



IKER
GAZTE
NAZIOARTEKO
IKERKETA EUSKARAZ

VI. IKERGAZTE

NAZIOARTEKO IKERKETA EUSKARAZ

2025eko maiatzaren 28, 29 eta 30a
Bilbo, Euskal Herria

ANTOLATZAILEA:
Udako Euskal Unibertsitatea (UEU)



Aitortu-PartekatuBerdin 4.0

INGENIARITZA ETA ARKITEKTURA

**Altzairu-zepen propietateen
lorpena iturri bilgailudun ohandze
konikoetan CO₂-aren harrapaketa
egiteko**

*Aimar Martín, Álvaro Cano,
Maidor Bolaños, Idoia Estiati,
Mikel Tellabide, Xabier Sukunza
eta Martin Olazar*

117-124 or.

<https://dx.doi.org/10.26876/ikergazte.vi.03.14>

ANTOLATZAILEA



BABESLEAK



EUSKO JAURLARITZA
GOBIERNO VASCO



LAGUNTZAILEAK



Altzairu-zepen propietateen lorpena iturri bilgailudun ohantze konikoetan CO₂-aren harrapaketa egiteko

Aimar Martín, Álvaro Cano, Maider Bolaños, Idoia Estiati, Mikel Tellabide, Xabier Sukunza,
Martin Olazar

Ingeniaritza Kimikoko Saila, Euskal Herriko Unibertsitatea, UPV/EHU, PO Box 644 – E48080 Bilbo, Espainia

aimar.martin@ehu.eus

Laburpena

CO₂ kontzentrazioa urtero handitzen ari da eta, beraz, CO₂ isuriak murriztea ezinbestekoa da. Arazo hori ekiditeko altzairu-zepak erabili daitezke, karbonatazio mineralerako eta CO₂-a harrapatzeko egokiak baitira, haien CaO eduki altua dela eta. Hortaz, karbonatazio mineralak CO₂ molekulak modu iraunkorrean harrapatzen ditu eta material organiko eta ez-organiko baliotsu eta termodinamikoki egonkorak ere sortzen ditu. Karbonatazio minerala horretarako diseinatutako industria-instalazioetan egiten da, baina instalazio hauek mugak dituzte. Hori dela eta, iturri bilgailudun iturri ohantze konikoak karbonatazio mineralerako eta CO₂-aren harrapaketarako egokiak izan daitezke. Ondorioz, altzairu-zepen propietate fisiko-kimikoak zehaztu egin dira, izan ere baliagarriak izango dira karbonatazioa iturri ohantzean auresateko.

Hitz gakoak: Altzairu-zepak, Karakterizazioa, Karbonatazio minerala, CO₂-aren harrapaketa, Deskonposizio termikoa

Abstract

The CO₂ concentration is increasing annually, and therefore reducing CO₂ emissions is of uttermost concern. Steel slags may be used to overcome this issue, as they are suitable for mineral carbonation and CO₂ capture due to their high CaO content. Accordingly, mineral carbonation may not only permanently capture CO₂ molecules, but also might produce valuable and thermodynamically stable organic and inorganic materials. Mineral carbonation is conducted in industrial plants designed on purpose, but they have limitations. Thus, fountain confined conical spouted beds may be suitable for mineral carbonation and CO₂ capture, but there is hardly any information regarding their applications in mineral carbonation. Accordingly, a thorough characterization of steel slags has been carried out in order to shed light onto mineral carbonation in spouted beds.

Keywords: Steel slags, Characterization, Mineral carbonation, CO₂ capture, Thermal decomposition

1 Sarrera eta motibazioa

1880. urtean tenperaturak erregistratzen hasi zirenetik, 2024a urterik beroena izan da, urteko batez besteko tenperatura 1.17 °C altuagoa izan baita (NASA, 2024). Izan ere, Copernicus Klima Aldaketaren Zerbitzuek (C3S) baieztatu zuten 2024ko uztailaren 22an munduko batez besteko tenperatura erregistratutako altuena izan zela, hots, 17.16 °C. Aurreko erregistro altuena 17.08 °C izan zen 2023ko uztailaren 6an (McDaniel *et al.*, 2024).

Lurraren atmosferako tenperaturaren igoera berotegi-efektuko gasen (BEG) kontzentrazioaren hazkundera eta jarduera industrialen mundu-mailako hedapenaren ondorio dela esaten da. Izan ere, erregai fosilek BEG isuri izugarriak eragiten dituzte, baina erregai fosilen erabilerarako beharrezkoa den teknologia dagoeneko ezarrita dago eta ondorioz, beste aukera batzuk baino merkeagoa da. Nahiz eta CO₂-ak berotegi-efektuko gasen %75a osatzen duen, beste batzuk ere kontuan hartu behar dira, hala nola, SO_x, NO_x eta Konposatu Organiko Lurrunkorrek (KOL).

Klima-aldaketaren kausa antropogenikoei buruzko ebidentzia ugari aurki daitezke literaturan (McDaniel *et al.*, 2024; Tarakanow, 2022). Hori dela eta, herrialde garatuak eta garapen bidean daudenek Parisko Akordioa bultzatu egin zuten, Nazio Batuen Garapen Jasangarrirako 13. Helburuan (GJH) kokatzen dena. Akordio horrek, beste ekimen batzuekin batera, klima-aldaketaren aurka borrokatzea eta haren eraginei aurre egitea sustatzen du.

