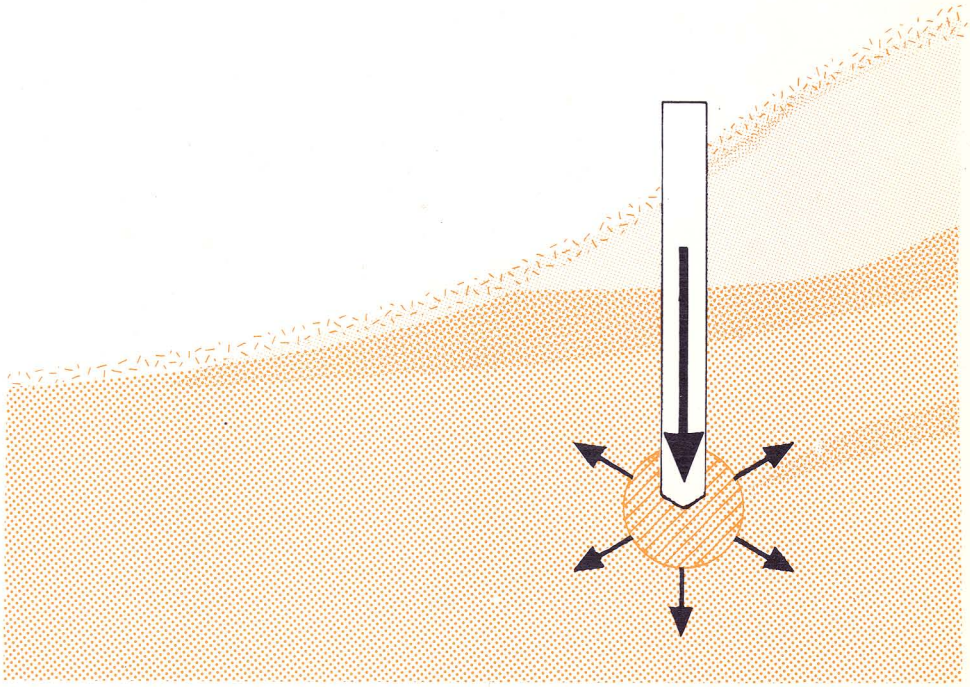
ZOLUEN MEKANIKA



udako euskal unibertsitatea

IRUÑEA 1983

Z O L U E N

M E K A N I K A

Jaime Kortabarria Onaindia

Jabegoa: U.E.U.ko GEOTEKNIA Saila
Lege-gordailua: BI-807-83
I S B N : 84-300-9342-7
Inprimategia: I. BOAN, S.A. - BILBO

SARRERA

Gizasemeok zortzi ordu sartzen ei dugu lanean egunero, beraz, itzarrik gauden denboraren erdia. Euskaldunok ere bai, eraikitzaileok ere bai, baina ezin izan euskaldun eraikitzaile eraikuntz arlorako ez dugulako euskararik. Gure bizibideari eskaintzen dizkiogun orduetan, zortzi egunero hain zuzen, erdaraz hitz egin behar nahiz eta etsipenez betetako "agur, gero arte" barregarri hori tarteka sartu; edo, hiztuna lotsatzen duen eta hizkuntza trakets egiten duen euskara mordoilo hori erabili, hitzak eta kontzeptuak edozelan eta zuzenki erdaratik hartzen dituena, esaldi birik batetan "hau erdaraz da baina ez dakit zelan esaten den euskaraz" txertatuz, eta honetarako astia eta gogoa ere behar dira, eta biak urri lanean. Egoera kaskar hau gaindiztzeko lan handia egin beharko dugu bide luzea ibiliz, urratsasko bota beharko ditugu. Liburu txiki hau, ez dakit zenbatgarren urratsa izango den, lehenetarikoa zoritxarrez, baina nora bide eta norantza onean eta horregatik baliogarri izan dadin, ahaleginak egin ditut. Geroak esango du.

Lantxo hau lehenetariko bat izanik, Zoluen Mekanika gai hau berebizikoa dugu, eraiki zimendu on batzuren gainean egin behar dela guk eraikitzaileok inork baino argiago ikusten baitugu. Eta Zoluen Mekanika, zimenduak batez ere kalkulatzeko eta diseinatzeko bildutako jakintza dugu. Zoluak, eraikuntza bat inguratzen duten ekai natural solidoak izanik, eta Mekanika, indarrek gorputz materialetan daukaten eragina aztertzen duen zientzia izanik, Zoluen Mekanikak, zer gertatzen den eraikuntz zamak edo indarrak zoluei ipintzen zaizkienean azaltzen du.

Mekanika hitza entzunez, Zoluen Mekanika zientzia bat dela dirudi, baina izatez ez da horrela, artea ere baita, zati on batez behintzat. Eta artea esaten dudanean, zenbakiak alde

batera utzita edo zenbakiei jaramon osorik egin gabe, erabakiak hartzeko ahalmena adierazi nahi dut. Ahalmen hau ingeniaritz sen on baten bidez lortzen da. Zoluen Mekanikaren ikuspuntutik eraikitoki bakoitza bat eta bakarra da, eta izan behar, Geologia aldetik eta hemen azalduko diren beste aldagai askoren aldetik horrela baita. Hala eta guztiz ere zientzi zatiak aurrerakuntza nabarmenak izan ditu 1930etatik gaur eguneraino, baina arte zatiak beti iraungo du eta garrantzi handiaz gainera. Eraikitoki bat batetan ere, zolutegien izakera aldabera dela kontutan hartuz, teoriak eta laborategi saiakuntza batzuk adierazten digutena alde batetik, eta zoluen landako joera bestetik erlazionatzeko, ingeniaritz sena behar da hein handi batetan. Hau irudi antzera ipinita honela adieraz daiteke:

Zoluen Mekanika, Geologia, laginen bidezko somaketa, ezperientzia (antzerako kasuen ezagupena) Ekonomia	+	Ingeniaritz Sena	=	Zolu-Ingeniaritz problemen ebazpide egokiak

Zoluen Mekanikaren historia labur labur bat egiterakoan, 1776garren urterarte zolu-ingeniaritza osoki enpirikoa zela esan behar. Urte horretan Coulomb-ek aurkeztu zuen bere lur-presioaren teoria. Gero Rankine-ren teoria argitaratu zen 1857garren urtean, eta ez zen egin aurrerakuntza handirik 1925garren urtean Terzaghi-k bere tentsio eraginkorraren printzipioa adierazi zuen arte. Printzipio honez hasi zen Zoluen Mekanika modernoaren garatzea, 1950etan bezain arestian ere garrantzi handiko aurrerakuntzak eginez. Hala eta guztiz ere, gaur egun ere, gauza batzu ez dira ondo ulertzen, hala nola tentsio-deformazioen erlaziotasunak eta zolu erdika aseen jokaera.

Hemen liburutxo honetan, ingeniariak jakin behar lukeen teoria azaltzen da; baina ingeniaritz eran, eratorpen handirik eta askorik egin gabe, eta ahalik eta aldagai eta aspektu gehien aipatuz, kasuan kasu denak garrantzitsuak direlako. Hau guztiau liburuaren neurria kontutan hartuz, noski. Teoria honen erabilkera azaltzea oso garrantzitsua da baina oso luzea ere bai zoritxarrez, eta neurri honetako lan batetik kanpo geratzen da, nahiz eta 6. atalean oinarri oinarrizko adibide bakun batzu eman.

Sarrera hau amaitzeko, liburu hau zelan mamitu dudan esango dut. Ia idatzirik eraman nuen U.E.U.ra ikastaldi batzu emateko; han besteen eritziak entzun eta ohar batzu hartu nituen zuzenketa egiteko. Behin zuzenduz, eta eskatu ditudan eritziak argitaratzearen alde daudela ikusirik, argitatzen ausartu naiz, eta hor doa lantxo hau.

Ez arinegi ere, baina urte bi igaro eta gero, liburu hau ahazteko erako beste hobe bat agertzen bada, euskaraz gai honetaz, nirea pozik handiena.

EGILEA

Bilbon, 1982-X-10

AURKIBIDEA

1. Atala. ZOLUEN DESKRIBAPEN ETA SAILKAPENA 9

1.1 Ingeniaritza-Zoluak 9
1.2 Zolu-Zatikiak 10
1.3 Zoluen Sailkapena 15
1.4 Zolu-laginak 19
1.5 Dentsitate Maximoa eta Minimoa Bikorrezko Zoluetan 27

2. Atala. TENTSIO-EGOERA ZOLU-MOLTSOETAN 29

2.1 Zolu Lehorrean Berez Dauden Tentsioak 29
2.2 Urpeko Zoluen Tentsio-Egoera 42
2.3 Kanpotiko Zamak Sorterazitako Tentsioak 45

3. Atala. UR-JARIOA ZOLUETAN 59

3.1 Zoluen Estruktura 59
3.2 Oldar-Motak 60
3.3 Inosketa 62
3.4 Inosberatasun-Koefizientea 64
3.5 Haztagabetasun-Egoera 72
3.6 Jario-Sareak 76
3.7 Laplace-ren Ekuapena 87
3.8 Iragazkien Betebeharrak 93
3.9 Kapilaritatea 94

4. Atala. SENDARPENA ETA APALPENA 99

4.1 Apalpena 99
4.2 Dimentsio Bateko Sendarketa-Saiakuntza 103
4.3 Apalketa-Ekuapenak 108
4.4 Jasoinen Apalpenak 109

5. Atala. EBAKIDUR JARKIMENA 121

5.1 Harearen Ebakidur Jarkimena 121
5.2 Kohesiodun Zolu Aseen Ebakidur Jarkimena . . . 129
5.3 K_o (alboetako jardoki gabeko) Saiakuntza . . . 145

6. Atala. EBAKIDUR JARKIMENAREN ERABILERA DISEINUAN. . 147

6.1 Lurraren Aurkako Ormak 147
6.2 Sakonera Txikiko Zimenduen Euspen-Ahalmena . . 158

1. ATALA

ZOLU DESKRIBAPEN ETA SAILKAPENA

Atal honek ingeniaritza-zoluen izaera eta ezaugarriak azaltzen ditu. Hasteko, zolua zatiki bereziz osoturikotzat hartzen da, hau da, fase bakarreko sistema deitzen dena, eta gero, airez, urez eta zatikiz osoturikotzat, fase aniztun sistema izenekoa.

Zolu-propietate behinen batzu aipatzen eta eztabaidatzen dira hemen. Propietate hauk zoluak talde desberdinetan sailkatzeko zelan erabil daitezkeen erakusten da.

1.1.- Ingeniaritza-Zoluak

Zoluen jatorria Geologi ikastaroan ikasten da. Haizeak eta urak eragindako higadurak deseginiko, eta, meteorizatze fisiko eta kimikoek deseginiko haitzetako mineralez zelan osotuak diren batez ere, Geologiak irakasten du.

Zoluen Mekanikan eta zimendakuntz ingeniaritzan, zolu hitz honek zolu organikoak ere adierazten ditu, adibidez zoikatza. Honez gain, legarrak, uharriak eta boldroak*, zolu bikortutzat hartzen dira.

Zimenduen azterketetan eta diseinuetan, ingeniari zibilak zolua, haitza, izotza, elurra eta ura aurki ditzake. Nahiz eta gai bakoitza arlo espezializatutzat har daitekeen, eremu guztietako printzipio arrunt asko dute. Horregatik, "Ingeniaritza Geotekniko" izenburupean espezialitate desberdin hauk sartzeko joera izan da.

* Izartxo hau duten hitzen azalpena lantxo honen azkenean, glosategia deitzen den zatian ematen da.

1.2.- Zolu-Zatikiak

Zolu-zatikiek neurri eta eiteen eremu* oso luzea dute. Biek, neurriak eta eiteak, zolu-propietate fisikoak nabariki alda ditzakete; arazo hauk geroago eztabaidatuko dira.

1.2.1.- Zatikien Neurriak

Zolu-jalkin batetan zatikien neurrien eremu bat dago. Zatiki batzu erraz ikus daitezte begiz, beste batzu, berriz, hain txikiak izanik, mikroskopiopean bakarrik ikus daitezke. Zatiki desberdinen neurrien ehunekobestea eta eremua jakitea oso garrantzitsua da, eta zatiki edo bikorren neurriak zeintzu diren hautemateko saiakuntza estandarrak asmatuak izan dira horregatik. Lantxo honetan, bikor-neurrien* analisiari buruzko saiakuntzaren laburpena sartu da.

Zatiki handienen (hareen eta legarren, alegia) bikor-neurrien banapena hautemateko, maze*-saiakuntza (analisia) erabiltzen da, eta hidrometro-saiakuntza (analisia) zatiki txikienen (buztinen eta lupetzen*, alegia) bikor-neurrien barreiapena hautemateko.

Maze saiakuntzan, zolu-lagina* maze-sail gainean ipintzen da. Maze bakoitzak zabaldura karratudun burdinarizko* sarea du; zabaldurek neurri estandarra dute eta maze bakoitza bere zabalduren arauera zenbakiturik dago. Gain gaineko mazeak ditu zabaldura handienak (8 cm.koak gehienetan) eta zabaldura txikienak behe beheko mazeak (0,074 mm.koak, edo 200 deituriko mazea). Mazeak eta zolu-lagina eskuz edo bibramakinaz astindu egiten dira, eta maze bakoitzak gerarazten duen zoluaren pisua taula eran erregistratua izaten da bikor-neurrien analisirako datu-orrietan. Honela, bikor-neurri bakoitzaren ehunekobestea hautematen

da eta neurri-ordenaren kurba irudika daiteke.

Hidrometro-saiakuntzan, zatikien neurriak esferaren balio kideak balitez, eta uretan esferen abiaduraz jalkiko balitez egiten da kalkulua. Denbora neurtuz eta Hidraulikaren legeak (Stokes-en formula batez ere) gogoan hartuz, une bakoitzean zein neurriko zatikiak jalki diren jakiten da.

Maze-saiakuntzaren eta hidrometro-saiakuntzaren emaitza batzu neurri-ordenaren kurba eran irudikaturik daude 1.1 irudian.

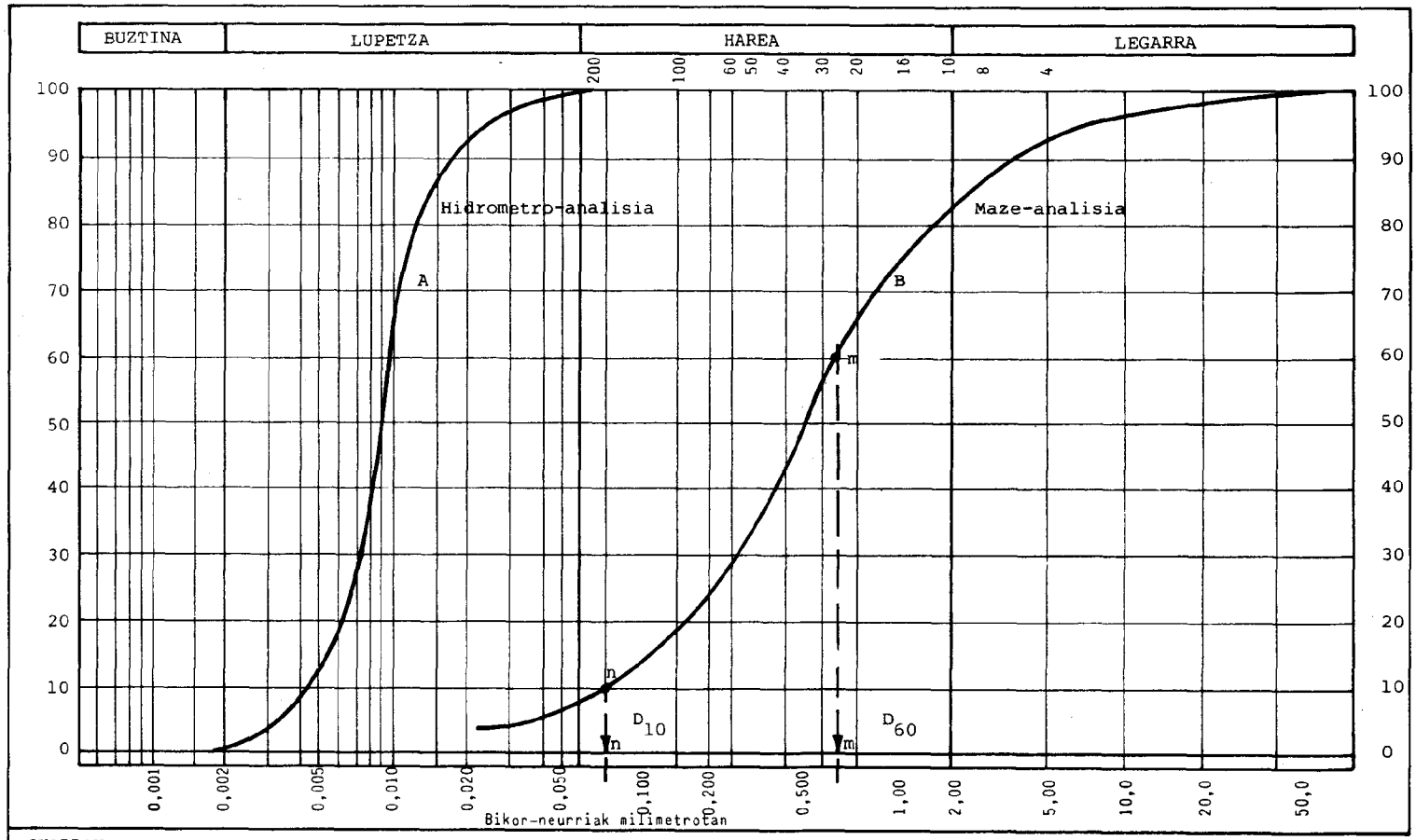
Aipaturiko saiakuntzak, 0,001 mm.tik 10 mm.ra edo lerrokatzen diren zatiki-neurriak neurtzeko asmaturik daude. Neurri hauetan, buztina, lupetza, harea eta legarra sartzen dira. Zolu horik zeintzu neurritan mugatzen diren erabaki gabe dago, eta sailkatze-sistema bat baino gehiago erabiltzen da ondorioz. Sistemen ugaritasun honek sarritan nahaste eta ezulerkuntzak dakartza, bikor-neurrien banapena taula eran aurkezturik dagoenean batez ere, adibidez:

Legarra	%10
Harea	%70
Lupetza	% 5
Buztina	%15

Honelako aurkezpena, sailkatze-sistema eman egiten bada izango da adierazgarria, eta orduan bakarrik.

Sailkatze-sistema (zatiki-neurriei, bakar bakarrik, dagokiena) erabilienetariko bat erakusten da 1.1 irudian. Sailkatze sistema honetan buztin-neurriaren muga 0,002 mm. da. Buztin-frakzioa, hau da, buztin-neurriaren ehunekobestea, sarritan azpimarratzen da zoluen propietate fisikoak aldatzeko eragin garrantzitsua du eta.

Sailkatze-sistema gehienetan, gutxienez zolu-mota bi bereizten dira:



OHARRAK:

1.1 Ir. Neurri-ordenen kurbak

Bikor larrizko zoluetan, harea, legarra, uharriak eta boldroak sartzen dira. Kohesiorik ez daukaten zatiki lokabez behinenki osoturikotzat hartzen dira honelako zoluak. Zatiki hauez osoturiko moltsoek, ebakidurari, marruskadur jarkimena* bakarrik kontrajarri ahal diote. Marruskadur jarkimena geroagoko atal batetan eztabaidatzen da.

Bikor zehezko zoluetan, buztina eta lupetza sartzen dira. Zolu hauk, propietate biak, marruskadura eta kohesioa dauzkate eta plastikotasun-gradu aldakorrak eduki ditzakete.

1.2.2.- Uniformetasun-Koefizientea

Neurri-ordenaren kurbaren tankerak eta bikor larrizko zoluen propietate fisikoek badute nolabaiteko erlazioa elkarren artean. Neurri-ordenaren kurbak, 1.1 irudian A kurbaz erakusten den bezala, zuta izateko joera badu, zolua uniformeki neurri-ordenatua da. Logaritmo-ziklo batzutan lerrokatzeko joera badu, B kurbak erakusten duen bezala, zolua ondo neurri-ordenatua da.

Neurri-ordenaren kurbaren tankera zenbakiz ere defini daiteke, Kf_u uniformetasun-koefizientea aurkeztuz,

$$Kf_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \qquad (1.1)$$

non, D_{60} = honela definituriko zatikiaren diametroa: pisuz, zoluaren %60a zatiki hau baino zeheagoa da. m puntua 1.1 irudian, beraz.

D_{10} = honela definituriko zatikiaren diametroa: pisuz, soluaren %10a zatiki hau baino zeheagoa da. n puntua 1.1 irudian, beraz.

D_{10}-ri neurri eraginkorra ere deritzo. 2,0 inguru baino gutxiagoko uniformetasun-koefizientedun zolua, uniformetzat

hartzen da.

1.2.3.- Zatikien Eite eta Mineralogia

Eskuharki, bikor larrizko zoluak biribilak edota angeluarrak diren zatikiz osotuak dira. Biribiltasun eta angeluartasun-gradua, mineral-motaren eta, meteorizaketa eta garraio eren araueraKoa da. Eguneroko lanean, zatikiak banan banan, izari* berdintsudunekotzat har daitezke, hau da, kubo edo esferatzat har daitezke. Zatiki bakoitza, mineral antzez geldoz, adibidez kuartzoz, osoturikoa dela har daiteke. Honelako zoluen jokaera metodo mekanikoz ondo azal daiteke.

Bestalde, buztin-neurriko zatikien mikroskopiopeko azterketek, zatikiak izari berdintsudunekoak ez direla erakusten dute. Itxuraz behintzat, gehienetan, xafla antzekoak izatera eta noizbehinka makila-eitekoak izatera jotzen dute. Mineralak kristal konplexuak dira gainera. Kristalen ikaskuntza* mineralogikoak hauetaz saiatzen dira:

- diren mineralak identifikatzen, adibidez, kaolinita, montmorillonita, illita, etab.

- estrukturak azaltzen, hau da, xafla antzeko eiteen, zatikien orientapenen, eta abarren zergatia.

- estrukturan eta jokaeran, egintza kimikoek eragindako aldapenak azaltzen.

- jokaera mekanikoen aurreikuspena ematen.

Ikaskuntza mineralogikoak, beren kostua eta konplexutasuna direla eta, ez dira erraz ikusten zolu-ingeniaritzan. Bietan, ikerpenetan eta ingeniaritza-ikaskuntzetan erabiltzen dira halere. Adibide gisa, Ipar Amerikako erdi-mendebaldean, eraikuntzei gertaturiko kalte estrukturalak, montmorillonita buztinei egotzi dizkiete, kanpoko ur askez bustitzen direnean

nabariki handitzen baitira. Aluminio eta silizezko xafla-unitateek osotzen dute montmorillonita. Unitate tarteetan ura erraz sar daiteke bolumen-handitze nabarmenak sortuz.

1.3.- Zoluen Sailkapena

Zoluak zatikien neurrien arauera bakarrik sailkatzea ez da sarritan nahiko, bikor zehezko zoluen kasuan batez ere, kohesioa eta plastikotasuna baitute. Kohesioa eta plastikotasuna sistema mineralogiko konplexuen emaitzak dira. Gauza diren saiakuntza, karta eta parametro batzu asmatu eta erabili dira sailkatze-sistemetan azken berrogeitamar urteetan; hauetariko batzu hemen oraintxe eztabaidatuko dira.

1.3.1.- Atterberg Mugak

Atterberg mugak enpirikoak dira eta laborategi-saiakuntzetan, bakar bakarrik, oinarriturik daude. Muga gorena edo likido-muga, w_L, plastiko-egoeratik likido-egoerara zolua iragaten deneko ur-edukia da; w_P muga beherena edo plastiko-muga, erdisolido-egoeratik plastiko-egoerara zolua iragaten deneko ur edukia da. Ur-edukia, w, honela definitzen da:

$$w = \frac{W_w}{W_s} \qquad (1.2)$$

non, W_w = zolu-laginak duen uraren pisua, eta

W_s = zolu-lagin lehorraren pisua. Labean, 104°Ctan, 24 ordutan lehorturikoarena.

Nahiz eta Atterberg mugak enpirikoak izan, prozesu estandarrak erabiltzen badira eurak lortzen, egokiak dira zoluak sailkatzeko.

Plastikotasun-indizea, I_P, honela definitzen da:

$$I_P = w_L - w_P \qquad (1.3)$$

Plastikotasun-indizearen eta likido-mugaren baloreak plastikotasun-kartan irudikatzen dira (ikus 1.2 irudia). Puntu irudikatu hauk sail desberdinetan jaus daitezke, hala nola CL, OH, etab.

Eskuarki, $I_P = 0$ bada, zolua ezplastikoa dela esaten da; $I_P > 0$ bada, zolua plastikoa da. I_P gehitzean zoluaren plastikotasuna handitzen da horregatik.

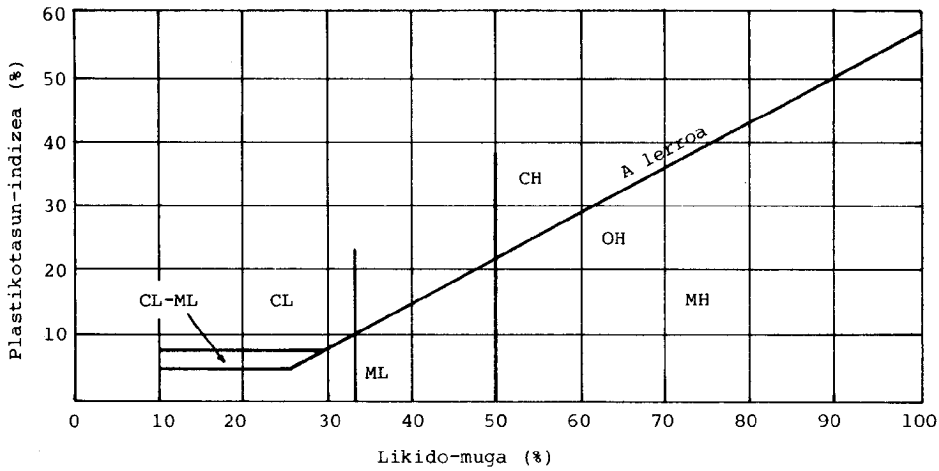
Likidotasun-indizea, hau da I_L , honela definitzen da:

$$I_L = \frac{w - w_P}{w_L - w_P} \qquad (1.4)$$

non, w = zoluaren ur-eduki naturala.

Gehienetan, zolu-jalkinetan, w-ren balorea w_L eta w_P-ren tartean izango da, eta normalean I_L zerotik batera aldatzen da horregatik. I_L zerora hurbiltzen dencan, zolua erdisolido-egoera hurbiltzen da, eta jakina, bere jarkimena handiagotu beharko luke. Era berdinean jarkimena txikiagotu beharko luke I_P-ren balorea gehitzean. Gogoan hartzekoa da halere, zolu asaldatu* edo birmoldeatuak erabiltzen direla w_P eta w_L lortzeko. Birmoldeaketak, zoluaren lotura eta estruktura naturalak suntsitzen ditu, eta hau dela eta, zolu birmoldeatuen jarkimena ezbirmoldeatuena baino txikiagoa da eskuarki. I_L baloreak, adierazletzat bakarrik, baina inoiz ere ez absolututzat, hartu behar direla azpimarratu egiten da.

Buztinezko jalkin batzuren ur-edukia likido-muga baino handiago dela oharteraztekoa da; orduan, 1.4 ekuapenak $I_L > 1.0$ ematen du. Honelako jalkinak, Kanadan, Ottawa eta St. Lawrence ibaien haranetan zehar, eta Eskandinabian aurkitzen dira. Buztin hauk itsasbuztinak dira, eta Leda buztinak edo buztin sentikorrak eskuarki deritze. Euren egoera naturalean, buztin hauk nahiko zurrunak izan daitezke, baina jarkimen gehiena gal dezakete birmoldeatzen direnean ($w > w_L$ delako); buztin hauen



1.2 Ir. Plastikotasun-karta.

ML Lupetz inorganikoa, hare zehe zeheak, harri irina, lupetzdun edo buztindun hare zeheak, edo plastikotasun txikiko buztindun lupetzak.

CL Txikitik ertainerainoko plastikotasuna daukaten buztin inorganikoak, legardun buztinak, haredun buztinak, lupetzdun buztinak, buztin meheak.

OL Lupetz organikoak eta plastikotasun txikiko lupetzdun buztin organikoak.

MH Lupetz inorganikoak, hare zehedun edo lupetzdun zolu mikadunak edo diatomeadunak, lupetz elastikoak.

CH Plastikotasun handiko buztin inorganikoak, buztin gizenak.

OH Ertainetik handirainoko plastikotasuna daukaten buztin organikoak, lupetz organikoak.

lubiziei lur-jarioak deritze horregatik, buztin birmoldeatuak distantzia luzeetan zeharjario daitezke eta.

Buztinen aktibotasuna honela definitzen da:

$$\text{Aktibotasuna} = \frac{\text{plastikotasun-indizea}}{\text{0,002 mm. baino zeheagoen pisuzko \%a}} \qquad (1.5)$$

Ekuapen honek, buztin baten aktibotasuna konstante izan beharko lukeela aldarrikatzen du. Bestela esanda, zolu baten buztin-frakzioa aldatzen bada, I_P-k aldapen proportzionala jasan beharko luke, frakzio berbera, hau da, aktibotasun berbera emateko. Erlazio hau saiakuntz bidez egiaztatu dute. Buztinezko jalkin batetan, plastikotasun-indize eta buztin - frakzioen balore-aldakuntzak izango dira; baina aktibotasun-balore nahiko konstanteak lortuko dira halere.

1.3.2.- Uzkurdur Muga

w_S uzkurdur muga, erdisolido-egoeratik solido-egoerara zolua iragaten deneko ur-edukia da. Muga hau ere laborategiko saiakuntz bidez lortzen da.

Demagun, ur-eduki handia duen zolu-lagin bat, adibidez ia likido-mugakoa. Zolu-lagina lehortzen bada, ur-edukia gutxiagotzen doa eta bolumena txikiagotzen. Lehortzeari jarraitzen bazaio, ur-edukia zerora hurbilduko da noizbait; hori baino lehen, behin uzkurdur mugara helduz gero, neurri batetan konstanteturik geraturik bolumena ez da txikiagotuko halere.

1.3.3.- Sailkatze-Sistemak

Aurreko azpiataletan, zatiki-neurrien barreiapena, mineralogia, Atterberg mugak, etab. eztabaidatuak izan dira. Sailka-

tze-sistemak erabiltzean hauetariko gai gehienak haintzakotzat hartzen dira. Sailkatze-sistemarik arruntena "Unified Soil Classification" delakoa da; beste sailkatze-sistema batzu ere erabiltzen dira, hala nola "U.S. Public Road Administration System".

Eskuarki, honelako sailkatze-sistemak, argibidea elkarbidaltzea erraztadin eta ingeniari zibilak zoluen datuak erkatzeko ahalmena izan dezan erabiltzen dira.

Zolua begiratzea eta ukitzea bakarrik erabiliz, eskarmentudun teknikariak edo zolu-ingeniariak zolu gehienak nolakotasunez sailka ditzakela, gogoan edukitzekoa da. Zenbatasun-analisia egiteko, laborategiko saiakuntzak behar beharrezkoak dira halere.

1.4.- Zolu-Laginak

Zimendakuntz ingeniaritzako problema gehienetan, zolu naturalezko edo artifizialki osoturiko zolu-moltsoz arduratzen gara, eta ez zatiki bakarrez edo zolu-lagin asaldatuz. Hau dela eta, laborategian edo landan aztertua izan daitekeen lagin adierazlea lortzea beharrezkoa izaten da. Erabiltzen diren lagintze-metodoen edo lagingailuen arauera, neurri desberdinetako lagin adierazleak lortuko dira. Lagintze-metodoak eta teknikak hemen ez dira aztertuko, baina oinarrizko kontzeptu batzu aipatzea baliogarri izango da.

Idealki, lagin guztiak ezasaldatuak izan behar lukete euren tokiko zoluak adierazteko. Eguneroko lanean, egiazko lagin ezasaldatua ia lortezina da, eta edozein lagintze-teknika asaldapenak gutxientzen* eta txikientzen* saiatzen da beraz.

Bikor larrizko zoluek ez dute kohesiorik edo txikia dute, eta ezin lagin daitezke asaldapen garrantzitsurik gabe horregatik. Buztin eta istil bezalako bikor zehezko zoluek kohesioa daukate eta, asaldapen garrantzitsurik gabe lagin daitezke.

Laginak, ideialki, saiakuntz putzuetan, alboetan edo hondoan, hartu behar dira; baina metodo hau garestia da eta saiakuntz putzuen sakonera ere mugatua izaten da: lau bost metro esate baterako. Metodo aukeragaiak*, zulapen bidez laginak lortzen dituztenak, asmatuak izan dira horregatik.

Kohesiodun zoluak, paret-mehedun tutuz (Shelby tutuz) laginduak dira eskuarki. Tutu hauk, gutxi gora behera 60 cm. luzeraz eta 5 cm.tik 10 cm.ra diametroz dira, 1.3 irudian ikusten den eran. Tutu-mutur batek ertz ebakitzaile zorrotza du. Beste tutu-muturra, altzairuzko daratulatzeko zarta-serie baten azkenera konektatua izaten da, eta zulapen hondora, zolu ezasaldatuaren barrura bultzatua.

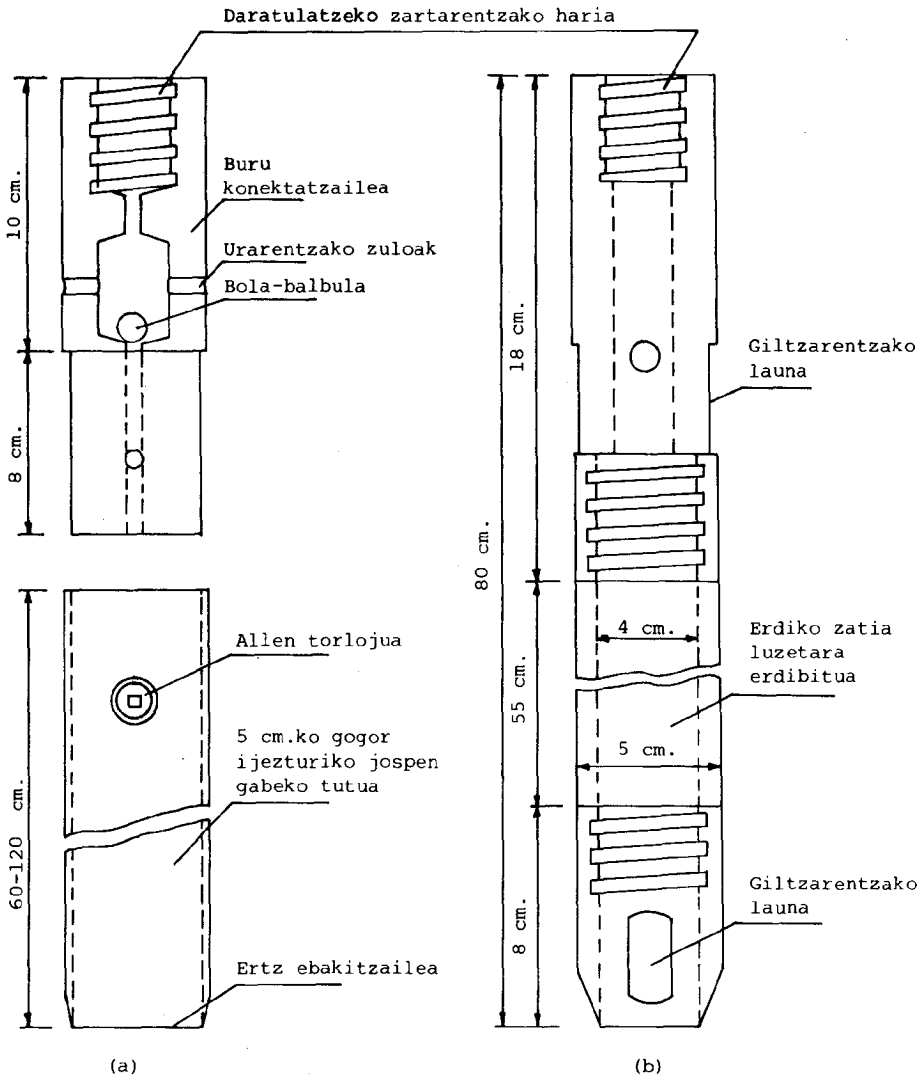
Bikorrezko zoluak, altzairuzko paret lodidun tutu erdibitu estandarrez lagintzen dira (ikus tutua 1.3 irudian). Lagingailu honi goilare-lagingailua ere deritzo. Lehenengoa bezalaxe, hau ere zarta-seriearen azkenera konektatua izanik, kolpeka barruratzen da, sartze-jarkipena edo N kolpe-kopurua jakiteko, non

N = 30 cm. edo oinbete bat sarterazteko, goilare-lagingailuari eman behar zaion kolpe-kopurua.

Goiengo daratulatze-zarta gainera 70 kiloko pisua jausteraziz 75 cm.ko altueratik, lagingailua sartzen da. Saiakuntza hau estandartua dago, eta Sartze-Saiakuntza Estandarra deritzo. Goilareak ere izari estandarrak ditu, 1.3 irudian ikusten den bezala. Barne diametroa (B.D.) = 4,0 cm.koa denez, legar larridun zoluetan erabiltzen bada, lagingailuak erroredun N baloreak eman ditzake.

N balorearen erabilera diseinuan, geroagoko atal batetan azalduko da.

Zoluen propietate fisikoen baloreak erabakitzeko, erlaziotasun batzu ezarriak izan dira. Erlaziotasun hauk ondoko eran definitzen dira.



1.3 Ir. (a) Shelby tutua, (b) Goilare erdibitua.

1.4.1.- Grabitate Espezifikoa

Zolu-zatikien (solidoen) grabitate espezifikoa G deitzen da. Mineralek 2,3tik 2,9ra lerrokatzen diren baloreak dituzte. Zoluak gutxitan dira mineral bakarrezkoak; edozein zolu baten tzako batezbesteko grabitate espezifikoa saiakuntz bidez lortzen da hortaz.

Definizioz:

Masa-grabitate espezifikoa = $G_m = \gamma_t/\gamma_o$ (1.6)

Uraren grabitate espezifikoa = $G_w = \gamma_w/\gamma_o$ (1.7)

Solidoen (zolu-zatikien) grabitate espezifikoa = $G = \gamma_s/\gamma_o$ (1.8)

non, γ_t = bolumen-unitatearen pisu guztia (unitate-pisu* guztia), (sarritan γ bakarrik idazten da),

γ_w = tenperatura batetako uraren unitate-pisua,

γ_o = 4°Ctako uraren unitate-pisua,

γ_s = solidoen (zolu-zatikien) unitate-pisua.

Eguneroko lanean $\gamma_w = \gamma_o$ hartzen da; hau dela eta, 1.6tik 1.8rainoko ekuapenak honela idatz daitezke:

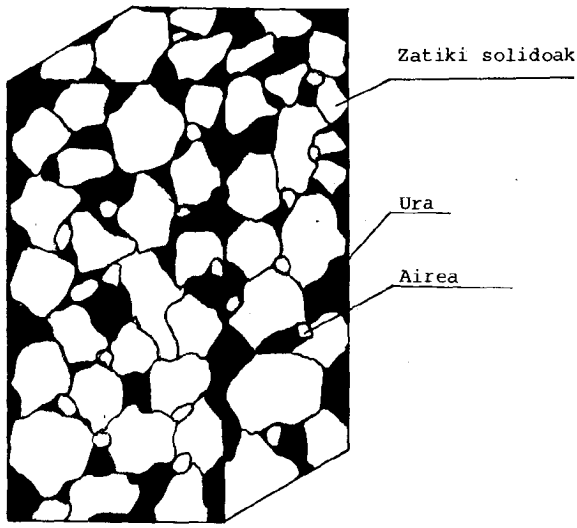
$G_m = \gamma_t/\gamma_w$ (1.9)

$G_w = \gamma_w/\gamma_w = 1,0$ (1.10)

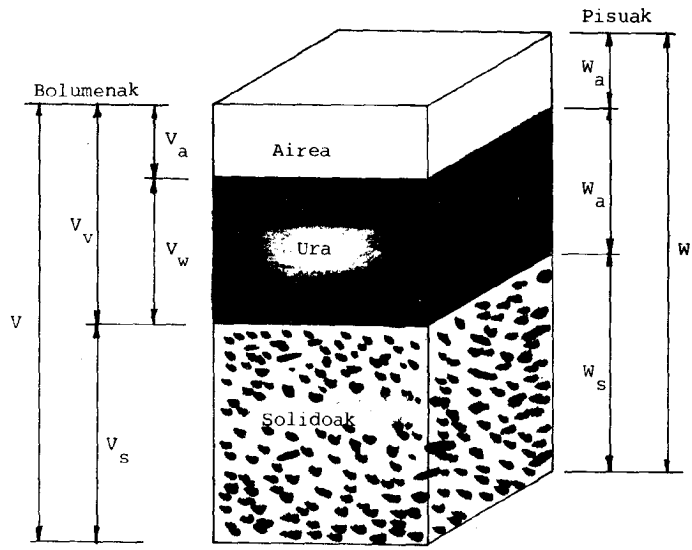
$G = \gamma_s/\gamma_w$ (1.11)

1.4.2.- Fase Aniztun Zolu-Lagineko Erlaziotasunak

Dimentsio bitan eta diagramatikoki, zolu-lagin natural bat



(a)



(b)

1.4 Ir. Fase aniztun zolu-sistema. (a) Elementu naturalak.
(b) Fase desberdinen antzezpena.

erakusten da 1.4 irudian. Lagina, airez, urez, eta zolu-zatikiz (mineralez) osotutakoa dela gogoan hartzen da. Fase desberdin hauk azarean barreiaturik daude laginean zehar; analisia eta aurkezpena errazteko, gehienetan fase hauk aldenduak izaten dira, bertan 1.4 irudian ikusten den bezala.

Irudi honetan ikus daiteke laginaren bolumen totala V dela, hots,

$$V = V_s + V_w + V_a \qquad (1.12)$$

non, V_s = zolu-zatikien bolumena,

V_w = uraren bolumena,

V_a = airearen bolumena.

Urak eta aireak, laginaren hutsarte*-espazioa betetzen dute; V_v hutsarte-bolumena eman dezaten elkartzen dira beraz.

Honela,

$$V_v = V_w + V_a \qquad (1.13)$$

eta 1.12 ekuapena ikusiz,

$$V = V_s + V_v \qquad (1.14)$$

Antzera, W laginaren pisu guztia zera da:

$$W = W_s + W_w + W_a \qquad (1.15)$$

non, W_s = solidoen pisua,

W_w = uraren pisua,

W_a = airearen pisua.

