

# Soluzioni ottimali nell'Elettrogeocinesi applicata

*(Optimal solutions on applied electro-geokinetics)*

A. BELLUIGI

Ricevuto il 30 Giugno 1973

RIASSUNTO. --- § 1) Rendimento tecnico-economico elettrogeosmotico EGO, in funzione dei dispositivi elettro-geocircuitali, soluzioni ottimali: elettrodi bidimensionali, elettrogeocinetizzazione.

§ 2) L'evoluzione del perfezionamento elettrodologico fino alle polarità piane aperte o multiple, (lineari o bifilari), ha avuto il punto di partenza dai poli bicilindrici coassiali o eccentrici, (utilizzabili per essiccazioni di masse umide, come gli estrusi di guarnizioni per freni, confezionate per via umida).

Nel § 3) si rimuove teoricamente una limitazione delle passate teorie EGO, (pressione anodica costante); segue dalla nuova teoria l'avvento dei "bifilari e loro modalità".

Il § 4) dà teorizzazioni approssimate (sufficienti) dei piani polari infissi al suolo.

In più si espongono dispositivi polari misti, (lineari chiusi e aperti), uno atto alla formazione d'ancoraggi elettrici subanodici. Altro dispositivo è descritto nel § 5), più idoneo per palancolate e diaframmi elettrici.

Si teorizza un sistema pluripolare per realizzare formazioni colomnari a larga base, fino alla superficie del suolo, con norme operative e di programmazione polare, e secondo i casi.

SUMMARY. — We inspected recent types of electro-geocircuits affecting almost all the main geo-mechanical problems (see § 1<sup>st</sup>). We described the evolution of electrodes up to those of plane two-dimensional type (see § 2<sup>nd</sup>); we previously mentioned the internal two-cylinder electrology with prevalingly aims of massive exication in manufacturing sectors of friction materials. In the § 3<sup>rd</sup> we also cleared the presupposition that it is in apparent contrast with the past electroosmotic theories of the artificial constant anodic pressure, as we consider it natural and therefore variable during the cathodic electro-drain.

We put forward a polar planes theory og the § 4<sup>th</sup>), after giving operative conditions of uniform, wide and heteropolar electric consolidation. We studied further polar monodimensional devices for particular aims.

A first system produces deep subanodic consolidations as a result of a plane circular cathodic polar system and of an anodic central axial system.

A second system described in § 5<sup>th</sup> (2 cathodic vertical plates and 1 horizontal anode in middle point) causes striped hardening effects.

A third system brings forth columnar consolidations (electro-plinths) provided of vertical electrodes distributed on concentric circles.

§ 1) L'*Elettrodologia* s'adatta ad ampie applicazioni elettrogeomecniche.

Incombono ancora le due grandi limitazioni, inerenti l'una alle disuniformità di campo elettrico impresso con geobipoli standard, ad inversioni potenziali in mezzaria, l'altra relativa ai condizionamenti selettivi dei terreni, ad alto o basso indice di Wiedemann. Oggi si può operare con polarità bidimensionali o miste, (a macropunti, superficiali, e lineari), purché ad elettroazioni soprattutto uniformi (<sup>2</sup>). Con un neo-dispositivo misto descritto in (<sup>4</sup>), elettrogetto (EGE) a bisol silicatico, si perviene ad elettro-ancoraggi subanodici, (Fig. 1<sub>1</sub>), o ad indurimenti paliformi ad alta snellezza (Fig. 1<sub>2</sub>), anodi ad elementi tubolari avvitati, estraibili. In Fig. 1<sub>3</sub> si riporta un adattamento multipolare per bonifica di sottofondi, pilastri d'ancoraggio collegati ad una piattaforma basale, elettrogettata.

Le limitazioni inerenti alla natura dei terreni, a carenze di porosità, idrogeochimiche, sono state ridimensionate anch'esse, introducendo demolitori d'idrostrutture stagne, dissociazioni, solvenze, influenzando

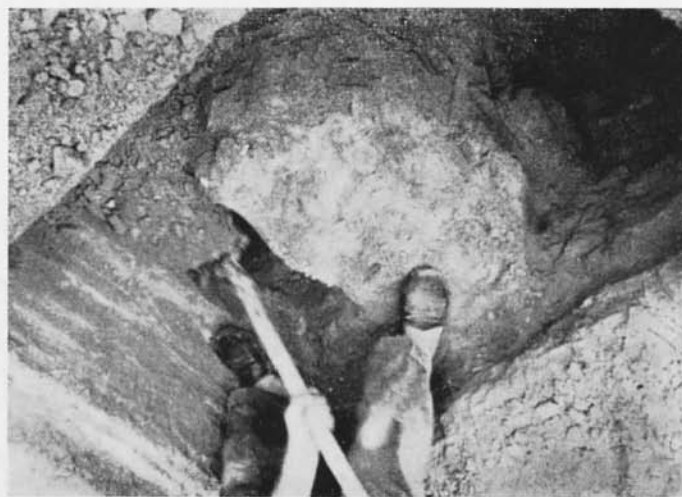


Fig. 1<sub>1</sub> - Cordolo elettrico, (elettroiniezione silicatica bisolica).

in vario modo, con immissioni di ioni ed eterocariche, (autoprotolisi), attivando scambi ionici.

Le stesse finalità infine (EGO + EGE) si sono estese, da consolidanti, impermeabilizzanti, pietrificanti, alle plastizzazioni dei suoli rigidi, con ripercussioni agronomiche, elettrogeomeccaniche, (*cerniere o tagli plastici*).

La diversa durezza nella delimitazione, abbastanza netta, dell'elettroafforzamento terroso EGE conseguito, viene avvertita agevolmente anche dallo sterratore. Si nota un consolidamento (<sup>1</sup>) terroso, (dosabile), simmetrico rispetto agli anodi, (a filari), per tutta la loro lunghezza d'infissione, (EGE parziale).

Elettrogetti subanodici, a tubolari metallici estraibili, recuperabili, in Fig. 1<sub>2</sub>, (andamento di bulbificazione colonnare, più o meno spaziata, a seconda il numero degli elementi polari accostati). La distribuzione dei tubi anodici, (trianodici o polianodici), è generalmente in parallelo.

