3. GAIA: HUTSEGITE ESTATIKOKO TEORIAK

1. HUTSEGITE HARIKORRA ETA HUTSEGITE HAUSKORRA

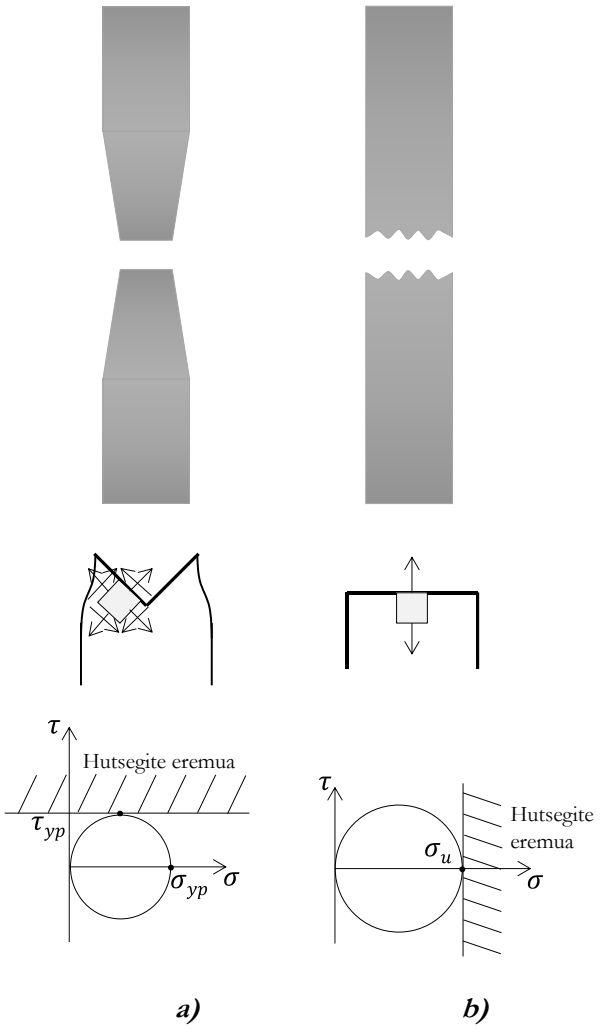
Aurreko gaian azaldu den bezala, hutsegite harikorra materiala isurpenera iristen denean gertatzen da (deformazio iraunkor handia ematen da); hutsegite hauskorra, berriz, materiala haustera edo apurtzera iristen denean gertatzen da (ia deformaziorik gabeko pieza hausten da).

Hutsegite-mekanikari dagokionez, material harikorretan, isurpena tentsio tangentzialen (ebakitzaileen) bidez gertatzen da, Figura 1a irudian ageri den bezala; horregatik, probetak isurpena lortzen denean eta, azkenik, haustean, ardatzarekiko 45º-ko inklinazio-angeluarekin gertatzen da. Hau da, adierazi ohi denaren kontra, hutsegitea ez da gertatzen ardatzaren norabideko tentsio normalak $\sigma = \sigma_{yp}$ -ren balioa lortzen duelako, baizik eta ardatzarekiko 45º-ko norabideko tentsio ebakitzaileak $\tau = \tau_{yp}$ -ren balioa lortzen duelako. Une horretan, 45º-ko tentsio ebakitzaile hori hain da handia, materiala ez dela gai bere baitan jasateko. Hala, plano kristalinoen arteko irristatzea gertatzen da, eta deformazio handia eta iraunkorra eragiten du norabide horretan. Fenomeno horri isurpena esaten zaio. Hala ere, 1a irudiko Mohr-en zirkuluan ikusten denez, trakzio-saiakuntzan (tentsio-egoera uniaxiala), aldi berean $\tau = \tau_{yp}$ gertatzen dira, eta, beraz, eskuarki esaten da hutsegitea gertatzen denean, $\sigma = \sigma_{yp}$, nahiz eta kontzeptualki baieztapen hori okerra izan.

Bestalde, material hauskorretan, ardatzaren norabideko tentsio normala $\sigma = \sigma_u$ denean haustura gertatzen da Une horretan, materiala ez da gai tentsio normal horri aurre egiteko, eta pitzadura txiki bat sortzen da. Pitzadura hori tentsio-kontzentratzaile bat bihurtzen da, pitzaduraren ertzean tentsio-maila igotzen du eta pitzadura ia bat-batean hedatzen da ardatzarekiko norabide perpendikularrean. Hala, probetaren sekzioa erditik apurtzen da,

Dokumentuko errekurtso grafiko eta irudi denak egileenak dira, askeak dira edo/eta baimenduta erabili dira.

inolako inklinaziorik gabe, bat-batean, 1b irudian ikusten den bezala.



1. irudia. Hutsegite motak: a) hutsegite harikorra b) hutsegite hauskorra. Egileen irudia.

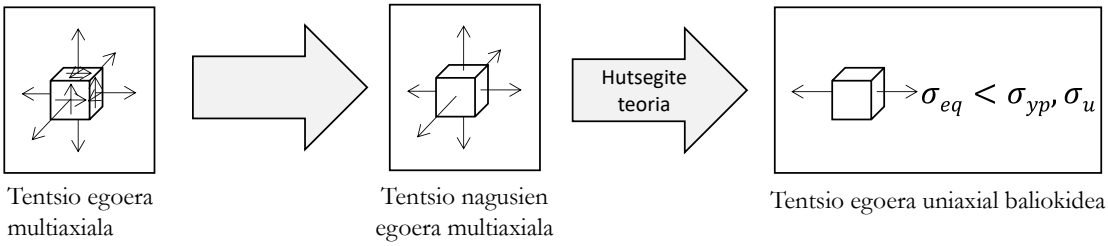
2. HUTSEGITE ESTATIKOEN TEORIAK

Trakzio-saiakuntzan bezala, ardatz bakarreko tentsio-egoeran dagoen puntu baten hutsegitea zehaztea erraza da: materiala harikorra bada, hutsegitea gertatzen da $\sigma = \sigma_{yp}$ (egia esan, $\tau = \tau_{yp}$); materiala hauskorra bada, hutsegitea gertatzen da $\sigma = \sigma_u$. Gogoan izan behar da, halaber, tentsio-kontzentrazio bat baldin badago, materiala harikorra baldin bada σ_{nom} tentsio nominala, σ_{yp}-rekin alderatu behar dela; materiala hauskorra bada ordea, σ_{max} tentsio maximoa σ_u-rekin konparatu behar da.

Hala ere, pieza baten puntu bat tentsio-egoera multiaxial batean dagoenean (biaxiala edo, bakanka, triaxiala), ez da hain berehalakoa zehaztea hutsegitea gertatuko dela. Egokiena

litzateke tentsio multiaxialetarako saiakuntza bat izatea, tentsio uniaxialetarako erabiltzen den trakzio-saiakuntzaren antzekoa, baina hori ez da bideragarria praktikan, tentsio-egoeren konbinazio ugari ($\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \tau_{xy}, \tau_{\tau xz}, \tau_{yz}$) probatu beharko liratekeelako. Halaber, ez dago justifikatuta piezaren saiakuntzak egitea, haren funtzionamendu-bizitzan izango dituen karga handiei eraginez, elementu kritikoak direnean edo tirada handietan fabrikatu behar direnean izan ezik. Hala, analistak trakzio-saiakuntzatik lortutako materialaren σ_{yp} eta σ_u balioak bakarrik ezagutu ohi ditu. Balio horiek bakarrik ezagututa, analistak zehaztu behar du hutsegiterik emango den tentsio-egoera multiaxiala duen piezaren edozein puntutan. Horretarako, zenbait hutsegite-teoria garatu dira.