Horregatik,

$$W = W_s + W_w \qquad (1.16)$$

γ laginaren unitate-pisua, zera da definizioz:

$$\gamma = \frac{W}{V} \qquad (1.17)$$

e hutsarte-arrazoia:

$$e = \frac{V_v}{V_s} \qquad (1.18)$$

n bolumen-porositatea:

$$n = \frac{V_v}{V} \qquad (1.19)$$

S asetasun-gradua:

$$S = \frac{V_w}{V_v} \qquad (1.20)$$

γ_s solidoen unitate-pisua:

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s} \text{ , eta} \qquad (1.21)$$

γ_w uraren unitate-pisua:

$$\gamma_w = \frac{W_w}{V_w} \qquad (1.22)$$

1.14, 1.18 eta 1.19 ekuapenak elkartuz, zera lortzen da:

$$n = \frac{e}{1 + e} \quad \text{edo} \quad e = \frac{n}{1 - n} \qquad (1.23)$$

Egoki denez, bedi V = 1,0 (hots, litroa, edo metro ber hirua), eta horrela 1.14 ekuapena hartuz, $V_s + V_v = 1,0$ eta 1.18 ekuapena hartuz, $V_v = e\ V_s$; eta,

$V_s + V_v = V_s + eV_s = 1$, eta

$$V_s = \frac{1}{1 + e} \qquad (1.24)$$

eta $V_v = 1 - V_s = 1 - \frac{1}{1 + e}$; horregatik

$$V_v = \frac{e}{1 + e} \qquad (1.25)$$

$V = 1,0$ denean, 1.17 ekuapenean $\gamma = W$ lortzen da, hots,

$$\gamma = W_s + W_w \qquad (1.26)$$

1.20 ekuapena hartuz, $V_w = S\ V_v$, eta 1.15 ekuapenean ordeztuz,

$$V_w = \frac{S\ e}{1 + e} \qquad (1.27)$$

1.11 eta 1.21 ekuapenak hartuz, $W_s = \gamma_s V_s = G_w V_s$, eta 1.22 ekuapena hartuz $W_w = V_w \gamma_w$. Balore hauk 1.26 ekuapenean ordeztuz, zera lortzen da:

$$\gamma = (GV_s + V_w)\ \gamma_w \qquad (1.28)$$

1.24 eta 1.27 ekuapenen ordezpenek zera lortzen dute:

$$\gamma = \frac{G + S\ e}{1 + e}\ \gamma_w \qquad (1.29)$$

1.2 eta 1.26 ekuapenen ordezpenek, $\gamma = W_s(1 + w)$ lortzen dute, eta 1.11, 1.21 eta 1.24 ekuapenen ordezpenek

$$\gamma = \frac{1 + w}{1 + e}\ G\ \gamma_w \qquad (1.30)$$

Laginak ez badauka urik, asetasun-gradua zero izango da, hau da, $S = 0$ eta 1.29 ekuapena, γ_d unitate-pisu lehorra azal dezan erabil daiteke. Honela,

$$\gamma_d = \frac{G}{1 + e}\ \gamma_w \qquad (1.31)$$

1.11 , 1.21 , 1.24 eta 1.27 ekuapenak hartuz

$$w = \frac{W_w}{W_s} = \frac{V_w \gamma_w}{V_s G \gamma_w} = \frac{\frac{S\ e}{1+e}}{\frac{G}{1+e}} = \frac{S\ e}{G} \qquad \text{edo}$$

$$w\ G = e\ S \tag{1.32}$$

1.32 ekuapena 1.31an ordeztuz, zera lortzen da:

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1+w} \tag{1.33}$$

Urpeko unitate-pisua, γ' , honela definitzen da:

$$\gamma' = \gamma - \gamma_w \tag{1.34}$$

Urpeko zolu asearentzat, S = 1,0 eta 1.19 ekuapena honela geratzen da:

$$\gamma = \frac{G+e}{1+e}\gamma_w \text{ , eta } \gamma_w \text{ kenduz (substraituz)}$$

$$\gamma' = \frac{G-1}{1+e}\gamma_w \tag{1.35}$$

1.5.- Dentsitate Maximoa eta Minimoa Bikorrezko Zoluetan

Zelan zoluaren dentsitatea, asetasun-graduaren, hutsarte arrazoiaren eta solidoen grabitate espezifikoaren menpeko den 1.4.2 azpiatalean, adibidez 1.29 ekuapenean erakutsi da. Hor, G eta S konstantetzen badira, zelan dentsitatea eta e hutsarte-arrazoia elkarren artean zuzenki erlazionaturik dauden ikus daiteke. Bestela esateko, dentsitatea aldatuko da hutsarte-arrazoia aldatzen bada.

Esfera-eitedun hare-zatiki lokabeak hartzen baditugu, era desberdin askotan elkarbileraziak* izan daitezkeela jakina da. Muturreko elkarbilpen biak ahal den egoerarik astinen eta den-

tsoen bezala agertzen dira, eta zenbakitan, e_{max} eta e_{min} dei daitezke. Erdiko elkarbilpenak e deitzen dira. Baina hutsarte-arrazoia emanik elkarbilpen-egoera azaldu beharrean, erabilbide gehiagokoa eta adierazgarriagoa da bikorrezko zoluaren dentsitatea ematea, D_r bere dentsitate erlatiboa hautemanez,

$$D_r = \% \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \times 100 \qquad (1.36)$$

non, e_{max} = zoluaren egoera astinengo hutsarte-arrazoia,

e_{min} = zoluaren egoera dentsoengo hutsarte-arrazoia,

eta e = zoluak duen hutsarte-arrazoia.

1.36 ekuapenaz lortzen diren zenbakitako baloreak, hitzez ere adierazten dira 1.1 taulan idazten diren bezala.

1.1 TAULA

D_r Dentsitate Erlatiboa %	Adierazpena
0 - 15	Oso astina
15 - 35	Astina
35 - 65	Erditrinkoa
65 - 85	Dentsoa
85 - 100	Oso dentsoa

2. ATALA

TENTSIO-EGOERA ZOLU-MOLTSOETAN

Pisu-bolumen-dentsitate erlaziotasunak deribatuak eta eztabaidatuak izan ziren 1. atalean. Zoluei dagokien heinean, tentsio kontzeptua aurkezteko, 2. atalak erlaziotasun horik erabiltzen ditu. Zoluaren bere pisua, hots, γ unitate pisua dela eta, zolu moltsoan dauden tentsioak azaltzen eta eztabaidatzen dira. Tentsio horik, hasierako, berez dauden edo "in situ" tentsioak dira.

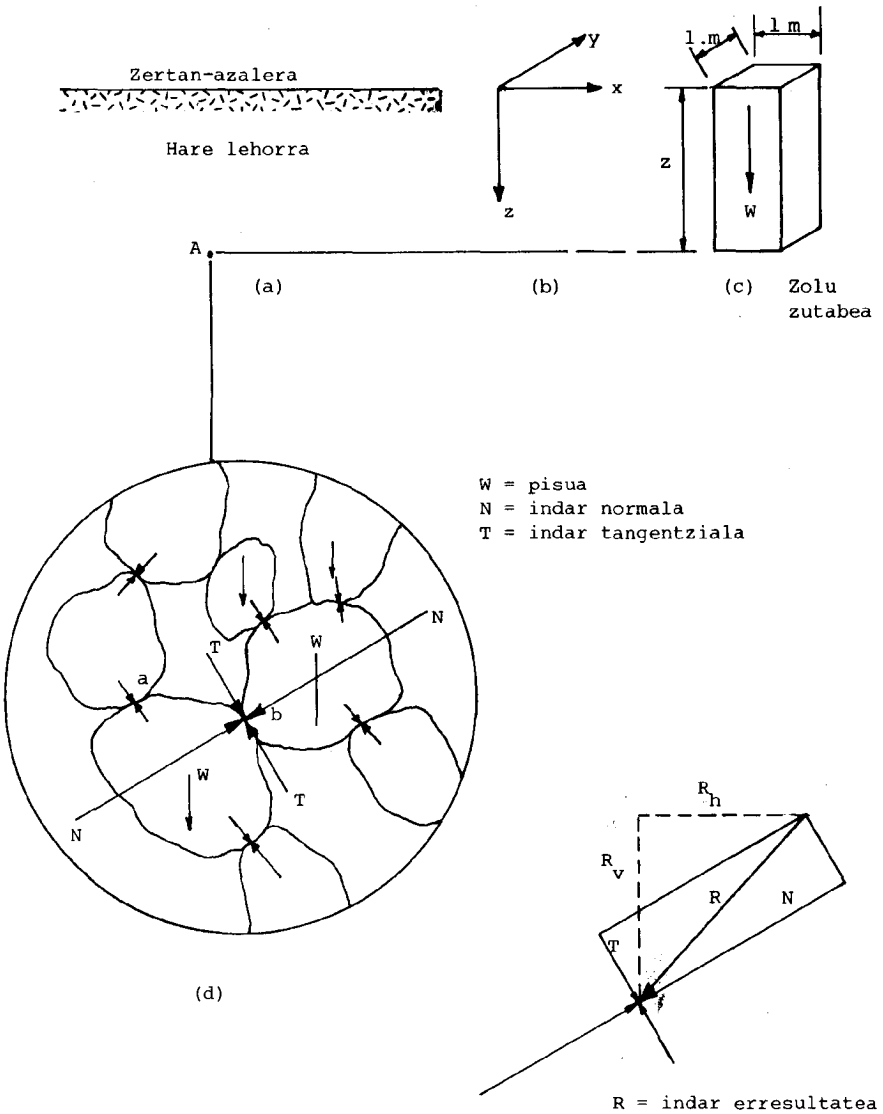
Dezamapenak eta zamapenak eragin zezaketen tentsio induzituak ere atal honetan eztabaidatzen dira. Adibide gisa, estruktura batentzako induspenaren eta honi datorkion eraikintzaren ondorioak dira tentsio induzitu horik. Hasierako tentsioei tentsio induzituak gainjartzen zaizkie azken tentsioak lortzeko. Estrukturen zimenduen jokaera eta segurtasuna aurreikusteko, azken tentsio egoera hau erabiliko da jarraipeneko ataletan.

2.1.- Zolu Lehorrean Berez Dauden Tentsioak

2.1.1.- Tentsio Normal Bertikalak

Norabide horizontaletan, funtsean distantzia infinituraino hedatzen den zertan* gainazalak duen hare larrizko jalkin naturala erakusten du 2.1(a) irudiak. Hemengo arazoa, edozein z sakonerako tentsio bertikala hautematea da.

Erreferentzi gisa, 2.1(b) irudian ikusten den bezala, har koordinatu-ardatz sorta bat, x, y, eta z, alegia. Har zolu-zutabe bertikal bat, A puntuan zeharko plano horizontalaz eta x eta y ardatzarekiko paralelo diren plano bertikalez mugatua.



2.1 Ir. Indarren barreiapena hare lehorretan.

Horrez gain, bedi metro bat plano bertikal arteko distantzia. Honela, 2.1(c) irudiko zutabea, metro karratu batekoa eta z metro altuerakoa izango da.

Zutabearen pisu totala, W, zera izango da:

$$W = \gamma V \qquad (2.1)$$

non γ = zolu unitate pisua, eta

V = zolu-zutabearen bolumena

= azalera x altuera = 1 x 1 x z = z m3.

A puntuaren auzoko zoluaren ikuste emendatuak, ikus 2.1(d) irudia, harea zatiki lokabez osoturik dagoela erakusten du. Zatiki hauk solidoak dira eta ezin daitezke besterekiko erraz higi. Horrengatik, zolua, sistema zatikitu bat bezala aipa daiteke.

Grabitate-indarrak direla eta, A puntuaren goiko zolu zatiki bakoitzaren bere pisuak beherantz eragingo du sisteman zehar, ikus 2.1(d) irudia. Ukipen-puntuetan, hala nola a eta b, pisu gainjarriak, beheko eta alboko zolu-bikorretaratuak izango dira. Ukipen-puntu bakoitzean, T, indar tangentziala, eta N, indar normala, osagai dituen R, indar erresultantea aurkituko da, ikus 2.1(e) irudia. Indar hauk hiru dimentsiodun espazioan azarean orientaturik izango dira, baina hartu diren koordinatu-ardatzen norabideetan aritzen diren F_x, F_y, eta F_z indar osagaiez ordeztuak izan daitezke.

Estatikan oinarrituz eta orekarako:

$$\Sigma F_x = \Sigma F_y = \Sigma F_z = 0$$

z norabidean, $F_z = 0$; horrengatik, 2.1 ekuapena hartuz,

$F_z = W = \gamma V = \gamma \times A \times z = \gamma z$, A = 1.0 bada.

Definizioz, plano bateko indar guztien osagai normalen batudura, zati, plano horren azalera, tentsio normala, σ, da.

Plano horizontalean aritzen diren indar osagai bertikalak hartzen badira, tentsio normal bertikala, σ_v, honela azal daiteke:

$$\sigma_v = \frac{W}{A} = \frac{\gamma \times A \times z}{A} = \gamma z \qquad (2.2)$$

Plano horizontalean, x ala y norabideetako indar osagaien batudura, zati, plano horizontal honen azalera, τ_x ala τ_y ebakidur tentsioak dira. Kasu berezi honetan, hots, 2.1(a) irudikoan, azalera finituko indar horizontal guztien batudurak, $\Sigma F_x = \Sigma F_y = 0$ izango dira, eta ondorioz $\tau_x = \tau_y = 0$; hori bidezkoa da. Bestela esateko, ez dago ebakidur tentsiorik plano horizontalean eta horrengatik, plano hori plano printzipala da.

2.1.2.- Tentsio Normal Horizontalak

Plano bertikalean, x ala y norabideetako indar osagaien batudura, zati, planoaren azalera (demagun unitatea dela), σ_h tentsio normal horizontala da. Horregatik,

$$\sigma_h = \frac{\Sigma F_x}{A} = \frac{\Sigma F_y}{A}$$

F_x eta F_y-aren balioa jakitea ezinezkoa da. Eguneroko lanean, σ_h tentsio horizontala ondoko eran taxutzen* da. Jalkinaren iraganeko historia geologikoa eta zolu motaren arauera, K, tentsio horizontalaren eta bertikalaren arteko arrazoiak, bere balioa aldatuko du. Arrazoi hau honela definitzen da:

$$K = \frac{\sigma_h}{\sigma_v} \qquad (2.3)$$

non, K, alboetako tentsioaren koefizientea (laborategian neurtua) izanik.

Demagun 2.1(a) irudian erakusten den hare-jalkina zabalera handiko azaleran jalkia izan dela, eta horregatik, ez zaiola zama horizontalik jarri. Orduan, jalkinari jarritako tentsio horizontalak harearen bere pisuan bakarrik dute sorburua; hau da, tentsio horizontalak, 2.2 ekuapenak emandako tentsio bertikalen funtzioa dira.

Honelako jalkinean, alboko jardokirik* ez da izan zoluan, eta K arrazoiaren ordez K_o arrazoia erabiltzen da, non K_o = $= \sigma_h/\sigma_v$ = atsedeneango alboko tentsio-koefizientea. Bestela esateko, atseden-egoeran $K = K_o$.

Maiz,

K_o = 0,4tik 0,5ra hareetan, eta

K_o = 0,7 buztin ertainki sendartuetan*.

Naturan, jalkin ugari, orain dauden baino zama handiagopean egon dira iraganean. Zama handiago horik, glaziarpena, higadura, bertako urmailaren beherapena, etabarren bidez sortutakoak izan zitezkeen. Zama horik lortzeko prozesuak aurrezamatze hitzaz deskribatzen dira. Aurrezamatzeak, bien, tentsio horizontalen eta bertikalen handikuntza dakar. Aurrezama hori kentzean (tentsio bertikalen txikikuntza, hain zuzen), zoluak lehen zuen tentsio horizontalaren zati adierazgarri bat geratzen da "irten ezinik". Horrela, zolu aurrezamatuetan, K_o unitatea baino gehiago izan daiteke; K_o hiru ingurukoa izatea ja zo da batzutan.

X-planoan, y eta z norabideetan, ari diren indar osagaien batudura, zati, x-planoaren azalera, τ_y eta τ_z ebakidur tentsioak dira, zer bere. Biak, x-planoan aritzen diren ΣF_y eta ΣF_z zero izango dira; orduan, $\tau_y = \tau_z = 0$

Antzera y-planoan, $\tau_x = \tau_z = 0$

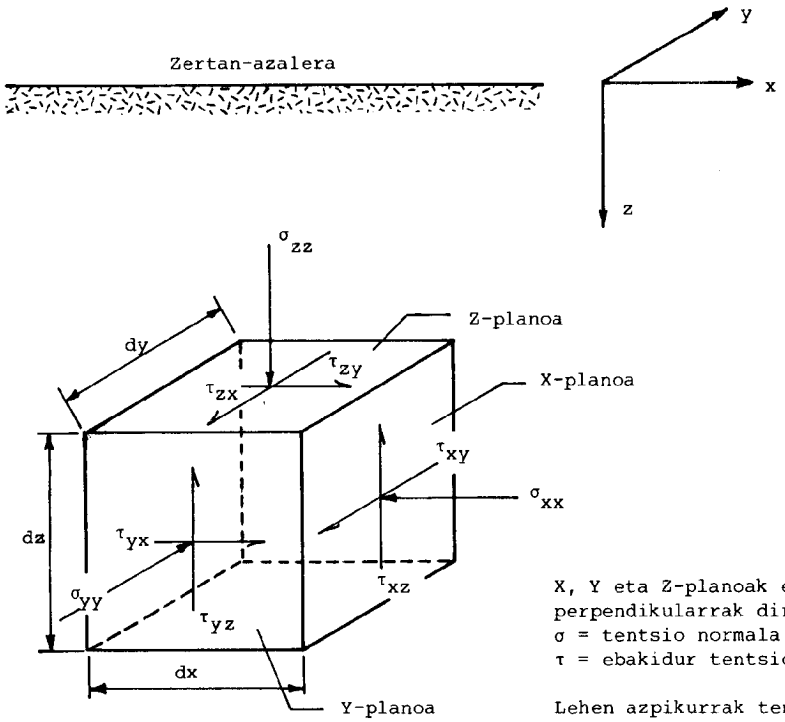
2.1.3.- Mohr-en Tentsio-Zirkulua eta Tentsio Printzipalak

Zertango edozein edonolako puntutako hasierako tentsio--egoera, hiru plano ortogonaletan (elkar perpendikularretan) aritzen diren tentsioz defini daiteke, 2.2 irudian erakusten den eran. Orokorki, elementu kubikoaren aurpegi bakoitzak, biak ebakidur tentsioa eta tentsio normala izango ditu; egoki delako, tentsio osagaien norabideak, beti, koordinatu-ardatzen sortarekiko erakusten dira.

2.1(a) irudian erakusten den kasu zehatzean, edonolako elementu arruntaren aurpegi bakoitzeko ebakidur tentsioak zero izango dira, (hau 2.1.2 azpiatalean eztabaidatua izan zen). Zero ebakidur tentsiodun planoei plano printzipalak deritze. Hiru plano hauetan aritzen diren tentsio normalei tentsio printzipalak deritze. Hiru tentzio hauetarik handienari, σ_1-ri, tentsio printzipal handiena deritzo; txikienari, σ_3-ri, tentsio printzipal txikiena deritzo; eta besteari, σ_2-ri, tentsio printzipal ertaina deritzo. Hau ikusirik, $\sigma_1 = \sigma_{zz}$; $\sigma_2 = \sigma_{yy}$; $\sigma_3 = \sigma_{xx}$.

Ostera ere, 2.1(a) irudian erakusten den kasuan, $\sigma_2 = \sigma_3$ dela bidezko da. Eta edozein zamapen-egoera simetrikorentzat ere, gauza bera, $\sigma_2 = \sigma_3$, egia da (adibidez, jasoin* karratu uniformeki zamatuak). Zamapen-egoera askotan (adibidez, lurbeteak, zerrenda-jasoinak, etab.) $\sigma_2 \neq \sigma_3$ izango da; halere, $\sigma_2 = \sigma_3$ eskuarki onartzen da. σ_2 tentsio printzipal ertainak, ez duela eragin nabaririk zolu propietateetan, saiakuntz bidez egiaztaturik dago, eta beraz onarpen hori bidezkotzat hartzen da; analisia ere bakuntzen du $\sigma_2 = \sigma_3$ izateak. Aurrerantzean, $\sigma_2 = \sigma_3$ hartuko da, bestela nabarmenki ez bada aipatzen; gainera, σ_1 eta σ_3 dimentsio biko espazioan adieraziak izango dira, ohi denez.

Diagramatikoki 2.3(a) irudian erakusten den eran, bektorialki 2.3(b) irudian erakusten den eran, edo Mohr-en tentsio-zirkuluan 2.3(c) irudian erakusten den eran, adieraz daitezke

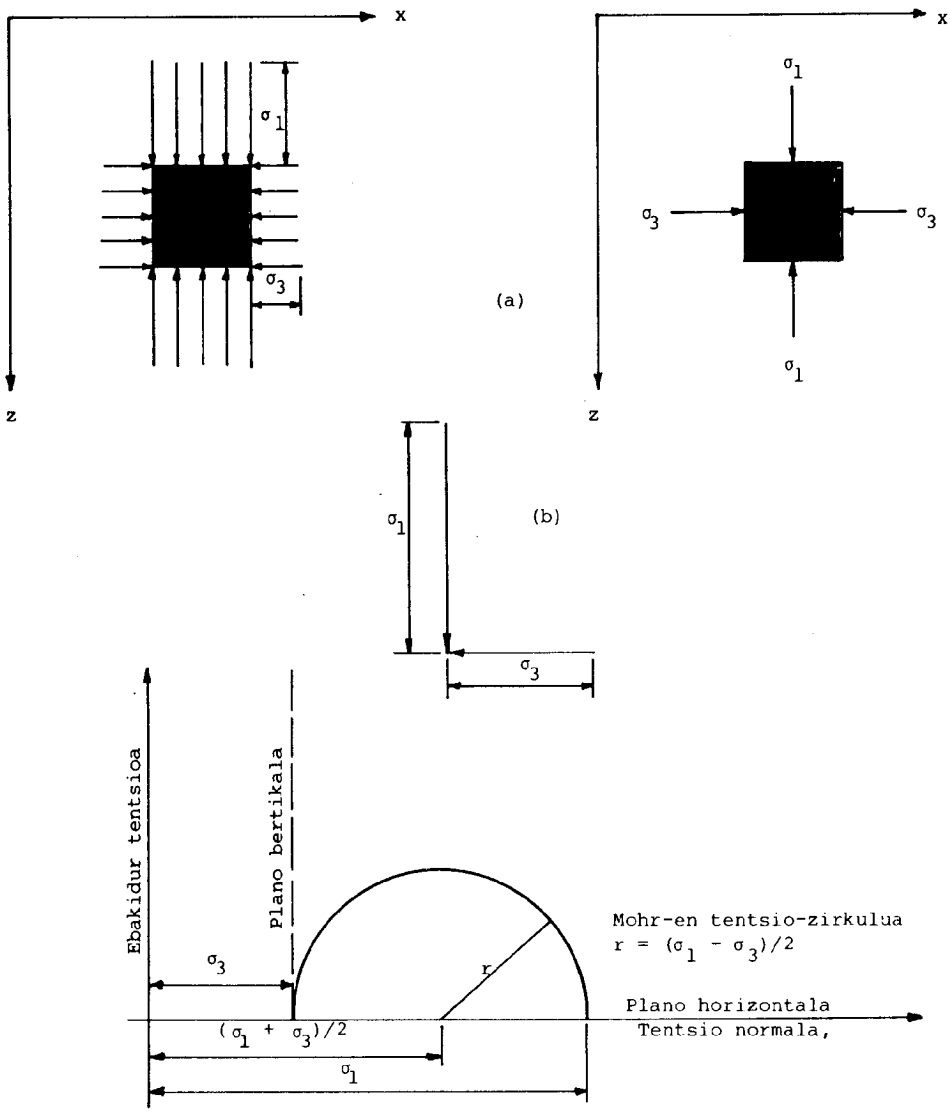


X, Y eta Z-planoak elkar perpendikularrak dira.
σ = tentsio normala,
τ = ebakidur tentsioa.

Lehen azpikurrak tentsioa aritzen den planoa antzez ten du.

Bigarren azpikurrak tentsioa aritzen den norabidea antzez ten du.

2.2 Zolu-elementu batetako tentsioak.



2.3 Ir. Zolu-elementu batetako tentsioak. (a) diagramatikoki, (b) bektoreen bidez, (c) Mohr zirkuluaren bidez.

edozein zolu-elementutan aritzen diren tentsio printzipalak.

Edozein edonolako planoko ebakidur tentsioa eta tentsio normala ondoko eran aurki daiteke:

Hiru plano marraztu, 2.4 irudian bezala. OAB elementuko tentsioak hauk bitez: $\sigma_v = \sigma_1$, $\sigma_h = \sigma_3$, σ eta τ

non σ = AB plano inklinatuarekiko tentsio normala,

τ = plano inklinatuko ebakidur tentsioa.

Irudiaren planoarekiko normalki, elementuak unitate-izaria beza, eta ABren luzera L bedi.

Orduan, $OA = AB \cos \theta = L \cos \theta$, eta

$OB = AB \sin \theta = L \sin \theta$

Indarra = tentsioa x azalera, denez. (Azalera = luzera x 1)

OAko indarra = $\sigma_1 L \cos \theta$, eta

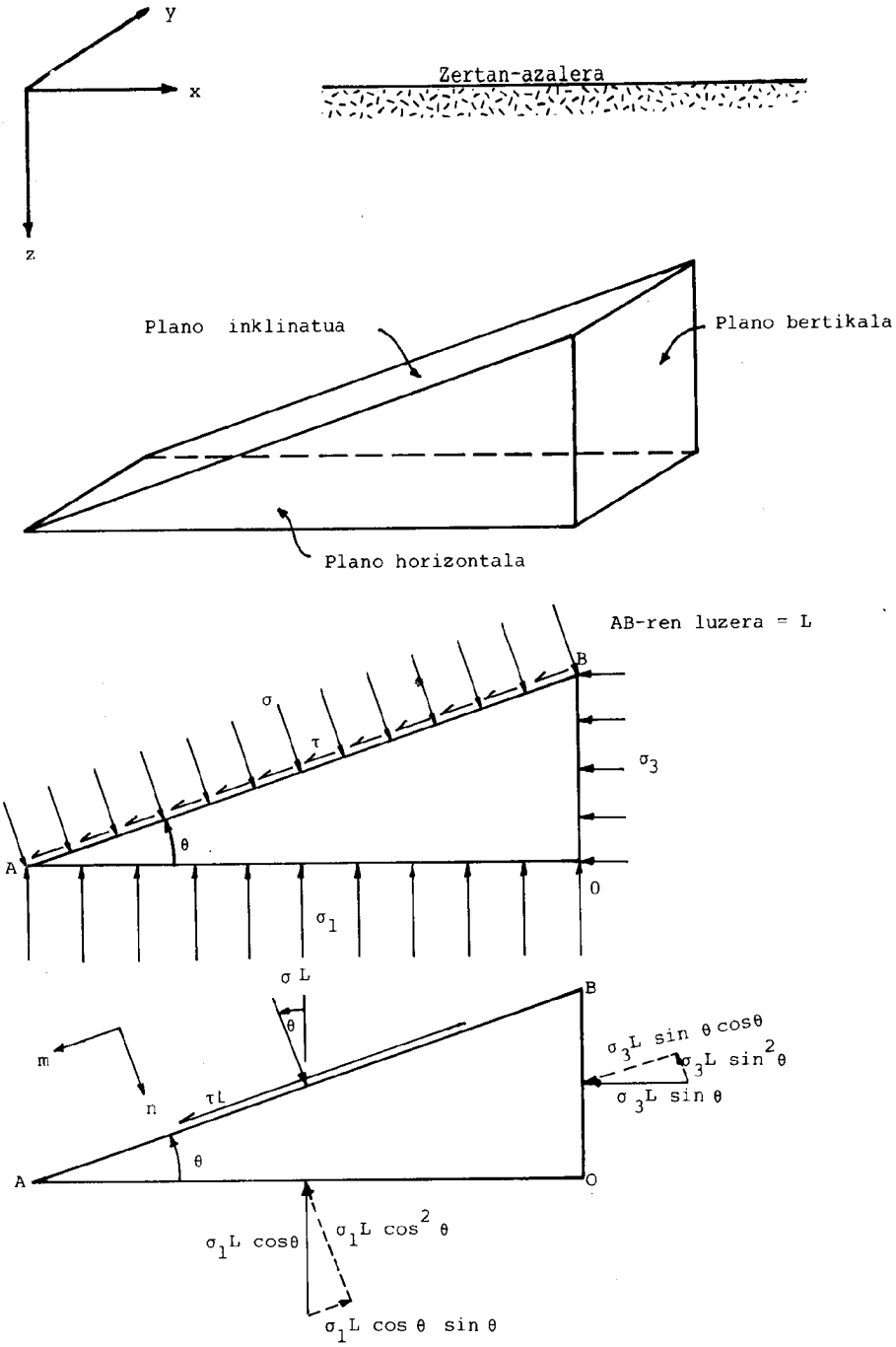
OBko indarra = $\sigma_3 L \sin \theta$.

ABko indar normala = σL, eta

ABko ebakidur indarra = τL.

Egoki denez gero, AB plano inklinatuari paralelo eta normal diren norabideetan bilakatuak izan daitezke indarrak. OAko indar erresultanteak, 2.4 irudian ikusten den eran, indar osagai hauk izango ditu: $\sigma_1 L \cos^2 \theta$ plano inklinatuarekiko normala eta $\sigma_1 L \cos \theta \sin \theta$ plano inklinatuarekiko paraleloa. OBko indar erresultanteak osagai hauk izango ditu: $\sigma_3 L \sin^2 \theta$ plano inklinatuarekiko normala eta $\sigma_3 L \sin \theta \cos \theta$ plano inklinatuarekiko paraleloa.

Plano inklinatuarekiko, zer bere, normal eta paralelo diren m eta n ardatz koordinatuak hartuz, ardatz hauen norabide



2.4 Ir. Plano inklinatu batetako tentsioak.

etako indar osagaiak bat daitezke.

Estatikan, $\Sigma F_n = 0$; beraz,

$$\sigma L - \sigma_1 L \cos^2\theta - \sigma_3 L \sin^2\theta = 0 ,$$

$$\sigma = \sigma_1 \cos^2\theta + \sigma_3 \sin^2\theta \qquad (2.4)$$

Orain, $\cos 2\theta = 2\cos^2\theta - 1$; beraz, $\cos^2\theta = \frac{1 + \cos 2\theta}{2}$

Baita ere, $\cos 2\theta = 1 - 2\sin^2\theta$; beraz, $\sin^2\theta = \frac{1 - \cos 2\theta}{2}$

Adierazpen hauk 2.4 ekuapenean ordezkaturik, zera lortzen da:

$$\sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\theta \qquad (2.5)$$

Baita ere, $\Sigma F_m = 0$; horregatik,

$$\tau L + \sigma_3 L \sin\theta \cos\theta - \sigma_1 L \cos\theta \sin\theta = 0$$

$$\tau = \sigma_1 \sin\theta \cos\theta - \sigma_3 \sin\theta \cos\theta$$

$$= (\sigma_1 - \sigma_3) \sin\theta \cos\theta$$

Orain, $\sin 2\theta = 2 \sin\theta \cos\theta$

Horregatik,

$$\tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\theta \qquad (2.6)$$

2.5 eta 2.6 ekuapenak plano batetako tentsio normala eta ebakidur tentsioa ematen dute, zerk bere. Plano hau honela definitzeke:

Tentsio printzipal handiena ari den planoarekiko θ angeluaz norabideturik (eskerretara neurturik, hain zuzen) dagoen planoa. 2.4 irudian, σ_1 OA planoan aritzen da; beraz, OA planotik eskerretara neurtzen da θ .

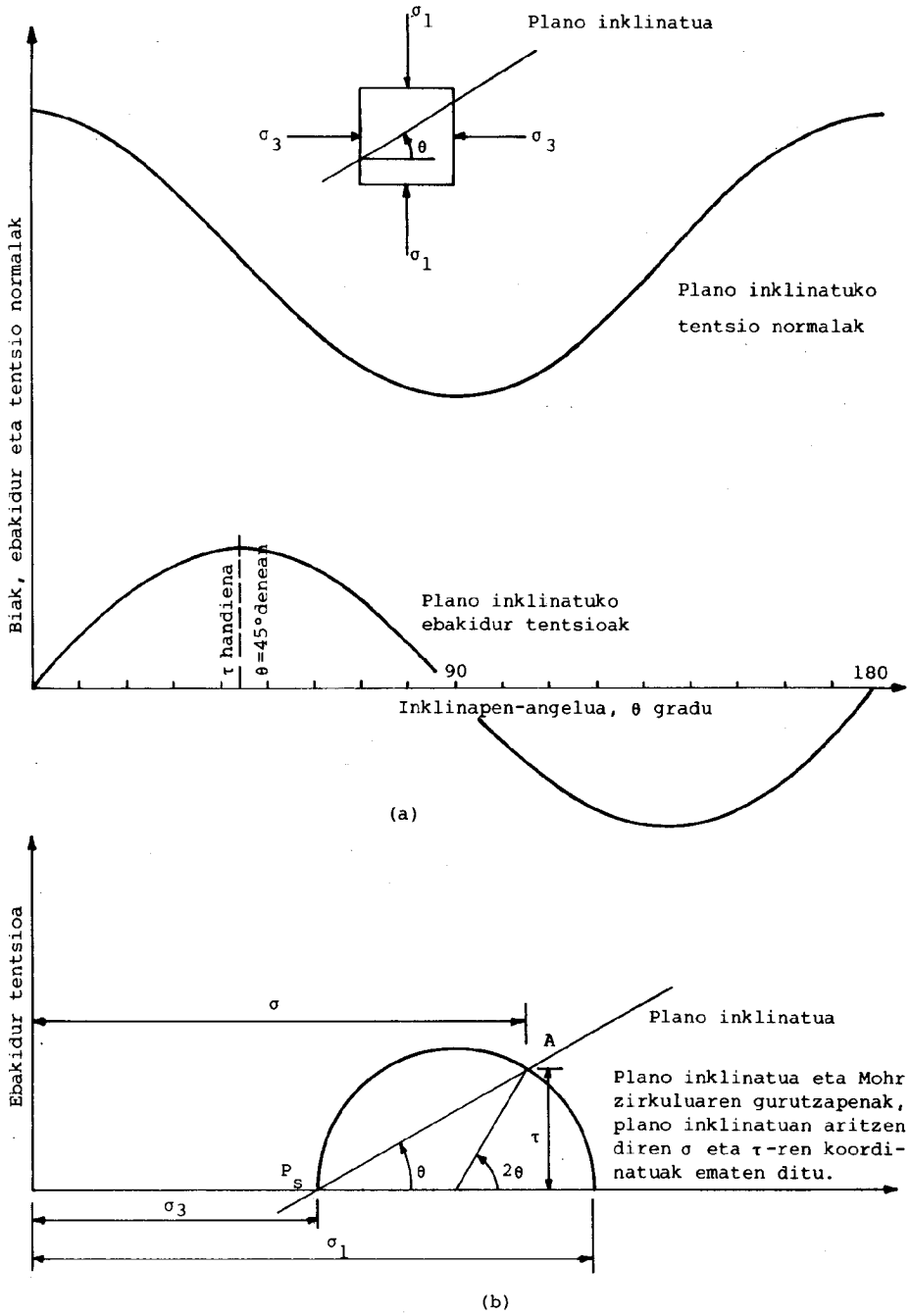
Orain, $\theta = 0°$ ordezkatzen badugu, cos $2\theta = 1$ eta sin2 $= 0$, eta ondorioz $\sigma = \sigma_1$ eta $\tau = 0$. Honek, plano horizontaleko tentsio normala, tentsio printzipal handiena dela egiaztatzen du. Lehen aipatu den zera ere, plano printzipalean ez dela ebakidur tentsiorik hain zuzen, honek egiaztatzen du.

Antzera, $\theta = 90°$ bada, $\sigma = \sigma_3$ eta $\tau = 0$.

0°tik 180°ra aldatzen diren inklinapen-angeluentzat, biak tentsio normala eta ebakidur tentsioa dauden planoen kopurua infinitu izango da. 2.5 eta 2.6 ekuapenetan ordezkatuz eta, 2.5 irudian erakusten den eran, emaitzak irudikatuz, tentsio hauk kalkulatuak izan daitezke. Tentsio normal maximoak eta zero ebakidur tentsioak zelan batera datozen, eta ebakidur tentsio maximoak $\theta = 45°$ denean zelan jazotzen diren, irudi horrek erakusten ditu.

Baita ere, Mohr-en tentsio-zirkuluaren bidez, eta 2.5 irudian erakusten den bezala, tentsio normalak eta ebakidur tentsioak lor daitezke. Zirkuluaren zentrua, sorpuntu* egoki batetik $(\sigma_1 + \sigma_3)/2$ distantziara irudikatzen da. Zirkuluaren erradioa $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ da. Zirkuluaren zentrua, sorpuntutik, σ_1 tentsio printzipal handienaren norabidean irudikatzen da. 2.1(a) irudian erakusten den kasuan, tentsio printzipal handiena bertikalki aritzen da; horrela ba, Mohr-en zirkuluaren zentrua $(\sigma_1 + \sigma_3)/2$ distantziara marrazten da, 2.5(b) irudian ikusten den bezala, eta zirkulua $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ erradioz marrazten da.

Plano inklinatua, planoen sorburuan zehar marrazten da. Planoen sorburu hau, Mohr-en zirkuluko puntu bat da, eta P_s ikurrez esagutzen da. Puntu honek ondoko propietate hau du: P_s-an eta edozein Mohr-en zirkuluko A puntutan zeharko le-



2.5 Ir. Plano inklinatu batetako tentsioen antzezpen grafikoa.

rroa, A puntu honek Mohr-en zirkuluan ematen dituen σ eta τ tentsioak aritzen diren planoarekiko paraleloa izango da.

2.2.- Urpeko Zoluen Tentsio-Egoera

Zolu moltso lehor bat (zertango urmailaren gainekoa) eta urpeko bat (zertan-urmailaren azpikoa) dauden kasua erakusten du 2.6 irudiak. Aldez aurreko azpiatalak, zolu lehor barruko tentsioez mintzatzen ziren. Tentsio total bezala edo tentsio eraginkor bezala adieraz daitezke urmailapeko tentsioak.

Tentsio bertikal totala, edozein urmailapeko C puntutan, lehen bezalaxe hautematen da, ikus 2.2 ekuapena.

Hau da $\sigma_v = \gamma_z = \gamma_1 h_1 + \gamma_2 h_2$

non γ_1 = zolu lehorraren unitate pisua = γ_d

γ_2 = zolu buztiaren unitate pisua, hau γ_1 baino handiagoa izanez hutsarteak urez beteta baitaude.

Presio (tentsio) hidrostatikoa, C puntuan, u deitzen da.

non $u = \gamma_w h_2$

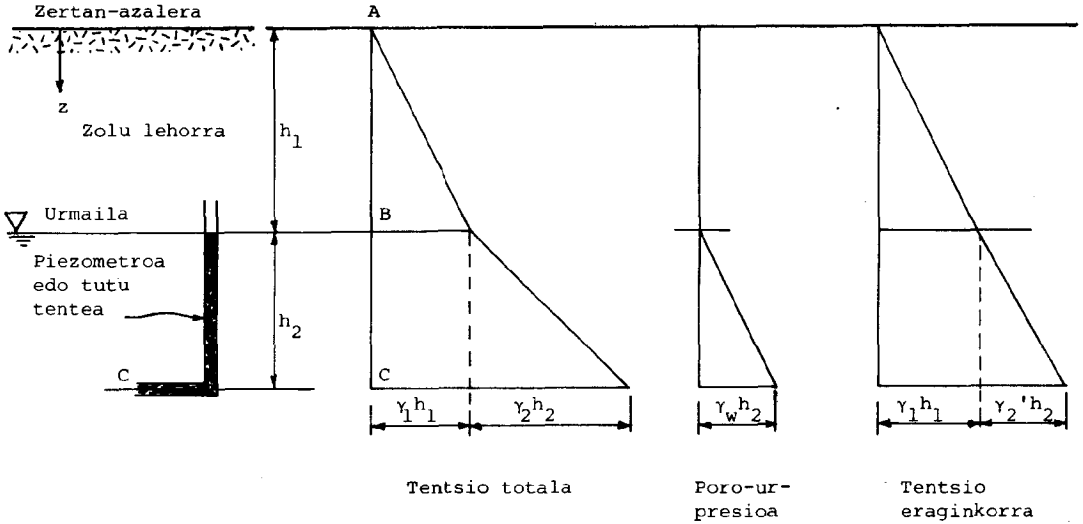
non γ_w = 1 . kg/litro = uraren unitate pisua.

2.7 ekuapenean agertzen den h_2, $h_2 = -\frac{u}{\gamma_w}$ izanik, oldar* piezometrikoa edo presio-oldarra da.

Edozein tentsio normal totaletatik, hala nola σ_v edo σ_h-tik, poro-ur-tentsioa kentzen bada, orduan, σ', tentsio eraginkorra lortzen da, adibidez:

$$\sigma'_v = \sigma_v - u \quad \text{edo} \qquad (2.8)$$

$$\sigma'_h = \sigma_h - u \quad \text{etab.}$$



2.6 Ir. Urpeko zolu bateko tentsio bertikalak.

Zoluen ebakidur jarkimena eta bolumen aldaketak tentsio eraginkorrak kontrolatzen dituela geroagoko azpiatal batetan erakutsiko da. Tentsio eraginkorraren printzipioa honela enuntzia daiteke:

a) Tentsio normal totalaren aldapena ken tentsio hidrostatikoaren aldapena da elementuaren bolumen-aldatzeak eragiten dituena, eta ez jartzen den tentsio normal totala;

b) Zoluko edozein planotako ebakidur jarkimen maximoa, ez da planoan ari den tentsio normal totalaren funtzioa, tentsio normal totalaren eta tentsio hidrostatikoaren arteko kenduraren funtzioa baizik.

Tentsio normal eraginkorra, 2.6 irudiko kasuan, era bitan hauteman daiteke:

1. Metodoa:

Ken tentsio hidrostatikoa tentsio normal totalari, adibidez,

A puntuan, 2.6 irudian, $\sigma_v = 0$, $u = 0$, ondorioa $\sigma'_v = 0$

B puntuan, $\sigma_v = \gamma_1 h_1$, $u = 0$, ondorioz $\sigma'_v = \sigma_v - u = \gamma_1 h_1 - 0 = \gamma_1 h_1$. Kasu honetan, γ_1, harearen unitate-pisua da. Hutsarteetan urik ez dagoenez, $\gamma_1 = \gamma_d$, γ_d hare lehorraren unitate-pisua izanik.

C puntuan, $\sigma_v = \gamma_1 h_1 + \gamma_2 h_2$, $u = \gamma_w h_2$, eta ondorioz,

$\sigma'_v = \gamma_1 h_1 + \gamma_2 h_2 - \gamma_w h_2 = \gamma_1 h_2 + (\gamma_2 - \gamma_w) h_2$

2. Metodoa:

Erabil pisu buiatuak*, γ'-ak, urmailapean.

Unitate-pisu buiatua = bolumen-unitate-pisua ken uraren unitate-pisua, hau da, $\gamma' = \gamma - \gamma_w$

A puntuan, $\sigma'_v = 0$

B puntuan, $\sigma'_v = \gamma_1 h_1$

C puntuan, $\sigma'_v = \gamma_1 h_1 + \gamma'_2 h_2$

Tentsio normal horizontala, K_o-ren balore egokiaz tentsio normal eraginkor bertikala bidertuz, eta orduan ur-tentsioa (presioa) gehituz lortzen da.

