

# Zepa beltzezko hormigoi armatuz fabrikatutako habeen makurdura-esfortzuaren aurreko analisia

(A preliminary analysis of bending behavior of electric arc furnace slag concrete beams)

Amaia Santamaría<sup>1\*</sup>, Iñaki Marcos<sup>1</sup>, Jesus Maria Romera<sup>1</sup>, Marcos Larrauri<sup>1</sup>,  
José Tomás San José<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU), Bilboko Ingeniaritza Eskola,  
Ingeniaritza Mekanikoko Saila

<sup>2</sup> Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU), Bilboko Ingeniaritza Eskola,  
Metalgintzako meatzaritza ingeniari eta materialen zientziako Saila

**LABURPENA:** Bizi garen mundua zaintzeko erronka dugu aurrean. Garapen jasangarriko helburuak 2030 Agendan bildu dira, eta, 12. erronkari begira, «Kontsumo- eta ekoizpen-modalitate jasangarriak bermatzea», funtsezkoa da hondakinen kudeaketa lantzea. Altzairugintza-industria garrantzitsua da Euskal Herrian, ezinbestekoa ekonomiaren garapenerako. Horregatik, sektore horrek sortzen dituen hondakinei bizitz berri bat bilatzeko beharra dago. Hondakin nagusiak zepa beltzak dira eta eraikuntza-sektorean erabiltzen dira batik bat. Urte askotan, masa-hormigoietan agregakin bezala azertu izan da zepa beltzaren portaera, eta oso emaitza onak lortu dira. Horregatik, lan honetan pauso bat aurrerago emango da, eta hormigoi armatuzko egiturak eraikitzeko aztertuko da zepa beltzaren erabilera. Laborategiko lan txikiak alde batera utzita, 600 l-ko bolumena egingo da, eraikuntza-prozedura arrunt batean edozein sendotasuneko zepa beltzez eginiko hormigoia nola fabrika daitekeen baieztatzeko. Lan honen erronka 4 m-ko hormigoi armatuzko habeak fabrikatzea da, makurduraren aurreko portaera aztertzeko. Erabiliko diren hormigoiak autotrinkotzaileak izango dira. Lortutako balio esperimentalak araudietan oinarritutako balio analitikoekin alderatu dira, eta emaitza onak lortu dira.

**HITZ GAKOAK:** zepa beltza, hormigoi armatua, hormigoi autotrinkotzailea, makurduraren aurreko portaera.

**ABSTRACT:** We are facing the challenge of preserving the world where we live. The sustainable development goals have been collected in agenda 2030. Taking into account the 12<sup>th</sup> goal «Assessing the modalities of sustainable consumption and production», waste management is a process in which is mandatory to worked out. Iron and steel industry is an important industry in the Basque Country, necessary for the development of the economy. Thus, it is important to look for a new life for the waste produced by this sector. For many years, the behavior of electric arc furnace slag has been studied as an aggregate in mass concrete, obtaining very good results. Therefore, this work goes further, and studies the use of concrete with electric arc furnace slag in the construction of reinforced concrete structures. In order to confirm that the common mixing procedure of self-compacting concrete was adequate for bigger volumes than the usual made on laboratory, 600l electric arc furnace slag concrete mixes were made and used to make 4m long reinforced concrete beams. According to the bending behavior, experimental values obtained were compared to the analytical values, in accordance with the standards and the obtained results were satisfactory.

**KEYWORDS:** electric arc furnace slag, reinforced concrete, self compacting concrete; bending behavior.

\* **Harremanetan jartzeko / Corresponding author:** Amaia Santamaría, Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU), Bilboko Ingeniaritza Eskola, Ingeniaritza Mekanikoko Saila. Plaza Ingeniero Torres Quevedo, s/n (48013 Bilbo). – [amaia.santamaria@ehu.eus](mailto:amaia.santamaria@ehu.eus) – <https://orcid.org/0000-0002-4559-8734>.

