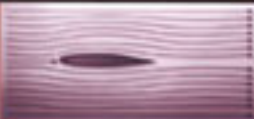


forma eta fluxua

progetto e testi: Tullio De Mauro



Autunno 1971 - Stagione 1972

W&A

viale Italia 10 - 20121 Milano

FORMA ETA FLUXUA

Arrastearen fluido-dinamika

Ascher H. Shapiro

Itzultzaileak:

Jose Ramon Etxebarria

Josu Mirena Igartua

Jon Igor Urresti

UEUko Fisika Saila

Udako Euskal **Unibertsitatea**

Bilbo, 2000

Autorea

Massachusetts Institute of Technology institutuan egin zituen bere ikasketak; 1938. urtean lizentziatu zen eta 1946.ean doktoratu. Lizentziatu ondoren irakasle ibili da institutuan bertan; gaur egun ingeniari-tza mekanikoa irakasten du.

Shapiro doktorea termodinamikan espezializaturik dago, baina abiadura handiak eta zurrusta-propultsioa agertutakoan, Bigarren Mundu-Gerran, abiadura handiko gasen dinamikari ekin zion. Gaur egun fluido-dinamikaren gai desberdinetan lan egiten du; berak dioenez, fluido-dinamikaren gaia “inoiz ez da agortuko, bizitzako eta teknologiako edozein alorrekin loturik baitago, ezustez josita, gainera”.

Bigarren Mundu-Gerrarako torpedoen garapenerako laborategiko zuzendari-lana egiteagatik, Shapiro doktorea *Naval Ordnance Development Award* saria jaso zuen eta ekarpen baliotsuaren zertifikatua eman zion Gerrarako Armada Sailak. *National Advisory Committee for Aeronautics* erakundearen zenbait azpibatzordetan parte hartu du. Gainera, *Atomic Energy Commission* eta *Technical of Advisory Panel on Aeronautics of the Secretary of Defense* erakundeetarako aholkulari-lanak egin ditu. *Project Dynamo* izeneko proiektua zuzentzen ari zela, energia nuklearrearen erabilera zibilarekin loturiko arlo teknikoak eta ekonomikoak aztertu zituen, *AEC* batzorderako.

Shapiro doktorea *American Academy of Arts and Science*, *Sigma Xi*, *Tau Beta Pi* eta *Pi Tau Sigma* taldeetako kidea da. 1960. urtean, *Richards Memorial Award* saria eman zion *American Society of Mechanical Engineers* erakundeak, “berak egindako goi-mailako lorpenengatik”.

The Dynamics and Thermodynamics of Compressible Fluid Flow izeneko liburua idatzi du, eta aldizkari zientifikoetan idazten du, askotan. Oraintsu, ingeniari-tza filmen bidez irakastea bururatu zaio. Honen ondorioz, bere ustez luzea izango den zerrendako lehenengo filma kaleratu du: *The Fluid Dynamics of Drag* izenekoa, esku artean duzun liburuaren iturria izan dena.

1960. urtean idatzitako testua.

ASCHER H. SHAPIRO

Eitea eta fluxua

ARRASTEAREN FLUIDO-DINAMIKA



«Liburu hau Hezkuntza, Unibertsitate eta
Ikerketa Sailaren laguntzaz argitaratu da»

Itzulpenari dagokionez,

© Jose Ramon Etxebarria, Josu Mirena Igartua, Jon Igor Urresti

© Udako Euskal Unibertsitatea

ISBN: 84-8438-012-2

Lege-gordailua: BI-2578-00

Inprimategia: RGM, Bilbo

Azalaren diseinua: Iñigo Ordozgoiti

Hizkuntza-zuzenketa arduraduna: Jose Ramon Etxebarria

Banatzailleak: UEU. Concha Jenerala 25, 4. BILBO telf. 94-4217145

e-mail: argitalpenak@ueu.org www.ueu.org

Zabaltzen: Igerabide, 88 DONOSTIA

Fisika Saileko ikasle guztiei

Aurkibidea

ITZULTZAILEEN HITZAURREA	15
--------------------------------	----

I	SARRERA	19
---	---------------	----

Gure asmoak — Arrastea sorrarazteko era desberdinak.

II	ZENBAIT SAIAKUNTZA PARADOXIKO	27
----	-------------------------------------	----

Haize-tunela — Lehenengo saiakuntza: abiaduraren eragina esferaren arrastean — Bigarren saiakuntza: esfera leunaren eta zertxobait laztutako esferaren gaineko arrasteen arteko konparazioa — Hirugarren saiakuntza: itxura aerodinamikoa biskositate txikiko fluidoan — Laugarren saiakuntza: itxura aerodinamikoa biskositate handiko fluidoan — Paradoxen laburpena.

III	FLUIDOEN DINAMIKAREN OINARRIZKO KONTZEPTU ETA PRINTZIOAK	49
-----	--	----

Fluido jarraituaren eredua — Fluido-partikulen gaineko indarrak — Fluido-partikuletan eragiten duten indar-motak — Gorputz-indarrak — Gainazal-indarrak — Tentsio normalak edo presioak

eragindako gainazal-indarrak — Forma-aldaketaren aurkako erresistentzia biskosoa sortzen duten ebakidura-tentsioak — Biskositatea zer den — Ez-labaintzearen ezaugarria — Presioaren eragina marruskadura biskosoan — Newton-en higidura-legea — Antzekotasun dinamikoa eta Reynolds zenbakia — Reynolds zenbakiaren jatorria — Antzekotasun dinamikoaren adibidea — Antzekotasun dinamikoko saikuntzetan lortutako emaitzak — Reynolds zenbakiaren beste esanahi garrantzitsu bat — Gorputzen gaineko indarrak.

IV BISKOSITATEA NAGUSI DUTEN FLUXUAK, REYNOLDS ZENBAKI BAXUETAN 84

Biskositate handiko zenbait material — Portaera oso biskosoaren kontzeptu orokorragoa — Reynolds zenbaki oso txikietarako Stokes-en legea — Fluidoaren dentsitatearen eragina.

V REYNOLDS ZENBAKI ALTUETARAKO ARRASTE-LEGEA 99

Arrastearen gaineko abiaduraren eragin esperimentalak — Arraste-koefizientea eta Reynolds zenbakia lotuko dituen antzekotasun dinamikoaren legea — Antzekotasun dinamikoa ereduekin eragindako frogen oinarria da.

VI MUGA-GERUZA BISKOSOA 108

Zer garrantzi du biskositateak Reynolds zenbaki handietan? — Muga-geruza — Reynolds zenbakiaren eragina muga-geruzaren hedapenean.

VII FLUXU LAMINARRA ETA FLUXU ZURRUNBILOTSUA	122
---	-----

VIII ARRASTEAREN GUTXIPENA, AERODINAMIKAREN BIDEZ	129
--	-----

Aerodinamikako esperimentuak — Bernouilli-ren printzipioa fluido ez-biskosoen fluxuaren kasuan — Biskositatearen efektua presio-banaketan — Aurkako presio-gradientearen eraginpeko muga-geruzaren geldiketa-gunea — Presio-arrastea forma aerodinamikoen eta forma ez-aerodinamikoen kasuan — Muga-geruzaren bisualizazioa — Aerodinamikako esperimentuen azalpena — Zein da forma aerodinamikoen sortzaile hobeia, natura ala gizakia?

IX PARADOXAK ARGITUZ	158
----------------------------	-----

Zergatik dakarren aerodinamikak arrastearen gehikuntza Reynolds zenbaki txikietan — Zergatik dakarren batzuetan abiadura handitzeak arrastearen gutxitzea — Zergatik gutxitzen duen batzuetan lastasunak arrastea

AURKIBIDE ALFABETIKOA	173
-----------------------------	-----

Itzultzaileen hitzaurrea

Esku artean duzun itzulpena azken bost urteotan etenka egindako lanaren ondorioa da. Itzultzaileetako batek interesgarri ikusi zuen Fisika-ikasketetan lantzen ez zen fluidoan gaiak zerbait prestatzea. Gaur egun aipaturiko ikasketetan fluidoan mekanika azaldu egiten da zenbait irakasgaietan, baina orduan ez. Fluidoan mekanikan adituak diren zenbait irakaslerekin hitz egin ondoren, eta haien esanei segituz, oinarrizko bi ezaugarriko liburuak lantzea erabaki zuen: alde batetik, fluidoan mekanikari buruzko funtsezko kontzeptuak argitu behar zituen liburuak; eta bestetik, ulerterraza izan behar zuen; hots, tresneria matematiko korapilatsuegirik erabili gabe idatzirikoa izan behar zuen.

Etenkako lanari buruz, ondokoa esan beharra dago. Aipaturiko itzultzaileak 1996. urteko uztailan egin zuen itzulpenaren lehen bertsioa. Asmoa, urte hartako Durangoko Liburu eta Disko Azokarako argitaratzea zen. Dena den, zenbait arazo izan zirela eta, lehenengo bertsio horrek ez zuen aurrera egin, eta bi urtez, gutxi gorabehera, kutxa batean sarturik, ahaztuta egon zen.

UEUko Fisika Saileko arduretako bat, betidanik, irakaskuntzarako materiala plazaratzea izan da, printzipioz originala; baina itzulpenak ere ongi etorriak izan dira. Beste ardura bat, fisika-saileko ikasleak eta irakasleak prestatzea da; bai fisikaren ikuspuntutik, eta bai euskarari begira ere. Gainera, kideen artean, zenbait momentutan, irriki berezia egon da itzulpenen munduan sartzeko. Horrexegatik, 1998an egindako bilera batean Fisika Saileko Itzulpen-taldea abian jartzea erabaki genuen. Guztira zazpi UEUkide osaturiko lan-taldea sortu genuen. Orduko taldean, esku artean duzun itzultzaileetako bik parte hartu genuen. Material-sormenean beharrak handiak ziren, baina itzulpen-talde sortu berria lan-talde moduan eskarmenturik gabekoa zenez, itxuraz lan erraza izan

zitekeenarekin hastea erabaki zen. Orduan, bi urte aurrerago egindako lana aprobetxatzea erabaki zen. Hots, taldeak itzulpena kutxatik atera eta gainbegiratu egin behar zuen, urtebeteko epean, bigarren bertsioa egiteko asmoz. Bigarren bertsio hori, UEUko zuzentzaile orokorrak gainbegiratuko zuen; hauxe da itzultzaileen artean hirugarrena, Jose Ramon Etxebarria.

Bikoteka lan eginez, bina kapitulu itzuli behar ziren. Gainera, denon artean adostatutako esamoldeak eta abar ere finkatu nahi izan ziren, baina... Koordinazio faltagatik, eta nahiz eta, agindu bezala, urtebetez lan egin, itzulpenak ez zuen argirik ikusi.

Berriro kutxara, eta are gehiago, hondorik gabeko kutxara antza denez, egindako lana galdu egin baitzen: zenbait bertsio idatzita hemendik, fitxategiren bat handik, baina koherentziarik gabe, ordenarik gabe. Lana galdutzat eman zuen taldeak.

Bizitza aurrera zihoan ...

Bitartean, hurrengo urtean, UEUk Zuzenketa-Ikastaroa antolatu zuen, eta hara! itzultzaileetako bi, ikastaroko bost ikasleen artean egoteko zortea izan genuen; jakina, ikastaro-arduraduna Jose Ramon Etxebarria zen. Aipaturiko bi ikasleok ikastaroan landu beharreko ariketa orokortzat, ditxosozko liburua lantzea erabaki genuen. Eta horrela, bien artean, hasierakoa ahaztuta bai, baina erabat galduta ez zegoen lehen bertsioa goitik behera gainbegiratu genuen. Ondoren, parte bat itzultzeaz gain, hiruron lana Jose Ramon Etxebarriak zuzendu du.

Hortaz, horixe da arrazoia, espresuki aipatuta gauden hirurok itzulpenaren egile moduan agertzeko. Dena dela, itzulpen-taldean aritutakoak aipatzea ere zilegi eta egokia denez, hemen doazkizu, ordena alfabetikoan: Xiomara Gezuraga, Edorta Karraskal, Aitziber Lasa, Ainhoa Urzelai eta Nora Zabala.

Liburuaren edukiari dagokionez, arestian esan bezala, erraz irakuriko duzun liburua duzu esku artean. Gainera, ez duzu behar izango goi-mailako ezagumendu matematikorik, erabat kualitatiboa baita den-dena. Hala ere, tresna oso egokitzen jo dugu itzultzaileok, benetan funtsezko

kontzeptuen azalpen fisikoaz eta aplikagarritasun teknikoaz jabetzeko aukera emango baitizu. Ikusiko duzun moduan, idazkera erraza izateaz gain, pedagogikoa da oso; poliki-poliki eramango zaitu, sinpleenetik korapilatsuenera, baina konturatu gabe, era ikusgarrian; saiakuntzak proposatuz, saiakuntzak aurrera eramanez eta, azkenik, aztertuz eta argituz. Bestalde, liburuaren tamaina, aurkezpen eta maketazioari dagokienez, egoki iritzi genion jatorrizko argitalpeneko erabakiak errespetatzeari. Horrela, orrialdez orrialde, euskarazko bertsioko liburuak jatorrizkoaren egitura berbera du. Argazkiak zuri-beltzean eginikoak dira, baina oso adierazgarriak, egiaztatu ahal izango duzunez.

Besterik gabe, bada, gustukoa izango duzulakoan, ekin ieazaziozu irakurtzeari!

Itzultzaileak
Bilbon, 2000ko azaroaren 6an

I. KAPITULUA

Sarrera

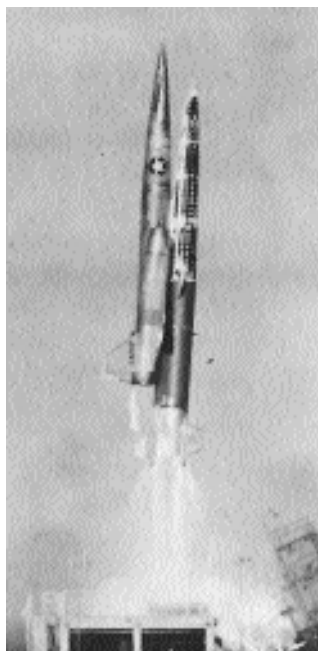
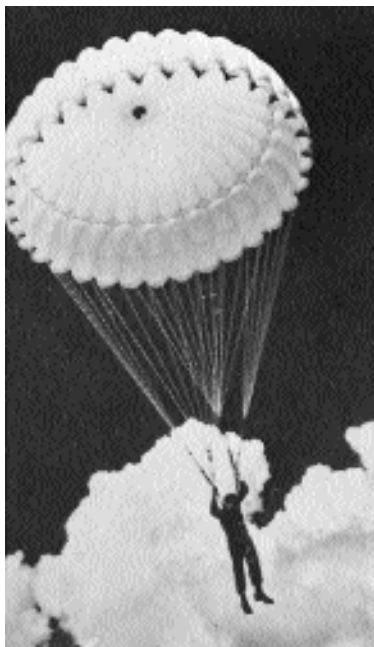
1. irudiko pertsona edo objektu guztiek —urpekaria, ontzia, erortzen ari den jauskaria, belaontzia, hurakana, ur-eskiatzailea, ur-bizietan dagoen haitza— badute ezaugarri komun bat. Kasu horietan guztietan objekturen bat, handia izan zein txikia izan, gas edo likido batean higitzen da; edo fluidoan higitzen da objektuaren inguruan. Kasu bakoitzean, mugitzen ari den objektuak erresistentzia bat jasaten du fluidoan duen mugimendua dela eta. *Arrastea* deritzogu erresistentzia horri. Kasu guztietan, kanpo-indarren bat —ur-eskiatzaileari heltzen dion sokak duen tentsioa, kasu— egin beharko da erresistentzia hori gainditzeko, edo objektua mantsotuz joango da, dezeleratuz.

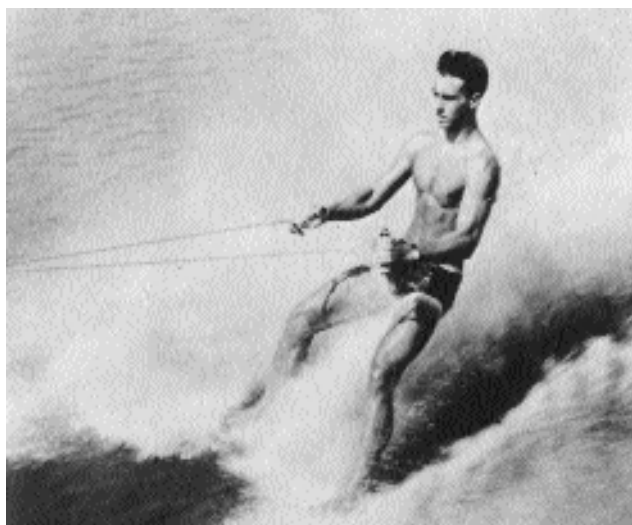
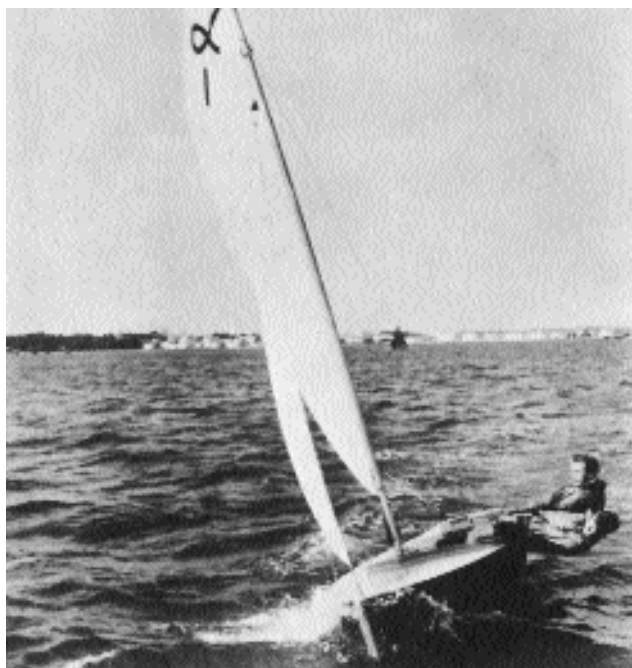
Fluidoak ditugu bai gasak bai likidoak. *Fluidoek* *dinamikak* higitzen diren fluidoak aztertzen ditu. Likidoek edota gasek, higitzean, zein indar eragiten diete *objektuei*? Edo alderantziz, nolakoa da fluidoek higidura *objektuek* eragindako indarpean? Gure inguruan, baita gure gizarte industrialean ere, likidoak eta gasak edonon aurki ditzakegunez, fluidoek dinamikaren funtsa diren oinarritzko galdera hauek modu askotan eragiten dute bizitzan eta teknikaren alor guztietan.

Galileo-k Pisako dorre inklinatuan burutu omen zuen saiakuntza famatu haren aurretik, luma metalezko bola baino geldoago eroriko zela uste zuten filosofoek, pisu txikiagoa zuelako. Orain



1. irudia. Fluidoaren dinamikak —indarren eta higiduraren arteko erlazioak likido eta gasetan— hainbat egoera desberdin gobernatzen ditu.







badakigu horrela ez dela. Luma geldoago eroriko da, beraren pisuarekin konparatuz, lumaren higidurari aireak eragindako aurkako erresistentzia metalezko bolaren kasuan baino askoz handiagoa delako.

Aurrekoa frogatzeko, airez ia guztiz hustutako hodi bertikal batean utziko ditugu erortzen luma eta altzairuzko bola. Biak aldi berean askatzen baditugu, altzairuzko bolak egiten duen une berean joko du hondoa lumak ere.

Izatez, gorputz guztiek azelerazio berbera dute hutsean, beren neurria, itxura, material edo pisua edozein izanik ere. Aire —eta beraren erresistentzia— desagertzean, luma eta bola aske eroriko dira grabitateak eragindako azelerazioaz. Lastima antzinako greziarrak ez zirela hutsa sortzeko gai, horrelako saiakuntzak burutzeko. Greziarren ustez, gorputz bat abiadura konstantez higitzeko, *etengabe* indar baten bidez bultzatu beharra zegoen. Baina Isaac Newton-ek aldarrikatutako dinamikaren lehenengo printzipio nagusiak dioskunez, gorputz bat abiadura konstantez higitzen bada, ez dago bere gaineko inolako indarrik. Greziarrek, hegan zihoazen harriak, geziak eta antzekoen higidura behatzeaz kontentatu behar zuten. Ez ziren konturatu aireak, nahiz eta ikusezin eta ukiezina izan, erresistentzia-indarra eragiten duela, zeinak jaurtitako objektua geldotzen duen, bestelako kanpo-indar batek arraste-indarrari aurka egin eta zero indar garbiko egoera sortzen ez badu behintzat.

300 urte baino ez dira pasatu, zientzialariak higitzen diren fluidoengatik inguruko nozio errealek aztertzen hasi zirenetik. Baina aurreko mendean urrats handiak eman ziren fluidoengatik dinamikaren oinarritzko ulermenean.

GURE ASMOAK

Liburu honen helburuetako bat, fluidoetan gertatzen den higiduraren kontrako erresistentziaren inguruko informazio interesgarria aurkeztea da, saiakuntzen bidez batez ere. Itxura edo forma desberdinetako gorputzekin lan egingo dugu —aerodinamikoak eta ez-aerodinamikoak, azal latzeko gorputzak eta azal leunekoak, fuselaje-itxurakoak eta hego-itxurakoak— eta era berean hainbat fluido desberdinekin: gasak, likidoak, biskositate handiko fluidoak, biskositate txikikoak, oso fluido dentsoak, fluido arrarifikatuak. Ingeniaritzako adar guztietan garrantzitsua da fluidoek higidurari eragindako erresistentzia ulertu eta auresateko gaitasuna izatea. Zein bulkada behar du ontzia edo hegazkina mugiarazten duen motorrak? Zer neurrikoa izan behar du jausgailu batek jaitsiera segurua ziurtatzeko? Zein itxura izan behar lukete txorrotada bidezko propulsaizailearen konpresorearen palek erresistentzia minimoa izateko? Zein neurritan dezeleratuko da satelite artifiziala atmosferan berriro sartzean? Zein abiaduraz barneratuko da olioia hondar-geruzan zehar? Zein neurrikoak behar dute izan olio-birfindegiko hodiekin? Zenbat ur ekar daiteke mendiko ur-biltegi batetik kanal irekiaren bidez? Dударik gabe, garrantzi praktikoa handiko galderak ditugu. Zeuk ere fluidoek erresistentziarekin zerikusia duten beste hamaika galdera pentsa ditzakezu.

Aipatuko ditugun saiakuntzak banan-banan aztertuz gero ez dirudi portaera-eredu garbirik dutenik. Are gehiago, zenbait behaketa paradoxiko agertuko zaizkigu, eta portaera-ereduren bat aukeratzekotan, portaera kaotikoa litzateke.

Aurrekoak, garrantzitsuena den gure bigarren helburura garamatza: nola aurki diezaiokegun nolabaiteko zentzua eta ordena itxurazko kaos honi, oinarritzko kontzeptu eta printzipio fisiko gutxi batzuen bidez. Beste era batera esanda, fluidoek dinamikaren oinarriak azaleratzeko tresna modura erabiliko ditugu arraste-saiakuntzak.

ARRASTEA SORRARAZTEKO ERA DESBERDINAK

Arrastea sorrarazteko modu desberdinetatik, guk, biskositateak sortutakoa erabiliko dugu bakarrik liburu honetan. Honek, dentsitate konstanteko fluidoekin lan egitera mugatuko gaitu, uhinak barrea daitezkeen gainazal askarik ez duten baldintzetara, eta fluidoarekiko elkarzutak diren indarrak jasaten ez dituzten gorputzetara. Dena den, arrastea sorrarazteko beste bide batzuk ere badaudela jakin behar duzu, hala nola:

(1) Uretan doan ontziak, konstanteki barreiatzen den grabitate-uhinen sistema sortzen du, zeinak energia zinetiko eta potentziala itsasoan barna urrunera irradiatzen duen. Itsasoari energia hau emateko, higitzen den ontziak lan mekanikoa egin behar du, urari egindako indarren bidez. Urak ontziari eragindako indar baliokide eta aurkakoari “uhin-arrastea” deritzo.

(2) Abiadura supersonikoetan edo abiadura subsoniko altuetan hegan dabilen hegazkinak, presio-uhinen sistema darama berekin, eta horrek, ontzien grabitate-uhinen sistemaren analogiaz, aire-ozeanora irradiatzen du energia. Energia-elikatze hau, higitzen den hegazkinak aireari eragiten dion indarrak mantentzen du. Indar honen aurkako erreakzio baliokidea “uhin-arraste supersonikoa” deitzen da.

(3) Goraka doan luzera finituko hegoak, bere muturretik, aire-hezetasun baldintza batzuetan ikus daitezkeen “zurrunbilo-jarraitzaile” batzuk igorri edo emititzen ditu. Luzatze konstanteko zurrunbilo-jarraitzaile hauek energia zinetikoa dute. Hegoek, zeharkatzen duen aireari konstanteki energia zinetikoa emateko, lana egin behar dute aireari eragindako indarren bidez. Indar honekiko erreakzioari “goratzeak sortutako arraste indutua” deritzo.

Hasieratik azpimarratu behar dugunez, higidura erlatiboa eta arrastea berdinak dira, gorputza, abiadura uniformeaz, geldirik dagoen fluido-ozeano batean higitzean edota, haize-tunelaren kasuan modura, fluido-gorputz handi bat objektuaren inguruan isurtzen denean. Aurrekoaren arabera, gure zenbait saiakuntzatan eredu geldikorra erabiliko dugu mugitzen den korrontean; eta beste zenbaitetan, eredu higituko da fluido geldikorrean barna. Bi baldintzak guztiz baliokideak direnez, saiakuntzen emaitzak, erabilitako saiakuntza-metodoa edozein izanik ere, berdin interpreta ditzakegu. Behatzailearen ikuspuntu-aldaketa honi —hots, batean gorputzari lotua eta bestean fluxuari lotua— “transformazio Galilearra” deritzo. Gehienetan komenigarria izaten zaio behatzaileari objektuarekin bat mugitzea, horrela, igarotako fluxu-isuria berdina izango baita uneoro. Dena den, haize-tunelean finko dagoen hegazkin-modeloarekin saiakuntzak egitea askoz sinpleagoa da, saiakuntza-tresnerian zehar hegan doan hegazkin-modeloarekin frogak egitea baino.

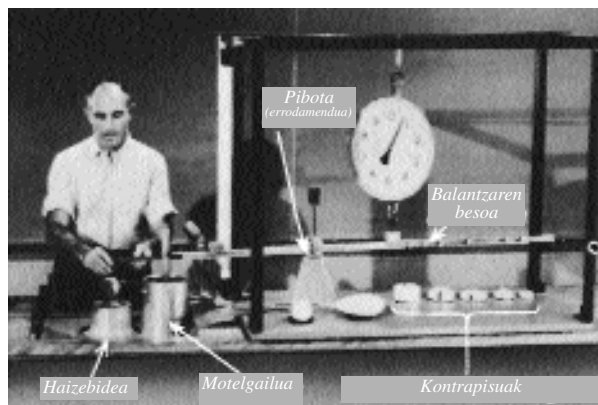
II. KAPITULUA

Zenbait saiakuntza paradoxiko

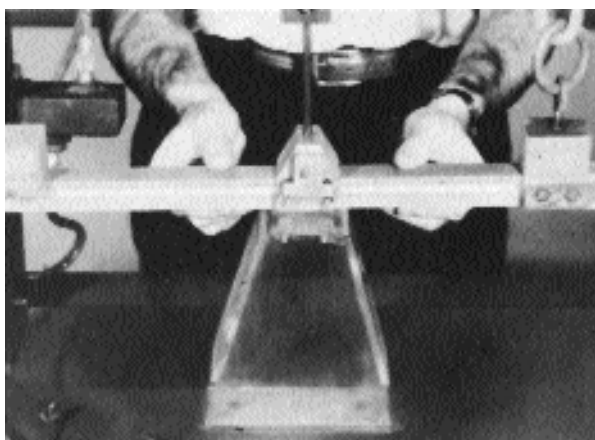
Lau saiakuntza aztertuz hasiko gara. Beren-berengi aukeratu dira, puntu bat argitzeko asmoz: behaketa esperimentalak auresanezinak dira, berauei buruz fluidoaren higiduraren dinamikaren funtsezko printzipioen arabera pentsatzen hasten garen arte.

HAIZE-TUNELA

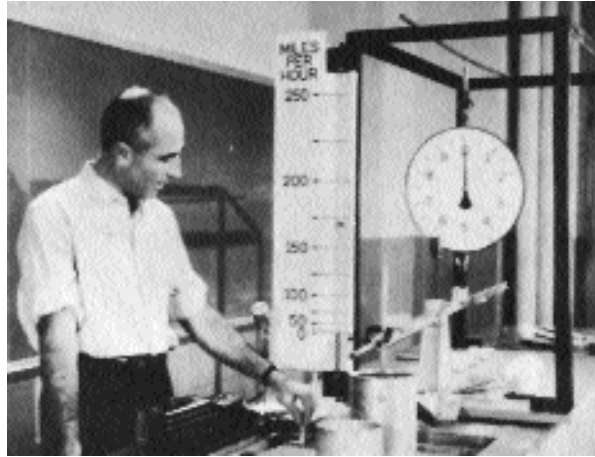
Saiakuntzak burutzeko erabili den haize-tunela 2. irudian ageri da. Azpiko ganbaratik, aire-zurrusta 230 mph-rainoko (mph $\equiv$ milia orduko) kontrolpeko abiaduran ateratzen da gorantz haizebidean zehar. Konpresore batek hornitzen du ganbara presiopeko airez. Palanka-sistemaren mutur batean modelo desberdinak jar ditzakegu aire-zurrustaren parean, 2. irudiko esferarekin egin den antzera. Balantzaren pibot modura, boladun errodamendu bat erabiliko dugu. Aire-zurrusta parean dagoen modeloan egindako goranzko arraste-indarra, balantzako besoak beheranzko teinkada moduan transmitituko du, palankaren beste muturrean dagoen malguki bidezko pisu-neurgailuaren eskalara. Hasieran, oraindik aire-fluxurik ez dagoela, besoan ezarritako kontrapisuak doitu egin daitezke, eskalan zero marka beha dezagun.



2. irudia. Haize-tunelaren muntaia. Nire eskuak modeloari (esferari) eusten dio balantzaren muturrean. Modeloaren azpian, gorantz begira, haizebidea ikus daiteke. Bertatik aterako da mahai azpian dagoen ganbarako presiopeko airea eguratserantz. Ezkerreko eskuaren azpian motelgailu biskosoa dago. Balantzaren besoa, errodamendua, indar-eskala eta kontrapisuak ere ikus daitezke.



3. irudia. Pibota (boladun errodamendua).



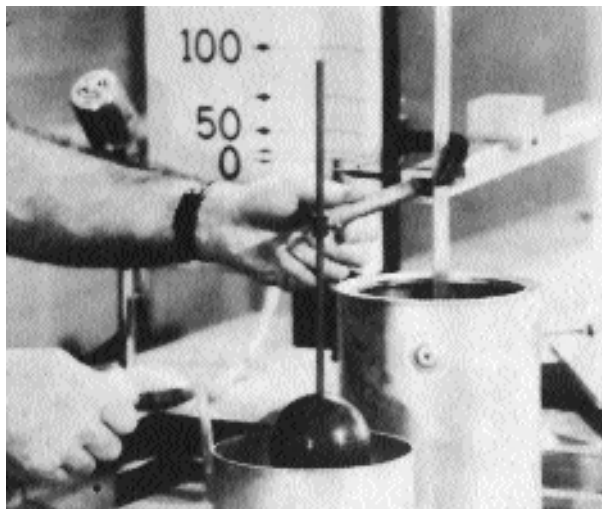
4 irudia. Eskuetan dudan hoditxoak darama ganbarako airea, abiadura-eskalaren atzean (irudian ikus ezin daitekeena) dagoen U-itxurako presio-neurgailuaren zutabe batera. Irudian ikus daitekeen neurgailuaren beste zutabearen mailak, haizearen abiadura adierazten digu zuzenean.

Ganbarako presioa egurats-presioa baino handiagoa da, eta presio-diferentziak finkatuko du aire-zurrustaren abiadura. Hodi malgu baten bidez, koloreztatutako urez betetako U-itxurako presio-neurgailu baten zutabeetako batera eramango da ganbarako presioa (4. irudia). Neurgailuaren beste zutabea eguratsera irekita dago. Presio-diferentziak desorekatuko ditu alde bietako ur-zutabeak, eta eguratsera irekita dagoen ur-zutabeak kalibraturik egon behar du, haizearen abiadura zuzenean mph-tan irakurri ahal izateko.

LEHENENGO SAIAKUNTZA:

ABIADURAREN ERAGINA ESFERAREN ARRASTEAN

Hiru hazbeteko diametroa duen esfera, balantzaren besoari lotuko diogu, aire-zurrustaren gain-gainean (5. irudia). Ondoren, haizearen abiadura linealki jasoz, arrastea neurtuko dugu (6. irudia).



5. irudia. Pilota esferikoa aire-zorrotadaren gainean.

Abiadura 80 mph-koa izan den kasuan, indarra eskalako 1,5 unitatekoa izan da. Abiadura 100 mph-koa izan denean, arrastea 2,4 unitateraino igo da. Apurtxo bat gorago, 115 mph-ko abiaduran, arrasteak 3,0 unitateko balioa hartu du. Orain artekoa oso erregularra da; espero genezakeena. Baina, gure harridurarako, abiadurak 115 mph-ko balioa gainditu duenean, arrastea gutxituz hasi da, eta 140 mph-ko abiaduran 2,3 unitateko balioa izan du soilik. Jarraian, arrastea berriro handitu da, eta 155 mph-ko abiaduran 3,1 unitateko balioa hartu du. Ondoren, arrasteak handituz jarraitu du beste inolako irregulartasunik gabe.

Aipatutako behaketak 7. irudiak laburbiltzen ditu grafikoki. Ardatz bertikalean arraste-indarra adierazi da, eta ardatz horizontalean, haizearen abiadura. Zerotik abiatuz, abiadura handituz doan neurrian, arrasteak ere gorantz egiten du, azeleratuz doan autotik eskua ateratzean gertatzen den modu berean. Baina abiadura balio kritiko konkretura heltzean, hortik gora abiadura handiagotzeak arrastearen txikiagotzea dakar. Gainera, puntu horretan, arraste-

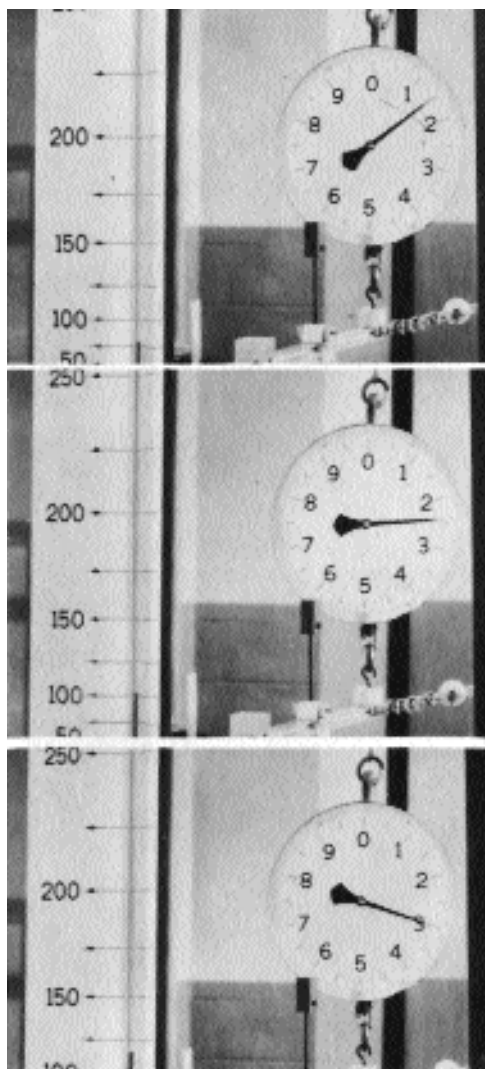
-eskalako orratzak oszilazio handiak ditu, nolabaiteko ezegonkortasunaren adierazgarri. Azkenik, arrastea poliki-poliki gorantz doa berriro, abiadurarekin bat, baina hasierako goranzko tartean zera-manaz bestelako kurba desberdin bati jarraituz.

Beraz, bi fluxu-mota desberdin daudela dirudi, abiadura-tarte jakinean batetik besterako trantsizio arina gertatzen delarik. Abiaduraren handiagotze txiki batek fluxua mota batetik bestera pasarazten duenean, bat-bateko beherapen nabarmena du arrasteak. Zein dira aipatutako fluxu-motak? Eta, egia al da abiadura handiko arrastea abiadura txikietakoa baino txikiagoa izan daitekeela?

