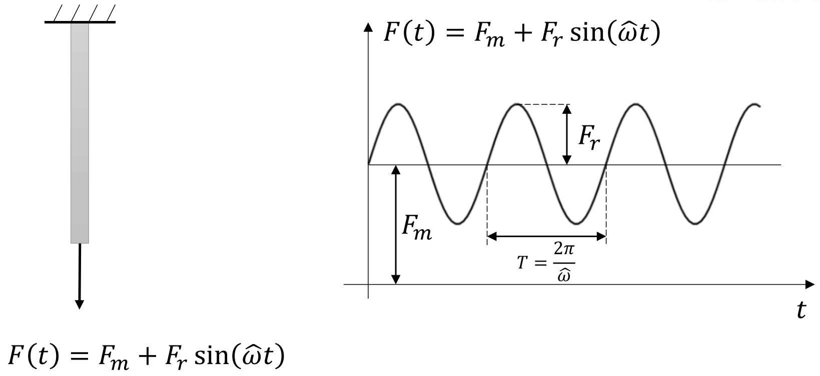
4. GAIA: NEKEA: TENTSIO UNIAXIAL ALTERNOA

1. EGITURA-ANALISI MOTAK ETA HUTSEGITE POSIBLEAK

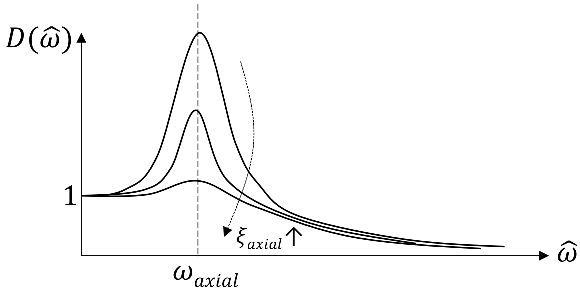
Makinen osagaiei ezartzen zaizkien esfortzu-eskaera gehienak aldakorrak dira denboran zehar. Izan ere, esan liteke ez dagoela eskaera konstanterik. Hala ere, sistema mekaniko baten onargarritasuna zehazteko aztertzean, askotan nahikoa izaten da kalkulu estatiko bat, non karga konstanteak hartzen baitira. Kasu adierazgarriena egitura baten kalkulu estatikoa izan daiteke, nahiz eta jasan behar dituen karga batzuk (adibidez, haize-kargak) konstanteak ez izan. Hala ere, kasu honetan eta beste askotan, baldintzek uzten badute, komenigarria da analisi estatikoa egitea, bere sinpletasunarengatik.

Sistema batek behar duen egitura-analisia eta izan dezakeen hutsegite-mota bi faktoreren menpe daude: batetik, sistemaren berezko izaeraren menpe; bestetik, sistemak jasan behar dituen esfortzuen menpe.

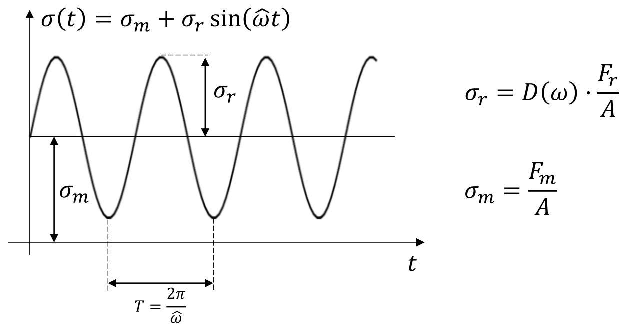
Kontzeptuak argitzeko, eta ikasmaterial honetan nekeari buruzko aztergaien sarrera gisa, 1. irudiko egitura sistema aztertuko da: habe bat landapenarekin eta denboran aldakorra den indar axial baten menpe (osagai ertaina eta alternoa dituena). Indarraren maiztasuna $\hat{w}$ da. Maiztasun natural axiala (sinplifikatzeko, bibrazio axialeko modu bakar bat dagoela suposatuko da) w_{axial} da, eta modu horren moteltzea, berriz, ξ_{axial} da. Modu honen anplifikazio dinamikoaren kurba 2. irudian ageri da. Luzapenak eta, beraz, habean sortzen diren tentsioak ere aldakorrak dira denboran, osagai batezbestekoarekin eta alternoarekin, 3 irudian adierazten den moduan. Tentsioaren batezbesteko osagaia $\sigma_m = F_m/A$ da, eta alternoa $\sigma_r = D(\hat{w}) \cdot F_r/A$, hau da, batezbesteko tentsioaren magnitudea F_m batezbesteko indarraren balioaren araberakoa baino ez da; tentsio alternoaren magnitudea, berriz, F_r indar alternoaren balioaren eta $D(\hat{w})$ anplifikazio dinamikoaren balioaren araberakoa da.



1. irudia. Indar axial alternoa aplikaturiko habea landapenarekin. Egileen irudia.



2. irudia. Bibrazio-modu axialaren anplifikazio dinamikoaren kurba. Egileen irudia.



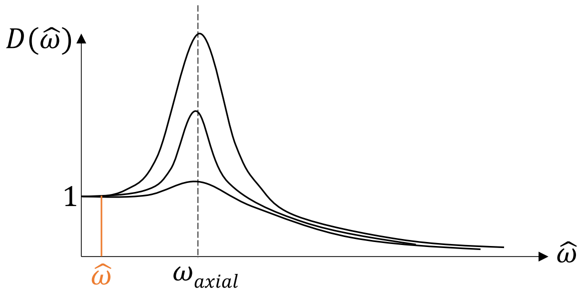
3. irudia. Landatutako habearen tentsio egoera. Egileen irudia.

Jarraian, habean gerta daitezkeen hutsegite motak deskribatzen dira. Tentsio alternoaren $\sigma_r = D(\hat{w}) \cdot F_r/A$ eta batezbesteko tentsioaren $\sigma_m = F_m/A$ arteko magnitudea aztertzea da gakoa. $\sigma_r << \sigma_m$ betetzen bada, σ_r tentsio alternoa mespretxatu egin daiteke, eta, beraz, batezbesteko tentsio bakarra egongo litzateke (konstantea denboran), eta piezaren hutsegitea (baldin badago) estatikoa izango da; bestela, σ_r tentsio alternoa ezin da mesprezatu, eta, hala, batezbesteko tentsioa + tentsio alternoa egongo litzateke (aldakorra denboran zehar), eta piezaren hutsegitea (baldin badago) nekekoa izango litzateke.

Horren arabera, 5 kasu bereizten dira:

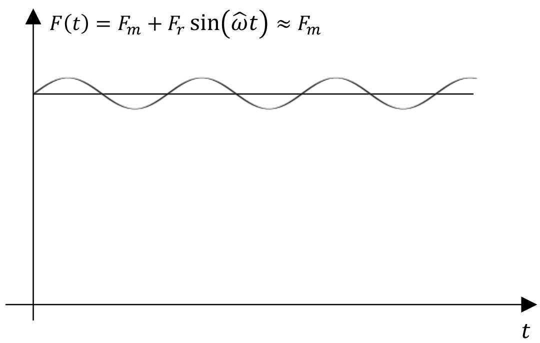
a) $/w_{axial}$ txikia; ξ_{axial} berdin da (indiferente); F_r/F_m txikia

Alde batetik, ŵ eszitazio-maiztasuna nabarmen txikiagoa da w_{axial} maiztasun naturala baino (ŵ/w_{axial} txikia); beraz, anplifikazio dinamikoa D(ŵ)≈1 da, ξ_{axial} moteltze modalaren balioa kontuan hartu gabe.



4. irudia. Anplifikazio dinamikoaren grafikoa, a) kasua. Egileen irudia.

Bestalde, 5. irudian ikus daitekeenez, indarraren F_r osagai alternoa indarraren F_m batezbesteko osagaia baino askoz txikiagoa da (F_r/F_m txikia).

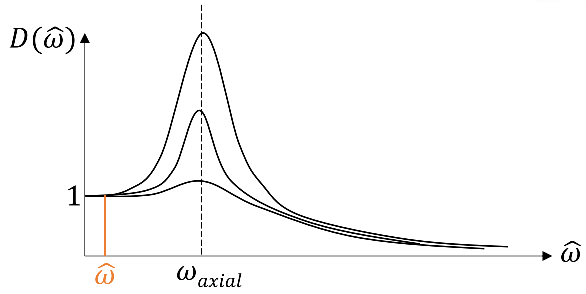


5. irudia. Indar alternoaren anplitudea batez besteko indarraren aurrean a) kasuan. Egileen irudia.

Horren ondorioz, $\sigma_r=F_r/A \cdot D(\hat{w}) \approx F_r/A$ tentsio alternoa mespretxatu egin daiteke $\sigma_m=F_m/A$. batezbesteko tentsioaren aurrean. Ondorioz, piezaren tentsio-egoera $\sigma(t)=\sigma_m=F_m/A$ da, denboran zehar konstantea: egin beharreko analisia estatikoa da eta habeak izan dezakeen hutsegitea estatikoa izango da.

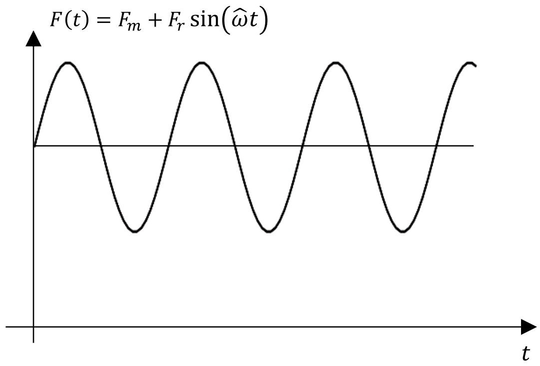
b) $\hat{w}/w_{axial}$ txikia; ξ_{axial} berdin da (indiferente); F_r/F_m ez txikia

Alde batetik, ŵ eszitazio-maiztasuna nabarmen txikiagoa da w_{axial} maiztasun naturala baino (ŵ/w_{axial} txikia) beraz, anplifikazio dinamikoa D(ŵ)≈1 da, ξ_{axial} moteltze modalaren balioa kontuan hartu gabe (6. irudia).



