



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

**Protioaren eta deuterioaren  
permeabilitatearen erlazio  
isotopiko klasikoaren balioztatze  
esperimentala Eurofer-97 eta AISI  
316 materialetan**

*María Urrestizala, Jon Azkurreta,  
Natalia Alegría eta Igor Peñalva*

19-26 or.

<https://dx.doi.org/10.26876/ikergazte.vi.03.02>

ANTOLATZAILEA



BABESLEAK



EUSKO JAURLARITZA  
GOBIERNO VASCO



LAGUNTZAILEAK



# **Protioaren eta deuterioaren permeabilitatearen erlazio isotopiko klasikoaren balioztatze esperimentalak Eurofer-97 eta AISI 316 materialetan**

María Urrestizala, Jon Azkurreta, Natalia Alegría, Igor Peñalva

Bilboko Ingenieritza Eskola, Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU); Ingeniero Torres  
Quevedo Plaza 1, 48013,  
[maria.urrestizala@ehu.eus](mailto:maria.urrestizala@ehu.eus)

## **Laburpena**

Hidrogenoaren garraio-parametroen arteko erlazio isotopikoa menderatzea oso aplikagarria izan daiteke fusio-erreaktoreen materialak ondo ezaugarritzeko. Urteetan zehar, teoria atomiko klasikoa zalantzan jarri eta ikuspuntu desberdinak erabiliz aztertu egin da, baina ez da inolako adostasunik lortu. Dena den, ratioa ondo ebaluatzeko, isotopo bakoitzaren parametroak lortzeko prozesuan agertzen diren ziurgabetasunak minimizatzea ezinbestekoa dela egiaztatu da. Horretarako, Eurofer eta AISI 316 materialen bi laginekin azterketa esperimental zehatza burutu da, seinalearen kalitatea, instalazioaren huts-seinalea eta erregimen difusiboaren egiaztapena zainduz, uste baita horiek direla errore-kausa potentzial handienetakoak. Datuen iragazpen honi esker, esperimentazioa zehaztasunez egiten denean, protioaren eta deuterioaren permeabilitateek erlazio klasikoa doitasunez betetzen dutela egiaztatu da bi material horietan.

Hitz gakoak: fusio-nuklearra, erlazio-isotopikoa, permeabilitatea, Eurofer-97, AISI 316

## **Abstract**

*Mastering the isotopic ratio of hydrogen transport parameters in fusion reactor materials is of great applicability for their characterisation. For years, the classical atomic theory has been questioned; however, no consensus has been reached. However, it is necessary to minimise this uncertainty when obtaining each transport parameter separately, before relating them isotopically. In the present study, this process has been carried out with a Eurofer sample and an AISI 316, paying special attention to the quality of the signal, the relative vacuum-signal of the facility itself, and the verification of the diffusive regime, as these are believed to be some of the major potential causes of error. It has thus been verified that, by obtaining the permeability of protium and deuterium accurately, the classical ratio is fulfilled with a really accurate precision in these two materials.*

*Keywords: nuclear fusion, isotope-effect, permeability, Eurofer-97, AISI 316*

## **1. Sarrera eta motibazioa**

Fusio-erreaktoreak osatuko dituzten materialen hautaketa eta karakterizazioa teknologia honek aurre egin beharreko erroka handienetakoak dira. Izan ere, oso tenperatura altuen eta karga mekaniko handien eraginpean egongo dira, eta erradiazio jarraitua jasango dute. Gainera, haien eroankortasuna, segurtasun-baldintzak, balio-bizitza eta bideragarritasun ekonomikoa erabakigarriak izango dira ere. Baldintzatzaile horiek guztiak kontuan hartuta, epe laburrean aukera helduenek altzairu austenitikoak eta aktibazio baxuko altzairu ferritiko/martensitikoak (RAF/M) hartzen dituzte kontuan. Horregatik, lan honek bi material horietan jarri du arreta, zehazki Eurofer-97 RAFMean eta AISI 316 austenitikoan.

Ikerketa- eta karakterizazio-lanetan eragozpen nagusia, tritioarekin (T) esperimentalki lan egiteko zailtasuna da, bere urritasuna eta erradioaktibitatea direla eta; horretaz gain, batzuetan deuterioarekin (D) lan egitea ere ez da erraza, protioa (H) baino askoz eskuraezinagoa baita. Beraz, interesgarria litzateke garraio-parametroen arteko erlazio isotopikoa ezagutzea, karakterizazio-saiakuntza esperimentalak H isotopoarekin bakarrik burutzeko eta emaitzak beste bi isotopoetara estrapolatzeko. Hori izango da, izan ere, ikerlan honek bilatzen duena.

Garraio-parametroak, laburbilduz, gas batek material baten bidez hedatzean duen portaera ezaugarritzen duten magnitude fisikoak dira eta hurrengoak dira aztertutakoak:

- Difusibitatea ( $D$ ): kontzentrazio-gradiente baten ondorioz hidrogeno atomoek materialaren barruan duten abiadura ezaugarritzen du  $[m^2 s^{-1}]$ .