**Nola aipatu / How to cite:** Santamaría, Amaia; Marcos, Iñaki; Romera, Jesus Maria; Larrauri, Marcos; San José, José Tomás (2022). «Zepa beltzezko hormigoi armatuz fabrikatutako habeen makurdura-esfortzuaren aurreko analisia»; *Ekaia*, ale berezia 2022, 49-61. (<https://doi.org/10.1387/ekaia.23143>).

Jasotze-data: 2021, urriak 26; Onartze-data: 2022, urtarrilak 12

ISSN 0214-9001 - eISSN 2444-3255 / © 2022 UPV/EHU



Lan hau Creative Commons Aitortu-EzKomertziala-LanEratorririkGabe 4.0 Nazioartekoa lizentzia baten mende dago

## 1. SARRERA

Euskal Herria eta altzairugintza lotuta egon dira historikoki [1]. XIX. mendean, euskal altzairugintzaren momentu gorenean, Espainiako altzairuaren % 60 Euskal Autonomia Erkidegoan ekoizten zen [2]. Nahiz eta ehuneko hori txikitu egin den, Euskal Autonomia Erkidegoan produzitzen den altzairu kopurua esanguratsua da oraindik ere. 2020an 3 milioi tona ekoiztu ziren [3]; hots, Espainian ekoiztutako altzairuaren % 27. Ekonomiaren ikuspuntutik begiraturaz, datu onak dira, baina altzairugintzak sortzen dituen hondakinak lurralde txiki batean kudeatu behar ditugula ere pentsatu behar dugu.

Gaur egun, beteta dauzkagu zaborteak; ez da posible altzairugintzatik ateratzen diren zepak hondakindegietara eramaten jarraitzea. Ekonomia zirkularra [4] eredu hartuta, erabilpen bat bilatu behar diegu hondakinei.

Euskal Autonomia Erkidegoan ekoizten den altzairu guztia arku elektrikoko labeetan produzitzen denez, arku elektrikoko zepak eta koilare-zepak sortzen dira gehienbat, *zepa beltz* eta *zepa zuri* deritzenak.

Azken urteotan azterlan ugari egin dira zepa beltzen inguruan [5-9]. Hainbat ikertzailek frogatu dute material ona dela agregakin bezala erabiltzeko, bai hormigoietan [10, 11], bai nahaste bituminosoetan [12]. Hormigoietan lortzen diren propietate mekanikoak [13, 14] eta iraunkortasuna [15-17] hormigoia arruntaren antzekoak direla frogatu da. Ikerketa horiek eraikuntza-proiektuetan zepa beltzekin egindako hormigoia erabiltzera bultzatu dituzte zenbait eraikitzaille eta erakunde. Bizkaian, adibidez, Bilboko portuan kai-muturrak babesten dituzten blokeak eta Sollana puntako dikea (1. irudia) eraikitzeko erabili dute [18]. Gainera, Bilboko behin-behineko autobus-geltokia eraiki zutenean, zepa beltzekin egindako hormigoia erabili zuten.

Hori gutxi ez eta 2019. urtean Eusko Jaurlaritzak dekretu bat argitaratu zuen, zeinak arku elektrikoko labeetako altzairugintzako zepa beltzen balorizazio-jardueretarako araubide juridiko aplikagarria [19] deskribatzen zuen.

Pauso handia da eraikuntza-sektorean lan egiten duten eragileak material berria erabiltzera anima daitezen. Geratzen den erroka hormigoia armatuaren propietateak frogatzea da. Hainbat ikertzaile-taldek aurre egin diote erroka horri, eta argitaratu diren lehenengo datuak nahiko onak dira [20-22]. Egindako lana, hormigoia armatuarekin probak egitea, bat dator talde hauekin. Alde batetik dimentsio errealeko habeen makurduaren aurreko portaera eta bestetik sendotasunaren erroka landu dira. Nahasketa autotrinkotzaileak lortzea izan da helburua, orain arte lan batzuetan ikusi delako zepa beltzak agregakin bezala erabiltzean sendotasun txarragoak lortzen zirela.