BIGARREN SAIAKUNTZA: ESFERA LEUNAREN ETA ZERTXOBAIT LAZTUTAKO ESFERAREN GAINEKO ARRASTEEN ARTEKO KONPARAZIOA

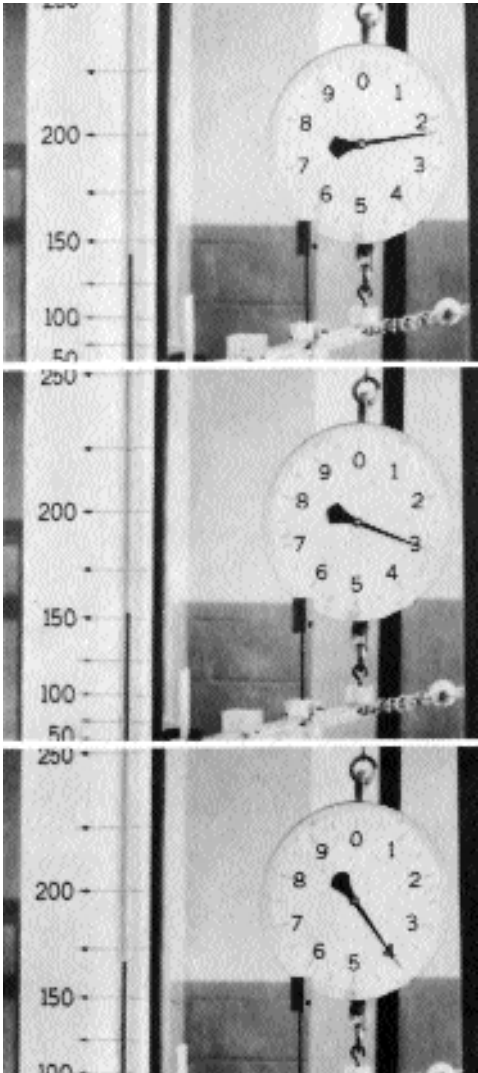
Oraingoan, haizea ganbaratik eguratsera aterako duten bi haizebide berdinekin arituko da haize-tunela (8. irudia). Modu honetan, haize-abiadura bereko eta diametro berbereko bi aire-zurrusta lortu ditugu. Saiakuntza honen helburua ez da arrastea kuantita-tiboki neurtzea, abiadura bereko haizepean dauden bi objekturen gaineko arrasteen konparazioa egitea baizik. Beraz, objektu biak luzera bereko bi beso dituen balantzaren muturretan kokatuko ditugu. Erraza da arrasterik handiena zeinek pairatuko duen beha-tzea, balantza zein aldetara desorekatzen den ikusiz.

Erabiliko ditugun objektu edo modeloak diametro bereko bi pilota dira. Urrunetik berdina dirudite, baina benetan garrantzitsua den xehetasun txiki batek desberdinduko ditu: bata beira-akabera du, hots, akabera leuna; besteak, aldiz, urratu fin batzuk ditu eta plastiko mehezko tira zirkular estu bat dauka atxikirik. Aipatutako xehetasunez gain, beira-akabera duen gainazalean, urratu txiki horiek haize-fluxuari zein arrasteari ekar diezazkieten ondorioak benetan ezustekoak dira.

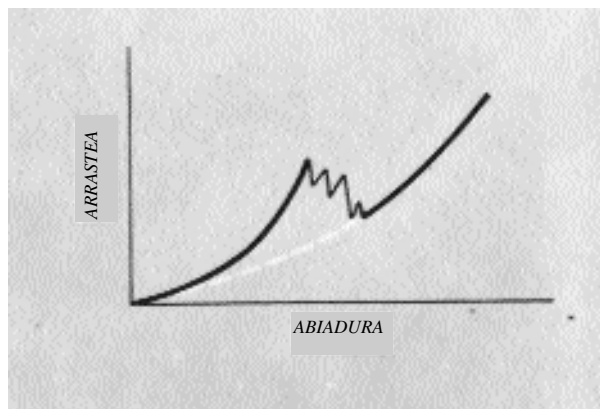


6. irudia.

Irudia	Airearen abiadura	Arraste-indarra
6a	80	1,5
6b	100	2,4
6c	115	3,0

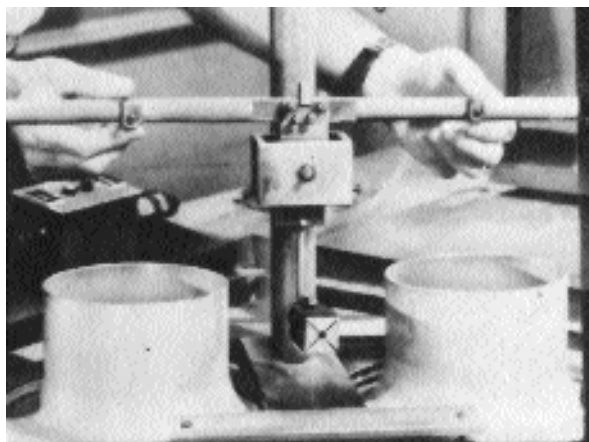


Irudia	Airearen abiadura	Arraste-indarra
6d	140	2,3
6e	155	3,1
6f	170	4,0



7. irudia. 6. irudian ageri diren saiakuntzen laburbiltze grafikoa.

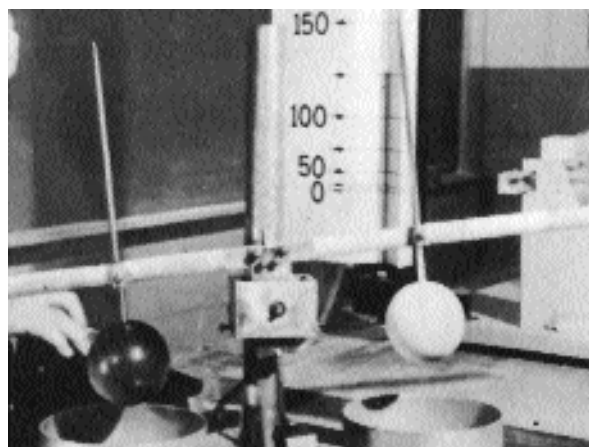
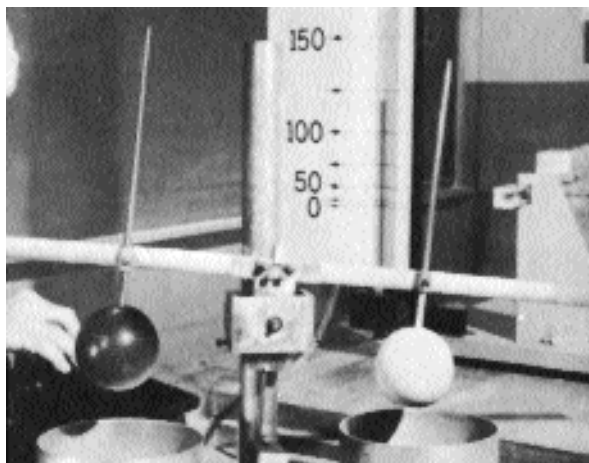
Esferak eseki ondoren, eta oraindik aire-zurrustarik gabe, balantzaren besoak orekatuko ditugu, horizontal gera daitezen. Haize-fluxua hasitakoan, eta oraindik abiadura txikia denean, 10a irudian agertzen den moduan okertuko da besoa. Irudian argi dagoenez, esfera leunaren gaineko arrastea txikiagoa izango da. Abiadura gorantz joan den neurrian, besoaren desbideratzea gero eta handiagoa izan da aipatutako norabidean. Baina bat-batean, 125 mph-ko abiadurako balioan, desbideratzea guztiz kontrakoa izatera pasatu da (10b irudia); beraz, urratuak dituen esferaren gaineko arrastea txikiagoa da. 125 mph-ko abiadura baino balio handiagoetarako, esfera latzaren gaineko arrasteak txikiagoa izaten jarraitzen du, behintzat erabilitako abiadura maximoraino, 200 mph-ko abiaduraraino hain zuzen ere. Abiaduraren balioa jaitsiz gero, arraste erlatiboaren arteko aldaketa 125 mph-ko abiaduran gertatuko da berriro ere.



8. irudia. Neure eskuak erduen bi euskarrietan ditut, pibotetik distantzia berera, haizebideen pare-parean.



9. irudia. Zertxobait laztutako esfera. Urratuek, hiru hazbete-milareneko sakonera dute, eta atzamar parean dagoen plastikozko tirak hazbete-ehuneneko lodiera du.



10. irudia. (a) abiadura txikietan —hemen 120 mph— eskuineko esfera leunak ezkerreko esfera latzak baino arraste txikiagoa du. (b) Abiadura kritiko batetik gora —hemen 125 mph— esfera latzaren arrastea, bat-batean, leunarena baino txikiagoa da.

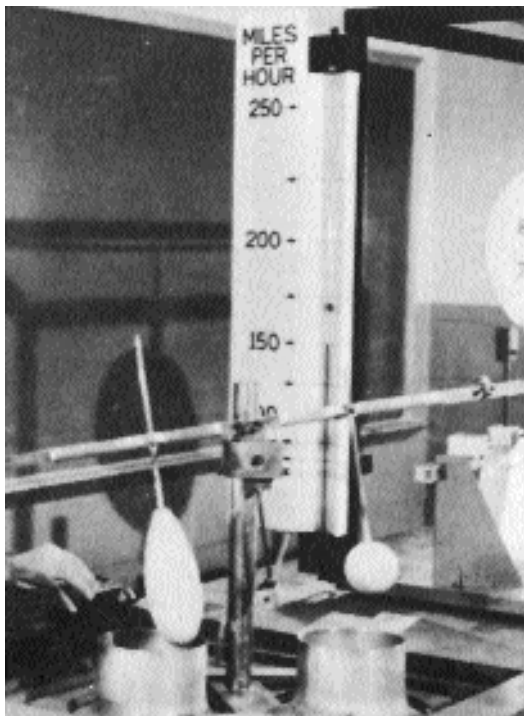
Abiadura kritiko horretan, esferetako baten, edo ziurrenik bien, inguruko fluxu-ereduan erabateko aldaketa gertatu behar dela pentsa genezake. Lehenengo saiakuntzaren arabera (6. eta 7. irudiak), bigarren saiakuntza honetan erabilitako laztutako esferaren arrastearen bat-bateko beherapena agertuko zela aurreikus genezakeen, baina aldaketa honen zergatia, eta esfera leunean zergatik gertatzen ez den, azaltzeke daude.

Gainazalaren laztasunak batzuetan arrastea txikiagotu egin dezakeela ohartzea harrigarria bada ere, are txundigarriagoa da, abiaduraren zenbait baliotarako esfera latzaren arrastea esfera leunarenaren arrastearen bostena baino txikiagoa dela konturatzea, balantzaren eskalaren bidezko behaketa kuantitatiboen ondorioz. Fenomeno naturalen munduan, baldintzen aldaketa txikiek portaeretan ere neurri bereko aldakuntzak ekarriko dituztela pentsatzeko joera dugu. Nola da posible, ukimenez ia nabarmenezinak diren urratuen moduko kausa txiki batek arrastearen balioa bost aldiz txikiagotzea bezain efektu nabarmena ekartzea?

HIRUGARREN SAIKUNTZA: ITXURA AERODINAMIKOA BISKOSITATE TXIKIKO FLUIDOAN

Ondoren, elkarrekin erlazionaturik dauden bi saiakuntza deskribatuko ditugu: bata airean gertatuko da, eta bestea, berriz, glizerinan. Airearen eta glizerinaren biskositate-balioen artean alde handia dago; hotz, berauetan murgilduta dagoen edozein material bultzatzeko edo bere forma aldatzeko, barne-marruskaduraren balioak oso ezberdinak dira. Eztiaren modu berean, nagikeriaz jarioko da glizerina pitxerretik kanpora; oster, gasak, libreki higitzen dira batetik bestera.

Oraingoan ere, airearen saiakuntza burutzeko bi haize-bideak eta beso berdineko balantza prestatuko dira haize-tunelean. Arestian aipatutako 3 hazbeteko esfera leuna, forma aerodinamikoa duen gorputz batekin alderatuko dugu (11. irudia). Geroago



11. irudia. Aerodinamikak arrastea gutxitzen du haize-tuneleko saiakuntzan. Ezkerreko eredu leunak, eskuineko eredu esferiko leunaren diametro maximo berdina du, baina itxuraz, komikigileek erortzen ari den malkoari ematen dioten forma bera du (egiazko malkoek guttiz itxura desberdina dute).

finkatuko dugu “forma aerodinamiko” esamoldearen esangura. Oraingoaz, punturik garrantzitsuena hauxe da: aerodinamikoa den gorputzaren diamentrorik handiena, esferaren diametroaren berdina izatea; eta beraien arteko ezberdintasun bakarra, lehenengoak, gutxi gorabehera, malko-tanta baten itxura izatea.

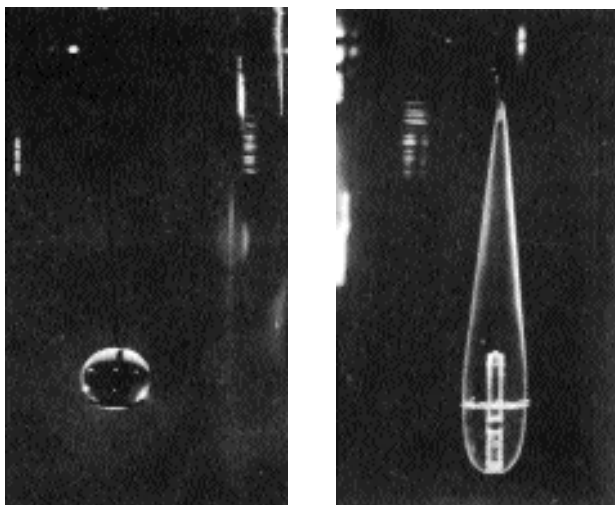
Eredu biak haize-bide bikien gainean kokatuko ditugu berriro. Oraindik haize-fluxurik ez dagoela, balantzaren besoak horizontal orekatu ditugu. Abiadura poliki igo dugu, 200 mph-ko abiadurara heldu arte, eta eredu aerodinamikoak, esferak baino arraste txikiagoa jasaten duela ikusi dugu (11. irudia). Hau, aurretik ere espero genezakeen. Aldez aurretik ziurtzat dugu itxura aerodinamikoa izatea ona dela, hau da, erresistentzia beheratuko duela horrek, nahiz eta honako galdera hau egin dezakegun: zergatik dago itxura aerodinamikoa duen gorputzeko gune kamutsa aurreko aldean eta gune zorrotza atzeko aldean, alderantziz izan beharrean? Baina hau gure arazoaren parte denez, jarrai dezagun aurrera.

LAUGARREN SAIAKUNTZA: ITXURA AERODINAMIKOA BISKOSITATE HANDIKO FLUIDOAN

Aipatutako saiakuntza-bikotearen kasu honetan, likido biskoso berbera duten bi hodi bertikal erabiliko ditugu. Hodi horietan, aldi berean modelo bana askatu eta hondora daitezen utziko ditugu, arinago zein hondoratuko den ikusteko. Modelo horiek haize-tuneleko saiakuntzan erabilitako modeloen eskala txikiko kopiak dira (12. irudia); bata esfera leuna eta bestea, itxura aerodinamikoagoa duen diametro maximo bereko gorputza.

Aurreko haize-tuneleko saiakuntzan, hasi aurretik balantza orekatu dugu, modelo biek, airean, hots, alderaketa egiteko erabili dugun fluidoan, pisu neto berdina izan zezaten. Oraingoan erabiliko ditugun bi modelo txikiak ere pisu berberekoak dira, baina ez airean, glizerinan baino, zeinean zehar hondoratuko diren. Haize-tuneleko saiakuntzan, abiadura berberean doazen gorputz biren gainean agertu diren arrasteen arteko alderaketa egin dugu. Glizerinaren esperimentuaren kasuan, aldiz, errazagoa da bakoitzari arraste berbera eragingo dion abiadurak alderatzea.

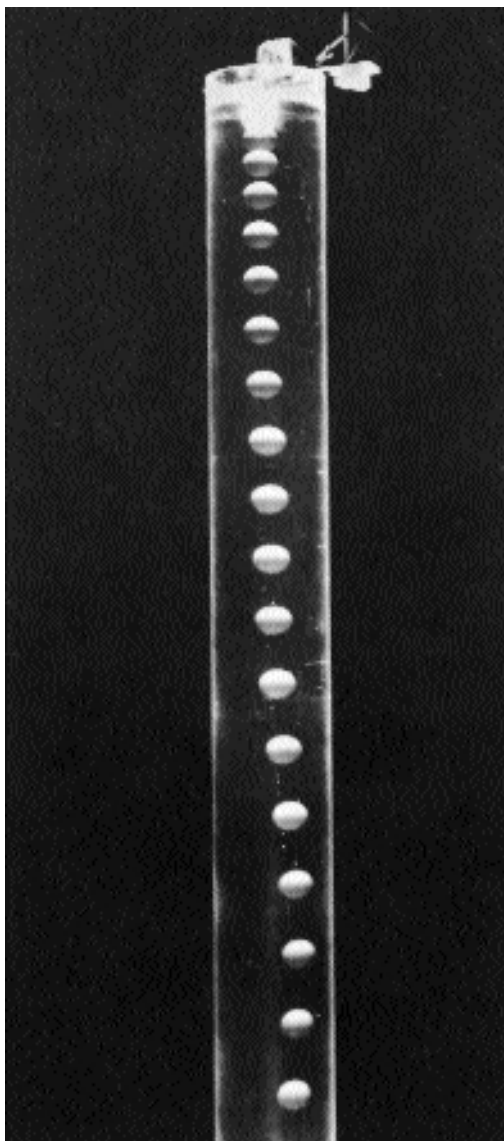
Orduan, nola ziurta dezakegu bien gaineko arrastea berdina izango dela? Edozein gorputz, likidoz betetako zutabe bertikalean



12. irudia. Laugarren saiakuntzan erabilitako ereduak.

zehar hondoratzen uztean, hasieran azeleratu egingo da, baina zenbat eta arinago higitu hainbat eta handiagoa izango da gorpuzaren gaineko arrastea, denbora-tarte baten ondoren hondoratze-abiadura konstantea izango den arte. Gauza bera gertatzen da euri-tanten edo elur-maluten kasuan, baita jauskariaren kasuan ere. Azken abiadura horri *muga-abiadura* deritzogu. 13. irudiak altzairuzko esfera glizerinan hondoratzearen prozesuaren argazki estroboskopikoa erakusten du. Esposizioen arteko denbora-tartea konstantea da, eta beraz, elkarren segidako kokapenak aldiuneetako abiaduren adierazgarri dira. Ikus daitekeenez, hasieran azelerazio-gune bat dago, poliki-poliki abiadura konstanteko gune bihurtuko dena.

Gogoraraz dezagun Newton-en higiduraren lehenengo legea: lerro zuzenean zehar eta abiadura uniformeaz higitzen ari den gorpuzaren gaineko indarren batura algebrakoak nulua izan behar du. Airearen erresistentzia eta grabitaterik ez balego, esaterako,



13. irudia.

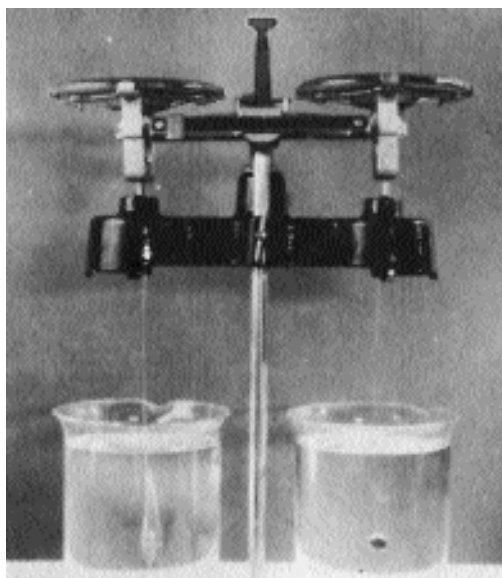
jaurtiriko pilota bat etengabe higituko litzateke lerro zuzenean, abiaduraren gorapen zein beherapen txikienik ere pairatu gabe, bere gainean indarrak ez baitago. Hala ere, muga-abiaduraren saiakuntzaren kasuan gertatu den moduan indarrak dauden kasuan (pisua eta arrastea), eta zehazki balio berekoak izan eta kontrako noranzkoan ari diren kasuan, aipatutako egoera berbera lortuko dugu. Indar netoa nulua da, eta abiadura zein higiduraren norabidea aldaezinak dira. Muga-abiadura, beraz, gorputza geldiaraziko duen arraste-indarrak beharako noranzkoa duen pisu-indarra orekatuko du.

14. irudian ikus daitekeenez, modelo biak kordelen bidez esekita daudela, glizerinan murgildu dira, beso berdineko balantzan. Modeloei pisua gehituko zaie balantzaren besoa horizontalki geratu arte. Beraz, horren arabera, modelo biek pisu berbera dute glizerinan. Ondorioz, arestian esan dugunari segituz, glizerinaz beteriko zutabeen zehar muga-abiadura berberaz hondoratuz doazenean, arraste berbera pairatuko dute. Bataren muga-abiadura bestearena baino handiagoa bada, fluxuaren kontrako erresistentzia txikiagoa ageriko du azken honek.

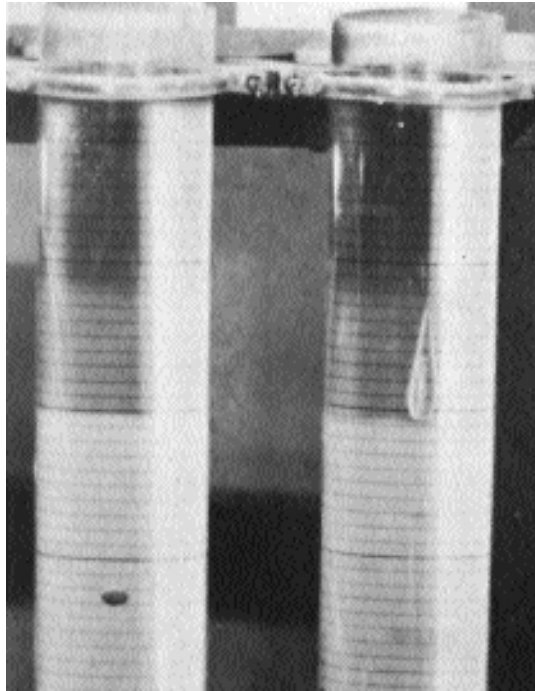
Gogora dezagun haize-tuneleko saiakuntzan forma aerodinamiko duen gorputzak aire-fluxuaren kontrako erresistentzia txikiagoa ageri duela. Abiadura berean arraste txikiagoa pairatu du. Ondokoa da geure buruari galde diezaiokeguna: erresistentzia txikiagoa ageriko ote du glizerinaren kasuan ere? ala, arraste beraren kasuan, abiadura handiagoz higituko ote da? Galderei erantzuteko asmotan, glizerinaz beteriko zutabeen goiko aldetik, modelo biak aldi berean askatuko ditugu. Biek lortu dute muga-abiadura hasiera-hasieratik. 15. irudian ikus daitekeenez, aerodinamikoagoa den gorputzaren muga-abiadura esferarena baino askoz txikiagoa da. Beraz, egindako galderari dagokion erantzuna “ez” da. Arraste berbera dutela suposatuz, gorputz aerodinamikoaren abiadura txikiagoa da. Alderantziz, abiadura berean buru-

tutako arrastearen behaketak egingo bagenitu, gorputz aerodinamikoak arraste handiagoa ageriko lukeela behatuko genuke.

Emaitza hau aire-fluxuaren saiakuntzan ondorioztatu dugunaren guztiz kontrakoa da. Bien arteko aldea glizerinaren eta airearen arteko funtsezko desberdintasunen batean ote datza, ala, oro har, gasen eta likidoen arteko desberdintasunetan ote dago? Edo, ba al dago higiduren legeak gidatzen dituen oinarritzko azalpenik, zeinaren arabera ez dugun fluidoen arteko alde kualitatiborik kontuan hartu behar?



14. irudia.



15. irudia. Forma aerodinamikodun modeloa esfera baino astiroago erortzen da.

PARADOXEN LABURPENA

Eman diezaiegun gainbegiratutxo bat orain arteko saiakuntzei. Lehenengo saiakuntzan ondokoa aurkitu dugu: abiaduraren gorapenak, kasu batzuetan, arrastearen beherapena dakar ondorioz. Bigarrenetan, bestalde, honako hau ikusi dugu: abiadura-tarte konkretuan esfera leunak arraste txikiagoa pairatu du, eta beste abiadura-tarte desberdin batean esfera latzak pairatu du arraste txikiagoa. Azkenik, hirugarren eta laugarren saiakuntzetan, zenbait baldintzaren pean, itxura aerodinamikoak emateak arrastea txikitu du, eta beste batzuetan, aldiz, handitu egin du.

Emitza hauek paradoxikoak dira, edo behintzat intuizioaren aurka doaz. Baina arazoa oraindik korapilatsua agertzen zaigun arren, egindako esperimentuak era ordenatuan eta logikoki azal daitezke. Hala ere, modu bakarra dago, ikusitako guztiari ordena eta logikotasuna ekartzeko: fluidoaren dinamikaren funtsezko kontzeptuei eta printzipioei ekitea.

Ingeniarientzako nahitaezkoa da logika hori aurkitzea, bestela ez bailirateke gai izango, hegazkinak, ontziak, propulsaileak, birfindegiak, zentral elektrikoak, suziriak, edo nolabait fluidoek zeresana duten tresnak diseinatu eta hobetzerakoan aurkituko lituzketen arazo teknikoei aurre egiteko.

III. KAPITULUA

Fluidoaren dinamikaren oinarrizko kontzeptu eta printzipioak

FLUIDO JARRAITUAREN EREDUA

Ezaguna da materia —materia guztia, solidoa, likidoa zein gaseosoa— espazio hutsez banatutako milioika molekulez osatuta dagoela. Hala ere, distantzia molekularrarekin alderatuz oso handia den eskalan, jarraitutzat eta egitura gabekotzat har dezakegu materia. Fluidoaren benetako molekula bakan guztiez aritu beharrean, egiazko fluidoaren bere “eredu fisikoa” deritzogunaz ordezkatzeari komeni zaigu. Eredu honetan ez dago ez molekularik ezta egiturarik ere. Eredu jarraitua da, baina egiazko fluidoaren osatzen duten molekula zenbatezinen portaera estatistiko berdina izan dezan, zenbait batezbesteko ezaugarri esleitu behar dizkiogu.

Eredu jarraituaren propietateetako bat fluidoaren *dentsitatea* da. Har dezagun fluido-koskor bat, orratzaren puntan erortzeke dagoen tanta baino askoz ere txikiagoa izan arren trilioika molekula dituen. Fluido-koskorari esleituko diogun batezbesteko masa-dentsitatearen definizioa fluido-koskorrean dagoen molekula guztien masa-kantitatearen eta molekulek betetzen duten bolumenaren arteko zatidura da. Beste hitzetan, dentsitatea (masa-dentsitatea, alegia) deritzon magnitudea, masa zati bolumena da.

Dinamika ikuspuntutik masa-dentsitatea propietate garrantzitsua da, fluidoak azeleratua izateko duen “inertzia-erresistentzia”-ren neurria emango baitigu. 16 librako masa duen burdinazko bola, jaurtitzailerak zero abiaduratik bere eskutik ateratzerakoan duen abiadurara azeleratzeko, bere esku eta gorputzaz, izugarriko indarra egin behar dio. Aipatutako adibidean, jaurtitzaileraren bultzada, gorputz orok duen “inertzia” propietatearen adierazgarria da. Inertzia gainditzeko eta gorputzaren abiadura aldatzeko indarra aplikatu beharrek, gorputzek “azeleratuak izateari dioten inertzia-erresistentzia” kontzeptuaren esanahia dakarte. Zenbat eta fluidoaren masa-dentsitatea handiagoa izan, hainbat eta indar handiagoa eragin behar izango diogu fluido-koskorari, azelerazio jakina har dezan; hots, fluidoak inertzia-erresistentzia handiagoa izango du azeleratua izateko.

Fluido jarraituari lotuta dagoen beste propietate jarraitu bat, puntu jakinean duen *abiadura* da. Molekula indibidualak oso modu konplexuan higitzen direnez, edozein unetan fluido-koskorreko molekulak abiadura desberdinak dituzte. Beraz, bakoitzari momentu lineal bakarra dagokio; hau da, molekulak masa eta abiaduraren arteko biderkadura-balio desberdinak dituzte. Fluidoak puntu jakinean duen abiadura, fluido-koskorra osatzen duten molekula guztien momentu linealaren eta molekula hauen masa osoaren arteko zatidura modura definituko dugu. Newton-en dinamikan erabil dezakegun batezbesteko abiadura da. Batez-besteko abiaduraren eta fluido-koskoraren masa osoaren arteko biderkadurak momentu osoa emango digu zuzenean, eta azken hau da Newton-en higidura-legeekin erlazionatutako higiduraren propietate garrantzitsua.

Geroago aztertuko ditugu fluido jarraituarekin lotutako beste zenbait propietate. Orain aipatu beharrekoa, fluido-koskor edo fluido-partikulek propietate ezberdinak izan ditzaketela kontuan hartzea da. Adibidez, ondoko adibideetan argi ikus daitekeenez, kasu bakoitzeko partikula guztiek ez dute higidura berbera: tximi-

niatik ateratzen den kea behatzerakoan, harraskan behera doan urari so egiterakoan, gela eguzkitsuan konbekzio-korronteek mugiarazten duten hautsari erreparatzerakoan, edozein zubiren zutabeen aldamenetik pasatzen den ura edo kostaldean apurtzen diren olatuak begiratzerakoan, argi ikusten da hori. Hain korapilatsuak diren higidurak ulertzea errazagoa gerta dadin —hobeto esanda, posible izan dadin—, fluido osoa ibilbide, historia eta propietate-multzo bana duten puska txikietan zatiturik balego modura hartu beharra dago. Identitate finkoa duten fluido-koskor horiei fluido-partikula deritzegu.

FLUIDO-PARTIKULEN GAINKO INDARRAK

Fluido-partikula guztiek Newton-en higiduraren legea betetzen dute. Beraz, fluxuari buruz, bere osotasunean, asko ikas genezake partikula tipikoaren dinamika aztertuz. Eman dezagun, kanilatik ateratzen den ur-zurrustako ur-puska bat, bere jarraipena errazteko asmoz, gorritz tindatzeko aukera dugula. Mentalki, fluido-partikula hau inguruko uretatik isola dezagun eta pentsa dezagun partikula horren gainean eragiten duten indarretan, eta indar hauek zein eragin duten beraren higiduran, kanilatik atera, harraskan ibili eta hustubidetik behera doanean.

Ideia hau konkretuago bihurtzeko asmoz, izugarri handitutako eskalan, gure fluido-partikula ordezkaturako duen eta eskuan har dezakegun zurezko kuboaren erabil dezakegu. Gure kuboari (edo fluido-partikulari) indar desberdin ugarik eragiten dioten arren, bi mailatan sailka ditzakegu: gorputz-indarrak eta gainazal-indarrak. Ondorengo taulan adieraziko ditugu:

FLUIDO-PARTIKULETAN ERAGITEN DUTEN INDAR-MOTAK

1. GORPUTZ-INDARRAK (distantziara eragiten dute)
 - a) Grabitatorioa
 - b) Elektrikoa
 - c) Magnetikoa

2. GAINAZAL-INDARRAK (kontaktu zuzenez eragiten dute)
 - Tentsio normala (presioa)
 - Ebakidura-tentsioa edo tentsio tangentiala (marruskadura biskosoa)

GORPUTZ-INDARRAK

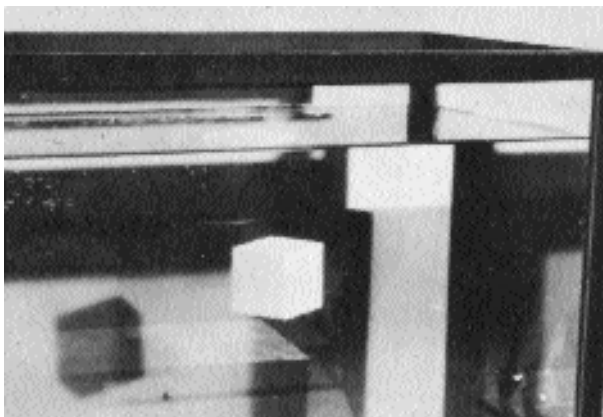
Gorputz-indarrak distantziara eragiten duten indar grabitatorioa, indar elektrikoa eta indar magnetikoa dira. “Indar-eremuek” sortutakoak dira. Materialean bertan eragina dutenez, gorputz-indarrak deritzegu. Aztertutako fluido-partikula, orekan dagoen biltegiko ur-partikula baltz (16. ir.), beheantzen bultzatuko luke grabitateak. Baina, argi dago biltegiko partikulek ez dutela higidurarik (esan bezala, biltegiko fluidoak orekan baitago), eta beraz, beste indarren batek orekatu beharko du partikulaaren pisua, azeleratua izan ez dadin.

GAINAZAL-INDARRAK

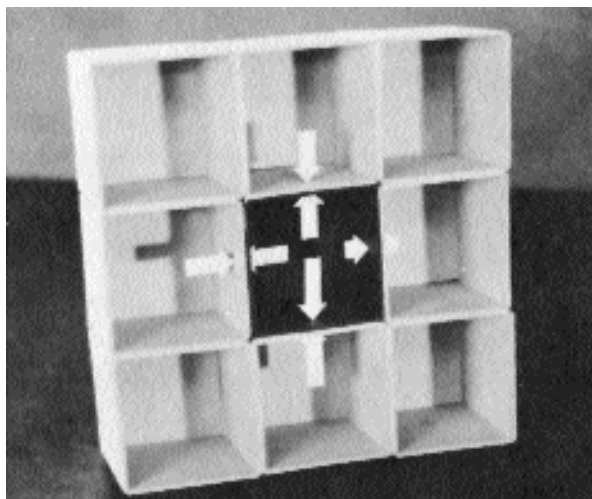
Aipatutako beste indar horiek, gainazal-indarrak dira. Gorputz-indarrek distantziara eragiten duten moduan, gainazal-indarrek partikulaaren eta inguruaren arteko kontaktu zuzenez eragiten dute. Benetan ukitzen duen inguruko fluidoak, zuzenean bere sei aldeetako gainazalean eragiten dio kuboari, izenak berak adierazten

duen moduan. Indar *normalak* gainazalarekiko elkarzutak dira; mahai gainean geldirik dagoen metalezko kubo pisutsuaren behealdeari, mahaiak gorantz egiten dion bultzadaren modukoak. *Ebakidura*-indarrak berriz, gainazalarekiko tangentialak dira, hau da, beren norabidea gainazalarekiko paraleloa da; mahai gaineko metalezko kubo pisutsua guk bultzatu ondoren, mahaiak berak kuboaren azpiko aldeari eragiten dion marruskadura-indarraren moduan.

Indar normalei dagokienez, kuboaren alde bakoitzean, kuboaren barneko fluidoak eta kanpoko fluidoak indar bereko aurkako indarrak eragiten dituzte (17. ir.).



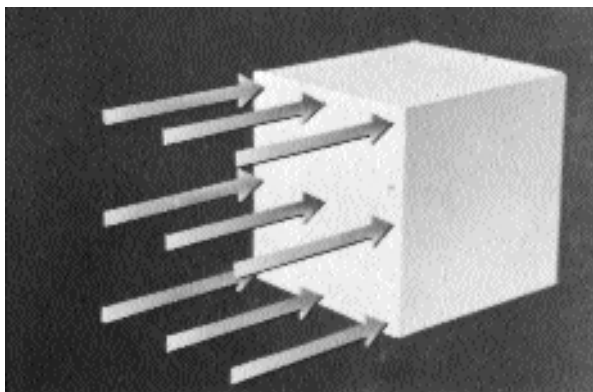
16. irudia. Zurezko blokeak, biltegian dagoen fluido-partikula ordezkatzeko. Azeleraziorik gabeko blokea denez, grabitatea orekatzen duen indarrak egon behar du.



17. irudia. Partikula beltzaren mugetan, partikula beltzaren eta bere inguratzen duten partikula argiagoei balio bereko baina aurkako gainazal-indar normalak eragiten dituzte.

TENTSIO NORMALAK EDO PRESIOAK ERAGINDAKO GAINAZAL-INDARRAK

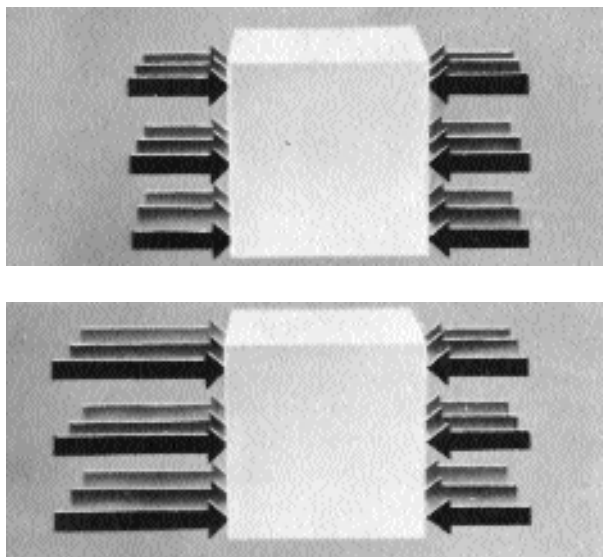
Azter dezagun fluido-partikula tipikoa ordezkatzeko duen kuboaren gainazal bat. Oraingoan, gainazal horrekiko eragin elkarzuta duen indarra baino ez dugu kontuan hartuko. Zenbat eta gainazalaren azalera handiagoa izan, hainbat eta handiagoa izango da haren gaineko gainazal-indarraren balioa; beraz, komenigarria da gainazal-unitateko indarra kontsideratzea. Indar normalaren eta azaleraren arteko zatidurari, tentsio normal edo presioa deritzogu. Adibidez, 20 libreako indarra 10 hazbete karratuko azalerako gainazalean aplikatuz gero, batezbesteko tentsioa edo presioa 2 libra hazbete karratuko baliokoa da. 18. irudian, gainazalean zehar hedaturik dagoen tentsioak duen izaera banatua, gezi askoren bidez adierazi da.