- Solubilitatea: presio jakin batean materialean orekan disolba daitekeen hidrogeno kantitatea adierazten du eta Sieverts konstantearekin ( $K_S$ ) ezaugarritzen da [ $\text{mol m}^{-3} \text{Pa}^{1/2}$ ].
- Permeabilitatea ( $\Phi$ ): hidrogenoak materiala zeharkatzeko duen erraztasuna adierazten du [ $\text{mol m}^{-1} \text{Pa}^{-1/2} \text{s}^{-1}$ ].

## 2. Arloko egoera eta ikerketaren helburuak

Bere garrantzi eta aplikagarritasuna direla eta, erlazio isotopikoaren balioa asko eztabaidatu da. Urteetan zehar, erlazio klasikoa onartua izan zen, ratioa isotopoen masa atomikoen arabera dela ezartzen duena (Wert eta Zener, 1949; Mehrer, 2007). Hala ere, esperimentalki egiaztatzen saiatzean, desadostasunak antzematen hasi ziren. Hainbat berrikuspen bibliografiko egin dira (Urrestizala et al., 2023), testuinguru horretan argitaratutako emaitzak benetan desberdinak direla agerian uzten, baita material berberetarakoak ere. Izan ere, autore berek ere emaitza desberdinak lortu izan dituzte material berdinen lagin desberdinetarako (Urrestizala et al., 2024). Era berean, hainbat eredu proposatu dira, tritioaren balioak modu egokiagoan iragartzeko (Le Claire, 1966; Ebisuzaki et al., 1967; Franklin, 1969; Katz et al., 1971; Esteban et al., 2000).

Azterlan hau garatu bitartean, prozesu esperimentalek ziurgabetasun ugari dakartzatela berekin ikusi da isotopo bakoitzaren garraio-parametroak lortzean. Beraz, horiek minimizatzen ez badira, ondorioak eta erroreak handiagotu egiten dira bi isotopoen parametroak geroago erlazionatzean. Era berean, azterketa esperimental horiek instalazioaren, laginen ezaugarrien, entseguak egiteko moduaren eta ordenaren, datu-bilketaren, datu-prozesaketaren eta abarren eragin handia dute. Halaber, kontuan hartu behar da erabilitako ereduak prozesuaren erregimen nagusia hau egonkortzean difusiboa dela hartzen duela hipotesi moduan. Baina, egiatan, erregimen horretarako baldintza batzuk aukeratu arren, ezinezkoa da aspektu hori aldeztetik ziurtatzea. Nabarmendu behar da, bestalde, prozesu esperimentalak eta instalazioak ez direla askotan zehazki deskribatzen, ezta emaitzak tratatzeko modua ere, eta horrek joera edo errore batzuk estal ditzakeela. Azkenik, ez da ohikoa ere laginaren egoera aztertzea, mikroegituraren aldaketa nabarmenik egon den zehazteko. Horregatik guztiagatik, ez da harritzekoa argitaratutako emaitzak hain sakabanatuta egotea eta parametroen erlazio isotopikoari buruzko ondorio zehatzik ez ateratzea.

Bestalde, bi parametro esperimental erlazionatzen dituen fenomeno bat egiaztatzeke (eta ez parametro bakoitza berez), komenigarria izango litzateke ziurgabetasun gutxi duen parametroa aztertzea. Horrela, bi isotopoen erlazionatzean, ahalik eta ondorio zehatzak lortu ahal izango dira. Hori dela eta, permeabilitatea soilik aztertzea aukeratu da, permeazio-entseguak erabiltzen direnean parametrorik fidagarriena delako eta doikuntza lineala erabiliz eskuratzen delako. Gainera, *trapping*-ak ez dio permeabilitateari eragiten, eta horrek, beraz, prozesuaren ziurgabetasun-arrazoi berri bat ezabatzen du. *Trapping*-aren bidez, hidrogeno-atomo disolbatuak gune espezifiko batzuei lotuta geratzen dira (hala nola inklusioak, dislokazioak, ale-mugak, prezipitatuak...). Ondorioz, atomoen garraioa moteltzen da eta horrek beste parametroen balioan badu eragina; adibidez, solubilitatea handitzen da, materialak atomo gehiago absorbatuko baititu.

Lan honen helburu nagusia, beraz, Eurofer-97 eta AISI 316 materialetan H- eta D-ren permeabilitateen arteko erlazio isotopikoak teoria klasikoa betetzen duen esperimentalki aztertzea da. Horretarako, ikerketarako erabilitako entseguak aldeztetik iragaziko dira, zehaztasun ezaren kausa potentzialak minimizatzeke.

## 3. Ikerketa muina

### 3.1. Materiala

Ikerketa lan honetan zehar bi laginen emaitzak jasoko dira, bata Eurofer-97 materialarena (EUROFER deitua) eta bestea AISI 316 altzairu austenitikoarena (SS316 deitua). Biak