Hutsegite-teoriak bi urratsetan oinarritzen dira. Lehenik, aztergai den puntuaren jatorrizko egoera multiaxialeko ($\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \tau_{xy}, \tau_{\tau xz}, \tau_{yz}$) tentsio nagusiak ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) lortzen dira. Bigarrenik, hutsegite-teorien bidez, tentsio nagusien tentsio-egoera horretatik egoera baliokide uniaxial batera pasatzen da (σ_{eq}). σ_{eq} balio hori σ_{yp}-rekin (material harikorra) edo σ_u-rekin (material hauskorraren kasuan) alderatuz hutsegitea gertatzen den ala ez zehazteko prozeduraren eskema 2 irudian erakusten du.



2. irudia. Hutsegite estatikoaren teorien prozedura. Egileen irudia.

Hutsegite-teoria batzuk hobeto egokitzen dira material harikorretara, beste batzuk hauskorretara, beste batzuk material ekierresistenteetara,… Ondoren, hutsegite harikor eta hauskorretarako erabilienak azaltzen dira.

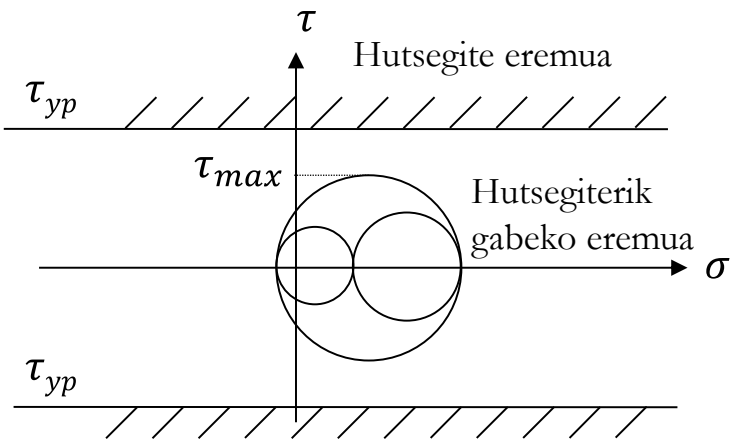
2.1 Hutsegite-teoriak hutsegite harikorrerako

Ikasmaterial honetan azalduko diren hutsegite harikorren teoriak hauek dira: esfortzu ebakitzaile maximoaren teoria (Tresca), distortsio maximoaren teoria (Von Mises) eta Coulomb-Mohr-en teoria.

- ***ESFORTZU EBAKITZAILE MAXIMOAREN TEORIA (TRESCA)***

Teoria horren arabera, ardatz anitzeko tentsio-egoera batean, gehienezko tentsio

ebakitzaileak isurpen-tentsioa gainditzen duenean gertatzen da hutsegitea, hau da: $\tau_{max} = \tau_{yp}$. Hori da, hain zuzen ere, 1a irudian azaldu dena. Hala, Mohr-en zirkuluen bidez edozein tentsio-egoera multiaxial irudikatuz, zirkulu batek (ikusi 3 irudia) τ_{yp} -ren mugak gainditzen dituenean gertatzen da hutsegitea.



3. irudia. Trescaren hutsegite-teoriaren irudikapena Mohr-en zirkuluetan. Egileen irudia.

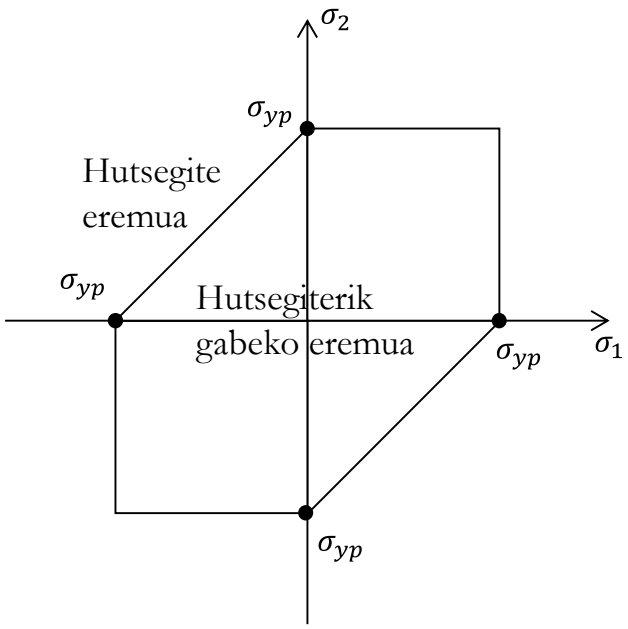
Matematikoki, teoria horren arabera, baldintza hau egiaztatu behar da hutsegiterik egon ez dadin:

$$\tau_{max} = max\left(\left|\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}\right|, \left|\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}\right|, \left|\frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2}\right|\right) < \tau_{yp} \quad (1)$$

Hau da, zirkulu handienaren erradioak (τ_{max}) baino txikiagoa izan behar du. Figura 1-en arabera, $\tau_{yp} = \sigma_{yp}/2$ da. Aurreko adierazpena bider 2 eginez, σ_{eq} tentsio uniaxial baliokidea lortzen da. Material harikorra denez, hutsegitea ez gertatzeko σ_{yp} baino txikiagoa izan behar du tentsio horrek:

$$\sigma_{eq} = max(|\sigma_1 - \sigma_2|, |\sigma_1 - \sigma_3|, |\sigma_2 - \sigma_3|) < \sigma_{yp} \quad (2)$$

Esan bezala, ohikoena tentsio-egoera biaxialak izatea da ($\sigma_3 = 0$). Kasu horietarako, (2) ekuazioa $\sigma_1 - \sigma_2$ diagrama baten bidez irudika daiteke, non "hutsegiterik ez"-ren konbinazioak hexagono baten barruan geratzen dira (ikusi 4 irudia); hau da, ebakitzaile maximoaren teoriaren arabera, hexagonotik kanpo edo haren gainean geratzen den edozein $\sigma_1 - \sigma_2$ tentsio-egoeran emango da hutsegitea.



4. irudia. Trescaren hutsegite-teoriaren adierazpena $\sigma_1 - \sigma_2$ diagraman (tentsio-egoera biaxialetarako). Egileen irudia.

