



IKER  
GAZTE  
NAZIOARTEKO  
IKERKETA EUSKARAZ

## IV. IKERGAZTE NAZIOARTEKO IKERKETA EUSKARAZ

2021eko ekainaren 9, 10 eta 11a  
Gasteiz, Euskal Herria

ANTOLATZAILEA:  
Udako Euskal Unibertsitatea (UEU)

### INGENIARITZA ETA ARKITEKTURA

**Abiadura handiko entseguak  
egiteko forjaketa-mailu baten  
garapena**

*Julen Agirre, Peio Arrese,  
Nagore Otegi eta Lander Galdos*

193-200 or.

<https://dx.doi.org/10.26876/ikergazte.iv.03.23>



## Abiadura handiko entseguak egiteko forjaketa-mailu baten garapena

Agirre, J., Arrese, P., Otegi, N., Galdos, L.

*Materialak Eraldatzeko Prozesu Aurreratuak ikerketa taldea, Mondragon Unibertsitatea,  
Loramendi 4, 20500 Arrasate, Gipuzkoa  
jagirreb@mondragon.edu*

### **Laburpena**

Mailu bidezko forjaketa prozesua era askotariko propietate mekaniko altuko piezak fabrikatzeko erabiltzen da. Forjaketa prozesu hauek egoki diseinatzeko, geroz eta gehiago erabiltzen dira elementu finitu bidezko simulazio softwareak. Software hauen sarrera-datuak egokiak izatea berebizikoa da simulazioen emaitzak fidagarriak izan daitezen, horien artean materialaren portaera definitzea atal garrantzitsuenetakoa delarik. Zoritxarrez, deformazio abiadura handian materialek duten portaera mekanikoa karakterizatzeko entsegu-makina komertzial oso gutxi daude. Hutsune hori betetzeko garatu den laborategi eskalako forjaketa-mailu berri bat aurkeztzen da artikulu honetan. Makina berri honetan egindako entseguetako emaitzen azterketa egin da, lortutako emaitzak itxaropentsuak izanik.

Hitz gakoak: Mailu-forjaketa, abiadura handiko entseguak, materialen karakterizazioa

### **Abstract**

*Hammer forging is a widely employed manufacturing process to produce parts with excellent mechanical properties. In order to achieve an optimal process design, finite element modelling is broadly utilized in industry and research. It is well known that to obtain accurate simulation results, accurate material characterization have to be performed. Although material behaviour of metals under hammer forging conditions are of great industrial interest, few materials have been tested in such high strain rates due to the lack of laboratory machines for high-speed testing. With the objective of addressing that gap, this paper presents a novel automatic forging simulator comprised of an instrumented forging hammer capable of performing high-speed deformations. In this work, results of high strain rate tests performed on the developed hammer were evaluated obtaining promising conclusions.*

*Keywords: Hammer forging, high-speed testing, material characterization*

## **1. Sarrera eta motibazioa**

Forjaketa prozesua propietate mekaniko altuko piezak lortzeko erabiltzen den fabrikazio prozesu garrantzitsuenetakoa da. Prozesu honetan, geometria sinpleko pieza bat (sekzio zirkular edo errektangeluarrekoa, normalean) plastikoki deformatzen da bi estanpen artean geometria konplexuko pieza lortu arte (Semiatin, 2005). Forjaketa prozesua erakargarria da pieza kopuru handiak fabrikatu behar direnean edota propietate mekaniko oso altuko piezak lortzea nahi denean. Propietate mekaniko altu hauek forjaketa prozesu bidez soilik lortu daitezke kasu askotan (Altan eta Ngaile, 2005). Adibide gisa, Inconel 718 nikel superaleazioaren kasuan, galdaketa bidez fabrikatutako pieza baten giro tenperaturako limite elastikoa 940 MPa den bitartean, forja bidez fabrikatutakoarena 1192 MPa izan daitezke (Trosch et al., 2016).

