

eman ta zabal zazu



Universidad del País Vasco Euskal Herriko Unibertsitatea

Aireko eroale elektrikoak: ezaugarriak eta kalkulu mekanikoa

ISBN: 978-84-9082-024-7

Igor Albizu Flórez

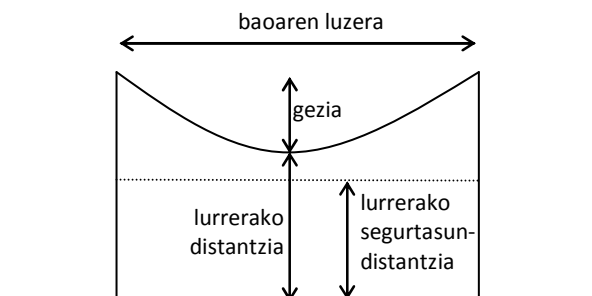
**EUSKARAREN ARLOKO ERREKTOREORDETZAREN SARE
ARGITALPENA**

Liburu honek UPV/EHUko Euskararen Arloko Errektoreordetzaren dirulaguntza jaso du

1	Sarrera	1
2	Aireko eroaleen ezaugarriak	2
2.1	Ezaugarri termikoak	5
2.2	Dilatazio termikoa	6
2.3	Erresistentzia mekanikoa.....	6
2.4	Erresistentzia elektrikoa	9
2.5	Instalazio prozesua.....	10
3	Eroaleen kalkulu mekanikoa	11
3.1	Baoaren geometria	14
3.1.1	Katenariaren ekuazioa	14
3.1.2	Gainkargak eroalean izotza eta haizeagatik.....	17
3.1.3	Bao erregulatzailerak	19
3.2	Eroalearen portaera	20
3.2.1	Deformazio elastikoa	20
3.2.2	Deformazio termikoa	21
3.2.3	Isurpena.....	21
3.2.4	Asentatze geometrikoa zehazteko esfortzu-deformazio saiakuntzak.....	22
3.2.5	Isurpen metalurgikoa zehazteko saiakuntzak	25
4	Kalkulu mekanikorako metodoak	25
4.1	Eroalea bere osotasunean hartzen duen eta isurpena esperientziaren bidez zehazten duen metodoa.....	26
4.2	Nukleo eta aluminioaren portaera independentea kontuan hartzen duen eta isurpena saiakuntzen bidez zehazten duen metodoa	27
5	Erreferentziak.....	32

1 SARRERA

Bao esaten zaio bi euskarriren artean dagoen linea elektrikoaren zatiari. 1. irudian ikus daitekeen bezala, gezia esaten zaio bao bat mugatzen duten bi puntuen arteko zuzenaren eta eroaleak osatzen duen kurbaren arteko distantzia bertikal maximoari. Distantzia maximo hori baoaren erdialdean gertatzen da, gehienetan. Bestalde, bertikala da lurrerako distantzia eroalearen kurbaren garaiera minimoko puntuaren eta lurraren arteko distantzia. Gezia eta lurrerako distantzia elkarrekin loturiko magnitudeak dira; izan ere, gezia handiagotzen denean lurrerako distantzia txikiagotzen da, eta alderantziz. Eroalea goi-tentsioan dagoenez, mugatu egin behar da lurrerako distantzia. Lurrerako segurtasun-distantzia esaten zaio onargarria den distantzia maximoari. Eroalea berotzen denean luzatu egiten da, eta, ondorioz, gezia handiagotu eta lurrerako distantzia murriztu egiten da. Eroalearen gehiegizko tenperaturak eroalea gehiegi luzaraz dezake, eta era arriskutsuan murriztu daiteke lurrerako distantzia. Lurrerako segurtasun-distantziari lotuta, baoaren geziaren balio maximoa dago. Era berean, geziaren balio maximoari loturiko eroalearen tenperatura maximoa dago.



1. irudia. Linea elektrikoaren baoa

Aireko eroaleen kalkulu mekanikoak zehazten du erlazio bat geziaren, eroalearen tentsioaren, eroalearen tenperaturaren, eroalearen ezaugarrien, haize- eta izotz-baldintzen eta eroaleak garaturiko isurpenaren artean. Geziaren eta tenperaturaren arteko erlazioak bereizten du eroale baten portaera.

Aireko eroaleen ezaugarri garrantzitsu bat da bere erresistentzia mekanikoa. Erresistentzia mekaniko handia izateko, material eroalez gain (aluminioa), erresistentzia mekaniko handiagoko materialak ere erabiltzen dira eroalearen nukleoan. Helburu horretarako altzairua erabiltzen da gehien, ACSR izeneko eroaleetan, adibidez.

Jarraian, aireko eroale elektriko motak aurkeztuko ditugu, eta beren ezaugarriak deskribatuko eta alderatuko. Gainera, eroalearen kalkulu mekanikoaren oinarriko kontzeptuak azalduko ditugu, eta zehaztasunez deskribatuko dugu gehien erabiltzen den teknika.

2 AIREKO EROALEEN EZAUGARRIAK

Eroale arruntek, ACSR eroaleek adibidez, 90 °C azpitik lan egin dezakete, hortik gora aluminioa suberatu egiten baita eta ezaugarri mekanikoak galtzen baititu [1]. Temperatura altuagoetan lan egin ahal izateko, aluminio-aleazio bereziak garatu dira [2]. Horiek ez dituzte ezaugarri mekanikoak galtzen temperatura altuagoetan, eta antzeko eroankortasun elektrikoa dute. Aleazio horien artean hauek erabiltzen dira gehien: TAl aleazioa (Thermal-Resistant Aluminum Alloy), ZTAl aleazioa (Super Thermal-Resistant Aluminum Alloy) eta XTAl aleazioa (Extra Thermal-Resistant Aluminum Alloy edo Special Thermal-Resistant Aluminum Alloy). 1350-O aluminio suberatua erabiltzea da beste aukera bat. Aluminio hori 400 °C-tik gora suberutzen da ekoizpen-prozesuan. Ondorioz, erresistentzia mekaniko txikiagoa du, baina balio hori ez da murriztuko linearen temperatura dela-eta. 1. taulan ikus daitezke aluminioen ezaugarri termiko, elektriko eta mekanikoak.

1. taula. Aluminio-aleazioak

	Temperatura maximo iraunkorra (°C)	Eroankortasun elektriko minimoa (% IACS)	Hastura- tentsio minimoa (kg/mm ²)
Al	90	61	16,2
TAl	150	60	16,2
XTAl	230	58	16,2
ZTAl	210	60	16,2
1350-O	400	63	6

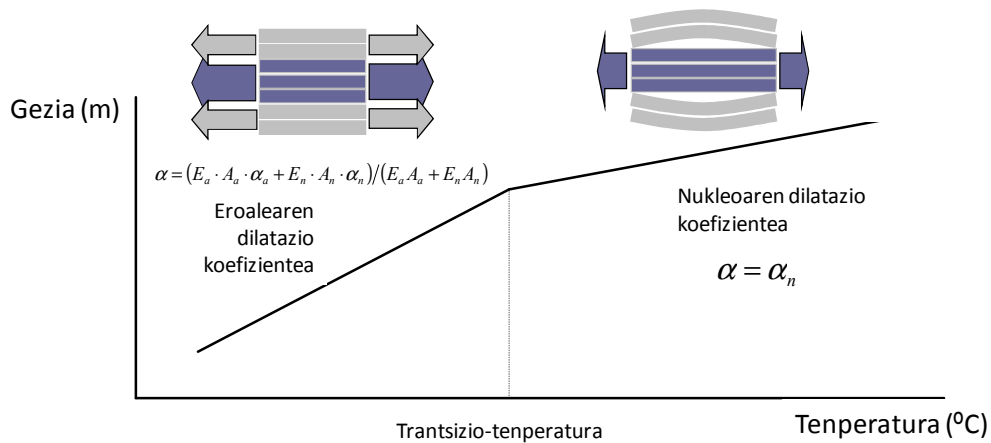
Aleazio berezi horiekin, temperatura altuko eta gezi txikiko eroaleak garatu dira. 70eko hamarkadaren hasieran garatu ziren lehenbiziko temperatura altuko eta gezi txikiko eroaleak, Japonian eta Ipar Amerikan. Japonian, GTACSR (Gap Type Thermal-Resistant Aluminum Alloy Conductor Steel Reinforced) eroalea garatu zen, hau da, gap motako eroalea, eta Ipar Amerikan, suberatutako aluminioa duen ACSS (Aluminum Conductor Steel Supported) eroalea agertu zen. 80ko hamarkadaren hasieran, nukleoan erabiltzeko invar materiala sortu zen Japonian. Horrekin lotuta, XTACIR/TW (Extra Thermal-Resistant Aluminum Alloy Conductor Invar Reinforced) eroalea

garatu zen, eta geroago, ZTAl aleazioaren garapenarekin, ZTACIR (Super Thermal-Resistant Aluminum Alloy Conductor Invar Reinforced) eroalea. Beste bi eroale ere agertu ziren garai hartan: GZTACSR eroalea (Gap Type Super Thermal-Resistant Aluminum Alloy Conductor Steel Reinforced), hau da, ZTAl aleazioa duen gap motako eroalea, eta ACSS/TW eroalea, hau da, aluminiozko alanbre trapezoidalak dituen ACSS eroalea. Duela urte gutxi, konposite materiala nukleoan erabiltzen hasi dira Ipar Amerikan: ZTACCR (Super Thermal-Resistant Aluminum Alloy Conductor Composite Reinforced) eroalea eta ACCC/TW (Aluminum Conductor Composite Core) eroalea.

2. taula. Nukleoa eta aluminioa

	Nukleoa		Aluminioa
ACSR	Altzairua aluminioz estalia Altzairu galbanizatua		Al
ACSS ACSS/TW	Altzairua aluminioz estalia Altzairua galfanez estalia Altzairu galbanizatua		Aluminio suberatu
ZTACIR	Invar galbanizatua Invar aluminioz estalia		ZTAl
XTACIR/TW	Invar aluminioz estalia		XTAl
GTACSR	Altzairu galbanizatua	Tartea (gap) nukleoaren eta aluminioaren artean Lehen aluminio geruza alanbre trapezoidalekin	TAl
GZTACSR	Altzairua aluminioz estalia		ZTAl
ZTACCR	Alumina-zuntzak eta aluminio-matrizea		ZTAl
ACCC/TW	Karbono-zuntzak eta erretxina-matrizea		Aluminio suberatu

Tenperatura altuko eta gezi txikiko eroaleak trantsizio-tenperaturatik gora duen portaeran oinarritzen dira. Aluminioak ez du karga mekanikorik eusten trantsizio-tenperaturatik gora; karga mekaniko guztia nukleoaren gain dago. Hori hala gertatzen da aluminioaren dilatazio-koefizientea nukleoarena baino handiagoa delako. Ondorioz, nukleoaren portaeraren arabera da eroalearen portaera trantsizio-tenperaturatik gora, eta nukleoaren dilatazio-koefizientea eroalearena baino txikiagoa denez, gutxiago luzatuko da tenperatura igotzean (2. irudia).



