzen duen dosifikazio ezin hobea zehazteko asmoz, kontrol tekniken batekin bukatzeko, ahal dela, entsegu ez-suntsitzaileetan (NDT) oinarrituz.

Aski ezagunak dira zuntzez indartutako (AZIH altzairuzkoen kasuan) eta jariakortasun handiari (HAT) dagozkien hormigoiaren teknologiek dakartzaten abantailak. Ikerketa hau teknologia bien abantailak sustatzera bideratu da, erabilera elkartuak dakarren sinergiaren bidez. Ikerketaren ekarpenik handiena, neurri handiko egitura-elementuaren diseinu eta egikaritze faseetan zehar pilatu den esperientzia da, 1:1 eskalako entseguak egiteko laginak lortu ahal izan direlarik. Aldi berean, diseinurako jarraibide saila ezartzen da eta egituraren kalitate kontrol metodo ugari erkatzen dira.

Bigarren zatian zehar, material bereiz biei (AZIH eta HAT) dagokien arteen egoeraren bilketa egiten da. AZIHAT deritzonaren esperientziak nabarmenki murriztagoak dira. Materialaren portaera eta teknologia bien uztarkek dakartzan abantailei dagokionez, proiektugile askoren ezjakintasunak eta haren egiaztatze eta obraratzeko berariazko araudi edo instrukzio ezak, materialarekiko uzurtasuna gainditzea zail egiten dute. Azterketa xehatu honen

ondorioz zenbait alderdi azpimarratzen dira, gaur egun eta daukagun artearen egoeraz, ez dutenak haren erabilgarritasuna errazten.

- Hormigoi matrizean banaka sartuak dauden altzairu zuntzen erauzketa erantzuna balioesteko hainbat entsegu ez normalizatu konfigurazio daude, baina haien interesa zuntzaren irristatze prozesuan agertzen diren fenomenoen ikerketan datza, ezin direlarik egitura-elementuen kalkulurako oinarri gisa erabili, material konposatuaren portaera era osoan ezarri behar delarik eta ez era isolatuan.
- Era berean diseinurako hartu den kode edo instrukzioaren arabera, flexotrakzio entseguak era ezberdinean normalizatzen dira eta haien emaitzak ere bestelako eran interpretatzen dira. Beraz, beharrezkoa gertatzen da modelo eratzaille adostua ezartzea, ulergarriagoa eta, ahal dela, aurreikuspen izaerakoa, proiektugileari segurtasun handiagoa ematen diona bere erabilera zuzenari dagokionez eta, bide batez, erabilera hori sustatzen duena.
- Zuntzen norabideari dagokionez izan daitezkeen kasuistika guztiak behin ezarri direla, argi dago aurreikuspen eta ondorengo kontrol teknikak garatu behar direla, orientazioa dudarik gabe zehazten dutenak, balio orokorregiak hautatu gabe, ez baitituzte masaren benetako mugimenduaren ondorioz gertatzen diren aldaketa lokalizatuak, trinkotze elementuen eraginak eta abar aintzat hartzen.

HAT-ari dagokionez, argi dago bere abantailekiko interesa, baina beste batzuen artean, dosifikazioaren sentikortasunak oztupo izaten jarraitzen du:

- Dosifikazio metodoak ez dira orokorregarriak, horietatik gehienak, garatu dituen herrialdearen idiosinkrasiari egokitzen baitzaizkio, material ezberdinen erabilera ohitura eta eskuragarritasun alderdiak direla bide.
- Halaber, adibidez gure inguru hurbileko, hormigoi planta guztiak ez daude, gaur egun, HAT dosifikatzeko beharrezko tresneriaz hornituak, multzoaren portaerarengan osagaien hezetasunak duen eragina dela kausa. Bereziki garrantzitsua gertatzen da plantako nahasketa errealetan, material hornituek ez baitituzte beti ezaugarri berdinak elkarren artean, ezta laborategiko dosifikazio teorikoarekiko.
- Biskositate eta isurpen-tentsioari dagokionez, dosifikazio ezberdinek izango duten erreologia aurretiaz zehaztea ezinezkoa gertatzen da. Horretarako, ezinbestekoa da, isurpen denboren neurketari dagokionez, egiaz subjektiboak izan daitezkeen entsegu normalduak erabiltzea.
- Parametro erreologiko horiek biskosimetro edo erreometroen bitartez kuantifikagarriak dira, baina aparailu bakoitzak erregistratzen dituen balioak ez dira alderagarriak, bakoitzak erabat ezberdina den neurketa tarte edo eskala ezberdina baitu.

Teknologia bien konbinazioak, AZIHAT deritzon batean egiten du. Material honek arestian aipatu diren abantailak ditu, dosifikazioaren konplexutasunean gerta daitezkeen gehikuntza arin baten lepotik.

- Zuntzak bezalako agregakin lerdin batek, zuntzen blokeo edo segregazio-rik sortu gabe, jariakortasun handia bermatzeko beharrezko dosifikazioan eragiten du. Zailtasun hori, itxura eta neurrien arabera, erabiltzen den zuntzen proportzio eta dosifikazioaren azterketa egokiaz konpon daiteke.
- Materialaren jariakortasun handiak, batez ere masaren mugimenduari paraleloa den lerrokatzea eragiten du zuntzengan. CFD metodoak, haien aldaera guztiekin, orientazio hori zehazteko interesgarriak agertzen diren arren, oraindano ez da neurri handiko elementuengan entsegurik gauzatu haien baliozkotasuna egiaztatzeko.

Hirugarren zatiak, proposatutako erabilerarentzako egokiena den zuntz mota aukeratzeko metodologia sinplea aurkezten du. Banakako zuntzen erauzte emaitzak, gaian batzen diren ohar guztiekin batera, zuntz bat edo beste aukeratzeko jarraibideak ezartzen dituzte, azkenik mutur konformatuak dituztenak hautatuz, eta baita baterako erabilerarekin bat datorren hormigoiazen dosifikazioa diseinatzeko, xedatutako hormigoi autotrunkotzailea kasu. Aldi berean, hormigoiazen dosifikazio zehazteko estrategia ezartzen da:

- Hurbileko eta gure ingurunean ohikoak diren lehengaietatik abiatuz, eskatzen diren baldintza guztiak betetzen dituen AZIHAT-a dosifikatzeko metodologia sinplea ezartzen da.
- Proposatzen den dosifikazioa ekonomikoki optimizatua izan daiteke, zementu edukia indarreko araudiak (EHE-08) baimentzen duen gutxieneko baliora murriztuz eta beste adizioaren bategatik ordeztu (filler minerala, silize-ke, etab.). Hala ere, giro erasotzaileetan ezberdintasuna ez da horren nabarmena.

Doktore Tesi honen laugarren zatiak, hormaren egikaritze (4 Gaia) eta hura moztu ondorengo entsegu ez-suntsitzaile (5 Gaia) eta suntsitzaileei (6 Gaia) dagozkien atalak biltzen ditu. Tesiaren lanketan zehar erdietsi den esperientziak hurrengo agerraraztera behartzen du:

- Gertatu den bezala, hormigoi plantako ekoizpenaren ondorioz lehengaien kontsumo jarraituak eta ezaugarri oso ezberdinekoen horniketak, laborategian zehaztutako dosifikazioa aldatzera behartzen du, agregakinen granulometria edota hezetasun berriei, bereziki, egokitzeko.
- Masak garraio eta obraratzean zehar jasan ditzakeen aldakuntzak oso kontuan hartzekoak dira. Masaren jariakortasun handiak ponpaketa errazten duenez, beharrezkoa da tutuaren blokeoa ekiditen duten ponpaketa makina bazkatzeko metodo ezberdinak aztertzea. Tutua, hormigoi autotrunkotzaileaz beraz zuzenean bazkatzeko aukera aztertu behar da, ur gehiago eman eta, ikerketa honetan gertatu bezala, masaren segregazioa bultzatzea ekidingo duen zementu-esnea erabili beharrean. Egoera eze-goki honek, egikaritutako egitura-elementu osoaren ezespena ekar lezake. Ponpatutako hormigoiazen lehen zatikiaren erabilera baztertzeo aukera ere legoke.
- Obraratze prozedurak xehetasun handiz aztertua izan behar du, isurtzearen kokapen eta erak zuntzek hartzen duten norabidea baldintzatzen duela frogatu egin baita. Indartze okerrek, trakzio esfortzuen norabidearekin

guztiz bat ez datozen zuntzen kasu, pentsatutako erabilerarako erabat onartezina egingo duten puntu ahulak sor ditzakete egitura. CFD simulazio metodoen bitartez, aldagai horiek azter daitezke prozedura egokia zehaztu arte.

- Tesian zehaztu diren egitura ezaugarri eta osaketaren arabera, hormaren egikaritze denbora eta epeak, armatze eta enkofratze lanak gehituz, nabarmenki murrizten dira. Horrek kostu murrizketa nabarmena dakar berekin.
- Dokumentuan zehar eman diren baieztapenak babesteko asmoz, hormaren osotasunean emaitzak estrapolatzeko gai izateko, nahikoa adierazgarria den lagin kopuruan entsegu saila gauzatzen da. Hainbat metodo ez-suntsitzaileen bidez aztertutako laginak ia guztiak dira, hau da, hormaren %100-a. Entsegu suntsitzaileei dagokienez aldiz, aztertutako lagin prismatikoak 70 baino gehiago dira eta kubikoak, 34 dira. Guztira, aztertu den azalera, hormaren %40-a baino gehiago da.
- Erabili diren entsegu ez suntsitzaileen artean, gutxi dira, gaur egun, egitura-elementuaren gainean zuzenean egin daitezkeenak zuntzen orientazio eta zenbatekoa zehazteko. Erabili diren metodo ezberdinek, azterketa kasura egokitzapen maila bestelakoak dituzte:
 - Pulsu ultrasonikoen abiaduraren neurketak ez du informazio interesgarririk ematen gune ezberdinetan zuntzek duten zenbateko eta orientazioari dagokionez.
 - Metodo estereologikoak bat datoz beste NDT batzuen arabera balioztatu diren orientazioekin, baina tamaina txikiko laginen mozketak aurpegietan agerian utzi diren zuntzak edo laginok birrindu ostean hormigoitik erauzi direnak zenbatzea lan nekeza da.
 - Ardatz tomografia konputerizatuak informazio oso zehatza eskaintzen du, baina bere kostu eta kontrol sistema *in situ* ezartzeko ezintasunak, kontrol neurri sistematiko gisa baztertzea behartzen dute.
 - Erraztasun, fidagarritasun eta errepikagarritasuna dela medio, metodo magnetikoak dira guztietan interesgarrienak. Induktantzia aldakuntzaren neurketak orientazio, zenbateko eta are, materialaren erantzun mekanikoaren, informazio zehatza ematen du. Hala ere, erabilitako konfigurazioak ez du egitura-elementuaren gaineko neurketak egiteko balio, baizik eta lagin kubikoetan. Tresneria ezberdinen neurketen arteko proportzionaltasun lineala egiaztatu da, zuntz mota bakoitzaren kalibraketa ereduak ezartzeko bidea ematen delarik. Halaber, hondar erresistentzien ondorengo aurreikuspen formulazioetarako lagin prismatiko eta kubikoen neurketak elkarrekin erlazionatzeko metodologia ezartzen da.
 - Erabilitako dosifikazio metodologiak, proposatzen den erabilerarako egokitasun ona agertzen duen AZIHAT-a formulatzeko aukera ematen du, planteatutako andeletan balizko iragazpenak ekiditen dituen iragazkortasun txikian oinarrituz.

- Hormako kokapen ezberdinetako laginetan egindako hainbat haustura entseguek, materialaren trakzioko ezaugarri mekanikoetan ezberdintasun handiak agertzen dituzte, gertatu den segregazioa eta masaren mugimenduak behartu dituen orientazio ezberdinak direla eta. Hala eta guztiz ere, uste bezalako zuntz norabidea duten guneek etorkizuneko egikaritzeetan multzoaren egitura-segurtasuna berma daitekeela frogatzen dute, behar baino hondar erresistentzia batuz besteko balio handiagoak lortu baitira.
 - Hormigoiaaren konpresio erresistentzia adierazgarria nahiko uniformea da, desbideratze txikiaz, horma guztian zehar, lagin bakoitzean zuntzen norabide eta indartze maila gorabehera. Uste zenaren aurka, hormatik erauzi diren lagin kubikoen erresistentzia balioak eta material berdinarekin modelatu diren lagin zilindrikoek antzeko balioak eman dituzte. Jariakortasuna eta iraunkortasuna bermatzeko beharrezkoak diren dosifikazioak ikusirik eta lortutako konpresio erresistentzia adierazgarria HAT-en ohikoekin alderatuz, erabilitako dosifikazioa erresistentzia moderatuko tartean kokatzen dela baieztatu daiteke.
 - Trakzio erresistentzia, entsegu prozedura ezberdinen bitartez zehaztu da, Bartzelona eta Brasildar entseguen arteko erlazioak zehaztuz, bat eta bestearen balioak bihurtzeko aukera ematen delarik. Bartzelona entseguak Brasildarrak baino balio txikiagoak ematen ditu, baina nahikoak eta desbideratze murriztarekin. Hormigoiz matrizearen trakzio erresistentziak zuntz indartzearen eragin nabarmenik agertzen ez duen arren, laginek erakusten duten zailtasuna, zuntzen zenbateko eta orientazioaren arabera da. Haustura eredu ezberdinak antzematen dira trakzioa jasaten duten ardatzek antzeko edo bestelako zuntz norabideak dituzten kasuetan, lehenengoan zuntz lerrokatu gehien duen ardatzarekiko paraleloak diren haustura planoak agertuz. Orientazioa antzekoa baldin bada ardatz bietan, haustura planoak lagin kubikoaren diagonalean zehar sortzen dira.
 - Ez dira esfortzu tangenzialen aurreko erresistentzia eta zuntzen norabide edo zenbatekoaren arteko erlazio eztabaidaekin lortu. Hala ere, zehaztu den erresistentzia proposatutako erabileran agertuko diren esfortzuak baino handiagoa da.
 - Flexotrakzio entseguek hondar erresistentzia balio arras ezberdinak ematen dituzte, aipatu diren egikaritze akatsak direla kausa. Hala eta guztiz ere, gehiegizkoak ez diren zuntz zenbatekoekin portara mekaniko maila egokiak lortzen dira, behartutako orientazioari esker. Hondar erresistentzia eta mozketaren aurpegietan zenbatutako zuntz kopurua edo inдукtantzia aldakuntzaren arteko erlazioak ezartzen dira, lehenengo hondar erresistentziakiko doitasun onak agertuz eta desbideratzea areagotuz ondorengoetan. Flexotrakzio entsegurekiko materialaren erantzuna eta lege eratzailea (EHE-08-ren arabera) aurrerako metodologia ere ezartzen da, metodo magnetiko ez-suntsitzaileetan pilatutako emaitzetan oinarrituz, esponentzial laukoitzaren itxuraz. Azken metodo hauen garapenak materialaren propietate mekanikoak zehazteko bidea eman lezake egiturarengan egindako entseguetan.

Bosgarren zatiak, CFD metodoen bitartez egin den hormigoitze simulazioaren inguruan garatu den azterketa handinahietakoa hartzen du barnean. 7 Gaian, sarrera datuak ezartzeko erabili den metodologia eta metodo ez-suntsitzailen emaitzekin egindako egiaztapena azaltzen dira.

- Propietate erreologikoak neurtzeko tresneria ezaren ondorioz eta aparailu ezberdinen arteko emaitzen desadostasuna ikusirik, erabilitako software-arentzako balio tarte onargarria ezartzeari ekiten zaio askiesgarriki, benetako isurpen entsegu eta simulazioen arteko erkatze bidez.
- Simulazioaren emaitzak, abiadura eremuak zuntzen orientazio angeluetan bihurtuz, metodo magnetikoaren bidez detektatu diren norabideekin erkatzen dira antzekotasun nabarmena ohartuz.
- Horrez gain, simulazioan aurreikusten diren norabideetan oinarrituz, materialaren erantzun mekanikoa funtzio esponentzial laukoitz itxuraz aurretateko metodologia ezartzen da, egitura osoaren portaera aurretiaz ezagutu, puntu ahulak antzeman eta hormigoitze prozedura egokienak zehazteko dakarren interesarekin, adibidez, piezaren neurrien arabera tutu bat baino gehiagorekin hormigoitzea, hormigoitzekoa den egitura-elementuaren arabera tutua altxatzearen egokitasuna eta abar.
- 50° baino zuntzen makurdura angelu handiagoetarako hondar erresistentzien murrizte nabarmena egiaztatzen da, zuntzen berrorientatzea behar-ko litzatekeelarik trazio esfortzu nagusien arabera lerrokatzeko.

Azkenik, seigarren zatian (8 Gaia), hormigoi armatu tradizional eta AZIHAT bidez proposatu den euste andel zilindrikoaren diseinuaren artean ekonomia eta ingurumen alderaketa egiten da.

- Materialei dagokien unitate kostuaren gehikuntza nabarmena da, zuntz eta zementuarena batez ere, nahiz eta kuantitatiboki ez den horren handia altzairu zenbateko osoaren murrizketa proposatzen delako eta giro erasotzaileek berez, zementu eduki handia eskatzen baitute, dosifikazioa are gehiago optimizatu daitekeelarik gainera.
- Emaitza osoa ere ez da gehiegi garestitu eskulan (armatzea, dardaratzte, etab.) aurrezpena eta egikaritze epeen murrizketa gertatzen delako. Hormigoitu beharreko piezen neurrien arabera, enkofratuaren garestitzea gerta liteke materialaren ezaugarrien ondoriozko presio hidrostatikoa dela eta.
- Ikerketa honek hala ere, egituraren jasangarritasun ekarpena neurtzeko adierazle berriak ezartzen ditu, zementu eduki handiagoen ondoriozko zigorrak beste alderdi batzuen hobekuntzarekin orekatzen direlarik, asko arestian aipatutakoak dokumentu honetan zehar.

9.2 Ikerketa ildo berriak

Materialaren erabilera egokia egiaztatu denez, adibidez, aipatutako egitura-ezaugarriak dituzten euste andel zilindrikoak eraikitzeke, hemendik aurrera

beharrezkoa gertatzen da Doktore Tesi honen lantze eta idazketan zehar arazoak sortu dituzten zenbait alderdi bultzatzea, baina egoera hasiberri honetan ere material, prozedura eta erabilera guztiz egokiak direla frogatu delarik.

- Merkatuan eskuragarri dauden zuntz berrien ainguraketa mekanikoaren hobekuntza aztertu beharra dago, mutur konformatuak era bikoitz eta are hirukoitzean erakusten baitituzte, lan honetan aurkezten den antzeko egoera batean hondar erresistentzia handiagoa eta apurketa mekanismoa aldatzen ote den zehazteko, azken hau zuntzaren apurketa izanik irristatzea beharrezkoa, haren harikortasuna murriztuko lukeelarik.
- Laborategi mailan zehaztu diren dosifikazio teorikoak eskala-produkzioara estrapolatzeko metodologiak zehaztu behar dira, hornitutako materialen aldaketen aurrean nola jokatu adierazten dutenak, eta are giro tenperaturekin, era sistematikoan.
- Fabrikatzaileek kalibraketa ereduak ezartzea ezinbestekoa da, zuntzen zenbaterako eta orientazioa era fidagarri eta ez-suntsitzailean zehazteko baliagarri izan daitezkeen.
- Metodo magnetikoen arabeko portaera mekanikoaren aurreikuspen egokia ikusirik, teknika honek garatua izan behar du obrako kalitate kontrol gisa inplementatzeko, egitura berarengan eta tresneria eramangarriekin, aipatu diren ereduak erabiliz.
- Interesgarria da Bartzelona entseguan sakontzea, Brasildar entseguaren ordezkari gisa materialaren trakzio erresistentzia zehazteko eta flexotrakzio entseguarena hondar erresistentziak balioesteko. Gaur egun, zuntz zenbaterako eta orientazio eta entsegu horren bidez neurtutako materialaren zailtasun gehikuntzaren arteko erlazioa aztertzen gabiltza.
- Egikaritze ondoko kalitate kontrol guztiez gain, lehentasuna, elementu handien azterketa egin nahi baldin bada eta horrek dakarren kostua dela eta, zuntzen antolaketa eta orientazioa aurretiaz zehazteko egokiak diren metodo konputazionalen garapenak behar luke. Jariakin homogeen bidezko simulazioak eite geometriko eta isurketa prozedura ezberdinekin erabili behar dira, paraleloki, simulazio konplexuagoen gaitasuna aztertu behar delarik, partikula lagrangiarren bidez zuntzak eurak ordezkari daitezkeelarik eta norabideez gain, banaketaren informazioa eskuratzeko. Honek AZIHAT-aren erabilerrako materialaren propietate erreologikoen balioen mugatzea (autotrinkotasun motak) ekar lezake.

Doktore Tesi honetan azaldutakoa ikusirik, zentsuzkoa dirudi laborategi fasea gainditu behar dela baieztatzea, materialak erabilera ugariara egokitze-ko ahalmena duela frogatu baita, eta egitura mailako azterketari ekin neurri handiagoko elementuetan, zenbait prozedura ezarri behar direlarik oraindik, bere gehieneko erresistentzia ahalmenaz segurtasun osoz baliatzeko. Fase honen proiektugileari, teknologiarren ziurtasuna eta konprobaketa tresnak emango dizkion arau edo instrukzioaren idazketarekin amaitu behar luke, material eta teknologiarren erabilerrari zaion uzurtasuna gainditzeko, Doktore Tesi honen ekarpenekin eta artearen egoeran aurreratzen eta azaltzen diren oinarriekin, bidea ireki baita.

Erreferentziak

- ACHE (1999) Manual de tecnología del hormigón reforzado con fibras de acero. Tech. rep., Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural
- ACHE (2008) Hormigón autocompactante: Diseño y aplicación. Tech. rep., Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural
- Aïtcin PC, Mehta P (1990) Principles underlying production of high-performance concrete. *Journal of Cement, Concrete and Aggregates* 12(2):70–78
- Arroyo JC, Cabré FM, Álvaro García Meseguer (2009) Jiménez Montoya - Hormigón Armado, 15th edn
- Arslan M (2002) Effects of drainer formworks on concrete lateral pressure. *Construction and Building Materials* 16(5):253–259
- Arslan M, Simsek O, Serkasi S (2005) Effects of formwork surface materials on concrete lateral pressure. *Construction and Building Materials* 19(4):319–325
- Assaad JJ, Khayat KH (2006) Effect of viscosity-enhancing admixtures on formwork pressure and thixotropy of self-consolidating concrete. *ACI materials journal* 103(4):280–287
- Barr B, Lee M, Barragán B, Dupont D, Gettu R, Olesen J, Stang H, Vandewalle L (2003a) Round-robin analysis of the RILEM TC 162-TDF uni-axial tensile test: Part 1. *Materials and Structures* 36:265–274
- Barr B, Lee M, de Place Hansen E, Dupont D, Erdem E, Schaerlaekens S, Schnütgen B, Stang H, Vandewalle L (2003b) Round-robin analysis of the RILEM TC 162-TDF beam-bending test: Part 1—Test method evaluation. *Materials and Structures* 36:609–620
- Barragán BE (2002) Failure and toughness of steel fiber reinforced concrete under tension and shear. PhD thesis, Universitat Politècnica de Catalunya
- Bartos P (1993) Assessment of properties of underwater concrete by the orimet test. In: *Proceedings of the International RILEM workshop on Special Concretes. Workability and Mixing.*, pp 181–192
- Bartos P, Duris M (1994) Inclined tensile strength of steel fibres in a cement-based composite. *Composites* 25(10):945 – 952

- Belleze T, Fratesi R, Failla C (2004) Effect of chemical-physical interaction between galvanized steel fibres and concrete. In: Prisco MD, Felicetti R, Plizzari GA (eds) Proceedings of the Sixth International RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concretes (FRC) - BEFIB 2004, RILEM, vol Volume 1, pp 239–248
- Bencardino F, Rizzuti L, Spadea G, Swamy RN (2008) Stress-strain behavior of steel fiber-reinforced concrete in compression. *Journal of Materials In Civil Engineering* 20(3):255–263
- Bernard E (2000) Behaviour of round steel fibre reinforced concrete panels under point loads. *Materials and Structures* 33:181–188
- Billberg P (1999) *Self-compacting Concrete for Civil Engineering Structures: The Swedish Experience*
- Blanco A, Pujadas P, de la Fuente A, Cavalaro S, Aguado A (2013) Application of constitutive models in european codes to rc–frc. *Construction and Building Materials* 40(0):246 – 259
- Blanco Álvarez A, Pujadas Álvarez P, de la Fuente Antequera A, Aguado de Cea A (2010) Análisis comparativo de los modelos constitutivos del hormigón reforzado con fibras. *Hormigón y Acero* 61(256):83–101
- Boulekbache B, Hamrat M, Chemrouk M, Amziane S (2012) Influence of yield stress and compressive strength on direct shear behaviour of steel fibre-reinforced concrete. *Construction and Building Materials* 27(1):6 – 14
- Bramshuber W, Uebachs S (2003) Investigation on the formwork pressure using self-compacting concrete. In: 3rd International Symposium on Self-Compacting Concrete
- Bui V, Akkaya Y, Shah S (2002) Rheological model for self-consolidating concrete. *ACI Materials Journal* 99(6):549–559
- Chen WF (1970) Double punch test for tensile strength of concrete. *ACI Materials Journal* 67(2):993–995
- Choi Y, Lee H, Chu S, Cheong S, Jung W (2012) Shear behavior and performance of deep beams made with self-compacting concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials* 6(2):65–78
- Chu H, Machida A (1998) Experimental Evaluation and Theoretical Simulation of Self Compacting Concrete by the Modified Distinct Element Method (MDEM). In: Recent advances in concrete technology, fourth CAN-MET/ACI/JCI international conference, vol 179, pp 691–714
- Chu H, Machida A, Suzuki N (1997) Experimental Investigation and DEM Simulation of Filling Capacity of Fresh Concrete. *Transactions of the Japan Concrete Institute* 18:9–14
- CNR-DT 200/2004 (2008) *Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo di strutture fibrorinforzate*

- Coutinho JS (2003) The combined benefits of CPF and RHA in improving the durability of concrete structures. *Cement and Concrete Composites* 25(1):51 – 59
- Coutinho MJARdS (1998) Melhoria da durabilidade dos betões por tratamento em cofragem. PhD thesis, Engenharia Civil. Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto
- Cunha VMCF (2010) Steel fibre reinforced self-compacting concrete (from micromechanics to composite behavior). PhD thesis, Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, Azurém, 4800-058 Guimaraes, Portugal
- Cunha VMCF, Barros JAO, Sena-Cruz JM (2010) Pullout behavior of steel fibers in self-compacting concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering* 22(1):1–9
- DBV-Stahlfaserbeton (2001) Merkblatt stahlfaserbeton
- Djelal C, Vanhove Y, De Caro P, Magnin A (2002) Role of demoulding agents during self-compacting concrete casting in formwork. *Materials and Structures* 35(252):470–476
- Domone P (2006) Self-compacting concrete: An analysis of 11 years of case studies. *Cement and Concrete Composites* 28(2):197 – 208
- Domone PL, Jin J, Chai HW (1999) Optimum mix proportioning of self-compacting concrete. In: *Proceedings of International Conference on Innovation in Concrete Structures: Design and Construction*, Thomas Telford, pp 277–285
- Dufour F, Pijaudier-Cabot G (2005) Numerical modelling of concrete flow: homogeneous approach. *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics* 29:395–416
- Dupont D, Vandewalle L (2005) Distribution of steel fibres in rectangular sections. *Cement and Concrete Composites* 27(3):391 – 398
- EAE-2011 (2011) Instrucción de Acero Estructural EAE 2011
- Edgington J, Hannant D (1972) Steel fibre reinforced concrete. the effect on fibre orientation of compaction by vibration. *Materials and Structures* 5:41–44
- EHE-08 (2008) Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08
- Faifer M, Ottoboni R, Toscani S, Ferrara L (2011) Nondestructive testing of steel-fiber-reinforced concrete using a magnetic approach 60(5):1709–1717
- Farhat F, Nicolaidis D, Kanellopoulos A, Karihaloo B (2007) High performance fibre-reinforced cementitious composite (CARDIFRC) – Performance and application to retrofitting. *Engineering Fracture Mechanics* 74(1–2):151 – 167
- Ferrara L, Park YD, Shah SP (2007) A method for mix-design of fiber-reinforced self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research* 37(6):957 – 971

- Ferrara L, Park Y, Shah S (2008) Correlation among fresh state behavior, fiber dispersion, and toughness properties of sfrcs. *J Mater Civ Eng* 20(7):493–501
- Ferrara L, Faifer M, Toscani S (2012) A magnetic method for non destructive monitoring of fiber dispersion and orientation in steel fiber reinforced cementitious composites—part 1: method calibration. *Materials and Structures* 45:575–589
- Ferraris CF, deLarrard NS F and; Martys (2001) Fresh concrete rheology - recent developments. In: *Materials Science of Concrete VI. Proceedings. American Ceramic Society.*, pp 215–241
- Ferraris CF, Brower LE, Banfill P, Beaupré D, Chapdelaine F, de Larrard F, Domone P, Nachbaur L, Sedran T, Wallevik O, Wallevik JE (2001) Comparison of concrete rheometers: International tests at LCPC. Tech. rep., National Institute of Standards and Technology
- Feys D, Verhoeven R, Schutter GD (2007) Evaluation of time independent rheological models applicable to fresh self-compacting concrete. *Applied Rheology* 17(5):56,244–1/56,244–10
- Feys D, Verhoeven R, Schutter GD (2009) Why is fresh self-compacting concrete shear thickening? *Cement and Concrete Research* 39(6):510 – 523
- Figueiras H, Nunes S, Coutinho JS, Figueiras J (2009) Combined effect of two sustainable technologies: Self-compacting concrete (SCC) and controlled permeability formwork (CPF). *Construction and Building Materials* 23(7):2518 – 2526
- Fortin J, Millet O, de Saxcé G (2005) Numerical simulation of granular materials by an improved discrete element method. *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 62(5):639–663
- Gagne R, Pigeon M (1990) Deicer salt scaling resistance of high-performance concrete. *ACI-SP* pp 29–44
- Garcia J (2004) Diseño de hormigones dirigido a la aplicación. Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya
- Garrido L (2004) Hormigones Autocompactantes, chap Introducción: Razón de ser del hormigón autocompactante, pp 5–38
- Gettu R, Barragán BE, Zerbino LAR, Cruz C, Bravo M, Bernad C (2004) Hormigones Autocompactantes, chap Repetibilidad y reproducibilidad de los ensayos para el hormigón autocompactable, pp 119–149
- Gettu R, Gardner D, Saldivar H, Barragan B (2005) Study of the distribution and orientation of fibers in sfrc specimens. *Materials and Structures* 38(275):31–37
- Gomes PCC, Gettu R, Agulló BC L And (2001) Experimental optimization of high-strength self-compacting concrete. In: *Second Int. Symp. on Self-Compacting Concrete*, pp 377–386

- Gram A, Silfwerbrand J (2011) Numerical simulation of fresh scc flow: applications. *Materials and Structures* 44:805–813
- Groth P (2000) Fibre reinforced concrete: fracture mechanics methods applied on self-compacting concrete and energetically modified binders. PhD thesis, Luleå University of Technology
- Grünewald S (2004) Performance-based design of self-compacting fibre reinforced concrete. PhD thesis, Technische Universiteit Delft
- Heirman G, Hendrickx R, Vandewalle L, Gemert DV, Feys D, Schutter GD, Desmet B, Vantomme J (2009) Integration approach of the couette inverse problem of powder type self-compacting concrete in a wide-gap concentric cylinder rheometer: Part ii. influence of mineral additions and chemical admixtures on the shear thickening flow behaviour. *Cement and Concrete Research* 39(3):171 – 181
- Hillerborg A, Modéer M, Petersson PE (1976) Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements. *Cement and Concrete Research* 6(6):773 – 781
- Hirt C, Nichols B (1981) Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *Journal of Computational Physics* 39(1):201 – 225
- Homrich JR, Naaman AE (1988) Stress-strain properties of SIFCON in uniaxial compression and tension. Tech. rep., University of Michigan
- Hoogerbrugge PJ, Koelman JMVA (1992) Simulating microscopic hydrodynamic phenomena with dissipative particle dynamics. *EPL (Europhysics Letters)* 19(3):155
- Hu C (1995) Rheologie des betons fluides. PhD thesis, L'Ecole Nationale Des Ponts Et Chaussees
- Johnston C (1996) Proportioning, mixing and placement of fibre-reinforced cements and concretes. In: Barros P, Marrs D, Cleland D (eds) *Production methods and workability of concrete*. Proceedings of the International RILEM Conference, RILEM, pp 155–180
- Khayat KH, Omran A (2007) State-of-the-art review of form pressure exerted by self-consolidating concrete. Tech. rep., Université de Sherbrooke
- Kim JH, Noemi N, Shah SP (2012) Effect of powder materials on the rheology and formwork pressure of self-consolidating concrete. *Cement and Concrete Composites* 34(6):746 – 753
- Klein NS, de la Fuente A, Aguado A, Masó D (2011) Hormigón ligero auto-compactante con fibras para rehabilitación de forjados. *Materiales de Construcción* 61(302):239–256
- Kokado T, Hosoda T, Miyagawa T, Fuji M (1997) Study on a method of obtaining yield values of fresh concrete from slump flow test. *JSCE* 37:29–42
- Kooiman AG (2000) Modelling steel fibre reinforced concrete for structural design. PhD thesis, Delft University

- Kooiman AG, der Veen CV, Djorai M (1999) Steel fibre reinforced concrete segments in the second heinenoord tunnel. In: Proceedings of the fib symposium
- Krenchel H (1975) Fibre spacing and specific fibre surface. In: Proceedings of the RILEM symposium on fibre reinforced cement and concrete, pp 66–79
- Kwon SH, Phung QT, Park HY, Kim JH, Shah SP (2011) Effect of wall friction on variation of formwork pressure over time in self-consolidating concrete. *Cement and Concrete Research* 41(1):90 – 101
- König G, Kützing L (1999) Modelling the increase of ductility of HPC under compressive forces - A fracture mechanics approach. In: Third International RILEM Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cement Composites, RILEM, pp 251–259
- Lagrée PY, Staron L, Popinet S (2011) The granular column collapse as a continuum: validity of a two-dimensional Navier–Stokes model with a $\mu(I)$ -rheology. *Journal of Fluid Mechanics* 686:378–408
- Laranjeira F (2011) Design-oriented constitutive model for steel fibre reinforced concrete. PhD thesis, UPC
- Laranjeira F, Aguado A, Molins C (2010) Predicting the pullout response of inclined straight steel fibers. *Materials and Structures* 43:875–895
- Laranjeira F, Grunewald S, Walraven J, Blom C, Molins C, Aguado A (2011) Characterization of the orientation profile of steel fiber reinforced concrete. *Materials and Structures* 44(6):1093–1111
- de Larrard F, Ferraris C, Sedran T (1998) Fresh concrete: A Herschel-Bulkley material. *Materials and Structures* 31:494–498
- Lataste J, Behloul M, Breysse D (2008) Characterisation of fibres distribution in a steel fibre reinforced concrete with electrical resistivity measurements. *NDT; E International* 41(8):638 – 647
- Laure P, Silva L, Coupez T, Toussaint F (2007) Numerical modelling of concrete flow with rigid fibers. In: 10th ESAFORM conference on material forming, American Institute of Physics, vol 907, pp 1390–1395
- Lee M, Barr B (2004) A four-exponential model to describe the behaviour of fibre reinforced concrete. *Materials and Structures* 37:464–471
- Lewis RW, Navti SE, Taylor C (1997) A mixed lagrangian–eulerian approach to modelling fluid flow during mould filling. *International Journal for Numerical Methods in Fluids* 25(8):931–952
- Li V, Stang H, Krenchel H (1993) Micromechanics of crack bridging in fibre-reinforced concrete. *Materials and Structures* 26:486–494
- Luoma J, Voller V (2000) An explicit scheme for tracking the filling front during polymer mold filling. *Applied Mathematical Modelling* 24(8–9):575 – 590
- Maidl B (1995) *Steel Fibre Reinforced Concrete*. John Wiley & Sons

- Marković I (2006) High-performance hybrid-fibre concrete: development and utilisation. PhD thesis, Delft University of Technology
- Martys NS, Ferraris CF (2002) Simulation of SCC flow. In: First North American Conference on Design and Use of Self-Consolidation Concrete., pp 27–30
- Maturana A (2013) Estudio teórico-experimental de la aplicabilidad del hormigón reforzado con fibras de acero a losas de forjado multidireccionales. PhD thesis
- May M (2008) Änderung des arbeitsverhaltens von stahlfaserbetonen mit hochfesten stahlfasern. Projektarbeiten, Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden
- Michels J, Waldmann D, Maas S, Zuerbes A (2012) Steel fibers as only reinforcement for flat slab construction - experimental investigation and design. *Construction and Building Materials* 26(1):145–155
- van Mier J, van Vliet M (2002) Uniaxial tension test for the determination of fracture parameters of concrete: state of the art. *Engineering Fracture Mechanics* 69(2):235 – 247
- Mlekusch B (1999) Fibre orientation in short-fibre-reinforced thermoplastics II. Quantitative measurements by image analysis. *Composites Science and Technology* 59(4):547 – 560
- Molins C, Aguado A, Saludes S (2009) Double Punch Test to control the energy dissipation in tension of FRC (Barcelona test). *Materials and Structures* 42(4):415–425
- Mora F (2008) Distribución y orientación de fibras en dovelas, aplicando el ensayo barcelona. PhD thesis, UPC
- Moresi L, Dufour F, Mühlhaus HB (2003) A Lagrangian integration point finite element method for large deformation modeling of viscoelastic geomaterials. *J Comput Phys* 184(2):476–497
- Mori H, Tanigawa Y (1992) Simulation methods for fluidity of fresh concrete. 71-134 44(1), Nagoya University
- Naaman A, Najm H (1991) Bond-slip mechanisms of steel fibers in concrete. *ACI Materials Journal* 88(2):135–145
- Naaman A, Reinhardt H (2006) Proposed classification of HPFRC composites based on their tensile response. *Materials and Structures* 39:547–555
- Nemegeer D (1999) Zelfverdichtend staalvezelbeton. In: Proceedings Constructeursmiddag Betonvereniging
- Noor M, Uomoto T (1999) Three-dimensional discrete element simulation of rheology tests of self-compacting concrete. In: Å Skarendahl, Petersson O (eds) First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete, RILEM, pp 35–46