Forjaketa prozesurako prentsa mota ezberdinak erabili daitezke, gehien erabiltzen direnak prentsa hidrauliko eta mekanikoak eta mailuak direlarik (Dieter et al., 2003). Prentsa hidraulikoetan, pieza deformatzeko indarra zilindro hidrauliko bitartez egiten da eta aurrez aipatutako prentsen artetik motelenak dira,  $10 \text{ s}^{-1}$ -eko deformazio abiadura maximoak lortzeko gaitasunarekin (Semiatin, 2005). Prentsa mekanikoei dagokienez, deformazio indarra lortzen da motor elektriko baten biraketa-higidura mugimendu lineal bihurtuz sistema mekaniko baten bitartez. Prentsa mota hauetan,  $30 \text{ s}^{-1}$ -ko deformazio abiadura maximoak lortu daitezke. Amaitzeko, forjaketa-mailuen kasuan, pieza abiadura handiko talka bidez deformatzen da. Talka-abiadura handiak lortzeko, deformazio estanpak presio handiko zilindro pneumatiko bidez bultzatzen dira normalean. Mailuen kasuan, lortzen diren deformazio abiadurak aurrez aipatutako prentsetan baino askoz handiagoak dira,  $100 \text{ s}^{-1}$  eta  $500 \text{ s}^{-1}$  bitartean kasu

askotan (Bhujangrao et al., 2020; Prasad et al., 2015). Artikulu honetan aurkezten den ikerketa mailu bidezko forjaketan oinarritzen da.

Mailu-forjaketa prozesuen diseinu fasean gaur egun gehien erabiltzen den erreminta elementu finitu bidezko simulazioa da. Simulazio hauek osatzeko, simulazio softwarean sarrera-datu ezberdinak zehaztu behar dira, besteak beste, prentsaren zinematika, piezaren hasierako tenperatura, pieza eta estanpen arteko interakzioa, eta piezaren materialaren portaera (Chen et al., 2018). Jakina da simulazioen emaitzaren zehaztasuna simulaziora sartzen diren sarrera-datuaren arabera dela.

Materialen portaerari dagokionez, sartu beharreko datu bat materialaren erresistentzia da, hau da, materialaren tentsio-deformazio kurba tenperatura eta deformazio abiadura ezberdinetara. Mailu-forjaketan materiala abiadura handian deformatzen da eta jakina da materialaren erresistentzia deformazio abiaduraren arabera aldatzen dela, zenbat eta azkarrago deformatu materiala orduan eta erresistentzia handiagoa izango du materialak. Forjaketa prozesuetako materialen tentsio-deformazio kurbak esperimentalki eskuratzeko egiten den entsegu ohikoena konpresio entsegua da (Semiatin, 2005).

Deformazio abiaduraren eragin handia kontuan hartuta, ezinbestekoa da mailu-forjaketa baldintzetan materialek duten portaera ondo ezagutzea prozesuen diseinu egokia egiteko. Atal honek berebiziko garrantzia duen arren, ikerketa oso gutxi egin dira deformazio abiadura handietan ( $> 100 \text{ s}^{-1}$ ) materialek duten portaera aztertzeko (Bhujangrao et al., 2020). Ikerketa-hutsune honen arrazoi nagusia da abiadura handian materialak karakterizatzeko laborategi-makina komertzial gutxi daudela eskuragarri. Alde batetik, laborategietan materialen karakterizaziorako erabiltzen diren entsegu-makina konbentzionalak abiadura motelean ( $< 10 \text{ s}^{-1}$ ) entseatzeko gai dira soilik eta ezin dira abiadura handiagotako entseguak egiteko erabili. Bestalde, abiadura oso handietako entseguak egiteko “Split Hopkinson Pressure Bar” (SHPB) izeneko makinak erabiltzen dira. Zoritxarrez, makina mota hauekin lortu daitezkeen deformazio abiadurak ( $> 1000 \text{ s}^{-1}$ ) mailu-forjaketa prozesuetan lortzen direnak baino askoz handiagoak dira ( $100 \text{ s}^{-1}$ – $500 \text{ s}^{-1}$ ) eta SHPB-ek zailtasunak aurkezten dituzte deformazio abiadura txikiagoak entseatzeko (Xu et al., 2017).

