

# Plaka-trenbideen mikrouhin bidezko eraiste eraginkorra

*(Efficient microwave demolition of railway slab tracks)*

Olatz Oyarzabal\*, Javier Canales, Ernesto García Vadillo, Aimar Orbe

Ingeniaritza Mekanikoa Saila, Bilboko Ingeniaritza Eskola, Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU)

**LABURPENA:** Azken hamarkadetan plaka-trenbideen erabilera hedatu da, eta ez bakarrik tuneletan, baita lurrazalean ere. Plaka bidezko trenbidea eraikitzeko beharrezko denbora eta hasierako kostu handiagoak epe luzera konpentsatzen dira, balasto bidezko trenbideetan ez bezala, ia mantentze beharrik ez baitu. Azken horietan bateatzeko, egonkortzeko, profilatzeko, balasto-arazteko eta abarrek lanak egitea ezinbestekoa da zirkulazioaren kalitate egokia mantentzeko. Plaka bidezko trenbideak, aldiz, desabantaila garrantzitsu bat du. Ez da egokia zenbait egoeratan ordeztu edo konpondu behar denean: errailetako irteerak, uholdeak, ezponden erortzea, edo osagaien balio-bizitzaren amaiera. Gaur egun, kaltetutako edo balio-bizitza agortu duten plakak konpontzeko/ordezteko prozesua, funtsean, ordeztu beharrek plaka mailu pneumatikoz guztiz eraitsi arte txikitzean datza, eta horrek kutsadura (akustikoa, hautsa, etab.) eta langileen arazo ergonomikoak dakartza. Hori dela eta, oso lagungarria litzateke kaltetutako plakak azkar konpontzeko sistema berritzaile eta efizientea garatzea, zirkulazio-etenak minimizatuz eta, ondorioz, azpiegitura-administratzaileen gastua eta bidaiarientzako afekzioak mugatzeko. Lan honek, mikrouhin bitartez plaka bidezko trenbideak eraginkortasunez eraisteko metodo bat aurkeztzen da. Prozesuaren zenbakizko simulazioak, probeta-eskalako saiakuntzak eta, lan honen egileek eraikitako trenbide-plaka prototipoan, mikrouhinak aplikatzeko prototipoarekin lortutako emaitza esperimentalak biltzen ditu lanak. Plaka-trenbidea eraikitzeko ohiko materialen azterketa egin da, eta, trenbide-araudiarekin bat, portaera mekaniko egokiz haien osotasuna bermatu eta, gaur egun erabiltzen diren metodoak baino modu eraginkorragoan eta jasangarriagoan, haiek eraitea eta ordezkatzea erraztuko duen materiala bilatu da.

**GAKO-HITZAK:** Mikrouhina, trenbide-plaka, eraitea, morteroa, asfaltoa.

**ABSTRACT:** In recent decades, the use of slab track in railways has become widespread, both in tunnels, and on surface lines. The longer time required for the construction of slab tracks and the increase in the initial cost are compensated in the long term because, unlike ballast tracks, they require almost no maintenance. In the latter, the ballast tamping, profile stabilization, ballast cleaning, etc. are essential in order to maintain adequate traffic quality. By contrast, the slab track has a major disadvantage. It is not suitable for situations where replacement or repair is essential for reasons such as derailment, flooding, slope sliding or end-of-life of the components. Currently, the process of repairing/replacing damaged slabs basically consists in demolishing the plate to be replaced with pneumatic hammers, which causes pollution (noise, dust, etc.) and ergonomic problems to the workers. Therefore, it is essential to develop an innovative and efficient system for the rapid repair of damaged slabs minimizing traffic disruptions and, consequently, limiting infrastructure managers' costs and passenger impacts. This work, presents a method for the efficient microwave demolition of slab tracks. It includes numerical simulations of the process, tests on scale specimens and experimental results obtained with prototypes of microwaves applicator and railway slabs. The study of conventional materials for the slab track construction, in accordance with railway regulations, provides a material that guarantees its integrity with adequate mechanical behaviour and facilitates its demolition and replacement in a more efficient and sustainable way than the methods currently used.

**KEYWORDS:** Microwave, slab track, demolition, mortar, asphalt.

\* **Harremanetan jartzeko/Corresponding author:** Olatz Oyarzabal, Ingeniaritza Mekanikoa Saila, Bilboko Ingeniaritza Eskola, Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU). Torres Quevedo plaza, 1 (48013 Bilbao-Bizkaia).  <https://orcid.org/0000-0001-9610-1030>, [olat.z.oyarzabal@ehu.es](mailto:olat.z.oyarzabal@ehu.es)

**Nola aipatu/How to cite:** Oyarzabal, Olatz; Canales, Javier; García Vadillo, Ernesto; Orbe, Aimar (2025). «Plaka-trenbideen mikrouhin bidezko eraiste eraginkorra», *Ekaia*, 48, 2025, DOI: <https://doi.org/10.1387/ekaia.27424>

Jasoa: martxoak 18, 2025; Onartua: maiatzak 23, 2025

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

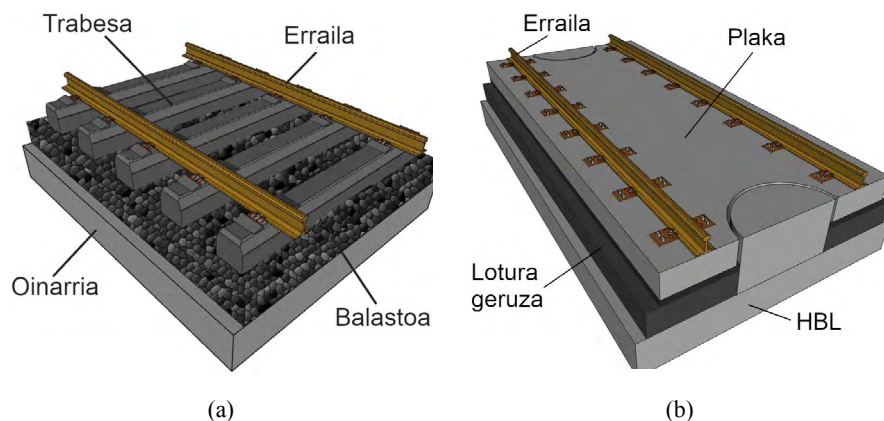


Lan hau Creative Commons Aitortu-EzKomertziala-PartekatuBerdin 4.0 Nazioartekoa lizentzia baten mende dago