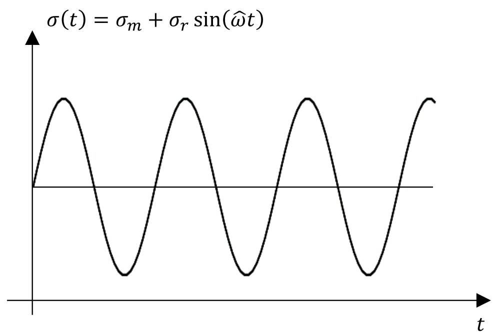
6. irudia. Anplifikazio dinamikoaren grafikoa, b) kasua. Egileen irudia.

Bestalde, irudian ikus daitekeenez, indarraren F_r osagai alternoa ez da indarraren F_m batez besteko osagaia baino askoz txikiagoa (F_r/F_m ez da txikia).



7. irudia. Indar alternoaren anplitudea batezbesteko indarraren aurrean b) kasuan. Egileen irudia.

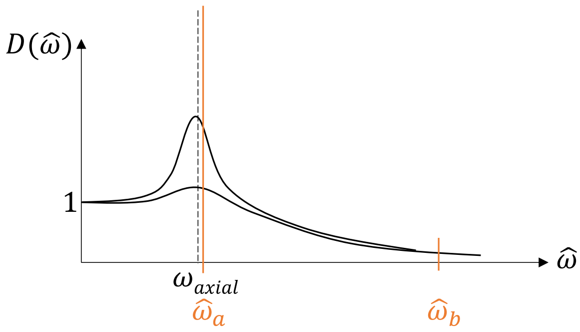
Ondorioz, $\sigma_r = F_r/A \cdot D(\hat{w}) \approx F_r/A$ tentsio alternoa ez da mespretxatzen $\sigma_m = F_m/A$ batezbesteko tentsioaren aurrean. Ondorioz, piezaren tentsio egoera $\sigma(t) = \sigma_m + \sigma_r \sin(\hat{w}t) = F_m/A + F_r/A \sin(\hat{w}t)$, alternoa da denboran (8. irudia), egin beharreko analisia kuasiestatikoa da (hau da, tentsio aldakorra, baina 1 balioko anplifikazio dinamikoarekin), eta habearen hutsegite posiblea nekekoa izango da.



8. irudia. b) kasuaren ondoriozko tentsioa. Egileen irudia.

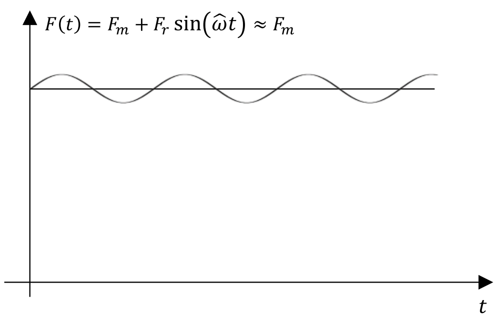
c) $\hat{w}/w_{axial}$ *ez txikia;* ξ_{axial} *txikia;* F_r/F_m *txikia*

Alde batetik, ŵ eszitazio-maiztasuna ez da w_{axial} maiztasun naturala baino askoz txikiagoa ($\hat{w}/w_{axial}$ ez txikia), eta, beraz, anplifikazio dinamikoak oso balio desberdinak har ditzake (9. irudia). $\hat{w}\approx w_{axial}$ bada eta kontuan izanda ξ_{axial} txikia dela, D(ŵ)-k oso balio altua izango du. $\hat{w}>>w_{axial}$ betetzen bada ordea, D(ŵ) oso baxua litzateke, zerotik hurbil.



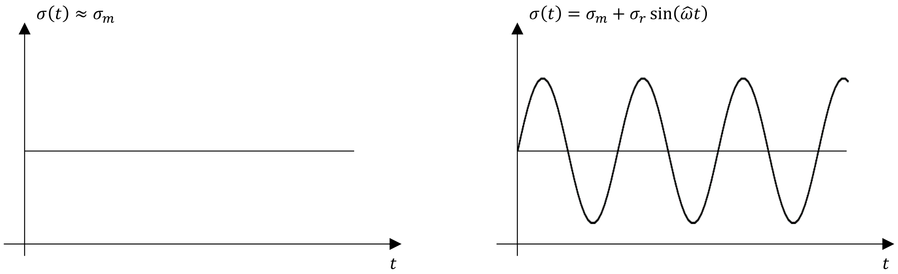
9. irudia. Anplifikazio dinamikoaren grafikoa, c) kasua. Egileen irudia.

Bestalde, 10. irudian ikus daitekeenez, indarraren F_r osagai alternoa indarraren F_m batezbesteko osagaia baino askoz txikiagoa da (F_r/F_m txikia).



10. irudia. Indar alternoaren anplitudea batez besteko indarraren aurrean c) kasuan. Egileen irudia.

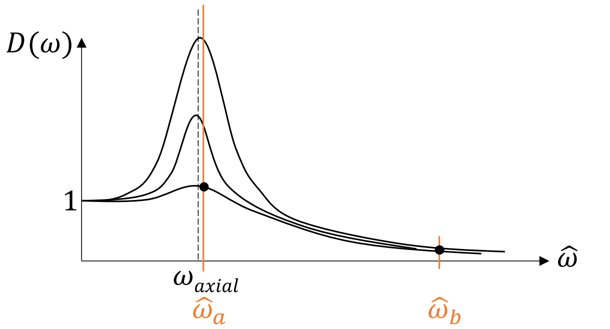
Ondorioz, oro har, F_r/F_m txikia eta D(ŵ) txikia denez, $\sigma_r=F_r/A\cdot D$ (tentsio alternoa) mespretxatu egin daiteke $\sigma_m=F_m/A$ batezbesteko tentsioaren aurrean; piezaren tentsio egoera σ(t)≈σm=Fm/A da, egin beharreko analisia estatikoa da eta hutsegitea estatikoa izan daiteke. Hala ere, $\hat{w}\approx w_{axial}$ den heinean, D(ŵ) oso handia da; hortaz, $\sigma_r=F_r/A$ (tentsio alternoa) ezin da mespretxatu $\sigma_m=F_m/A$ batezbesteko tentsioaren aurrean; piezaren tentsio egoera $\sigma(t)=\sigma_m+\sigma_r\sin(\hat{w}t)=F_m/A+F_r/A\cdot D(\hat{w})\sin(\hat{w}t)$ (11. irudia). Egin beharreko analisia dinamikoa da eta D(ŵ)ren balioa kalkulatzeko eta hutsegite posiblea nekekoa izango da.



11. irudia. kasuaren ondoriozko tentsioa. Egileen irudia.

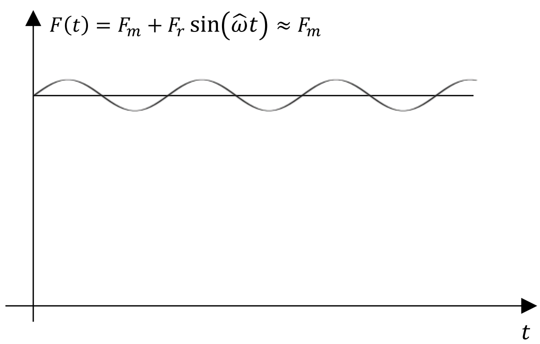
d) $\hat{w}/w_{axial}$ *ez txikia;* ξ_{axial} *handia;* F_r/F_m *txikia*

Alde batetik, $\hat{w}$ eszitazio-maiztasuna ez da w_{axial} frekuentzia naturala baino askoz txikiagoa ($\hat{w}/w_{axial}$ ez txikia); beraz, anplifikazio dinamikoak oso balio desberdinak har ditzake (12. irudia). Hala ere, ξ_{axial} moteltzea axial handia denez, $D(\hat{w})$ anplifikazio dinamikoak ez du inoiz balio handia izango.



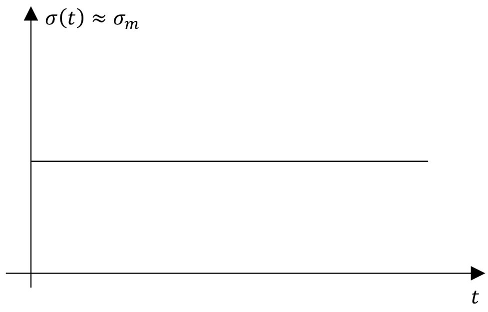
12. irudia. d) kasuaren anplifikazio dinamikoaren grafikoa. Egileen irudia.

Bestalde, 13. irudian ikus daitekeenez, indarraren F_r osagai alternoa indarraren F_m batezbesteko osagaia baino askoz txikiagoa da (F_r/F_m txikia).



13. irudia. Indar alternoaren anplitudea batez besteko indarraren aurrean, d) kasuan. Egileen irudia.

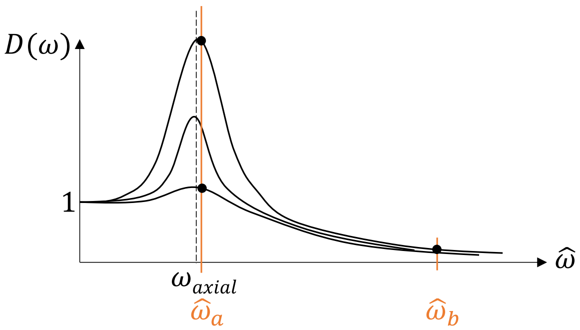
Ondorioz, oro har, F_r/F_m txikia eta $\sigma_r = F_r/A \cdot D(\hat{w})$ (tentsio alternoa) mespretxatu egin daiteke $\sigma_m = F_m / A$ batezbesteko tentsioaren aurrean; piezaren tentsio egoera $\sigma(t) \approx \sigma m = F_m / A$ da, egin beharreko analisia estatikoa da eta hutsegitea estatikoa izan daiteke.



14. irudia. d) kasuaren ondoriozko tentsioa. Egileen irudia.

