

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 xaboia,
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 sortzearen; 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 Jariekinen 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	Pultsu 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



Universidad
del País Vasco

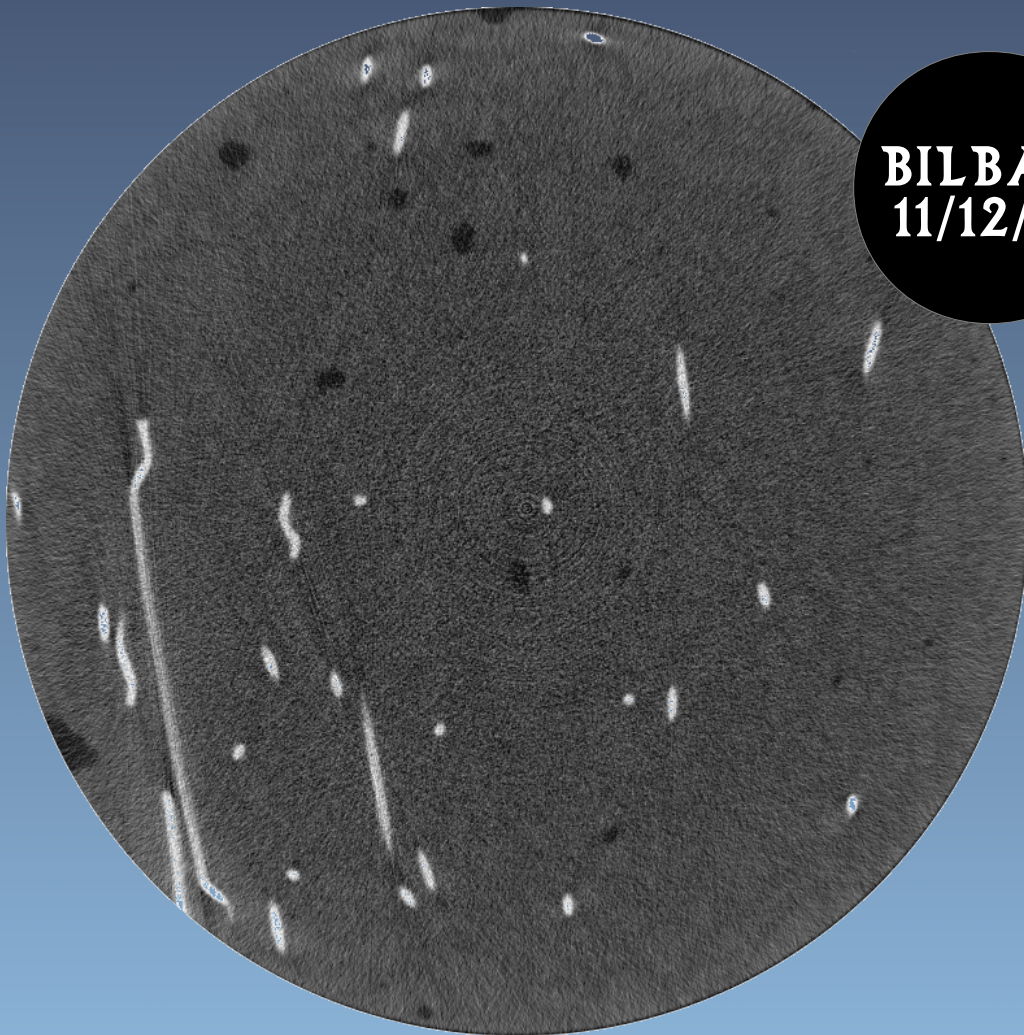
Euskal Herriko
Unibertsitatea



Ingeniaritza Goi Eskola Teknikoa
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Bilbao

ERRESISTENTZIA MODERATUKO OHIKO APLIKAZIOETAN ALTZAIRU ZUNTZEZ INDARTURIKO HORMIGOI AUTOTRINKOTZAILEAREN ERABILERAREN OPTIMIZAZIOA

(Optimización del Uso de Hormigones Autocompactantes Reforzados con
Fibras de Acero en Aplicaciones Convencionales de Resistencias Moderadas)



BILBAO
11/12/13

DOKTORE TESIA / TESIS DOCTORAL

EGILEA / AUTOR: **AIMAR ORBE MATEO**

ZUZENDARIAK / DIRECTORES: **RAMÓN LOSADA RODRÍGUEZ**
EDUARDO ROJÍ CHANDRO

Tesis Doctoral

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

(Optimización del uso de Hormigones Autocompactantes Reforzados con
Fibras de Acero en Aplicaciones Convencionales de Resistencias Moderadas)