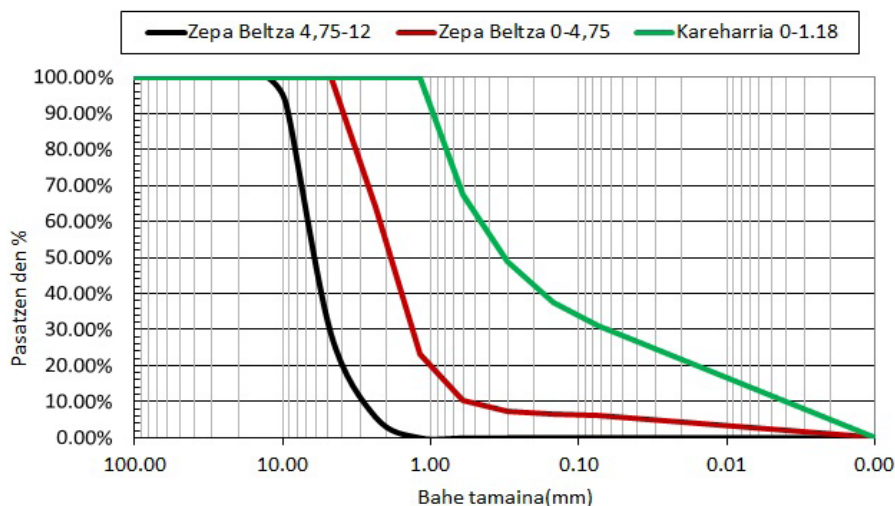


**1. irudia.** Sollana puntako dikea.

## **2. MATERIALAK**

Burgos hiriko ur-sare publikotik hartu zen ura, SUCONS taldearekin egindako lana delako. Hormigoia prestatzeko, bi zementu mota erabili ziren: batetik, I 52,5 R motako Portland zementua; bestetik, IV/B-V 32,5-N motako Portland zementua; biak UNE-EN 197-1 arauaren [23] arabera. CEM I Portland zementua Portland klinkerraz (% 90), kaltzio karbonato hautsez (% 5) eta igeltsuz (% 5) osatuta dago. CEM IV Portland zementua, berriz, Portland klinkerraz (% 50), errauts hegalariz (% 40), kaltzio karbonato hautsez (% 5) eta igeltsuz (% 5) osatuta dago.

Kareharri naturalaren agregakin finak erabili ziren, 1,18 mm baino txikiagoak, 1,5 unitateko fintasun-modulua eta 2. irudian adierazten den mailaketa dutenak. 1 mm baino txikiagoak diren partikulek funtzio garrantzitsua dute hormigoia ren funtzionamenduan. Ikerketa honetan, kareharriko agregakin finak gehitzen dira: alde batetik, zepa beltzek ez dutelako 1 mm baino gutxiagoko ale askorik, 2. irudian ikus daitekeen bezala, eta, beste aldetik, beharrezkoak direlako hormigoiak loditasun egokia izateko eta agregakin lodien segregazioa saihesteko.



## 2.1. Nahasketen diseinua

Lau nahasketa desberdin diseinatu ziren. Horietatik bi hormigoi ponpagarriak ziren, eta gainerako biak hormigoi autotrinkotzaileak. Zepa beltza erabiltzeak eragozpen bat zeukan: lortzen ziren sendotasunak, hormigoi arruntekin konparatuz, txarragoak zirela. Hori dela eta, ponpatzeko hormigoiak eta hormigoi autotrinkotzaileak egitea erabaki zen. Sendotasun mota bakoitzeko bi nahasketa desberdin egin ziren, material guztien proportzioak mantenduz, baina zementu mota desberdinak erabiliz. Horrela, zementuek sendotasunean zuten eragina eta zepa beltzek errauts hegalariekin zuten interakzioa ikus zitezkeen.

Hormigoi autotrinkotzaileak lortzea ez da lan erraza izan, nahasketa asko egin behar izan baitira dosifikazio aproposa lortu arte [25]. Egindako lanetan, agregakin finek garrantzi handia dutela ikusi zen, eta, aipatu bezala, kareharri natural finak erabili behar izan ziren sendotasun aproposak lortzeko.