Horrela, goiko adibidean,

A puntuan, $\sigma'_v = 0$, ondorioz $\sigma'_h = 0$

B puntuan, $\sigma'_v = \gamma_1 h_1$, ondorioz $\sigma'_h = K_o \gamma_1 h_1$

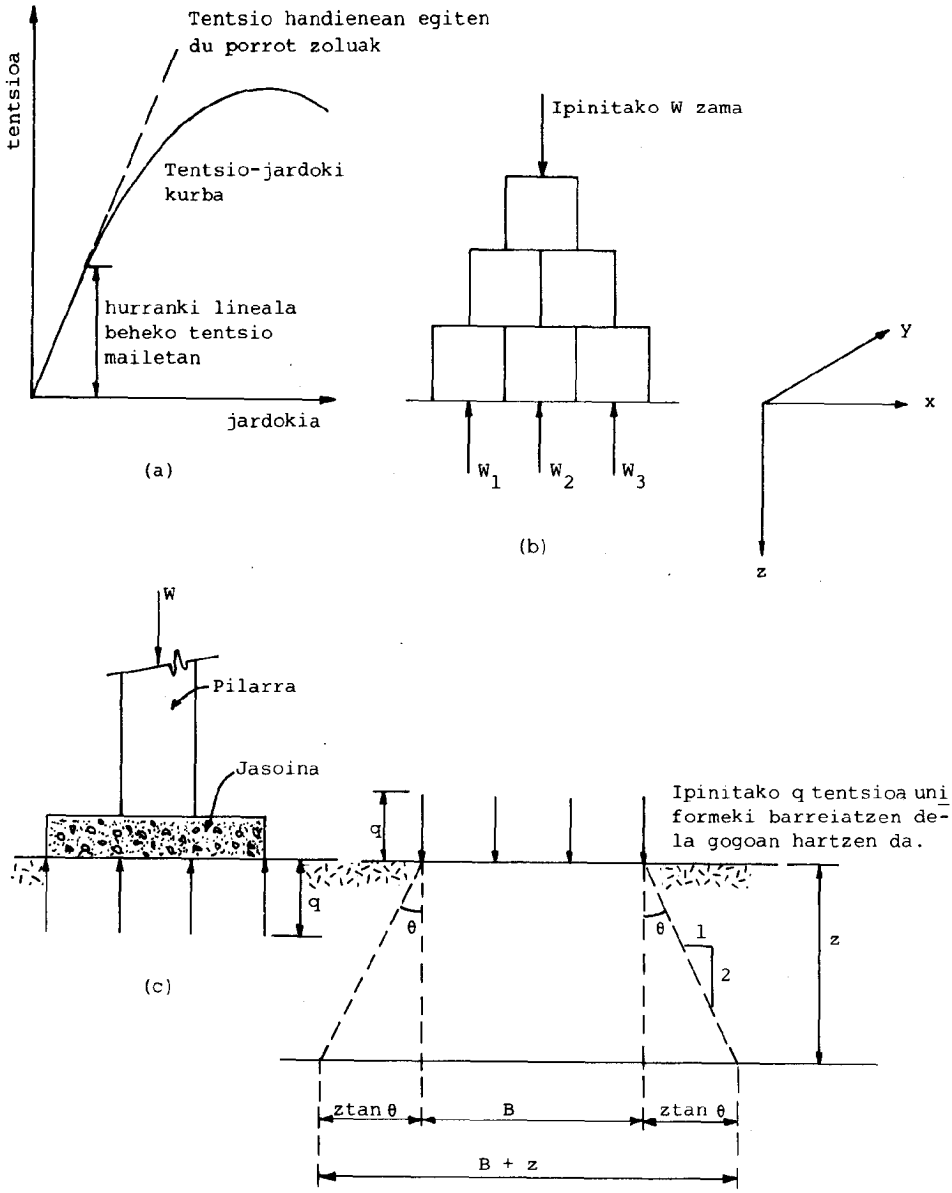
C puntuan, $\sigma'_v = \gamma_1 h_1 + \gamma'_2 h_2$, ondorioz $\sigma'_h = K_o(\gamma_1 h_1 + \gamma'_2 h_2)$

non σ'_h , tentsio normal horizontal eraginkorra den. Problema batzutan, gero ikusiko den bezala, tentsio normal horizontal totala, σ_h, kalkulatzea beharrezkoa da. Honela, C puntuan,

$$\sigma_h = \sigma'_h + \gamma_w h_2 = K_o(\gamma_1 h_1 + \gamma'_2 h_2) + \gamma_w h_2$$

2.3.- Kanpotiko Zamak Sorterazitako Tentsioak

Orain arteko azpiataletan erakutsi dena, zolu beraren pisuak eragindako zolu-moltso baten barneko tentsioak zelan hauteman, izan da. Zolu-Mekanikan eta zimendakuntz ingeniaritza-problemetan, kanpotiko zamek sorterazten dituzten tentsio-aldapenak hautematen arduratzen gara gehiago.



2.7 Ir. Tentsio bertikalen barreiapen bakundua.

Zolua elastikoa ez denez, tentsio-deformapenen erlaziotasun orokorrak orindik ez dira zintzoki ezagunak zoluei dagozkienean. Beraz, kanpotiko zamek eragindako zolu-moltsoko tentsio-barreiakera zehazki ezin daiteke kalkula. Nahiz eta zolua elastikoa ez izan, tentsioen eta deformapenen arteko erlaziotasun lineal bat, ikus 2.7(a) irudia, dagoela onartzen da; tentsio-maila behekoetan, hau egiaren ondokoa dela aurkitu da.

Problema gehienetan, zera ere onartzen da: zolua homogenoa dela (punturik puntura bere propietateak konstanteak direla) eta isotropikoa (bere propietateak berberak direla puntu batetan zeharko edozein norabidetan).

Tentsio edo zama-barreiakera kubo-ereduaren bidez erakus daiteke 2.7(b) irudiko eran. Estatikan $\Sigma F = 0$; beraz

$$W_1 = W_2 + W_3 + W_4$$

Honek, W_1 zama W_2, W_3 eta W_4 zametan barreiatua izan dela erakusten du.

Blokeak, jasoin batetan aritzen den pilar batez ordeztuak izan daitezke halaber, 2.7(c) irudian agertzen den eran. Jasoinpeko azalera iragan eta bertan, W zama hau uniformeki barreiatzen dela onartzen da. Gainera, jasoina malgutzat hartzea ohi da.

Zama-barreiapena jasoinak daukan jarkimenari dagokiola ikus daiteke adibide honetan; hau da, jasoinak ebakidur jarkimena daukala edo ebakidurari jarkipen bat kontrajartzen diola. 2.7(c) irudia 2.7(d) irudiaz ordez daiteke, eta hemen q, kanpotiko tentsioa zertan-azaleran uniformeki zimendatutzat hartzen da. Zenbakitan,

$$q = \frac{W}{\text{ukipen-azalera}}$$

Urrengo urratsa, azpian datzan zolu-moltsoan q honek zer eragin duen hautematea da, hau da, zer tentsio-gehitze, baten bat bada, zolu-moltsoaren barruan jazotzen den.

Lehen hurbiltze gisa, zolu moltsoa bloke pilo batez 2.7(b) irudian ikusten diren antzekoez, ordezkatua izan daitekeela jakin da. Gainera, gutxi gora behera zolu barneko tentsio barreiapena itxuratzeko, blokeak jarriera berezi batetan ipini behar direla jakin da. 2.7(d) irudian erakusten den eran, z edonolako sakoneran, $\Delta\sigma_v$, gutxi gora beherako tentsio-gehikuntza, q, jasoinpeko tentsioa baino txikiagoa da begibistan, eta, $\Delta\sigma_v$ gehikuntza hau jarraiko eran hautematen da.

Demagun $\tan\theta = 1/2$ eta zertan-mailako jasoin-zabalera= B Beraz, z sakoneran, tentsio-gehikuntzapean den zabalera zera da: $B + 2z\tan\theta = B + 2z(1/2) = B + z$

Jasoinak L luzera bat ere izango du eta orduan, edonolako z sakoneran, orrialdearekiko norabide elkartzutean, luzera $L + z$ izango da.

Estatikan, $\Sigma F_z = 0$

Tentsioa $= \frac{\text{Zama}}{\text{Azalera}}$, hau da, Zama = Tentsioa x Azalera.

Zertan-azaleran, Zama = q x B x L

z sakonera batetan, Zama = $\Delta\sigma_v$ x (B + z) x (L + z)

Baina zama hauk berdinak izan behar dute; beraz,

$\Delta\sigma_v \times (B + z) \times (L + z) = q \times B \times L$

eta $\Delta\sigma_v = q \times \frac{B \times L}{(B + z)(L + z)}$ (2.10)

2.10 ekuapen honek, z handiagotuz $\Delta\sigma_v$ txikiagotzen dela erakusten du. 2.10 ekuapen hau jasoinak karratuak edo laukizuzenak direnean erabiltzen da. Luzeraz zabaleraz baino askoz handiagoak diren jasoinei, hau da L>>B, zerrenda-jasoin edo jasoin jarraiak deitzen zaie. Zerrenda-jasoinetan $L \to \infty$ eta 2.10 ekuapena, honi hurbiltzen zaio:

$$\Delta\sigma_v = q \times \frac{B}{B + z} \qquad (2.11)$$

Problema askotan, hemen goiko hurbiltzerako metodoa baino zehatzagoren bat erabiltzea gogokoagoa egiten da. Ebazpide hertsiagoak elastizitate teorian dautza. Jasoin-eite eta motak, zolu-sistema geruzatuak, eta baita ere zoluaren eta jasoinaren zurruntasun erlatiboak kontutan hartzen dituen ebazpideak eskuhar dauzkagu.

Lantxo honetan, hedapen infinitudun zolu isotropiko homogenoetan (erdi-espazio elastikoa deitzen dena arruntki) zimendaturiko jasoin malguz arituko gara soilik. Gainera, ebazpenak eratorpenik gabe emanak izango dira.

2.3.1.- Puntu-Zama

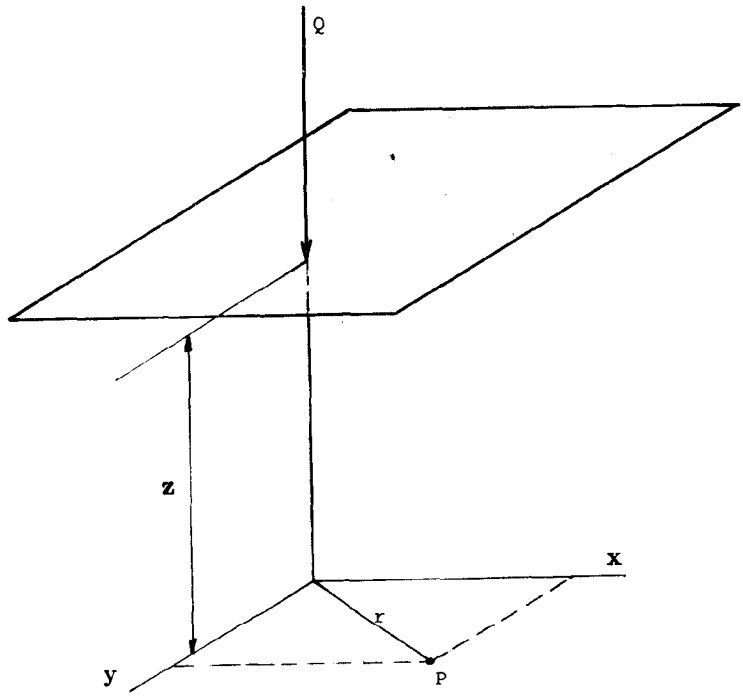
Q puntu-zamaren azpiko $\Delta\sigma_v$ tentsio bertikalaren aldapena, adierazpen honen bidez hauteman daiteke:

$$\Delta\sigma_v = \frac{Q}{z^2} I_\sigma \qquad (2.12)$$

non, z = Q zama jarrita dagoen puntuaren azpiko sakonera,

I_σ = eragipen-faktorea, non

$$I_\sigma = \frac{1,5}{\pi[1 + (r/z)^2]^{5/2}} \qquad (2.13)$$



Puntu-zama azpiko presio bertikalentzako eragipen-faktoreak.

$\frac{r}{z}$	Eragipen Faktorea I_σ	$\frac{r}{z}$	Eragipen Faktorea I_σ	$\frac{r}{z}$	Eragipen Faktorea I_σ
0,00	0,4775	1,00	0,0844	2,00	0,0085
0,10	0,4657	1,10	0,0658	2,10	0,0070
0,20	0,4329	1,20	0,0513	2,20	0,0058
0,30	0,3849	1,30	0,0402	2,30	0,0048
0,40	0,3294	1,40	0,0317	2,40	0,0040
0,50	0,2733	1,50	0,0251	2,50	0,0034
0,60	0,2214	1,60	0,0200	2,60	0,0029
0,70	0,1762	1,70	0,0160	2,70	0,0024
0,80	0,1386	1,80	0,0129	2,80	0,0021
0,90	0,1083	1,90	0,0105	2,90	0,0018

2.8 Ir. Puntu-zamapeko tentsio bertikalak

Koordinatu-sistema 2.8 irudian definitzen da. $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ dela ohartzekoa da. Eta $x = y = 0$ (zuzenki zamapean) denean $r = 0$ eta $I_\sigma = 1,5/\pi = 0,4775$

2.3.2.- Azalera Zamatu Zirkularra

$\Delta\sigma_v$ tentsio bertikalaren aldapena, q unitate-zamaz uniformeki zamatua den jasoin zirkularraren zentru azpian, adierazpide honen bidez hauteman daiteke:

$$\Delta\sigma_v = q\, I_\sigma \qquad (2.14)$$

non, $I_\sigma = 1 - \left[\frac{1}{1 + (R/z)^2}\right]^{3/2}$, eta (2.15)

R = jasoinaren erradioa

I_σ eragipen-faktorearen baloreak, x (edo y) eta z-ren balore desberdinetan, 2.9 irudian agertzen den grafikoaren bidez ere hauteman daitezke.

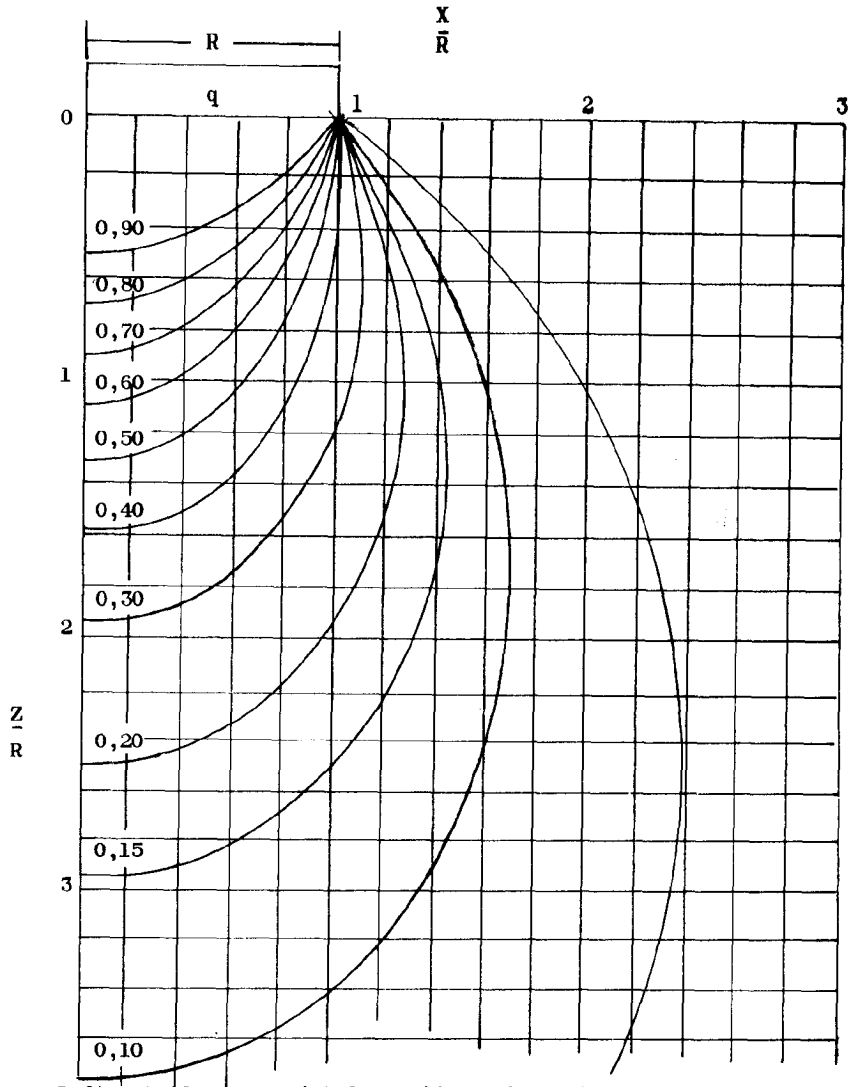
2.3.3.- Zerrenda-Zama

$\Delta\sigma_v$ tentsio bertikalaren aldapena, q unitate-zamaz uniformeki zamatua den zerrenda-jasoinaren azpian, adierazpen honen bidez hauteman daiteke:

$$\Delta\sigma_v = q\, I_\sigma \quad , \text{ non} \qquad (2.16)$$

$$I_\sigma = \frac{1}{\pi}\,(\beta + \sin\beta) \qquad (2.17)$$

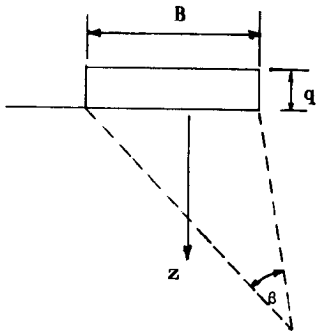
β angelua, 2.10(a) irudian azaltzen da. 2.16 eta 2.17 ekuapenak grafikoki azaltzen dira 2.10(b) irudiaren eskume aldean.



D diametrodun area zirkular uniformeki zamatuaren zentrupeko presioarentzako eragipen faktoreak

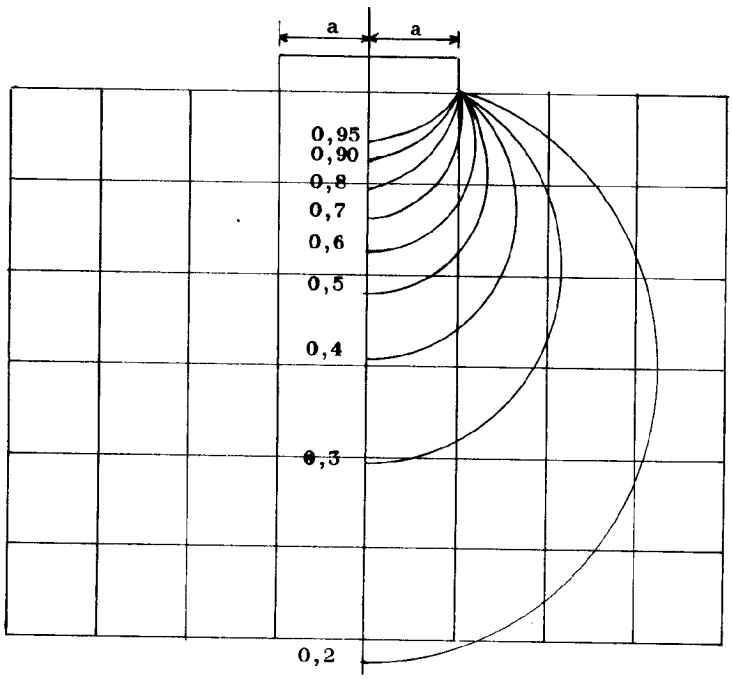
D/z	Eragipen Faktorea I_σ	D/z	Eragipen Faktorea I_σ	D/z	Eragipen Faktorea I_σ
0,00	0,0000	2,00	0,6465	4,00	0,9106
0,20	0,0148	2,20	0,6956	6,00	0,9684
0,40	0,0571	2,40	0,7376	8,00	0,9857
0,60	0,1213	2,60	0,7733	10,00	0,9925
0,80	0,1996	2,80	0,8036	12,00	0,9956
1,00	0,2845	3,00	0,8293	14,00	0,9972
1,20	0,3695	3,20	0,8511	16,00	0,9981
1,40	0,4502	3,40	0,8697	20,00	0,9990
1,60	0,5239	3,60	0,8855	40,00	0,9999
1,80	0,5893	3,80	0,8990	200,00	1,0000

2.9 Ir. Azalera zirkular batetako zama uniforme batek induzitutako tentsio bertikalak



(a)

Oharra: B = 2a



(b)

2.10 Ir. Tentsioak zerrenda-zama uniforme baten azpian.

2.3.4.- Azalera Zamatu Laukizuzenarra

$\Delta\sigma_v$ tentsio bertikalaren aldapena, q unitate-zamaz uniformeki zamatua den jasoin laukizuzenarraren erpin azpian, adierazpen honen bidez hauteman daiteke:

$$\Delta\sigma_v = q\ I_\sigma \quad , \text{ non} \tag{2.18}$$

$$I_\sigma = \frac{a + b}{4\pi} \quad , \text{ non} \tag{2.19}$$

$$a = \frac{2mn\sqrt{m^2 + n^2 + 1}}{m^2 + n^2 + 1 + m^2n^2} \times \frac{m^2 + n^2 + 2}{m^2 + n^2 + 1}$$

$$b = \sin^{-1} \frac{2mn\sqrt{m^2 + n^2 + 1}}{m^2 + n^2 + 1 + m^2n^2}$$

$m = B/z$, eta $n = L/z$, non

B = jasoinaren zabalera, eta

L = jasoinaren luzera.

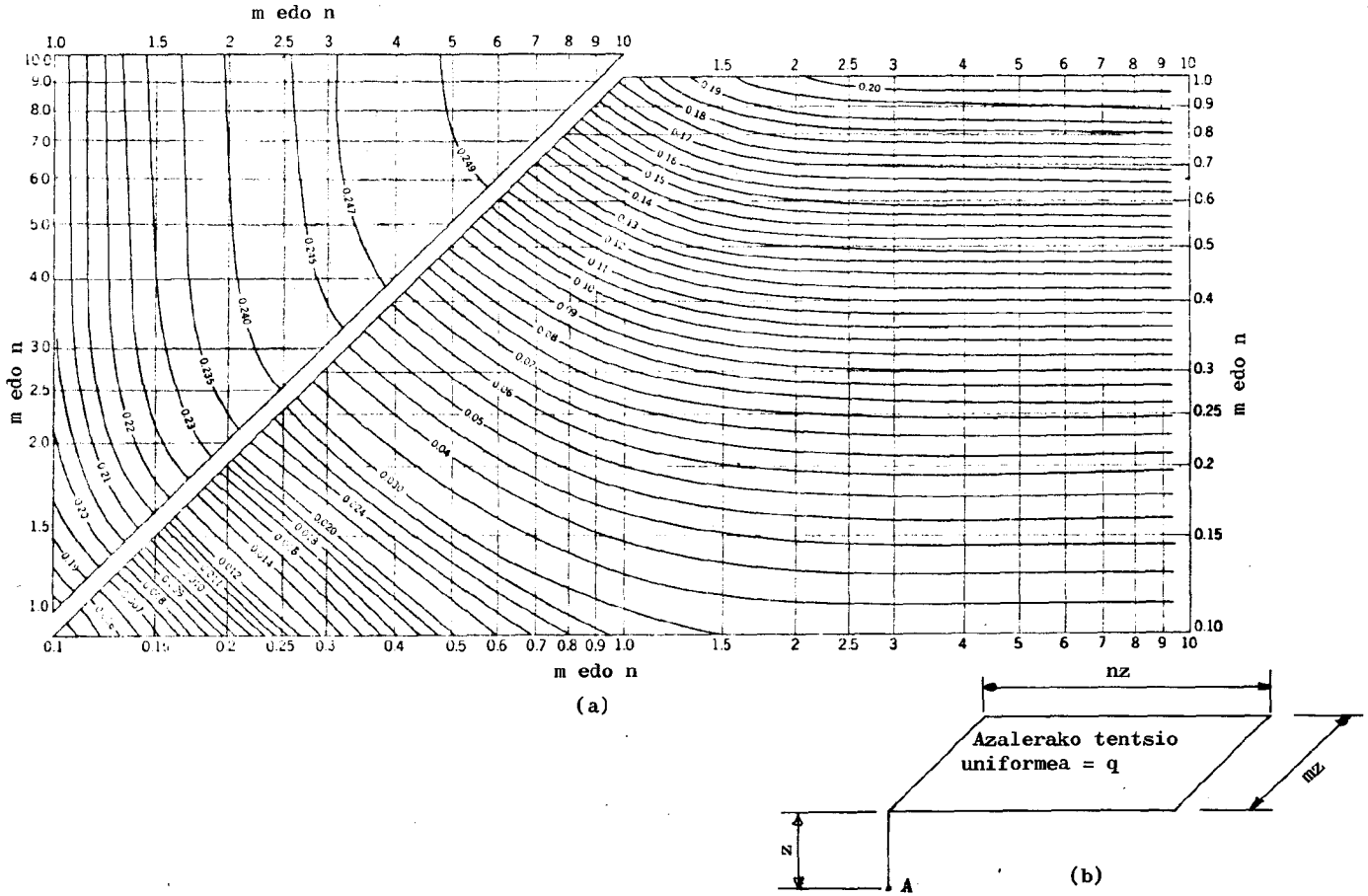
2.11 irudian erakusten dira m eta n balore desberdinetako eragipen-faktorearen balioak; m eta n elkar aldagarriak direla ohar daiteke.

Erpin azpian ez den puntu bateko eragipen-faktorea hauteмateko, 2.11 irudian ikusten den eran izan daiteke zatitua azalera zamatua; horrela, tentsioa gura deneko puntuaren gainean egongo da erpin bakoitza. Kasu hauetan,

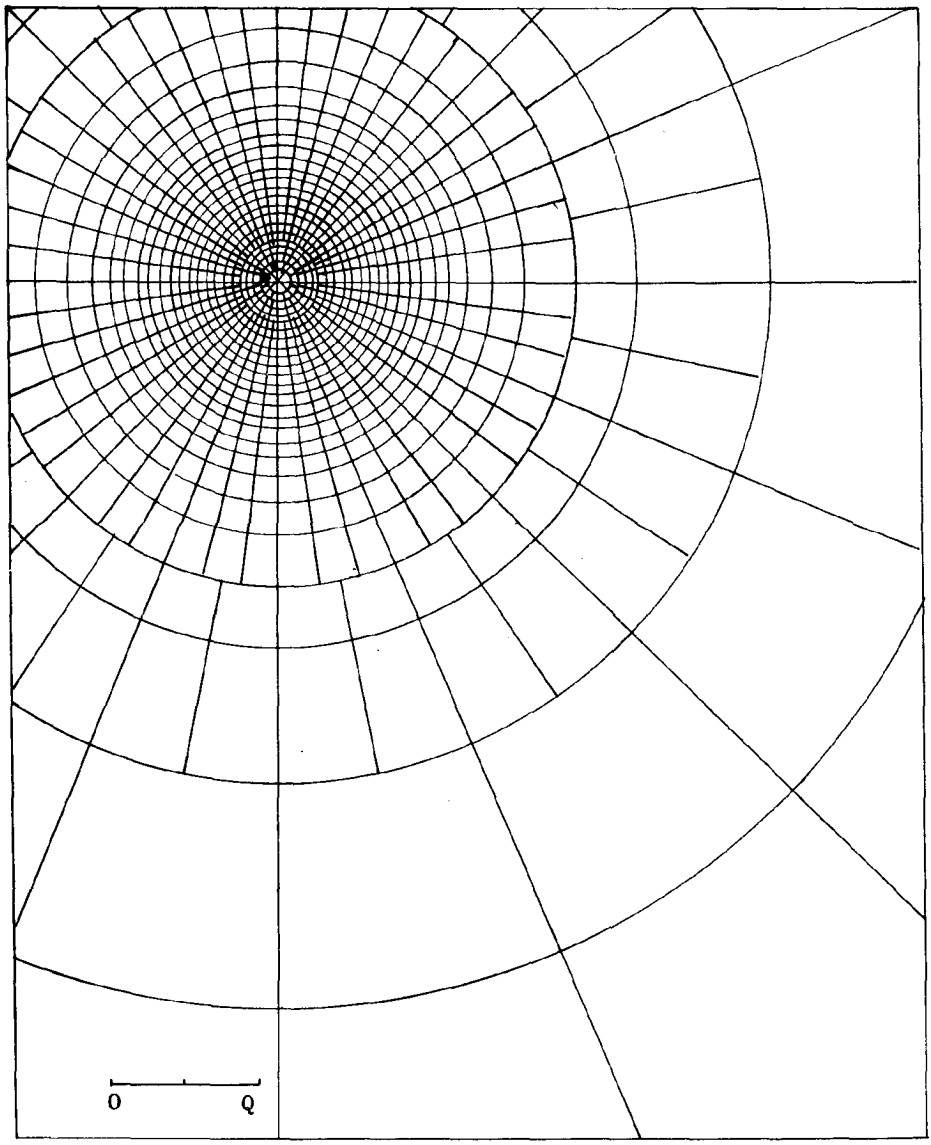
$$I = (I_1 + I_2 + I_3 + I_4)$$

2.3.5.- Newmark-en Eragipen-Karta

(1) azalera zamatua eitez araugabekoa bada, edo (2) eraikuntza baten zama jasoin batzuk erasaten badute, edozein P pun



2.11 Ir. Ekai elastiko isotropikoetan, azalera laukizuzenen erpinpeko tentsio bertikalak hautemateko karta. (a) f(m,n) ematen du. (b) A puntuan, $\Delta\sigma_v = \Delta q_s \times f(m,n)$.



Eragipen faktorea = 0,001

2.12 Ir. Zimendupeko tentsioak hautemateko Newmark-en karta.

tutako tentsio bertikala hautematea zaluagoa izango da Newmark--en karta erabiliz. Karta hori, 2.12 irudian agertzen da eta jarraiko eran erabil daiteke:

(i) Marraztu paper gardenean azalera zamatuaren goitiko bista, (OQ = z) eskalatan, z, $\Delta\sigma_v$ hauteman behar deneko puntuaren sakonera izanik.

(ii) Jarri marrazkia Newmark-en kartaren gainean, P puntu hori kartaren zentruan ipiniz.

(iii) Azalera zamatuak estaltzen dituen kartaren zatiak zenbatu. Zati erdiez zati osoak egin.

(iv) Kalkulatu $\Delta\sigma_v$ tentsioa, non

$$\Delta\sigma_v = (\text{kartaren zati estalien kopurua}) \times (\text{kartaren eragipen-faktorea}) \times (q) \qquad (2.20)$$

2.3.6.- Tentsio-Anpuloa

2.9 eta 2.10 irudietan erakusten den eran, $\Delta\sigma_v$ tentsioaren gehipena, jasoin zamatupean eta urrunago, berbera izango da puntu askotan. Tentsio gehipen berdindun puntu hauk batzen dituen lerroa isobara deitzen da, eta eitez zirkularra izatera jotzen du. Isobara baten barruko azalera edo barrualdea, tentsio edo presio-anpuloa deitzen da. Presio-anpuloa hadiagotuz, tentsio-gehipenak txikiagotzen doaz.

Eguneroko lanean, 0,10 balorea duen isobara barruko presio-anpuloa bakarrik eragipen-zona edo eragipen-sakoneratzat hartzen da. Erdizka gogoratzeko, gutxi gora behera, presio-anpuloa 3B sakoneraraino hedatzen da, B jasoinaren izaririk laburrena izanik.

Tentsio bertikalaren barreiapena, edozein z sakoneratan,

isobaretan zehar lerro horizontal bat marraztuz lor daiteke. Tertsio bertikal handiena jasoinaren zentrupean izango da.

Hurbil hurbileko jasoin bi edo gehiagotan, tentsio bertikalak gainjar daitezke. Beraz, gainjarpen-zonaren barruko tentsioak batkorrak dira. Gainera, gainjarpen hau jasoin baten zabalera gehitzearen antzekoa da eta horregatik eragipen-sakonera nabariki gehi daiteke.

3. ATALA

UR-JARIOA ZOLUETAN

Uraren oldar estatikoaren* (oldar piezometrikoa edo presio-oldarraren) eragina zolu-moltso batetan, eztabaidatua izan zen 2.2 azpiatalean. Lanean, apropos jarritako edo berez dauden ur-oldar desorekatuak direla eta, zolu-moltsoaren zehar poro-uraren presioa aldatuz joango den egoera ugari dira, adibidez, urtegietako lurrezko uharketan*. Ezarririk dauden inoskeeta*-lege eta printzipioetan hasiz, edozein puntutako poro-ur--presioa, eta baita ere, ur-jarioaren ginoa* taxudaitezke. Lege eta printzipio horik hemen behean eztabaidatzen dira.

3.1.- Zoluen Estruktura

Lehen atalean, zatiki-neurriak, zatiki-eiteak eta zatikizko juntapen bat eztabaidatu ziren. Zolu-lagin batetan zehar zolu-zatikiak azarean barreiatuak daudela 1.4 irudiak erakusten zuen. Zolu-zatikiek eite eta neurri desberdinak dituzte, eta elkarbildura espezifiko batzu ere bai. Eitea, neurria eta elkarbildura edozein izanik ere, zolu-moltso bateko hutsarteak elkar konektatuak direla mikroskopiopeko analisiek ezarri dute. Honela, edozein zolu, porotsu edo perbioa da, beraz, nolabaiteko inosberatasun*-gradua du.

Ura zolu bateko hutsarteetan zehar jariotzen da eta, honegatik, ibilbide ingurutsu edo karabilkatsuak hartu behar ditu. Poroak (hutsarteak) neurriz eta eitez aldatzen direnez, jariouraren abiadura ere aldatu egiten da. Zolu-ingeniaritza-problemetan, halere, uraren jarioa eskala makroskopikoan (handian) har daiteke, eta ura batezbesteko abiadura batez ibilbide zuzenetan jariotzen dela onets daiteke.

3.2.- Oldar-Motak

Fluidoen Mekanikan Bernoulli-ren ekuapena dugu:

$$H = h_p + \frac{u}{\gamma_w} + \frac{v^2}{2g} \qquad (3.1)$$

non, H = oldar totala

h_p = posizio-oldarra, gura den erreferentziatik neurtzen dena, hau goiera*-oldarra ere deitzen da.

$\frac{u}{\gamma_w}$ = presio-oldar edo oldar piezometrikoa, eta

$\frac{v^2}{2g}$ = abiadura-oldarra; hau zokoragarria da v oso txikia delako.

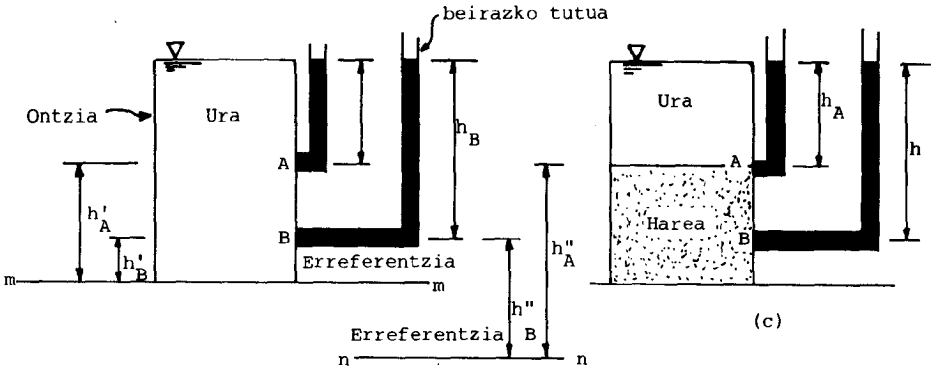
Edozein puntu biren oldar totalen arteko diferentzia oldar hidraulikoa deitzen da, eta oldar honek dakar zoluetan zeharko jarioa.

Beirazko tutu biz konektaturiko ontzi bat erakusten da 3.1(a) irudian. Erakusten den mailarainoko ura daukate ontziek eta tutuek. Edozein A edo B puntuetako oldar totala H da, beraz, oldar totalen arteko diferentziarik ez dago; hau dela eta, jariorik ez dago.

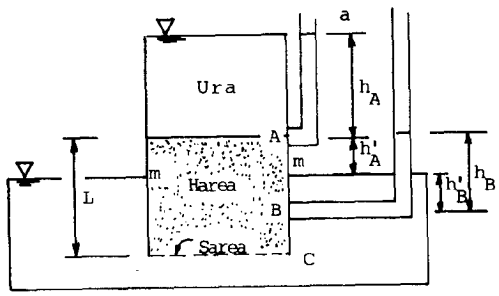
Oldar totalaren magnitudea erreferentzi lerroaren kokapenaren menpekoa da, 3.1(a) eta (b) irudietan erakusten den bezala; halere, A eta B puntuen arteko oldar totalen diferentzia ez da erreferentzi lerroaren kokapenaren menpekoa. Kasu bietan, oldar totalen arteko diferentzia zero da eta ez dago jariorik horregatik.

Harea ipintzen bada ontzian, 3.1(c) irudian bezala, oldarrak ez dira aldatzen, eta berriz, ez dago jariorik.

Ontziaren hondoa sare batez ordezten bada eta sistema osoa



Puntua	Goiera Oldarra	Presio Oldarra	Oldar Totala	Goiera Oldarra	Presio Oldarra	Oldar Totala
A	h'_A	h_A	$h'_A+h_A = H_A$	h''_A	h_A	$h''_A+h_A = H'_A$
B	h'_B	h_B	$h'_B+h_B = H_B$	h''_B	h_B	$h''_B+h_B = H'_B$
Erreferentzia m-m lerroan				Erreferentzia n-n lerroan		
$H_A-H_B = 0$ eta $H'_A-H'_B = 0$ ikus daiteke; beraz ez dago jariorik.						



(d)

Puntua	Goiera Oldarra	Presio Oldarra	Oldar Totala
A	h'_A	h_A	$h'_A+h_A = H_A$
B	$-h'_B$	h_B	$-h'_B+h_B = H_B$
(d)			

3.1 Ir. Oldar-motak.

urez beteriko aspil batetan jartzen bada, 3.1(d) irudiko eran, eta goiko eta beheko ur-mailak konstante mantentzen badira, A eta B puntuetako presio-oldarrak oreka-balioetara iritsiko dira. Inguruko baldintza jakinen bidez, B puntuko presio-oldarren magnitudea honela hauteman daiteke:

(i) Hauteman h_C, C puntuko presio-oldarra. Somaketa baten bidez, h_C = m-m erreferentzi lerro (beherengo ur-maila) eta C puntuaren arteko distantzia.

(ii) Hauteman h_B presio-oldarren interpolapen linealaren bidez.

$$h_B = \frac{BC}{AC} (h_A - h_C) + h_C$$

Edozein bi puntutako oldar totalen arteko diferentziari oldar hidraulikoa deritzogu, adibidez, 3.1(d) irudian A puntuko oldar totala $H_A = h'_A + h_A$ da, eta C puntuko oldar totala $H_C = -h_C + h_C = 0$; beraz, h oldar hidraulikoa = $H_A - H_C = H_A$ = = goiko eta beheko ur-mailen arteko diferentzia. Zera ere oharrtzekoa da: tutu zutetako ur-mailen goieren arteko direrentzia bezala defini daitekeela h oldar hidraulikoa. Adibidez, A puntuko tutu zuteko ur-maila a puntuan dago, C puntuko tutu zuteko ur-maila m-m mailan dago. Maila arteko diferentzia $h_A + h'_A$ = = H_A = h da lehen bezala.

3.3.- Inosketa

A eta C puntuak L distantzia batez aldenduak daudela 3.1 (d) irudiak erakusten du. Beste era batera esateko, h oldar bat L luzera batetan jarioa eragiten. Definizioz,

$$i = \frac{h}{L}$$

non, i = gradiente hidraulikoa,

h = oldar hidraulikoa, eta

L = h hautemateko erabili diren bi puntu arteko distantzia.

3.1(d) irudian erakusten den erabidearen antzekoa erabiliz Darcy-k ondoko adierazpena formulatu zuen:

$$q = k\ i\ A$$

non, q = jario ginoa, adibidez cm^3/s

k = inosberatasun-koefizientea,

i = gradiente hidraulikoa = h/L, eta

A = laginaren gurutzetarako sekzioaren azalera.

3.3 ekuapena edo Darcy-ren Legea honela idatz daiteke:

$$\frac{q}{A} = k\ i = v \qquad (3.4)$$

non, v = batezbesteko abiadura, cm./s. , m./egun etab. unitatez.

Arestian aipatu bezala, hutsarteetan zehar ura ibilbide ingurutsuetan barrena jariotzen da, horregatik, v_s inospen-abiadura ez da izango v honen berdina.

3.1(d) irudian erakutsitako ontzian zehar ura beherantz jariotzen bada, zilindroan zehar iragaten den Q ur-kantitateak eta zolu-laginean zehar iragaten den Q ur-kantitateak berbera izan behar dutela ikusterraza da; hau da,

$$Q = v\ A = v_s\ A_v \qquad (3.5)$$

non, A_v = A zehar-sekzioko hutsarte-azalera.

3.5 ekuapenetik, $v_s = \frac{v\,A}{A_v} = v\,\frac{A\,L}{A_v L} = v\,\frac{V}{V_v} = \frac{v}{n}$

beraz, $v_s = \frac{v}{n} = (\frac{1+e}{e})v = (\frac{1+e}{e})\,k\,i$ (3.6)

Zolu-ingeniaritzan, v v_s baino askoz ere sarriago erabiltzea ohi da; beraz, aurrerantzean, v erabiliko dugu.

Jario laminarretarako bakarrik gauza da 3.4 ekuapena, hau da, v_c abiadura kritiko batetara iritsi arte. Saiakuntz nabaritasunak zera iradokitzen du: hare ertainen neurrirainoko zoluentzat gauza dela Darcy-ren Legea. Zolu larriagoetan jario zurrunbilotsua izan daiteke, eta benetako gradiente eta abiaduraren arteko erlaziotasuna saiakuntz bidez hauteman beharko litzateke.

3.4.- Inosberatasun-Koefizientea

Inosberatasun-koefizientea, bai laborategian edo bai landan neur daiteke. Laborategiko metodo arrunt biak hauxek dira:

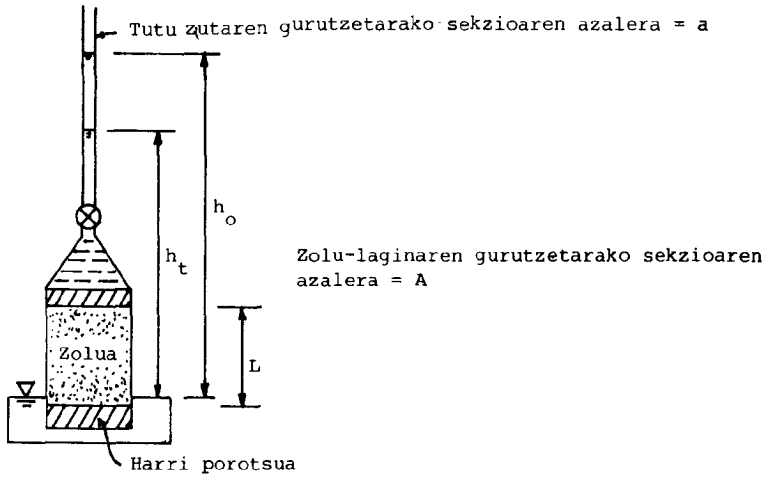
a) Oldar aldakordun inosdur neurgailu-saiakuntza.

b) Oldar konstantedun inosdur neurgailu-saiakuntza.

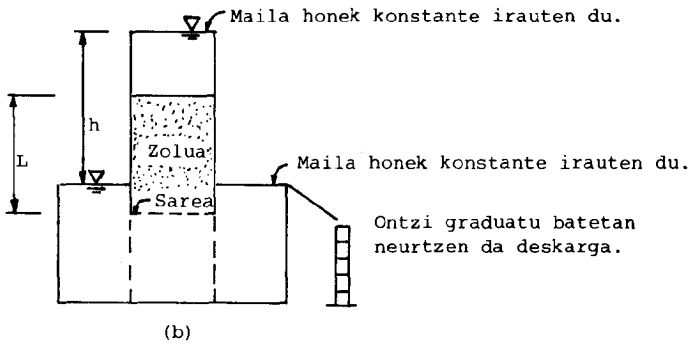
Saiakuntza hauk diagrama eran erakusten dira dagozkien 3.2(a) eta (b) irudietan.

a) Oldar aldakordun inosdur neurgailua

Saiakuntza hau egokiena da bikor zehezko zolu eseentzat, alegia, lupetzentzat eta hare oso zeheentzat. Oinarriz, laginа daukan zilindro batez egina da gailua; zonbreru bat eta zulo findun tutu tente bat atxekitzen zaizkio. Arreta berezia izaten da sisteman dagokeen airea egozteko. Tutu tenteko balbula bat irekitzen da eta urari laginean zehar aspil batetara



(a)



(b)

3.2 Ir. (a) Oldar aldakordun inosdur neurgailua.

(b) Oldar konstantedun inosdur neurgailua.

inosten uzten zaio. Aldizka, ura tutu tenteko edonolako beheragoko maila batetara jausten iragaten den t denbora hartzen da.