## 1. SARRERA

Tradizioz, trenbideak eraikitzeko balastoa erabili izan da (ikus 1(a) irudia). Material hori, jatorri ofitikoko harritz osatua, trabesaren azpian jartzen da, esfortzu bertikalak moteltzeko, trabesen eta errailaren arteko elementu elastiko gisa jarduteko eta uraren drainatzea errazteko. Funtzio horiek betetzeaz gain, balastoa nahiko merkea da, baina mantentze-lan handiak behar ditu, parametro geometrikoak aldatzen baitira trenak igarotzean.

Balastoaren ordezkotza aukera plaka-trenbidea da; trenbidea zuzenean hormigoizko lauza baten gainean dago, 1(b) irudian ikus daitekeen bezala. Balastorik ezean, beharrezko elastikotasuna bermatuko duen sistema errailaren eta hormigoizko lauzaaren artean kokatzen da soilik. Plaka-trenbide motaren arabera, hainbat sistema erabil daitezke, gehienetan ohikoa baino material elastikoa tartekatuz.



**1. irudia.** (a) Balasto bidezko trenbidea eta (b) plaka bidezko trenbidea [1].

Sistema honek balasto-trenbidearekiko dituen abantaila nagusien artean aipa daitezke garbitzeko eta ustiatzeko erraztasuna, egonkortasun geometrikoa bermatzeko behar den mantentze-lan txikia eta kurbadura-erradio txikiagoak onartzea. Gainera, sistema hori abiadura handiko trenentzat egokiena da. Izan ere, zuloak saihesteaz gain, balasto-jaurtiketa saihesten du, hau da, trenak igarotzean harri txikiak abiadura handian jaurtitzea.

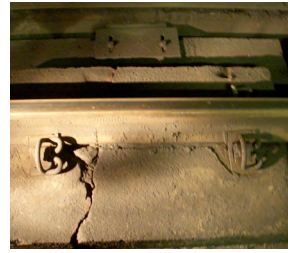
Hala ere, badira zenbait eragozpen. Horien artean nabarmenena ez dira egokienak errailatako irteerak gertatzean, naturako fenomeno batzuk (uholdeak, ezponden luiziak, etab.) suertatzean edo osagaien balio-bizitza agortzean ordezkatu edo konpondu behar diren egoeretarako. Egoera horietariko batzuk 2. irudian ikus daitezke.



(a)



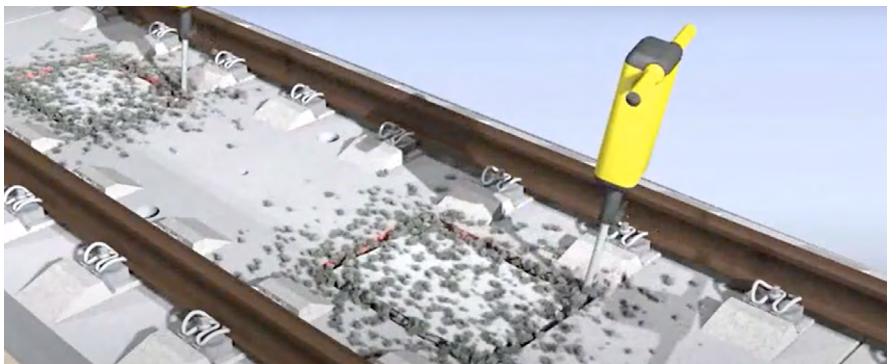
(b)



(c)

**2. irudia.** (a) Abiadura handiko trenaren errailatik ateratzeagatik kaltetutako plaka [2] eta (b) eta (c) metropoli-trenaren errailatik ateratzeagatik kaltetutako plaka [3].

Egoera horietan, ezinbestekoa da kaltetutako plaka ordeztzea (normalean, zenbait metro, plaka aurrefabrikatuekin egin ohi den eraikuntza modularra dela eta). Gaur egun, konponketa hori egiteko irtenbide bakarra kaltetutako plaka eraistea da, mailu pneumatikoz txikituz (ikus 3. irudia). Prozesu hori motela izateaz gain (horrek dakarren operazio-kostuarekin, kaltetutako trenbide-linearen zerbitzua eten behar baita), nahiko kutsagarria da (zarata, sortutako hautsa, lurzoruan eragindako dardarak, etab.), eta, bereziki hiriguneetan, gogaikarritzat har daiteke.



**3. irudia.** Plaka eraistea mailu pneumatikoen bidez [4].

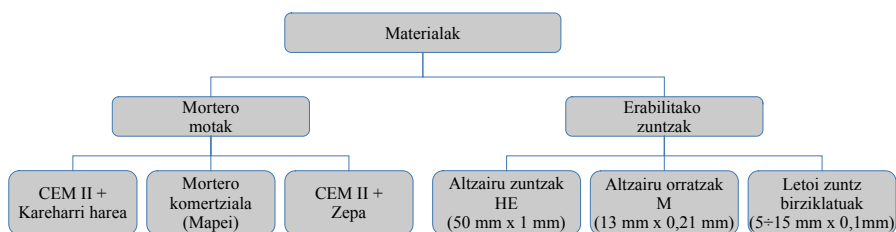
Lan honetan, mikrouhin bidez plaka-trenbideak modu eraginkor eta jasangarriagoan eraisteko metodo bat aurkezten da, mikrouhinak erabiliz.

## 2. MATERIAL-HAUTAKETA

Mikrouhinek eta indukzio bidezko beroketak eraispen-teknika gisa duten potentzialtasunaren inguruan argia ematen duten hainbat ikerketa dira [5, 6]. Planteamendu hori interesgarria da egiturak errazago birgaitzeko eta materialak modu eraginkorragoan birziklatzeko aukera ematen duten materialak modu lokalizatuagoan banatzeko. Gainera, inpaktu-indarrak aplikatuz materialen haustura eragiten duten eraispen-prozesu klasi-koen alderdi kutsagarri asko saihesten ditu.