Questo dipende dai volumi di terreno da elettroconsolidare (Fig. 1<sub>2</sub>).

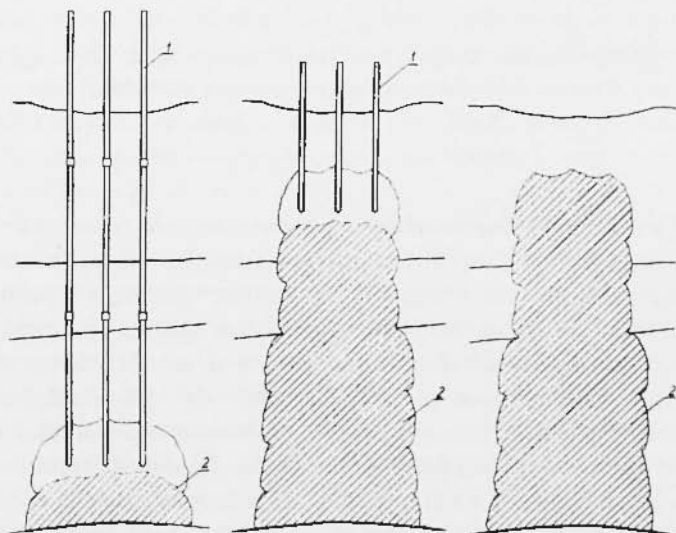


Fig. 1<sub>2</sub> - Gli anodi tubolari, a spezzoni avvitati, si sollevano man mano, post-iniezione, fino al loro recupero completo.

Elettroimbastamento con pilastri laterali EGE, (poli verticali e obliqui). I sistemi rocciosi sedimentari, — membrane, (diaframmi), contengono costantemente dispersioni granolistiche, in giunti, traps,

cosparsi di dissoluzioni turbonitiche; paleoscheletri di roccia dissoluti per carichi tensivi permanenti, (effetto Rieke); doppi strati elettrici, capillari e no, a varia distribuzione ionica (rada e no, ioni mobili compensatori in soluzione), adsorbenze, stati di valenze insature, (disperse o no), *consistenze naturali elettrogeocinetiche diffuse*.

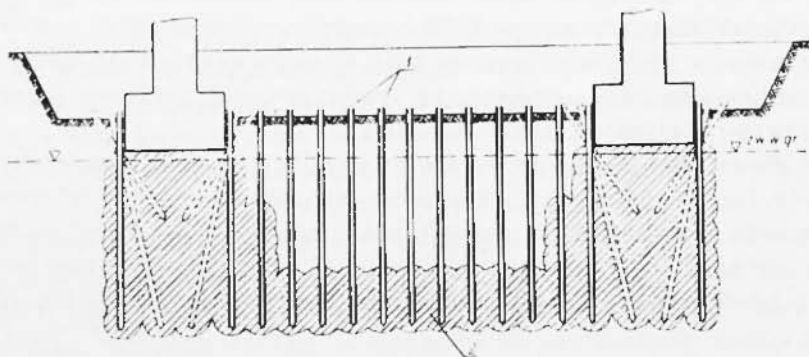


Fig. 1<sub>5</sub> - Rafforzamento fondale di plinti, con platea elettrogettata a ribasso, di collegamento, (e spessore variabile).

È questa una constatazione sperimentale che dischiude nuovi orizzonti per interventi di potenziamento artificiale di tali consistenze.

D'imprevedibili possibilità s'è mostrata l'elettrogeoplasmosi<sup>(3,4)</sup>, a fine di trasformazione dei suoli rigidi, fino al loro spappolamento, con sistemi dapprima ad elettroinondazione a catodo cieco, (1 - 1,5 atm.). Rocce sedimentarie in situ, aggredite dai fluidi, ad inibizione persistente, s'alterano, si solubilizzano, tendono a neoequilibri deposizionali; e come s'è sviluppata una tecnica dei fluidi indurenti, così n'è sorta un'analogia dei fluidi plastificanti, viscoplastici; con regolazioni di solubilità (pII) e stabilità (redox). Dobbiamo sorvolare su recenti messe a punto apparentemente minori, d'autoconsolidamento meccanico, con dosate igroscopulsioni catodiche; ridistribuzione, contrazioni di pressioni neutre, delimitazioni razionali d'abbassamento di falde idriche, (condizionate dai consumi energetici, che dovranno essere competitivi, progredienti esponenzialmente con la profondità, con ripercussioni di fondo), igroscopizzazioni, scarichi tensivi "slippage planes by ground water".

La sommersione di intere regioni aride, in USA, infestate da sali alcalini, indurenti e impermeabilizzanti, (che impediscono o ritardano la crescita delle piante), affiancata da interventi EGO, permette l'asportazione di sali di sodio dannosi; "ripermeabilizzazione" del terreno, (gas vari, tra cui  $H_2$ , sgombrano le vie di percolazione dei fluidi), scambi  $(Na)/(Ca)$ , attivando macerazione e friabilità; notevole la capacità di scambio di tali suoli alcalini, ( $Na$  estremamente diffuso per la sua alta solubilità), con cationi preferenziali calcici, preesistenti o immessi: (*bonifica EGO-agronomica*).

Elettrazioni miste, a catodo cieco e aperto, in quanto se è vero che la concentrazione dei prodotti disciolti aumenta nella fase stazionaria, non è men vero che i coefficienti di scambio s'incrementano con la velocità dei fluidi irroranti, (fase cinetica). I "fluidi validi" dovranno esser tali da poter raggiungere una minima saturazione del mezzo, per non precludere, come accade talvolta, gli effetti di contatto o permeabilizzanti.

Ad altre nuove prospettive s'avvia l'Elettrogetto; forse, la più importante, è la trasformazione dei "geotipi iperstatici ad isostatici", (mercè tagli elettroplastici), per riservare il successivo eventuale consolidamento agli isogeostati. Il principio che sosteniamo, è di procedere, nei consolidamenti dei suoli, con interventi EGE, preferibilmente sui geoisostati, solo eccezionalmente sugli ipergeostati, (un argomento che verrà sviluppato altrove).