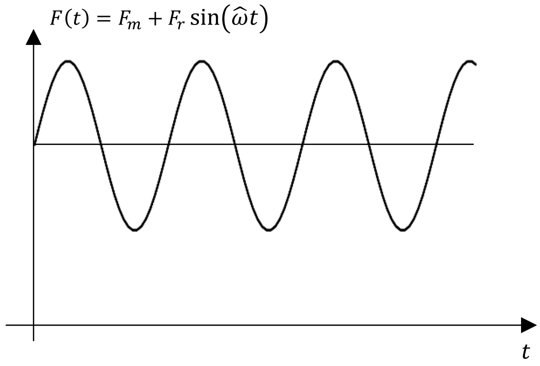
e) $\hat{w}/w_{axial}$ ez txikia; ξ_{axial} berdin da (indiferente); F_r/F_m ez txikia

Alde batetik, $\hat{w}$ eszitazio-maiztasuna ez da w_{axial} frekuentzia naturala baino askoz txikiagoa ($\hat{w}/w_{axial}$ ez txikia) beraz, anplifikazio dinamikoak oso balio desberdinak har ditzake. ξ_{axial} moteltze axiala handia bada, $D(\hat{w})$ anplifikazio dinamikoak ez du inoiz balio handirik izango; baina ξ_{axial} moteltzea axiala txikia bada $D(\hat{w})$ anplifikazio dinamikoak balio oso handia izango du, baldin eta $\hat{w} \approx w_{axial}$ (ikusi 15. irudia).



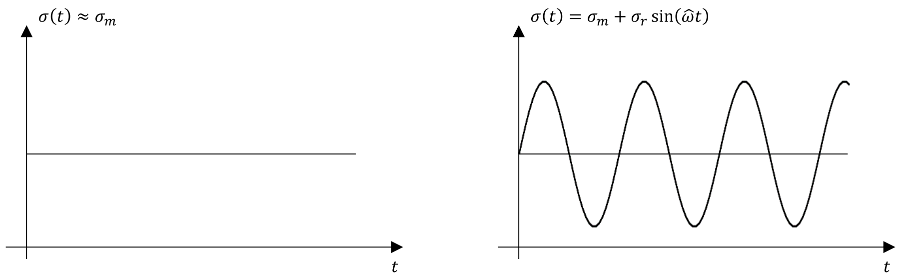
15. irudia. Anplifikazio dinamikoaren grafikoa, e) kasua. Egileen irudia.

Bestalde, irudian ikus daitekeenez, indarraren F_r osagai alternoa ez da indarraren F_m batez besteko osagaia baino askoz txikiagoa (F_r/F_m ez da txikia).



16. irudia. Indar alternoaren anplitudea batez besteko indarraren aurrean e) kasuan. Egileen irudia.

Ondorioz, orokorrean, $\sigma_r=F_r/A\cdot D(\hat{w})$ tentsio alternoa ezin da mespretxatu $\sigma_m=F_m/A$ batez besteko tentsioaren aurrean. Piezaren tentsio-egoera $\sigma(t)=\sigma_m+\sigma_r\sin(\hat{w}t) =F_m/A+F_r/A\cdot D(\hat{w})\sin(\hat{w}t)$ (ikusi 17. irudia - eskuma), egin beharreko analisia dinamikoa da ($D(\hat{w})$-ren emaitza zehatza lortzeko) eta hutsegite posiblea nekekoa izango da. Hala ere, kasuren batean, gerta daiteke $D(\hat{w})$ oso txikia izatea, eta tentsio alternoa $\sigma_r=F_r/A\cdot D(\hat{w})$ mespretxagarria izatea $\sigma_m=F_m/A$ batezbesteko tentsioaren aurrean; piezaren tentsio egoera $\sigma(t)=\sigma_m$ da; (17. irudia - ezkerra), egin beharreko analisia estatikoa da, eta hutsegitea estatikoa izan daiteke.



17. irudia. e) kasuaren ondoriozko tentsioa. Egileen irudia.

Laburpen gisa, azaldu berri diren 5 kasuen eskema ematen du.

W_{axiala}	F_r/F_m	Axiala		EGITURA-AZTERKETA	HUTSEGITE POSIBLEA
Txikia	Txikia	Berdin da	→	Estatikoa	Estatikoa
Txikia	Ez txikia	Berdin da	→	Kuasiestatikoa	Nekea
Ez txikia	Txikia	Txikia	→	Litekeena estatikoa dinamikoaren aurrean	Seguraski estatikoa Seguraski ez- nekea
Ez txikia	Txikia	Handia	→	Oso litekeena da estatikoa izatea	Oso litekeena da estatikoa izatea
Ez txikia	Ez txikia	Berdin da	→	Dinamikoa	Nekea izan daiteke

1. taula. Analisi-motak eta hutsegite posibleak. Egileen taula.

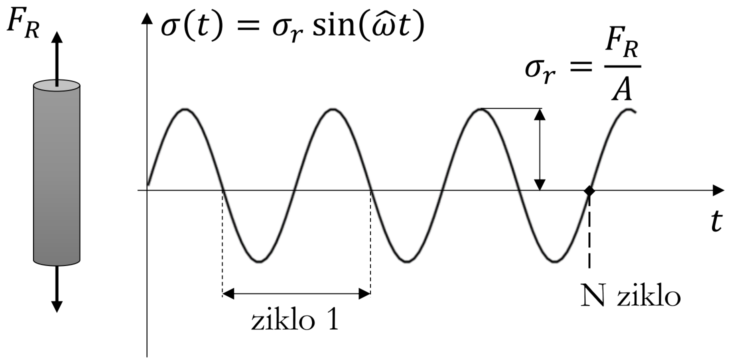
Ahal den neurrian, saihestu egin behar da egitura-sistema batean $D(\hat{w})$ anplifikazio dinamiko handia agertzea. Adibidez, ardatz batean, fenomeno horrek deformazio oso handiak eragingo lituzke, bertan muntatutako elementuen (engranajeak, errodamenduak…) funtzionamendu egokia arriskuan jarriko luketenak, eta, gainera, tentsio handiak agertuko lirateke, ardatzaren bizitza erabilgarria nabarmen laburtuko luketenak. Alde horretatik, diseinuaren irizpide orokor gisa, sistema baten eskakizunak onartzen dituzten maiztasunak, maiztasun naturalen oso azpitik egotea lortu nahi da, horrela $D(\hat{w})$ (anplifikazio dinamikoa 1 izan dadin gutxi gorabehera (1. taulako 2. kasua). Esfortzuen $\hat{w}$ maiztasunak direna direnez (ezin da aukeratu sisteman eragiten duten kargen maiztasuna), $D(\hat{w})\approx 1$ lortzeko estrategiak maiztasun naturalak eta $\hat{w}$ sistemaren balioak urruntzen saiatzen da. Horretarako, sistemaren geometria aldatzen da haren zurruntasuna eta/edo masa aldatzeko, maiztasun naturalen balioa bi parametro horien araberakoa baita.

Ikasmaterial honetan lantzen den nekeari dagokionez, beti pentsatuko da pieza diseinatze-irizpide hori $D(\hat{w})\approx 1$ betetzeko diseinatu dela, hau da, 1. taulako 2. kasuan gaudela (analisi kuasiestatikoa).

2. NEKEAREN ONDORIOZKO HUTSEGITEA

Aurreko atalean azaldu den bezala, tentsio alternoak jasaten ari den (denboran aldakorra den tentsio-egoera) pieza batek huts egin dezake nekearen ondorioz. Hutsegite hori ez da gertatzen une batean tentsio-balio onargarri jakin bat lortzen delako, estatikan gertatzen den bezala. Nekeak eragindako hutsegitea gertatzen da, denboran zehar tentsio aldakorreko egoera bat behin eta berriz aplikatzean. Piezaren esfortzu handienak dituen puntuan (tentsio handienarekin) pitzadura bat agertzen delako uneren batean; pitzadura hori pixkanaka hedatzen da, harik eta N karga-zikloan pitzadura sekzio erresistente osora zabaldu eta haustura gertatu arte (ikusi 18. irudia). Ikasmaterial honen noraino kotik kanpo geratzen da pitzaduraren agertze- eta hedatze-prozesua aztertzea; ikasmaterial honetan, pieza nekearen ondorioz apurtzen den N ziklo-kopurua kalkulatzen da soilik.

Nekeak eragindako hutsegitea eta hutsegite estatikoarekiko duen aldea hobeto ulertzeko, demagun trakzioa duen pieza bat dugula, $\sigma=F/A$ tentsio normalarekin. F indarra denboran konstantea bada, tentsioa estatikoa da eta hutsegite estatikoa gertatuko da $\sigma=F/A\geq\sigma_{yp}$ edo $\sigma=F/A\geq\sigma_u$, denean, materiala harikorra edo hauskorra denean, hurrenez hurren. F indarra denboran aldakorra bada, adibidez, guztiz alternoa (batez besteko osagai nulua), hutsegitea N zikloren buruan gertatzen da, $\sigma_r=F_r/A$ σ_{yp} edo σ_u baino askoz tentsio-balio txikietarako (gogoratu $D(\hat{w})\approx 1$, onartzen baitu pieza eremu kuasiestatikoan lanean ari dela); eta jakina, zenbat eta handiagoa izan σ_r, orduan eta txikiagoa izango da N ziklo kopurua.



18. irudia. N zikloren ondoren nekeak eragindako hutsegitea. Egileen irudia.

Zoritxarrez, ez dago teoria zorrotzik, saiakuntza tipo batekin batera, pieza baten neke-bizitza modu sinplean zehazteko, estatikan gertatzen den bezala (trakzio-saiakuntza eta hutsegite-teoriak hor daude). Bi arrazoi nagusi daude:

a) Pieza baten neke-hutsegitea faktore askoren araberakoa da (gainazal-akabera, tamaina, lan egiteko modua...), eta faktore horien eragina ere zaila da modu zehatz batean kuantifikatzen.

b) Bi pieza berdin-berdinetan ere (gainazal-akabera bera, tamaina, lan-forma…), emaitzetan oso dispertsio handia ematen da, eta, beraz, tentsio-balio berak N ziklo-kopuru nahiko desberdinean eragin dezake hutsegitea.