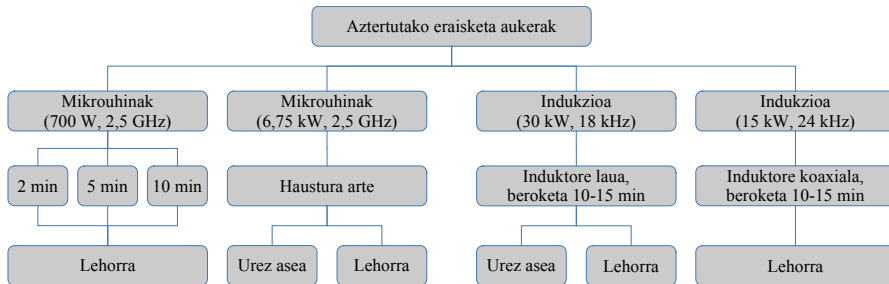
Trenbidearen plaka oinarriarekin lotzen duen geruza bero bidez ahultzeko aukera izanez gero, ordezeko plakak modu eraginkorragoan jartzeko aukera izango litzateke. Arazoari aurre egiteko, beroketaren bi printzipio fisikoren (indukzio elektromagnetikoa edo mikrouhinen aplikazioa) eta hautsi beharreko materialen zenbait konfigurazioren arteko konbinazio eraginkorrenak aztertu dira.

Bistan denez, azterketa honetan erabili diren materialek portaera «mekaniko» eta «termiko» onaren konbinazioa izan behar dute. Portaera «mekaniko» ona beharrezkoa da, trenbide-azpiegituraren osotasuna bermatzeko erresistentzia-baldintzak betetzeko (erresistentzia mekanikoa eta plakarekiko lotura, araudian zehaztutako indarrei eusteko, etab.), eta portaera «termiko» ona, eroankortasun-balioek berotze-prozesu fokalizatua-ren bidez lor daitezkeen tenperatura-tarteetan materialen haustura eragin dezaten.



**4. irudia.** Laborategi-eskalan frogatutako materialak.

Horretarako, beroketarako bi aukera aztertu dira: indukzio magnetikoaren aplikazioa eta mikrouhinen aplikazioa. Lehendabizi azterketa zabala egin da, laborategian (probetetan), material eta gehigarrien (zuntzak batez ere) konbinazio ezberdinak probatuz. 4. eta 5. irudietan, erabili ziren materialen eta berotze-metodoen konbinazio nagusiak azaltzen dira eskematikoki.



**5. irudia.** Laborategiko probetan erabilitako eraispén-aukerak.

Indukzio elektromagnetikoaren aplikazioan lortutako emaitza nagusiak argitaratuak dira [7]. Atera diren ondorioek ikuspegi hori interes teknologiko handiko beste aplikazio batzuetara bideratzea aholkatzen dute, hala nola konpondu beharreko hormigoi armatuzko zutabeen estaldurak kentzea.

Lortutako emaitzetatik abiatuta, azterketa mikrouhinen erabileran zentratzea erabaki da, eta mikrouhinen aplikazioaren aurrean materialek duten portaera hobeto ezagutzeko zenbait kalibrazio-saiakuntza egin dira. 6. irudian, kalibrazio-saiakuntza horien emaitzen argazkiak ikus daitezke. Hurrengo atalean, emaitza arrakastatsuen duten materialen azterketan sakonduko da.



**6. irudia.** Kalibrazio-saiakuntzetako emaitza batzuk.

Probetetan egindako saiakuntzetatik ondoriozta daiteke ezen irisgarriak ez diren poroetan urak sortzen duen barne-presioaren eraginez materialaren haustura era bortitzean gertatzen dela. Zuntzek, aldiz, ezkutu gisa jokatzeko dute, uhinak islatzen baitituzte. M zuntzen eta letoi-zuntzek antzeko eragina erakusten dute, haien neurriak antzekoak baitira. HE zuntzetan, aldiz, haien luzera handiagoa dela eta, pantaila-efektua txikiagoa da, zuntz-sarea ez baita horren trinkoa. Maiztasuna aldatu ezean, haustura-mekanismoa antzekoa da erabiltzen den potentzia edozein dela ere.

Kalibrazio-proben artean, hainbat materialen propietate dielektrikoak neurtu dira, propietate horiek erabakigarriak baitira material optimoa bi-latzeko [8]. 7. irudian ikus daitezkeen asfalto- eta zementu-probetak az-tertu dira, eta haien emaitzak 1. taulan laburbiltzen dira. Konstante horien (konstante dielektrikoa, galera-faktorea, galera-tangentea) esanahiaren azalpen zehatzagoa eta material bakoitza mikrouhin bidez irradiatzean es-pero daitezkeen emaitzetan duten eragina [8] erreferentzian kontsultatu daitezke.



**7. irudia.** (a) Asfalto- eta mortero-probetak (kareharri-agregakina eta silize-agre-gakina) eta (b) haien propietate dielektrikoen neurketa (b).