Operando su geoisostati, (naturali o preconvertiti tali), s'addiende ad un più sicuro, duraturo consolidamento, (né si escludono interventi, per rinforzi d'integrazione o sostitutivi, su geostati iperstatici instabili). Operare però indiscriminatamente, su apparenti geoequilibri iperstatici, non è buona norma, è facile incorrere in imprevedibili alterazioni, tanto maggiori, quanto lo è il grado d'iperstaticità. Dapprima dunque la scelta del sistema geoisostatico principale, più conveniente, dopo, "tagliati i vincoli superflui", (*elettrogeoisostatizzazione*); segue l'EGE rassodante il geoisostato.

L'EGE integrale <sup>(3,4,5)</sup> porta ad una strutturazione consolidata omogenea (Fig. 14), (non mosaicale eterogenea inserzionale, come accade con gli altri processi); rimuove il disuniforme, i geogermi, le concentrazioni tensive sparse, porta all'assorbimento uniforme dei carichi.

Il che accade in quanto, con la elettro-formazione di films silicatici, avvolgenti i granuli, si facilita, con una omogeneizzazione filmatica di granuli eterogenei, la diffusità secondo le leggi di Fick.

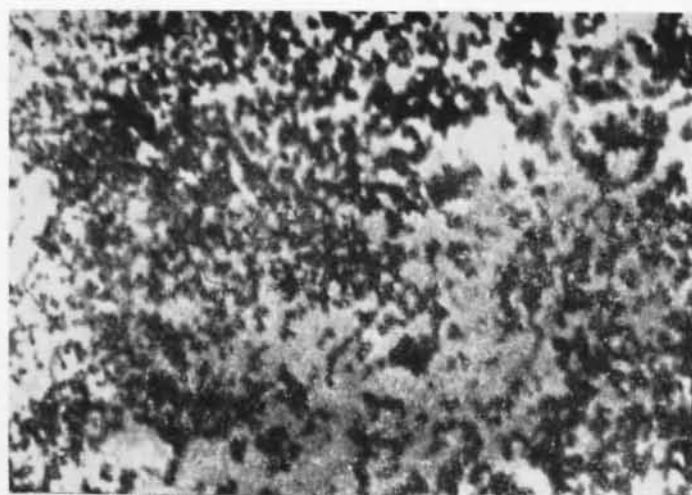


Fig. 1<sub>3a</sub> - EGE parziale-indurente inserzionale o intergranulare.

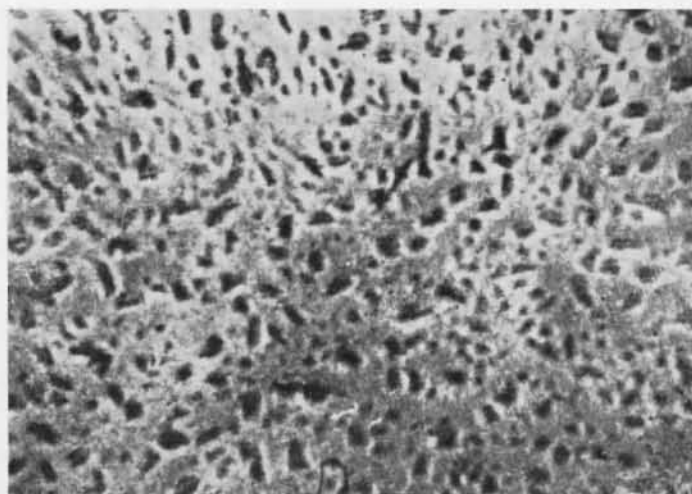


Fig. 1<sub>3b</sub> - EGE integrale-indurente avvolgente o filmante  
i granuli ferrosi (omogeneizzazione diffusiva).

L'indurezza, inserzionale è molto meno consistente di quella granulofilante. Quest'ultima inoltre si risolve in effetti d'arriciatura liscia, continua, intonacizzante, gunitizzante, uniformizzante i carichi.

L'azione di bonifica ad es. dei terreni sottofondali, convergerebbe non più su geostati iperstatici, ma su quelli di conversione elettroisostatica.

Non è certo agevole riconoscere ubicazione, entità, numero delle sollecitazioni sovrabbondanti; in tutti i casi *abbassare il grado d'ipergeostaticità costituisce già un risanamento ambientale.*

Tra gli interventi d'attivazione elettrogeocinetica annoveriamo i nostri tentativi positivi di "elettrocimentazione" per carenze cementative meccaniche, chimiche ("chemical Grout"), puramente porosimetriche.

Con cementazione forzata, dirompente, (carico sedimentario: 0,2-03 kg/cmq/m), si colmano i vuoti maggiori; ricementando con malte leggerissime, a minima viscosità, si cancellano i vuoti medi; il "range" di porosità si sposta verso i "fini", a consistenza elettrocinetica.

È qui valevole il nostro intervento EGE, a pressioni distribuite, in direzioni volute, comandato dal coefficiente d'efficacia ( $K_e/K$ ). Soluzioni saline integrate da additivi d'acque espansive, carbonatiche, possono completare la cementazione, altrimenti difettosa.