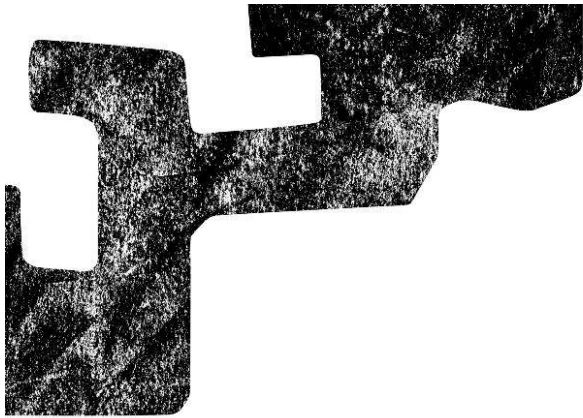
- Okamura H, Ouchi M (2003) Self-compacting concrete. *Journal of advanced concrete technology* 1(1):5–15
- Orbe A, Cuadrado J, Losada R, Rojí E (2012) Framework for the design and analysis of steel fiber reinforced self-compacting concrete structures. *Construction and Building Materials* 35(0):676 – 686
- Ozawa K, Maekawa K, Kunishima M, Okamura H (1989) Development of high performance concrete based on the durability design of concrete structures. In: *Proceeding of the 2nd East-Asia and Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-2)*, pp 445–450
- Ozyurt N, Mason TO, Shah SP (2006a) Non-destructive monitoring of fiber orientation using AC-IS: An industrial-scale application. *Cement and Concrete Research* 36(9):1653 – 1660
- Ozyurt N, Woo LY, Mason TO, Shah SP (2006b) Monitoring fiber dispersion in fiber-reinforced cementitious materials: Comparison of ac-impedance spectroscopy and image analysis. *ACI Materials Journal* 103(5):340–347
- Papanastasiou TC (1986) Flows of materials with yield. *Journal of Rheology* 31(5):385–404
- Parmentier B, De Grove E, Vandewalle L, Van Rickstal F (2008) Dispersion of the mechanical properties of FRC investigated by different bending tests. In: *Proceedings of the fib Symposium "Tailor Made Concrete Structures"*, fib Symposium "Tailor Made Concrete Structures", Taylor & Francis Group, pp 507–512
- Perrot A, Amziane S, Ovarlez G, Roussel N (2009) SCC formwork pressure: Influence of steel rebars. *Cement and Concrete Research* 39(6):524 – 528
- Petersson O (2003) Simulation of self-compacting concrete laboratory experiments and numerical modeling of testing methods, J-ring and L-box tests. In: Wallevik O, Nielsson I (eds) *Proceedings of the third International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, pp 202–207
- Petersson O, Hakami H (2001) Simulation of SCC laboratory experiments and numerical modeling of slump flow and L-box tests. In: Ozawa K, Ouchi M (eds) *Proceedings of the Second International Symposium on Self-Compacting Concrete*, pp 79–88
- Petersson O, Billberg P, Van B (1996) A model for self-compacting concrete. In: Bartos P, Marrs D, Cleland D (eds) *Production Methods and Workability of Concrete*, *Proceedings of the International RILEM conference, RILEM*, 32, pp 483–492
- Popinet S (2003) Gerris: A tree-based adaptive solver for the incompressible euler equations in complex geometries. *J Comp Phys* 190:572–600
- Price W (2000) Controlled permeability formwork. Tech. rep., CIRIA
- di Prisco M, Colombo M (2006) *Measuring, Monitoring and Modeling Concrete Properties*, Springer, chap FRC and HPFRC composites: From constitutive behaviour to structural applications, p 10

- Pujadas P (2013) Caracterización y diseño del hormigón reforzado con fibras plásticas. PhD thesis, Universitat Politècnica de Catalunya Departament d'Enginyeria de la Construcció
- Pujadas P, blanco A, Cavalaro SHP, Aguado A (2011) Método para la caracterización multidireccional del HRF. In: científico-técnica del hormigón estructural A (ed) V Congreso de ACHE, Asociación científico-técnica del hormigón estructural, pp 289–290
- Rao CK (1979) Effectiveness of random fibres in composites. *Cement and Concrete Research* 9(6):685 – 693
- Redon C, Chermant L, Chermant JL, Coster M (1999) Automatic image analysis and morphology of fibre reinforced concrete. *Cement and Concrete Composites* 21(5-6):403 – 412
- Riba E (2005) Cálculo y elección óptima de un depósito de agua. Universitat Politècnica de Catalunya - Minor Thesis
- Robins P, Austin S, Jones P (2002) Pull-out behaviour of hooked steel fibres. *Materials and Structures* 35:434–442
- Robins P, Austin S, Jones P (2003) Spatial distribution of steel fibres in sprayed and cast concrete. *Magazine of Concrete Research* 55(3):225–235
- Roelfstra PE, Wittmann FH (1986) Fracture Toughness and Fracture Energy of Concrete, Elsevier Scientific Publishing Company, chap Numerical method to link strain softening with failure of concrete, p 163.175
- Rokugo K, Kanda T, Yokota H, Sakata N (2009) Applications and recommendations of high performance fiber reinforced cement composites with multiple fine cracking (HPFRCC) in Japan. *Materials and Structures* 42:1197–1208
- Roqueta G, Jofre L, Romeu J, Blanch S (2010) Broadband propagative microwave imaging of steel fiber reinforced concrete wall structures. *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on* 59(12):3102 –3110
- Roussel N (2006) Correlation between yield stress and slump: Comparison between numerical simulations and concrete rheometers results. *Materials and Structures* 39:501–509
- Roussel N (2007a) Rheology of fresh concrete: from measurements to predictions of casting processes. *Materials and Structures* 40:1001–1012
- Roussel N (2007b) The LCPC BOX: a cheap and simple technique for yield stress measurements of SCC. *Materials and Structures* 40:889–896
- Roussel N, Coussot P (2005) "fifty-cent rheometer" for yield stress measurements: From slump to spreading flow. *Journal of Rheology* 49(3):705–718
- Saeed K (1995) Technique of multi-step concrete mixing. *Materials and Structures* 28:230–234
- Satoh A, Majima T (2005) Comparison between theoretical values and simulation results of viscosity for the dissipative particle dynamics method. *Journal of Colloid And Interface Science* 283(1):251–266

- Schölin K (1988) Ermittlung der orientierung, menge und verteilung der fasern in faserbewehrtem beton. *Beton- und Stahlbetonbau* 63(6):168–171
- Sedran T, de Larrard F (1999) Optimization of self-compacting concrete thanks to packing model. In: Å Skarendahl, Petersson O (eds) *First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, RILEM, pp 321–332
- Self-Compacting Concrete European Project Group (2005) *The european guidelines for self-compacting concrete. specification, production and use*. Tech. rep., EFNARC
- Serna P, Arango S, Ribeiro T, Núñez A, Garcia-Taengua E (2009) Structural cast-in-place SFRC: technology, control criteria and recent applications in spain. *Materials and Structures* 42:1233–1246
- Skarendahl A (2003) The present - the future. In: Wallevik O, Nielsson I (eds) *International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, pp 6–14
- Slater E, Moni M, Alam MS (2012) Predicting the shear strength of steel fiber reinforced concrete beams. *Construction and Building Materials* 26(1):423 – 436
- Soroushian P, Lee CD (1990) Distribution and orientation of fibers in steel fiber reinforced concrete. *ACI Materials Journal* 87(5):433–439
- Stang H, Li V, Krenchel H (1995) Design and structural applications of stress-crack width relations in fibre reinforced concrete. *Materials and Structures* 28:210–219
- Stroeven P (2009) Stereological principles of spatial modeling applied to steel fiber-reinforced concrete in tension. *ACI Materisls Journal* 106(3):213 – 222
- Stroeven P, Shah SP (1978) Use of radiography-image analysis fos steel fibre reinforced concrete. In: *Proceedings of the RiLEM symposium on Testing and Test Methods of Fibre Reinforced Composites*, pp 275–288
- Stähli P, Custer R, van Mier J (2008) On flow properties, fibre distribution, fibre orientation and flexural behaviour of FRC. *Materials and Structures* 41:189–196
- Tanigawa Y, Mori H (1986) Rheological analysis of slumping behavior of fresh concrete. In: *Proceedings of the 29th Japan congress on materials research*, p 129
- Tchamba J, Amziane S, Ovarlez G, Roussel N (2008) Lateral stress exerted by fresh cement paste on formwork: Laboratory experiments. *Cement and Concrete Research* 38(4):459 – 466
- Thrane LN (2007) *Form filling with self-compacting concrete*. PhD thesis, Technical University of Denmark
- Tie G, Dequn L, Huamin Z (2006) Three-dimensional finite element method for the filling simulation of injection molding. *Engineering with Computers* 21:289–295

- Timoshenko S, Woinosky-Krieger S (1959) Theory of plates and shells. McGraw-Hill, New York
- Toralles-Carbonari BM, Gettu R, Agullo L, Carbonari G (2003) Analysis of production factors in high performance concrete. *Ciências Exatas e Tecnológicas* 24:49–58
- Torrents J, Blanco A, Pujadas P, Aguado A, Juan-García P, Sánchez-Moragues M (2012) Inductive method for assessing the amount and orientation of steel fibers in concrete. *Materials and Structures* pp 1–16
- Tschegg EK, Linsbauer HN (1986) Prüfeinrichtung zur ermittlung von bruchmechanische kennwerten sowie hierfür geeignete prüfkörper.
- Van Damme S, Franchois A, Taerwe L (2004) Comparison of two coaxial probes for the non-destructive evaluation of a steel fiber reinforced concrete layer. In: Proc. 21st IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conf. IMTC 04, vol 1, pp 579–582
- Vandewalle L, Heirman G, van Rickstal F (2008) Fibre orientation in self-compacting fibre reinforced concrete. In: Gettu R (ed) BEFIB 2008: 7th RILEM International Symposium on Fibre Reinforced Concrete, RILEM Publications SARL, pp 719–728
- Švec O, Skoček J, Stang H, Geiker MR, Roussel N (2012) Free surface flow of a suspension of rigid particles in a non-newtonian fluid: A lattice boltzmann approach. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* 179–180(0):32 – 42
- Vu-Quoc L, Zhang X, Walton O (2000) A 3-D discrete-element method for dry granular flows of ellipsoidal particles. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 187(3–4):483 – 528
- Wallevik O (2003) Rheology - a scientific approach to develop self-compacting concrete. In: Wallevik O, Nielsson I (eds) Proceedings of the 3rd International RILEM symposium on Self-Compacting Concrete, RILEM, pp 23–32
- Wallevik O, Gjorv O (1990) Development of a coaxial cylinder viscosimeter for fresh concrete. In: Proceedings of the RILEM colloquium on properties of fresh concrete, RILEM, Chapman and Hall, pp 213–224
- Wei S, Mandel JA, Said S (1986) Study of the interface strength in steel fiber-reinforced cement-based composites. *ACI Journal* 83(4):597–605
- Wendt JF (2009) Computational Fluid Dynamics. An introduction., 3rd edn. Springer
- Wille K, Kim DJ, Naaman AE (2011) Strain-hardening UHP-FRC with low fiber contents. *Materials and Structures* 44(3):583–598
- Wolinski S, Hordijk DA, Reinhardt HW, Cornelissen HA (1987) Influence of aggregate size on fracture mechanics parameters of concrete. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete* 9(2):95 – 103
- Yurugi M, Sakai G (1998) A proven QA system for flowable concrete. *Concrete International* 20(10):44–48

Zerbino R, Barragán B, Garcia T, Agulló L, Gettu R (2009) Workability tests and rheological parameters in self-compacting concrete. *Materials and Structures* 42:947–960



Eranskinak

A ERANSKINA

Pultsu ultrasonikoen abiadura

A.1 Neurketa osoa

Hurrengo tauletan, pultsu ultrasonikoen metodoaren bidez egin diren neurketa guztiz azaltzen dira. Dokumentuan zehar aipatu izan den bezala, balioak oso ezberdinak dira eta ez datoz bat gainontzeko metodoen, suntsitzaile zein ez-suntsitzaile, bidez lortu diren emaitzekin. Haztagailuen kokapen-puntuak zehazteko horman bertan marraztutako sarearen zenbakiak A.1 Irudian ikus daiteke.

Hala ere azpimarratu beharra dago, ez dela pultsuen abiadura zehazteko arauan ezartzen den prozedura jarraitu, A.2 Irudian azaltzen den bezala, 68-69 laukien puntuen arteko neurketek denbora laburragoak agertu arren, lerroaren malda handiagoa da eta dagokion abiadura 71-72 puntuen artekoa baino txikiagoa.

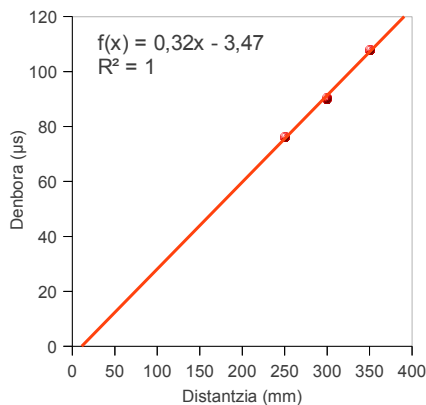
A.1 eta A.2 Taulek, pultsu ultrasonikoen neurketaren datu guztiak biltzen dituzte eta abiadurak, ibilitako tarte eta behar izan den denboraren arteko zatiketa soil gisa kalkulatu dira, arauaren prozeduraren arabera lortuko litatekeenekiko oso bestelakoak kasu askotan. Dagokion laukiaren zenbakia eta gutxi gora behera kokapen horietatik erauzi diren laginen zenbakiak ere azal-

1	e	3	4	5	6	7	8	9	10	11	1e	13	14	15	16	17	18	19	e0
e1	ee	e3	e4	e5	e6	e7	e8	e9	30	31	3e	33	34	35	36	37	38	39	40
41	4e	43	44	45	46	47	48	49	50	51	5e	53	54	55	56	57	58	59	60
61	6e	63	64	65	66	67	68	69	70	71	7e	73	74	75	76	77	78	79	80
81	8e	83	84	85	86	87	88	89	90	91	9e	93	94	95	96	97	98	99	100
101	10e	103	104	105	106	107	108	109	110	111	11e	113	114	115	116	117	118	119	1e0
1e1	1ee	1e3	1e4	1e5	1e6	1e7	1e8	1e9	130	131	13e	133	134	135	136	137	138	139	140
141	14e	143	144	145	146	147	148	149	150	151	15e	153	154	155	156	157	158	159	160
161	16e	163	164	165	166	167	168	169	170	171	17e	173	174	175	176	177	178	179	180
181	18e	183	184	185	186	187	188	189	190	191	19e	193	194	195	196	197	198	199	e00

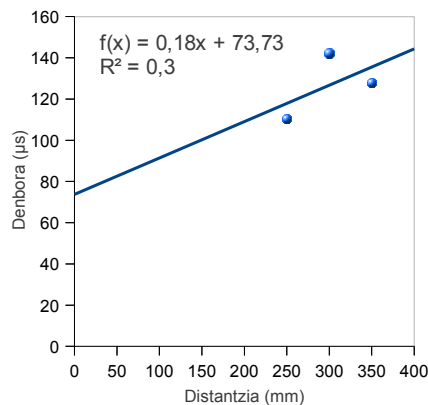
(a) Neurketa horizontalak

(b) Neurketa bertikalak

A.1 Irudia: Sare eta egindako neurketen irudikapena.



(a) 68-69



(b) 71-72

A.2 Irudia: Egin diren neurketetara hoberen egokitzen diren erregresio lerroak.

tzen dira.

Laginak	Laukiak	Neurketa	Denbora (μs)	Luzera (mm)	Abiadura (km/s)	
2-3 21-22	1	2	1	82,7	250	3,02
			2	97,2	300	3,09
			3	108,4	350	3,23
			4	85,2	250	2,93
			5	96,7	300	3,10
			6	108,6	350	3,22
4 23	4	5	1	84,4	250	2,96
			2	95,7	300	3,13
			3	92,4	350	3,79
			4	82,3	250	3,04
			5	74,0	300	4,05
			6	85,4	350	4,10
4-5 23-24	5	6	1	64,7	250	3,86
			2	90,7	300	3,31
			3	87,2	350	4,01
			4	64,6	250	3,87
			5	78,2	300	3,84
			6	85,7	350	4,08
5 24	6	7	1	101,5	250	2,46
			2	78,0	300	3,85
			3	108,7	350	3,22
			4	105,2	250	2,38
			5	94,1	300	3,19
			6	105,4	350	3,32
5-6 24-25	7	8	1	71,2	250	3,51
			2	79,2	300	3,79
			3	89,7	350	3,90
			4	67,7	250	3,69

Hurrengo orrialdean jarraitzen du

Taula A.1 – aurreko orrialdetik dator

Laginak	Laukiak	Neurketa	Denbora (μ s)	Luzera (mm)	Abiadura (km/s)	
		5	75,7	300	3,96	
		6	97,5	350	3,59	
		1	84,4	250	2,96	
		2	76,7	300	3,91	
116-117 135-136	61	62	3	103,6	350	3,38
			4	84,2	250	2,97
			5	99,4	300	3,02
			6	110,4	350	3,17
		1	94,7	250	2,64	
		2	142,7	300	2,10	
117 136	62	63	3	111,2	350	3,15
			4	99,9	250	2,50
			5	115,6	300	2,60
			6	152,1	350	2,30
		1	71,2	250	3,51	
		2	83,6	300	3,59	
117-118 136-137	63	64	3	103,6	350	3,38
			4	66,0	250	3,79
			5	100,1	300	3,00
			6	110,2	350	3,18
		1	61,6	250	4,06	
		2	78,0	300	3,85	
118 137	64	65	3	95,5	350	3,66
			4	84,0	250	2,98
			5	101,2	300	2,96
			6	108,8	350	3,22
		1	81,2	250	3,08	
		2	79,7	300	3,76	
118-119 137-138	65	66	3	85,2	350	4,11
			4	70,3	250	3,56
			5	92,2	300	3,25
			6	112,7	350	3,11
		1	71,7	250	3,49	
		2	82,8	300	3,62	
119 138	66	67	3	97,7	350	3,58
			4	72,8	250	3,43
			5	86,3	300	3,48
			6	108,2	350	3,23
		1	81,2	250	3,08	
		2	90,2	300	3,33	
119-120 138-139	67	68	3	106,5	350	3,29
			4	83,3	250	3,00
			5	74,2	300	4,04
			6	105,6	350	3,31
		1	84,5	250	2,96	
		2	96,6	300	3,11	
121-122 140-141	68	69	3	106,8	350	3,28
			4	67,8	250	3,69
			5	83,6	300	3,59

Hurrengo orrialdean jarraitzen du

Taula A.1 – aurreko orrialdetik dator

Laginak	Laukiak	Neurketa	Denbora (μ s)	Luzera (mm)	Abiadura (km/s)	
			6	108,7	350	3,22
			1	82,1	250	3,05
			2	108,7	300	2,76
122	69	70	3	109,5	350	3,20
141			4	83,2	250	3,00
			5	124,8	300	2,40
			6	110,8	350	3,16
			1	95,2	250	2,63
			2	146,8	300	2,04
122-123	70	71	3	148,6	350	2,36
141-142			4	117,4	250	2,13
			5	142,2	300	2,11
			6	150,1	350	2,33
			1	115,2	250	2,17
			2	147,6	300	2,03
124-125	71	72	3	107,4	350	3,26
143-144			4	105,1	250	2,38
			5	136,6	300	2,20
			6	148,2	350	2,36
			1	127,7	250	1,96
			2	150,2	300	2,00
125	72	73	3	172,7	350	2,03
144			4	130,5	250	1,92
			5	155,4	300	1,93
			6	174,4	350	2,01
			1	84,4	250	2,96
			2	98,4	300	3,05
125-126	73	74	3	110,5	350	3,17
144-145			4	86,0	250	2,91
			5	98,5	300	3,05
			6	107,7	350	3,25
			1	83,2	250	3,00
			2	151,3	300	1,98
127-128	74	75	3	108,2	350	3,23
146-147			4	100,1	250	2,50
			5	152,1	300	1,97
			6	108,6	350	3,22
			1	130,2	250	1,92
			2	150,7	300	1,99
129-130	75	76	3	173,2	350	2,02
148-149			4	130,7	250	1,91
			5	152,2	300	1,97
			6	172,7	350	2,03
			1	86,9	250	2,88
			2	83,7	300	3,58
130	76	77	3	110,0	350	3,18
149			4	105,4	250	2,37
			5	101,4	300	2,96
			6	114,2	350	3,06
			1	111,2	250	2,25

Hurrengo orrialdean jarraitzen du

Taula A.1 – aurreko orrialdetik dator

Laginak	Laukiak	Neurketa	Denbora (μ s)	Luzera (mm)	Abiadura (km/s)	
130-131 149-150			2	100,6	300	2,98
			3	115,3	350	3,04
			4	77,9	250	3,21
			5	90,1	300	3,33
			6	114,3	350	3,06
			1	86,7	250	2,88
131 150	78	79	2	101,2	300	2,96
			3	111,7	350	3,13
			4	88,9	250	2,81
			5	105,7	300	2,84
			6	114,3	350	3,06
			1	118,3	250	2,11
131-132 150-151	79	80	2	137,4	300	2,18
			3	163,6	350	2,14
			4	87,5	250	2,86
			5	143,1	300	2,10
			6	154,5	350	2,27
			1	64,1	250	3,90
192-193 211-212	101	102	2	71,1	300	4,22
			3	83,1	350	4,21
			4	64,4	250	3,88
			5	81,1	300	3,70
			6	106,2	350	3,30
			1	63,0	250	3,97
193 212	102	103	2	78,7	300	3,81
			3	86,2	350	4,06
			4	64,5	250	3,88
			5	84,7	300	3,54
			6	91,9	350	3,81
			1	65,0	250	3,85
193-194 212-213	103	104	2	73,5	300	4,08
			3	84,4	350	4,15
			4	67,5	250	3,70
			5	78,2	300	3,84
			6	80,2	350	4,36
			1	62,8	250	3,98
194 213	104	105	2	73,1	300	4,10
			3	151,4	350	2,31
			4	65,2	250	3,83
			5	76,4	300	3,93
			6	89,0	350	3,93
			1	72,7	250	3,44
194-195 213-214	105	106	2	85,0	300	3,53
			3	83,2	350	4,21
			4	64,0	250	3,91
			5	77,0	300	3,90
			6	87,1	350	4,02
			1	63,2	250	3,96
195	106	107	2	73,2	300	4,10
			3	89,1	350	3,93
			Hurrengo orrialdean jarraitzen du			

Taula A.1 – aurreko orrialdetik dator

Laginak	Laukiak	Neurketa	Denbora (μ s)	Luzera (mm)	Abiadura (km/s)	
214			4	64,2	250	3,89
			5	78,6	300	3,82
			6	87,3	350	4,01
195-196 214-215	107	108	1	68,2	250	3,67
			2	72,2	300	4,16
			3	86,6	350	4,04
			4	68,3	250	3,66
			5	76,2	300	3,94
			6	83,7	350	4,18
197-198 216-217	108	109	1	61,2	250	4,08
			2	74,7	300	4,02
			3	102,2	350	3,42
			4	64,8	250	3,86
			5	75,1	300	3,99
			6	82,8	350	4,23
198 217	109	110	1	64,7	250	3,86
			2	72,2	300	4,16
			3	89,5	350	3,91
			4	64,2	250	3,89
			5	73,6	300	4,08
			6	83,5	350	4,19
198-199 217-218	110	111	1	64,7	250	3,86
			2	71,6	300	4,19
			3	82,4	350	4,25
			4	61,7	250	4,05
			5	77,7	300	3,86
			6	82,7	350	4,23
200-201 219-220	111	112	1	64,7	250	3,86
			2	75,2	300	3,99
			3	83,5	350	4,19
			4	61,0	250	4,10
			5	72,0	300	4,17
			6	82,2	350	4,26
201 220	112	113	1	84,4	250	2,96
			2	83,5	300	3,59
			3	81,7	350	4,28
			4	79,7	250	3,14
			5	66,2	300	4,53
			6	83,2	350	4,21
201-202 220-221	113	114	1	102,2	250	2,45
			2	71,7	300	4,18
			3	85,2	350	4,11
			4	72,1	250	3,47
			5	72,5	300	4,14
			6	87,7	350	3,99
203-204 222-223	114	115	1	81,7	250	3,06
			2	95,3	300	3,15
			3	150,0	350	2,33
			4	81,2	250	3,08
			5	73,2	300	4,10

Hurrengo orrialdean jarraitzen du

Taula A.1 – aurreko orrialdetik dator

Laginak	Laukiak	Neurketa	Denbora (μ s)	Luzera (mm)	Abiadura (km/s)
		6	89,5	350	3,91
		1	66,2	250	3,78
		2	75,2	300	3,99
205-206	115	116	3	106,1	3,30
224-225			4	73,3	3,41
			5	77,4	3,88
			6	105,0	3,33
			1	65,0	3,85
			2	92,3	3,25
206	116	117	3	103,3	3,39
225			4	81,3	3,08
			5	93,6	3,21
			6	102,6	3,41
			1	79,8	3,13
			2	94,5	3,17
206-207	117	118	3	103,4	3,38
225-226			4	69,9	3,58
			5	93,8	3,20
			6	96,2	3,64
			1	64,3	3,89
			2	97,0	3,09
207	118	119	3	95,2	3,68
226			4	73,2	3,42
			5	94,4	3,18
			6	95,6	3,66
			1	69,3	3,61
			2	83,2	3,61
207-208	119	120	3	146,3	2,39
226-227			4	78,6	3,18
			5	80,7	3,72
			6	124,2	2,82
			1	63,3	3,95
			2	72,7	4,13
306-307	161	162	3	84,4	4,15
325-326			4	66,1	3,78
			5	75,2	3,99
			6	100,3	3,49
			1	71,5	3,50
			2	79,7	3,76
307	162	163	3	86,8	4,03
326			4	60,3	4,15
			5	74,4	4,03
			6	85,7	4,08
			1	68,2	3,67
			2	74,1	4,05
307-308	163	164	3	85,2	4,11
326-327			4	63,9	3,91
			5	75,6	3,97
			6	85,3	4,10
			1	61,2	4,08

Hurrengo orrialdean jarraitzen du

Taula A.1 – aurreko orrialdetik dator

Laginak	Laukiak	Neurketa	Denbora (μ s)	Luzera (mm)	Abiadura (km/s)	
308 327			2	71,6	300	4,19
			3	82,1	350	4,26
			4	62,7	250	3,99
			5	70,0	300	4,29
			6	81,8	350	4,28
			1	60,7	250	4,12
308-309 327-328	165	166	2	69,9	300	4,29
			3	81,2	350	4,31
			4	60,3	250	4,15
			5	70,4	300	4,26
			6	82,2	350	4,26
			1	60,8	250	4,11
309 328	166	167	2	72,2	300	4,16
			3	81,2	350	4,31
			4	62,0	250	4,03
			5	71,9	300	4,17
			6	83,3	350	4,20
			1	61,7	250	4,05
309-310 328-329	167	168	2	69,3	300	4,33
			3	82,3	350	4,25
			4	59,4	250	4,21
			5	70,7	300	4,24
			6	81,5	350	4,29
			1	59,6	250	4,19
311-312 330-331	168	169	2	74,3	300	4,04
			3	105,7	350	3,31
			4	66,0	250	3,79
			5	75,2	300	3,99
			6	106,2	350	3,30
			1	60,7	250	4,12
312 331	169	170	2	69,2	300	4,34
			3	81,3	350	4,31
			4	61,4	250	4,07
			5	70,7	300	4,24
			6	85,4	350	4,10
			1	84,2	250	2,97
312-313 331-332	170	171	2	83,7	300	3,58
			3	96,9	350	3,61
			4	73,6	250	3,40
			5	84,2	300	3,56
			6	108,7	350	3,22
			1	69,8	250	3,58
314-315 333-334	171	172	2	71,2	300	4,21
			3	82,6	350	4,24
			4	60,4	250	4,14
			5	70,8	300	4,24
			6	82,1	350	4,26
			1	83,6	250	2,99
315	172	173	2	74,4	300	4,03
			3	112,2	350	3,12
			Hurrengo orrialdean jarraitzen du			

Taula A.1 – aurreko orrialdetik dator

Laginak	Laukiak	Neurketa	Denbora (μ s)	Luzera (mm)	Abiadura (km/s)	
334			4	84,2	250	2,97
			5	74,7	300	4,02
			6	111,2	350	3,15
315-316 334-335	173	174	1	79,7	250	3,14
			2	87,1	300	3,44
			3	90,2	350	3,88
			4	83,6	250	2,99
			5	72,9	300	4,12
			6	91,9	350	3,81
317-318 336-337	174	175	1	70,4	250	3,55
			2	93,4	300	3,21
			3	105,6	350	3,31
			4	70,2	250	3,56
			5	93,4	300	3,21
			6	103,8	350	3,37
319-320 338-339	175	176	1	83,4	250	3,00
			2	92,7	300	3,24
			3	108,2	350	3,23
			4	83,2	250	3,00
			5	96,2	300	3,12
			6	110,9	350	3,16
320 339	176	177	1	80,9	250	3,09
			2	94,6	300	3,17
			3	106,5	350	3,29
			4	65,6	250	3,81
			5	90,5	300	3,31
			6	125,1	350	2,80
320-321 339-340	177	178	1	81,5	250	3,07
			2	93,7	300	3,20
			3	150,7	350	2,32
			4	83,4	250	3,00
			5	93,5	300	3,21
			6	149,8	350	2,34
321 340	178	179	1	78,5	250	3,18
			2	147,5	300	2,03
			3	108,8	350	3,22
			4	77,7	250	3,22
			5	99,1	300	3,03
			6	110,1	350	3,18
321-322 340-341	179	180	1	101,3	250	2,47
			2	88,1	300	3,41
			3	140,5	350	2,49
			4	91,3	250	2,74
			5	88,0	300	3,41
			6	119,7	350	2,92
344-345 363-364	181	182	1		250	N/A
			2	0,0	300	N/A
			3	140,2	350	2,50
			4		250	N/A
			5	90,2	300	3,33

Hurrengo orrialdean jarraitzen du

Taula A.1 – aurreko orrialdetik dator

Laginak	Laukiak	Neurketa	Denbora (μ s)	Luzera (mm)	Abiadura (km/s)	
345 364	182	183	6	104,2	350	3,36
			1	0,0	250	N/A
			2	0,0	300	N/A
			3	166,3	350	2,10
			4	0,0	250	N/A
			5	0,0	300	N/A
345-346 364-365	183	184	6	164,7	350	2,13
			1	127,2	250	1,97
			2	132,1	300	2,27
			3	163,7	350	2,14
			4	126,2	250	1,98
			5	92,2	300	3,25
346 365	184	185	6	145,2	350	2,41
			1	106,6	250	2,35
			2	128,6	300	2,33
			3	0,0	350	N/A
			4		250	N/A
			5		300	N/A
			6		350	N/A

A.1 Taula: Pultsu ultrasonikoen entseguaren emaitza guztiak (norabide horizontala).

Laginak	Laukiak	Neurketa	Denbora (μ s)	Luzera (mm)	Abiadura (km/s)	
22-41	2	22	1	83,7	250	2,99
			2	144,0	300	2,08
			3	170,2	350	2,06
			4	124,9	250	2,00
			5	113,2	300	2,65
			6	174,2	350	2,01
60-79	22	42	1	87,2	250	2,87
			2	150,7	300	1,99
			3	108,5	350	3,23
			4	104,2	250	2,40
			5	104,6	300	2,87
			6	149,3	350	2,34
98-117	42	62	1	116,3	250	2,15
			2	147,0	300	2,04
			3	179,3	350	1,95
			4	94,7	250	2,64
			5	144,6	300	2,07
			6	173,7	350	2,01
136-155	62	82	1	79,5	250	3,14
			2	89,3	300	3,36
			3	145,6	350	2,40
			4	114,1	250	2,19
			5	96,7	300	3,10
			6	110,4	350	3,17

Hurrengo orrialdean jarraitzen du

Taula A.2 – aurreko orrialdetik dator

Laginak	Laukiak	Neurketa	Denbora (μ s)	Luzera (mm)	Abiadura (km/s)	
174-193	82	102	1	83,7	250	2,99
			2	100,2	300	2,99
			3	119,5	350	2,93
			4	88,1	250	2,84
			5	101,0	300	2,97
			6	117,7	350	2,97
212-231	102	122	1	65,7	250	3,81
			2	86,6	300	3,46
			3	108,6	350	3,22
			4	84,0	250	2,98
			5	90,9	300	3,30
			6	109,6	350	3,19
250-269	122	142	1	107,3	250	2,33
			2	97,8	300	3,07
			3	114,5	350	3,06
			4	69,0	250	3,62
			5	97,5	300	3,08
			6	110,6	350	3,16
288-307	142	162	1	74,7	250	3,35
			2	83,5	300	3,59
			3	109,2	350	3,21
			4	65,4	250	3,82
			5	80,8	300	3,71
			6	106,2	350	3,30
326-345	162	182	1	60,7	250	4,12
			2	131,1	300	2,29
			3	104,4	350	3,35
			4	58,2	250	4,30
			5	108,1	300	2,78
			6	97,6	350	3,59
25-44 26-45	8	28	1	74,5	250	3,36
			2	74,6	300	4,02
			3	83,8	350	4,18
			4	80,6	250	3,10
			5	78,9	300	3,80
			6	86,1	350	4,07
63-82 64-83	28	48	1	77,5	250	3,23
			2	81,7	300	3,67
			3	91,2	350	3,84
			4	70,2	250	3,56
			5	80,7	300	3,72
			6	81,7	350	4,28
101-120 102-121	48	68	1	62,2	250	4,02
			2	73,4	300	4,09
			3	81,2	350	4,31
			4	61,7	250	4,05
			5	72,3	300	4,15
			6	82,7	350	4,23
			1	64,4	250	3,88
			2	76,5	300	3,92
68		88	Hurrengo orrialdean jarraitzen du			

Taula A.2 – aurreko orrialdetik dator

Laginak	Laukiak	Neurketa	Denbora (μ s)	Luzera (mm)	Abiadura (km/s)	
139-158			3	82,6	350	4,24
140-159			4	67,0	250	3,73
			5	75,2	300	3,99
			6		350	N/A
			1	69,7	250	3,59
			2	74,0	300	4,05
177-196	88	108	3	89,8	350	3,90
178-197			4	82,2	250	3,04
			5	74,3	300	4,04
			6	81,3	350	4,31
			1	67,7	250	3,69
			2	73,2	300	4,10
215-234	108	128	3	81,5	350	4,29
216-235			4	63,5	250	3,94
			5	66,4	300	4,52
			6	86,6	350	4,04
			1	66,1	250	3,78
			2	73,3	300	4,09
253-272	128	148	3	82,7	350	4,23
254-273			4	64,4	250	3,88
			5	74,4	300	4,03
			6	84,2	350	4,16
			1	62,7	250	3,99
			2	88,6	300	3,39
291-310	148	168	3	104,2	350	3,36
292-311			4	61,2	250	4,08
			5	80,7	300	3,72
			6	92,4	350	3,79
			1	61,5	250	4,07
			2	75,8	300	3,96
329-348	168	188	3	91,3	350	3,83
330-349			4	68,7	250	3,64
			5	78,9	300	3,80
			6	92,2	350	3,80
			1	134,5	250	1,86
			2	155,3	300	1,93
28-47	11	31	3	184,2	350	1,90
29-48			4	132,9	250	1,88
			5	138,4	300	2,17
			6	176,3	350	1,99
			1	114,3	250	2,19
			2	130,8	300	2,29
66-85	31	51	3	106,7	350	3,28
67-86			4	99,6	250	2,51
			5	104,5	300	2,87
			6	120,6	350	2,90
			1	102,0	250	2,45
			2	133,3	300	2,25
104-123	51	71	3	170,9	350	2,05
105-124			4	112,0	250	2,23

Hurrengo orrialdean jarraitzen du

Taula A.2 – aurreko orrialdetik dator

Laginak	Laukiak	Neurketa	Denbora (μ s)	Luzera (mm)	Abiadura (km/s)		
			5	137,2	2,19		
			6	148,2	2,36		
			1	111,1	2,25		
			2	125,2	2,40		
142-161	71	91	3	139,7	2,51		
143-162			4	108,6	250	2,30	
			5	111,7	300	2,69	
			6	152,3	350	2,30	
			1	116,9	250	2,14	
			2	112,0	300	2,68	
180-199	91	111	3	160,4	350	2,18	
181-200			4	122,2	250	2,05	
			5	116,5	300	2,58	
			6	114,5	350	3,06	
			1	94,2	250	2,65	
			2	114,3	300	2,62	
218-237	111	131	3	114,3	350	3,06	
219-238			4	74,9	250	3,34	
			5	99,9	300	3,00	
			6	114,4	350	3,06	
			1	84,2	250	2,97	
			2	124,1	300	2,42	
256-275	131	151	3	110,6	350	3,16	
257-276			4	93,2	250	2,68	
			5	143,9	300	2,08	
			6	111,9	350	3,13	
			1	119,9	250	2,09	
			2	98,2	300	3,05	
294-313	151	171	3	150,2	350	2,33	
295-314			4	116,8	250	2,14	
			5	150,0	300	2,00	
			6	104,2	350	3,36	
			1	82,6	250	3,03	
			2	136,2	300	2,20	
332-351	171	191	3	103,1	350	3,39	
333-352			4	82,7	250	3,02	
			5	131,2	300	2,29	
			6	106,3	350	3,29	
			1	129,3	250	1,93	
			2	153,7	300	1,95	
35-54	16	36	3	152,5	350	2,30	
			4	123,2	250	2,03	
			5	142,1	300	2,11	
			6	114,5	350	3,06	
			1	133,5	250	1,87	
			2	113,9	300	2,63	
73-92	36	56	3	170,9	350	2,05	
			4	132,1	250	1,89	
			5	99,8	300	3,01	
Hurrengo orrialdean jarraitzen du							

Taula A.2 – aurreko orrialdetik dator

Laginak	Laukiak	Neurketa	Denbora (μ s)	Luzera (mm)	Abiadura (km/s)	
111-130	56	76	6	171,4	350	2,04
			1	100,2	250	2,50
			2	121,3	300	2,47
			3	149,7	350	2,34
			4	66,7	250	3,75
			5	82,2	300	3,65
149-168	76	96	6	103,7	350	3,38
			1	105,8	250	2,36
			2	97,5	300	3,08
			3	163,8	350	2,14
			4	106,2	250	2,35
			5	98,4	300	3,05
187-206	96	116	6	112,1	350	3,12
			1	87,2	250	2,87
			2	105,7	300	2,84
			3	127,7	350	2,74
			4	81,7	250	3,06
			5	121,2	300	2,48
225-244	116	136	6	111,6	350	3,14
			1	131,2	250	1,91
			2	148,2	300	2,02
			3	192,5	350	1,82
			4	120,3	250	2,08
			5	147,4	300	2,04
263-282	136	156	6	171,7	350	2,04
			1	127,3	250	1,96
			2	161,2	300	1,86
			3	206,7	350	1,69
			4	139,2	250	1,80
			5	162,0	300	1,85
301-320	156	176	6	204,6	350	1,71
			1	122,3	250	2,04
			2	154,8	300	1,94
			3	180,2	350	1,94
			4	120,2	250	2,08
			5	151,7	300	1,98
339-358	176	196	6	175,3	350	2,00
			1	106,4	250	2,35
			2	138,9	300	2,16
			3	176,9	350	1,98
			4	116,1	250	2,15
			5	150,2	300	2,00
			6	173,3	350	2,02

A.2 Taula: Pultsu ultrasonikoen entseguren emaitza guztiak (norabide bertikala).

B ERANSKINA

Metodo magnetikoa

B.1 Metodo magnetikoaren emaitza osoak

Atal honetan, laginengan egin diren neurketak biltzen dira, kubikoak nahiz prismatikoak izan. 5.4 Atalean aipatu den legez, lagin kubikoetan hiru neurketa burutu dira, ardatz nagusi bakoitzeko bana; lagin prismatikoetan, X ardatz edo luzetarako norabidean soilik neurtu daitekeelarik, hura osatzen duten laurden bakoitzean.

Ondoren, hainbat neurketa errepikatu egin dira lagin kubikoengan tresneria eta haril ezberdinekin, balioen arteko erlazioa erkatuz azterketa parametroen aldakuntzaren arabera. Nabarmendu beharra dago, ezin izan direla hurrenez hurrengo neurketak probeta guztietan egin, haietako zenbait entsegu suntsitzai-leetan erabili baitira eta, hortaz, ondorengo neurketetarako baliaezinak gertatu dira.

