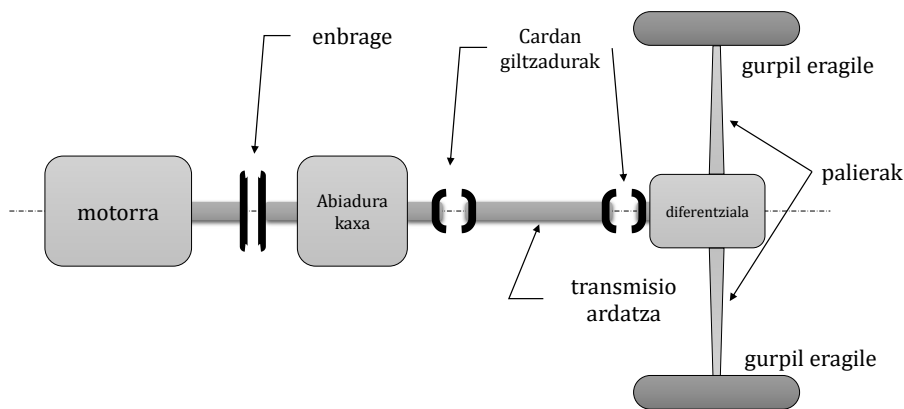


12. GAIA: ENBRAGEAK

1. SARRERA

Enbrageak bi ardatz akoplatu (enbragatu) eta desakoplatzeko (desenbragatzeko) balio duten elementuak dira, une bakoitzeko beharren arabera. Beraz, ardatzen arteko aldi baterako lotura-elementuak dira. Adibidez, automobil batean enbrage bat jartzen da motorraren irteera-ardatzaren eta abiadura-kaxaren sarrera-ardatzaren artean (ikusi 1. irudia): gidariak martxa aldatu nahi duenean, enbragearen pedala zapaltzen du; une horretan, enbrageak abiadura-kaxaren motorra desakoplatzen du, eta, hala, gidariak martxa-aldaketa egin dezake (abiadura-palankarekin) momentu eragilerik gabe, eta, modu progresibo eta leun batean. Gidariak pedala soltatzten duenean, motorra eta abiadura-kutxa akoplatuko dira.



1. irudia. Auto baten transmisioaren eskema. Egileen irudia.

Ardatz higiarazlea kargarik gabe abiarazteko ere erabiltzen dira enbrageak (hala, lehenago iritsiko da erregimen-abiadurara), edo ardatz erresistentea geldiarazteko momentu eragilerik gabe (hala, ardatza lehenago balaztatuko da). Baldintza horietako edozeinetan beharrezkoa da enbrage bat izatea, ardatzak egoki den moduan lotu/banatzeko.

Enbrage-mota asko daude, eragiteko metodoaren eta oinarrizko eragiketa-printzipioaren arabera sailkatuta:

- a) Eragiteko-metodoak ardatzak lotzen/banatzten dituen indarra enbragean nola ezartzen den adierazten du: hala, eragingailu mekanikoa, pneumatikoa, hidraulikoa, elektrikoa... izan daiteke.

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

b) Oinarrizko eragiketa-printzipioak nola transmititzen den momentu tortsoarea ardatz batetik bestera adierazten du: sailkapen horren arabera, enbrageak mekanikoak, elektromagnetikoak, hidraulikoak... izan daitezke. Enbrage mekanikoen barruan, momentua marruskaduraz edo arrastez transmititzen da.

Ondoren, enbrage mekaniko nagusien ezaugarriak eta kalkulatzeko prozedurak azaltzen dira, oinarrizko eragiketa-printzipioaren arabera sailkatuta.

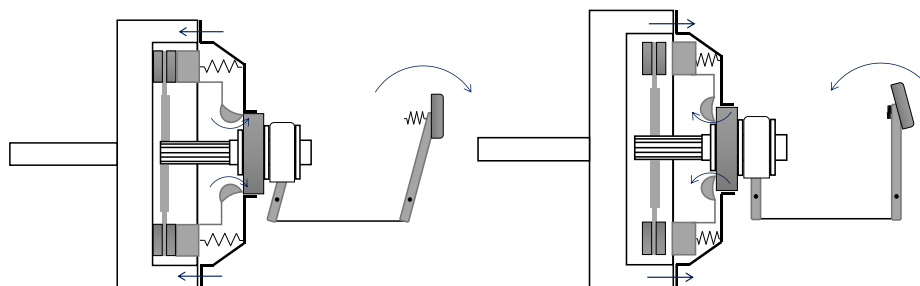
2. MARRUSKADURA-ENBRAGEAK

Moldakortasuna dela eta, enbrage erabilienak marruskadurazkoak dira, eta pareta gainazalen arteko marruskaduraren bidez transmititzen da. Enbrage horien abantaila nagusia da ardatzen arteko akoplamendua (enbragatua) modu leun eta progresiboan gertatzen dela: lotu aurretik, ardatzak oso abiadura desberdinetan biratzen ari dira, eta, beraz, elkar ukitzen duten unean, bi gainazalen arteko labainteta gertatzen da biraketa-abiaduren ezberdintasunaren eraginez. Hala ere, marruskadurak, azkenean, labaindura hori pixkanaka, bi ardatzetara desagerrarazten du (leunki eta pixkanaka). Enbrage mota horren desabantailak dira bero kantitate handia sortzen dela enbragatze-prozesuan gertatzen den labainduraren ondorioz, eta transmiti dezaketen pareta ez dela beste enbrage-mota batzuetan bezain handia, adibidez, kontaktu positiboko enbrageetan (aurrerago ikusiko ditugu).

Marruskadura-gainazalen formaren arabera oinarrizko bi marruskadura-enbrageak disko-enbragea eta enbrage konikoa dira. Marruskadura zentrifugoko enbrageak ere aztertzen dira, beren diseinu eta erabilera bereziagatik.

2.1 Disko motako marruskadura-enbrageak

Disko-motako marruskadura-enbrageek bi ardatz akoplatzen dituzte disko-formako gainazalen artean garatutako marruskadura-parearen bidez. 2. irudian eskema tipiko bat ageri da, enbragatuaren (ardatz akoplatuak) eta desenbragatuaren (ardatz bananduak) adibideekin.



a)

b)

2. irudia. Disko-motako marruskadura-enbrage baten eskema: la) enbragatua b) desenbragatua. Egileen irudia.

Momentua kalkulatzeko gakoa kontaktuko presioen banaketa ezagutzea da. Horrela, enbrage berri bat eta erabilitako bat bereizten dira.