2. irudia. Trantsizio-temperatura

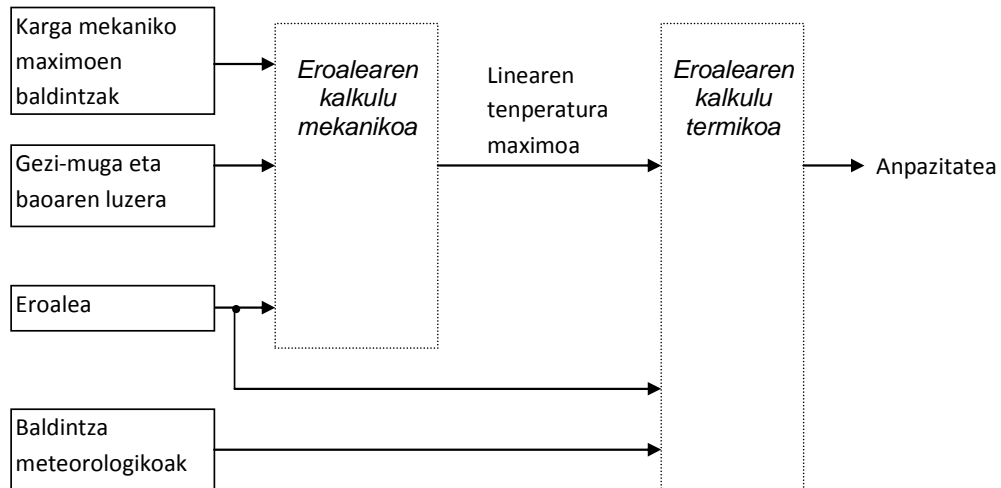
Beraz, hiru parametroren araberakoa da gezi txikiko ezaugarria:

- Eroalearen dilatazio-koefizientea
- Nukleoaren dilatazio-koefizientea
- Trantsizio-temperatura

Parametro horien balioa zenbat eta txikiagoa izan, hobe da eroalearen gezi txikiko ezaugarria. Ondorioz, gezi txikiko eroaleak dilatazio-koefiziente txikiko nukleoko materialekin edota trantsizio-temperatura txikiekin diseinatzeko dira. Trantsizio-temperatura txikiak lortzeko, gap motako eroaleen kasuan, karga mekanikorik gabe uzten da aluminioa, eroalea instalatzen denean trantsizio-temperatura instalazio prozesuko temperatura izateko; ACSS eroaleen kasuan, instalazio-prozesuaren aurretiko tenkatzea gomendatzen dute fabrikatzaileek.

Eroale motaren, nukleo eta aluminio sekzioen arteko erlazioaren eta baoaren luzeraren araberakoa da trantsizio-temperatura. Esan bezala, aluminioak karga mekanikoa galtzen duenean gertatzen da trantsizio-temperatura. Aluminioaren eta nukleoaren sekzioen arteko erlazioa zenbat eta txikiagoa izan, orduan eta karga mekaniko gutxiago izango du aluminioak, eta, ondorioz, temperatura baxuago batean galduko du karga. Baoaren luzerari dagokionez, zenbat eta luzeago izan orduan eta gutxiago murrizten da tentsioa temperatura igotzean. Ondorioz, bao luzeek trantsizio-temperatura altuagoak erakusten dituzte.

Gezi txikiko ezaugarria duten eroaleak ezaugarri hori ez duten eroaleak baino tenperatura altuagoan iristen dira baoaren geziaren balio maximora. Ondorioz, linearen tenperatura maximoa handiagotu egiten da, eta anpazitatea edo intentsitate-ahalmena ere bai (3. irudia). Anpazitatea da baldintza meteorologikoen arabera eroalearen tenperatura maximoa eragiten duen korrontearen intentsitatearen balioa.



3. irudia. Anpazitatearen kalkulua

2.1 Ezaugarri termikoak

Aluminioaren eta nukleoaren ezaugarri termikoen arabera da eroalearen ezaugarri termikoa. 3. taulan ikus daitezke eroale desberdinen tenperatura maximoak.

3. taula. Eroaleen tenperatura maximoak

	Temperatura maximoa (°C)
ACSR	90
ACSS	200-250
ZTACIR	210
XTACIR/TW	230
GTACSR	150
GZTACSR	210
GTTACSR	150
ZTACCR	210
ACCC/TW	175

Eroale gehienetan aluminioak ezartzen du tenperatura-muga (TAI, ZTAI edo XTAI). Hala ere, aluminio suberatu duten eroaleetan, nukleoak ezartzen du muga, aluminioak ez baititu ezaugarri mekanikoak galtzen 400 °C-ren azpitik.

2.2 Dilatazio termikoa

Eroalearen α dilatazio-koefiziente baliokidea da α_n nukleoaren eta α_a aluminioaren dilatazio-koefizienteen, E_n and E_a modulu elastikoen eta A_n and A_a sekzioen balioen arabera (1).

$$\alpha = \frac{E_a \cdot A_a \cdot \alpha_a + E_n \cdot A_n \cdot \alpha_n}{E_a A_a + E_n A_n} \quad (1)$$

Aluminioaren α_a dilatazio-koefizienteak balio bera dauka eroale guztietan ($23 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$). Ondorioz, nukleoaren materialaren arabera gertatuko da eroaleen arteko desberdintasuna. Nukleoan altzairua, invarra edo konpositea erabiltzen da. Invarraren eta konpositearen dilatazio-koefizientea altzairuarena baino txikiagoa da (4. taula).

4. taula. Dilatazio-koefizientea

	Nukleoaren dilatazio-koefizientea α_n ($^\circ\text{C}^{-1}$)	Nukleoa
ACSR	$11,5 \cdot 10^{-6}$	Altzairu galbanizatua
ACSS	$11,5 \cdot 10^{-6}$	Altzairu galbanizatua Altzairua galfanez estalia
	$13 \cdot 10^{-6}$	Altzairua aluminioz estalia (20 SA)
ZTACIR	$2,8 \cdot 10^{-6}$ ($T < 100 \text{ } ^\circ\text{C}$)	Invar galbanizatua
	$3,6 \cdot 10^{-6}$ ($T > 100 \text{ } ^\circ\text{C}$)	
XTACIR/TW	$3,7 \cdot 10^{-6}$ ($T < 230 \text{ } ^\circ\text{C}$)	Invar aluminioz estalia
	$10,8 \cdot 10^{-6}$ ($T > 230 \text{ } ^\circ\text{C}$)	
G(Z)TACSR	$11,5 \cdot 10^{-6}$	Altzairu galbanizatua
	$11,8 \cdot 10^{-6}$	Altzairua aluminioz estalia (13 SA)
ZTACCR	$6,3 \cdot 10^{-6}$	Alumina-zuntzak eta aluminio-matrizea
ACCC/TW	$1,61 \cdot 10^{-6}$	Karbono-zuntzak eta erretxina-matrizea

2.3 Erresistentzia mekanikoa

Eroalearen haustura mekanikoarekiko erresistentzia da nukleoaren eta aluminioaren erresistentzien eta bakoitzaren sekzioaren arabera. Gainera, kontuan hartu behar da alambreen elongazio maximoa ere, jakiteko nukleoaren eta aluminioaren artean zein hautsiko den lehen. Al, TAl, ZTAl eta XTAl aleazioak erabiltzen direnean, aluminioa da lehen hausten dena. Kalkuluak egiteko, suposatzen da aluminioa % 1eko elongazioan hausten dela. Ondorioz, eroale osoaren erresistentzia kalkulatzeko,

nukleoak eta aluminioak % 1eko elongazioan duten erresistentzia hartzen da kontuan. Aluminio suberatua duten eroaleetan, berriz, nukleoa da lehen hausten dena. Ondorioz, eroale osoaren erresistentzia kalkulatzeko, nukleoaren erresistentzia osoaren eta aluminioaren erresistentzia osoaren % 96a erabiltzen da.

5. eta 6. tauletan ikus daitezke nukleoaren eta aluminioaren haustura-tentsioak.

5. taula. Nukleoaren haustura-tentsioa

	Nukleoa	Haustura-tentsioa %1eko elongazioan (kg/mm ²)	Haustura-tentsioa (kg/mm ²)
ACSR	Altzairu galbanizatua (ST1A)	112 - 119	133 - 143
ACSS	Altzairua aluminioz estalia	112 - 123	123 - 137
ACSS/TW	Altzairu galbanizatua	119 - 133	140 - 147
	Altzairua galfanez estalia	119 - 133	140 - 147
	Erresistentzia handiko altzairu galbanizatua	137 - 147	154 - 165
	Erresistentzia handiko altzairua galfanez estalia	137 - 147	154 - 165
	Oso erresistentzia handiko altzairua galfanez estalia	156 - 167	174 - 186
	Erresistentzia ultrahandiko altzairua galfanez estalia	169 - 183	189 - 205
ZTACIR	Invar galbanizatua	---	105 - 110
	Invarra aluminioz estalia	---	95 - 105
	Erresistentzia handiko invarra aluminioz estalia	---	120 - 125
XTACIR/TW	Invarra aluminioz estalia	---	95 - 105
G(Z)TACSR	Oso erresistentzia handiko altzairu galbanizatua	---	180
ZTACCR	Alumina-zuntzak eta aluminio-matrizea	---	140,6
ACCC/TW	Karbono-zuntzak eta erretxina-matrizea	---	246

6. taula. Aluminioaren haustura-tentsioa

	Aluminioa	Haustura tentsioa (kg/mm ²)
ACSS ACCC/TW	Aluminio suberatua	6 - 9,8
ACSR	Al	16,3 - 20,4
GTACSR	TAl	16,2 - 17,9
ZTACIR GZTACSR ZTACCR	ZTAl	16,2 - 17,9
XTACIR/TW	XTAl	16,2 - 17,9

Tamaina bera dutela suposatuz, ACSR eroalearen erresistentziarekin aldera daiteke temperatura altuko eta gezi txikiko eroaleen erresistentzia.

ACSS eroalean, txikia da aluminioaren erresistentzia eta, ondorioz, batez ere nukleoaren arabera gertatuko da eroalearen erresistentzia. ACSS eta ACSS/TW eroaleek ACSR eroaleen aluminioaren eta nukleoaren sekzio berdinak dituzte eta, ondorioz, txikiagoa da ACSS eroaleen erresistentzia. Nukleoan erresistentzia ultrahandiko altzairua erabiliz, ordea, lor daiteke ACSR eroalearen erresistentzia parekatzea.