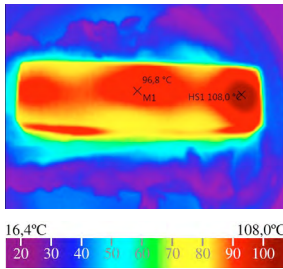
**1. taula.** Propietate dielektrikoen neurketen emaitzak.

| Materiala       | Konstante dielektrikoa ( $\epsilon'$ ) |                 | Galera-faktorea ( $\epsilon''$ ) |                 | Galera-tangentea |
|-----------------|----------------------------------------|-----------------|----------------------------------|-----------------|------------------|
|                 | Batezbestekoa                          | Desbid. estand. | Batezbestekoa                    | Desbid. estand. |                  |
| Silize-harea    | 4,33                                   | 0,41            | 0,1126                           | 0,0228          | 0,026            |
| Kareharri-harea | 5,32                                   | 0,63            | 0,2286                           | 0,0397          | 0,043            |
| Asfaltoa        | 5,91                                   | 0,47            | 0,1850                           | 0,0737          | 0,031            |

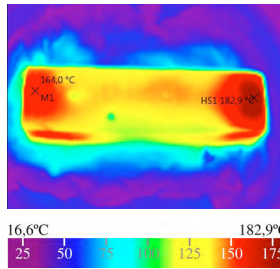
Proba horietan guztietan, materialaren gainazaleko tenperatura zehaz-tekota kamera termografikoa erabili zen. Adibide gisa, 8. irudian, 700 W-eko mikrouhin-potentziaz denbora-tarte ezberdinez berotutako sei kasu ikus daitezke. «R» letrak mortero hutsezko probeta adierazten du, eta «S» le-trak, mortero-bolumenaren % 2 osatzen duten zuntzez indarturikoa.

Behin laborategiko saiakuntzak burututa, mikrouhin-aplikagailu irekia-ren prototipoa diseinatzeari eta eskala handiagoko proben faseari ekingo zaio.

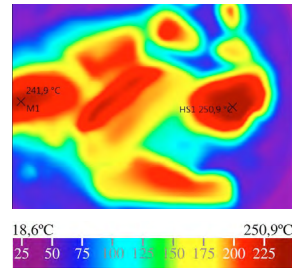




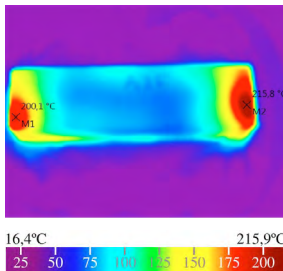
(a) R mortar, MW:120s



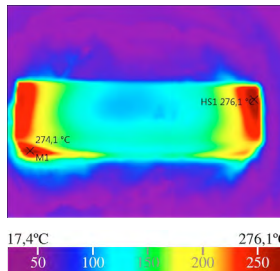
(c) R mortar, MW:240s



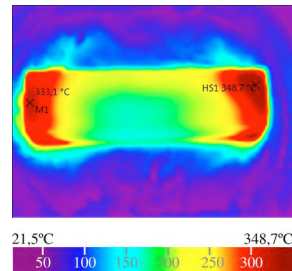
(e) R mortar, MW:300-400s



(b) S mortar, MW:120s



(d) S mortar, MW:240s



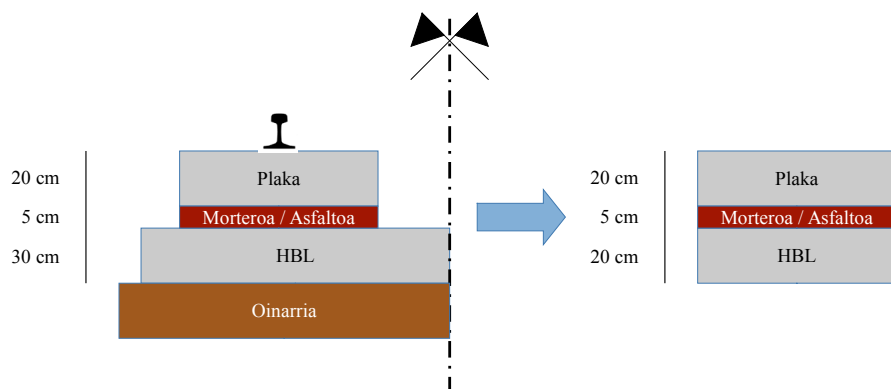
(f) S mortar, MW:600s

**8. irudia.** Adierazitako tenperaturak lortzeko beharrezko mikrouhin bidezko be-  
rotze-denbora (s).

### 3. MIKROUHIN-APLIKAGAILU IREKIAREN DISEINUA

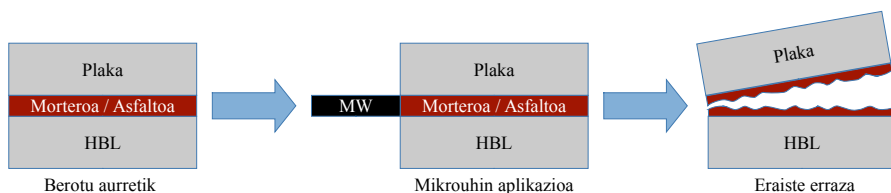
Laborategiko saiakuntzen bidez lanaren hasierako hipotesia berretsi on-  
doren (zementu-matrizeko materialen geruzak modu eraginkorrean eta se-  
lektiboan eraits daitezkeela), industrialki garrantzitsuak diren inguruneetan  
probatu ahal izateko mikrouhin-ekipoa diseinatu da.

Ekipoa era egokian diseinatzeko, plaka-trenbideen ohiko konfigura-  
zioak ezagutzea ezinbestekoa da. Gaur egun, askotariko konfigurazio ko-  
mertzialak dauden arren (Stedef, Edilon, Shinkansen, etab. [9]), guztiek  
antzeko ezaugarriak partekatzen dituzte. Guztietan, plataformaren oinarria-  
ren gainean hormigoizko geruza bat tartekatzen da, eskuarki Hydraulically  
Bonded Layer (HBL) deiturikoa. Lauza aurrefabrikatu bidezko trenbideet-  
an, errailei utsiko dien lauza horren eta HBLaren arteko lotura, 9. irudian  
ikus daitekeen bezala, obran isuritako mortero/hormigoiz edo asfaltoz osa-  
tzen da.



**9. irudia.** Plaka bidezko trenbidearen eskema.

Lan honetan, eskema hori sinpletu, eta, 10. irudian ikus daitekeen bezala, tarteko geruza horretan mikrouhinak (MW) aplikatuz, hormigoi-plaka aldatzeko fusible gisa erabil liteke. Tarteko geruza hori berotzeko, mikrouhin-aplikagailu irekia diseinatu behar da. Geruzaren lodiera 50 mm izan ohi denez, 2,45 GHz-eko maiztasuneko saiakuntzetan erabiltzen diren uhin-gida laukizuzenak ( $86 \times 43 \text{ mm}^2$ ) erabiliko dira.