2.1.1 ENBRAGE BERRIA: PRESIO UNIFORMEA

Enbrage berri batean, diskoen gainazalak guztiz lauak direnez, presioa berdina da ukipen-gainazalaren puntu guztietan. Hau da, presio uniformearen hipotesia betetzen da, eta kontaktu-gainazalean sortzen den marruskadura-momentua hau da:

$$T_{roz} = \int r \cdot \mu \cdot p \cdot dA = \mu \cdot p \cdot \int r \cdot dA = \mu \cdot p \cdot \int r \cdot 2\pi r \cdot dr$$

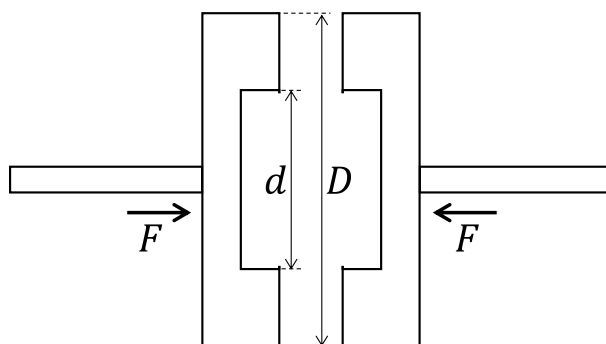
$$= 2\pi \cdot \mu \cdot p \cdot \frac{(r_{ext}^3 - r_{int}^3)}{3} = \frac{\pi}{12} \cdot \mu \cdot p \cdot (D^3 - d^3) \quad (1)$$

non μ marruskadura-koefizientea da, p presioa (uniformea kasu honetan), D kanpo-diametroa eta d barne-diametroa direlarik (ikusi 3. irudia). Jakina, kontaktu-gainazalean p presioa egoteko, beharrezkoa da diskoak F indar batekin lotuta egotea. Indar horren balioa:

$$F = \int p \cdot dA = p \cdot A = \frac{\pi}{4} \cdot p \cdot (D^2 - d^2) \quad (2)$$

(2) adierazpena (1) adierazpenean ordezkaturaz:

$$T_{roz} = \mu \cdot \frac{F}{3} \cdot \frac{D^3 - d^3}{D^2 - d^2} \quad (3)$$



3. irudia. Disko-motako marruskadura-enbrage baten eskema. Egileen irudia.

2.1.2 ENBRAGE ERABILIA: HIGADURA UNIFORMEA

Deskribatutakoaren arabera, enbragea berria denean, presioa berdina da diskoen arteko ukipen-puntu guztietan. Hala ere, ardatzaren erdigunetik urrunen dauden puntuetan higadura handiagoa da. Gogoan izan ukipen-gainazalaren puntu bateko higaduraren adierazpena hau dela:

$$\delta = k \cdot p \cdot v_{dest} \quad (4)$$

Hau da, puntu bateko higadura proportzionala da (k proportzionaltasun-konstantearekin) p presioarekiko eta bi gorputzen arteko kontaktu-puntu horretan dagoen v_{desl} labaintze-abiadurarekiko. Enbragearen kasuan, bi gorputzak biratzen ari diren bi disko dira, bakoitza bere ardatzarekin. w_1 eta w_2 baitira, hurrenez hurren, 1 eta 2 ardatzen biraketa-abiadurak, hau da bi diskoen arteko abiadura angeluar erlatiboa (labaindurarena):

$$w_{desl} = w_1 - w_2 \quad (5)$$

r erradio batean dagoen kontaktu-puntu baten irristatze-abiadura, beraz:

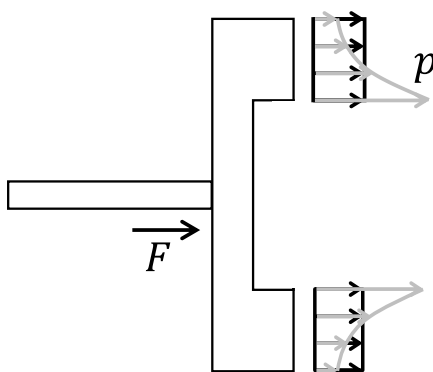
$$v_{desl} = w_{desl} \cdot r = (w_1 - w_2) \cdot r \quad (6)$$

(4) formularen ordezkatuz:

$$\delta = k \cdot p \cdot w_{desl} \cdot r = k \cdot p \cdot (w_1 - w_2) \cdot r \quad (7)$$

Formulatik ondoriozta daitekeenez, ardatzaren zentrotik urrunen dauden puntuak (r erradio handiagoan daudenak) gehiago higatzen dira. Higadura horren ondorioz, erdigunetik urrun dauden puntu horietako ukipen-presioa gutxituz doa pixkanaka; kontrapartida gisa, aldi berean, ardatzaren erdigunetik hurbil dauden puntuetako presioa handitu egiten da, puntu guztien presioen batura konstante mantendu behar baita, aplikatutako F indarra ez baita aldatu denboran zehar.

Beraz, apurka-apurka, ukipen-gainazal osoan presio-banaketa uniformetik banaketa berri batera pasatzen da, non presioa handiagoa baita barne-erradioan eta txikiagoa kanpo-erradioan (ikus 4. irudia). Zenbat eta zurrunagoa izan enbragea, orduan eta lehenago gertatzen da trantsizio hori.



4. irudia. Presioen banaketa disko-motako marruskadura-enbrage batean: berria (presio uniforme, beltza) eta erabilia (higadura uniforme, grisa). Egileen irudia.

Denbora baten buruan, banaketa batera iristen da, non higadura berdina izango baita ukipen-puntu guztietan, eta, beraz, behin betiko presio-banaketara iristen da. Egoera horretan, enbragea jada "erabilia" dagoela eta higadura-hipotesi uniforme betetzen dela jotzen da. Hipotesi horren arabera:

$$\delta = k \cdot p \cdot (w_1 - w_2) \cdot r = \text{uniforme} \rightarrow p \cdot r = \text{uniforme} \quad (8)$$

Hau da, esan bezala, eta (8) formulatik ondoriozta daitekeenez, ukipen-puntu guztietan higadura berdina izateak esan nahi du erradio handiagoan (ardatzaren erdigunetik urrunago) dauden puntuek presio txikiagoa dutela.