Mailu-forjaketa baldintzetan materialek duten portaera karakterizatzeko entsegu-makina oso gutxi daudela kontuan hartuta, artikulu honetan entsegu-makina berri bat aurkezten da zeina gai den abiadura altuko konpresio entseguak egiteko Laborategi eskalako entsegu-makina berri hau gai da forjaketa prozesuetan materialek izan ditzaketen askotariko baldintzak errepikatzen. Horretarako, lau atal nagusi ditu: beroketa labea, probeta abiadura baxuan deformatzeko laborategi eskalako prentsa hidraulikoa, probeta abiadura handian deformatzeko forjaketa-mailua eta hozketa-ontzia. Ikerketa hau forjaketa-mailuan oinarritu da, ekarpen zientifiko gehien izateaz gain, konplexutasun eta berezitasun gehiago dituen makinako atala delako.

Artikulu honetan aurkezten den abiadura handiko entsegu-makinaren zailtasun nagusia entseguan zeharreko datuak egoki eskuratzea da, entseguak abiadura handian egiten direlako, hain zuzen. Hori kontuan hartuta, abiadura handiko konpresio entseguetatik lortutako tentsio-deformazio kurbak fidagarriak direla bermatzeko, forjaketa-mailuan egindako konpresio entseguetako emaitzak laborategi-makina komertzial bateko emaitzekin konparatu dira. Forjaketa-mailuan entseguak abiadura handian eta makina komertzialean abiadura txikian egin direnez, emaitzak konparagarriak izateko kobrezko probetak erabili dira. Izan ere, kobreak abiadura baxuan eta altuan duen portaera oso antzekoa da eta asko erabili da industriako forjaketa-mailuak karakterizatzeko (Galdos et al., 2014).

## **2. Ikerketaren helburuak**

Sarreran aipatuta da mailu bidezko forjaketa prozesuetan materialek duten portaera mekanikoa ezagutzea ezinbestekoa dela forjaketa prozesua egoki diseinatu ahal izateko. Zoritxarrez, abiadura handiko deformazioetan materialek duten portaera karakterizatzeko entsegu-makina komertzial oso gutxi daude eskuragarri.

Motibazio edo ikerketa-hutsune hori kontuan hartuta, ikerketa honen helburuak bi dira:

- Alde batetik, mailu-forjaketa baldintzetan materialek duten portaera mekanikoa karakterizatzeko laborategi-makina bat garatzea.
- Bestetik, garatutako laborategi-makinan egindako abiadura handiko konpresio entseguen emaitzen fidagarritasuna aztertzea.

Behin laborategiko forjaketa-mailuan eskuratu daitezkeen emaitzen fidagarritasuna bermatuta, material ezberdinen abiadura handiko portaera aztertzea da etorkizunera begira ezarritako xedea.

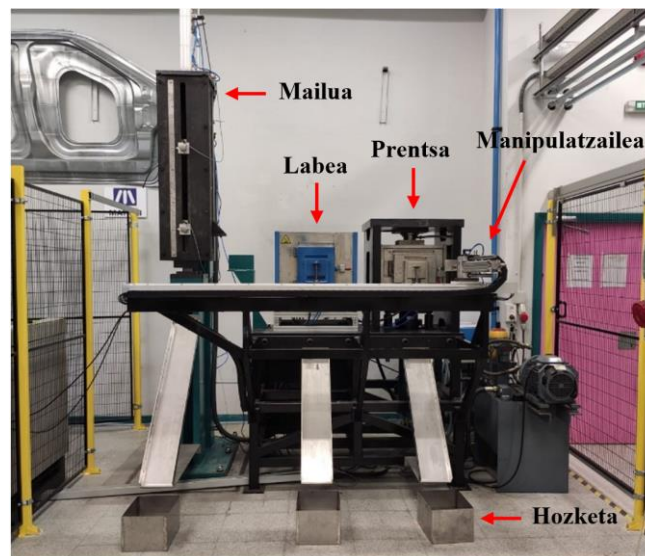
### 3. Ikerketaren muina

Aurreko atalean zehaztutako bi helburuak kontuan hartuta, 3. atala bi azpi-ataletan banatu da.