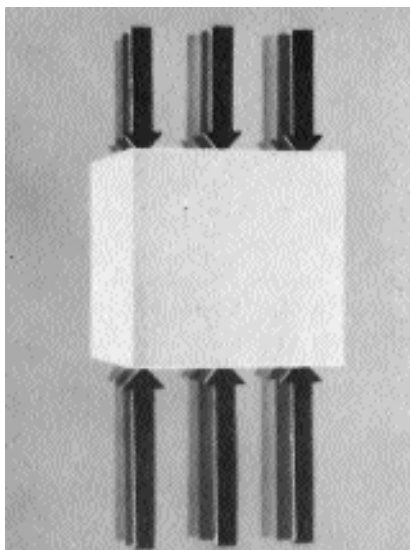
18. irudia. Irudikatutako geziek, fluido-partikula tipikoa ordezkatzeko kuboaren alde batean eragiten duen presio edo tentsio normala erakusten dute.

Orain, demagun beste aldeko gainazalean ere 20 librako indarra aplikatu dugula (19a ird.). Beraz, indar biek elkar orekatuko dute eta partikula azeleratuko duen indar netorik ez da egongo. Aurrekoak ondorio garrantzitsua agertzen digu, hots, edozein gainazaletan aplikatutako presioak ez duela, berez, partikularen dinamikaren gaineko eraginik. Aldiz, demagun 30 librako indarra aplikatu dugula bigarren gainazalean (19b ird.). Kasu honetan, partikula azeleratuko duen 10 librako indar desorekatu netoa dago. Fluidoaren higidurari dagokionez behintzat, *presio-diferentziak* dira kontuan hartu beharrekoak, eta ez presioa bera. Fluidoaren bolumen-unitateko presio-indar netoa, aurrez aurre dauden gainazalen arteko presio-diferentziarekiko proportzionala da, eta gainazalen arteko distantziarekiko alderantziz proportzionala. Distantziarekiko presio-alaketaren neurriak, *presio-gradiente*a deritzogunak, presioaren eremuak fluidoaren higiduran duen eragin garbia finkatuko du.

Itzul gaitezen biltegian geldirik dagoen partikula ordezkatzeko erabili dugun kubora (20. ir.). Kuboaren pisua —lurraren eremu grabitatorioak kuboan eragiten duen indarra—, kuboaren behealdeko presioa goialdekoa baino handiagoa bada oreka daiteke. Hots, oreka estatikoa izateko, presio-gradientea beharrezkoa da eta presioa sakonerarekin handituko da. Behealdean eta goialdean eragiten duten presioen arteko diferentziak, fluidoan murgilduta dagoen gorputzaren gaineko bultzada sortzen du. Arkimedes-en printzipioa izenaz ezagutzen dena, oraindik oinarrikoagoa den legearen ondorio logikoa da. Guk geuk ere erraz nabari dezakegu sakonerarekin bat dagoen presioaren

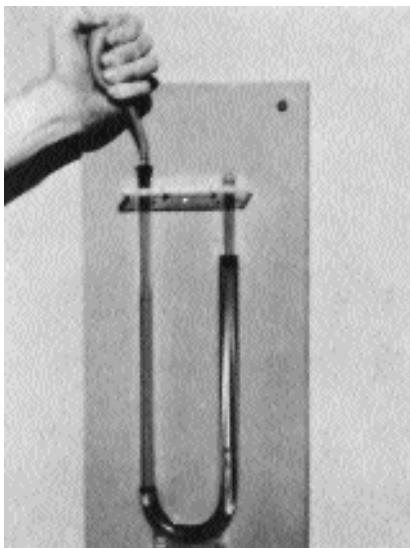


19. irudia. (a) Aurrez aurre dauden gainazaleko presioak berdinak direnean, ez dago partikula azeleratuko duen indar netorik, eta presioaren balioak ez du garrantzirik. (b) Aurrez aurre dauden gainazaleko presioak berdinak ez direnean, partikula azeleratuko duen indar netoa dago.



20. irudia. Geldirik dagoen fluido-partikularen pisua, behealde eta goialdeko gainazaletako presioen arteko diferentziak orekatzen du.

handitze hori —presio-neurgailu ezin hobeak diren tinpanoen bidez—, uretan hondoratzean. Presioa sakonerarekin handitzearen eragina, presaren horma apur dezakeen indar suntsitzailea izan daiteke, edo beste aldetik, itsasontziak ur gainean iraunarazteko beharrezkoa duen indar laguntzailea.

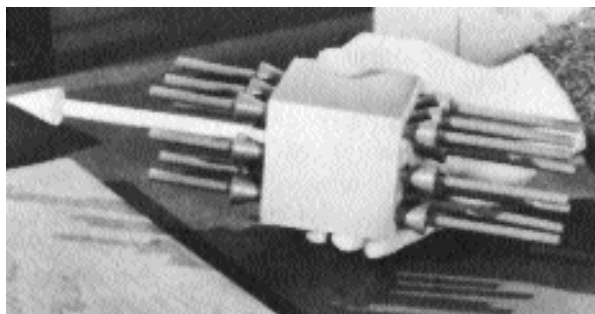


21. irudia. U-itxurako manometroa presio-diferentziak neurtzeko erabiltzen da. Likido-zutabe desorekatuaren pisua, zutabearen zeharkako sekzioak jasaten duen presio-diferentziak orekatzen du.

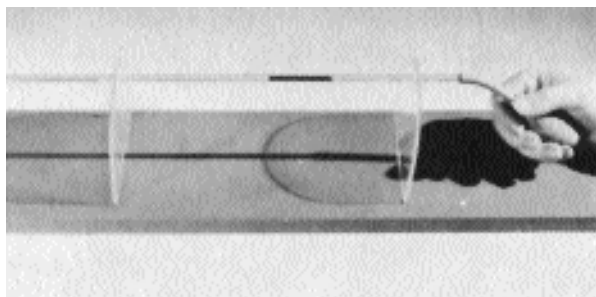
Gorputz-indarren eta gainazal-indarren arteko oreka estati-koaren beste adibide bat, lehenengo saiakuntzan erabili dugun eta presioa, edo hobeto esateko, presio-diferentzia neurtzeko erabili ohi den U-itxurako hodiz egindako manometroa da. 21. irudian ikus daitekeenez, eskuineko hodi-muturra eguratsera irekita dago. Ezkerreko hodi-muturrean presio handiagoa aplikatzean, maila-diferentzia agertuko da. Oreka estatikoan, eskuineko likido-zutabe desorekatuaren pisua, zutabe beraren behealdeko presio handiaren eta goialdeko egurats-presioaren arteko diferentziaren bidez oreka-tuko da.

Har dezagun berriro, fluido-partikula ordezkatzeko duen blokea, eta demagun orain presio-diferentzia norabide horizontalean dugula, alde bateko presioa bestekoa baino txikiagoa delarik (22. ird.). Grabitateak beheraka eragiten du, eta beraz, ez du indar horizontalen orekatzean inolako eraginik. Presio-indar netoak, hau da, aurkakoak diren presioen diferentziak, azelerazio horizontala ekarriko du, Newton-en higiduraren legeari jarraituz. Gezi handiak (22. ird.) azelerazioaren magnitudea adierazten du.

23. irudiak saiakuntza adierazgarria erakusten du. Beirazko hodi horizontalean dugun likidoan, likido-zatitxoa bat koloreztatu dugu. U-itxurako hodiaren eskuinaldea eguratsera zabalik eta ezkerreko aldeak gomazko poltsatxo txikira ematen du. Gomazko poltsatxoa presionatzerakoan, ezkerraldeko presio-handitzeak likido-apurra, ia ikusezin bihurtzen duen abiaduraz, eskuinerantz azeleratuko du.



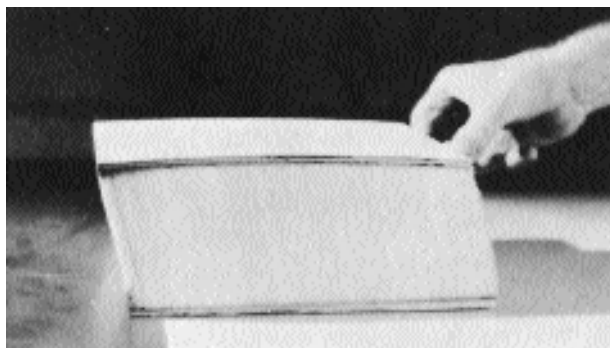
22. irudia. Aurrez aurre dauden gainazalen presio-diferentziak dakarren azelerazioa adierazten du gezi zuria.



23. irudia. Orekatu gabeko presio-gradienteak eragiten duen azelerazioa erakusteko saiakuntza sinplea.

FORMA-ALDAKETAREN AURKAKO ERRESISTENTZIA BISKOSOA SORTZEN DUTEN EBAKIDURA-TENTSIOAK

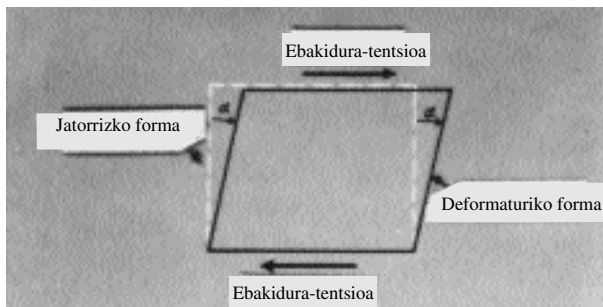
Orain arte, fluido-partikularen aurpegiekiko eragin elkarzuta duten gainazal-tentsioak aztertu ditugu soilik. Are gehiago, fluido-partikula, zurezko blokearen modura, zurruntzat hartu dugu, eta beraz, biratu eta desplazatu arren, itxuraz deformatzen ez dela kontsideratu dugu orain arte. Egia esan, partikulek forma-deformazio handiak paira ditzakete eta pairatzen dituzte, askotan goma-aparrak baino errazago (24. ir.). Dena den, goma-aparraren modu berean, fluido-partikulek forma-deformazioaren aurkako erresistentzia dute. Baina, solidoak eginiko erresistentzia, distortsio-mailaren arabera bada, fluidoaren forma-aldaketaren kontrako erresistentzia distortsio-abiaduraren menpekkoa da. Deformatua izateko erresistentzia-magnitudearen adierazgarri den fluido-propietateari *biskositatea* deritzogu. Zenbait fluidok, urak esaterako, biskositate erlatibo txikia dute, eta beste batzuk aldiz, arto-siropak edo melazak esaterako, biskositate handia dute.



24. irudia. Indar tangential edo ebakidura-indar handiak aplikatuz gero, goma-aparrezko blokeak deformazio handiak paira ditzake.

BISKOSITATEA ZER DEN

Ondoren, biskositatearen esanahia zehatzago eta kuantitatiboki finkatuko dugu. Demagun hasieran kubo-itxura duen fluido-puska deformatu dugula (25. ird.). Deformazio hori neurtzeko, hasieran bi aldeek zuten angelu zuzena (lerro etena) eta bukaeran alde berek duten angelu zehiarraren (lerro jarraitua) arteko α (alfa) angelua erabiliko dugu. Erresistentzia biskosoa, zeharkako deformazioa abiadura jakinean sorrarazteko egin beharreko ebakidura-tentsioak



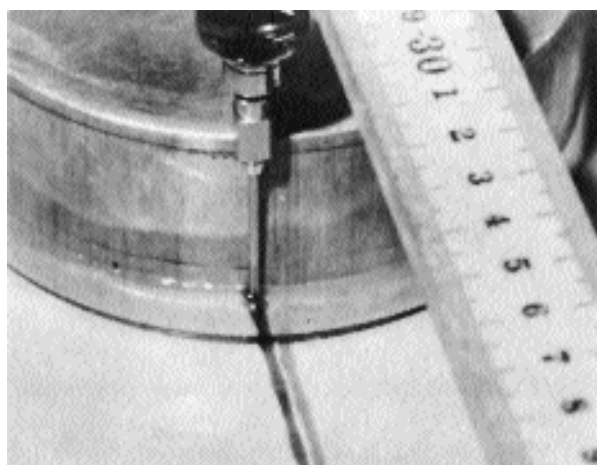
25. irudia. Biskositatearen definizioa.

edo tentsio tangentialak emango digu. Fluidoaren biskositatea, aipatutako gertakari bien erlazio modura definituko dugu, “kausa” edo “ondorioa” edozein izan daitekeelarik:

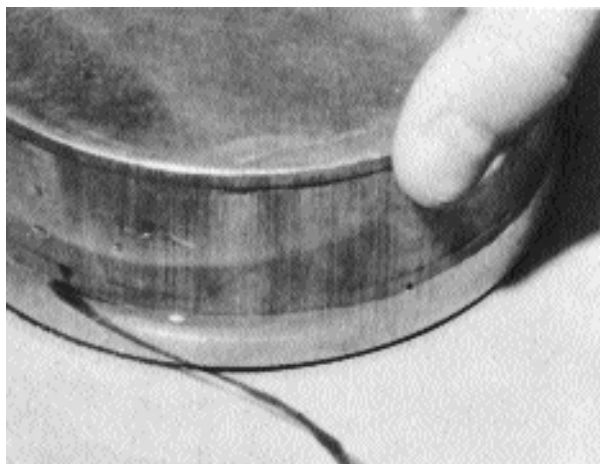
$$\text{Biskositatea} = \frac{\text{ebakidura-tentsioa}}{\alpha \text{ angeluaren aldaketa-abiadura}}$$

EZ-LABAINTZEAREN EZAUGARRIA

Biskositateari buruzko beste ezaugarri garrantzitsu bat ezagutu behar zenuke: solidoaren gainazala ukitzen dagoen fluido ezin da gainazalarekiko labaindu. Aurrekoaren ondorio harrigarri baina egiazkoa ondokoa da: gainazalaren material-motak —egurra, metala, beira zein plastikoa izan— ezin du fluidoaren portaera biskosoa edo fluidoan zeharreko higiduraren kontrako erresistentzia aldatu. Honek galdera interesgarria dakarkigu. Ezaguna da urak ez duela argizaria “bustitzen”; argizarizko gainazalean ura isurtzean, ura ez da gainazalean zehar hedatuko, baizik eta, nolabait esatearren, “uzkurtu” egingo da eta ia esferikoa den forma hartuko du. Testuinguru horretan ura argizarian “itsasten” ez dela esan ohi da. Beraz, etxeko edozein hodiren barnealdean argizarizko estaldura jarri gero, presio baxuagoa behar izango al zenuke abiadura jakinez hodian zehar ura zirkularazteko? Ez! Aipatutako bustidura-fenomenoa gainazal-tentsioarekin lotuta dago, eta argizarizko estaldura duen hodiak fluidoaren eta solidoaren mugen arteko higidura erlatiborik ezaren legea bete egingo du. Beraz, biskositatearen testuinguruan ura argizarian *itsatsi* egingo da.



26. irudia. Fluidoak solidoaren mugarekiko labaintzen ez direla erakusteko saiakuntza. (a) Tresneria. (b) Orratz hipodermikoaz fluidoan markatutako lerroa.



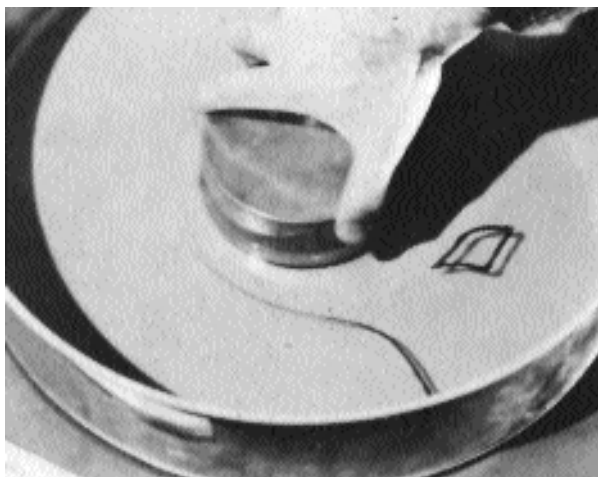
(c) Barneko zilindroa biraraztean fluido-lerroaren puntak zilindroan itsatsirik dirau. (d) Tentsio biskosoek fluidoan zehar hedatuko dute barneko zilindroaren higidura.



27. irudia. Fluidoaren ebakidura-deformazioak. (a)
Partikula-lauki markatu berria.

26a irudian glizerinaz betetako ontzi zirkularra agertzen da. Ontziaren erdian, biraraz daitekeen zilindroa dago. Orratz hipodermikoaren bidez, koloreztatutako glizerinazko lerroa markatuko dugu fluidoaren zenbait partikula identifikatzeko (26b ird.). Barneko zilindroa biraraztean, bere gainazala ukitzen dagoen fluido gainazalarekin bat eginik higituko dela ikus daiteke (26c ird.), eta, beraz, ez dago labainketarik. Tentsio biskosoen eraginez, zilindroaren aldamenean ez dagoen fluido higitu egingo da, baina zilindrotik zenbat eta distantzia handiagoa dagoen, hainbat eta abiadura baxuagoz.

27. irudian lauki-itxura duen fluido-partikula markatu dugu orratzaren bidez. Berriro ere, barneko zilindroa biraraztean, partikula horrek paralelogramo-forma emango dion ebakidura-deformazioa jasango du (27b ird.). Ontziko partikula guztiek jasango dute deformazio hori. Biskositatearen eraginez, fluidoko partikulek



(b) Barruko zilindroak bira egitean, partikula-laukia paralelogramo bilakatzen da. Indar tangentialak behar dira holako ebakidura-deformazioa abiadura jakinean sortzeko.

deformazioaren kontrako erresistentzia agertuko dute, eta, beraz, barneko zilindroa abiadura jakinez birarazi nahi badugu, momentua aplikatu beharko diogu.

Aipatutako printzipioan oinarriturik dagoen biskositate-neurgailua erakusten da 28. irudian. Motor elektrikoak ezaguna den abiaduraz birarazten du ontziko fluidoan murgildurik dagoen zilindroa. Zilindroa birarazteko beharrezkoa den momentua, malgukiaren bidez neurtzen da, eta eskalan irakurtzen da. Abiadura, momentua eta zilindro birakorraren dimentsioa erabiliz, barneko zilindroaren gaineko ebakidura-tentsioa zehazteaz gain, ebakidura-deformazioaren abiadura ere kalkula daiteke. Hauek dira, hain zuzen ere, 59. orrialdeko formularen biskositatearen balioa kalkulatzeko behar ditugun balioak.



28. irudia. Biskositate-neurgailu komertziala.
(Brookfield Engineering Co.)

PRESIOAREN ERAGINA MARRUSKADURA BISKOSOAN

Fluidoaren marruskadura biskosoak espero ez den beste propietaterik ere badu. Solido biren arteko marruskadura-erresistentzia, ukipeneko presio normalaren menpekoea da. Mahaiaren gainean dagoen liburua bultzatuz gero, liburua mahaiaren kontra zenbat eta indartsuago sakatu, marruskadura-erresistentziaren balioa hainbat eta handiagoa izango da. Baina fluidoetan agertuko den erresistentzia biskosoa ia-ia presioarekiko independentea da. Agertuko duen menpekotasun bakarra, fluido-partikulen forma-aldaketaren abiadurarekikoa da. Adibidez, hodian zehar higituko den urak agertuko duen marruskadura-erresistentzia ia berbera da, uraren hodiaren hormaren kontrako presioa 10.000 libra hazbete karratuko baliokoa denean, zein 1 libra hazbete karratukoa denean, fluxuaren abiadura berbera dela emanik. Gaur egun, onartuta dago likidoetako ebakidura-tentsio biskosoek ez dutela likidoaren presioarekiko menpekotasunik. Baina hau ez da ez begi-bistakoa. Leonhard Euler-ek berak —gaur egungo fluido-dinamika arrazionalaren aitak—, hodian hormetako marruskadura-tentsioak hormetako presio normalaren menpekoak zirela uste izan zuen, solido biren arteko Coulomb-en marruskadura-koefizienteari gertatzen zaion modu berean.

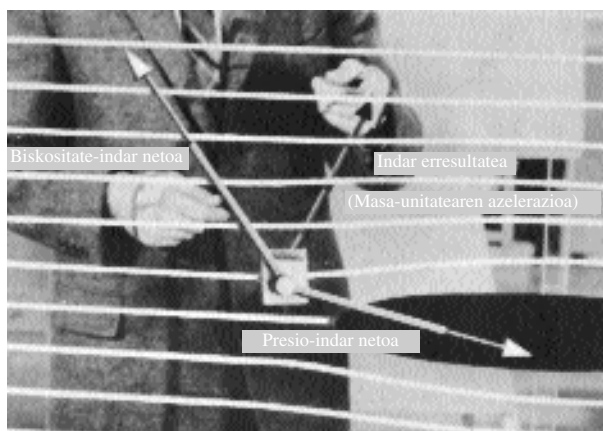
NEWTON-EN HIGIDURA-LEGEA

Jada prest gaude orain arte aipatutako indarrek —gorputz-indarrek, presio-indarrek eta biskositate-indarrek—, fluidoaren higiduran duten eraginari buruz hausnarketa egiten hasteko.

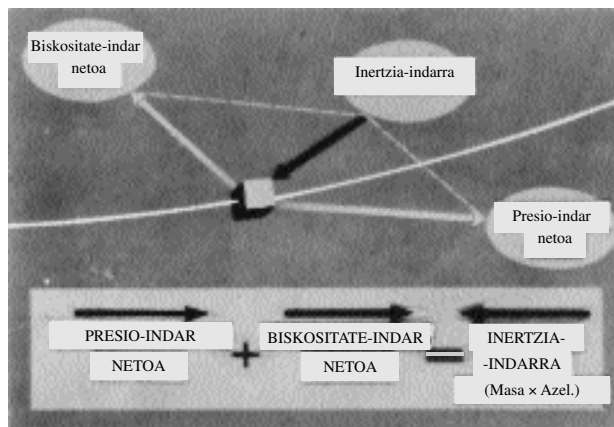
Lehenik, esan dezagun gure saiakuntzetan ez dugula grabitate kontuan hartu behar. Bigarren kapituluko lau saiakuntzetan, fluidoaren pisu grabitatorioak sakonean sortutako presioaren gehikuntzak objektuen itxurazko pisua gutxitzen duen bultzada sortu du. Dena den, guk neurtu duguna pisu netoa izan da, eta, beraz, aipatutako saiakuntza guztietan grabitatea automatikoki hartu dugu kontuan. Beste gorputz-indarrei dagokienez, elektri-

koak eta magnetikoak, ez dute saiakuntzetan eraginik izan. Horren guztiaren ondorioz, gainazal-indarrak baino ez ditugu kontuan hartu behar, hots, presio-indarrak eta biskositate-indarrak.

Gainazal-indar horiek biek fluido-partikularen higiduran duten eragina, Newton-en higiduraren legeak ematen digu. Indar biak bektoreak dira, hots, beren ezaugarriak zehazteko, norabidea eta magnitudea ezagutu behar ditugu. Bi indarren arteko batura bektoriala, hau da, bien arteko erresultantea, paralelogramoaren legea erabiliz lortuko dugu (29. ird.). Indar erresultante horren balioa partikularen masaren eta azelerazioaren arteko biderkadura da; masa-unitateko partikularen kasuan, azelerazioa bera zuzenean. Aldiuneko indarrek sortutako aldiuneko azelerazioek, ibilbidearen hurrengo unean partikulak izango duen higidura zehaztuko dute, eta horrela bere ibilbidearen une guztietan. Bide batez, esan dezagun partikularen higiduraren norabideak ez duela zertan azelerazio-bektorearen norabidearekin bat etorri, ezta bi indarren bektoreen norabideekin ere.

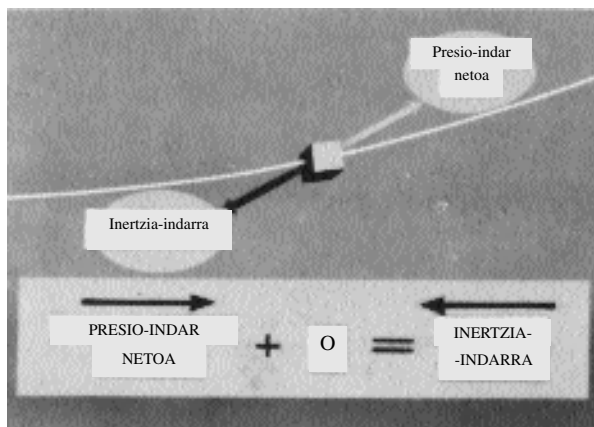


29. irudia.



30. irudia.

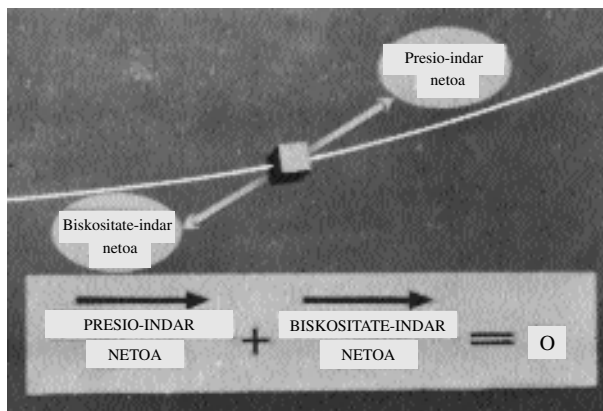
30. irudiak indarren paralelogramoa eta Newton-en higidura-ren legea erakusten du. Eskuinaldeko gaiari, masaren eta azelerazioaren arteko biderkadurari, *inertzia-indarra* deritza. Normalean, inertzia-indarrari esleitutako bektorearen noranzkoa azelerazio-bektorearen aurkako noranzkoan adierazten da. Hori, indar inertzialaren kontzeptuarekin bat dator; hots, azeleratua izateari masak egindako erresistentzia adierazten du. Noranzkoen hitzarmen honen arabera, inertzia-indarrak, biskositate-indar netoa eta presio-indar netoaren batura bektoriala orekatu behar du. Beste hitz batzuetan, hiru indarren arteko —presio-indarra, biskositate-indarra eta inertzia-indarra— bektore-baturak nulua behar du izan.



31. irudia. Indarren paralelogramoa eta Newton-en higiduraren legea, biskositate-indarrak arbuigarriak direnean.

Gure helburua ez da fluidoetako fluxua ulertzeko matematika asko erabiltzea. Nahikoa da ondoko hiru kantitateen arteko orekaren kontzeptuan zertxobait sakontzea, benetan asko ikasteko: presio-indar netoa, biskositate-indar netoa eta inertzia-indarra. Izaera desberdin eta korapilatsuetako fluidoetako fluxu-fenomenoen ulermena, egoera bakoitzean hiru indarren garrantzi erlatiboa desberdina dela konturatzean datza.

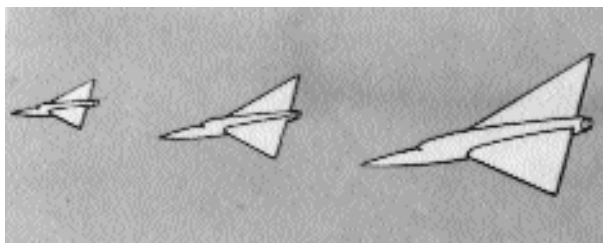
Adibidez, demagun oso biskositate baxuko fluidoa dugula. Orduan, abiadura-eskala jakinean higidura aztertzean, biskositate-indarrak oso txikiak izango dira indar inertzialekin alderatuz. Kasu honetan, helburu praktikoetarako, biskositate-indarrak guztiz arbuigarriak izango dira, eta ondorioz, presio-indarraren eta indar inertzialaren arteko orekatzea ematen da. Newton-en ekuazioak bi gai baino ez ditu (31. ird.), eta bektore-diagraman indar biek elkar anulatu behar dute.



32. irudia. Indarren paralelogramoa eta Newton-en higiduraren legea fluido oso biskosoen kasuan.

Biskositate txikiko fluidoaren ondoren, azter ditzagun orain biskositate handiko fluidoak. Abiadura-eskala jakinean agertuko diren biskositate-indarrak hain izango dira handiak, ezen fluidoaren azelerazioarekin lotuta dauden indar inertzialak guztiz estaliko dituzten. Helburu praktikoei dagokienez, indar inertzialak izango dira orain arbuia daitezkeenak, eta ondorioz, presio-indarraren eta biskositate-indarraren arteko oreka soilak eratuko zaigu (32. ir.). Bektore-diagraman, aipatutako bi indarrek berdinak eta kontrako noranzkodunak izan behar dute.

Erabilitako bi muga-kasuez hausnarketa egitea lagungarri gerta daiteke, biskositate-indarraren eta indar inertzialaren garrantzien arteko erlazioak fluxu-mota sailkatzen lagunduko digulako. Gainera, honek ondorio erabilgarriagoetara eramango gaitu, ondoren ikusiko dugunez.



33 irudia.

ANTZEKOTASUN DINAMIKOA ETA REYNOLDS ZENBAKIA

Indarren arteko erlazioaren garrantzia *antzekotasun dinamiko*a deritzogun kontzeptuarekin dago loturik. 33. irudian tamaina desberdineko zenbait objektu agertzen dira. Hala ere, objektu guztiek forma berbera dutenez, geometrikoki antzekoak direla esango dugu. Hegazkinen eta itsasontzien eskalara egindako modeloak, tamaina errealekoen antzekoak dira geometrikoki.

Demagun tamaina desberdinekoak baina geometrikoki antzekoak diren modeloen multzoarekin zenbait arraste-saiakuntza egin dugula. Antzekotasun geometrikoa dela eta, saiakuntzan erabilitako modeloei, beren tamaina adieraziko duen dimentsio bakar bat esleitzen diezaiekegu, beren *luzera* esaterako. Egin beharreko saiakuntza bakoitzean fluxuaren *abiadura* desberdina izan daiteke. Gainera, saiakuntzetan *fluido* desberdinak erabil ditzakegu; airea, ura, olio, etab. Fluidoaren higidurari dagokionez, propietate mekaniko garrantzitsuak ondokoak dira: lehenik *densitatea*, zeina fluidoaren inertiaren neurria den, eta bigarrenik *biskositatea*, zeinak forma-distortsioaren kontrako fluidoaren marruskadura-erresistentzia finkatuko digun. Ohiko tenperaturetan, airearen eta uraren aipatutako propietateen balioak adierazi dira 34. irudian. Taula berean, saiakuntza desberdinetako *luzera* eta fluxuaren

abiadurak idazteko zutabeak ere agertzen dira. Dentsitatea eta biskositatea aldatu diren modu berean, luzera eta abiadura ere tarte zabaletan alda daitezke.

Luzera, abiadura, dentsitatea eta biskositatea aldatuz gauzatu ditzakegun saiakuntzen kopurua infinitua da, izatez. Gainera, saiakuntza horiek guztiak, bata bestearekiko fisikoki guztiz desberdinak direla dirudi; galipota, merkurioa, airea edo kerosenoa bezalako fluido desberdinak erabil ditzakegulako; oinbetearen hamar milioirenetik ehunka oinbeteko tartean luzera desberdinak izan ditzakegulako; eta abiadura ere, orduko hazbetetik, segundoko ehunka oinbetetara alda daitekeelako. Oro har, elkarren arteko erlaziorik gabeko saiakuntzak dira. Demagun, eginiko bi saiakuntza edo gehiagotan, geometrikoki antzekoak diren kokapenetan, neur-tutako indarren orekatzeari parte hartzen duten kantitateen —biskositate-indar netoa, presio-indar netoa eta inertzia-indar netoa—

LENGTH	SPEED	FLUIDS	DENSITY	VISCOSITY
1 m	1 m/s	Air	1.2	0.00018
1 m	1 m/s	Water	1000	0.01

34. irudia. Geometrikoki antzekoak diren zenbait modelorekin, antzekotasun dinamikoaren printzipioa ulertzeko egindako saiakuntza-multzoan erabilitako aldagai garrantzitsuenen taula.

arteko zatidurak balio berberekoa direla, modeloen magnitudeak berdinak izan ez arren. Saiakuntza berezi horiek *dinamikoki antzekoak* direla esan ohi da. Newton-en dinamikari dagokionez behintzat, saiakuntza berdinak dira.

Luzera, abiadura, dentsitatea eta biskositatearen arteko konbinazio berezi horiek, zenbaki-balio bera ematen duten kasuan, eta kasu horretan soilik, geometrikoki antzekoak diren gorputzekin egindako saiakuntzak dinamikoki antzekoak direla esan dezakegu. Konbinazio berezi hori *Reynolds zenbakia* da.

$$\begin{aligned} \text{Reynolds zenbakia} &= \frac{\text{Dentsitatea} \times \text{Abiadura} \times \text{Luzera}}{\text{Biskositatea}} \\ &= \frac{D \times V \times L}{B} \end{aligned}$$

Izen hori Osborne Reynolds ingeniari-zientzialariaren omenez eman zaio, berak eman baitzuen ideia lehena arrastoa, XIX. mendearen bigarren erdialdean.

REYNOLDS ZENBAKIAREN JATORRIA

Fluxuaren inguruko saiakuntza-multzotik, geometrikoki antzekoak diren gorputzekin egindako edozein saiakuntza zehazteko, nahikoa da V abiadura, L gorputzaren luzera, D fluidoaren dentsitatea eta B fluidoaren biskositatea ezagutzea.

Ikuspuntu berezia erabili behar dugu orain. Fluido-partikula bakoitzean eragina duten indarren balio zehatzak kontuan hartu beharrean, indar horien neurri orokorraren “magnitude-heinaren” estimazioarekin konformatuko gara. Oso zehatza ez izateak ez gaitu gehiegi kezkatu behar. Esaterako, arkakusoaren indarra ontzaren milarenekoetan neurtzen den arren, lokomotorraren indarra milaka toneladatan neurtzen da. Nahiz eta ez dugun esan arkakusoak ontzaren zenbat milareneko indarra duen edo lokomotorrak zenbat toneladako indar zehatza duen, lasai baieztatzeko beraien indarren arteko erlazioa 10^9 “heinekoa” dela, hots mila milioi bat ingurukoa. Magnitude-ordenaren ikuspegiarekin ez gara magnitudeen balio zehatzez arduratuko, eta zuzentzat emango dugu koma hamartarra leku egokian kokatzen badugu.

Gure saiakuntzetako fluido-partikula tipikoan eragina duen indar inertzialaren balioa partikularen masaren eta azelerazioaren arteko biderkadurak finkatuko du. Definizioaren arabera, bolumen-unitateko masa-kantitatea D dentsitatea da, eta partikularen bolumena luzera-eskalaren kuboaren proportzionala da; beraz, masa DL^3 -ren proportzionala da. Azelerazioa, abiadura-aldaketaren eta aldaketa gertatu deneko denbora-tartearen arteko zatidura da. Gorputzaren inguruan fluidoak izango duen azelerazioaren eta dezelerazioaren aldaketak, V abiadura beraren magnitude-ordena-koak izango dira. Denbora-tartearen ordena, V abiaduraz partikula tipikoak L luzera zeharkatzeko behar duen denbora izango da;

hots, L/V . Beraz, azelerazioaren magnitudea V zati L/V delakoaren proportzionala da, hau da, V^2/L -ren proportzionala. DL^3 masaren eta V^2/L azelerazioaren arteko biderkadura ondokoa da:

$$\text{Indar inertziala} \sim DL^2V^2$$

non $\sim$ ikurrak proportzionaltasuna eta magnitude-heina adierazten duen.

Biskositate-indarraren balioa, ebakidura-tentsio biskosoaren eta eragina duen gainazal-azaleraren arteko biderkadurak ematen digu. Fluido-partikularen azalera, bere luzeraren karratuaren proportzionala da, hau da, L^2 -ren proportzionala. Tentsio biskosoa bestalde, B biskositatearen eta L luzerarekiko abiadura-aldakuntzaren proportzionala da. Azken hau S/L magnitudearekiko proportzionala denez, ondoko hau idatz dezakegu:

$$\text{Biskositate-indarra} \sim BVL$$

Biskositate-indarraren eta indar inertzialaren arteko zatidura egin eta gaiak sinplifikatu ondoren:

$$\frac{\text{Indar inertziala}}{\text{Biskositate-indarra}} \sim \frac{DL^2V^2}{BVL} \sim \frac{DVL}{B}$$

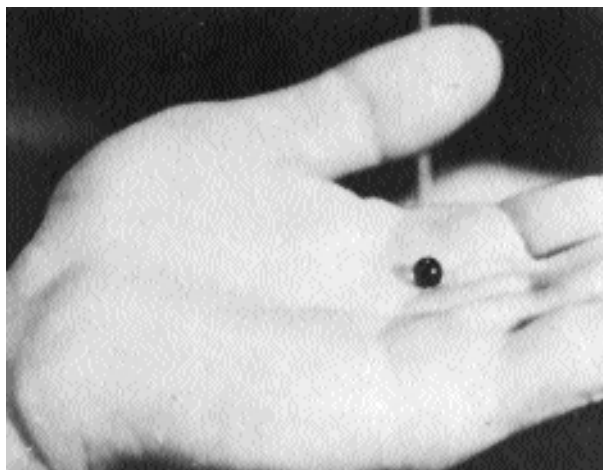
zeina aurretik definitu dugun Reynolds zenbakiaren adierazpena den.