ZTACIR eroalearen egitura ACSR eroalearenaren berdintsua da. Invarraren haustura-erresistentzia altzairuarena baino txikiagoa denez, ACSR eroalearena baino txikiagoa da ZTACIR eroalearen erresistentzia. Erresistentzia handiko invarra erabiliz, ACSR eroalearen erresistentziatik hurbil dago ZTACIR eroalearen erresistentzia. XTACIR/TW eroalearen erresistentzia ACSRarena baino handiagoa da, baina hori nukleoko sekzio handiago batekin eta aluminioko sekzio txikiago batekin lortzen da.

G(Z)TACSR eta ACSR eroaleen portaera antzekoa da, biek altzairua baitute nukleoan eta berdinak baitira aluminioaren ezaugarri mekanikoak. Hala ere, G(Z)TACSR eroaleetan oso erresistentzia handiko altzairua erabiltzen denez, ACSR arruntarena baino handiagoa da erresistentzia.

ZTACCR eroalearen erresistentzia ACSR eroalearen erresistentziaren antzekoa da. Izan ere, antzekoa da nukleoko materialen erresistentzia, eta bere sekzioa ere bai. Abantaila bat du, ordea, ZTACCR eroaleak: konpositea dela eta arinagoa.

ACCC/TW eroalea ACSR eroalearen diametro berdinarekin diseinatzen da. Ondorioz, aluminiozko alambre trapezoidalak dituzenez, handiagoa da aluminioaren sekzioa. Nukleoaren diametroa ACSR eroalean baino txikiagoa da, baina, hala ere, bere sekzioa handiagoa da hari bakar batez osaturik dagoelako. Konpositearen erresistentzia handiagoa dela-eta, eroalearen erresistentzia mekanikoa ACSRarena baino handiagoa da. Gainera, arinagoa da konpositea dela-eta.

7. taulan ikus daiteke eroaleen haustura-erresistentzia ACSR eroalearekin alderatuta. Pisua ere konparatzen da. Balioak ACSRarenak baino txikiagoak (<), berdinak (=) edo handiagoak (>) izan daitezke.

7. taula. Eroaleen haustura-erresistentzia, ACSR eroalearekiko alderatuta

	Hauztura- erresistentzia	Pisua
ACSS Altzairu arrunta	<<	=
ACSS/TW Altzairu arrunta Azalera-baliokidetasuna	<<	=
ACSS/TW Altzairu arrunta Diametro- baliokidetasuna	<	>
ZTACIR	<	=
XTACIR/TW	>=	>
G(Z)TACSR Oso erresistentzia handiko altzairua	>>	=
ZTACCR	=	<<
ACCC/TW Diametro- baliokidetasuna	>>	<

2.4 Erresistentzia elektrikoa

Aluminioaren eroankortasunaren (8. taula) arabera da eroaleen erresistentzia elektrikoa. Gainera, aluminioaren sekzioaren balioa ere garrantzitsua da erresistentziaren balioan. Kontuan hartzekoa da nukleoaren eroankortasuna ere (9. taula).

8. taula. Aluminioaren eroankortasuna

Aluminioa	Eroankortasuna (% IACS)	Eroalea
Aluminio suberatua	63	ACSS ACCC/TW
Al	61	ACSR
TAl	60	GTACSR
ZTAl	60	ZTACIR GZTACSR ZTACCR
XTAl	58	XTACIR/TW

9. taula. Nukleoaren eroankortasuna

Nukleoa	Eroankortasuna (% IACS)	Eroalea
Alumina-zuntzak eta aluminio-matrizea	23-25	ZTACCR
Altzairua aluminioz estalia	20,3	ACSS
Invarra aluminioz estalia	14	ZTACIR XTACIR/TW
Altzairua aluminioz estalia	8	ACSS
Altzairu galbanizatua	8	ACSR, ACSS
Karbono-zuntzak eta erretxina-matrizea	0	ACCC/TW

10. taulan ikus daitezke eroaleen erresistentzia elektrikoa, aluminio-sekzioa eta aluminioaren eroankortasuna ACSR eroalearekin alderatuta.

10. taula. Erresistentzia elektrikoa ACSR eroalearekin alderatuta

	Erresistentzia elektrikoa	Aluminio-sekzioa	Aluminioaren eroankortasuna
ACSS	<	=	>
ACSS/TW			
Azalera-baliokidetasuna	<	=	>
ACSS/TW			
Diametro-baliokidetasuna	<<	>>	>
ZTACIR	>	=	<
XTACIR/TW	>>	<	<
G(Z)ACSR	>	=	<
ZTACCR	< *	=	<
ACCC/TW			
Diametro-baliokidetasuna	<<<	>>>	>

* Nukleoaren eroankortasun handiagatik

2.5 Instalazio prozesua

Tenperatura altuko eta gezi txikiko eroale gehienek instalazio-prozesua konplexuagoa da ACSR eroalearena baino. Instalazio-prozesu berdina duen eroale bakarrak invarreko ZTACIR eta XTACIR/TW eroaleak dira.

Zenbait eroaleren kasuan, instalazio-prozesua kontuz egin behar da, eroalea kalteturik gerta ez dadin. Adibidez, ACSS eta ACCC/TW eroaleen kasuan,

aluminioaren biguntasuna dela-eta, kontuz ibili behar da aluminioaren gainazala ez kaltetzeko. Konpositoko nukleoa duten ACCC/TW eta ZTACCR eroaleen kasuan, berriz, neurri bereziak hartu behar dira instalazio-prozesuan, nukleoa hauskorra baita.

ACSS eroaleei dagokienez, fabrikatzaileek aurretiko tenkatzea gomendatzen dute instalazio-prozesuan. Prozesu hori arriskutsua izan daiteke, eroalea kaltetu baitezake, ondo egin ezean.

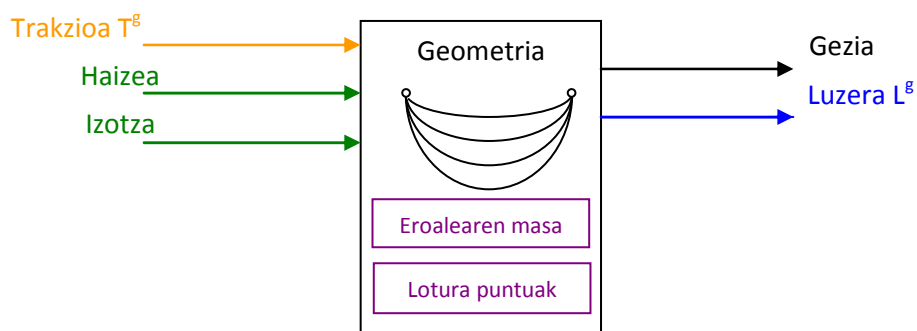
Gap motako G(Z)TACSR eroaleen instalazio-prozesua berezia da, amaitzean aluminioak karga mekanikorik gabe geratu behar baitu. Helburu hori lortzeko, instalazio-prozesua amaitu aurretik, eroalea nukleotik zintzilikatuta mantentzen da zenbait orduz, mutur batean libre dagoen aluminioa lasaitu eta karga mekanikoa galdu arte. Hori posible da eroale horietan nukleoaren eta aluminioaren artean dagoen tartea dela-eta.

3 EROALEEN KALKULU MEKANIKOA

Aireko eroaleen kalkulu mekanikoak zehazten du erlazio bat geziaren, eroalearen tentsioaren, eroalearen tenperaturaren, eroalearen ezaugarrien, haize- eta izotz-baldintzen eta eroaleak garaturiko isurpenaren artean [3]. Geziaren eta tenperaturaren arteko erlazioak bereizten du eroale baten portaera.

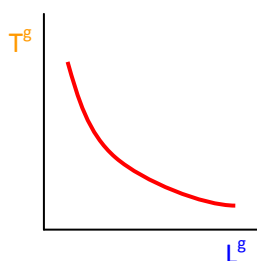
Eroalearen kalkulu mekanikoa da baoaren geometriak eta eroalearen portaerak ezarritako baldintzak betetzen dituzten eroalearen T trakzioa eta L luzeraren kalkulua.

Baoaren geometria. Bi punturen artean zintzilik dagoen eroaleak hartzen duen forma da eroalearen karga mekanikoaren eta jasaten duen trakzio mekanikoaren araberakoa. Karga mekanikoari dagokionez, eroalearen masaz gain, haizeak edo izotzak ere eragin dezakete bere balioan. Beraz, karga-baldintza jakin batekin (masa, haizea eta izotza), eta lotura-puntuen arteko posizio erlatiboa ezagututa (baoaren a luzera horizontala eta h altuera-diferentzia bertikala), trakzioaren balioaren araberakoak izango dira eroalearen forma eta luzera (4. irudia).



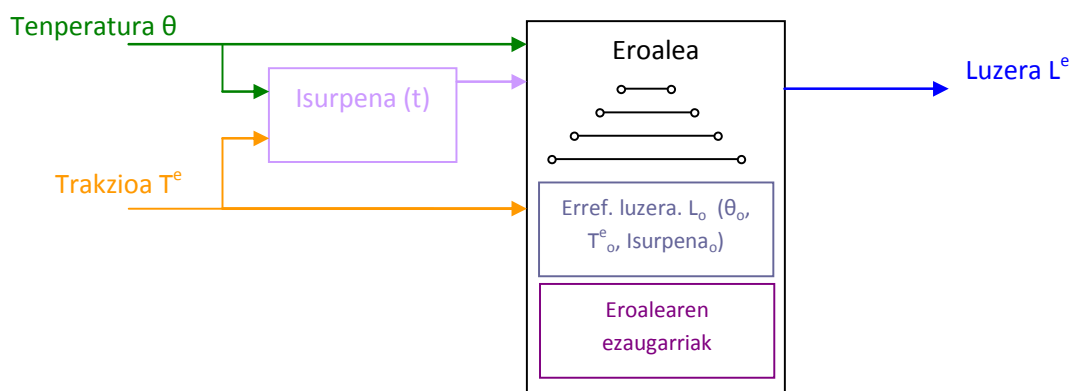
4. irudia. Baoaren geometria

Baoaren geometriaren arabera, baoaren ezaugarriek eta karga-baldintzek mugatzen dituzte L^g - T^g luzera-trakzio bikoteen konbinazioak. Trakzioaren balioa handiagotu ahala, luzeraren balioa murriztu egiten da (5. irudia).



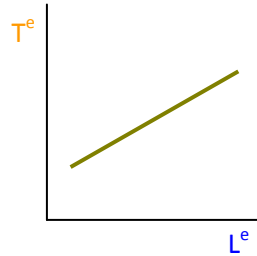
5. irudia. Trakzio-luzera baoaren geometriaren arabera

Eroalearen portaera. Eroalearen luzeran eragiten duen faktoreetako bat da eroalearen tenperaturaren aldaketa (6. irudia). Trakzioaren aldaketak ere luzera-aldaketa eragiten du. Gainera, luzera modu iraunkorrean handiagotzen da isurpena dela eta. Isurpenaren balioa handituz doa denborarekin. Eroalearen ezaugarrien araberakoak dira aldaketa horiek (materialak, sekzioa, dilatazio-koefizientea, modulu elastikoa...).