#### 3.1. Forjaketa-mailuaren garapena

Sarreran esan bezala, laborategiko entsegu-makina komertzial gutxi daude eskuragarri mailu-forjaketa prozesuetako deformazio abiadurak lortzeko gai direnak ( $100 \text{ s}^{-1}$ - $500 \text{ s}^{-1}$ ). Hutsune hori betetzeko, laborategi mailako forjaketa simulagailu esperimental bat garatu eta eraiki da (1. irudia). Forjaketa simulagailu automatiko hau materialen karakterizaziorako entsegu ezberdinak egiteko garatu da, besteak beste, konpresio, ebaketa edota talka entseguak. Lau atalez osatuta dago: beroketa labea (max.  $1350^\circ\text{C}$ ), probeta abiadura baxuan deformatzeko prentsa hidraulikoa, probeta abiadura handian deformatzeko forjaketa-mailua eta hozketa-ontziak. Entseguen errepikakortasuna bermatu eta manipulazio denborak optimizatzeko, entsegu-probetaren manipulazioa automatikoki egiten da entsegu hasieratik amaierara sistema elektro-pneumatiko baten bitartez.

1. irudia. Garatutako forjaketa simulagailua



Artikulu honetan egin den ikerketa forjaketa-mailuan oinarritu da, esan bezala, ekarpen zientifiko gehien izateaz gain konplexutasun eta berezitasun gehiago dituen deformazio-modulua delako. Forjaketa-mailua, funtsean, zilindro pneumatiko batek abiadura handian bertikalki bultzatutako masa bat da. Masa hori  $5 \text{ m/s}$ -ko abiadura maximora jaurti daiteke, probetaren geometriaren arabera,  $300 \text{ s}^{-1}$ -eko deformazio abiadurak lortzeko gaitasunarekin. Konpresio entsegu konbentzionaletan, probetaren entseguan zeharreko deformazio abiadura (1) formula erabilia kalkulatzeko da:

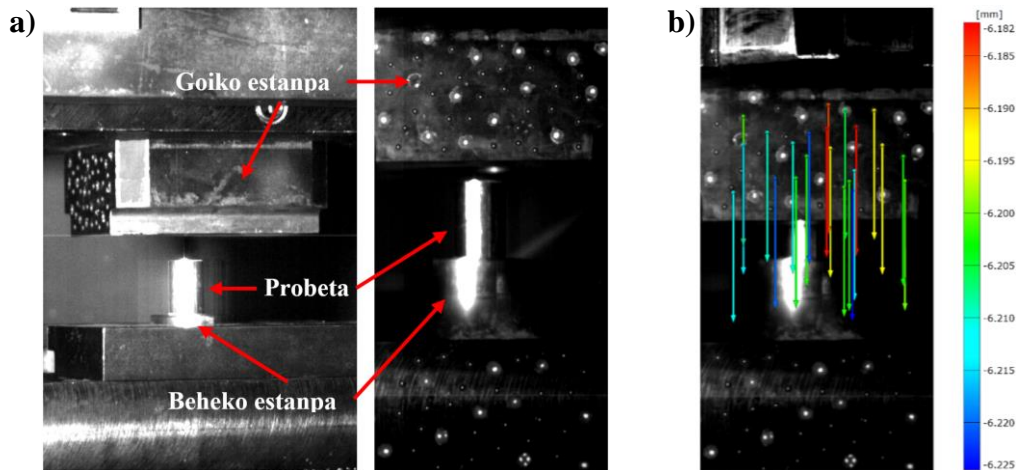
$$\dot{\epsilon} = \frac{v}{h} \quad (1)$$

non  $v$  deformazio-estank momentu oro duen abiadura eta  $h$  probeta zilindrikoak momentu oro duen altuera diren. Lortu daitezkeen deformazio abiadura hori kontuan hartuta, laborategi-

makina honek mailu bidezko forjaketan ematen diren baldintza guztietan materialak duen portaera aztertzea ahalbidetzen du.

