

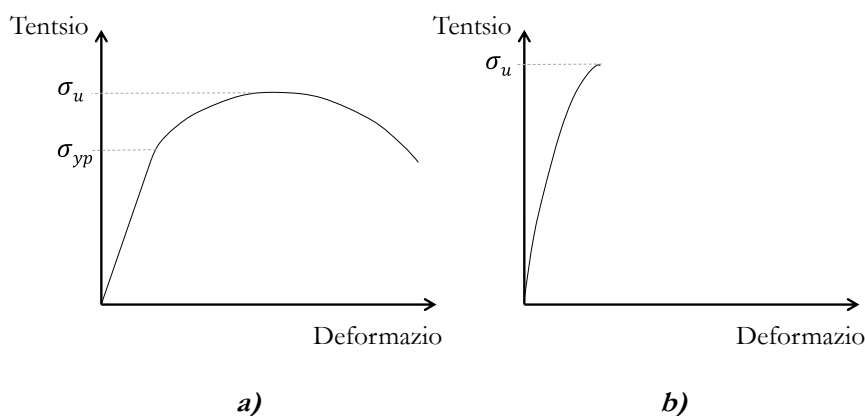
## 2 GAIA:

# TENTSIO-KONTZENTRAZIOAK

## 1. TENTSIO-DEFORMAZIO DIAGRAMA

---

Trakzio-saiakuntza material baten portaera estatikoa ezaugarritzen duen oinarritzko proba da. Saiakuntzaren emaitza  $\sigma - \varepsilon$  tentsio-deformazio diagraman irudikatzen da. Material harikorrentzako, diagramak 1-a irudia adierazten du eta material hauskorrentzako ordea, 1-b irudiarena.



**1. irudia. Tentsio-deformazio diagrama: a) material harikorra b) material hauskorra.**

***Egileen irudia.***

Material harikorretan,  $\sigma_{yp}$  tentsio-maila jakin batera iristean, deformazio iraunkor nabarmena (erregimen plastikoa) agertzen da tentsio-maila ia handitu gabe. Tentsio horri isurpen-tentsioa deitzen zaio. Materialak  $\sigma_u$  (haustura-tentsioa) tentsio maila altuago batera hautsi gabe lanean jarraitzeko gai den arren,  $\sigma_{yp}$  iristean materialak huts egiten duela kontsideratuko da, balio horretan deformazio handia eta iraunkorra sortzen baita, eta horrek ezinezko egiten du materialak behar bezala lan egiten jarraitzea.

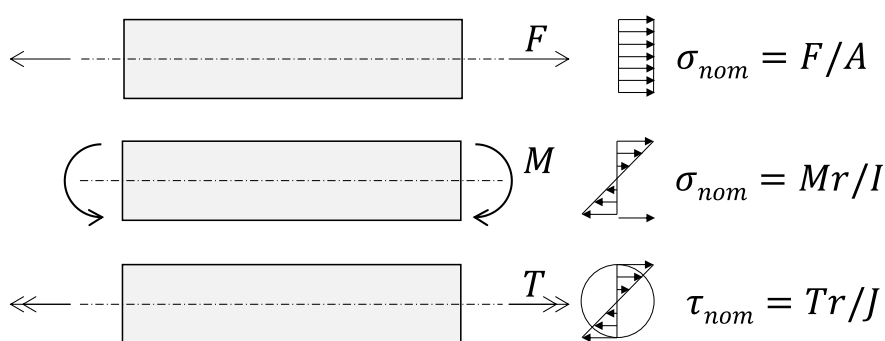
Material hauskorretan, materialak ez du deformazio handirik jasaten haustura-tentsiora iristean. Horrela, hutsegitea  $\sigma_u$  haustura-tentsiora iristean gertatzen da, eta momentu

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

horretan sekzioan zehar berehala hedatzen den pitzadura mikroskopiko bat agertzen da, pieza bitan zatituz.

## 2. TENTSIO-KONTZENTRAZIOAK

Geometria sinpleko pieza batean eta hipotesi sinplifikatzaile batzuen arabera, hala nola, 2. irudiko ardatz zirkularra, honen tentsio-egoera kalkulatzeko posible da Materialen Erresistentziako formulak erabiliz. Horrela kalkulatuak tentsioari tentsio izendatua edo nominala deitzen zaio.



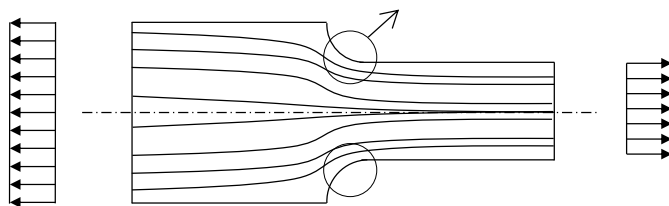
### 2. irudia. Tentsio nominalaren banaketa karga axiala, makurdura momentuan eta bihurtura momentuan jasaten dituen barra batean. Egileen irudia.