Gaur egun, CO₂-aren harrapaketa arlo askotan ikertu egin da. 2021ean, industriaren sektoreak munduko CO₂ isuriaren %67a suposatu zuen eta garraio-sektoreak, berriz, %23a (IEA, 2023). Isuriak murrizteko eta Nazio Batuek (NB) ezarritako helburuak betetzeko asmoarekin ikerketa ugari egin dira dagoeneko.

Azken urteetan hainbat teknologia garatu egin dira CO₂ isuriak murrizteko. Hauen artean karbonoaren harrapaketa, erabilera eta biltegitratzea (CCUS, ingelesez *Carbon Capture, Utilisation and Storage*) CO₂ isuriak murrizteko eta klima-aldaketaren eragin negatiboak arintzeko estrategia eraginkorrena da. CO₂-a material organikoetan harrapatu daiteke, hala nola, lurreko landaredian, ozeanoko biomasa edo *biochar*ean, edota sakonera handiko arroka sedimentarioetan.

Bestalde, naturak mendeetan zehar modu pasiboan egin duen bezala, karbonoa modu iraunkorrean mineral solidoetan biltegitratu daiteke karbonato anioi (CO₃²⁻) eran, hala nola, kaltzio karbonato (CaCO₃) eta magnesio karbonato (MgCO₃) gisa. Hala ere, karbonatazio mineral izenez ezagutzen diren prozesu natural hauen zinetika, oro har, oso motela da (Milani *et al.*, 2025).

Karbonatazio mineralak CO₂ molekulak modu iraunkorrean harrapatu eta material organiko eta ez-organiko baliotsu eta termodinamikoki egonkorak sortzen ditu, hala nola, karbono emisio gutxiko hormigoi birziklatua (Milani *et al.*, 2025). Liu *et al.* autoreek (2021) jakinarazi zuten hormigoiaren ekoizpenak gizakiak eragindako CO₂ isuriaren %8a suposatzen zuela. Ondorioz, zementua eta agregakinak eraikuntza- eta eraispén-hondakinekin ordezkatzek, hormigoiaren ekoizpenaren aztarna karbonikoa eta lehengai naturalen ustiapena gehiago murriztu dezake.

Gainera, karbonoaren harrapaketak zementu eta hormigoi gogortuaren karbonatazio minerala azkartu dezake (Li *et al.*, 2022). Urtero 40 mila milioi tona mineral agregakin baino gehiago ekoizten direnez (Bhatawdekar *et al.*, 2021), eraikuntza-materialen merkatuak karbonatazio minerala bezalako prozesuak erabiltzera bultzatu du, karbonatazio minerala CO₂-aren harrapaketarako prozesu energetikoki eraginkorrenetakoa dela ikusita. Izan ere, eraikuntza-material berdeen eskaera gero eta handiagoa izatea espero denez, karbonatazio mineralaren bidez eraikuntza-materialen ekoizpena areagotzek merkatua sustatuko duela aurreikusten da.

2 Arloko egoera eta ikerketaren helburuak

Karbonatazio mineralean, CO₂-ak kaltzioarekin erreakzionatu egiten du. Kaltzio oxidoa (CaO) gehienbat hondakin alkalinoetan aurkitu daiteke, hala nola, altzairu-zepetan. Hauek altzairuaren ekoizpenean sorturiko hondakinak dira. Altzairua ekoizteko txatarra erabiltzen da eta arku elektrikoko labean (EAF, ingelesez *Electric Arc Furnace*) urtu egiten da 1600 °C-tan. Labera oxigenoa injeztatu egiten da eta burdinez, silizez, manganesoz, kromoz eta aluminioz osatuta dagoen txatarrarekin erreakzionatzen du. Gainera, kareharri bezalako gehigarriak gehitu egiten zaizkio nahasteari, sufrea eta fosforo ezpurutasunak kentzeko. Oxidazioaren ondorioz, ezpurutasunak urrutako altzairuaren gainazalean geratzen dira, zepa beltz izenez ezagutzen direnak. Haien gutxi gorabeherako konposizioa masan hurrengoa da: %37 CaO, %10 MgO, %20 Fe₂O₃, %20 SiO₂ eta %5 Al₂O₃ (Arribas *et al.*, 2015; Uibu *et al.*, 2011).

Urtutako altzairua findu egiten da koilara labe batean (LF, ingelesez *Ladle Furnace*), sufrea, karbonoa eta hidrogenoa kentzeko. Ondorioz, beste fase solido bat sortzen da gainazalean, zepa zuria izenekoa. Honek gutxi gorabehera %55 CaO, %10 MgO, %2 Fe₂O₃, %12 SiO₂ eta %20 Al₂O₃ du masan (Uibu *et al.*, 2011; Mahoutian *et al.*, 2014).