2. taulan, nahasketak lortzeko erabili diren materialen proportzioak aurkezten dira. Bi nahasketa desberdintzen dira: P (ponpatzeko hormigoiak) eta A (hormigoi autotrinkotzaileak). Esan den moduan, azkenean lau nahasketa egin ziren zementua aldatuz: ponpatzeko hormigoietatik bi nahasketa lortzen dira (PI eta PIV), eta hormigoi autotrinkotzaileetatik beste bi nahasketa (AI eta AIV).

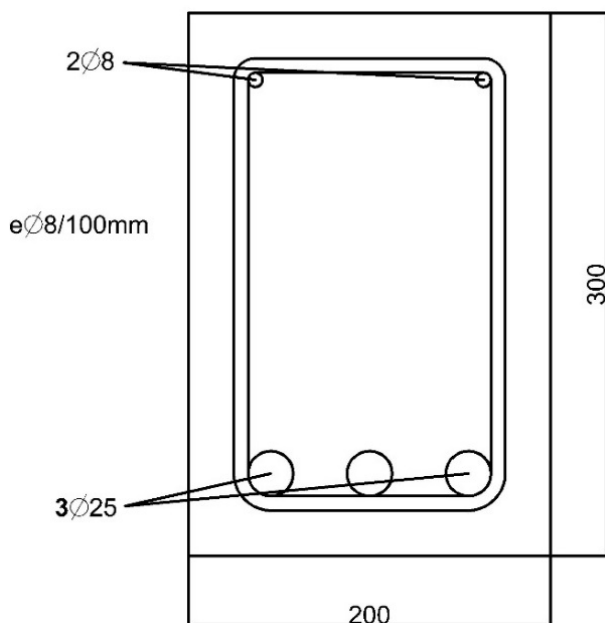
**2. taula.** Nahasketen proportzioak.

	P [kg/m <sup>3</sup> ]	A [kg/m <sup>3</sup> ]
Zementua	330	330
Ura	160	165
Zepa beltza (4,75-12 mm)	950	760
Zepa beltza (<4,75 mm)	690	550
Kareharria (<1,18 mm)	650	900
Superplastifikatzailea (% zementuarekiko, pisan)	% 1,5	% 2

## 3. HABEEN XEHETASUNAK ETA EGINDAKO ENTSEGUAK

Ikerketa honen erronketako bat habeak eraikuntza-gune baten benetako baldintzak imitatuz fabrikatzea zen. Beraz, nahasketa mota bakoitzetik 600 litroko bolumena prestatzea erabaki zen. Masa horrekin, bi habe fabrikatu ziren: bata makurduraren aurreko portaera aztertzeko, eta bestea luzaroko deformazio eta ebakiduraren aurreko portaera aztertzeko, lan honetan aztertuko ez dena. Habeak hormigoitu ostean soberan zegoen masarekin hainbat lagin egin ziren, hormigoien propietate mekanikoak aztertzeko.

Habea makurdurapean saiatzean, garrantzi handia dauka habearen hutsegitea hormigoiazen hutsegitearen ondorioz gertatzeak. Horretarako, hormigoiazen zuntz konprimatuena bere deformazio maximora heldu behar zen, hormigoiazen propietateak aztertu ahal izateko. Hori dela eta, EHE-08ko eremuen metodoaren arabera, haustura 3. eremuan ematea erabaki genuen, hormigoiazen haustura bere deformazio maximora heltzean gertatzeko eta trakzioan lan egiten ari diren armadurek beren elastikotasun-muga gaindituta izateko, tentsio maximoaren aprobetxamendua emanez.



**3. irudia.** Makurdura-habearen sekzioaren eskema.

Aurreko baldintza abiapuntu bezala harturik, 4,4 m-ko luzerako habearen diseinatu zen. Zeharkako sekzioak 200 mm-ko zabalera eta 300 mm-ko altuera zituen, 3. irudian ikusten den bezala. Trakzio-esfortzuak jasateko, 25 mm-ko hiru barra jarri ziren habearen beheko aldean. Konpresioko armadura ez zen kasu honetan beharrezkoa, eta armadura minimoa jarri zen, 8 mm-ko bi barrez osatua, muntaia errazteko. Esfortzu ebakitzailaren ondoriozko tentsioak jasateko, 8 mm-ko estribuak 100 mm-ro jarri ziren.