Hala ere, Materialen Erresistentzia ez da erabilgarria pieza baten gune jakin batzuetan tentsio-egoera zehazteko, konkretuki:

- Piezaren forman bat-bateko aldaketa-guneetan.
- Euskarri-puntuetan eta kargak piezaren gainean aplikatzen diren puntuetan.

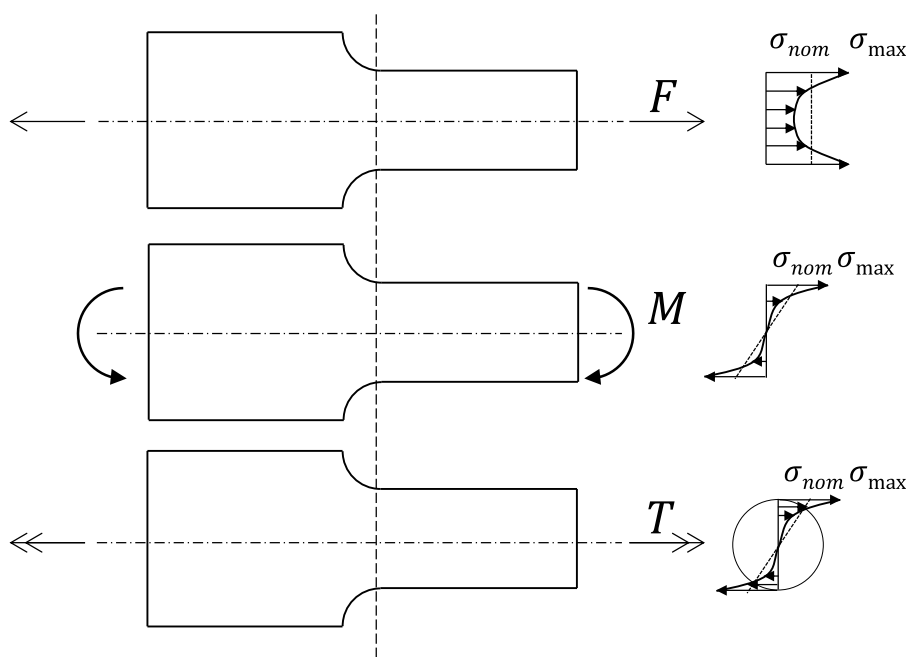
Gune horietan tentsio-kontzentrazioak gertatzen dira, eta horrek sekzio erresistentearen tentsio nominalaren banaketa aldatzen du. Fenomeno honen estimazio kualitatiboa ahalbidetzen duen kontzeptu intuitibo bat tentsioaren transmisio-lerroena da. Lerro hauek indarra "transmititzen duten" lerroak adierazten dituzte, eta modu horretan bere dentsitatea eta/edo malda-aldaketa handiagoa den sekzioko guneetan tentsio-kontzentrazioa ematen da. Adibide gisa, 1. irudiko piezak tentsio-kontzentrazioa adierazten du ardatzaren diametroa aldatzen den sekzioan, akordio-erradiotik hurbil dagoen gunean.

Tentsio kontzentrazio eremua



**3. irudia. Esfortzuen transmisio-lerroak, karga axial banatuean eta sekzio aldakorreko barra batean. Egileen irudia.**

3. irudian, sekzio kritikoko tentsioen banaketa ageri da; ikusten denez, ez dator bat Materialen Erresistentziak definitutako tentsio nominalen banaketarekin. Hozkadetatik hurbil dauden eremuak tentsio-kontzentrazio guneak dira, piezaren forman bat-bateko aldaketa bat ematen delako; beraz, tentsioa nominala baino handiagoa izango da bertan. Aitzitik, tentsioa nominala baino txikiagoa izango da hozkadetatik urrun, sekzioaren erdiko aldean, sekzioaren tentsio totala berdin mantentzen delarik eta tentsio-kontzentrazioaren guneranzko birbanaketa baino ez da gertatzen.



**4. irudia. Karga axiala eta momentu makurtzailea jasaten dituen barra bateko tentsioen banaketa. Sekzio-aldaketako tentsioak. Egileen irudia.**

4. irudian ikusten denez,  $\sigma_{max}$  tentsio maximoa hozkadaren ertzean gertatzen da, esfortzuen transmisio-lerro gehien kontzentratzen diren gunean, eta haren balioa  $\sigma_{nom}$  tentsio nominala baino  $K_t$  aldiz handiagoa da (gauza bera gertatzen da  $\tau$  tentsio ebakitzailerari ere):

$$\sigma_{max} = K_t \cdot \sigma_{nom} \quad (1a)$$

$$\tau_{max} = K_t \cdot \tau_{nom} \quad (1b)$$

$K_t$  faktoreari “tentsio-kontzentrazio faktorea” deritzo, eta balio hori, jakina, unitatea baino handiagoa da. Balio hori bi modutan kalkula daiteke:

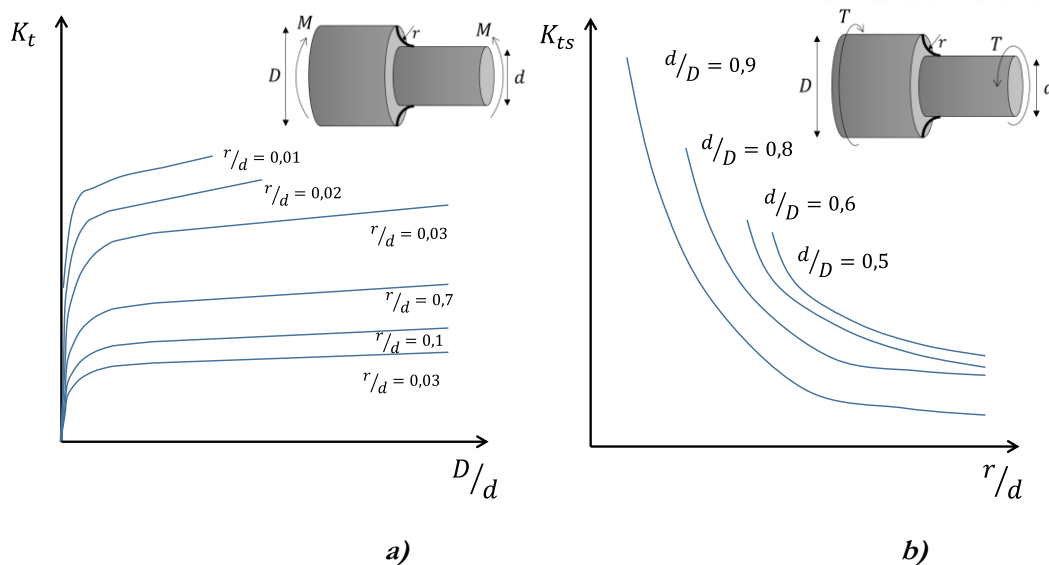
a) Analitikoki: oso geometria eta karga sinpleak dituzten kasu batzuetan bakarrik egin daiteke.

b) Esperimentalki edo Elementu Finituen Metodoaren bidez (EFM): saiakuntza edo simulazioen tentsio maximoa lortzen da ordenagailu bidez, eta Materialen Erresistentziaren adierazpenekin kalkulaturako tentsio nominalaz zatituz,  $K_t$ -ren balioa kalkulatu da.

$K_t$  balioak dituzten taula ugari argitaratu dira ingeniarietzako geometria eta karga-kasu ohikoetarako, aipaturako edozein modutatik lortuak. Adibidez, potentzia-transmisioko ardatz bat bihurduaren (potentzia transmititzean) eta makurduaren (zeharkako indarrak jasatean) menpe dago, eta ohikoa da diametro-aldaketak izatea. Tentsio-kontzentrazioa duten sekzio horietako tentsio normal eta ebakitzaila maximoak ezagutzeko, 5a (tentsio normalerako) eta 5b (tentsio ebakitzailerako) irudietatik lortutako  $K_t$  balioak erabiltzen dira. Balio horiek hauek izanik:

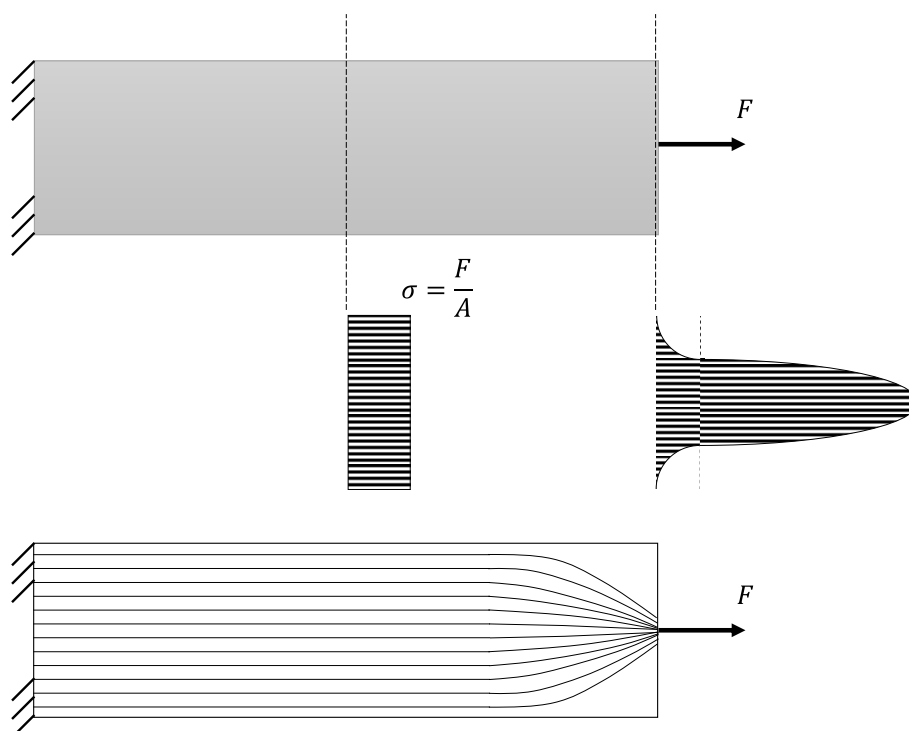
$$\sigma_{max} = K_t \cdot \sigma_{nom} = K_t \cdot \frac{M \cdot r}{I} \quad (\text{Figura 5a} - \text{eko } K_t) \quad (2a)$$