Hala eta guztiz ere, metodo orokor bat garatu da, “metodo edo ikuspegi klasikoa” izenekoa. Metodo hori “lur orotako” metodo bat da, nekeko piezak modu kontserbadorean eta egiaztatutako emaitzekin diseinatzeko aukera ematen duena. Nolanahi ere, nekearen fenomenoaren konplexutasuna dela eta, metodo klasiko horren emaitzak zenbait erreserbarekin interpretatu behar dira. Izan ere, metodo klasiko horren ondoriozko diseinua ezin da behin betikotzat hartu, baizik eta hasierako diseinu edo aurrediseinu gisa. Ondoren, saiakuntza esperimentalen bidez balioztatu beharko da, funtzionamendukoen ahalik eta antzekoenetan, batez ere erantzukizun handiko piezetan.

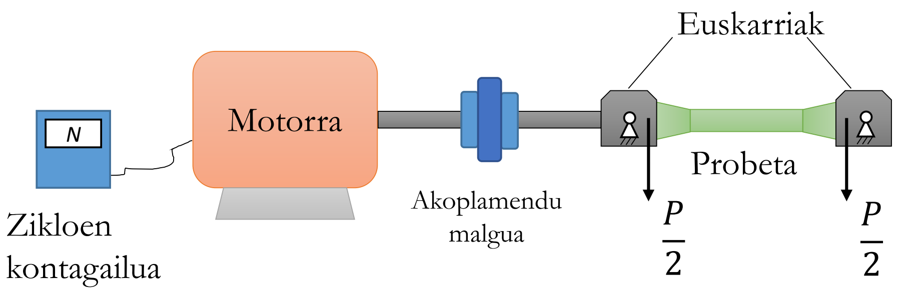
Demagun bizikleta-koadro bat diseinatu dela metodo klasikoaren bidez. Diseinu hori onargarritzat jotzeko, saiakuntza esperimentalen kanpaina bat egin behar da, 19. irudian adierazten den moduan. Lehenik eta behin, datuak eskuratzeko sistema bat muntatzen da, (a) koadroaren kargak kanpo ibilbidean neurtuko dituena; ondoren, karga horiek saiakuntza-banku batean (b) muntatutako prototipo bati aplikatzen zaizkio, eta nekeak eragindako hutsegitea (c) gertatzen den ala ez egiaztatzen da. 19-c irudian ikusten denez, soldadurako sekzio erresistentea pitzadura batek erabat zeharkatzeko eta, beraz, hausteko zorian dago, hau da, koadroaren neke-hutsegitea eragiteko zorian. Haustura hori gertatzen denean, koadroaren iraupena neurtzen da. Pieza honentzat behar den iraupena bete den edo ez kontuan hartuta, ontzat emango da koadroa edo berriz diseinatuko da; 19-c. irudiaren kasuan, berriz diseinatu beharko da soldaduraren eremua, edo, nekeari hobeto erantzuteko, soldaduraren prozedura hobetu.

19. irudia. Bizikleta baten koadroko neke-saiakuntza. Irudia ondorengo estekan sartuta ikus daiteke: https://www.youtube.com/watch?v=kPz0SkuMiRQ&t=22s

Azkenik, garrantzitsua da jakitea makinako elementu espezifiko batzuetarako, hala nola errodamenduetarako, engranajeetarako, uhaletarako eta abarretarako, neke-metodo propioak garatu direla, eta, askotan, kalkulu-arau edo -kodeak sortu dituztela. Metodo espezifiko horiek metodo klasikoarekin zerikusirik ez dutela dirudien arren, oinarrian dauden kontzeptuak berdinak dira. Horregatik, nekearen metodo klasikoa ezagutzeak ez du soilik pieza “orokorrak” diseinatzeko balio; aitzitik, oso lagungarria da makina-elementu “partikularragoen” neke-metodo espezifikoak ulertzeko, aipatutakoak bezalakoak.

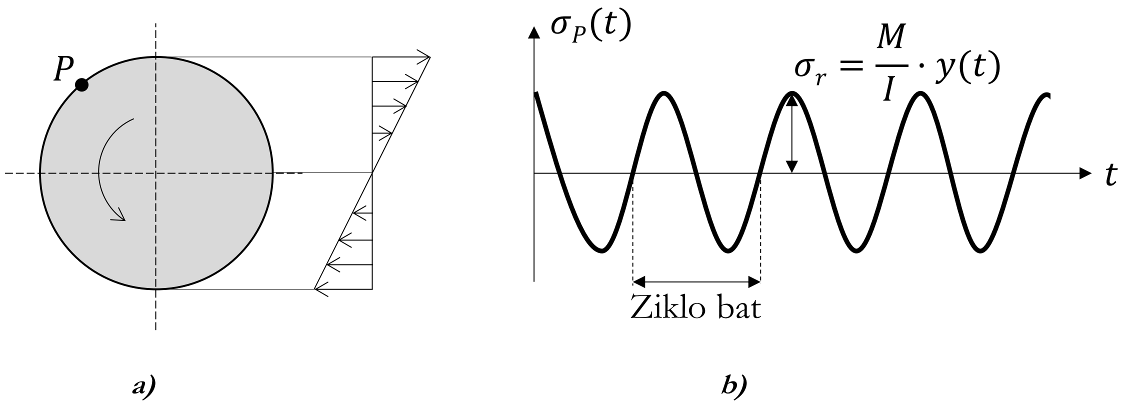
3. NEKE-SAIAKUNTZA

Aurrerantzean, nekearen metodo klasikoa aurkeztuko da. Metodo hori probeta baten gaineko saiakuntzan oinarritzen da, eta probeta horren bidez ezaugarritzen da materialaren neke-portaera. Hainbat saiakuntza daude, eta Moore-en probeta birakariarena da erabilienetako bat. Saiakuntza horretan, probeta bere muturretan bermatzen da, eta indar bertikalak aplikatzen zaizkio, flexio hutsaren eraginpean jarriz.



20. irudia. Neke-saiakuntza Moore-en probeta birakariarekin. Egileen irudia.

Piezaren esfortzu gehien jasango duen puntua probetaren erdiko sekzioan gainazalaren P puntu bat da. Sekzio honetan momentu makurtzailea maximoa da eta sekzioaren erradioa minimoa, eta ondorioz tentsioa maximoa da. Motor batek probeta birarazten du, eta P puntua zuntz trakzionatuenean (behean) egotetik konprimituenean (goian) egotera pasatzen da, zuntz neutrotik pasatuz (ikus 20. irudia). Ondorioz, P puntuaren tentsio-egoera aldatu egiten da, 21-b irudian adierazten den bezala.

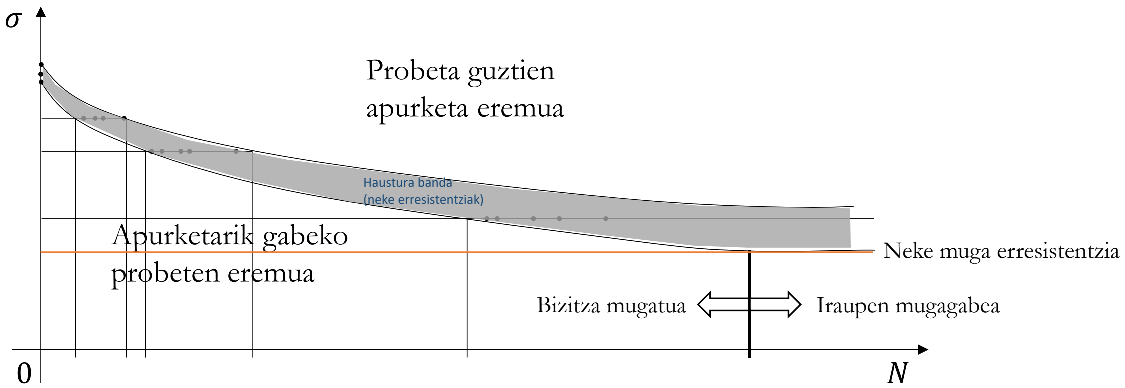


21. irudia. Tentsio-egoera alternoa Moore-en probeta birakariaren esfortzu gehien jasango duen puntua. Egileen irudia.

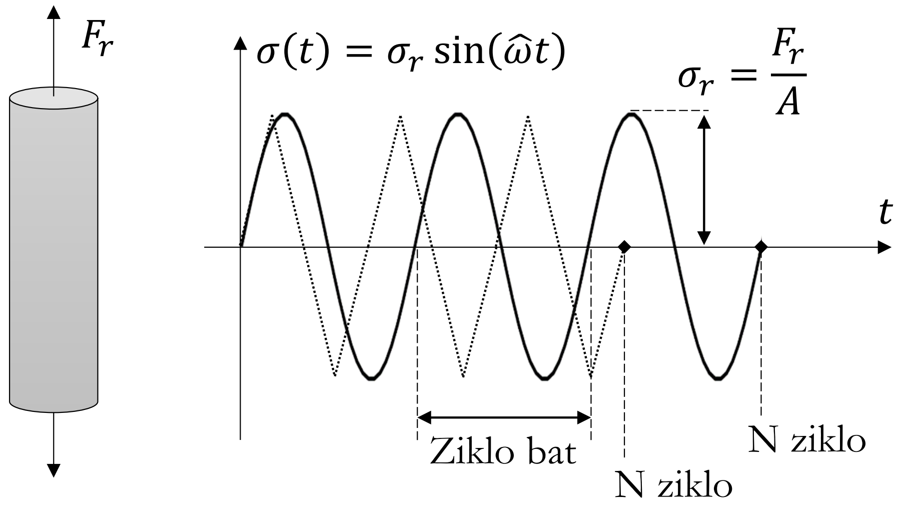
Hala, aurreko atalean azaldutakoaren arabera, pitzadura bat agertuko da P puntuan, eta pixkanaka hedatuz joango da pieza erdiko sekziotik hautsi arte, N tentsio-ziklo lortzen direnean. N ziklo-kopurua ziklo-kontagailu baten bidez neurtzen da, eta saiakuntza honetan tentsio-ziklo bat ardatzaren bira oso bati dagokio. Logikoa denez, σr tentsioaren balioa aldatzean, probetaren N iraupena ere aldatu egiten da; zenbat eta tentsio handiagoa, orduan eta iraupen txikiagoa izanez.