Taula B.1 – aurreko orrialdetik dator

Zbk.	1. Harila			2. Harila			3. Harila					
	ΔL_x (H)	ΔL_y (H)	ΔL_z (H)	ΔL_m (H)	ΔL_x (H)	ΔL_y (H)	ΔL_z (H)	ΔL_m (H)	ΔL_x (H)	ΔL_y (H)	ΔL_z (H)	ΔL_m (H)
90	0,034	0,014	0,021	0,02	0,078	0,047	0,037	0,05	0,024	0,007	0,008	0,01
94	0,066	0,011	0,005	0,03	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
95	0,000	0,000	0,000	0,00	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
96	0,000	0,000	0,000	0,00	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
97	0,356	0,231	0,372	0,32	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
101	1,085	0,413	0,532	0,68	1,203	0,460	0,594	0,75	0,729	0,283	0,358	0,46
102	N/A	N/A	N/A	N/A	0,967	0,319	0,540	0,61	N/A	N/A	N/A	N/A
104	0,719	0,209	0,350	0,43	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
105	0,680	0,183	0,297	0,39	0,737	0,186	0,320	0,41	0,447	0,125	0,198	0,26
107	0,218	0,076	0,148	0,15	0,284	0,097	0,146	0,16	0,147	0,049	0,092	0,1
108	0,212	0,055	0,122	0,13	0,274	0,087	0,125	0,16	0,140	0,034	0,079	0,08
109	0,227	0,067	0,124	0,14	0,294	0,107	0,186	0,20	0,149	0,040	0,083	0,09
110	0,177	0,048	0,130	0,12	0,229	0,070	0,165	0,16	0,113	0,038	0,076	0,08
113	0,006	0,008	0,007	0,01	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
114	0,001	0,001	0,003	0,00	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
116	0,441	0,313	0,676	0,48	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
120	0,821	0,217	0,328	0,46	0,933	0,238	0,341	0,50	0,549	0,142	0,206	0,3
121	0,902	0,342	0,636	0,63	1,001	0,375	0,703	0,69	0,608	0,230	0,424	0,42
123	0,815	0,273	0,404	0,50	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
124	0,680	0,270	0,545	0,50	0,780	0,320	0,620	0,57	0,473	0,180	0,383	0,35
126	0,354	0,159	0,352	0,29	0,405	0,215	0,402	0,34	0,228	0,108	0,231	0,19
127	0,342	0,178	0,357	0,29	0,348	0,197	0,358	0,30	0,221	0,114	0,233	0,19
128	0,348	0,178	0,354	0,31	0,455	0,185	0,390	0,34	0,255	0,134	0,232	0,21
132	0,064	0,014	0,017	0,03	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
135	0,642	0,404	0,617	0,55	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
139	0,878	0,199	0,456	0,51	0,928	0,238	0,488	0,55	0,591	0,134	0,296	0,34
140	1,282	0,225	0,421	0,64	1,378	0,258	0,413	0,68	0,872	0,147	0,279	0,43
142	1,023	0,363	0,500	0,63	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
143	N/A	N/A	N/A	N/A	0,992	0,434	0,464	0,63	N/A	N/A	N/A	N/A
145	0,654	0,325	0,534	0,50	0,704	0,373	0,609	0,56	0,437	0,221	0,351	0,34
146	0,542	0,274	0,446	0,42	0,604	0,260	0,480	0,45	0,354	0,181	0,296	0,28
147	0,415	0,256	0,485	0,39	0,488	0,296	0,586	0,46	0,270	0,170	0,322	0,25
151	0,058	0,028	0,048	0,05	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
154	0,568	0,465	0,965	0,67	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
158	0,759	0,173	0,482	0,47	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
159	N/A	N/A	N/A	N/A	0,933	0,282	0,212	0,48	N/A	N/A	N/A	N/A
161	1,249	0,273	0,370	0,63	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
162	1,131	0,287	0,468	0,63	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
164	0,790	0,355	0,655	0,60	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
165	0,815	0,302	0,646	0,59	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
166	0,636	0,304	0,668	0,54	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

Hurrengo orrialdean jarraitzen du

Taula B.1 – aurreko orrialdetik dator

Zbk.	1. Harila			2. Harila			3. Harila		
	ΔLx (H)	ΔLy (H)	ΔLz (H)	ΔLx (H)	ΔLy (H)	ΔLz (H)	ΔLx (H)	ΔLy (H)	ΔLz (H)
167	0,674	0,324	0,546	0,52	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
170	0,025	0,018	0,131	0,06	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
171	0,000	0,000	0,010	0,00	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
173	0,667	0,242	0,810	0,57	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
177	0,294	0,141	0,767	0,40	0,431	0,163	0,831	0,208	0,093
178	N/A	N/A	N/A	N/A	1,342	0,250	0,424	0,67	N/A
180	1,263	0,243	0,393	0,63	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
181	1,323	0,257	0,399	0,66	1,501	0,306	0,430	0,75	0,269
183	0,937	0,315	0,440	0,56	1,050	0,321	0,475	0,62	0,199
184	0,964	0,326	0,597	0,63	1,089	0,361	0,543	0,66	0,220
185	0,915	0,306	0,500	0,57	1,005	0,332	0,585	0,64	0,207
186	1,062	0,286	0,489	0,61	1,204	0,358	0,558	0,71	0,198
189	0,090	0,066	0,255	0,14	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
190	0,030	0,009	0,012	0,02	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
192	0,726	0,286	1,064	0,69	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
197	N/A	N/A	N/A	N/A	1,116	0,302	0,426	0,62	N/A
199	0,780	0,206	0,618	0,54	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
202	1,089	0,301	0,623	0,67	1,156	0,316	0,701	0,72	0,197
203	1,096	0,260	0,603	0,65	1,133	0,303	0,662	0,70	0,224
204	1,092	0,331	0,553	0,66	1,160	0,318	0,553	0,68	0,183
208	0,171	0,185	0,495	0,28	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
211	0,390	0,177	0,813	0,46	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
215	0,281	0,193	1,076	0,52	0,317	0,243	1,201	0,59	0,127
216	N/A	N/A	N/A	N/A	1,065	0,245	0,592	0,63	N/A
218	0,916	0,234	0,477	0,54	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
219	0,818	0,250	0,322	0,46	0,892	0,286	0,350	0,51	0,225
221	1,071	0,205	0,468	0,58	1,233	0,255	0,550	0,68	0,133
222	0,700	0,228	0,532	0,49	0,733	0,236	0,553	0,51	0,147
223	0,814	0,288	0,666	0,59	0,876	0,305	0,774	0,65	0,448
224	0,755	0,251	0,809	0,61	0,881	0,298	0,901	0,69	0,192
227	0,255	0,229	0,681	0,39	N/A	N/A	N/A	N/A	0,502
230	0,418	0,225	0,879	0,51	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
234	0,331	0,174	0,831	0,45	0,381	0,231	0,927	0,51	0,116
235	N/A	N/A	N/A	N/A	0,683	0,260	0,686	0,54	N/A
237	0,631	0,154	0,464	0,42	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
238	0,807	0,158	0,425	0,46	0,940	0,167	0,337	0,48	0,105
240	0,890	0,203	0,418	0,50	0,980	0,273	0,442	0,57	0,278
241	0,873	0,206	0,456	0,51	0,929	0,192	0,477	0,53	0,139
242	0,804	0,299	0,654	0,59	0,708	0,308	0,598	0,54	0,192
243	0,883	0,225	0,618	0,58	0,971	0,290	0,637	0,63	0,153
246	0,302	0,204	0,740	0,42	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
249	0,787	0,404	1,306	0,83	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

Hurrengo orrialdetan jarraitzen du

Taula B.1 – aurreko orrialdetik dator

Zbk.	1. Harila			2. Harila			3. Harila			
	ΔL_x (H)	ΔL_y (H)	ΔL_z (H)	ΔL_x (H)	ΔL_y (H)	ΔL_z (H)	ΔL_x (H)	ΔL_y (H)	ΔL_z (H)	
253	N/A	N/A	N/A	0,616	0,733	0,748	0,70	N/A	N/A	N/A
254	N/A	N/A	N/A	0,815	0,168	0,617	0,53	N/A	N/A	N/A
256	0,792	0,224	0,645	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
257	N/A	N/A	N/A	1,424	0,222	0,546	0,73	N/A	N/A	N/A
259	1,172	0,204	0,300	1,348	0,222	0,393	0,65	0,785	0,131	0,203
260	1,178	0,229	0,418	1,356	0,299	0,451	0,70	0,784	0,154	0,276
261	1,258	0,245	0,521	1,346	0,270	0,494	0,70	0,829	0,156	0,348
262	N/A	N/A	N/A	1,108	0,288	0,531	0,64	N/A	N/A	N/A
265	0,302	0,240	0,709	0,42	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
268	1,033	0,456	1,100	0,86	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
272	0,888	0,183	0,258	0,44	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
273	0,953	0,202	0,311	0,49	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
275	0,992	0,215	0,340	0,52	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
276	1,016	0,160	0,201	0,46	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
278	1,291	0,275	0,304	0,62	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
279	1,401	0,272	0,231	0,64	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
280	1,423	0,279	0,316	0,67	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
281	1,075	0,209	0,282	0,52	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
284	0,401	0,237	0,756	0,47	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
285	0,013	0,005	0,101	0,04	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
287	0,668	0,343	0,548	0,52	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
291	0,849	0,315	0,491	0,55	0,951	0,382	0,574	0,64	0,581	0,218
292	1,014	0,384	0,317	0,70	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
294	1,408	0,315	0,304	0,71	1,576	0,377	0,289	0,75	1,009	0,209
295	1,519	0,315	0,304	0,71	1,576	0,377	0,289	0,75	1,009	0,209
297	1,504	0,413	0,236	0,72	1,652	0,479	0,252	0,79	1,009	0,275
298	1,445	0,372	0,220	0,68	1,610	0,411	0,304	0,78	0,962	0,245
299	1,655	0,437	0,254	0,78	1,822	0,475	0,281	0,86	1,101	0,297
300	1,524	0,413	0,252	0,73	1,702	0,447	0,227	0,79	1,023	0,283
303	0,285	0,254	0,665	0,40	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
306	1,076	0,497	0,590	0,72	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
311	N/A	N/A	N/A	1,270	0,375	0,737	0,79	N/A	N/A	N/A
313	1,492	0,416	0,417	0,78	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
316	1,128	0,297	0,282	0,57	1,251	0,316	0,325	0,63	0,744	0,200
317	0,852	0,297	0,358	0,50	0,970	0,271	0,376	0,54	0,563	0,197
318	1,140	0,375	0,244	0,59	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
322	0,315	0,135	0,233	0,23	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
323	0,000	0,000	0,000	0,00	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
325	1,563	0,806	0,868	1,08	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
329	1,403	0,607	0,628	0,88	1,548	0,628	0,750	0,98	0,927	0,409
330	N/A	N/A	N/A	1,573	0,604	0,457	0,88	1,109	0,368	0,294
332	1,420	0,385	0,253	0,69	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

Hurrengo orrialdetan jarraitzen du

Taula B.1 – aurreko orrialdetik dator

Zbk.	1. Harila			2. Harila			3. Harila				
	ΔLx (H)	ΔLy (H)	ΔLz (H)	ΔLx (H)	ΔLy (H)	ΔLz (H)	ΔLx (H)	ΔLy (H)	ΔLz (H)		
333	1,441	0,366	0,292	1,599	0,425	0,323	0,78	0,954	0,241	0,200	0,46
335	1,398	0,304	0,247	1,543	0,318	0,305	0,72	0,936	0,209	0,161	0,44
336	1,415	0,324	0,258	1,444	0,366	0,304	0,71	0,934	0,217	0,180	0,44
337	1,378	0,342	0,247	1,544	0,395	0,327	0,76	0,917	0,234	0,163	0,44
338	1,410	0,318	0,241	1,594	0,361	0,247	0,73	0,931	0,213	0,161	0,44
341	0,000	0,001	0,000	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
344	1,221	0,661	1,713	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
348	1,517	0,439	0,296	1,657	0,472	0,353	0,83	1,024	0,298	0,201	0,51
349	N/A	N/A	N/A	1,803	0,463	0,302	0,86	N/A	N/A	N/A	N/A
351	1,570	0,495	0,257	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
352	1,532	0,354	0,212	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
354	1,807	0,414	0,256	1,950	0,455	0,276	0,89	1,208	0,274	0,172	0,55
355	1,455	0,353	0,224	1,617	0,392	0,283	0,76	0,964	0,233	0,147	0,45
356	1,580	0,456	0,264	1,795	0,485	0,285	0,86	1,046	0,307	0,180	0,51
357	1,441	0,426	0,222	1,603	0,484	0,277	0,79	0,960	0,291	0,148	0,47
360	0,087	0,012	0,010	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
363	1,169	0,582	0,960	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
367	N/A	N/A	N/A	1,735	0,244	0,248	0,74	N/A	N/A	N/A	N/A
368	N/A	N/A	N/A	2,064	0,636	0,312	1,00	N/A	N/A	N/A	N/A
370	1,809	0,507	0,257	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
371	N/A	N/A	N/A	1,920	0,662	0,292	0,96	N/A	N/A	N/A	N/A
373	1,526	0,409	0,227	1,678	0,474	0,291	0,81	1,019	0,278	0,157	0,48
374	1,528	0,411	0,213	1,660	0,395	0,221	0,76	1,013	0,274	0,145	0,48
375	1,519	0,469	0,252	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
376	N/A	N/A	N/A	1,385	0,526	0,676	0,86	N/A	N/A	N/A	N/A
379	0,859	0,483	0,375	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

B.1 Taula: Lagin kubikoen induktantzia aldatuta baldintza balioren zerrenda haril ezberdinetan.

Lagin prismatikoak aldiz, bi fasetan neurtu dira, erdiz erdi 1. eta 3. harilak erabiliz. Lagin prismatiko guztien luzeraren laurden bakoitzean egin diren neurketak laburbiltzen ditu B.2 Taulak, 1. harilaz zein 3. harilarekin egin, balio guztiak eskala berdinerara eraldatuz (1. harila).

Batera, zenbait lagin prismatiko moztuak izan dira eta berriro neurtuak kubikoak bailiran, neurketen baldintzak berriz, aldatuz. Tarte bakoitzeko zuntzen norabideaz gain, zuntzen dentsitatea doi-doi zehatz daiteke horrela, alboko tarteen eragin edo gehikuntza erantsia aintzat hartu gabe. Neurketa hauek 2. harilarekin burutu dira, mozketa aurreko balioekin erlazionatuz.

Halaber, lagin laurden bereziren neurketak, proposatzen den ebazpide matrizialarekin erka litezke, zuntzen zenbatekoa jatorrizko laginean egindako neurketen bitartez jotzeko.

Kasu honetan eta egin diren neurketa guztientzako, 1. Harilaren arabera lortu diren induktantzia aldakuntza neurketak hartu dira erreferentzi eskala gisa.

Zbk.	Lagin prismatikoa			Lagin kubikoa**			Balio analitikoak					
	$\Delta L_{0/15}$ (H)	$\Delta L_{15/30}$ (H)	$\Delta L_{30/45}$ (H)	$\Delta L_{45/60}$ (H)	$\Delta L_{0/15}$ (H)	$\Delta L_{15/30}$ (H)	$\Delta L_{30/45}$ (H)	$\Delta L_{45/60}$ (H)	$\Delta L_{0/15}$ (H)	$\Delta L_{15/30}$ (H)	$\Delta L_{30/45}$ (H)	$\Delta L_{45/60}$ (H)
61	0.171	0.172	0.228	0.199	N/A	N/A	N/A	N/A	0.154	0.136	0.195	0.184
62	0.181	0.107	0.133	0.159	N/A	N/A	N/A	N/A	0.173	0.086	0.114	0.152
68	0.067	0.076	0.063	0.034	N/A	N/A	N/A	N/A	0.064	0.073	0.061	0.034
73	0.000	0.000	0.000	0.000	N/A	N/A	N/A	N/A	0.000	0.000	0.000	0.000
79*	0.660	1.421	1.181	0.548	N/A	N/A	N/A	N/A	0.503	1.236	0.977	0.430
80*	0.603	0.385	0.356	0.236	N/A	N/A	N/A	N/A	0.277	0.322	0.318	0.215
81*	0.286	0.497	0.815	0.923	N/A	N/A	N/A	N/A	0.376	0.456	0.756	0.857
84*	0.687	0.687	0.485	0.431	N/A	N/A	N/A	N/A	0.633	0.600	0.401	0.399
87*	0.339	0.329	0.301	0.165	N/A	N/A	N/A	N/A	0.325	0.312	0.290	0.161
92*	0.000	0.000	0.000	0.000	N/A	N/A	N/A	N/A	0.000	0.000	0.000	0.000
93*	0.000	0.000	0.000	0.000	N/A	N/A	N/A	N/A	0.000	0.000	0.000	0.000
98	1.475	1.331	0.951	0.732	N/A	N/A	N/A	N/A	1.401	1.184	0.828	0.676
99	0.860	0.733	0.549	0.604	N/A	N/A	N/A	N/A	0.814	0.599	0.432	0.551
100	1.070	1.375	1.363	1.018	N/A	N/A	N/A	N/A	0.958	1.157	1.148	0.890
103	1.114	1.121	0.883	0.996	N/A	N/A	N/A	N/A	1.021	0.960	0.705	0.932
106	0.517	0.543	0.502	0.377	N/A	N/A	N/A	N/A	0.461	0.450	0.420	0.340
111	0.174	0.148	0.077	0.027	N/A	N/A	N/A	N/A	0.159	0.140	0.074	0.027
112	0.014	0.010	0.005	0.000	N/A	N/A	N/A	N/A	0.014	0.008	0.000	0.000
117*	0.858	0.822	0.768	0.528	N/A	N/A	N/A	N/A	0.829	0.739	0.700	0.482
118*	0.818	0.850	0.813	1.016	N/A	N/A	N/A	N/A	0.780	0.743	0.696	0.952
119*	1.219	1.442	1.426	1.571	N/A	N/A	N/A	N/A	1.109	1.242	1.190	1.469
122*	1.124	1.327	1.060	0.827	N/A	N/A	N/A	N/A	1.018	1.144	0.877	0.739
125*	0.634	0.664	0.580	0.572	N/A	N/A	N/A	N/A	0.591	0.590	0.504	0.540
130*	0.323	0.344	0.255	0.206	N/A	N/A	N/A	N/A	0.304	0.311	0.224	0.192
131*	0.100	0.067	0.022	0.000	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
137	0.711	1.106	1.348	1.000	N/A	N/A	N/A	N/A	0.622	0.923	1.159	0.868
138	1.005	1.361	1.391	1.270	N/A	N/A	N/A	N/A	0.868	1.143	1.146	1.164
144	1.181	1.106	1.092	0.969	N/A	N/A	N/A	N/A	1.086	0.910	0.916	0.884
149	0.520	0.496	0.454	0.375	N/A	N/A	N/A	N/A	0.472	0.412	0.379	0.343
155*	1.031	0.500	0.653	0.518	N/A	N/A	N/A	N/A	1.000	0.394	0.592	0.482
156*	0.967	1.361	1.538	1.105	N/A	N/A	N/A	N/A	0.863	1.164	1.346	0.985
157*	0.936	1.218	1.218	1.121	N/A	N/A	N/A	N/A	0.856	0.878	1.057	1.041
160*	1.149	1.339	1.617	1.367	N/A	N/A	N/A	N/A	1.051	1.123	1.410	1.243
163*	1.138	1.525	1.506	1.322	N/A	N/A	N/A	N/A	1.204	1.307	1.286	1.209
168*	0.813	0.823	0.576	0.486	N/A	N/A	N/A	N/A	0.751	0.716	0.475	0.444
169*	0.335	0.357	0.390	0.198	N/A	N/A	N/A	N/A	0.309	0.297	0.347	0.164
174	1.162	0.731	0.558	0.880	1.092	0.533	0.367	0.836	1.113	0.566	0.420	0.831
175	0.802	1.223	1.332	1.348	N/A	N/A	N/A	N/A	0.674	1.030	1.088	1.255
176	1.102	1.330	1.345	0.790	N/A	N/A	N/A	N/A	0.987	1.132	1.185	0.696
179	1.035	1.336	1.641	1.297	0.918	1.098	1.255	1.225	0.934	1.121	1.432	1.164

Hurrengo orrialdean jarraitzen du

* 3. harilarekin neurtua eta 1. harilaren erreferentzia eskalara eraldatua

** 2. harilarekin neurtua eta 1. harilaren erreferentzia eskalara eraldatua

Taula B.2 – aurreko orrialdetik dator

Zbk.	Lagin prismatikoa			Lagin kubikoa**			Balio analitikoak			
	$\Delta_{L_{0/15}}$ (H)	$\Delta_{L_{15/30}}$ (H)	$\Delta_{L_{30/45}}$ (H)	$\Delta_{L_{0/15}}$ (H)	$\Delta_{L_{15/30}}$ (H)	$\Delta_{L_{30/45}}$ (H)	$\Delta_{L_{0/15}}$ (H)	$\Delta_{L_{15/30}}$ (H)	$\Delta_{L_{30/45}}$ (H)	
182	1.544	1.614	1.447	1.398	1.329	1.075	1.892	1.335	1.208	0.903
187	1.190	1.137	0.854	0.718	N/A	N/A	N/A	1.077	0.935	0.672
188	0.529	0.515	0.492	0.316	N/A	N/A	N/A	0.473	0.421	0.420
194*	1.551	1.551	1.486	1.412	N/A	N/A	N/A	1.355	1.299	1.306
195*	1.230	1.430	1.326	0.654	N/A	N/A	N/A	1.124	1.241	1.181
201*	1.425	1.229	0.801	0.996	N/A	N/A	N/A	1.334	1.062	0.630
206*	1.102	1.222	1.069	0.885	N/A	N/A	N/A	1.042	1.082	0.806
213*	1.286	1.756	1.605	1.367	N/A	N/A	N/A	1.116	1.502	1.325
214	0.975	0.880	0.947	0.381	N/A	N/A	N/A	0.872	0.701	0.856
220	0.948	1.072	1.293	1.159	N/A	N/A	N/A	0.846	0.858	1.081
225	0.895	1.070	1.073	1.037	N/A	N/A	N/A	0.809	0.906	0.894
231*	0.644	0.728	1.250	1.204	N/A	N/A	N/A	0.601	0.601	1.124
232*	1.335	1.700	1.357	1.223	N/A	N/A	N/A	1.213	1.512	1.133
233*	0.810	0.327	0.536	0.459	N/A	N/A	N/A	0.792	0.217	0.483
236*	1.007	0.952	0.847	0.761	N/A	N/A	N/A	0.937	0.808	0.716
244*	1.425	1.664	1.205	0.876	N/A	N/A	N/A	1.297	1.460	1.006
245*	0.822	1.002	0.781	0.710	N/A	N/A	N/A	0.744	0.881	0.648
250	0.699	0.840	0.950	1.110	0.636	0.657	0.830	0.650	0.709	0.797
251	1.519	1.499	1.146	0.849	N/A	N/A	N/A	1.406	1.281	0.957
252	0.397	0.442	0.763	0.702	N/A	N/A	N/A	0.368	0.348	0.674
255	0.740	0.994	1.007	0.986	0.602	0.819	0.804	0.672	0.867	0.859
258	1.157	1.401	1.525	1.405	1.144	1.121	1.170	1.028	1.165	1.275
263	1.202	1.058	1.078	0.981	N/A	N/A	N/A	1.122	0.854	0.904
264	0.587	0.615	0.675	0.574	N/A	N/A	N/A	0.536	0.510	0.577
269*	0.459	0.877	0.411	1.005	N/A	N/A	N/A	0.374	0.818	0.231
270*	1.437	1.310	0.614	0.669	N/A	N/A	N/A	1.353	1.129	0.444
271*	0.812	1.113	0.763	1.009	N/A	N/A	N/A	0.719	1.000	0.592
274*	0.765	1.375	1.381	1.082	N/A	N/A	N/A	0.628	1.197	1.186
277*	1.260	1.448	1.657	1.635	N/A	N/A	N/A	1.157	1.239	1.435
282*	1.214	1.418	1.252	1.052	N/A	N/A	N/A	1.109	1.238	1.070
283*	0.719	0.562	0.629	0.474	N/A	N/A	N/A	0.678	0.468	0.559
289	1.201	0.646	0.834	1.049	N/A	N/A	N/A	1.145	0.432	0.659
290	1.288	1.406	0.872	0.630	N/A	N/A	N/A	1.141	1.214	0.688
296	1.736	2.046	1.913	1.726	N/A	N/A	N/A	1.550	1.729	1.580
301	2.004	2.070	2.046	1.704	N/A	N/A	N/A	1.808	1.706	1.710
307*	0.734	0.910	0.665	0.897	N/A	N/A	N/A	0.592	0.772	0.432
308*	0.573	0.528	0.993	1.183	N/A	N/A	N/A	0.541	0.412	0.870
309*	1.110	1.113	0.947	1.121	N/A	N/A	N/A	1.023	0.961	0.764
312*	1.275	1.771	1.984	1.743	N/A	N/A	N/A	1.174	1.579	1.624

* 3. harilarekin neurtua eta 1. harilaren erreferentzia eskalara eraldatua
 ** 2. harilarekin neurtua eta 1. harilaren erreferentzia eskalara eraldatua

Hurrengo orrialdean jarraitzen du

Taula B.2 – aurreko orrialdetik dator

Zbk.	Lagin prismatikoa			Lagin kubikoa**			Balio analitikoak							
	$\Delta L_{0,15}$ (H)	$\Delta L_{15/30}$ (H)	$\Delta L_{30/45}$ (H)	$\Delta L_{0,15}$ (H)	$\Delta L_{15/30}$ (H)	$\Delta L_{30/45}$ (H)	$\Delta L_{0,15}$ (H)	$\Delta L_{15/30}$ (H)	$\Delta L_{30/45}$ (H)					
315*	1.552	1.204	1.657	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
320*	1.123	1.278	1.421	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
321*	1.195	1.275	0.917	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
326	0.693	0.993	0.940	0.923	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0.543	0.809	0.701
327	0.802	1.142	1.081	0.886	0.684	0.966	0.856	0.769	0.675	0.961	0.883	0.801	0.853	0.801
328	1.068	1.737	2.213	1.969	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0.915	1.446	1.879
331	1.832	1.795	1.674	1.437	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	1.627	1.466	1.365
334	1.563	1.840	1.859	1.444	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	1.390	1.548	1.584
339	1.659	1.781	1.633	1.246	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	1.529	1.536	1.411
340	0.964	0.756	0.413	0.133	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0.900	0.562	0.305
346*	2.462	2.679	2.507	2.277	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	2.290	2.328	2.157
347*	2.179	2.683	2.328	1.969	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	1.973	2.337	1.965
353*	1.880	2.202	2.165	1.923	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	1.734	1.927	1.883
358*	1.688	1.489	1.196	0.793	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	1.590	1.309	1.059
365	2.491	2.793	3.230	2.235	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	2.249	2.277	2.800
366	2.269	2.369	2.364	1.924	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	2.060	1.966	1.939
372	2.038	2.218	2.245	1.890	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	1.855	1.884	1.927
377	1.498	1.729	1.446	1.132	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	1.340	1.459	1.182
														1.006

B.2 Taula: Lagin prismatikoen induktantzia aldakuntzia balioen zerrenda.

* 3. hariarekin neurtua eta 1. hariaren erreferentzia eskalara eraldatua

** 2. hariarekin neurtua eta 1. hariaren erreferentzia eskalara eraldatua

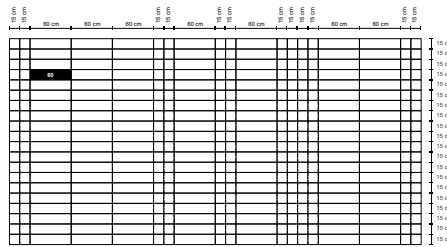
Flexotrakzio entseguak

C.1 Emaidza eta diagramak

Eranskin honetan, 6.6 Atalean deskribatu den bezala, entseguetan erabili diren lagin prismatiko guztien emaitzak azaltzen dira. Entsegu mota honen ohiko dispertsioaz gain, emaitzek elkarren oso ezberdinak ematen dute. Alabaina, lagin bakoitzean hauteman diren zuntz dentsitate alde arinak eta zuntz norabide ezberdinak masaren mugimendua dela eta, laginen azterketa puntuaz gain, uniformeak ez diren erresistentzia balioak dakartzala nabarmendu beharra dago.

Entsegu mota honentzako, lagin fabrikazioari buruz araudiak ezartzen dituen neurriekiko alde arinak dituzte horma moztetik erauzi diren laginek. Mozketari ekiteko erabili den diamante diskoak kentzen duen hormigoi lodiera txikia, luzera eta altuerari dagokionez batetik, eta enkofratuaren kokapen okerrak, hormaren altueran zehar, lodieran kausatu duen aldakortasuna bestetik, horren arrazoiak dira, ondorioz neurri ezberdinetako laginak lortuz.

Entseguaren ezarpenak 500 mm-ko tartea zehazten du berme puntuen artean eta 25 mm-ko hozka sakonera. Laginen luzera ezberdintasunek ez dute eragin handiegirik ikerketa honetan, bermeen arteko tartea konstantea baita kasu guztientzako, piezen hegalak arinki aldatuz. Era berean, hozkaren sakonera ezberdina izan da lagin bakoitzean, 125 mm-ko altuera konstantea izan dezaten guztiek ahuldutako ebakiduran, deformazioak bertan neurtuko direlarik. Ebakidura erresistentea eta laginaren apurketa gertatuko den plano teorikoak, hortaz, antzeko ezaugarri geometrikoak ditu. Laginaren zabalera da bateratu ez den aldagai bakarra, kontutan hartuko delarik askotariko tentsioak (proporzionaltasun muga eta hondar-erresistentziak) zehazteko, aldaketa esangarririk eragingo ez duten arren.

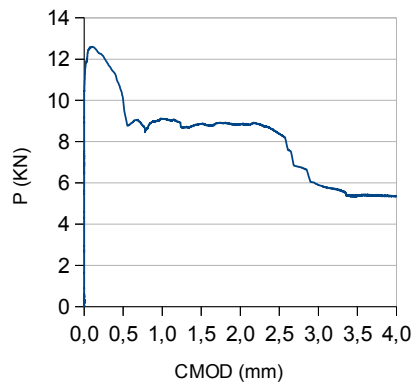


(a) Laginaren kokapena

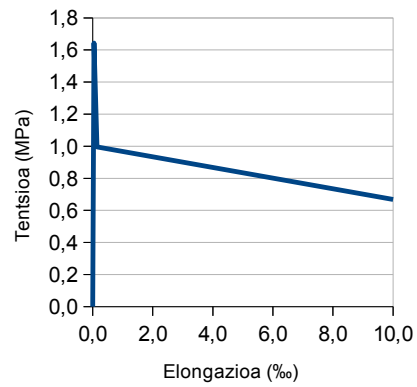


(b) Laginaren irudia

Lagin zbk.		Luzera (mm)	Zabalera (mm)	Altuera (mm)	Zuntz kopurua haustura planoan	
60		N/A	N/A	N/A	N/A	
		$L_{0/15}$ (H)	$L_{15/30}$ (H)	$L_{30/45}$ (H)	$L_{45/60}$ (H)	
		N/A	N/A	N/A	N/A	
F_L (KN)	F_1 (KN)	F_2 (KN)	F_3 (KN)	F_4 (KN)	α_{pre}	α_{post}
12.41	10.03	8.86	8.37	5.37	N/A	N/A
$f_{ct,fl}$ (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)	α_{pre}	α_{post}
4.11	3.32	2.93	2.77	1.78	N/A	N/A

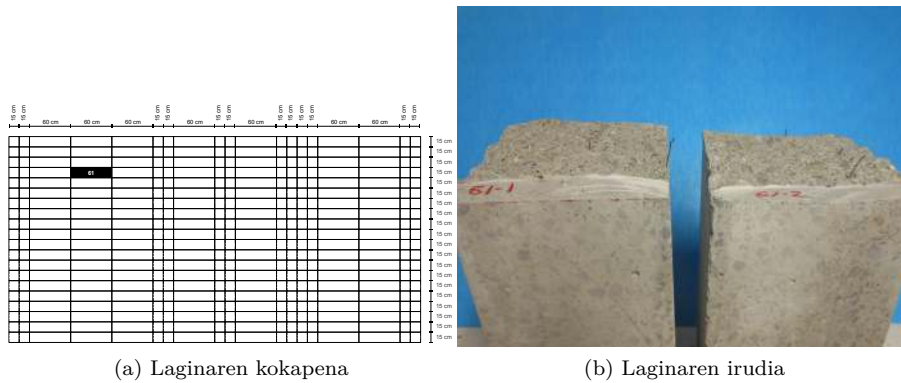


(a) P-CMOD

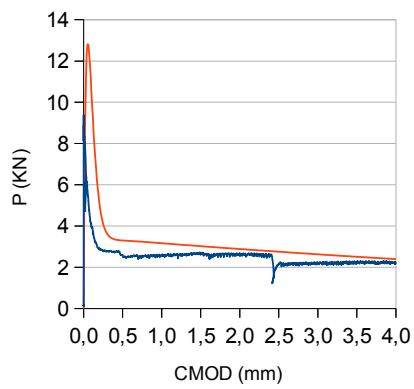


(b) $\sigma - \epsilon$

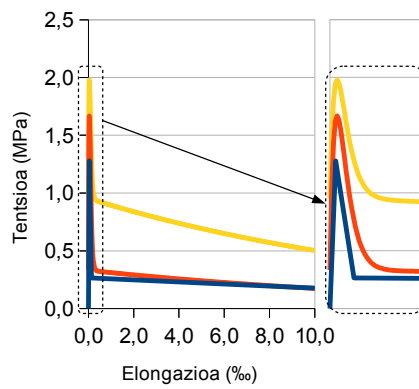
Oharrak:



Lagin zbk.		Luzera (mm)	Zabalera (mm)	Altuera (mm)	Zuntz kopurua haustura planoan	
61		595	141	140	10	
		$L_{0/15}$ (H)	$L_{15/30}$ (H)	$L_{30/45}$ (H)	$L_{45/60}$ (H)	
		0.171	0.172	0.276	0.199	
F_L (KN)	F_1 (KN)	F_2 (KN)	F_3 (KN)	F_4 (KN)	α_{pre}	α_{post}
9.38	2.59	2.65	2.14	2.23	1.001	100
$f_{ct,fl}$ (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)	α_{pre}	α_{post}
3.19	0.88	0.90	0.73	0.76	1.001	10

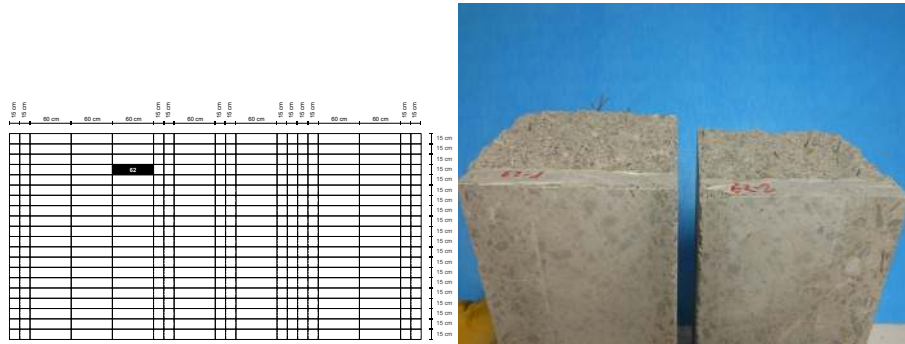


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

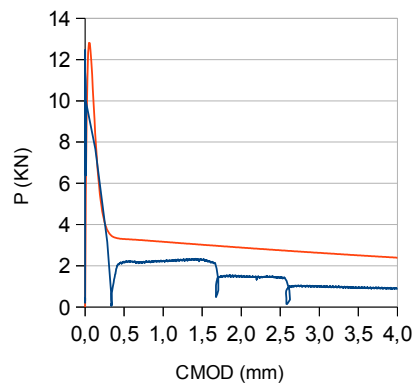
Oharrak:



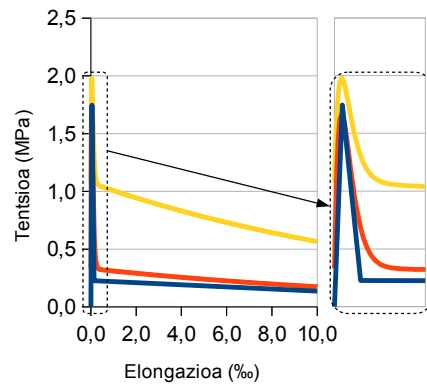
(a) Laginaren kokapena

(b) Laginaren irudia

Lagin zbk.		Luzera (mm)	Zabalera (mm)	Altuera (mm)	Zuntz kopurua haustura planoan	
62		595	137	143	7	
		$L_{0/15}$ (H)	$L_{15/30}$ (H)	$L_{30/45}$ (H)	$L_{45/60}$ (H)	
		0.181	0.107	0.13	0.159	
F_L (KN)	F_1 (KN)	F_2 (KN)	F_3 (KN)	F_4 (KN)	α_{pre}	α_{post}
12.46	2.16	2.28	1.41	0.96	1.001	100
$f_{ct,fl}$ (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)	α_{pre}	α_{post}
4.37	0.76	0.80	0.49	0.34	1.001	10

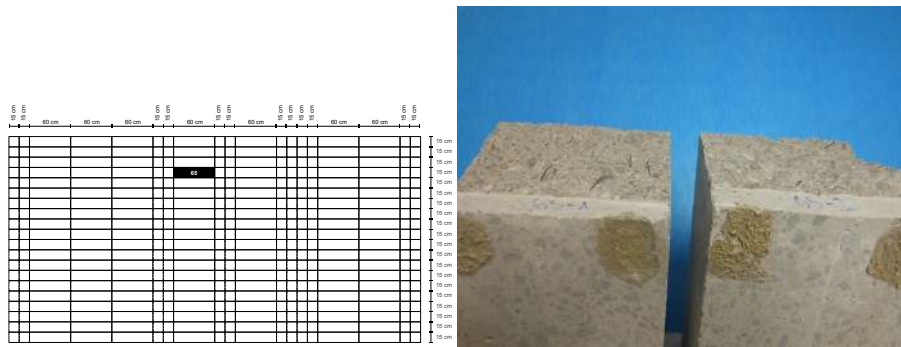


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

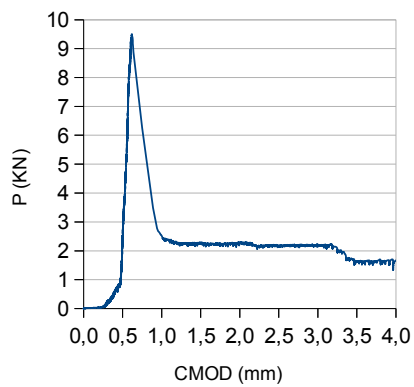
Oharrak:



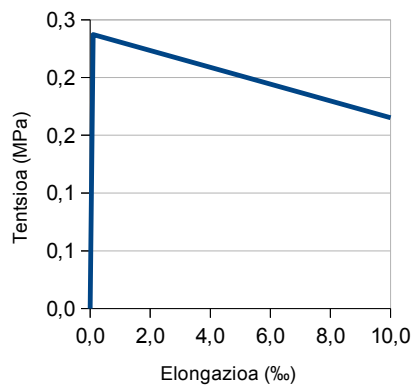
(a) Laginaren kokapena

(b) Laginaren irudia

Lagin zbk.		Luzera (mm)	Zabalera (mm)	Altuera (mm)	Zuntz kopurua haustura planoan	
65			137		8	
		$L_{0/15}$ (H)	$L_{15/30}$ (H)	$L_{30/45}$ (H)	$L_{45/60}$ (H)	
		N/A	N/A	N/A	N/A	
F_L (KN)	F_1 (KN)	F_2 (KN)	F_3 (KN)	F_4 (KN)	α_{pre}	α_{post}
9.51	2.39	2.26	2.15	1.75	N/A	N/A
$f_{ct,fl}$ (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)	α_{pre}	α_{post}
3.51	0.79	0.75	0.71	0.55	N/A	N/A



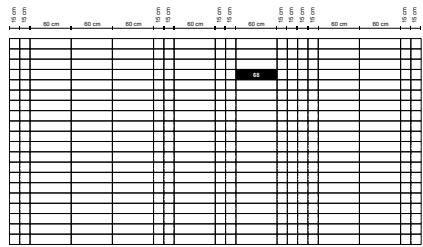
(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

Oharrak:

Makina eta laginaren arteko kokatze ezegokia dela eta, atzerapenez aplikatu da karga. Grafikoa jatorrirantz desplazatu da LOP-aren balio lortzeko.