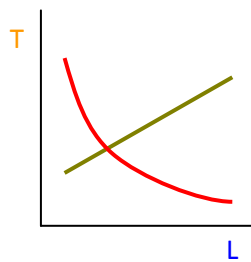
6. irudia. Eroalearen portaera

Eroalearen portaeraren arabera, L^e - T^e luzera-trakzio bikoteen konbinazioak mugatzen dituzte eroalearen ezaugarriek. Kasu honetan, trakzioaren balioa handiagotu ahala, luzeraren balioa handiagotu egiten da (7. irudia).



7. irudia. Trakzio-luzera, eroalearen portaeraren arabera

Baoaren geometria eta eroalearen portaera kontuan hartuz, biek ezarritako baldintzak betetzen dituzten trakzio-luzera bikote bakarra dago (8. irudia). Kalkulu mekanikoaren helburua da bikote hori kalkulatzeko.



8. irudia. Trakzio-luzera, baoaren geometriaren eta eroalearen portaeraren arabera

Kalkulu mekanikoaren soluzioa aldatu egiten da bi kurbetako baten itxura edo posizioa aldatzen denean. Baoaren geometriaren kurba aldatu egiten da haizearen edo izotzaren baldintzak aldatzen direnean. Eroalearen kurbari dagokionez, eroalearen tenperatura edota isurpena aldatzean gertatzen da aldaketa.

Kalkulu mekanikoaren abiapuntua erreferentzia-egoera baten definizioa da. Trakzio-luzera balioak definitzen dira gainkarga (haize, izotz), tenperatura eta isurpen balio jakin batzuentzat. Ohikoa da erreferentzia bezala instalazio-baldintzak hartzea. Gero, gainkargan, tenperaturan eta isurpen balioetan izandako aldaketen eraginak hartuko ditu kontuan kalkuluak, trakzio-luzera balio berriak kalkulatzeko. Metodo iteratiboen bidez bilatzen da soluzioa.

3.1 Baoaren geometria

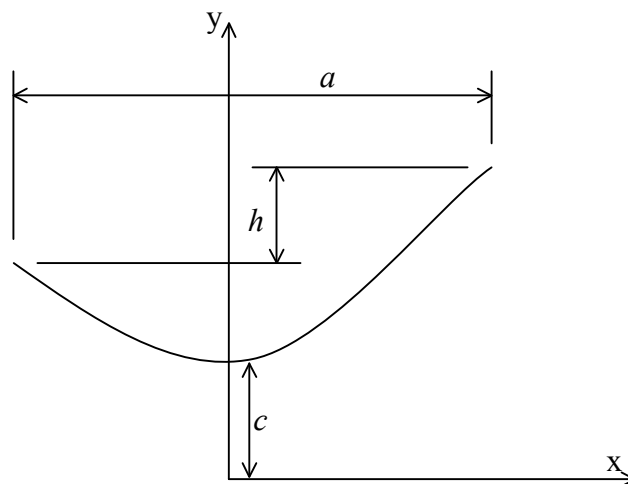
3.1.1 Katenariaren ekuazioa

Zintzilik dagoen eroaleak katenariaren itxura hartzen du (2). (3) ekuazioan, H trakzioaren osagai horizontala da, eta ω luzera unitateko karga.

$$y = c \cdot \cosh\left(\frac{x}{c}\right) \quad (2)$$

$$c = \frac{H}{\omega} \quad (3)$$

Katenariaren erpinaren koordenatuak $(0,c)$ izan daitezzen kokatzen da x-y ardatzaren jatorriaren posizioa (9. irudia).



9. irudia. Katenaria

Kurbaren luzera (4) ekuazioak ematen du.

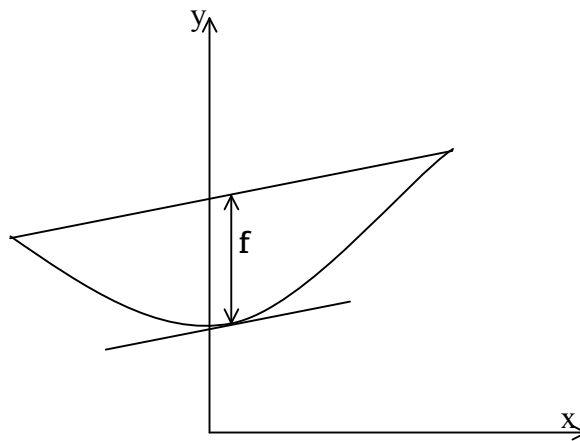
$$L = c \cdot \left(\sinh\left(\frac{X + a/2}{c}\right) - \sinh\left(\frac{X - a/2}{c}\right) \right) \quad (4)$$

$$X = c \cdot \ln \left(\left(\frac{h}{2 \cdot c \cdot \sinh\left(\frac{a}{2 \cdot c}\right)} \right) + \sqrt{\left(\frac{h}{2 \cdot c \cdot \sinh\left(\frac{a}{2 \cdot c}\right)} \right)^2 + 1} \right) \quad (5)$$

Bi muturrak altuera berdinean badaude ($h=0, X=0$):

$$L = 2 \cdot c \cdot \sinh\left(\frac{a/2}{c}\right) \quad (6)$$

Bi muturrak altuera berdinean badaude ($h=0$), katenariaren erpinean neurtzen da gezia. Altuera-diferentzia dagoenean, berriz, gezia neurtzeko katenariaren erpinetik urrundu behar da (10. irudia).



10. irudia. Gezia

Gezia (7) ekuazioaren arabera kalkulatu da.

$$f = c \cdot \cosh\left(\frac{X + a/2}{c}\right) - c \cdot \cosh\left(\frac{x_f}{c}\right) - \frac{h}{a} \cdot (X + a/2 - x_f) \quad (7)$$

$$x_f = c \cdot \ln\left(\frac{h}{a} + \sqrt{\frac{h^2}{a^2} + 1}\right) \quad (8)$$

Bi muturrak altuera berdinean badaude ($h=0, X=0, x_f=0$):

$$f = c \cdot \left(\cosh\left(\frac{a/2}{c}\right) - 1 \right) \quad (9)$$

Puntu batean, eroalearen ω kargaren eta puntu horren eta kurbaren erpinaren d altuera-diferentziaren araberakoa da T trakzioaren eta bere H osagai horizontalaren arteko aldea.

$$T = H + \omega \cdot d \quad (10)$$

$$d = c \cdot \left(\cosh\left(\frac{x}{c}\right) - 1 \right) \quad (11)$$

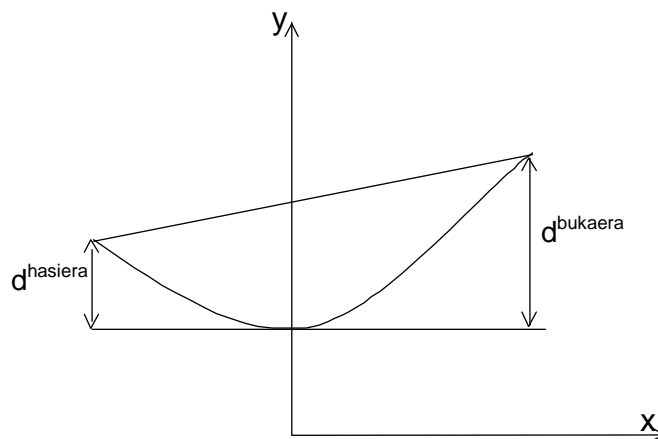
Hasierako eta bukaerako muturren kasuan (11. irudia):

$$d^{hasiera} = c \cdot \left(\cosh\left(\frac{X - a/2}{c}\right) - 1 \right) \quad (12)$$

$$T^{hasiera} = H + \omega \cdot \left(\cosh\left(\frac{X - a/2}{c}\right) - 1 \right) \quad (13)$$

$$d^{bukaera} = c \cdot \left(\cosh\left(\frac{X + a/2}{c}\right) - 1 \right) \quad (14)$$

$$T^{bukaera} = H + \omega \cdot \left(\cosh\left(\frac{X + a/2}{c}\right) - 1 \right) \quad (15)$$



11. irudia. Erpinarekiko muturretako d altuera-diferentziak

Bi muturrak altuera berdinean badaude ($h=0$):

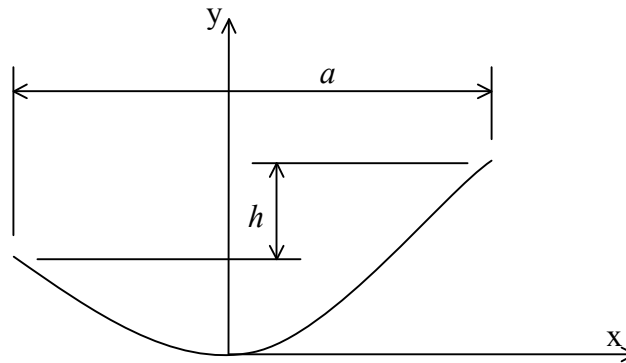
$$d^{hasiera} = d^{bukaera} = f \quad (16)$$

$$T^{hasiera} = T^{bukaera} = H + \omega \cdot f \quad (17)$$

Katenariaren ekuazio zehatza erabili beharrean, parabola erabil daiteke hurbilketa bezala (18).

$$y = \frac{x^2}{2 \cdot c} \quad (18)$$

Kasu honetan, x-y ardatzen jatorria parabolaren erpinean kokatzen da, eta (0,0) dira erpinaren koordinatuak.



12. irudia. Parabola

Bi muturrak altuera berdinean badaude ($h=0$), (19) ekuazioak ematen du kurbaren luzera.

$$L = a + \frac{a^3}{24 \cdot c^2} \quad (19)$$

Gezia (20) ekuazioaren arabera kalkulatu da, bi muturrak altuera berdinean dauden kasuan ($h=0$):

$$f = \frac{a^2}{8 \cdot c} \quad (20)$$

3.1.2 Gainkargak eroalean, izotzgatik eta haizegatik

Gainkargarik gabe, eroalearen ω_e masari dagokio eroalearen ω karga. Gainkargarekin, ordea, handiagoa da eta, ondorioz, katenariaren luzera ere bai.

Haizegatik eta izotzgatik izan ohi da gainkarga. Hotz egiten duenean, izotz-geruza bat gara daiteke eroalearen inguruan. Itxura zilindrikoa dauka eta izotz-mahuka esaten zaio. Izotzak eragiten duen kargaren norabidea bertikala da. Ondorioz,

eskalarki batu daitezke bere balioa eta eroalearen masa. Haizeak eragindako gainkargen noranzkoa, ordea, oso aldakorra izan daiteke. Ondorioz, bektorialki batu behar dira haizeak sorturiko gainkarga eta eroalearen masarena. Gainera, izotza eta haizea batera izaten badira, izotzaren ondorioz azalera handiagoa izango da, eta haizearen gainkarga ere bai. Euriaren eragina ez da kontuan hartzen kalkuluetan, nahiz eta bustitako eroalearen karga lehorrarena baino % 2,5 handiagoa izan daitekeen [3].