Saiakuntzaren baldintzak zorrotz zaindu behar dira; izan ere, kanpoko edozein bibrazio, talka, probetako urradura eta abarrek saiakuntzaren baldintzak alda daitezke, haren balioa kolokan jarriaz, batez ere kontuan hartuz pieza (edo probeta, kasu honetan) baten neke-bizitzan eragina duten faktore asko. Hala ere, kanpo-faktore guzti horiek kontu handiz kontrolatu arren, emaitzek dispertsio handia dute, nekearen fenomenoari atxikia. Hau da, bi probetak, berdin-berdinak, tentsio-maila berekoak eta saiakuntza-baldintza ideal berberetan, oso iraupen desberdinak izan ditzakete. Saiakuntza-emaitzetan (ikusi 22. irudia) probetaren hutsegite-puntuak erakusten ditu, non egiaztatzen baita σ_r tentsio-balio jakin bati N iraupen posibleen tarte bat dagokiola balio bakar baten ordez.

Probetaren N iraupena ez da tentsio alternoaren formaren edo periodoaren araberakoa. Hau da, nekearen ondorioetarako, bi tentsio-egoerak guztiz baliokideak dira, biek N zikloen iraupen bera izango baitute (dispertsioa alde batera utzita), nahiz eta bat triangeluarra eta bestea sinusoidala izan, eta batek besteak baino periodo handiagoa (ikusi 23. irudia). Hala ere, zenbat eta handiagoa izan periodoa, orduan eta denbora gehiago beharko da N ziklo horiek lortzeko, irudian ageri den bezala.

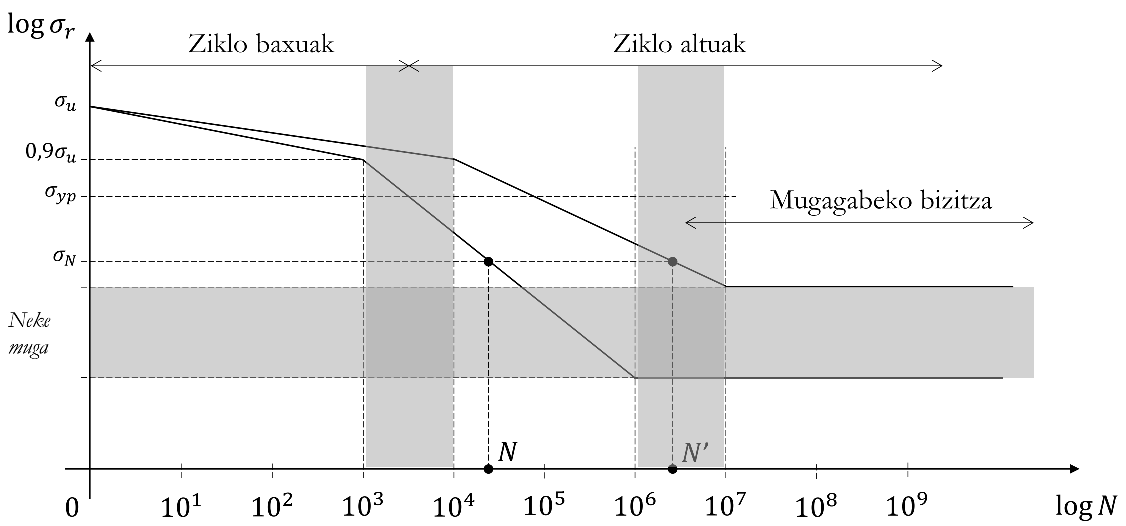


22. irudia. σ_r –N tentsio-iraupenaren grafikoa, Moore-en probeta birakariaren saiakuntzaren emaitza. Egileen irudia.



23. irudia. Nekearen baliokide diren tentsio-egoerak (N iraupen berarekin). Egileen irudia.

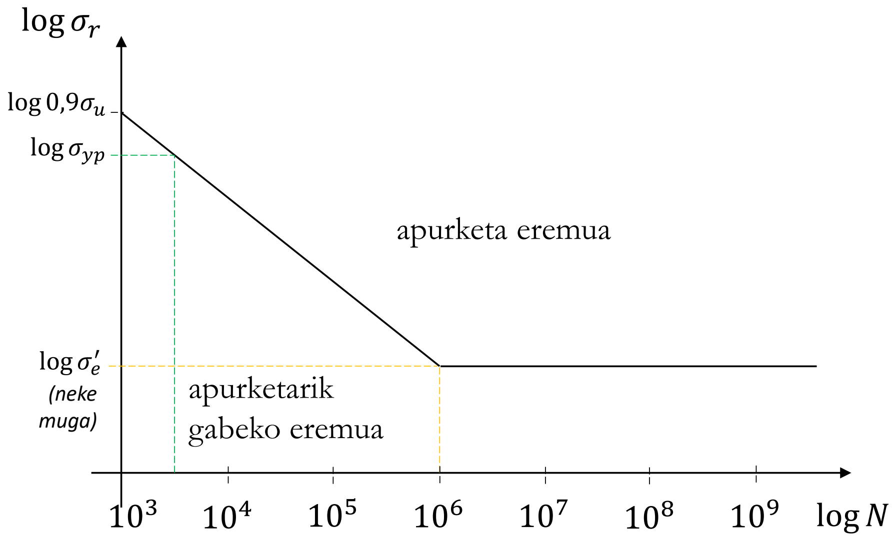
22. irudian eskala logaritmikoko σ_r–logN diagramaren hutsegite-puntuen hodeia irudikatzen bada, hodeiaren beheko eta goiko mugak gutxi gorabehera lerro zuzenak dira. 24. irudian ageri den irudikapen horri "Basquin kurba" deitzen zaio. Grafiko horretan bi eremu bereizten dira: ziklo baxuko eremua (N<10^3-10^4 ziklo) eta ziklo altuko eremua (N>10^3-10^4 ziklo). Ziklo baxuko eremua σ_r tentsioak σ_{yp} isurpen-tentsioa gainditu duen hutsegite-puntuei dagokie, eta, beraz, eremu hori aztertzean, materialaren portaera plastikoa hartzen da kontuan. σ_r ziklo altuetako eremuan σ_{yp} ez da gainditzen (milaka ziklo gutxi batzuetan izan ezik, eremuaren oso hasieran); beraz, materialak erregimen elastiko linealean lan egiten du, eta horrek asko errazten du haren azterketa. Ziklo altuko zona honetan, "neke-muga" jakin batetik beherako σ_r tentsio-balioetan (ikusi 25. irudia), probetak bizitza mugagabea edo iraupen mugagabea du (iraupena: N=∞).



24. irudia. Logσ_r –logN grafikoa (Basquinen kurba), Moore-en probeta birakariaren saiakuntzaren emaitza. Egileen irudia.

Ikasmaterial honetan ziklo altuen eremua baino ez da aztertuko, oso gutxitan diseinatzen baita makinaren pieza edo elementu bat, ehunka edo milaka ziklo iraun dezan. Izan ere, elementu asko bizitza infinituan diseinatzen dira, hala nola ardatzak, dagokion gaia aztertzean ikusiko den bezala. Bestalde, ziklo baxuko nekean, materialaren portaera plastikoak esku hartzen du, eta nabarmen zailtzen du haren azterketa. Azken finean, ikasmaterial honetan azaltzen den metodo klasikoa ziklo altuetarako bakarrik da aplikagarria; behe-zikloetan, beste irizpide eta metodo batzuk erabiltzen dira, eta horiek aztertzea ikasmaterial honen norainokotik kanpo geratzen da.

24. irudian ikus daitekeenez, neke-saiakuntzaren emaitzak oso sakabanatuta daude, eta, beraz, printzipioz, emaitza horien azterketa estatistikoa egin beharko litzateke. Hala ere, kalkuluak egitean, sinpletasuna eta erosotasuna direla eta, balio deterministekin lan egitea komeni da. Horregatik, dispertsio-banda osoarekin lan egin beharrean, emaitzen bandaren erdiko lerroa erabiltzen da; hutsegiteen erdiak erdiko lerro horren gainetik daude, eta beste erdiak beherago, hau da, %50eko fidagarritasunari dagokion lerroa da. Une horretatik aurrera landuko den erdiko lerro hori goiko zikloetarako taulan ageri da. Esana dugunez, milaka ziklo gutxi batzuetarako σ_r tentsioak σ_{yp} isurpen-tentsioaren balio gainditzen du, eta, beraz, metodo klasikoa ez litzateke baliozkoa izango (ziklo txikiei dagozkien metodoak aplikatu beharko lirateke). Era berean, σ_e' neke-mugaren tentsioa $N=10^6$ ziklori dagokie: probetako tentsioa $\sigma r=\sigma e'$ bada, iraupena 10^6 ziklotakoa izango da; probetako tentsioa $\sigma_r<\sigma_e'$ bada, probetaren iraupena zikloak dira (bizitza infinitua, hau da, probetak inoiz ez du huts egingo nekeagatik). Lerro hori oso ohikoa da, baina kontuan izan behar da kurba orokorra dela; izan ere, saiakuntzek frogatzen dute altzairu bakoitzak bere neke-kurba duela, eta, aleazio kasu batzuetan, nahiko desberdinak izan daitezke elkarren artean. Alde horretatik, kurbaren erabilera onargarria izan daiteke aldez aurreko kalkulu bat egiteko edo erantzukizun gutxiko piezak diseinatzeko, baina zehaztasun handiagoa behar izanez gero, piezaren altzairu zehatzarentzako neke-kurba lortu beharko litzateke saiakuntza bidez. Saiakuntza horiek oso luzeak eta garestiak dira, eta, horregatik, gutxitan egiten dira.