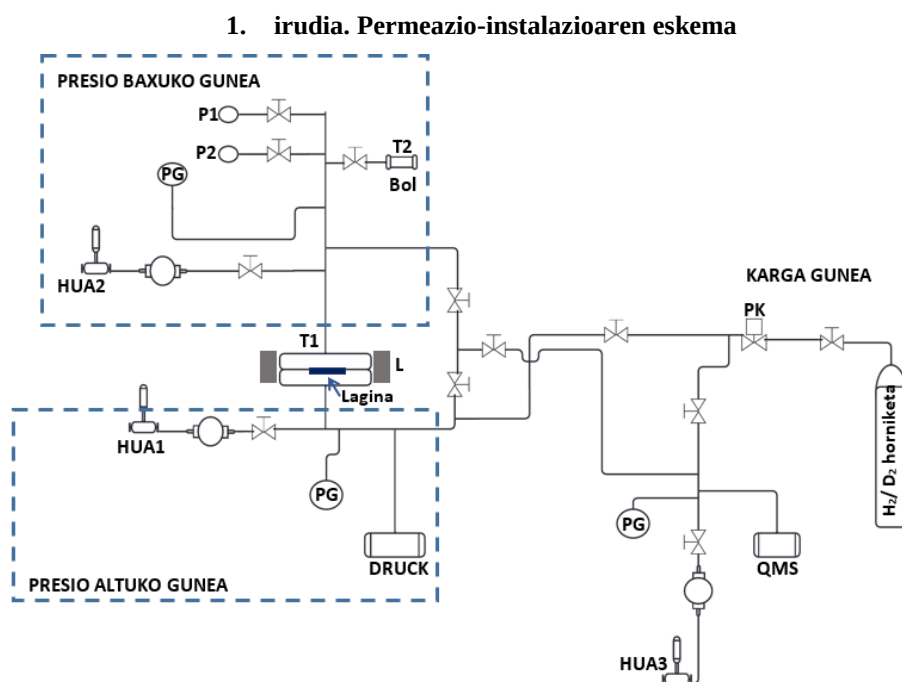
CIEMATeko laborategiak bidali ditu, eta 1200-aleko lixaz leundu dira, erregimen difusiboa erraztuko duen gainazal leun eta homogeneo bat lortzen saiatuz.

EUROFER laginari dagokionez, Atmosat enpresan du jatorria eta ATM1615 lotetik (20-052) atera zen. 25 x 25 mm<sup>2</sup>, 1,25 mm-ko lodiera eta 6,0125 g-ko masa duen lagin karratua da. Entseguak 250 °C eta 550 °C artean egin ziren, 50000 Pa eta 150000 Pa arteko gas-kargekin.

316SS laginari dagokionez, bestalde, Goodfellow hornitzailearen LS43226 AISI 316 material zehatza da, FE240320/13 kodea duena. Kasu honetan, lagina zirkularra izan da, 20 mm-ko diametroa, 0,85 mm-ko lodiera eta 2,1435 g-ko pisua izanik, eta entseguak EUROFER laginaren tenperatura eta presio tarte berdinekin egin dira.

### 3.2. Metodologia

Erabilitako permeazio-teknika eta -instalazioa (ikusi 1. irudia) aurreko azterlanetan azaldu da (Urrestizala et al., 2024); beraz, labur-labur azalduko da lan honetan. Hasteko, lagina permeazio-zutabe baten barruan jartzen da eta zutabe hori, labe baten barruan (L) eta aldi berean, bi bolumenen artean kokatuta egongo da, huts ultra altuko baldintzetan (<10<sup>-6</sup> Pa). Muntaketa eta zigilatzea egokiak direnean, laginaren beheko aldean (presio altuko gunean) H edo D presio konstantean kargatzen dira eta goiko aldean (presio baxuko gunean) presio-gehikuntza erregistratzen da. Presio-igoera eremu batetik bestera lagina zeharkatu duten gas-molen ondorio zuzena izango da. Beraz, erregistratutako seinalea  $p(t)=at+b$  zuzenaren ekuazioa doitu,  $J$  (permeazio-fluxua: lagina zeharkatu duten hidrogeno molak, denbora eta azalera unitateko) eta  $\Phi$  balioak lor daitezke.



Bi laginetan erabilitako metodologia honako hau izan da:

1. Laginaren X izpien difrakzio analisia. Saiakuntzen aurretik eta ondoren egin da, mikroegituraren aldaketa nabarmenik egon ez dela egiaztatzeko.
2. Laginaren eta zutabeen azken garbiketa. Ultrasoinuen bainua erabiliz egiten da: lehenik, azetonan, hondakin organikoak kentzeko, eta, ondoren, alkohol isopropilikoan, beste edozein ezpurutasun kentzeko.
3. Lagina zutabeen muntatzea eta instalazioa prestatzea. Laginaren alde banatan urrezko bi juntura toriko jartzen dira zutabea itxi aurretik, eta zutabea instalazioarekin lotzeari dagokionez, kobrezko juntura estandarrak erabiltzen dira. Muntaketa ez da baliozkotzat joko huts-maila gutxienez 10<sup>-5</sup> Pa-era iristen ez bada 2 h igarotzean.