### 3.1. Masa-hormigoiazen egindako entseguak

Hormigoi freskoaren propietateak neurtzeko, bi sendotasun mota desberdin behar dira: ponpatzekoa eta autotrinkotzailea. Ponpatzeko hor-



tzeko erabili zen. 5. irudian ikus daiteke erabilitako ekipamendu parte baten kokapena. Jarritako ekipamendu guztia honako hau izan zen:

- 6 transduktore aldagarri lineal (LVDT).
- 5 tentsio-galga alboko aurpegietan, habearen erdiko puntuan.
- 2 tentsio-galga goiko aurpegian, habearen erdiko puntuan.
- 2 tentsio-galga beheko aurpegian, habearen erdiko puntuan.
- 3 tentsio-galga trakzioko armadura bakoitzaren behealdean, habearen erdiko puntuan.
- Sentsore bat, ingurugiroko tenperatura neurtzeko.
- Sentsore bat, habearen tenperatura neurtzeko.
- Karga-sentsore bat, zilindro hidraulikoaren karga neurtzeko.
- Transduktore bat, zilindro hidraulikoaren desplazamendua neurtzeko.

Gainera, deformazio bertikalaren datuak bikoizteko, 6 erloju konparatzaile (C) jarri ziren, 4. irudian ikusten den bezala.

Lehenengo neurria karga aplikatu barik egin zen, habearen pisu propioaren eragina zehazteko. Entsegua hiru abiadura desberdinekin burutu zen. Hasieran, eragingailuaren desplazamendua 0,5 mm/min-koa zen, lehenengo pitzadurak agertu ondoren bikoiztu egin zen abiadura (1 mm/min), eta entseguaren amaieran 2 mm/min arte igo zen abiadura.

## 4. LORTUTAKO EMAITZAK

### 4.1. Hormigoien propietateak

Hormigoi bigunetan egindako entseguetan lortu diren emaitzak 3. taulan ikus daitezke. Hormigoi ponpagarrietan lortu den sendotasuna jariazko da. Hormigoi autotrinkotzaileen sendotasuna aztertzerakoan, hasteko, erronka lortu dela ikusten dugu, hormigoiek autotrinkotzaileak izateko propietate minimoak betetzen dituztelako, Egitura Kodea kontuan harturik (irristatzea 550-850 mm artean eta zeharkatzeko gaitasuna >0,8). Lortutako hormigoiak, beren irristatze-propietatea kontuan harturik, SF2 gisa, eta, L kutxatik ateratako datuak kontuan izanik, PA2 gisa sailka daitezke, eta Egitura Kodean agertzen denaren arabera da sailkapen hori.

**3. taula.** Hormigoi bigunen emaitzak.

	Abrams-en konoa	Irristatzea	L kutxa
PI	115 mm		—
PIV	115 mm		—
AI		680 mm	1
AIV		700 mm	1



Hormigoi gogortuen propietate mekaniko nagusiak 4. taulan daude laburbilduta. Erabilitako zementuen arabera, bi motako hormigoiak bereiz daitezke, bai erresistentziari begira, bai elastikotasun-moduluari begira. I zementuarekin egindako nahasketek 50 MPa baino gehiagoko erresistentzia lortu dute 28 egunera. Aldiz, IV zementuarekin egindako nahasketak, adin berarekin, 30 MPa inguruko erresistentziara heldu dira. Datuak bat datoz zementuen ezaugarriekin, eta kalkulu teorikoak egiteko erabiliko dira.