Altra messa a punto funzionale è il nostro "Electrowellpoint" abbinante due tipi d'estraibilità fluida, ad effetti superadditivi. I "Well points", punte filtranti, aspirano per depressione, (pur molto al disopra di ordini porosimetrici EGO  $\phi \sim 0,001$  mm), liberano il mezzo non colloidale dell'acqua tellurica neutra polimerizzata o no, (terreni ad es. arenacei), aspirano da finestre del pozzo tubolare catodico, recipiente insieme idronioni. L'EGO scardina fino alle acque a coesione metastrutturale, e le convoglia con le altre all'uscita del pozzo: emungimenti allora per cause diverse, d'acque telluriche del terreno bifasico. Il "Well point" data la potenza delle pompe a vuoto-spinto, collegate con quelle d'aspirazione autoadescente, provoca un'evaporazione dei residui idrici nello spazio interparticellare che in questo modo si incrementa. La trazione capillare si rafforza, e con essa la pressione costipante nel maggior spazio evaporativo. Una "meccanocinesi" conseguita al "Well-point-EGO", può spingersi fino alla rottura locale, con distacco dei menischi, per cui l'acqua dei pori, subendo la gravità, cade nell'ambiente roccioso, a contrazione massima (ritiro). Gli effetti annunciati superadditivi, nell'"Electrowellpoint", sono appunto i *meccanogeocinetici.*



§ 2) - *L'elettrodo bidimensionale* <sup>(3)</sup>, (cilindrico, piano, a superficie curva, ondulata) consegue efficienze distributive d'elettroazioni uniformi, irraggiungibili altrimenti, tranne in casi particolari che vedremo.

Venne occasionato da un'elettrodologia bicilindrica interna, (coassiale o no), per l'essiccazione elettrosmotica di prodotti sintetici d'atrito per via umida, (estrusi a "moulding" elettrico, "brakelining" curvi, nell'intercapedine bicilindrica polare).

In Fig. 2<sub>1</sub>, si rileva un intenso e rapido prosciugamento massivo d'impasto umido, ben maggiore ed efficace di quello standard termico, (in forni ordinari), di natura quest'ultimo pellicolare, incrostante.

L'elettroprocesso deumidificante s'inizia delubrificando, instaurando subito incrementi frizionali, una *incipiente neoatritogenesi*, che s'avvarrà poi dell'effetto Kruyt.

D'altra parte s'è dimostrata l'impossibilità termoconvenzionale di fluidi racchiusi in mezzi porosi, con riscaldamento esterno di qualsiasi provenienza. Il condizionamento della termoconvezione di fluidi occlusi in tali mezzi, dipenderebbe, secondo Rayleigh-Porton, da un eccessivo grad  $T$ , di difficile realizzazione:

$$\text{grad } T \geq 4\pi^2 h^2 \nu / KgaD^2 \rho_0;$$

( $h^2$  termodiffusività; con  $\nu$  viscosità,  $K$  permeabilità,  $a$  termodilatazione,  $\rho_0$  densità apparente,  $D$  spessore materiale).

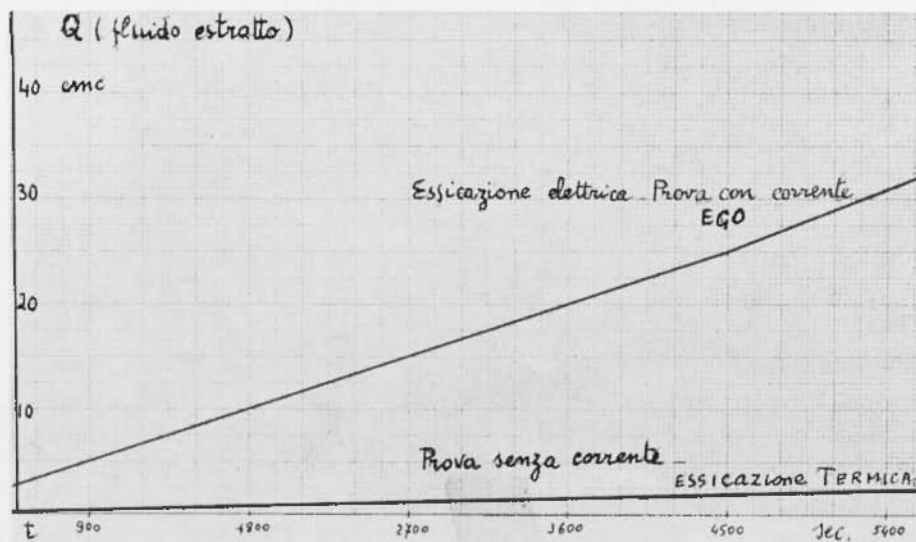


Fig. 2<sub>1</sub> - Deidratazioni d'un test-saturo di materiale umido sintetico frizionale estruso, (termica e EGO): diagrammi (Q, t).



Senza azione elettrosmotica non si accusa, nel tempo indicato, essiccazione sensibile, né variazione d'umidità interna; con l'EGO la perdita d'acqua  $Q$  è progressiva, lineare, all'inizio per basse tensioni elettriche, poi a tendenza asintotica all'ascissa  $t$  (Fig. 2).

L'eventuale successiva applicazione iniettiva EGE, se non si è spinto troppo l'emungimento (ostacolante in tal caso la mobilità ionica), è facilitata dall'ampiammento conseguito delle sezioni di passaggio dei canalicoli, tortuosità liberate: (permeabilità apparente accresciuta). L'opportunità d'una *pre EGO* è subordinata ad una *idroestrattività critica*, né da superare, né da tenere inferiore al punto critico; attualmente è normale, in ascesa.

L'elettrodreno attenua le lubricità intermassive, solleva, eliminandoli, veli acquiferi interfasciali, opponendosi agli "swelling", microritiri, o ad altre forme d'instabilità; rafforzando reticoli tensivo-capillari coesivanti, senza togliere all'aggregato, a più componenti in equilibrio (coerenza termodinamica), quell'umidità critica (Proctor) necessaria al rassodamento massimo.

Con idonei adsorbati, volendo, post-elettrimmisione, può essere incrementata la capacità di contrastare sforzi di taglio, che è poi la "frizionalità" indotta, forme diverse d'attritogenesi.

Un dispositivo d'essiccazione variante del bicilindrico<sup>(2)</sup> (adatto per trattamenti "pads"), è a piani polari orizzontali sovrapposti, distanziati a polo negativo in basso, ( $K < 10^{-2}$ ,  $K_e > 10^{-3}$ ).