Honela erator daiteke k inosberatasun-koefizientea hautemateko adierazpena:

Bitez h_o eta h_t , beherengo ontziko ur-mailatik neurtuz, tutu tenteko hasierako eta tarteko ur-goierak. Bedi A laginaren gurutzetarako sekzioaren azalera eta bedi a tutu tentearen gurutzetarako sekzioaren azalera. Bedi L laginaren luzera.

dt denbora tarte batetan ur-maila -dh distantzia batjausten da. 3.3 ekuapena hartuz, q = k i A edo Q = k i A t , ba, q = Q/t. Tutu tentea uzten duen ur-kantitatea edo bolumena azalera x altuera = -a x dh da. Laginaren zehar iragaten den ur-kantitatea $Q = k \frac{h}{L} A\, dt$ da. Jarraitasunarengatik, horik berdinak izan behar dute, beraz adierazpen biak ekuatuz

$$k \frac{h}{L} A\, dt = -a\, dh \text{ , eta}$$

$$dt = -\frac{a\, L}{A\, k} \frac{dh}{h}$$

Alde biak integratuz, zera daukagu

$$\int_{t_o}^{t} dt = -\frac{a\, L}{A\, k} \int_{h_o}^{h_t} \frac{dh}{h}$$

hau da, $t - t_o = -\frac{a\, L}{A\, k} \ell n(\frac{h_t}{h_o})$, edo

$$k = -\frac{a\, L}{A(t - t_o)} \ln (\frac{h_t}{h_o}), \text{ edo}$$

$$k = 2{,}3 \frac{a\, L}{A(t - t_o)} \log_{10} \frac{h_t}{h_o} \qquad (3.7)$$

Kalkulapen eta irakurpen batzu egin behar litezke hein batetan k konstantea dela ziurtu arte, ba, tenperatura gora behera, airea barruan izateak eta abarrek emaitzetan eragina izan dezakete.

b) Oldar-konstantedun inosdur neurgailua

Saiakuntza hau zolu-mota guztietan eurrez erabiltzen da. Gailua, 3.2(b) irudian erakusten da. Inosberatasun-koefizientea honela idatzitako 3.3 ekuapenaren bidez kalkulatzen da:

$$k = \frac{Q\ L}{h\ A\ t} \qquad (3.8)$$

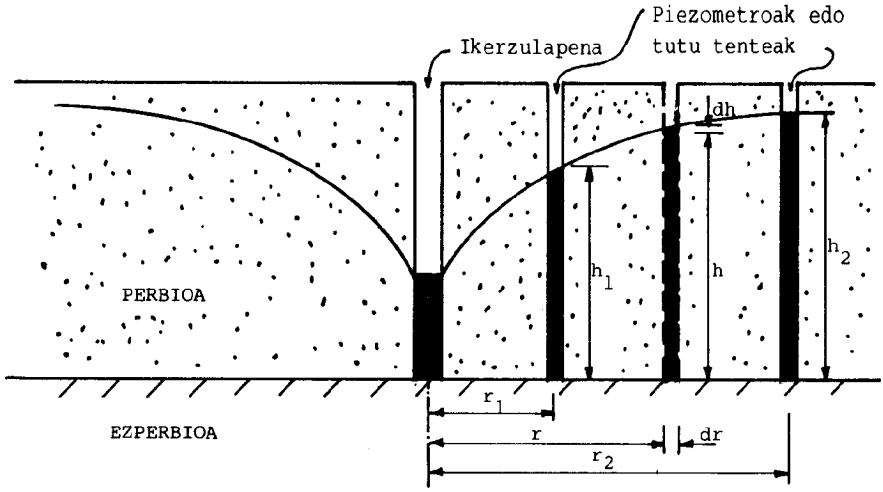
Landa bertako inosberatasun horizontalaren taxu fidagarriagoak lortzeko, ekonomikoagoa izan daiteke landa-inosberatasun saiakuntzak eroatea. Ikerzulapenetan* edo saiakuntz patinetan eroan daitezke landako inosberatasun-saiakuntzak. Patin baten ur-emaria taxutu behar denean eta txikapen-sistema bat instalatu behar denean maila freatikopean industeko, saiakuntza hauk ordezgaitzak dira sarritan. Inosberatasuna handiagotu ahala inosberatasun-saiakuntzak garrantzitsuagoak bilakatzen direla nabari izan behar luke.

Patin-saiakuntzak 3.3 irudian erakusten dira. Kasu bi barkarrik marrazten dira: (1) estratu perbio bat gainestaltzen estratu ezperbio bat, eta (2) estratu ezperbio bat gainetzaten estratu perbio batetan. (1) kasuan eta 3.3(a) irudira begia zuzenduz, 3.3 ekuapenak $q = k\ i\ A$ ematen du.

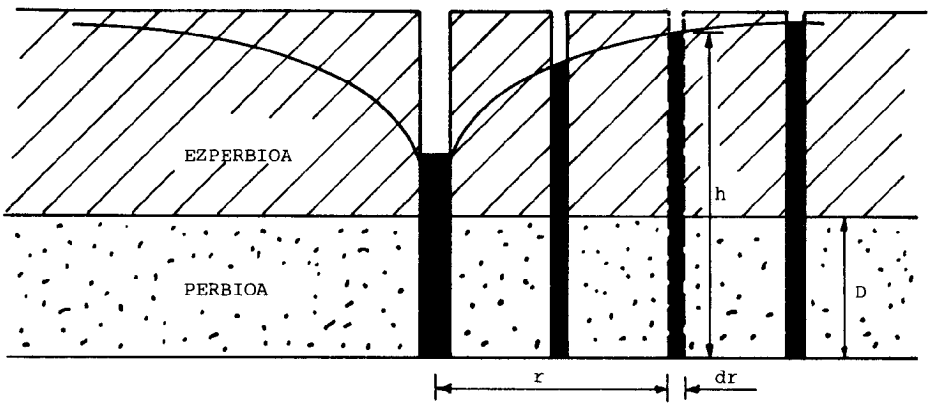
Orain, $A = 2\ \pi\ r\ h$; $i = \frac{dh}{dr}$, beraz

$$q = 2\ \pi\ r\ h\ k\ \frac{dh}{dr} \quad \text{eta} \quad \frac{dr}{r} = \frac{2\ \pi\ k\ d\ dh}{q}$$

r_1 eta r_2 artean eta dagozkien h_1 eta h_2 altuera artean integratuz,



(a)



(b)

3.3 Ir. Landako inosberatasun-neurketa.

(a) Zolu perbioa gainestaltzen zolu ezperbioa.

(b) Zolu ezperbioa gainestaltzen zolu perbioa.

$\int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{1} = \frac{2\ \pi\ k}{q} \int_{h_1}^{h_2} h\ dh$ lortzen da, eta

$$\ell n \frac{r_2}{r_1} = \frac{\pi\ k}{q} (h_2^2 - h_1^2) \text{ , eta}$$

$$k = \frac{q\ \ell n \frac{r_2}{r_1}}{\pi(h_2^2 - h_1^2)} \qquad (3.9)$$

(2) kasuan eta 3.3(b) irudia begiratuz, $A = 2\ \pi\ r\ D$; beraz,

$$\ell n \frac{r_2}{r_1} = \frac{2\ \pi\ k\ D}{q} (h_2 - h_1) \text{ , eta}$$

$$k = \frac{q\ \ell n \frac{r_2}{r_1}}{2\ \pi\ D)h_2 - h_1)} \qquad (3.10)$$

Faktore hauk eragiten diote inosberatasun-koefizienteari:

1. Zatiki-Neurria

Eskuarki, inosberatasuna zatiki-neurriaz handiagotzen da hutsarte-espazioa handiagoa delako neurri handietan. Edozein zatiki-neurri eta inosberatasunen arteko erlaziotasuna, bikor larrizko zoluetan bikor zehezkoetan baino egokiagoa izango dela nabaria izan behar luke. Erlaziotasun batzu formulatuak izan dira, baina argi bedi hurranpenak* direla. Erlaziotasun arruntenetarikoa Hazen-i dagokio; honek hau proposatu zuen:

$$k = 100\ D_{10}^2 \qquad (3.11)$$

non, k = inosberatasuna, cm/s. tan,

D_{10} = neurri eraginkorra, cm.tan.

Neurri-ordena-kurba ezagutzen denean bakarrik 3.11 ekuapena erabil daiteke k-ren taxu trauskil bat lortzeko; gainera, hareetan bakarrik erabili behar litzateke.

2. Hutsarte-Arrazoia.

Nahiz eta hutsarte arrazoia eta zatiki-neurria erlazionaturik izan, e_1 hutsarte-arrazoidun zoluaren k_1 inosberatasun-koefizientea ezaguna bada, e_2 hutsarte-arrazoidun zoluaren k_2 taxu daiteke bikor larrizko zoluetan, hau da,

$$k_2 = \frac{\frac{e_2^3}{1+e_2}}{\frac{e_1^3}{1+e_1}} \cdot k_1 \qquad (3.12)$$

Baita,

$$k_2 = \frac{e_2^2}{e_1^2} \cdot k_1 \qquad (3.13)$$

3. Tenperatura.

Egia osoa esateko, uraren tenperaturak jario-ginoari eragiten dionez gero, k-ren balioak tenperatura estandar batetan ja kineraziak izan behar lirateke. Zolu-ingeniaritzan, 20ºC-tako tenperatura hartzen da eskuarki. Ondoko adierazpenaz zuzen daitezke inosberatasun baloreak.

$$k_{20ºC} = \frac{\mu_T}{\mu_{20º}} k_T \qquad (3.14)$$

hemen, $k_{20ºC}$ = 20ºC-tako inosberatasuna,

k_T = TºC-tako inosberatasuna,

$\mu_{20ºC}$ = 20ºC-tako biskositatea

μ_T = TºC-tako uraren biskositatea.

4. Ehundura edo Estruktura.

Ehundura zein estruktura berbak bikor zehezko zoluari buruz hitz egiteko erabiltzen dira behinenki. Zolu hauen jalkitze naturalean, zatiki-neurriak eta eiteak, ur-araztasunak, mineralogiak, etabarrek eragina izan dezakete zatiki bakoitzaren jarreran. Muturretako zatiki-jarreren mota biak estruktura lapastua (flokulatua) eta estruktura sakabanatua (dispertsatua) deitzen dira. Estruktura lapastuan, zolu zatikiak ertza-aurpegira-(karta-etxe) jarreran daude, ostera, estruktura sakabanatuan, zolu-zatikiak aurpegia-aurpegira-jarrera paraleloa dute.

Zolu-laginak hutsarte arrazoi berberean erkatuak badira, estruktura lapastua duen laginak estruktura sakabanatua duenak baino inosberatasun handiagoa du. Estruktura sakabanatua duten jalkinetan, zolu-zatikiak posizio horizontalean egoteko joera izango dute; beraz, k_h norabide horizontaleko inosberatasuna norabide bertikaleko k_v inosberatasuna baino handiagoa izango da. Geroago eztabaidatuko den bezala, hau garrantzidun mana da jario-sareak marraztekoan.

5. Aire Irtenezina.

Zolu-jalkin askok hutsarteetatik irten ezin daitekeen airea daukate. Airezko burbuilak zolu barruan egoteak inosberatasuna txikiagotzeko eragina du.

3.4.1.- Inosberatasun-Baloreak

Inosberatasun-koefizientearen keradun* baloreak ematen dira hemengo 3.1 taulan.

3.1 Taula. k-ren Keradun Baloreak

Zolua	k(cm./s.)
Legar garbia	>1
Hare larri garbia	$1 \times 10^{-2} - 1$
Hare zehea	$1 \times 10^{-3} - 5 \times 10^{-2}$
Lupetzdun harea	$1 \times 10^{-4} - 2 \times 10^{-3}$
Lupetza	$1 \times 10^{-5} - 5 \times 10^{-4}$
Buztina	$<1 \times 10^{-5}$

Inosberatasun-gradua 3.2 taulako eran klasifika daiteke.

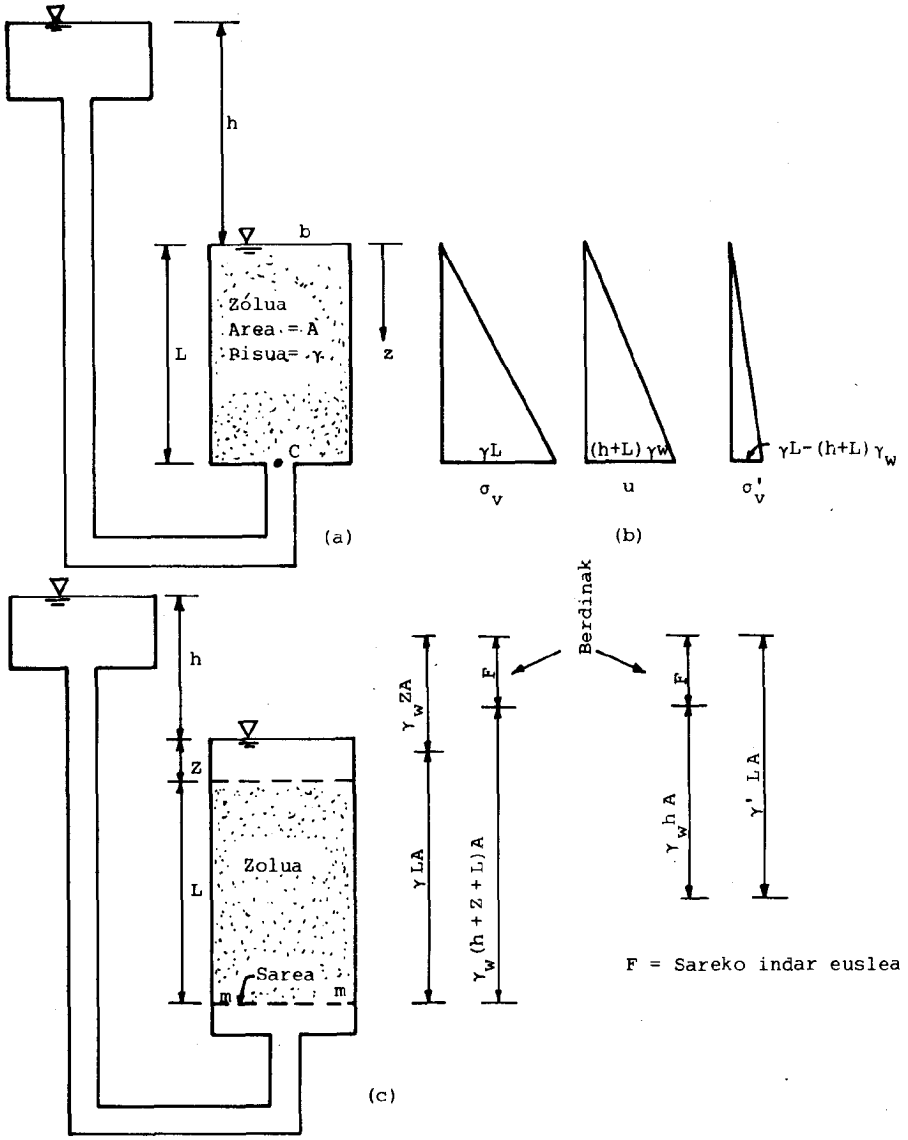
3.2 Taula. Inosberatasunaren Klasifikapena

Inosberatasun-gradua	k(cm./x.)-ren balorea
Garaia	Gain 10^{-1}
Ertaina	$10^{-1} - 10^{-3}$
Behekoa	$10^{-3} - 10^{-5}$
Oso Behekoa	$10^{-5} - 10^{-7}$
Inostezindakoa	Azpi 10^{-7}

3.5.- Haztagabetasun-Egoera

Lehendabiziz, "haztagabe" berba, ez ekai bati, baizik eta egoera bati doakiola ohartzea garrantziduna da. Bestela esateko, hare haztagabea* ez da hare-mota berezi edo desberdin bat. Haretegi zamatugabe batetan barrena, goranzko norabidean jariotzen den urak sortzen du hare haztagabea, hemen deskribatzen den eran.

Tentsio eraginkorraren printzipioa, 2.2 azpiatalean aurkeztu zena, eta oldarrak eta inosketa eztabaidatzeko 3.2 eta 3.3 azpiataletan erabili zena, aipatzen dugu haztagabetasun-egoera deskribatzeko.



3.4 Ir. Tentsio eta indar oreka goranzko jarioa dela eta.

Gogoan hartuz 3.4(a) irudian agertzen den prestapen experimentala, h oldar hidraulikoa dela eta, ura gorantz jariotuko da harean zehar. Hare-lagineko edozein puntutako tentsio eraginkor eta totala lortzeko, 2.2 eta 2.8 ekuapenak erabiltzen ditugu. Har joandako uraren* mailako b erreferentzi puntua.

Edozein z sakoneratan

$$\sigma_v = \gamma z$$

b puntuan, $z = 0$, eta $\sigma_v = 0$; presio-oldarra $= \frac{u}{\gamma_w} = 0$, eta $u = 0$.

c puntuan, $z = L$, $\sigma_v = \gamma L$; presio-oldarra $= \frac{u}{\gamma_w} = h + L$, eta $u = (h + L)\ \gamma_w$.

Horregatik b puntuan, $\sigma'_v = 0$, eta c puntuan

$\sigma'_v = \sigma_v - u = \gamma L - (h + L)\gamma_w$. Tentsio hauk 3.4(b) irudian erakusten dira.

Hare bati (kohesiogabea) goranzko jario bat aritzen bazaio, ondorioz zero tentsio eraginkorra emanez, harearen jarkimena zero bilakatzen da, hau da, haztagabetasun-egoera bat dago. Bestela esateko, haztagabetasun-egoera egoten da poro-uraren presioak tentsio totala (harearen pisua) berdintzen duenean, hau da, $\sigma'_v = 0$.

Honela, $\sigma'_v = 0 = \gamma L - (h + L)\ \gamma_w$

eta $\frac{h}{L} = \frac{\gamma - \gamma_w}{\gamma_w} = \frac{\gamma'}{\gamma_w}$, baina $\frac{h}{L} = i$, gradiente hidraulikoa. Horregatik, i_{kr} gradiente hidrauliko kritikoa, haztagabetasun-egoera sorteraziko duena:

$$i_{kr} = \frac{\gamma'}{\gamma_w} \qquad (3.15)$$

Beste eratorpen aukeragai bat indarren oreka haintzakotzat hartzea da, alegia $\Sigma F_z = 0$

3.4(a) irudiko zolu laginean, bedi bere luzera = L eta azalera = A. Honela, beheranzko pisua edo indarra γLA da. Goranzko indarra uA da. Goranzko indarrak beheranzko indarra berdintzen duenean haztagabetasun-egoera bat dago.

$u A = \gamma L A$, hau da, $u = \gamma L$

Baina, $u = (h + L)\gamma_w$ eta $\gamma = \left(\frac{G + e}{1 + e}\right)\gamma_w$;

eta ondorioz, $i_{kr} = \frac{h}{L} = \frac{G - 1}{1 + e}$ (3.16)

Noiz behinka, goranzko indarra zati bitan gogoan hartzea irakasgarria izaten da:

Goranzko indarra = $u A = (h + L)\gamma_w A = h A \gamma_w + L A \gamma_w$

= 1. zatia + 2. zatia

1. zatia = $h A \gamma_w$ = inospen-indarra, eta

2. zatia = $L A \gamma_w$ = bolumena x γ_w = indar buiatzailea.

Zati biak urak eragindakoak.

Bolumen-unitateko inospen-indarra, inospen-indarra zati zolu-bolumena da, hots,

$$j = \frac{h A \gamma_w}{A L} = \frac{h}{L} \gamma_w = i \gamma_w \quad (3.17)$$

Bolumen-unitateko indar buiatzailea γ_w da.

Zolu-lagina sare batetan ointzen* (edo eusten) dela ikusten da 3.4(c) irudian. Sare euslearen gainean iharduten duen F indar bertikala honela hautematen da:

1. Metodoa

m-m mailan, $\sigma_v = \gamma_w z + \gamma L$, eta

$$u = (h + z + L)\gamma_w \text{ ; beraz}$$

$$\sigma'_v = \gamma_w + \gamma L - (h + z + L)\gamma_w$$

$$= \gamma L - (h + L)\gamma_w$$

Baina, F indarra = tentsioa x azalera ; beraz

$$F = \gamma L A - (h + L)\gamma_w A \qquad (3.18)$$

2. Metodoa

Beheranzko indar buiatzailea $\gamma' L A$ da eta goranzko inospen-indar netua $h A \gamma_w$ da. Horregatik,

$$F = \gamma' L A - h A \gamma_w$$

$$= (\gamma - \gamma_w) L A - h A \gamma_w$$

$$= \gamma L A - (h + L)\gamma_w A$$, hots, 3.18 ekuapen berbera.

3.6.- Jario-Sareak

Zoluetan zeharko ur-jarioa Laplace-ren ekuapena deritzogun jario-ekuapenaz gobernatzen da. Ekuapen hau aurreragoko azpiatal batetan eratortzen da. Laplace-ren ekuapena, lerro elkartzutez marrazturiko sareki* batetan datzan jario-sareaz grafikoki antzez daiteke. Lerro elkartzut hauei, jario-lerroak eta lerro ekipotentzialak deritze.

Zolu-moltsoan zehar inostean, urak hartzen dituen bideak

antzezten dituzte jario-lerroak. Jario-lerro arteko espazioei jario-ubideak deitzen zaizkie.

Lerro ekipotentzialak, oldar totalberdindun puntuetan zehar marrazturiko lerroak dira eta jario-lerroerekiko elkartzutak dira.

Jarioa daukan edozein sistemak inguruko baldintza-sorta berezi bat du. Aurreragoko eztabaidetan inguruko baldintza hauk finkoak direla onartuko da. Edozein jario-sarek inguruko baldintza hauk bete behar ditu.

Lerro elkartzuten kopuru infinitu batez antzez daiteke jario-sare bat; bestela ezin dezakegunez, halere, lerro-kopuru mugatu bat bakarrik marraztuko da. Zolu isotropikoetan, lerroak elkartzutak badira eta karratu-eremu bat lortzen bada, eta orduan bakarrik, Laplace-ren ekuapena betetzen da.

Jarioa zedatua* izan daiteke, adibidez, ulangadura* baten azpiko inosketa, edo zedagabea, adibidez, lurrezko uharkan zeharko inosketa, eta bat, bi, hiru-dimentsionala izan daiteke.

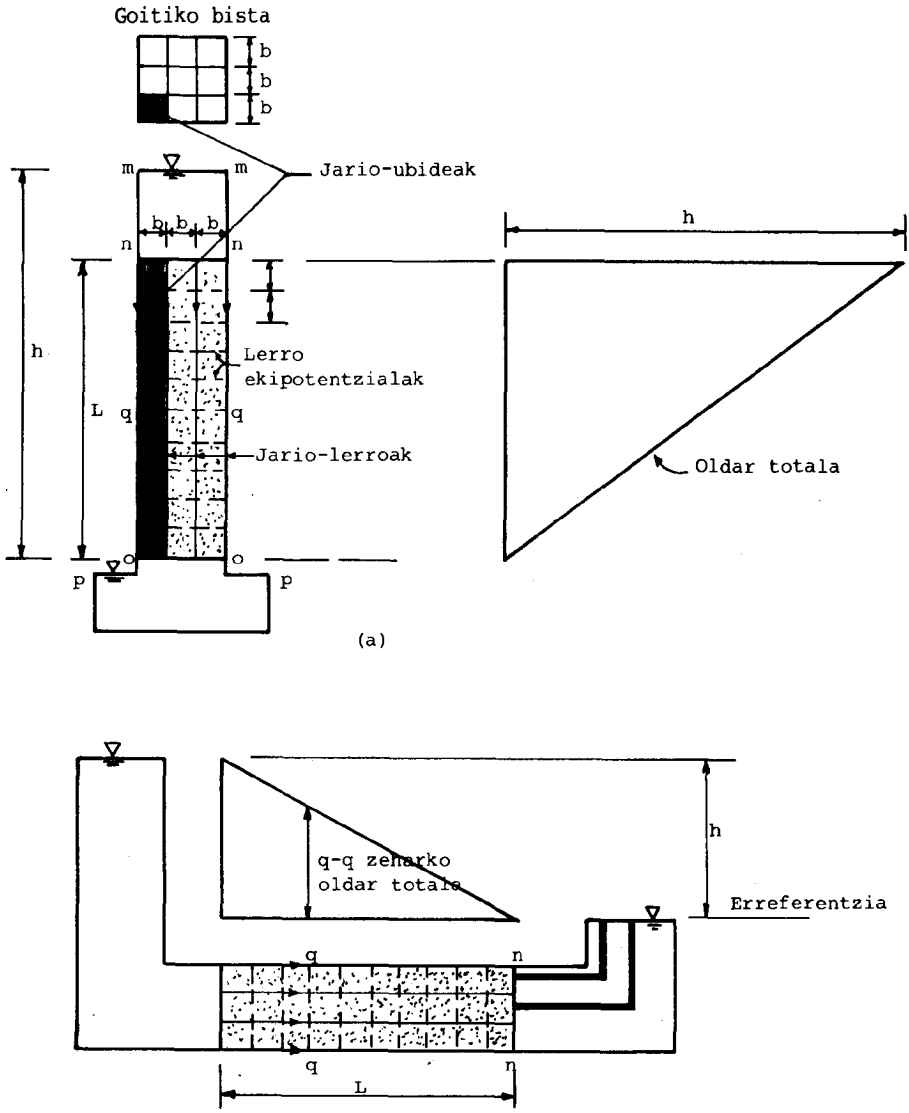
3.6.1.- Dimentsio Bateko Jario Zedatuentzako Jario-Sarea

Gogoan har 3.5(a) irudian agertzen den eredua.

Eredu honek, p-p joandako uraren maila eta m-m daugin uraren* mailen oldar totalen arteko diferentzia h dela, eta urazolan zehar jariotzean, hau da, n-n-tik o-o-ra, oldar total hau galdua dela erakusten du.

Edozein n-n edo q-q lerro horizontaletan luze*, oldar total berbera dago, eta honegatik lerro hauk lerro ekipotentzialak dira. Jakina, jario-lerroak bertikalak direla eta lerro ekipotentzialak angelu zuzenetara gurutzatzen dituztela.

Egoki denez, lau jario-lerro bakarrik izan dira marraz-



3.5 Ir. Jario zedatua. (a) Bertikala.
(b) Horizontala.

tuak 3,5(a) irudian erakusten den eran. Lau jario-lerrook, b zabalera berdindun hiru jario-ubidetan zatitzen dute azalera. Ontziaren goitiko bista karratua bada, orrialdearekiko norabide zutean ere b zabaleradun jario-ubideak izango dira, 3.5(a) irudian erakusten den eran. Beraz, adibide honetan bederatzi jario-ubide dago. Ez da jariorik ubide batetik beste batera.

Lehen aipatu bezala, h oldar totala n-n eta o-o artean galtzen da. Egoki denez, L, laginaren luzera berdinki zatitzen da, eta honela edozein alboko lerro ekipotentzial biren arteko oldar-galera, berbera izango da. Gainera, lerro ekipotentzial arteko ℓ distantzia b zabaleraren berdina egiten da, eta honela jario-sareak karratu-sistema bat formatzen du.

Gogoan hartzen badugu edozein X karratu (edo kubo) 3.5(a) irudian ikusten den eran, q_x, karratu honetan zeharko jario-ginoa (3.3) ekuapenaz hauteman daiteke, hau da,

$$q_x = k\, i_x\, A_x \qquad (3.19)$$

Bedi n_d = jario-sare guztiko jauzi potentzialen kopurua.

Oldar totala hamar jauzi berdinetan zatitua dago 3.5(a) irudian. Alboko jauzi ekipotentzial biren artean galtzen den oldar totala h/n_d da. Orain, $i = h/L$ eta $i_x = h/(n_d\, \ell)$. Baita ere, $A_x = b \times b$. Baliook 3.19 ekuapenean ordezturik:

$$q_x = \frac{k\, h\, b^2}{n_d\, \ell} \qquad (3.20)$$

Lagin osoan zehar iragan behar du X karratuara sartzen den jarioak; beraz, 3.20 ekuapenak jario-ubide batetan zeharko jarioa antzezten du. Demagun n_f = jario-ubideen kopurua ($n_f = 9$, gure adibidean), eta jario-gino totala zera da

$$q = \frac{k\, h\, b^2}{\ell}\, \frac{n_f}{n_d} \qquad (3.21)$$

Zolu-ingeniaritzan, problema gehienak bi-dimentzionalak dira, eta metroko (orrialdearekiko zuta) jario-ginoa hautematea egokiagoa da, hots, b orrialdearekiko izari zuta metro bat dela onartzen da. Bestela b = ℓ bada, 3.21 ekuapena zera bilakatzen da:

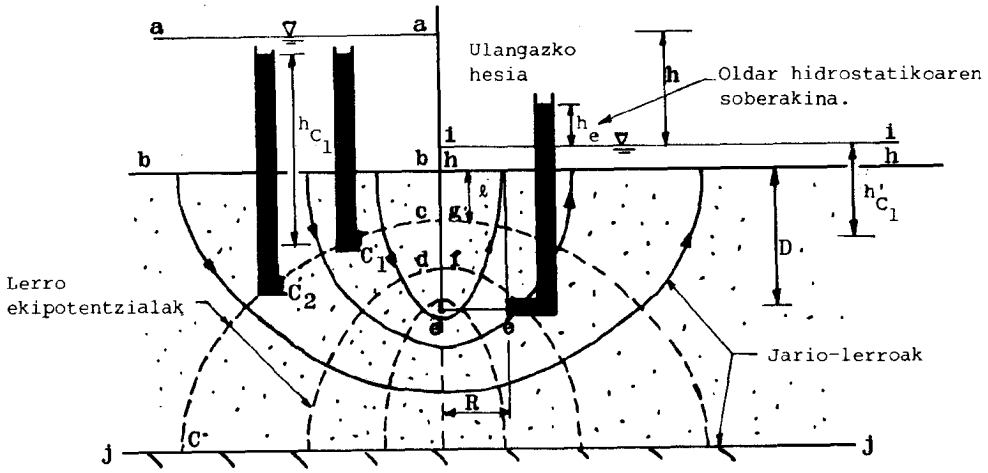
$$q = k\, h\, \frac{n_f}{n_d} \qquad (3.22)$$

Problema askotan, jario-sare barruko edozein puntutako gradiente hidraulikoa eta oldar piezometrikoa edo presio-oldarra hautematea beharrezkoa da, baina laster lor daitezke, presio-oldarra = oldar totala - posizio-oldarra eta i = h/L baitira. 3.5(a) irudiko q-q maila, bost jauzi potentzial n-n-mailapean dago. Guztitara hamar jauzi potentzial dagoenez, oldar totalaren 5/10 galduak izan dira, (5/10)h oldar totala utziz. q-q-an goiera-oldarra h'_q da. Piezometro edo tutu tente bat sarterazia izango balitz q-q mailan, piezometroko ura ren maila (5/10)h - h'_q altuerara, q-q maila gainean, igongo litzateke. q-q mailako gradiente hidraulikoa h/L da. Alboko lerro ekipotentzial biren arteko oldar-galera, ℓ distantzian, h/n_d da. Honegatik, i = $h/(n_d\ \ell)$. Adibide honetan i konstantea da laginean zehar.

Jario horizontala erakusten da 3.5(b) irudian. Aipaturiko printzipio eta ekuapenak berdin balio dute jario bertikalentzat eta horizontalentzat. Lerro bertikal batetan luze, q-q erakoan, oldar totala konstantea da; beraz q-q lerroak ekipotentziala izan behar du n-n ekipotentzialean ikusten den eran; nahiz eta oldar totalak berdinak iraun presio-oldarrak desberdinak dira goiera bakoitzean.

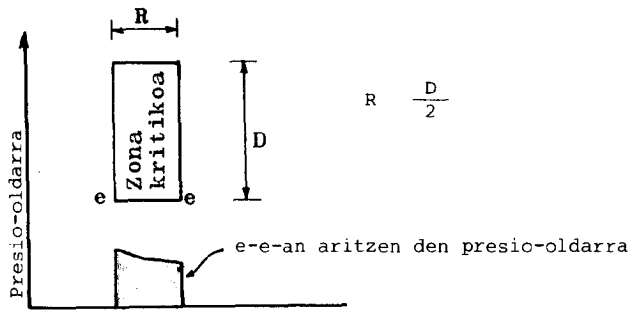
3.6.2.- Dimentsio Biko Jario Zedatuentzako Jario-Sarea

Haitz sendoaren gainean, hots, estratu ezperbio baten gainean dagoen zolu-estratu perbioaren zati bateraino sarturik dagoen ulangazko hesi azpiko jarioa erakusten du 3.6 irudiak.



Adibide honetan n_d = jauzi potentzialen kopurua = 8

n_f = jario-ubideen kopurua = 4



3.6 Ir. Ulangazko hesi baten azpiko jario zedatua.

Ulangadura ezperbioa dela onartzen da (egiatan, ulanga batek junturetan luze ura galduko badu ere).

Inguru-baldintza guztiak definiturik daudenez, 3.6 irudiak jario-egoera zedatu bat erakusten du. Orrialdearekiko norabide zutean ulangazko hesia oso luzea dela gogoan hartzen da, eta honela hesi azpiko jarioa bi-dimentzionaltzat har daiteke. Inguru-baldintzak hauk dira:

1. a-a daugin uraren maila eta i-i joandako uraren maila konstante irauten dute.

2. b-b lerroan luzeko oldar totala konstantea da; beraz, b-b ekipotentziala da.

3. h-h lerroan luzeko oldar totala konstantea da; beraz, h-h ekipotentziala da.

4. b puntuan sartzen den ur-tanta h puntuan bakarrik irten daitekeenez ulanga inguraturik jariotuz, bedefgh xenda jaio-lerroa da.

5. j-j xenda jario-lerroa da.

Inguru-baldintzak betetzeko jario-sare bat marraz daiteke 3.6 irudian erakusten den eran. Azpiko inospenaren kantitatea kalkulatzeko eta haztagabetasun-egoeraren ahalbidea zaintzeko erabil daiteke honelako jario-sarea. Metodo batzuren bidez lor daiteke jario-sarea:

1. Matematikoki -erlaxapen metodoa.
2. Experimentalki -eredu eskalatua, analogo elektrikoa, etab.
3. Krokisatua -hau da metodorik arinen eta erabiliena.

Karratu-eremu bat lortzeko, jario-lerroek angelu zuzenez gurutzatu behar dituzte lerro ekipotentzialak 3.6 irudian ohartzen den eran. Jakina, eskala handian marrazten direnean, ka-

rratuak nolabait itxuragabetuak dira. Jario-lerroen eta lerro ekipotentzialen kopuruak nabariki gehitzen badira, karratuak itxuradunagoak bilakatzen dira, eta karratu-karratuak izatera hurbiltzen dira. Lanean, arintasunagatik jario-sare trauskil bat marrazten da, eta xehetasuna behar den edozein lekutan jario-sare finago bat marraztu ahal da. Gainera, zolu-jalkinen izaera heterogenoak ez du baimentzen zehaztasun desegokirik.

Krokisaketa-metodoak haztamuzko jario-sare batzu beregain dakartza. Ohiz, eskarmentuak haztamu-kopurua gutxitzen du.

c-c bezalako edozein ekipotentzialetan luzeko oldar totala konstantea da, 3.6 irudian erakusten den eran, ezen ekipotentzialean kokaturiko tutu tente edo piezometro bateko ur-mailak maila berberara igongo dira.

a-a eta i-i artean galtzen den oldar totala (oldar hidraulikoa nahiago bada) h da. Oldar hau zoluan zehar ezereztatzen edo galtzen da, 3.6.1 azpiatalean aldarrikatu zen bezala. Honela, ondoko lerro ekipotentzial artean galtzen den oldarra h/n_d 3.6.1 azpiatalean erakutsi bezala.

c_1 puntua bezalako edozein puntutako oldar hidraulikoa hautemateko, ari honela:

1. Hauteman jario-sare guztiko n_d jauzi potentzialen kopurua.

2. Hauteman b-b daugin uretako zertan-azalera eta c_1 puntuaren arteko n'_d jauzi potentzialen kopurua. 3.6 irudian, $n_d = 8$ eta puntua $n'_d = 1$-ean kokaturik dago, hau da, oldar-galera h/n_d da.

3. Hauteman c_1 puntuko goiera-oldarra. Erreferentzi lerroa i-i mailan izanik, goiera-oldarra $-h'_{c_1}$ da.

4. c_1 puntuko oldar totala hauteman. Hau berdin h ken oldar galdua da, edo $h - (h/n_d)$.

5. Presio-oldarra (oldar piezometrikoa) kalkulatu, hau da,
oldar piezometrikoa = oldar totala - goiera-oldarra.

$$h_{c_1} = (h - \frac{h}{n_d}) - (-h'_{c_1}) \quad ; \text{ honegatik}$$

$$h_{c_1} = h + h'_{c_1} - \frac{n'_d}{n_d} h \qquad (3.23)$$

$(h + h'_{c_1})$ honek daugin uraren maila eta puntuaren arteko distantzia bertikala antzezten du.

f puntuan

$$h_f = h + h'_f - (6/8)h$$

Oldarra presio bezala adieraz daitekela 2.7 ekuapena hartuz, hau da $u = \gamma_w h$, eta presio hau norabide guztietan aritzen dela jakina izan behar luke. Beraz, ulangazko hesiaren aurka aritzen den presio horizontala desberdina izango da; daugin uraren aldeko presioa handiagoa izango da.

Jario-ginoa 3.22 ekuapena hartuz kalkula daiteke, hau da

$$q = k\, h\, \frac{n_f}{n_d}$$

Karratu txikien eta goienean izango da kritikoa irteera gradientea, hau da, hesi ondoko karratuan. (h/n_d) da azken karratuan galtzen den oldarra eta ℓ luzeran galtzen da; beraz $i = h/(n_d\, \ell)$. Haztagabetasun-egoeraren edo hodidur porrotaren* aurkako zentzuzko segurtasun faktorea emateko, 0,20-0,25 ez du gainditu behar irteera gradienteak.

Terzaghi eta Peck-ek zera iradoki zuten: sarpen-sakonerara arte eta ulangazko hesiaren sarpen-sakoneraren erdi inguruko zabalerara arte hedatzen den zona ukitzen du daitekeen hodidur porrotak. 3.6 irudian erakusten da zona hau. Gogoan har metro bateko lodiera orrialdearekiko zut.

Prismaren e-e eustazpian luzeko oldar piezometrikoak irudikatzen badira, 3.6 irudian bezala, mailak joandako ur-maila baino gorago daudela ikusiko da. Maila arteko diferentzia hau oldar hidrostatikoaren soberakina deitzen da eta e-e mailako oldar totalaren berdina da.

e-e-an luzeko oldar totalaren aldakuntza arin hauteman daiteke eta batezbesteko balore bat lor. Honela, goranzko presioa = batezbesteko oldar totala x γ_w, eta F_g goranzko indarra = e-e-ko batezbesteko oldar totala x γ_w x R. Goranzko indar honi, $F_b = \gamma' \times R \times D$ beheranzko indarra jarkitzen zaio, eta hodiduraren aurkako segurtasun-faktorea zera da:

$$SF = \frac{F_b}{F_g} = \frac{\gamma' \times R \times D}{\text{e-e-ko batko. oldarra} \times \gamma_w \times R} \qquad (3.24)$$

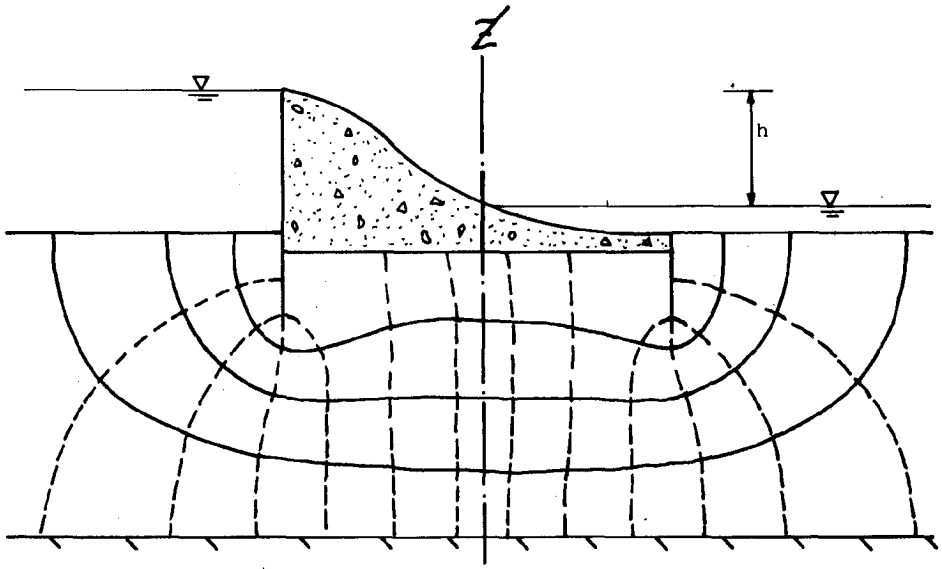
Jario zedatuaren beste adibide bat erakusten da 3.7 irudian. Inosketa, irteera-gradientea eta isurbidearen* eustazpiko jasoketa taxutzeko.

3.6.3.- Dimentsio Biko Jario Zedatugabeentzako Jario-Sarea

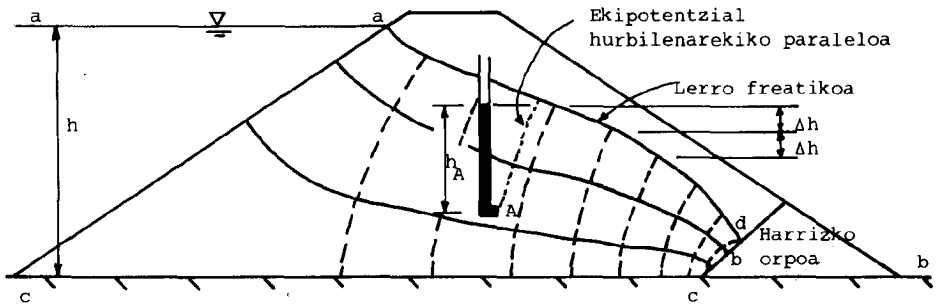
Egartzolu* ezperbio baten gainean datzan lurrezko uharka batetan zeharko jario sostengatua erakusten du 3.8 irudiak. Joandako ur aldeko aurpegiaren barruan mantentzeko gain gaineko jario-lerroa, joandako ur aldeko zatia orpoko drain batez hornitzen da. Inguruko baldintza finkoak hauk dira:

1. a-a daugin ur-maila eta b-b joandako ur-maila konstante irauten dute. Lerro hauetan luze, oldar totala konstantea da; a-a eta b-b lerro ekipotentzialak dira horregatik.

2. Uharkaren eustazpia ezperbioa da, hots, c-c jario-lerroa da.



3.7 Ir. Isurbide baten azpiko jario zedatua.



3.8 Ir. Lurrezko uharka batetan zeharko jario zedatugabea.

3. Daugin ur aldeko aurpegia, a-c alegia, ekipotentzial bat da, ezen oldar totala berdina da edonon a-c lerroan luze.

Geratzen den inguru-baldintza a-d lerroa da, berau muga ko jario-lerro bat izanik. Lerro honetako puntu guztiak zero presio oldarra dute; beraz, lerro freatikoa edo gain gaineko jario-lerroa deritzo.

Jario zedatuentzat bezalaxe, lerro ekipotentzialek jario--lerroak angelu zuzenez gurutzatzen eta karratu-eremu bat eratzen marrazten da jario-sarea. a-d lerroaren eitea baldintza hauk betetzeko egokitzen da: (1) karratu-eremua jario-sarean barrena, eta (2) puntu arteko goiera-aldapena eta ekipotentzial bi arteko oldar totalen diferentzia berdinak izan behar dutela. Bestela esateko, lerro freatikoan luze, Δh ondoko ekipotentzial bi arteko distantzia bertikala (ikus 3.8 irudia) konstantea izan behar du.

a-d lerroaren posizioari parabola baten bidez hur eman dakioke.