4. Entseguak protokolo berdinarekin egitea. Tenperaturekin goranzko ordena jarraitu da, beroaren eraginpean emandako denbora minimizatzen saiatuz. Ez dira egun berean H eta P entseguak burutu, emaitzak ez kutsatzeagatik. Gainera, tenperatura bakoitzerako huts-seinale bat ere erregistratu da, instalazioaren desortzioa permeazio-entseguekiko mespretxagarria dela ziurtatzeko.
5. Datuen prozesaketa. Garrantzitsua da seinalea pertsona berak doitzea, doikuntzarako seinalearen sekzioaren hautaketak nolabaiteko subjektibotasuna baitarama inplizituki.
6. Entseguen iragaztea. Azterlan honen eta aurrekoen arteko alderik garrantzitsuenak da pausu hau. Bi isotopoen emaitzak erlazionatu aurretik, azterketarako benetan baliagarriak diren entseguak hautatu dira, gutxienez ezarritako 4 baldintzak betetzen dituztenak:
  - a) Seinalearen kalitatea.  $p(t)$  ekuazioarekin behar bezala doitu ezin diren entseguak baztertu dira hurrengo arrazoiengatik: zarata elektronik handiegia, bat-bateko aldaketa kurbaren maldan, eremu geldikor laburregia edo seinale oszilatzailea.
  - b) Huts-entseguarekin alderatzea. Huts-entseguaren seinalea permeazio-entsegu batean bertan baino % 5a edo gehiago igotzen bada tenperatura berdinean, entsegu hori baztertu egin da. Instalazioaren desortzioaren seinaleak entseguen seinalea distorsionatu dezakeela uste da kasu hauetan.
  - c) Entsegu-bikoteak. Entsegu “osagarri” baliodun bat (tenperatura eta karga bera, baina beste isotopoarekin egin) duten entseguak bakarrik hautatu dira. Bakarrik geratu direnak baztertu dira, nahiz eta haien baldintzak onak izan, erlazioa puntuz-puntu egitea nahi baita.
  - d) Erregimen nagusiki difusiboa. Gainazaleko fenomenoak benetan baztergarriak direla eta prozesua nagusiki difusiboa dela egiaztatzeko, permeazio-fluxuak presioekin erlazionatzean ateratzen den potentzia kalkulatu da eta 0,6 baino potentzia txikiagoa duten entseguak bakarrik hautatu dira. Literaturan ez dago adostasunik muga-balio honi buruz, eta batzuetan ez da ezta egiaztatzen. Dena den, ikerketa honetan erregimena emaitzen zehaztasunean duen eragina agerikoa dela frogatu da; horregatik muga nahiko murriztailea aukeratu da.
7. Entsegu-bikoteen permeabilitate balioak banan-banan erlazionatzea. Arrhenius ekuazioak erlazionatu ordez, balioak puntuz puntu zatitzea erabaki da.

### 3.3. Emaitzak

#### 3.3.1. EUROFER

EUROFER laginaren emaitzak 1. taulan jaso dira, non saiakuntzen kronologia nomenklaturaren arabera ikus daiteke. Kasu bakoitzean, lortutako fluxuaren eta permeabilitatearen balioak eta azaldutako iragazpena (a-d) bildu dira.

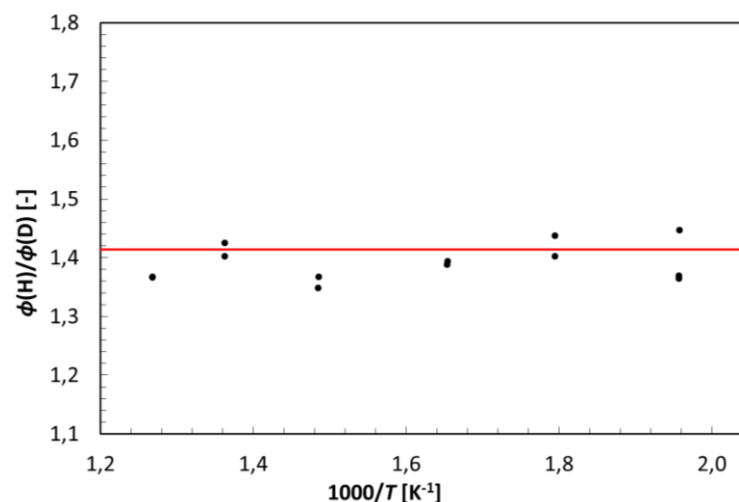
**1. taula EUROFER laginarekin egindako permeazio-entseguen emaitzak eta iragaztea**

| Entsegua   | Gasa | $P_{\text{carga}}$<br>[Pa] | $T$<br>[°C] | $1000T$<br>[K <sup>-1</sup> ] | $\Phi$<br>[mol m <sup>-2</sup> Pa <sup>-1/2</sup> s <sup>-1</sup> ] | $J$<br>[mol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ] | (a) | (b) | (c)      | (d) | Auk. |
|------------|------|----------------------------|-------------|-------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----|-----|----------|-----|------|
| EUROFER_02 | H    | 149977                     | 251         | 1,908                         | 9,64E-12                                                            | 2,99E-06                                      | BAI | BAI | BAI (7)  | BAI | BAI  |
| EUROFER_03 | H    | 100335                     | 251         | 1,907                         | 9,37E-12                                                            | 2,37E-06                                      | BAI | BAI | BAI (06) | BAI | BAI  |
| EUROFER_04 | H    | 50362                      | 251         | 1,907                         | 9,62E-12                                                            | 1,72E-06                                      | BAI | BAI | BAI (05) | BAI | BAI  |
| EUROFER_12 | H    | 50330                      | 300         | 1,745                         | 2,09E-11                                                            | 3,75E-06                                      | BAI | BAI | BAI (09) | BAI | BAI  |
| EUROFER_13 | H    | 100027                     | 300         | 1,745                         | -                                                                   | -                                             | -   | -   | -        | -   | EZ   |
| EUROFER_14 | H    | 149513                     | 300         | 1,745                         | 2,22E-11                                                            | 6,88E-06                                      | BAI | BAI | BAI (11) | BAI | BAI  |
| EUROFER_16 | H    | 50273                      | 350         | 1,604                         | 4,02E-11                                                            | 7,21E-06                                      | BAI | BAI | BAI (19) | BAI | BAI  |
| EUROFER_17 | H    | 99702                      | 350         | 1,605                         | 4,14E-11                                                            | 1,05E-05                                      | BAI | BAI | EZ       | -   | EZ   |
| EUROFER_18 | H    | 148740                     | 350         | 1,605                         | 4,31E-11                                                            | 1,33E-05                                      | BAI | BAI | BAI (20) | BAI | BAI  |