Kalkuluak egiteko kontuan hartu beharreko haize- eta izotz-balioak zehazten dituzte araudiek. Izotzak eta haizeak eragindako gainkarga nola kalkulatu ere zehazten dute.

Espainiako araudian [4], eroalearen D diametroaren arabera kalkulatu da izotzak eragindako gainkarga, eta itsasoaren mailarekiko altueraren arabera da izotzgeruzaren tamaina (11. taula).

11. taula. Izotzaren gainkarga

Itsasoaren mailarekiko altuera (m)	Izotzaren gainkarga (daN/m)
500-1000	$\omega_{izotz} = 0,18\sqrt{D}$
1000-1500	$\omega_{izotz} = 0,36\sqrt{D}$

non D diametroa mm-tan baitago.

Eroalearen D diametroaren eta haizeak eragindako presioaren arabera da haizeak eragindako gainkarga. Gainkarga proportzionala da haizearen norabidean eroaleak duen azalerarekiko. Ohikoa da suposatzea haizearen norabidea eroalearekiko perpendikularra dela. Luzera unitateko, metro bakoitzeko, D diametroarena da azaleraren balioa. Horrela, gainkarga kalkulatzeko, azalera hori eta haizearen q (daN /m²) presioa biderkatzen dira (21).

$$\omega_{haize} = q \cdot D \tag{21}$$

Espainiako araudian [4], $60 \cdot (V/120)^2$ daN/m² da kalkuluetarako hartu beharreko q haizearen presioa eroalearen diametroa 16 mm edo txikiagoa bada eta $50 \cdot (V/120)^2$ daN/m² beste kasuentzat, non V haizearen abiadura baita km/h-tan emanda. Kontuan izan behar da D diametroa metrotan eman behar dela aurreko ekuazioan.

3.1.3 Bao erregulatzailea

Bi lotura-euskarrien artean, zenbait esekidura-euskarri daudenean, kalkulusinplifikazio bat egiten da. Bao multzoa bao bakar batez irudikatzen da, bao erregulatzaile izenekoaz, eta bao multzoan dauden baoen luzeren arabera kalkulatzen da bere luzera. Eroalearen tenperaturaren edota gainkargaren aldaketa dagoenean, bao bakoitzean izaten den trakzioaren aldaketa bere luzeraren arabera da. Esekidura isolagailu-katearen mugimendu-askatasunaren ondorioz, berdindu egiten dira ondoz ondoko baoen trakzioak. Ondorioz, bao guztietan berdina da trakzioaren osagai horizontala. Aipaturiko baldintza-aldaketek bao-erregulatzailean eragiten duten trakzio-aldaketa bao multzoan eragiten dutenaren antzekoa da. Ondorioz, bao multzoa kalkulatu beharrean, errazagoa denez, bao erregulatzailearen kalkulua egiten da. Bao erregulatzailearen luzera (22) ekuazioak emandakoa da.

$$a_r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n a_i^3}{\sum_{i=1}^n a_i}} \quad (22)$$

Bao erregulatzailearentzat kalkulaturiko H_r trakziotik eta f_r gezitik abiatuz, berdina da beste edozein baotako trakzioa, eta (23) ekuazioaren bidez kalkula daiteke f_i gezia.

$$f_i = f_r \cdot \left(\frac{a_i}{a_r}\right)^2 \quad (23)$$

Honako baldintza hauetan oinarritzen da bao erregulatzailearen hurbilketa [5]:

- Bao-luzerak handiak dira, bao muturren arteko altuera-diferentziekin alderatuz.
- Luzera-unitateko karga berdina da bao guztietan.
- Eroalearen tenperatura berdina da bao multzo osoan.
- Esekidura-kateen mugarik gabeko mugimendu-askatasuna dute.

Berez, esekidura-kateek mugaturik dute mugimendu-askatasuna eta, ondorioz, zenbait kasutan gerta daiteke ondoz ondoko baoen trakzioa ez berdintzea. Hala ere, bao-erregulatzailearen hurbilketaren errorea txikia da eroalearen tenperatura 100 °C baino txikiagoa bada, eta ondoz ondoko bao-luzeren aldea handia ez bada [5].

3.2 Eroalearen portaera

Eroalearen luzera-aldaketan honako hauek eragiten dute:

- Trakzio mekanikoaren eraginez sorturiko deformazio elastikoa, ε^T
- Isurpenak eragindako deformazio iraunkorra, ε^i
- Tenperatura-aldaketek eragindako deformazio termikoa, ε^θ

Lehen biak eroalearen trakzioarekin erlazionaturik daude. Alde batetik, trakzioaren eraginez sorturiko deformazio elastikoa dela-eta, eroalearen luzera handitu egiten da trakzioa handitzean, eta alderantziz. Bestalde, denborarekin handituz doan deformazio iraunkorra dago, isurpen gisa ezagutzen dena. Hirugarrena tenperatura-aldaketek eragiten duten dilatazioekin eta kontrakzioekin erlazionaturik dago.

Eroale konposatuen kasuan –hau da, material desberdinetako alanbreak erabiltzen dituzten eroaleak–, nukleoaren eta aluminioaren portaera desberdina da aipaturiko deformazioei dagokienez.

3.2.1 Deformazio elastikoa

Suposatzen da $\Delta\sigma$ dela esfortzuaren aldaketak sorturiko ε^T deformazio elastikoaren arteko erlazio lineala. Bere arteko erlazioa E modulu elastikoaren arabera da (24).

$$\varepsilon^T = \frac{\Delta\sigma}{E} \quad (24)$$

Eroale konposatuen kasuan, desberdinak dira nukleoaren E_n eta aluminioaren E_a modulu elastikoak (25-26).

$$\varepsilon_n^T = \frac{\Delta\sigma_n}{E_n} \quad (25)$$

$$\varepsilon_a^T = \frac{\Delta\sigma_a}{E_a} \quad (26)$$

Eroale osoaren deformazio elastikoa kalkulatzeko E eroalearen modulu elastiko baliokidea kalkula daiteke nukleoaren eta aluminioaren A_n eta A_a azalaren eta E_n eta E_a modulu elastikoen bidez (27).

$$E = \frac{E_a \cdot A_a + E_n \cdot A_n}{A_a + A_n} \quad (27)$$

3.2.2 Deformazio termikoa

Suposatzen da $\Delta\theta$ dela tenperatura aldaketak sorturiko ε^θ deformazio termikoaren arteko erlazio lineala. Bere arteko erlazioa α dilatazio-koefizientearen araberrakoa da (28).

$$\varepsilon^\theta = \alpha \cdot \Delta\theta \quad (28)$$

Eroale konposatuen kasuan, desberdinak dira nukleoaren α_n eta aluminioaren α_a dilatazio-koefizienteak (29-30). Aluminioarena handiagoa da eta, ondorioz, luzera-aldaketa handiagoak jasaten ditu.

$$\varepsilon_n^\theta = \alpha_n \cdot \Delta\theta \quad (29)$$

$$\varepsilon_a^\theta = \alpha_a \cdot \Delta\theta \quad (30)$$

Eroale osoaren deformazio termikoa kalkulatzeko α eroalearen dilatazio-koefiziente baliokidea kalkula daiteke nukleoaren eta aluminioaren azalaren, modulu elastikoen eta dilatazio-koefizienteen bidez (31).

$$\alpha = \frac{E_a \cdot A_a \cdot \alpha_a + E_n \cdot A_n \cdot \alpha_n}{E_a A_a + E_n A_n} \quad (31)$$

3.2.3 Isurpena

Bi isurpen mota jasaten dituzte eroaleek. Alde batetik, isurpen metalurgikoak alanbreen egitura mikroskopikoari eragiten dio. Isurpen hori etengabe handituz doa denborarekin, eta esfortzuaren eta tenperaturaren araberrakoa da. Beste alde batetik, alanbreen arteko elkarrekintzekin erlazonaturik dago asentatze geometrikoa. Isurpen hori bat-batekoa da eta eroaleak jasandako esfortzu maximoa gaintitzen den bakoitzean gertatzen da. Isurpen osoa ε^i , isurpen metalurgikoaren ε^{im} eta asentatze geometrikoaren ε^{ia} batura da (32).

$$\varepsilon^i = \varepsilon^{im} + \varepsilon^{ia} \quad (32)$$

Alanbreen isurpen metalurgikoa ε^{im} honako ekuazio honen bidez kalkulatzen da [6]:

$$\varepsilon^{im} = K \cdot e^{\phi\theta} \cdot \sigma^\alpha \cdot t^\mu \quad (33)$$

non θ tenperatura baita, σ esfortzua alanbreen eta t denbora. K , ϕ , α eta μ konstanteak doitu egiten dira ekuazioak emandako emaitzak ahalik eta gehien hurbil daitezzen saiakuntzek emandako emaitzetara.

θ tenperatura eta σ esfortzua konstante direla suposatuz, denboraren arabera bakarrik aldatzen da isurpen metalurgikoa. (34) ekuazioan m konstantea da, eta (33) ekuazioarekin alderatuz ikus daiteke zein den bere balioa.

$$\varepsilon^{im} = m \cdot t^\mu \quad (34)$$

μ esponentearen balioa 1 baino txikiagoa izan ohi da eta, ondorioz, $d\varepsilon^{im}/dt$ deribatuaren balioa murriztuz doa denborarekin. Deribatuaren balioa maximoa da hasieran eta murriztuz doa gero.