Bi zepek CaO eduki altua dute, eta, ondorioz, CO₂-aren harrapaketarako erabili daitezke, baina zepa zurien CaO edukia handiagoa da. Hori dela eta, zepa zuria aukera erakargarriagoa da karbonatazio mineralean erabiltzeko.

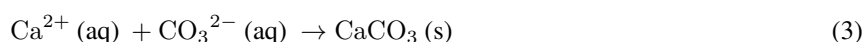
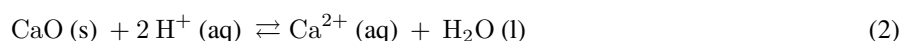
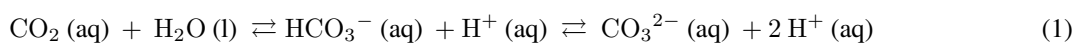
Karbonatazio mineral zuzenak (DMC, ingelesez *Direct Mineral Carbonation*) silikato mineraletako kaltzio eta magnesio oxidoen eta CO₂-aren arteko erreakzioa da. Ondorioz, kaltzio eta magnesio karbonato egonkorak sortzen dira. Karbonatazioa difusioz kontrolatutako prozesua da eta, hortaz, solidoaren propietateek (partikulen tamaina eta porositatea) eragin nabarmena dute zinetikan (Milani *et al.*, 2025).

DMC prozesua tenperatura altuetan gertatzen denez (500 °C), energia-eskakizunak eta ustiapén-kostuak nabarmen handiak dira. Beraz, kostuak murrizteko, Haghnegahdar *et al.* autoreek (2010) ingurune urtsuan ematen den karbonatazioa (DAMC, ingelesez *Direct Aqueous Mineral Carbonation*) proposatu zuten. Karbonatazio minerala gerta dadin, ura erabiltzen da eta horrela, erreakzioa tenperatura baxuetan (20 – 90 °C) gerta daiteke. Ura erabiltzen denez, erreakzioan hiru fase daude: zepa solidoa, ur likidoa eta CO₂ gasa.

Aurretik aipatu den bezala, zepa zuri eta beltzen konposizioa konplexua da eta, beraz, karbonatazio mineralaren

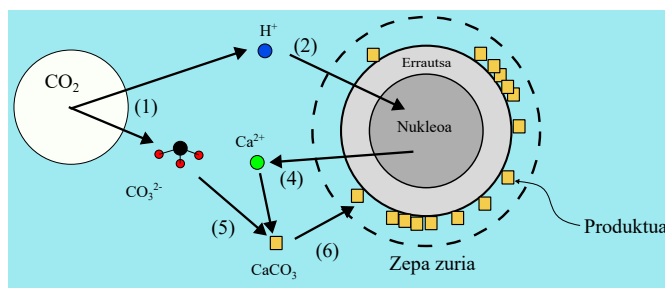
erreakzio-mekanismoa ez da erraza (DiGiovanni *et al.*, 2024; Chen *et al.*, 2021). Literaturan (Milani *et al.*, 2025; Zhang *et al.*, 2025; Huijgen *et al.*, 2005; Li *et al.*, 2023) egindako zinetika ikerketen bidez hurrengo mekanismoa proposatu da hipotesi bezala:

- (1) CO₂ gasa ingurune urtsuan disolbatu egiten da eta karbonato (CO₃²⁻) edo bikarbonato (HCO₃⁻) ioiak eta hidrogeno ioiak (H⁺) sortzen dira (1. ekuazioa). Horretarako, ingurune basikoak (pH > 11) beharrezkoak dira, izan ere, karbonato ioien agerpena faboratzen dute.
- (2) Hidrogeno ioiak uraren fase nagusitik partikulara eta gero, partikulan zehar barreiatzen dira.
- (3) Partikularen barnean, hidrogeno ioiak eta kaltziozko fase disolbagarriak (batez ere, CaO eta Ca₂SiO₄) erreakzionatzen dute (2. ekuazioa), kaltzio ioiak askatuz.
- (4) Partikularen nukleoan dauden kaltzio ioiak (Ca²⁺) fase nagusira barreiatzen dira.
- (5) Ingurune urtsuan dauden karbonato eta kaltzio ioiak erreakzionatzen dute (3. ekuazioa) kaltzio karbonatoa (CaCO₃) ekoitziz.
- (6) Kaltzio karbonatoa zepetan prezipitatzen da eta honek sortzen duen kaltzio karbonato geruza hidrogeno ioien difusioa eragozten du.



Karbonatazioaren mekanismoa 1. irudian erakusten da. Hiru eremu ezberdindu daitezke: karbonatazioaren aurreko zepa berdina den eremua, nukleoa; kaltzio-agortutako zepa-geruza, errautsa; eta kanpoaldean dagon kaltzio karbonatozko geruza, produktua. Huijgen *et al.* autoreek (2005) errauts eremuak silikato eta kaltzio aztarnak zituela identifikatu zuten.