- ***DISTORTSIO MAXIMOKO ENERGIAREN TEORIA (VON MISES)***

Teoria honen arabera, bolumen unitario bateko distortsio totalaren energia bolumen bereko isurpenarekiko erresistentziari dagokion distortsio-energiaren balioa baino handiagoa denean gertatzen da hutsegitea. Dagokion garapen matematikoaren ondoren (ikasmaterial honen norainokotik kanpo geratzen da), σ_{eq} tentsio uniaxial baliokide bat lortzen da, eta, material harikorra denez, hutsegitea ez gertatzeko σ_{yp} baino txikiagoa izan behar du tentsio horrek:

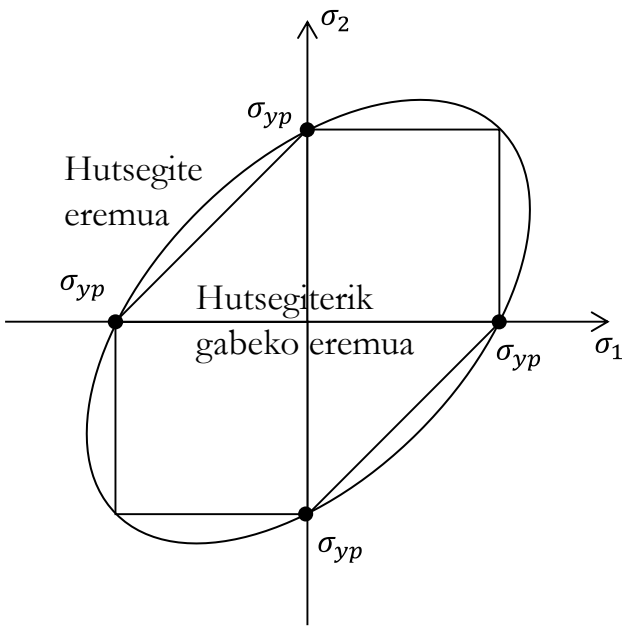
$$\sigma_{eq} = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]} < \sigma_{yp} \qquad (3)$$

Tentsio-egoera biaxialetarako diagraman ($\sigma_3 = 0$), "hutsegite ezaren" $\sigma_1 - \sigma_2$ konbinazioak elipse baten barruan geratzen dira (ikus 5. irudia); hau da, distortsio maximoko energiaren teoriaren arabera, elipsetik kanpo edo elipsearen gainean geratzen den edozein $\sigma_1 - \sigma_2$ tentsio-egoerak eragiten du hutsegitea.

5 irudian lerro etenetan, esfortzu ebakitzaile maximoaren teoriari dagokion hexagonoa agertzen da. Trescaren teoria Von Misesena baino pixka bat kontserbadoreagoa den arren (hexagonoaren eta elipsearen arteko puntu batek hutsegitea adierazten baitu Trescaren arabera, eta ez hutsegitea Von Misesen arabera), gehiago erabiltzen da Von Misesen teoria, esperimentalki egiaztatu baita errealitatera hobeto egokitzen dela, eta haren adierazpen

CC BY NC SA

matematikoa sinpleagoa delako, ekuazio bakarra baita.



5. irudia. Von Misesen hutsegite-teoriaren irudikapena $\sigma_1 - \sigma_2$ diagraman (tentsio egoera biaxialetarako). Egileen irudia.

- ***COULOMB-MOHRREN TEORIA***

Ohartu zaitezte azaldutako bi teorietan (Tresca eta Von Mises) suposatu dela material harikorra ekierresistentea dela, hau da, trakzioarekiko eta konpresioarekiko erresistentzia-ezaugarri berdinak dituela ($\sigma_{ypt} = \sigma_{ypc}$). Hori da kasu ohikoena.

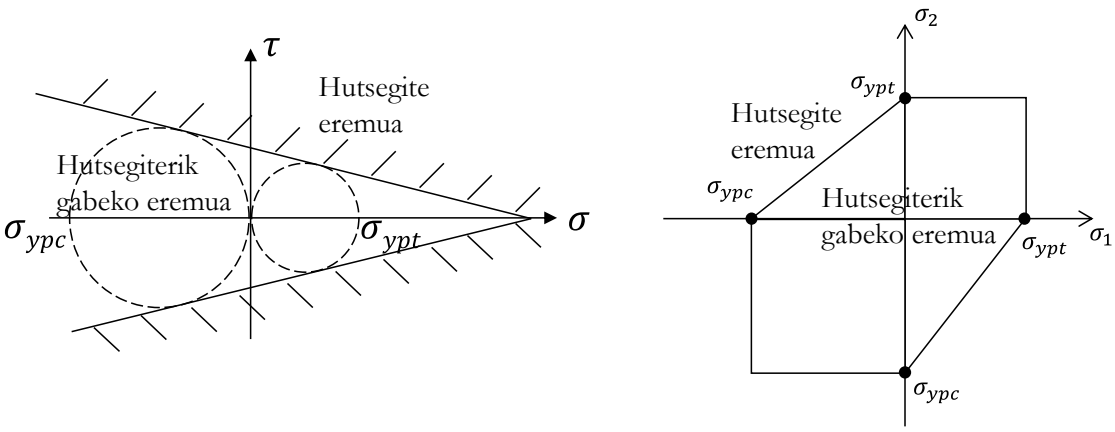
Material harikorra ez bada ekierresistentea, Coulomb-Mohr-en teoria erabiltzen da; teoria hau Trescaren teoriaren egokitzapen bat da material ez- ekierresistente batzuetarako. Kasu horretan, hutsegiterik ez izateko, baldintza hau izango litzateke:

$$max\left(\left|\frac{\sigma_1}{{\sigma_{yp}}^*} - \frac{\sigma_2}{{\sigma_{yp}}^*}\right|, \left|\frac{\sigma_1}{{\sigma_{yp}}^*} - \frac{\sigma_3}{{\sigma_{yp}}^*}\right|, \left|\frac{\sigma_2}{{\sigma_{yp}}^*} - \frac{\sigma_3}{{\sigma_{yp}}^*}\right|\right) < 1 \qquad (4)$$

Non σ_{yp}^* trakzio-isurpen tentsioa σ_{ypt} izango da, zenbakitzailearen tentsio nagusia trakzio-tentsioa denean, eta konpresio-isurpen tentsioa σ_{ypc}, zenbakitzailearen tentsio nagusia konpresio-tentsioa denean. Kontuan izan behar da material ekierresistente baterako Coulomb-Mohr-en (4) ekuazioa Tresca-ren (2) ekuazioaren berdina izango litzatekeela.

6a irudian, Mohr-en zirkuluetan hutsegite-eremuak eta hutsegiterik ez duten eremuak ageri dira; 6b irudian, berriz, tentsio egoera biaxialetarako ($\sigma_3 = 0$) $\sigma_1 - \sigma_2$ diagraman gauza bera

ageri da. Beste behin, Trescaren hutsegite-teoriarekin duen analogia egiaztatzen da.



a) *b)*

6. irudia. Coulomb-Mohr hutsegite-teoriaren adierazpena: a)Mohr-en zirkuluetan b) $\sigma_1 - \sigma_2$ diagraman (tentsio egoera biaxialetarako). Egileen irudia.

2.2 Hutsegite hauskorretarako hutsegite-teoriak

Ikasmaterial honetan azalduko diren hutsegite hauskorren teoriak esfortzu normal maximoaren teoria (Rankine) eta Coulomb-Mohr-en teoria eta Mohr-en teoria aldatuak dira.