L'essiccamento comporta, se  $V_0 = aq_0J$  (5-100 V), il potenziale iniziale, un'energia alimentatrice ( $V_0^2 q_0 at$ ), umidità iniziale  $Q_0$ , che si riduce a  $Q < Q_0$ , nel tempo  $t$ , causa il deflusso idrocattodico. Il pre-EGO critico si rileva dalle curve di estrattività  $Q(t)$  a due componenti idraulica e osmotica, loro intersezione o "punto critico" per  $t = t_c$ , istante in cui si deve interrompere l'EGO, e iniziare l'EGE, (altrimenti per  $t \leq t_c$ , il rendimento EGE diminuisce). Questa constatazione ci permise di formulare il *processo EGO-EGE*, di massimo rendimento, da noi introdotto e praticato.

Con la corrente (durata) energizzante il suolo, si incrementano le cariche micellari e quindi la viscosità (Kruyt), incidendo il puro processo EGO sul  $\mu$  (coefficiente d'attrito del materiale), il  $\mu$  che aumenta non tanto per la *viscosizzazione d'essiccamento*, quanto per elettroviscosità. Essiccamento, contemporanea creazione dei  $\mu$  (uniformi per di più in tutto il volume trattato), sono realizzabili operando con bidimensionalità polari.

Gli effetti d'omogeneità, conseguiti con c.c. ad elettrodi bidimensionali, apparizione dell'effetto Kruyt, si conseguono anche con c.a. (abolendo i convertitori a c.c.), in quanto il cilindro esterno anodico, offrendo superficie maggiore dell'interno catodico, permette che si attui un "effetto valvola" (raddrizzamento di c.a.).

Di questa proprietà ci avvaliamo spesso, nell'uso di polarità eteronome, a diversa superficie attiva (comportanti diverse resistenze ohmiche diffusive, e relative densità di corrente), e ne teniamo conto nelle progettazioni.

La bidimensionalità polare è trasferibile ai sistemi bifilari, sia di superficie (<sup>1,5</sup>), che profondi, tubolari, a piani polari verticali (complanando elementi sottili cilindrici accostati).

Variante essenziale concerne la distribuzione polare (oltre la struttura) per l'esaltazione EGO, massimo rendimento, *anodi interni affacciati*. Non solo s'elimina l'apporto parassita di teleazioni idrotelluriche extranodiche (Fig. 2<sub>2</sub>) (<sup>3</sup>), ma ciò si converte in moltiplicatore d'effetti interanodici, eliminando le teleazioni. Nessuna variante alla legge estrattiva in funzione altresì del coefficiente di consolidamento  $c$  meccanico (compressibilità/permeabilità) (<sup>2</sup>). Il tempo di deidratazione  $\tau = a^2c/4$ , o di consolidamento, non rispecchia più, quando  $t > \tau$ , l'acqua tellurica extranodica  $q = aIK_{e0} \sqrt{c/\pi t}$ , esterna al geobipolo, ma esclusivamente l'interanodica del *bifilare accoppiato*.

Viene rimossa l'impossibilità di poter eliminare la deidratazione di spazi parassiti vicini (comportando ciò vecchi sistemi di geobipoli).

In Fig. 2<sub>2</sub>, A e B sono i settori interni e extranodici della bipolarità astiforme:  $a = 100$ , interpolarietà;  $K_{e0}I = 10^{-5}$  (1), durate processuali  $t = \tau/10$ ,  $t = \tau$ ,  $t = 10\tau$ ; per  $t \gg \tau$  la influenza extranodica prevale l'interpolare;  $Q(x, t)$ ,  $x$ , indica che per  $t = \tau/10$ , si nota un effetto prevalente interpolare, che è però sempre limitato, metà dovuto al terreno interno, metà al terreno esterno: poi la disimmetria rispetto all'anodo va tutta a vantaggio della deidratazione esterna. Dispositivi del genere devono essere aboliti.

Con doppia bifilarità, anodi interni affacciati, s'attuano *elettrorecinzioni*, sbarramenti impermeabili idromigratori, mentre nello spazio chiuso, all'interno del recinto, s'accentuano le depressività delle linee d'ugual riduzione d'umidità (10%, 15%, 30%), l'intera energia elettrica devolvendosi per l'elettrazione interecinziale. Non più essiccamento 40%, 50% ai poli, e 10% in mezzaria e anche meno, tali effetti si uniformizzano (livellano) al massimo rendimento.

Necessitando cospicui dreni, in tempo breve, preferiamo correnti e. pulsanti, o ad alta frequenza rettificata (con forti sviluppi di calore per elettroinduzioni, apporti termosmotici affiancanti i cataforetici), da cui discende prassi di *permeabilizzazione ad alta frequenza*, per aumento soprattutto di porosità apparente.

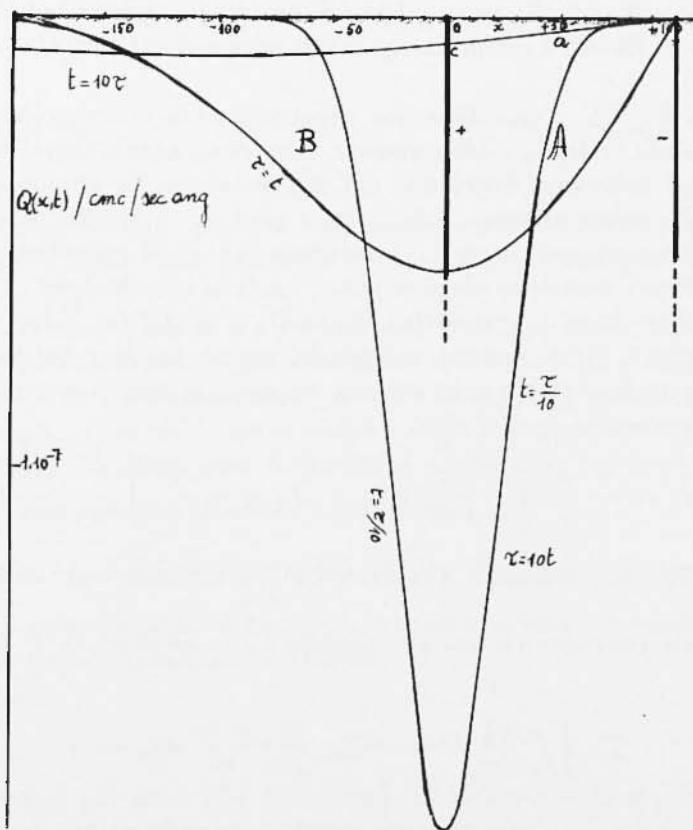


Fig. 2<sub>2</sub> - Dispositivo polare ad effetti misti.