1. Irudia: Zepa zuriaren karbonatazio mineralaren mekanismoaren irudi eskematikoa.



Oro har, karbonatazio mineralaren zinetika faktore askok eragiten dute (Chen *et al.*, 2021; DiGiovanni *et al.*, 2024), hala nola, erreakzio denbora, erreakzio tenperatura, partikula tamaina, CO₂-aren presio partziala eta likido-solido ratioa. Karbonatazio erreakzioaren hasierako uneetan erreakzio abiadura maximoa da, izan ere hidrogeno ioien difusioa partikulan oso azkar gertatzen da. Hala ere, CaCO₃-a partikularen gainazalean prezipitatu egiten den heinean, hidrogeno ioien difusio-abiadura behera egiten du eta, beraz, karbonatazio erreakzio abiadura moteldu egiten da. Hidrogeno ioien desagerpen abiadurak behera egiten duenez, ingurunearen azidotasunak gora egiten du (pH-a 6 – 8 tartean). Ondorioz, karbono dioxidoa uretan disolbatu egiten denean, bikarbonatoa sortu egiten da, kaltzio ioiekin erreakzionatzen ez duena. Hau ekiditeko eta erreakzio abiadura maximoa izan dadin, ingurunearen pH-a 11 baino altuagoa izan behar da eta hidrogeno difusioa azkartu beharra dago. Horretarako, partikula tamaina txikia duten zepa zuriak erabili daitezke, partikularen gainazal espezifiko handitzeko asmoz.

Partikulen propietateak, hortaz, karbonatazio erreakzio abiaduran eragina dute. Hori dela eta, euren propietateak ezagutzea ezinbestekoa da zepa zuria eta beltzen karbonatazio minerala iturri ohantzean egin nahi bada. Ondorioz, zepa zuria eta beltzen propietate fisiko-kimikoak zehaztea da lan honen helburu nagusia.

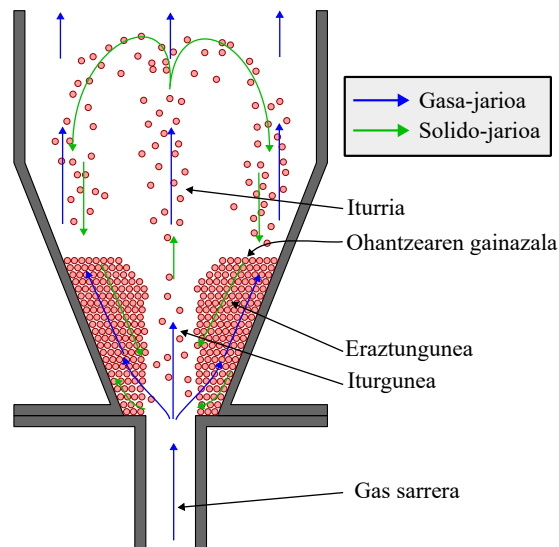
3 Ikerketaren muina

3.1 Materiala eta metodologia

Materialaren propietateak zehazteko hiru zepa zuri, zepa beltz bat eta kare bizia erabili dira. Zepa zuriak Euskal Herriko hurrengo altzairu produkzio lantegietatik hornitu zituzten: Nervacero, S.A., Sidenor Aceros Especiales, S.L. eta Aceros Inoxidable, S.A. Bestetik, Nervacero enpresak ere zepa beltz lagin bat hornitu zuen.

Eskala txikiko iturri ohandze koniko batean erabiltzeko, laginak bahetu dira partikula tamaina 100 – 300 µm artekoa izateko. Iturri ohandze koniko teknologia, 2. irudian adierazten den bezala, gasa eta solido partikulak kontaktuan jartzean datza. Gasa bertikalki elikatzen da kontaktorearen azpitik, ohandzearen zentroan irekidura bat sortuz (iturgunea). Solido partikulak gorantz arrastatzen dira, iturria sortuz, eta grabitatearen ondorioz, eraztungunean erortzen dira.

2. Irudia: Iturri ohandze koniko baten adierazpen eskematikoa.



Iturri ohandzean hidrodinamika ulertzeko zepetako partikulen tamaina eta propietate fisiko eta kimikoak ezagutzeko funtsezkoa da, hauek zuzeneko efektua dutelako materialaren portaeran. Materialen hezetasuna jakiteko ISO 589 estandarra erabili da (materiala 24 orduz labean lehortzen utzi da 105 °C-tan). Zepa freskoaren konposizio elementala X-izpien fluoreszentzia (XRF; PANalytical Xpert PRO) erabiliz zehaztu da, Bragg-en legean oinarritzen delarik. XRF analisian, X-izpi batek atomo baten barne-geruzako elektroio bat kanporatzen du, eta kanpo-geruzako elektroio bat hutsunea betetzeko erortzen denean, elementu bakoitzarentzat bereizgarria den X-izpi bat igortzen da, horrek elementua zehaztasunez identifikatzeko aukera emanez. Zepa freskoaren konposizio mineralogikoa X-izpien difraktometria (XRD, PANalytical AXIOS) bidez identifikatu da. XRD analisian, X-izpiak kristal baten sare-puntuetan elkarrekarritzen du eta difraktatu egiten dira. Difrakzio-eredu bereizgarri honek materialaren egitura kristalinoa zehaztasunez identifikatzeko aukera ematen du. Aurreko analisien emaitzetako karbonato eta hidratazio informazio ezaren ondorioz, deskonposizio termikoa analisi termograbitimetrikokoan (TGA, TA Instruments SDT 650) kuantifikatu da.