Presentada por
Aimar Orbe Mateo

Para la obtención del grado de
Doctor Ingeniero Industrial

por la
**Universidad del País Vasco /
Euskal Herriko Unibertsitateko**
en el
Departamento de Ingeniería Mecánica

Dirigido por:
Dr. D. Ramon Losada Rodríguez
Dr. D. Eduardo Rojí Chandro

Bilbao, Octubre de 2013

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

Resumen

El objetivo de la presente tesis doctoral, se centra en plantear las posibilidades estructurales de fibras cortas de acero como refuerzo de la matriz de hormigón, habitualmente denominado HRFA, junto con la posibilidad de proporcionarle propiedades autocompactantes, que mejoren ciertos aspectos del material, formando el denominado Hormigón Autocompactante Reforzado con Fibras de Acero (HACRFA), en determinadas condiciones, gracias a las propiedades y características que se han atestiguado en este documento.

Para tal fin y a diferencia de la mayoría de las experiencias anteriores que conocemos, se construye y analiza un tramo de muro de gran envergadura (3 metros de alto y 6 metros de largo). Este planteamiento permite estudiar la disposición de las fibras de acero dentro de un elemento estructural de gran tamaño y ejecutado en condiciones reales de obra, para determinar el comportamiento del material teniendo en cuenta todos los condicionantes posibles, algunos de los cuales no están presentes en las investigaciones de laboratorio.

La exhaustiva caracterización del material que compone la estructura, conlleva la división del muro en 380 probetas de diversos tamaños que se someten a prometedores ensayos no destructivos y a los habituales ensayos destructivos. Las correlaciones establecidas entre ambos campos, posibilitan la determinación de aspectos resistentes de forma indirecta y sin dañar el material, estableciendo nuevas vías para un interesante control de calidad sobre la propia estructura.

Para complementar el análisis a posteriori, se establece una metodología para determinar de manera previa a la ejecución de los trabajos la orientación de las fibras dentro de la masa de hormigón. Las simulaciones realizadas por medio de la Dinámica Computacional de Fluídos, permiten además establecer una serie de estimaciones de las resistencias residuales del material a partir de la orientación de las fibras prevista, detectando a priori puntos débiles o inadecuados procesos de hormigonado.

Como colofón se realiza una comparativa económica y sostenibilidad medioambiental entre la aplicación a depósitos de contención cilíndricos propuesta, ejecutada por un lado mediante un hormigón convencional y el HACRFA por el otro. Cada sistema presenta sus ventajas y desventajas pero se concluye que el HACRFA puede resultar igual o más económico y sostenible, que un diseño estructural convencional.

Estos trabajos se enmarcan dentro de las investigaciones desarrolladas por el Área de Conocimiento de Ingeniería de la Construcción adscrito al Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU).

Aimar Orbe
Ingeniero Industrial
Bilbao, Octubre de 2013.

Agradecimientos

Quisiera agradecer primeramente a los directores de la presente Tesis Doctoral, Ramón y Eduardo, por la ayuda y paciencia que me han mostrado durante este largo periodo de trabajo. Me habéis conducido correctamente alentándome cuando más lo necesitaba y frenándome cuando me desbocaba.

También quiero expresar mi gratitud, mencionándolos por orden de cercanía: a Jesús, por estar siempre dispuesto a echarme una mano (o dos, o tres, o las que hagan falta); a Tomás, por ser un consejero inestimable; a Mikel y Fran por crear una burbuja de distensión y humor en medio del ajetreo cotidiano; a Raúl por mancharse conmigo con el polvo de los cientos de probetas que he manejado, al resto de mis compañeros de trabajo en el Departamento de Ingeniería Mecánica (Aitor, Unai, Mikel, Yokasta, Pedro, Ciprian, Gheorghe, etc.), del Departamento de Ingeniería de Comunicaciones (Amaia, Iván y Álvaro que han contribuido con un estudio paralelo de las señales atenuadas por el HACRFA) y, en general, de la ETSI de Bilbao.

Así mismo, aprecio la colaboración de David, Leire, Josu, Pello, Jesús, Bengo y demás profesionales de Tecnalia, por el apoyo técnico prestado, además de ser excelentes compañeros.

De igual manera, debo agradecer a los colegas de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Antonio, Albert, Pau, Ana y Josep María, por haberme dado ese primer empujón, los conocimientos iniciales y herramientas para proceder con esta ardua labor.