$$\tau_{max} = K_t \cdot \tau_{nom} = K_t \cdot \frac{T \cdot r}{J} \quad (\text{Figura 5b} - \text{eko } K_t) \quad (2b)$$



**5. irudia.  $K_t$ -ren balioak, diametro-aldaketa duen ardatz zirkulararentzat: a) momentu makurtzailepean, b) momentu bihurtzailepean. Egileen irudia.**

Aipatu den bezala, piezaren forma bat-batean aldatzen den guneetan ez ezik, piezetako euskarrietan eta kargen aplikazio-puntuetan ere tentsio-kontzentrazioak gertatzen dira 5. irudian ageri den bezala. Hala ere, kontzentrazio horiek ez dira aztertzen, ez baitira existitzen errealitatean. Izan ere, 6. irudikoa bezalako indar puntual bat (edo euskarri puntual bat) idealizazio bat baino ez da, indar errealaren sinplifikazio bat, askoz azalera handiagoan aplikatuko dena, eta, beraz, ez du halako tentsio-kontzentrazio nabarmenik eragingo.

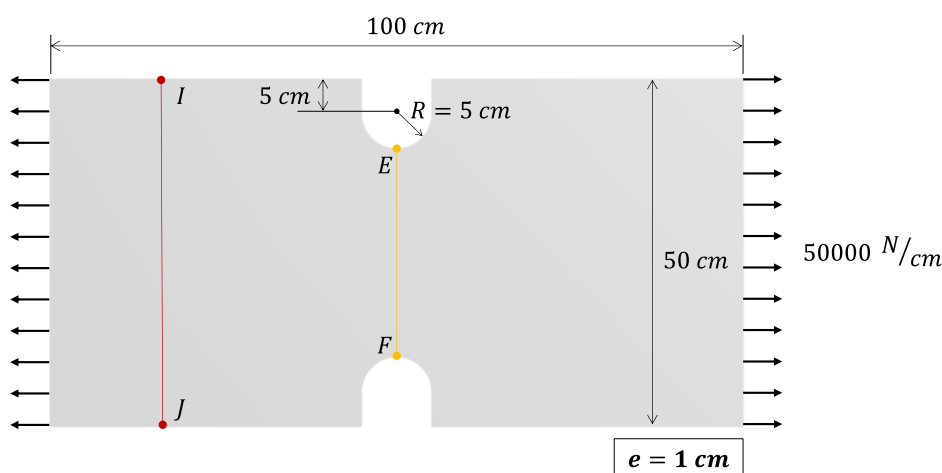


6. irudia. Tentsioaren balioak bi sekziotan eta esfortzuak transmititzeko lerroetan.

*Egileen irudia.*

### 3. PIEZAREN MATERIALAREN ARABERAKO TENTSIO-KONTZENTRAZIOA

Tentsio-kontzentrazioaren eragina ez da berdina material harikorrezko pieza batean eta hauskor batean. Hori argitzeko, Figura 7 irudiko pieza aztertuko da. Xafla errektangular bat da, lodiera uniformekoa,  $e = 1\text{cm}$ , muturretan banaturiko indar axiala jasaten duena, eta hozkada bat duena: inguruan tentsio-kontzentrazio eremua sortuz.

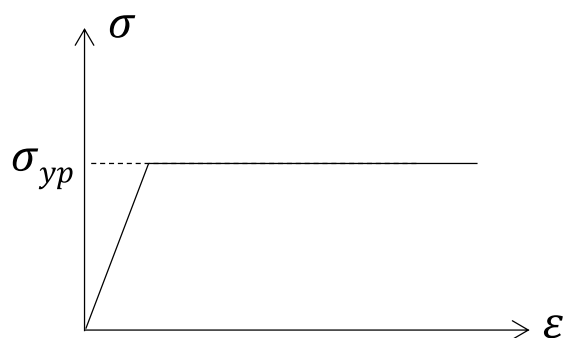


8. irudia. Karga axialpean dagoen hozkadadun xafla. Egileen irudia.