|            |   |        |     |       |          |          |     |     |          |     |     |
|------------|---|--------|-----|-------|----------|----------|-----|-----|----------|-----|-----|
| EUROFER_24 | H | 99217  | 424 | 1,435 | 9,25E-11 | 2,33E-05 | BAI | BAI | BAI (22) | BAI | BAI |
| EUROFER_25 | H | 147469 | 424 | 1,435 | 9,39E-11 | 2,89E-05 | BAI | BAI | BAI (21) | BAI | BAI |
| EUROFER_27 | H | 50271  | 489 | 1,312 | 1,48E-10 | 2,65E-05 | BAI | BAI | EZ       | -   | EZ  |
| EUROFER_28 | H | 98694  | 489 | 1,313 | 1,59E-10 | 3,98E-05 | BAI | BAI | BAI (30) | BAI | BAI |
| EUROFER_29 | H | 145937 | 489 | 1,313 | 1,59E-10 | 4,87E-05 | BAI | BAI | BAI (31) | BAI | BAI |
| EUROFER_35 | H | 143292 | 548 | 1,218 | 2,39E-10 | 7,25E-05 | BAI | BAI | BAI (33) | BAI | BAI |
| EUROFER_36 | H | 97904  | 548 | 1,219 | 2,36E-10 | 5,90E-05 | BAI | BAI | BAI (32) | BAI | BAI |
| EUROFER_05 | D | 50162  | 251 | 1,907 | 6,65E-12 | 1,19E-06 | BAI | BAI | BAI (04) | BAI | BAI |
| EUROFER_06 | D | 100098 | 251 | 1,907 | 6,84E-12 | 1,73E-06 | BAI | BAI | BAI (03) | BAI | BAI |
| EUROFER_07 | D | 149266 | 251 | 1,907 | 7,06E-12 | 2,18E-06 | BAI | BAI | BAI (02) | BAI | BAI |
| EUROFER_09 | D | 50315  | 300 | 1,746 | 1,45E-11 | 2,61E-06 | BAI | BAI | BAI (12) | BAI | BAI |
| EUROFER_10 | D | 99871  | 300 | 1,746 | 1,48E-11 | 3,75E-06 | BAI | BAI | EZ       | -   | EZ  |
| EUROFER_11 | D | 148688 | 300 | 1,746 | 1,59E-11 | 4,89E-06 | BAI | BAI | BAI (14) | BAI | BAI |
| EUROFER_19 | D | 50304  | 350 | 1,604 | 2,89E-11 | 5,19E-06 | BAI | BAI | BAI (16) | BAI | BAI |
| EUROFER_20 | D | 148681 | 350 | 1,604 | 3,09E-11 | 9,52E-06 | BAI | BAI | BAI (18) | BAI | BAI |
| EUROFER_21 | D | 147535 | 423 | 1,436 | 6,87E-11 | 2,11E-05 | BAI | BAI | BAI (25) | BAI | BAI |
| EUROFER_22 | D | 98816  | 424 | 1,434 | 6,86E-11 | 1,73E-05 | BAI | BAI | BAI (24) | BAI | BAI |
| EUROFER_30 | D | 98372  | 488 | 1,313 | 1,11E-10 | 2,79E-05 | BAI | BAI | BAI (30) | BAI | BAI |
| EUROFER_31 | D | 144820 | 488 | 1,313 | 1,14E-10 | 3,46E-05 | BAI | BAI | BAI (29) | BAI | BAI |
| EUROFER_32 | D | 97550  | 548 | 1,218 | 1,72E-10 | 4,30E-05 | BAI | BAI | BAI (36) | BAI | BAI |
| EUROFER_33 | D | 141634 | 547 | 1,219 | 1,75E-10 | 5,27E-05 | BAI | BAI | BAI (25) | BAI | BAI |

2. irudian, aukeratutako entsegu-bikoteen ratioa irudikatu da, erlazio klasikoarekin batera, (gorriz).

2. irudia. EUROFER-ekin hautatutako entsegu bikoteen permeabilitatearen erlazio isotopikoak



Lortutako emaitzak teoria klasikoarekin bat datoz, bai balioari dagokionez ( $\sqrt{2}$ ), bai tenperaturarekiko independentziari dagokionez; batez besteko desbideratzea % 2,4-koa eta desbideratze maximoa % 4,6-koa izanik.

### 3.3.2. SS316

2. taulan, SS316 laginarekin egindako saiakuntzei dagokien informazioa adierazi da.