No puedo dejar de mencionar a José Antonio Hurtado y Santiago Beceiro, excelentes profesionales de Financiera y Minera (Italcementi Group), así como a Javier Álamo de ArcelorMittal (Wire-Solutions), por la ayuda técnica y material prestada. Al mismo tiempo, quiero agradecer la amabilidad e interés de Carlos García Marcos y Marcos Gregorio del Consorcio de Aguas Bilbao-Bizkaia.

El estudio tomográfico ha resultado posible gracias a la colaboración de Juan Manuel Manso y Pedro Miguel Bravo en representación de la Universidad de Burgos (UBU), así como de la empresa TAC 64 S.L. a los que estoy muy agradecido.

El análisis mediante herramientas de Dinámica Computacional de Fluidos (CFD), no hubiese sido posible sin la inestimable ayuda de Daniel Fuster y Pie-

re Yves Lagréé (Institut Jean Le Rond D'Alembert UPMC), Stephan Popinet (NIWA) y, en general, de la comunidad de desarrolladores del programa Gerris.

También debo agradecer el esfuerzo de los desarrolladores de los programas de código abierto 3Dslicer, Meshlab, Salomé, LibreOffice, Texmaker, etc. por proporcionar herramientas que han servido para desarrollar la presente investigación.

Por último, parte de esta investigación ha sido financiada por los proyectos MIVES IV ref: BIA 2010-20789-C04-04 otorgado por el Ministerio de Ciencia e Innovación y BIRGAITEK 7-12-TK-2009-10 de la Diputación Foral de Bizkaia, así como agradecer al **Grupo de Investigación IT781-13** financiado por el Gobierno Vasco, por lo que el autor de la presente Tesis Doctoral muestra su más profundo agradecimiento a dichas instituciones.

No puedo pasar sin agradecer a mi familia y amigos el apoyo prestado, pero sin embargo, todo esto no hubiese sido posible sin las sonrisas que cada noche me esperaban en casa.

Indice General

Resumen	III
Abstract	VII
Agradecimientos	XI
Indice General	XV

I	Antecedentes	1
1	Introducción	3
1.1.	Ámbito de la investigación	3
1.2.	Objetivos de la investigación	5
1.3.	Metodología y procedimiento	5
1.4.	Estructura del documento	6

II	Estudios preliminares	9
2	Estado del Arte	11
2.1.	Introducción	11
2.2.	Características del HRFA	12
2.2.1.	Tipos de fibras	14
2.2.2.	Propiedades mecánicas del HRFA	15
2.2.3.	Modelos constitutivos	23
2.2.4.	Control de calidad	26
2.3.	Características del HAC	30
2.3.1.	Métodos de diseño	31
2.3.2.	Reología del HAC	33
2.3.3.	Requisitos en estado fresco	34
2.4.	Dinámica de fluidos computacional	36
2.4.1.	Fluidos no Newtonianos	38
2.5.	Aplicaciones estructurales	39
2.5.1.	Fabricación y puesta en obra	40
2.6.	Conclusiones finales	41

III	Campaña experimental en laboratorio	45
3	Selección del HACRFA	47
3.1.	Introducción	47
3.2.	Elección del tipo de fibra	47
3.2.1.	Configuración y procedimiento	49
3.2.2.	Resultados de arrancamiento	50
3.3.	Formulación del hormigón	51
3.3.1.	Determinación de la pasta	53
3.3.2.	Optimización del esqueleto granular	54
3.3.3.	Determinación de aditivos	55
3.3.4.	Procedimiento de mezcla	57
3.3.5.	Validación de resultados	57
3.4.	Consideraciones finales	58
<hr/>		
IV	Campaña experimental a escala real	61
4	Ejecución del elemento estructural	63
4.1.	Introducción	63
4.2.	Extrapolación a la fabricación en planta	63
4.2.1.	Control de humedad	64
4.2.2.	Procedimiento y ciclos de amasado	64
4.3.	Preparación del muro	65
4.3.1.	Encofrado	66
4.3.2.	Procedimiento de hormigonado	67
4.3.3.	Proceso de curado	68
4.4.	Ensayos sobre el elemento estructural	68
4.4.1.	Análisis Visual	69
4.4.2.	Impulsos ultrasónicos	70
4.5.	Selección de probetas y ensayos	71
4.5.1.	Ensayos a realizar	71
4.5.2.	Tamaño de probetas	71
4.5.3.	Esquema de corte del muro	72
4.6.	Consideraciones finales	72
5	Ensayos no destructivos (END)	77
5.1.	Introducción	77
5.2.	Velocidad de impulsos ultrasónicos	77
5.2.1.	Procedimiento del ensayo	78
5.2.2.	Resultados de las mediciones	80
5.3.	Métodos estereológicos	80
5.3.1.	Análisis de las caras de corte	83
5.3.2.	Estimación del factor de orientación	83
5.4.	Métodos magnéticos	84
5.4.1.	Configuración del ensayo	85
5.4.2.	Análisis de las probetas cúbicas	85
5.4.3.	Análisis de las probetas prismáticas	92
5.4.4.	Estimación de la densidad de fibras	94