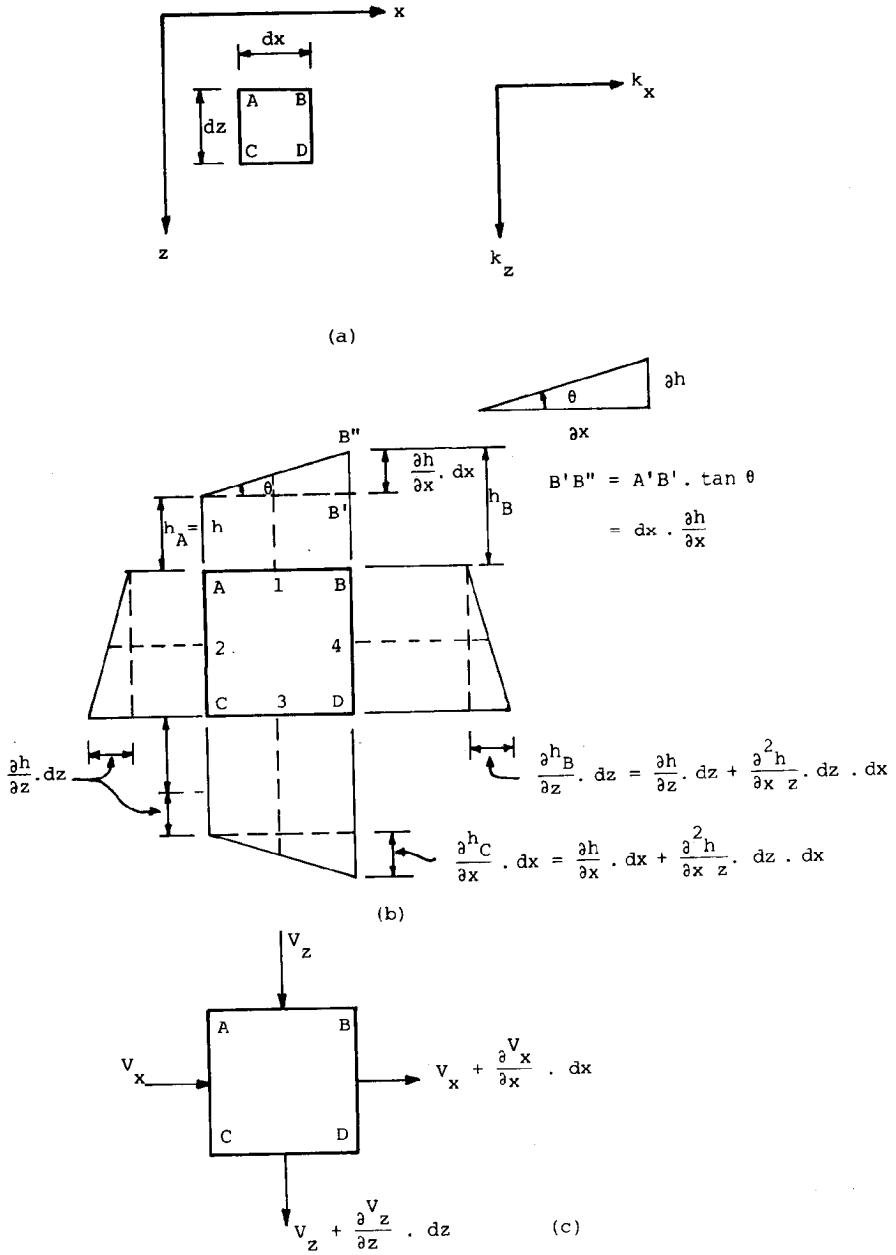
d puntuaren kokapena irteera-baldintzen menpe dago.

Inosketa kantitatea 3.22 ekuapenaren bidez taxu daiteke.

Egonkortasun analisietan, porrot-azala izan daitekeeneko puntu berezi batzutako oldar piezometrikoa hautematzea beharrezkoa izaten da. h_A, puntu honetako oldar piezometrikoa 3.8 irudian erakusten da.

3.7.- Laplace-ren Ekuapena

Zoluetan zeharko ur-jarioa Laplace-ren ekuapenaren bidez gobernatzen dela aipatu zen 3.6 azpiatalean. Behin jario-lerroen eta lerro ekipotentzialen arteko elkartzutasuna onetsi zgero, ekuapen hori, jario-sare printzipioa justifikatzen duen



3.9 Ir. Elementu batetako oldarrak eta abiadurak.

adierazpen matematikoa da. Gainera, ekuapena inguru-baldintza batzuren bidez ebatzia izan daiteke. Jarraian, bi dimentsioko jarioarentzako Laplace-ren ekuapenaren eratortzea:

Gogoan har x eta z ardatz koordenatuak eta ABCD elementu txiki bat, 3.9 irudian agertzen diren bezala.

Bitez, k_x = inosberatasun-koefizientea x-norabidean,

k_z = inosberatasun-koefizientea z-norabidean

d_x = elementu txikiaren zabalera,

d_z = elementu txikiaren altuera, eta

h = A puntuko oldar totala.

3.9(b) irudian erakusten den erara, balore hauk lortzen dira:

Puntua	Koordinatuak	Oldar Totala
A	x, z	$h_A = h$
B	x + dx, z	$h_B = h + \frac{\partial h}{\partial x} dx$
C	x, z + dz	$h_C = h + \frac{\partial h}{\partial z} dz$
D	x + dx, z + dz	$h_D = h + \frac{\partial h}{\partial z} dz + \frac{\partial}{\partial x}(h + \frac{\partial h}{\partial z} dz)dx$

h_D hau, $h + \frac{\partial h}{\partial z} dz + \frac{\partial h}{\partial x} dx + \cancel{\frac{\partial^2 h}{\partial x \partial z} dz\, dx}^{\,0}$ bilakatzen da.

Aurpegi bakoitzeko erdiko puntuan kokaturik dauden 1-tik 4-ra puntuetako oldarrez antzezten da elementuaren aurpegi bakoitzeko oldar totalaren batezbestekoa.

Puntua	Batezbesteko oldarra
1	$h_1 = h + \frac{1}{2} \frac{\partial h}{\partial x} dx$
2	$h_2 = h + \frac{1}{2} \frac{\partial h}{\partial z} dz$

3 $$h_3 = h + \frac{\partial h}{\partial z}\, dz + \frac{1}{2}\frac{\partial h}{\partial x}\, dx$$

4 $$h_4 = h + \frac{\partial h}{\partial x}\, dx + \frac{1}{2}\frac{\partial h}{\partial z}\, dz$$

dx distantzian galtzen da 2 eta 4 puntuen arteko oldar diferentzia; i = h/L denez,

$$i_x = \frac{h_2 - h_4}{dx} = -\frac{\partial h}{\partial x}$$

Antzera, $$i_z = \frac{h_1 - h_3}{dz} = -\frac{\partial h}{\partial z}$$

Dary-ren legea v = k i da; beraz

$$v_x = -k_x \frac{\partial h}{\partial x}\ , \text{ eta}$$

$$v_z = -k_z \frac{\partial h}{\partial z}\ .$$

Aurpegi bakoitzeko abiadurak 3.9(c) irudian erakusten dira. Ura, AB eta AC-tik sartzen eta CD eta BD-tik irteten da. Sartzen den ur-bolumena = abiadura x azalera

$$= v_x\, dx\, dy + v_z\, dx\, dy$$

Irteten den ur-bolumena = $(v_z + \frac{\partial v_z}{\partial z}\, dz)\, dx\, dy + (v_x + \frac{\partial v_x}{\partial x}\, dx)\, dz\, dy$

Poro-jariakina (ura) konprimaezina dela eta e hutsarte-arrazoia ez dela aldatzen onartzen da; beraz, elementura sartzen den ur-bolumena = elementutik irteten den ur-bolumena, eta goiko adierazpen biak ekuatzen badira,

$$v_x\,dx\,dy + v_z\,dx\,dy = (v_z + \frac{\partial v_z}{\partial z}\,dz)\,dx\,dy + (v_x + \frac{\partial v_x}{\partial x}\,dx)\,dz\,dy$$

edo $(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_z}{\partial z})\,dx\,dy\,dz = 0$

Orain, dx dy dz-ak bolumena antzezten du eta ezin daiteke zero izan; honegatik,

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0$$ eta v_x-ren eta v_z-ren baloreak ordeztuz:

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \qquad (3.25)$$

3.25 ekuapena ez da Laplacetarra.

Zolua isotropikoa bada, hau da, $k_x = k_z$, 3.25 ekuapena hau bilakatzen da:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0,\ \text{Laplace-ren Ekuapena} \qquad (3.26)$$

Angelu zuzenez gurutzatzen diren lerroen (jario-lerro eta lerro ekipotentzialen) kopuru infinitua definitzen du 3.26 ekuapenak, hots, 3.26 ekuapenaren antzezkuntza grafikoa jario-sare bat da.

3.7.1.- Eskala-Eraldakuntza

Zolu askotan $k_x > k_z$ da eta 3.26 ekuapena edo jario-sarea, benetako ur-jarioa antzezteko ezin daiteke erabil, hau da, $k_x \neq k_z$ denean, inosberatasun aldetik zolua anisotropikoa da eta baldintza hau 3.25 ekuapenaz antzezten da. 3.25 ekuapena Laplacetarra egiteko, x_t koordinatu aldakor berri batera eraldatzen da x koordinatua, non $x_t = a\,x$ eta

$$a = \left(\frac{k_z}{k_x}\right)^{1/2} \qquad \text{eta} \qquad a^2 = \frac{k_z}{k_x}$$

Beraz, $x_t = \left(\frac{k_z}{k_x}\right)^{1/2} x$

3.25 ekuapena honela idatz daiteke:

$$k_x \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial h}{\partial x_t}\right) + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} = 0 \text{ , edo}$$

$$k_x \frac{\partial}{\partial x_t}\left(\frac{\partial h}{\partial x_t}\frac{\partial x_t}{\partial x}\right)\frac{\partial x_t}{\partial x} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$$

Baina, $\frac{\partial x_t}{\partial x} = a$, eta

$$k_x \frac{\partial}{\partial x_t}\left(\frac{\partial h}{\partial x_t} a\right) a + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \text{ , edo}$$

$a^2 k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x_t^2} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$, eta a^2-ren ordezpenak hau ematen du:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x_t^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \qquad (3.27)$$

Eta 3.27 ekuapena Laplacetarra da; x_t-ek x ordezkatzen du. 3.27 ekuapenaren antzezkuntza grafikoa honela eroaten da:

1. Ebakiduraren eskala horizontala txikiagotu, izari horizontal guztiak $(k_z/k_x)^{1/2}$-z biderkatuz, eta deitu honi ebakidura eraldatua.

2. Marraztu jario-sare bat ebakidura eraldatua erabiliz.

3. Jario-sarearen benetako antzezkuntzarako, handiagotu izari horizontalak benetako lehenagoko baloreetarai-

no. Benetako eskala honetan, ekipotentzialak eta jario-lerroak beraien benetako posizioetan daude eta ez dira gurutzatuko angelu zuzenetan.

Zolu anisotropikoetan, jario-kantitate adierazpen honen bidez hauteman daiteke:

$$q = \sqrt{k_z k_x}\ h\ \frac{n_f}{n_d} \qquad (3.28)$$

3.8.- Iragazkien Betebeharrak

Lurrezko estruktura askotan zolu batetatik beste zolu batetara jariotzen da ura. Kasu guztietan iragazki batetan zehar drain batetara jariotzen da ura. Zatiki neurrien barreiapena oinarritzat hartuz diseinatu behar lirateke honelako iragazkiak, honelako eran:

$$(1)\quad \frac{(\text{iragazkiaren})D_{15}}{(\text{zoluaren})\ D_{85}} < 5 \qquad (3.29)$$

$$(2)\quad \frac{(\text{iragazkiaren})\ D_{15}}{(\text{zoluaren})\ D_{15}} < 20\ ,\ \text{eta} \qquad (3.30)$$

$$(3)\quad \frac{(\text{iragazkiaren})\ D_{50}}{(\text{zoluaren})\ D_{50}} < 25 \qquad (3.31)$$

Hiru betebeharrok betetzen badira, (1) bere inosberatasuna zoluarena baino handiagoa dela ziurtzeko bezain larria izango da iragazki-ekaia, eta (2) zolu-zatikiak ez dira migratuko eta ez dute iragazkia butxatuko. 3.29tik 3.31rainoko ekuapenak drain-ekaiari ere dagozkiola ohartzekoa da, ba, drain-ekai honek drainatzen du iragazkia. Inospen-kantitate taxutua eramateko bezainbesteko zabalera izan behar luke iragazkiak zein drainak.

3.9.- Kapilaritatea

Urez betetako upeltto baten barruan zulo txikidun beirazko tutu bat sartzen bada 3.10(a) irudiko eran, ura upelttoko mailara baino gorago igongo da tutu barruan. Fenomeno honi kapilaritatea deritzo. Kapilaritate-igopenaren altuera oharterazteko h_c erabiltzen da.

Presio atmosferikopean dago a-a maila; a-a hartzen bada erreferentzi lerro bezala goiera-oldarra eta presio-oldarra zero dira A eta B puntu bietan; beraz, oldar totala zero da, eta a-a-ri lerro freatikoa dei dakioke.

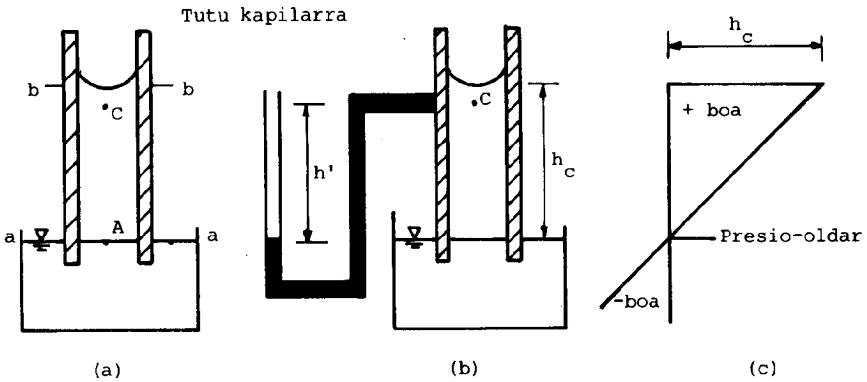
Tutu tente bat konektatua izango balitz beirazko tutura C puntuan 3.10(b) irudian bezala, d, tutu tenteko ur-maila a-a mailara iritxiko litzateke, hau da, C puntuko oldar piezometrikoa edo presio-oldarra -h' da. C puntua b-b-ri hurbiltzen zaion heinean, h' hurbiltzen da h_c-ra; horregatik, b-b mailako uraren presioa negatiboa da eta $u = -h_c \gamma_w$-ren berdina. Poro-ur-presioaren barreiapena triangeluarra da 3.10(c) irudian erakusten den eran.

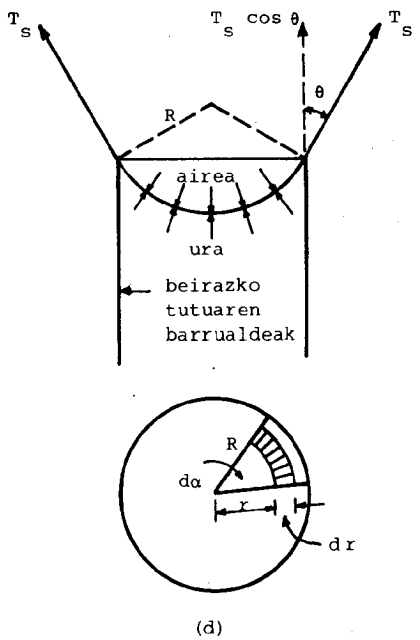
b-b mailako meniskoaren bista emendatua aztertzen bada 3.10(d) irudian bezala, h_c-rentzako adierazpena lor daitekeena da.

T_s-ren osagai bertikala $T_s \cos\theta$ da, eta indar hau meniskoaren perimetro-inguruan aritzen da. Perimetroa $2\pi R$ da eta honela, goranzko indarra $2\pi R\, T_s \cos\theta$ da. $u_a > u_w$ denez, $u_a - u_w$ presio-diferentzia beherantz ari da meniskoaren azalera projektatuan, hau da, πR^2 azalera batean. Orekan izateko, gorantz indarrak beherantz indarra ekuatu behar da, hau da,

$$2\pi R\, T_s \cos\theta = (u_a - u_w)\, \pi R^2 \quad , \text{ eta}$$

$$u_a - u_w = \frac{2\, T_s \cos\theta}{R}$$





Bedi: u_a = airetako presioa,

u_w = uretako presioa.

$u_a > u_w$

3.10 Ir. Eredu kapilarra

Beira garbian $\theta \to 0$; beraz

$$u_a - u_w = \frac{2T_s}{R}$$

Ohiz, u_a aire-presioa zerotzat hartzen da, eta $u_w = -h_c \gamma_w$

Beraz, $h_c = \frac{2\ T_s}{\gamma_w R}$ (3.32)

Ura denean T_s = 0,076 gm./cm. eta γ_w = 1,0 gm./cm.^{3}

$(u_a - u_w)$ adierazpenari zurgapena deritzo.

3.9.1.- Zoluetako Kapilaritate eta Lei-Aupa*

Lerro freatikoaren gaineko zolu gehienek asetasun-gradu al dakorrak dauzkate. Zolu mota, lerro freatikoaren hurbiltasuna, inguruneko baldintzak (euria,, etabarren menpean dago asetasun--gradua. Zoluaren ur-edukikortasuna edo erakarkortasuna kapilaritateari dagokio. R handiagotuz h_c txikiagotzen dela, edo alderantziz, erakusten du 3.32 ekuapenak; eta R txikiagoa da bikor zehedun zoluetan. Honela, buztinek eta lupetzek altuera adierazkor bateraino ura erakar lezaketela espero daiteke eta hau egiaztatua dago lanean. Alderantziz, lerro freatikoa jausten bada, bikor zehedun zoluok ur-eduki handiagoa gordeko dute.

Kapilaritateak poro-ur-presio negatiboa dakarrelaz ohar daiteke. Beraz, zolu bati idortzen uzten bazaio, poro-ur-presioa negatiboagoa bilakatzen da, eta noski, tentsio eraginkorra handiagotzen (ikus 2.8 ekuapena). Tentsio eraginkorraren handiagotze honek zoluaren konprimakortasun-ezaugarriei eta jarkimenari nabariki aldaerazten die; aurreragoko atal bateran eztabaidatzen da arazo hau.

Kapilaritateak lei-aupatzea dakarrela, edo behintzat hein handi batetan laguntzen diola, eskuharki onartzen da. Zertan-

azaleratik hurbil, zoluko ura izoztu ahala, une izoztuetarantz doa hezetasunaren jarioa. Honek, zolu-uretan zurgapen-gradiente bat ezarri dela adierazten du. Zurgapen-gradienteak behetik ura erakartzen du eta zoluan izotzezko ezkatak formatzeari eragiten dio. Tenperatura aski hotz den artean eta behetiko ur-horniketa den artean jarraitzen du fenomeno honek.

Baldintza ezagun batzupean, izotzezko ezkatak lodiagotu ahala zolua hantu egiten da. Hau lei-aupa (edo aupatze) deitzen da. Estrukturetan edo pabimentuetan, indar oso handiak sor ditzake aupa honek eta kalte itzelak ekar, beraz, daitekeenean zolu leiberak ekidinak izan behar dira.

Bikor zehedun zoluek inosberatasun txikia dute eta zurgapen handia. Bikor larridun zoluetan, inosberatasuna handia da baina zurgapena txikia. Honegatik, zolu horik ez dira, lupetza bezalako, bitarteko zoluak bezain objektagarri, ezen lupetzak inosberatasun eta zurgapen-gradu nahiko handiak baititu. Bestela esateko, lupetzezko zoluetan leiak beste zoluetan baino kalte handiagoak egin ditzake.

4. ATALA

SENDARPENA ETA APALPENA*

Azalera zamatu azpietan tentsioak zolu-moltsoratuak izaten direla 2. atalean erakutsi zen. Ipinitako zama konprimatzailea bada, ondorioz, tentsio eraginkorraren (2.8 ekuapenak definitua) gehipen bat izango da, eta baita ere, eragipen-zonako zolu-moltsoaren konprimapena. Konprimapen hau (hutsarte--arrazoiaren gutxitzea, alegia) zoluaren konprimakortasunagatik da eta zolu-moltsoaren apalpena gertarazten du, eta zolu--moltsoaren gainean edo barruan zimendatua dagoen edozein estrukturarena ere bai.

Kasu batzutan, azkenaldian jartzen diren tentsioak, lehen go bertako tentsioak baino txikiagoak dira, eta ondorioz, ten tsio eraginkorraren txikiagotze bat izango da. Honek, aupada edo harrotze batetara, goranzko indarrez, daroake zolua.

Zimendakuntz ingeniaritzan, gainean eraikitako estrukturei kalteak ekiditzeko, aupadaren edo apalpenaren magnitudea mugatzea edota aurresatea garrantzi handikoa da.

Tentsio-aldapenek apaltze eta aupatze-prozesuetan duten eragina eztabaidatzen da atal honetan.

4.1.- Apalpena

Zertan zamatua edo estruktura deslekuratzen den distantzia bertikalari doakio apalpen hitza. Estruktura gehienek zerbaiteko malgutasun-gradua daukate, eta horregatik, itxura txardun arrakala kaltegarrietara daroatzaten apalpen diferentzialak ja zoko zaizkie.

ρ apalpen totala honela defini daiteke:

$$\rho = \rho_b + \rho_p + \rho_s \qquad (4.1)$$

non, ρ_b = bat bateko edo apalpen elastikoa,

ρ_p = apalpen plastikoa, eta

ρ_s = sendarpen-apalpena.

4.1.1.- Bat bateko Apalpena

Azalera zamatu baten bat bateko apalpena taxutzeko metodo hurranak* badira. Teoria elastikoetatik erakarritako formulak erabiliz egiten dira aurresanak. Oinarriz, formulok ρ_b, $\Delta\sigma_v$ (tentsio bertikalaren handiagopena), E (Young-en moduloa), μ (Poisson-en arrazoia), eta azalera zamatuaren zurruntasun eta geometria erlazionatzen dituzte.

Gehienetan, E eta μ bezalako landa bertako (in situ) zolu parametroak ebaluatzea guztiz zaila izaten da, zolu-moltsoak ezomogenoak eta ezisotropikoak direlako eta zolu-lagin antzezgarri ezasaldatuak lortzea gaitza delako.

Lanean, ρ_b-ren balioztapena maiz enoratzen da (a) goian aipaturiko gaiztasunak direla eta, (b) ohiz magnitude hau sendarpen-apalpena baino askoz txikiagoa delako eta (c) estruktura gehienetan zamaren poxin handi bat eraiketaren amaiera baino lehen izaten da gehitua, eta apalketa-zama ipintzen denean jazotzen da bat bateko apalpen hau.

Bat bateko edo apalpen elastiko honen azalpen zehatza lantxo honen edukinetik at dago eta ez da emango.

4.1.2.- Deformapen (Apalpen) Plastikoa

Azalera zamatupeko zolu-moltso bat apalketa garrantzidu-

nak hasten direneraino tentsionatzen bada, zoluak (plastikoki) jariotzera joko du eta apalpena aurresatea ezin dena da benetan. Mota honetako apalpen handiak (deformaketa plastikoa) ekidinak izan behar dira, eta ondorioz, mugatuak izaten dira diseinuan (projektuan) tentsio soria kalkulatuz. Arazo hau geroago eztabaidatuko da.

4.1.3.- Sendartze-Apalpena

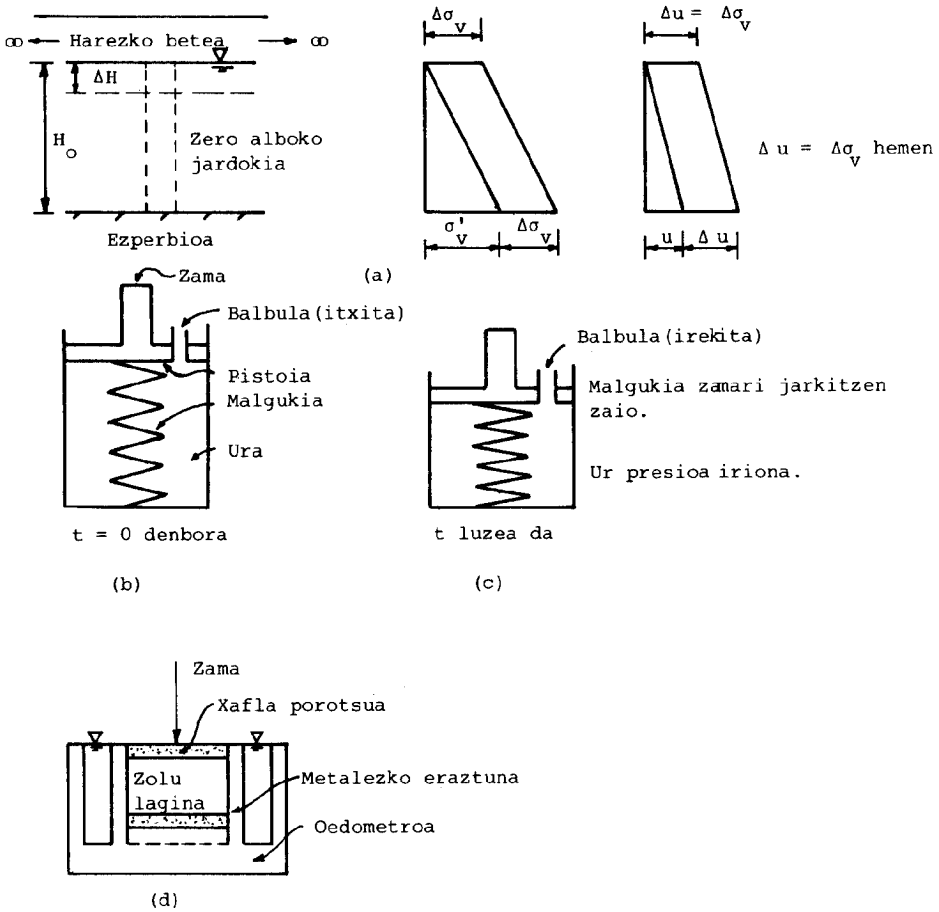
Tentsio-handitze bat aritzen denean zolu-moltso ase edo ia ase batetan, tentsio gehitua zatika egartzen dute zolu-zatikiek eta hutsartetako urak. Ondorioz, u poro-ur-presioa zama ipini eta behingoan handiagotzen da. Poro-ur-presioaren Δu gehipen hau oldar hidrostatikoaren edo oldar hidraulikoaren soberakin baten baliokidea da.

Presio-handitze hau induzitu eta berehala, gradiente hidrauliko bat jartzen da eta poro-ura drainaia-geruza hurbilenerantz jariotzen hasten da. Poro-ur-presioaren iriote-prozesu hau sendartzea deitzen da, denboraren menpeko eta inosbera tasunaren funtzioa izanik. Horrela, lupetz eta buztin erako bikor zehedun zoluetan sendarketa astiro joaten da eta urte batzutan ez amaitzea jazo daiteke. Alderantziz, hare bezalako bikor larridun zoluetan, sendarketa oso azkar jazotzen da eta sendarpen guztia zama ipini eta berehalaxe jazotzen dela onartzen da.

Sendartzea (prozesua) eredu hidromekaniko baten bidez erakuts daiteke, 4.1 irudian bezala. Geruza ezperbio batetan datzan buztinezko jalkin bat antzezten du 4.1(a) irudiak. Luzezabal horizontal handiko hare-bete bat gehitzen bazaio buztinazalerari, ($\Delta\sigma_v$ = q) tentsio bertikalaren eta (Δu) poro-ur-presioaren gehipen konstanteak izango dira buztin-estratu guztian zehar.

Sistemaren eredu hidromekaniko bat deskribatzen du 4.1(b) irudiak; pistoi baten bidez zama (tentsioa) jartzen da eta bal

$\Delta\sigma_v$ = presio-gehipena, betea = q jartzen dela eta.



4.1 Ir. Dimentsio bateko sendarketa.

bula ixten da urak ihes egitea ekiditeko Zolu-eskeletua (zolu-zatikien juntapena) konpresioa jarkitzen duen malguki batez ordezten da. Balbula sarratuta uzten bada, urak egariko du zama gehiena konprimagaitza delako. Balbula ireki eta berehala, presiopean dagoen urak ihes egingo du balbulan kanpora. Urak ihes egin ahala, malgukia laburtzen joango da eta zamaren frakzio on bat egariko du. Azkenean, 4.1(c) irudian ikusten den eran, uraren presio soberakina irioten da eta zama guztia malgukiratzen da. 2.8 ekuapenak erakusten duen bezala, tentsio eraginkorra gehitzen doa poro-ur-presioa gutxiagotu ahala, eta 2.2 azpiatalean aipatu bezala eta tentsio eraginkorraren printzipioaz bat, tentsio eraginkorraren aldapen honek kontrolatzen du bolumena, hau da, sendarpena eta apalpena.

Gehienetan, ura norabide zutean (gorantz edota beherantz) drainatzen dela onartzen da, eta beraz, dimentsio bateko sendarketa gogoan hartzen da.

4.2.- Dimentsio Bateko Sendarketa-Saiakuntza

Asetzat hartzen den buztinezko geruza bakar bati doakion sendartze-problema bakun bat antzezten du 4.1(a) irudiak. Dimentsio bateko sendarketa-teoriaz bat etortzeko, buztin geruzaren eta jarritako zamaren luze-zabal horizontala infinitua dela gogoan hartzen da. Honela, zolu-kaldatz bertikal edo zutabe bakoitza alboko zutabeen antzera zamatua eta deformatua izango da, hau da, zero alboetako jardoki egoeran (K_o egoeran) deformazio bertikala bakarrik jazotzen da.

Buztinezko geruzaren konprimakortasun-ezaugarriak lortzeko, ikerzulapenetan lagin antzezle bat edo gehiago erdiesten da paret mehedun lagingailuak erabilki. Zolu-lagina sendarketa-aparatuan (oedometroan) jartzen da (aparatu hori diagramatikoki erakusten da 4.1(d) irudian). Zolu-lagina bertikalki zamatzen da eta metalezko eraztun baten bidez ez zaio uzten horizontalki deformatzen. Zolu-lagina gehikuntza espezifikoez zamatzen da (gehikuntza bakoitzean, ohiz, zama berretu egiten da)

eta zama bakoitza lagin gainean geratzen da egun bat edo, denbora honetan laburpen bertikal gehiena, poro-presioaren irioteagatik, jazotzen baita.

Konparagailu bat erabiltzen da laburpen bertikalak neurtzeko eta irakurpenak aldi egokikal hartzen dira. Emaitzak denbora presioaren aurkako kurba eran irudikatzen dira, $\sqrt{t}$ eskalan 4.2(a) irudiko eran edo log t eskalan 4.2(b) irudiko eran. Poro-presioaren irioketaz elkartua den sendarpen lehendarra, eta zolu-eskeletuaren erlaxaketa motelak zertzen duen sendarpen bigarrendarra hautemateko erabiltzen da kurba hori. 4.2 irudian erakusten den bezala kurba bakoitzak d_s irakurpen zuzendu bat du. Irakurpen honen eta hasierako irakurpenaren arteko diferentzia, bat bateko edo konpresio elastikoaren neurketa da; berau jartze-errorei edo harri porotsuen konpresioari dagokio.

4.2.1.- Hutsarte-Arrazoi eta Presio-Diagramen Kontrastea

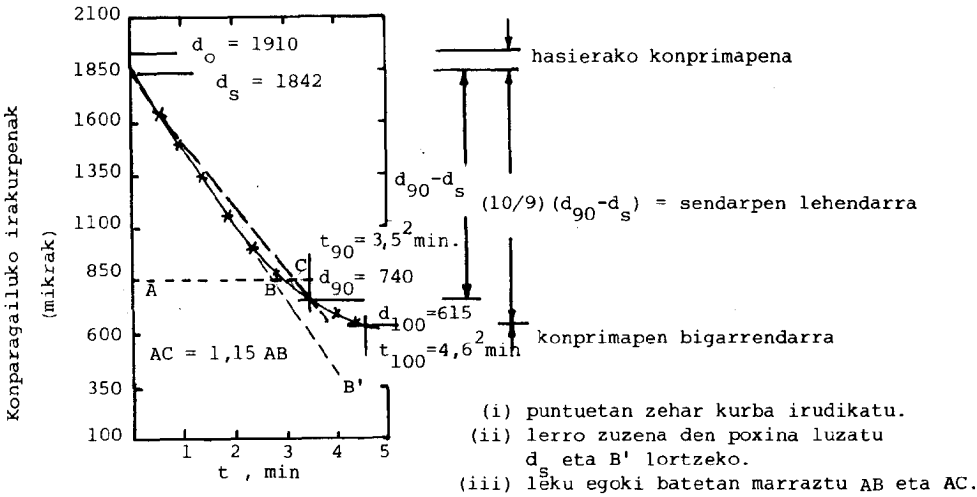
Laborategiko sendarketa-saiakuntzatiko datuak hutsarte-arrazoia presioaren aurkako diagramak irudikatzeko erabiltzen dira, 4.2(c) eta (d) irudietan erakusten den bezala. Zama-gehikuntza bakoitzaren azkeneko konparagailuko irakurpenetan oinarrituz kalkulatzen da hutsarte-arrazoia. Bai eskala naturalez (4.2(c) irudian) edo eskala logaritmikoz (4.2(d) irudian) irudikatzen da ipinitako presioa.

Kurbaren edozein poxinen aldatza, 4.2(c) irudikoa, honela definitzen da:

$$a_v = - \frac{de}{d\sigma'_v} = - \frac{e}{\Delta\sigma'_v} \quad \text{(gehikuntza txikietan)} \qquad (4.2)$$

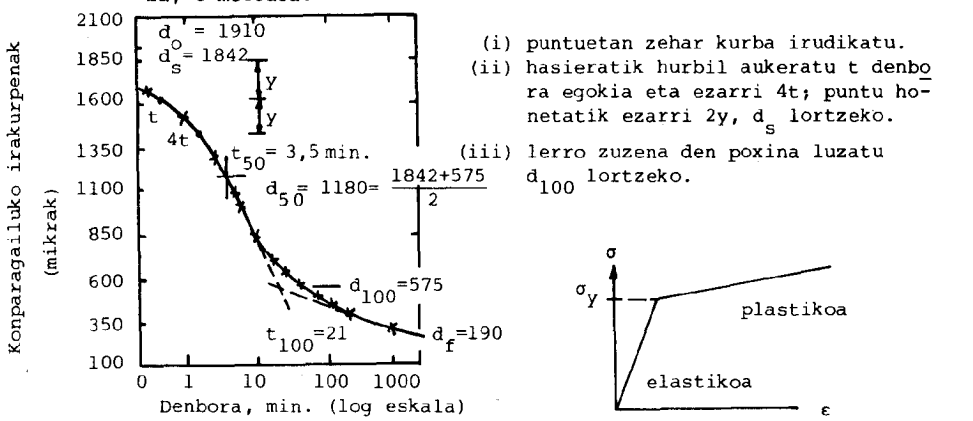
non, a_v = konprimatasun koefizientea.

Kurban lerro zuzena duen poxinaren aldatza, 4.2(d) irudikoa, honela definitzen da:



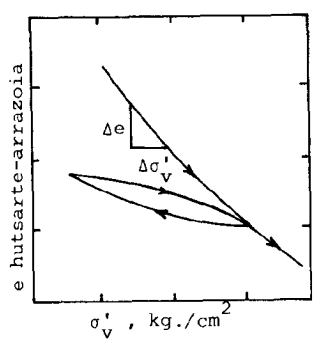
(a) Denbora-konprimapen kurba, t metodoa.

(i) puntuetan zehar kurba irudikatu.
(ii) lerro zuzena den poxina luzatu d_s eta B' lortzeko.
(iii) leku egoki batetan marraztu AB eta AC.
(iv) luzatu d_sC kurba d_{90}-an ebakitzeko.

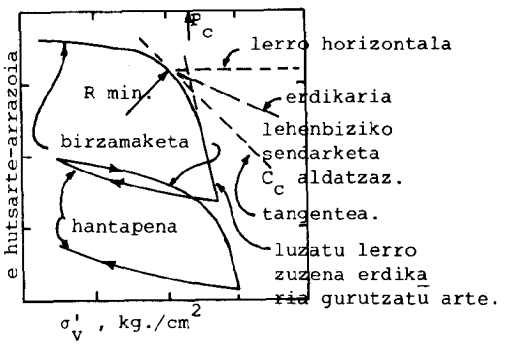


(i) puntuetan zehar kurba irudikatu.
(ii) hasieratik hurbil aukeratu t denbora egokia eta ezarri 4t; puntu honetatik ezarri 2y, d_s lortzeko.
(iii) lerro zuzena den poxina luzatu d_{100} lortzeko.

(b) Denbora-konprimapen kurba, log t metodoa.



(c) e - σ'_v diagrama.



(d) e - σ'_v diagrama.

4.2 Ir. Zoluen konprimaketa.

$$C_c = - \frac{\Delta e}{\Delta(\log \sigma'_v)} \qquad (4.3)$$

non, C_c = konprimatasun-indizea

Kalkulaketa errazteko ohiz log-ziklo bat hartzen da, ezen $\Delta(\log \Delta'_v) = 1.0$

4.2.2.- Dimentsio Bateko Bolumen-Aldaketen Erlaziotasunak

Dimentsio bateko konpresioan, 4.1(a) irudian erakutsia, unitateko H_o hasierako altueraren ΔH altuera-aldapenak, unitateko V_o hasierako bolumenaren ΔV bolumen-aldapena ekuatzen du,

hau da, $\frac{\Delta H}{H_o} = \frac{\Delta V}{V_o}$ (4.4)

Bedi e_o = laginaren hasierako hutsarte-arrazoia, eta

e_1 = hain zuzen, $V_1 = V_o - \Delta V$ bolumenari eta $H_1 = H_o - \Delta H$ lagin-altuerari doakien hutsarte-arrazoia.

1.18 ekuapenetik, $V_v = e_o V_s$ eta 1.14 ekuapenetik, $V_o = V_s + V_v = V_s + e_o V_s = (1 + e_o)V_s$. Antzera, $V_1 = (1 + e_1)V_s$. Baina $\Delta V = V_o - V_1$; beraz, $\Delta V = (1 + e_o)V_s - (1 + e_1)V_s = (e_o - e_1)V_s$ eta

$\frac{\Delta V}{V_o} = \frac{(e_o - e_1)V_s}{(1 + e_o)V_s} = \frac{e_o - e_1}{1 + e_o}$, eta 4.4 ekuapena zera bilakatzen da

$$\Delta H = H_o \frac{e_o - e_1}{1 + e_o} = H_o \frac{\Delta e}{1 + e_o} \qquad (4.5)$$

4.2 ekuapenetik, $e = a_v \Delta\sigma'_v$; beraz

$$\Delta H = H_o \frac{a_v}{1 + e_o} \Delta\sigma'_v = H_o \, m_v \, \Delta\sigma'_v \qquad (4.6)$$

non, $m_v = \frac{a_v}{1 + e_o}$ = Bolumen-konprimatasunaren koefizientea. (4.7)

4.2.3.- Sendartaurreko Tentsioa

Metal baten tentsioa jardokiaren aurkako kurba 4.2 irudian erakusten da. Ikusten den bezala, σ_y jaulkipen*-tentsio ezagun bateraino heldu eta gero jazotzen dira jardoki plastikoak. Nahiz eta zoluen eta metalen tentsio eta jardokien erlaziotasunak desberdinak izan, irakaskorra dirudi jarraierako analogia: (1) 4.2(d) irudiko birzamapen-zikloak elastikotzat hartzen dira ezentzialki eta ia aldatz laukoak, (2) C_c aldatzdun lehenbiziko sendarketa-kurba deitzen den kurba poxina lehenaldian baino tentsio-maila handiagoetaraino zamatua izan den artean, eta (3) honi doazkion deformazioak ezentzialki plastikoak diren artean.

Birzamaketa-egoerakotik lehenbiziko sendarketa-egoerako jokaerara aldatzen duen tentsioa P_c tentsioak antzezten du, beti saiatzen den lagin bat batez ihardunez. Tentsio hau (4.2 (d) irudian erakusten den metodo grafikoaren bidez hautematen da, eta zoluak landan inoiz izan duen sendarketa-tentsiorik handiena antzezten du.

Oraingo landa bertako, lagina hartu zen sakonerako, σ'_v tentsio eraginkorra kalkulatzen bada, eta σ'_v hori = P_c bada, orduan, buztina normalki sendartua dagoela esaten da, eta edozein zamapen handiagok apalpen sakonak ekarriko ditu.

P_c-ek σ'_v gainditzen badu, orduan zolua larsendartua dagoela esaten da, eta zolu-estratua P_c-ren hurbileko baloreetaraino tentsionatua izan daiteke apalpen handiegiak jazo gabe.

Ohartu behar litzatekeena zera da: birzamaketa-kurban luze zamatzen bada zolu bat, ipinitako tentsioaren aldapenaren eta hutsarte-arrazoiaren aldapenaren arteko erlaziotasun egokia a_v dela. Halere, zolua lehenbiziko konpresio-kurban luze zamatua bada, orduan C_c-ren balorea erabil daiteke Δe eta $\Delta(\log \sigma'_v)$ erlazionatzeko.

4.3.- Apalketa-Ekuapenak

Goian erakarritako erlaziotasunak lanean erabiltzen dira buztinen erako bikor zehedun zolu kohesiodunen gainean zimendaturiko estrukturen apalpena taxutzeko.

H lodierako estratu batetan, ρ_s sendarpen-apalpena 4.6 ekuapenak ematen dituen altuera-aldapenak sumatuz lortzen da, hau da

$$\rho_s = \sum_{0}^{H} H_o \, m_v \Delta\sigma'_v \qquad (4.8)$$

non, H_o = hartutako geruza bakoitzaren hasierako altuera,

m_v = hartutako geruza bakoitzarentzako bolumen-aldapenaren koefizientea.

$\Delta\sigma'_v$ = hartutako geruza bakoitzeko tentsio eraginkorraren batezbesteko gehipena.

Tentsio eraginkor azkenen irudikaduraren eitearen eta zolutegiaren uniformetasunaren menpean dago hartzen den geruza bakoitzaren lodiera.

Lehenbiziko sendarketa-kurban luze gertatzen den zamaketan, sendarpen-apalpena itxura egokiagoan adieraz daiteke.

4.2 eta 4.3 ekuapenak ekuatuz zera ematen du:

$$a_v = \frac{C_c \Delta(\log \sigma'_v)}{\Delta\sigma'_v} \quad , \text{ eta } \quad m_v = \frac{a_v}{1 + e_o} \quad \text{denez,}$$

4.8 ekuapena zera bilakatzen da:

$$\rho_s = \sum_{0}^{H} H_o \frac{C_c}{1 + e_o} \Delta(\log \sigma'_v)$$

Zamatu baino lehen, tentsio eraginkorra σ'_v da.