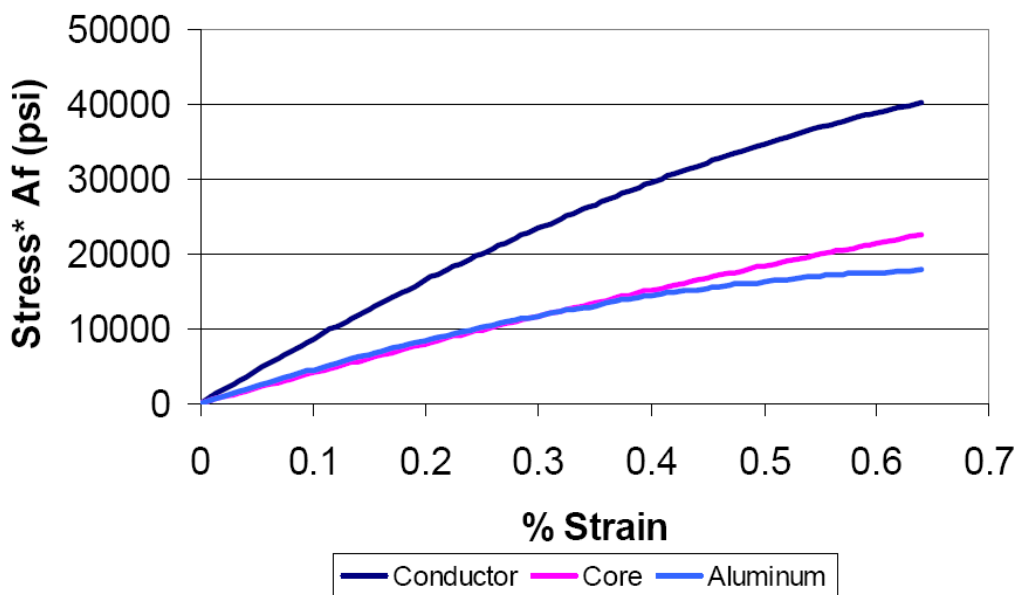
Isurpen metalurgikoaren deformazioa eta denbora eskala logaritmikoan irudikatzen badira, erlazio lineala lortzen da (35).

$$\log(\varepsilon^{im}) = \log(m) + \mu \cdot \log(t) \quad (35)$$

3.2.4 Asentatze geometrikoa zehazteko esfortzu-deformazio saiakuntzak

Asentatze geometrikoa zehazteko, esfortzu-deformazio saiakuntza egiten da. Saiakuntza horren bidez, eroalearen, nukleoaren eta aluminioaren hasierako kurba bereizgarria zehazten da (13. irudia). Kurba horrek ordu betez esfortzu jakin batekin egonez garaturiko deformazioa ematen du.

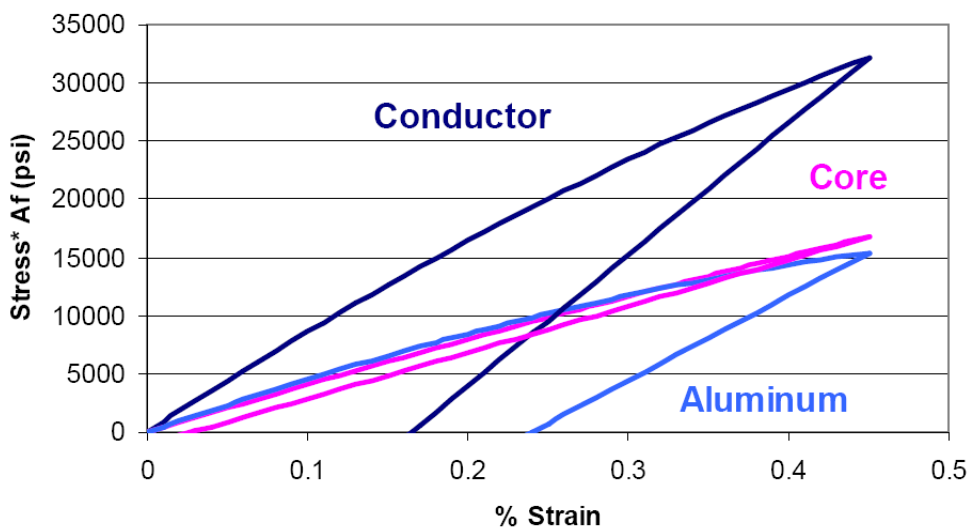
1272 ACCR Initial Curves



13. irudia. ZTACCR eroale baten hasierako kurba bereizgarriak [7]

Hasierako kurban agertzen den deformazioa hiru deformazioen batura da: deformazio elastikoa, asentatze geometrikoaren deformazioa eta ordubeteko isurpen metalurgikoko deformazioa. Horrela, eroalea lasaitzen bada, hau da, trakzioa kentzen bazaio, geratzen dira asentatze geometrikoaren deformazioa eta ordubeteko isurpen metalurgikoko deformazioa (14. irudia). Gainera, modulu elastikoak kalkula daitezke trakzio-murrizketaren kurbaren bidez.

1272 ACCR Stress-Strain Curves

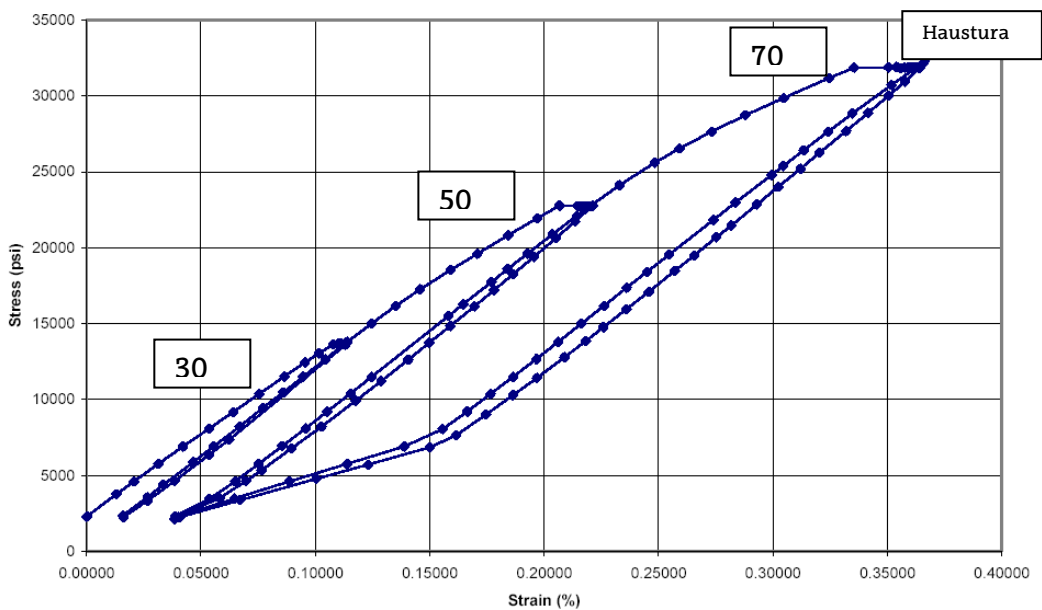


14. irudia. ZTACCR eroale baten esfortzu-deformazio saiakuntzaren kurbak [7]

Esfortzu-deformazio saiakuntzan balio desberdineko zenbait karga-deskarga ziklo egiten dira. 1964 urtean Aluminum Association-ek zehaztu zuen esfortzu-deformazio saiakuntza egiteko modua [8]. [9] arauan ere zehazten da saiakuntza egiteko prozedura:

- Saiakuntza eroale osoarekin hasten da eta eroalea bere haustura-trakzioaren % 5era tenkatzen da. Hortik aurrera hasiko da deformazioa neurtzen.
- Trakzioa haustura-trakzioaren % 30era igotzen da eta balio horretan mantentzen da ordu erdiz.
- Eroalea lasaitu egiten da, % 5era arte; % 50era igotzen da, eta bertan ordubetez mantendu.
- Eroalea lasaitu egiten da, % 70era igo, eta bertan ordubetez mantendu.
- Eroalea lasaitu egiten da, % 85era igo, eta bertan ordubetez mantendu.
- Eroalea Eroalea lasaitu egiten da, eta trakzioa igotzen da eroalea hausten den arte.
- Ondoren, nukleoarekin jarraitzen da, eta eroale osoari egin zaizkion zikloak egiten zaizkio. Ziklo bakoitzean igotzen joaten da trakzioa, deformazioa eroale osoaren saiakuntzan lorturikoa den arte.

15. irudian TACCR eroale bati egindako saiakuntza ikusten da [7]. Kasu honetan, [8] jarraituz egin da. Saiakuntza antzekoa da, baina ziklo bat gutxiago egiten da.

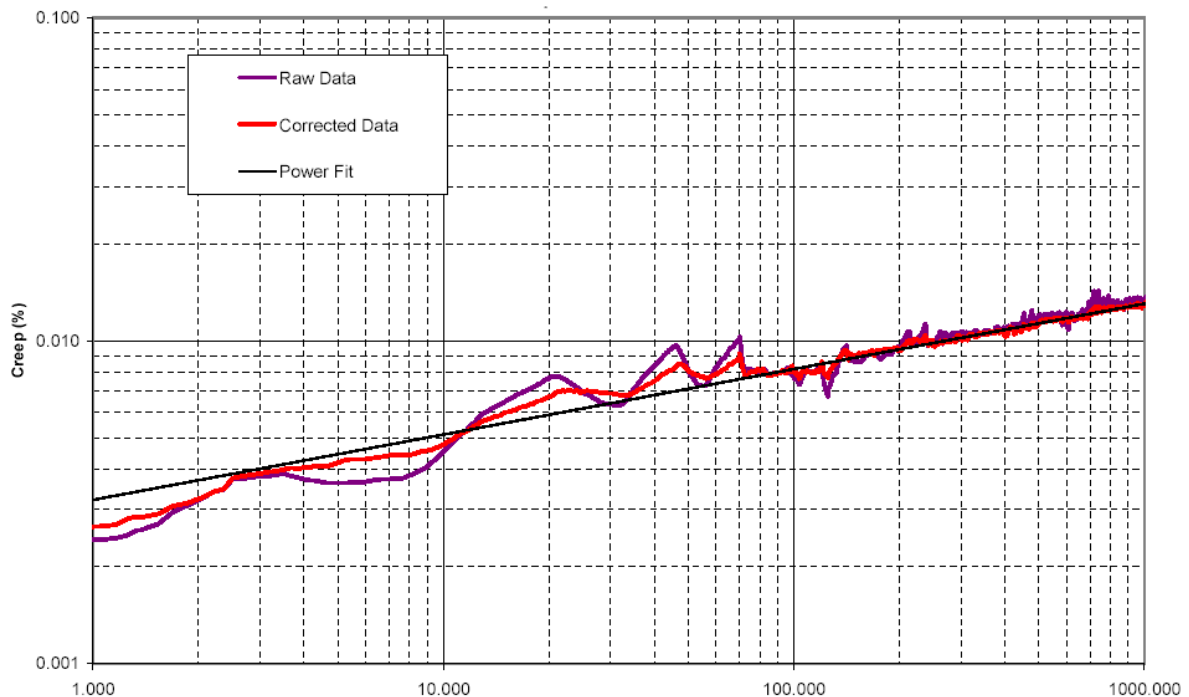


15. irudia. ZTACCR eroale baten esfortzu-deformazio saiakuntza [7]

Saiakuntzen bidez, hasierako kurba bat lortzen da eroalearentzat eta beste bat nukleoarentzat. Aluminioaren hasierako kurba bi kurben arteko diferentzia eginez lortzen da. Gainera, eroalearen eta nukleoaren modulu elastikoak lortzen dira, trakzio-jaitsiera kurben bidez. Aluminioaren modulu elastikoa kalkuluaren bidez egiten da, eroalearentzat eta nukleoarentzat duen balioetan oinarrituz.