5.4.5.	Estimación del factor de orientación	95
5.5.	Tomografía axial computerizada	97
5.5.1.	Procedimiento del estudio	98
5.5.2.	Resultados en probetas pequeñas	98
5.5.3.	Resultados en probetas grandes	99
5.5.4.	Estimación de la densidad de fibras	99
5.5.5.	Correlación con ensayos magnéticos	101
5.6.	Atenuación de señales	103
5.7.	Determinación de la permeabilidad	104
5.7.1.	Procedimiento del ensayo	105
5.7.2.	Resultados de penetración	105
5.8.	Consideraciones finales	106
6	Ensayos destructivos (ED)	107
6.1.	Introducción	107
6.2.	Ensayo de compresión	107
6.2.1.	Ubicación de las probetas	108
6.2.2.	Resultados de compresión	108
6.3.	Ensayo Barcelona	110
6.3.1.	Configuración del ensayo	110
6.3.2.	Ubicación de las probetas	111
6.3.3.	Resultados del ensayo Barcelona	112
6.4.	Ensayo Brasileño	117
6.4.1.	Configuración del ensayo	117
6.4.2.	Resultados del ensayo brasileño	118
6.5.	Ensayo a cortante	118
6.5.1.	Configuración del ensayo	118
6.5.2.	Ubicación de las probetas	118
6.5.3.	Resultados del ensayo a cortante	119
6.6.	Ensayo a flexotracción	120
6.6.1.	Configuración del ensayo	120
6.6.2.	Ubicación de las probetas	121
6.6.3.	Resultados del ensayo a flexotracción	121
6.7.	Consideraciones finales	139
V	Predicción de la orientación	141
7	Simulación de hormigonado mediante CFD	143
7.1.	Introducción	143
7.2.	Resolución de ecuaciones de Navier-Stokes	143
7.2.1.	Parámetros reológicos	144
7.2.2.	Modelo completo	151
7.3.	Resultados de la simulación	154
7.3.1.	Contrastación experimental	155
7.3.2.	Predicción de resistencias	157
7.4.	Predicción de la ley constitutiva del material	161
7.5.	Consideraciones finales	162

VI	Aplicación a casos prácticos	165
8	Depósitos circulares de contención	167
8.1.	Introducción	167
8.2.	Ejemplos de la aplicación	168
8.2.1.	Dimensiones, armados y materiales	170
8.3.	Caso de estudio	173
8.3.1.	Coste del producto	176
8.3.2.	Reducción de plazos	179
8.4.	Índice de sostenibilidad	180
8.4.1.	Criterio medioambiental de optimización del cemento.	182
8.4.2.	Criterio medioambiental de optimización de los áridos.	183
8.4.3.	Criterio medioambiental de optimización del agua de amasado.	185
8.4.4.	Criterio medioambiental de optimización del uso de aditivos.	186
8.4.5.	Criterio medioambiental de optimización del armado.	187
8.4.6.	Criterio medioambiental de control de los impactos.	190
8.4.7.	Criterio medioambiental relativo al plazo de construcción.	191
8.4.8.	Criterio medioambiental relativo al control del material.	193
8.4.9.	Comparativa entre ambos casos de estudio.	194
8.5.	Consideraciones finales	194
<hr/>		
VII	Conclusiones finales	197
9	Conclusiones y perspectivas futuras	199
9.1.	Conclusiones	199
9.2.	Nuevas líneas de investigación	205
<hr/>		
	Referencias	207
<hr/>		
	ApéndiceA Velocidad de impulsos ultrasónicos	221
A.1.	Mediciones completas	221
	ApéndiceB Método magnético	237
B.1.	Resultados completos del método magnético	237
	ApéndiceC Ensayos a flexotracción	247
C.1.	Resultados y diagramas	247
	ApéndiceD Simulaciones computacionales	315
D.1.	Comparativa respecto al viscosímetro BML	315
<hr/>		
	Índice de Tablas	317
	Índice de Figuras	319

Notaciones y Acrónimos

323

Publicaciones

329