Hala, ukipeneko p_{\max} presio maximoa enbragearen barneko erradioaren puntuetan agertzen da ($r_{\text{int}}=d/2$). (8) formula garatuz, p presioa r erradioan dagoen edozein puntutan adieraz daiteke, presio maximoaren arabera:

$$p \cdot r = p_{\max} \cdot r_{\text{int}} \rightarrow p = \frac{p_{\max} \cdot r_{\text{int}}}{r} \quad (9)$$

Enbrageak garatutako marruskadura-momentua hau da:

$$\begin{aligned} T_{\text{roz}} &= \int r \cdot \mu \cdot p \cdot dA = \int r \cdot \mu \cdot \frac{p_{\max} \cdot r_{\text{int}}}{r} \cdot 2\pi r \cdot dr = 2\pi \cdot \mu \cdot p_{\max} \cdot r_{\text{int}} \cdot \int r \cdot dr \\ &= \pi \cdot \mu \cdot p_{\max} \cdot r_{\text{int}} \cdot (r_{\text{ext}}^2 - r_{\text{int}}^2) = \pi \cdot \mu \cdot p_{\max} \cdot d \cdot \frac{(D^2 - d^2)}{8} \end{aligned} \quad (10)$$

Eta indarra:

$$\begin{aligned} F &= \int p \cdot dA = \int \frac{p_{\max} \cdot r_{\text{int}}}{r} \cdot 2\pi r \cdot dr = 2\pi \cdot p_{\max} \cdot r_{\text{int}} \cdot (r_{\text{ext}} - r_{\text{int}}) \\ &= \frac{\pi}{2} \cdot p_{\max} \cdot d \cdot (D - d) \end{aligned} \quad (11)$$

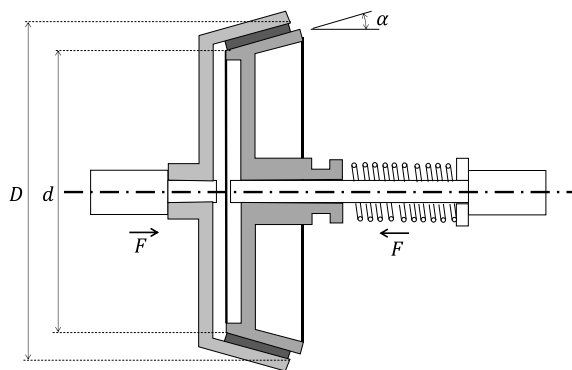
(11) ekuazioa (10) ekuazioan ordezkatzuz:

$$T_{\text{roz}} = \mu \cdot \frac{F}{4} \cdot (D + d) \quad (12)$$

Enbrage jakin batek (μ , F , D , d) eta (10) presio uniformeko eta higadura uniformeko formulekin, hurrenez hurren, garatutako bi T_{roz} marruskadura-momentuak kalkulatzeko baditugu, higadura-hipotesi uniformearen emaitza txikiagoa da. Beraz, enbragea higadura uniformearen hipotesiarekin diseinatzeak enbragea neurritz gain hartzera eramaten du, eta, beraz, presio uniformekoa baino hipotesi kontserbadoreagoa da. Horrek, hasieran berriak izan arren, enbrage guztiak "erabili" egoeran bukatzen dutenez, gehien erabiltzen den hipotesia higadura uniformekoa izatea dakar.

2.2 Marruskadura-enbrage konikoa

Marruskadura konikoko enbrageek bi ardatz akoplatzen dituzte kono-formako gainazalen artean garatutako marruskadura-parearen bidez. 5. irudian eskema tipiko bat ageri da, non konikotasun-angelua erakusten den. Diskoko enbrageak bezala, enbrage koniko berriak presio uniformearen hipotesiaren pean aztertzen dira; aldiz, erabilitako enbrageak higadura uniformetzat hartzen dira.



5. irudia. Marruskadura konikoko enbrage baten eskema. Egileen irudia.

2.2.1 ENBRAGE BERRIA: PRESIO UNIFORMEA

Enbrage berri batean, presioa berdina da konoen arteko ukipen-puntu guztietan. Disko-motako enbrageetarako egindakoaren antzeko garapenarekin, marruskadura-momentua hau da:

$$T_{roz} = \int r \cdot \mu \cdot p \cdot dA = \frac{\pi}{12} \cdot \mu \cdot p \cdot (D^3 - d^3) \cdot \frac{1}{\sin\alpha} = \mu \cdot \frac{F}{3} \cdot \frac{D^3 - d^3}{D^2 - d^2} \cdot \frac{1}{\sin\alpha} \quad (13)$$

2.2.2 ENBRAGE ERABILIA: HIGADURA UNIFORMEA

Enbragea erabili ahala, presio uniformeko egoeratik higadura uniformeko egoerara igarotzen da, eta horretarako, enbragearen marruskadura-momentua hau da:

$$\begin{aligned} T_{roz} &= \int r \cdot \mu \cdot p \cdot dA = \frac{\pi}{8} \cdot \mu \cdot p_{max} \cdot d \cdot (D^2 - d^2) \cdot \frac{1}{\sin\alpha} \\ &= \mu \cdot \frac{F}{4} \cdot (D + d) \cdot \frac{1}{\sin\alpha} \end{aligned} \quad (14)$$

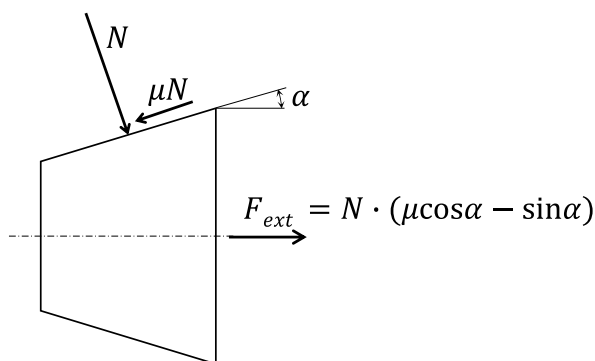
Berriz ere, zenbat eta zurrunagoa izan enbragea, orduan eta lehenago iristen da higadura-egoera uniformera. Era berean, higadura-hipotesi uniformea pixka bat kontserbadoreagoa da, eta horregatik erabiltzen da maizago.

Kono-enbragea disko-enbragearekin alderatuz gero, ikusten da aplikatutako F indar beraren kasuan (D, d) eta μ marruskadura-koefiziente beraren kasuan, enbrageak $1/\sin\alpha$ handiagoa duela ($1/\sin\alpha$ handiagoa da beti 1 baino), eta hori abantaila garbia da enbrage konikoentzako disko-enbrageekin alderatuz.

Eragozpen gisa, enbrage konikoak auto-erretentzioa jasan dezake: kono bat enbragatzean bestean

sartzen denean, “katigatuta” geratzen dira, eta, egoera jakin batzuetan, indar bat egin behar izaten da desenbragatzeari banatzeko (hori ez zen gertatzen disko-enbrageetan). 6. irudian ageri den bezala, autoerretentzioa gertatzen da konoak bereizteko $F_{ext} > 0$ erauzketa-indarra erabili behar bada, hau da, $\mu \cos \alpha - \sin \alpha > 0$ bada, edo, baldin eta hori bera bada, baldin eta $\mu > \tan \alpha$ bada. Argi dago enbrage konikoaren diseinuan saihestu beharreko zerbait dela auto-erretentzioa.