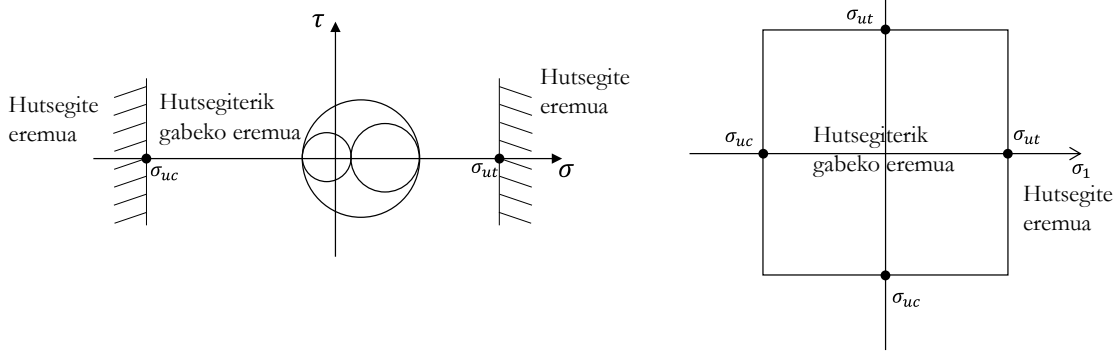
- ***ESFORTZU NORMAL MAXIMOAREN TEORIA (RANKINE)***

Teoria horren arabera, tentsio egoera multiaxial batean, tentsio nagusi positiboenak σ_{ut} trakziorako haustura-tentsio normala gainditzen duenean edo tentsio nagusi negatiboenak σ_{uc} konpresiorako haustura-tentsio normala gainditzen duenean gertatzen da hutsegitea (material hauskorrak ez dira ekierresistenteak). Horixe erakutsi da, hain zuzen, 7 irudian. Matematikoki adierazia:

$$\sigma_{eq} = max(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) < \sigma_{ut} \tag{5a}$$

$$\sigma_{eq} = min(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) > \sigma_{uc} \tag{5b}$$

Figura 7a irudiak Mohr-en zirkuluak erakusten ditu, eta 7b irudian $\sigma_1 - \sigma_2$ diagramak, tentsio-egoera biaxialetarako ($\sigma_3 = 0$), teoria honen arabera.

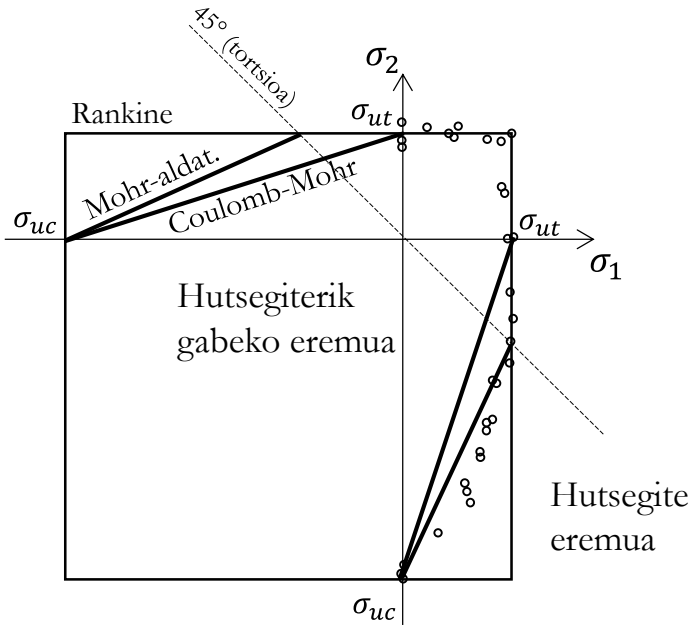


a) ***b)***

7. Irudia. Rankineren hutsegite-teoriaren adierazpena: a)Mohr-en zirkuluetan b) $\sigma_1 - \sigma_2$ diagraman (tentsio egoera biaxialetarako). Egileen irudia.

- ***COULOMB-MOHR ETA MOHR ALDATUEN TEORIAK***

Saiakuntza esperimentalek frogatzen dute Rankineren teoria ez dela gai hutsegite hauskor batzuk behar bezala aurreikusteko. Hain zuzen, 8 irudian $\sigma_1 - \sigma_2$ tentsio-konbinazioak irudikatzen dituzten puntu batzuk adierazten dira, baina, Rankineren teoriaren arabera, tentsio egoera horietako batzuek ez lukete huts egin behar, huts egiten ez duen eremuaren barruan baitaude. Errealitatera hobeto egokitzeko, Rankineren teoriaren alternatibak garatu ziren, besteak beste, Coulomb-Mohr eta Mohr aldatuaren teoriak (8-n irudikatuak).



8. irudia. Rankine, Coulomb-Mohr eta Mohr aldatuaren hutsegite-teorien irudikapena, $\sigma_1 - \sigma_2$ diagraman (tentsio egoera biaxialetarako), hutsegite-puntuekin batera. Burdinurtu

grisari dagozkion emaitzak. Egileen irudia.

Beste teoria batzuk ere badaude, bi horiez gain, hala nola bigarren eta laugarren koadranteak parabolen bidez hurbiltzen dituen bat, baina erabiliena Coulomb-Mohr-en teoria da, ekuazioaren sinpletasunagatik eta emaitza onargarriengatik:

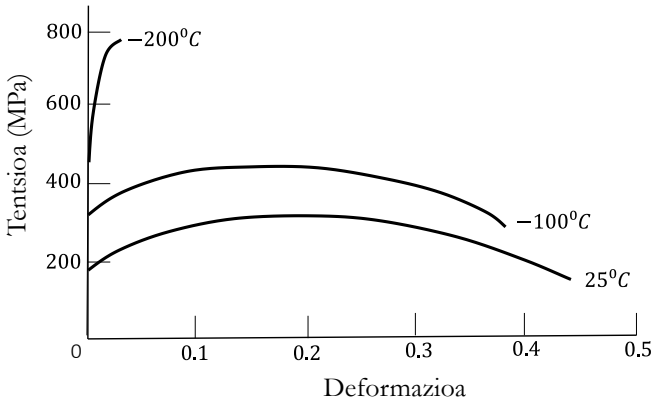
$$max\left(\left|\frac{\sigma_1}{\sigma_u{}^*}-\frac{\sigma_2}{\sigma_u{}^*}\right|,\left|\frac{\sigma_1}{\sigma_u{}^*}-\frac{\sigma_3}{\sigma_u{}^*}\right|,\left|\frac{\sigma_2}{\sigma_u{}^*}-\frac{\sigma_3}{\sigma_u{}^*}\right|\right)<1 \qquad (6)$$

Zenbakitzailearen tentsio nagusia trakzio-tentsioa denean σ_u^*, σ_{ut} hausturako trakzio-tentsioaren berdina da, eta zenbakitzailearen tentsio nagusia konpresio-tentsioa denean, σ_{uc} konpresio-hausturaren tentsio berarengatik ordezkatzen da ekuazioan.

3. MATERIAL HARIKORREN HUTSEGITE HAUSKORRA

Material hauskor batek beti hutsegite hauskorra badu ere, material harikor batean hutsegite hauskorra gerta daiteke zenbait kasutan, piezak baldintza hauetako bat betetzen duenean: tenperatura baxuak, talka-kargak edo tentsio egoera triaxiala. Hona hemen kasu berezi horietako bakoitza:

a) Tenperatura baxuak: material harikor bat tenperatura baxuen eraginpean dagoenean, haren tentsio/deformazio portaera hauskor bihurtzen da, 9 irudian adierazten den bezala, eta, beraz, hutsegite hauskorra izango du.