§ 3) - Vogliamo ora qui togliere il condizionamento anodico del l'idrocarico costante, una modalità operativa vantaggiosa sotto tanti aspetti, controllo manometrico del carico polare, del prelievo fluido-catodico (pure a carattere costante). La bagnabilità perianodica attenua intanto l'effetto Joule, il tampone resistivo controlla la circolazione della e.e.; il livello costante idrico nel tubo metallico anodico da

modo, mantenendo il carico idraulico, di verificare la reale portata dell'idronio ( $\text{H}_2\text{O}$ )<sup>+</sup>, acqua metastrutturale leggera scardinata dall'EGO, viscotrascinante aliquote acqueose deionizzate.

Vediamo ora cosa accade invece se lasciamo autostabilirsi i livelli idrici anodici, variabili naturalmente da anodo ad anodo, quando liberi. Ci riferiamo ad un bipiano (equivalente) geopotolare, attribuendo un potenziale  $E_A$  agli  $N_A$  anodi cilindrici complanari, il potenziale  $E_K$  agli  $N_K$  catodi cilindrici complanari paralleli ai precedenti, opportunamente spazati.

Le  $\sum_{n_A}$ ,  $\sum_{n_K}$ , caratterizzano rispettivamente le omopolarità piano-parallele verticali, si conseguono *c.e.* uniformi, quindi consolidamenti del suolo, tolleranza distribuita dei carichi esterni. Le grandezze relative agli anodi abbiano indici latini ( $i, j, \dots$ ), quelle relative ai catodi d'indici greci ( $\mu, \nu, \dots$ ). Notiamo con  $V_p$  il geopotenziale nel suolo  $P(xyz)$ , omogeneo di resistività  $\varrho$ ; tensione alimentatrice ( $E_A - E_K$ ) correnti anodiche  $J_i$ , catodiche  $J_K$ , totale  $J = \sum J_i = \sum J_K$ .

Dette  $S_i$   $S_K$ , le superfici esterne dell'iesimo anodo e del muesimo catodo, detta  $n$  la normale esterna ad esse, si hanno notoriamente le equivalenze:

$$[3_1] \quad J_i = - \frac{1}{\varrho} \int_{S_i} \frac{\partial V}{\partial n} dS_i, \quad J_K = - \frac{1}{\varrho} \int_{S_K} \frac{\partial V}{\partial n} dS_K$$

con  $V$  funzione armonica, annullantesi all' $\infty$ , assumente ai poli i valori  $E_A$ ,  $E_K$ .

Data l'eguaglianza tra *c.e.* anodica e *c.e.* catodica, la  $V$  soddisfa alle:

$$[3_2] \quad \sum_i \int_{S_i} \frac{\partial V}{\partial n} dS_i + \sum_K \int_{S_K} \frac{\partial V}{\partial n} dS_K = 0$$

La determinazione di tali grandezze elettriche si può effettuare, come più volte abbiamo visto (1,2), considerando il problema, riferibile all'elettrostatica, quindi a soluzioni già note, convertibili.

Come in altri casi, indichiamo con  $\phi_i$ ,  $\phi_K$ , quei potenziali che corrispondono ad una carica unitaria all'iesimo anodo, e al muesimo catodo, allorquando sugli altri conduttori polari non appaiono cariche (o siano nulle).

Ricordiamo ancora che ci riferiamo ad un terreno uniforme, pressione  $H_0$  all' $\infty$ , pressione estrattivo-catodico  $H_K$ , comune a tutti i catodi; in più, questa è la nuova assunzione, *non immissione di fluido*

esterno agli anodi, o idroflusso esterno nullo per ogni anodo, considerando un regime stazionario a libera fenomenologia EGO, l'acqua tellurica nei tubolari anodici auto-livellandosi differenzialmente in genere nei diversi anodi del dispositivo polare.

Per il teorema di Gauss si ha:

$$\int_{S_i} \frac{\partial \phi_i}{\partial n} dS_i = -4\pi; \int_{S_\mu} \frac{\partial \phi_\mu}{\partial n} dS_\mu = -4\pi; \int_{S_j} \frac{\partial \phi_i}{\partial n} dS_j = 0$$

$$\int_{S_\mu} \frac{\partial \phi_i}{\partial n} dS_\mu = \int_{S_i} \frac{\partial \phi_i}{\partial n} dS_i = \int_{S_\nu} \frac{\partial \phi_i}{\partial n} dS_\nu = 0; i \neq j; \mu \neq \nu$$

I geopotenziali generati dall'iesima carica unitaria sull'iesimo conduttore piano siano indicabili con  $C_{ii}$ ,  $C_{ij}$ ...; analogamente per  $C_{\mu\mu}$ ,  $C_{\mu i}$ ,  $C_{\mu\nu}$ .

Si hanno (1), per le energie mutue:  $C_{ij} = C_{ji}$ ,  $C_{i\mu} = C_{\mu i}$ ,  $C_{\mu\nu} = C_{\nu\mu}$ , (coefficienti aventi per dimensioni l'inverso d'una lunghezza). Gli inversi di  $C_{ii}$  rappresentano, se i conduttori sono sufficientemente distanziati, le capacità elettrostatiche degli iesimi conduttori dipendendo esse solo dalla loro disposizione geometrica.

La soluzione del problema è data per  $V_P$

$$[3_4] \quad V_P = V = E (\sum_A S_i \phi_i - \sum_K S_\mu \phi_\mu)$$

La determinazione delle  $S_i$ ,  $S_\mu$ , avviene in base alle condizioni a cui tali grandezze devono soddisfare.