Materialen Erresistentziaren arabera, IJ sekzioko tentsio nominalaren banaketa  $\sigma_{nom} = F/A = 50000 \times 50 / (50 \times 1) = 500 \text{ MPa}$  da eta balio uniformekoa sekzio osoan zehar, 8. irudian erakusten den bezala. IJ sekzio honetan ez dago piezaren formaren bat-bateko aldaketarik; beraz, ez dago tentsio-kontzentrazio gunerik, eta, beraz, banaketa hori da benetan piezan ematen dena. Adierazpen bera EF atalari aplikatuz, Materialen Erresistentziak iragartzen du  $\sigma_{nom} = F/A = 50000 \times 50 / (30 \times 1) = 833 \text{ MPa}$  balioko banaketa uniforme izango duela, baina E eta F puntuen inguruan tentsio-kontzentrazio bat eragiten duen hozkada bat dagoenez, tentsio errealeen banaketa ez da nominala bezalakoa. Hala, tentsio maximoa E eta F puntuetan agertzen da, eta geometria eta karga partikular horretarako, tentsio nominala baino 2'4 aldiz handiagoa da ( $K_t = 2'4$ ), hau da,  $\sigma_{max} = K_t \cdot \sigma_{nom} = 2'4 \cdot 833 = 2000 \text{ MPa}$ . Tentsio hau pieza osoan zehar ematen den altuena denez, piezaren hutsegitea materiala tentsio-balio hori jasateko gai izatearen menpe egongo da. Ondoren, beraz, piezaren tentsio-kontzentrazioak aztertzen dira material motaren arabera:

a) Material hauskorra: eman dezagun pieza  $\sigma_u = 1450 \text{ MPa}$  haustura-tentsioa duen material hauskorrez egin dagoela. Piezaren tentsio maximoa  $\sigma_{max} = 2000 \text{ MPa} > \sigma_u = 1450 \text{ MPa}$  denez, hutsegite hauskorra gertatuko da. Gaiaren hasieran azaldu den bezala, haustura-tentsiora iristen den puntuan pitzadura bat agertzen delako gertatzen da hutsegite hori; pitzadura hori berehala hedatzen da, eta pieza hautsi egiten da bi zatitan. Beraz, bat-bateko hutsegitea da, eta “aldez aurretik abisatu gabe” gertatzen da (ez da deformazio handirik sortzen hutsegin aurretik).

b) Material harikorra: jo dezagun orain pieza  $\sigma_{yp} = 1250 \text{ MPa}$  isurpen-tentsioa duen material harikorrez egin dagoela. Analisia sinplifikatzearen, materiala elastoplastiko perfektua dela onartuko da; hau da, piezaren puntu bat isurpen-tentsiora iristen denean, materiala ez da gai tentsio gehiago xurgatzeko, eta deformazio plastiko infinituraino jariatzen da.

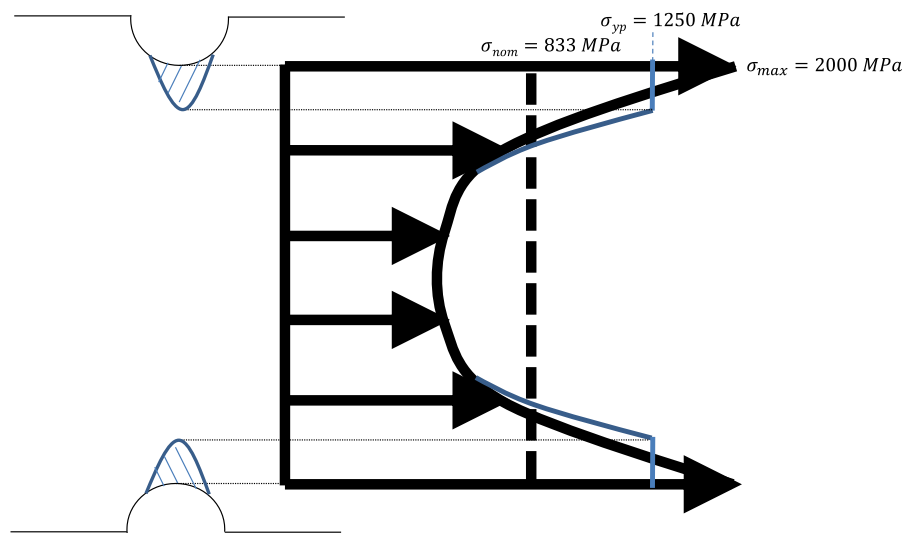


**9. irudia. Material elastiko-plastiko perfektu baten tentsio-deformazio diagrama.**

***Egileen irudia.***

Piezaren tentsio maximoa  $\sigma_{max} = 2000 \text{ MPa} > \sigma_{yp} = 1250 \text{ MPa}$  denez, a priori pentsa liteke piezaren hutsegite harikorra gertatuko dela. Hala ere, 9. irudiko diagramaren arabera, piezaren puntu bat isurpen-tentsiora iristen denean, ez da gai tentsio gehiago absorbatzeko; beraz, tentsio gehigarri guztia inguruko puntuek absorbatzen dute, 10. irudian ageri den bezala. Hala, EF ataleko gune txiki bat plastifikatzen da E eta F puntuen inguruan (eremu marratua 10. irudiko atalean). Eremu plastifikatu horretako puntuek deformazio infinitu bateraino jariatzeko joera dute, baina gune horrek piezaren EF erresistentzia-sekzioaren zati txiki bat baino ez du hartzen; beraz, sekzioaren zatirik handiena isurpen-tentsioaren azpitik dago, eta, beraz, erregimen elastikoan eta deformazio txikiekin. Hala, EF sekzio erresistentea bere osotasunean aztertzen bada, zati txiki batek deformazio plastiko eta infiniturantz