Reynolds zenbakiaren adierazpena numerikoki zehatza den edo ez alde batera utziz —eta kasurik onenean batezbestekoa izango litzateke, bi indarren arteko erlazioa fluxuaren puntu bakoi-tzean desberdina baita— inongo duda-izpirik gabe ziurta dezakegu ezen bi saiakuntza dinamikoki antzekoak izateko, Reynolds zenbaki berdina izan behar dutela. Are gehiago, D , V , L eta B

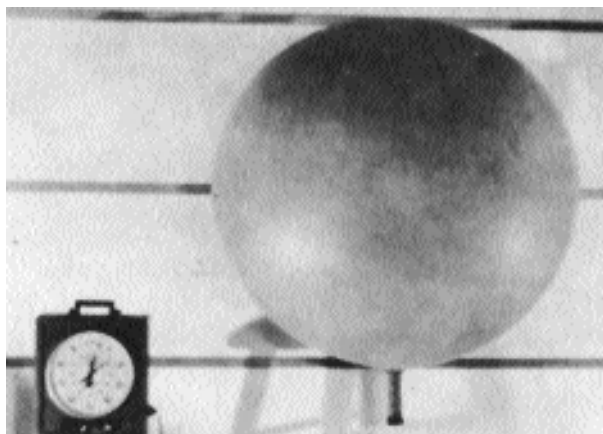
magnitudeetarako unitate-sistema egokia aukeratuz, Reynolds zenbakia dimentsio gabea, hots, unitate gabea izatea lortzen badugu, eta L luzera neurtzeko objektuaren dimentsio esanguratsua aukeratzen badugu, orduan bere zenbakizko balioak ere esanahia izango du. Esaterako, $1/10$ eta 10 balioen arteko Reynolds zenbakiak, indar inertziaiek eta biskositate-indarrek, biek garrantzia dutela adieraziko du. Milarenetik beherako Reynolds zenbakiak, indar inertzialak arbuia ditzakegula adierazten du. Azkenik, milatik gorako Reynolds zenbakiaren kasuan, biskositate-indarrak arbuiatuko ditugu, nahiz eta geroago ikusiko dugunez, horiek ezin izango ditugun guztiz arbuiatu, bereziki fluxuaren eta gorputzaren arteko mugaren inguruan.

ANTZEKOTASUN DINAMIKOAREN ADIBIDEA

Antzekotasun dinamikoaren ideia finkatzeko, saiakuntza esanguratsu bat egingo dugu. Geometrikoki antzekoak diren bi modelo erabiliko ditugu, biak esferikoak. Bata, $0,6$ cm-ko diametroan plastikozko bolatxo da (35. ir.). Bestea berriz, 100 cm-ko



35. irudia.



36. irudia. Helioz betetako globo handia, muga-
-abiaduraz airean igotzen.

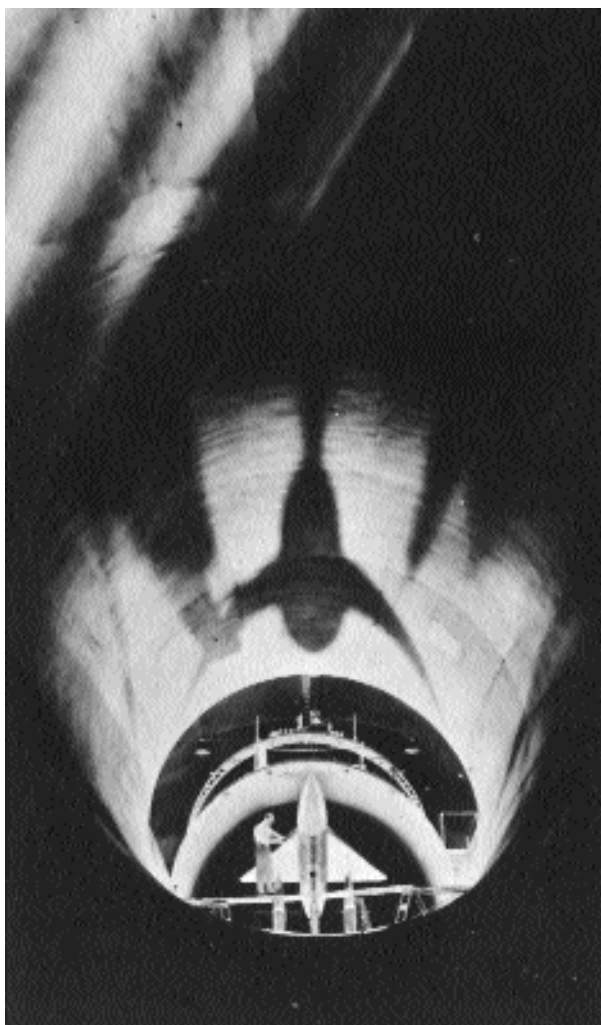
diametroa duen helioz betetako globoa da (36. ird.). Globoari pi-
suak gehituz zenbait saiakuntza egin ditugu (36. ird.), zeintzuetan
goranzko muga-abiadurak balio desberdinak hartu dituen. Horieta-
riko batean muga-abiadura 5,4 cm/s-koa izan da. Plastikozko bola
uretan hondoratzen uztean, bere muga-abiadura 55 cm/s-koa izan
da.

Saiakuntza bakoitzean izandako dentsitatea, abiadura, luzera
eta biskositatea ondoko taulan idatzi ditugu:

***ANTZEKOTASUN DINAMIKOKO SAIKUNTZETAN
LORTUTAKO EMAITZAK***

Luzera	Abiadura	Fluidoa	Dentsitatea	Biskositatea	Reynolds zenbakia
100	5,4	Airea	0,0012	0,018	36
0,6	55	Ura	1,0	0,89	37

$$\text{Reynolds zenbakia} = \frac{\text{Luzera} \times \text{Abiadura} \times \text{Dentsitatea}}{\text{Biskositatea}}$$



37. irudia. Antzekotasun dinamikoaren printzipioak, eskala errealeko hegazkinaren portaera aurrerata ahalbidetzen du, haize-tunelean egindako saiakuntza eroso eta erlatiboki merkearen bidez.

Balio hauek Reynolds zenbakiaren adierazpenean ordezkatzuz, 36 eta 37 zenbakizko balioak lortu ditugu. Beraz, saiakuntza horien kasuan, Reynolds zenbakien balioek ehuneko gutxi batzuen aldea baino ez dute. Orduan, saiakuntza hauek —bata gasean, bestea likidoan; bata handia, bestea txikia; bata igotzen, bestea jaisten— guztiz desberdinak diruditen arren, antzekoak dira izatez; dinamikoki antzekoak. Ondoren ikusiko dugunez, antzekotasun dinamikoak inplikazio praktiko garrantzitsuak dituen aparteko ondorioa ateratzea ahalbidetzen du; heliozko globoak airean jasango duen arraste-indarra *aurre*san dezakegu, saiakuntza desberdinetan plastikozko bolatxoak uretan duen arraste-indarra neurtuz.

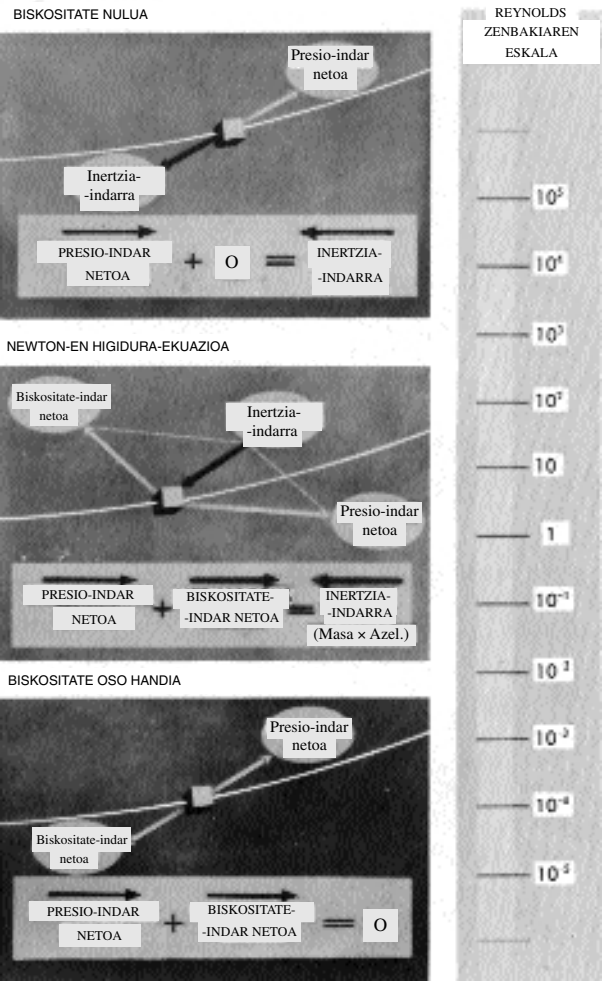
Antzekotasun dinamikoaren ideia hau haize-tunelaren eta antzeko saiakuntzen oinarri-oinarrian dago. Beraz, haize-tuneletan hegazkinen modeloekin egindako saiakuntzen bidez, benetako hegazkinak pairatuko dituzten indarrak auresatera eramango gaitu antzekotasun dinamikoak (37. ird.).

REYNOLDS ZENBAKIAREN BESTE ESANAHI GARRANTZITSU BAT

Hurrengo orrialdeko 38. irudian ikus daitekeenez, Reynolds zenbakiak beste ikuspuntu batetik ere laguntzen digu gure arrazoitzean. Indarren balantzea egitean, ikusi dugunez, Reynolds zenbakia indar inertzialen eta biskositate-indarren arteko erlazioaren neurria da:

$$\text{Reynolds zenbakia} = \frac{\text{Dentsitatea} \times \text{Abiadura} \times \text{Tamaina}}{\text{Biskositatea}}$$

$$\text{Reynolds zenbakia} = \frac{\text{Indar inertzialak}}{\text{Biskositate-indarrak}}$$



38. irudia. Biskositate-indarraren eta inertzia-indarraren arteko erlazioaren adierazle gisa, Reynolds zenbakiak duen garrantzia erakusten duen grafikoa.

Adibidez, Reynolds zenbaki oso-oso txikiek biskositate-indarrak inertzia-indarrak baino askoz handiagoak direla adierazten digute, eta, hortaz, indar inertzialak arbuia ditzakegula. Ondorioz, fluidoak bultzatzen duen presio-indar netoaren eta deformazioaren aurkako biskositate-indarraren arteko oreka dugu. Bestalde, Reynolds zenbakiaren balio oso-oso handiek biskositate-indarrak arbuia garriak direla adierazten dute. Horrela, fluidoak bultzatzen duen presio-indar netoaren eta azeleratua izatearen aurkako indar inertzialaren arteko oreka dugu.

Laburbiltzeko, Reynolds zenbakiaren balio txikiek portaera biskosoa adieraziko dute, nahiz eta fluidoak biskositate baxukoa izan; eta Reynolds zenbakiaren balio handiek biskositate baxuko portaera adieraziko dute, nahiz eta fluidoak bera oso biskosoa izan.

GORPUTZEN GAINEKO INDARRAK

Orain arteko funtsezko ideien inguruko eztabaida, fluido-partikula txiki tipikoaren gaineko indarren eta bere higiduraren arteko erlazioetan oinarritu dugu. Ondoren, tamaina neurgarria duen objektuaren gaineko indarrak aztertuko ditugu, berau fluidoan zehar higitzen delarik edo higitzen den fluido-korrontean finko dagoelarik.

Lehenik eta behin, modeloaren gainean fluidoak egindako indarra, modeloaren gainazalean aplikatua izango da eta indar hori modeloaren gainazalaren inguruan dauden fluido-partikulek eragiten dute soilik (39a. ir.). Gainazaleko elementu bakoitzaren kasuan, aldameneko fluido-partikulek egindako bi indar-mota hartu behar dira aintzat; bata indar normala (presioa), eta bestea berriz, indar tangentiala (marruskadura). Indar hauek osagaia dute aurka datorkien fluxuaren norabidean (39b, c eta d irudiak).

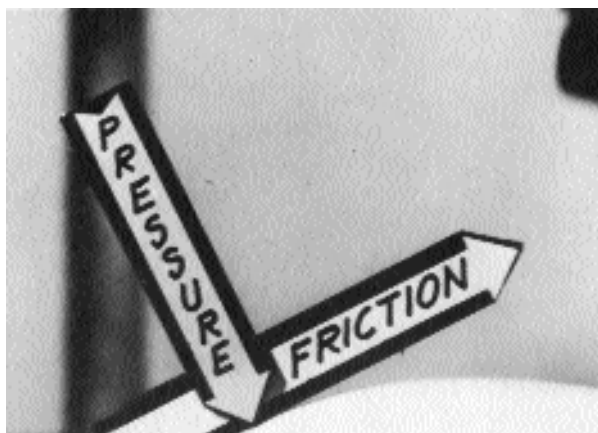
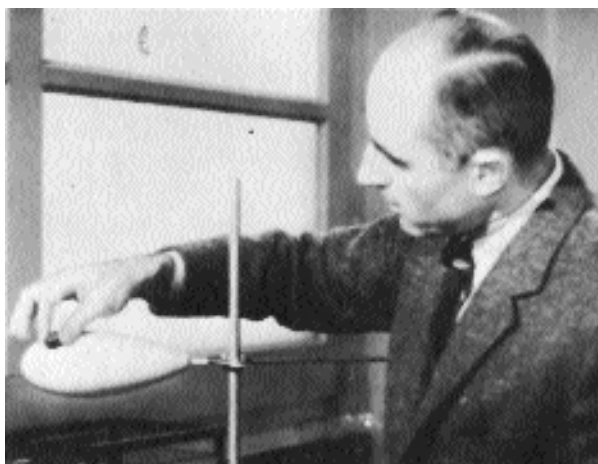
Gutxi gorabehera itxura aerodinamikoa duen gorputzaren gaineko marruskadura-indarrak aztertzean, indar tangentialak,

kontra datorren fluxuaren norabidearekiko paraleloak direla ikusi da ia gorputz osoan. Beraien batura da arraste biskosoa edo marruskadura-arrastearen eragilea.

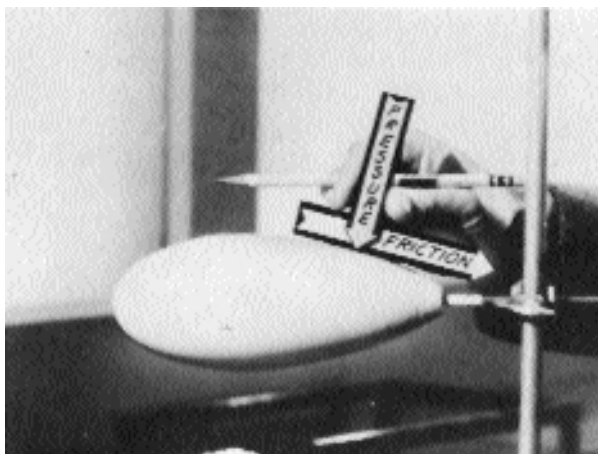
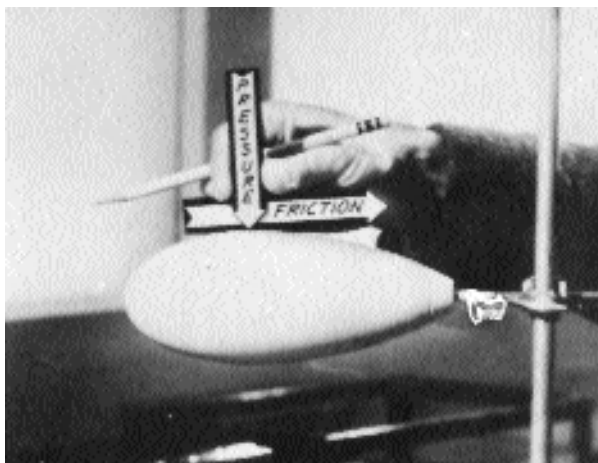
Objektuaren “sudurraren” inguruko puntuetan, gainazalarekiko normala edo elkarzuta den presio-indarrak osagai positiboa gehitzen dio arrasteari (39b ird.). Gorputzaren punturik estuenean (39c ird.) presio-indarrek ez dute arraste-indarrak sortzen. “Isatsaren” inguruan (39d ird.) presio-indarrak arraste-osagai negatiboa du; hain zuzen, presio-indarraren osagai horizontalak gorputza fluxuaren kontra bultzatzen du. Gorputzaren azalera-elementu guztietan ditugun osagai guztien batura eginik eta osagaiak positiboak ala negatiboak diren kontuan harturik, arraste osoaren bigarren osagai nagusia lortzen dugu: presio-arrastea.

Marruskadura-arrastea beti agertuko da, fluido guztiak biskoak direlako. Baina, eta hau oso garrantzitsua da, presio-arrastea gorputzaren formaren arabera da, eta marruskadura-arrastearekin konparatuz, oso handia edo guztiz arbuigarria gerta daiteke. Presio-arrastearen magnitudea, gorputzaren aurreko erdialdearen gaineko batezbesteko presioaren eta atzealdeko erdialdearen gaineko batezbesteko presioaren arteko diferentziaren arabera da. Atzeko eta aurreko erdialdearen gaineko batezbesteko presioen balioak berdinak diren kasuan, presio-arrasterik ez dago. Baina atzeko erdialdearen gaineko arrastea aurrekoaren gainekoa baino baxuagoa denean, presio-arraste neto handia agertuko da.

Zergatik aztertu behar ditugu bi arraste-motak bakoitza bere aldetik? Arrazoi desberdinetan oinarriturik daudelako, eta bestetik, Reynolds zenbakiaren hein desberdinetan direlako nagusi; eta beraz, fluxu-mota desberdinak ekarriko dizkigutelako. Eta Reynolds zenbakiaren balio desberdinen arabera, bata edo bestea izango denez nagusi, fluidoetako fluxu-mota desberdinak agertzea ekarriko dutelako.



39. irudia. Higituz doan korrontean dagoen gorputzaren gaineko indarrak. (a) Gorputzaren gainazalarekin kontaktuan dauden partikulek soilik eragingo dute gorputzaren gaineko indarra. (b) Presioa eta marruskadura-indarra, gorputz aerodinamikoaren sudurretik gertu.



(c) Aurreko bera, baina sorbaldatik gertu. (d) Aurreko bera, baina isatsetik gertu.

IV. KAPITULUA

Biskositatea eragile nagusi duten fluxuak, Reynolds zenbaki baxuetan

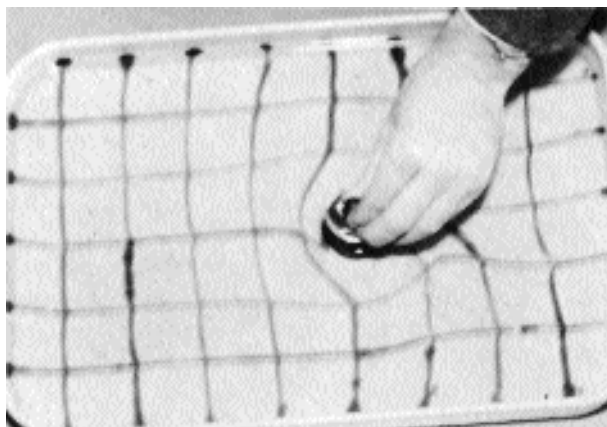
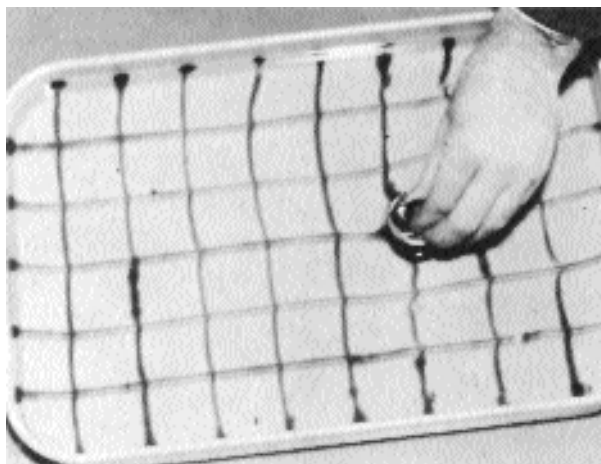
Dagoeneko azpimarratu dugu Reynolds zenbakiaren garrantzia, berak finkatzen baitu higiduran efektu inertzialak edo biskosoak nagusituko diren. Aurrerapausoa eman dezakegu muturreko bi kasuak gehiago landuz. Kapitulu honetan aztertuko dugun lehenengo muturreko kasua fluido oso biskosoarena da, zeinaren higidura biskositate-indarrak gidatuko duen. Hurrengo kapituluan aztertuko dugun bigarrena, ordea, biskositate txikiko fluidoarena da, zeinean biskositate-indarrak arbuia ditzakegun, indar inertzialekin alderatuz.

BISKOSITATE HANDIKO ZENBAIT MATERIAL

Ohiko tenperaturan upelean dagoen galipotak nahiko solidoa dirudi. Mailuaz joz gero, bere erantzuna, zur solidoarenaren modukoa da. Hala ere, galipota likidoa da, likido oso biskoso. Galipotaren gainean adreilu bat jarriko bazenu, gainazal solidoaren gainean balego moduan iraungo luke hasieran. Baina, bi egunen buruan ez da adreilurik ikusiko, upeleko hondoa egongo baita.

Pentsa dezagun orain, poliki-poliki hondoratuz doan adreiluak desplazaturiko galipotean gertatuko denaz. Bi dira galipotaren higiduran parte hartuko duten indar-motak. Lehenik, eragindako deformazioaren kontrako biskositate-indar erresistenteak. Bigarrenik, galipotaren partikulen azelerazioaren kontrako inertzia-erresistentzia deritzoguna. Baina, galipotaren higidura motela ikustean, berehala kontura zaitezke galipoteko edozein partikularen azelerazioa oso txikia dela; eta ondorioz, beraren gaineko indar inertzialak ere txikiak izango dira. Deformazioaren kontrako erresistentzia biskosoa, bere aldetik, izugarri handia da. Erraz baieztatu dezakezu: har ezazu altzairuzko hagatxo luze bat, koka ezazu upelaren gainean, bertikalki, eta beha ezazu zenbat denbora behar duzun bultzaka hondoratzeko. Erabat nekatuko zara hondoa jo aurretik. Horrelako kasuetan, indar inertzialekin alderatuz, biskositate-indarrak infinituak ere izan daitezke. 32. irudiko egoera berezia nagusituko da, beraz.

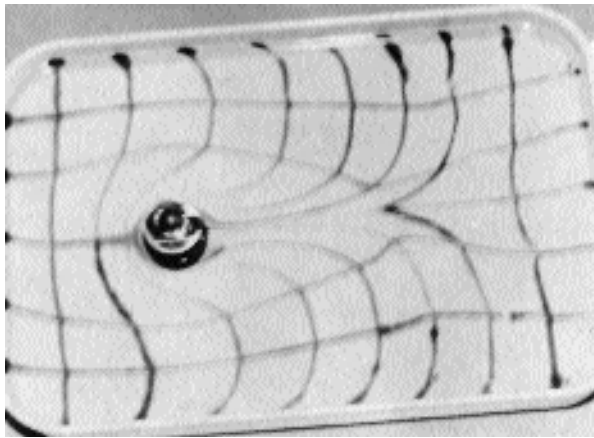
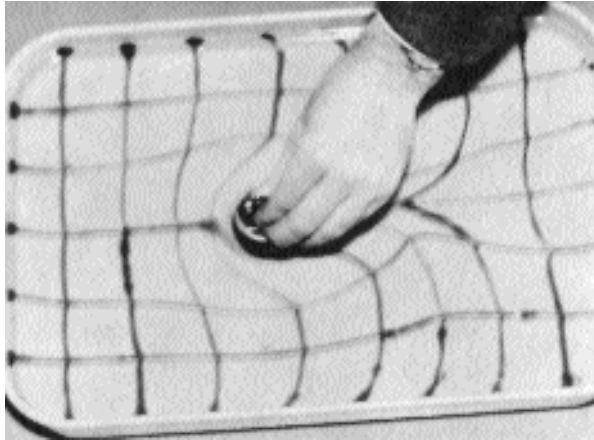
40. irudiko glizerinaz beteriko ontzia horren guztiaren adierazgarri da. Koloretutako glizerina duen xiringa hipodermikoa erabili dugu likidozko laukiak markatzeko, zilindro bat barnertzean fluidoaren higidura ikus dezagun. Zilindroa higiarazi dugunez, fluidoko partikulek pairatu duten deformazioak agerian geratu dira 40. irudiko argazkietan. Kontura zaitez zilindrotik distantzia handietara hedatu direla higidurak. Zilindroa oso motelki higiarazi dugun kasuan, higidurak hain dira motelak, ezen inolako azelerazioarik ez dela ageri. Dena den, ebakidura-tentsio biskosoa biskositatearekiko eta deformazioaren abiadurarekiko proportzionala da. Beraz, nahiz eta 40. irudian ageri diren deformazio-abiadurak txikiak izan, erresistentzia-tentsio biskoso handiak ditugu, fluidoaren biskositatea oso handia baita.



40. irudia.

PORTAERA OSO BISKOSOAREN KONTZEPTU OROKORRAGOA

Airea, ia gas guztien moduan, oso biskositate txikikoa da. Hala ere, batzuetan, gasen fluxuak portaera oso biskosoa agertzen dute. Beraz, egin beharreko galdera ondoko hau da: noiz ageriko du



gasak portaera biskosoa? Noiz izango da biskositate txikikoa? Galdera hauei erantzuna emateko, Reynolds zenbakiaren adierazpena erabiliko dugu:

$$\text{Reynolds zenbakia} = \frac{\text{Dentsitatea} \times \text{Abiadura} \times \text{Luzera}}{\text{Biskositatea}}$$

Adierazpen honetan ez da biskositatea soilik agertzen; fluidoaren dentsitatea, fluxuaren abiadura eta gorputzaren tamaina (luzera) ere agertzen dira. Reynolds zenbakiaren adierazpen algebraikoaren arabera biskositate handiak Reynolds-en zenbakiaren balio txikia dakar ondorioz, eta beraz, biskositate-indarrek gidaturiko fluxua.

Baina modu berean, beste zenbait arrazoiaren eraginez, Reynolds zenbakiaren balioa oso txikia izan daiteke. Esaterako, dentsitate oso txikiaren eragina biskositate handiak duenaren berdina da. Horrela bada, Lurretik altuera handian dabilen hegazkin batek aire arrarifikatua zeharkatzean, dagokion fluidoaren Reynolds zenbakiaren balioa oso txikia izan daiteke, nahiz eta airea oso biskositate txikikoa izan; eta nahiz eta arrunki, aire arrarifikatua “mehea” dela esango genukeen.

Biskositate-indarrak nagusituko diren beste zenbait fluxuren adibideak, hots, Reynolds zenbaki txikia dutenak, abiadura txikiak edo tamaina txikikoak dira. Esaterako, nahikoa tamaina txikia duen objektua behar bezain higidura motelaz airean higitzean, fluxuaren izaera biskosoa da, airearen biskositatea txikia izan arren. Hauxe da hauts-malutari gelan motelki erortzean gertatuko zaiona. Airean higituz ari diren hauts-partikulen gaineko biskosi-



41. irudia.

a)



b)

tate-indarrak, (41a irudia) glizerinaz beteriko zutabeen zehar azkar hondoratuz doan altzairuzko pilota handiaren gainekoak baino handiagoak dira erlatiboki (41b irudia). Airean bizi diren bakteriek ikusten duten ingurunea, guk geuk melazan bizi bagina ikusiko genukeena bezain biskoso da.

Beraz, askoz ere egokiagoa da egoera biskosoaz hitz egitea, fluido biskosoaz hitz egitea baino.

REYNOLDS ZENBAKI OSO TXIKIETARAKO STOKES-EN LEGEA

Orain dela zenbait urte, Sir George Stokes zenak, Reynolds zenbaki oso txikietako gorputzen gaineko arraste-lege sinplea matematikoki ondorioztatu zuen, indar inertzialak erabat arbuigarriak zirela postulatu:

$$\text{Arrastea} \sim \text{Abiadura} \times \text{Biskositatea} \times \text{Luzera}$$

Adierazpen honen arabera, arrastea, fluxuaren abiadurarekiko, fluidoaren biskositatearekiko eta objektuaren luzera edo tamainarekiko proportzionala da. Proportzionaltasun hau berdintza bihurtzeko konstante baten beharra dugu, soilik objektuaren formaren arabera den zenbakia:

$$\text{Arrastea} \sim \text{Konstantea} \times \text{Abiadura} \times \text{Biskositatea} \times \text{Luzera}$$

Stokes-en postulatu egia denentz ikusteko, arrastea, abiadura, biskositatea eta tamaina neurtuko dituguneko zenbait saiakuntza aurrera eraman ditzakegu, forma geometriko jakineko gorputz baten gainean. Behatutako balioak Stokes-en adierazpenarekin bateragarriak diren ikusiko dugu, eta horrela bada, indar inertzialak Reynolds zenbaki txikietarako arbuigarriak direla erabakitzen lagunduko digu.

Aukeratutako forma geometrikoa esfera da. Esferaren diámetroa kalibrearen bidez neur dezakegu zehatz. Modu berean, biskositate-neurgailua erabil dezakegu biskositatea neurtzeko.

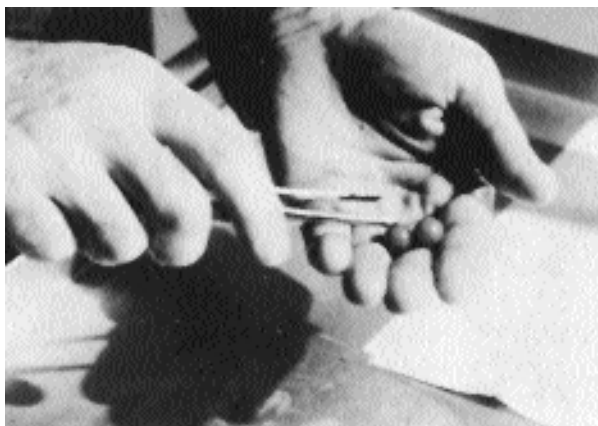
Likido-zutabeen zehar muga-abiaduraz hondora dadin utziko diogu aipatutako esferari, horrela arrastea esferak likidoan murgildurik dagoenean duen pisu netoaren berdina izango delarik. Distantzia jakin bat zeharkatzeko gorputzak behar duen denbora-tartea neurtuz lortuko dugu fluidoak gorputzarekiko duen abiadura.

Abiadura distantziaren eta denboraren arteko zatidura modura neurtuko dugunez, ondoko eran moldatuko dugu Stokes-en legearen adierazpena:

Arrastea = Konstantea × $\frac{\text{Distantzia} \times \text{Biskositatea} \times \text{Luzera}}{\text{Denbora}}$

Adierazpeneko bost magnitudeetatik hiru aldaketarik gabe utziz gero, falta diren bien artean proportzionaltasun-erlazioa agertu beharko litzateke. Alboko taulak dakar horrelako hiru saiakuntza aurrera eramateko programa. Bigarren zutabeen, saiakuntza bakoitzean konstante mantenduko ditugun magnitudeak daude.

Saiakuntza	Konstante mantenduriko aldagaiak	Espero izandako proportzionaltasuna
1	DISTANTZIA BISKOSITATEA TAMAINA	ARRASTEA × DENBORA = KONSTANTEA
2	ARRASTEA DISTANTZIA BISKOSITATEA	$\frac{\text{TAMAINA}}{\text{DENBORA}} = \text{KONSTANTEA}$
3	ARRASTEA DISTANTZIA TAMAINA	$\frac{\text{BISKOSITATEA}}{\text{DENBORA}} = \text{KONSTANTEA}$

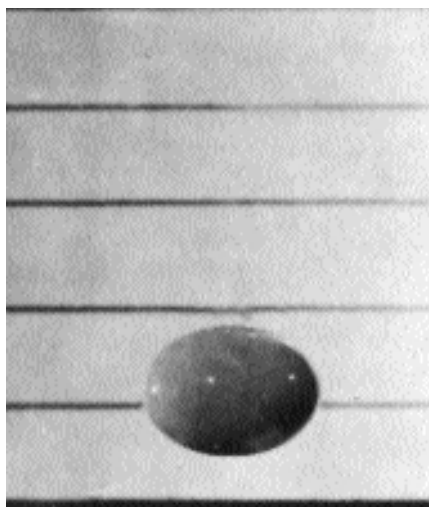


42. irudia. Bi esferak tamaina berekoak dira, baina glizerinaren barnean batek besteak baino lau aldiz pisu handiagoa du.

Hirugarrenak, berriz, Stokes-en legearen arabera proportzionalak izan behar duten kantitateak adierazten dizkigu.

Lehenengo saiakuntzaren kasuan arrastea izan ezik gainontzekoak aldatuko ditugu. Beraz, diametro bereko baina glizerinan pisu neto ezberdinekoak diren bi esfera ditugu (42. irudia). Pisu txikieneko lehenengo askatuz, eta muga-abiadurara heltzeko zain egon ondoren, 10 cm-ko ibilbidea burutzeko 20 segundo behar izan dituela behatu eta neurtu dugu (43. irudia).

Bigarren esferak glizerinan duen pisua, lehenak duena baino lau aldiz handiagoa da, eta, beraz, muga-abiaduran duen arrastea ere lau aldiz handiagoa izango da. Bigarren honekin saiakuntza errepikatuz, 10 cm-ko ibilbidea burutzeko 4,9 segundo behar izan dituela behatu dugu. Ondoko taulak laburbiltzen ditu emaitzak:



43. irudia. Muga-abiaduraren esperimentua. Glizerinaren barnean esferak egindako distantziaren neurketa bere muga-abiaduran.

<i>Arrastea</i>	<i>Denbora</i>	<i>Denbora × Arrastea</i>
1	20,0	20,0
4	4,9	19,6

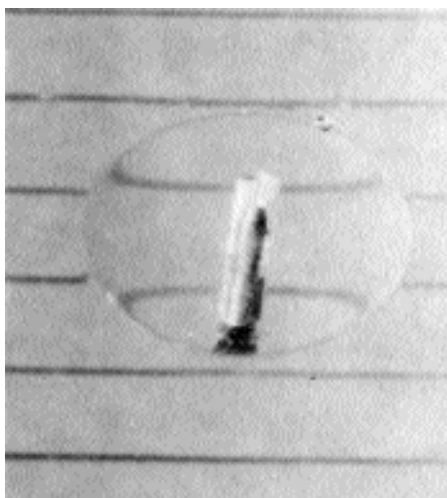
Errore esperimentala kontuan hartuz, bi saiakuntzetan arrastearen eta denboraren arteko biderkaduraren balioa berdina izan da, eta, beraz, Stokes-en legearen oinarrian dagoen postulatuaren frogapena dugu hori.

Postulatuaren bigarren azterketan dena aldatuko dugu, tamaina izan ezik. Orduan, glizerinan pisu berbera eta, beraz, arraste berbera duten bi esfera erabiliko ditugu, berauen diametroen arteko zatidura 2 baliokoa izango delarik (44. irudia). Ondokoak dira datuak:

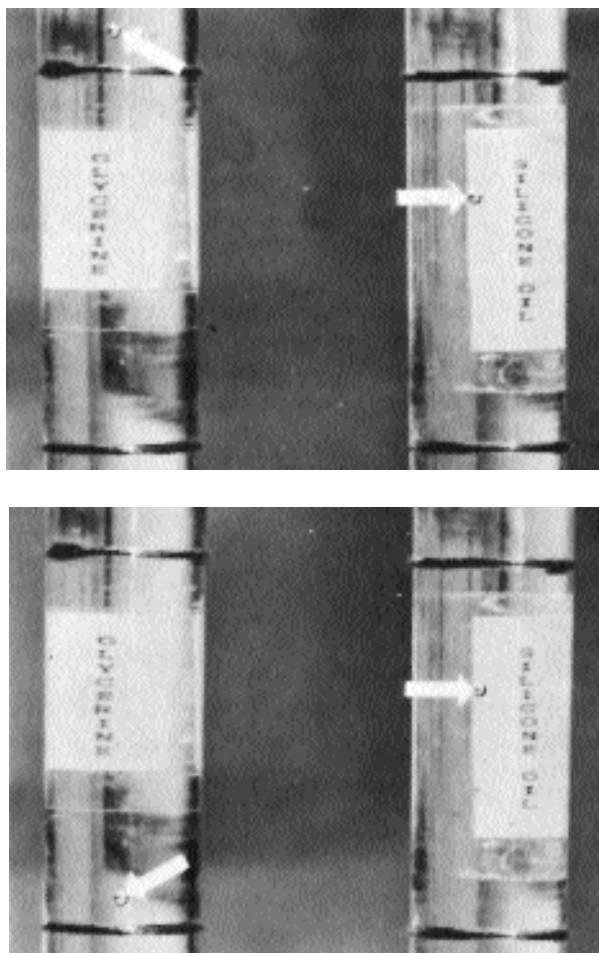
<i>Tamaina</i>	<i>Denbora</i>	<i>Tamaina/Denbora</i>
1	20,0	0,050
2	38,6	0,052

Orain ere, errore esperimentala kontuan hartuz, Tamaina/Denbora zatidurari dagozkien bi saiakuntzetako balioak berdinak izan dira, eta beraz, berriro ere, aipatutako legea baieztatu dugu.

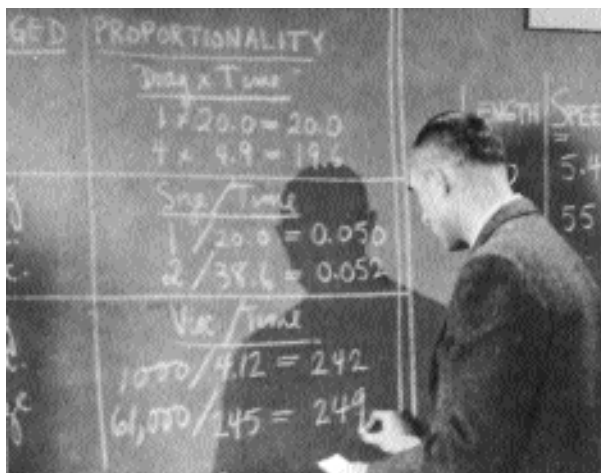
Hirugarren saiakuntzako aldagai bakarra biskositatea da. Kasu honetan, bi zutabe erabiliko ditugu: bata glizerinaz beteko dugu, eta bestean silikona-olioa jarriko dugu, zeina glizerina baino 61 aldiz biskosoagoa den. Esfera bien diametroak berdinak dira, eta gainera, dagokien likidoan murgildurik daudenean pisu berbera dute. Alboko orriko 45. irudiak aipatutako saiakuntza erakusten du. Bestalde, 46. irudiak lortutako emaitzak adierazten ditu. Kasu honetan ere, errore esperimentalak barne, lortutako emaitzak bateragarriak dira Stokes-en legearekin.