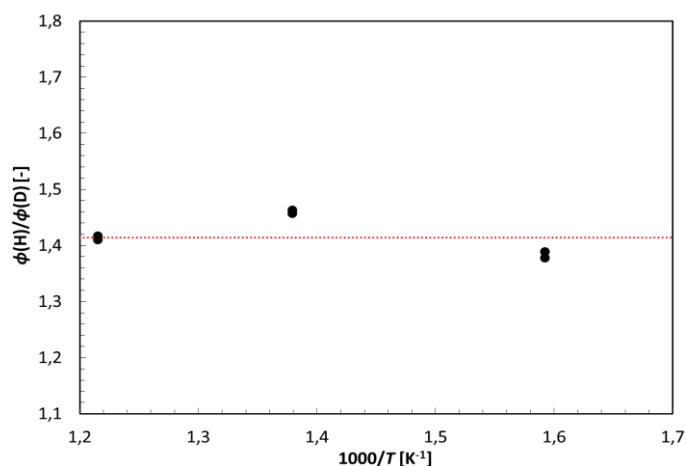
2. taula. SS316 laginarekin egindako permeazio-saiakuntzen emaitzak eta iragazketa

| Entsegua | Gasa | $P_{\text{carga}}$<br>[Pa] | $T$<br>[°C] | $1000/T$<br>[K <sup>-1</sup> ] | $\Phi$<br>[mol m <sup>-1</sup> Pa <sup>-1/2</sup> s <sup>-1</sup> ] | $J$<br>[mol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ] | (a) | (b) | (c) | (d) | Auk. |
|----------|------|----------------------------|-------------|--------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|------|
| SS316_02 | H    | 150000                     | 250         | 1,911                          | -                                                                   | -                                             | EZ  | -   | -   | -   | EZ   |
| SS316_04 | H    | 150000                     | 300         | 1,745                          | -                                                                   | -                                             | EZ  | -   | -   | -   | EZ   |
| SS316_05 | H    | 150000                     | 350         | 1,605                          | -                                                                   | -                                             | EZ  | -   | -   | -   | EZ   |
| SS316_08 | H    | 150000                     | 400         | 1,485                          | -                                                                   | -                                             | EZ  | -   | -   | -   | EZ   |
| SS316_09 | H    | 149827                     | 402         | 1,481                          | 2,59E-12                                                            | 1,23E-06                                      | BAI | EZ  | -   | -   | EZ   |
| SS316_10 | H    | 50627                      | 402         | 1,481                          | 2,46E-12                                                            | 6,74E-07                                      | BAI | EZ  | -   | -   | EZ   |

|          |   |        |     |       |          |          |     |     |          |     |     |
|----------|---|--------|-----|-------|----------|----------|-----|-----|----------|-----|-----|
| SS316_16 | H | 50813  | 475 | 1,337 | 9,40E-12 | 2,58E-06 | BAI | BAI | BAI (14) | EZ  | EZ  |
| SS316_17 | H | 150264 | 475 | 1,337 | 1,09E-11 | 5,14E-06 | BAI | BAI | BAI (15) | EZ  | EZ  |
| SS316_19 | H | 50733  | 503 | 1,289 | 1,48E-11 | 4,07E-06 | BAI | BAI | EZ       | -   | EZ  |
| SS316_20 | H | 50469  | 550 | 1,215 | 3,49E-11 | 9,56E-06 | BAI | BAI | BAI (23) | BAI | BAI |
| SS316_21 | H | 149096 | 550 | 1,215 | 3,63E-11 | 1,71E-05 | BAI | BAI | BAI (25) | BAI | BAI |
| SS316_31 | H | 100945 | 355 | 1,592 | 1,55E-12 | 5,99E-07 | BAI | BAI | BAI (29) | BAI | BAI |
| SS316_32 | H | 149096 | 355 | 1,592 | 1,55E-12 | 7,32E-07 | BAI | BAI | BAI (30) | BAI | BAI |
| SS316_35 | H | 70908  | 452 | 1,379 | 7,99E-12 | 2,60E-06 | BAI | BAI | BAI (33) | BAI | BAI |
| SS316_36 | H | 150452 | 452 | 1,379 | 8,54E-12 | 4,04E-06 | BAI | BAI | BAI (34) | BAI | BAI |
| SS316_11 | D | 50814  | 403 | 1,479 | 1,97E-12 | 5,41E-07 | BAI | EZ  | -        | -   | EZ  |
| SS316_12 | D | 150412 | 402 | 1,480 | 2,13E-12 | 1,01E-06 | BAI | EZ  | -        | -   | EZ  |
| SS316_14 | D | 50739  | 475 | 1,336 | 6,09E-12 | 1,67E-06 | BAI | BAI | BAI (16) | EZ  | EZ  |
| SS316_15 | D | 149763 | 475 | 1,337 | 7,07E-12 | 3,34E-06 | BAI | BAI | BAI (17) | EZ  | EZ  |
| SS316_23 | D | 50759  | 550 | 1,215 | 2,46E-11 | 6,49E-06 | BAI | BAI | BAI (20) | BAI | BAI |
| SS316_24 | D | 145404 | 550 | 1,215 | -        | -        | EZ  | -   | -        | -   | EZ  |
| SS316_25 | D | 149181 | 550 | 1,215 | 2,57E-11 | 1,21E-05 | BAI | BAI | BAI (21) | BAI | BAI |
| SS316_27 | D | 50759  | 355 | 1,592 | 1,12E-12 | 3,08E-07 | BAI | BAI | EZ       | -   | EZ  |
| SS316_28 | D | 150392 | 355 | 1,592 | -        | -        | -   | -   | -        | -   | EZ  |
| SS316_29 | D | 100949 | 355 | 1,592 | 1,11E-12 | 4,31E-07 | BAI | BAI | BAI (31) | BAI | BAI |
| SS316_30 | D | 150710 | 355 | 1,592 | 1,12E-12 | 5,31E-07 | BAI | BAI | BAI (32) | BAI | BAI |
| SS316_33 | D | 70610  | 452 | 1,379 | 5,48E-12 | 1,78E-06 | BAI | BAI | BAI (35) | BAI | BAI |
| SS316_34 | D | 150499 | 452 | 1,379 | 5,84E-12 | 2,76E-06 | BAI | BAI | BAI (36) | BAI | BAI |