Zamatuz gero eta poro-presioa irionez gero, tentsio eraginkorra $\sigma'_v + \Delta\sigma'_v = \sigma'_{vf}$ da. Tentsio-aldapena $\sigma'_{vf} - \sigma'_v$ da; beraz $\Delta(\log \sigma'_v)$ zera bilakatzen da:

$\log \sigma'_{vf} - \log \sigma'_v = \log (\frac{\sigma'_{vf}}{\sigma'_v}) = \log (\frac{\sigma'_v + \Delta\sigma'_v}{\sigma'_v})$ eta ordezpenak zera ematen du:

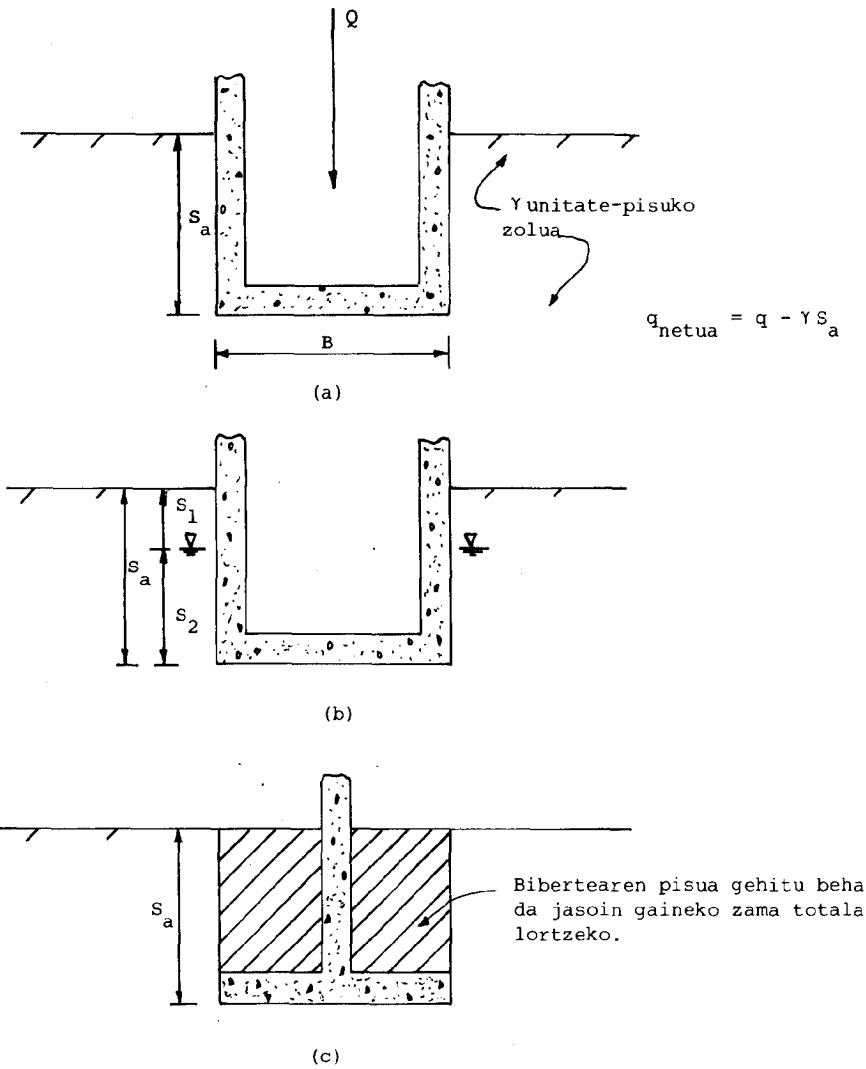
$$\rho_s = \sum_{0}^{H} H_o \frac{C_c}{1 + e_o} \log(\frac{\sigma'_v + \Delta\sigma'_v}{\sigma'_v}) \qquad (4.9)$$

4.4.- Jasoinen Apalpenak

Zolu-moltso baten barruko hasierako eta ipinitako tentsioak hautemateko metodoak 2. atalean deskribatu ziren. Zimendu baten diseinuan, $\Delta\sigma'_v$ ipinitako tentsioaren magnitudea mugatzen da zerak ekiditzeko: (a) euspen-ahalmenaren porrota eta (b) apalpen handiegia. Jasoinaren neurria haztamu-metodo batez hautematen da; honela, jasoin-neurria taxutzen da, eta gero analizatzen da ea diseinu egoki bat lortu dentz jakiteko. Honela, euspen-presio soria hautematen da, lehenik euspen-ahalmenaren betebeharrak nahikotzeko eta bigarrenik, apalpenaren betebeharrak nahikotzeko. Apalpenari bakarrik dagokion analisia eztabaidatzen da hemen behean.

4.4.1.- Tentsio Netua

Zertan-azalean jarritako jasoinetara mugatua izan zen 2.



4.3 Ir. Zama-intentsitate sendorra eta netua.

ataleko eztabaida. Benetan, ohiz jasoinak S_a sakonera batetan jarriak dira soto bat lortzeko, euspen-ahalmen handiagoa emateko, zimenduak izkutatzeko edota leiaren aurkako geriza egokia emateko. Beraz, zimendu-induspenean kendutako zoluaren pisuaren ordainbide bat egin behar da.

Gogoan har 4.3(a) irudian agertzen den jasoina.

Bedi Q = jasoinari ipinitako zama gehi jasoinaren pisua,

A = jasoinaren azpiaren azalera = B x L , non
B = jasoinaren zabalera eta L = jasoinaren luzera.

Horrela, q zama-intentsitate sendorra* = $\frac{Q}{A}$

Induspenean kendu den zoluaren pisua $W = \gamma S_a A$ da, eta ipinitako zama netua $Q - S_a A$. Honela, zama intentsitate netua hau da:

$$q_{netua} = \frac{\text{zama netua}}{\text{azalera}} = \frac{Q - \gamma S_a A}{A} = \frac{Q}{A} - \gamma S_a \text{ , edo}$$

$$q_{netua} = q - \gamma S_a \qquad (4.10)$$

Beste era batera, q_{netua} honela ere kalkula daiteke:

Bedi σ_v = jasoin proposatuaren azpiko gain-haxeak eragindako tentsio bertikal totala (hau da, induseta baino lehenagokoa) = γS_a , eta

q = zama-intensitate sendorra, lehen bezala; beraz

$$q_{netua} = q - \sigma_v = q - \gamma S_a$$

Eraiketa aurretik eta geroztik maila freatikoa jasoin azpia baino gorago badago, 4.3(b) irudian erakusten den eran,

$$\sigma_v = \gamma S_a \text{ ,}$$

$u = \gamma_w S_1$, eta

$\sigma_v' = \sigma_v - u = \gamma S_a - \gamma_w S_2$

Baina σ_v' hau, $\gamma S_1 + \gamma' S_2$ -ren berdina ere bada.

Orduan $\sigma_v = \sigma_v' + u = \gamma S_1 + \gamma' S_2 + \gamma_w S_2$; beraz

$q_{netua} = q - \sigma_v = q - (\gamma S_1 + \gamma' S_2 + \gamma_w S_2)$

$= q - \gamma S_1 - (\gamma' + \gamma_w) S_2$

$= q - \gamma S_1 - \gamma S_2$

$= q - \gamma (S_1 + S_2)$, eta

$q_{netua} = q - \gamma S_a$ lehen bezala; horregatik, ipinitako presio netua ez da ur-mailaren menpekoa.

Jasoina betegarriz estalita badago, 4.2(c) irudian bezala, egokiketa batzu egin beharko zaizkie tentsio netuei. Kasu honetan, jasoin gainean jarritako zoluaren pisua zama totalari gehitua izan beharko zaio.

4.4.2.- Buztin Gaineko Jasoina

Gutxi gora behera, baldintza honetaz defini daitekeen sakonera txikitako zimenduetara mugatuko da eztabaida,

$$\frac{S_a}{B} \leq 5 \qquad (4.11)$$

4.1 adibidearen bidez, buztin estratu konprimagarri batetan edo bere gainean zimendatzen den jasoinaren apalpenaren kalkulaketa erakusten da.

4.1. Adibidea

Emanik 4.4 irudian erakusten diren datuak, Hauteman estrukturaren erdiguneko sendarpen-apalpena.

Ebazpidea:

Kalkulatu presio netua 4.10 ekuapena erabiliz, hau da, $q_{netua} = q - \gamma S_a$.

Orain $q = \frac{8600}{24 \times 12} = 29,86$ mbt*

eta $\gamma S_a = 1,7 \times 1,0 + 2,3 \times 2,0 = 1,7 + 4,6 = 6,3$ mbt.

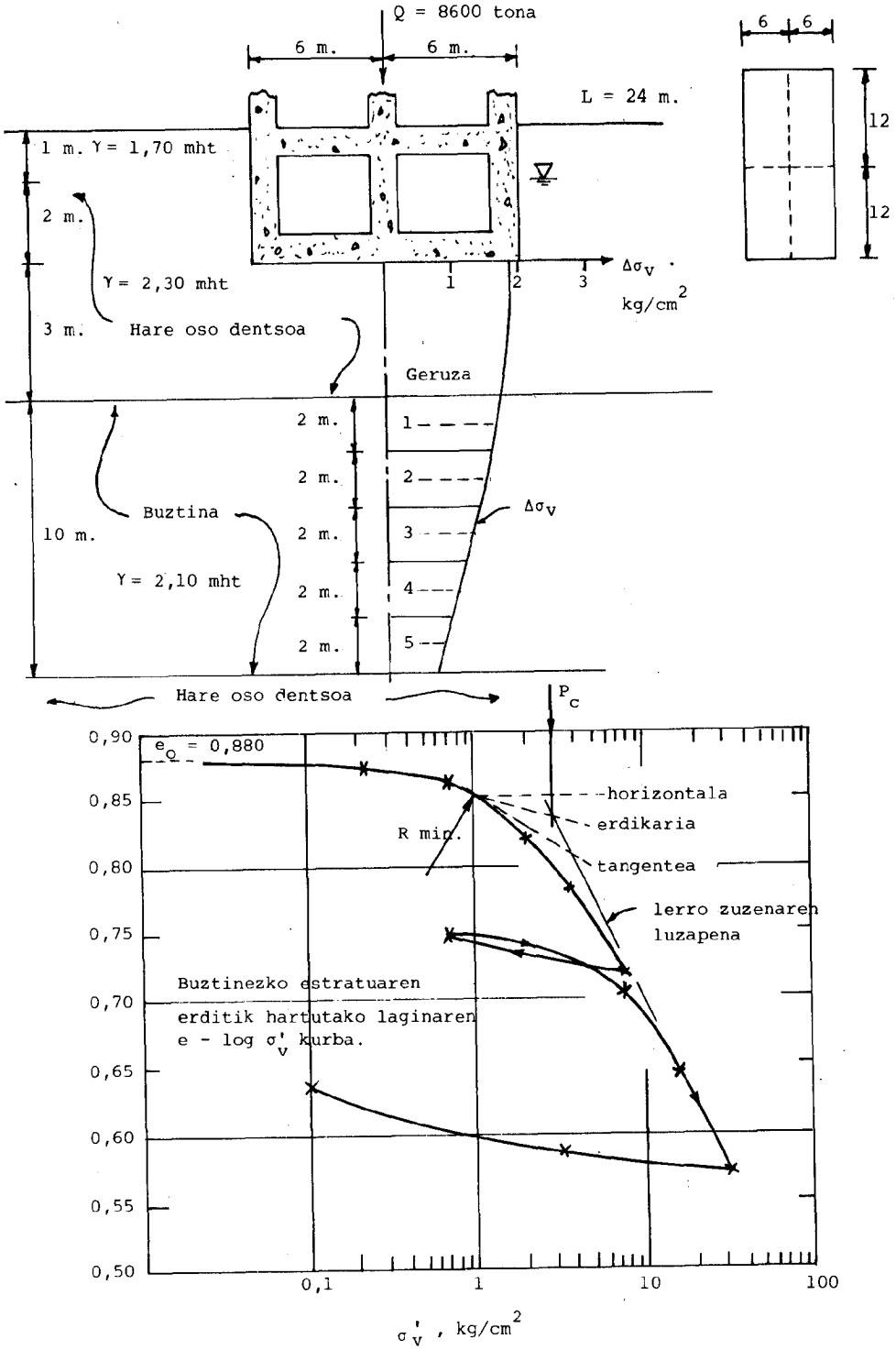
Horrela $q_{netua} = 29,86 - 6,30 = 23,56$ mbt.

Zatitu zimenduaren goitiko bista lau laukizuzen berdinetan; bakoitzak 6,0 m. bider 12,0 duelarik; orduan, B = 6 m. eta L = 12 m. Zimenduaren azpia erreferentzi bezala erabiliz z sakonera neurtzeko, kalkulatu $\Delta\sigma_v$ sakonerarekiko tentsio bertikalaren gehikuntza 2.11 irudiaren laguntzaz.

4.1 Taula. $\Delta\sigma_v$-ren Kalkulaketa

z m.	M = B/z	n = L/z	I_σ	4 I_σ	$\Delta\sigma_v = 4I_\sigma q_{net.}$ mbt
0			0,250	1,00	23,56
3	2,00	4,00	0,239	0,956	22,52
4	1,50	3,00	0,230	0,920	21,67
6	1,00	2,00	0,200	0,800	18,85
8	0,75	1,50	0,170	0,680	16,02
10	0,60	1,20	0,140	0,560	13,19
12	0,50	1,00	0,110	0,440	10,37

Irudikatu $\Delta\sigma_v$ 4.4 irudian ikusten den eran.



4.4 Ir. Sendarketa-apalpena.

Buztinezko estratu konprimagarria nahiera zatitzen dugu bost geruza berdinetan, 2 m. lodi bakoitza, eta geruza bakoitzaren zentruetarako tentsio eraginkor bertikala kalkulatzen da. Tentsio hau $\Delta\sigma_v$-ren balore egokiari sumatzen zaio, geruza bakoitzaren zentruko azken tentsio eraginkor bertikala lortzeko.

4.2 Taula. Hasierako eta Amaierako σ'_v-ren Kalkulaketa

Geruza	Geruzarainoko Sakonera m.	Geruzaren Lodiera m.	Hasierako σ'_v mbt	$\Delta\sigma_v$ mbt	Amaierako σ'_v mbt
1	5 - 7	2	10,2	21,67	32,27
2	7 - 9	2	12,8	18,85	31,65
3	9 - 11	2	15,0	16,02	31,02
4	11 - 13	2	17,2	13,19	30,39
5	13 - 15	2	19,4	10,37	29,77

Sendarketa-lagina, 4.4 irudian ohartzen den bezala, buztinezko estratuaren erditik hartu zen. 4.2 taulan, hasierako tentsio eraginkor bertikala (σ'_v) buztin-estratuaren erdian 15.0 mbt dela ikus daiteke. 4.4 irudian erakusten den grafikoan, P_c sendartaurreko presioa 2,9 zbk* = 29,0 mbt gutxi gora behera dela ikusten da; beraz, buztina larsendartua da.

Eskala aritmetiko batetan irudikatzen bada e log σ'_v-ren aurkako kurba, 4.5 irudian erakusten den eran, edozein puntutako kurbaren aldatza a_v da (ikus 4.2 Ek.). Orduan m_v kalkula daiteke (4.7 Ek.) a_v kalkulatu den puntuko e erabiliz, eta m_v baloreak irudikatuak 4.5 irudian bezala. Baloreak 4.6 ekuapenean erabiltzen dira apalpena kalkulatzeko. Kalkulaketa 4.3 taulan erakusten da.

4.3 Taula. Apalpenaren Kalkulaketa m_v Erabiliz

Geruza	Batezbesteko σ'_v mbt	m_v m^2/tona	H_o m.	$\Delta\sigma_v$ mbt	ΔH m.
1	21,43	0,00141	2	21,67	0,061
2	22,22	0,00140	2	18,85	0,053
3	23,01	0,00139	2	16,02	0,045
4	23,80	0,00138	2	13,19	0,036
5	24,58	0,00138	2	10,37	0,029

$\Sigma \Delta H = 0,224$ m.

C_v konprimatasunaren indize-metodoaren eta 4.9 ekuapenaren bidez kalkulatuko dugu goiko apalpen bera emaitzak erkatzeko, 4.4 taulan erakusten den eran.

4.4 Taula. Apalpenaren kalkulaketa C_v Erabiliz

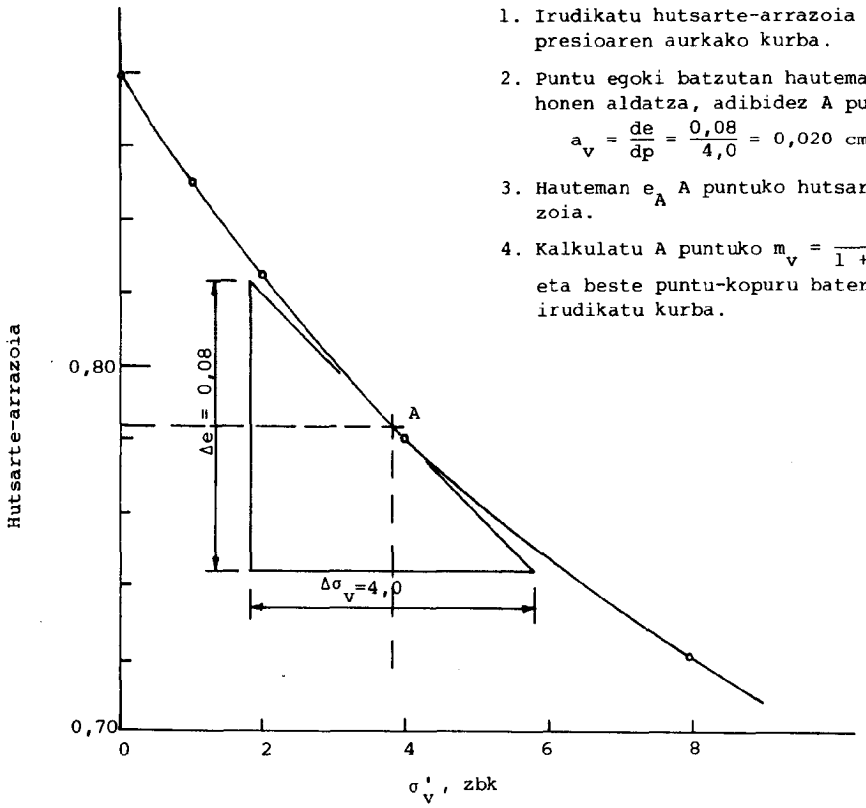
Geruza	Batezbesteko σ'_v zbk	C_v	$\frac{C_v}{1 + e_o}$	$\log(\frac{\sigma'_v + \Delta\sigma'_v}{\sigma'_v})$	H. m.
1	2,14	0,134	0,0713	0,4835	0,069
2	2,22	0,135	0,0718	0,3932	0,056
3	2,30	0,137	0,0729	0,3155	0,046
4	2,38	0,138	0,0734	0,2472	0,036
5	2,46	0,140	0,0745	0,1859	0,028

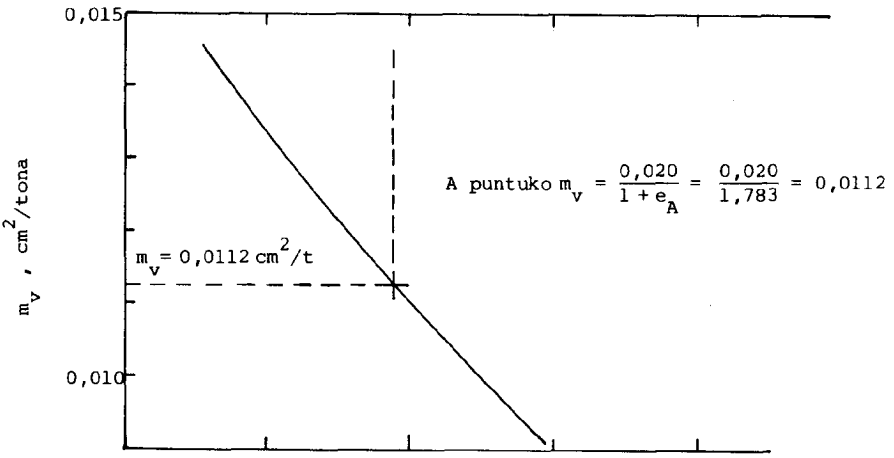
$H = 0,235$ m.

1. Irudikatu hutsarte-arrazoia presioaren aurkako kurba.
2. Puntu egoki batzutan hauteman kurba honen aldatza, adibidez A puntuan,

$$a_v = \frac{de}{dp} = \frac{0,08}{4,0} = 0,020 \text{ cm}^2/\text{tona}$$

3. Hauteman e_A A puntuko hutsarte-arrazoia.
4. Kalkulatu A puntuko $m_v = \frac{a_v}{1 + e_A}$ eta beste puntu-kopuru baterako eta irudikatu kurba.





A puntuko $m_v = \frac{0,020}{1 + e_A} = \frac{0,020}{1,783} = 0,0112$

4.5 Ir. a_v eta m_v-ren hautemakera.

4.4.3.- Hare Gaineko Jasoinak

Hare gainean eraikitako jasoinen apalpena taxutzeko metodorik arruntenak, Sartze-Saiakuntza Estandarrean hautemandako N baloreak erabiltzen ditu. Metodo honen laburdura, ondoko hau izan daiteke:

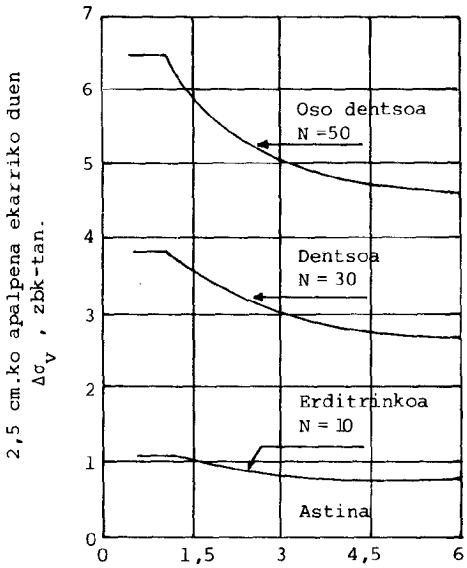
1. Kalkulatu N-ren batezbesteko baloreak, jasoinaren eustazpian hasita 1,5B sakonera barrukoak.

2. N-ren balore kalkulatu hauk hartuz jo 4.6 irudira, eta hauteman 2,5 cm. edoko apalpena ekarriko duen $\Delta\sigma_v$ tentsio bertikala.

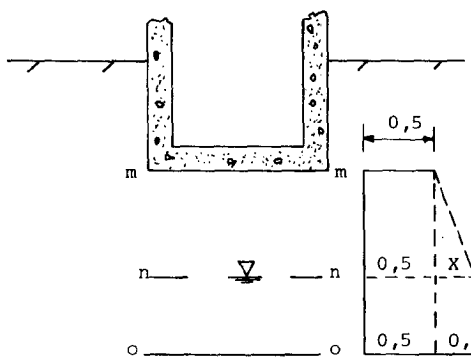
3. Apalpenak 2,5 cm. baino handiagoa ez badu izan behar, $q_{netua} = \Delta\sigma_v$, $q_{netua} \neq \Delta\sigma_v$ bada, orduan apalpena zera da hurrenkiz:

$$\rho = \frac{q_{netua}}{\Delta\sigma_v} \times 2,5 \text{ cm.}$$

4. Ur-maila jasoinaren eustazpitik B distantzia baino hurbilago badago, orduan 4.6 iruditiko $\Delta\sigma_v$ baloreak $\frac{1}{2}(1 + \frac{Z}{B})$ faktore zuzentzaile batez bidertuak izan behar dute. Hemen Z jasoin-eustazpitik ur-mailarainoko distantzia izanik; horrela Z = B bada, ez da behar zuzenpenik.



B jasoinaren zabalera, metrotan.



Maila	Faktore Zuzentzailea
o-o	1,0
m-m n-n	$\frac{1}{2}(1 + \frac{Z}{B})^{1/2}$

4.6 Ir. Apalpenak hare gaineko jasoinetan.

5. ATALA

EBAKIDUR JARKIMENA

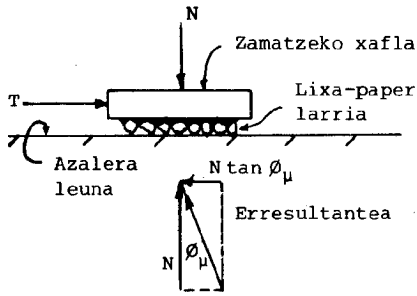
Kanpotiko zimendapen-zamak ipintzen direnean, tentsioak zelan zolu-moltsoratuak diren 2. atalak deskribatu zuen. Zoluratutako tentsioak bai normalak edo bai ebakidur tentsioak zirela eta tentsio hauen arteko erlaziotasunak 2.5 ekuapenaren bidez edo Mohr diagramaren bidez, 2.5 irudian bezala, hateman daitezkeela erakutsi zen.

Tentsio bertikalek zimenduen apalpenetan dauzkaten garrantzia eta eragina 4. atalean erakutsia izan zen.

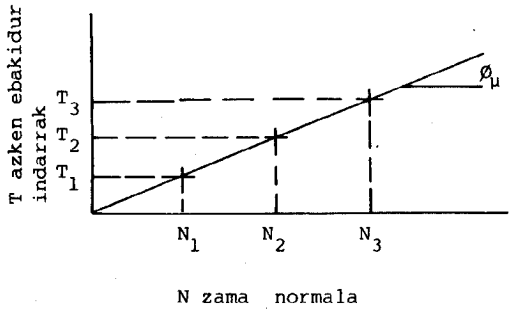
Zimenduetako zamen, lubakien edo induspenen, ur-mailen aldapenen, etabarren ondorio bezala induzi daitezkeen ebakidur tentsioen garrantzia deskribatzen du atal honek. Aurkako ormetako* problemetan eta euspen-ahalmenaren problemetan ebakidur tentsioek duten eragina 6. atalean deskribatzen da. Problema guztiotan, ipinitako ebakidur tentsioek zoluaren ebakidur jarkimena ez dutela gainditzen eta porrota ekiditeko sentzuzko segurtasun-faktore bat dagoelaz ziur izan behar da.

5.1.- Harearen Ebakidur Jarkimena

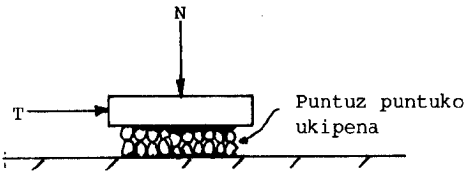
Harearen ebakidur jarkipenaren printzipioa 5.1 irudian agertzen diren eredu bakunen bidez erakuts daiteke. Orain gogoan har dezagun metalezko xafla batetara lekedatua izan den lixa-paper larrizko (hare larrizko) txatal bat. Hare bikorrak gainazal nahiko leun batez ukipena badaukate 5.1(a) irudian erakusten den eran, N indar normala handiagotzen bada T ebakidur indarra handiagotzen da 5.1(b) irudian agertzen den eran. N-T irudikaduraren aldatza $\emptyset_\mu$ marruskadur angeluaren bidez de-



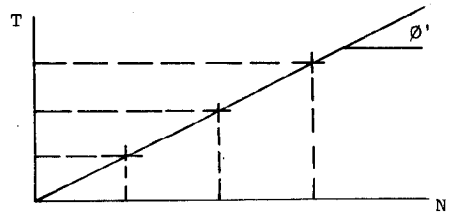
(a)



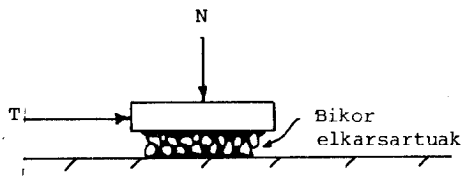
(b)



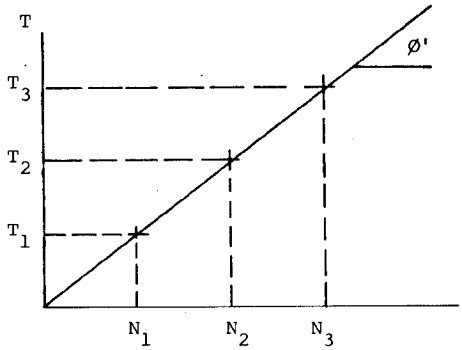
(c)



Ø' marruskadur angelua han diagotzen doa elkarsardur gradua handiagotuz.



(d)



5.1 Ir. Elkarsarduraren eragina marruskadur jarkipenean.

fini daiteke eta f marruskadur koefizientea honela defini daiteke:

$$f = \tan \emptyset_{\mu} \qquad (5.1)$$

Hare-bikorrez ukipena daukan ekaiarekiko hare-bikorren marruskadur jarkimena definitzen du 5.1 ekuapenak, hau da, ukipena daukaten ekai eta hare-bikorren arteko marruskadur koefizientea da f. Koefiziente hau garrantziduna da aurkako ormetako arazoen ikaskuntzan.

Lixa-paper orri bi puntuz puntuko ukipenean jartzen badira, 5.1(c) irudian bezala, N eta T arteko erlaziotasuna hare-bikorren arteko marruskadur jarkipenaren menpean izango da. Nahiko ziur, balore hau, 5.1(a) irudian erakusten den saiakuntzan lortutakoa baino handiagoa izango litzatekeela.

5.1(d) irudian erakusten den bezala hare-bikorrak elkarsartzeko* eran lixa-orriak doituak badira, N-ren balore bat batentzako egin behar den T ebakidur indarra handiagoa izan behar dela begibistan dago; ez bakarrik hare-bikor arteko irristaketa marruskadura, baita ere elkarsardurak zerturiko jarkipena gainditu behar duelako. Hare-bikorrei elkarrekiko goratz edo beherantz higierazteko joera du elkarsardura honek.

Benetako zolu-moltso batetan, elkarsardur gradua ondoko hauen menpeko izango da: zatikien eitea, zatikien neurria, eta elkarbilduraren egoera, hau da, hasierako hutsarte-arrazoia. Hareen ebakidur jarkimena neurtzeko laborategi-saiakuntzak asmatuak izan dira. Ohiz, saiakuntza hauk ebakidura artezentzako kutxan (ikus 5.2(b) irudia) edo tresneria triaxialen (ikus 5.2(a) irudia) zertzen dira.

5.1.1.- Harearen Ebakidura Artezaren Saiakuntza

Ebakidura artezerako kutxako saiakuntzan, hutsarte-arrazoi ezagun bateko lagina gertatzen da kutxa batetan. Lagina N

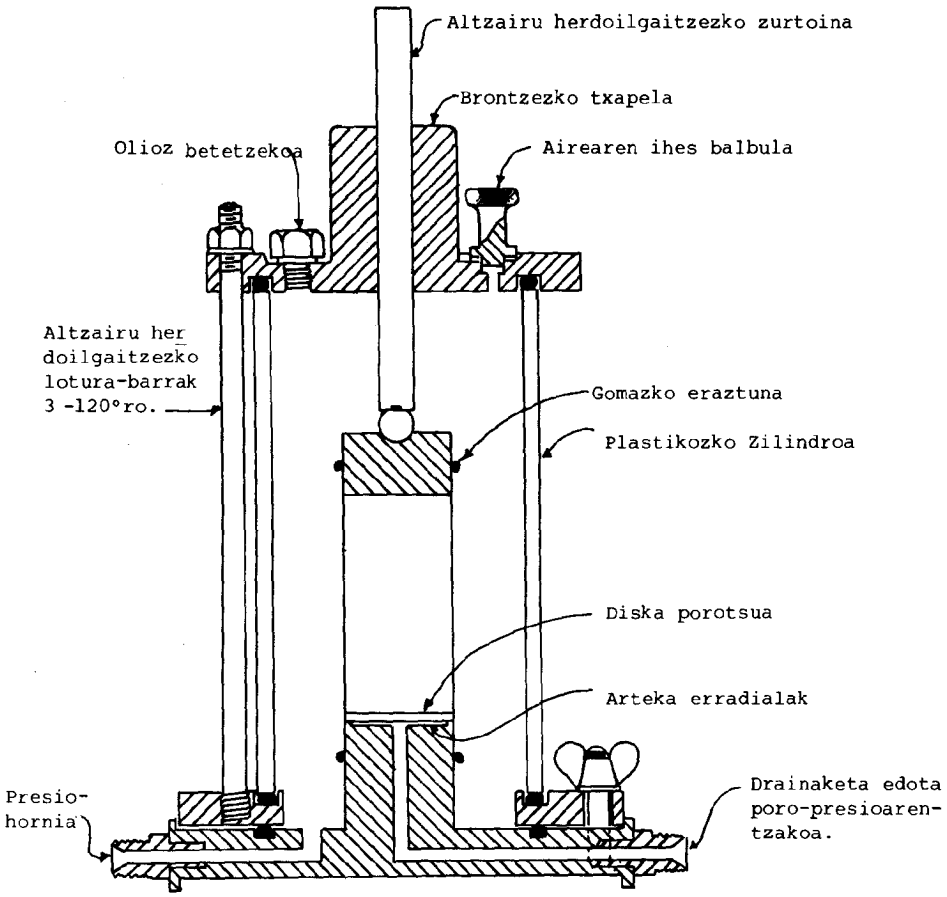
zama normalpean ipintzen da baina kutxaren erdi biak apurtxo bat bertikalki aldenduak izanik, orduan T ebakidur indar bat jartzen zaio. Biak, deformapen bertikala eta horizontala neur eta idatz daitezke. Saiakuntzaren aldi desberdinetako $\sigma_n = N/A$, $\tau = T/A$, $\varepsilon_v = \Delta H/H_o$ eta $\varepsilon_h = L/L_o$ baloreak kalkula daitezke, eta 5.3(a) eta (b) irudietan erakusten den eran irudikatuak izan daitezke. Saiakuntza bakoitzean σ_n hurranki konstantea da baina τ handiagotzen doa τ_{max} balore maximo batetara iritsi arte; τ_{max} hau porrot-balorea dela esan daiteke. Ohiz, $\sigma_n - \tau_{max}$ irudikadura, lerro zuzen bat da 5.3(c) irudian agertzen den eran eta Ø' angeluz definituriko aldatzari barne marruskadur angelu ageria deitzen zaio. Hare ezagun batetan, Ø'-ren balorea handiagotzen da laginaren hasierako dentsitate handiagotu ahala. Hau 5.3(d) irudian erakusten da. Handiagotze hau elkar sarpen-gradu handiagotzeari dagokio.

Ur askeetan, hau da $u \approx 0$, dagoen hare bati egiten bazaio ebakidura artezaren saiakuntza, aldapen adierazgarririk ez du izango barne marruskadur angelu neurtuak, horregatik, Ø' berdina da hare lehorretan eta urpeko haretan.

5.1.2.- Saiakuntza Triaxialak Haretan

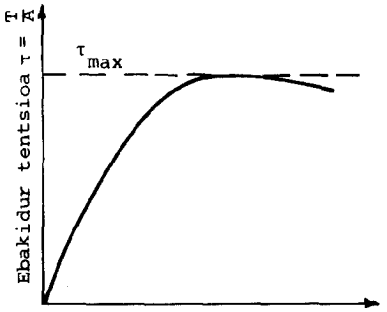
Hare-lagin lehorrak edo aseak saia daitezke tresneria triaxialetan. Saiakuntza triaxialean, lagina gomazko mintz batetan sarratzen da, eta honek laginari σ_3 inguru guztiko presioa (zedatzailea) aplikatzea ahalgarri egiten du. Inguru guztiko presioak ezin dezakela ekar laginaren porrota, ba, zolu-bikorrak eta zolu-eskeletua elkar konprimatuak bakarrik daudelako, begibistakoa izan behar luke. Presio zedatzaile oso handiez, zolu-bikor batzu zanpatuak izan daitezke ukipen-puntuetan, baina hau ez da porrotetzat hartzen. Honela, harearen ebakidur jarkimena hautemateko, pistoi zamatzaile baten bidez P zama bertikala norabide bertikalen aplikatuz zolu - lagina axialki zamatzen da; σ_3-ri konstante irauneraztzen zaio.

Deformapen axiala, hau da ΔH, konparagailu batez neurtzen



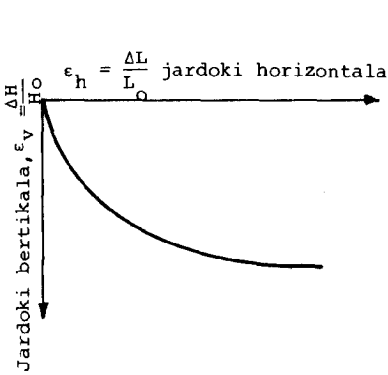
5.2 Ir. (a) Aparailu triaxiala.

(b) Ebakidura artezerako kutxa.

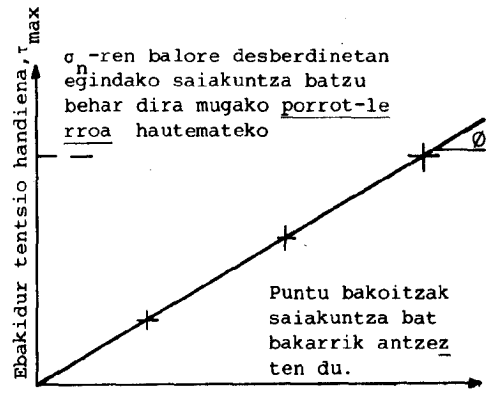


$\varepsilon_h = \frac{\Delta L}{L_o}$ jardoki horizontala.

(a)

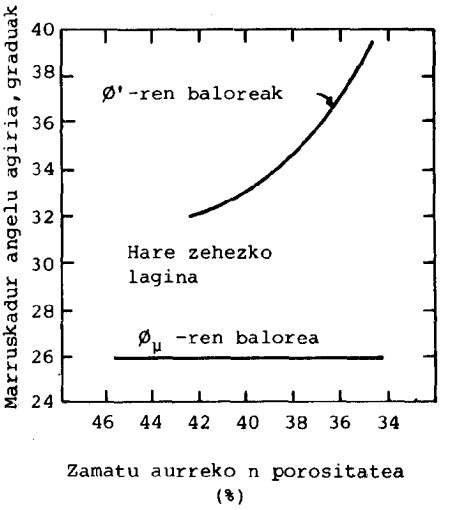


(b)



$\sigma_n = \frac{N}{A}$ tentsio normala.

(c)



(d)

5.3 Ir. Ebakidura artezeko kutxako saiakuntz emaitzak.

da, eta ΔV bolumen-aldapena bolumen-konparagailu batez. Saiketa triaxialetan, lagina osoki asea badago bolumen-aldapenak neurtzea errezagoa izaten da eta horregatik hare-lagin aseak gurago dira. Zamatzean, urari laginetik drainatzen uzten bazaio eta zamatzea motela bada, lagin guztian zeharko poro-urpresioa zero dela onartzen da eta horregatik tentsio totalak eta eraginkorrak berdinak dira.

σ_1 tentsio axiala P/A tentsioz gehi σ_3 tentsio zedatzaileaz osoturik dago, hau da,

$$\sigma_1 = \frac{P}{A} + \sigma_3 \qquad (5.2)$$

5.2 ekuapena honela idatz daiteke:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{P}{A} = \text{tentsio aldaratzailea} = q \qquad (5.3)$$

Jardoki axialak, ε_a edo $\varepsilon_1 = \frac{\Delta H}{H_o}$ (5.4)

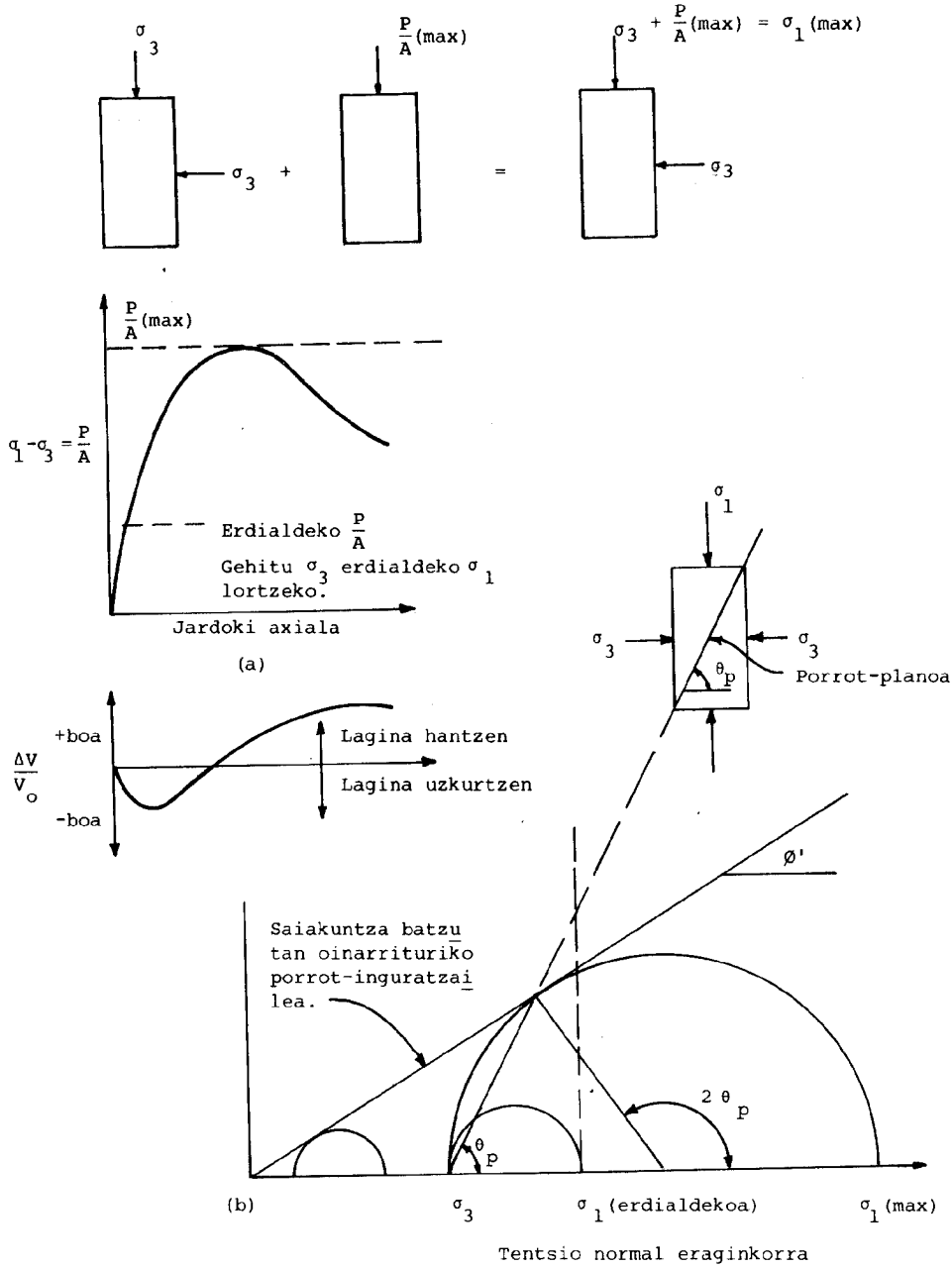
eta jardoki bolumetrikoa, $v = \frac{\Delta V}{V_o}$ (5.5)

Saiakuntza triaxial drainatu batetan, aldakuntzak izango dira bietan ε_1 eta v-an eta horregatik laginaren gurutzetarako sekzio azalera ere aldatu egingo da. Saiakuntzaren hasieran A_o, H_o eta V_o ezagunak dira. Edozein zamatze-mailatan $H_1 = H_o - \Delta H$ eta $V_1 = V_o - \Delta V$. Adierazpen hauk 5.4 eta 5.5 ekuapenez konbinatuz zera ematen du:

$$A_1 = A_o\left(\frac{1 - v}{1 - \varepsilon_1}\right) \qquad (5.6)$$

Horregatik, q tentsio aldaratzailea azalera aldatu honetan oinarrituz kalkulatzen da.

Saiakuntza triaxialeko datuak 5.4(a) irudian bezala irudika daitezke eta tentsio aldaratzaile handiena lortzeko era-



5.4 Ir. Harearen saiakuntza triaxial drainatuaren emaitzak.

bil. Honi σ_3-ren balorea gehitzen zaio porrot - σ_1 lortzeko. 2. atalean erakutsi bezala, σ_3 eta σ_1, tentsioen Mohr zirkulua marrazteko erabil daitezke. Saiakuntza triaxial batzu σ_3--ren balore gero eta handiagoak hartuz egiten badira, tentsio aldaratzailea, eta beraz porrot-puntuko σ_1-ak handiagoak direla ikusiko da. Saiakuntza-kopuru baten emaitzak Mohr zirkulu-serie bat marrazteko erabil daitezke 5.4(b) irudian erakusten den eran. Zirkulu "maximo" hauetariko lerro tangenteari Mohr ingurutzailea edo porrot-inguratzailea deritzo eta hare--lagin batetan porrota definitzeko erabiltzen da. Ingurutzaile hau, ohiz, $\emptyset'$ barne marruskadur angelu ageria inklinatua den lerro zuzen batez antzez daiteke. Lehen bezala, $\emptyset'$ handiagotuko da laginaren hutsarte-arrazoia txikiagotzen bada.

Saiakuntzaren edozein alditan Mohr zirkulu bat marraz daitekeela, 5.4(b) irudian ikusten den eran, begibistan izan behar litzateke. Tentsio-zirkulu hau porrot-ingurutzailepean badago, zolua egonkorra izango da tentsio-egoera horretan. Mohr zirkulua porrot-ingurutzailearekiko tangente doia denean, zoluaren jarkimen osoa hatzeman da zoluaren zeharko plano batetan. Porrot-planoa θ_p angelu bat inklinatua dago σ_1 aritzen den planoarekiko 5.4(b) eta (c) irudietan erakusten den bezala.