jotzen du, baina gainerako sekzioak deformazio elastiko eta txiki bat baino ez du, eta horren ordeztu plastifikatutako gunea “atxikitzen” ditu. Beste era batera esanda, deformazio txiki eta elastikoak deformazio infinitu eta plastikoei “ezartzen” zaizkie, eta, hala, sekzioa gutxi eta elastikoki deformatzen dela bermatzen da, sekzioaren eta, ondorioz, piezaren hutsegitea saihesteko. Bistan denez, horrek balio du baldin eta plastifikatutako gunea sekzio erresistentearen zati txiki bat baino hartzen ez badu: zenbat eta handiagoa izan plastifikatutako gunea, orduan eta handiagoa izango da pieza deformatzeko joera, asko eta modu plastikoan.



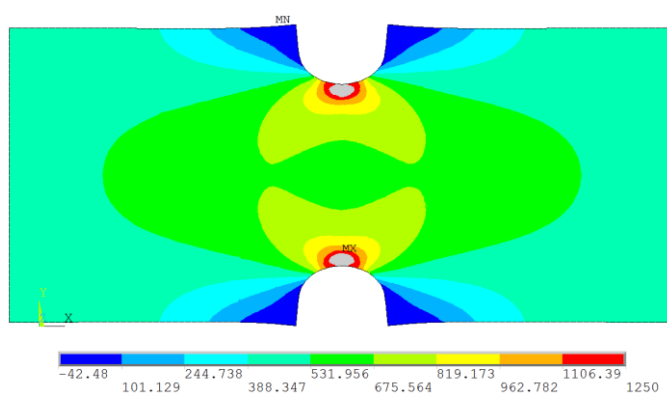
**10. irudia. Erdialdeko EF sekzioaren tentsioen banaketa. Egileen irudia.**

Eskuzkoa den kalkulu horretan,  $\sigma_{max}$  tentsio maximoa kalkula badaiteke ere (betiere aztertutako kasurako  $K_t$ -ren balioa ezagutzen bada), ez da ezagutzen tentsioen banaketa, eta, beraz, ezin da jakin plastifikatutako gunea behar bezain lokala (txikia) izango den, sekzio erresistentearen gainerakoek piezaren hutsegiterik ez dagoela bermatzeko, edo, aitzitik, hutsegitea eragiteko bezain handia izango den. Gutxi gorabeherako kalkulu gisa, oro har, tentsio nominala eta isurpen-tentsioa konparatzea onartzen da. Hala,  $\sigma_{nom} < \sigma_{yp}$  bada, gune plastifikatua oso lokala izango dela eta piezak ez duela huts egingo onartzen da. Irizpide horren arabera, aztertzen ari garen adibidean, piezak ez luke huts egingo,  $\sigma_{nom} = 833 \text{ MPa} < \sigma_{yp} = 1250 \text{ MPa}$  baita.

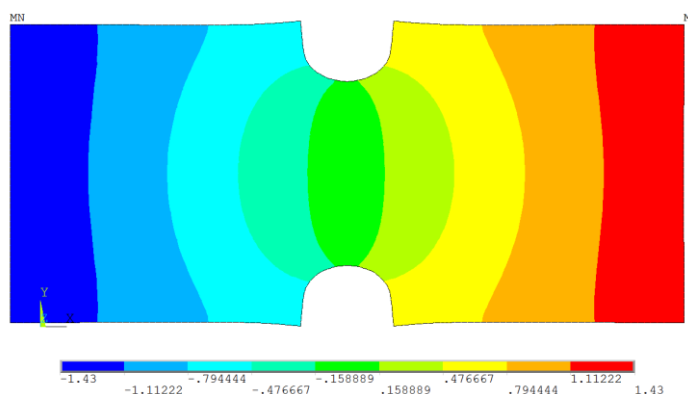
Kalkulu hori eskuarki onartzen den arren, ez da ahaztu behar kalkulu sinplifikatua dela, eta, beraz, mugak dituela. Oso zorrotzak ez diren deformazio onargarriak dituen



erantzukizun txikiko pieza batean, kalkulu hori nahikoa dela jo daiteke. Hala ere, demagun 7. irudiko pieza oso deformazio onargarri murriztaileak dituen egitura edo makina baten pieza kritikoa dela. Kasu horretan, ezinbestekoa izango da analisi-metodo aurreratuago bat erabiltzea, hala nola, Elementu Finituen Metodoa, informazio zehatza emango baitu pieza osoko tentsioen banaketari buruz eta pieza horren azken deformazioari buruz (eta haren izaera elastiko edo plastikoari buruz), 10. irudiko emaitzen arabera. Informazio xehe horri esker, piezaren portaera zehatza ezagutu ahal izango da, eta, horretan oinarrituta, haren onargarritasuna balioztatu, ezarritako diseinu-baldintzen arabera.