Beraz, alde batetik, komeni da konikotasun-angelua txikia izatea garatutako momentua handia izan dadin, baina, bestetik, balio txikiegia izateak auto-erretentzioa eragin dezake. Ondorioz, erdi-mailako balioak izaten ditu, 10° ingurukoak.



6. irudia. Erauzketa-indarra, enbrage koniko bat desegiteko. Egileen irudia.

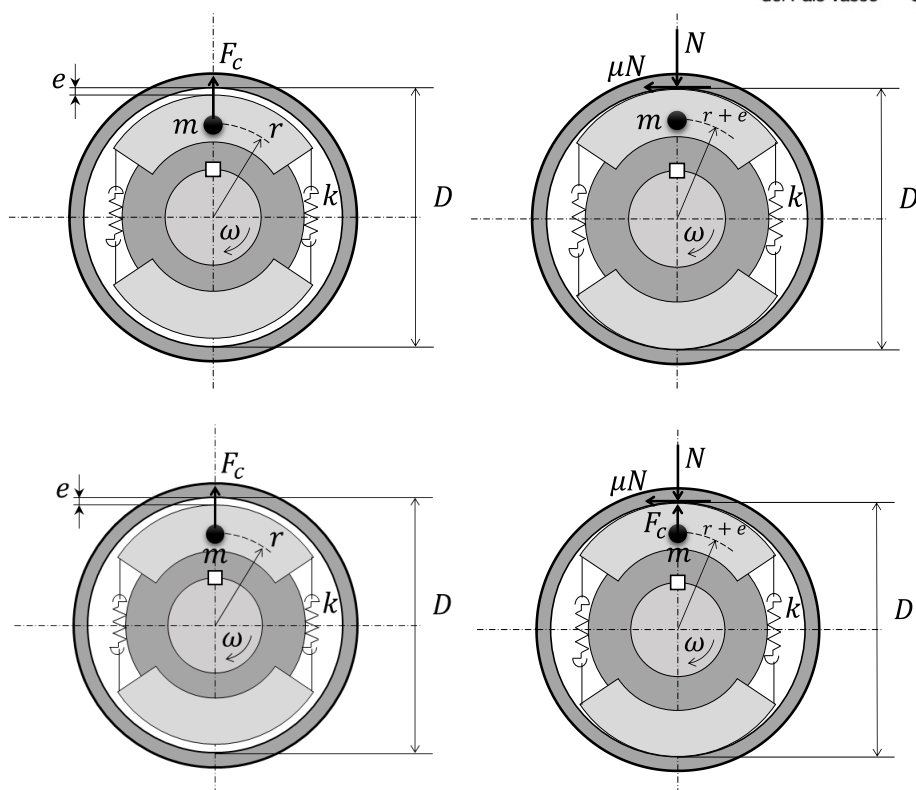
2.3 Enbrage zentrifugoa

Enbrage zentrifugoa marruskadura-enbrage mota berezi bat dira, hau da, pare marruskadura bidez transmititzen da; kasu horretan, bi marruskadura-gainazalen arteko indarra indar zentrifugoa da.

Izan ere, enbrageak masa eszentriko batzuk ditu, eta masa horiek, ardatza biratzean, indar zentrifugoaren mende daude (ikus 7. irudia). Ardatzaren biraketa-abiadura zenbat eta handiagoa izan, orduan eta handiagoa da ardatzeko masak urruntzen dituen indar hori, eta indar hori orekatu egiten da masak ardatzera hurbiltzen dituzten malgukiengatik. Edozein masatan indarren oreka planteatuz:

$$m \cdot \omega^2 \cdot (r + e) = 2 \cdot k \cdot 2y \tag{15}$$

Non y masaren desplazamendu erradiala da, hau da, indar zentrifugoaren ondorioz masa ardatzetik urrundu den distantzia. Kontuan izan 7. irudiko bi malgukietako bakoitza $2y$ distantzia trakzionatzen dela.



7. irudia. Marruskadurazko enbrage zentrifugoaren eskema. Egileen irudia.

Logikoa denez, ardatzaren biraketa-abiadura zenbat eta handiagoa izan, orduan eta handiagoa da masen desplazamendu erradiala, eta, horrenbestez, biraketa-abiadura jakin batean, masak beste ardatzarekin kontaktuan jarriko dira $y=e$ denean. (15) adierazpenetik, w^* biraketa-abiadura hau da:

$$w = \sqrt{\frac{4 \cdot k \cdot e}{m \cdot (r + e)}} \quad (16)$$

w^* -tik gorako w biraketa-abiaduretarako, masa-gainazalak kontaktuko indar normal bat garatzen da ardatzaren barne gainazalean, honako baliokoa:

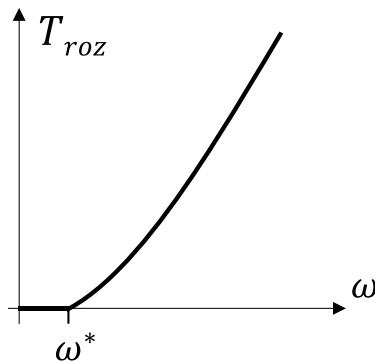
$$N = m \cdot w^2 \cdot (r + e) - 2 \cdot k \cdot 2e \quad (17)$$

Indar normal horren ondorioz, marruskadura-indar bat sortzen da, eta, aldi berean, bi ardatzak akoplatzen dituen marruskadura-momentu bat garatzen da:

$$\begin{aligned} T_{roz} &= \mu \cdot N \cdot \left(\frac{D}{2}\right) \times 2 \text{pastillas} \\ &= \mu \cdot (m \cdot w^2 \cdot (r + e) - 4 \cdot k \cdot e) \cdot \left(\frac{D}{2}\right) \times 2 \text{pastillas} \end{aligned} \quad (18)$$

(18) formularen ikusten denez, zenbat eta biraketa-abiadura handiagoa, orduan eta handiagoa da garatutako momentua.

Azken finean, ardatzaren biraketa-abiadura jakin batetik (w^* baino txikiagoa) ez da momenturik garatzen masak ez direlako beste ardatzarekin kontaktuan jarri. W^* baino abiadura handiagoetan, ukipen-indar normal bat sortzen da, eta horrek marruskadura-momentu bat eragiten du: zenbat eta biraketa-abiadura handiagoa, orduan eta handiagoa da momentu hori. 8. irudiak kontzeptu horiek erakusten ditu. Esan daiteke enbrage zentrifugoak enbrage automatikoak direla, enbragatzea/desenbragatzea automatikoki gertatzen baita w^* abiaduran.