**10. irudia.** Euskarri-geruza haustea, mikrouhinak aplikatuz.

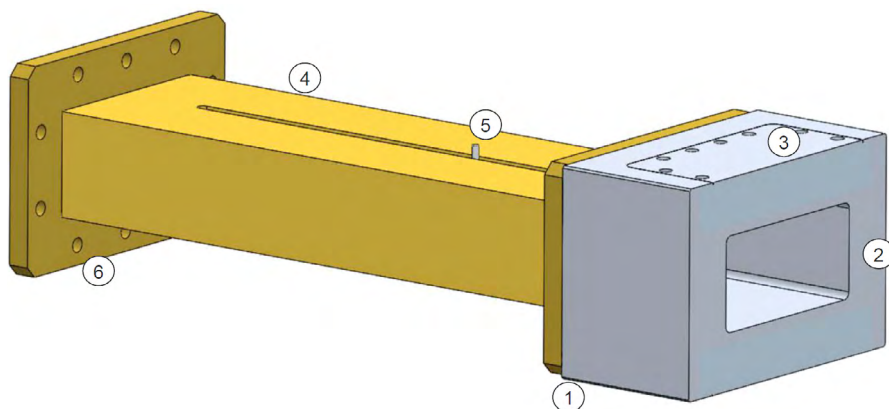
Mikrouhinen eta berotu beharreko materialen arteko elkarrekintza ere aztertu behar izan da. FEM simulazioen bidez eta hormigoiaren, morteroaren eta asfaltoaren ohiko balioak kontuan hartuz, S11 islapen-koefizientea [10] zehaztu da, alegia, igorritako potentzia islatuaren eta xurgatu gabearren ehunekoa. Espero bezala, S11ren balioa apalak ( $-7,02 \text{ dB}$ ) eraginkortasun baxua adierazten du (igorritako potentziaren % 80 islatzen du), uhin-gidaren eta berotu beharreko kargaren inpedantziak nabarmen ezberdinak baitira. Elkarrekintza hobetzeko hainbat eratan egokitu daiteke inpedantzia. Ekipoaren sendotasuna, arintasuna eta prezioa irizpide nagusitzat harturik, uhin-gidaren barruan tefloi-geruza bat tartekatzea erabaki da. FEM simulazioen arabera, aplikagailuaren muturretiko distantzia optimoa 8 mm da ( $+ n * \text{uhin-luzera}$ ). Bestalde, transformatu



binomial multisekzioaren teoriaren bidez [11], tefloi-geruzaren lodiera 27 mm zela zehaztu zen. Era horretan, S11 koefizientea  $-18,861$  dB-ra murriztu zen; hau da, inpedantzia-egokitzapenaren bidez potentziaren % 98,7 xurgatuko da.

Hala ere, agregakin motaren, hezetasunaren eta beste aldagai batzuen arabera, hormigoia, morteroaren eta asfaltoaren propietate dielektrikoak aldatu ahala, kargaren inpedantzia ere aldatu egiten da. Ondorioz, inpedantzia egokitzeko tefloi-geruza mugitzeko aukera eskaintzen da, aplikagailuaren muturrerainoko distantzia aldatuz, ia edozein karga ondo ahokatzeko moduan. 11. irudian, CEINNMAT enpresa espezializatuaren laguntzarekin diseinatu eta fabrikatutako mikrouhin-aplikagailu irekiaren atalak azaltzen dira.

- |                                              |                                  |
|----------------------------------------------|----------------------------------|
| 1. Aplikagailu irekiaren burua               | 2. Aplikagailu irekiaren muturra |
| 3. Mikrouhin-iragazki direkzional integratua | 4. Uhin-gida                     |
| 5. Inpedantzia irristakorreko egokigailua    | 6. Aplikagailuaren lotura        |

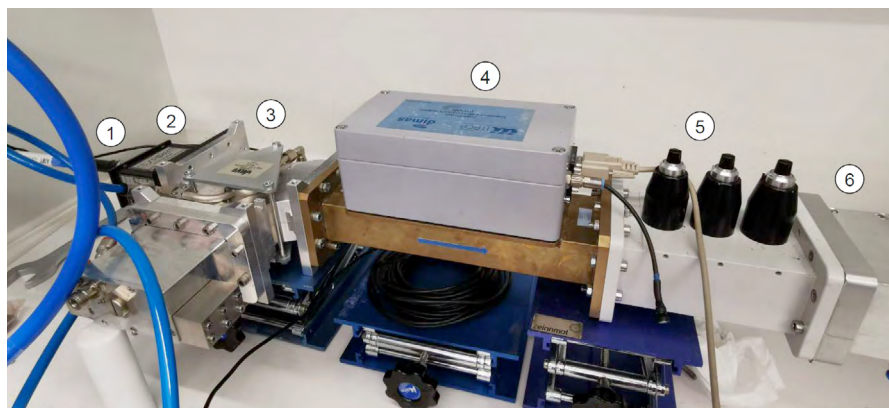


**11. irudia.** Mikrouhin-aplikagailu irekia.

#### **4. PROTOTIPOEN PROBA ESPERIMENTALAK**

Aplikagailua egituraren neurria diseinatu ondoren, mikrouhinak sortzeko sistemarekin elkartu eta sistemaren kalibrazioa egin behar da berotu beharreko materiala kontuan hartuta. Mikrouhin-sorgailuaren eta aplikagailuaren artean, 12. irudian ikus daitezkeen atalek osatzen dute sistema hori. Atal horiek beharrezko segurtasuna eskaintzen dute uhinak bideratzeko, igorritako eta islatutako potentziak neurtzeko eta azken horiek ekipoa kalterik ez sortzeko.

1. Mikrouhinak elikatzeko kable ardazkidea.
2. Uhin-gidaritzarako trantsizio ardazkidea.
3. Isolagailua, uhin-gidariaren zirkulagailu batez eta ur-karga batez osatua.
4. HiPoM mikrouhinen erreflektometroa, xurgatutako potentzia, igorritako potentzia eta islatutako mikrouhin-potentzia neurtzeko.
5. Hiru poloko inpedantzia-berdintzailea.
6. Aplikagailua.