5.1 irudiko eran neurtzen eta definitzen den $\emptyset'$ barne marruskadur angelu ageria, tresneria triaxialaren bidez hauteman dena baino gutxi gora behera 2^o handiagoa dela aurkitu da. Emaitza triaxialak zehatzagotzat hartzen dira, ezen porrot planoa ez da bortxatzen lerro jakin batetan luze jazotzeko ebakidura artezentzako kutxako saiakuntzan bezala.

5.2.- Kohesiodun Zolu Aseen Ebakidur Jarkimena

Hare aseetako saiakuntza drainatuetan laginaren zeharko poro-ur-presioa zerotzat hartzen zela zamaketa aldi guztietan esan zen 5.1 azpiatalean. Hau zentzuzkoa dela dirudi hareak inosberatasun koefiziente handia daukalako eta zama ipini eta berehalaxe harea drainatzen dela onartzen delako (hau egia ez

izatea gerta daiteke talka edo zamaketa dinamikoetan). Bestela esateko, tentsio totalak eta tentsio eraginkorrak baliokideak dira kasu honetan.

5.2.1.- Saiakuntza Drainatuak (Saiakuntza Sendartu- Drainatuak).

Buztin aseetako saiakuntza triaxialetan, zamatzea oso astiro egin behar da egoera osoki drainatua zoluak jaretsiko badu. Saiakuntza drainatuetan, 5.2tik 5.6rainoko ekuapenak balio osodunak izaten jarraitzen dute eta emaitzak 5.5 irudian bezala irudikatzen dira. Buztinezko zolu gehienetan, Mohr ingurutzaileak zero puntua baino gorago gurutzatuko du ordenatua. Abzisa eta gurutzegunearen arteko distantziari c' kohesio ageria deritzo eskuarki. Buztinaren τ ebakidur tentsio drainatua honela definitzen da kasu honetan:

$$\tau = c' + \sigma_n' \tan \phi' \qquad (5.7)$$

non, τ = ebakidur jarkimena

c' = kohesio ageria

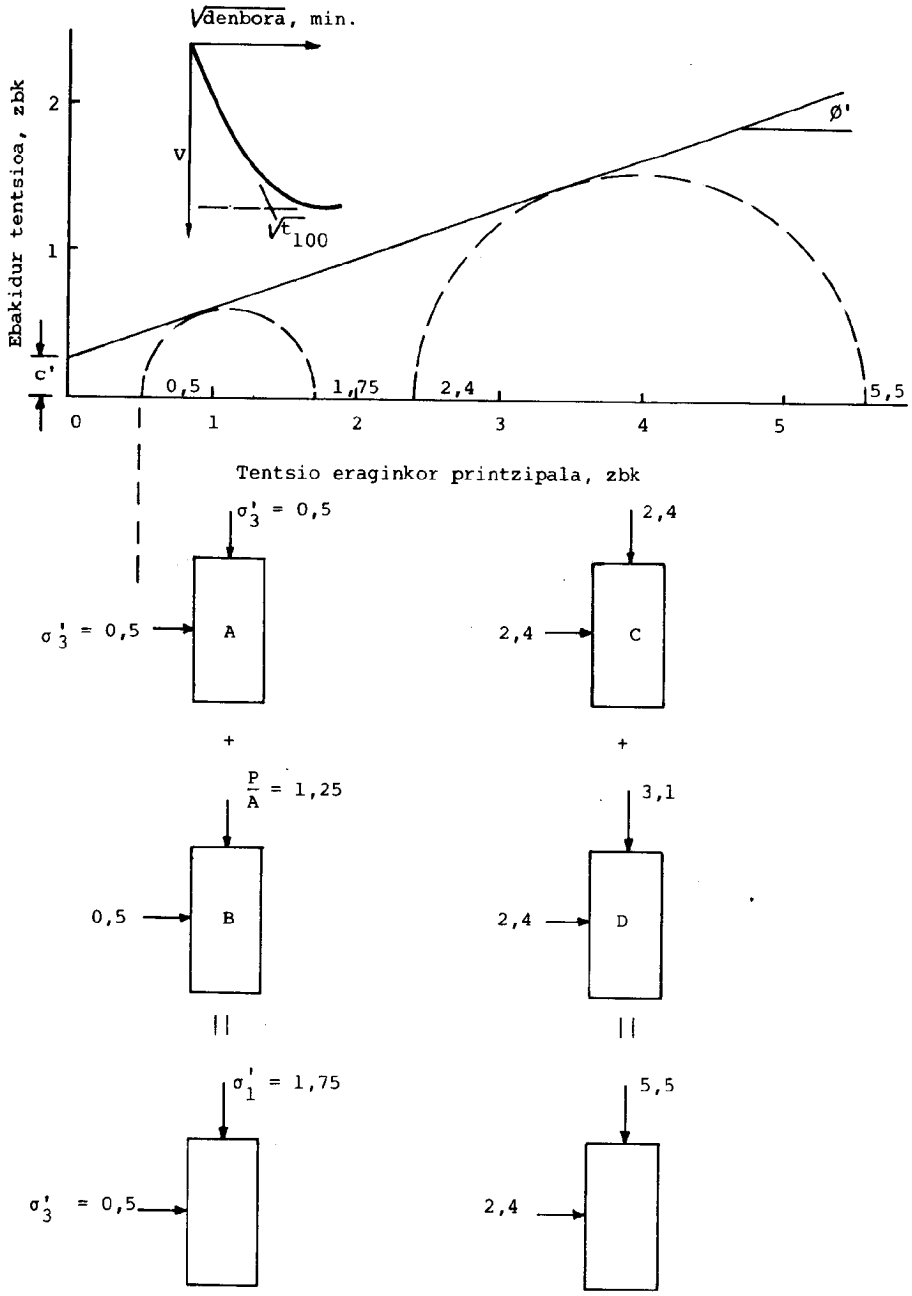
ϕ' = barne marruskadur angelu ageria

σ_n' = tentsio eraginkor normala = $\sigma_n - u$

Ikusten denez denak tentsio eraginkorrez adieraziak dira.

Gehienetan, frogeta triaxialak diametroz 4 cm. eta altueraz 8 cm.koak dira, edo 5 eta 10 cm.koak beste neurri batzu ere erabil daitezkeen arren. Altuera eta diametro arteko 2 edotako arrazoiak, muturretako xaflen interferentzia gabeko porrot-plano garatzen uzten duela aurkitu da.

Saiakuntza triaxial batetako drainapen osoa gauzaz* amaitzeko edo poro-presioa irioteko zamaketa-ginoa aurresateko metodoak badaude. Sarritan, albono drainak (iragazki-paperezko zerrendak) jartzen dira frogeta aurpegietan drainaketa-bidea



5.5 Ir. Buztinaren saiakuntza triaxial drainatuaren emaitzak.

laburtzeko.

Diametroz 4 cm. eta altueraz 8 cm. diren buztinezko frogetak hurranki egun batetan saia daitezke.

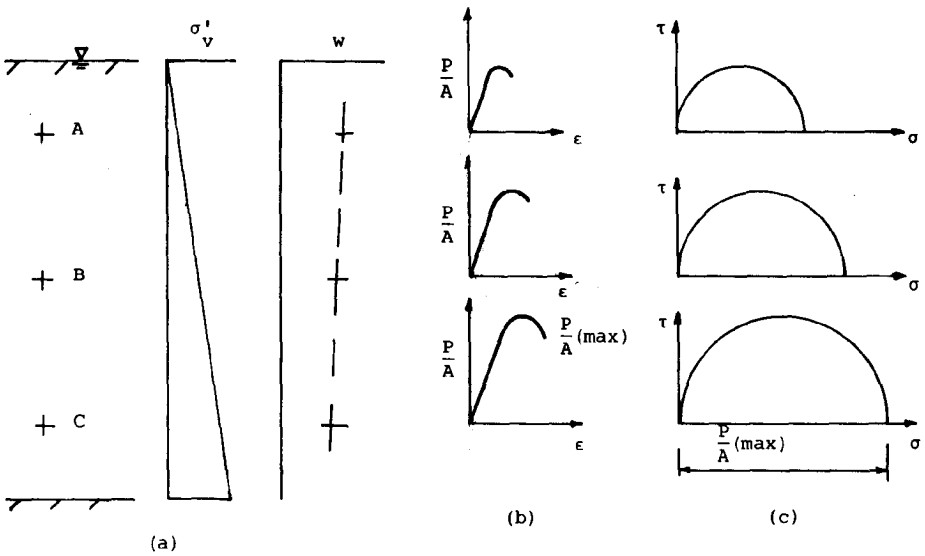
Porrota jazotzen den Mohr tentsio-zirkulu bat baino gehiago lortzeko, hasieran edozein σ_3 presio zedatzaile aukeratutan sendartu behar dira frogeta batzu. Behin σ_3 presio zedatzailepean lagina isotropikoki sendartua izan denean aplikatu egiten zaio tentsio aldaratzailea. Horregatik, saiakuntza hauei saiakuntza sendartu-drainatuak deritze.

5.2.2.- Saiakuntza Zedatua

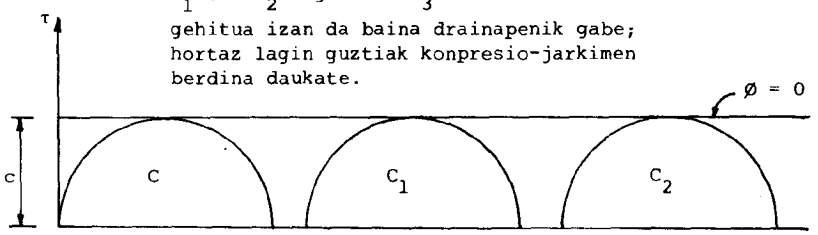
Gogoan har dezagun buztindegi normalki sendartu bat, 5.6 (a) irudian erakusten den erakoa. σ'_v tentsio eraginkor bertikala sakoneraz handiagotuko dela erraz erakuts daiteke 2. atalean deskribaturiko metodoak erabiliz. K_o-ren balorea ezaguna bada σ'_h kalkulatzea ere egin daitekeena da. Ikerzulapen batetan A, B eta C goieretatik laginak lortzen badira, laginen ur-edukia desberdina izango dela eta ur-edukia sakoneraz txikiagotzen joango dela erakuts daiteke.

Laginak zertanetik atera arren ere, aseturik egongo dira kapilareak formatzen direlako laginaren inguruko bere tokiko tentsioak kendu eta berehala. Bestela esateko, laginetako poro-ur-presioa negatiboa bilakatuko da eta laginek $\sigma' = u$ tentsioa berredukiko dute.

Aipaturiko goieretako lagin bana konpresio-saiakuntza zedagabe batez ($\sigma_3 = 0$) meneratzen badira eta tentsio aldaratzailea jardoki axialaren aurka irudikatzen bada 5.6(b) irudian agertzen den eran, C goierako laginak beste laginek baino q_u konpresio-tentsio handiagoa jarkiko duela erakutsiko dute emaitzek. Saiakuntza hauetan ura drainatzen ez delaz ohartzea erraza da egintza kapilarrak berredukitzen duelako. Horregatik, saiakuntza hauk drainagabeak dira eta poro-ur-pre-



C_1 eta C_2 laginetan σ_3 tentsio zedatzailea gehitua izan da baina drainapenik gabe; hortaz lagin guztiak konpresio-jarkimen berdina daukate.



(d)

5.6 Ir. Saiakuntza drainatugabe sendartugabe eta zedatugabeak.

sioak ez dira ezagutzen. Honela, σ_1 eta σ_3 tentsioez bakarrik marraz daiteke Mohr zirkulua 5.6(c) irudian erakusten den bezala. Gainera, drainaketarik ez denez aritzen (baldintza drainagabeak jarraitzen) lagin bakoitzaren konpresio-jarkimen neurtuak ez du poro-ur-presioaren menpekotasunik. Hau honela ere froga daiteke:

Frogeta bat baino gehiago hartzen dira goiera bakoitzean, hau da, A,B, eta C goieretan. Har ditzagun C goierako C_1 eta C_2 frogetak. Frogeta bakoitza mintzez ingurutzen da aparatu triaxialean eta presio zedatzaile desberdinez meneratua, baina drainaketarik ez zaie uzten. Frogetak drainapen gabe zamatzen badira tentsio aldaratzailea lagin guztietan berdina dela aurkituko da (laginak berdintsuak izanez, noski). Tentsio totalak hartuz Mohr zirkuluak irudikatzen badira, 5.6(d) irudiko eran, porrot-ingurutzailea horizontala izango da eta ordinatuko gurutzapenari c ebakidur jarkimena deritzo, non

$$c = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \qquad (5.8)$$

Hemen, barne marruskadur angelu ageria = $\emptyset$ = 0 da.

Ebakidur tentsioaren baloreok garrantzi handidunak dira ingeniaritza-problema askotan, adibidez, zamatzean drainaketa zokoragarriak jazotzen direnetarikoetan, hau da, euspen-ahalmenak, luebakietako ezponden egonkortasuna, etab.

Hemen aipaturiko saiakuntzei sendartugabe-drainatugabe saiakuntzak deritze.

Zolu bat sendartzen bada, (tentsio totaletarekiko) ebakidur jarkimena handiagotzen dela ere erakusten du 5.6 irudiak. Egite hau sarritan abantailerako erabiltzen da lanean, adibidez, azpizoluari sendartzen uzteko kaminoetako lubeteak aldizka eraikitzea, aldi bakoitza hilebeteak edo urteak izanik, eta honela hein batetan behintzat jarkimena irabaz dezaten.

5.2.3.- Saiakuntza Sendartu Drainatugabeak

Tentsio eraginkorretarekiko zoluaren jarkimena 5.1.1, 5.1.2 eta 5.2.1 azpiataletan eztabaidatua izan zen. Ebakidur jarkimena c' eta Ø'-rekiko definitua izan zen, eta drainapen osoa ziurtutariko saiakuntzetan neurtua.

Poro-ur-presioa neurtzen den saiakuntza sendartu drainetugabeetan ere hauteman daitezke c' eta Ø'.

Hasieran, aparatu triaxial batetan ipintzen da frogeta eta σ_3 presio zedatzailez meneratu. Urrats honetan, drainaketa osoa uzten da eta poro-ur-presioa zero izango da. Sendartuz gero, σ_3 presio zedatzailea konstante mantentzen da, eta frogeta ardatz-zamaz meneratzen da. Zamaldi honetan, ipinitako zama, ardatz-deformapena eta poro-ur-presioa neurtzen dira.

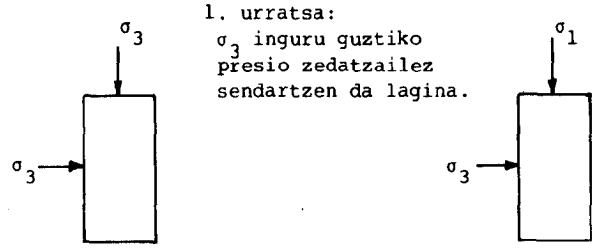
Lagina asea bada, zamaldian bolumen-aldapenik ez da izango, hau da, baldintza drainatugabeak jarraitzen dute. Horregatik, zamatzeaurreko V_1 bolumena eta zamatzeango V_2 bolumena berdinak dira. Beraz,

$$V_2 = V_1 \text{ eta } A_2 = \frac{A_1 H_1}{H_2} = \frac{A_1 H_1}{H_1 - \Delta H} = \frac{A_1}{1 - \varepsilon_1}$$

non, $\varepsilon_1 = \frac{\Delta H}{H_1}$ = jardoki axiala.

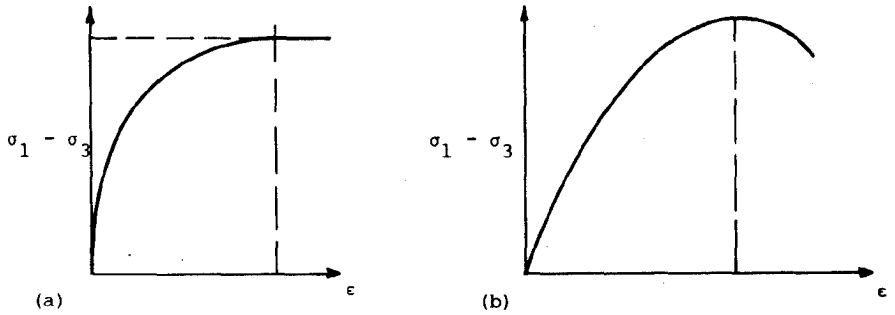
A_2 azalera zuzendua erabiltzen da tentsio aldaratzailea lortzeko.

Saiakuntz emaitzak irudika daitezke 5.7 irudian agertzen den eran. σ_1 eta σ_3 tentsio totalak lor daitezke jardokiaren edozein baloretan eta tentsio totalerekiko Mohr zirkulua irudikatzeko erabil. Jardokiaren balore berberean, u poro-ur-presioa lor daiteke 5.7(a) eta 5.7(b) irudietan erakusten den bezala. 2.8 ekuapenetik zera lor dezakegu:



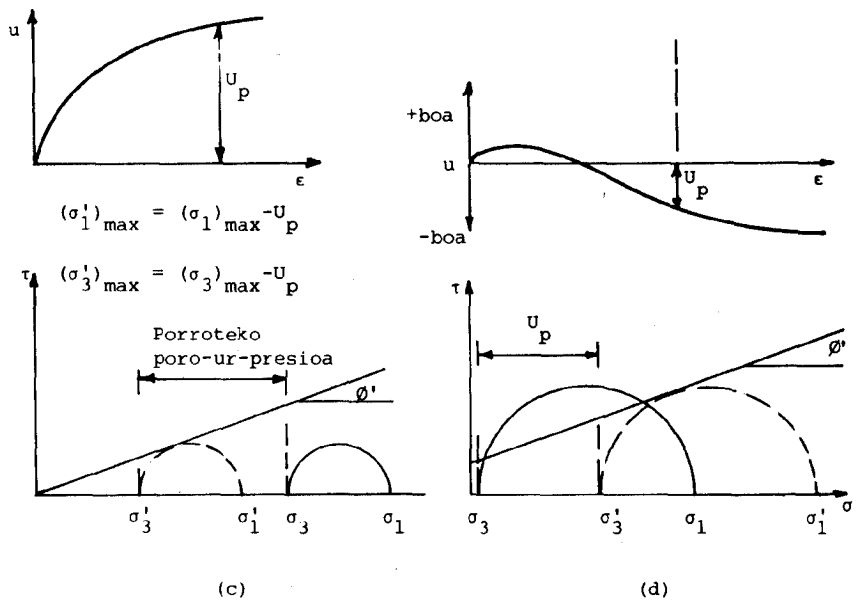
1. urratsa:
σ_3 inguru guztiko presio zedatzailez sendartzen da lagina.

2. urratsa:
Drainapen-balbula ixten da, eta σ_3 konstante mantenduz zamatzen da lagina. Poro-ur-presioa neurtzen da.



Buztin normalki sendartua

Buztin larsendartua



5.7 Ir. Saiakuntza drainatugabe sendartuak.

$$\sigma_3' = \sigma_3 - u \text{ , eta}$$

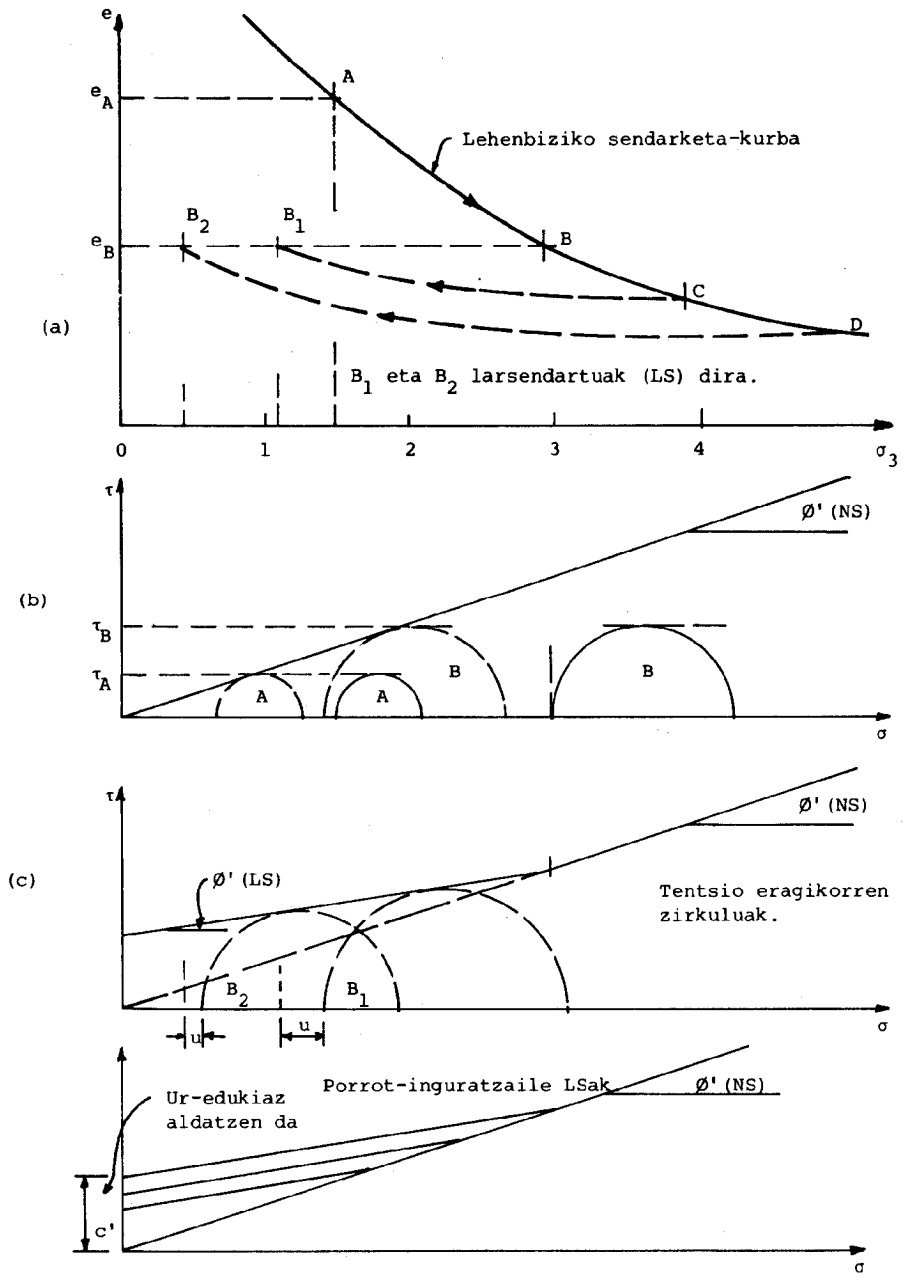
$$\sigma_1' = \sigma_1 - u \qquad (5.9)$$

Beraz, σ_3' eta σ_1' lor daitezke eta tentsio eraginkorrerekiko Mohr zirkulua irudikatzeko erabil, 5.7(c) eta 5.7(d) irudietan erakusten den eran. σ_3-ren balore desberdinpean hasieran laginen kopuru bat sendartzen bada, ur-edukiak aldatu egingo dira eta ondorioz ebakidur jarkimen aldaketa bat izango da 5.2.2 azpiatalean eztabaidatzen zen bezala. σ_3' eta σ_1'-en balore maximoetan (porrot-baloreetan) saiakuntza (lagin) bakoitzarentzako Mohr zirkulu bat marruazten bada, zirkuluen ingurutzaileak, lehen bezala, c' eta Ø'-rekiko ebakidur jarkimena deskribatzen du (ikus 5.5 irudia).

5.2.4.- Buztin Normalki Sendartua eta Larsendartua.

Zamatzearen historiak eragina du ebakidur jarkimenean, hau da, buztina normalki ala lar sendartua izateak ere aldatzen du jarkimena. Hau experimentalki erakutsia izan daiteke jarraiera ko eran:

Buztina eta ura kaliputsuki nahasten dira zirin* bat eratu arte. Zirina ontzi batetan jartzen da eta zama txiki bat aplikatuz arbastatzerainoko heinean sendartua. Lagin batzu sartzen dira aparatu triaxialean eta σ_3 inguru guztiko presio zedatzaile desberdinpeetan sendartuak (honi sendarketa isotropikoa deritzo). Sendarketan bolumen-aldaketak neurtuak badira, sendarketaren amaierako e hutsarte-arrazoia kalkulatua eta irudikatua izan daiteke 5.8(a) irudian bezala. Irudikadura hau presioeremu luze batetan lerro zuzena izango da log σ_3 eskala erabiltzen bada, eta lehenbiziko sendarketa-lerro isotropikoa deritzo. Lerro hau, 4.2(d) irudian erakusten den diagramako lerro zuzenaren poxiaren berdintsua da. σ_3 eskala aritmetiko batez irudikatzen bada, 5.8(a) irudian bezala, lehenbiziko kurba isotropiko bat lortzen da. 5.8(a) irudian erakusten den irudikadu



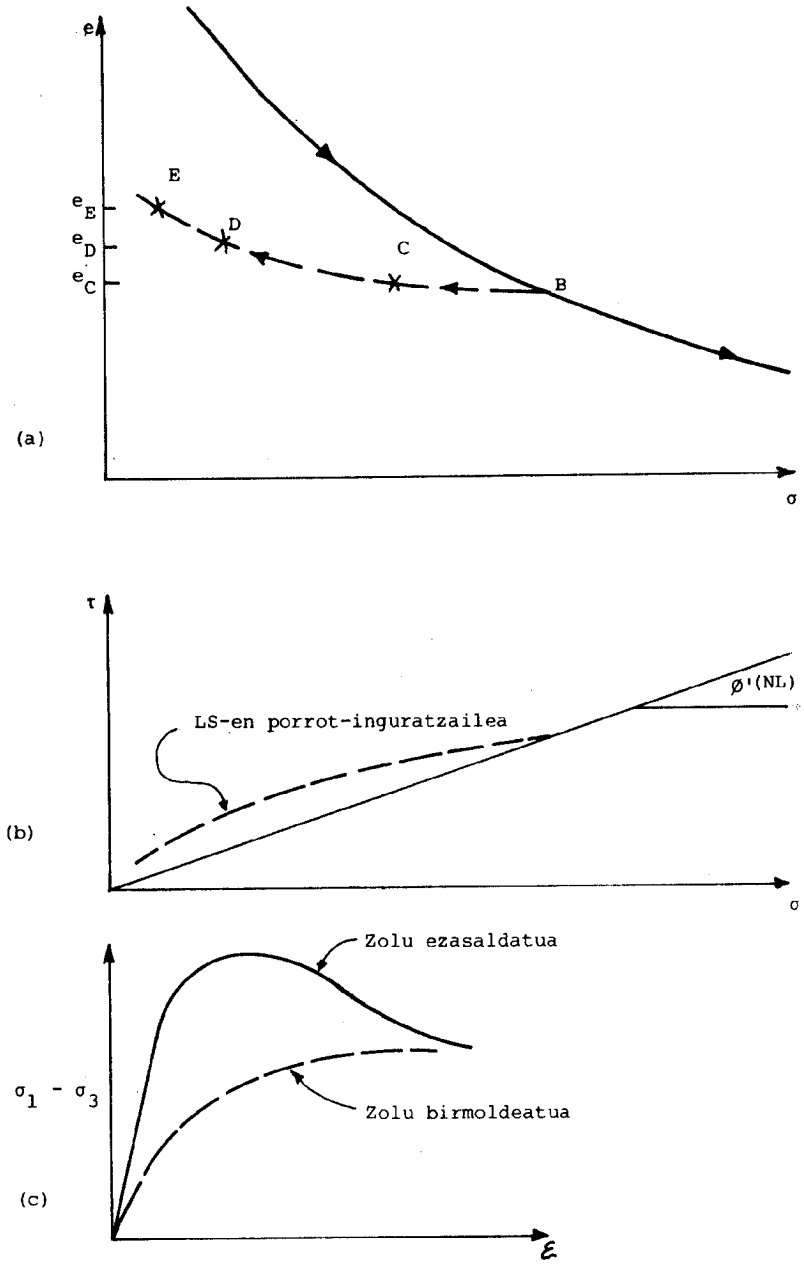
5.8 Ir. Larsendarpenaren eragina ebakidur jarkimenean.
(ur-eduki berdineko laginak)

ra zolu bat batentzako da bakarrik, hau da, buztin desberdinek e - σ_3 irudikadura desberdinak izango dituzte.

Zolu bereko A eta B lagin bi isotropikoki sendartuak badira, edozelan aukeraturiko σ_3 = 1,5 zbk eta 3 zbk presio zedatzailepeetan, zerk bere, e_A eta e_B hutsarte-arrazoiak izango dituztela itxarongo litzateke 5.8(a) irudian erakusten den eran Drainatzen utzi gabe laginak ardatz-zama batez meneratuak badira, σ_3 eta σ_1 balore desberdinez porrot egingo dute 5.8(b) irudiko tentsio totalen Mohr zirkuluetan erakusten den bezala. Drainaketa aldian u poro-ur-presioak neurtzen badira, σ_3' eta σ_1' porrotuneko tentsio eraginkorrak ezagunak izango dira eta 5.8(b) irudian bezalako tentsio-eraginkorren Mohr zirkuluak marraztea egin daitekeena izango da. Buztin normalki sendartuetan c' zero edo ia zero izango da eta Ø'-ak balore bakar bat izango du. Saiakuntza drainatuak zertuak izango balira porrot ingurutzaile berdintsu bat lortuko litzateke 5.2.3 azpiatalean aipatu zen bezala.

Lagin gehigarri bi C eta D puntuetaraino sendartuak dira, 5.8(a) irudiko eran, eta orduan berriz hantzen uzten zaie B_1 eta B_2 puntuetaraino, eta honela B,C eta D laginek, denek izango dute hutsarte-arrazoi eta ur-eduki bera eta berdina. Konpresio-saiakuntza drainagabeak zertzen badira lagin hauetan, C eta D laginen tentsio eraginkorren Mohr zirkuluak normalki sendartuen c'-Ø' ingurutzailea baino gorago daudela ikusiko da. Larsendarpenaren historiak c' eta Ø' baloreetan eragina daukala horrela frogatua geratzen da. Berdin, begibistako izan behar luke c-an ere eragina daukala.

Laginak B punturaino isotropikoki sendartuak badira, 5.9 (a) irudian bezala, eta hutsarte-arrazoi (ur-eduki) desberdinetararte hantatzen utziak, ur-eduki handietako jarkimenak txikiagoak direla eta, lortzen den tentsio eraginkorren porrot-inguratzailea (5.9(b) irudian) uztaitua izango da.



5.9 Ir. Larsendarpenaren eragina ebakidur jarkimenean.
(Ur-eduki desberdindun laginak)
(c) Birmoldeapenaren eragina jarkimenean eta porrot-jardokian.

5.2.5.- Sentikortasuna

Buztin bat birmoldeatzen denean bere hasierako jarkimenaren poxin on bat gal dezake. Jarkimen-galera hau sentikortasuna berbaz definitzen da.

$$\text{Sentikortasuna} = \frac{\text{zolu ezasaldatuaren jarkimena}}{\text{zolu birmoldeatuaren jarkimena}} \qquad (5.10)$$

Ohiz, birmoldeapenak jarkimen-galera bat dakar, eta ohiz, zoluaren tentsio-jardoki karakteristikak aldatzen ditu 5.9(c) irudian erakusten den eran.

Sentikortasun-gradua honela defini daiteke:

Deskribapena	Sentikortasuna
ezsentikorra	1
sentikortasun txikikoa	1 - 2
sentikortasun ertainekoa	2 - 4
sentikorra	4 - 8
oso sentikorra	8 - 16
lasterra	> 16

Ottawa eta St. Lawrence ibaien haranetako eta Eskandinabiako buztinak buztin sentikor bezala klasetuak izan zirela 1.3 azpiatalean aipatua izan zela gogora eraz daiteke. Buztin hauk 100 edo gehiagoko sentikortasuna daukate eta buztin laster bezala ere klasetuak izan daitezke. Porrotak edo lubiziak, zolu hauetan, birmoldeapen adierazgarriak dakartzate eta horregatik jariotzeko joera daukate.

5.2.6.- Itxoroski-Saiakuntza

Laborategian edo landan, maiz egiten dira itxoroski-saiakuntzak c ebakidur jarkimena (tentsio totalerekiko) hautemateko.

Ziri zirkular bati soldeatutako lau xafla mehetan datza itxoroskia. Ebaki laukizuzendarra (5.10(a) irudikoa) edo puntaduna (5.10(b) irudikoa) izan dezake itxoroskiak.

Landan, zulatzeko zarta baten muturrean (Shelby tutuez lagintzen den eran) hondoratzen da itxoroskia eta zolu barrura sartzen. Zarta biratzen da zertan-azaleran eta momentua handiagotzen da porrota jazo arte, izan ere momentu maximoa lortu arte.

Zoluaren bere tokiko itxoroski-saiakuntza sarritan erabiltzen da zolu lagingaitzetan. Bere tokiko itxoroski-saiakuntzak ez duela zolua asaldatzen eta ebakidur jarkimen neurtuak zolu ezasaldatuaren ebakidur jarkimena hurrantzen duela ere argudiatzen da. Ebakidur jarkimenen baloreen erkapenek zera adierazten dute: bere tokiko saiakuntzek ia beti lagin "ezasaldatuetako" laborategi saiakuntzek baino ebakidur jarkimenen balore handiagoak ematen dituztela. Gehienetan, landarako itxoroskiak 15 cm. edo luze bider 8 cm. edo zabal izaten dira.

Laborategian, lagin-tutu barruan dauden laginen barrura sakatzen da 2 cm. edo bider 1 cm. edo duen itxaroskia. Momentu biratzailea aplikatu eta neurtzen da, eta ebakidur jarkimena kalkulatzeko, momentu handiena erabiltzen da.

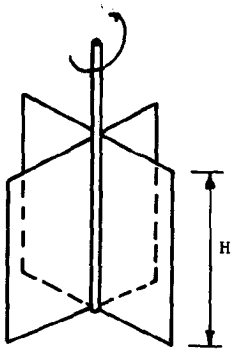
Itxoroski laukizuzendarretan T momentu biratzailea honelako hau da:

$$T = \pi c \left(\frac{HD^2}{2} + \frac{D^2}{6}\right) \qquad (5.11)$$

eta itxoroski puntadunetan

$$T = \pi c D^2 \left(\frac{D}{3\sqrt{2}} + \frac{H}{2}\right) \qquad (5.12)$$

Ezartzen zaion momentua



Pareen ertzez, hau da, alboez eta muturrez, zolua ebakiz, azalera zilindriko bat lortzen dela gogoan hartzen da.

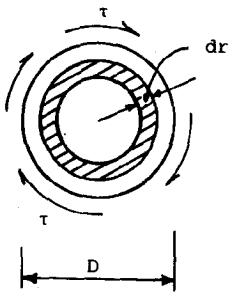
Momentu jarkitzailea = tentsio x azalera x momentu-besoa.

Muturretako elementuetan, azalera = $2\pi r\ dr$, momentu-besoa = r

Beraz, momentua = $2\pi r^2\ dr\tau = M$

Mutur bietan

$$M = 2\int_0^{D/2} 2\pi\tau\ r^2 dr = \frac{\pi\tau D^3}{6}$$

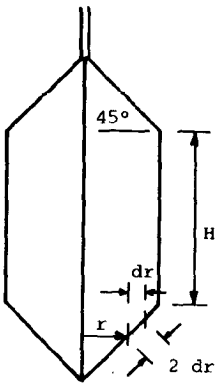


Zilindroaren alboetan

$M = \pi DH\tau(D/2) = (1/2)\ \pi HD^2\tau$

Momentu totala = $M = \pi\tau(\frac{HD^2}{2} + \frac{D^3}{6})$

$\tau = c$ = ebakidur jarkimena



Mutur konikoetan, $M = 2\int_0^{D/2} \tau 2\pi r dr \quad 2\ r = \pi\ \frac{D^3}{6}\ 2$

Zilindroan, $M = \frac{\pi HD^2}{2}\ \tau$

Momentu totala, $M = \pi cD^2\ (\frac{D}{3\ 2} + \frac{H}{2})$

$\tau = c$ = ebakidur jarkimena

5.10 Ir. Itxoroski-Saiakuntzak ebakidur jarkimen drainatugabeak hautemateko.

5.2.8.- Ebakidur Jarkimen Taxutuak

Lanean diharduen ingeniariari sarritan eskatzen zaio buztin aseen c ebakidur jarkimena taxutzeko. Bideetarik bat, zolu laginak (hunak), behin laginketa-tutuetatik atera eta gero, aztertzea da. Hemen beheko koerlazioa oso hurrana baina emendioa egiten duena da.

Konpresio-Jarkimena $q_u = 2\ c$	Mamintasuna	Oharrak
zbk		
< 0,25	Oso biguna	Hun altua bere pisupean makurtuko da.
0,25 - 0,50	Biguna	Hatzamarrez zatibi daiteke huna.
0,50 - 1,00	Irmea	Hatzamarren koska erraz utzi ahal zaie hunei.
1,00 - 2,00	Zurruna	Indar handiz bakarrik hatzamar-koska dakie hunei.
2,00 - 4,00	Oso zurruna	Huna nekez hatzamar-koska daiteke.
> 4,00	Gogorra	Huna ezin daiteke hatzamar--koska.

Buztinak normalki sendartuak direnean, honelako adierazpena ere erabil daiteke c-ren balorea hurranki taxutzeko:

$$c = \sigma_v' \ (0,11 + 0,0037\ I_p) \qquad (5.13)$$

non, σ_v' = bere tokiko tentsio eraginkorra, eta

I_p = Ehunekobestez adierazitako plastizitate-indizea.

5.13 ekuapena itsas buztinentzat eta beste buztin askorentzat egokia da, hala eta guztiz ere, arretaz erabili beharko litzateke buztin guztientzat ez duelako balio.

5.3.- K_o (alboetako jardoki gabeko) Saiakuntza

Aparatu triaxiala, 5.2(a) irudian erakutsia, erabil daiteke K_o-ren balorea hautemateko. K_o hau honela definitzen da:

$$K_o = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_v} \qquad (5.14)$$

non, σ'_h = tentsio eraginkor horizontala, eta

σ'_v = tentsio eraginkor bertikala

Alboko jardokirik gabeko baldintzetan ezartzen da K_o-ren balorea. Hortaz, aparatu triaxialean tresna sentikor (jardoki neurgailu) bat jartzen da altueraren erdian laginaren zirkunferentzian. Baldintza drainatupeetan lagina axialki zamatzen da; laginak sabeltzera jotzen du baina σ_3 presio zedatzailea handiagotuz higidura horizontalak gutxiendu egiten dira. σ'_3 eta σ_1-en elkar aurkako irudikadura gutxi gora behera lineala da eta lerroaren aldatza K_o bezala definitzen da.

6. ATALA

EBAKIDUR JARKIMENAREN ERABILERA DISEINUAN

Aurkako ormen, jasoinen, zimenduen, egarzoluen, ezponden etabarren analisi edota diseinuan ebakidur jarkimena osagai garrantzitsua da. Tentsio-jardoki erlaziotasun orokorrak ez dira izan ezarriak zoluentzat, eta horregatik, zoluak daukan ebakidur jarkimena ebakidur tentsio induzituez erkatzen duten metodoetan dautza analisia eta diseinua. Ebakidur tentsioek dakartzaten deformapenak gauzaz aurresatea ezinezkoa da, eta horregatik zoluaren hauspeneko ebakidur jarkipenari segurtasun-faktore egoki bat erantsiz mugatzen dira deformapenak.

Analisi eta diseinu-problemen kopuru batetako ebakidur jarkimenen erabilera gainki deskribatzen da atal honetan.

6.1.- Lurraren Aurkako Ormak

Eraikuntz lan askotan zolutegi naturalak ezponda zutez edo hurranki zutez industen dira. Gainera maiz, aldatz handiko aldapetan bete trinkotuak jarri beharra izaten da. Kasu bietan, gizonak jarritako edo zolu-moltso naturalak aldi luzeetan egonkor ez irautea izan daiteke. Hortaz, zolu-moltsoak eusteko zer edo zelako aurkako estruktura eraiki behar da. Aurkako ormak, luebanetako eskoralanak eta palataskak* horietariko estruktu-ren adibide arruntak dira.

Estrukturen aurka aritzen edo arituko diren lur-tentsioen (presioen) taxupena eskatzen du estruktura hauen diseinu edo analisiak. Teoria batzu badira estruktura hauen aurkako presioak taxutzeko erabil daitezkeenak; halere, oinarrizko kontzeptuak aukeratuko dira atal honetan.

6.1.1.- Mugako Oreka Plastikoen Rankine Egoerak

Gogoan har zolu-moltso kohesiogabe lehor erdi-infinitu horizontal bat, 6.1(a) irudian bezalakoa. Zolu-moltso barrura eta H sakoneraraino a-b orma leun bat sartzen da. Albotiko lur-presioa, orma honen aurkakoa, 2.3 ekuapena erabiliz kalkula daitekе. Erakusten den eran, presio-barreiapena triangeluarra da eta H sakonerako albotiko presioa $\sigma'_h = K_o \gamma H$. 2. atalean ohartu zen bezala, K_o balorea, higidura horizontalik ez daukan egoeari bakarrik dagokio.

Orma a'-b' posizio berri batetara higitzen bada 6.1(b) irudian bezala, ormaren eskumaldeko zoluak teink egingo du A elementuaz erakusten den eran. Higipena nahiko handia bada zolu-moltsoan induzitutako tentsioak zoluaren ebakidur tentsio handienera hurbilduko dira eta zolu-moltsoko puntu guztiak porrot zorian edo mugako oreka-egoeran egongo dira. Honi kasu aktiboa deritzo.

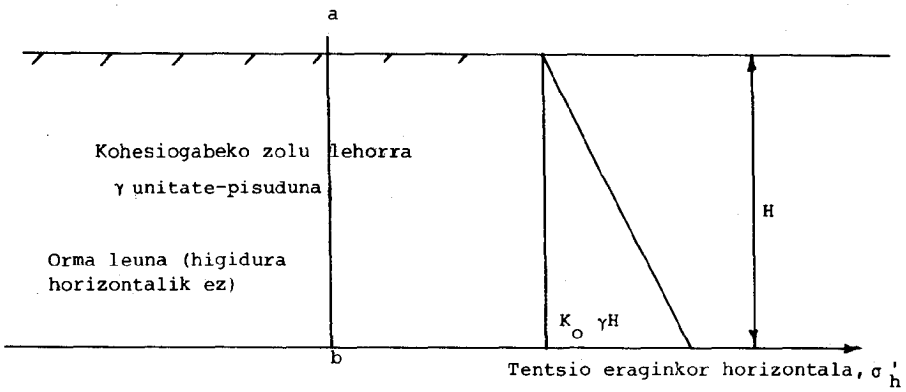
Antzera, 6.1(c) irudiko eran orma higitzen bada a"-b" posizio berrira, ormaren eskumaldeko zolua konprimatu egingo da A keradun elementuaren bidez erakusten den eran. Lehen bezala, nahiko higipen jasotzen bada, zolu-moltso barruko puntu guztiak mugako oreka-egoeran izango dira. Honi kasu pasiboa deritzo.

6.1.2.- Erlaziotasun Teorikoak Birbete Kohesiogabeetan

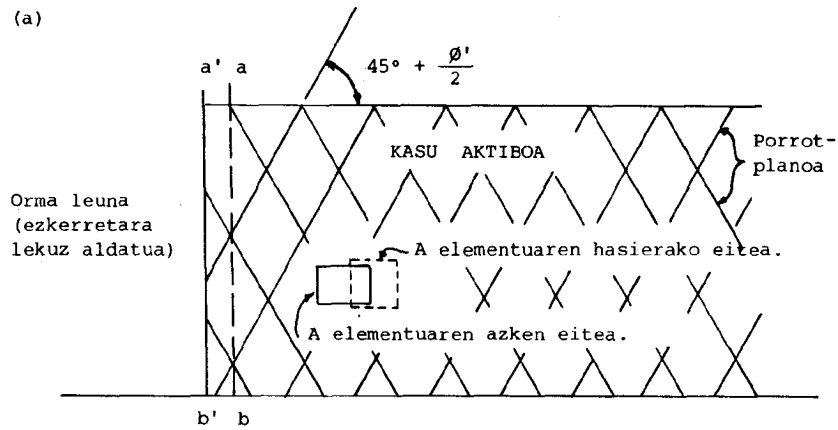
Tentsio-egoera aktibo eta pasiboak Mohr zirkuluaren laguntzaz erakutsi daitezke 6.2(a) irudiko eran. Zolu-moltsoa hare kohesiogabez, hau da c' = 0, osoturik dagoela gogoan hartzen da.