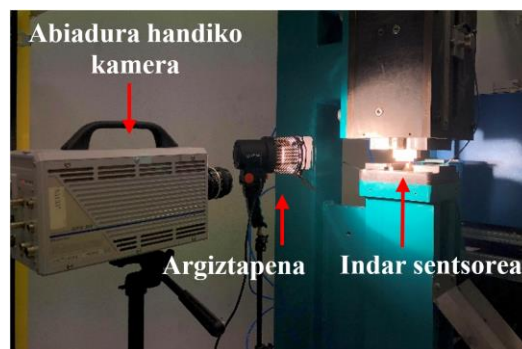
Entseguan zehar datuak eskuratzeko bi teknika erabiltzen dira. Alde batetik, goiko estanparen talka-zinematika neurtzeko Photron Fastcam-APX RS250K abiadura handiko kamera erabiltzen da. Kamera honekin 250.000 fps-erarteko maiztasunarekin grabatu daiteke eta ikerketa honetako entseguetan 15.000 fps-eko grabaketa-maiztasuna erabili da. Grabaketetatik deformazio zinematika eskuratzeko Irudi Korrelazio Digitala (“Digital Image Correlation” (DIC)) teknika erabili da (2. irudia).

## 2. irudia. a) Forjaketa-mailuaren elementuak eta b) DIC teknikaren bidez eskuratutako zinematika



Entsegua zinematikaz gain, talkan zehar probeta deformatzeko egin den indarra ere eskuratzen da. Horretarako, beheko estanparen barruan dagoen Kistler 9106A indar sentsorea erabiltzen da eta ikerketa honetan 300 kHz-ko eskuratzeko-maiztasuna erabili da. 3. irudian ikus daiteke bi eskuratzeko sistemen muntaia.

## 3. irudia. Eskuratzeko sistemen muntaia



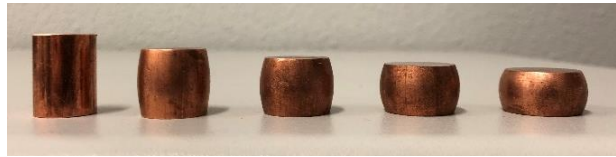
### 3.2. Emaitzen azterketa

Eraiki den forjaketa-mailuan egindako entseguen fidagarritasuna aztertzeko, konpresio entseguak egin dira lau abiadura ezberdinetara eta hotzetan. Artikuluan zehar irakurketa errazteko, mailuko abiadura baxuena (3,3 m/s) 1. kasu moduan izendatuko da, hurrengo abiadura (4,1 m/s) 2. kasua, hurrengoa (4,8 m/s) 3. kasua eta abiadura altuena (5,1 m/s) 4. kasu moduan izendatuko da. Mailuan egindako entseguetako emaitzekin alderatzeko, Instron-4206 laborategi makina unibertsalean abiadura baxuan entsegu mota bera egin da.

Sarrerako atalean esan bezala, material gehienak zenbat eta abiadura handiagoan deformatu orduan eta handiagoa da beraien erresistentzia, hots, orduan eta altuagoa da lortutako tentsio-deformazio kurba. Azterketa honetarako erabili den kobre puruaren kasuan, aldiz, deformazio abiadurak erresistentzian duen eragina ez da hain nabarmena. Hain zuzen ere, horrexegatik erabili izan dira kobre puruzko piezak industriako forjaketa-mailuen karakterizazioarako. Azterketa honetarako erabili diren kobrezko probeta zilindrikoek Ø15x22,5 mm-ko hasierako