a)



b)

**11. irudia. 6. Irudiko piezaren Elementu Finitu bidezko analisiaren emaitzak: a) Tentsio normala (MPa) eta b) X norabidean desplazamendua (mm). Egileen irudia.**

Azkenik, aurkeztutako kalkuluak ( $\sigma_{nom}$  eta  $\sigma_{yp}$  arteko konparazioak egitea hutsegitea zehazteko) beste muga nabarmen bat du:  $\sigma_{nom}$  tentsio nominala kalkulatzeko Materialen Erresistentziaren adierazpenak erabiltzeko beharrezkoak diren hipotesi sinplifikatuak betetzen dituzten pieza eta karga-kasu sinpleei soilik aplikatu daiekie.

Hala, 3. irudiko pieza liraina ez balitz edo kargaren kasua konplexuagoa balitz, ezin izango litzateke  $\sigma_{nom}$  tentsio nominala kalkulatu  $\sigma_{yp}$  isurpen-tentsioarekin konparatzeko.

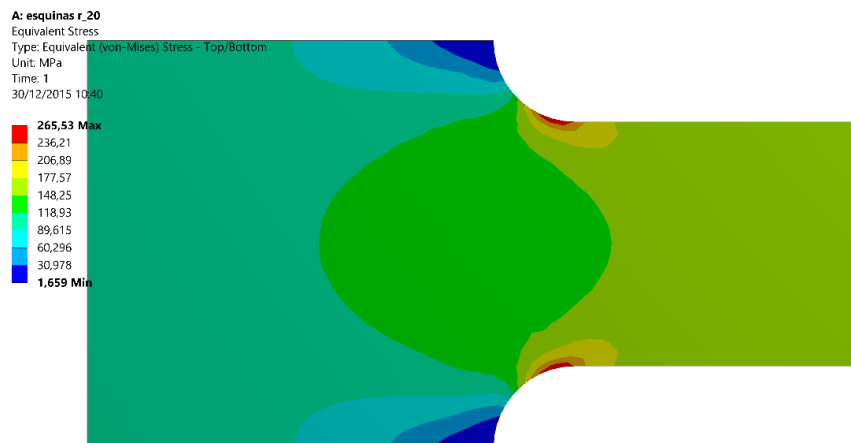
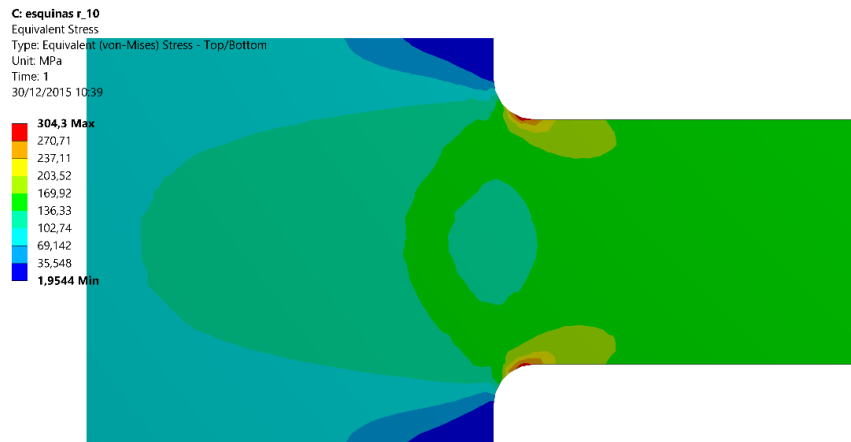
Laburbilduz, hutsegite harikor eta hauskorretarako hutsegite-irizpideak hauek dira:

- a) Hutsegitea ez da hauskorra izango  $\sigma_{max} = K_t \cdot \sigma_{nom} < \sigma_u$  bada. Piezaren tentsio maximoa  $\sigma_u$ -ren baliora iristen denean, puntu horretan pitzadura bat agertzen da, bat-batean hedatuz eta pieza hautsi egiten da.
- b) Ez da hutsegite harikorrik emango  $\sigma_{nom} < \sigma_{yp}$  bada; izan ere, baldintza hori betetzen bada, sekzio erresistentearen oso zati txiki bat plastifikatuko duela soilik onartzen da; gainerako sekzioa isurpenaren azpitik egongo da (portaera elastikoa izango du), eta, ondorioz, pieza nagusiki elastikoki deformatuko da, hau da, deformazio txiki ez-iraunkor batzuk, guztiz onargarriak (piezak ez du hutsik egingo).  $\sigma_{nom} < \sigma_{yp}$  baldintza betetzen ez bada, alderantzizko guztia gertatuko da: plastifikatutako eremua oso handia izango da, beraz, piezaren deformazioa handia, iraunkorra, eta, kasu honetan, ez da onargarria izango (piezaren hutsegitea emango da).