**4. taula.** Hormigoi gogortuen propietate mekaniko nagusiak.

	fc 28 egun [MPa]	E [GPa]
PI	53	38,6
PIV	29	31,4
AI	53	39,9
AIV	31	33,8

#### 4.2. Makurdura-saiakuntzatik ateratako emaitzak

Lehenik, teorikoki kalkulatu dira habearen haustura gertatzen den zuntz neutroaren sakonera eta jasan dezaketen momentu maximoa. Horretarako, hormigoiaren parabola-errektangulu diagraman eta altzairuaren diagrama sinplifikatuan oinarritu gara. Ez dira koefizienteak aplikatu, ez materiale-tan, ezta kargan ere, estimazioa errealitatetik ahalik eta hurbilen egoteko. Erabili diren ekuazioak EHE-08 arauan agertzen den eremuen metodoan oinarrituta daude, eta egiaztatu da Egitura Kode berrian ekuazioak ez direla aldatzen. Aipatu bezala, habeak 3. eremuan hausteko diseinatu dira; horregatik, aplikatu diren formulak honako hauek dira:

$$N_u = \psi b x f_c + A_2 f_y - A_1 f_y \quad (1)$$

$$M_d = \psi b x f_c (d - \lambda x) + A_2 f_y (d - d_2) \quad (2)$$

3. eremuan  $\psi$  eta  $\lambda$ -k balio zehatzak dituzte: 0,8095 eta 0,416, hurrenez hurren. Material guztien datuak ezagunak dira. Ez zen esfortzu axialik aplikatu; beraz,  $N_u = 0$ . Geratzen diren ezezagun bakarrak zuntz neutroaren sakonera eta momentu makurtzaileak dira. 4. taulan baturik daude lortutako emaitza guztiak, bai analitikoak, bai esperimentalak.

Zuntz neutroaren balio esperimentalak tentsio-galgen datuak kontuan izanik lortu ziren. Lehenengo, begiratu zen zein galgek zeuzkaten deformazio positiboak, eta zeintzuek negatiboak. Aldaketa gertatzen zenean, hiruko erregela aplikatuz kalkulatu zen zuntz neutroaren sakonera.

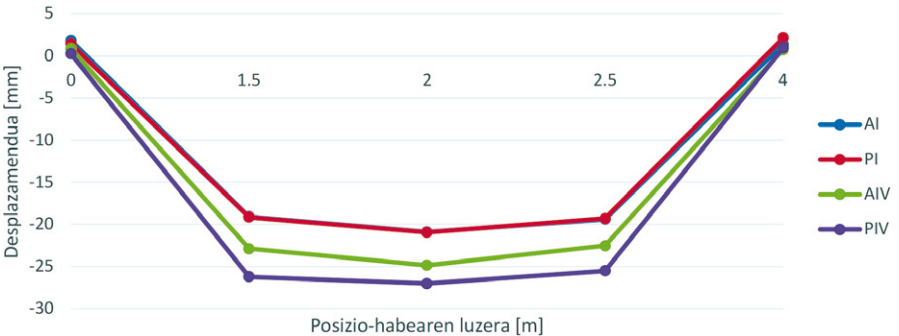
4. taula. Hormigoi gogortuen propietate mekaniko nagusiak.

	X <sub>Teo</sub> [mm]	X <sub>Exp</sub> [mm]	M <sub>Teo</sub> [kNm]	M <sub>Exp</sub> [kNm]
PI	81	97	170,25	173,25
PIV	134	168	140,25	131,25
AI	81	100	170,25	174,75
AIV	128	147	144,75	146,25

Habeek jasan zezaketen momentu maximoa eragingailuak aplikatu-tako karga maximoaren datutik abiatuz kalkulatu zen, 4 puntuko entsegua-ren momentu-diagrama kontuan harturik. Momentua kalkulatzeko, honako ekuazio hau erabili zen, F eragingailuaren indar maximoa izanik:

$$M = \frac{F}{2} \cdot x_{1,5} \tag{3}$$

PI, AI eta AIV habeetan lortutako balioak onak dira. Nahiz eta ar-datz neutroko sakoneraren balioak desberdinak izan, momentu maximoa-ren balio esperimentalak eta analitikoak oso antzekoak dira. Azaldu be-zala, zuntz neutroaren balio esperimentalak tentsio-galgen bidez lortu da, eta eskuratu diren emaitzak askotan ez dira oso zehatzak izan. PIV-ren kasuak aipamen berezia merezi du. Oro har, nahiko datu pobreak lortu zi-ren nahasketa horrekin, eta, egindako laginak aztertu ondoren, ikusi zen hormigoia fabrikatzeko orduan arazoak egon zirela eta nahasketa ez zela ondo egin.