3.2.5 Isurpen metalurgikoa zehazteko saiakuntzak

Isurpen metalurgikoaren saiakuntzan, trakzio eta temperatura konstantean mantentzen da eroalea 1000 orduz jarraian [8,10]. Ohikoa da temperatura 20 °C izatea eta saiakuntza-trakzioa haustura-trakzioaren % 20. Neurketen bidez, isurpenaren bilakaera zehazten duten m eta μ parametroak kalkulatu dira (34 ekuazioa).



16. irudia. ZTACCR eroale baten isurpen metalurgikoaren saiakuntza [7]

4 KALKULU MEKANIKORAKO METODOAK

Eroaleen kalkulu mekanikorako metodoak sailka daitezke, isurpena kontuan hartzeko duten moduaren arabera [3]:

- Isurpena ez dutenak kontuan hartzen.
- Isurpena kontuan hartzen dutenak eta bere balioa esperientziaren bidez zehazten dutenak.
- Isurpena kontuan hartzen dutenak eta bere balioa saiakuntzen bidez zehazten dutenak.

Eroale konposatuen kasuan, bi taldetan bereiz daitezke metodoak:

- Nukleoaren eta aluminioaren portaera independentea kontuan hartzen duten metodoak. Nukleoaren eta aluminioaren trakzioa kalkulatu dute, eta aluminioa trakziorik gabe geratzen den trantsizio-tenperatura zehazten dute.
- Eroalea bere osotasunean irudikatzen duten metodoak. Ez dute nukleoaren eta aluminioaren trakzioa kalkulatu eta ez dute zehazten trantsizio-tenperatura.

4.1 Eroalea bere osotasunean hartzen duen eta isurpena esperientziaren bidez zehazten duen metodoa

Metodo hau sinpleenetakoa da, eta ACSR eroaleen kalkulurako erabiltzen da [11]. Metodoak ez du trantsizio-tenperatura zehazten, baina, ACSR eroaleen kasuan, tenperatura hori bere funtzionamendu-tenperaturaren gainetik egon ohi da gehienetan, eta, ondorioz, sinplifikazioaren eragina ez da antzematen. Isurpena modu sinplifikatuan zehazten da. Balio konstante bat hartzen da, eta lineekin urte askoan lan egiteak emandako esperientziarekin bat egiten duen balioa hartzen da.

Deformazio elastikoa zehazteko, eroalearen E modulu elastikoa erabiltzen da eta deformazio termikoa zehazteko eroalearen α dilatazio-koefizientea.

Erreferentzia-egoera bat zehazten da eta beste egoera guztiak hortik abiatuz lortzen dira. Erreferentzia-luzera kalkulatu da katenariaren geometriaren eta erreferentzia-egoeraren T_0 trakzioaren bidez (17. irudia).

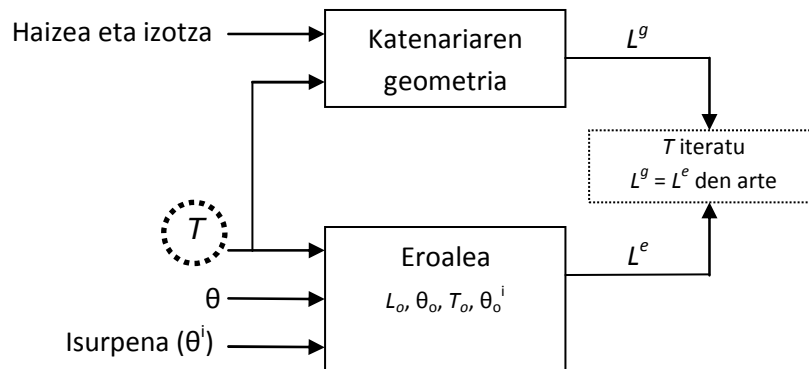


17. irudia. L_0 erreferentzia-luzera

Kalkulurako baldintzak (tenperatura eta gainkarga) izan daitezke hasierako egoerakoak (instalazio-eguna) edo bukaerakoak (linea 10 urteren ondoren). Suposatzen da bukaerako egoeran hasierako egoerarekiko isurpena izan dela. Isurpena eroalearen $\Delta\theta_i$ tenperatura igoera baten bidez irudikatzen da. $\Delta\theta_i$ tenperatura hori benetako tenperaturari gehitzen zaio kalkulua egiteko. Adibidez, Iberdrolak 15 °C-ko tenperatura-gehikuntza erabiltzen du ACSR eroaleen isurpena irudikatzeko, eta Red Eléctrica de España REE 10 °C-ko tenperatura-gehikuntza.

Erreferentzia-egoeratik abiatuz, metodo iteratibo baten bidez kalkulatu da egoera berria (18. irudia). Eroalearen T trakzioaren balioa iteratzen da geometriaren

araberako L^g luzeraren eta eroalearen araberako L^e luzera zehazturiko atalase baten azpitik egon arte.



18. irudia. Kalkuluaren prozesu iteratiboa

Metodoaren sinplifikazioak ere egin daitezke. Gehien erabiltzen denetako batek parabolaren ekuazioa erabiltzen du katenariaren geometriaren kalkuluan, eta suposatzen du berdinak direla baoaren a luzera horizontala eta eroalearen L luzera. Lotura-puntuak altuera berdinean duten baoaren kasuan, (36) ekuazioaren bidez zehazten dira baldintza-aldaketak. Ekuazio horrek berdintzen ditu tenperaturaren, trakzioaren eta isurpenaren aldaketaren ondorioz gertatzen den eroalearen luzera-aldaketa ΔL^e (berdintzaren ezkerreko zatia), eta trakzioaren eta gainkargaren araberako ΔL^g luzera-aldaketa (berdintzaren eskuineko zatia). T trakzioan iteratzen da, berdintzaren bi aldeen arteko diferentzia zehazturiko atalase bat baino txikiagoa den arte.

$$\alpha \cdot (\theta - \theta_1) + (T - T_1) / (E \cdot A) + \alpha \cdot (\theta^i - \theta_o^i) = a^2 \cdot [(\omega/T)^2 - (\omega_o/T_o)^2] / 24 \quad (36)$$

4.2 Nukleoaren eta aluminioaren portaera independentea kontuan hartzen duen eta isurpena saiakuntzen bidez zehazten duen metodoa

Metodo hau 1926. urtean zehaztu zuten [12]. Eroalearen esfortzu-deformazio eta isurpen-kurbetan oinarritzen da. SAG10 eta PLS-CADD software-programetan erabiltzen da metodoa. Saiakuntzen bidez lorturiko kurbak ekuazioen bidez irudikatzen dira konputazio-analisia errazteko. Ekuazioek σ^{birtual} esfortzu birtuala eta deformazioa erlazionatzen dituzte (37-39). Esfortzu birtuala lortzen da benetako esfortzua azalera-erlazioagatik biderkatuz. Hau da, aluminioaren kasuan, aluminioak jasaten duen esfortzua eta aluminioaren eta eroale osoaren azalaren arteko A_a/A erlazioa biderkatuz lortzen da aluminioaren esfortzu birtuala. Berdin egiten da

nukleoaren kasuan, bere esfortzua A_n/A erlazioarekin biderkatuz. Horrela, aluminioaren eta nukleoaren esfortzu birtualak batzen badira, eroale osoaren esfortzua lortzen da zuzenean. Hasierako kurbak dira lehen azaldu diren esfortzu-deformazio saiakuntzetan lortutakoak, eta eroaleak ordubetean garaturiko isurpena irudikatzen dute. Kurba horiek laugarren ordenako polinomioen bidez irudikatzen dira (37). Isurpen-kurbek 10 urtean zehar emandako isurpena irudikatzen dute, eta laugarren ordenako polinomioen bidez irudikatzen dira (38). Bukaerako kurbek eroalearen bukaerako portaera irudikatzen dute. Eroalearen portaera lineala da, eta $E^{birtual}$ modulu elastiko birtualaren bidez gertatzen da esfortzu birtualaren eta deformazioaren arteko erlazioa (39). Modulu elastiko birtuala lortzen da aluminioaren edota nukleoaren modulu elastikoa aluminioaren edota nukleoaren azaleraren eta eroale osoaren azaleraren arteko erlazioarekin biderkatuz.

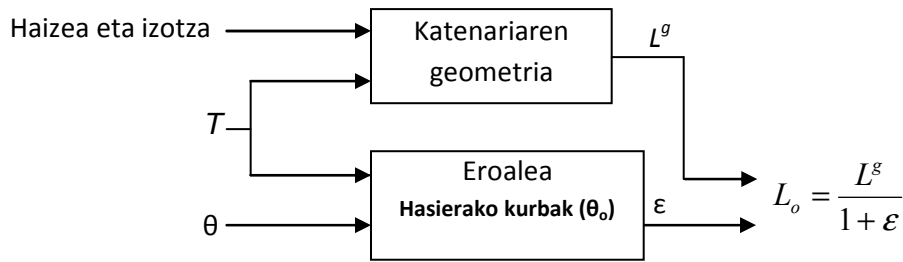
$$\sigma_{hasiera}^{birtual} = a_0 + a_1 \cdot \varepsilon + a_2 \cdot \varepsilon^2 + a_3 \cdot \varepsilon^3 + a_4 \cdot \varepsilon^4 \quad (37)$$

$$\sigma_{isurpena}^{birtual} = b_0 + b_1 \cdot \varepsilon + b_2 \cdot \varepsilon^2 + b_3 \cdot \varepsilon^3 + b_4 \cdot \varepsilon^4 \quad (38)$$

$$\sigma_{bukaera}^{birtual} = c_0 + E^{birtual} \cdot \varepsilon \quad (39)$$

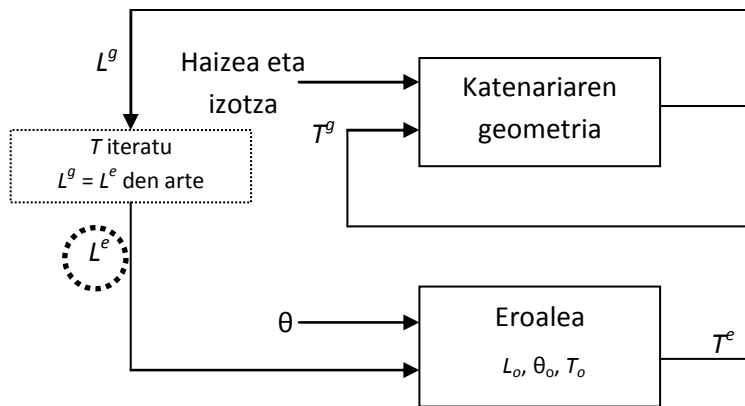
Kurba horiek saiakuntzak egindako θ_0 erreferentzia-tenperaturari dagozkio. Kurba horietatik abiatuz eta dilatazioaren deformazioa kontuan hartuz, beste edozein tenperaturatan kalkula daitezke kurbak. Horretarako, nukleoaren eta aluminioaren kurbak modu independentean hedatzen dira deformazio-ardatzean (abzisa). Deformazio termikoa, eta, ondorioz, kurbaren desplazamendua, handiagoa da aluminioarentzat (ε_a^θ) nukleoarentzat (ε_n^θ) baino. Temperatura handiagoa bada kurba eskuinerantz desplazatzen da, eta bestela, ezkerrera. Ondoren, bi kurbak batuz eroalearen esfortzu-deformazio kurba lortzen da tenperatura horrentzat.