Laginen partikula tamainaren distribuzioa zehazteko Mastersizer 3000 ekipoa erabili da ISO 13320 estandarrean oinarrituta. Laginen partikula dentsitatea kalkulatzeko ur destilatua eta piknometroa erabili dira, ISO 18753:2017 estandarra jarraituz. Ohantzearen dentsitatea Brown eta Richards autoreek (1970) proposatutako prozedurari jarraituz kalkulatu da. Ohantzearen porositatea kalkulatzeko 4. ekuazioa erabili da. Karbonatazio mineralaren zinetika ikertzeko partikularen gainazalaren azalera hartu behar da kontuan, BET metodoa erabilita eta ISO 9277 estandarra aplikatuta, Micrometrics ASAP 2010 ekipoa neurtu egin da.

$$\epsilon_b = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_p} \quad (4)$$

3.2 Propietate kimikoak

1. taulak kare biziaren, Nervaceroko (WS-N), Olarrako (WS-O), Sidenorrekoa (WS-S) zepa zurien eta Nervaceroko zepa beltzaren (BS-N) konposizio mineralogikoa erakusten du.

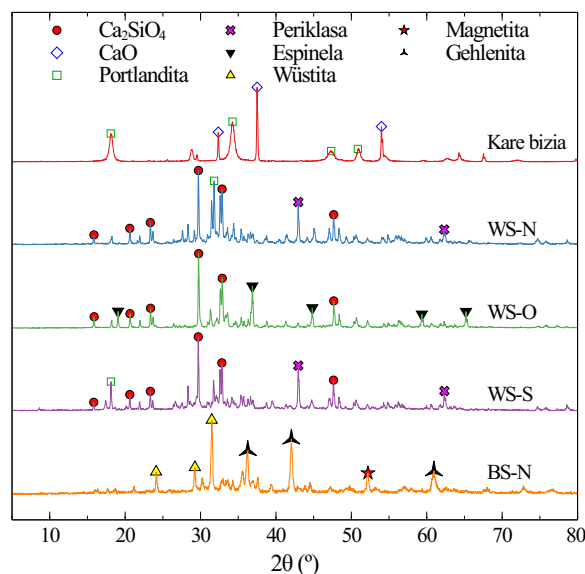
Oro har, kaltzio oxido-edukirik altuena kare bizian dago (%77). Gainera, analisia egin baino lehenagoko kaltzinazioan (LOI, ingelesez *Loss of mass on ignition*), laginak %18.28 masa galdu du, hezetasunaren lurrunketari edota kaltzio hidroxido edo kaltzio karbonatoaren deskonposizio termikoari dagokiona. Zepa zuriei dagokienez, kaltzio oxido kopuru baxuagoa dute, magnesio oxido, silize, alumina eta manganeso oxido kantitate altuak baitituzte. Azpimarratzekoa da Nervacerok hornitutako zepa zuriaren (WS-N) LOI balioa negatiboa dela, hau da, bere masa kantitatea altuagoa da kaltzinazioaren ostean, oxidatu gabeko burdin edukia altua delako. Zepa beltzari dagokionez, CaO gutxiago eta Fe₂O₃ gehiago ditu kare biziaren eta zepa zuriaren aldean, izan ere, zepa beltza altzairu urtze-prozesuaren lehen fasean sortzen da.

1. Taula: Laginen osagai-elementalen konposizioa oxido masan (%), XRF analisiaren bidez. *Oharra: LOI-k XRF analisia egin baino lehenagoko kaltzinazioan galdutako masa adierazten du.*

Lagina	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ t	MnO	LOI
Kare bizia	77.00	0.48	0.58	0.90	0.10	—	18.28
WS-N	55.51	9.60	21.03	3.10	4.35	0.50	-4.09
WS-O	43.08	9.80	20.52	19.38	0.49	1.14	0.45
WS-S	44.96	12.71	16.92	5.77	3.81	1.15	8.10
BS-N	23.42	4.23	15.22	9.78	37.20	4.87	-1.62

3. irudian laginen konposizio mineralogikoa adierazten dira. Kare bizia kaltzio oxidoz (CaO) eta portlanditaz (Ca(OH)₂) osatuta dago. Horrek suposatzen du CaO-ak inguruko hezetasunarekin erreakzionatu duela kaltzio hidroxidoa sortzeko.

3. Irudia: Laginen analisi mineralogikoa XRD analisiaren bidez.



Gainera, Nervacero eta Sidenor enpresek hornitutako zepa zuriak (WS-N eta WS-S) konposizioan antzekotasun nabarmen dituzte. Bi laginen fase nagusiak kaltzio silikatoa (Ca₂SiO₄), periklasa (MgO) eta portlandita dira. Hala ere, WS-N laginak kaltzio sulfuroa (CaS) eta jasmundita (Ca₁₁(SiO₄)₄O₂S) ezpurutasunak ditu, konposizio elementalean (1. taula) sufreaken presentzia justifikatzen dutenak. Bestalde, WS-O laginaren kaltzioa Ca₂SiO₄-an txertatuta dago, aurreko laginetan bezala, eta magnesioa espinelan (MgAl₂O₄) integratuta agertzen da.