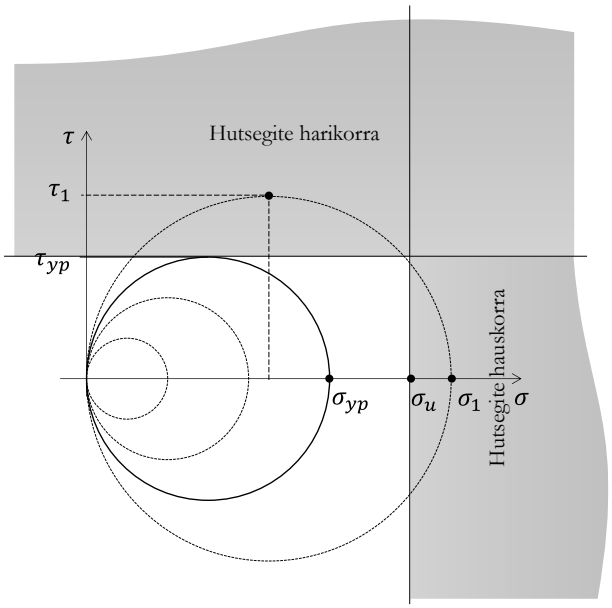


9. irudia. Tenperaturaren eragina materialaren deformazioan. Egileen irudia.

b) Talka-kargak: talka edo inpaktu-kargek material harikor baten hutsegite hauskorra ere eragin dezakete. Isurpena denbora behar duen fenomenoa da: kristal-planoen irristatzea ez da bat-batean gertatzen, denbora behar du. Horregatik, karga bat-batean aplikatzen bada (denbora-tarte labur batean), nahiz eta $\tau_1 > \tau_{yp}$ materialera iritsi, ez

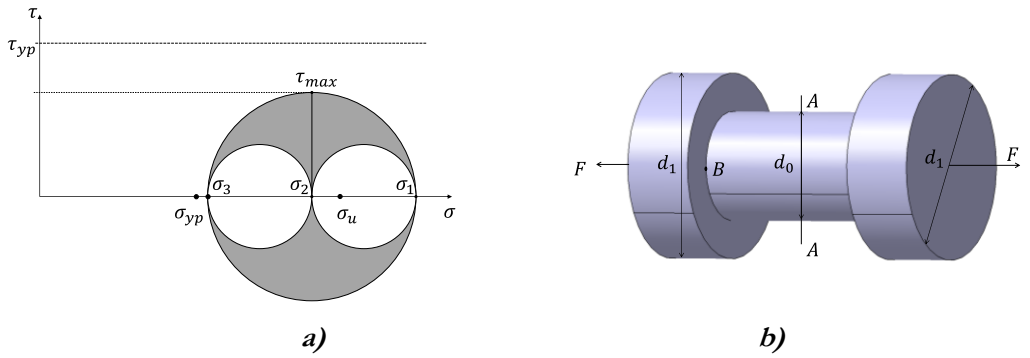
CC BY NC SA

dio astirik emango modu harikorrean isurpena sortu eta huts egiteko, eta, horren ordez, hutsegite hauskorra gertatuko da. 10 irudian, $\sigma_1 > \sigma_u$ zirkulu punteatuek planoen arteko isurpenak baino denbora gutxiagoan gertatzen den tentsio-egoeraren bat-bateko bilakaera adierazten dute.



10. irudia. Talka-kargek eragindako hutsegite hauskorra. Egileen irudia.

c) Egoera triaxialak: egoera triaxialek tentsio tangentzial txikia dute lotuta (ikusi 11a); horregatik, errazagoa da $\sigma = \sigma_u$-ra iristea (hutsegite hauskorra) $\tau = \tau_{yp}$-ra (hutsegite harikorra) baino. Hala ere, ez da ohikoa pieza batek tentsio egoera triaxiala izatea. Adibidez, 11b-ren piezaren diametro-aldaketaren sekzioan gertatzen da: pieza horretan, sekzio-aldaketa hain da handia, trakzio-indar bat aplikatzean, diametro-murrizketa askoz handiagoa baita piezaren erdiko tartean muturretan baino (gogoratu piezaren bolumen totala konstante mantentzen dela). Horren ondorioz, sekzio-aldaketan (B puntua) tentsio erradial eta zirkunferentziazko oso garrantzitsuak garatzen dira, eta tentsio horiek, trakzio-indarrak eragindako tentsio axialarekin batera, 11. irudiko tentsio egoera triaxiala eragiten dute gune horretan.

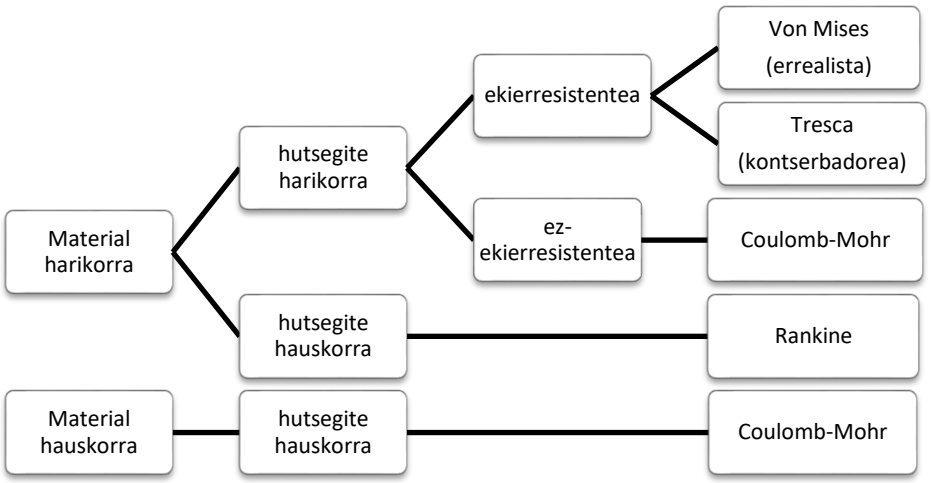


11. irudia. a) Tentsio egoera triaxiala b) Tentsio triaxialak izan ditzakeen pieza. Egileen irudia.

4. HUTSEGITE ESTATIKOARI BURUZKO TEORIEN HAUTAKETA

12. irudian hutsegitearen teoria hautatzeko diagrama bat proposatzen da, zenbait faktore kontuan izanda. Material harikorretarako hutsegite-teoria bat hautatzean, lehenik eta behin, material ekierresistentea den edo ez bereizi behar da. Ekierresistentea bada, berdin erabil daitezke Trescaren edo Von Misesen teoriak (oso antzeko emaitzak ematen dituzte), nahiz eta, lehenago esan bezala, Von Mises gehiago erabiltzen den, errealitatera gehiago egokitzen delako eta matematika-adierazpen sinpleagoa duelako (Tresca pixka bat kontserbadoreagoa den arren). Materiala ez bada ekierresistentea, Coulomb-Mohr erabiltzen da.