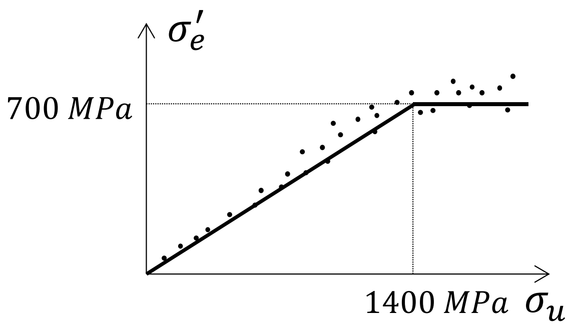


25. irudia. Logσr –logN grafikoa (Basquinen kurba), emaitzen bandaren %50eko fidakortasun muga hartuta. Egileen irudia.

Azken batean, probetaren bizitza finitu eta infinituaren arteko muga σ_e' da. Beraz, oso parametro garrantzitsua da. Saiakuntza espezifikoen bidez, materialaren σ_e' neke-mugaren eta σ_u hausturarekiko erresistentziaren arteko erlazioa lortu da. 26. irudian ageri dira emaitzak, non nekearen berezko ohiko dispertsioa ere ikusten baita.

$$\sigma_u < 1400MPa \rightarrow \sigma_e' = 0.5 \cdot \sigma_u \quad \text{(1a)}$$

$$\sigma_u \geq 1400MPa \rightarrow \sigma_e' = 700MPa \quad \text{(1b)}$$



26. irudia. σ_u haustura-tentsioaren eta σ_e neke-tentsioaren arteko erlazio esperimentala. Egileen irudia.

σ_r tentsio alternoaren balio jakin baten pean probetaren N iraupena lortzeko, nahikoa da triangelu-antzekotasuna planteatzea honako honetan:

$$\frac{log(0.9\sigma_u) - log\sigma_e'}{log10^6 - log10^3} = \frac{log\sigma_r - log\sigma_e'}{log10^6 - logN} \quad \text{(2)}$$

Edo, gauza bera dena:

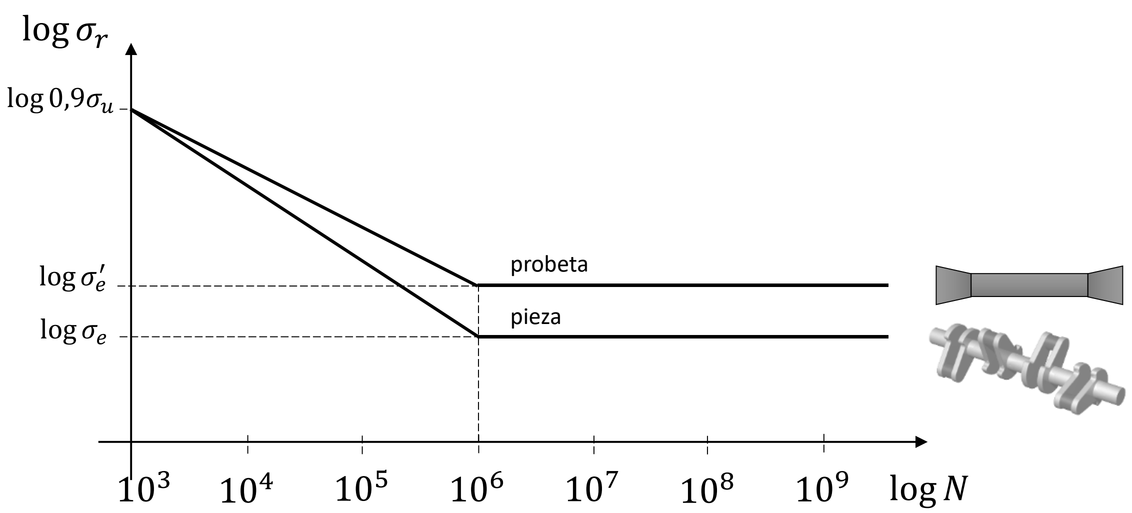
$$\frac{log(0.9\sigma_u) - log\sigma_e'}{log10^6 - log10^3} = \frac{log(0.9\sigma_u) - log\sigma_r}{logN - log10^3} \tag{3}$$

4. NEKEAREN MUGA ALDATZEN DUTEN KOEFIZIENTEAK

Aurreko atalean, Moore-en probeta birakariarentzako neke-saiakuntza eta saiakuntza horren emaitzak aurkeztu dira, (2) edo (3) ekuazioen bidez probetaren iraupena kalkulatzeko aukera ematen duen logσ_r –logN kurbarekin. Orain, probetako emaitza horiek edozein piezatara estrapolatu behar dira. Piezaren geometria, lan egiteko modua, azaleko akabera, tamaina, talka-maila eta beste, desberdinak izango dira probeta birakariaren aldean; izan ere, probetak forma eta neurri normalizatuak ditu, makurdurapean lan egiten du, gainazaleko leunketa-akabera ispilua du, talkarik ez dagoenean entseatzen da... Faktore horiek guztiek zuzeneko eragina dute nekearen aurrean, eta, beraz, kontuan hartu beharko dira piezaren iraupena kalkulatzean.

Beraz, probetako logσ_r–logN kurba piezari egokitu behar zaio, faktore horietako bakoitzaren eragina kontuan hartuz (geometria, lan egiteko modua, azaleko akabera…): horretarako, nekearen muga aldatzen duten koefiziente esperimental batzuk erabiltzen dira (koefiziente bat faktore bakoitzeko). Hala, eta σ_e´ probetako neke-mugatik abiatuta, 27. irudian ikus daitekeen moduan, σ_e piezaren neke-muga definitzen da:

$$\sigma_e = C_s \cdot C_d \cdot C_t \cdot C_f \cdot C_m \cdot C_j \cdot C_k \cdot C_T \cdot C_w \cdot C_v \cdot \ldots \cdot \sigma_e' \tag{4}$$



27. irudia. Probetaren eta piezaren logσ_r –logN (Basquinen kurba) grafikoa. Egileen irudia.

Probetarekin bezala, σ_r tentsio alternoaren balio jakin bati dagokion piezaren N iraupena lortzeko, nahikoa da triangelu-antzekotasun bat planteatzea honako honetan:

$$\frac{log(0.9\sigma_u) - log\sigma_e}{log10^6 - log10^3} = \frac{log\sigma_r - log\sigma_e}{log10^6 - logN} \tag{5}$$

Edo, gauza bera dena:

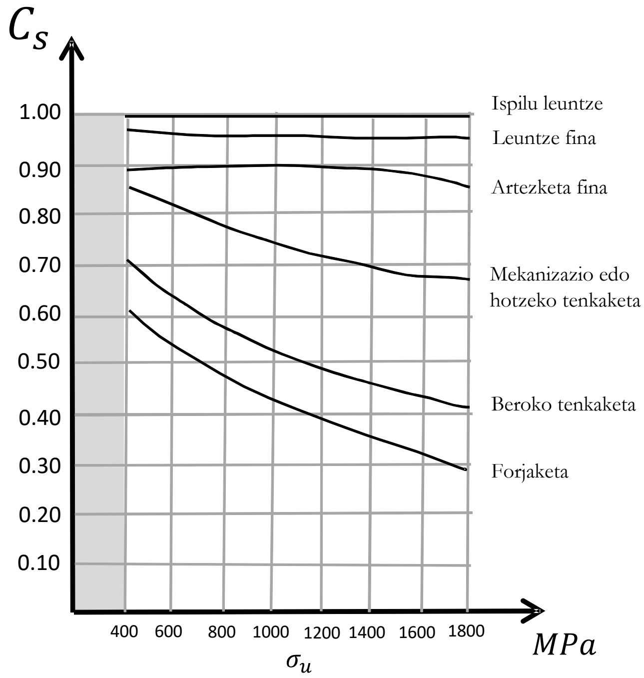
$$\frac{log(0.9\sigma_u) - log\sigma_e}{log10^6 - log10^3} = \frac{log(0.9\sigma_u) - log\sigma_r}{logN - log10^3} \tag{6}$$

Adierazitakoaren arabera, C_i faktore bakoitzak kuantifikatzen du piezaren neke-iraupenean eragina duen faktore baten eragina. Hona hemen garrantzitsuenak.

c_s: gainazal-akaberaren koefizientea

Moore-en probeta birakariak gainazaleko ispilu-leunketa akabera du; hala ere, aztertutako piezak artezketa, mekanizazio edo ijezketa-akabera izan dezake… Ispilu-leunketa da gainazal akaberarik onena nekeari dagokionez, gainazalean irregulartasunik ez duen akabera baita, eta, ondorioz, nekeak eragindako hutsegitea eragingo lukeen pitzadura agertzea edo haztea zailduko baitu. Akabera horri c_s=1 koefizientea dagokio, probetaren akabera baita. Hain zainduak ez diren beste akabera batzuek gainazal irregularragoa uzten dute, eta, beraz, pitzadurak agertzeko joera handiagoa dute; beraz, c_s<1 balioa dute, hau da, piezaren neke-muga murrizten dute, eta, ondorioz, piezaren N iraupena murrizten dute σ_r tentsio alterno jakin baten pean.

28. irudiak c_s balioak erakusten ditu, piezaren gainazal-akaberaren eta materialaren σ_u haustura-tentsioaren arabera. Piezari gainazaleko akabera sortzeko eragiketa bat baino gehiago aplikatu bazaio (adibidez mekanizatua forjaketaren ondoren), azken akabera hartu behar da kontuan c_s koefizientea aukeratzeko orduan.



28. irudia. C_s-ren balioak. Egileen irudia.

c_d: dimentsio eta geometria koefizientea

Moore-en probeta birakariak tamaina nahiko txikia du (0,76 cm-ko diametroa erdiko sekzioan); aztertutako piezak, berriz, tamaina ertaina (automobil-birabarkia), handia (kamioi- edo tren-bagoiaren bastidorea) edo oso handia (zentral elektrikoko turbinaren ardatza) izan dezake bere sekzio kritikoan.

Ikusi denez, pieza handiek nekearekiko portaera okerragoa dute; izan ere, fabrikatzeko prozesu zaila dutelako edo, besterik gabe, tamaina handia dutelako, hutsegite txiki gehiago dituzte (poroak, inklusioak, hozkadak), eta, ondorioz, pitzadura errazago agertzen da, eta nekeak huts egin arazten du.