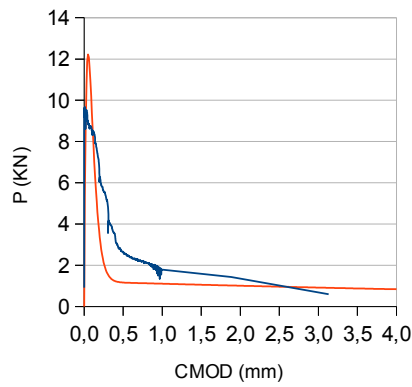


(a) Laginaren kokapena

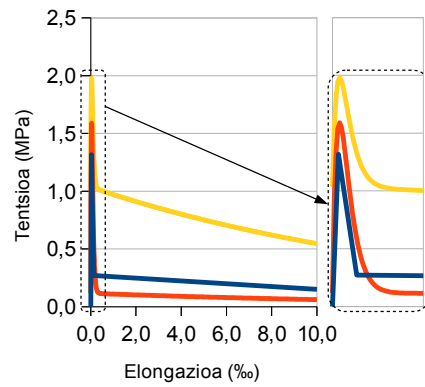


(b) Laginaren irudia

Lagin zbk.		Luzera (mm)	Zabalera (mm)	Altuera (mm)	Zuntz kopurua haustura planoan	
68		593	143	150	3	
		$L_{0/15}$ (H)	$L_{15/30}$ (H)	$L_{30/45}$ (H)	$L_{45/60}$ (H)	
		0.067	0.076	0.063	0.034	
F_L (KN)	F_1 (KN)	F_2 (KN)	F_3 (KN)	F_4 (KN)	α_{pre}	α_{post}
9.67	2.65	1.79	1.43	0.60	1.001	100
$f_{ct,fl}$ (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)	α_{pre}	α_{post}
3.29	0.90	0.61	0.49	0.20	1.001	10

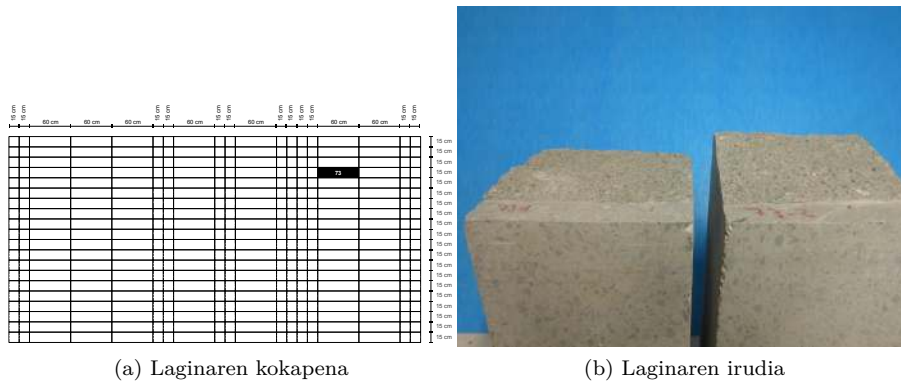


(a) P-CMOD

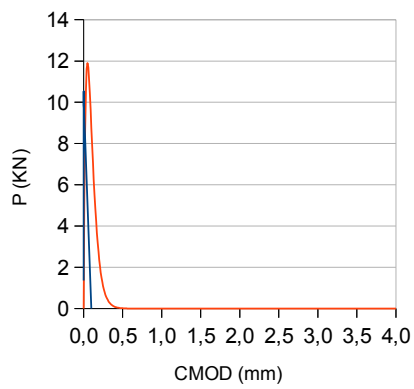


(b) $\sigma - \epsilon$

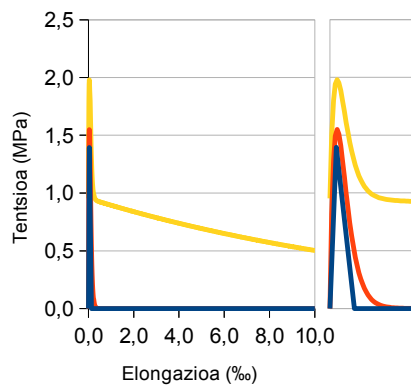
Oharrak:



Lagin zbk.		Luzera (mm)	Zabalera (mm)	Altuera (mm)	Zuntz kopurua haustura planoan	
73		591	142	147	0	
		$L_{0/15}$ (H)	$L_{15/30}$ (H)	$L_{30/45}$ (H)	$L_{45/60}$ (H)	
		0.000	0.000	0.000	0.000	
F_L (KN)	F_1 (KN)	F_2 (KN)	F_3 (KN)	F_4 (KN)	α_{pre}	α_{post}
10.53	9.61	0.00	0.00	0.00	1.001	100
$f_{ct,fl}$ (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)	α_{pre}	α_{post}
3.49	0.00	0.00	0.00	0.00	1.001	10

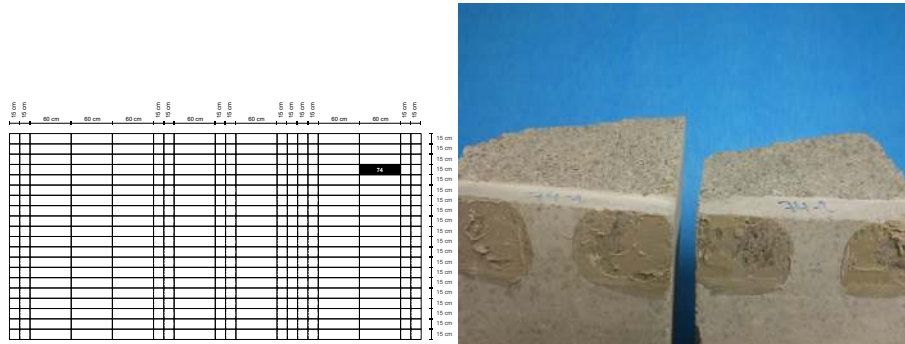


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

Oharrak:



(a) Laginaren kokapena

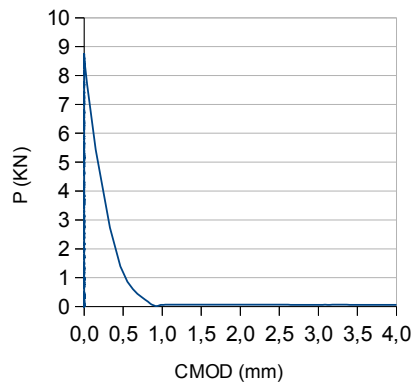
(b) Laginaren irudia

Lagin zbk.

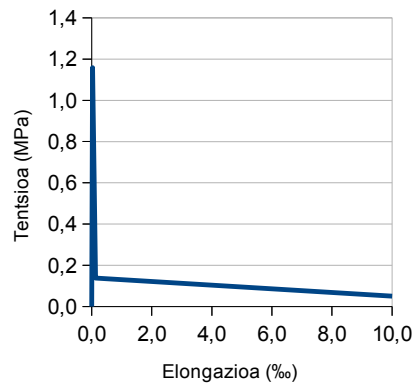
74

Luzera (mm)	Zabalera (mm)	Altuera (mm)	Zuntz kopurua haustura planoan
144			
$L_{0/15}$ (H)	$L_{15/30}$ (H)	$L_{30/45}$ (H)	$L_{45/60}$ (H)
N/A	N/A	N/A	N/A

F_L (KN)	F_1 (KN)	F_2 (KN)	F_3 (KN)	F_4 (KN)	α_{pre}	α_{post}
8.75	1.39	0.06	0.00	0.00	N/A	N/A
$f_{ct,fl}$ (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)	α_{pre}	α_{post}
2.90	0.46	0.02	0.00	0.00	N/A	N/A

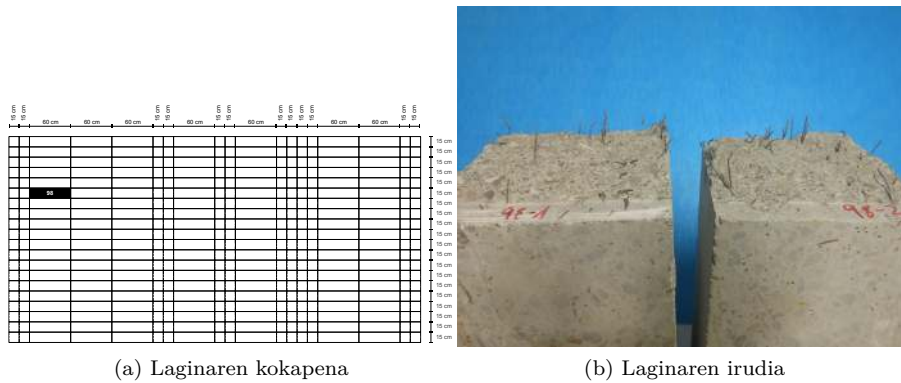


(a) P-CMOD

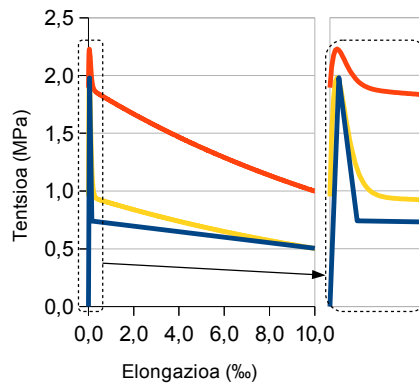
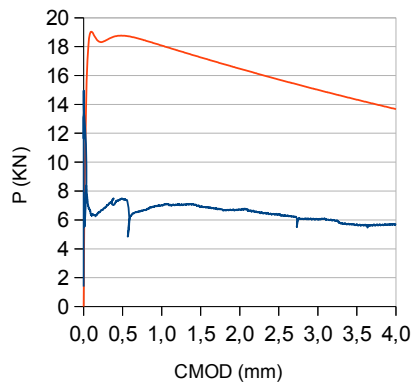


(b) $\sigma - \epsilon$

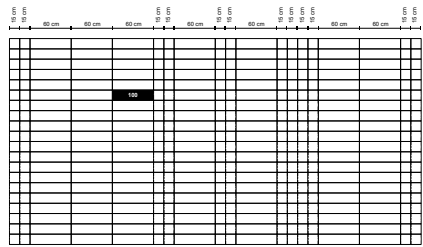
Oharrak:



Lagin zbk.		Luzera (mm)	Zabalera (mm)	Altuera (mm)	Zuntz kopurua haustura planoan	
98		597	144	150	70	
		$L_{0/15}$ (H)	$L_{15/30}$ (H)	$L_{30/45}$ (H)	$L_{45/60}$ (H)	
		1.475	1.331	0.951	0.732	
F_L (KN)	F_1 (KN)	F_2 (KN)	F_3 (KN)	F_4 (KN)	α_{pre}	α_{post}
14.95	7.46	6.92	6.39	5.67	1.001	100
$f_{ct,fl}$ (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)	α_{pre}	α_{post}
4.95	2.47	2.29	2.12	1.88	1.001	10



Oharrak:

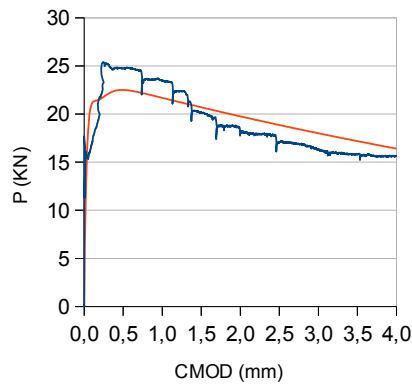


(a) Laginaren kokapena

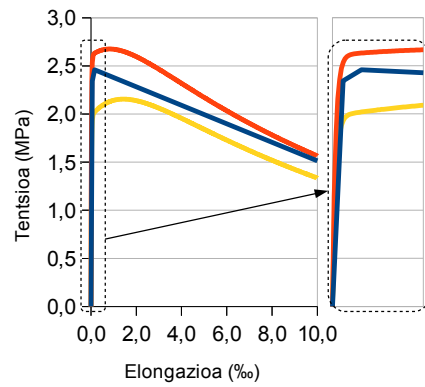


(b) Laginaren irudia

Lagin zbk.		Luzera (mm)	Zabalera (mm)	Altuera (mm)	Zuntz kopurua haustura planoan	
100		600	139	152	87	
		$L_{0/15}$ (H)	$L_{15/30}$ (H)	$L_{30/45}$ (H)	$L_{45/60}$ (H)	
		1.070	1.375	1.363	1.018	
F_L (KN)	F_1 (KN)	F_2 (KN)	F_3 (KN)	F_4 (KN)	α_{pre}	α_{post}
17.69	24.76	20.17	17.06	15.84	1.001	100
$f_{ct,fl}$ (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)	α_{pre}	α_{post}
5.86	8.20	6.68	5.65	5.24	100	10

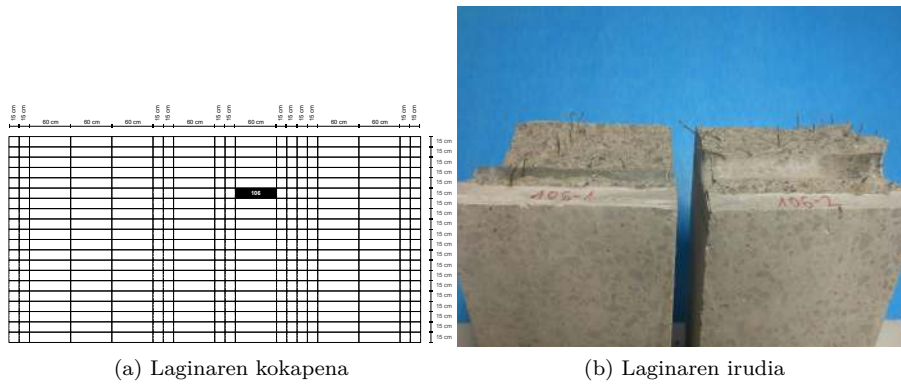


(a) P-CMOD

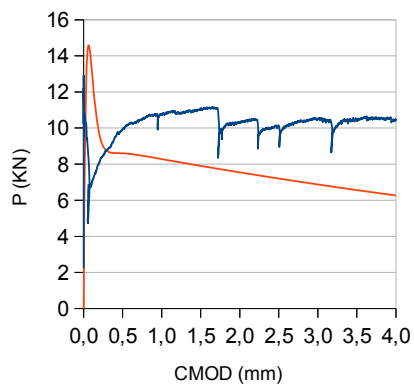


(b) $\sigma - \epsilon$

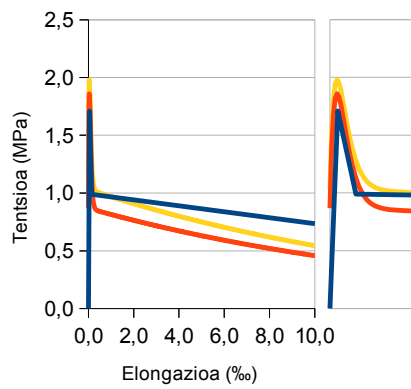
Oharrak:



Lagin zbk.		Luzera (mm)	Zabalera (mm)	Altuera (mm)	Zuntz kopurua haustura planoan	
106		594	143	147	26	
		$L_{0/15}$ (H)	$L_{15/30}$ (H)	$L_{30/45}$ (H)	$L_{45/60}$ (H)	
		0.517	0.543	0.502	0.377	
F_L (KN)	F_1 (KN)	F_2 (KN)	F_3 (KN)	F_4 (KN)	α_{pre}	α_{post}
12.91	9.96	11.06	10.14	10.42	1.001	100
$f_{ct,fl}$ (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)	α_{pre}	α_{post}
4.27	3.30	3.66	3.36	3.45	1.001	10

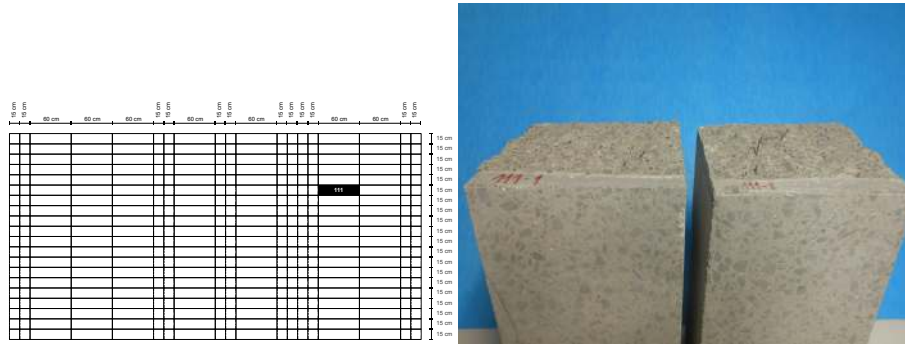


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

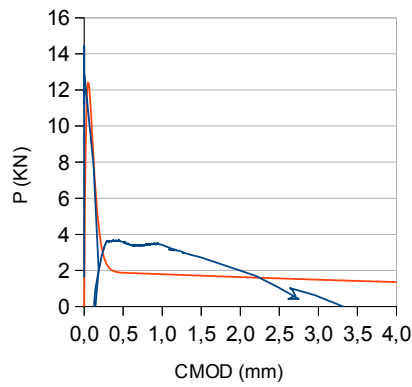
Oharrak:



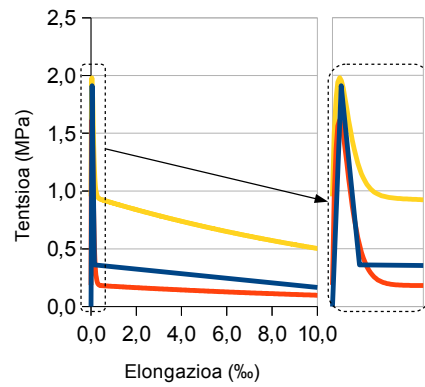
(a) Laginaren kokapena

(b) Laginaren irudia

Lagin zbk.		Luzera (mm)	Zabalera (mm)	Altuera (mm)	Zuntz kopurua haustura planoan	
111		596	146	144	N/A	
		$L_{0/15}$ (H)	$L_{15/30}$ (H)	$L_{30/45}$ (H)	$L_{45/60}$ (H)	
		0.174	0.148	0.077	0.027	
F_L (KN)	F_1 (KN)	F_2 (KN)	F_3 (KN)	F_4 (KN)	α_{pre}	α_{post}
14.43	3.63	2.73	1.05	0.00	1.001	100
$f_{ct,fl}$ (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)	α_{pre}	α_{post}
4.78	1.20	0.90	0.35	0.00	1.001	10

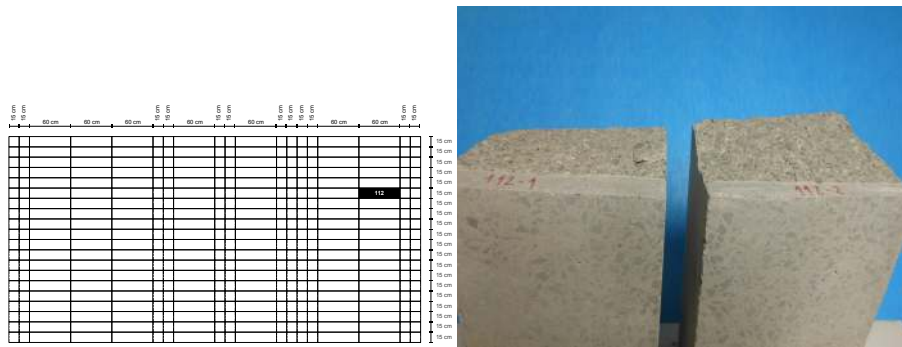


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

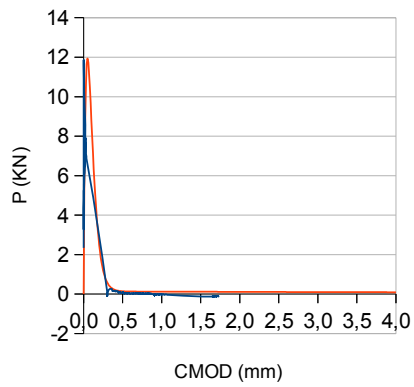
Oharrak:



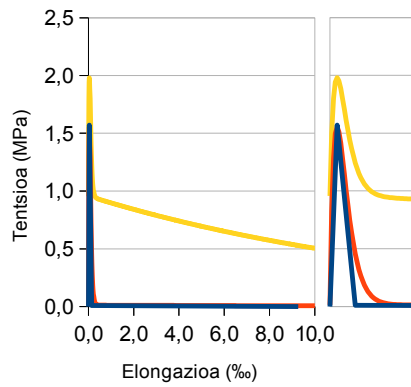
(a) Laginaren kokapena

(b) Laginaren irudia

Lagin zbk.		Luzera (mm)	Zabalera (mm)	Altuera (mm)	Zuntz kopurua haustura planoan	
112		601	147	142	0	
		$L_{0/15}$ (H)	$L_{15/30}$ (H)	$L_{30/45}$ (H)	$L_{45/60}$ (H)	
		0.014	0.010	0.006	0.000	
F_L (KN)	F_1 (KN)	F_2 (KN)	F_3 (KN)	F_4 (KN)	α_{pre}	α_{post}
11.86	0.09	0.00	0.00	0.00	1.001	100
$f_{ct,fl}$ (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)	α_{pre}	α_{post}
3.93	0.03	0.00	0.00	0.00	1.001	10

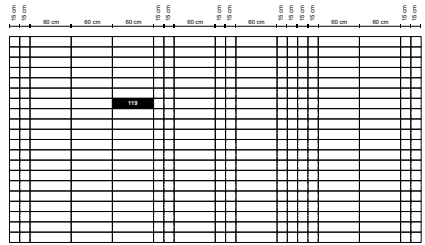


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

Oharrak:

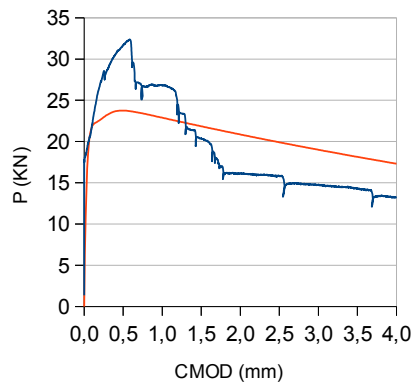


(a) Laginaren kokapena

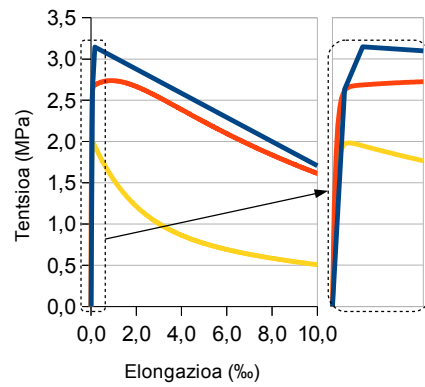


(b) Laginaren irudia

Lagin zbk.	Luzera (mm)	Zabalera (mm)	Altuera (mm)	Zuntz kopurua haustura planoan
119	$L_{0/15}$ (H)	$L_{15/30}$ (H)	$L_{30/45}$ (H)	107
	1.219	1.442	1.426	$L_{45/60}$ (H)
	F_L (KN)	F_1 (KN)	F_2 (KN)	F_3 (KN)
	19.86	31.68	20.37	15.84
	F_4 (KN)	α_{pre}	α_{post}	
	14.29	1.001	100	
	$f_{ct,fl}$ (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)
	6.57	10.49	6.74	5.24
		$f_{R,4}$ (MPa)	α_{pre}	α_{post}
		4.73	100	10

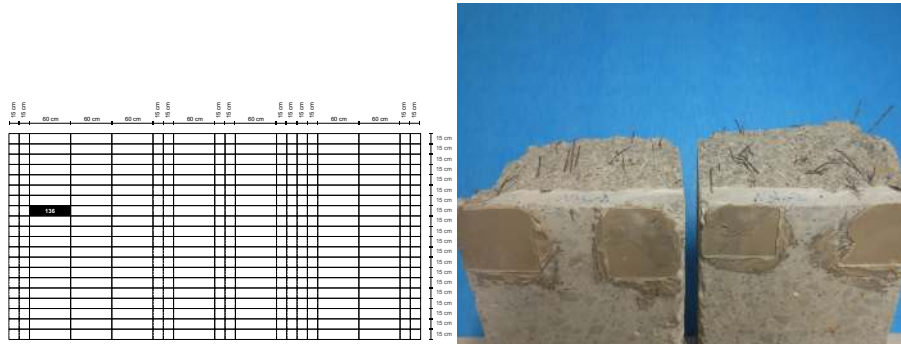


(a) P-CMOD

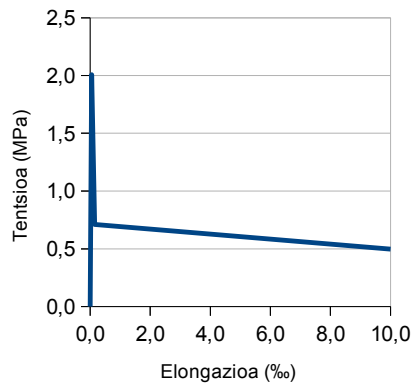
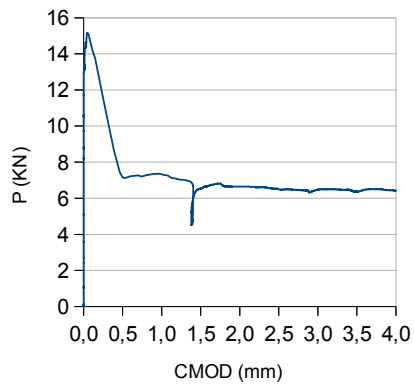


(b) $\sigma - \epsilon$

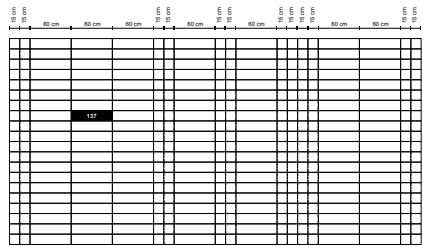
Oharrak:



Lagin zbk.		Luzera (mm)	Zabalera (mm)	Altuera (mm)	Zuntz kopurua haustura planoan	
136			142		26	
		$L_{0/15}$ (H)	$L_{15/30}$ (H)	$L_{30/45}$ (H)	$L_{45/60}$ (H)	
		N/A	N/A	N/A	N/A	
F_L (KN)	F_1 (KN)	F_2 (KN)	F_3 (KN)	F_4 (KN)	α_{pre}	α_{post}
15.16	7.15	6.54	6.56	6.56	N/A	N/A
$f_{ct, f1}$ (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)	α_{pre}	α_{post}
5.02	2.37	2.17	2.15	2.11	N/A	N/A



Oharrak:

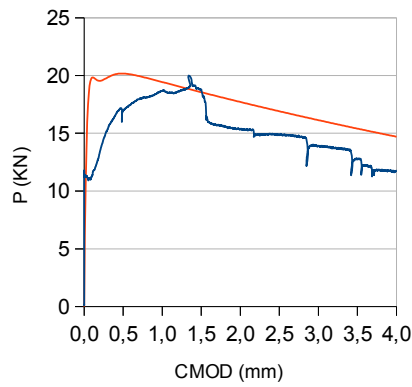


(a) Laginaren kokapena

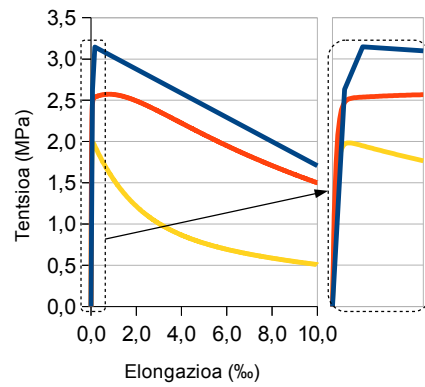


(b) Laginaren irudia

Lagin zbk.	Luzera (mm)	Zabalera (mm)	Altuera (mm)	Zuntz kopurua haustura planoan			
137	600	145	144	69			
	$L_{0/15}$ (H)	$L_{15/30}$ (H)	$L_{30/45}$ (H)	$L_{45/60}$ (H)			
	0.711	1.106	1.348	1.000			
	F_L (KN)	F_1 (KN)	F_2 (KN)	F_3 (KN)	F_4 (KN)	α_{pre}	α_{post}
	11.79	16.96	18.80	14.85	12.76	1.001	100
	$f_{ct,fl}$ (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)	α_{pre}	α_{post}
	3.90	5.61	6.22	4.92	4.22	100	10

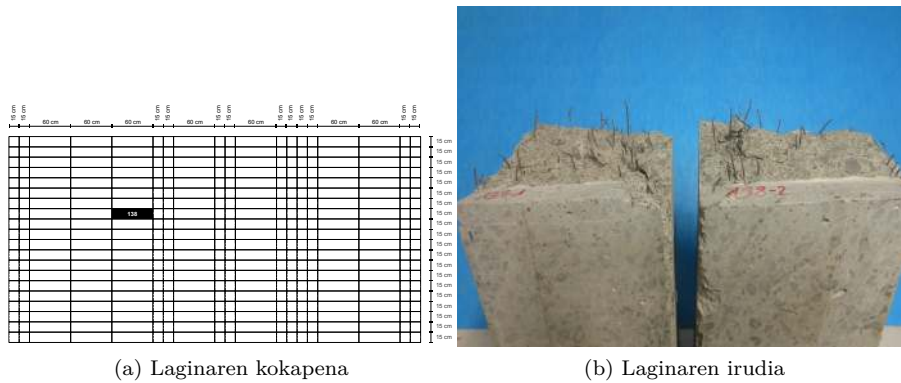


(a) P-CMOD

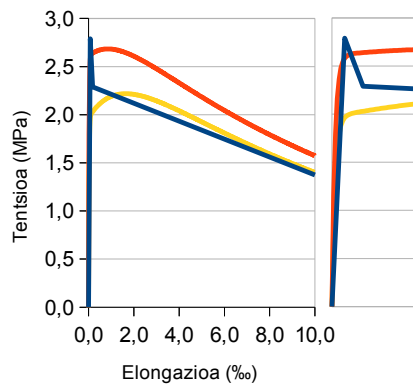
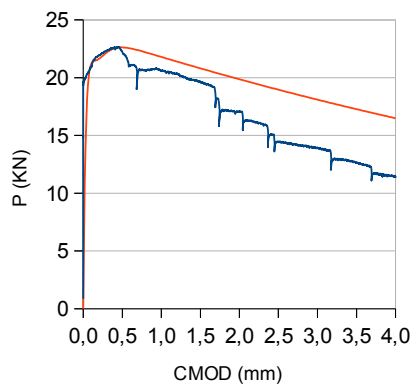


(b) $\sigma - \epsilon$

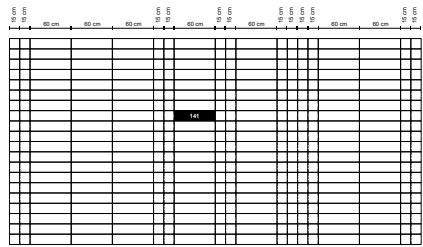
Oharrak:



Lagin zbk.		Luzera (mm)	Zabalera (mm)	Altuera (mm)	Zuntz kopurua haustura planoan	
138		597	140	144	71	
		$L_{0/15}$ (H)	$L_{15/30}$ (H)	$L_{30/45}$ (H)	$L_{45/60}$ (H)	
		1.006	1.361	1.391	1.270	
F_L (KN)	F_1 (KN)	F_2 (KN)	F_3 (KN)	F_4 (KN)	α_{pre}	α_{post}
20.34	22.25	19.64	14.43	12.64		
$f_{ct, f1}$ (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)	α_{pre}	α_{post}
6.97	7.63	6.73	4.95	4.33	100	10



Oharrak:

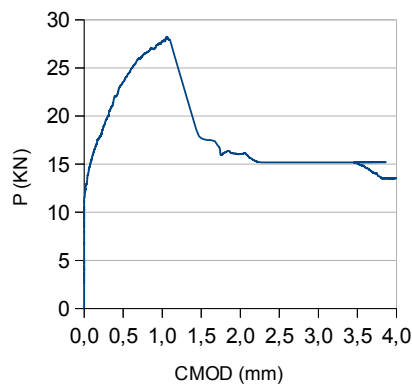


(a) Laginaren kokapena

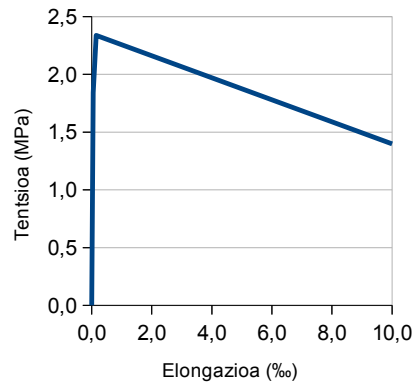


(b) Laginaren irudia

Lagin zbk.		Luzera (mm)	Zabalera (mm)	Altuera (mm)	Zuntz kopurua haustura planoan	
141		142	70			
		$L_{0/15}$ (H)	$L_{15/30}$ (H)	$L_{30/45}$ (H)	$L_{45/60}$ (H)	
		N/A	N/A	N/A	N/A	
F_L (KN)	F_1 (KN)	F_2 (KN)	F_3 (KN)	F_4 (KN)	α_{pre}	α_{post}
13.91	23.54	17.71	15.19	15.08	N/A	N/A
$f_{ct,fl}$ (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)	α_{pre}	α_{post}
4.60	7.79	5.86	5.03	4.99	N/A	N/A

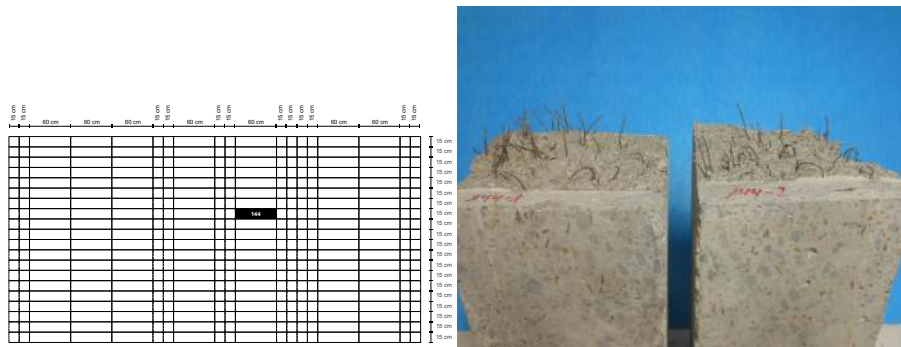


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

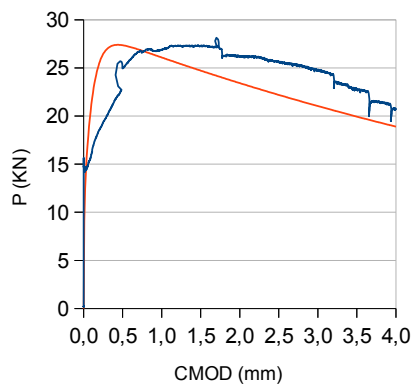
Oharrak:



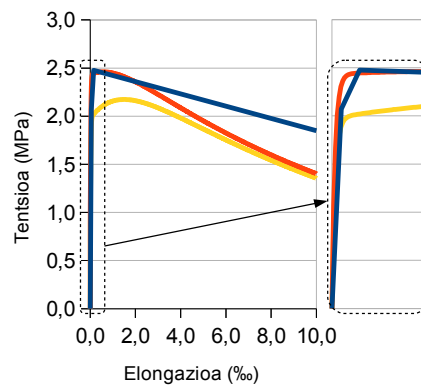
(a) Laginaren kokapena

(b) Laginaren irudia

Lagin zbk.		Luzera (mm)	Zabalera (mm)	Altuera (mm)	Zuntz kopurua haustura planoan	
144		594	145	148	85	
		$L_{0/15}$ (H)	$L_{15/30}$ (H)	$L_{30/45}$ (H)	$L_{45/60}$ (H)	
		1.181	1.106	1.092	0.969	
F_L (KN)	F_1 (KN)	F_2 (KN)	F_3 (KN)	F_4 (KN)	α_{pre}	α_{post}
15.64	24.94	27.30	25.65	22.78	1.001	100
$f_{ct,fl}$ (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)	α_{pre}	α_{post}
5.18	8.26	9.04	8.49	7.54	100	10

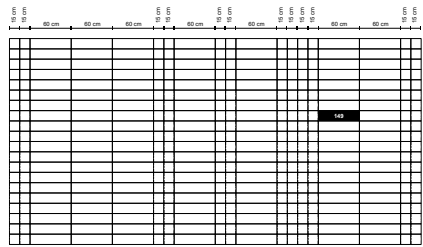


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

Oharrak:

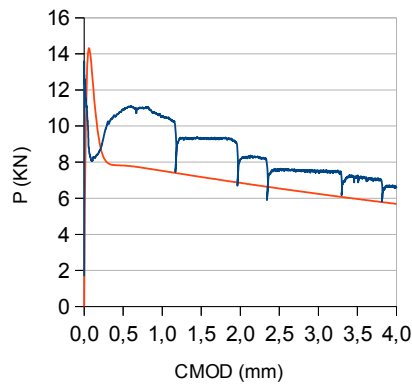


(a) Laginaren kokapena

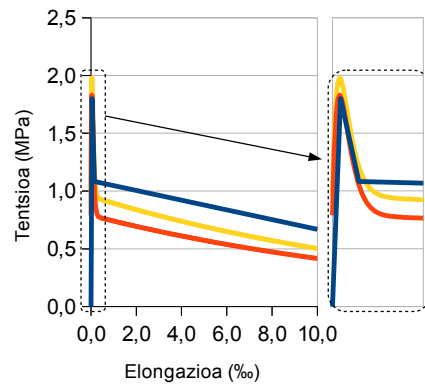


(b) Laginaren irudia

Lagin zbk.	Luzera (mm)	Zabalera (mm)	Altuera (mm)	Zuntz kopurua haustura planoan			
149	592	148	148	31			
	$L_{0/15}$ (H)	$L_{15/30}$ (H)	$L_{30/45}$ (H)	$L_{45/60}$ (H)			
	0.520	0.496	0.454	0.375			
	F_L (KN)	F_1 (KN)	F_2 (KN)	F_3 (KN)	F_4 (KN)	α_{pre}	α_{post}
	13.59	10.90	9.31	7.58	7.23	1.001	100
	$f_{ct,fl}$ (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)	α_{pre}	α_{post}
	4.50	3.61	3.08	2.51	2.39	1.001	10