Material hauskorretarako, Coulomb-Mohr-en teoria erabiltzen da; izan ere, azaldu den bezala, Rankineren teoria ez da gai zenbait hutsegite aurreikusteko. Nahiz eta Coulomb-Mohrena baino teoria zehatzagoak dauden, ez dira hainbeste erabiltzen beren adierazpen matematikoak askoz konplexuagoak direlako; gainera, Coulomb-Mohr beste teoria horiek baino kontserbadoreagoa da.



12. irudia. Hutsegite-teoriak hautatzeko diagrama. Egileen irudia.

5. HAUSTURAREN MEKANIKA

Batzuetan, haustura hauskorrak agertzen dira, portaera harikorra izatea espero zen baldintzetan eta isurpena baino tentsio txikiagoekin. Hutsegite-teoriak azaltzeko gai ez diren hutsegiteak dira, hau da, tentsio-egoeretarako hutsegitea gertatzen da, hutsegite-teorien arabera huts egin behar ez luketenak. Haustura horiek, batez ere, lodiera handiko xaflen eta profilen soldaduraren bidez eraikitako egitura-sistemetan gertatzen dira (ontziak, zubiak, biltegi handiak, makina handien karkasak…), nahiz eta erresistentzia handiko altzairuz eta aleazioz egindako tamaina ertaineko piezetan ere gertatzen diren. Fabrikazio-, mekanizazio- edo soldadura-prozesuetan edo, besterik gabe, kolpeen ondorioz, pitzadurak agertu diren guneetan sortzen dira. Pitzadura horiek makroskopikoak dira, nahiz eta askotan ez dauden agerian, adibidez, soldadura baten barruan kokatuta daudelako.

Haustura hauskor horiek berehala eta aldez aurretik jakinarazi gabe gertatzen dira: estatikoki eskatutako pieza batean, karga altu baten aurrean, pitzaduraren ertzeko tentsioen kontzentrazioak zabaldu egiten du, eta, ondorioz, sekzio erresistentea txikiagotu egiten da, tentsioa handituz, eta, horrela, pieza ia bat-batean hausten da. Hausturaren teoriak horrelako hutsegiteak aztertzen ditu. Ez ditu ordezten azaldu berri diren hutsegite-teoriak, baizik eta osatu egiten ditu, horiek aurreikusteko gai ez diren hutsegite mota batzuk azaltzen baititu.

Hausturaren teoria XX. mendean garatu zen hutsegite katastrofiko asko gertatu ziren eta. Kasu pare bat aipatzearren, 1942 eta 1952 artean, 5.000 T-2 Tanker eta Liberty ontzietatik 19k neurri handiko pitzadurak izan zituzten, eta 1967an Point Pleasant zubia hautsi eta 46

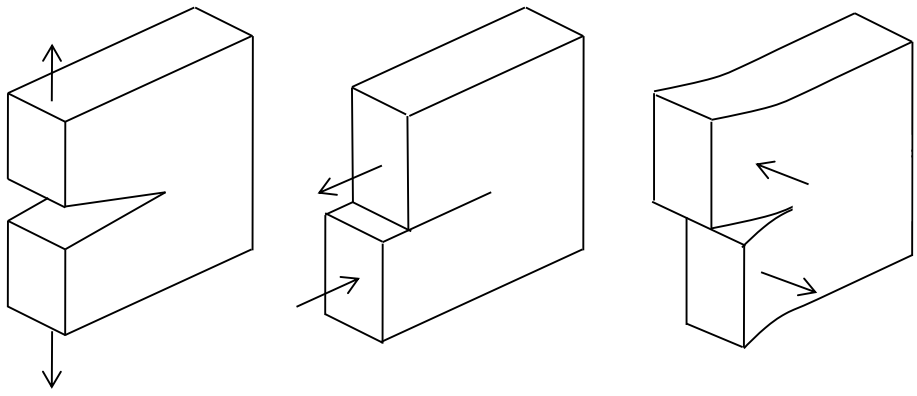
BY NC SA

pertsona hil ziren.

13. irudia. T2 Tanker motako ontzia: hausturaren ondoriozko hutsegitea. Irudia ondorengo estekan sartuta ikus daiteke: https://www.twi-global.com/media-and-events/insights/schenectady-t2-tanker

5.1 Pitzaduraren ertzeko tentsio-eremuaren azterketa

Aipatu dugun moduan, hausturagatiko hutsegiteen jatorria lehendik zegoen pitzadura batean dago (fabrikazio-hutsegiteak, soldadurak, kolpeak... direla eta); beraz, hutsegite horien arrazoia ulertzeko lehen urratsa pitzaduraren inguruan gertatzen dena aztertzea da. Pitzadura bat duen eta esfortzu estatikoak jasaten dituen pieza batean, pitzadura modu desberdinean zabal daiteke, pitzaduraren eremuan aplikatzen diren tentsio normalen, ebakitzaileen edo bien arabera. Hala, hiru haustura mota daudela esan daiteke (14 irudia): I (tentsio normalek eragindakoa), II eta III (tentsio ebakitzaileek eragindakoa), n. Edozein haustura-kasu hiru modu horiek gainjarriz azter daiteke. Aurrerantzean I. modua aztertuko da, baina azaltzen den guztia beste bi moduetako edozeini aplika dakioke.



a) ***b)*** ***c)***

14. Irudia. Haustura-moduak: a) I modua (tentsio normalak) b) II modua (tentsio ebakitzaileak) c) III modua (alboko tentsio ebakitzaileak). Egileen irudia.

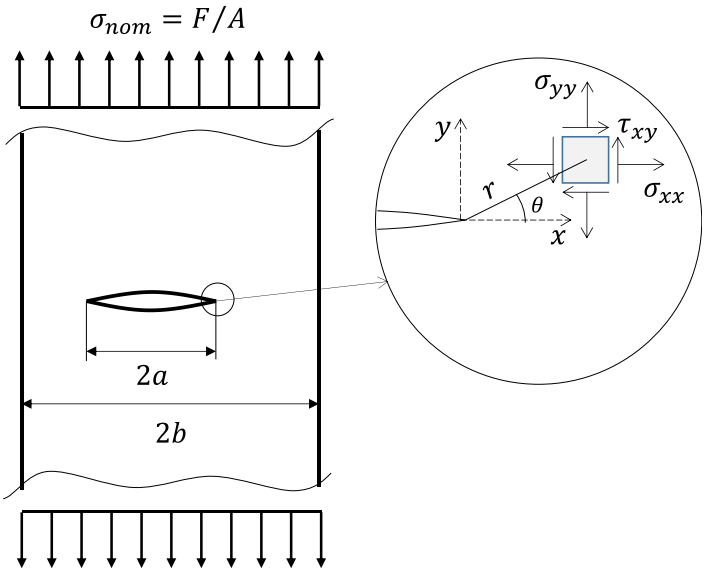
15 irudiak pitzaduraren ertzeko tentsioak erakusten ditu (distantzia $r <<< a$ batera), tentsio-egoera lau baterako (lodiera txikiko pieza):

$$\sigma_{xx} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cdot f_1(\theta) \tag{7a}$$