44. irudia. Glizerinan pisu bera duten baina diametroz 1:2 erlazioa duten esferen saiakuntza muga-abiaduran. Esfera handiagoan daratuz egindako zuloan, bere pisua doitzeko erabili dugun letoizko zurtoina ikus daiteke.



45. irudia. Pisu eta diametro bereko esferekin egindako muga-abiaduraren esperimientua, glizerinatan eta 61 aldiz biskosoago den silikona-oliotan. Ohar zaitez noraino heldu den bolatxo glizerinaz betetako hodian, “silikonaz” betetakoan “L” letra parean ia geldirik dagoen bitartean.

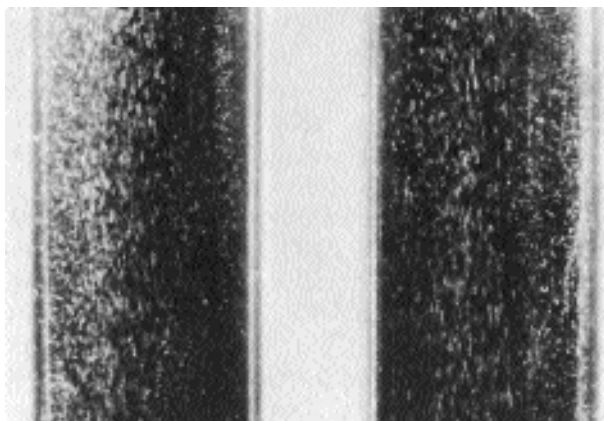
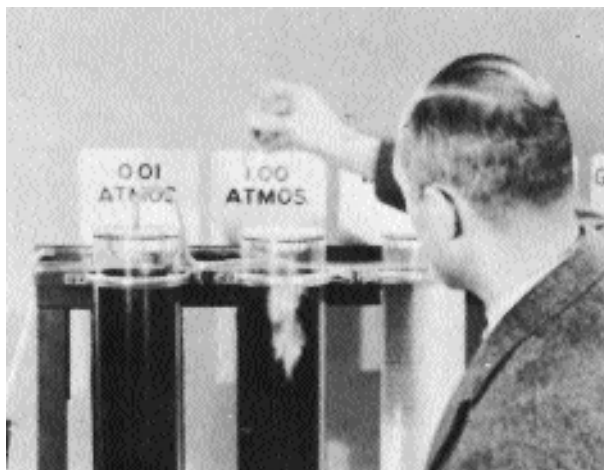


46. irudia. Hiru saiakuntzen emaitzak.

FLUIDOAREN DENTSITATEAREN ERAGINA

Har ditzagun berriro, arestian aipatutako saiakuntzak; hauetan, tamaina, biskositatea eta arrastea sistematikoki aldatu ditugu, eta beraien arabera hondorapen-abiaduraren gaineko Stokes-en legeak auresaten duena betetzen da. Baina, benetan arraroa dena, arrasteak fluidoaren dentsitatearekiko mendekotasunik ez izatea da. Pentsa genezake, dentsoagoa den fluidoak hain dentsoa ez denak baino gorputzaren higiduraren kontrako erresistentzia handiagoa erakutsi behar lukeela.

Dentsitateak eraginik ez duela frogatzeko, berariaz prestatuturiko saiakuntza bat egingo dugu, airez beteriko bi zutabe bertikal erabiliz (47a irudia). Zutabe bateko airea egurats-presiopean dago; beste zutabea, berriz, airearen %99-ko hustuketa burutu dugu. Honen ondorioz, bigarren zutabea dagoen airearen dentsitatea



47. irudia. Hauts-partikula txikiak egurats-presiopean dugun aire-zutabeen erortzean eta egurats-dentsitatearen %1 duen beste zutabeen erortzean, muga-abiadura berbera dute. (a) Tresneria (b) Hurbileko irudia. Hodi bietako arrastoen luzera berdina denez, abiadurak ere berdinak dira.

lehenengoan dagoenaren %1 baino ez da. Zutabeen gaineko gordailuetan dauden hauts-partikula txikiak aldi berean askatuko ditugu, eta lortuko duten muga-abiaduren arteko alderaketa egingo dugu.

Behaketa hauek interpretatzeko orduan —horren iragarpenak gasen teoria zinetikoaren lorpen handia izan ziren—, gasen propietate berezi bat gogoratu behar dugu. Ondokoa da: presio-aldakuntza handiak ez du gasaren biskositaterik asko aldatuko, tenperatura konstantea denean. Beraz, bi zutabeetako airearen biskositatea ia berbera da, nahiz eta dentsitateen arteko aldea 100 balioko faktorearen bidezkoa izan.

Hondoratuz doazen partikulen behaketan (47b irudia), hodi bietan partikulek muga-abiadura bera dutela ikusiko dugu. Hau da, 100 aldiz arrarifikatu den aireak erortzen den hautsari egingo dion erresistentzia, arrarifikatu gabekoak egingo dioenaren berdina izango da.

Beraz, erabili dituen magnitudeak erabiltzeagatik ez ezik, kanpoan utzi dituenak uzteagatik ere egokia da Stokes-en legea. Aipatutako saiakuntzek eta ezberdinak diren beste zenbaitek ere Stokes-en legea egokia dela frogatu dute; hots, Reynolds zenbaki baxuak ditugun kasuetan indar inertzialak arbuiagarriak direla. Azken saiakuntza bereziki harrigarria da, zeren indar inertzialak arbuiagarriak direnez, fluidoaren inertziaren neurria baino ez den fluidoaren dentsitatea garrantzirik gabeko propietatea izango baita. Eta horixe da ikusi duguna. Merkurioa airea baino biskositate txikiagokoa balitz (hamar aldiz biskosoagoa da soilik), bere barnean igeri egiten leudekeen mikroorganismoen gainean, aireak baino erresistentzia txikiagoa eragingo lieke; nahiz eta beraren dentsitatea hamar mila aldiz handiagoa izan.

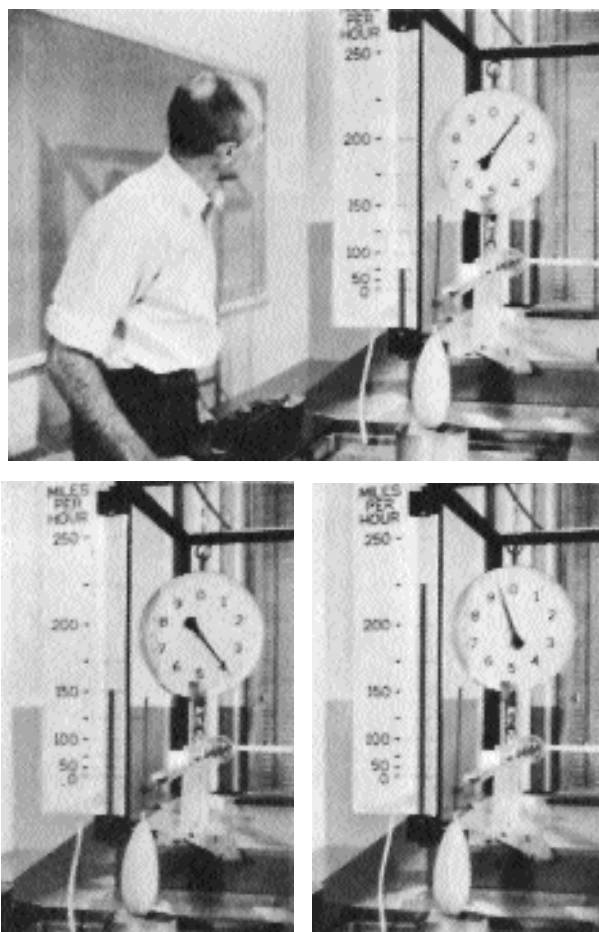
V. KAPITULUA

Reynolds zenbaki altuetarako arraste-legea

Aurreko kapituluan, Reynolds zenbaki txikietarako, biskositatearen eragina nagusi den fluxuetako arraste-legeak sinpleak direla ikusi dugu. Ez dago anomaliarik. Reynolds zenbakia altua denean, berriaz, egoera ez da hain garbia, eta horren azalpena emateko, ideia berriak definitu behar ditugu: muga-geruza, fluxu laminarra, fluxu zurrumbilotsua eta gelditasuna, besteak beste. Tresna arrunt gehienak aipatutako fenomeno nolabait korapilatsuetan ari dira. Hegazkinak, ur-turbinak, aireztapen-sistemak, koheteak, errektoreak, itsasontziak edo propulsiagailuak Reynolds zenbaki handiko adibideak dira.

ARRASTEAREN GAINEKO ABIADURAREN ERAGIN ESPERIMENTALA

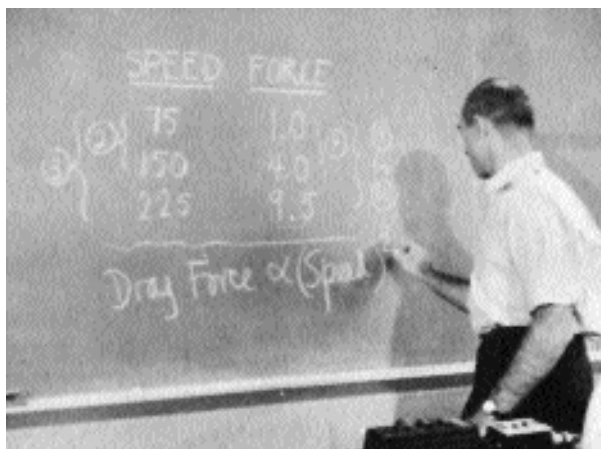
Zenbait arraste-saiakuntza burutuko ditugu haize-tunela erabiliz, forma aerodinamiko “ona” duten elementuekin; esaterako, fuselaje aerodinamikoaren gaineko arrasteak airearen abiadurarekiko agertuko duen aldaketa neurtzeko asmoz. Balantza eta pisu-eskala erabiliko ditugu (48. irudia). Abiadura nulua den kasuan arrasteak ere nulua izan behar duenez, hasieran balantza orekatuko dugu. 75 mph-ko (milia orduko) abiaduraren kasuan, arrastearen irakurketak



48. irudia. Reynolds zenbaki altuetan, itxura aerodinamikoak duten gorputzen arrastean haizearen abiadurak duen eragina aztertzeko saiakuntza. (a) Tresneria. (b) 150 mph abiaduran. (c) 225 mph abiaduran.

1,0 balioa eman digu (48a irudia). Ondoren, abiadura bi aldiz handiagoa egitean, hau da, 150 mph-ko abiaduraren kasuan, arrastearen balioa 4,0 unitatekoa izan da (48b irudia). Azkenik, abiadura hiru aldiz handiagoa egitean, hots 225 mph-ko abiaduran, arrasteak 9,5 unitaterainoko gehikuntza izan du (48c irudia).

Zer ondoriozta dezakegu datu hauek (48d irudia) erabiliz? Lehenik, kontura gaitezen abiadura bi aldiz handiagoa izatean arraste-indarrak 2 aldiz baino faktore altuagoko gorapena pairatu duela: izatez, 4-koa izan da faktorea. Bigarren kasuan, abiadura hiru aldiz handiagoa izatean, arraste-indarraren balioa hiru baino faktore altuagoaz biderkatu agertu da, 9 eta 10 balioen arteko faktoreaz, hain zuzen. Datu horietatik abiatuz, ba ote dago errepikatuko den eredurik ondorioztatzerik? Bai, egon badago. Arraste-indarraren aldaketak abiaduraren karratuarekiko menpekotasuna duela esango bagenu, ia asmatuko genuke. Taulan ikus daitekeen bezala, biren karratua lau da, eta hiruren karratua bederatzi da (bederatzi koma bost baliotik hurbil dagoena).



SPEED	FORCE
75	1.0
150	4.0
225	9.5

Drag Force $\propto$ (Spd)

48. irudia. d) Laburpena.

Forma ezberdinen gaineko saiakuntzen bidez arraste-indarra gutxi gorabehera abiaduraren karratuaren araberakoa dela ondoriozta daiteke, beti ere Reynolds zenbaki handiko baina biskositate txikiko fluxuetan.

Abiaduraren karratuaren lege hau dela eta, hegazkinez edo autoz abiadura handiz higitzearen ordaina erregai-kontsumo altua da. 40 mph-ko abiaduran arraste aerodinamikoaren balioa, 20 mph-ra joatean baino lau aldiz handiagoa. 60 mph-ko abiaduraz joanez gero, 20 mph-ra joanez baino bederatzi aldiz handiagoa da; eta azkenik, 80 mph-ko abiaduran joan nahi badugu, hamasei aldiz handiagoa izango da erregai-kontsumoa. Erabili beharreko potentzia abiaduraren eta arrastearen arteko biderkaduraren proportzionala denez, aipatutako saiakuntzetako arraste aerodinamikoa gainditzeko erregai-kontsumoak 1:8:27:64 erlazioari segituko dio. Abiaduraren kuboaren proportzionala da potentzia. Autoaren abiadura txikietan horrek ez du garrantzi handirik, errepidearen arrastea, arraste aerodinamikoa baino handiagoa baita. Baina abiadura handituz doan neurrian, bigarrena gero eta garrantzia handiagokoa da, azkenean errendimenduaren muga berak finkatuko duelarik. Ondorioz, nahiz eta autoaren abiadura txikietarako aerodinamikak ez duen garrantzi handirik, abiadura altuetan funtsezkoa da. Arrastea, abiaduraren karratuaren proportzionala eta potentzia abiaduraren kuboaren proportzionala izatearen legeek, azken urteetako aurrerapausoak motor indartsuagoak lortzera baino gehiago, ontziaren itxurari zuzenduak izatea azaltzen dute.

Reynolds zenbaki altuetarako arrastearen legearen irudi zehatza nahi izango bagenu, biskositatearen, dentsitatearen, tamainaren eta abiaduraren eraginak aztertu beharko genituzke. Hala ere, egia esateko, Reynolds zenbaki altuetarako lege sinple eta zehatzik ez dago, Reynolds zenbaki txikien kasuan gertatu den moduan. Gehienez, arrastearen lege esperimental hurbilduaz hitz egin genezake (zoritxarrez, salbuespen nabarmenez bete), zeinaren

arabera arrastea, abiaduraren karratuaren, dentsitatearen eta tamainaren karratuaren proportzionala den:

$$\text{Arrastea} \sim (\text{Abiadura})^2 \times \text{Dentsitatea} \times (\text{Tamaina})^2$$

Aldera dezagun Reynolds zenbaki handietarako lege hurbildua, Reynolds zenbaki txikietako arrastearen Stokes-en legearekin (49. irudia). Abiadura bi aldiz handiagoa izateak arrastea bi aldiz handiagoa izatea ekarriko du ondorioz, Reynolds zenbaki txikietako baldintzatan. Baina, Reynolds zenbaki altuetan, abiaduraren bikoizteak lau aldiz handituko du arrastea. Reynolds zenbaki txikietan tamainaren bikoizteak arrastea bikoiztuko du, eta Reynolds zenbaki handietan berriz, bikoizte berberak arrastearen lau aldiz handiagoko gorapena ekarriko du. Reynolds zenbaki txikietan biskositatea da garrantzizko papera jokatu duena, eta ez dentsitatea. Zenbaki altuetan, ordea, gutxi gorabehera alderantzizkoa gertatuko da, eta dentsitatea izango da zeregin nagusia jokatu duena.

ARRASTEAREN LEGEA, REYNOLDS ZENBAKI TXIKIEN KASUAN

$$\text{ARRASTE} \sim \text{ABIADURA} \times \text{BISKOSITATEA} \times \text{TAMAINA}$$

$$\text{ARRASTE} \sim \frac{\text{DISTANTZIA} \times \text{BISKOSITATEA} \times \text{TAMAINA}}{\text{DENBORA}}$$

GUTXI GORABEHERA

ARRASTEAREN LEGEA, REYNOLDS ZENBAKI HANDIEN KASUAN

$$\text{ARRASTE} \sim (\text{ABIADURA})^2 \times \text{DENTSITATEA} \times (\text{TAMAINA})^2$$

49. irudia.

Itsasoan bizi diren organismo biologiko txiki eta handiek dituzten egitura mekanikoen arteko eta igerian egiteko duten abilezia desberdinen arteko diferentziak, aipatutako eskala-legeek

gidatu dituzte nolabait. Arrainaren kasuan, bere pisu-unitateko propulsiarako potentziak bere dimentsioarekiko alderantzizko proportzionaltasuna du; beraz, handiagoa den arrainak abantaila du txikiagoa denarekin alderatuz. Itsasoko organismo mikroskopikoen kasuan, berriz, pisu-unitateko potentzia dimentsioaren karratuaren arabera da. Dimentsioa hamar balioko faktoreaz zatituz gero, planktonaren gaineko arrastea eta beharrezkoa duen propulsiarako potentzia faktore berberaz zatituko dira, baina organismoaren pisua mila aldiz txikiagotuko da. Azken honek neurri gabeko kontrako eragina dakar, eta dimentsio txikiko organismoek duten abiadura hain txikien azalpena ematen digu.

ARRASTE-KOEFIZIENTEA ETA REYNOLDS ZENBAKIA LOTUKO DITUEN ANTZEKOTASUN DINAMIKOAREN LEGEA

Arrastearen legeen garapenean, geometrikoki antzekoak izan diren formak erabili ditugu, nahiz eta luzera, abiadura eta dentsitatea edo biskositatearen moduko bestelako faktoreak oso ezberdinak izan zitezkeen. Reynolds zenbakia lehenengoz aipatu dugunean (72. orrialdean), antzekotasun dinamikoaz ere aritu gara. Gogora ditzagun, esaterako, uretan hondora dadin utzi dugun plastikozko esfera, edo airean gorantz joan den helioz beteriko globoa. Aipatutako bi saiakuntzak Reynolds zenbakiak antzekotasun dinamikoarekin lotuta duen esangura ulertzeko erabili ditugu. Reynolds zenbaki bereko eta geometrikoki antzekoak diren formekin egindako saiakuntzetan, arraste-indarrak modu berezian erlazionaturik daude, nahiz eta aipatutako indarrak oso ezberdinak izan daitezkeen magnitudeari dagokionez. Hori horrela dela erakusteko asmoz, uretan hondoratzen den plastikozko esferaren eta airean gorantz doan helioz beteriko globoaren saiakuntzetatik datu gehiago hartuko ditugu aintzakotzat. Ondorengo taulan, aurretik 76. orrialdean agertu diren datuei, oraintxe azalduko ditugun beste zenbait datu gehitu zaizkio.

	Luzera <i>L</i>	Abiadura <i>V</i>	Fluidoa	Dentsitatea <i>D</i>	Biskositatea <i>B</i>	$\frac{D \times V \times L}{B}$	Arraste- -indarra	Arraste- -koefizientea
HELIOZ BETERIKO GLOBOA	100	5,4	AIREA	0,112	0,0018	36	0,0067	0,000019
PLASTIKOZKO ESFERA	0,60	55	URA	1,00	0,89	37	0,020	0,000018

Muga-abiaduraz uretan hondoratuz doan plastikozko esferaren gaineko arraste-indarra, uretan duen bere pisu netoa izango da: 0,020 gramo hain zuzen. Muga-abiaduraz airean gorantz doan helioz beteriko globoaren gaineko arraste-indarra, eskalan gorantz tira egitean neurtu dugun bultzada netoa hauxe da: 0,0067 g. Argi dagoenez, bi indarrak oso ezberdinak dira, baina antzekotasun dinamikoaren printzipioaren arabera, Reynolds zenbakien balioak berdinak diren kasuan, arraste-koefiziente berbera edukiko dute. Arraste-koefizientearen definizioa ondoko hau da:

$$\text{Arraste-koefizientea} = \frac{\text{Arraste-indarra}}{(\text{Abiadura})^2 \times \text{Dentsitatea} \times (\text{Tamaina})^2}$$

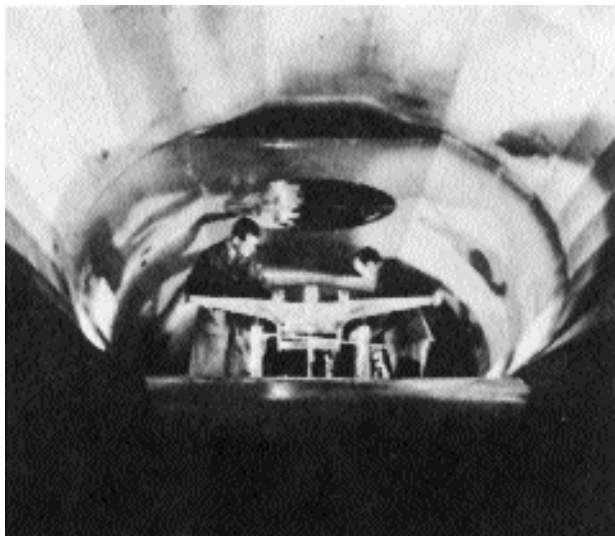
Arraste-koefizienteen balioak lortzeko beharrezkoak diren datu guztiak, aurreko taulan ditugu. Gorantz doan helioz beteriko globoaren kasuan, 0,000019 baliokoa da aipatutako koefizientea; eta uretan hondoratuz doan plastikozko esferaren kasuan 0,000018 baliokoa da; ia-ia berdinak. Zenbaki hauek, bakoitzaren Reynolds zenbakiekin loturik daude; 36 eta 37 zenbakiekin, hurrenez hurren. Beraz, antzekotasun dinamikoaren legea esperimentalki frogatu dugu, zeinaren arabera Reynolds zenbakien berdintasunak arraste-koefizienteen berdintasuna dakarren.

Antzekotasun dinamikoaren legea: REYNOLDS ZENBAKIEN BERDINTASUNAK ARRASTE-KOEFIZIENTEEN BERDINTASUNA DAKARREN.

ANTZEKOTASUN DINAMIkoa MODELOEKIN EGINDAKO FROGEN OINARRIA DA

Orain arteko guztiak inplikazio garrantzitsuak ditu. Pixka bat pentsatuz gero, eta antzekotasun dinamikoaren printzipioa ezagutuz gero, posiblea litzaizuke airean gorantz doan helioz beteriko globoaren saiakuntzaren emaitza auresatea, uretan hondoratuz doan plastikozko esferaren saiakuntzatik abiatuz.

Honela, bada, antzekotasun dinamikoaren printzipioa garrantzitsua da hegazkinak eta koheteak diseinatuko dituzten aeronautika-ingeniarien kasuan, edo propulzio-sistemak asmatuko dituzten ingeniari mekanikoen kasuan, edo itsasontziak diseinatuko dituztenek aplikatu dezaten, edo turbina hidraulikoak diseinatuko dituzten ingeniarien kasuan. Aipatutako eremu guztietan, antze-



50. irudia. Hegazkin-modelo baten haize-tuneleko froga. Emaitzak tamaina errealeko hegazkinean aplikatuko dira antzekotasun dinamikoaren printzipioa erabiliz.

kotasun dinamikoaren printzipioak tresnarik indartsuena eman die ingeniariari: modeloekin egindako frogak. Egiazko eskalako prototipoan aplikagarria izan dadin, saiakuntzan erabiliko dugun modeloak nolakoa izan behar duen eta lortutako datuen tratamendua nola egin behar dugun ere argituko digu antzekotasun dinamikoak.

Azken hirurogei urteotako motor-bidezko hegaldiek izan duten garapena harrigarria da. Aeronautika-industriatik kanpo oso gutxi nabarmendu da haize-tunelek bete duten zeregina (50. irudia). Horiek gabe ezinezkoa litzateke 1930etik 1960ra emandako hegazkinen hobekuntza ulertzea. Haize-tuneletako frogak ez dira diseinu osoaren froga soilak, garapen- eta diseinu-prozeduraren zati integralak baizik. Fluidoaren dinamika garrantzitsua duen ingeniariaren edozein adarrek kontuan hartzen du modeloekin egindako frogak etorkizuneko garapenean edukiko duten oinarriko zeregina. Dena den, esan denez, modeloekin egindako frogak ez lukete baliorik izango, antzekotasun dinamikoaren printzipioak modeloen gaineko saiakuntzetatik datuak nola interpretatu esango ez baligu.

VI. KAPITULUA

Muga-geruza biskosoa

Reynolds zenbaki txikietarako eta handietarako arraste-legea, eta Reynolds zenbakia arraste-koefizientearekin lotuko duen antzekotasun dinamikoaren printzipioa erabilgarri ditugularik, fluidoetako arrastearen gaia menderaturik dugula dirudi; hala ere, badugu oraindik zenbait gauza azaltzeke.

ZER GARRANTZI DU BISKOSITATEAK REYNOLDS ZENBAKI HANDIETAN?

Demagun esku artean dugun fluido magiko batek biskositaterik ez duela. Horrelako fluido “perfektuak” ez luke inolako erresistentziarik erakutsiko. Orduan, galde dezakeguna hauxe da: nola da posible, airea moduko biskositate txikiko fluidoek sortzen duten arraste-maila hain handia izatea? Eta kontuan hartzeko arrastea erakusten duten kasuetan, Reynolds zenbaki handietan ez ote luke biskositateak azertu dugun legean parterik hartu behar? Argi dago parte hartu beharko lukeela. Dena den, gogora ezazu lege hori hurbilketa baino ez dela. Biskositateak badu arrastearen gaineko eragina, nahiz eta, gehienetan oso txikia denez, arbuia garritzat jo dezakegun, faktore garrantzitsuen irudi orokorra soilik nahi badugu behintzat. Esaterako, Reynolds zenbaki altuetan, arrastearen

%100eko gorapenak forma aerodinamikoa duen objektuaren gaineko arrastea %15eko neurrian jasoko du soilik; nahiko kantitate txikia.

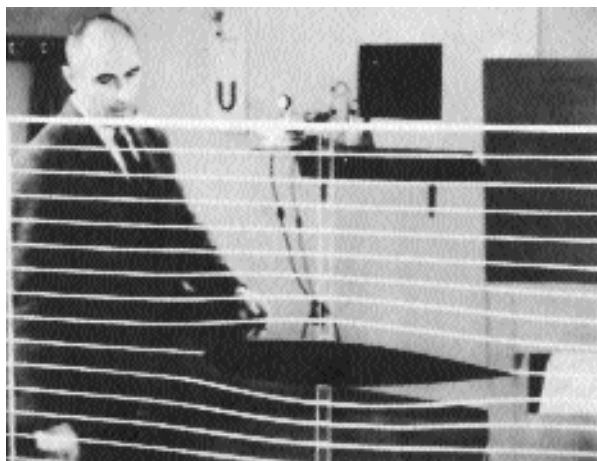
Hala ere, kontuz ibili behar dugu, batzuetan biskositatearen eraginak garrantzitsuagoak izan daitezkeelako. Hain zuzen, 2. kapituluko haize-tunelean, esferaren kasuan lortutako arraste/abiadura kurba bereziak (7. irudia) aipatutako eraginak bereziak ere izan daitezkeela adierazten du.

Biskositatea ez da garrantzirik gabekoa Reynolds zenbaki handietan, nahiz eta beraren eragina modu ustekabe eta sotilean agertzen den. Biskositatea da arrastearen eragile nagusia, eta zenbait kasutan, biskositaterik txikienak ere, zeharka, oso arraste handia ekar dezake. Are gehiago, —2. kapituluko 10. irudian ageri diren esfera leuna eta esfera latzaren kasuan modura— izugarri antzekoak diren formen gaineko arrasteak hain desberdinak izatearen arrazoiak biskositateak eraginak dira.

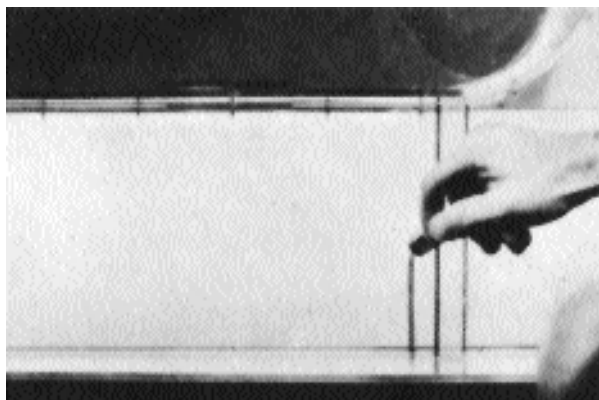
Biskositate txikiko fluidoetan gertatu denak sortzen digun harridura hau, beste modu batean ere adieraz dezakegu. Gogora ezazu Reynolds zenbakiak indar inertzialen eta biskositate-indarren arteko zatidura emango digula, eta fluidoaren dentsitatea eta biskositatea direla, hurrenez hurren, aipatutako indarrekin erlazionaturik dauden propietateak. Lehenago 4. kapituluan ikusi dugunez, Reynolds zenbaki txikietan, indar inertzialak arbuiagarriak direnean, zentzuzkoa denez, dentsitateak ez du eraginik. Era berean, Reynolds zenbaki handietan, hots, biskositate-indarrak arbuiagarriak direnean, biskositatea eraginik gabeko propietatea izango dela pentsa genezake. Baina hau ez da guztiz egia.

MUGA-GERUZA

51. irudian, biskositate txikiko fluidoaren airea dabil hego baten inguruan. Ikus daitezkeen lerroek fluidoaren partikula tipikoen korrante-lerroak edo ibilbideak adierazten dituzte. Gatozen, bada,



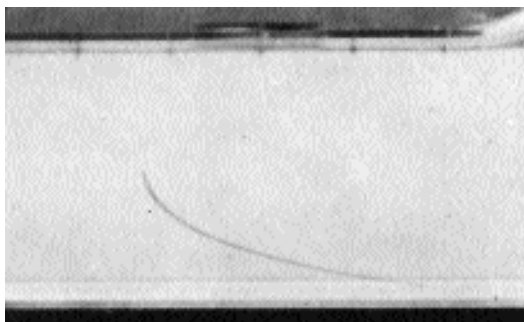
51. irudia.



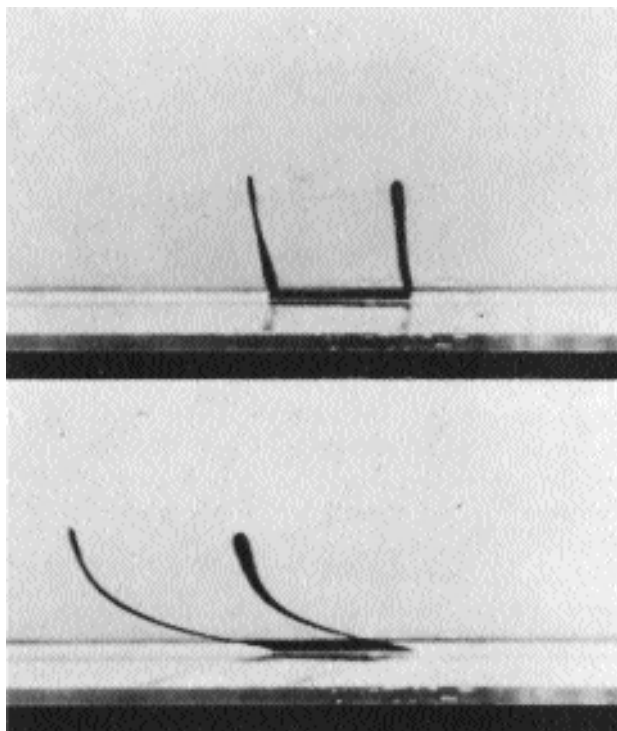
52. irudia. Koloredun glizerinaz lerro bat markatzen. Ezkerraldean, iruditik kanpo dagoen atea zabaltzean, kanaleko glizerina ezkererantz azeleratzen da.

muinera. Nahiz eta fluxuan zehar biskositate-indarren balioa oso txikia izan, zenbait gunetan guztiz garrantzitsuak dira indar horiek. Oinarritzko arrazoia hauxe da: edozein fluidotan, solidoaren gainazalarekin kontaktuan dauden fluidoetako partikulak ez dira gainazalarekiko labainduko. Beraz, aire gehiena hegoaren aldamentetik abiadura handiz pasatuko den arren, hegoaren gainazalean ukitzen dagoen airea ez da hegoarekiko higituko. Hegoaren aldameneko higidurarik gabeko aire-geruzaren, eta abiadura handiz higituz doan aire osoaren zati nagusiaren arteko fluxu-guneari *muga-geruza* deritzogu. Muga-geruza honetan, abiadura aldatuz joango da, horman duen zero baliotik, muga-geruzaren kanpoaldean biskositate-indarren eraginik gabeko balioraino.

52. irudiko muntaian, ezkerraldean dagoen atea zabaltzean, gainean duen ontzi batetik datorren glizerina ezkerreantz isurtzen da hodian zehar. Glizerina koloretuaz beteriko xiringa baten bidez, lerro bat irudikatu dugu fluidoko zenbait partikula markatuz. Ondoren, atea zabaldu dugu. Aipatu denez, fluxua ezkerreantz



53. irudia. 52. irudiko fluidoaren lerroa, fluxua denbora labur batez isuri ondoren. Lerroaren beheko muturra hormara lotuta geratu da.



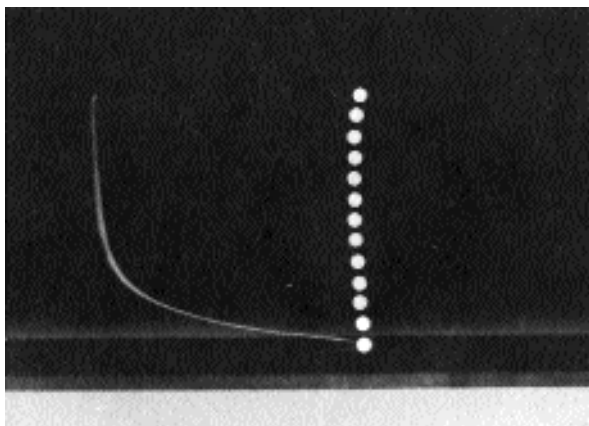
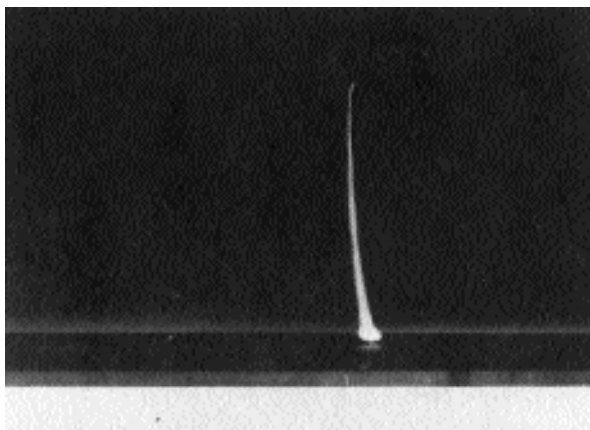
54. irudia. U-itxurako linea baten higidura fluidoan. (a) Fluxua hasi aurretik. (b) Fluxua hasi ondoren. U-aren zati horizontala, horma ukitzen dagoena, ez da mugitu.

doa, eta koloretutako lerroak hormatik distantzia desberdinetara dauden partikulak zein urrun eta zein abiaduraz higituko diren adieraziko du. Lerroaren higidura aztertuz —53. irudian berandua-goko kokapena agertzen da—, kanalaren erdian dauden partikulak abiadura handiagoz higitu direla, eta horman dauden partikulak mugitu ere egin ez direla esan dezakegu. Bestetik, 54. irudian agertzen den saiakuntzan, U-itxura duen glizerinazko lerroa irudi-

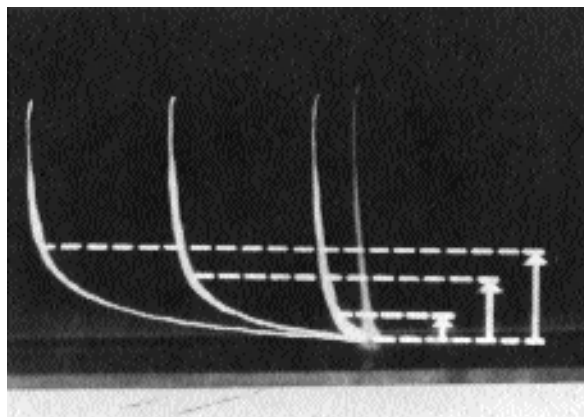
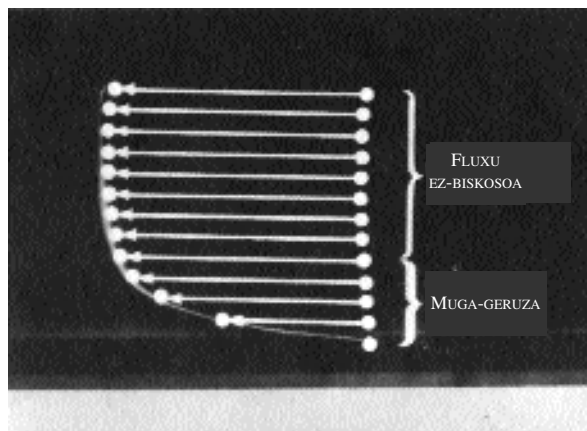
katu dugu, eta hormarekin kontaktuan dauden partikulak higitu ez direla behatu dugu. Hau da, labainketarik ez dagoela ikusi dugu.