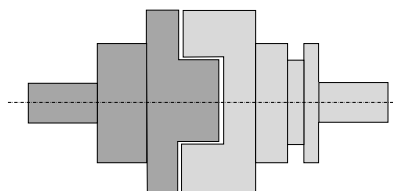


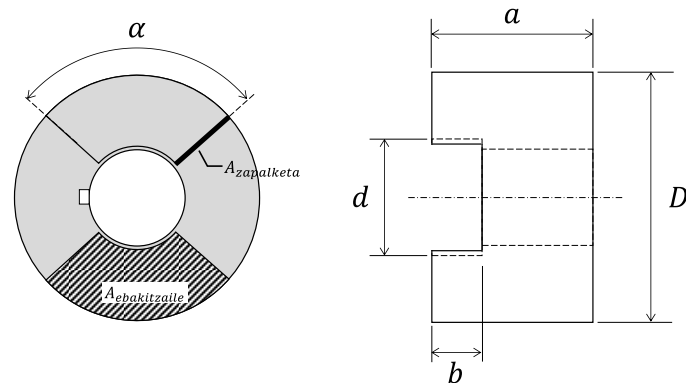
8. irudia. T_{roz} marruskadura-momentua, w ardatzaren biraketa-abiaduraren arabera, 7. irudiko enbragerako (18 ekuaziotik ateratako grafikoa). Egileen irudia.

3. ARRASTE-ENBRAGEAK

Arraste-enbrageek bi ardatzen arteko biraketa transmititzen dute “ahokatuta” geratzen diren eta arrastatu egiten diren osagaien bidez.

10. irudian kontaktu-positiboko enbrage bat ageri da, eta pareta “hortzen” arteko arrastearen bidez transmititzen da. Enbrage horien abantaila nagusiak bi dira: batetik, gainazalen arteko marruskadurarik eza (transmisioa arrastaka gertatzen da, ez marruskaduraz), eta, beraz, ez da berorik sortzen marruskaduragatik; bestetik, marruskadurazko enbrageak baino askoz pare handiagoak transmititzeko gai dira. Desabantaila da ardatzak abiadura txikian (askotan, geldirik) eta parerik gabe akoplatu behar direla, hortzetan kalteak eragin ditzaketen bat-bateko talkak saihesteko.





9. irudia. Kontaktu positiboko enbrage baten eskema. Egileen irudia.

Enbrageek transmiti dezaketen momentua kalkulatzeko, txabeten antzeko kalkulua egiten da. Zenbat eta momentu handiagoa transmititu, orduan eta indar handiagoa dute hortzek. 9. irudiko bi hortzen artean bihurtura momentua banatuz, txabetekin egiten zen antzera, hortz bakoitzak F indar bat jasaten du, erdiko erradioan $(D+d)/4$:

$$T = 2 \cdot F \cdot \frac{D + d}{4} \quad (19)$$

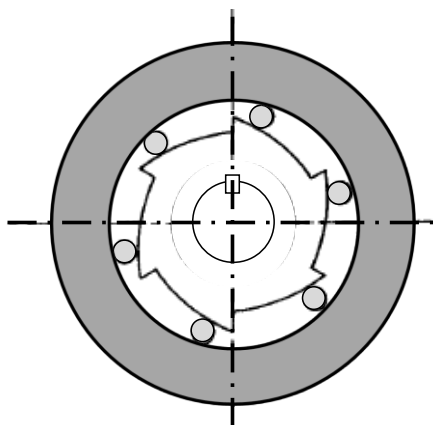
Indar horren pean, hortzek ebakitzailan eta zapaltzean huts egin dezakete, txabetetan gertatzen zen bezala. Beraz, onargarriak izan behar dute ebakitzailako eta zapalketako tentsioek:

$$\tau = \frac{F}{A_{\text{ebakitzaille}}} = \frac{F}{\frac{\alpha}{2} \cdot \frac{D^2 - d^2}{4}} \leq \frac{\tau_{yp}}{CS} \quad (20a)$$

$$\sigma = \frac{F}{A_{\text{zapalketa}}} = \frac{F}{b \cdot \frac{D - d}{2}} \leq \frac{\sigma_{yp}}{CS} \quad (20b)$$

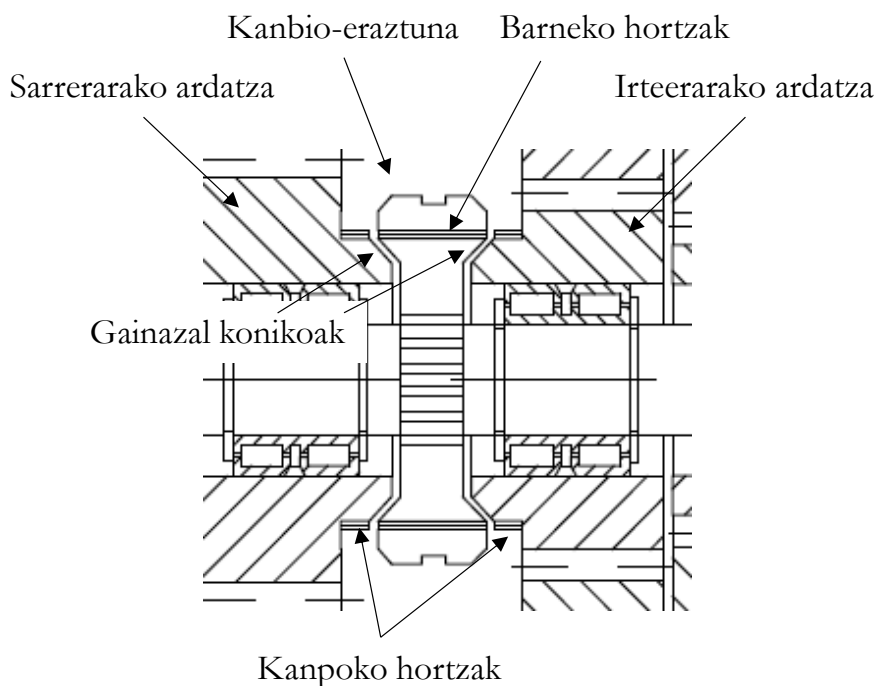
Bi baldintza hauek mugatzen dute ukipen positiboko enbragea transmititzeko gai den momentua. Kalkulu sinplifikatua eta kontserbadorea da.

10. irudian, arraste-enbrage mota berezi bat ageri da. Noranzko bakarreko enbragea da, hau da, ardatzaren biraketa-norabide bakar batean transmititzen du momentua.



10. irudia. Noranzko bakarreko arraste-enbrage baten eskema. Egileen irudia.

Sarritan, kontaktu-positiboko eta marruskadurako mekanismoak enbrage berean konbinatzen dira, bakoitzaren abantailak aprobetxatzeko. Lehenik eta behin, bi ardatzak abiadura berean eramaten dira pixkanaka eta leun, gainazalen arteko marruskaduraren bidez (marruskadura-enbragea); ondoren, ardatzak hortzen bidez lotzen dira (ukipen positiboko enbragea), momentu altu bat transmititu ahal izateko. Automobil baten abiadura-kaxaren sinkronizagailuak enbrage konbinatu mota horri dagozkio (12. irudia).