Kasu honetan, gehiago izan dira iragazketa gainditu ez duten entseguak, batez ere lehenengoak laburregiak egin zirelako, eta horrek eragin handia daukalako lortutako emaitzen kalitatean. 3. irudian, aukeratutako 6 entsegu-bikoteen erlazioa ikusten da. Berriz ere hautatutako saiakuntzek teoria klasikoarekin bat datorren erlazio isotopikoa betetzen dutela ondorioztatzen da, % 1,9ko batez besteko desbideratzearekin eta % 3,5eko desbideratze maximoarekin.

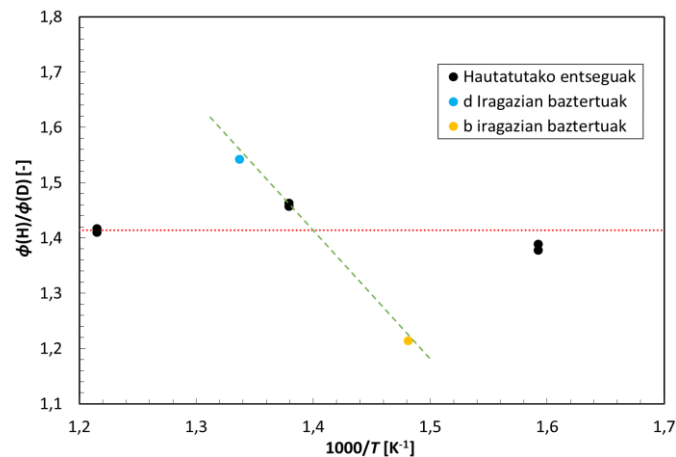
### 3. irudia. SS316-ekin hautatutako entsegu bikoteen permeabilitatearen erlazio isotopikoak



Baina, gainera, SS316 laginaren iragazketak, saiakuntzen emaitzak bahetzeko benetako beharra egiaztatzen du, zehaztasun falta oro minimizatzeko; izan ere, efektu isotopikoaren azterketan eragin zuzena du. Horretarako, honelako frogaketa egin da, bi iragazkik ezabatutako bi entsegu-bikote hartuz: alde batetik, SS316\_14/SS316\_16 entseguak, fluxuak eta presioak erlazionatzean 475 °C-ko saiakuntzekin ateratzen den potentziak ezarritako muga gainditu egiten zuenak (d iragazkia). Bestetik, SS316\_09/ SS316\_12 entseguak, erregistratutako entsegu-denborarako, instalazioaren huts-seinaletik ez baitziren nahiko bereizten (b iragazkia).

Baztertutako bi entsegu-bikoteak irudikatzean (4. irudia), alde aurretiko zehaztasun-faltak eragin zuzena duela egiaztatu da efektu isotopikoa zehaztean, ratioek balio klasikoaren % 15 inguruko desbiderapena baitituzte.

#### 4. irudia. Baztertutako eta hautatutako SS316 laginaren permeabilitatearen erlazio isotopikoak



Baina, balio okerraz beraz gain, emaitzak gaizki interpretatzeak tenperaturarekiko mendekotasun baten interpretazio faltsua ekar zezakeen, hori baitirudi 4. irudiko erdiko puntuak islatzen dutena. Hortaz, frogapen honi esker, ez-zehaztasun guztiak zaintzearen beharra berretsi da.

#### 4. Ikerketaren ondorioak

Efektu isotopikoa fenomeno polemikoa izan da urteetan zehar; izan ere, isotopoen masa atomikoekin erlazionatzen duen teoria klasikoa esperimentalki baliozkotzen saiatzean, eztabaida ugari sortu dira. Haren azterketa hainbat ikuspuntuetatik bideratu da, eredu alternatiboak garatu dira eta azterketa esperimental ugari sortu dira testuinguru horretan, emaitza-espekto zabala sortuz, baita material berberetarako ere.

Azterketa honen atzetik egon diren ikerketa-lanetan zehar, prozesu esperimentaletan esku hartzen duten faktoreek ziurgabetasun eta zehaztasun-falta ugari ekar ditzaketela ikusi da, eta horiek eragin zuzena dutela isotopo bakoitzaren parametroak lortzeko orduan. Beraz, aurretiazko prozesu hori ahalik eta zehaztasun eta gardentasun handienarekin egiten ez bada, erroreak handiagotu egiten dira isotopo biren parametroak erlazionatzean ondoren.