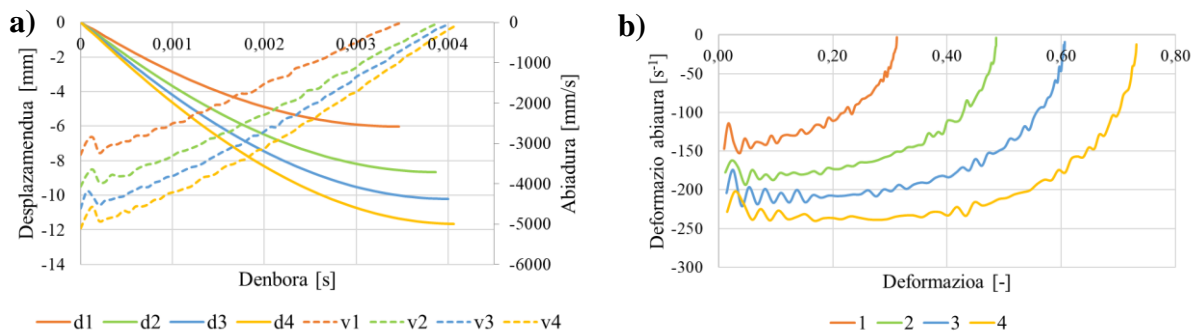
dimentsioa dute. Jarraian datorren 4. irudian probetaren hasierako dimentsioaz gain mailuan lau abiadura ezberdinetara entseaturako probetak ere ikus daitezke. Garbi ikus daiteke mailuaren abiadura zenbat eta altuagoa izan deformazio maila ere orduan eta handiagoa dela.

#### 4. irudia. Mailuan entseaturako kobrezko probetak



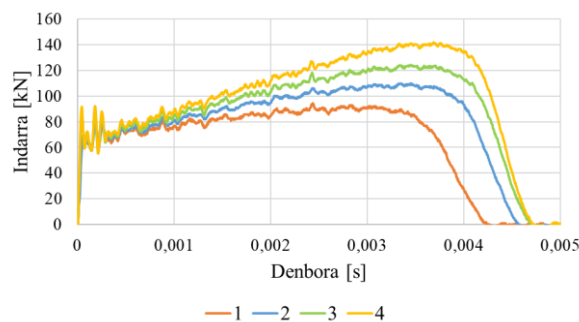
Mailuko entseuetako emaitzekin hasteko, 5. irudian aurkezten dira abiadura handiko kamerarekin eskuratutako desplazamendu eta abiadura kurbak baita (1) formula erabilia kalkulaturako deformazio-abiadural. Ikus daiteke hasierako talkaren ostean goiko estanparen abiadura linealki jaisten dela guztiz gelditu arte, energia zinetikoa probetaren deformazio bihurtuz.

#### 5. irudia. a) Abiadura handiko kamerarekin mailuko entseuetan eskuratutako posizio eta abiadurak eta b) lortutako deformazio abiadurak



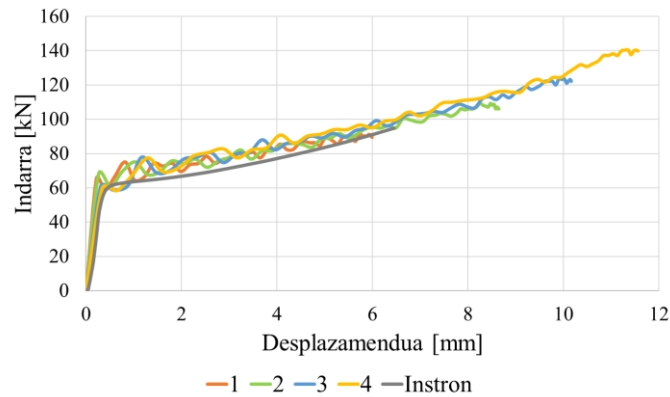
Indarrari dagokionez, ondorengo irudian ikus daitezke mailuko entseuetan indar sensorearekin neurtutako indarrak (6. irudia):

#### 6. irudia. Indar sensorearekin mailuko entseuetan neurtutako indarrak



Abiadura handiko kamerarekin eta indar sensorearekin eskuratutako deformazio datuak konbinatuz, 7. irudian erakusten diren indar-desplazamendu kurbak lortu dira. Irudi honetan gehitu da Instron-4206 laborategi makina unibertsalean egindako entseuaren kurba ere. Ikus daiteke mailuan egindako entseuen eta Instron-ean egindako entseuaren arteko indar diferentzia oso txikia dela.