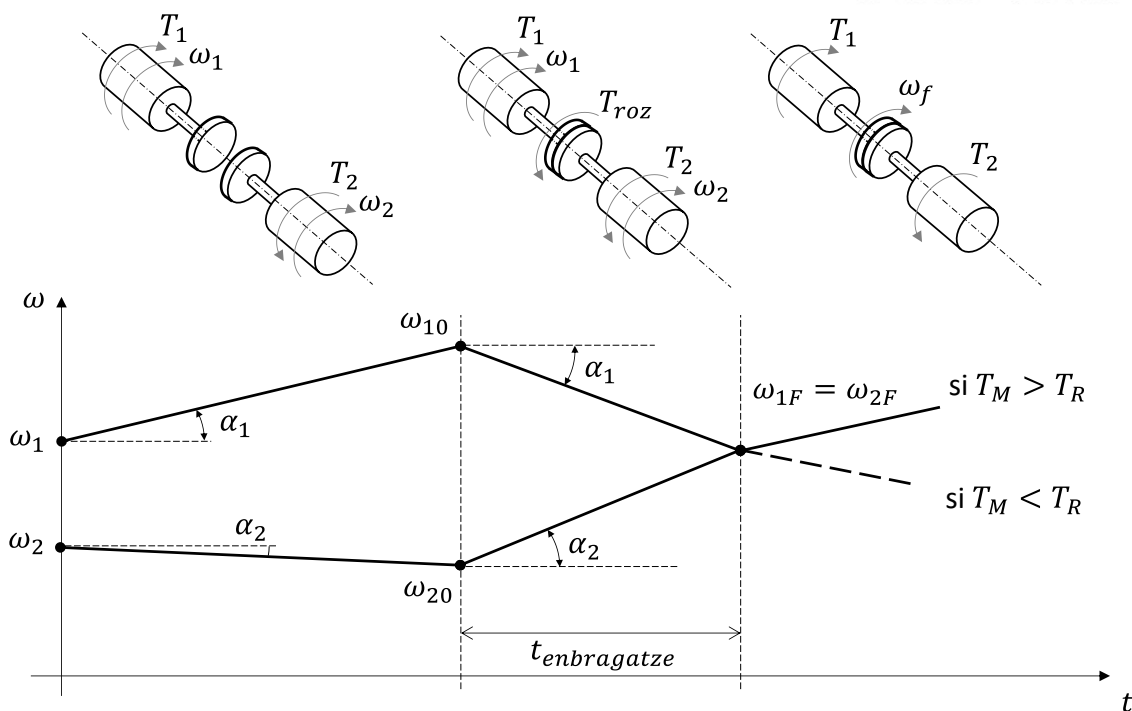
11. irudia. Automobil baten abiadura-kaxaren sinkronizagailua. Egileen irudia.

4. ENBRAGEEN DISEINUAN KONTUAN HARTU BEHARREKO ALDERDIAK

Enbrage mota bakoitzak transmiti dezakeen momentuaren kalkulua aurkeztu ondoren, kalkulu sinplifikatuak direla azpimarratu behar da lehenik. Horrenbestez, kalkulu-adierazpen horiek berez diren bezala erabili behar dira, enbragearen gutxi gorabeherako diseinua edo hasierako hautaketa egiteko balio duten formula errazak. Formula horiek, gainera, enbrage baten funtzionamenduaren printzipioak ulertzeko aukera ematen dute, baita zer parametroren mende dagoen pareta transmititzeko gaitasuna ere.

Orain arte, enbragearen azterketa egin duen marruskadura-momentuan oinarritu da. Hala ere, gai honen sarreran aditzera eman denez, enbragea hautatu edo diseinatzean beste alderdi garrantzitsu bat enbragatze-prozesuan marruskaduraz sortzen den beroa da. Bistan denez, marruskadura-enbrageei buruz ari gara, arraste-enbrageek ez dute arazo hori. Izan ere, esan bezala, bi ardatz marruskadura-enbrage batean abiadura desberdinetan biraka jartzen direnean, abiadura-alde hori dela eta, labaindura bat dago kontaktu-aurpegien artean; pixkanaka-pixkanaka, marruskadura-momentuak lortzen du labainketa hori desagertzen joatea, eta, aldi batean ($t_{\text{enbragatze}}$), biraketa-abiadurak berdintzen dira, eta, ondorioz, enbragatze-prozesua bukatutzat ematen da. Labaintzea gertatzen den ($t_{\text{enbragatze}}$) denbora horretan, marruskadurak bero kantitate handia sortzen du kontaktu-gainazalean. Sortutako bero hori oso handia izan daiteke, eta behar bezala ez bada ateratzen, tenperatura igotzeak eraginkortasuna galtzea eragin dezake, baita enbrageak huts egitea ere.

Beraz, garrantzitsua da enbragatze-prozesuan sortutako beroaren magnitudea ezagutzea. Horretarako lehen urratsa enbragatze-denboraren balioa ezagutzea da. 12. irudian, enbragatze-prozesua aztertzen da, hiru etapatan: enbragatzearen aurretik, bitartean eta ondoren. Hona hemen etapa horietako bakoitza.



12. irudia. Enbragatze-prozesuaren etapak. Egileen irudia.

Enbragatu aurretik, 1. ardatzak T_1 momentu eragilea du (w_1 biraketaren aldera), eta 2. ardatzak T_2 momentu eragozle bat (w_2 biraketaren kontra), 1. ardatzak azeleratu egiten du eta 2. ardatzak dezeleratu:

$$T_1 = I_1 \cdot \alpha_1 \quad (21a)$$

$$T_2 = I_2 \cdot \alpha_2 \quad (21b)$$

Une jakin batean, ardatzak kontaktatzen dute eta enbragatze-prozesuari ekiten zaio. Une horretan, kontaktu-gainazalean T_{roz} marruskadura pare bat garatzen da. Momentu horren ondorioz, 1. ardatza moteldu egiten da eta 2. ardatza dezeleratu, hurrenez hurren.