55. irudiaren arabera, hormatik distantzia jakin batetik aurrera dauden partikulak abiadura berberaz higituko dira, korronteari segituz. 55b eta 55c irudiek erakusten dituzten konfigurazioetara heltzeko behar izan den denbora-tartean, fluidoako partikula bakoitzak hasierako kokapenetik bete duen ibilbidea, partikula horren batez-besteko abiaduraren adierazgarria da. Muga-geruza (55c irudian giltza lodiz mugatua), fluidoak abiadura galduz eta fluxua motelduz doan gunea da. Muga-geruzatik kanpo (55c irudian giltza mehez mugatua), biskositateak ez du fluxua oztopatzen.

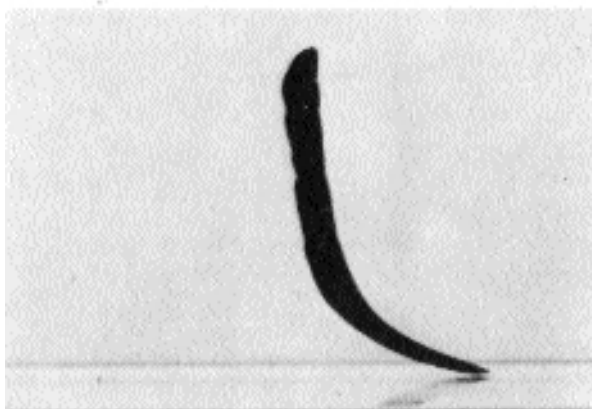
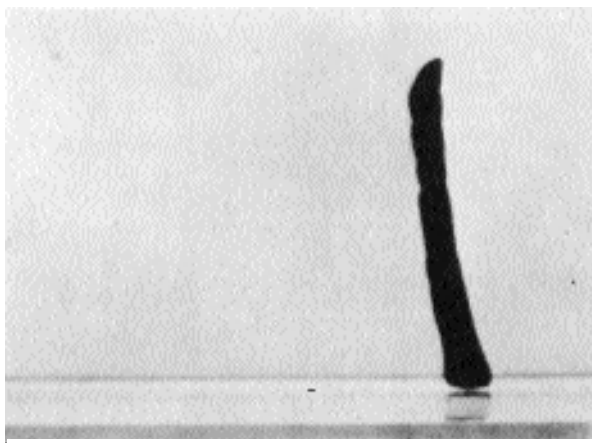
Hormarekin kontaktuan dagoen higidurarik gabeko fluidoaren geruzatik hasiko da muga-geruza eratzen. Aipatutako geruzarekin kontaktuan dagoen fluidoaren hurrengo geruzaren gaineko arraste biskosoa eragingo du lehenengoak, bigarrena motelduko duelarik. Bigarrenak, higidura-kantitatea galtzen hasten denean, hirugarrenaren gainean arraste biskosoa eragingo du eta berau ere momentu lineala galtzen hasiko da. Horrela, geruzatik geruzara. Beraz, biskositateak, horman gertatu den abiaduraren beherakada, kanporantz barreiatuko du, gero eta fluido gehiago muga-geruzan harrapaturik geratuko delarik. 55. irudiak erakusten du muga-geruzaren “zabaltze-prozesu” jarraitu hori, zeinean gezi bertikalek atzeraturiko fluido-geruzaren lodiera hiru aldiune desberdinetan adierazten duten.



55. irudia. Muga-geruza biskosoa adierazten duten argazkiak (negatiboan). Fluido eskuinetik ezkerrera doa. (a) Partikula koloretuen hasierako posizioa. (b) Partikula-linearen posizioa une bat beranduago, fluxua hasi ondoren. Puntuz adierazten den lerroa, 55a irudiko partikulen hasierako posizioa da.



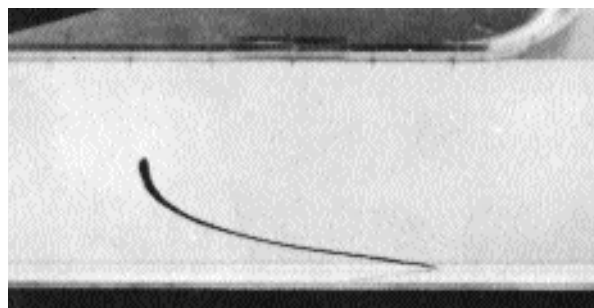
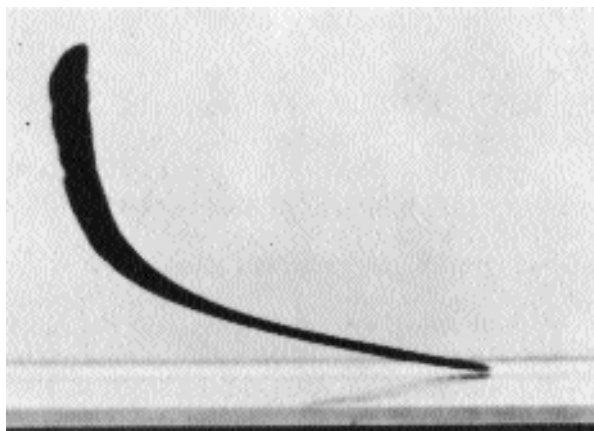
(c) 55b irudiko posizio bera. Gezien luzerak, 55a-ko hasierako posiziotik 55b-ko azken posiziora, partikula bakoitzaren batezbesteko abiaduraren proportzionalak dira. (d) Ondoz ondoko lau une desberdinetan, fluido-linearen posizioa agertzen duten argazki gainjarriak.

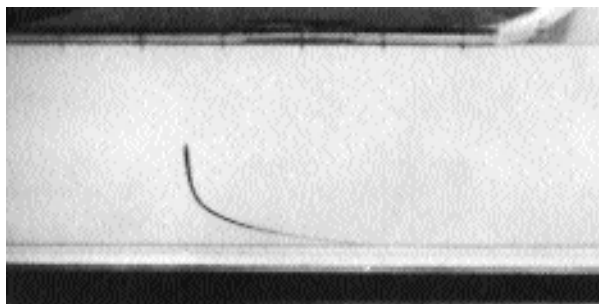


56. irudia. Muga-geruzaren hedapen arina abiadura txiki eta biskositate handietan. (a) Fluxua hasi aurretik. (b) Fluxua hasi eta berehala. (c) Zertxobait beranduago. (d) Muga-geruza kanalaren erdira heldu da, fluxu nagusiaren partikulek kanalaren zabalerako distantzia ibili orduko.

***REYNOLDS ZENBAKIAREN ERAGINA
MUGA-GERUZAREN HEDAPENEAN***

Muga-geruzak denbora-tarte jakinean izango duen hazkundea, biskositatearen, abiaduraaren eta dentsitatearen arabera da. Esaterako, 56. irudiko abiadura txikia eta biskositate handia duen adibidean, muga-geruzak oso denbora-tarte txikian hedapen handia lortu du: erdialdeko fluxu nagusiak kanalaren zabaleraren heineko distantzia bete duenean, muga-geruza kanalaren erdialdera heldu da. 57. irudian abiadura bereko baina biskositate txikiagoko fluido





57. irudia. Abiadura handiz eta biskositate txikiz, muga-geruzaren hazkunde-abiadura ertaina dugu.

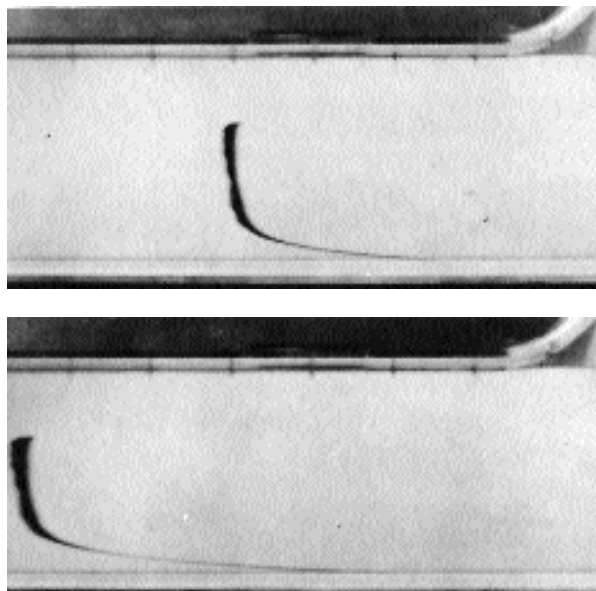
egindako saiakuntza dugu. Kasu honetan, muga-geruzaren hedapena motelagoa da. Azkenik, biskositate txikiko azken fluido horretan abiaduraren gorakadak dakarren eragina adierazten du 58. irudiak: muga-geruzak are hedapen txikiagoa dauka orain.

Laburbilduz, zenbat eta abiadura handiagoa edo biskositatea txikiagoa izan, hainbat eta motelagoa da muga-geruzaren hedapena. Reynolds zenbakiaren adierazpen kualitatiboa gogoratuz (abiadura $\times$ tamaina $\times$ dentsitatea/biskositatea), ondorio orokorrak lor daitezke: Reynolds zenbakiak gorantz egiten duen neurrian, muga-geruzaren hedapena gero eta motelagoa da. Baina —eta honek argituko du zergatik ezin dugun inoiz biskositatea arbuiatu— berdin dio Reynolds zenbakia zein altua den, eta ondorioz biskositatea zein txikia den, muga-geruza biskosoa oso mehea izanik ere, ez da inoiz desagertuko, horman neurtuko dugun abiadura beti nulua izango baita.

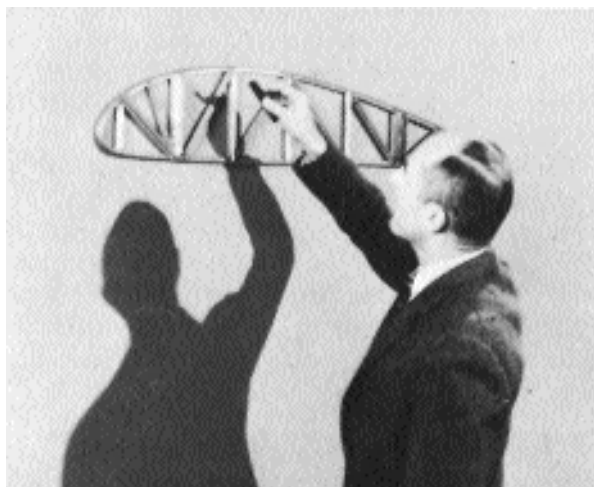
Hegazkinaren hegoari dagokion Reynolds zenbakia hain handia denez, muga-geruzaren hedapena kartoi arruntezko pieza baten zabalerakoa da (59. irudia). Konparatiboki hitz eginez airearen biskositatea txikia den arren, muga-geruza mehe horretako

biskositate-indarren balioak oso handiak dira, hazbetearen frakzioko tartetxoan, abiadurak zerotik ehunka mph-rainoko gorapena pairatuko duelako. Muga-geruzan dagoen fluidoko partikulek izugarrizko zeharkako deformazio-tentsioaren aldaketa jasango dute. Geroago ikusiko dugu muga-geruzaren portaera ulertzea zein garrantzizkoa den hegazkinen diseinuaren garapenerako.

Hegazkinaren hegoaren estalkia, errematxe bidez lotuta dago azpiko egiturari. Aintzinako hegazkinetan buru biribilak zituzten errematxeak erabiltzen zituzten, baina industriak dirutza handia gastatu du gainazalarekin parekaturik dauden buru zapaleko errematxeak lortzeko. Hegotik hasita hedatuko den muga-geruzaren zabalera zenbait hazbetetakoa balitz, aipatutakoak ez



58. irudia. Muga-geruzaren hazkunde-abiadura geldoa abiadura handiagotuz eta biskositate baxuaz.



59. irudia. Hegoaren muga-geruza oso txikia da hegoaren tamainarekin konparatuz.

luke zentzurik izango, errematxeek sortutako konkorra, geruzaren higidurarik gabeko hondoko gunean egongo litzatekeelako, eta helburu guztiei begira, muga-geruzatik kanpoko aire arinarekiko hegazkinaren hegoa leuna izango litzatekeelako. Baina erreallitatean, buru biribileko errematxeak oztopo handia dira muga-geruzako fluxuarentzat, eta hor datza buru zapaleko errematxeak erabiltzearen interesa.

Beraz, argudio berberei segituz, edozein gainazal, aerodinamikoki leuna edo latza izango da, bere gainazalean dauden gailurren eta haranen dimentsioak muga-geruzaren zabalerarekin alderatuz txikiak edo handiak diren heinean. Ura eramango duen burdinurtuzko hodia “latza” izan daiteke, hazbete laurdeneko diametroa duen kasuan, baina 30 hazbeteko diametroa duenean “leuna” da. Eta modu berean, 30 hazbeteko diametroa duen burdinurtuzko hodia, hazbete zortzireneko diametrodun beirazko hodia baino leunagoa izan daiteke hidrodinamikoki. Betiko moduan, laztasun “handia” edo “txikia” erlatiboki interpretatu beharra dago, kasu honetan muga-geruzarekiko.

Nola edo hala, guztiok ezagutzen ditugu muga-geruzak. Esaterako, egun haizetsuan hondartzan zaudela, airea “gainetik” kentzeko etzan egingo zara. Zenbait oinbetetako zabalera duen muga-geruza zabalean murgildu zara, zeinean airearen abiadura motelagoa den. Inoiz itsasontzi handian zoazela itsasora begiratu baduzu, ontziaren alboetan, kaskotik zenbait hazbeteko zabalerako abiadura motelagoko muga-geruza ikusi duzu. Ontziaren arku parean nahiko estua da, baina zenbat eta atzerago begiratu, nahiko zabalera handia hartzen du popa parean. Muga-geruza motako fluxua ikusteko, koipe beroa duen zartagina okertu eta koipea alde batetik bestera nola mugitzen den begiratzea ere nahikoa da.

VII. KAPITULUA

Fluxu laminarra eta fluxu zurrunbilotsua

Azter dezagun orain, muga-geruzetarako garrantzitsua den fluxuen beste propietate bat. Batzuetan, fluxuak oso leuna dirudi eta *laminarra* deritzogu. Beste batzuetan berriz, irregularra eta nahasia dirudi eta *zurrunbilotsua* edo *turbulentoa* deritzogu. Eguneroko bizitzan, aipatutako bi fluxu-moten adibideak ikus daitezke. Esaterako, gela oso lasai batean dagoen hautsontziko zigarrotik, nahastu gabe eta leunki gorantz doan ke-zutabe mehea ikus daiteke (60. irudia). Baina puntu batean, zutabea apurtu egingo da, eta kea arin eta irregularki barreiatuko da inguruetara. Ke-zutabeko zati leuna laminarra da, eta zati irregularra zurrunbilotsua.

Hain zuzen, 61. eta 62. irudietan, deskribatu berri dugun adibidearen antzekoa den saiakuntza kontrolagarria ikus daiteke. Bertan, hodi batetik airera deskargatuko den ke-zurrusta erabili da. Abiadura txikietan, zurrusta laminarra da hasieran, baina geroxeago zurrunbilotsu bihurtuko da, eta inguruko airearekin nahastuko da. Zurrustaren abiadura handituz doan neurrian, fluxu laminarretik zurrunbilotsurako trantsizioa arinago gertatuko da.

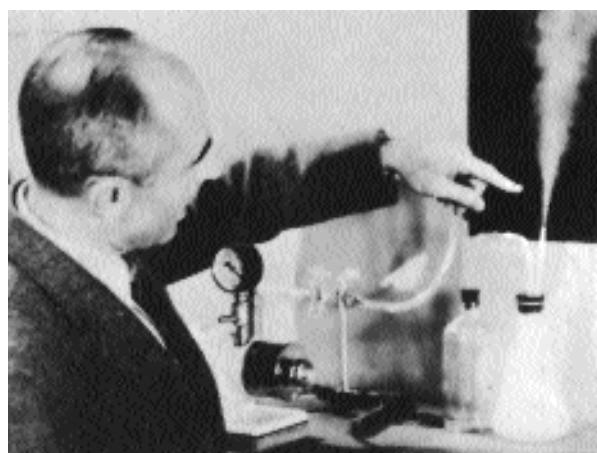
Ezaguna den beste adibide bat, kanilatik ateratzen den urarena da, eta zuk zeuk ere egin dezakezu (63. irudia). Abiadura txikietan, zurrustaren gainazala leuna da, beiraren itxura hartuz. Abiadura handietan, ordea, gainazala zimurtsua da. Bi konfigurazio hauek,



60. irudia. Ke-zutabea hasieran laminarra da, baina une batean ezegonkor bihurtzen da, eta azkenik zurrunbilotsua da.

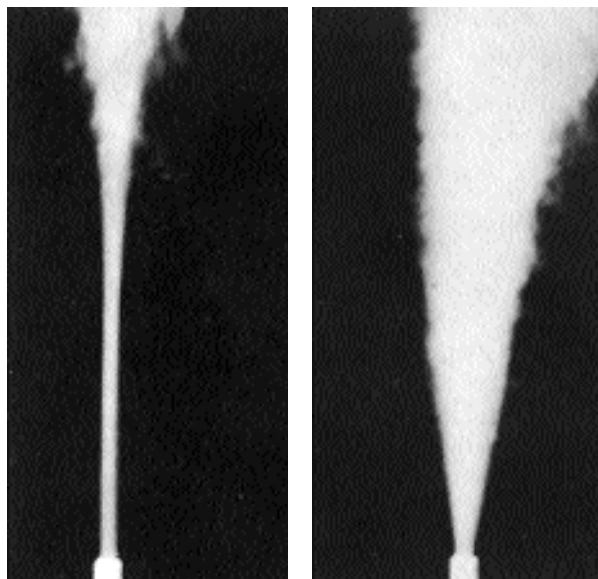
fluxu laminarrarekin eta zurrunbilotsuarekin lotuta daude, hurrenez hurren. Pitxerrari darion sirope pisutsuaren fluxua, fluxu laminarra da; gainera, oso zaila da zurrunbilotsu bilakatzea, fluxuaren edozein irregulartasun berehala indargetua izango baita, biskositate-indar bortitzen eraginez.

Baina, zein da fluxu laminarraren eta zurrunbilotsuaren arteko funtsezko aldea? Fluxu laminarrean fluidoaren partikulek korronteari jarraituko diote ibilbide leun eta erregularretan, fluido-ko geruzen artean nahastura nabarmenik gertatu gabe. Horrelako fluxua egonkorra da; hots, edozein partikulak, espazioko edozein puntutatik pasatzean, bere aurretik puntu berberera heltzean beste

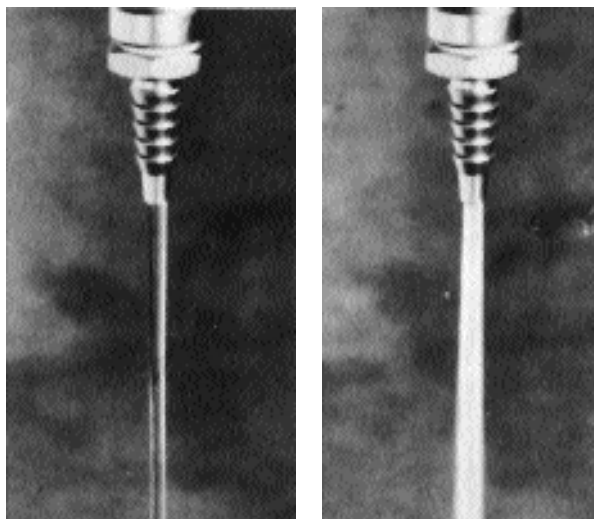


61. irudia. Kea sortzeko, airea titanio tetrakloruroan zehar pasarazten da. Ketutako airea kristalezko hoditik ateratzen da kontrolpeko abiaduran. (a) Abiadura txikian, hasierako bi hazbeteko tartean fluxua laminarra da, gero zurrunbilotsua bihurtu aurretik. (b) Abiadura handietan, zurrusta ia hasieratik da zurrunbilotsua.

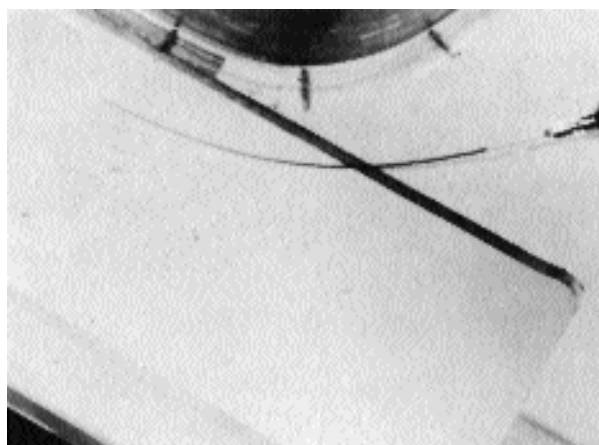
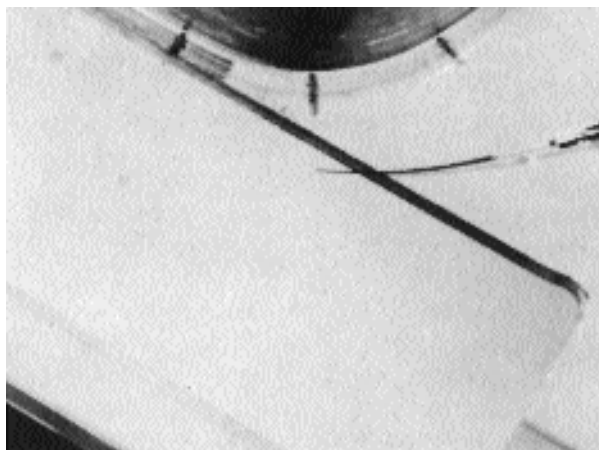
partikulek izan duten abiadura eta norabide berbera izango ditu. Bestalde, fluxu zurrumbilotsuaren kasuan, fluidoaren higidura nagusiari, irregularra eta itxuraz zorizkoa den higidura gainezartzen zaio, zeinak, korrante-lerroen arteko nahastura eta masa-trukatzea ekarriko duen. Nahastura honek korrante-lerro ezberdinen arteko fluido-partikulen trukatzeko dakar. Baina geroxeago ikusiko dugunez, ikuspegi dinamikoaren arabera garrantzia duena ez da masa-trukea izango, korrante-lerroen artean dagoen *momentu linealaren* trukea baizik. Hau da, nahastura-prozesuaren ondorioz, higidura arina duen partikulak azeleratu egingo du higidura moteleko partikula, eta, era berean, lehenengoa moteldu egingo da.



62. irudia. 61. irudiko ke-zurrustaren hurbileko argazkia.
(a) Abiadura txikian. (b) Abiadura handian.

**63. irudia.**

Puntu honetan, saiakuntzetatik ondoriozta dezakeguna aipa daiteke: ke-zurrustaren zein ur-zurrustaren adibideetako fluxu laminarretik zurrunbilotsurako trantsizioak, zurrustaren abiadura handiagotzean du jatorria. Orokorrago, Reynolds zenbakiaren balioa handitu dugula esan genezake. Egia esan, Reynolds zenbaki txikietan fluxuak laminarra izateko joera du. Hauxe da 64. irudian ikusten dena: xiringa hipodermikoa erabiliz koloratutako glizerina-zurrusta bat injektatu dugu glizerinazko fluxuan. Ia-ia ez dago nahasketarik. Bestalde, Reynolds zenbaki handietan, fluxua ezegonkorra da eta zurrunbilotsu bihurtuko da. Horixe da 65. irudian ikusten dena: isurian dabilen ur-korrontean ur koloratua injektatu dugu, eta berehala barreiatu da. Ahotik zigarroaren kea botatzean aterako den zurrusta ere zurrunbilotsua da, eta inguruetan oso arin barreiatuko da. Kea botatzen dabilen tximiniaren kasu berbera dugu. Baina, pitxerretik ontzira ezitia isurtzean, zurrusta era laminarrean eroriko da. Hegazkinean, ia muga-geruza osoa



64. irudia. Isurtzen ari den glizerina-korrante batean koloretutako glizerina injektatzen ari da, Reynolds zenbaki txikietan fluxua laminarra dela erakutsiz.



65. irudia. Isurtzen ari den uretan koloretutako urea injektatzean, Reynolds zenbaki altuetan fluxua ezegonkorra dela eta berehala zurrunbilotsu bihurtzen dela ikus daiteke.

zurrunbilotsua da. Arrain handiek muga-geruza zurrunbilotsuak dituzte. Oso txikiak diren elementuetan aldiz, bizidun zein bizigabe, zurrunbiloak ez dira ageri. Fluidoaren mekanika askoz sinpleagoa da mundu honetan, zorionez, zurrunbiloen kaos guztia ez baita agertzen.

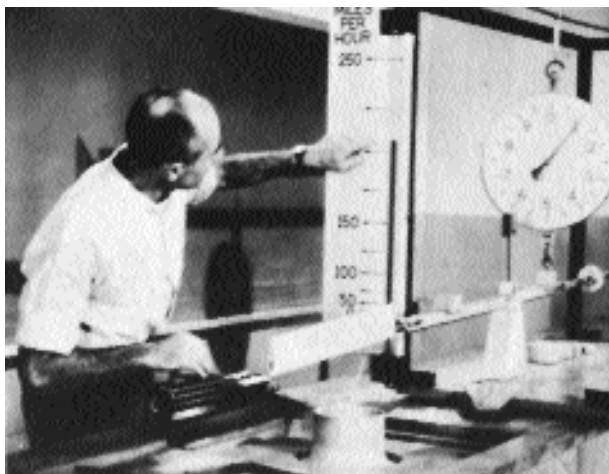
VIII. KAPITULUA

Arrastearen gutxipena, aerodinamikaren bidez

Egoera gehienetan arrastea edo erresistentzia txikiagoa izatea nahi izaten dugu (ez beti, hala ere, jauskailuen kasuan adibidez). Gorputzak jasaten duen arrastea gainditzeko, era batean zein bestean energia edo potentzia kontsumitu behar dugu. Esate baterako, hegazkin baten kasuan arrastea txikiagotuz, propulsiio- edo bultzapen-motor txikiagoa erabil dezakegu, edota urrunago joan gaitezke erregai-kantitate berberaz. Arrastea txikiagotzeko moduetako bat, aerodinamikaren bidezkoa da. Ikus dezagun zenbat aurrera dezakegun, haize-tunelean eginiko esperimentu erraz batzuen ondorioen bitartez.

AERODINAMIKAKO ESPERIMENTUAK

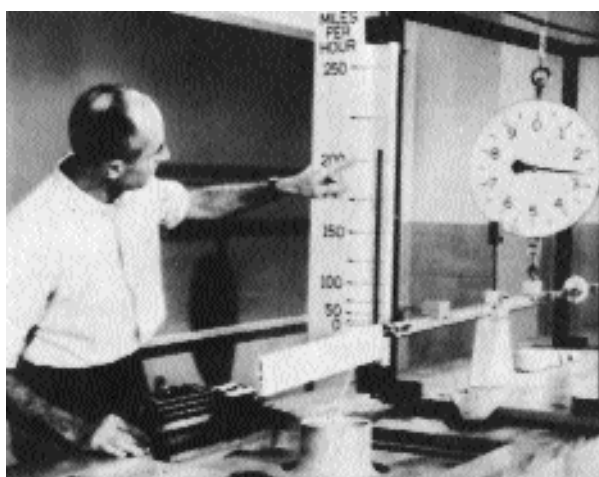
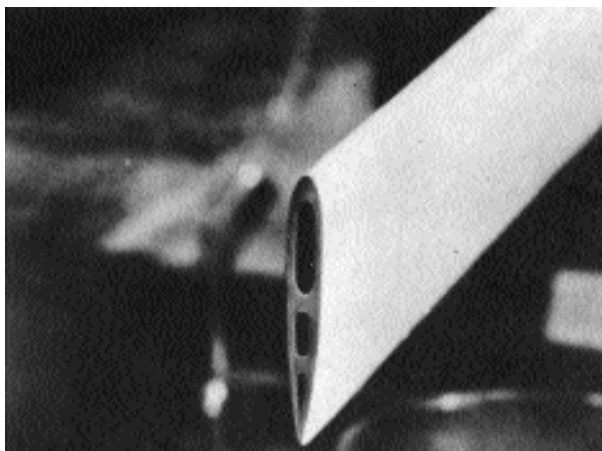
Saiakuntzak bideratzeko prozedura, aire-zurrusta banantzen duten bi dimentsioko forma desberdinei dagozkien arrasteak neurtzean datza, airearen abiadura konstantea mantenduz. Lehenengo saiakuntzan, hego bat bere posizio egokian muntaturik dago, aurreko ertz biribildua (“sudurra”) korronteari aurre eginez eta atzeko ertz zorrotza (“isatsa”) korrontean beherako jarreran dagoela. Areagotu egingo dugu haizearen abiadura, hegoaren gaineko arraste-indarrak eskalako unitate bateko balioa lortu arte (66. ird.). Gure kasuan



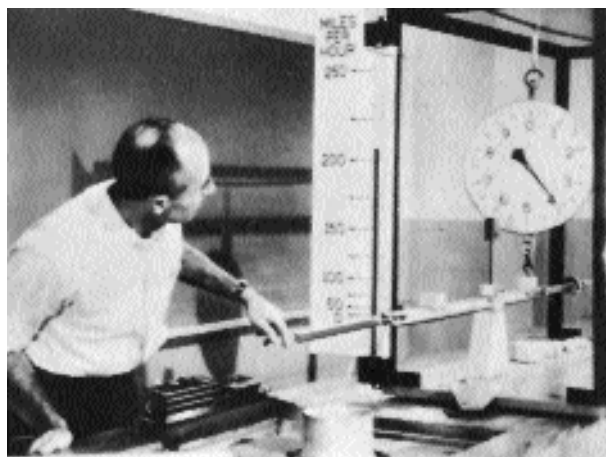
66. irudia. Hego aerodinamikoak 1,0 unitateko arrastea jasaten du haizearen abiadura 210 mph-koa denean.

hori 210 mph-ko (mila orduko) abiaduran gertatu da. Hurrengo saiakuntzetan birsortu egingo dugu abiadura hori berori, horrela, era errazean, beste formei dagozkien arrasteen balioak forma aerodinamikoa duen hegoari dagokion unitate bateko balio estandarrarekin konparatu ahal izateko.

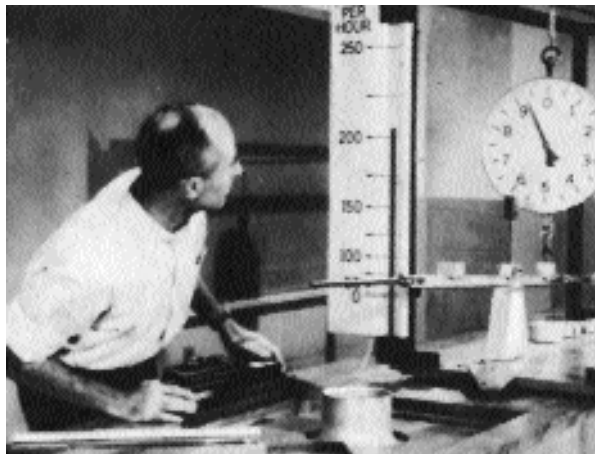
Aspaldi ez zela, fluidoaren dinamikari buruzko hainbat kontzeptu ongi ulertuak izan aurretik, jendeak uste zuen ezen, arraste minimoa lortzeko modurik egokiena laban-aihotz erako aurreko ertza edukitzea zela, nolabait esateko, horrek bidea fluidoan zehar “ebaki” egingo zuela uste izanik. Aldi berean, aurrealde biribilduak fluidoaren sudurrean inpaktatzera behartuko zuela uste zen, eta ondorioz arraste handia sorraraziko zuela. Iker dezagun iritzi hori lehenagoko hego aerodinamikoa biratuz eta ertz zorrotza aire-zurrustaren aurrez aurre jarritz, alegia, ertz biribildua atzealdean kokatuz (67a ird.). Airearen 210 mph-ko abiadura estandarraz pasaraziz, oraingoan arrastea dagokion eskalan 2,6 unitateko balioa irakurri dugu, uste genuenaren kontra (67b ird.). Lehenago aipatu-



67. irudia. Aurreko 66. irudiko hegoa alderantzizko jarrerari ipiniz, ertz zorrotza fluxuaren aurrez aurre alegia, arrastea 2,6 unitatera igo da.



68. irudia. Aurreko 66. irudiko hegoaren euskarri errektangeluarrak 4,0 unitateko arrastea jasaten du berak bakarrik.

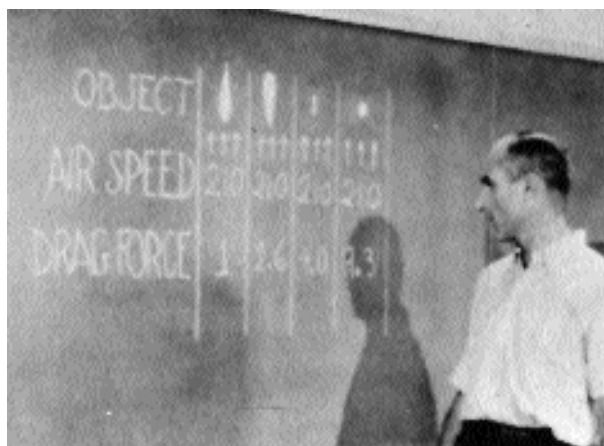


69. irudia. Hegoaren zabalera maximoaren adinako diametroa duen hodi biribilak 9,3 unitateko arrastea jasaten du.

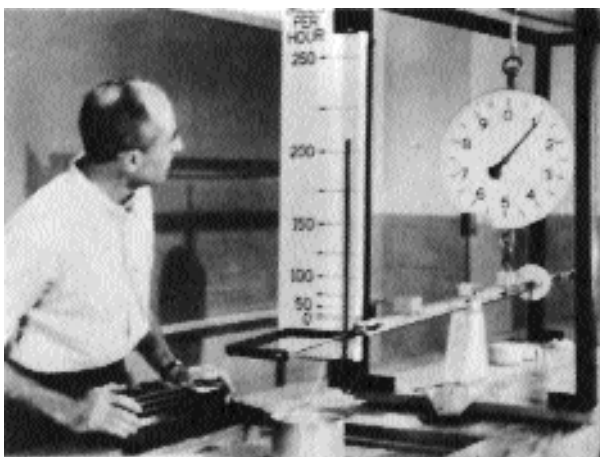
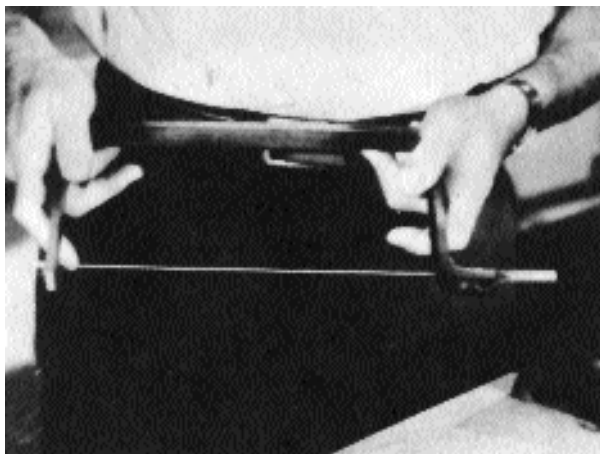
riko uste “zentzudun” hori zentzugabekoa da izatez, ez baitago funtsezko printzipioekin loturik. Nolabait esanez, asmaketa hutsa baino arriskugarriagoa da, zeren ekintza bat burutzera eraman baikaitzake, gure erabakiak benetako oinarririk ez duela konturatu gabe.

Ondoren, atera egingo dugu hegoba muntaturik egon deneko euskarri errektangeluarretik, era horretan konparatiboki txikiagoa den euskarri errektangeluar horrek berak bakarrik jasaten duen arrastea neurtu ahal izateko (68a ird.) Berriro ere aire-korrontea 210 mph-koa izanik, arrastea hegobari zegokiona baino lau aldiz handiagoa dela aurkitu dugu (68b ird.), eta hori euskarri errektangeluarrak azalera txikiagoa eta fluxuaren aurreko zeharkako azalera txikiagoa dituen arren.

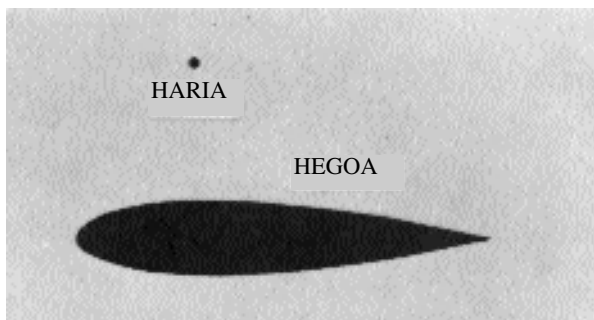
Hurrengo saiakuntzan palanka-besoan hodi zirkular bat muntatuko dugu, horren diametroa hegoba duen zabalera maximoaren balio berekoa izanik; horrela eginez, pentsa daiteke



70 irudia. Aerodinamikazko saiakuntzen laburpena.



71. irudia. Hegoaren zabalera baino hamar aldiz txikiagoa den diametroko hariak 1,1 unitateko arrastea jasaten du.