Balio orientagarri gisa, honako hauek har daitezke: c_d=1 pieza txikientzat (probeta txikia baita), c_d=0,9-0,8 pieza ertainentzat (ibilgailu baten motorraren birabila) eta cd=0,8-0.7 pieza handientzat (kamioiaren edo tren-bagoiaren bastidorea).

c_t: lan moduaren koefizientea

Moore-en probeta birakariak makurdura hutsarekin egiten du lan; aztertutako piezak, berriz, axialaren, bihurdura eta abarren eraginpean egon daitezke. Balio orientagarri gisa, honako hauek har daitezke: c_t=1 makurdurapeko piezetarako (probeta makurduran baitago), c_t=0,9-0,7 axialki lan egiten duten piezetarako (0,9 karga zentraturako, 0,7-raino makurdura eragiten duen karga axialerako). c_t=0,85 makurduran eta bihurduran lan egiten duten piezentzako eta c_t=0,57 bihurdurarako.

c_f: fidagarritasun-koefizientea

Nekeak dispertsio handia du, eta, beraz, piezari lotutako fidagarritasuna oso kontzeptu garrantzitsua da. Datu espezifikorik ezean, c_f=1-0.08z har daiteke, non z R fidagarritasunaren menpe baitago (ikusi 2. taula).

Z	0.0	0.1	0.2	0.4	1.0	2.0	2.5	3.0	3.5	3.7
R	0.5	0.5398	0.5793	0.6554	0.8413	0.9773	0.9938	0.9987	0.9998	0.9999

2. taula. Z-ren balioak c_f kalkulatzeko. Egileen taula.

Adibidez, 2. taularen arabera, %99,99ko fidagarritasunerako (hutsegite bat 10.000 piezako), c_f=1-0.08·3.7= 0.704. % 50eko fidagarritasunerako koefizientea 1 dela ikus daiteke, eta hori logikoa da, erabiltzen ari den neke-kurba fidagarritasun horri dagokion lerroa baita, aurretik aipatu bezala.

Makinen diseinuan ohikoa da% 95etik gorako fidagarritasunerako piezak diseinatzea.

c_m: tratamendu mekanikoen koefizientea

Zenbait tratamendu mekanikok gainazaleko konpresio-tentsioak eragiten dituzte, pitzadura "ixteko" joera dutenak, eta, hala, piezaren neke-portaera hobetzen dute. Tratamendu horietako bi granailaketa eta azaleko ijezketa dira. Tratamendu horien eraginpean dauden piezei c_m=1+Y koefiziente bat aplikatzen zaie, eta haren balioa 1 baino handiagoa da; beraz, piezaren neke-muga handitzen duen koefiziente bakarra da. Bi tratamendu horietarako Y-ren balioak:

AZALERA	LEUNKETA	MEKANIZATUA	IJEZKETA	FORJAKETA
Y	0.04-0.22	0.25	0.25-0.5	1.0-2.0

a)

AZALERA	ALTZAIRUZKO ARDATZAK	LEUNKETA/MEKANIZAZIOA	MAGNESIOA	ALUMINIOA	BURDIN GALDAKETA
Y	0.2-0.8	0.06-0.5	0.5	0.2-0.3	0.2-1.93

b)

3. taula. Y-ren balioak, c_m: a) kalkulatzeko, b) granailaketa-eragiketetarako, gainazal-ijezketako eragiketetarako. Egileen taulak.

Granailaketako eta azaleko ijezketako eragiketek piezaren azaleko akabera aldatzen dute; beraz, tratamendu mekanikoen c_m koefizientea estuki lotuta dago c_s gainazal-akaberako koefizientearekin. Hala, bada, esperimentalki egiaztatu da cs·cm produktuak 0.7 eta 0.9 artean egon behar duela beti ($0.7<c_s \cdot c_m<0.9$). Hau da, c_s c_m-z biderkatzean emaitza 0.7 baino txikiagoa bada, 0,7 hartuko da; era berean, emaitza 0.9 baino handiagoa bada, 0,9 hartuko da. Horregatik, tratamendu horiek azaleko akabera oso oneko piezetan erabiltzea kaltegarria izan daiteke. Adibidez, ispilu bidezko pieza leundu batean (c_s=1), ondoren granailaketa bidezko tratamendu mekaniko batek (c_m=1,04) ez du hobetzen, baizik eta piezak nekearekiko duen portaera okerragotzen du, emaitza $c_s \cdot c_m$=0,9 baita, deskribatu berri den murriztapenaren arabera.

c_j: fretting koefizientea

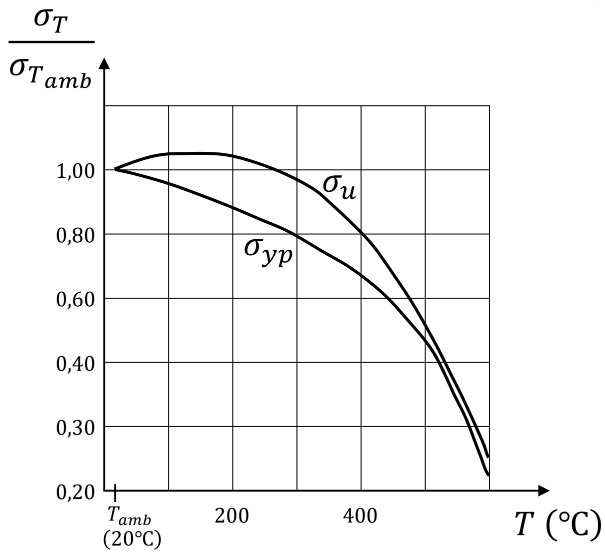
“Fretting”-a marruskadura-fenomeno bat da, torloju bidezko loturen, errodamenduen eta abarren kontaktu-eremuetan gertatzen dena. Kontaktu horrek pikatuak eta urradurak eragiten ditu, eta horiek piezen azalera hondatzen dute, pitzadurak agertzea eta, beraz, neke huts egitea eraginez. Balio orientagarri gisa, c_j=0,7-0,8 erabiltzen da oro har, eta c_j=0,95 oso doikuntza zehatzetarako, kontaktuan dauden piezen arteko desplazamendu erlatibo oso txikia denean.

c_k: talka-koefizientea

Moore-en probeta birakariaren saiakuntzetan ez du eraginik talkak; hala ere, aztertutako piezan eman daiteke. Talken eragina kontuan hartu ahal da nekearen logσ_r –logN kurban sarrerako tentsioa handituz, horren ordez ohikoagoa da c_k talka-koefiziente bat erabiltzea, nekearen muga murrizten duena. Balio orientagarri gisa, honako hauek har daitezke: c_k=1 talkarik gabeko piezentzat (probetak ez du talkarik jasaten); c_k=1-0.3 talken eraginpean dauden piezentzat (talkak zenbat eta indartsuagoak izan, orduan eta txikiagoa da c_k).

c_T: tenperatura-koefizientea

Makinetako elementuek ez dute tenperatura altuegietan lan egiten, baina, hala gertatuko balitz, kontuan hartu beharko litzateke materialaren ezaugarriak aldatzen direla tenperatura altuetan. σ_u haustura-tentsioa, tenperaturaren arabera aldatzen da, eta, horrenbestez, (1) ekuazioaren arabera σ_e´ probetaren neke-muga ere alda liteke eta σ_e piezaren neke-muga. Beraz, tenperatura-koefizientea ez da berez koefizientea: ez dago, berez, c_T koefizienterik; neke-tenperaturaren eragina kalkulatzeko, σ_u-ren balioaren aldaketa kontuan hartzen da.



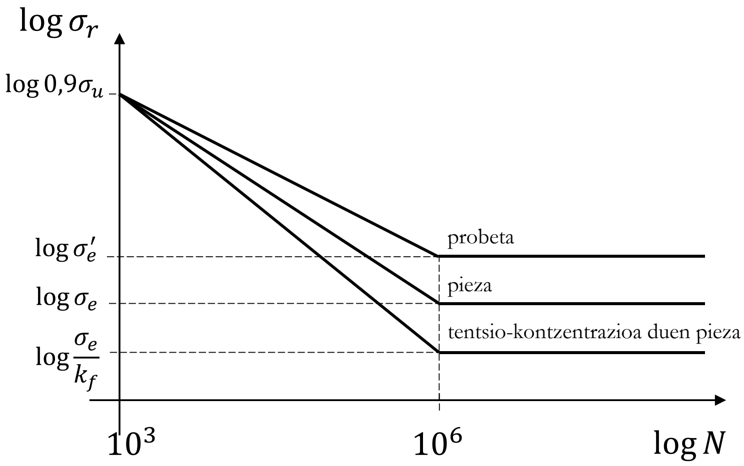
29. irudia. σ_{yp} eta σ_u-ren balioak tenperatura ezberdinetan. Egileen irudia.

c_w: soldadura-koefizientea

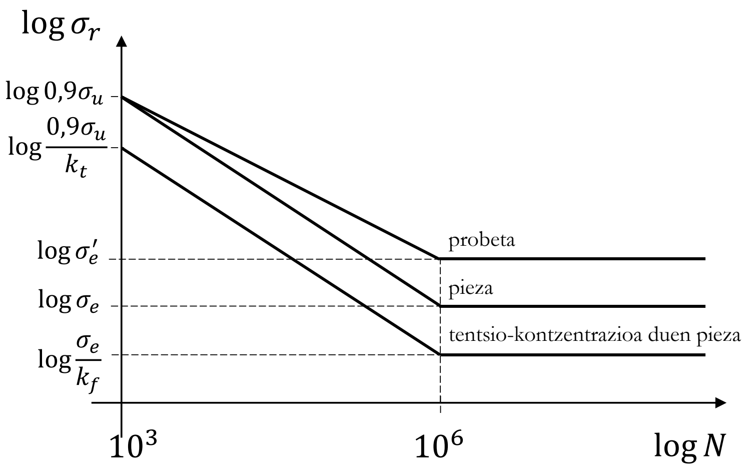
Soldadurak oso kaltegarriak dira nekeak eragindako hutsegiteen aurrean (ikus, adibidez, 19. irudia), hondar-tentsioak, tentsio-kontzentrazioa, pitzadurak, poroak, gainazaleko edo azal azpiko hutsegiteak, betetze-hutsegiteak eta abar eragiten baitituzte. Datu zehatzagorik ezean, c_w-ren balioak 0,5 eta 0,85 bitartekoak izatea gomendatzen da: tartearen gutxieneko balioa kalitate oneko soldadurei dagokie, baina ondorengo tratamendurik gabeak (adibidez, tentsioen arintzea) eta behar bezala ikuskatu gabeak. Gehieneko balioa soldadura oso zorrotzetan erabiltzen da, hozte moteleko soldaduretarako, tentsioak arintzeko, soberako materiala kentzeko, ikuskapen zehatz eta abarretarako.