5. irudia. Haben deformazioa, M = 100 kNm aplikatzean.

5. irudian lau haben deformazioa ikus daiteke, bakoitzak 100 kNm ja-satean. Elastikotasun-moduluei begira, bi multzotan bana ditzakegu, es-pero zen bezala. Alde batetik, 21 mm inguruko deformazio maximoarekin,

I motako zementuarekin fabrikatutako habeen deformazioa oso antzekoa izan zen. Desberdintasunak hain izan ziren txikiak, non grafikan ezin baitiren bereizi. IV motako zementuarekin egindako hormigoietan, ordea, moduluak oso antzekoak izan arren, ez da gertatzen gauza bera, deformazioetan alde handiagoak ikus baitaitezke: AIV-n 23 mm inguruko deformazio maximora heltzen da, eta PIV-n 27 mm-ra. Horrek berresten du PIV nahasketarekin arazoak egon zirela eta bere portaera ezin dela kontuan hartu.

Hala ere, ikerketa honetan lortutako emaitzak onak izan ziren oro har, eta material jasangarri berri hau eraikuntzetan erabiltzera bultza ditzakete eraikuntza-sektoreko eragileak.

## **5. ONDORIOAK**

Egindako laborategi-lanetan oinarrituz laburbil daitezkeen ondorioak honako hauek dira:

- Nahasketa-proportzio egokiekin, edozein obratan lor daiteke beharrezko sendotasuna. Zepa beltzeko hareak erabiltzen direnean, garrantzi handia hartzen dute partikula finek (<1 mm). Oso zaila izango zen hormigoia agregakin modura zepa beltza soilik erabiliz fabrikatzea, 1 mm baino txikiagoak diren partikulen faltagatik. Nahasketei kareharri-harea fina gehituz gero, hormigoi autotrinkotzaileak egin daitezkeela frogatu da.
- Egiaztatu da zepa beltzekin fabrikatutako hormigoi armatuaren makurduraren aurreko portaera aurreikus daitekeela, gaur egungo araudiekin bat. Hormigoi berri horretako egiturak diseinatzean EHE-08 eta Egitura Kode berria aplikatzen badira, beti segurtasunaren aldean egongo direla ikusi da.

## **ESKER ONAK**

Argitalpen hau MCIN/AEI/10.13039/501100011033- eta FEDER *Europa egiteko modu bat* erakundeek finantzatutako I+G+B RTI2018-097079-B-C31 proiektuaren zati bat da. Egileek eskertu egin nahi dute Eusko Jaurlaritzako IT1619-22 (SAREN) ikerketa-taldeari emandako laguntza.

## **BIBLIOGRAFIA**

- [1] HIRU EJ. Sector siderometalúrgico. 2013.
- [2] Fernando CAPEL STEGUI HERRERO. La siderurgia Vizcaína (1876-1996). 1996.