### 7. irudia. Mailuko entseguetako eta Instron makina unibertsaleko indar-desplazamendu kurbak



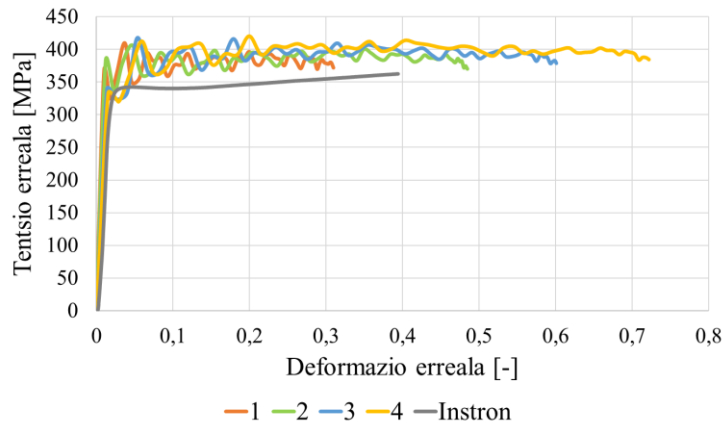
Indar-desplazamendu kurbak ingeniariatza eta arkitektura alorretan materialaren erresistentzia mekanikoa irudikatzeko erabiltzen diren tentsio-deformazio kurba bilakatzeko, (2) eta (3) formulak erabili dira:

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{h}{h_0}\right) \tag{2}$$

$$\sigma = \frac{F}{A} \tag{3}$$

non  $h$  probetak momentu oro duen altuera eta  $h_0$  probetaren hasierako altuera diren, eta  $F$  eta  $A$  entseguan zeharreko indarra eta probetaren momentuko azalera diren, hurrenez hurren. Bi formula horiek erabilia, 8. irudian aurkezten diren tentsio-deformazio kurbak kalkulatu dira. Lortutako emaitzak guztiz logikoak dira. Alde batetik, mailuan egin diren entseguetako kurben arteko tentsio desberdintasun eta dispersioa oso baxuak direlako eta, bestetik, Instron makina unibertsalean abiadura baxuan ( $0,001 \text{ s}^{-1}$ ) egindako entseguren kurba baxuagoa izatea deformazio abiadura ezberdintasunak eragin duelako. Mailuan egindako entseguren kurben artean, deformazio abiadura desberdintasuna txikiaenez (magnitude-ordena bera), tentsio mailan ez da diferentzia handirik nabaritzen. Dena dela, deformazio abiadura handieneko kurbak (4) tentsio maila altuagoa duela nabaritzen da. Instron makinan egindako entseguren kasuan, aldiz, deformazio abiadura azkoz txikiagoa izanenez, tentsio desberdintasuna argi ikusten da.

### 8. irudia. Mailuko entseguetako eta Instron makina unibertsaleko tentsio-deformazio kurbak



#### 4. Ondorioak

Ezarrirako helburuei eta ikerketaren emaitzei erreparatuz, hurrengo ondorioztatu da:

- Mailu bidezko forjaketan materialek duten portaera mekanikoa karakterizatzeko laborategi eskalako forjaketan simulagailu automatiko bat diseinatu eta eraiki da.
- Kobrezko probetekin eginiko entseuetako emaitzak kontuan hartuta, industriako mailu-forjaketan prozesuetan lortzen diren deformazio abiadurak lortu daitezke garatu den makinako entsegu-mailuan.
- Mailuko eta Instron entsegu-makina unibertsaleko tentsio-deformazio kurbei erreparatuz, mailuko entseuetako emaitzak fidagarriak eta errepikakorrak dira.