CC BY NC SA

$$\sigma_{yy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cdot f_2(\theta) \tag{7b}$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cdot f_3(\theta) \tag{7c}$$

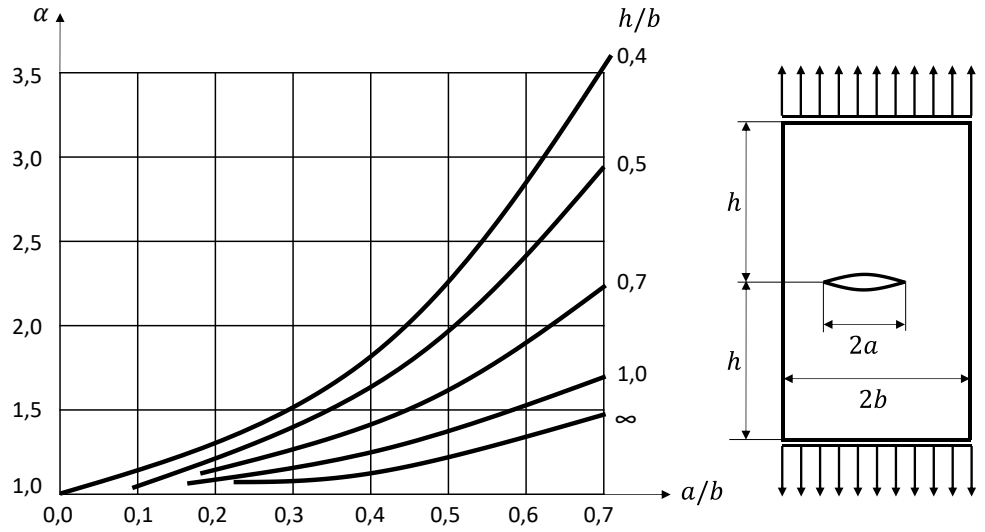


15. irudia. Pitzaduraren ertzeko tentsio egoera. Egileen irudia.

Non $f_1(\theta)$, $f_2(\theta)$ eta $f_3(\theta)$ funtzioak θ -ren menpeko dira, eta K_I (I. modurako) tentsio-intentsitatearen faktorea deritzona da, eta bere balioa:

$$K_I = \sigma\alpha\sqrt{\pi a} \tag{8}$$

Ekuazio horretan, σ tentsio nominala da, hau da, pitzaduraren ertzeko posizioan piezak izango lukeen tentsioa, pitzadurarik ez balego, kasu honetan $\sigma = F/A$. Bestalde, α koefizientea piezaren geometriaren, lan egiteko moduaren eta pitzaduraren tamainaren eta kokapenaren araberakoa da. α -ren balioa taulatuta dago kasu askotarako: Figura 15-ren kasurako α -ren balioak ematen 16. irudian. Oro har, pitzaduraren tamaina ($2a$) txikia izan ohi da piezaren zabalerarekin ($2b$) alderatuta, hau da, $a/b \approx 0$ hartzen da: $\alpha \approx 1$ (ikusi 16).



16. irudia. α balioa. Egileen irudia.

X ardatzaren gainean dauden puntuetarako $(\theta = 0)$frogatzen da, $f_1(\theta)$ =$f_2(\theta)$=1 eta $f_3(\theta) = 0$, beraz:

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} = \sigma\alpha\sqrt{\frac{a}{2r}} \tag{9a}$$

$$\tau_{xy} = 0 \tag{9b}$$

Adierazpen horien arabera (9), pitzaduraren ertzean ($r \approx 0$), tentsioak infiniturantz jotzen du; izan ere, pitzadurak oso tentsio-kontzentrazio handia sartzen du; hala ere, komeni da gogoratzea material harikorrek ezin dutela tentsioa absorbatu isurpen-puntutik haratago (material elastoplastiko perfektua dela σ_{yp} kontsideratuz).

Bestalde, (9) adierazpenetatik ere ondorioztatzen da pitzadura-ertzetik urrundu ahala tentsioak zerorantz jotzen duela. Hala ere, hori ez da egia, pitzaduraren efektua desagertu egiten baita harengandik behar bezala urrundu ondoren; distantzia horretatik aurrera, Hausturaren Mekanikaren (9) adierazpenak ez dira jada baliozkoak, eta σ tentsioak bere balio nominala "berreskuratzen" du (lehen komentatu den bezala $\sigma = F/A$, 15 irudia).

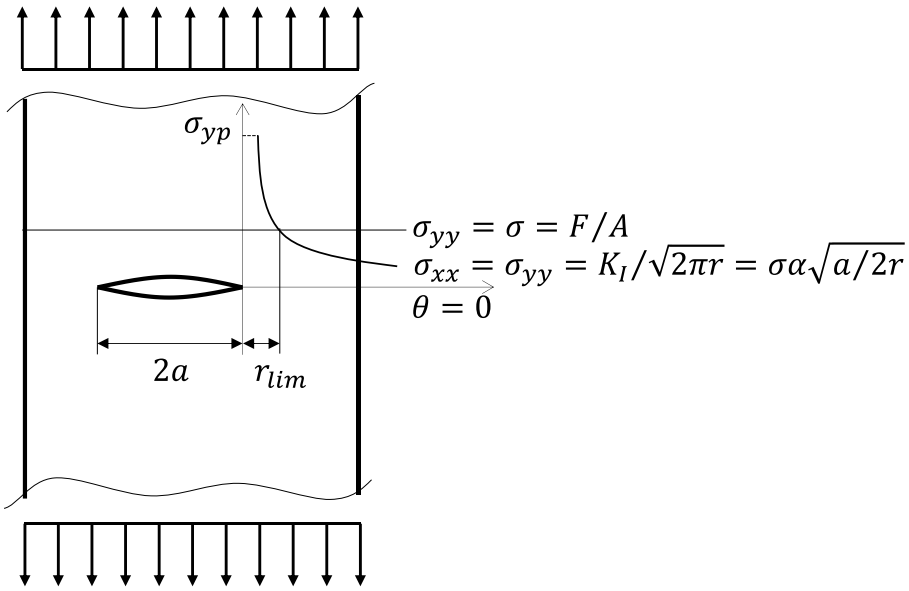
Bi tentsio egoeren arteko muga (pitzaduraren ertzarena eta nominalarena) markatzen duen r_{lim} distantzia bi balioak berdintzen diren puntuan dago, 17 irudian adierazten den moduan:

$$\sigma\alpha\sqrt{\frac{a}{2r}} = \sigma \rightarrow r_{lim} = \frac{a}{2} \tag{10}$$

Figura 17-k, piezaren tentsio egoera erreala adierazten du, non Hausturaren Mekanikaren (9)

BY NC SA

adierazpenak distantzia bateraino betetzen baitira, $r_{lim} = a/2$ eta pitzaduraren ertza plastifikatu egiten da σ_{yp} isurpen tentsioa gainditzen duten puntuetan; distantzia $r_{lim} = a/2$ baino haratago, tentsio egoera nominala da, hau da, pitzadurarik ez balego piezak izango lukeen egoera.



17. irudia. r_{lim} distantziaren definizio grafikoa. Egileen irudia.