Bi ardatzen kontaktu-urpegiaren arteko labaintze-abiadura erlatiboa gutxituz doa pixkanaka-pixkanaka, harik eta abiadura berean biratu arte, eta enbragatze-prozesua amaitutzat ematen da. Prozesu horren iraupena kalkulatzeko, ardatz bakoitzeko bihurtura momentuen orekak planteatuz:

$$T_{roz} - T_1 = I_1 \cdot \alpha_1 = I_1 \cdot \frac{w_{10} - w_f}{t_{embragatze}} \quad (22a)$$

$$T_{roz} - T_2 = I_2 \cdot \alpha_2 = I_2 \cdot \frac{w_f - w_{20}}{t_{embragatze}} \quad (22b)$$

w_{10} eta w_{20} adierazpenetan, 1 eta 2 ardatzen biraketa-abiadurak dira enbragatzearen hasieran (hasierako kontaktu-unean), eta w_f enbragatzearen amaieran dagoen abiadura da (bi ardatzentzat berdina). w_f bakanduz, $t_{embragatze}$ -formulara iristen da:

$$t_{embragado} = \frac{w_{10} - w_{20}}{\frac{T_{roz} - T_1}{I_1} + \frac{T_{roz} - T_2}{I_2}} \quad (23)$$

Enbragatze-prozesu horrek iraun duen denboran, T_{roz} marruskadura-momentuak W_{roz} marruskadura-lana sortu du bero gisa:

$$W_{roz} = \int T_{roz} \cdot d\theta = \int T_{roz} \cdot w_{rel} \cdot dt = T_{roz} \cdot (w_{rel})_{batezbestekoa} \cdot t_{embragatze} \quad (24)$$

Enbragatze-etapan, w_{rel} labainketaren abiadura erlatiboa $w_{10}-w_{20}$ da hasieran eta 0 bukaeran (ikus 12. irudia), eta linealki aldatzen da egoera horien artean; beraz, batez besteko abiadura erlatiboa $(w_{rel})=(w_{10}-w_{20})/2$ da. Horrela, sortutako beroa honela adieraz daiteke:

$$W_{roz} = \frac{T_{roz}}{2} \cdot \frac{(w_{10} - w_{20})^2}{\frac{T_{roz} - T_1}{I_1} + \frac{T_{roz} - T_2}{I_2}} \quad (25)$$

Marruskadura-denboraren eta sortutako beroaren formulatik ondorioztatzen da zenbat eta handiagoa izan T_{roz} marruskadura-momentua, orduan eta txikiagoa dela $t_{embragatze}$. Hau da, zenbat eta marruskadura-momentu handiagoa izan enbrage batek, orduan eta azkarrago enbragatzen da, baina beroa denbora gutxiagoan sortzen da. Hori dela eta, zailagoa da hura kanporatzea, eta enbragea kaltetzeko aukera handiagoa dago, tenperatura altuak lortzen baitira.

Enbragatzearen etapa amaitu ondoren, 1. eta 2. ardatzak batera biratzen dute, eta sistema ardatz bakartzat har daiteke, T_1 momentu eragilea eta T_2 momentu eragozlea dituen ardatz gisa. Hala, momentu eragileak erresistentea gainditzen badu, ardatza azeleratu egingo da, eta hau ez bada betetzen dezeleratu egingo da.

Enbragea hautatu edo diseinatzean kontuan hartu beharreko beste alderdi garrantzitsu bat da enbrageak garatutako momentuak haren bidez transmititu nahi den momentuak baino handiagoa izan behar duela. Demagun, adibidez, bi ardatzen artean T pare bat transmititu nahi dela marruskadura-enbrage baten bidez; enbrage horrek garatu behar duen T_{roz} marruskadura-momentuak T baino handiagoa izan behar du; bestela, enbragea labaindu egingo da, T osoa transmititzeko gai ez delako (ardatzak ez dute inoiz labaintzeari utziko, eta, beraz, ez dira inoiz abiadura berdinduko). Lehenago esan bezala, T_{roz} handiagoa izateak enbragatze-denbora laburragoa eskatzen du, baina arazo termikoak sor ditzake. Horregatik, enbrage-fabrikatzaileek berek gomendatzen dute beren katalogoetan T_{roz} T transmititu beharreko pareta baino handiagoa izatea, baina ez askoz handiagoa. Orientazio gisa, 1. taulak SF zerbitzu-faktorearen balio gomendatuak erakusten ditu, eta, beraz, marruskadura-momentuak transmititu beharreko momentua baino SF aldiz handiagoa izan behar du, hau da, $T_{roz}=T \cdot SF$.

Aurkeztutako formulak erabiltzeko orduan, I_1 eta I_2 inertzia 1. eta 2. ardatzen inertzia baliokideei dagozkie, ez marruskadura diskoen edo konoen inertziei. Demagun 14a irudiko antolaketa dugula, engragearen 2. ardatza beste ardatz bati konektatuta dagoela. Irudi honetan, 1. ardatzaren eta 1. ardatzaren marruskadura-diskoaren inertzien batura da I_a ; I_b , berriz, 2. ardatzaren, 2. ardatzaren marruskadura-diskoaren eta 2. ardatzaren gainean muntatutako horzdun gurpilaren inertzien batura; azkenik, I_c beheko ardatzaren eta beheko ardatz horren gainean muntatutako horzdun gurpilaren inertzien batura da.

Aurreko formulatan erabili beharreko 1. ardatzaren I_1 inertzia $I_1=I_a$ da zuzenean. 2 ardatzaren I_2 inertzia kalkulatzeko, 14b irudikoa bezalako sistema baliokide bat definitu behar da. Sistema baliokide horrek jatorrizko sistemaren energia zinetiko bera izan behar du:

$$\frac{1}{2} \cdot I \cdot \omega_b^2 = \frac{1}{2} \cdot I_b \cdot \omega_b^2 + \frac{1}{2} \cdot I_c \cdot \omega_c^2 \quad (26)$$

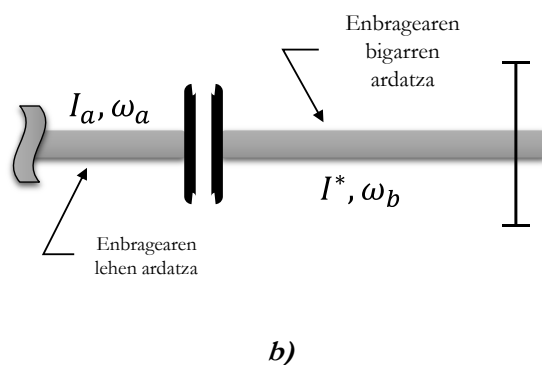
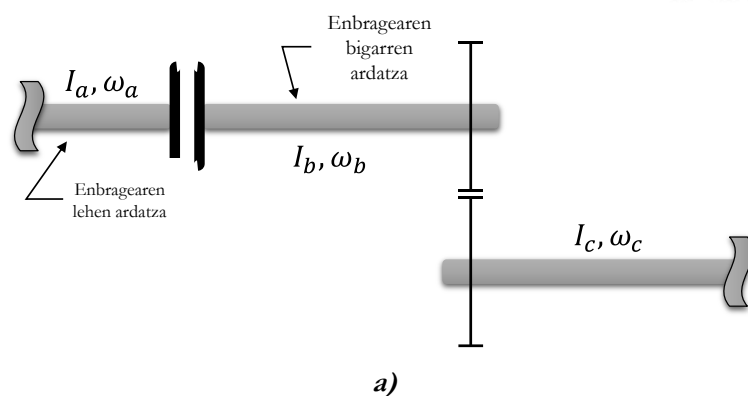
Hortik ondorioztatzen da 2. ardatzaren inertzia baliokidea hau dela:

$$I_2 = I = I_b + I_c \cdot \left(\frac{\omega_c}{\omega_b}\right)^2 \quad (27)$$

Ardatz gehiago izanez gero, prozedura bera erabiliko litzateke.