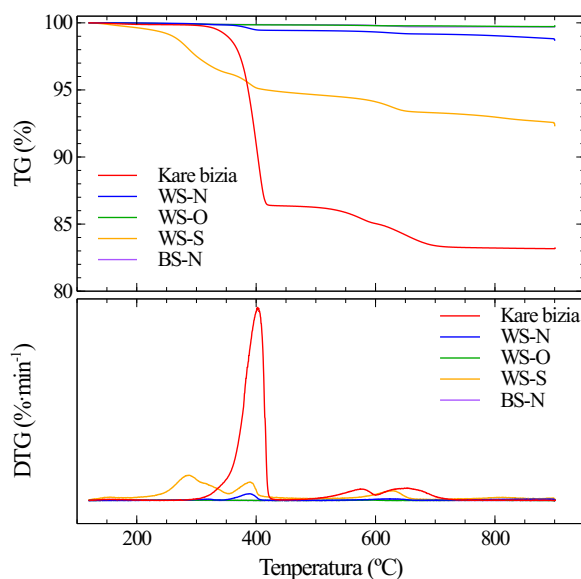
Azkenik, zepa beltza (BS-N) wüstitaz (FeO), magnetitaz (Fe₂O₃) eta gehlenitaz (Ca₂Al(AlSi)O₇) osatuta dago. Izan ere, lagina kaltzioz, silizioz eta burdinez osatuta dago (1. taula). Horrenbestez, zepa beltzak lehenengo urtze-prozesuan sortzen diren materialak dira eta, horregatik, burdin kantitate altuagoa du (Uibu *et al.*, 2011).

Ondorioz, zepa zuriak egokiagoak dira CO_2 harrapatzeko karbonatazio mineralaren bidez zepa beltzekin alde-ratuta. Izan ere, zepa zuriek kaltzio eta magnesio kantitate altuagoak dituzte, eta mineral inerte gutxiago.

3.3 Deskonposizio termikoa

Deskonposizio termikoa TGA-n kuantifikatzeko, lagina 105°C -ra berotu da erabat lehortu dela ziurtatzeko, eta ondoren tenperatura linealki igo da $5^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ abiadura erabiliz, 900°C -ra ailegatu arte, $30\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ nitrogenu puruzko emariarekin. 4. irudian masa galera kurbak (TG) eta haien deribatua (DTG) aurkezten dira. $300 - 500^\circ\text{C}$ tartean ematen den masa galera portlanditaren deshidratazioari dagokio eta $530 - 715^\circ\text{C}$ tartean izandako masa galera CaCO_3 -ren deskonposizio termikoari dagokio, eta ur baporea eta CO_2 -a sortuz, hurrenez hurren.

4. Irudia: Laginen TG-DTG analisia.



Espero bezala, XRD eta XRF analisiaren arabera, kare biziak masa galera handiena du deshidratazio eta kaltzinazio prozesuen ondorioz. Horrez gain, Sidenorrek hornitutako zepa zuria (WS-S) nahiko hidratatuta dagoela ondorioztatu daiteke, 400°C baino lehenago izandako masa galera dela eta. Izan ere, 390°C -tan portlandita-ren deshidratazioa gertatzen da eta, aurretik, 290°C -tan $\text{Mg}(\text{OH})_2$ -a deshidratatzen da (Yu *et al.*, 2024). Bestalde, DTG kurban 625°C -tan kokatzen den gailurra CaCO_3 -ren kaltzinazio prozesuari dagokio. Gainerako masa, %92.34, material inertei dagokie, hala nola, silika, kaltzio oxidoa eta periklasa, besteak beste.

Nervacero hornitutako zepa zuriaren TG kurba (WS-N) WS-S laginarenarekin konparatuz nahiko antzekoa da, baina galdutako masa %1.27-koa da, lagin hau hain hidratatuta ez dagoelako. Bestaldek, Olarra hornitutako zepa zuria (WS-O) eta Nervacero hornitutako zepa beltza (BS-N) laginen masa galera arbuiagarria kontsidera daiteke, %0.5 baino txikiagoa baita. Horrek adierazten du, batetik, materiala lehor dagoela eta ez dela ez hidratazio ezta karbonatazio erreakziorik gertatu, eta, bestetik, beren konposizio mineralogikoan prozesu termikoetan gutxiago degradatzen diren fase inerte gehiago dituztela.

3.4 Propietate fisikoak

Laginen batez besteko diametroa, hezetasuna, gainazaleko azalera, partikula dentsitatea, ohantzearen dentsitatea eta porositatea 2. taulan adierazten dira. Karearen eta zepen gainazaleko azalera antzekoak dira, baina zenbait desberdintasun dituzte. Alde batetik, Sidenorrek hornitutako zepa zuria (WS-S) azalera handiena duen lagina da. Bestetik, azalera txikiena duen lagina Olarrako zepa zuria (WS-O) da. Hau altzairuaren urtze-prozesuan operazio baldintza ezberdinak erabili izanaren ondorioa da.