Metodoak L_0 eroalearen erreferentzia-luzera zehazten du. Luzera hori da eroaleak trakziorik eta isurpenik gabe θ_0 erreferentzia-tenperaturan duen luzera. Eroaleak baoan instalatu aurretik duen luzera irudikatzen du. Katenariaren geometriatik kalkulaturako L^g luzeraren bidez egiten da bere kalkulua, hasierako kurbak eta hasierako egoera (normalean, instalazio-egoera) kontuan hartuz deformazioa kalkulatzeko (19. irudia).



19. irudia. L_o erreferentzia-luzera

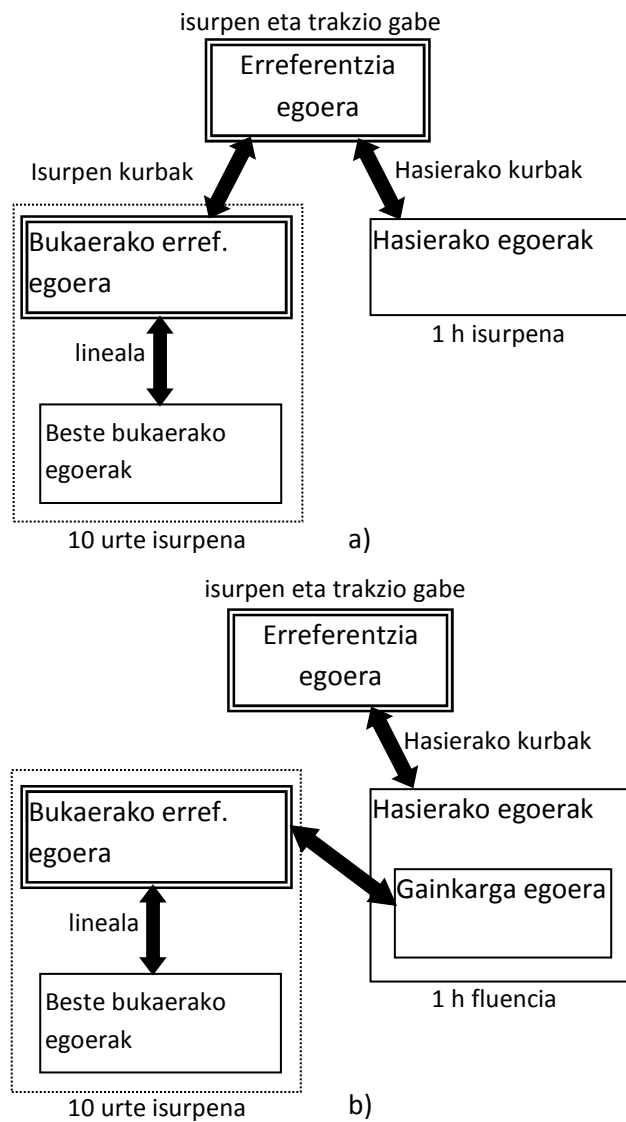
Egoera-aldaketaren kalkulua prozesu iteratibo baten bidez egiten da (20. irudia). Iterazio-aldagaia L^e eroalearen luzera da. Balio horren bidez, ϵ deformazioa kalkulatu da eta, ondoren, σ esfortzua eta T^e eroalearen trakzioa. Trakzio horrekin L_g katenariaren luzera kalkulatu da, eta L^e eroalearen luzerarekin alderatu da. Iterazioak jarraitu egingo du, luzeren arteko diferentzia zehazturiko atalase bat baino txikiagoa den arte.



20. irudia. Kalkuluaren prozesu iteratiboa

Bukaerako egoera kalkulatzeko, bukaerako erreferentzia definitzen da lehendabizi. Horrek kontuan hartzen du eroaleak jasandako isurpena. Kasu horretan, bi aukera daude. Lehenengo aukera da denbora jakin batez -10 urtez normalean- tenperatura konstantean -normalean $15\text{ }^\circ\text{C}$ - emandako isurpen metalurgiko jarraitua (21.a irudia). Kasu horretan, bukaerako erreferentzia-baldintza lortzen da lehen azaldutako prozesu iteratiboan isurpen-kurbak erabiliz. Bigarren aukera da trakzio handiko gainkarga-egoera batek sortutako isurpena kontuan hartzea (21.b irudia). Kasu horretan, bukaerako erreferentzia lortzen da lehen azaldutako prozesu iteratiboan hasierako kurbak gainkarga-egoeran erabiliz. PLS-CADD programak bi aukerak emandako emaitzak erakusten ditu. SAG10 programak, aldiz, bukaerako deformazio handiena ematen duena bakarrik erakusten du. 22. irudian SAG10 programaren

emaitza ikusten da, deformazio handiena isurpen metalurgikoa denean. Aldiz, 23. irudian ikus daiteke deformazio handiena gainkargak sorturikoa denean.



21. irudia. Bukaerako erreferentzia. a) Isurpen metalurgiko jarraitua. b) Gainkargak eragindako isurpena

Conductor ZEBRA ACSR/British

Area= ,7485 Sq. in Dia= 1,125 in Wt= 1,088 lb/f RTS= 29900 lb
 Data from Chart No. 1-838
 English Units
 Using Exact Catenary Equations

Span= 150,0 feet NESC Medium Load Zone
 Creep IS a Factor Rolled Rod

Design Points					Final			Initial		
Temp	Ice	Wind	K	Weight	Sag	Tension	RTS	Sag	Tension	RTS
F	in	psf	lb/f	lb/f	ft	lb	%	ft	lb	%
15,	,25	4,00	,20	1,809	,66	7703,	25,8	,59	8628,	28,9 ≤ 50
32,	,25	,00	,00	1,515	,67	6409,	21,4	,55	7748,	25,9
0,	,00	,00	,00	1,088	,36	8587,	28,7	,33	9217,	30,8
15,	,00	,00	,00	1,088	,41	7475,	25,0* ≤ 25	,36	8499,	28,4 ≤ 33.3
30,	,00	,00	,00	1,088	,48	6382,	21,3	,39	7761,	26,0
60,	,00	,00	,00	1,088	,71	4320,	14,4	,49	6233,	20,8
90,	,00	,00	,00	1,088	1,14	2695,	9,0	,65	4676,	15,6
120,	,00	,00	,00	1,088	1,49	2054,	6,9	,95	3224,	10,8
167,	,00	,00	,00	1,088	1,84	1667,	5,6	1,73	1773,	5,9
212,	,00	,00	,00	1,088	2,20	1394,	4,7	2,11	1451,	4,9

* Design Condition: Trakzioaren muga balioa

22. irudia. Bukaerako egoera 60 °F temperaturan emandako isurpen jarraituak baldintzatuta

Conductor ZEBRA ACSR/British

Area= ,7485 Sq. in Dia= 1,125 in Wt= 1,088 lb/f RTS= 29900 lb
 Data from Chart No. 1-838
 English Units
 Using Exact Catenary Equations

Span= 150,0 feet Special Load Zone
 Creep is NOT a Factor Rolled Rod

Design Points					Final			Initial		
Temp	Ice	Wind	K	Weight	Sag	Tension	RTS	Sag	Tension	RTS
F	in	psf	lb/f	lb/f	ft	lb	%	ft	lb	%
-25,	,50	8,00	,00	2,532	,66	10760,	36,0	,66	10760,	36,0 ≤ 50
32,	,25	,00	,00	1,515	,67	6409,	21,4	,54	7959,	26,6
0,	,00	,00	,00	1,088	,36	8587,	28,7	,32	9424,	31,5
15,	,00	,00	,00	1,088	,41	7475,	25,0* ≤ 25	,35	8710,	29,1 ≤ 33.3
30,	,00	,00	,00	1,088	,48	6382,	21,3	,38	7976,	26,7
60,	,00	,00	,00	1,088	,71	4320,	14,4	,47	6454,	21,6
90,	,00	,00	,00	1,088	1,14	2695,	9,0	,63	4894,	16,4
120,	,00	,00	,00	1,088	1,42	2153,	7,2	,90	3411,	11,4
167,	,00	,00	,00	1,088	1,76	1742,	5,8	1,65	1853,	6,2
212,	,00	,00	,00	1,088	2,11	1449,	4,8	2,06	1488,	5,0

* Design Condition: Trakzioaren muga balioa

23. irudia. Bukaerako egoera gainkargako trakzioak baldintzatuta

5 ERREFERENTZIAK

- [1] R. Thrash, «**Overhead conductor manual**», Southwire, 2007.
- [2] CIGRÉ Brochure 244, «**Conductors for the uprating of overhead lines**», 2004.
- [3] CIGRÉ Brochure 324, «**Sag-tension calculation methods for overhead lines**», 2007.
- [4] «**Goi-tensioko aireko linea elektrikoei buruzko erregelamendua**», Euskal Herriko Unibertsitateko Argitalpen Zerbitzua, 2011.
- [5] Y. Motlis, J.S. Barrett, J.A. Davidson, D.A. Douglass, P.A. Hall, J.L. Reding, T.O. Seppa, F. Thrash, H.B. White, «**Limitations of the ruling span method for overhead line conductors at high operating temperatures**», *IEEE Transactions on Power Delivery*, 14. lib., 2. zk., 549.-560 or., 1999.
- [6] CIGRÉ 22-05, «**Permanent elongation of conductors. Predictor equations and evaluation methods**», *ELECTRA*, 75. zk., 63.-98. or., 1981.
- [7] 3M, «**ACCR Conductor Test Reports**».
- [8] Electrical Technical Committee of The Aluminum Association, «**A method of stress-strain testing of aluminium conductor and a test for determining the long time tensile creep of aluminium conductors in overhead lines**», 1999.
- [9] UNE-EN 50182, «**Aireko linea elektrikoetarako eroaleak. Geruza zentrokideetan kableatutako alanbre biribilez osatutako eroaleak**», 2002.
- [10] UNE-EN 61395, «**Aireko linea elektrikoetarako eroaleak. Txirikordaturiko eroaleen isurpen saiakuntza egiteko prozedurak**», 1999.
- [11] L.M. Checa, «**Líneas de Transporte de Energía**», Marcombo, Bartzelona, 1988.
- [12] T. Varney, «**ACSR graphic method for sag-tension calculations**», *Aluminum Company of America*, 1927.