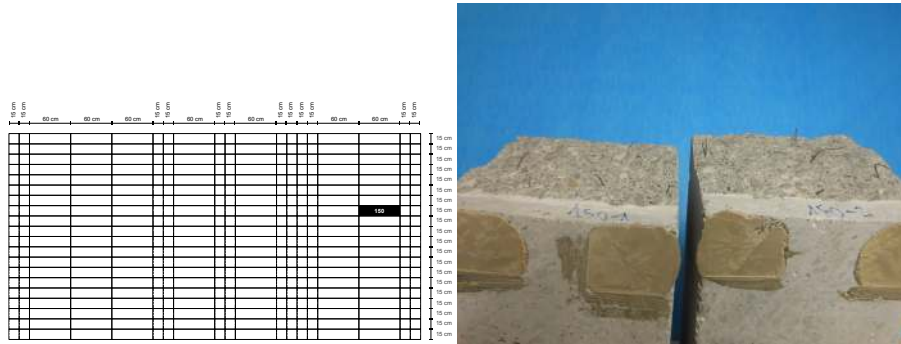


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

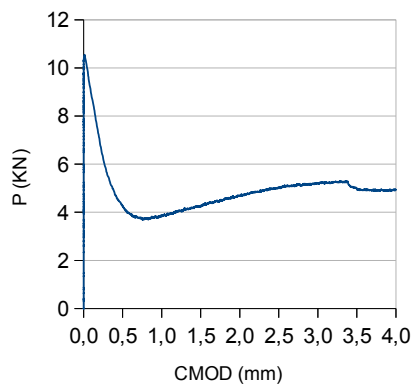
Oharrak:



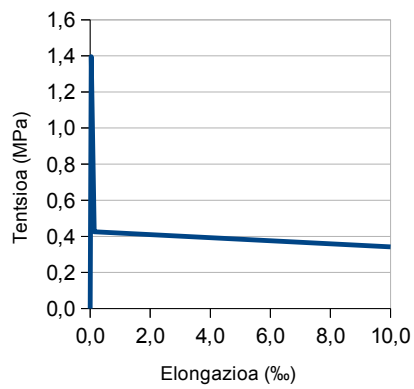
(a) Laginaren kokapena

(b) Laginaren irudia

Lagin zbk.		Luzera (mm)	Zabalera (mm)	Altuera (mm)	Zuntz kopurua haustura planoan	
150			146		12	
		$L_{0/15}$ (H)	$L_{15/30}$ (H)	$L_{30/45}$ (H)	$L_{45/60}$ (H)	
		N/A	N/A	N/A	N/A	
F_L (KN)	F_1 (KN)	F_2 (KN)	F_3 (KN)	F_4 (KN)	α_{pre}	α_{post}
10.54	4.28	4.26	5.03	4.98	N/A	N/A
$f_{ct,fl}$ (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)	α_{pre}	α_{post}
3.49	1.42	1.41	1.66	1.85	N/A	N/A

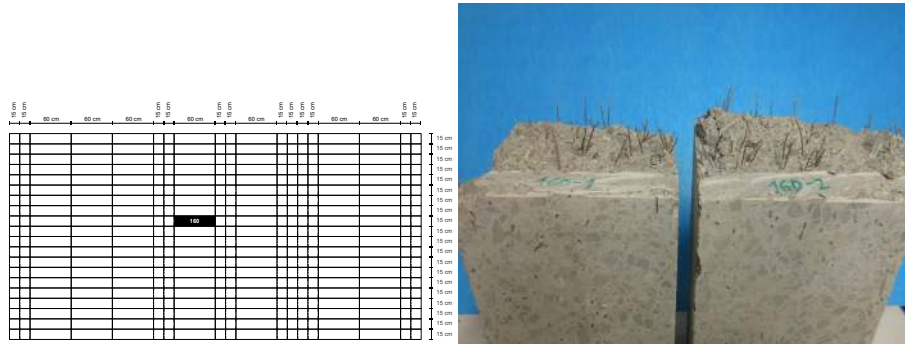


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

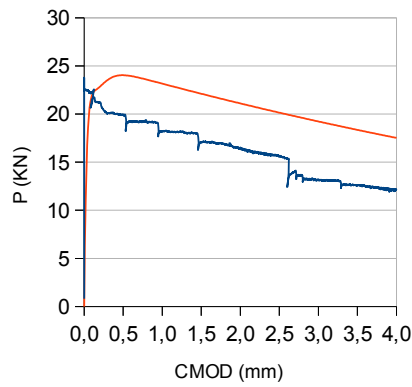
Oharrak:



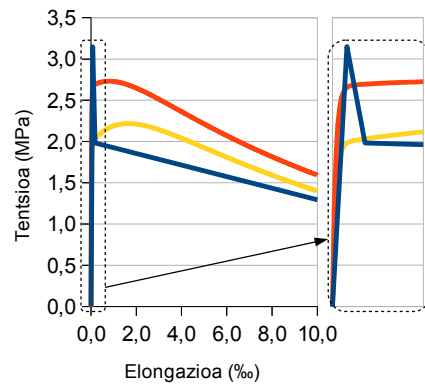
(a) Laginaren kokapena

(b) Laginaren irudia

Lagin zbk.		Luzera (mm)	Zabalera (mm)	Altuera (mm)	Zuntz kopurua haustura planoan	
160		$L_{0/15}$ (H)	$L_{15/30}$ (H)	$L_{30/45}$ (H)	$L_{45/60}$ (H)	
		1.149	1.339	1.617	1.367	
F_L (KN)	F_1 (KN)	F_2 (KN)	F_3 (KN)	F_4 (KN)	α_{pre}	α_{post}
23.78	19.96	17.06	15.64	12.60	1.001	100
$f_{ct,fl}$ (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)	α_{pre}	α_{post}
7.87	6.61	5.65	5.18	4.17	100	10

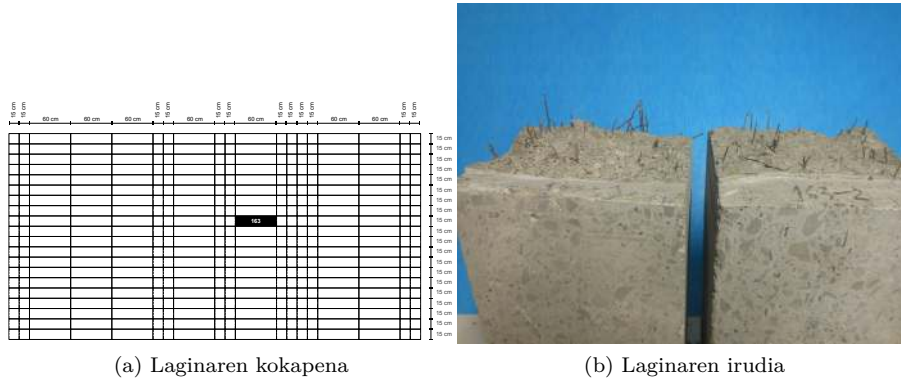


(a) P-CMOD

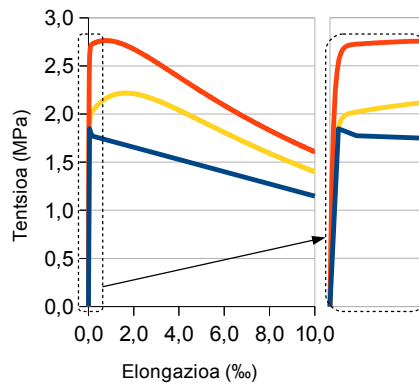
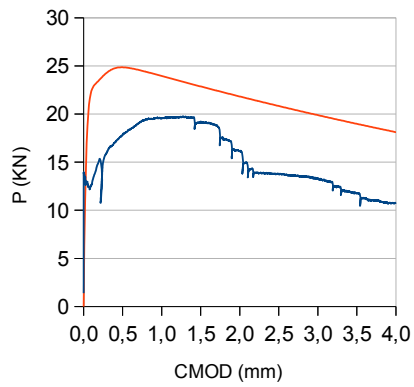


(b) $\sigma - \epsilon$

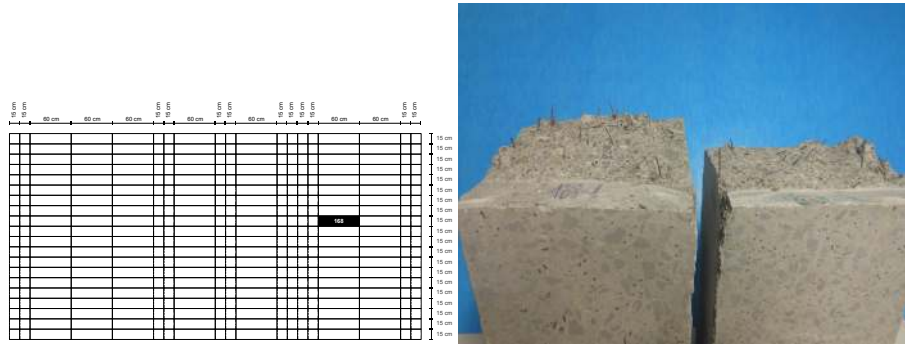
Oharrak:



Lagin zbk.		Luzera (mm)	Zabalera (mm)	Altuera (mm)	Zuntz kopurua haustura planoan	
163					80	
		$L_{0/15}$ (H)	$L_{15/30}$ (H)	$L_{30/45}$ (H)	$L_{45/60}$ (H)	
		1.318	1.525	1.506	1.322	
F_L (KN)	F_1 (KN)	F_2 (KN)	F_3 (KN)	F_4 (KN)	α_{pre}	α_{post}
13.95	17.83	19.23	13.76	11.78	1.001	100
$f_{ct,fl}$ (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)	α_{pre}	α_{post}
4.62	5.91	6.37	4.56	3.90	100	10



Oharrak:



(a) Laginaren kokapena

(b) Laginaren irudia

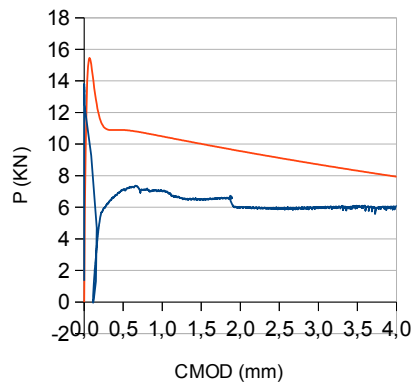
Lagin zbk.

168

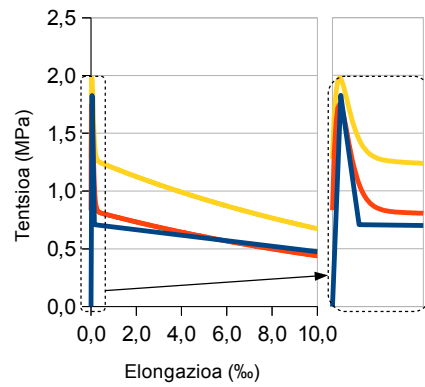
Luzera (mm)	Zabalera (mm)	Altuera (mm)	Zuntz kopurua haustura planoan
$L_{0/15}$ (H)	$L_{15/30}$ (H)	$L_{30/45}$ (H)	$L_{45/60}$ (H)
0.813	0.823	0.576	0.486

F_L (KN)	F_1 (KN)	F_2 (KN)	F_3 (KN)	F_4 (KN)	α_{pre}	α_{post}
13.80	7.11	6.51	5.95	6.03	1.001	100

$f_{ct,fl}$ (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)	α_{pre}	α_{post}
4.57	2.36	2.16	1.97	2.00	1.001	10

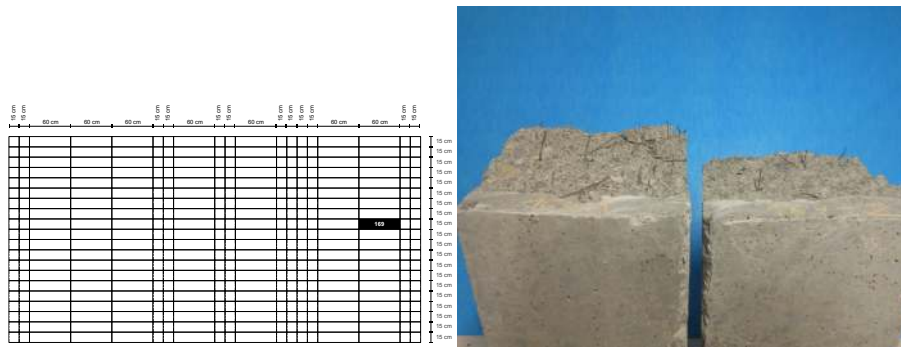


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

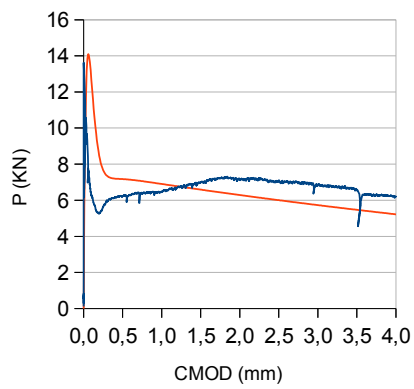
Oharrak:



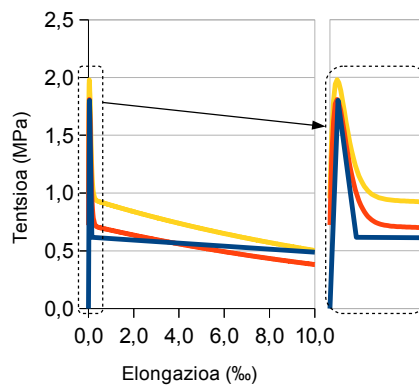
(a) Laginaren kokapena

(b) Laginaren irudia

Lagin zbk.		Luzera (mm)	Zabalera (mm)	Altuera (mm)	Zuntz kopurua haustura planoan	
169		$L_{0/15}$ (H)	$L_{15/30}$ (H)	$L_{30/45}$ (H)	35	
		0.335	0.357	0.390	0.198	
F_L (KN)	F_1 (KN)	F_2 (KN)	F_3 (KN)	F_4 (KN)	α_{pre}	α_{post}
13.61	6.21	7.01	7.09	6.58	1.001	100
$f_{ct,fl}$ (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)	α_{pre}	α_{post}
4.51	2.06	2.32	3.35	2.18	1.001	10

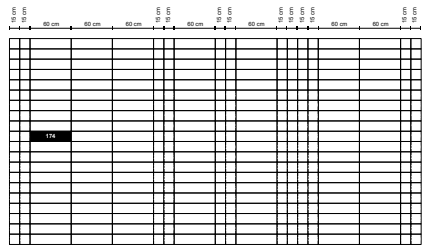


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

Oharrak:

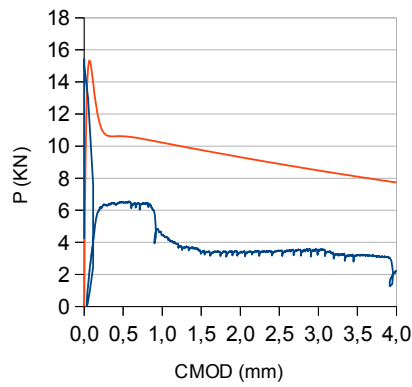


(a) Laginaren kokapena

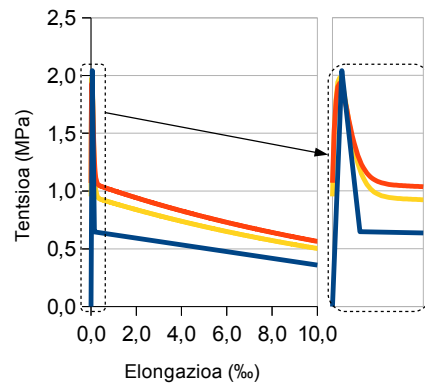


(b) Laginaren irudia

Lagin zbk.	Luzera (mm)	Zabalera (mm)	Altuera (mm)	Zuntz kopurua haustura planoan			
174	597	150	145	38			
	$L_{0/15}$ (H)	$L_{15/30}$ (H)	$L_{30/45}$ (H)	$L_{45/60}$ (H)			
	1.162	0.731	0.588	0.880			
	F_L (KN)	F_1 (KN)	F_2 (KN)	F_3 (KN)	F_4 (KN)	α_{pre}	α_{post}
	15.42	6.51	3.38	3.46	3.19	1.001	100
	$f_{ct,fl}$ (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)	α_{pre}	α_{post}
	5.10	2.16	1.12	1.15	1.06	1.001	10

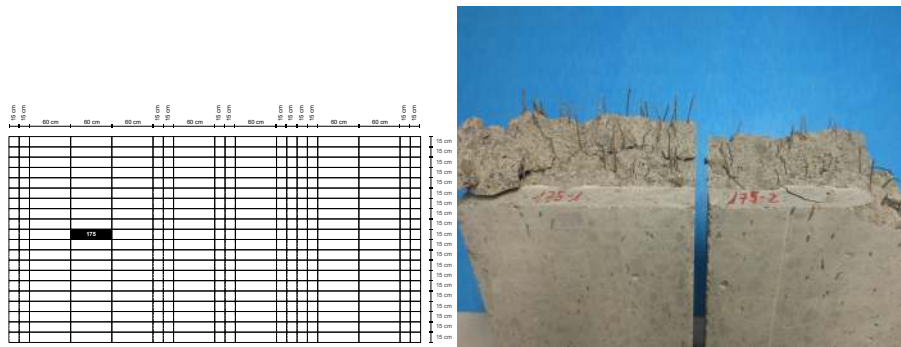


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

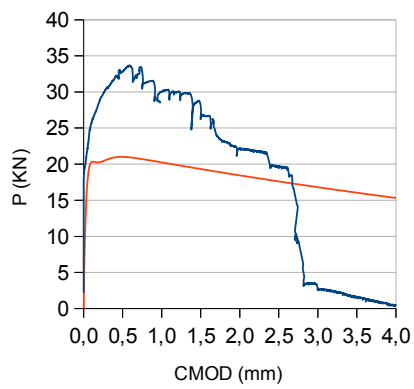
Oharrak:



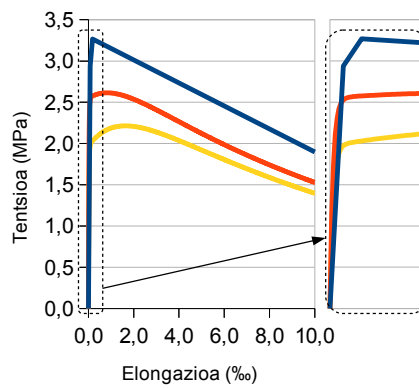
(a) Laginaren kokapena

(b) Laginaren irudia

Lagin zbk.		Luzera (mm)	Zabalera (mm)	Altuera (mm)	Zuntz kopurua haustura planoan	
175		596	149	146	86	
		$L_{0/15}$ (H)	$L_{15/30}$ (H)	$L_{30/45}$ (H)	$L_{45/60}$ (H)	
		0.602	1.223	1.332	1.348	
F_L (KN)	F_1 (KN)	F_2 (KN)	F_3 (KN)	F_4 (KN)	α_{pre}	α_{post}
22.19	32.89	28.33	19.42	1.58	1.001	100
$f_{ct,fl}$ (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)	α_{pre}	α_{post}
7.35	10.89	8.81	6.51	0.52	100	10

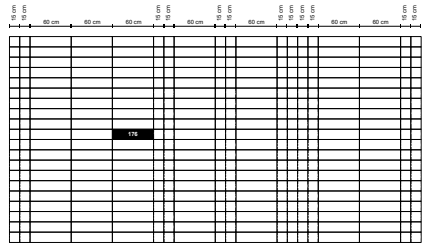


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

Oharrak:

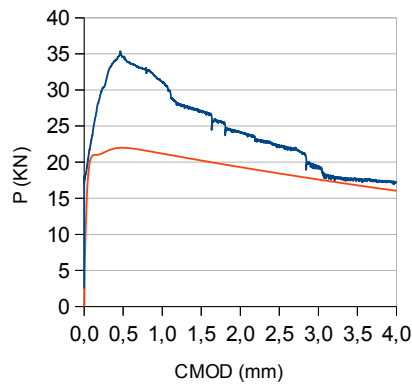


(a) Laginaren kokapena

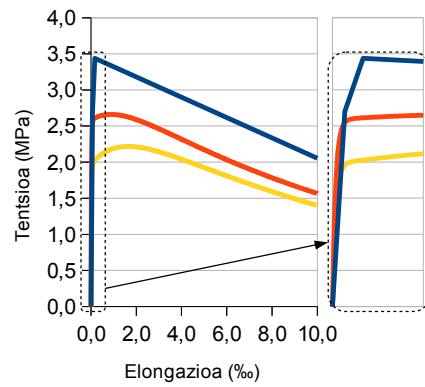


(b) Laginaren irudia

Lagin zbk.	Luzera (mm)	Zabalera (mm)	Altuera (mm)	Zuntz kopurua haustura planoan			
176	597	143	145	94			
	$L_{0/15}$ (H)	$L_{15/30}$ (H)	$L_{30/45}$ (H)	$L_{45/60}$ (H)			
	1.102	1.330	1.345	0.790			
	F_L (KN)	F_1 (KN)	F_2 (KN)	F_3 (KN)	F_4 (KN)	α_{pre}	α_{post}
	20.40	34.62	27.12	22.24	17.65	1.001	100
	$f_{ct,fl}$ (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)	α_{pre}	α_{post}
	6.75	11.46	8.98	7.36	5.84	100	10

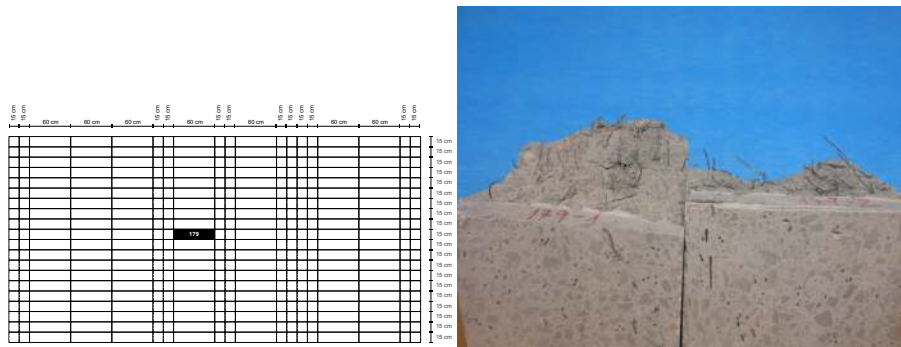


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

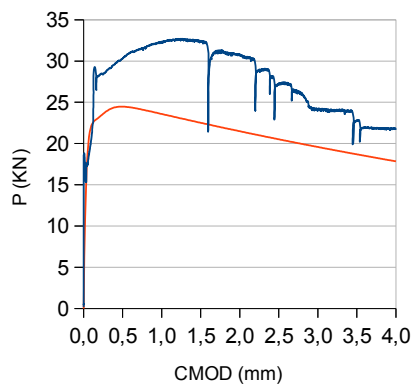
Oharrak:



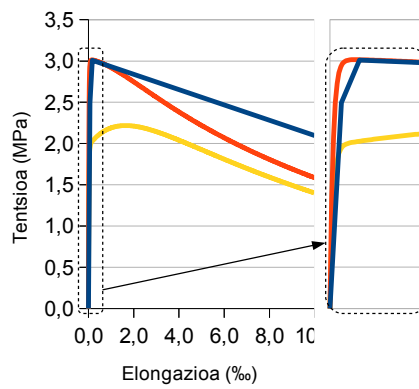
(a) Laginaren kokapena

(b) Laginaren irudia

Lagin zbk.		Luzera (mm)	Zabalera (mm)	Altuera (mm)	Zuntz kopurua haustura planoan	
179		602	147	144	100	
		$L_{0/15}$ (H)	$L_{15/30}$ (H)	$L_{30/45}$ (H)	$L_{45/60}$ (H)	
		1.035	1.336	1.641	1.297	
F_L (KN)	F_1 (KN)	F_2 (KN)	F_3 (KN)	F_4 (KN)	α_{pre}	α_{post}
18.83	30.30	32.41	27.27	22.80	1.001	100
$f_{ct,fl}$ (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)	α_{pre}	α_{post}
6.23	10.03	10.73	9.03	7.55	100	10

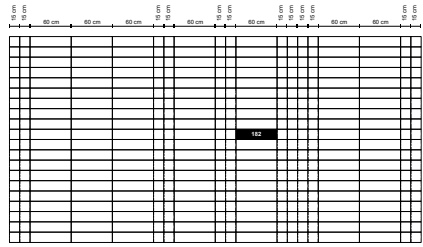


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

Oharrak:

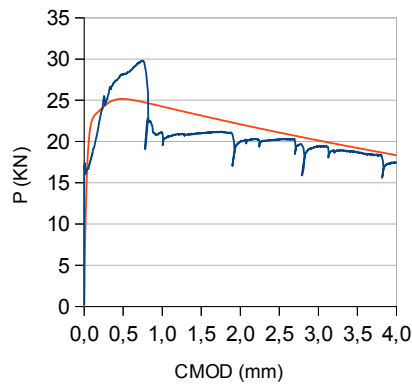


(a) Laginaren kokapena

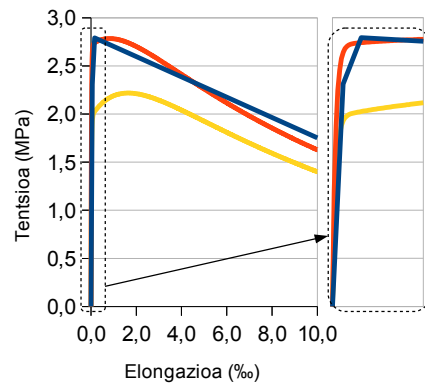


(b) Laginaren irudia

Lagin zbk.	Luzera (mm)	Zabalera (mm)	Altuera (mm)	Zuntz kopurua haustura planoan			
182	594	148	140	86			
	$L_{0/15}$ (H)	$L_{15/30}$ (H)	$L_{30/45}$ (H)	$L_{45/60}$ (H)			
	1.544	1.614	1.447	1.033			
	F_L (KN)	F_1 (KN)	F_2 (KN)	F_3 (KN)	F_4 (KN)	α_{pre}	α_{post}
	17.44	28.11	20.96	20.28	18.72	1.001	100
	$f_{ct,fl}$ (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)	α_{pre}	α_{post}
	5.77	9.31	6.94	6.71	6.20	100	10

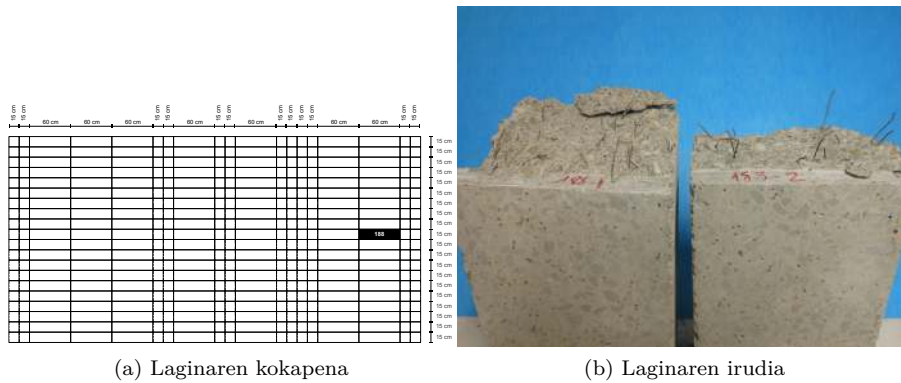


(a) P-CMOD

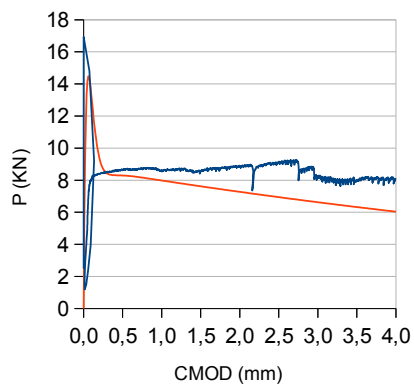


(b) $\sigma - \epsilon$

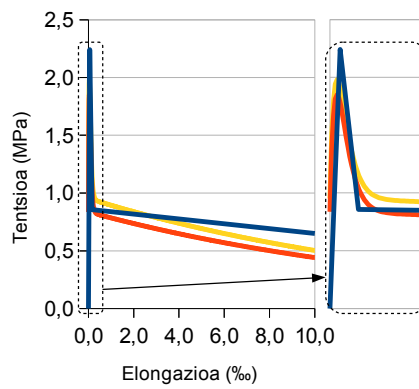
Oharrak:



Lagin zbk.		Luzera (mm)	Zabalera (mm)	Altuera (mm)	Zuntz kopurua haustura planoan	
188		598	150	140	41	
		$L_{0/15}$ (H)	$L_{15/30}$ (H)	$L_{30/45}$ (H)	$L_{45/60}$ (H)	
		0.529	0.515	0.492	0.316	
F_L (KN)	F_1 (KN)	F_2 (KN)	F_3 (KN)	F_4 (KN)	α_{pre}	α_{post}
16.93	8.63	8.54	9.13	8.00	1.001	100
$f_{ct,fl}$ (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)	α_{pre}	α_{post}
5.60	2.86	2.83	3.02	2.65	1.001	10

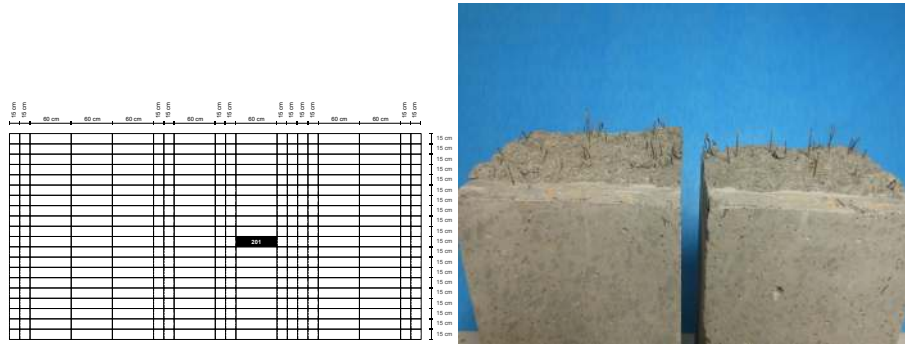


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

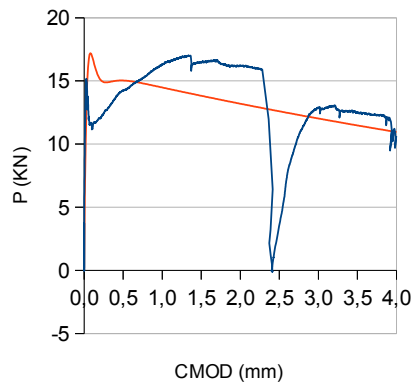
Oharrak:



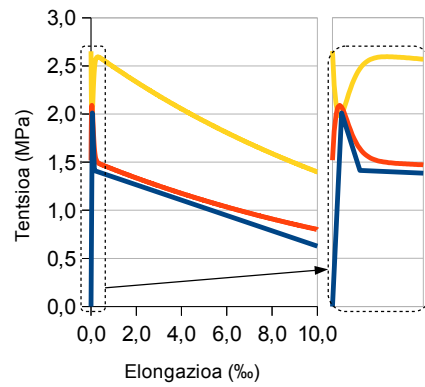
(a) Laginaren kokapena

(b) Laginaren irudia

Lagin zbk.		Luzera (mm)	Zabalera (mm)	Altuera (mm)	Zuntz kopurua haustura planoan	
201		$L_{0/15}$ (H)	$L_{15/30}$ (H)	$L_{30/45}$ (H)	$L_{45/60}$ (H)	
		1.425	1.229	0.801	0.996	
F_L (KN)	F_1 (KN)	F_2 (KN)	F_3 (KN)	F_4 (KN)	α_{pre}	α_{post}
15.18	14.22	16.49	3.50	12.54	1.001	100
$f_{ct,fl}$ (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)	α_{pre}	α_{post}
5.03	4.71	5.46	1.16	4.15	1.001	10

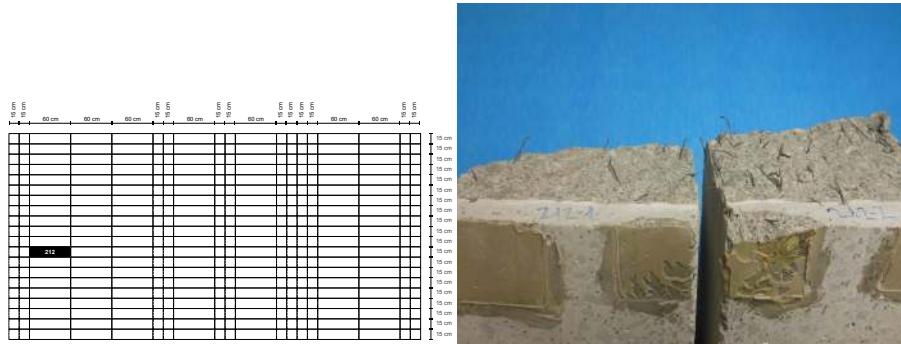


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

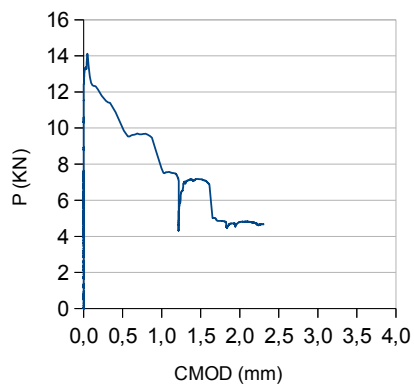
Oharrak:



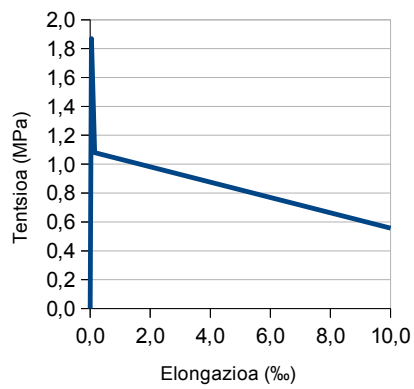
(a) Laginaren kokapena

(b) Laginaren irudia

Lagin zbk.		Luzera (mm)	Zabalera (mm)	Altuera (mm)	Zuntz kopurua haustura planoan	
212			146		28	
		$L_{0/15}$ (H)	$L_{15/30}$ (H)	$L_{30/45}$ (H)	$L_{45/60}$ (H)	
		N/A	N/A	N/A	N/A	
F_L (KN)	F_1 (KN)	F_2 (KN)	F_3 (KN)	F_4 (KN)	α_{pre}	α_{post}
14.12	10.87	7.17	4.87	4.67	N/A	N/A
$f_{ct,fl}$ (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)	α_{pre}	α_{post}
4.67	3.60	2.37	1.55	1.55	N/A	N/A

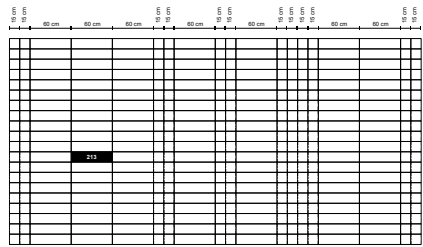


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

Oharrak:

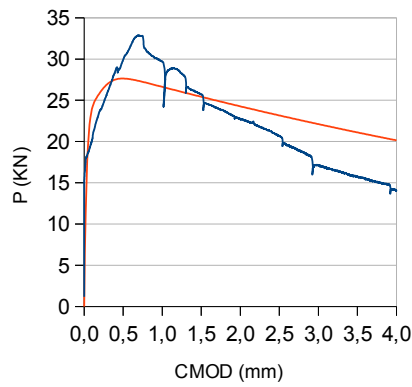


(a) Laginaren kokapena

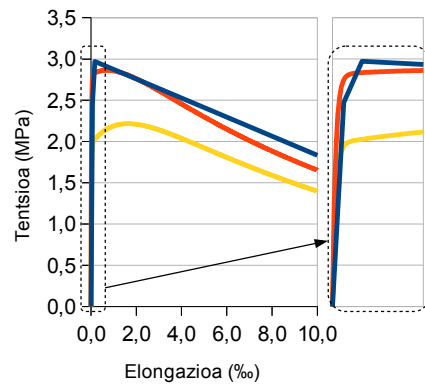


(b) Laginaren irudia

Lagin zbk.	Luzera (mm)	Zabalera (mm)	Altuera (mm)	Zuntz kopurua haustura planoan			
213	595	150	144	87			
	$L_{0/15}$ (H)	$L_{15/30}$ (H)	$L_{30/45}$ (H)	$L_{45/60}$ (H)			
	1.286	1.756	1.606	1.367			
	F_L (KN)	F_1 (KN)	F_2 (KN)	F_3 (KN)	F_4 (KN)	α_{pre}	α_{post}
	18.67	29.92	25.71	20.71	15.71	1.001	100
	$f_{ct,fl}$ (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)	α_{pre}	α_{post}
	6.18	9.90	8.51	6.86	5.20	100	10

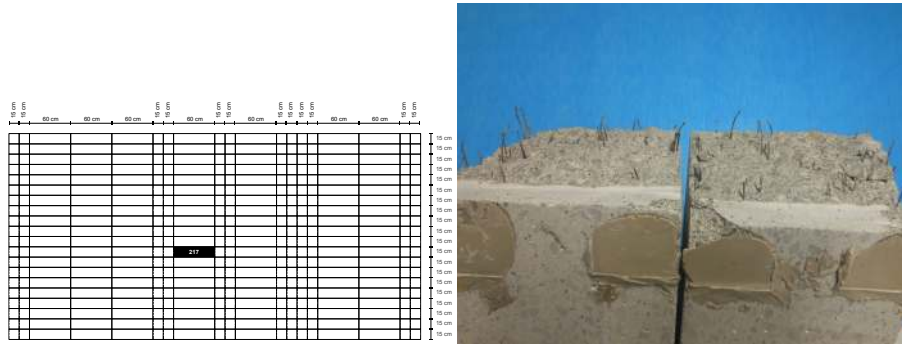


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

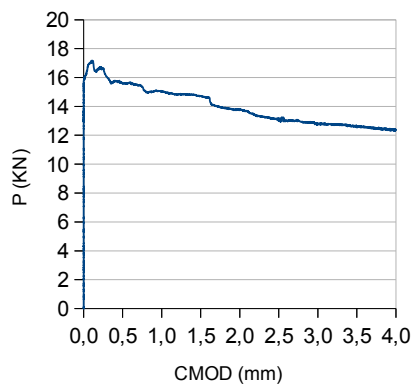
Oharrak:



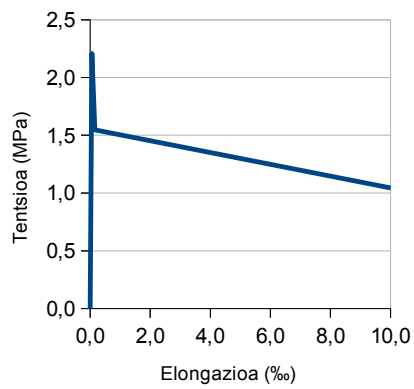
(a) Laginaren kokapena

(b) Laginaren irudia

Lagin zbk.		Luzera (mm)	Zabalera (mm)	Altuera (mm)	Zuntz kopurua haustura planoan	
217		146	67			
		$L_{0/15}$ (H)	$L_{15/30}$ (H)	$L_{30/45}$ (H)	$L_{45/60}$ (H)	
		N/A	N/A	N/A	N/A	
F_L (KN)	F_1 (KN)	F_2 (KN)	F_3 (KN)	F_4 (KN)	α_{pre}	α_{post}
16.68	15.58	14.72	13.12	12.63	N/A	N/A
$f_{ct,fl}$ (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)	α_{pre}	α_{post}
5.52	5.16	4.87	4.34	4.18	N/A	N/A