Partikulen dentsitateari dagokionez, balio handiena Nervacero hornitutako zepa beltzari (BS-N) dagokio. Izan ere, zepa beltzek altzairu zepa zuriak baino burdin kantitate gehiago dute (Fisher eta Barron, 2019). Gainera, zepa zuriek ere silikatoa eta alumina dituzte eta, horregatik, zepa zurien partikulen dentsitatea txikiagoa da zepa

beltzarekin alderatuta.

2. Taula: Laginen batez besteko diametroa (d_p), hezetasuna (MC), gainazaleko azalera (a_s), partikula dentsitatea (ρ_p), ohandzearen dentsitatea (ρ_b) eta porositatea (ϵ_b). Oharrak: ¹ Laginaren partikula tamaina 100 – 200 μm -koa da. ² Kare bizia labe batean 1000 °C-tan kaltzinatu zen ordu batean zehar.

Lagina	d_p , μm	MC, %	a_s , $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$	ρ_p , $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	ρ_b , $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	ϵ_b
Kare bizia ¹	—	0.52	8.86	—	—	—
Kaltz. kare bizia ^{1,2}	10.63	—	6.15	3340.00	902.67	0.73
WS-N	76.95	0.01	4.58	2911.55	1406.23	0.52
WS-O	102.93	0.06	3.06	3184.28	1520.74	0.52
WS-S	83.99	11.96	12.42	3010.28	1206.43	0.60
BS-N	203.97	2.14	—	3462.81	1951.63	0.44

Laginen ohandze dentsitatearen balioak ere nahiko antzekoak dira, eta literaturan (Fisher eta Barron, 2019) adierazitakoekin bat datoz. Gainera, ohandze dentsitate altuena zepa beltzari dagokio, burdin kopuru altuaren ondorioz.

4 Ondorioak

Lan honetan kare biziaren eta zepa zurien eta beltzen propietateak aztertu egin dira. Modu honetan, karbonatazio mineralaren prozesuan CO_2 -a harrapatzeko izango luketen ahalmena hobeto uler daiteke. Emaitzetatik hurrengo ondorioak lortu dira:

Zepa bakoitzak propietate fisiko-kimiko ezberdinak ditu. Izan ere, altzairu zepa beltzetan material inerte eduki altuagoa dagoela behatu da, eta, ondorioz, haien CO_2 -aren harrapaketa ahalmena karbonatazio mineralaren bidez baxuagoa izatea espero da.

Kare biziaren TGA analisiak kaltzio hidroxidoaren eta karbonatoaren degradazioaren tenperatura-eremua aztertzea ahalbidetu du, eta hori funtsezko informazioa da zepa zurien eta beltzen DTG kurban dauden puntu jakin horiek identifikatzeko.

Ondorioz, zepa zuriek eta beltzek propietate fisiko eta kimiko desberdinak dituzte, eta horregatik ezinbestekoa izan da azterketa sakon bat egitea karbonatazio mineralari begira. Era berean karbonatazio mineralaren bidez CO_2 -aren harrapaketarako egokiena izan daitekeen zepa Sidenorrek hornitutako zepa zuria (WS-S) da, bere gainazal azalera handiak zinetika azkartu dezakeelako. Izan ere, gas eta solidoaren arteko interakzioa handitzen du.

5 Etorkizunerako planteatzen den norabidea

Ikerketa honen helburu nagusia altzairu industriaren zepa zuriak CO_2 harrapaketa bitartez balioztatzea da iturri ohandzeko koniko errektore bat erabiliz. Horretarako, errektore ez-jarrai batean azterketa zinetikoa egingo da, literaturan agertzen diren autore askok egin duten bezala (Huijgen *et al.*, 2005; Li *et al.*, 2023; Tu *et al.*, 2015; Wang *et al.*, 2024; Zhang *et al.*, 2025). Horrek 2. atalean deskribatutako mekanismoa hobeto ulertzea lagunduko du eta erreakzioan eragiten duten parametroak aztertu egingo dira. Ondoren, iturri ohandze koniko errektore bat diseinatuko da eta azterketa hidrodinamikoa eta zinetikoa egingo da errektore berri horretan.

Erreferentziak

- Arribas, Idoia, Amaia Santamaría, Estela Ruiz, Vanesa Ortega-López, eta Juan M. Manso. 2015. Electric arc furnace slag and its use in hydraulic concrete. *Construction and Building Materials* 90.68–79.
- Bhatawdekar, Ramesh Murlidhar, Trilok Nath Singh, Edy Tonnizam Mohamad, Danial Jahed Armaghani, eta Dayang Zulaika Binti Abang Hasbollah. 2021. River sand mining vis a vis manufactured sand for sustainability. *LNCE* 109.143–169.
- Brown, R.L., eta J.C. Richards. 1970. *Principles of powder mechanics. Essays on the packing and flow of powders and bulk solids : International series of monographs in chemical engineering 10*. Pergamon press, 1 edition.
- Chen, Zhaohou, Zhizhi Cang, Fengmin Yang, Jingwen Zhang, eta Lingling Zhang. 2021. Carbonation of steelmaking slag presents an opportunity for carbon neutral: A review. *Journal of CO₂ Utilization* 54.101738.