Horregatik, Eurofer-97 eta AISI 316 materialen bi lagin aztertu dira, permeabilitatea soilik ikertuz, permeazio-teknikan lor daitekeen parametrerik egiazkoena baita. Entseguak egin ondoren, hauek bahetu egin dira soilik fidagarritasun nahikoa duten entseguak hautatzeko, bai kurbaren kalitateari dagokionez, bai huts-seinale batekin alderatzeari dagokionez, baita erregimen difusiboa egiaztatzeari dagokionez ere. Horren ondoren, presio eta tenperatura berberekin egindako entsegu-bikoteak erlazionatu dira, joera faltsutuak saihesteko. Lortutako emaitzak  $\sqrt{2}$  balio teorikotik erabat hurbil daude, eta, gainera, tenperaturarekiko independenteak dira, haien ratioa horizontala mantenduz, teoria klasikoak dioen bezala.

#### 5. Etorkizunerako planteatutako norabidea

Ikerketa honi esker, Eurofer-97 eta AISI 316 altzairuetan protioaren eta deuterioaren permeabilitateek erlazio klasikoa betetzen dutela baieztatu daiteke aztertutako tenperatura-tartean.

Hala ere, ez da antzeko azterketarik aurkitu literaturan; beraz, interesgarria izango litzateke prozesu xehea beste material batekin errepikatzea, efektu isotopikoa materialarekiko independentea den jakiteko.

Era berean, baliagarria izango litzateke egiaztatzea teoria berdinean betetzen den gainerako bi garraio-parametroetan eta, horretarako, beharrezkoa litzateke prozesu esperimentalik egokiena hautatzea. Halaber, ondorioak estrapolagarriak izatea espero den arren, garrantzitsua litzateke erlazioa T-rako enpirikoki ere frogatzea. Prozesu hau guztia beste instalazio eta laborategi batzuetan ere gauzatu liteke, kasu bakoitzean errore-kausa potentzialak detektatuz eta minimizatzeko modua bilatuz.



## 6. Erreferentziak

- Ebisuzaki, Y., Kass W. J., eta O'Keeffe, M. (1967). Quantum mass effects in diffusion, *The Philosophical Magazine: A Journal of Theoretical Experimental and Applied Physics*, vol. 15, (137), 1071–1074, <https://doi.org/10.1080/14786436708221655>.
- Esteban, G. A., Perujo A., Douglas K. eta Sedano, L. A. (2000) Isotope Effects in Hydrogen Transport Parameters in the Martensitic Steel Optifer-IVb, *European Comission Report En Eur 19021*, 38, [https://doi.org/10.1016/s0022-3115\(00\)00188-4](https://doi.org/10.1016/s0022-3115(00)00188-4)
- Franklin, W. (1969). Phonon Theory of Solid-State Diffusion Including Anharmonic Effects, *Phys. Rev.*, 180, (3), 682–694, <https://doi.org/10.1103/PhysRev.180.682>
- Katz, L., Guinan M., eta Borg, R. J. (1971) Diffusion of H<sub>2</sub>, D<sub>2</sub>, and T<sub>2</sub> in Single-Crystal Ni and Cu, *Phys. Rev. B*, 4, (2), 330–341, <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.4.330>
- Le Claire, A. D. (1966). Some comments on the mass effect in diffusion," *Philosophical Magazine* 14, (132), 1271–1284, <https://doi.org/10.1080/14786436608224292>
- Mehrer, H. (2007). *Diffusion in Solids: Fundamentals, Methods, Materials, Diffusion-Controlled Processes*. Springer arg., Berlin
- Urrestizala, M., Azkurreta, J., Alegría N., eta Peñalva, I. (2023). Isotope effect of hydrogen and deuterium permeability and diffusivity in fusion reactor materials. A literature review, *Fusion Eng. Des.*, 194, 113915, <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2023.113915>
- Urrestizala, M., Azkurreta, J., Alegría N., eta Peñalva, I., Malo, M. eta Rapisarda, D. (2024). Experimental study of the isotope effect of the permeability in structural steels for fusion reactors: Eurofer and SS316, *Nuclear Materials and Energy*, 38, 101579, <https://doi.org/10.1016/j.nme.2024.101579>
- Wert, C. and Zener, C. (1949). Interstitial Atomic Diffusion Coefficients, *Phys. Rev.*, 76, (8), 1169–1175, <https://doi.org/10.1103/PhysRev.76.1169>

## 7. Eskerrak eta oharrak

Aurkeztutako lana doktore-tesi baten emaitzei dagokio. Fusio Materialen Laborategian burututako neurketak Europar Batasunak Euratom Programaren bidez finantzatutako Ikerketa eta Prestakuntzarako EUROfusion proiektuen esparruan daude (diru-laguntzetarako 101052200-EUROfusion hitzarmena). Hala ere, adierazitako iritziak eta ikuspuntuak egileenak baino ez dira, eta ez dituzte Europar Batasunarenak edo Europako Batzordearenak islatzen. Ez Europar Batasuna ez Europako Batzordea ezin dira horien erantzuletzat hartu.

*This work has been carried out within the framework of the EUROfusion Consortium, funded by the European Union via the Euratom Research and Training Programme (Grant Agreement No 101052200 — EUROfusion). Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Commission. Neither the European Union nor the European Commission can be held responsible for them.*