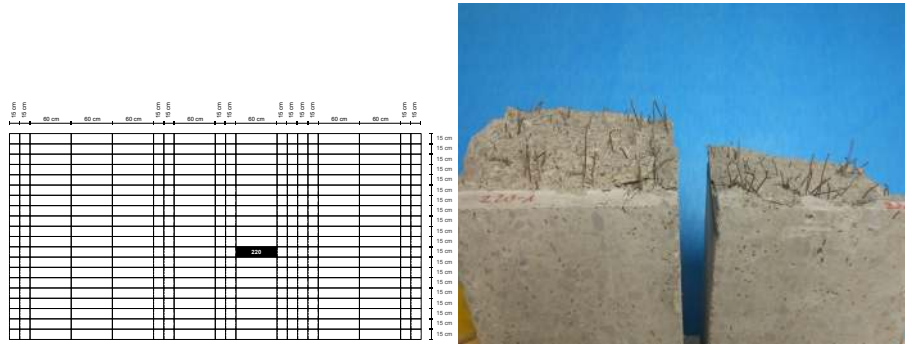


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

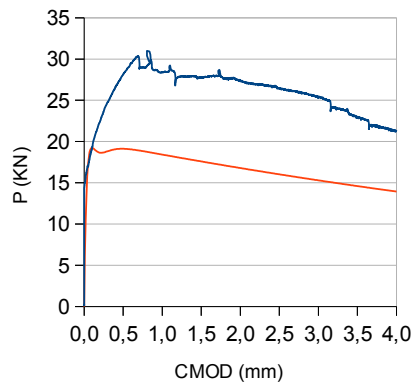
Oharrak:



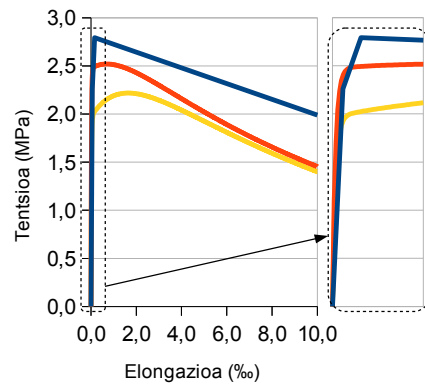
(a) Laginaren kokapena

(b) Laginaren irudia

Lagin zbk.	Luzera (mm)	Zabalera (mm)	Altuera (mm)	Zuntz kopurua haustura planoan			
220	593	144	148	87			
	$L_{0/15}$ (H)	$L_{15/30}$ (H)	$L_{30/45}$ (H)	$L_{45/60}$ (H)			
	0.948	1.072	1.293	1.159			
	F_L (KN)	F_1 (KN)	F_2 (KN)	F_3 (KN)	F_4 (KN)	α_{pre}	α_{post}
	17.07	28.12	27.69	26.42	23.00	1.001	100
	$f_{ct,fl}$ (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)	α_{pre}	α_{post}
	5.65	9.31	9.17	8.75	7.61	100	10

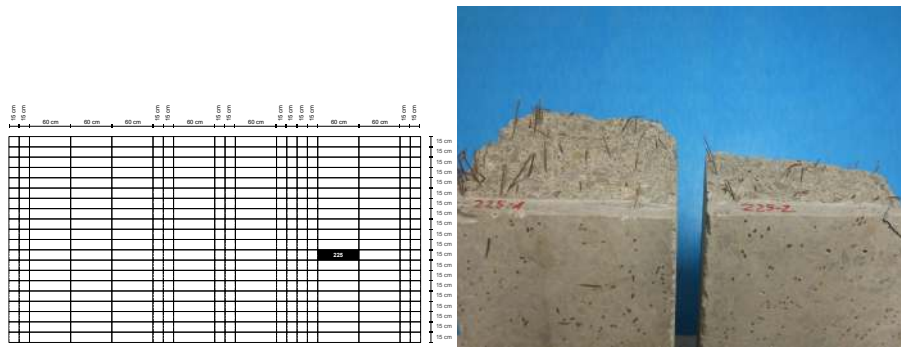


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

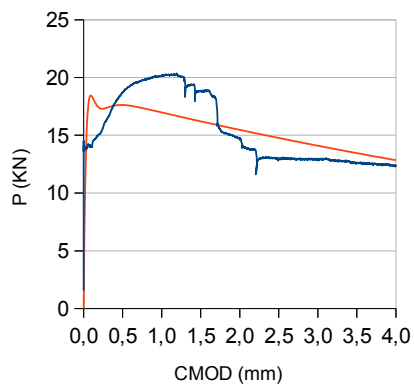
Oharrak:



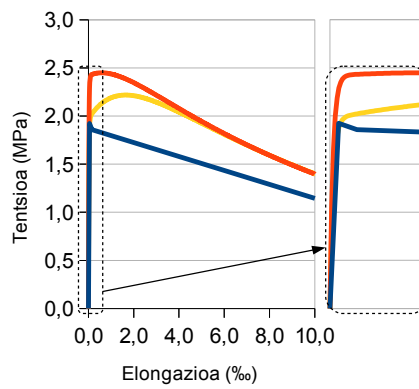
(a) Laginaren kokapena

(b) Laginaren irudia

Lagin zbk.		Luzera (mm)	Zabalera (mm)	Altuera (mm)	Zuntz kopurua haustura planoan	
225		594	141	152	53	
		$L_{0/15}$ (H)	$L_{15/30}$ (H)	$L_{30/45}$ (H)	$L_{45/60}$ (H)	
		0.895	1.070	1.073	1.037	
F_L (KN)	F_1 (KN)	F_2 (KN)	F_3 (KN)	F_4 (KN)	α_{pre}	α_{post}
14.52	18.71	18.81	12.93	12.63	1.001	100
$f_{ct,fl}$ (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)	α_{pre}	α_{post}
4.81	6.19	6.23	4.28	4.18	100	10

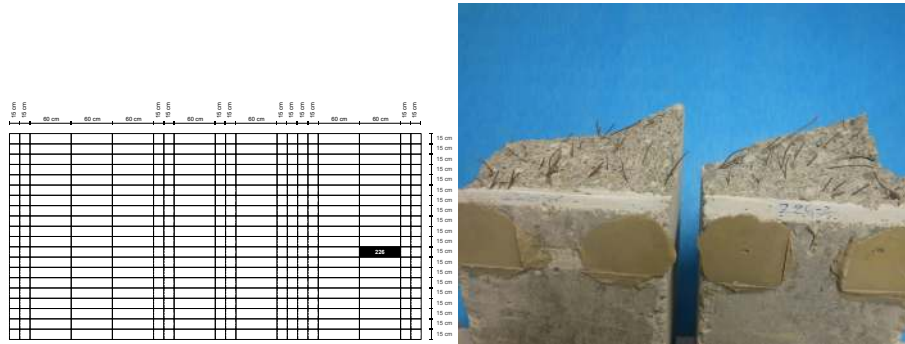


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

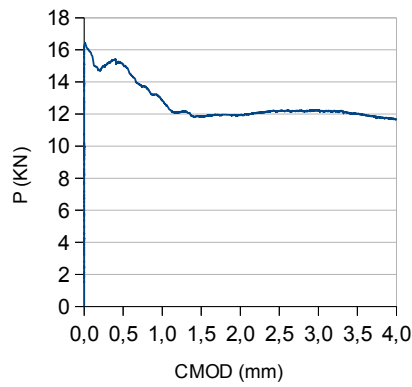
Oharrak:



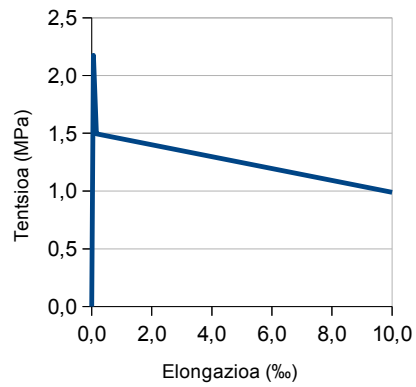
(a) Laginaren kokapena

(b) Laginaren irudia

Lagin zbk.		Luzera (mm)	Zabalera (mm)	Altuera (mm)	Zuntz kopurua haustura planoan	
226		141				
		$L_{0/15}$ (H)	$L_{15/30}$ (H)	$L_{30/45}$ (H)	$L_{45/60}$ (H)	
		N/A	N/A	N/A	N/A	
F_L (KN)	F_1 (KN)	F_2 (KN)	F_3 (KN)	F_4 (KN)	α_{pre}	α_{post}
16.42	15.06	11.85	12.18	12.02	N/A	N/A
$f_{ct,fl}$ (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)	α_{pre}	α_{post}
5.44	4.99	3.92	4.03	3.98	N/A	N/A



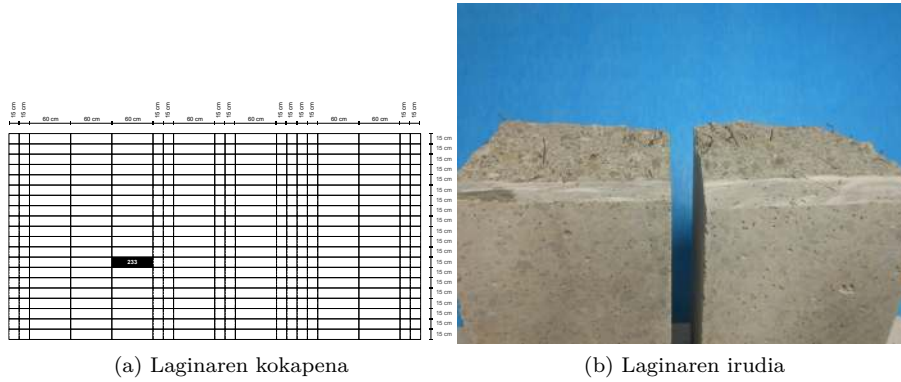
(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

Oharrak:

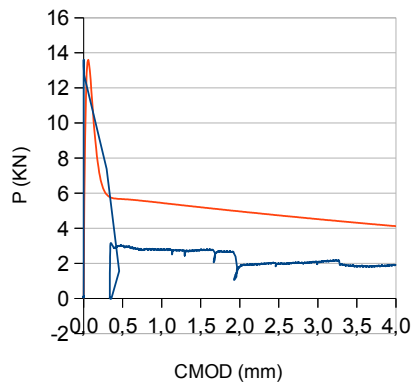
Hutsegitez, laginaren alboko aurpegietako batean egin da hozka.



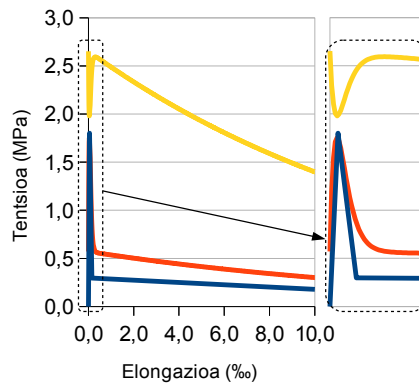
(a) Laginaren kokapena

(b) Laginaren irudia

Lagin zbk.		Luzera (mm)	Zabalera (mm)	Altuera (mm)	Zuntz kopurua haustura planoan N/A	
233		$L_{0/15}$ (H)	$L_{15/30}$ (H)	$L_{30/45}$ (H)	$L_{45/60}$ (H)	
		0.810	0.327	0.536	0.459	
F_L (KN)	F_1 (KN)	F_2 (KN)	F_3 (KN)	F_4 (KN)	α_{pre}	α_{post}
13.60	2.98	2.78	1.99	1.82	1.001	100
$f_{ct,fl}$ (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)	α_{pre}	α_{post}
4.50	0.99	0.92	0.66	0.60	1.001	10

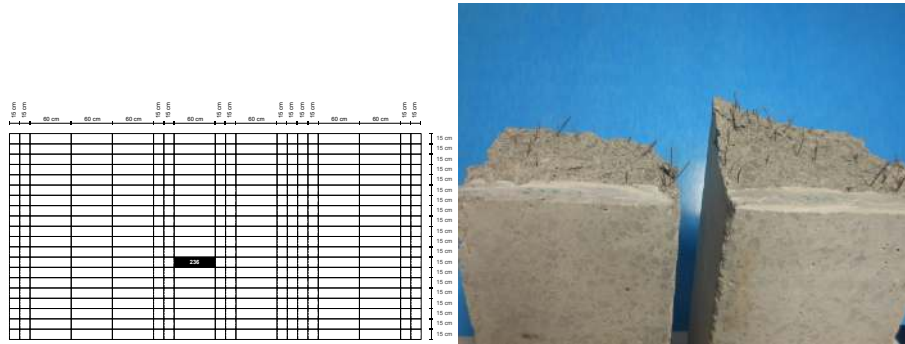


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

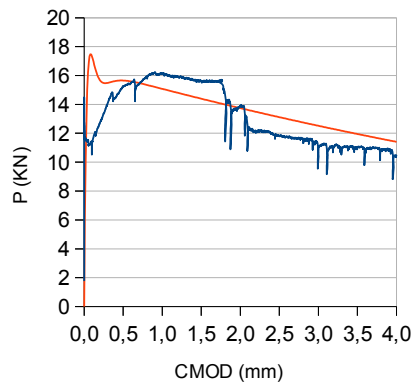
Oharrak:



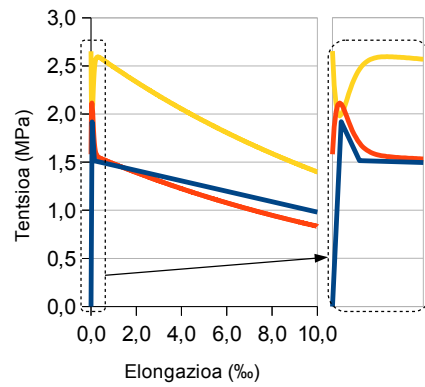
(a) Laginaren kokapena

(b) Laginaren irudia

Lagin zbk.		Luzera (mm)	Zabalera (mm)	Altuera (mm)	Zuntz kopurua haustura planoan	
236		$L_{0/15}$ (H)	$L_{15/30}$ (H)	$L_{30/45}$ (H)	56	
		1.007	0.952	0.847	$L_{45/60}$ (H)	
F_L (KN)	F_1 (KN)	F_2 (KN)	F_3 (KN)	F_4 (KN)	α_{pre}	α_{post}
14.49	15.24	15.62	11.83	11.05	1.001	100
$f_{ct,fl}$ (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)	α_{pre}	α_{post}
4.80	5.04	5.17	3.92	3.66	1.001	10

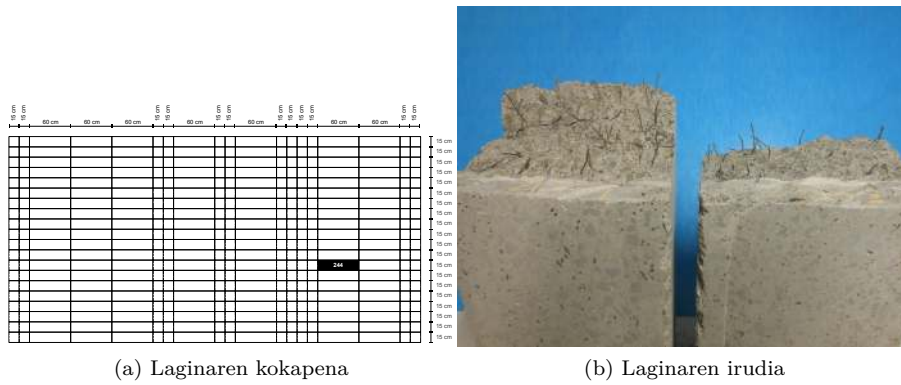


(a) P-CMOD

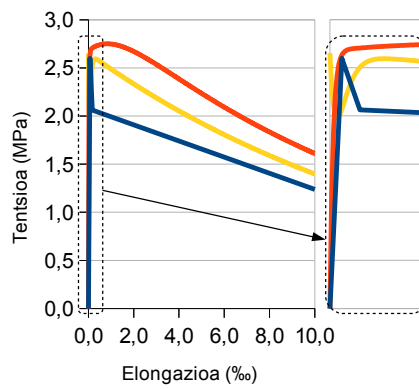
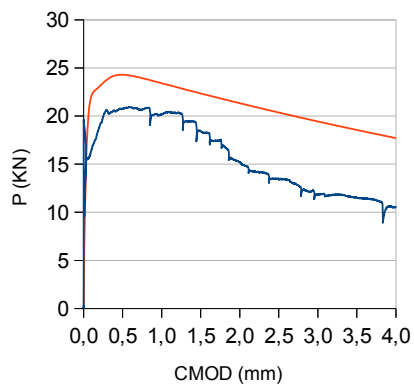


(b) $\sigma - \epsilon$

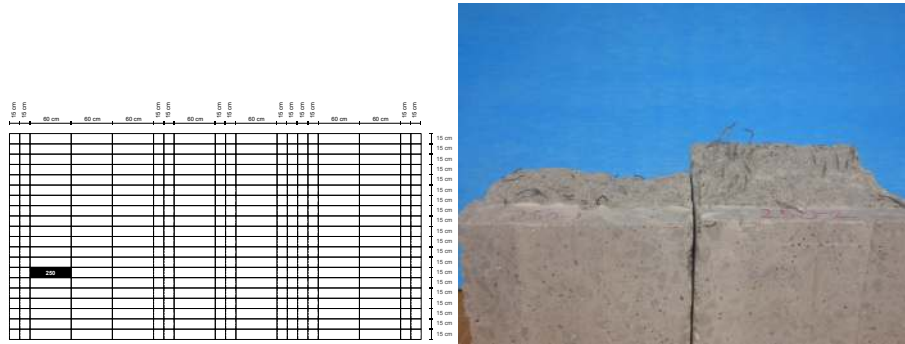
Oharrak:



Lagin zbk.		Luzera (mm)	Zabalera (mm)	Altuera (mm)	Zuntz kopurua haustura planoan	
244					87	
		$L_{0/15}$ (H)	$L_{15/30}$ (H)	$L_{30/45}$ (H)	$L_{45/60}$ (H)	
		1.425	1.664	1.205	0.876	
F_L (KN)	F_1 (KN)	F_2 (KN)	F_3 (KN)	F_4 (KN)	α_{pre}	α_{post}
19.62	20.76	18.43	13.46	11.48	1.001	100
$f_{ct,fl}$ (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)	α_{pre}	α_{post}
6.49	6.87	6.10	4.46	3.80	100	10



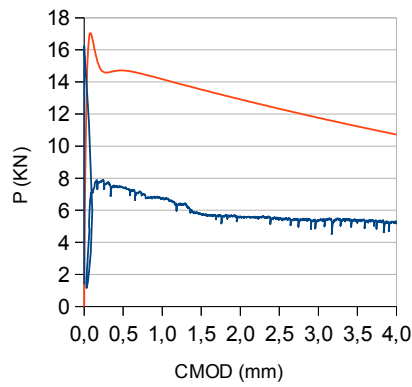
Oharrak:



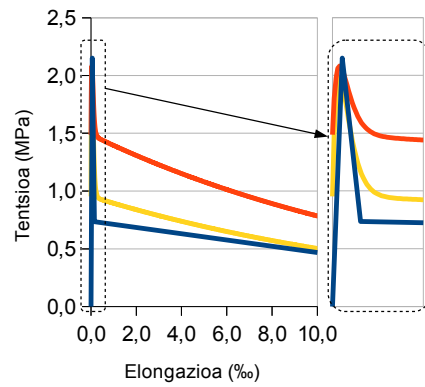
(a) Laginaren kokapena

(b) Laginaren irudia

Lagin zbk.	Luzera (mm)	Zabalera (mm)	Altuera (mm)	Zuntz kopurua haustura planoan			
250	596	149	145	39			
	$L_{0/15}$ (H)	$L_{15/30}$ (H)	$L_{30/45}$ (H)	$L_{45/60}$ (H)			
	0.699	0.840	0.950	1.110			
	F_L (KN)	F_1 (KN)	F_2 (KN)	F_3 (KN)	F_4 (KN)	α_{pre}	α_{post}
	16.24	7.40	5.76	5.48	5.30	1.001	100
	$f_{ct,fl}$ (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)	α_{pre}	α_{post}
	5.38	2.45	1.91	1.81	1.75	1.001	10

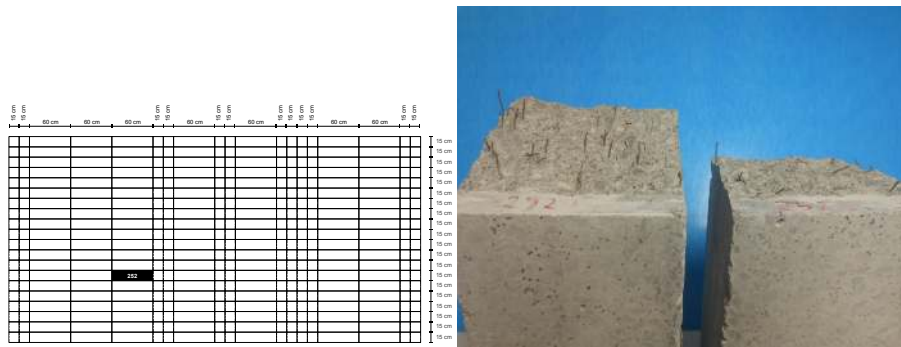


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

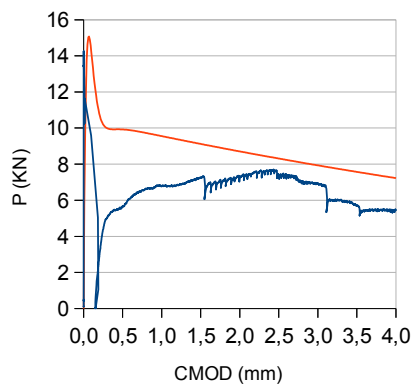
Oharrak:



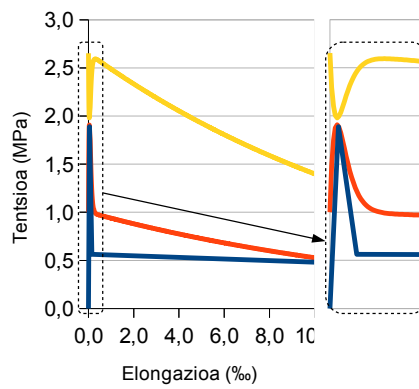
(a) Laginaren kokapena

(b) Laginaren irudia

Lagin zbk.		Luzera (mm)	Zabalera (mm)	Altuera (mm)	Zuntz kopurua haustura planoan	
252		598	150	148	N/A	
		$L_{0/15}$ (H)	$L_{15/30}$ (H)	$L_{30/45}$ (H)	$L_{45/60}$ (H)	
		0.397	0.442	0.763	0.702	
F_L (KN)	F_1 (KN)	F_2 (KN)	F_3 (KN)	F_4 (KN)	α_{pre}	α_{post}
14.26	5.67	7.25	7.43	5.72	1.001	100
$f_{ct,fl}$ (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)	α_{pre}	α_{post}
4.72	1.88	2.40	2.46	1.89	1.001	10

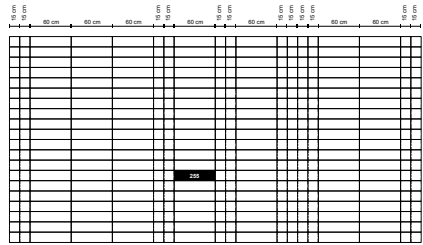


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

Oharrak:

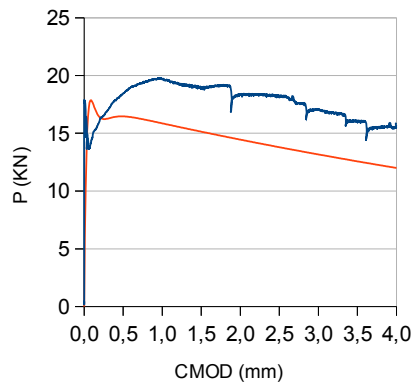


(a) Laginaren kokapena

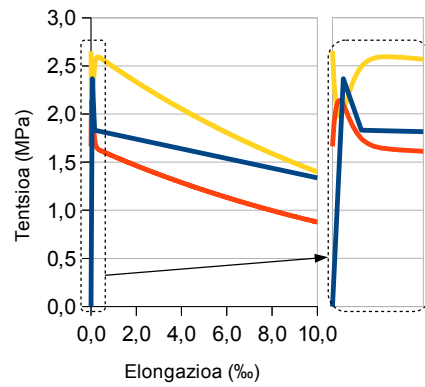


(b) Laginaren irudia

Lagin zbk.		Luzera (mm)	Zabalera (mm)	Altuera (mm)	Zuntz kopurua haustura planoan	
255		592	150	150	58	
		$L_{0/15}$ (H)	$L_{15/30}$ (H)	$L_{30/45}$ (H)	$L_{45/60}$ (H)	
		0.740	0.994	1.007	0.986	
F_L (KN)	F_1 (KN)	F_2 (KN)	F_3 (KN)	F_4 (KN)	α_{pre}	α_{post}
17.87	18.44	19.00	18.20	16.06	1.001	100
$f_{ct,fl}$ (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)	α_{pre}	α_{post}
5.92	6.10	6.29	6.02	5.32	1.001	10

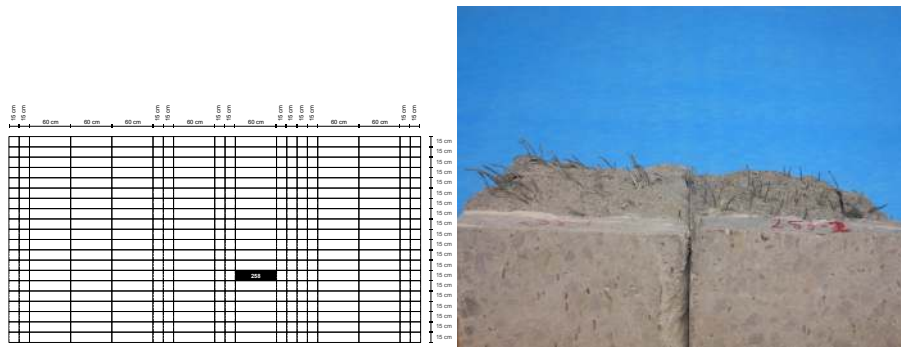


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

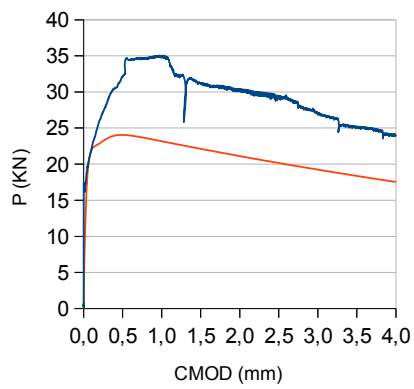
Oharrak:



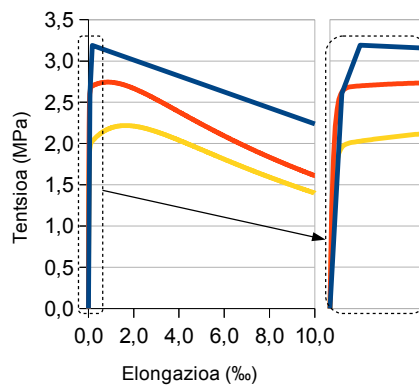
(a) Laginaren kokapena

(b) Laginaren irudia

Lagin zbk.		Luzera (mm)	Zabalera (mm)	Altuera (mm)	Zuntz kopurua haustura planoan	
258		596	150	149	106	
		$L_{0/15}$ (H)	$L_{15/30}$ (H)	$L_{30/45}$ (H)	$L_{45/60}$ (H)	
		1.157	1.401	1.525	1.405	
F_L (KN)	F_1 (KN)	F_2 (KN)	F_3 (KN)	F_4 (KN)	α_{pre}	α_{post}
19.68	32.12	31.26	29.26	25.15	1.001	100
$f_{ct,fl}$ (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)	α_{pre}	α_{post}
6.51	10.63	10.35	9.69	8.33	100	10

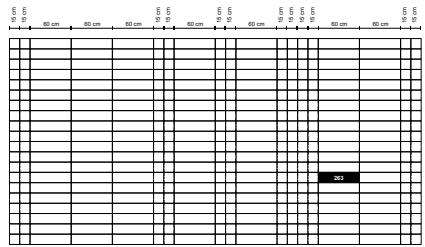


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

Oharrak:

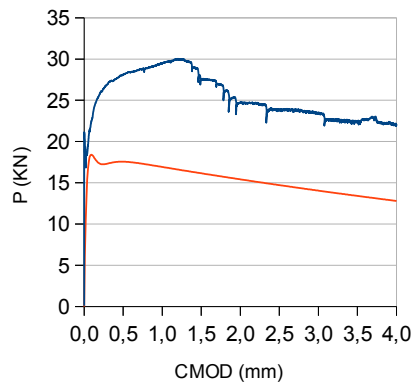


(a) Laginaren kokapena

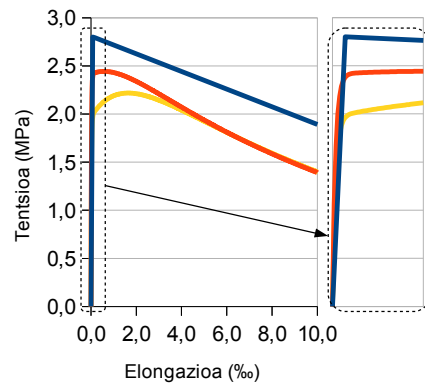


(b) Laginaren irudia

Lagin zbk.		Luzera (mm)	Zabalera (mm)	Altuera (mm)	Zuntz kopurua haustura planoan	
263		595	151	146	90	
		$L_{0/15}$ (H)	$L_{15/30}$ (H)	$L_{30/45}$ (H)	$L_{45/60}$ (H)	
		1.202	1.058	1.078	0.981	
F_L (KN)	F_1 (KN)	F_2 (KN)	F_3 (KN)	F_4 (KN)	α_{pre}	α_{post}
21.15	28.12	27.48	23.86	22.37	1.001	100
$f_{ct,fl}$ (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)	α_{pre}	α_{post}
7.00	9.31	9.10	7.90	7.41	100	10

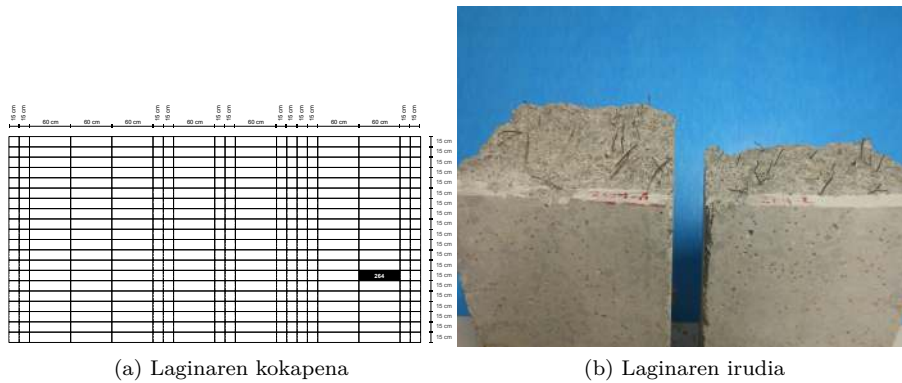


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

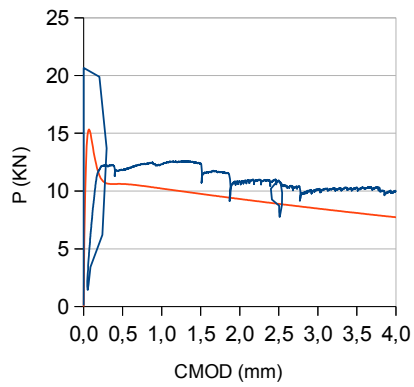
Oharrak:



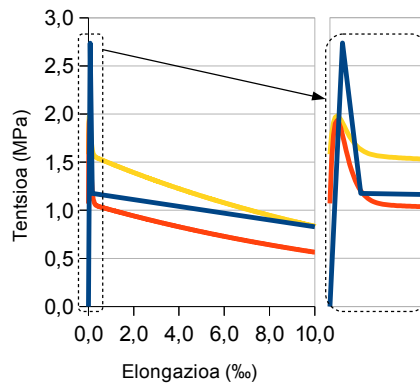
(a) Laginaren kokapena

(b) Laginaren irudia

Lagin zbk.						
264						
		Luzera (mm)	Zabalera (mm)	Altuera (mm)	Zuntz kopurua haustura planoan	
		597	150	141	N/A	
		$L_{0/15}$ (H)	$L_{15/30}$ (H)	$L_{30/45}$ (H)	$L_{45/60}$ (H)	
		0.587	0.615	0.675	0.574	
F_L (KN)	F_1 (KN)	F_2 (KN)	F_3 (KN)	F_4 (KN)	α_{pre}	α_{post}
20.66	11.83	12.37	10.93	10.28	1.001	100
$f_{ct,fl}$ (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)	α_{pre}	α_{post}
6.84	3.92	4.09	3.62	3.40	1.001	10

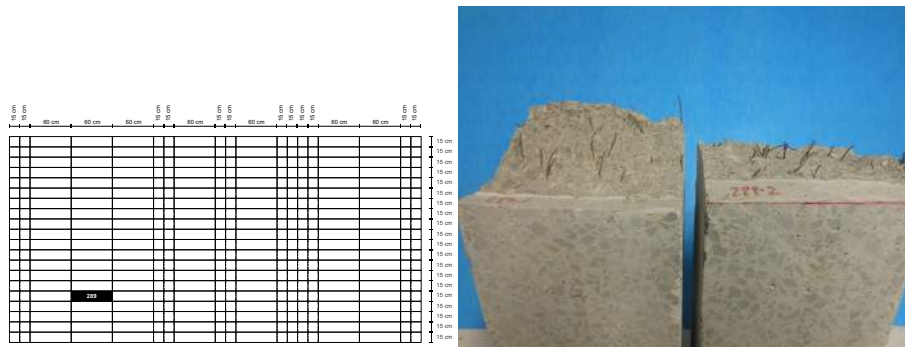


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

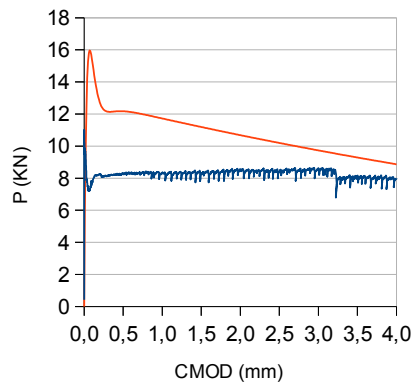
Oharrak:



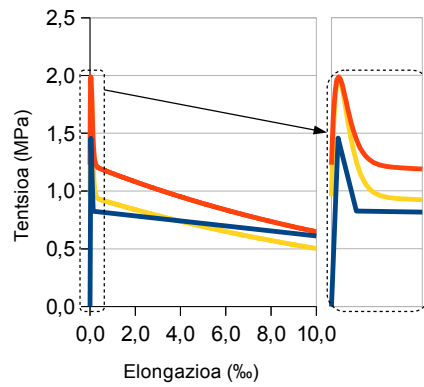
(a) Laginaren kokapena

(b) Laginaren irudia

Lagin zbk.		Luzera (mm)	Zabalera (mm)	Altuera (mm)	Zuntz kopurua haustura planoan	
289		596	146	140	39	
		$L_{0/15}$ (H)	$L_{15/30}$ (H)	$L_{30/45}$ (H)	$L_{45/60}$ (H)	
		1.201	0.646	0.834	1.049	
F_L (KN)	F_1 (KN)	F_2 (KN)	F_3 (KN)	F_4 (KN)	α_{pre}	α_{post}
11.00	8.31	8.27	8.41	8.15	1.001	100
$f_{ct,fl}$ (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)	α_{pre}	α_{post}
3.64	2.75	2.74	2.78	2.70	1.001	10

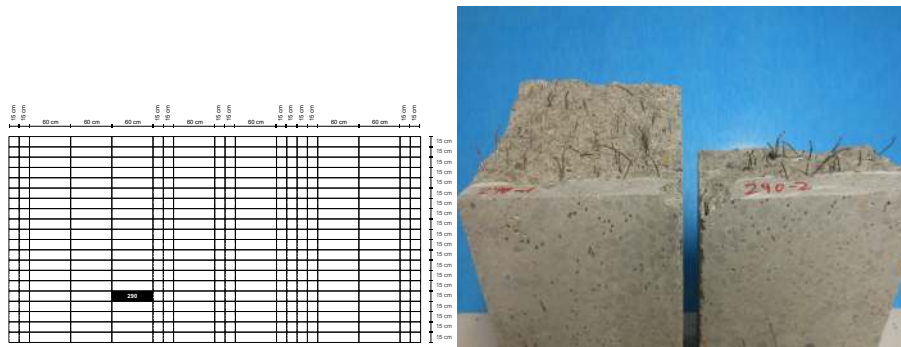


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

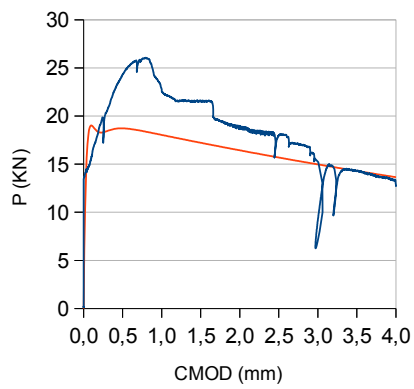
Oharrak:



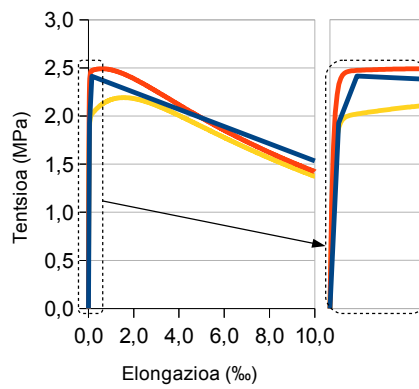
(a) Laginaren kokapena

(b) Laginaren irudia

Lagin zbk.		Luzera (mm)	Zabalera (mm)	Altuera (mm)	Zuntz kopurua haustura planoan	
290		598	142	142	71	
		$L_{0/15}$ (H)	$L_{15/30}$ (H)	$L_{30/45}$ (H)	$L_{45/60}$ (H)	
		1.288	1.406	0.872	0.630	
F_L (KN)	F_1 (KN)	F_2 (KN)	F_3 (KN)	F_4 (KN)	α_{pre}	α_{post}
14.55	24.31	21.55	17.99	14.33	1.001	100
$f_{ct, f1}$ (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)	α_{pre}	α_{post}
4.82	8.05	7.13	5.96	4.74	100	10

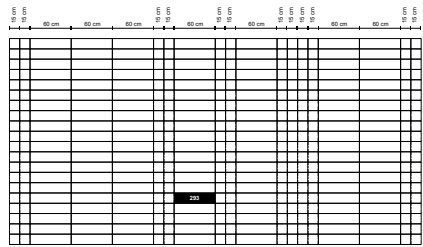


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

Oharrak:

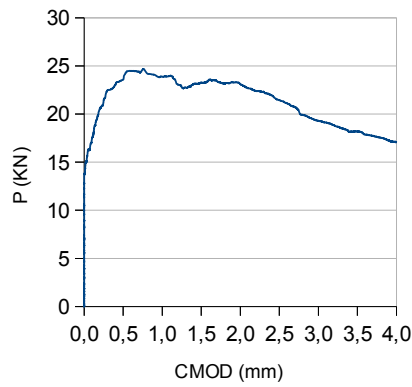


(a) Laginaren kokapena

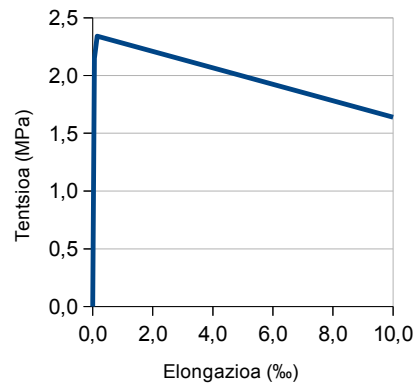


(b) Laginaren irudia

Lagin zbk.		Luzera (mm)	Zabalera (mm)	Altuera (mm)	Zuntz kopurua haustura planoan	
293			139		86	
		$L_{0/15}$ (H)	$L_{15/30}$ (H)	$L_{30/45}$ (H)	$L_{45/60}$ (H)	
		N/A	N/A	N/A	N/A	
F_L (KN)	F_1 (KN)	F_2 (KN)	F_3 (KN)	F_4 (KN)	α_{pre}	α_{post}
16.23	23.56	23.27	21.43	18.22	N/A	N/A
$f_{ct,fl}$ (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)	α_{pre}	α_{post}
5.37	7.80	7.70	7.10	6.03	N/A	N/A

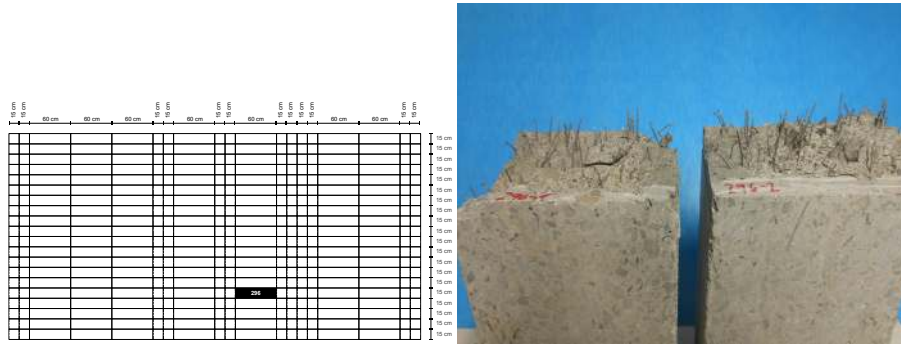


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

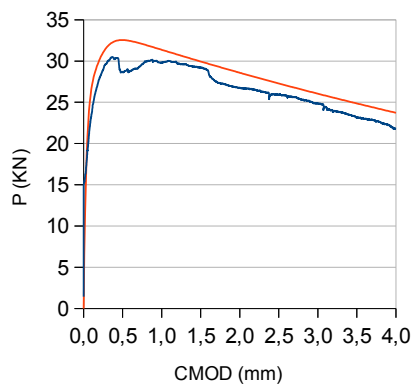
Oharrak:



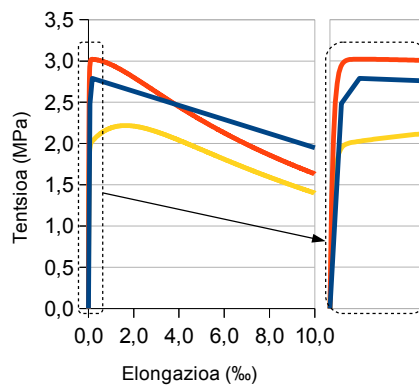
(a) Laginaren kokapena

(b) Laginaren irudia

Lagin zbk.		Luzera (mm)	Zabalera (mm)	Altuera (mm)	Zuntz kopurua haustura planoan	
296		597	148	140	127	
		$L_{0/15}$ (H)	$L_{15/30}$ (H)	$L_{30/45}$ (H)	$L_{45/60}$ (H)	
		1.736	2.046	1.913	1.726	
F_L (KN)	F_1 (KN)	F_2 (KN)	F_3 (KN)	F_4 (KN)	α_{pre}	α_{post}
19.14	28.66	29.17	25.92	23.22	1.001	100
$f_{ct,fl}$ (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)	α_{pre}	α_{post}
6.21	9.30	9.46	8.41	7.53	100	10

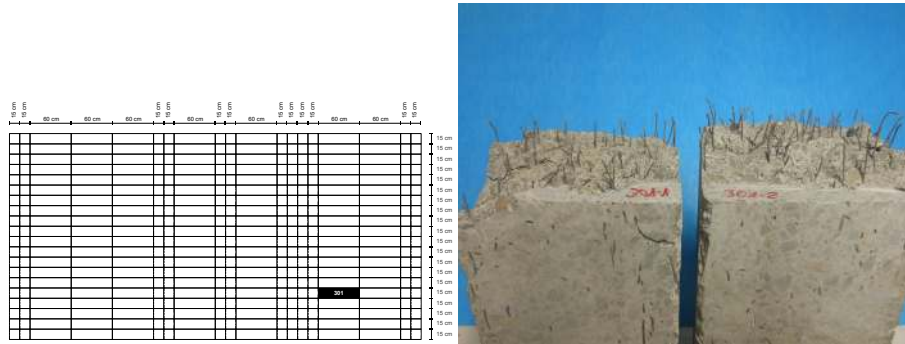


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

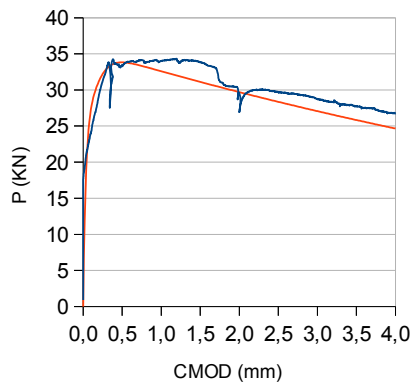
Oharrak:



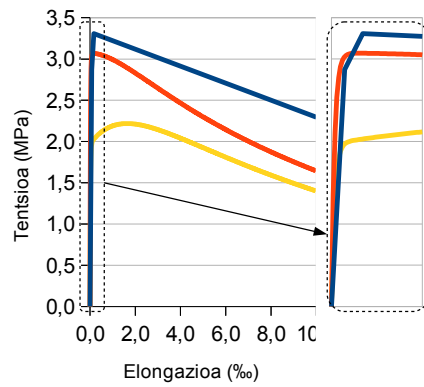
(a) Laginaren kokapena

(b) Laginaren irudia

Lagin zbk.	Luzera (mm)	Zabalera (mm)	Altuera (mm)	Zuntz kopurua haustura planoan			
301	597	150	142	117			
	$L_{0/15}$ (H)	$L_{15/30}$ (H)	$L_{30/45}$ (H)	$L_{45/60}$ (H)			
	2.004	2.070	2.046	1.704			
	F_L (KN)	F_1 (KN)	F_2 (KN)	F_3 (KN)	F_4 (KN)	α_{pre}	α_{post}
	21.68	33.30	33.86	29.67	27.77	1.001	100
	$f_{ct,fl}$ (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)	α_{pre}	α_{post}
	7.18	11.02	11.21	9.82	9.19	100	10

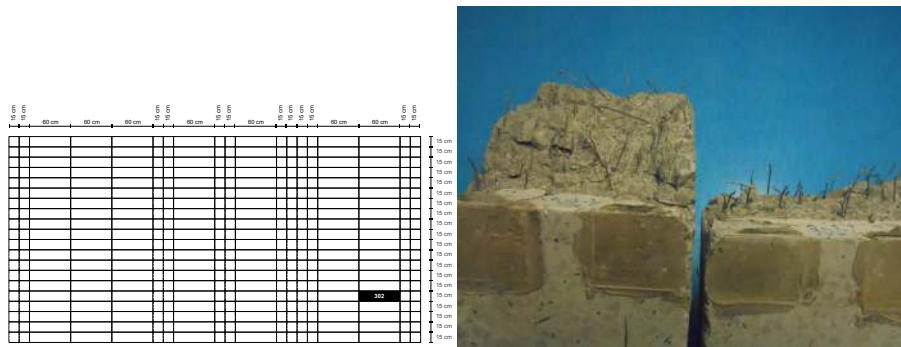


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

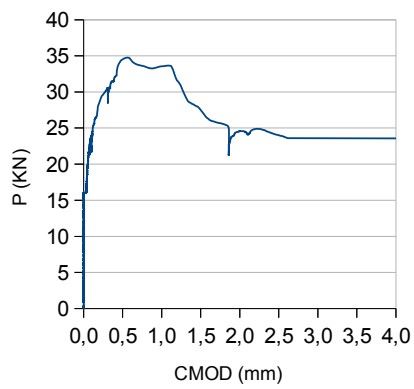
Oharrak:



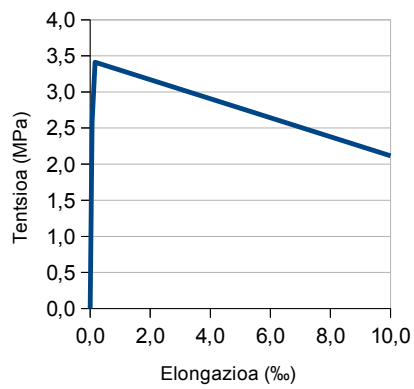
(a) Laginaren kokapena

(b) Laginaren irudia

Lagin zbk.		Luzera (mm)	Zabalera (mm)	Altuera (mm)	Zuntz kopurua haustura planoan	
302			147		95	
		$L_{0/15}$ (H)	$L_{15/30}$ (H)	$L_{30/45}$ (H)	$L_{45/60}$ (H)	
		N/A	N/A	N/A	N/A	
F_L (KN)	F_1 (KN)	F_2 (KN)	F_3 (KN)	F_4 (KN)	α_{pre}	α_{post}
19.50	34.36	27.69	24.02	23.61	N/A	N/A
$f_{ct,fl}$ (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)	α_{pre}	α_{post}
6.46	11.38	9.17	7.95	7.81	N/A	N/A

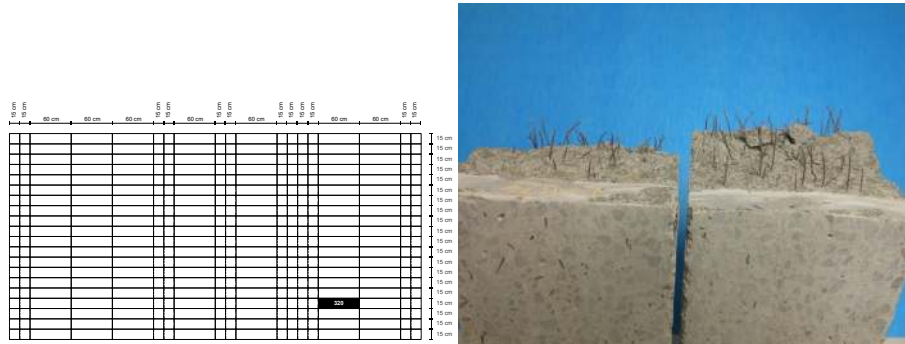


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

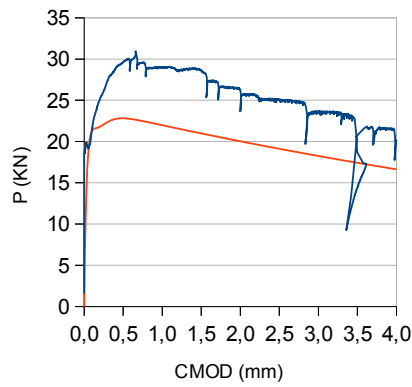
Oharrak:



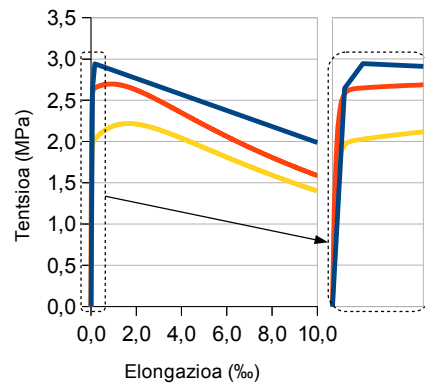
(a) Laginaren kokapena

(b) Laginaren irudia

Lagin zbk.	Luzera (mm)	Zabalera (mm)	Altuera (mm)	Zuntz kopurua haustura planoan		
320	$L_{0/15}$ (H)	$L_{15/30}$ (H)	$L_{30/45}$ (H)	$L_{45/60}$ (H)		
	1.123	1.278	1.421	1.421		
F_L (KN)	F_1 (KN)	F_2 (KN)	F_3 (KN)	F_4 (KN)	α_{pre}	α_{post}
19.96	29.62	28.65	24.99	14.44	1.001	100
$f_{ct,fl}$ (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)	α_{pre}	α_{post}
6.61	9.81	9.48	8.27	4.78	100	10

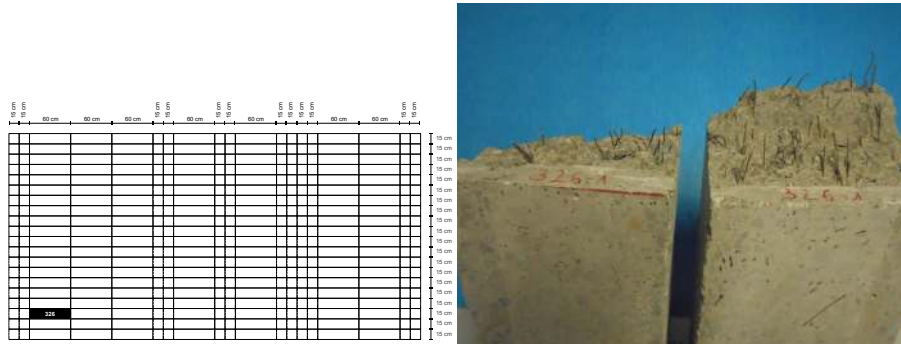


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

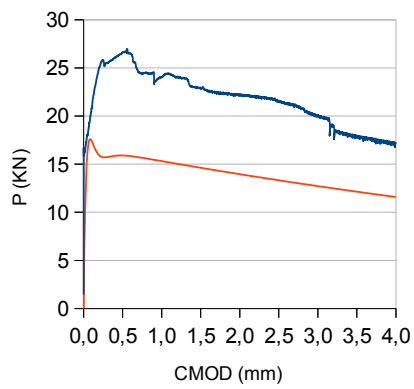
Oharrak:



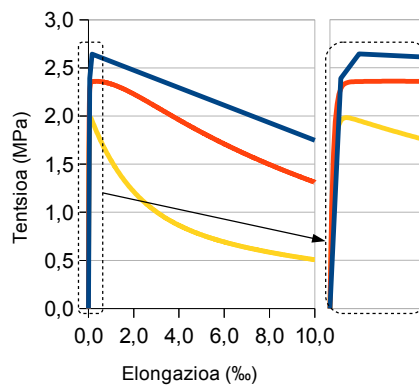
(a) Laginaren kokapena

(b) Laginaren irudia

Lagin zbk.		Luzera (mm)	Zabalera (mm)	Altuera (mm)	Zuntz kopurua haustura planoan	
326		595	147	145	76	
		$L_{0/15}$ (H)	$L_{15/30}$ (H)	$L_{30/45}$ (H)	$L_{45/60}$ (H)	
		0.693	0.993	0.940	0.923	
F_L (KN)	F_1 (KN)	F_2 (KN)	F_3 (KN)	F_4 (KN)	α_{pre}	α_{post}
18.05	26.62	22.95	21.50	17.96	1.001	100
$f_{ct,fl}$ (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)	α_{pre}	α_{post}
5.98	8.81	7.60	7.12	5.95	100	10

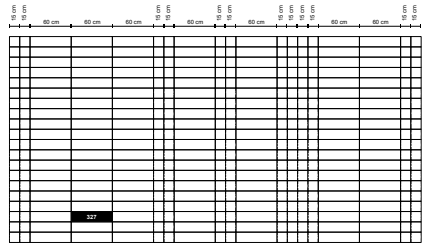


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

Oharrak:

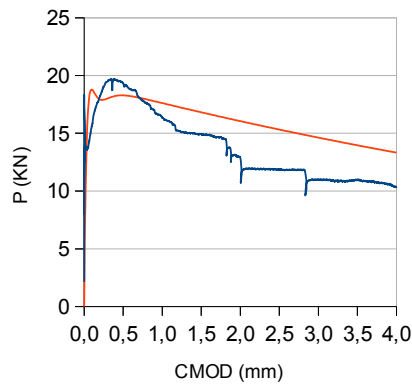


(a) Laginaren kokapena

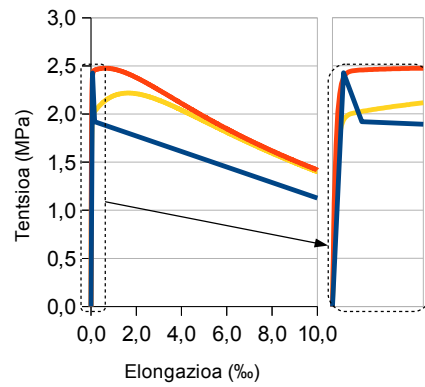


(b) Laginaren irudia

Lagin zbk.	Luzera (mm)	Zabalera (mm)	Altuera (mm)	Zuntz kopurua haustura planoan			
327	596	147	144	65			
	$L_{0/15}$ (H)	$L_{15/30}$ (H)	$L_{30/45}$ (H)	$L_{45/60}$ (H)			
	0.802	1.142	1.081	0.886			
	F_L (KN)	F_1 (KN)	F_2 (KN)	F_3 (KN)	F_4 (KN)	α_{pre}	α_{post}
	18.33	19.33	14.90	11.86	10.97	1.001	100
	$f_{ct,fl}$ (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)	α_{pre}	α_{post}
	6.07	6.40	4.93	3.93	3.63	100	10

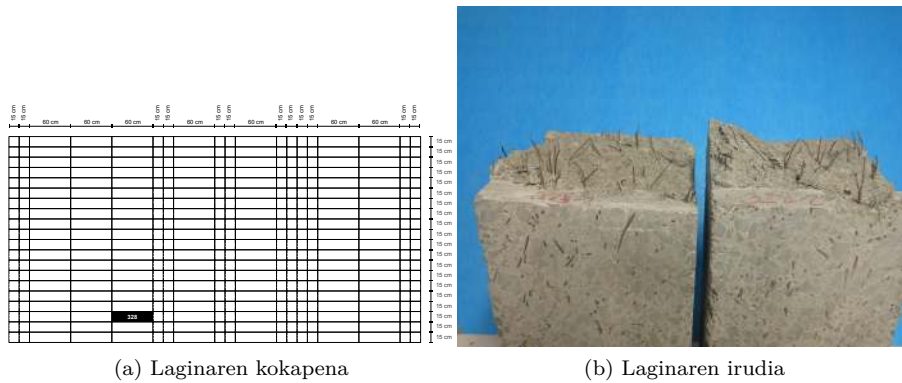


(a) P-CMOD

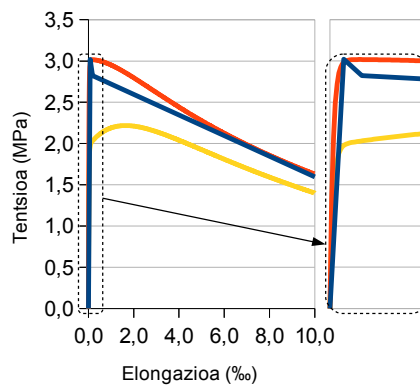
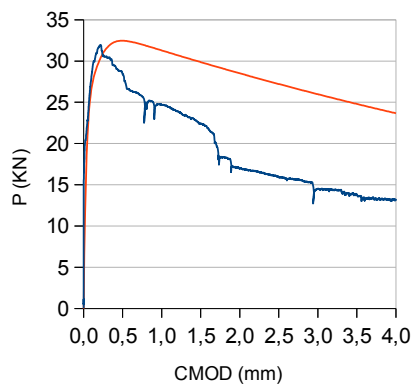


(b) $\sigma - \epsilon$

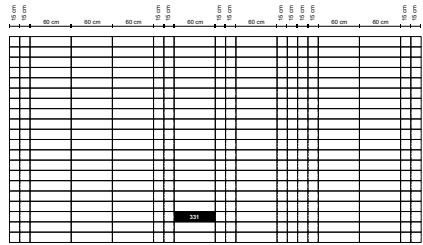
Oharrak:



Lagin zbk.		Luzera (mm)	Zabalera (mm)	Altuera (mm)	Zuntz kopurua haustura planoan	
328		598	142	145	N/A	
		$L_{0/15}$ (H)	$L_{15/30}$ (H)	$L_{30/45}$ (H)	$L_{45/60}$ (H)	
		1.068	1.737	2.213	1.969	
F_L (KN)	F_1 (KN)	F_2 (KN)	F_3 (KN)	F_4 (KN)	α_{pre}	α_{post}
22.81	28.42	22.40	15.89	13.80	1.001	100
$f_{ct,fl}$ (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)	α_{pre}	α_{post}
7.55	9.41	7.42	5.26	4.57	100	10



Oharrak:

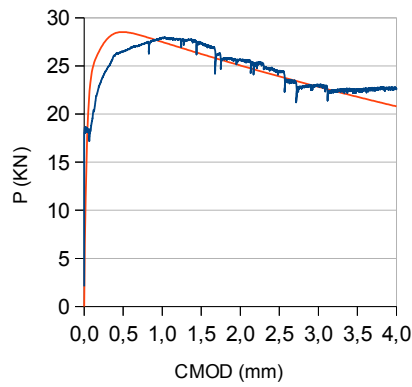


(a) Laginaren kokapena

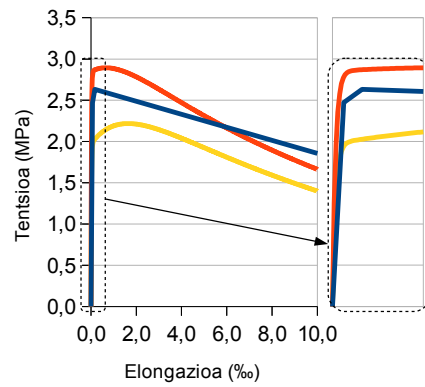


(b) Laginaren irudia

Lagin zbk.		Luzera (mm)	Zabalera (mm)	Altuera (mm)	Zuntz kopurua haustura planoan	
331		596	148	148	108	
		$L_{0/15}$ (H)	$L_{15/30}$ (H)	$L_{30/45}$ (H)	$L_{45/60}$ (H)	
		1.832	1.795	1.674	1.437	
F_L (KN)	F_1 (KN)	F_2 (KN)	F_3 (KN)	F_4 (KN)	α_{pre}	α_{post}
18.66	26.50	27.43	24.45	22.61	1.001	100
$f_{ct,fl}$ (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)	α_{pre}	α_{post}
6.18	8.77	9.08	8.09	7.48	100	10

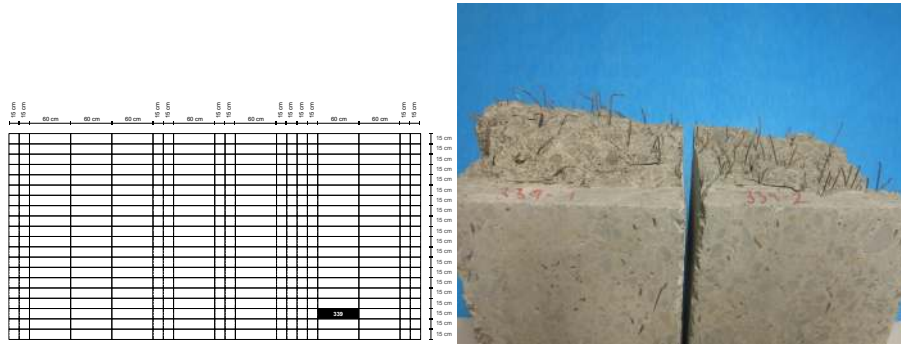


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

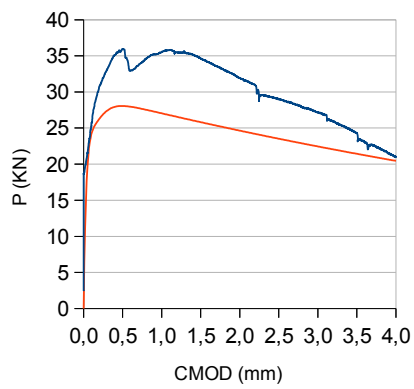
Oharrak:



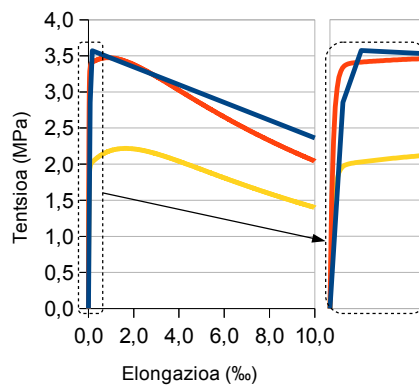
(a) Laginaren kokapena

(b) Laginaren irudia

Lagin zbk.		Luzera (mm)	Zabalera (mm)	Altuera (mm)	Zuntz kopurua haustura planoan	
339		595	152	150	99	
		$L_{0/15}$ (H)	$L_{15/30}$ (H)	$L_{30/45}$ (H)	$L_{45/60}$ (H)	
		1.659	1.781	1.833	1.246	
F_L (KN)	F_1 (KN)	F_2 (KN)	F_3 (KN)	F_4 (KN)	α_{pre}	α_{post}
21.56	35.96	34.64	29.03	24.33	1.001	100
$f_{ct,fl}$ (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)	α_{pre}	α_{post}
7.14	11.90	11.47	9.61	8.05	100	10

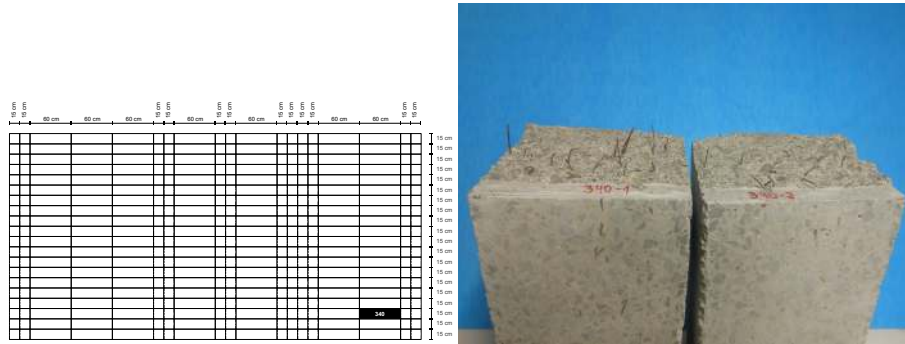


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

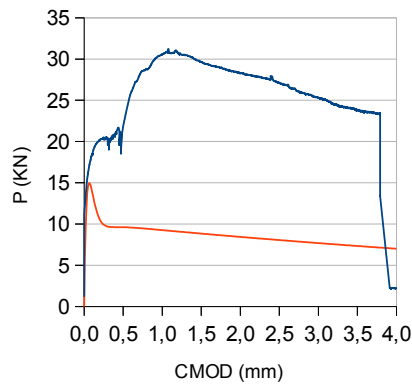
Oharrak:



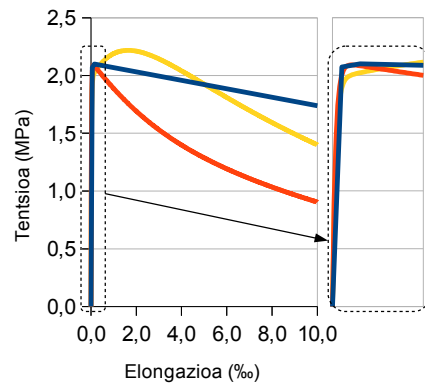
(a) Laginaren kokapena

(b) Laginaren irudia

Lagin zbk.		Luzera (mm)	Zabalera (mm)	Altuera (mm)	Zuntz kopurua haustura planoan	
340		588	149	143	34	
		$L_{0/15}$ (H)	$L_{15/30}$ (H)	$L_{30/45}$ (H)	$L_{45/60}$ (H)	
		0.964	0.756	0.413	0.133	
F_L (KN)	F_1 (KN)	F_2 (KN)	F_3 (KN)	F_4 (KN)	α_{pre}	α_{post}
17.74	16.11	14.12	9.72	6.30	1.001	100
$f_{ct,fl}$ (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)	α_{pre}	α_{post}
5.18	7.00	9.49	8.68	7.62	100	10

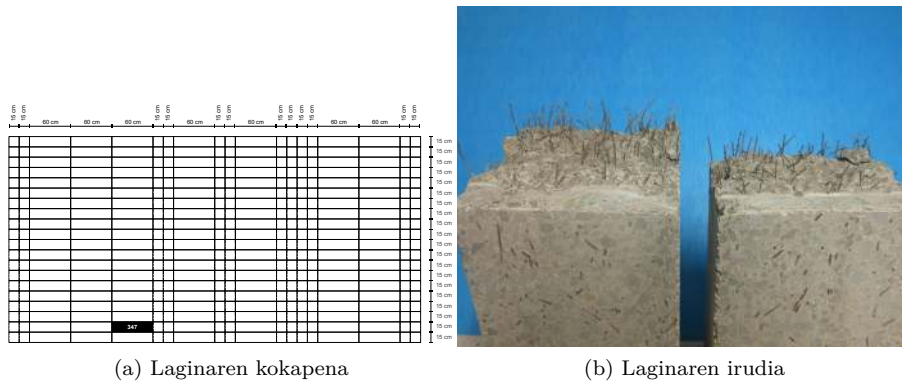


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

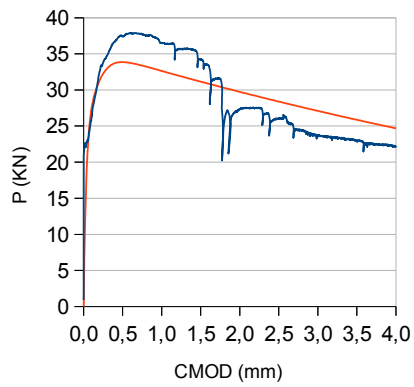
Oharrak:



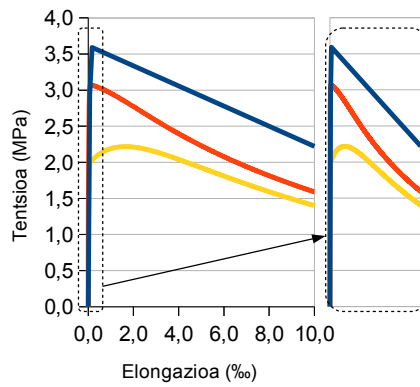
(a) Laginaren kokapena

(b) Laginaren irudia

Lagin zbk.	Luzera (mm)	Zabalera (mm)	Altuera (mm)	Zuntz kopurua haustura planoan		
347	$L_{0/15}$ (H)	$L_{15/30}$ (H)	$L_{30/45}$ (H)	N/A		
	2.179	2.863	2.328	$L_{45/60}$ (H) 1.969		
F_L (KN)	F_1 (KN)	F_2 (KN)	F_3 (KN)	F_4 (KN)	α_{pre}	α_{post}
22.93	37.39	34.24	26.05	23.06	100	10
$f_{ct,fl}$ (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)	α_{pre}	α_{post}

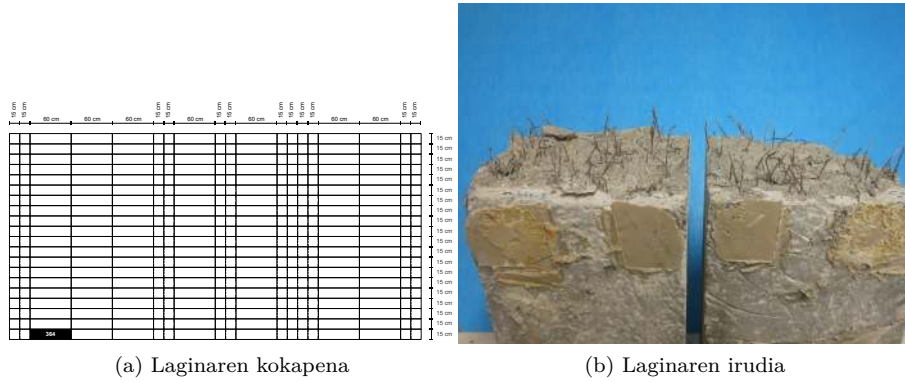


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

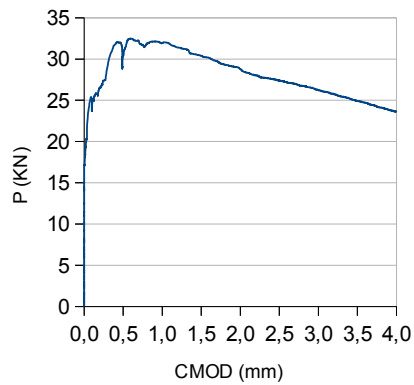
Oharrak:



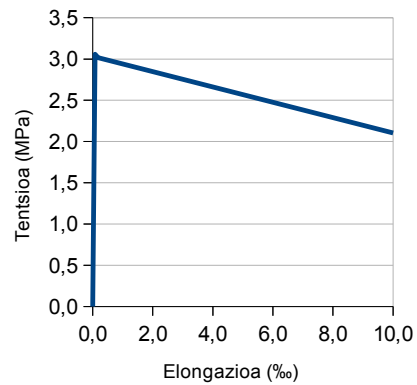
(a) Laginaren kokapena

(b) Laginaren irudia

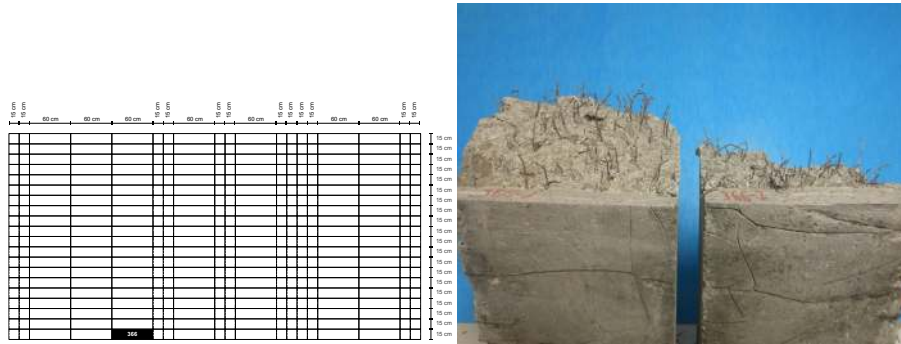
Lagin zbk.		Luzera (mm)	Zabalera (mm)	Altuera (mm)	Zuntz kopurua haustura planoan	
364		133	133	124	124	
		$L_{0/15}$ (H)	$L_{15/30}$ (H)	$L_{30/45}$ (H)	$L_{45/60}$ (H)	
		N/A	N/A	N/A	N/A	
F_L (KN)	F_1 (KN)	F_2 (KN)	F_3 (KN)	F_4 (KN)	α_{pre}	α_{post}
23.09	30.38	30.39	27.37	27.25	1.001	100
$f_{ct,fl}$ (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)	α_{pre}	α_{post}
7.64	10.06	10.06	9.06	8.25	100	10



(a) P-CMOD

(b) $\sigma - \epsilon$

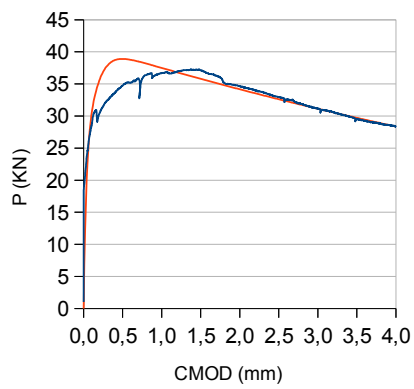
Oharrak:



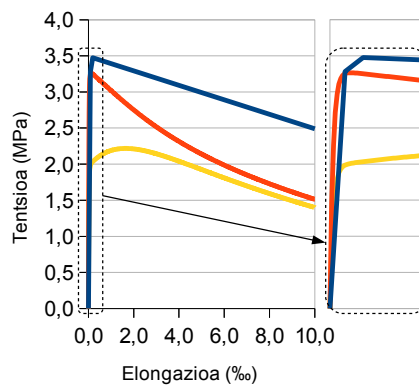
(a) Laginaren kokapena

(b) Laginaren irudia

Lagin zbk.		Luzera (mm)	Zabalera (mm)	Altuera (mm)	Zuntz kopurua haustura planoan	
366		596	144	138	154	
		$L_{0/15}$ (H)	$L_{15/30}$ (H)	$L_{30/45}$ (H)	$L_{45/60}$ (H)	
		2.269	2.369	2.354	1.924	
F_L (KN)	F_1 (KN)	F_2 (KN)	F_3 (KN)	F_4 (KN)	α_{pre}	α_{post}
24.60	34.75	37.12	32.97	29.52	1.001	100
$f_{ct,fl}$ (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)	α_{pre}	α_{post}
8.20	11.58	12.37	10.99	9.84	100	10

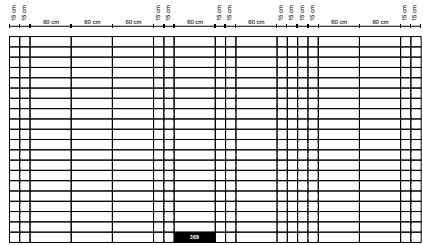


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

Oharrak:

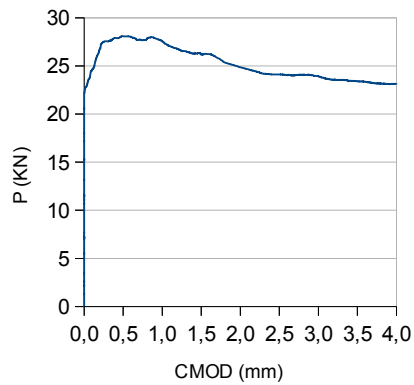


(a) Laginaren kokapena

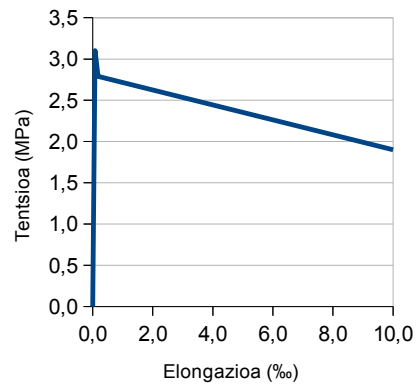


(b) Laginaren irudia

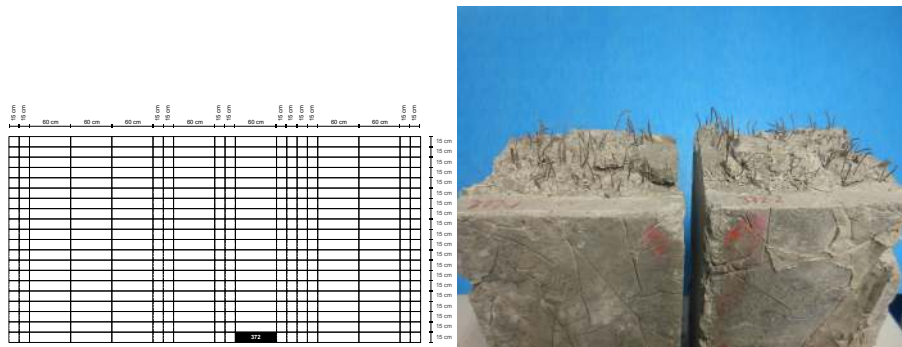
Lagin zbk.		Luzera (mm)	Zabalera (mm)	Altuera (mm)	Zuntz kopurua haustura planoan	
369			145		135	
		$L_{0/15}$ (H)	$L_{15/30}$ (H)	$L_{30/45}$ (H)	$L_{45/60}$ (H)	
		N/A	N/A	N/A	N/A	
F_L (KN)	F_1 (KN)	F_2 (KN)	F_3 (KN)	F_4 (KN)	α_{pre}	α_{post}
23.42	28.09	26.16	24.11	23.56	N/A	N/A
$f_{ct,fl}$ (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)	α_{pre}	α_{post}
7.75	9.30	8.66	7.98	7.74	N/A	N/A