Posto:

$$a_A = E_A/E, \quad a_K = -E_K/E,$$

si perviene per le  $S$  e  $a$  al sistema fondamentale d'equazioni [A], ( $n_A + n_K + 2$ ) equazioni in altrettante incognite:

$$[A] \quad \begin{cases} \sum_A C_{ii} S_i - \sum_K C_{\mu\nu} S_\nu = a_A; & - \sum_A C_{\mu i} S_i + \sum_K C_{\mu\nu} S_\nu = a_K \\ a_A + a_K = 1, & \sum_A S_i = \sum_K S_\mu. \end{cases}$$

Il 1° gruppo dà le condizioni che sull'iesimo anodo il potenziale sia uguale ad  $E_A$ , il 2° l'analoga condizione per i catodi, la penultima deriva dalla definizione delle  $a$ , l'ultima è la [3<sub>2</sub>], tenuto conto di [3<sub>3</sub>], [3<sub>4</sub>].

Le  $a$  sono adimensionali, mentre  $S_i$ ,  $S_K$  hanno dimensioni di una lunghezza (capacità e.s. in u.e.s.); esse rappresentano la cariche sui sin-

goli elettrodi (col segno cambiato sui catodi), quando tra il sistema degli anodi e quello dei catodi, si stabilisce una d.d.p. =  $\mathbf{J}$ .

La  $S$  è definita da:

$$[3_5] \quad S = \sum_i S_i = \sum_{\mu} S_{\mu}$$

(capacità e.s. del sistema considerato quale condensatore).

Dalle  $a$  si ricavano i potenziali polari:

$$[3_6] \quad E_A = E_1 a_A, \quad E_K = -E_1 a_K,$$

e, in virtù delle [3\_3], [3\_1], [3\_4], mediante le  $S$ , le correnti esprimibili nel modo seguente:

$$[3_7] \quad J_i = \frac{4\pi}{\varrho} E S_i, \quad J_{\mu} = \frac{4\pi}{\varrho} E S_{\mu}, \quad J = \frac{4\pi}{\varrho} E S,$$

(si divide il 2° membro per 2 nel caso di un suolo, o semispazio infinito; le  $\varrho/4\pi s$ ;  $\varrho/2\pi s$ , danno notoriamente le resistenze ohmiche).

Per risalire alla geodropressione e idroflusso migratorio, si procede come in (<sup>2</sup>): se nel punto  $P(xyz)$  del suolo umido, la pressione geoidrostatica è  $H(xyz)$ , la perdita di pressione rispetto a quella all' $\infty$  sarà  $h = H_o - H$ ; al catodo l'abbassamento di pressione  $h_i = H_o - H_i$ , all'iesimo anodo  $h_i = H_o - H_i$ . Se l'idroflusso all'iesimo catodo è  $Q_{\mu}$ , il flusso totale  $Q = \sum_{\mu} Q_{\mu}$ , ove:

$$[3_8] \quad Q_{\mu} = - \int S_{\mu} \left( k \frac{\partial h}{\partial n} - K_e \frac{\partial V}{\partial n} \right) dS_{\mu},$$

Le  $h$ , e di conseguenza le  $(h - K_e V)/K$  dovranno essere armoniche, nulle all' $\infty$ ; quest'ultima condizione dovrà soddisfare in più le nuove condizioni di *annullamento dei flussi anodici*:

$$[3_9] \quad \int S_i \left( \frac{\partial h}{\partial n} - \frac{K_e}{K} \frac{\partial V}{\partial n} \right) dS_i = 0,$$

assumere sui catodi i valori

$$[3_{10}] \quad h_K - \frac{K_e}{K} E K = h_K + \frac{K_e}{K} E a_K$$

(problema risolubile in maniera analoga a quello del potenziale).

Una funzione armonica che obbedisce alla [3<sub>0</sub>], è nulla all' $\infty$  ed è data da:

$$[3_{11}] \quad h - \frac{K_e}{K} V = \sum_{\mu} x_{\mu} \phi_{\mu}.$$

Per soddisfare le [3<sub>10</sub>], le  $x_{\mu}$  saranno determinate dal sistema:

$$[3_{12}] \quad \sum_{\nu} C_{\mu\nu} X_{\nu} = h_K + \frac{K_e}{K} E a_K.$$

Al fine di dare alla soluzione una forma analoga a quella relativa al potenziale, poniamo:

$$[3_{13}] \quad x_{\nu} = \left( h_K + \frac{K_e}{K} E a_K \right) t_{\nu},$$

dove per le  $t_{\nu}$  si ha il sistema di  $n_K$  equazioni in  $n_K$  incognite:

$$[B] \quad \sum_K C_{\mu\nu} t_{\nu} = 1,$$

(2° gruppo d'equazioni fondamentali).

Anche le  $t_{\nu}$ , (a dimensioni inverse di lunghezza), ammettono una semplice interpretazione fisica: rappresentano le cariche che si stabiliscono sui catodi, quando il sistema di questi ultimi viene portato al potenziale uguale ad uno, lasciando isolati gli anodi. Calcolate le  $t_{\nu}$ , mediante il sistema [B], anche questo polo dipende dalle caratteristiche geometriche (nel caso in cui le distanze anodi-catodi sono grandi rispetto alle loro dimensioni, esse risultano indipendenti dalla disposizione degli anodi), si può, mediante le [3<sub>4</sub>], [3<sub>11</sub>], [3<sub>B</sub>] determinare  $h$ :

$$[3_{14}] \quad h = \frac{K_e}{K} E \sum_i S_i \phi_i + \sum_{\mu} \phi_{\mu} \left[ h_K t_{\mu} - \frac{K_e}{K} E (S_{\mu} - a_K t_{\mu}) \right] =$$

$$h = h_K \sum_K t_{\mu} \phi_{\mu} + \frac{K_e}{K} \left\{ \sum_i S_i \phi_i - \sum_{\mu} (S_{\mu} - a_K t_{\mu}) \phi_{\mu} \right\}$$

Per risalire agli squoti  $h_i$  agli anodi, ( $h$  più pronunciate), introduciamo alcune grandezze adimensionali, definibili mediante il seguente sistema:

$$[C] \quad \beta_i = \sum_K C_{i\mu} \cdot t_{\mu}$$

(le grandezze  $\beta_i$  danno i potenziali sugli anodi isolati, allorchando i catodi vengono portati a potenziali unitari, per cui  $0 < \beta_i < 1$ ).