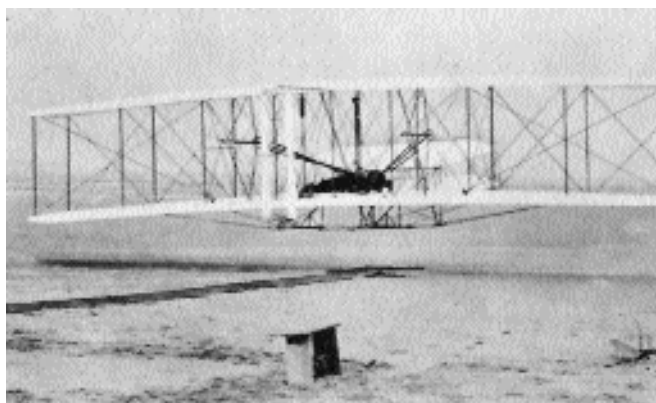
72. irudia. Arraste berbera jasaten duten hariaren eta hego aerodinamikoaren tamaina erlatiboak.

ezen hego aerodinamikoa hodia bera besterik ez dela, sudurra pixka bat zabaldurik eta atzealdean isats zorrotz bat jarriarik (69a ird.). 210 mph-ko abiadura estandarrean, hodi biribilak jasaten duen arrastea hego aerodinamikoak jasaten duena baino bederatzi aldiz handiagoa da.

Lau saiakuntza hauek froga dramatikoak eskaintzen digute, aerodinamikak arrastearen gutxipenerako eduki dezakeen balioa erakutsiz (70. ird.). Hegaldien hasierako egunetan, hegazkin biplanoen apogeoan bereziki, hari-eskorak (*wire struts*) erabiltzen ziren egitura zurruntzeko eta tentsionatzeko. Deskribatu berriak izan diren saiakuntzak kontuan edukiz, ondo imajina dezakezu hari horiek zernolako arrastea sorrarazten zuten.

Puntu hori aztertzeko, gazta mozteko aihotzen muntaien antzeko U-formako euskarri batean tentsatu dugu hari bat, zeinaren diametroa hegoaren zabalera maximoaren hamarrenekoa den, gutxi gorabehera (71a ird.). Euskarri hau gure neurgailuaren palanka-besoan muntatu da, euskarri bera haize-zurrustatik aparte gertatzeko moduan, horrela hariaren arrastea baino ez neurtzeko. Berriz ere 210 mph-ko abiadurako haizearen eraginez, oraingoan hariaren arrastea 1,1 unitatekoa izan da eskalan (71b ird.). Hamar aldiz zabalagoa den hegoak jasaten duena baino pixka bat handiagoa.

Forma aerodinamiko egokiaz, haria edo kablea baino hamar aldiz zabalagoa izanik ere, hegoak arraste txikiagoa jasan dezakeenez (72. ird.), argi ikus dezakezu arrazoi handia egon dela hegazkinen diseinuaren aldaketa itzelerako, orain dela berrogeita hamar urte Kitty Hawk-en Wright anaiek erabilitako makina gaur eguneko abiadura-handiko hegazkinekin konparatuz ikus daitekeenez (73. ird.).



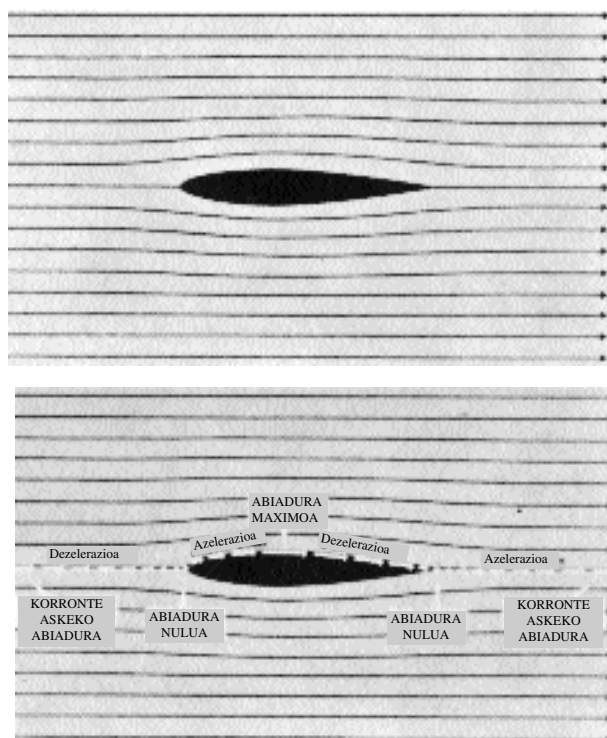
73. irudia.

BERNOULLI-REN PRINTZIPIOA FLUIDO EZ-BISKOSOEN FLUXUAREN KASUAN

Nola azal ditzakegu, aerodinamikaren bitartez lor ditzakegun irabazpen ikusgarriak? Arazoaren gakoa, muga-geruza bat presio txikiko alde batetik presio handiko alde batera pasatzera beharturik aurkitzean sortzen den egoera arriskugarriaren ulemenean datza. Muga-geruza geldi geratzen bada, hots, “kalaturik” geratzen bada, fluxu osoa etenda gera daiteke eta, gehienetan, horren ondorioa arrastearen gehikuntza handia izan ohi da. Hain zuzen ere, horixe da aerodinamikak saihestu nahi duen egoera.

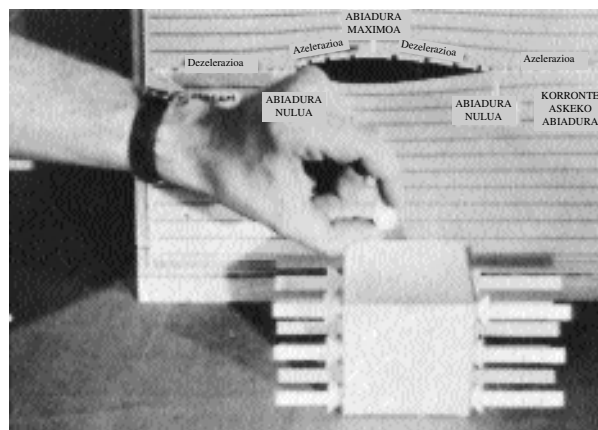
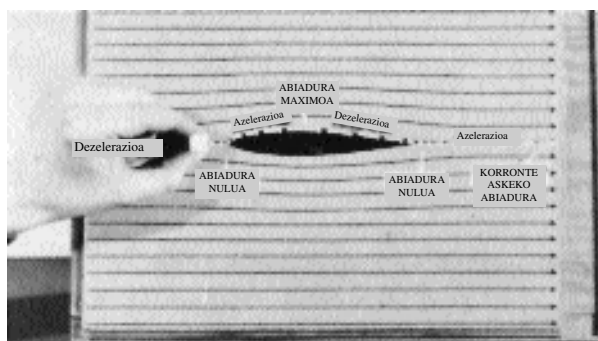
Hori guztia azaltzeko, lehenik eta behin, hego aerodinamiko batek zeharkatzen duen fluxua aztertuko dugu, fluidoak ezelako biskositaterik ez duela jorik. Biskositate-ezak inplikatu egiten du ezen fluidoak irrist egiten duela hegoaren gainazalaren gainetik. Fluxu honi dagozkion korrante-lerroak 74a irudian azaldu dira. Kontsidera dezagun erdiko korrante-lerroa; hain zuzen, lerro hori bitan banantzen da sudurrean, ondoren hegoaren alde banatatik (sorbaldetatik) doa, eta azkenik bi adarrak bateratu egiten dira isatsean. Fluxu horren analisi matematiko osoa egin daiteke, puntu bakoitzeko korrante-lerroen forma eta abiadura lortuz. Analisi horretatik lorturiko emaitzaren arabera, erdiko korrante-lerroaren puntu desberdinetako abiadurak, 74b irudian marrazturiko gezien luzeren proportzionalak dira. Korrantean gorako puntuetako korrante askeko abiadurekin hasiz, fluido-partikulak dezeleratuz doaz, sudurrean abiadura nulua izanik. Abiadura nuluko puntu horri *estankatze-puntua* edo *gelditze-puntua* deritzo. Fluido-partikula gelditze-puntutik hasi eta hegoaren gainazaletik korrantean behera doanean, lehenik azeleratu egiten da, hegoaren zabalera maximoko posizioaren inguruan bere abiadura maximoa lortu arte. Gero fluido-partikula dezeleratu egiten da, isatsean dagoen beste gelditze-puntura heldu arte, eta ondoren berriro azele-ratzen da, korrantean beherako korrante askeko abiadurara iritsi arte.

Newton-en higidura-ekuazioen bidez pentsatuz, orain imajinatu egin dezakegu nola aldatzen den presioaren balioa korronte-lerro zentral horretan zehar. Fluido-partikula dezeleratuz doa korrontean gorako urruneko puntutik hegoaren sudurrerantz hurbiltzean (75a ird.). Hipotesiaren arabera, biskositate-indarririk ez dago; beraz, dezelerazioa, partikularen atzealdeko eta aurrealdeko presio-indarren eraginez sor daiteke soilik. Honetaz sakonago pentsatzeko, 75b irudia azter dezakegu, zeinean eskala handian

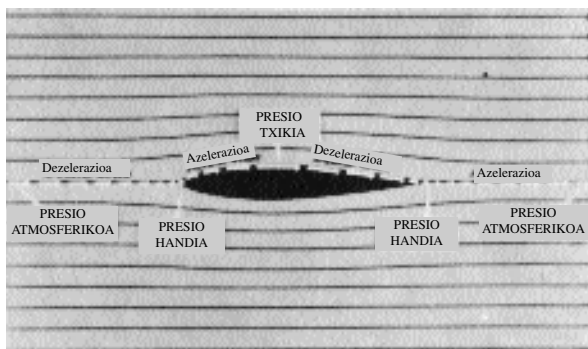


74. irudia. Fluxu ez-biskosoa hegoaren inguruan. (a) Korronte-lerroen egitura. (b) Hegoaren ingurumaritik doan korronte-lerroko puntuen abiadura-banaketa.

adierazi den fluido-partikula bat. Fluido-partikula hori dezeleratzen ari bada, bere gainean eragiten ari den indar netoak, higiduraren noranzkoaren aurkako noranzkoa izan behar du. Beraz, partikularen aurrealdeko aurpegian dagoen presioak, atzealdeko aurpegian dagoena baino handiagoa behar du izan. Gertaera hori



75. irudia. Bernoulli-ren printzipioaren adierazpide grafikoa, biskositate-indarririk gabe higitzen ari den fluido-partikula baten gainean, korrante-lerro jakin batean. Partikula dezeleratzen bada, presioa handiagotu egiten da; eta alderantziz.



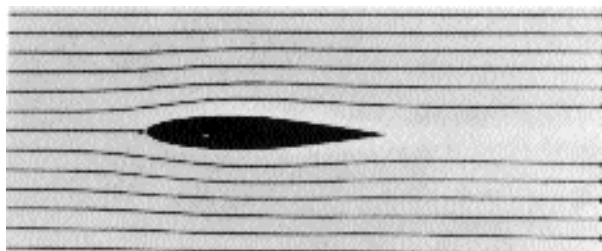
76. irudia. Bernouilli-ren printzipioaren arabera, inferitu egin daiteke presio-banaketa, 74b irudiko abiadura-banaketatik.

Bernouilli-ren printzipioaren bidez adieraz daiteke, zeina era honetan enuntzia daitekeen: Fluxu ez-biskosoaren kasuan, dezelerazioekin batera presioaren gorakada gertatzen da korronte-lerroan zehar; alderantziz, azelerazioa gertatzean, presioaren beherakada azaldu behar da korronte-lerroan zehar. Alegia, labur esanda, korronte-lerro jakin batean zehar: (1) abiadura handia den puntuetan, presioa txikia da; eta (2) abiadura txikia den puntuetan, presioa handia da.

Bernouilli-ren printzipioaren ondoriozko baieztapen hori erabiliz, hegoaren gainazalaren gainean eragiten ari den presioaren banaketa ondoriozta dezakegu (76 ird.). Hegotik urrun egonik, korrontean gora zein korrontean behera, abiaduraren balioa trabarik gabeko abiadura askea den tokietan, presio atmosferikoa dugu. Sudurrean eta isatsean —horietan abiadura nulua baita— presioa maximoa da. Eta sorbalda edo erdialdean, abiadura maximoa den puntuetan, presioak bere baliorik txikiena du. Beraz, fluido-partikula hegoaren gainazalean zehar higitzen ari denean, sudurretik sorbaldara momentu lineala handiagotuz doa eta presioa

txikiagotuz. Ondoren, galduz doa momentu lineal hori sorbaldatik isatserako bidean, presioa irabaziz.

Ikus daitekeenez, fluidoaren presioa handia da bai sudurrean eta bai isatsean. Azken puntuko presioak arrastea esan nahi duen aldi berean, sudurrekoak bultzada esan nahi du, hots, arraste edo erresistentzia negatiboa. Teorikoki froga daitekeenez, goranzko bultzada gabeko (*nonlifting*) forma aerodinamikoa fluido ez-bisko-soan higitzean, bi osagai horiek elkar anulatzen dute zehazki. Alegia, hemen aipaturiko baldintzetan, ez dago inolako arrasterik. Ondorio honi *d'Alembert-en paradoxa* deritzo, izan ere, intuitiboki oker edo desegoki baitirudi fluido baten barnean gorputz bat erresistentziarik gabe higitu ahal izatea, fluidoa ez-biskosoa izanik ere (zein engainagarri den gure intuizioa holako gaitan!).

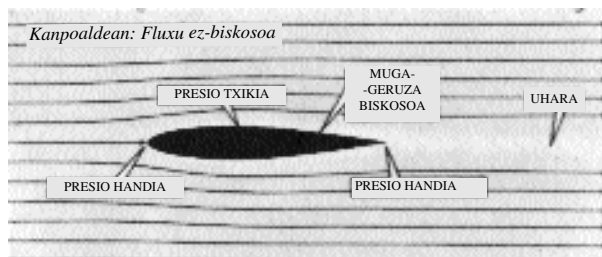


77. irudia. Biskositate txikiko fluxu batean (adibidez, Reynolds zenbakiaren balio handien kasuan) biskositatearen efektuak mugaturik daude gorputzetik hurbil dauden muga-geruza mehe batzue-tara, zeintzuek irudi honetan eskualde argiago modura azalduta dauden atzeko lortzarekin edo uhararekin batera.

BISKOSITATEAREN EFEKTUA PRESIO-BANAKETAN

Orain arte hegoari buruz esandakoa, biskositaterik ez dagoelako suposizioan oinarritutakoa izan da. Orain, biskositatea dagoenean gauzak nola aldatzen diren aztertzeaz arduratuko gara. Fluidoak ezin du irrist egin hegoaren gainazaletik. Aitzitik, hegoaren gainazala ukitzen dauden fluido-partikulen abiadura nulua da. Oraingo egoera hain da desberdina ezen, lehenengo begiradan, fluido ez-biskosoaz eratutako pentsamoldea erabat zentzugabea dela uste dezakegun. Dena den, gogoratu egin behar dugu ezen Reynolds zenbaki oso handien kasuan, indar biskosoak gainazal solidoetatik hurbil dauden muga-geruza oso meheetan soilik direla garrantzitsuak (77. ird.). Gainerako fluxua lehenago biskositaterik gabeko kasuan azaldu dugun modura portatzen da, gutxi gorabehera. Hegoaren gainazalaren gainaldeko presioaren banaketa, oro har, fluxu ez-biskosoko multzo nagusiaren kasukoa bezalakoa da, eta muga-geruzarik ez balego bezalakoa, gutxi gorabehera. Gainera, nolabait esateko, fluxuaren multzo osoaren presio-banaketa hori inprimaturik dago, gorputzaren alboan astiro higitzen ari den fluidoaren muga-geruza oso mehe batean. Astiro higitzen ari den muga-geruza horretako fluido-partikulek erantzun egin behar diete presio-banaketaren kausaz sorturiko indarrei (78. ird.).

Sudurraren eta sorbaldaren arteko muga-geruzako partikulak bultzatuak dira korrontean behera, presio beherakorraren eraginez. Sorbaldara iristean, muga-geruzako partikulak presio minimoko puntura heltzen direnean, hala ere, beraien momentu lineala bestela izan behar luketena baino txikiagoa da, partikulek jasan dituzten aurrakako biskositate-indarren eraginez. Beraz, sorbaldatik isatserainoko bidea egiten jarraitzean, muga-geruzako partikulak ez dira soilik momentu lineal txikiagorekin higitzen hasten; horrez gain, aurre egin behar diete aurrakako bi indar-motei, alegia, biskositate-indarrei eta oraingo presio hazkorrak sortutakoei. Presio-hazkuntzaren heina oso handia bada, muga-geruzako partikulak “hilda” gelditzeraino geraraz daitezke. Fenomeno honi *geldiketa-gunera*



78. irudia. Muga-geruzaren gainean inprimaturiko presio-banaketa, zeinari muga-geruzako partikulek erantzun behar dioten.

heltzea (*stall* ingelesez) deritzogu. Behin muga-geruza geldituz gero, partikulak atzerantz bultzaturik gerta daitezke, isatseko presio handiagoaren eraginez. Muga-geruzako fluxuaren alderantzaketa horrek “hildako” fluidoaren eskualde zurrunbilotsua sortzen du, eta fluxu nagusiaren etendura eta nahaspila, eta horren ondorioz, fluxu nagusia “hildako” eskualde horren inguruan isur daiteke.

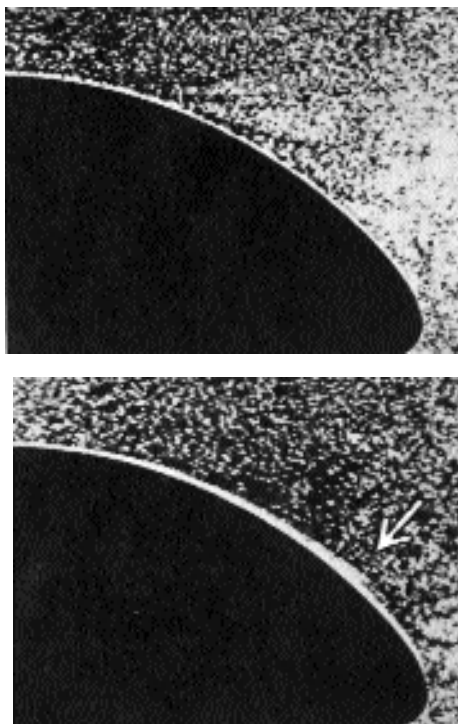
AURKAKO PRESIO-GRADIENTEAREN ERAGINPEKO MUGA-GERUZAREN GELDIKETA-GUNEA

Hurrengo orrialdeetan, pelikula higitzaile batetik harturiko argazkietan, geldiketa ekiditeko lodiak den hego baten atzeko aldera iritsi aurreko fluxuaren finkapena ikus daiteke. Fluidoak ezkerretik eskuinerantz isurtzen da, eta gezi zabalak muga-geruzako partikulen geldiketa non hasten den adierazten du. 79a irudian fluidoak pausagunean ageri da, uretan aluminio-partikulak egonik, higidura ikuskor bihurtzeko. 79b irudian fluxua abiaturik dago eta muga-geruza gero eta lodiagoa eginez doa denbora pasatu ahala. Gezitik hurbil, muga-geruza motelduz doa geldiketa-guneraino, fluxu nagusian sorturiko presio-gradientearen eraginez. Hildako muga-

-geruza honetako fluidoak pilatu egiten da gero eta lodiagoa den eskualdean (79c irudia). Orduan geldi dagoen fluido-eskualde hori bultzatua da atzerantz presio-eremuaren eraginez, eta fluidoaren multzo nagusia *banandu* egiten da gainazaletik eta isuri egiten da, goialdean birtzirkulatzen duen muga-geruza bat eratuz, 79d irudian marrazturiko gezia ikus daitekeenez. Azken argazkiak, 79e irudiak, erabat garaturiko geldiketa-gunea erakusten du. Ikus dezakezunez, geldiketa-guneak fluxu nagusiaren zenbait zenbait bananketa-alde ditu, eta baita eskala handiko zurrunbiloak ere, muga-geruzaren birtzirkulazio-eskualdean.

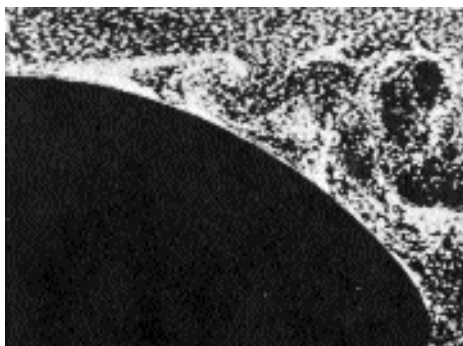
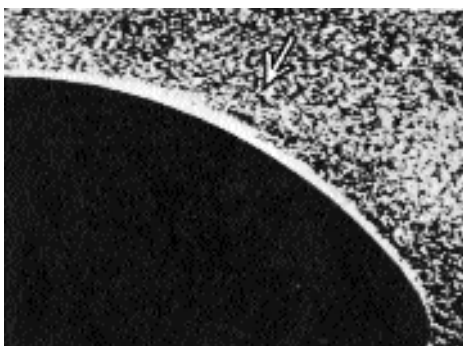
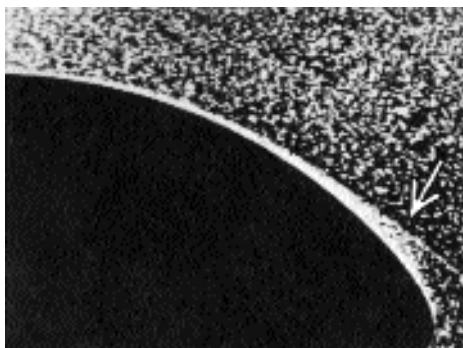
Analogia baten bidez azal dezakegu geldiketa-guneen kontzeptua. Demagun katilu esferiko baten ertzean geldi dagoen puxtarriak ukitu txikia jasaten duela. Katiluan behera errotatu ahala, puxtarriaren abiadura handiagotuz doa. Beheko puntura iritsi ondoren, abiadura motelduz doa, beste aldetik gorantz errotatuz doan neurrian. Marruskadurarik ez balego, energia potentzialaren eta energia zinetikoaren arteko bihurteta galerarik gabe gertatuko litzateke, eta puxtarria doi-doi iritsiko litzateke katiluaren ertzeraino, bere momentu linealaren azken apurra horretan erabilia izango bailitzateke. Baina, marruskadurarik balego, izan daitekeen txikiena izanik ere, puxtarria “gelditu” egingo litzateke goialdera iritsi aurretik, eta berriz ere abiatuko litzateke, katiluan behera errotatuz. Muga-geruzako fluido-partikulak antzera higitzen dira, eta presio-tontor batean behera doaz sudurretik sorbaldara, eta gero presio-tontorrean gora doaz, sorbaldatik isatsera.

Baina —zorionez— analogia ez da erabat zehatza. Horrela balitz, beti egon beharko litzateke atzeranzko fluxuren bat muga-geruzan, eta, beraz, beti gertatuko litzateke fluxu nagusiaren bananketa. Baina, izatez, muga-geruza kanpoaldeko fluidoak baino askoz astiroago higitzen denez, kanpoaldean bizkor higitzen ari den fluidoak biskositate-indarra egiten dio astiro higitzen den muga-geruzako fluidoari, muga-geruzari korrontean behera



79. irudia. Pelikula higikor bateko argazkiak, aurkako presio-gradiente bortitza sortzen duen objektu baten inguruan pasatzen den fluxuaren finkapenean zehar eratzen den muga-geruzaren bananketa-mekanismoa erakutsiz. (L. Prandtl, Göttingen)

higiaraztera *laguntzen* dion noranzkoan hain zuzen ere. Egoera hori oso konplikatua da, orain hiru indarren arteko balantzea aztertu behar baitugu. Kontua da, ea kanpoaldeko fluxuak sorrarazitako biskositate-indar hori aurkako bi indarren konbinazioari aurre egiteko nahiko handia den ala ez jakitea, alegia, hormako marruskadura-indarrari eta sudurretik isatserako presio-emendioen eraginez sortutakoari aurre egiteko gai ote den.

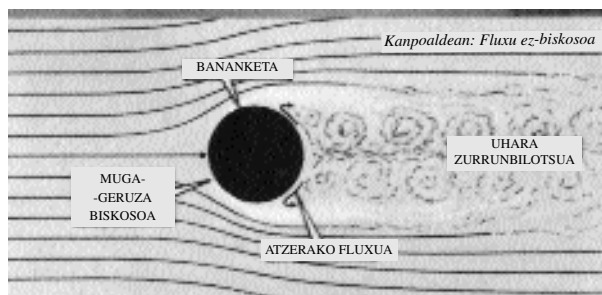


PRESIO-ARRASTEA FORMA AERODINAMIKOEN ETA FORMA EZ-AERODINAMIKOEN KASUAN

Isats estua duen gorputz mehe baten kasuan, hego aerodinamiko baten kasuan adibidez, sorbaldatik isatsera dagoen presio-emen-dioaren heina hain da txikia ezen muga-geruza oso hurbil manten-tzen dela isatserako bide osoan zehar, geldiketa-gunerik izan gabe. Kanpoaldeko fluxu nagusia ia inolako biskositaterik ez balego sortuko litzatekeen fluxua bezalakoa da. Gorputzaren gainazalaren gainaldeko presio-banaketa fluido ez-biskosoari dagokiona bezala-koa da ia-ia, eta ondorioz ez du ia presio-arrasterik sortzen.

Honaino iritsita, zehatzagoak izan gaitezke “aerodinamiko” adjektiboaren esanahiari dagokionez. Definizioz, forma bat aerodinamikoa dela esaten dugu, muga-geruzaren bananketarik ez dagoenean. Reynolds zenbaki altuen kasuan, objektu aerodina-mikoak ez du ia presioaren kausazko arrasterik jasaten, zeren atzeko muturreko batezbesteko presioa aurreko muturreko batezbesteko presioaren balio berekoa baita.

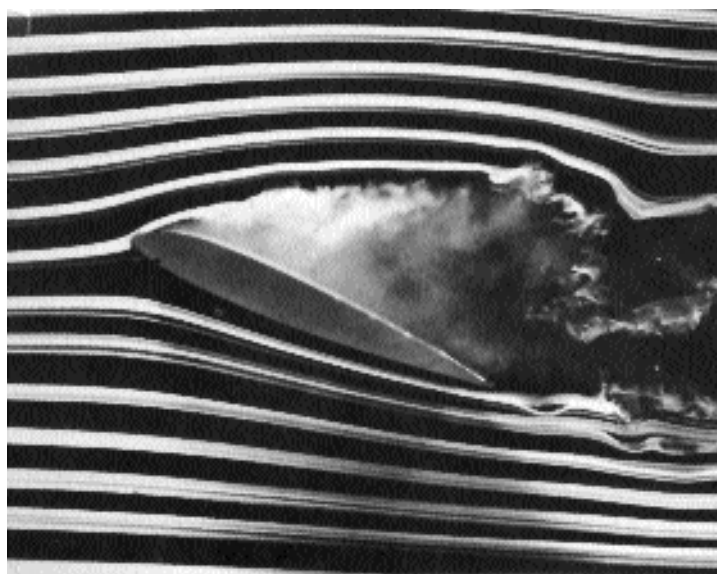
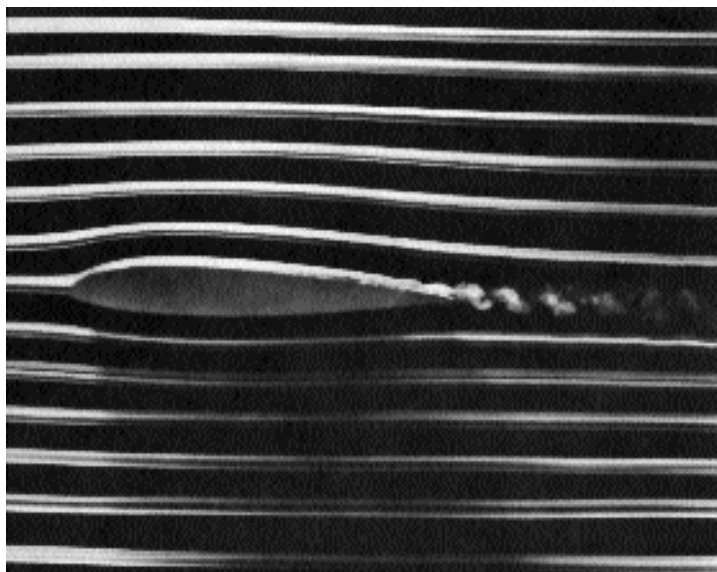
Zer esan dezakegu orain aerodinamikoak ez diren objektuei buruz, hala nola makila biribil bati buruz edo esfera bati buruz? Objektu hauek “kamutsak” direla esan ohi dugu, isats luze-esturik ez dutelako. Objektu kamutsen kasuan, sorbaldatik isatsera dagoen presio-emen-dioaren heina hain da handia, ezen muga-geruza laster heltzen dela geldiketa-gunera, sorbaldatik bertatik oso hurbil. Uhara zurrunbilotsu zabala eratzen da korrontean behera bananketa-gunetik hurbil (80. ird.), forma aerodinamikoaren kasuko uhara biskosoa baino askoz zabalagoa dena. Gainera, uhara zurrunbilo-tsuak okupaturiko espazioaren kausaz fluxu nagusian gertatzen den eragozpenaren ondorioz, aldatu egiten da fluxuaren egitura, eta horrekin batera, presio-banaketa. Gorputzaren atzealdeko presioa ez da orain aurrealdeko presioaren berdina; aitzitik, sorbal-dako presio baxuaren eta sudurreko presio altuaren tartekoa da. Gorputzaren aurreko erdialdeko batezbesteko presioa atzeko



80. irudia. Reynolds zenbaki altuen kasuan forma ez-aerodinamikoa duen gorputzaren inguruko fluxuaren egitura. Biskositate txikienak ere uhara banandu handia sortzen du, fluxu nagusiaren izaeraren eta presio-banaketaren erabateko aldaketa sorraraziz.

erdialdeko batezbesteko presioa baino handiagoa denez, presio-arraste netoa sortzen da. Gorputz kamutsen kasuan presio-arraste neto hori fluxuaren bananketarekin konbinatzen da, eta bien eragina gorputzaren gainazaleko marruskaduraren kausazko arrastea baino zenbait aldiz handiagoa izaten da; horrek azaltzen du forma aerodinamikoekin konparatuz forma ez-aerodinamikoek jasaten duten arraste askoz handiagoa.

Nolanahi dela, objektu aerodinamikoek ere —hala nola forma egokiko hegoek— izan ditzakete geldiketa-guneak, fluxuarekiko angelu desegokietan jarri gero. Hain zuzen ere, horixe gertatzen da, hego batean sostengu-indar handiagoa lortzeko ahaleaginean, eraso-angelua handiagotzean. Eraso-angeluaren aldaketak aldarazi egiten du presio-banaketa, batez ere goiko gainazalaren inguruan (edo “zurrupatze-gainazalaren” inguruan), banaketa hori sustengu-indarraren sortzaile nagusia izanik. Eraso-angelua balio kritikoa baino handiagoa bada, muga-geruzak geldiketa-gunea du goiko gainazalaren gainean eta fluxu nagusia banandu egiten da goiko gainazaletik (81. ird.). Orduan arrastea asko handiagotzen da, eta, garrantzitsuagoa dena, sustengu-indarra txikiagotu egiten da



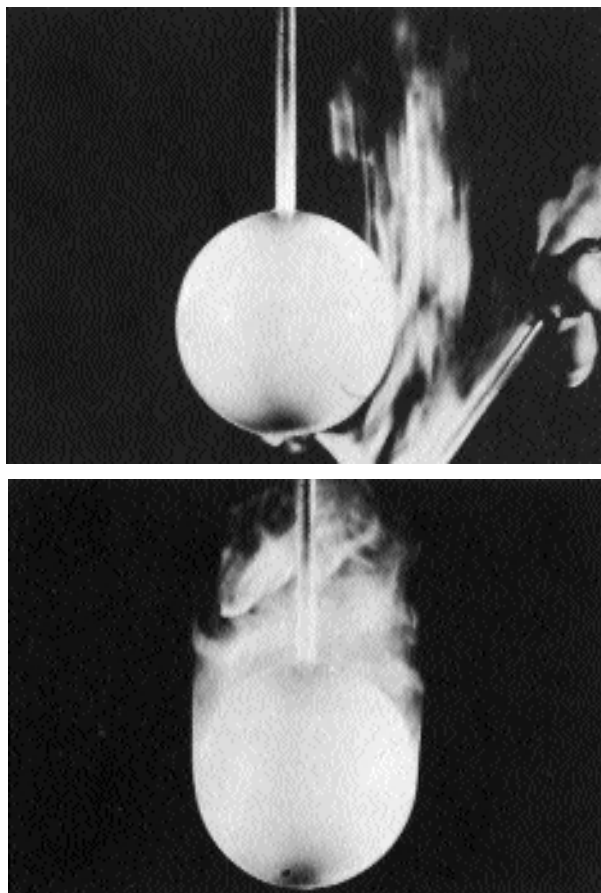
bat-batean. Esandakoa lurreratzen ari den aireplano edo hegazkin bati gertatuz gero, “talo egiten du” (*to pancake* ingelesez) lurrerantz —“ipurdiz behera” erortzeko higidura hartzen du, alegia—, eta horrek hondatu egin dezake hegazkinaren lurreratze-trena. Geldiketa-gune hori hegaldi erdian gertatzen bada, hegazkina biraka has daiteke ginbalet eran. Lurreratzeko eta aireratzeko uneetan sustengutza handia sortzeko, baina aldi berean geldiketa-guneen arriskura eraman dezakeen gehiegizko eraso-angeluak ekiditeko, hegazkinek aleroi edo hegala zabalkorrak dituzte, hegoen azalera handiagotzeko.

MUGA-GERUZAREN BISUALIZAZIOA

Muga-geruzaren fenomenoak esperimentalki irudikatzeko, aire-fluxuan titanio tetrakloruro likidua gehi dezakegu. Tetrakloruroa konbinatu egiten da aireko ur-lurrunarekin, ke oso fineko hodei trinkoa eratuz. (Esperimentu hauetan kontuz eta ardura handiz ibili behar da: aipatutako kea oso toxikoa da.)

82a irudian, titanio tetraklorurozko tanta bat jartzen ari da esferaren sudurrean. 82b irudian ikus daitekeenez, muga-geruza mehea da eta itsatsita mantentzen da esferaren lodiera maximoko puntura iritsi arte doi-doi; eta ondoren, muga-geruza banandu egiten da, eta fluxu nagusia, esferatik hurbil isuri ordez, desbi-deratu egiten da, gutxi gorabeherako uhara-eskualde zilindrikoa eratuz.

81. irudia. (a) Hego aerodinamikoa, eraso-angelu txikiaz. Muga-geruza mehea da eta itsatsita mantentzen da. (b) Hego aerodinamikoa, eraso-angelu handiegiaz. Muga-geruza banandu egiten da hegotik, geldiketa-gunea sortuz. (F. N. M. Brown irakaslea, University of Notre Dame)



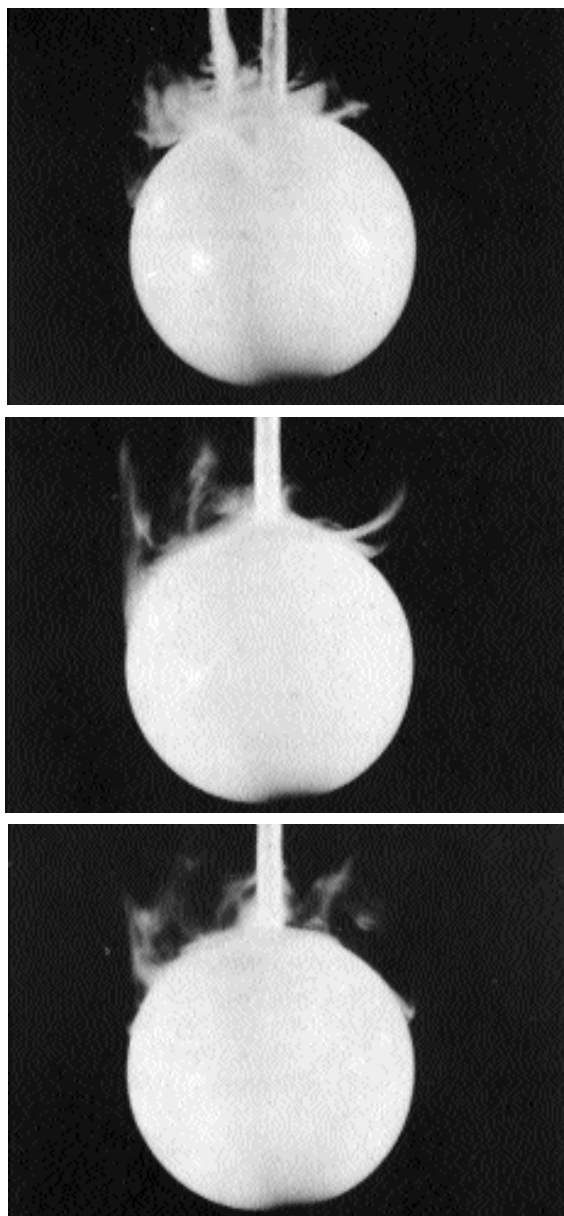
82. irudia. Muga-geruzaren bisualizazioa, esfera baten inguruko goranzko fluxuaz. (a) Sudurrean titanio tetraklorurozko tanta bat isuri da. (b) Sortutako fluxuan, muga-geruza oso mehea da aurreko erdialdean, eta huts-hutsik ikus daiteke; baina bananketa zorrotza dago sorbalda pasatu eta segidan; korrontean behera uhara zabal eta aldakorra dago, zurrumbiloz betea.