(a) P-CMOD

(b) $\sigma - \epsilon$

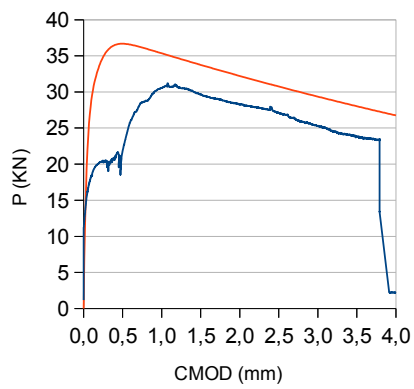
Oharrak:



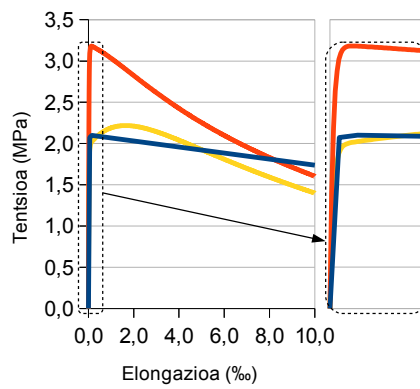
(a) Laginaren kokapena

(b) Laginaren irudia

Lagin zbk.		Luzera (mm)	Zabalera (mm)	Altuera (mm)	Zuntz kopurua haustura planoan	
372		599	150	148	155	
		$L_{0/15}$ (H)	$L_{15/30}$ (H)	$L_{30/45}$ (H)	$L_{45/60}$ (H)	
		2.038	2.218	2.249	1.890	
F_L (KN)	F_1 (KN)	F_2 (KN)	F_3 (KN)	F_4 (KN)	α_{pre}	α_{post}
16.19	21.87	29.65	27.11	22.80	1.001	100
$f_{ct,fl}$ (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)	α_{pre}	α_{post}
5.18	7.00	9.49	8.68	7.62	100	10

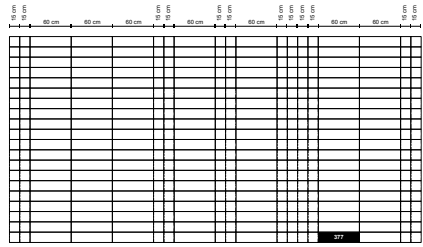


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

Oharrak:

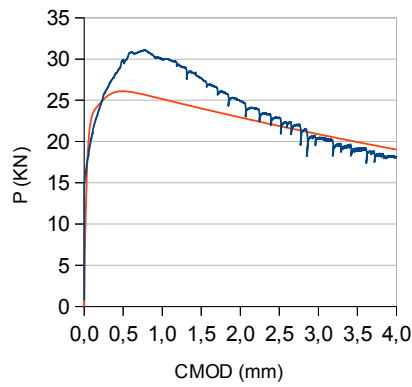


(a) Laginaren kokapena

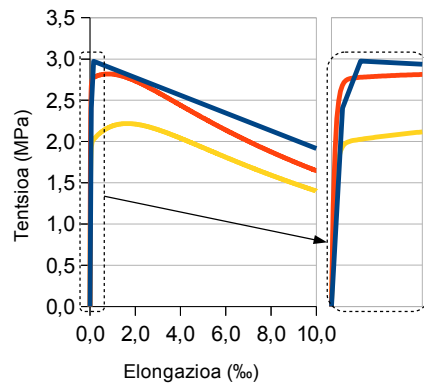


(b) Laginaren irudia

Lagin zbk.	Luzera (mm)	Zabalera (mm)	Altuera (mm)	Zuntz kopurua haustura planoan			
377	602	145	152	88			
	$L_{0/15}$ (H)	$L_{15/30}$ (H)	$L_{30/45}$ (H)	$L_{45/60}$ (H)			
	1.498	1.729	1.446	1.132			
	F_L (KN)	F_1 (KN)	F_2 (KN)	F_3 (KN)	F_4 (KN)	α_{pre}	α_{post}
	18.16	29.93	27.69	22.88	19.16	1.001	100
	$f_{ct,fl}$ (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)	α_{pre}	α_{post}
	6.01	9.91	9.17	7.57	6.34	100	10

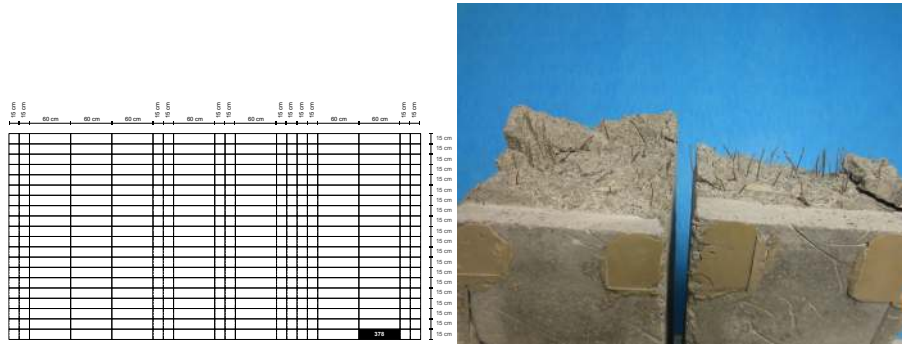


(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

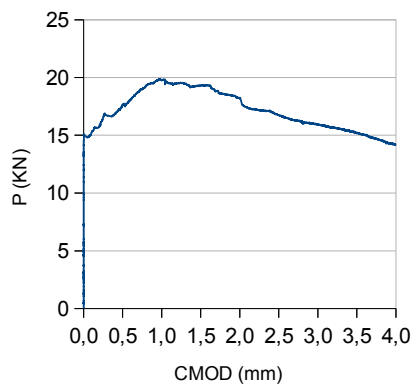
Oharrak:



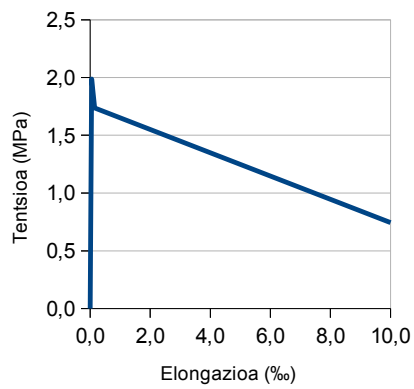
(a) Laginaren kokapena

(b) Laginaren irudia

Lagin zbk.		Luzera (mm)	Zabalera (mm)	Altuera (mm)	Zuntz kopurua haustura planoan	
378			146		65	
		$L_{0/15}$ (H)	$L_{15/30}$ (H)	$L_{30/45}$ (H)	$L_{45/60}$ (H)	
		N/A	N/A	N/A	N/A	
F_L (KN)	F_1 (KN)	F_2 (KN)	F_3 (KN)	F_4 (KN)	α_{pre}	α_{post}
15.11	17.61	19.33	16.74	15.20	N/A	N/A
$f_{ct,fl}$ (MPa)	$f_{R,1}$ (MPa)	$f_{R,2}$ (MPa)	$f_{R,3}$ (MPa)	$f_{R,4}$ (MPa)	α_{pre}	α_{post}
4.97	5.79	6.36	5.50	5.00	N/A	N/A



(a) P-CMOD



(b) $\sigma - \epsilon$

Oharrak:

D ERANSKINA

Simulazio konputazionalak

D.1 BML biskometroarekiko alderaketa

7.2.1 Ataleko 7.5a eta 7.5b Irudietan azaltzen diren grafikoak, D.1 Taulan biltzen diren balioei dagozkie. Zenbait erlazio alde batera utzi dira, tentsio mugaren balio nuluek (edo baxuek) errealitatearekin bat ez datorren dispertsio altua dakartzatelako.

τ (Pa)	μ (Pa·s)	D_f (mm)	T_{50} (s)	$\tilde{\tau}_0$ ($\cdot 10^{-3}$)	$\tilde{\mu}$ ($\cdot 10^{-3}$)
19	24	635	1	9	5
14	33	695	1,7	7	19
12	26	713	1	7	5
15	31	655	1	8	5
31	41	570	2	10	20
11	20	740	1	6	6
12	30	665	1	8	6
19	32	660	1,3	8	11
28	41	585	1,3	10	9
29	37	558	1,5	10	11
0	69	590	2,1	9	22
3	48	665	1,7	7	17
4	60	635	2,5	6	33
35	48	560	2,1	10	22
5	55	640	1,7	8	17
0	85	640	3,4	0	64
26	63	580	2,8	8	35
26	61	602	1,2	9	8
17	60	635	2,3	7	28
11	71	662	1,8	7	19
26	71	590	2,7	8	33
21	60	615	3	4	46
21	66	600	2	9	21
0	79	685	2,3	5	32
13	69	715	2	5	27
10	83	683	2,6	3	41
17	45	660	2	7	24
12	67	575	3,3	0	61
0	76	750	1,4	6	13
0	128	640	3,3	0	61
0	107	700	2,3	4	33
7	88	675	2,6	2	44
26	93	535	4,1	0	80
0	80	680	3,2	0	60
28	51	610	1,7	9	16
59	13	605	0,7	9	0
35	14	650	1	8	5
42	38	580	2	10	20
35	46	595	1,9	9	19
21	44	620	1,6	9	15

D.1 Taula: Gerris eta BML biskometroaren arteko emaitzen alderaketa.

Taulen Aurkibidea

2.1	Isurpen motak.	29
2.2	Biskositate motak.	29
2.3	Blokeo erresistentzia motak.	29
3.1	Hautatu diren zuntzen ezaugarriak.	44
3.2	Agregakinen granulometria.	49
3.3	Dosifikazio teorikoa.	53
4.1	Benetako dosifikazioa.	59
5.1	Norabidea faktorearen balioztapena.	76
5.2	Marko eta harilaren ezaugarriak.	77
5.3	Norabide faktorearen balioztapena metodo magnetikoen bitartez.	88
5.4	TAK emaitzak lagin txikietan.	94
5.5	Azterketa magnetiko eta analisi tomografikoaren datuak.	94
5.6	Presiopeko ur-sartze balioak.	97
6.1	Probeta kubikoen konpresio erresistentziaren emaitzak.	100
6.2	Probeta zilindrikoen konpresio erresistentziaren emaitzak.	101
6.3	Bartzelona entseguaren emaitzak.	105
6.4	Bartzelona entseguaren emaitzak Y norabidean.	107
6.5	Lagin zilindrikoen zeharkako erresistentziaren emaitzak.	109
6.6	Probeten ebakitzaila erresistentziaren emaitzak.	111
6.7	Laginen flexotrazio erresistentziaren emaitzak.	114
6.8	Erresistentzia erreal eta aurreikusien arteko ratioa.	123
6.9	Hasiera eta amaierako erregresio lerroen arabera aurreikusten diren inductantzia aldakuntzaren arteko ezberdintasunak, hondar erresistentzietan dagokionez.	123
6.10	Materialaren portaera aurreikusteko sarrera parametroak.	127
7.1	Konoarekin eta konorik gabeko simulazioen neurketen ezberdintasunak.	140
7.2	Funtzio sigmoideen abiapuntu parametroak.	152
8.1	HAT-aren kostuan zenbait faktorek duten kostu erlatiboa [Garrido (2004)].	160
8.2	Esfortzu maximoak.	166
8.3	Dosifikazio alderaketa.	167
8.4	Planteatutako haztatze koefizienteak.	173

8.5	Haztatze koefizienteak.	173
8.6	Zementu edukiaren optimizazioa.	174
8.7	Agregakin tamainaren optimizazioa.	175
8.8	Nahasketa uraren optimizazioa.	177
8.9	Dosifikazioan erabilitako gehigarri kimikoen optimizazioa.	179
8.10	Armatuaren optimizazioa.	180
8.11	Inpaktu kontrola.	182
8.12	Egikaritze epeen murrizketa.	183
8.13	Egindako kalitate kontrol entseguak.	184
8.14	Aztertutako kasuen alderaketa.	186
A.1	Pultsu ultrasonikoen entseguaren emaitza guztiak (norabide hori- zontala).	222
A.2	Pultsu ultrasonikoen entseguaren emaitza guztiak (norabide berti- kala).	226
B.1	Lagin kubikoen induktantzia aldakuntza balioen zerrenda haril ez- berdinetan.	232
B.2	Lagin prismatikoen induktantzia aldakuntza balioen zerrenda. . .	236
D.1	Gerris eta BML biskometroaren arteko emaitzen alderaketa. . . .	306

Irudien Aurkibidea

1.1	Ikerketan uztartzen diren hormigoia-aren teknologiak.	4
1.2	AZIHATaren optimizazioa - tesia osatzen duten 7 atalen ikuspegi orokorra.	6
2.1	Harikortasun gehitzea zuntz eduki ezberdinetarako.	12
2.2	Agregakinen gehienezko tamainaren eragina [Johnston (1996)]. . .	13
2.3	Zuntz motak.	14
2.4	ZIH-en sailkapen eskematikoa [Rokugo et al (2009)].	16
2.5	ZIH-en sailkapen grafikoa [Naaman and Reinhardt (2006)].	16
2.6	AZIH-aren tentsio-elongazio $\sigma - \epsilon$ eta tentsio-pitzadura irekidura $\sigma - \omega$ diagramak [Laranjeira et al (2010)].	18
2.7	Karga-irristatze erlazioa erauzte entseguan zehar [Cunha (2010)].	19
2.8	Erauzte entseguaren konfigurazio motak [Cunha (2010)].	20
2.9	Zuntzen biraketaren mugaketa 3Dtik 2Dra.	22
2.10	AZIH-aren modelo eratzailak [Blanco Álvarez et al (2010)].	23
2.11	AZIH laginaren TAC-a.	27
2.12	HAT-aren zenbait osagaien eragina [Wallevik (2003)].	31
2.13	Zenbait hormigoien erreologiaren erkaketa [Wallevik (2003)].	32
2.14	HAT-arentzako balio egokien tartea [Wallevik (2003)].	32
2.15	HAT eta hormigoi arruntaren dosifikazioa.	33
2.16	HAT-aren fresko egoerako entseguak.	34
2.17	HAT-zko hormaren hormigoitzea [Thrane (2007)].	35
2.18	Jariakin ez-Newtondarren modeloak.	38
3.1	Entseguetan erabili diren zuntzen hiru dimentsioko modeloak. . .	44
3.2	Zuntzak morteroan eta lokailu tresneria.	45
3.3	Zuntzen erauzketarako entsegu-makina.	46
3.4	Zuntz mota ezberdinen karga-desplazamendu kurbak.	48
3.5	Fuller parabola eta kurba konbinatua.	50
3.6	Trinkotasun, erresistentzia eta langarritasuna harea ehunekoaren arabera.	51
3.7	Asetasuna eta gogortzearen atzeratzea gehigarri gaindosia dela eta.	52
3.8	Isurpen eskasa Gehigarri superplastifikatzaile gabezia dela era. . .	52
3.9	Laborategiko nahastearen isurpena.	53
4.1	Behin betiko nahastearen isurpena.	59
4.2	Enkofratu eta juntura zigilatuen ikuspegia.	61
4.3	Uzkurtze pitzadurak hormaren goialdean.	62

4.4	Hormaren ikuspegia enkofratua kendu ostean.	63
4.5	Tutuaren muturreko forma moldeatua ponpaketa presioa dela eta.	64
4.6	Hormaren mozte eskema eta probeten banaketa.	66
4.7	Egituraren iraultzea garabi bidez.	67
4.8	Hormaren mozketa prozedura.	67
5.1	Haztagailuen kokapena.	70
5.2	Neurketa puntuak eta tresneria.	71
5.3	Zonaldekako pultsu ultrasonikoen hedatze abiadurak (norabide horizontala).	73
5.4	Zonaldekako pultsu ultrasonikoen hedatze abiadurak (norabide bertikala).	74
5.5	Ebakidura plano normaletan moztu diren zuntzak.	75
5.6	Entseguetan erabilitako harilak.	77
5.7	Lagin kubikoak neurtzeko prozedura.	77
5.8	Lagin prismatikoak neurtzeko prozedura.	78
5.9	Metodo magnetikoan erabili diren laginak (beltzez).	78
5.10	X norabidearekiko induktantzia aldaketaren adierazpen grafikoa.	79
5.11	Y norabidearekiko induktantzia aldaketaren adierazpen grafikoa.	80
5.12	Z norabidearekiko induktantzia aldaketaren adierazpen grafikoa.	81
5.13	Induktantzia batzbesteko aldaketaren adierazpen grafikoa.	82
5.14	Harilen ezberdinen neurketen arteko korrelazioa.	84
5.15	Lagin prismatikoen neurketa.	85
5.16	Lagin prismatiko eta kubikoen neurketen arteko korrelazioa.	85
5.17	Laginen birrinketa eta barneko zuntzen erauzte eta pisaketa.	86
5.18	Induktantzia aldaketaren batz besteko balio eta zuntz zenbaterakoaren arteko erlazioa.	86
5.19	Norabide faktorearen zuzenketa kurba.	87
5.20	Ikerketan erabilitako tomografoak.	89
5.21	292. lagina.	91
5.22	273. lagina.	92
5.23	328. lagina	93
5.24	Metodo magnetiko eta ardatz-tomografia konputerizatuaren arteko erlazioa.	95
5.25	Neurketa sistemaren arkitektura.	95
5.26	Laginak eta sartze frontearen neurketa.	96
6.1	Kompresio-apurketa entseguan erabili diren probeta kubikoen kokapena (beltzez).	100
6.2	Laginen apurketa konpresio entseguren ondoren.	101
6.3	Biela eta tiranteen modeloa [Mora (2008)] eta egindako entseguren konfigurazioa.	103
6.4	Punzonaketa bikoitze entseguan erabili diren lagin kubikoen kokapena (beltzez).	104
6.5	Apurketa mekanismo idealizatuak, banaketa eta irristaketa [Mora (2008)].	104
6.6	Orientazio ezberdinak dituzten laginen apurketa eredia.	105
6.7	Materialaren zailtasuna.	107
6.8	Antzeko zuntz zenbaterako eta X norabideko orientazioa duten laginen arteko alderaketa.	108

6.9	Antzeko orientazioa duten laginen apurketa erredua.	109
6.10	Ebakitzaille entseguaren gauzatzea.	110
6.11	Ebakitzaille entseguan erabili diren lagin kubikoen kokapena (beltzez).	111
6.12	Flexotrakzio entseguaren gauzatzea.	112
6.13	Flexotrakzio entseguan erabili diren probeta kubikoen kokapena (beltzez).	112
6.14	Portaera mekanikoen arabera taldekatutako laginak.	115
6.15	Egituraren baitan laginen portaera mekanikoaren irudikapena.	116
6.16	Induktantzia aldakuntza eta apurketa planoaren zuntz kopuruaren arteko erlazioa.	117
6.17	Karga-induktantzia eta karga-zuntz kopuruaren arteko erlazioak F_L -rentzat.	117
6.18	Karga-induktantzia eta karga-zuntz kopuruaren arteko erlazioak F_1 -rentzat.	118
6.19	Karga-induktantzia eta karga-zuntz kopuruaren arteko erlazioak F_2 -rentzat.	118
6.20	Karga-induktantzia eta karga-zuntz kopuruaren arteko erlazioak F_3 -rentzat.	119
6.21	Karga-induktantzia eta karga-zuntz kopuruaren arteko erlazioak F_4 -rentzat.	119
6.22	Induktantzia eta erresistentzien arteko erlazioa.	121
6.23	Flexotrakzio entseguen (lauki urdinak) emaitzak eta balio aurreikusiak (erronbo gorriak).	122
6.24	Flexotrakzio entseguaren emaitzak (urdinez) eta hurbilketa esponentziala (gorriz).	126
6.25	Diagrama multilineala [EHE-08 (2008)].	127
6.26	Induktantzia eta erresistentzien arteko erlazioa.	128
6.27	Diagrama multilineala (urdinez) eta hurbilketa esponentziala (gorriz).	130
7.1	Abrams-en kono bidezko isurpen entseguaren simulazioa hainbat isurpen-tentsio eta biskositate konbinaketarentzat.	138
7.2	Masaren mugimenduaren ezberdintasuna konoaren hertsatzea dela eta.	139
7.3	T_{50} -ren aldakuntza $\tilde{\mu}$ eta $\tilde{\tau}_0$ -ren arabera.	140
7.4	D_f -ren aldakuntza $\tilde{\mu}$ eta $\tilde{\tau}_0$ -ren arabera.	141
7.5	BML biskosimetroko $\tilde{\tau}_0$ eta $\tilde{\mu}$ -ren eta CFD simulazioen $\tilde{\tau}_0$ eta $\tilde{\mu}$ -ren neurketen arteko erlazioa.	142
7.6	Hormaren eta bere ugaldetaldintzen simulazio modeloa.	143
7.7	Fintze maila eta irizpideak.	144
7.8	Hormigoiz betetako zonaldea eta sarearen fintzea.	145
7.9	Abiadura eremuak $t = 112$ s denean.	146
7.10	Abiadura eremuak $t = 439$ s denean.	147
7.11	Abiadura eremuen aurreratzea 85 eta 294. laginetan.	148
7.12	Aurreikusitako orientazio eta metodo magnetikoen bitartez detektatutakoak.	149
7.13	Orientazioen Gaussiar banaketa.	150
7.14	Simulatutako orientazioen bidezko hondar erresistentzien aurreikuspena.	151
7.15	Diagrama multilineala (urdinez) eta hurbilketa esponentziala (horiz).	154

8.1	Bilboko Ingeniaritza Goi eskola Tekniko inguruan dauden zenbait euste andel zilindrikoen kokapena.	161
8.2	Egitura ereduaren ebakidura geometrikoa.	162
8.3	Egitura ereduaren armatua.	162
8.4	Lotura eta euskarri giltzatuen berariazko xehetasunak.	163
8.5	Tarteko andelaren zehaztapen geometrikoa.	163
8.6	Tarteko andelaren eraikuntzan behar den armatua.	164
8.7	Oinarri landatu eta giltzatuko andelen desplazamendu eta esfortzu ezberdintasuna.	165
8.8	Hainbat esposizio generiko eta espezifikoen arabera zementu eduki ezberdineko eskakizuna duten hormigoien prezioa.	168
8.9	Giro esposizio maila berdina duten hormigoien osagaien ehuneko kostuaren alderaketa.	169
8.10	Eskulan eta materialen ehuneko kostuen ezberdintasunak.	170
8.11	Adierazleen eskema eta ISMA zehazteko hierarkia.	173
8.12	Zementu optimizazioaren balio-funtzioa.	175
8.13	Agregakin tamainaren optimizazioaren balio-funtzioa.	176
8.14	Nahasketa uraren optimizazioaren balio-funtzioa.	178
8.15	Erabilitako gehigarri kantiatatearen optimizazioaren balio-funtzioa.	180
8.16	Armatuaren optimizazioaren balio-funtzioa.	181
8.17	Inpaktu kontrolaren balio-funtzioa.	182
8.18	Egikaritze epearen balio-funtzioa.	183
8.19	Sortutako hondakinen optimizazioaren balio-funtzioa.	185
A.1	Sare eta egindako neurketen irudikapena.	213
A.2	Egin diren neurketetara hoberen egokitzen diren erregresio lerroak.	214

Notazioak eta akronimoak

NOTAZIOAK

Hizki erromatar larriak

A	Gizarte ekarpen koefizientea	[—]
A _i	Adierazle bakoitzaren (i=1→8) parametro adierazgarria ..	[KN]
A _b	Funtzio sigmoidearen behe asintota	[MPa]
A _t	Funtzio sigmoidearen goi asintota	[MPa]
B	Balio-bizitzaren hedatzeagatik ekarpen koefizientea	[—]
C ₁	Integrazio konstantea	[—]
C ₂	Integrazio konstantea	[—]
C ₃	Integrazio konstantea	[—]
C ₄	Integrazio konstantea	[—]
D	Xaflaren makurdura zurruntasuna	[N·m]
E	Luzetarako elastikotasun modulua	[MPa]
F _L	Proporzionaltasun mugari dagokion karga	[KN]
F ₁	$\omega = 0.5$ mm-ri dagokion karga	[KN]
F ₂	$\omega = 1.5$ mm-ri dagokion karga	[KN]
F ₃	$\omega = 2.5$ mm-ri dagokion karga	[KN]
F ₄	$\omega = 3.5$ mm-ri dagokion karga	[KN]
H	Andelaren altuera	[m]
Π_γ	Deformazio tentsorearen bigarren inbariantea	[s ⁻²]
I _{cs}	Luzera kritikoa	[mm]
K	Tinkotasun faktorea	[Pa·s ⁿ]
K _i	Adierazle bakoitzaren (i=1→8) parametro adierazgarria ..	[KN]
L	Induktantzia	[H]
P	Karga	[KN]
P _i	Adierazle bakoitzaren (i=1→8) funtzio-balioa	[KN]
P _{máx}	Gehienezko karga	[KN]
P _{pre}	Pitzadura aurreko erreferentzia puntuaren karga	[KN]
P _{post}	Pitzadura ondoko erreferentzia puntuaren karga	[KN]
R	Andelaren erradioa	[m]
R ²	Determinazio-koefizientea	[—]
T _{$\delta=1$}	1 mm-ko desplazamenduari dagokion zailtasuna	[N·m]
T _{$\delta=2$}	2 mm-ko desplazamenduari dagokion zailtasuna	[N·m]
T _{$\delta=3$}	3 mm-ko desplazamenduari dagokion zailtasuna	[N·m]
T _{$\delta=4$}	4 mm-ko desplazamenduari dagokion zailtasuna	[N·m]
T _{$\delta=5$}	5 mm-ko desplazamenduari dagokion zailtasuna	[N·m]

$T_{\delta=6}$	6 mm-ko desplazamenduari dagokion zailtasuna	[N·m]
T_{50}	Isurpen denbora	[s]
T_v	Jario denbora	[s]
TM	Gehienezko agregakin tamaina	[mm]
U	Abiaduraren osagai horizontala	[m·s ⁻¹]
V	Abiaduraren osagai bertikala	[m·s ⁻¹]
V_i	Adierazle bakoitzaren (i=1→8) balio-koefizientea	[—]
Vol	Hormigoi bolumena	[m ³]
X	Hormaren luzetarako ardatza	[—]
Y	Hormaren zeharkako ardatza	[—]
Z	Hormaren ardatz bertikala	[—]
Z^*	Andelaren presioa	[MPa]

Hizki erromatar xeheak

a	Puntzoiaren erradioa	[mm]
b	Kutxaren neurria	[m]
c	Trazatzailearen balioa	[—]
c_1	Esponentzial laukoitz modeloaren itxura konstantea	[—]
c_2	Esponentzial laukoitz modeloaren itxura konstantea	[—]
c_3	Esponentzial laukoitz modeloaren itxura konstantea	[—]
c_4	Esponentzial laukoitz modeloaren itxura konstantea	[—]
c_5	Esponentzial laukoitz modeloaren itxura konstantea	[—]
c_6	Esponentzial laukoitz modeloaren itxura konstantea	[—]
d	Zuntzaren diametroa	[mm]
d_f	Isurketa	[mm]
$d_{J,f}$	Isurketa eraztun Japoniarrean.	[mm]
e	Espesor	[m]
f_{ck}	Hormigoiaren konpresio erresistentzia adierazgarria	[MPa]
f_{cm}	Hormigoiaren batez besteko konpresio erresistentzia	[MPa]
$f_{cm,3}$	Hormigoiaren batez besteko konpresio erresistentzia 3 egu- netara	[MPa]
$f_{cm,7}$	Hormigoiaren batez besteko konpresio erresistentzia 7 egu- netara	[MPa]
$f_{cm,14}$	Hormigoiaren batez besteko konpresio erresistentzia 14 egu- netara	[MPa]
$f_{cm,28}$	Hormigoiaren batez besteko konpresio erresistentzia 28 egu- netara	[MPa]
f_{ct}	Hormigoiaren trakzio erresistentzia	[MPa]
$f_{ct,f}^f$	Hormigoiaren flexotrakzio erresistentzia	[MPa]
$f_{ct,f}$	Hormigoiaren flexotrakzio erresistentzia	[MPa]
$f_{R,1}$	Hormigoiaren lehenengo flexotrakzio hondar-erresistentzia	[MPa]
$f_{R,2}$	Hormigoiaren bigarren flexotrakzio hondar-erresistentzia	[MPa]
$f_{R,3}$	Hormigoiaren hirugarren flexotrakzio hondar-erresistentzia	[MPa]
$f_{R,4}$	Hormigoiaren laugarren flexotrakzio hondar-erresistentzia	[MPa]
g	Grabitatea	[m·s ⁻²]
h	Lagin prismatikoaren altuera	[mm]

k	Pitzadura modulua	[KN/m ³]
l	Zuntzaren luzera	[mm]
m _i	Adierazle bakoitzaren (i=1→8) parametro adierazgarria .	[KN]
n	Jario portaera indizea	[—]
n _i	Adierazle bakoitzaren (i=1→8) parametro adierazgarria .	[KN]
p _{i,j}	Adierazle bakoitzaren (i=1→8) azpi-irizpidearen (j=1→n) portzentajea	[%]
t	Denbora	[s]
\tilde{t}	Denbora adimentsionala	[—]
v	Abiadura	[m·s ⁻¹]
\tilde{v}	Abiadura adimentsionala	[—]
x ₀	Funtzio sigmoidearen inflexio puntua	[°]
x _{pre}	Pitzadura aurreko erreferentzia puntuaren fisura irekiera .	[mm]
x _{post}	Pitzadura ondoko erreferentzia puntuaren fisura irekiera .	[mm]
w	Funtzio sigmoidearen trantsizio zabalera	[°]

Hizki greko larriak

$\Delta L_{0/15}$	Induktantzia aldakuntza lagin prismatikoen lehenengo laurdenean	[H]
$\Delta L_{15/30}$	Induktantzia aldakuntza lagin prismatikoen bigarren laurdenean	[H]
$\Delta L_{30/45}$	Induktantzia aldakuntza lagin prismatikoen hirugarren laurdenean	[H]
$\Delta L_{45/60}$	Induktantzia aldakuntza lagin prismatikoen laugarren laurdenean	[H]
ΔL_m	Induktantziaren batez besteko aldakuntza hiru ardatz nagusietan	[H]
ΔL_x	Induktantzia aldakuntza X ardatzean	[H]
ΔL_y	Induktantzia aldakuntza Y ardatzean	[H]
ΔL_z	Induktantzia aldakuntza Z ardatzean	[H]
$\Delta L_{i,\%}$	Induktantzia aldakuntzaren portzentajea ardatz bakoitzean (X,Y,Z)	[%]
$\Delta L_{x,\%}$	Induktantzia aldakuntzaren portzentajea X ardatzean ...	[%]
$\Delta L_{y,\%}$	Induktantzia aldakuntzaren portzentajea Y ardatzean ...	[%]
$\Delta L_{z,\%}$	Induktantzia aldakuntzaren portzentajea Z ardatzean	[%]
$\sum X$	X norabidean projektaturako azaleren batura	[mm ²]
$\sum Y$	Y norabidean projektaturako azaleren batura	[mm ²]
$\sum Z$	Z norabidean projektaturako azaleren batura.....	[mm ²]

Hizki greko xeheak

α_i	Adierazle bakoitzaren (i=1→8) haztapen koefizientea	[—]
α_{pre}	Esponentzial laukoitz modeloaren itxura koefizientea	[—]
α_{post}	Esponentzial laukoitz modeloaren itxura koefizientea	[—]
β	Itxura koefiziente zilindrikoa	[m ⁻¹]
β_i	Adierazle bakoitzaren (i=1→8) haztapen koefizientea	[—]

γ	Deformazio tasa	[s ⁻¹]
$ \dot{\gamma} $	Deformazio tasaren tentsorea	[s ⁻²]
γ_i	Adierazle bakoitzaren (i=1→8) haztapen koefizientea.....	[—]
δ	Desplazamendua	[mm]
ϵ	Elongazioa	[—]
η	Itxurazko likatasuna	[Pa·s]
η_θ	Norabide faktorea	[—]
$\eta_{i,\theta}$	Batez besteko norabide faktorea ardatz bakoitzean (X,Y,Z)	[—]
$\eta_{x,\theta}$	Batez besteko norabide faktorea X ardatzean	[—]
$\eta_{y,\theta}$	Batez besteko norabide faktorea Y ardatzean	[—]
$\eta_{z,\theta}$	Batez besteko norabide faktorea Z ardatzean	[—]
θ	Zuntzaren angelua	[°]
$\theta_{i,m}$	Batez besteko norabide angelua ardatz bakoitzean (X,Y,Z)	[°]
$\theta_{x,m}$	Batez besteko norabide angelua X ardatzean	[°]
$\theta_{y,m}$	Batez besteko norabide angelua Y ardatzean	[°]
$\theta_{z,m}$	Batez besteko norabide angelua Z ardatzean	[°]
$\lambda_{i,j}$	Adierazle bakoitzaren (i=1→8) azpiirizpidearen (j=1→n) parametroa	[%]
μ	Likatasun plastikoa	[Pa·s]
μ_h	Hormigoiaren likatasun plastikoa	[Pa·s]
μ_a	Airearen likatasun plastikoa	[Pa·s]
$\tilde{\mu}$	Likatasun plastiko adimentsionala	[—]
ν	Poisson-en koefizientea	[—]
ρ	Dentsitatea	[Kg·m ⁻³]
ρ_h	Hormigoiaren dentsitatea	[Kg·m ⁻³]
ρ_a	Airearen dentsitatea	[Kg·m ⁻³]
σ	Tentsioa	[MPa]
σ_{pre}	Pitzadura aurreko erreferentzia puntuaren tentsioa	[MPa]
σ_{post}	Pitzadura ondoko erreferentzia puntuaren tentsioa	[MPa]
τ_0	Isurpen-tentsioa	[Pa]
$\tau_{0,h}$	Hormigoiaren isurpen-tentsioa	[Pa]
$\tau_{0,a}$	Airearen isurpen-tentsioa	[Pa]
$\tilde{\tau}_0$	Isurpen-tentsio adimentsionala	[—]
τ_v	Ebakitzaile erresistentzia	[MPa]
ω	Pitzadura irekidura	[mm]

AKRONIMOAK

AC-IS	Alternate Current Impedance Spectroscopy (Korronte Aldizkatzaileko Inpedantzia Espektroskopia)
AZIH	Altzairu Zuntzez Indartutako Hormigoia
AZIHAT	Altzairu Zuntzez Indartutako Hormigoi Autotrinkotzailea
CFD	Computational Fluid Dynamics (Jariakinen Dinamika Konputazionala)
CMOD	Crack Mouth Opening Displacement (Pitzadura-Aho Irekiera Desplazamendua)

CPF	Controlled Permeability Formwork (Iragazkortasun Kontrolatutun Enkofratua)
C.V.	Aldakuntza-koefizientea
DEM	Distinct Element Method (Elementu Ezberdinen Metodoa)
DPD	Disipative Particles Dynamics (Partikula Barreiatzaileen Dinamika)
DVEM	Divided Viscoplastic Element Method (Elementu Biskoplastiko Zatituen Metodoa)
ECC	Engineered Cementitious Composites (Ingeniaritza Zementu-Konposatuak)
EHE	Instrucción de Hormigón Estructural (Egitura-Hormigoiaren Instrukzioa)
EHH	Erresistentzia Handiko Hormigoia
ELU	Estados Límites Últimos (Azken Muga Egoerak)
ELS	Estados Límites de Servicio (Zerbitzu Muga Egoerak)
E.T.A.P	Edateko Uren Araztegi
FCM	Fictitious Crack Model (Itxurazko Pitzaduraren Modeloa)
FEM	Finite Element Method (Elementu Finituen Metodoa)
FEMLIP	Finite Element Method with Lagrangian Integration Points (Elementu Finituen Metodoa Integrazio Puntu Lagrangiarrekin)
FRC	Fibre Reinforced Concrete (Zuntzez Indartutako Hormigoia)
FRCC	Fibre Reinforced Cementitious Composites (Zuntzez Indartutako Zementu-Konposatuak)
HA	Hormigoi Arrunta
HAT	Hormigón Autotrinkotzailea
HPFRCC	High Performance Fibre Reinforced Cementitious Composites (Zuntzez Indartutako Goi Betekizun Zementu-Konposatuak)
IBM	Immersed Boundary Method (Muga Murgilduaren Metodoa)
ICES	Índice de Contribución de la Estructura a la Sostenibilidad (Egituraren Jasangarritasun Ekarpen Indizea)
ISMA	Índice de Sostenibilidad Medioambiental (Ingurumen Jasangarritasun Indizea)
LMA	Levenberg-Marquardt Algorithm (Levenberg-Marquardt Algoritmoa)
LOP	Limit Of Proportionality (Proporzionaltasun Muga)
LSM	Level Set Method (Maila-Multzo Metodoa)
NDT	Non-Destructive Testing (Entsegu Ez-Suntsitzaileak)
SP	Superplastifikatzailea
TAC	Tomografía Axial Computerizada (Ardatz-Tomografia Konputerizatua)

UFC	Ultra High Strength Fibre Reinforced Cementitious Composites (Zuntzez Indartutako Erresistentzia Ultra Handiko Zementu-Konposatuak)
VFEM	Viscoplastic Finite Element Method (Elementu Biskoplastiko Finituen Metodoa)
VSEM	Viscoplastic Suspended Element Method (Esekitako Elementu Biskoplastikoen Metodoa)
VOF	Volume of Fluid (Jariakin Bolumena)
ZIH	Zuntzez Indartutako Hormigoia

Argitalpenak

Jarraian, Doktore Tesi honen ikerketen ondorioz plazaratu diren nazioarteko argitalpenak zerrendatzen dira:

ARTIKULU ZIENTIFIKOAK

Orbe, A., Cuadrado, J., Losada, R., Rojí, E. *Framework for the design and analysis of steel fiber reinforced self-compacting concrete structures*. Construct Build Mater 2012;35(0):676 – 686. (Q1)

Orbe, A., Rojí, E., Cuadrado, J., Losada, R. *Calibration patterns for predicting residual strengths of steel fibre reinforced concrete (SFRC)*. Compos Part B-Eng. Argitaratzeko onartua. (Q1)

Orbe, A., Cuadrado, J., Losada, R., Rojí, E. *The prediction of bending strengths in SFRSCC using computational fluid dynamics (CFD)*. Comput Concrete. Berrikuspenean. (Q2)

Orbe, A., Cuadrado, J., Losada, R., Rojí, E. *Estudio para la optimización de la composición de un HACRFA (Hormigón Autocompactante Reforzado con Fibras de Acero) estructural*, Inf Constr. Argitaratzeko onartua. (Q3)

KONGRESUETAKO TXOSTENAK

Orbe, A., Cuadrado, J., Losada, R., Rojí, E. *Simulations of computational fluid dynamics (CFD) for the prediction of fibre orientation in SFRSCC*, In: Computational Technologies in Concrete Structures (CTCS13), KAIST, Jeju-do, South Korea, September 2013, p. 142 + CD.

Orbe, A., Cuadrado, J., Losada, R., Rojí, E., Maturana, A. *Desarrollo estructural del HACRFA: Hacia una caracterización de su composición*, In: V Congreso Internacional de Estructuras, Asociación científico-técnica del hormigón estructural (ACHE); Barcelona, Spain, October 2011. p. 213-214 + CD.

Orbe, A., Cuadrado, J., Losada, R., Rojí, E. *Diseño de estructuras de contención innovadoras*, In: XV International congress on project engineering, AEIPRO, Huesca, Spain, July 2011, p. 60 + CD.