#### 5. Etorkizunerako planteatzen den norabidea

Artikulu honetan aurkeztu den forjaketan simulagailuaren garapena doktoretza proiektuaren lehen fasea izan da. Behin makina eraikita eta emaitzen fidagarritasun eta errepikakortasuna bermatuta, doktoretzako helburu nagusiei heltzea da hurrengo erronka. Doktoretzaren helburuetako bat, tenperatura altuko mailu bidezko forjaketan nikel superaleazioek duten portaera mekanikoa karakterizatzea da. Horretaz gain, beste helburu bat da forjaketan baldintzek (tenperatura, deformazio abiadura eta deformazio mailak) material aurreratu hauen mikroegituran duten eragina aztertzea. Entseguak tenperatura ezberdinetan egoki egin daitezkeela bermatzea da hurrengo pausua. Dena dela, erresistentzia bidezko labearekin egindako lehenengo frogak emaitza itxaropentsuak eskaini dituzte.

Karakterizazio entsegu horiek guztiak garatutako forjaketan simulagailu berrian egingo dira. Behin entseguak egindakoan, eskuratutako datu esperimentalak forjaketan prozesuen simulazioetako sarrera-datu gisa erabiliko dira, prozesu industrial hauen diseinua ahalik eta zehatzena izan dadin.

Doktoretza proiektu honen ostean, asmoa da eraikitako laborategi-makina askotariko material metalikoen karakterizaziorako erabiltzea, makina honek entseguak baldintza askotan egitea ahalbidetzen baitu, deformazio abiadura handi zein baxuan eta tenperatura hotz zein berotan.

#### 6. Erreferentziak

Altan, T., & Ngaile, G. (2005). *ASM Cold and Hot Forging*. ASM International.

Bhujangrao, T., Froustey, C., Iriondo, E., Veiga, F., Darnis, P., & Mata, F. G. (2020). Review of intermediate strain rate testing devices. *Metals*, 10(7), 1–24. <https://doi.org/10.3390/met10070894>

Chen, S., Qin, Y., Chen, J. G., & Choy, C.-M. (2018). A forging method for reducing process steps in the forming of automotive fasteners. *International Journal of Mechanical Sciences*, 137(December 2017), 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.12.045>

Dieter, G. E., Kuhn, H. a., & Semiatin, S. L. (2003). *Handbook of Workability and Process Design*. *Handbook of Workability and Process Design*. <https://doi.org/10.1361/hwpd2003p232>

Galdos, L., De Argandoña, E. S., Herrero, N., Ongay, M., Adanez, J., & Sanchez, M. (2014). The calibration of high energy-rate impact forging hammers by the copper-column upsetting method and high speed camera measurements. *Key Engineering Materials*, 611–612(1), 173–177. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.611-612.173>

Niu, J., Dai, G., Guo, Y., Sun, Z., Dan, Z., Dong, Y., ... Zhou, L. (2021). Microstructure and mechanical properties of B modified Ti–Fe alloy manufactured by casting, forging and laser melting deposition. *Composites Part B: Engineering*, 216(February), 108854. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.108854>

Prasad, Y. V. R. K., Rao, K. P., & Sasidhara, S. (2015). *Hot Working Guide - A Compendium of Processing Maps*. *Materials Engineering* (2nd ed.). <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-033454->



7.50019-X

Semiatin, S. L. (2005). *ASM Handbook: Metalworking: Bulk Forming* (Vol. 14A).  
<https://doi.org/10.1361/asmhba0003971>

Trosch, T., Ströbner, J., Völkl, R., & Glatzel, U. (2016). Microstructure and mechanical properties of selective laser melted Inconel 718 compared to forging and casting. *Materials Letters*, *164*, 428–431. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2015.10.136>

Xu, Z., Ding, X., Zhang, W., & Huang, F. (2017). A novel method in dynamic shear testing of bulk materials using the traditional SHPB technique. *International Journal of Impact Engineering*, *101*, 90–104. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2016.11.012>

## **7. Eskerrak eta oharrak**

Ikerketa hau Eusko Jaurlaritzak finantziatutako OGForge (Piezas forjadas de prestaciones extremas para el sector Oil & Gas mediante procesos de forja eficientes optimizados por modelos complejos de evolución microestructural) proiektuaren barruan kokatzen da. Egileek eskerrak eman nahi dizkiote ULMA Forja S. Coop. enpresari ere eskaintako laguntza ekonomiko zein teknikoarengatik.