- [3] GUILLEN E. El acero prevé una mejora del sector en este ejercicio. *Anuario 2020 Estrategia empresarial* 2020:10.
- [4] IHOBE GV. Economía circular y gestión de recursos en Euskadia. 2019.
- [5] BÄVERMAN C, ARAN ARAN F. A study of the potential of utilising electric arc furnace slag as filling material in concrete. *Studies in Environmental Science* 1997;71:373-6.
- [6] FALESCHINI F, SANTAMARIA A, ZANINI MA, SAN JOSÉ, JOSÉ TOMÁS SAN, PELLEGRINO C. Bond between steel reinforcement bars and Electric Arc Furnace slag concrete. *Mater Struct* 2017;50:170.
- [7] FRÍAS ROJAS M, SÁNCHEZ DE ROJAS MI. Chemical assessment of the electric arc furnace slag as construction material: Expansive compounds. *Cement and Concrete Research* 2004;34:1881-8.
- [8] PAPAYIANNI I, ANASTASIOU E. Concrete incorporating high-calcium fly ash and EAF slag aggregates. *Magazine of Concrete Research* 2011;63:597-604.
- [9] POLANCO JA, GONZALEZ JJ, MANSO JM. Electric Arc Furnace Slag in Concrete. *J Mater Civ Eng* 2004;16:639-45.
- [10] MANSO JM, HERNÁNDEZ D, LOSÁÑEZ MM, GONZÁLEZ JJ. Design and elaboration of concrete mixtures using steelmaking slags. *ACI Mater J* 2011;108:673-81.
- [11] FALESCHINI F, BRUNELLI K, ZANINI MA, DABALÁ M, PELLEGRINO C. Electric Arc Furnace Slag as Coarse Recycled Aggregate for Concrete Production. *Journal of Sustainable Metallurgy* 2016;2:44-50.
- [12] SKAF M, MANSO JM, ARAGÓN Á, FUENTE-ALONSO JA, ORTEGA-LÓPEZ V. EAF slag in asphalt mixes: A brief review of its possible re-use. *Resour Conserv Recycl* 2017;120:176-85.
- [13] MONOSI S, RUELLO ML, SANI D. Electric arc furnace slag as natural aggregate replacement in concrete production. *Cement and Concrete Composites* 2016;66:66-72.
- [14] PELLEGRINO C, GADDO V. Mechanical and durability characteristics of concrete containing EAF slag as aggregate. *Cement and Concrete Composites* 2009;31:663-71.
- [15] SANTAMARÍA A, ORBE A, SAN JOSÉ JT, GONZÁLEZ JJ. A study on the durability of structural concrete incorporating electric steelmaking slags. *Constr Build Mater* 2018;161:94-111.
- [16] ORTEGA-LÓPEZ V, FUENTE-ALONSO JA, SANTAMARÍA A, SAN-JOSÉ JT, ARAGÓN Á. Durability studies on fiber-reinforced EAF slag concrete for pavements. *Constr Build Mater* 2018;163:471-81.
- [17] FALESCHINI F, ALEJANDRO FERNÁNDEZ-RUÍZ M, ZANINI MA, BRUNELLI K, PELLEGRINO C, HERNÁNDEZ-MONTES E. High performance concrete with electric arc furnace slag as aggregate: Mechanical and durability properties. *Constr Build Mater* 2015;101:113-21.
- [18] GARCÍA MOCHALES JL. Utilización de áridos siderúrgicos en obras por la autoridad portuaria de Bilbao. 2016.

- [19] GOBIERNO VASCO. Decreto 64/2019, del 9 de abril, del régimen jurídico aplicable a las actividades de valorización de escorias negras procedentes de la valorización del acero en hornos eléctricos de arco.
- [20] KIM SW, LEE YJ, KIM KH. Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams with Electric Arc Furnace Slag Aggregates. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering* 2012;11:133-8.
- [21] FALESCHINI F, HOFER L, ZANINI MA, DALLA BENETTA M, PELLEGRINO C. Experimental behavior of beam-column joints made with EAF concrete under cyclic loading. *Eng Struct* 2017;139:81-95.
- [22] PELLEGRINO C, FALESCHINI F. Experimental behavior of reinforced concrete beams with electric arc furnace slag as recycled aggregate. *ACI Mater J* 2013;110:197-205.
- [23] CEN EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. Rue de Stassart, 36. Brussels B-1050.
- [24] ARRIBAS I, SANTAMARÍA A, RUIZ E, ORTEGA-LÓPEZ V, MANSO JM. Electric arc furnace slag and its use in hydraulic concrete. *Constr Build Mater* 2015;90:68-79.
- [25] SANTAMARÍA A, ORBE A, LOSAÑEZ MM, SKAF M, ORTEGA-LOPEZ V, GONZÁLEZ JJ. Self-compacting concrete incorporating electric arc-furnace steelmaking slag as aggregate. *Mater Des* 2017;115:179-93.
- [26] ASTM INTERNATIONAL. ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS. West Conshohocken, 19429-2959. PA, USA, 2008.
- [27] EFNARC S. Guidelines for self-compacting concrete. London, UK: Association House 2002:32-4.