5. TENTSIO-KONTZENTRAZIOAREN ERAGINA

Dagozkion aldaketa-koefiziente guztiak aplikatu ondoren, 27. irudiko piezaren logσ_r–logN nekearen kurba lortzen da, eta haren N iraupena kalkula daiteke kurban piezaren punturik eskatuenaren σ_r tentsioarekin sartuz. Hala ere, puntu hori tentsioen kontzentrazio-eremu batean badago, haren efektua σ_r tentsioa handituz edo honen neke-kurba gutxituz hartu behar da (ikusi 27. irudia). Ohikoena da kurba 30-a (material harikorrerako) edo 30-b (material hauskorrerako) ereduan agertzen den moduan gutxitzea. Bistan denez, kurba txikitu denez, σ_r tentsio izendatuaz (ez handiegia) sartzen da beti, hau da, Materialen Erresistentziaren adierazpenetatik kalkulatutako tentsioaz.



a)



b)

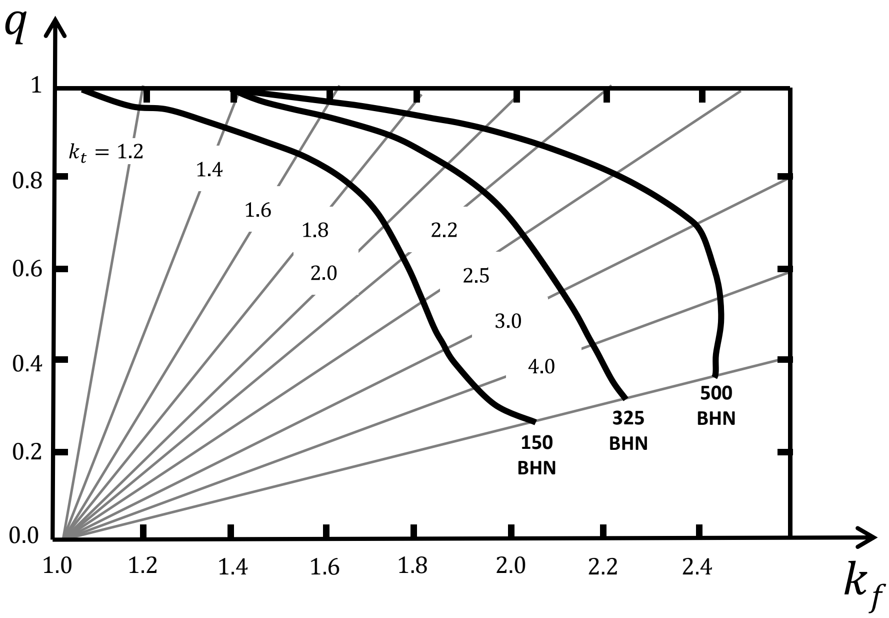
30. irudia. Probetaren eta piezaren logσr –logN (Basquin-en kurba) grafikoa, tentsioen kontzentrazioarekin eta kontzentraziorik gabe: a) material harikorra; b) material hauskorra. Egileen irudia.

k_f parametroa nekerako tentsioen kontzentrazio-faktorea da, eta zuzeneko lotura du k_t estatikarako tentsioen kontzentrazio-faktorearekin:

$$k_f = 1 + q \cdot (k_t - 1) \qquad (7)$$

Non q baita "hozkaketari sentikortasuna" izeneko parametroa, 31. iruditik, k_t-ren baliotik eta materialaren gogortasunetik lortzen baita. Gogoratu altzairuentzako Brinnel BHN gogortasunak erlazio hau betetzen duela:

$$BHN(kg/mm^2) = \frac{\sigma_u(MPa)}{3.1} \qquad (8)$$



31. irudia. Hozkadurarekiko sentikortasuna q. Egileen irudia.

Pieza indar axialaren eta momentu makurtzailearen menpe badago, σ_r tentsioa indar axialaren (σ_{ra}) eta, neurri batean, momentu makurtzailearen (σ_{rf}) araberakoa izango da. Hala, k_t balioa indar axialaren k_t (k_{ta}) eta momentu makurtzailearen k_t (k_{tf}) artean haztatutako batezbesteko antzeko baten bidez lortuko da:

$$k_t = \frac{k_{tf} \cdot \sigma_{rf} + k_{ta} \cdot \sigma_{ra}}{\sigma_{rf} + \sigma_{ra}} \tag{9}$$

Azken finean, σ_r tentsio alternoaren balio jakin baten pean dagoen pieza baten N iraupena lortzeko, nahikoa da triangeluen antzekotasuna planteatzea a (material harikorrerako) edo b (material hauskorrerako) puntuan. Hala, material harikor baterako:

$$\frac{log(0.9\sigma_u) - log\left(\sigma_e/k_f\right)}{log10^6 - log10^3} = \frac{log\sigma_r - log\left(\sigma_e/k_f\right)}{log10^6 - logN} \tag{10}$$

Edo, gauza bera dena:

$$\frac{log(0.9\sigma_u) - log\left(\sigma_e/k_f\right)}{log10^6 - log10^3} = \frac{log(0.9\sigma_u) - log\sigma_r}{logN - log10^3} \tag{11}$$

Eta material hauskorra bada:

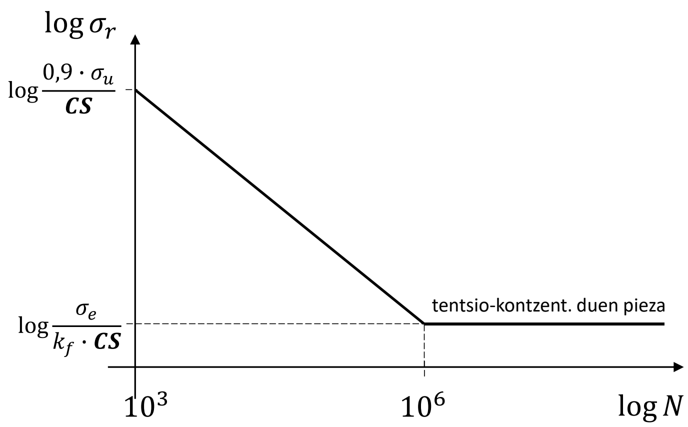
$$\frac{log(0.9\sigma_u/k_t) - log\left(\sigma_e/k_f\right)}{log10^6 - log10^3} = \frac{log\sigma_r - log\left(\sigma_e/k_f\right)}{log10^6 - logN} \tag{12}$$

Edo, gauza bera dena:

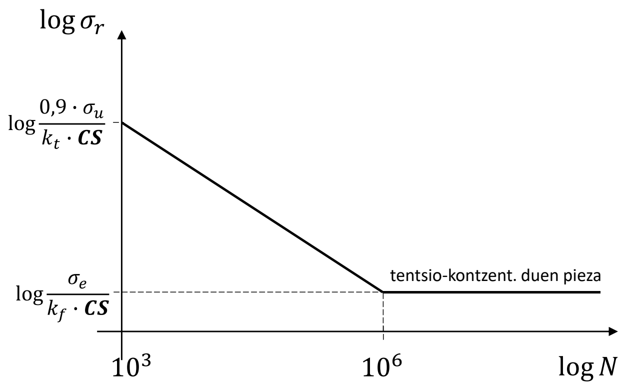
$$\frac{log(0.9\sigma_u/k_t) - log(\sigma_e/k_f)}{log10^6 - log10^3} = \frac{log(0.9\sigma_u/k_t) - log\sigma_r}{logN - log10^3} \tag{13}$$

6. SEGURTASUN-KOEFIZIENTEAREN ERAGINA

Segurtasun-koefizientea kontuan hartzeko, CS bidezko kurba txikiagotu behar da. Hala, tentsio-kontzentrazioa (esfortzu handienak jasaten dituen puntuan) eta CS segurtasun-koefizientea dituen pieza baten logσ_r–logN kurba 32. irudian adierazitakoa da.



a)



b)

32. irudia. Piezaren logσ_r –logN grafikoa (Basquinen kurba), tentsio-kontzentrazioa eta CS segurtasun-koefizientea dituena: a) material harikorra; b) material hauskorra. Egileen irudia.

Berriz ere, σ_r tentsio alternoa duen pieza baten N iraupena kalkulatzeko, material harikor baterako:

$$\frac{log(0.9\sigma_u/CS) - log(\sigma_e/k_f/CS)}{log10^6 - log10^3} = \frac{log\sigma_r - log(\sigma_e/k_f/CS)}{log10^6 - logN} \tag{14}$$

Edo, gauza bera dena:

$$\frac{log(0.9\sigma_u/CS) - log\left(\sigma_e/k_f/CS\right)}{log10^6 - log10^3} = \frac{log(0.9\sigma_u/CS) - log\sigma_r}{logN - log10^3} \tag{15}$$

Eta material hauskorra bada:

$$\frac{log(0.9\sigma_u/k_t/CS) - log\left(\sigma_e/k_f/CS\right)}{log10^6 - log10^3} = \frac{log\sigma_r - log\left(\sigma_e/k_f/CS\right)}{log10^6 - logN} \tag{16}$$

Edo, gauza bera dena:

$$\frac{log(0.9\sigma_u/k_t/CS) - log\left(\sigma_e/k_f/CS\right)}{log10^6 - log10^3} = \frac{log(0.9\sigma_u/k_t/CS) - log\sigma_r}{logN - log10^3} \tag{17}$$