83. irudian bolaren atzealdeko puntuan jarri da titanio tetraklorurozko tanta. Bertan sorturiko kea, atzealdeko puntu horretako presio altuko eskualdetik sorbalda inguruko presio baxuko eskualderantz higitu da, eta orduan kiribildu egin da eta bete egin du sorbaldatik hasita korrontean beherantz dagoen espazio osoa.

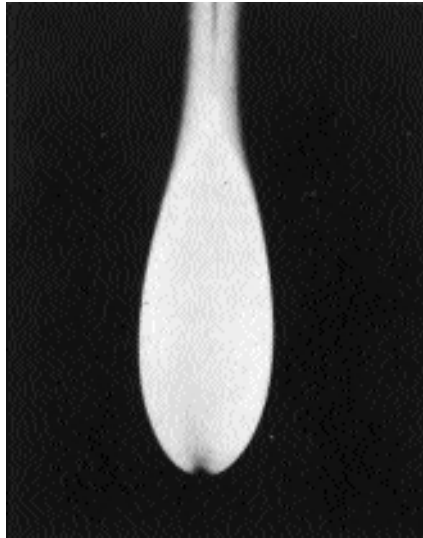
Titanio tetraklorurozko tantatxoa forma aerodinamiko baten sudurrean jartzean gertatzen dena ikus dezakegu 84. irudian. Muga-geruza mehea itsatsita mantentzen da sorbaldaz harantzago ere. Halaber, uhara oso mehea dela ikus dezakezu. Kasu honetan presioaren berreskurapena ia erabatekoa da isatsera iristean, eta presio-arrastea txikia da.

AERODINAMIKAKO ESPERIMENTUEN AZALPENA

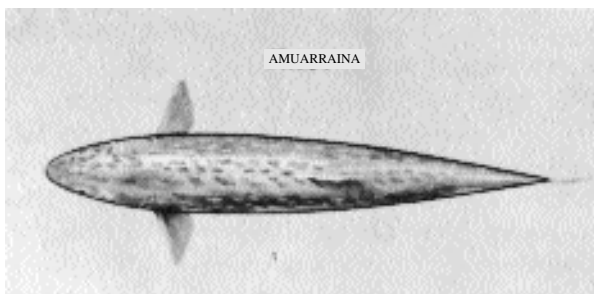
Orain, aldeko eta aurkako presio-gradienteen eraginpean muga-geruzek duten portaera ulertu ondoren, atzerantz egin dezakegu, lehenago egin ditugun arraste-esperimentuetara itzuliz, eta ulertu egin dezakegu zergatik zuen hegoak arraste txikiagoa jarrera ego-kian jartzean, ertz zorrotza haizeari begira jartzean baino. Azken orientazio horretan, sorbaldaz harantzago formak presio-emen-dioaren hein handia sorrarazten du. Aldi berean, baldintza horrek muga-geruzaren berehalako bananketa sorrarazten du, eta halaber presio baxua uharan; ondorioz, presio-arraste handia sortzen da. Eta bestelako formek ere —euskarri errektangeluarrak, makila biribilak, hariak— aurkako presio-gradiente latzak dituzte, fluxu bananduak eta presio-arraste handiak sorraraziz.



83. irudia. Pelikula higikor bateko ondoz ondoko argazkiak, geldiketa jasaten duen muga-geruza baten atzeranzko fluxua adieraziz. Airea gorantz isurtzen ari da esferaren ingurutik. (a) Titanio tetraklorurozko tanta bat euskarri-makilatik hurbil jarri da, hodi-garbigailu batez. Kontura zaitez kea korrontean gora higitzen hasten dela (hots, beherantz argazkian) sorbaldarantz, eta gero kiribildu egiten dela. (b) Esferaren atzealdetik datorren kea sorbaldara iritsi da, eta ezkerreko partean korrontean behera higitzen da fluxu nagusiak eta uharak bat egiten duten aldean. (c) Hemen uharan ikusten den ke guztia esferaren atzealdeko puntutik dator; beraz, horrek egiaztatu egiten du atzeranzko fluxua dagoela, era berean uharan nahiko nahasketa dagoela erakutsiz.



84. irudia. Goranzko fluxua forma aerodinamiko baten inguruan.



85. irudia. Arraste txikiko formak ez dira soilik garatzen gizaki razionalen adimenaren eraginez. Naturak ere garatzen ditu gene-mutazioa eta hautespen naturala deritzen mekanismoen bidez.

ZEIN DA FORMA AERODINAMIKOEN SORTZAILE HOBEA, NATURA ALA GIZAKIA?

Baina forma aerodinamikoaren sorkuntza ez da gauza berria. Oso aspaldi, naturak berak hobetu eta perfektionatu egin zituen arraste txikiko formak. Hain justu, 85a irudian amuarrain baten ikuspegia ageri da, goitik ikusita, beraren forma beltzez azpimarratuta dagoelarik. Bestetik, 85b irudian gainezarri egin dugu zuriz arraste txikiko hego moderno baten forma. Benetan harrigarria da forma bien arteko kointzidentzia, zorizkoa ez dena bestalde, batez ere

hain antzekoak diren bi forma horien eboluzioa lortzeko erabilita-ko metodoen arteko desberdintasuna kontuan izanik. Bata lortzeko, naturak bilioika urtetan bizi-eta-hiltze bidezko esperimentuak burutu ditu, ezin konta ahala froga-forma erabiliz. Bestean, giza adimena, naturako munduan ordena bilatuz eta aurkituz, gai izan da zenbait hamarkadatan antzinako garaietan jainkotiarizat hartzen zen gaitasuna garatzeko: diseinu optimoak sortzeko gaitasuna.

IX. KAPITULUA

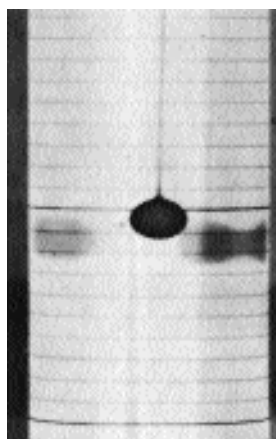
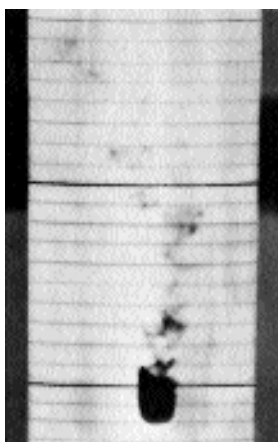
Paradoxak argituz

ZERGATIK DAKARREN AERODINAMIKAK ARRASTEAREN GEHIKUNTZA REYNOLDS ZENBAKI TXIKIETAN

Aerodinamikaren bidez arrastea nabarmen gutxitzea lortu dugun saiakuntzak Reynolds zenbaki altuekin burutu ditugu. Baina aurretik, II. kapitulan, Reynolds zenbaki baxuetan aerodinamikak arrastea *handitu* egiten duela ikusi dugu. Orain gai gara portaera horren zergatiak argitzeko.

Hasteko, gogora dezagun Reynolds zenbakiak txikitzean, muga-geruza zabaldu eta handitu egiten dela. Reynolds zenbaki oso txikietan, eremu biskosoa gorputzetik oso urrutira hedatzen da, eta ia-ia fluxuaren eremu guztia hartzen du. Kasu horretan muga-geruzaz hitz egiteak ez du, hortaz, inolako zentzurik.

Elementu kamuts batek Reynolds zenbaki oso altu edo oso baxuetan dituen inguruko fluxu desberdinak agertzen dira 86. irudian. Tintaz bustitako altzairuzko bola bat ur-zutabe batean erortzen uztean (86b irudia), Reynolds zenbaki handietan mugitzen da. Muga-geruza banandu egiten da eta uhara zurrunbilotsuak uzten ditu, ke-fluxuaren saiakuntzaren antzekoak.



86. irudia. Tintaz bustitako altzairuzko bola likido-zutabe batean erortzen.

Tintaz bustitako bola glizerinan erortzen uztean (86c irudia), aldiz, Reynolds zenbaki txikietan higitzen da. Banaketarik ez da agertzen. Bolaren gainazala ukitzen duen fluido tindatua bolaren atzean korrante-lerro bakar batean leunki isurtzen da. Laburbilduta, Reynolds zenbaki handietan banantzea *badago*; Reynolds zenbaki txikietan *ez* dago banantzerik.

Aurretik ikusi dugunez, Reynolds zenbaki handietan ematen den muga-geruzaren banantzea presio-banaketaren izaera bereziak eragina da —hots, sudurretik sorbaldara gutxitzen doan presioa, eta jarraian sorbaldatik isatsera handitzen dena—. Muga-geruzatik kanpoko fluido-partikulak, presio-indarrek eta inertzia-indarrek dinamikoki gobernatu daude eta honekin dago loturik itxura honetako presio-banaketa.

Baina Reynolds zenbaki oso txikiak dituzten fluxuetan indar inertzialak ia mesprezagarriak dira, eta fluidoaren higidura gehienbat presio-indarraren eta biskositate-indarraren arteko balantzeak gobernatzen du. Eta geratzen zaigun presio-banaketa erabat desberdina da fluxu ez-biskosoko kasukoarekin konparatuz.

Reynolds zenbaki txikietako fluxu hain biskoso horietan, presioa sudurretik sorbaldara gutxituz doa, baina *gutxitzen jarraitzen* du sorbaldatik isatsera ere. Etengabean gutxituz doan presioak, gainazal pareko momentu lineal txikiko fluidoak bul-tzatzen du eta horrela ez dago itzultzen den fluxurik; eta, hortaz, ez dago banantzerik. Aurrekoa argi ikus daiteke 86c irudian.

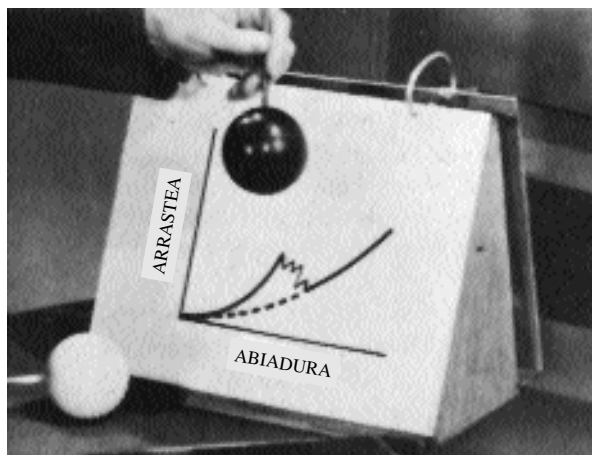
Azkenik, Reynolds zenbaki txikietan aerodinamikak arrastea handiagotzearen paradoxa argitu behar dugu. Reynolds zenbaki oso txikietan banantzea faktore eragilea ez denez, aerodinamikak ez du asko aldatzen presio-arrastea. Baina itxura aerodinamiko ematean, aldiz, marruskadura-tentsioak agertzen direneko azalera

ere handiagotzen denez, gainazaleko arraste-biskosoa nabarmenki handiagotzen da (zeina, noski, Reynolds zenbaki txikietan nahiko handia den, Reynolds zenbaki txikietako fluxuen izaera biskosoa dela eta. Horrela, aerodinamikak azalera bustia handitzen duenez, guztizko arrastea handitu egiten da Reynolds zenbaki txikietan.

ZERGATIK DAKARREN BATZUETAN ABIADURA HANDIAGOTZEAK ARRASTEAREN TXIKIAGOTZEA

Aurretik aipatutako beste paradoxa bat argitzeko ia prest gaude jada. Gogoratuko duzue, zertxobait laztutako esfera baten arrastea behatzerakoan, haizearen abiadura handiagotzean, hasieran arrastea handiagotu egiten zen. Baina abiadura konkretu batera heltzean, arrastea txikiagotu egiten zen abiadura handiagotzean, eta ondoren berriro arrasteak handiagotzen jarraitzen zuen abiadura handiagotzean. Arraste-abiadura kurba garbi batetik, beste arraste-abiadura kurba garbi desberdin batera pasatzeak (87. irudia), izaeraz desberdinak diren bi fenomenoren aurrean aurkitzen garelako iradokitzen du. Iradokizun zuzena. Lehenengo kurba, muga-geruza laminarraren kasua da eta bigarrena muga-geruza zurrunbilotsuarena.

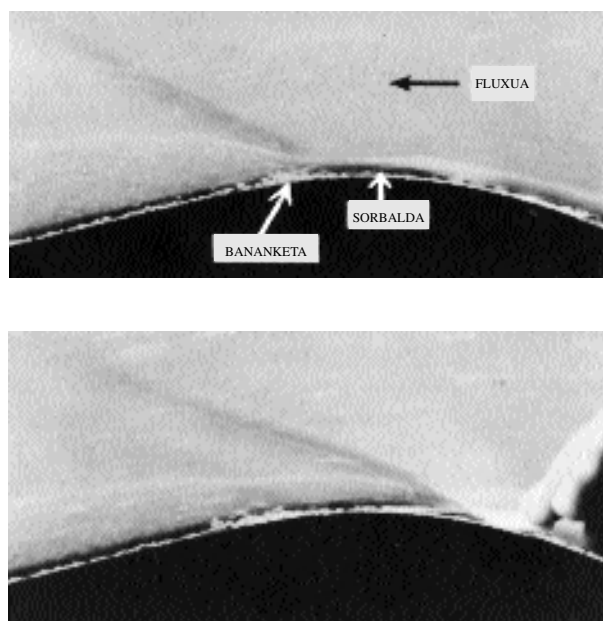
Esfera objektu kamutsa denez, Reynolds zenbaki handietan arraste gehiena presio-arrastea da. Abiadura nahiko txikietan muga-geruza laminarra da eta muga-geruzaren banantzea, bolaren zabalera maximoko puntua baino *korrontean gorago* gertatzen da. Nahiz eta presio-arrastea handia izan, presio txikiko uhara zabal eta banandua sortzen du. Baina fluxuaren abiadura handitzean zurrustatik ateratzen den ura edo airean dabilen ke-zurrustaren antzeko kasuan aurkituko gara. Muga-geruza zurrunbilotsu bilakatu da.



87. irudia. Esferarekin haize-tunelean burututako arraste/abiadura saiakuntzaren laburpena.

Muga-geruza laminarretik muga-geruza zurrunbilotsura pasatzearen garrantzia 88. irudian ikusten da. Ura eskuinetik ezkerrera isurtzen da, eta estugune batetik pasatu ondoren kanala zabaltzen den partera heltzen da. Nagusiki ez-biskosoa den fluidoaren parte nagusiak presio txikia sortzen du estugunean, sorbaldaren parean, eta presio altuagoa korrontean behera, hego aerodinamikoak bezala. Sorbaldaren osteko zabalgunean ematen den presio-banaketak, momentu lineal txikiko muga-geruza korrontean gora bultzatzeko joeraduna da, horrela, kalatze eta banantzearen aukera agertuz. Hasteko, muga-geruzaren fluxua laminarra da (88a irudia) eta sorbaldaren parean fluxu nagusia banandu egiten da, sorbaldatik atzeranzko fluxu-eremua eta zurrunbilo handiak sortuz. Bestetik, egur-zati mehe bat muga-geruzan —justu sorbaldaren parean korrontean gora— kokatu

dugunean zer gertatu den ikus daiteke 88b irudian. Oztopoak muga-geruzako fluidoan nahasten du, fluxua zurrunbilotsu bilakaraziz. Muga-geruza zurrunbilotsua sorbaldatik doala, korrontean behera hormari itsatsita geratzen da askoz distantzia luzeagoan, eta banantze-eremua asko txikitzen da. Portaera-aldaketa honen arrazoia hurrengoa da: muga-geruza laminarrarekin alderatuz, muga-geruza zurrunbilotsuak nahasmen handia du. Nahasmen honek momentu linealaren trukea dakar, eta beraren bidez,

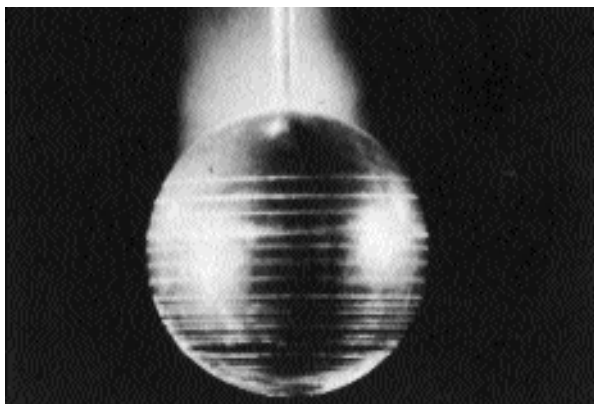
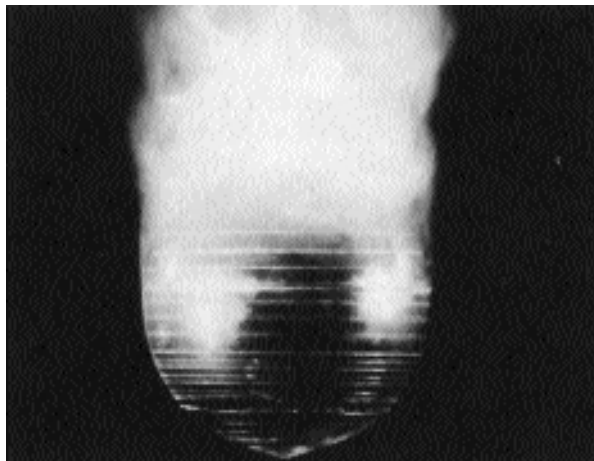


88. irudia. Ur-jarioa kanalean eskuinetik ezkerrera. Solidoa beltzez agertzen da eta bere formak fluxu-nagusiaren abiaduraren handiagotzea sorrazten du sorbaldan, ondoren zabalgunean abiadura txikiagotuz. Presioa minimoa da sorbaldan.

abiadura txikiko muga-geruzako fluidoak, nolabait esateko, muga-geruzaz kanpoko abiadura handiko fluidoari hartzen dio momentu lineala. Horrela, kanpo-fluxuak emandako energia zinetikoak lagundurik, muga-geruza zurrunbilotsua muga-geruza laminarra baino urrunago hedatzen da, aurkako presio-gradientearen kontra.

Fluxu zurrunbilotsuan ematen den masa-trukaketaren trakzio-efektua, analogia baten bidez erakuts daiteke. Har ditzagun bata bestearen alboan paraleloki doazen tren-errail pare bi. Bakoitzean tren bana dugu, makinarik gabe, inolako marruskadura ez aire-erresistentziarik gabe aurrera doazenak. Abiadura konstantez, etengabe mugituko direla espero dezakegu. Orain eman dezagun abiadura desberdinez higitzen direla eta tren bakoitzean soldaduak ditugula, zeintzuek berunezko balak tirokatzen dituzten leihoe-tatik, beren abiadurarekiko perpendikularki. A trenetik (eman dezagun, tren bizkorra) tirokatutako balak B trenean (geldoagoa) sartzen dira, eta berriro bala hauek hartu eta A trenera tirokatzen dira. A trenetik eta B trenetik, segundoko tirokatzen diren balen kopuruak berdinak direnez, ez dago masa-trukaketa *netorik*. Baina A trenen mantsotu egingo da; eta B trenen, aldiz, bizkortu. Azelerazioa eta dezelerazioa momentu linealaren trukaketaren ondorio diren arren, emaitza A -k B -ri aurreranzko trakzio-indarra eragitearen edo B -k A -ri balio bereko atzeranzko trakzio-indarra eragitearen baliokidea da. Era berean, muga-geruza zurrunbilotsuan ematen diren masaren eta momentu linealaren trukaketek, abiadura handiz mugitzen den fluidoak abiadura geldoz doanari aurreranzko trakzioa eragitearen efektu baliokidea sortzen dute.

Muga-geruzaren portaeraren aldaketa honek esferak zeharkatutako fluxuari nola eragiten dion 89. irudiko ke-fluxuaren argazkietan ikus daiteke. Abiadura txikietan muga-geruza laminarra da, banantzea hasieratik ematen da eta uhara zabala da (89a irudia). Abiadura handiagotzean, Reynolds zenbakia handiagotu

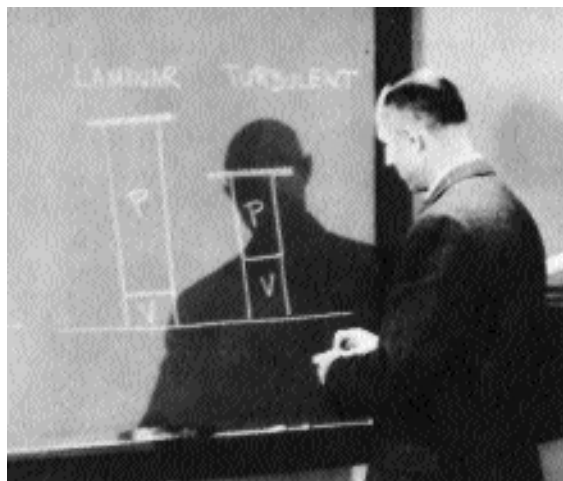


89. irudia. Esferak zeharkatutako goranzko aire-fluxua. Sudurrean botatako titanio tetrakloruroak sortzen du kea.

egiten da, eta muga-geruza laminarra izatetik zurrunbilotsu izatera pasatzen da. Muga-geruza zurrunbilotsua kontrako presio-gradientearen aurrean urrunago hel daiteke, eta, hortaz, esferari itsatsita jarraitzen du esferaren zabalera maximoko puntutik askoz harago (89b irudia). Honek bi ondorio garrantzitsu ditu: (i) esferaren korrontean beherako aldeko presio txikiko eremua estuagoa da orain kasu laminarrean baino; eta (ii) korrontean beherako aldeko presioa ez da kasu laminarrean bezain txikia. Bi arrazoiak medio, presio-arrastea txikiagotu egiten da.

Baina, gogora dezagun, saiakuntzan benetan neurtu dugun arrastea, presio-arrastearen eta arraste biskosoaren batura dela; hortaz, kasu laminarrean eta kasu zurrunbilotsuan osagai bakoitzean zer gertatzen den aztertu behar dugu. Hain zuzen, 90. irudiko ezkerreko laukian kasu laminarreko arraste totala agertzen da. Esfera bezalako elementu kamuts batean, fluxu laminarrean, guztizko arrastearen zati nagusia presio-arrastea da (P) eta zati txiki bat baino ez da arraste biskosoa (B), laukiaren P eta B zatiketetan agertzen denez. Muga-geruza biskosoaz, B arraste biskosoa handiagoa kasu laminarrean baino. Baina, ikusi dugunez, P presio-arrastea nabarmen txikiagoa da. Arraste guztien magnitudeek, geruza laminarretik geruza zurrunbilotsura pasatzean, P gehi B guztizko arrastea nabarmen txikiagotzea eragiten dute. Hain justu, 87. irudiko arrastearen erorketa, fluxu laminarretik fluxu zurrunbilotsura pasatzeak ekarri du.

Objektu kamutsaren arraste totala nabarmenki txikiagoa da fluxu zurrunbilotsua denean laminarra denean baino, eta arrastea txikia izatea nahiko bagenu, muga-geruza zurrunbilotsua izaten ahalegindu beharko ginateke.



90. irudia. Presio-arrastea (P) eta azaleko marruskadura-arrasteak (B) aerodinamikoa ez den gorputzak zeharkatutako fluxu laminar eta zurrunbilotsuetan, Reynolds zenbaki handietan.

Baina objektu aerodinamikoetan, beste aldetik, ez da presio-arrasterik ematen eta arraste guztia arraste biskosoa da. Objektu aerodinamikoaren arrastea txikia izatea nahiko bagenu, garrantzitsua da muga-geruza laminarra mantentzea. 1940tik aurrera ahalegin handiak egin dira mundu guztian zehar hegoek zein itxura izan behar duten zehazteko, horrela beren luzera ia osoan fluxua laminarra izan dadin. Aurkitu denez, forma konkretu batzuek bereziki lagungarria den presio-banaketa sortzen dute, eta “arraste gutxiko” hegoak, “fluxu laminarreko” hegoak ere deituak, arruntak dira gaur egun. Dena den, muga-geruza laminarra loditzen denean, ezegonkorra da eta fluxu zurrunbilotsu bilakaraz dezakeen aldakuntzarik txikienez oso sentikor bihurtzen da.

Hegoari itsatsitako intsektu txikienak ere diseinatzailearen ahaleginak honda ditzake, eta horixe da hain zuzen arraste txikiko hegoen arazo praktikoetako bat.

ZERGATIK TXIKIAGOTZEN DUEN BATZUETAN LAZTASUNAK ARRASTEA

Muga-geruzen portaeraren inguruko kasu hauek, II. kapituluan ikusitako beste paradoxa bat azaltzen lagunduko digute. Aire-abiadura berdinean, bola leun baten eta zertxobait laztutako baten arrasteen arteko alderaketa egin genuen. Abiadura txikietan bola leunak arraste txikiagoa zuen, eta abiadura handietan bola latzak arraste txikiagoa zuen. Bola biek ia-ia berdinak dirudite,



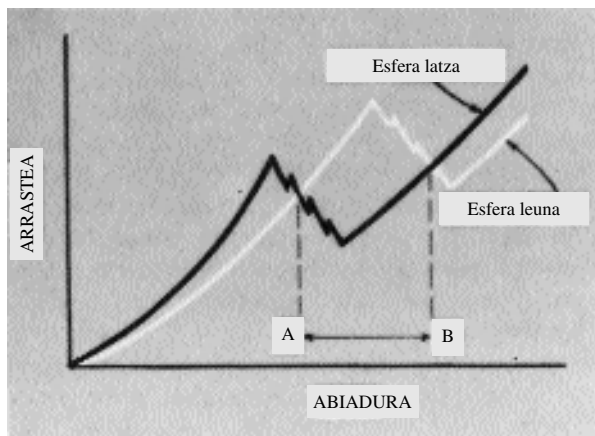
91. irudia. Esferan eginiko urratuek eta itsatsitako plastikozko tira meheak, mendiaren tamainakoak iruditzen zaizkio muga-geruzari. Pertsonaiei Lurraren azala malkortsua iruditzen zaigun era berean, nahiz eta Lurrak berak ere oso urrunetik ikusita bola bezain leuna dirudien.

baina orri bat bezain mehea den muga-geruza duten elementuetan, ile bakar bat bera ere oztopo bihurtzen da (91. ir.). Urraturik txikienak ere, hortaz, bestelakoan baino arinago bilakaeraz dezake zurrunbilotsu bolaren inguruko muga-geruza.

Saiakuntza honetan, abiadura txikietan, muga-geruza laminarra izan da bi esferen kasuetan. Banantze-puntu bertsua zuten, eta biek zuten antzeko presio-arrastea. Baina laztasunak handitu egiten du marruskadura-arrastea. Horregatik zuen laztutako esferak, esfera leunak baino askoz arraste handiagoa.

Eta, zer gertatu da orduan airearen abiadura handiagotzean? Muga-geruza *arinago* bilakatu da zurrunbilotsua esfera latzean esfera leunean baino. Ikusi dugunez, muga-geruza zurrunbilotsua luzaroago gelditzen da itsatsirik eta uhara ahulagoa sortzen du. Horrela, esfera latzaren presio-arrastea nabarmenki txikiagotu da laztasun horren eraginez. Hainbeste txikiagotu da, ezen laztutako esferak arraste txikiagoa jasaten duen orain. Abiadura batzuetan, laztutako esferaren arrastea, esfera leunaren arrastearen bostenera ere ez da heltzen. Aurreko emaitzak 92. irudiko grafikoan daude laburbildurik.

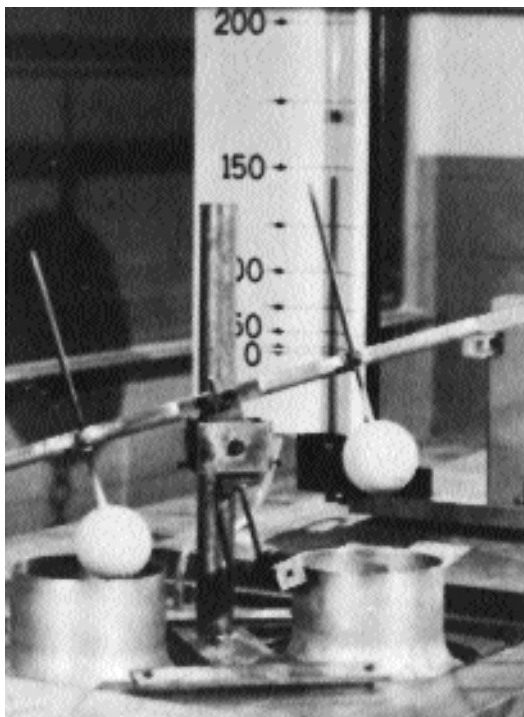
Golfaren hastapenetan, bola leunak erabiltzen ziren. Gaur egunekoek sakonunetxoak dituzte. 93. irudian haize-tunelean egindako saiakuntza agertzen da. Orekatutako balantza erabiliz, sakonuneak dituen golfeko bolaren arrastea, diametro bereko bola leunaren arrastearekin konparatu dugu. Golfariek, profesionalak zein moldakaitzek, bola *tee*-tik jaurtikitzen duten abiadura-tarte osoan (Reynolds zenbakien irizpidea erabiliz) zulodun bolak arraste txikiagoa du.



92. irudia. A eta B puntuen arteko abiadura-tartean, laztutako esferak, esfera leunak baino arraste txikiagoa du.

Askotan erabiltzearen ondorioz urratuak zituzten bolak, bola leunak baino urrunago heltzen zirela ohartzean hasi ziren golfeko bolei sakonuneak egiten. Golfeko bola bat 250 yardetara bidaltzen duen *swing* berdinez, bola leunak 50 yarda baino ez lituzke egingo. Garai haietan fluidoaren dinamika inguruko ezagutza hauek guztiak izan bazenitu eta golfean erabiltzeko burutapena izan, a zer-nolako ospea lortuko zenukeen kirol munduan!

Fluidoaren dinamika inguruko fenomenoaren aberastasunak ez du inongo mugarik: makinerian, etxegintzan, nekazaritzan, aire-ikerketetan, ozeanografian, meteorologian, astrodinamikan, magnetohidrodinamikan edota bizi-prozesuetan esaterako, hainbat eta hainbat aplikazio ditu.



93. irudia. Arrasteen konparazio-saiakuntzan ikus dezakegunez, (ezkerreko) golf-bolak (eskuineko) bola leunak baino arraste txikiagoa du.

AURKIBIDE ALFABETIKOA

Abiadura, 47, 104
Abiadura-beherapena, 91, 93
Abiadura kritikoa, 30, 34, 37
Abiadura uniforme, 40
Abiaduraren karratuaren legea, 101-02
Abiaduraren kuboaren legea, 102
Aerodinamikotasuna, 129-57
Aire-abiadura, 161
Aire-erresistentzia, 23, 40, 42
Antzekotasun dinamikoa, 74, 104, 106-7
Antzekotasun geometrikoa, 70, 72, 104-5
Arkimedes-en Printzipioa, 53
Arrastea, 19, 25-26
Arraste aerodinamikoa, 102
Arraste biskoso zuzena, 81
Arraste txikiko forma, 185
Arraste-abiadura, 161
Arraste-abiaduraren kurba, 109, 161
Arrastearen osagai negatiboa, 81, 142
Arrastearen osagai nulua, 81
Arrastearen osagai positiboa, 81
Arrastearen Stokes-en legea, 96, 103
Arraste-beherapena, 129-30, 134, 136-46, 148-49, 151, 153, 156-57
Arraste-gorapena, 158
Arraste-indarra, 19, 25-26, 104-105
Arraste-koefizientea, 104-105, 108

Arraste-uhina, 25

Azalera, 80

Balantza-pibotea, 27

Barreiapena, 113, 128

Bernoulli-ren Printzipioa, 138-42

Biskositatea, 25, 104

Biskositate handiko portaera, 86-89

Biskositate txikiko fluidoak, 109, 111

Biskositate-neurgailua, 63, 90

Bultzada 53,66, 142

Coulomb-en marruskaduraren koefizientea, 65

D'Alembert-en paradoxa, 142

Deformazioa, 85

Dentsitatea, 46, 104

Dinamikaren Printzipioa, 23

Ebakidura-indarra, 50

Ebakidura-tentsioa, 49

Ebakidura-tentsio biskosoa, 65, 85

Energia zinetikoa, 145, 164

Eraso-angelua, 149, 151

Erresistentzia, 19

Erresistentzia biskosoa, 85

Esfera latza/laztutako esfera, 31, 34, 37, 161, 169, 170

Esfera leuna, 37-38

Estankatze-puntua, 138

Euler, Leonhard, 65

Euri-tanta, 40

Ez-labaintzearen ezaugarria, 59, 62-63, 113

Fluido ez-biskosoa, 138-42
Fluido jarraitua, 46-48
Fluido oso biskosoa, 39-40, 42-43
Fluido arrarifikatua, 24
Fluidoaren inertzia, 98
Fluido-dentsitatea, 24, 46-7
Fluidoaren abiadura (definizioa), 47
Fluidoaren dinamika, 19, 45, 130
Fluidoaren erresistentzia, 24
Fluidoaren higidura, 19, 23-24, 48
Fluido-partikula, 48, 49
Fluxu ez-biskosoa, 160
Fluxu laminarra, 99, 125-26, 238
Fluxu zurrumbilotsua, 99, 122-23, 125-26, 128
Forma, 23
Forma aerodinamikoa, 24, 37-38, 99
Forma ez-aerodinamikoa, 24, 148

Gainazala, 151, 161
Gainazal-indarrak, 40-50
Galileo, 19
Geldiketa-gunea, 143
Gelditasuna, 99, 138, 144-46, 148, 149, 162
Gorputz-indarrak, 49, 66
Grabitatea, 49, 53, 56, 65-66
Grabitate-uhinen sistema, 25

Haize-tunela, 26, 31, 37-39, 78, 169-70
Hegazkinak, 45
Hego aerodinamikoak, 136
Hego aerodinamiko laminarra, 167
Higidura-ekuazioak, 67, 68, 69
Higiduraren lehenengo legea, 40, 42
Hutsa, 23

Indar biskosoak, 58-59, 63, 66, 160

Indar grabitatorioa, 49

Indar normalak, 49-50, 80

Inertzia, 47

Inertzia-erresistentzia, 47, 85

Inertzia-indarrak, 67-68, 73, 160

Kea, 128

Ke-zutabea, 123

Kitty Hawk, 137

Kontaktua, 49, 80

Korronte askeko abiadura, 138, 141

Laztasuna, 168-71

Laztutako esfera, 35

Marruskadura biskosoa, 85

Marruskadura-arrastea, 81, 169

Marruskadura-erresistentzia, 65

Marruskadura-tentsioa, 161

Masa-dentsitatea, 46, 47

Material biskosoa, 84-85

Material oso biskosoa, 84-85

Mekanikaren Printzipioak, 23

Modelo fisikoa, 46

Modelo jarraitua, 46

Modeloak, 26

Muga-abiadura, 40, 90

Muga-geruza, 99

Muga-geruza biskosoa, 108-09, 111-13, 117-19, 121

Muga-geruza laminarra, 161, 162-64, 166-67, 168

Muga-geruza zurrunbilotsua, 161-169

Muga-geruzako partikulak, 143-44, 145

Muga-geruzaren banaketa, 144-45, 148, 151, 153, 160

Muga-geruzaren eraketa, 113, 117-18

Newton, Isaac, 23, 40

Portaera biskosoa, 86-89

Portaera oso biskosoa, 86-89

Potentzia, 102

Presioa, 49, 51-56

Presio-arrastea, 81, 153

Presio-banaketa, 141-42, 153, 162

Presio-gradientea, 52-53, 153

Presio-indarra, 66

Presio-transduktorea, 54

Reynolds zenbakia, 108

Reynolds zenbaki handiak, 78, 80, 84-98, 158, 160

Reynolds zenbaki txikiak, 80, 102, 103, 108-109, 143, 158, 160

Reynolds, Osborne, 72

Shapiro, Ascher, 5-6

Stokes, George, 89

Sudurra, 81, 141, 142, 143

Tamaina, 23, 104

Tentsioa, 19

Tentsio normalak, 49

Tentsioak, 49, 51-56

Teoria zinetikoa, 98

Transformazio galilearrak, 26

U-itxurako manometroa, 55

Uhin supersonikoko arrastea, 26

Uhin-presioko sistema, 25-26

Wright anaiak. 137

Zeharkako deformazioa, 58-59, 62-63

Zeharkako ebakidura-indarra, 50

Zeharkako ebakidura-tentsioa, 49

Zeharkako ebakidura-tentsio biskosoa, 65, 85

Zentral elektrikoa, 45

Sailean argitaratu diren beste liburu batzuk

Fisika orokorra. Ariketak

UEUko Fisika Saila
1989an argitaratua
ISBN: 84-86967-18-X

Mekanika eta uhinak

J. R. Etxebarria eta Fernando Plazaola
1992an argitaratua
ISBN: 84-86967-42-2

Fisika orokorra

Jose Ramon Etxebarria eta beste
1992an argitaratua
ISBN: 84-86967-44-9

Mekanika kuantikoaren zenbait berezitasun

Joseba Tobar-Arbulu
1993an argitaratua
ISBN: 84-86967-55-4

Teoria fisikoen oinarriak

Jose Ramon Etxebarria
1994an argitaratua
ISBN: 84-86967-57-0

Fisika Praktika: I. Mekanika eta Elektriika

Martxel Ensunza eta beste
1995ean argitaratua
ISBN: 84-86967-68-6

Mekanika Estatistikoa. Sarrera

David H. Trevena
Euskaratzailea: Josu Igartua
1995ean argitaratua
ISBN: 84-86967-78-3