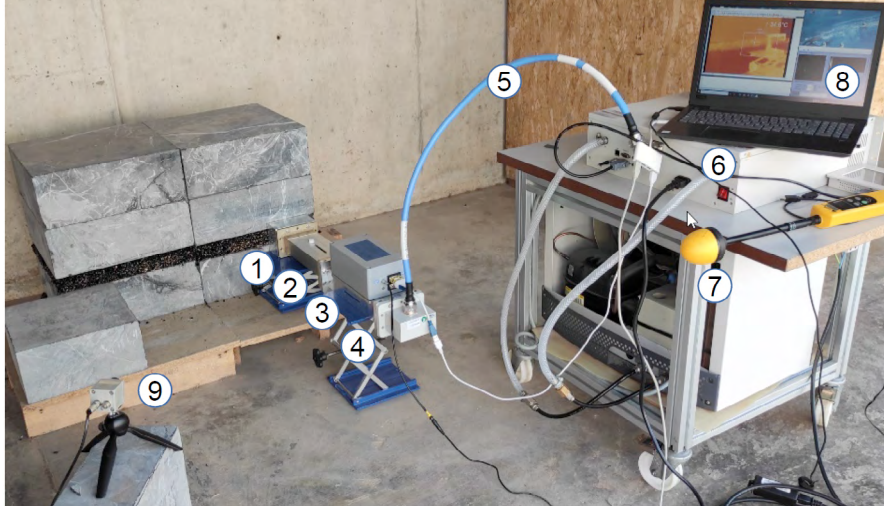


**12. irudia.** Norabide-aplikagailuaren atalak.

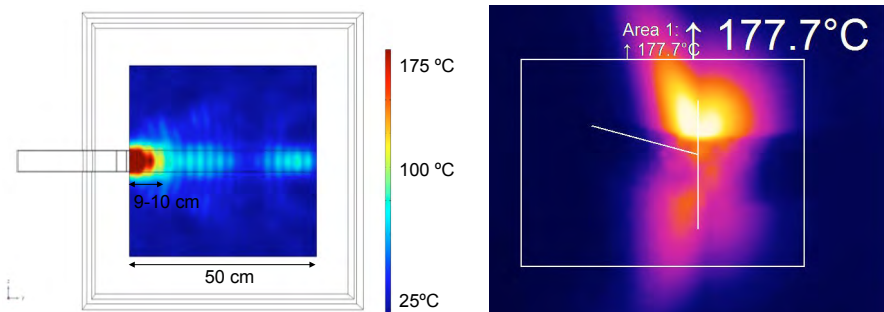
Prototipoaren behin betiko diseinua zehaztu aurretik, *ad hoc* prestatu-riko zenbait probetarekin azken saiakuntzak egin dira. 13. irudian, material bituminosoz osatutako geruza berotzeko egindako saiakuntza ikus daiteke. Probaren konfigurazioak simulazioen modelizazioa erreplikatzen du. Kارهارri-blokeek, asfalto-geruzaren inguruan, plaka-trenbide sisteman ohi-koak diren hormigoi-plaka aurrefabrikatu eta HBLaren funtzioa betetzen dute.

14. irudian, ordenagailu-simulazioetan aurreikusitako tenperaturak eta laborategiko saiakuntza honetan lortutako emaitzak alderatzen dira. 10 minutuz 1 kW-eko potentziaz berotu ondoren tenperatura-banaketak, batean zein bestean, antzekoak dira. Simulazioek errealtatearen joera islatzen dute, nahiz eta ezberdintasun arinak atzeman. Saiakuntza errealean lortu-tako tenperaturak txikiagoak dira, zeren aplikagailuaren muturraren eta be-rotutako materialaren arteko kontaktua, azken horren zimurtasuna dela eta, ez baita simulazioetan bezain perfektua.

- |                   |                                |                            |
|-------------------|--------------------------------|----------------------------|
| 1. Antena.        | 2. Impedantzia-kontrolagailua. | 3. HiPoM erreflektometroa. |
| 4. Igarobidea.    | 5. Elikatze-kable ardazkidea.  | 6. Mikrouhin-sorgailua.    |
| 7. Hozte-sistema. | 8. Kontrol-panela.             | 9. Kamera termikoa.        |



**13. irudia.** Norabide-aplikagailua kalibratzeko eta doitzeko proba-bankua.

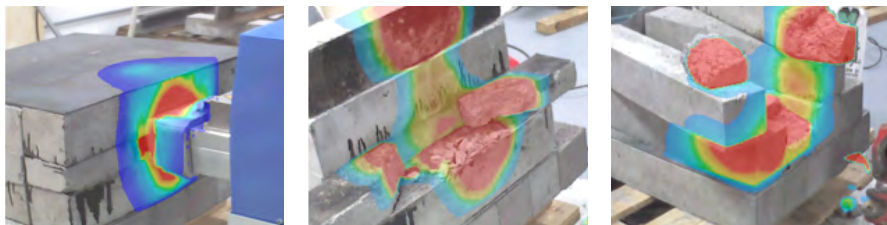


**14. irudia.** Kalibrazio-proban lortutako emaitzak (1 kW, 10 min): simulazioa ezkerrean, proba esperimentalean neurtutako tenperatura eskuinean.

Ekipoa kalibratzean lortutako emaitzak egokiak dira, eta lehenengo probetan lortutako tenperatura nahikoa da asfaltoa biguntzeko. Era horretan, goiko blokeak (lauza aurrefabrikatuak) ken daitezke HBLean eta azpiko geruzetan eragin gabe.