MAKINA HARTZAILE MOTA	MAKINA MOTOR MOTA			
	Motor elektriko a	4 edo 6 zilindroko eztanda-motorra	2 edo 3 zilindroko eztanda-motorra	Eztanda-motorra zilindro bakarrekoa
J oso txikia (ponpa zentrifugoak, haizagailu txikiak, konpresore zentrifugoa)	1,5	1,8	2	2,5
J txikia (jasogailuak, haizagailu handiak, zintako garraiagailuak, zurarako eta metalerako makina-erremintak, ehun-makina txikia)	1,7	2	2,2	2,8
J ertaina (labe birakaria, karga-jasogailua, nahasgailuak, zizaila, estanpatzeko makina, pistoizko ponpa eta konpresorea, zorrozteko makina, ehun-makina astuna, errotak)	2	2,3	2,5	3,2
J handia eta karga-punta sendoak (palak, leungailuak, traktoreak, metal arinen ijezkailuak, birringailuak, haizagailu handiak, matrize-prentsak, lokomotorrak, pistoi-ponpa handiak, garabiak)	2,5	2,7	3	3,5
J oso altua eta karga-punta sendoak (forjatzeko prentsak, pistoi handiko konpresorea, altzairu eta kautxurako ijezteko makinak, zerra alternatiboak, arrabol garraiatzaileak, limatzeko makinak, tenkatzeko bankuak, tolesteko makinak, birringailu handiak, papera egiteko kalandrak, zentrifugagailuak)	3	3,2	3,5	4

1. taula. SF zerbitzu-faktorearen balio gomendatuak. Egileen taula.



13. irudia. Enbrageak kalkulatzeko inertzia baliokidea: a) jatorrizko sistema b) sistema baliokidea. Egileen irudia.

Azkenik, enbrage-fabrikatzaileek enbrageen marruskadura-materialen propietate nagusiak zehazten dituzten taulak ematen dituzte beren katalogoetan. Marruskadura-materiala enbragearen elementu kritikoa da, zuzenean eragiten baitu garatutako marruskadura-momentuan; ideia orokor gisa, zenbat eta handiagoa izan p_{\max} marruskadura-koefizientea eta gehienezko presio onargarria, orduan eta handiagoa da enbrageak sor dezakeen marruskadura-momentua. Marruskadura-materialak propietateak gal ez ditzan (eta, beraz, enbrageak eraginkortasuna gal ez dezan), ezaugarri nagusi hauek izan behar ditu:

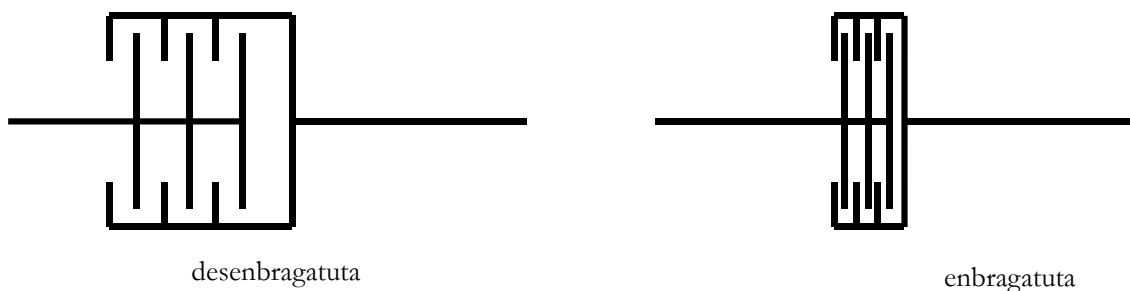
- a) Tenperatura altuei beren propietateak galdu gabe aurre egiteko gaitasuna
- b) Bero-eroankortasun eta disipazio handia
- c) Higadurarekiko erresistentzia handia
- d) Erresilientzia handia
- e) Portaera ona kontrako ingurumen-baldintzen aurrean (hezetasuna, etab.).

Ukitzean, gainazaletako bat altzairuzkoa edo burdinurtua izan ohi da, eta bestea marruskadura-materialekoa. 2. taulan ikusten denez, batzuetan forruak olioarekin lubrifikatzen dira (“Wet”); horrekin, μ asko murrizten da, baina, trukean, hobeto xahutzen da beroa eta p_{\max} balio handiagoak onar daitezke. T_{roz} -en balizko galerari aurre egiteko, enbrage lubrifikatuek marruskadura-aurpegi

batzuk izaten dituzte (disko anitzeko enbrageak, ikus 14. irudia). Kasu horretan, (1), (10), (13) eta (14) formulekin kalkulaturako marruskadura-momentuaren balioa marruskadura-aurpegien kopuruarekin biderkatu behar da, formula horiek marruskadura-alde bakarrekoak baitziren.

Materiala	Marruskadura koefizientea (μ)		Temperatura maximoa	Presio maximoa (p_{max})
	<i>Lubrikatzailearekin</i>	<i>Lubrikatzailegabe</i>	$^{\circ}C$	<i>kPa</i>
Burdinurtua burdinurtu gainean	0.05	0.15-0.20	320	1000-1750
Metal lainoztatua burdinurtuaren gainean	0.05-0.1	0.1-0.4	540	1000
Metal lainoztatua altzairu gogorraren gainean	0.05-0.1	0.1-0.3	540	2100
Feltroa altzairuaren edo burdinurtuaren gainean	0.18	0.22	140	35-70
Altzairu edo burdinurtu gaineke asbestoa	0.1-0.2	0.3-0.6	175-260	350-700
Altzairuaren edo burdinurtuaren gainean moldatutako asbestoa	0.08-0.12	0.2-0.5	260	350-1000
Altzairuan edo burdinurtuan inpregnatutako asbestoa	0.12	0.32	260-400	1000
Altzairuzko karbonozko grafitoa	0.05-0.1	0.25	370-540	2100

2. taula. Enbrageen ukipen-propietateen ohiko balioak. Egileen taula.



14. irudia. Disko anitzeko enbragea (marruskadura-aurpegi batzuk). Egileen irudia.