- DiGiovanni, Christopher, Ousmane A. Hisseine, eta Adedapo Noah Awolayo. 2024. Carbon dioxide sequestration through steel slag carbonation: Review of mechanisms, process parameters, and cleaner upcycling pathways. *Journal of CO₂ Utilization* 81.102736.
- Fisher, Lucy V., eta Andrew R. Barron. 2019. The recycling and reuse of steelmaking slags — a review. *Resources, Conservation and Recycling* 146.244–255.
- Haghnegahdar, M. R., M. S. Hatamipour, eta A. Rahimi. 2010. Removal of carbon dioxide in an experimental powder-particle spouted bed reactor. *Separation and Purification Technology* 72.288–293.
- Huijgen, Wouter J.J., Geert Jan Witkamp, eta Rob N. J. Comans. 2005. Mineral CO₂ sequestration by steel slag carbonation. *Environmental Science and Technology* 39.9676–9682.
- IEA, 2023. CO₂ emissions by sector.
- Li, Ning, Liwu Mo, eta Cise Unluer. 2022. Emerging CO₂ utilization technologies for construction materials: A review. *Journal of CO₂ Utilization* 65.102237.
- Li, Zijian, Jie Chen, Yiming Cheng, Jingyu Ran, eta Changlei Qin. 2023. Kinetic evaluation and applicability analysis on direct aqueous carbonation of industrial/mining solid wastes. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 11.111358.
- Liu, Weizao, Liumei Teng, Sohrab Rohani, Zhifeng Qin, Bin Zhao, Chunbao Charles Xu, Shan Ren, Qingcai Liu, eta Bin Liang. 2021. CO₂ mineral carbonation using industrial solid wastes: A review of recent developments. *Chemical Engineering Journal* 416.129093.
- Mahoutian, Mehrdad, Zaid Ghoulleh, eta Yixin Shao. 2014. Carbon dioxide activated ladle slag binder. *Construction and Building Materials* 66.214–221.
- McDaniel, Melissa, Santani Teng, Erin Sprout, Hilary Costa, Hilary Hall, Jeff Hunt, Diane Boudreau, Tara Ramroop, eta Kim Rutledge. 2024. The greenhouse effect and our planet.
- Milani, Dia, Robbie McDonald, Phillip Fawell, Haftom Weldekidan, Graeme Puxty, eta Paul Feron. 2025. Ex-situ mineral carbonation process challenges and technology enablers: A review from australia's perspective. *Minerals Engineering* 222.109124.
- NASA, 2024. Giss surface temperature analysis (GISTEMP).
- Tarakanow, Vladimir. 2022. How carbon emissions acidify our ocean. *IAEA Bulletin - Collaborating for Our Climate* 22–23.
- Tu, Maoxia, Hongxin Zhao, Ze Lei, Lina Wang, Desheng Chen, Hongdong Yu, eta Tao Qi. 2015. Aqueous carbonation of steel slag: A kinetics study. *ISIJ International* 55.2509–2514.
- Uibu, Mai, Rein Kuusik, Lale Andreas, eta Kalle Kirsimäe. 2011. The co₂-binding by ca-mg-silicates in direct aqueous carbonation of oil shale ash and steel slag. *Energy Procedia* 4.925–932.
- Wang, Zhenhao, Chuanwen Zhao, Pu Huang, Yuxuan Zhang, eta Jian Sun. 2024. Modeling and response surface methodology optimization of reaction parameters for aqueous mineral carbonation by steel slag. *Carbon Capture Science & Technology* 12.100229.
- Yu, Chunyang, Chunyi Cui, Jiuye Zhao, Fang Liu, Shaojun Fu, eta Gang Li. 2024. Enhancing mechanical properties of dredged sludge through carbonation stabilization employing steel slag: An eco-friendly and cost-effective approach. *Construction and Building Materials* 412.134748.
- Zhang, Nannan, Gao Deng, Wenyu Liao, Hongyan Ma, eta Chuanlin Hu. 2025. Aqueous carbonation of steel slags: A comparative study on mechanisms. *Cement and Concrete Composites* 155.105838.

6 Eskerrak eta oharrak

Lan hau MCIN/AEI/10.13039/50-1100011033-ak finantzatutako PID2022139454OB-I00 dirulaguntzari eta Eusko Jaurlaritzak finantzatutako IT1645-22, KK-2023/00060 eta PUE-2024-1-0006 dirulaguntzei esker burutu da. Horrez gain, proiektuak Europar Batasunaren HORIZON H2020-MSCA-2023-SE-01, ID: 101182827 programaren finantzaketa jaso du. Aimar Martín-ek eta Alvaro Cano-k eskerrak ematen diote Eusko Jaurlaritzaren aldetik jasotako doktorego bekagatik (PRE-2024-1-0117 eta PRE-2024-1-0048). Maider Bolaños-ek eskerrak ematen ditu Euskal Herriko Unibertsitatearen aldetik jasotako doktorego bekagatik (PIF21/69). Gainera, lan hau egiteko laginak eman dituzten enpresei eskerrak eman nahi zaie: Nervacero, S.A., Sidenor Aceros Especiales, S.L. eta Olarra Aceros Inoxidables, S.A.