Antzez beza (1) tentsio zirkuluak hasierako toki bertako baldintzetako Mohr tentsio zirkulua, non

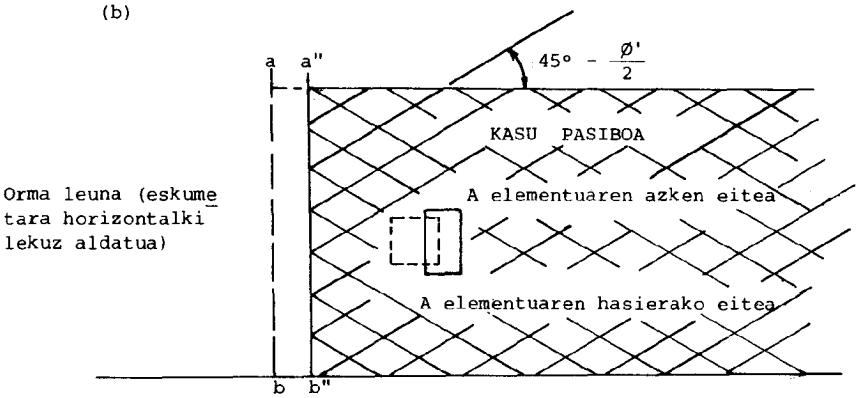
OB = tentsio printzipal txikiena = $K_o \sigma'_v$, eta



(a)



(b)



(c)

6.1 Ir. Oreka plastikoen Rankine egoerak.

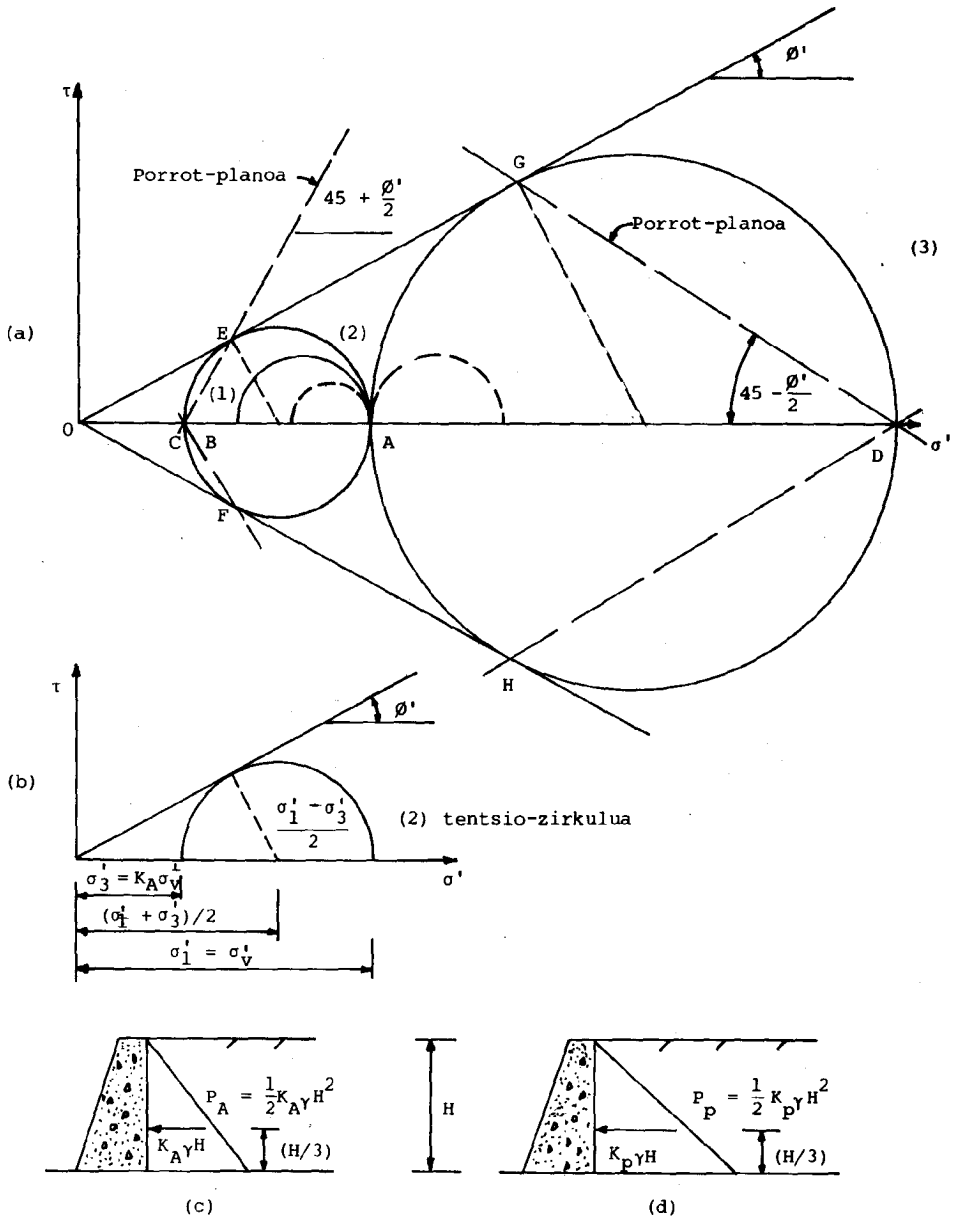
OA = tentsio printzipal handiena = σ'_v

Orma ezkerretara higitzen bada 6.1(b) irudian bezala, A elementu gaineko tentsio bertikal berak jarraituko du tentsio horizontala txikiagotzen den artean. Bestela esateko, σ'_v konstante geratzen da eta $K_o\sigma'_v$ txikiagotzen da. Tentsio-egoera bakoitza Mohr zirkuluaren bidez erakutsi daiteke 6.2(a) irudian erakusten den bezala. $K_o\sigma'_v$ txikiagotuz doala, (2) tentsio-zirkulu bezala erakusten den Mohr tentsio-zirkulua Mohr porrot--inguratzaileari tangente bilakatzen zaio. Une honetan porrota jazotzen da eta $K_A\sigma'_v$ da tentsio printzipal txikiena; non, K_A = lur-presio (tentsio) aktiboaren koefizientea. Gainera $K_A < K_o$. Plano printzipal handiena horizontala da eta berarekiko 45 + Ø'/2 angelua inklinatuak daude porrot-planoak. CE eta CF lerroez erakusten da hau.

Zolu-moltso infinitu batetan porrot-planoen kopuru infinitu bat izango da 6.1(b) irudian erakusten den eran.

Orma eskumetara higitzen bada 6.1(b) irudian erakusten den bezala, $K_o\sigma'_v$ tentsio printzipal txikiena handiagotzen da σ'_v konstante geraturik. Mohr tentsio zirkulua, 6.1(a) irudikoa, une batetan puntu batetara endakatzen da, hau da, $\sigma'_v = \sigma'_h$. Albotiko tentsioa gehiago handiagotuz doala, tentsioen Mohr zirkulua handiagotzen doa eta une batetan Mohr porrot-ingurutzailearen tangentea bilakatzen da (3) tentsio-zirkuluaren bidez 6.2(a) irudian erakusten den eran. Une honetan, tentsio printzipal handiena OD = $K_p\sigma'_v$ bilakatzen da, non K_p = lur-presio (tentsio) pasiboaren koefizientea. Porrot-planoak plano printzipal handienarekiko 45 - Ø'/2 angelua inklinaturik daude, DC eta DH lerroen bidez erakusten den eran. Zolu-moltso infinitu batetan, porrot-planoen kopuru infinitu bat izango da 6.1(c) irudian erakusten den eran.

Ikus daiteke, 6.2(b) irudiaren bidez,



6.2 Ir. Mohr zirkuluen diagramak eta tentsio-barreiapena.

$$\sin \phi' = \frac{\frac{\sigma'_v - K_A \sigma'_v}{2}}{\frac{\sigma'_v + K_A \sigma'_v}{2}}$$

eta $\sigma'_v = \sigma'_1$ eta $\sigma'_h = K_A \sigma'_v = \sigma'_3$ eginez

$$\sin \phi' = \frac{\frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2}}{\frac{\sigma'_v + \sigma'_3}{2}} \quad , \text{ eta}$$

$$\sigma'_1 - \sigma'_3 = \sigma'_1 \sin \phi' + \sigma'_3 \sin \phi'$$

$$\frac{\sigma'_3}{\sigma'_1} = \frac{1 - \sin \phi'}{1 + \sin \phi'} = K_A \qquad (6.1)$$

Kasu pasiboan,

$$\frac{\sigma'_3}{\sigma'_1} = \frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} = K_p \qquad (6.2)$$

6.2(c) irudiak zolu lehorreko lur-presio aktiboaren barreiapena erakusten du, eta 6.2(d) irudiak zolu lehorreko lur-presio pasiboarena.

K-ren baloreak, 2. atalean aipatu zen bezala, tentsio eraginkorretarekiko bakarrik adieraz daitezke. Hortaz, ur-maila bat bertan badago, lehen tentsio eraginkorretarekiko kalkulatu behar dira indarrak, eta gero gehitzen zaie ur-presioa.

6.1.3.- Birbete Kohesiodunentzako Erlaziotasun Teorikoak

Buztina bezalako kohesiodun zoluz osoturik badago birbetea, tentsio-egoera aktibo eta pasiboentzako Mohr tentsio-zir

kuluak erakusten dira 6.3(a) irudian. Sorburua C puntuan hartzen bada, 6.2 irudiko erlaziotasun geometrikoak hemen ere berdinak dira. Hortaz,

$$\frac{OD}{OE} = \cos \phi' \; ; \; OD = OE \cos \phi' = c' \cos \phi' = BF$$

$$OA = \frac{\sigma_1' + \sigma_3'}{2} \; ; \; AF = OA \sin \phi' = \frac{\sigma_1' + \sigma_3'}{2} \sin \phi' \; ;$$

$$AB = \frac{\sigma_1' - \sigma_3'}{2} = BF + AF = c' \cos \phi' + \frac{\sigma_1' + \sigma_3'}{2} \sin \phi' \; ;$$

Beraz, $\sigma_1' - \sigma_3' = 2\, c' \cos \phi' + (\sigma_1' + \sigma_3') \sin \phi'$

$$\sigma_3' = \sigma_1' \left(\frac{1 - \sin \phi'}{1 + \sin \phi'}\right) - \frac{2\, c' \cos \phi'}{1 + \sin \phi'} \quad , \quad \text{eta}$$

$$\sigma_3' = \sigma_1' K_A - 2\, c' \sqrt{K_A} \qquad (6.3)$$

Baina, $\sigma_1' = \sigma_v' = \gamma' z$, eta

6.3 ekuapena zera bilakatzen da

$$\sigma_3' = \gamma' z\, K_A - 2\, c' \sqrt{K_A} \qquad (6.4)$$

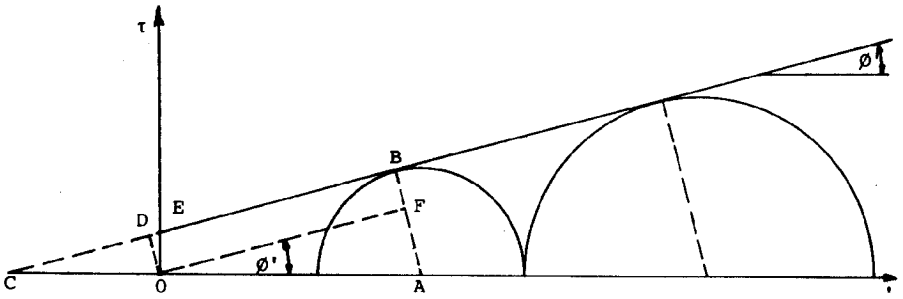
$z = 0$ denean, $\sigma_3' = -2c' \sqrt{K_A}$ 6.3(b) irudian bezala,

$\sigma_3' = 0$ denean, $\gamma' z = \dfrac{2c' \sqrt{K_A}}{K_A}$, eta

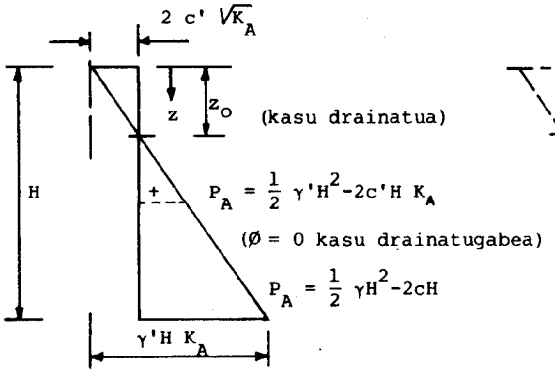
$$z = z_o = \frac{2\, c'}{\gamma'} \frac{\sqrt{K_A}}{K_A} = \frac{2\, c'}{\gamma'} \frac{1}{\sqrt{K_A}} \qquad (6.5)$$

z_o baino sakonera txikiagoan, lur-presio ageria negatiboa da, hots, teinkadur zona bat dago eta P_A indar aktiboen erresultantea zera da:

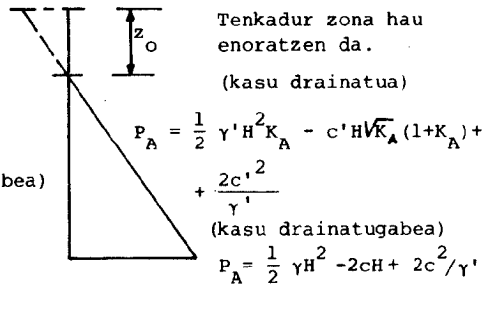
$$P_A = \frac{1}{2} \gamma' H^2 K_A - 2\, c' H \sqrt{K_A} \qquad (6.6)$$



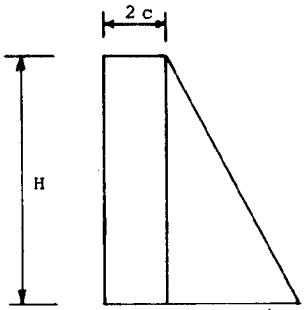
(a)



(b)



(c)



(Ø = 0 kasu drainatugabea)

$P_p = \frac{1}{2} \gamma H^2 + 2cH$

(d)

6.3 Ir. Birbete-ekai kohesiodunentzako erlaziotasunak.

non, H = ormaren altuera

Lanean, zolua ormari ez datxekiola onartzen da eta tentsio negatiboa enoratzen da. Beraz, indar aktiboen erresultantea zera bilakatzen da:

$$P_A = \frac{1}{2}\,\gamma'\,H^2\,K_A - 2\,c'\,H\,\sqrt{K_A} + \frac{2(c')^2}{\gamma'} \qquad (6.7)$$

Uraren indarra, baldin badago, honi gehitu egin behar zaio albotiko indar totala lortzeko.

Aurkako ormen problema askotan buztina ez dela lehen zamaketan drainatzen onartzen da eta tentsio totalen analisi bat bidezkoa da.

Hortaz, buztina $\phi = 0$ duen ekai bat bezala hantatzen da; gainera c'-ren lekua c-k hartzen du, hau da, tentsio totalerekiko kohesio edo ebakidur jarkimena; γ'-ren lekua γ-k hartzen du. 6.7 ekuapena honela idazten da

$$P_A = \frac{1}{2}\,\gamma\,H^2 - 2\,c\,H + \frac{2\,c^2}{\gamma} \qquad (6.8)$$

Kasu pasiboan, teinkadur arrakalak ezinezkoak dira, eta

$$P_P = \frac{1}{2}\,\gamma'\,H^2\,K_P + 2\,c'\,H\,\sqrt{K_P} \qquad (6.9)$$

Uraren indarra, baldin badago, honi gehitu egin behar zaio albotiko indar totala lortzeko.

Orain, $\phi = 0$ duen buztin batetan,

$$P_P = \frac{1}{2}\,\gamma\,H^2 + 2\,c\,H \qquad (6.10)$$

γ'-ren ordez γ erabiltzen denez, 6.8 eta 6.10 ekuapenak erabiltzen direnean uraren indarra ez da gehitu behar.

6.1.4.- Gainzama

Laneko kasu askotan, orma osteko birbetearen gainean, zama ezuniforme bat, zama uniforme bat, edo lerro-zama bat, hots, gainzama bat aritzen da. Zama hauen eraginak hautemateko metodoak egon badaude; halere, hemen behean zama uniformearen kasu bakuna bakarrik ematen da.

Gainzama uniformeak q magnitude bat (mbt, zbk, etab.) badauka, zamapeko edonongo tentsio bertikalari q tentsioa gehitzen zaio. Horrela, zolu kohesiogabeetan albotiko tentsioari q z K_A gehitzen zaio kasu aktiboan eta q z K_P kasu pasiboan. Zolu kohesiogabeetan,

$$P_A = \frac{1}{2} \gamma' H^2 K_A + q H K_A \qquad (6.11)$$

$$P_P = \frac{1}{2} \gamma' H^2 K_P + q H K_P \qquad (6.12)$$

Kohesiodun zoluetan (Ø = 0 kasuan)

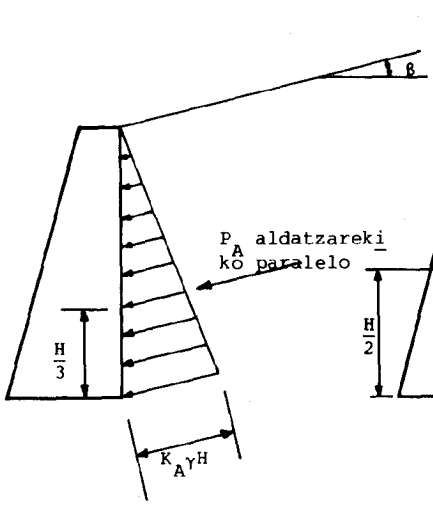
$$P_A = \frac{1}{2} \gamma H^2 - 2 c H + \frac{2 c^2}{\gamma} + q H \qquad (6.13)$$

$$P_P = \frac{1}{2} \gamma H^2 + 2 c H + q H \qquad (6.14)$$

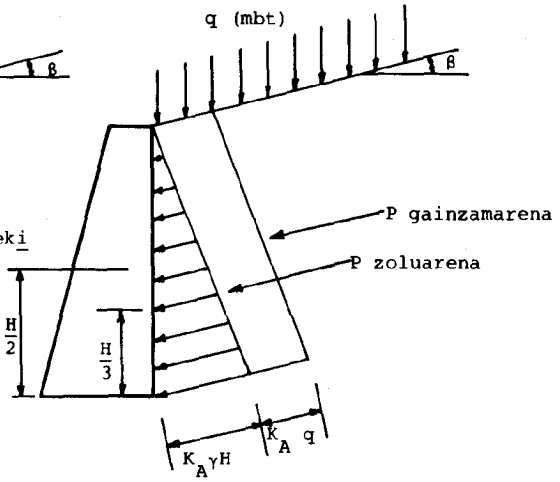
6.1.5.- Aldatz Gorako Birbetea (Zolu Kohesiogabeetan)

Uniformeki aldazten den (horizontalarekiko β angeluaz, ikus 6.4 irudia) zolu-moltso kohesiogabe erdi-infinituaren kasuan, badaude ebazpide analitikoak albotiko tentsioa hautemateko.

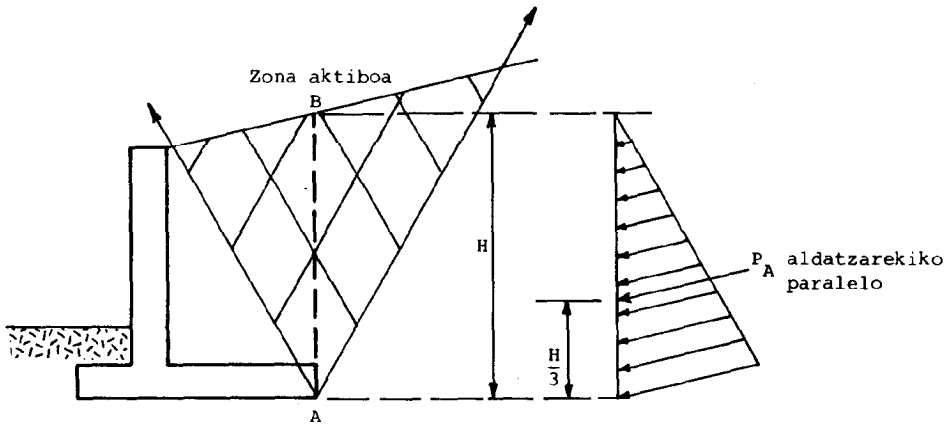
Kasu aktiboan,



(a) Aldatzdun birbetea.



(b) Aldatzdun birbetea zama uniformeaz.



(c) Aurkako hatzapar-orma

6.4 Ir.

$$P_A = \frac{1}{2}\,\gamma'\,H^2\cos\beta\,\frac{\cos\beta - \sqrt{\cos^2\beta - \cos^2\phi'}}{\cos\beta + \sqrt{\cos^2\beta - \cos^2\phi'}} \qquad (6.15)$$

non P_A aldatzarekiko lerro paralelo batetan aritzen den.

Kasu pasiboan,

$$P_P = \frac{1}{2}\,\gamma'\,H^2\cos\beta\,\frac{\cos\beta + \sqrt{\cos^2\beta - \cos\phi'}}{\cos\beta - \sqrt{\cos^2\beta - \cos^2\phi'}} \qquad (6.16)$$

Lanean, kasu pasiboa ez da ia inoiz jazotzen.

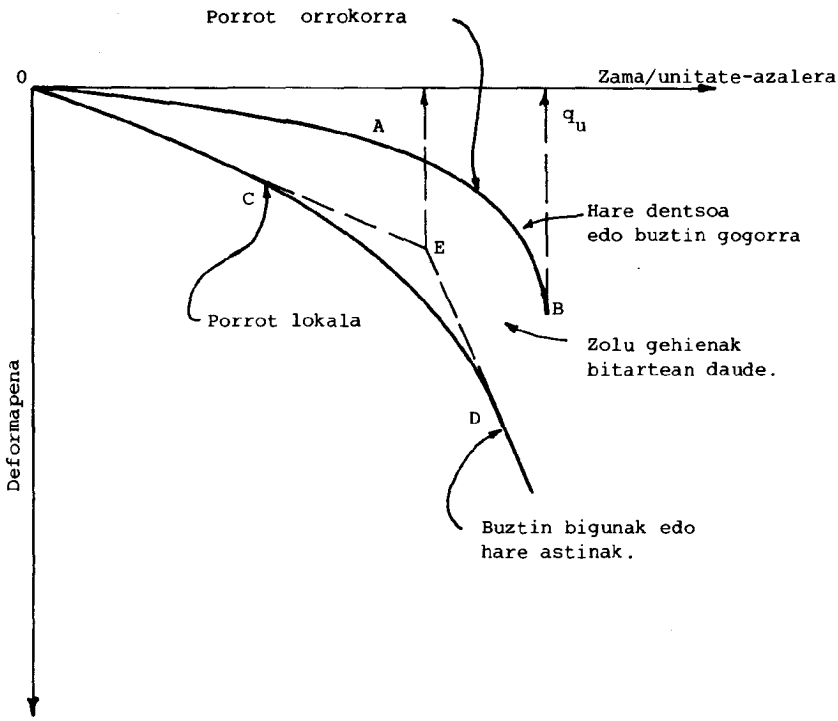
6.2.- Sakonera Txikiko Zimenduen Euspen-Ahalmena. Terzaghiren Hurbilkera

Hauspen gabe zoluak jasan dezakeen unitate-azalerako zama handiena da euspen-ahalmena. Handiagotzen doan unitate-azalerako zama bat aritzen bada zimendu batetan, honen portaera 6.5 irudian agertzen da.

Zoluaren mamitasun eta dentsitatearen arauera, porrotaren bi era daudela aurkitu da eta hauk dira:

(i) Ebakidur porrot osoaren era. Porrot aurreko deformazioak txikiak dira eta porrota bat batekoa dela esan daiteke. OAB kurbaren bidez erakusten da egoera hau eta, hare den tsoetan eta buztin zurrunetan jazotzen da batez ere.

(ii) Porrot lokalaren era. Deformazio handiak sortzen dira eta zama apalpenaren aurkako kurba gero eta gehiago aldazten da. OCD kurbaren bidez erakusten da portaera hau, eta hare astinetan eta buztin bigunetan jazotzen da batez ere.



6.5 Ir. Jasoin bateko zama eta deformapenaren arteko erlaziotasunak.

Lehenbiziko jaulkitzea gertatzen den A eta C puntuak ebakidur porrot lokal bati dagozkio. A eta C puntuetatik aurrerantz arrakalatze lokala eta zoluaren porrot ezosoak jazotzen dira. Ekai dentsoetan B puntuan, zama-handiagotze txikiz apalpenak azkar handiagotzen dira, Zoluak porrot egin du ebakidura dela eta, eta dagokion q_u tentsioa "azkeniko euspen-ahalmena" deitzen da.

Ekai astinen kasuan, azkeniko euspen-ahalmena ez dago ondo definitua gehienetan. E puntua, tangente biren elkargunea, porrotari dagokiola gogoan hartzen da.

Ebakidur porrot erarentzako, zerrenda-jasoin baten azkeniko euspen-ahalmena Terzaghi-k hauteman zuen 1930.ean. Azpiazala latza zela eta gainaztak* ez zuela jarkimenik gogoan hartu zituen. 6.6(a) irudian erakusten da dagokion mekanismoa, lanean aurkitutakoaren eredua izanik.

Azpiazalera latza denez, AC eta BC porrot-azalerak Ø angeluaz daude horizontalarekiko. AC eta BD azaleretako P_P indar pasiboak normalarekiko Ø angeluaz aritzen dira; beraz P_P-ek bertikala izan behar du.

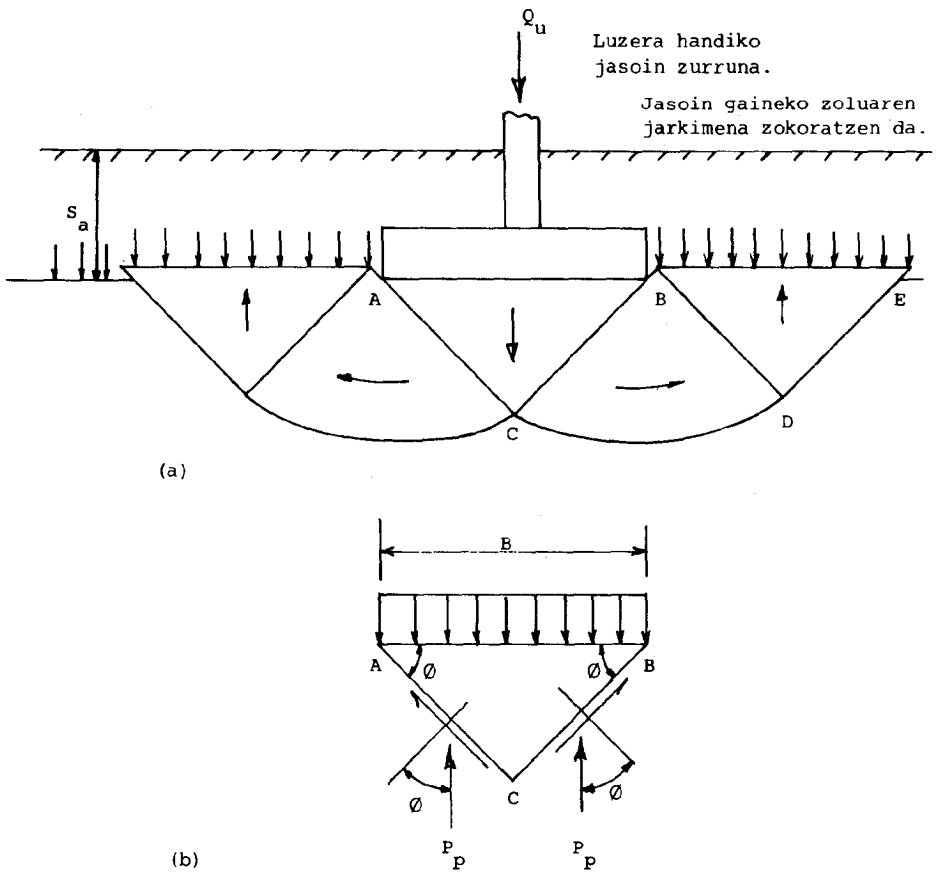
Jasoinaren azpi azpiko sokoteko indar-diagrama erakusten da 6.6(b) irudian. Oreka bertikalarentzat:

$$Q_u = 2\ P_P + 2\ C_A \sin \emptyset$$

Daukan geometriaz, $AC = B/(2 \cos \emptyset)$

Beraz, $$(q_u)\ B = 2\ P_P + B\ (c \tan \emptyset) \qquad (6.17)$$

P_P grafikoki edo analitikoki kalkula daiteke, 6.6(c) irudian erakusten den DCBE-ko indarren oreka haintzakotzat hartuz eta log-espiralaren teknikak erabiliz, baina lantxo honetan ez da egingo.



6.6 Ir. Terzaghi-ren euspen-ahalmenerako mekanismoa.

Hiru osagaitan zatitua izan daiteke P_P:

(i) P_γ, γ-ren eta Ø-ren eraginez sortzen dena, hau da, kohesiogabeko zero-gainaztaren egoerak sortzen duen P_P-ren zatia.

(ii) P_c, c kohesioaren eraginez sortutako P_P-ren zatia.

(iii) P_q, gainzamaren eraginez sortzen den P_P-ren zatia.

hau da, $P_P = P_\gamma + P_c + P_q$

Eta 6.17 ekuapenean ordeztuz zera lortzen da:

$$q_u = \frac{2}{B} (P_\gamma + P_c + P_q + \frac{B}{2} c \tan Ø) \qquad (6.18)$$

Eta hemen beheko hau ere erakuts daiteke:

$$P_\gamma = \frac{B^2}{4} (N\gamma) \quad , \quad P_c = \frac{c\ B}{2} (N_c - \tan Ø) \text{ eta } P_q = \frac{D_f\ B}{2} (N_q)$$

non, N_γ , N_c, eta N_q, Ø-ren menpeko dimentsio gabeko parametroak izanik. Parametro hauk 6.6 irudian ematen dira.

Terminoak berrordenatuz, q_u zerrenda-jasoin baten azkeneko euspen-ahalmen sendorra honela idatz genezake:

$$q_u = c\ (N_c) + P_g (N_q) + \frac{\gamma B}{2} (N\gamma) \qquad (6.19)$$

non, P_g = gainaztaren presioa = $S_a \gamma$

Hare astinak edo buztin bigunak topatzen badira, orduan porrot-era lokala jazotzen da eta ezin daiteke 6.19 ekuapena erabil. Egoera honetan c' eta Ø' parametro enpirikoak erabiltzeko aditzera eman zuen Terzaghi-k. Non,

$$\tan \emptyset' = \frac{2}{3} \tan \emptyset \qquad (6.20A)$$

$$c' = \frac{2}{3} c \qquad (6.20B)$$

Zaila da beste eite batzutako jasoinen euspen-ahalmena matematikoki analisatzea. Terzaghi-k jarraierako hurranpenak aditzera eman zituen:

Jasoin karratuentzat

$$q_u = 1.3\ c\ (N_c) + P_g\ (N_q) + 0.4\gamma\ B(N\gamma) \qquad (6.21)$$

R erradiodun jasoin zirkularrentzat

$$q_u = 1.3\ c\ (N_c) + P_g\ (N_q) + 0,6\gamma\ R(N\gamma) \qquad (6.22)$$

Ekuapen hauek jasoinpeko zoluaren azkeniko euspen-ahalmen sendorra ematen dute, jasoinaren gaineko zama guztien pisua barne delarik.

Ohiz, ingeniariari axola handiagoa zaio azkeniko euspen-ahalmen netua, hots, jasoinaren gaineko zoluaren pisua kendurik zoluaren porrota ekarriko duen zama.

Horrela,

Zerrenda jasoinarentzat,

$$q_{u\ netua} = c\ N_c + P_g(N_q - 1) + 0,5\gamma BN\gamma \qquad (6.19A)$$

Jasoin karratuarentzat,

$$q_{u\ netua} = 1,3\ c\ N_c + P_g(N_q - 1) + 0,4\gamma BN\gamma \qquad (6.21A)$$

Jasoin zirkularrarentzat,

$$q_{u\ netua} = 1,3\ c\ N_c + P_g(N_q - 1) + 0,6\ \gamma R N_\gamma \qquad (6.22A)$$

Jasoin laukizuzendarretan, Terzaghi-k $(1 + 0,3\ \frac{B}{L})$ eite--faktorea erabiltzea proposatu zuen 1,3 ordezteko 6.21 ekuapenean.

6.2.1.- Buztin Aseen Euspen-Ahalmena

Epe laburreko ebakidur jarkimenak, hau da, ebakidur jarkimen drainatu gabeak, beti eroan daroa buztin aseen euspen--ahalmena. Egoera honetan $\emptyset = 0$, $N_c = 5,7$, $N_q = 1,0$, $N_\gamma = 0$ eta Terzaghi-ri jarraituz azkeniko ahalmen netuak hauk bilakatzen dira:

$$q_{u\ netua}(zerrenda) = 5,7\ c_u \qquad (6.23)$$

$$q_{u\ netua}(karratu\ edo\ biribila) = 7,4\ c_u \qquad (6.24)$$

$$q_{u\ netua}(laukizuzendarra) = 5,7\ c_u(1 + \frac{B}{L}) \qquad (6.25)$$

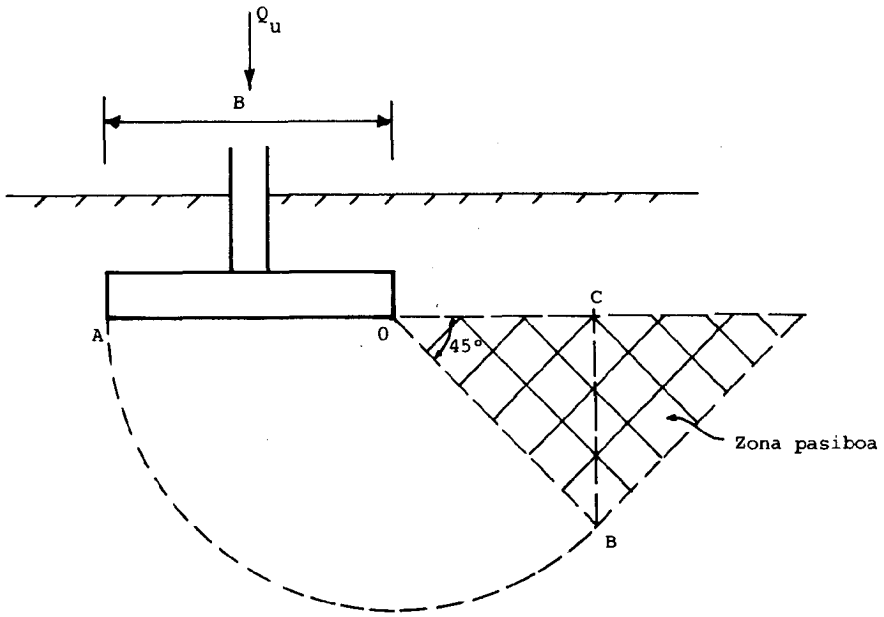
$\emptyset = 0$ denean, Terzaghi-k hartu zuen porrot-mekanismoa 6.7 irudian agertzen dena da, eta hemen log-espirala zirkulu bat bilakatzen da.

O bira-puntuaren inguruko momentuak hartuz:

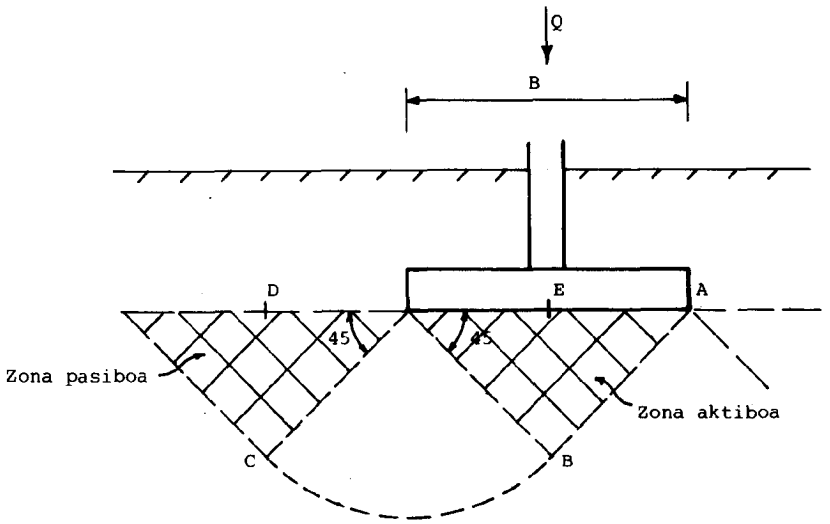
$$q_u(\frac{B}{2})^2 = (\frac{3}{4}\pi B)\ c_u\ B + \frac{2\ c_u B}{2} \times \frac{B}{2\sqrt{2}} + P_g\ \frac{B}{2} \times \frac{B}{2\sqrt{2}}$$

edo

$$q_u = 5,71\ c_u + P_g \qquad (6.26)$$



6.7 Ir. Terzaghi-ren mekanismoa (Ø = 0)



6.8 Ir. Prandtl-en mekanismoa (Ø = 0)

eta $q_{u\ netua} = 5{,}71\ c_u$ (6.27)

6.8 irudiko mekanismoan halere, Ø = 0 denean antzera erakuts daiteke $N_c = 5{,}14$ dela, eta balore hau erabiltzen da eskuarki lanean.

GLOSATERIA

Antzezgarri: representatibo, representative, représentatif.

Apalpen: asiento, settlement, tassement.

Asaldatu: Kolpe bat hartu duelako, bere hezetasuna galdu duelako edo beste edozergatik, naturan dagoen bezala ez denean hartu lagin bat, erabiltzen da adierazpen hau. "Alterar, to disturb".

Aukeragai: Aukera daitekeena balio duelako.

Aurkako orma: Muro de contención, retaining wall, mur de soutènement.

Boldro: Lur-indusketetan agertzen diren harriak, gehienetan biribilduak, 20 cm.ko neurria baino handiagoa daukatenean. "Bolo, boulder, bloc".

Bikor-neurri: Lantxo honetan sarritan erabiltzen da izen-konposizioa. Honela, pikor-neurri(en) analisia = "analisis granulométrico" = "grain size analysis".

Buiatu: Gauza batek urpean daukan pisuari pisu buiatua deitzen zaio. Beraz, pisu buiatua gauza horren aireko pisua, ken, deslekutzen duen uraren pisua da.

Burdinari: alambre, wire(made of iron), fil de fer.

Daugin ur: aguas arriba, upstream, eaux d'amont. Hemen uretako punturen bat adierazteko erabiltzen da, eta ez ibai ondoko lekuren bat.

Egartzolu: Gainetiko zamei eusten dien edo egartzen dituen zolua. Adibidez, jasoinpean, eta jasoinetik hurbil dagoen zolua.

Elkarbilerazi: Solte dauden gauza batzu elkartu espazio txikiagoa betetzeko.

Elkarsartu: Engranaien hortzak elkar sartzen diren eran sartu.

Eremu: Muga biren tartea. Ordenarik gabe, tarte horretakoak luzerak, kopuruak, etabar izan daitezke. Aipatzen den kasuan neurriak eta eiteak dira.

Gainazta: Gainzamaren antzekoa. Kalkulatzen gabiltzan estrukturak ez du zoluratzen, problema printzipaletik at dago. Kasu honetan jasoinak estaltzeko hor botatzen den ekai merkea da, baina kontutan hartu behar da.

Gauzaz: Ondo edo nahikotasunez gura dugun eragina izateko. Aipatzen den kasuan, badakigu drainapen osoa inoiz ez dugula lortuko, baina lortutzat ematen dugu geratzen den ur txikiak emaitzak ez dituelako aldatuko, hots, gauzaz amaitu dugu drainapen osoa.

Gino: Edozein neurpen egoki biren arrazoia. Adibidez: orduko metro kubikoak (m3./or.), (m/s), pesetak/dolarreko. Aipatzen den kasuan zera galde daiteke: Zein da ur-galtzearen ginoa? Orduko ehun litro da. "rate" ingelesez, batzutan "indice" gaztelaniaz.

Goiera: elevación, elevation, elévation.

Gutiendu: minimizar, to minimize

Hare haztagabe: arenas movedizas, quick sand, sable boulant.

Hurran: aproximado, approximate, approximatif.

Hutsarte: Espazio huts txikiak, poroak baino handiagoak eta edozein eitekoak izanik. Adibidez, harearen pikor arteko espazioak. "Hueco, void, cavité".

Ikaskuntza: Gai bat edo arazo bat ezagutzeko eta menperatzeko egiten den lana. "estudio, study".

Ikerzulapen: perforación de sondeo, borehole, trou de forage.

Inosberatasun: permeabilidad, permeability, perméabilité.

Inosketa: (in)filtración, seepage, filtracion.

Isurbide: aliviadero, spillway, déservoir.

Izari: Dimentsioa, neurpena denean. "Cota, measurement"-aren antzekoa.

Jardoki: deformación, strain, déformation. Deformapen hitzak esangura zabalegia daukalako erabiltzen dut hitz hau. Jardokia norabide ezagun bat batetan jazotzen eta neurtzen da.

Jarkimen: Indar bati jarkitzeko ekai batek daukan ahalmen osoa. Hitz hau ingeleseko "strength"-en esangurakidea da, eta batzutan bakarrik gaztelaniako "resistencia"-rena.

Jasoin: zapata, footing, semelle.

Jaulki: ceder, to yield, s'affaisser.

Joandako ur: aguas abajo, downstream, eaux d'aval. Hemen uretako punturen bat adierazteko erabiltzen da, eta ez ibaiondoko tokiren bat.

Keradun: "tipiko"-ren sinonimotzat erabiltzen da.

Lagin: muestra, sample, echantillon.

Lei-aupa: Leaiaren eraginez izotzak konkorrak agerterazten di tu pabimentuetan eta jasoinak gorantz bultzatzen di tu. Fenomeno honen izena lei-aupa da.

Lerro batetan luze: a lo largo de una línea, along a line.

Lupetz: limo, silt, limon.

Maze: tamiz, sieve, tamis.

mbt: metro ber biko tonak.

Oindu: apoyar, to rest, reposer.

Oldar estatiko: potencial hidráulico, static head, hauteur hydraulique.

Oldar piezometriko: altura piezométrica, piezometric head, hauteur piézométrique.

Palataska: ataguía, cofferdam, batardeau.

Porrot: fallo que causa rotura o derrumbe, failure.

Presio-oldar: Oldar piezometrikoaren berdina baina beste ikuspuntu batetik ikusita. "presure head" ingelesez.

Sareki: Sare antzeko zerbait. Sare baten irudia daukan zerbait.

Sendartu: consolidar, to consolidate, consolider.

Sendor: Netu ez dena. "Bruto, gross".

Sorpuntu: Punto de origen, point of origin.

Taxutu: estimar(calcular), to estimate, estimer.

Txikiendu: minimizar, to minimize.

Uharka: urtegi batetan ura biltzeko eraikitzen den orma.

Ulangadura: tablestacado, sheet-piling, palplanches.

Unitate-pisu: Ekai baten bolumen-unitatearen pisua. "Peso unitario, unit weight".

Zertan: Izarbel honen (Lurraren) gainazal lehorra. Zertan honen lodiera metro batzu izan daiteke.

Zedatu: confinar (encerrar), to confine.

zbk: zentimetro ber biko kiloak.

zhg: zentimetro ber hiruko gramoak.