5.2 Tentsio kritikoaren metodoa

Zenbait metodo daude, aurreko atalean pitzaduraren ertzaren tentsio-azterketan oinarrituta, pieza baten haustura hauskorraren ondorioz hutsegitea noiz gertatzen den kalkulatzen saiatzen direnak. Metodo horietatik, sinpleenetako eta erabilienetako bat tentsio kritikoaren metodoa da.

Demagun trakzio-saiakuntzako probeta harikor bati pixkanaka handituz doan indar axial bat aplikatzen zaiola; kasu hori aztertzen da sinpleena delako eta I. haustura-moduarekin zerikusia duelako, baina azaltzen diren kontzeptuak beste edozein piezari eta karga-egoerari aplika dakizkieke. Tentsio nominala $\sigma = F/A$ handituz joango da isurpenera (σ_{yp}) iritsi arte, eta hutsegite harikorra gertatuko da gehiegizko deformazio plastikoen ondorioz. Indarra areagotzen bada, azkenik, σ_u haustura-tentsiora iristean, pieza hautsi egingo da.

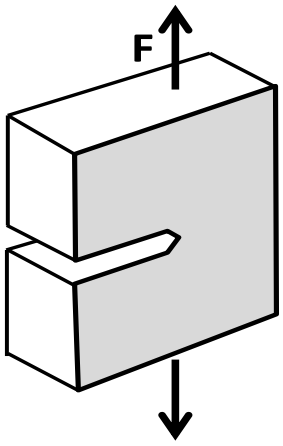
Probeta horrek berak pitzadura bat badu (fabrikazio-akatsen, soldaduren, kolpeen eta abarren ondorioz), tentsio kritikoaren metodoaren arabera, piezak hutsegite hauskorraren bidez huts egiten du tentsio nominala $\sigma = F/A$ tentsio kritiko izeneko σ_c balio batera iristen

denean. Balio hau:

$$\sigma_c = \frac{K_{Ic}}{\alpha\sqrt{\pi a}} \tag{11}$$

Adierazpen hori zuzenean lortzen da aurreko ataleko (8) adierazpenetik, $\sigma = \sigma_c,\ K_I = K_{Ic}$ denean. Esperimentalki frogatu da K_{Ic}-ren balioa materialaren araberako baino ez dela (hau da, material bakoitzak bere K_{Ic} balio propioa du), eta ez da pitzaduraren tamainaren edo kokapenaren araberakoa, ezta piezaren geometriaren edo lan egiteko moduaren araberakoa ere. Materialaren propietate horri zailtasuna deritzo, eta honen balioa taulatuta dago ia egitura-material guztietarako: haren balioa 18. irudiko saiakuntza normalizatuetatik lortzen da (hala nola, K_{IIc} -ren eta K_{IIIc} -ren balioak aurkitzea zailagoa da K_{Ic} baino).

(11) formulan ikus daitekeenez, σ_c tentsio kritikoa α -ren menpe ere badago, eta, beraz, ez da soilik materialaren funtzioa (K_{Ic}), baizik a eta pitzaduraren tamaina eta posizioaren eta baita ere piezaren geometriaren eta lan egiteko moduaren araberakoa.



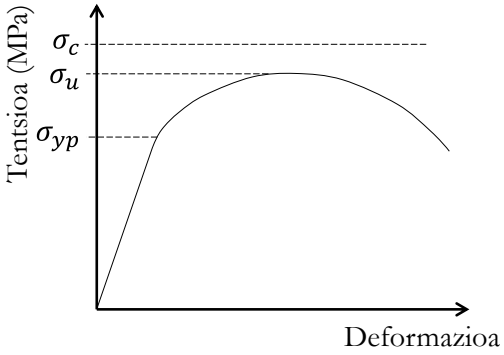
18. irudia. Material baten KIc hausturaren zailtasuna lortzeko saiakuntza. Egileen irudia.

Azken finean, eta trakzio-saiakuntzara itzuliz, probetak pitzadurarik ez badu, haren hutsegite harikor edo hauskorra modu "konbentzionalean" gertatzen da $\sigma = F/A$ tentsioa σ_{yp} eta σ_u-ra iristen denean, balio horiek probetako materialaren menpe baino ez daude. Probetak pitzadura bat badu, ordea, hausturaren ondoriozko hutsegite hauskorra $\sigma = F/A$ tentsioa σ_c-ra heltzen denean gertatzen da, eta haren balioa materialaren (K_{Ic}), pitzaduraren tamainaren (a) eta piezaren geometriaren eta lan egiteko moduaren araberakoa da. Adibidez, normala denez, α pitzaduraren tamaina zenbat eta handiagoa izan, orduan eta txikiagoa izango da hausturaren ondorioz sortuko den σ_c tentsio kritikoaren balioa.

Hausturaren ondoriozko hutsegitea saihesteko, saiatu behar da tentsio σ_c kritikoa σ_{yp}

isurpen-tentsioaren gainetik ez ezik σ_u haustura-tentsioaren gainetik ere egon dadin (irizpide kontserbadorea da). Horrela lortzen da hutsegite hori inoiz ez gertatzea, zeren eta, balioa lortu baino lehen, piezak aldez aurretik huts egingo baitu "ohiko" forman, σ_{yp} eta σ_u-ra iristean. Baldintza hori bermatzeko, $\sigma_c > \sigma_u$ (ikusi 19. irudia) eta nahikoa da pitzaduraren tamaina balio honen azpitik egotea. (11) ekuaziotik:

$$\sigma_c \geq \sigma_u \rightarrow a \leq \frac{1}{\pi}\left(\frac{K_{Ic}}{\alpha\sigma_u}\right)^2 \tag{12}$$



19. irudia. $\sigma_c > \sigma_u$ baldintza deformazio-tentsioaren diagraman irudikatuta. Egileen irudia.

Pitzadurak tamaina onargarri hori gainditu ez dezan, fabrikazio-, mekanizazio- eta soldadura-prozesu egokiak erabili behar dira. Gainera, pieza aldizka ikuskatzea gomendatzen da, egon daitezkeen pitzaduren tamaina neurtuz, balio onargarrietan daudela egiaztatzeko. Pitzaduraren tamaina neurtzeko hainbat teknika daude: ultrasoinuak, erradiografiak, likido sarkorrak…

Azaldu dugun prozedurak edozein piezatarako eta edozein hutsegite-modurentzat balio du. Pitzadura I, II eta III moduen arabera heda badaiteke, hausturarik gerta ez dadin, baldintza hau bete behar da:

$$\left(\frac{K_I}{K_{Ic}}\right)^2 + \left(\frac{K_{II}}{K_{IIc}}\right)^2 + \left(\frac{K_{III}}{K_{IIIc}}\right)^2 \leq 1 \tag{13}$$

Kasu horietan, K_{II} eta K_{III} kalkulatzeko, II eta III. irristapen eta urradura moduei dagozkien tentsio nominalak erabiltzen dira: I. moduan tentsio normalek bezala, pitzadura "irekitzen" saiatzen dira; II. eta III. moduetan, aldiz, tentsio tangentzialak dira pitzadura"zizailatzen edo ebakitzen" saiatzen direnak. K_{II} Pitzaduraren norabidean tentsio tangentzialak erabiltzeko, eta K_{III} pitzadurarekiko norabide perpendikularrean, 14 irudian ikus daitekeen moduan.