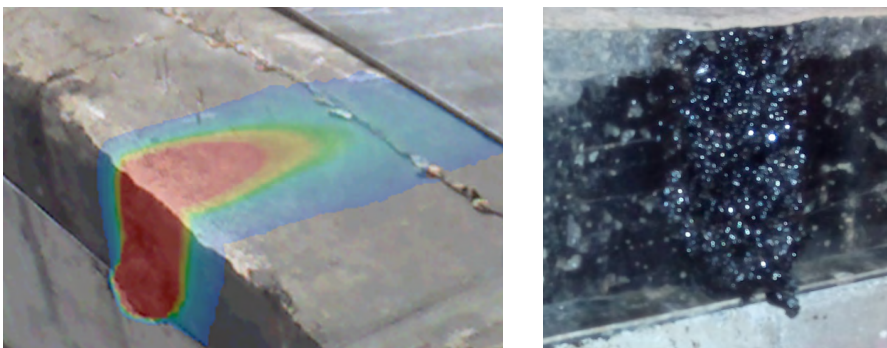
1. taulako balioen arabera, kareharri-hareazko morteroak dira beroketa handiagoa lortzeko aukerarik onena. Mortero hutsezko zein beste hainbat

produkturekin (zuntzak, etab.) nahastuz osatutako probetak probatu dira. Nahaste horien helburua da bero espezifikoaren murriztea edo beroa bolumen handiagoa hedatzea. Arestian aipatu bezala, hobekuntza horiek ez dira nabarmenak edo eraginkorrak izan. Beraz, horiek baztertu, eta mortero hutsezko probetak izan dira aztergai nagusi. 15. irudian, beroketaren ondoriozko morteroaren haustura ikus daiteke, baina erresistentzia altuak eta portaera hauskorrak materialaren leherketa eragin dute.



**15. irudia.** Morterozko lotura-geruzaren leherketa beroketaren ondorioz.

Ondorioz, eta nahiz eta propietate dielektriko onenak erakusten dituen, hurrengo saiakuntzetan asfaltozko geruza berotu da. Zenbait abantaila baditu, ordea. Materiala kaltetzeko behar den temperatura ez da zementuzko morteroek eskatzen dutena bezain altua. 100 °C-tik gora ahultzen hasten da, eta 175 °C-ra arte portaera plastikoa du. Temperatura horretatik aurrera asfaltoa urtzen hasten da, 16. irudian ikus daitekeen bezala (200 °C-ra berotu ondoren asfaltoa berez jariakorra da).



**16. irudia.** Asfaltozko lotura-geruzaren jariora beroketaren ondorioz.

Europar eta Japoniar asfaltozko geruza duten hainbat sistema komertzial erabiltzen dira (ATD, SATO, GETRAC, etab.). Hormigoi-plaka aurrefabrikatuekin, *top-down* eraikuntza-prozesua da egokiena, eta asfaltoa ezin hobeto egokitu daiteke. Betuna, harea, legarra eta *fillerra* proportzio

aldakorretan nahastuz, trinkotu beharrik gabe ezar daitekeen asfalto galdatua fabrikatzen da. Obran jartzean tenperatura altuak baditu ere (260 °C-rainokoak), aplikazio-metodo eta -teknikak aspaldi dira ezagunak, eta arriskuak murrizak dira. Behin asfaltoa hotoz gero (ordubete inguru), haren karga-ahalmena maximoa da. Morteroak, oso jariakorak izan daitezkeen arren, zenbait egunez ontze egokia baldin badu, zehaztutako konpresio-erresistentzia 28 egunera lortuko du. Gainera, asfaltoaren kasuan, eraispen-prozesuak ez du zarata edo hautsik sortzen, beroketaren bidez asfaltoa bigundu besterik ez baita egiten, inolako leherketaren arrisku eta eragozpenak saihestuz.

Asfalto galdatuak, erabilera ezberdinetan ondo egiaztatutako aplikazioa du, besteak beste, zirkulazio handiko zoladurak, zubiak, etab. Trenbide-azpiegituretarako irtenbide egoki gisa ere aztertu izan da [12]. Haren propietate mekanikoak lehen aipatutako motetan jada erabiltzen diren asfaltoen antzekoak dira, eta, gainera, hobeak dituzte zenbait propietate, hala nola portaera iragazgaitza.

Porositate txikia duenez, iraunkortasun handia du eta hainbat erasoren aurrean (urradura, produktu kimikoak, sustraiak, urteko gatza, etab.) oso erresistentzia ona du. Zaratarekiko eta dardararekiko portaera ona du, inpaktu-zarata 14 dB-eraino murrizten baitu (bereizketa-geruza gainean dagoen 35 mm-ko asfaltozko geruzaren kasuan) eta 0,18ko moteltzea ( $\eta$ ) eragin baitezake. Gainera, labe garraiagarri batek asfalto erauzia obran bertan berotu lezake, eta kaltetutako plaka ordezkatzeko berriz erabil liteke hura finkatzeko.

## **5. ONDORIOAK ETA ETORKIZUNEN LAN-ILDOAK**

Lan honetan, plaka-trenbideen azpiegiturak konpontzeko ideia berri-taile bat aurkeztu da. Garatutako kontzeptua errailei eusten dien plaka aurrefabrikatua eta plataformaren oinarria elkartzen dituen geruzaren eraispen selektiboan oinarritzen da. Asmo horretarako, geruza horretan aplikatutako mikrouhinaren berotze-efektua erabiltzen da. Metodo berria iza-teaz gain, gaur egun erabiltzen direnak baino eraginkorragoa da, horiek, funtsean, mailu pneumatikoak kaltetutako plaka erabat txikitzen baitute. Metodo berriak eraispen selektiboagoa egiteko aukera ematen du, zeren lotura geruzari bakarrik eragiten zaio eta kaltetutako plaka kentzen da, haren ordezkari beste bat jarrita denbora askoz laburragoan. Era horretan, eragindako tren-linearen zerbitzua etetearen ondoriozko eragozpenak murriztu egiten dira. Gainera, metodo jasangarriagoa da, gaur egungo konponketa-prozesuan nahi ez diren ondorioak murrizten baititu; hots, ez du zaratarik sortzen, ez hautsik, eta konponketaz arduratzen diren langileentzat ergonomi-koagoa da.

Plaka-trenbideen kasurako *ad hoc* diseinatu den aplikagailu irekiko mikrouhin-sistemaren prototipoa eraiki da. Laborategiko probetetan eta eskala errealean (ikus 17. irudia) egindako saiakuntzek emaitza itxaropen-tsua eskaintzen dituzte.