## 4. TENTSIO-KONTZENTRAZIOAK MURRIZTEKO TEKNIKAK

Ikusi dugunez, tentsio-kontzentrazioko guneek tentsioa nabarmen handitzen dute, eta, beraz, piezak errazago huts egin dezake. Beraz, ahal den neurrian, haren eragina murrizten saiatu behar da. Horretarako, hainbat teknika erabil daitezke:

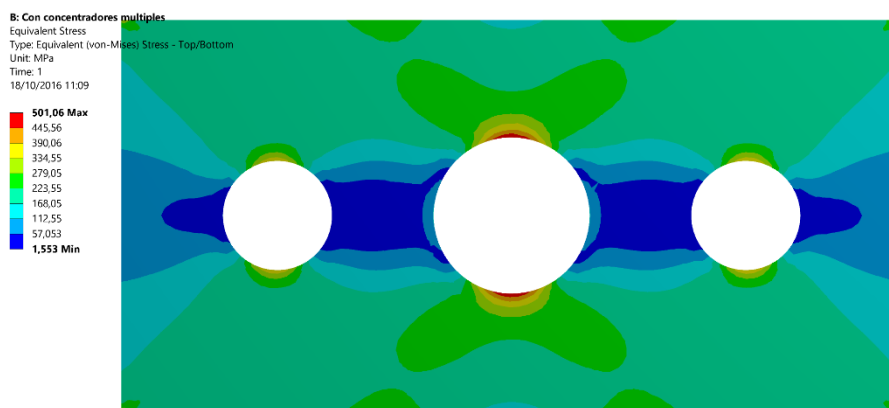
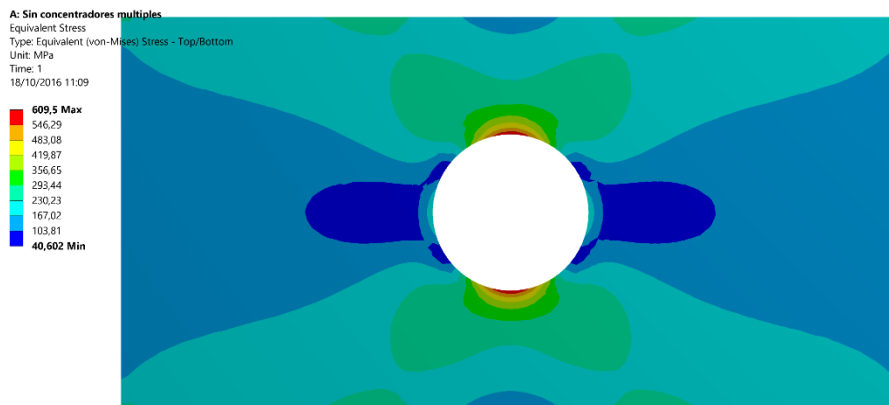
- a) Piezaren forma bat-batean aldatzen den guneetan, tentsio-kontzentrazioa murriztu egin daiteke, trantsizio hori leunduz. Adibidez 12. irudian, 304,3 MPa-tik 265,53 MPa-ra jaitsiko da tentsio maximoa, akordio-erradioa handitzean.



**12. irudia. Tentsio maximoa murriztea geometria aldatuz. Egileen irudia.**

b) Piezaren bermatze eta karga-ezartze puntuetan, ahalik eta karga ez-puntualena izatea gomendatzen da. Karga puntual batek tentsio infinituko kontzentrazioa suposatzen du, puntu batean  $F$  indarra aplikatzen ari baita (azalera infinitesimala), eta beraz  $\sigma = F/A = \infty$  da.

c) Azkenik, bada tentsio-kontzentragailu anizkoitzak erabiltzen dituen teknika bat. Teknika horren bidez, esfortzu-transmisioko lerroak “gidatuko” dira, tentsioen kontzentrazio-eremuak saihesteko. Adibidez, 13. irudiko piezan, alboko bi zulo (tentsio-kontzentragailuak) sartzen direnean, piezaren erdiko zuloko tentsio-kontzentrazioa murrizten da, eta, hala, tentsio maximoa txikiagotu egiten da. Hala ere, teknika horrek murriztu egiten du piezaren zurruntasuna materiala kenduz, eta kontu handiz erabili behar da.



*13. irudia. Tentsio maximoaren murrizketa zulo kontzentratzaile anitz ezarrita. Egileen irudia.*