**17. irudia.** Mikrouhin-ekipoa trenbidean lanean.

Hainbat proba egin dira plaka-trenbidearen sistemaren atal nagusiak elkartzen dituen geruzan, hainbat material probatuz. Guztien artean, asfalto galdatuaren erabilera bereziki nabarmendu da, emaitza eraginkorrenak aurkezten ditu eta.

Haren alderdi batzuk doitzen bukatzea falta bada ere, sistemaren garapena gertuago dago laborategiko giro kontrolatutik kanpo erabiltzetik (Technology Readiness Level 5). Alderdi horiek etorkizunean landu beharreko lan-ildo hauetan laburbiltzen dira:

- Benetako trenbide-plaka aurrefabrikatua desmuntatzeko, zeinak 5 metro inguruko luzera duen, paraleloan ekipo batek baino gehiagok lanean aritu behar dute. Aplikagailuaren neurriak handitu beharko lirateke, aplikagailu paraleloen kopurua murrizteko.
- Prototipoaren gaur egungo diseinuaren arabera, uhinek ez dute nahikoa sakonera berotzen gaur egun dauden plaka-trenbideetan aplikatzeko; adibidez, Shinkansen, ÖBB-IZO, etab. Lan honetan erabilitakoa baino maiztasun txikiagoko uhinak sortzen dituen mikrouhin-sorgailua erabiltzea aztertuko da. Magnetrotien maiztasun ohikoa, 2,45 GHz, lan honetan erabilitakoa da, baina beste maizta-



sun batzuekin ere lan egin daiteke. Uhinen barneratze-sakonera handitzeko eta ekipoez paraleloan lan egin behar ez dezaten edo plaka-trenbidearen sistema eta neurri ezberdinetara egokitu daitezen, maiztasun txikiagoekin (adibidez, 915 MHz) lan egiten duten magnetrotietara bideratu behar dira azterketak. Maiztasun horrek ekipoa birdiseinatzea eskatuko du, eta, zehazki, uhin-gidaren neurriak handitzea.

- Lan honetan diseinatutako ekipoa, errail bakoitzaren azpian euskarririk jarraitua eskaintzen duten habe aurrefabrikatu bereziak dituzten plaka-trenbideen sistema berriei aplikatu dakieke. Kasu horietan, materiala alde bietatik berotu egin behar da.

## ESKER ONAK

Lan hau European Horizon 2020 Joint Technology Initiative Shift2Rail erakundeak partzialki finantzatu du 101012456 (IN2TRACK3) kontratuaren bidez. Egileek, halaber, eskerrak eman nahi dizkiote Eusko Jaurlaritzari, euskal unibertsitate-sistemako ikerketa-taldeek (2022-2025) jarduerak babesteko IT1764-22 eta IT1619-22 (SAREN) laguntzaren bidez emandako dirulaguntzagatik.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] E. G. VADILLO *et al.* 2019. «Enhanced track structure – Status, key influencing parameters and prioritised areas of improvement». *Research into enhanced tracks, switches and structures*. In2Track Project.
- [2] JAPONIAKO LURZORU, AZPIEGITURA, GARRAIO ETA TURISMO MINISTERIOA. 2016. «[Kumamoto lurrikara] Shinkansen trenbidea konpontzeko lanak hilaren 18an hasiko dira (Japonieraz)». *The Sankei Shimbun*. <http://www.sankei.com/photo/story/news/160417/sty1604170022-n1.html>. 2016/04/17an eguneratua
- [3] ASIER MARTIARENA. 2014. «La seguridad de los viajeros del Metro de Madrid “no está garantizada”». *La Vanguardia*. <https://www.lavanguardia.com/local/madrid/20140730/54412607505/seguridad-viajeros-metro-madrid-no-esta-garantizada.html>. 2014/07/30ean eguneratua.
- [4] PORR Group. 2013. «PORR Austria: Slab Track Austria | System ÖBB-PORR elastically supported slab». <https://www.youtube.com/watch?v=fa5i0aoVL7k>. 2013/07/29an eguneratua.
- [5] ONG, K., AKBARNEZHAD, A. 2015. *Microwave-Assisted Concrete Technology: Production, Demolition and Recycling*. 1st ed. CRC Press Taylor & Francis Group.
- [6] JONES, D. A., LELYVELD, T. P., MAYROFIDIS, S. D., KINGMAN, S. W., MILES, N. J. 2002. «Microwave heating applications in environmental engineering—A review». *Resources, Conservation and Recycling*, **34** (2), 75-90.

- [7] ONAINDIA, A., OYARZABAL, O., ORBE, A., BORINAGA-TREVIÑO, R., CANALES, R., GARCÍA VADILLO, E. 2022. «Simulación numérica de la aplicación de corrientes de inducción al desmontaje eficiente de vías en placa ferroviarias». *Técnica Industrial*, **332**, 64-72.
- [8] GUTÍERREZ-CANO, J. D., PLAZA-GONZÁLEZ, P., CANÓS, A. J., GARCÍA-BAÑOS, B., CATALÁ-CIVERA, J. M., PEÑARANDA-FOIZ, F. L. 2020. «A New Stand-Alone Microwave Instrument for Measuring the Complex Permittivity of Materials at Microwave Frequencies». *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **69** (6), 3595-3605.
- [9] MICHAS, G. 2012 *Slab Track Systems for High-Speed Railways*. Master Degree Project. KTH Royal Institute of Technology.
- [10] POZAR, D. M. 2012. *Microwave Engineering*. 4th Ed. John Wiley and sons.
- [11] COSTER, I., LIL, E., CAPELLE, A. 2000. «Comparison of Design Methods for Binomial Matching Transformers». *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, **14**, 1229-1239.
- [12] LIU, S., YANG, J., CHEN, X., YANG, G., CAI, D. 2018. «Application of Mastic Asphalt Waterproofing Layer in High-Speed Railway Track in Cold Regions». *Applied Sciences*, **8**, 667.