Tenendo conto dei 3 sistemi fondamentali [A], [B], [C], definite le  $C_{i\mu}$ , dalle [3<sub>14</sub>] discendono le relazioni che portano alla determinazione di  $h_i$ :

$$[3_{15}] \quad h_i = \beta_i h_K + \frac{K_c}{K} + E (a_A + \beta_i a_K)$$

Qualora le  $\beta_i$  differiscano tra di loro, lo stesso avverrà per le  $h_i$ ; poiché  $h_i$  cresce con  $\beta_i$  se  $h_K > 0$ , ( $H_o > H_K$ ), si trae la importante conseguenza che per aumentare le  $\beta_i$ , occorre avvicinare gli anodi ai catodi. Questo è il condizionamento teorico del bifilare che ha significato se a polarità libere, non caricate idricamente. Con anodi lontani

$$\beta_i \rightarrow 0, h_i \rightarrow \text{cost} \left( \frac{K_c}{K} + E a_A = \frac{K_c}{K} + E_A \text{ cost} \right),$$

una situazione limite per cui  $h_i$  è "minima" perianodica.

L'elettrostraibilità fluida è pertanto doppiamente legata sia all'entità  $Q$  che alla  $h_i$ , particolarmente influenzabile quest'ultima, (tutto dipendendo dalla posizione assunta [3<sub>9</sub>]).

In virtù delle [3<sub>8</sub>], [3<sub>11</sub>], [3<sub>12</sub>], si ha per i flussi idrici EGO:

$$[3_{16}] \quad Q_\mu = 2\pi (kh_K + K_c a_K E) \cdot t_\mu$$

$$[3_{17}] \quad \sum t_\mu = T,$$

(capacità complessiva del sistema catodico).

L'elettroidroflusso totale risulta pertanto:

$$[3_{18}] \quad Q = 2\pi (Kh_K + K_c a_K E) \cdot T$$

Allontanandosi gli anodi, la [3<sub>16</sub>] che dà  $Q_\mu$ , stabilisce che i flussi catodici dipendono dalla loro reciproca posizione, essenzialmente attraverso  $a_K$  e non  $t_\mu$  ( $t_\mu$  funzione solo della distribuzione dei catodi).

Poiché in stato d'equilibrio di regime estrattivo l'acqua proviene, dopo un certo tempo, esclusivamente dalle lontananze (che non ci interessano), occorre adattare il dispositivo polare a quest'esigenza.

Per questo adottiamo una *doppia bicolinearità* (catodi all'esterno degli anodi affacciantesi nell'interno) perché con ciò diminuisce e aumenta  $a_K$  e aumenta  $a_A = 1 - a_K$ .

Il neodispositivo (già da tempo in uso in Russia) segnala, accusando una incisiva decrescenza d'acqua estrattiva, che in prossimità

si è già in regime (prosciugamento limite che non può procedere oltre), contemporaneamente si manifestano, affiancanti, forti abbassamenti di idropressione. Catodi dunque esterni agli anodi,  $\alpha_K$  diminuisce ossia  $E_A$  (bifilare introdotto dai russi ad anodi liberi). L'utilità d'incremento  $\beta_i$  (avvicinando anodi e catodi) dipenderà esclusivamente dalle grandezze relative  $h_K$ ,  $K_e E/K$ . Non si verifica questo nei bifilari ad anodi forzati o sotto carico artificiale, valendo altre correlazioni (3-4).

In suoli idraulici, permeabili o trasmissenti (predominanza d'effetti Darcy), accentuate depressioni  $h_K$  al catodo (uno stesso ordine di grandezza o  $>$  dell'indice di Schaad-Haeferli  $EK_e/K$ ), il maggior rendimento estrattivo s'otterrà innalzando  $\beta$ , prassi elettrodica dei *cappi a stretta bicollinearità polare*.

In suoli elettrocinetici (o a prevalenza tali), già con inizio idrodrenante più o meno costante (a differenza dell'inizio esuberante dei suoli idraulici), il rendimento estrattivo maggiore richiederà invece una prassi elettrodica ad *ampia bicollinearità polare*, (pur restando sempre una certa convenienza d'impiego del bifilare stesso).

Questa differenziazione dei 2 tipi di suoli è fondamentale; ed è possibile porla solo con la prassi accennata del bifilare; essa comporta diverse energie d'impiego e soprattutto le possibilità o meno di interventi elettrocinetici, giustificabili una buona volta, dopo dimostrazione la pertinenza.

Diamo l'esempio (Fig. 3<sub>1</sub>) di un campione di suolo misto, prevalentemente impermeabile, trattato a c.c. per meno di 5 ore (anodi liberi), in cui però si verifica il pericoloso tampone resistivo già dopo 3 ore, che praticamente annulla l'EGO, salvo l'incremento perdurante della permeabilità apparente, che potrebbe permettere il trattamento successivo del terreno elettroinettivo (EGE), altrimenti impossibile ad applicarsi.

Notiamo che i valori iniziali delle grandezze  $K$ ,  $\rho$ , (resistività elettrica), sono estrapolati, soprattutto per  $K$  che s'incrementa subito  $K = K(E)$ , com'è ben noto, a grad piuttosto accentuato, rimanendo sui massimi valori raggiunti di trasmissibilità, anche cessando l'emungimento idrocattodico, nonostante l'impennata di  $\rho$ , (che conferma l'alta eliminazione dell'acqua d'umidità, e nello stesso tempo garantisce l'incremento costante dell'indice dei vuoti).

In una recente prassi da noi studiata, ci siamo appunto avvalsi di questo risultato — solo apparentemente imprevedibile — in quanto  $K$  rimane sempre  $K(E)$ ; non esiste quindi alcuna contraddizione nell'introdurre un nuovo metodo (EGO + EGE), permettente l'EGE, altri-

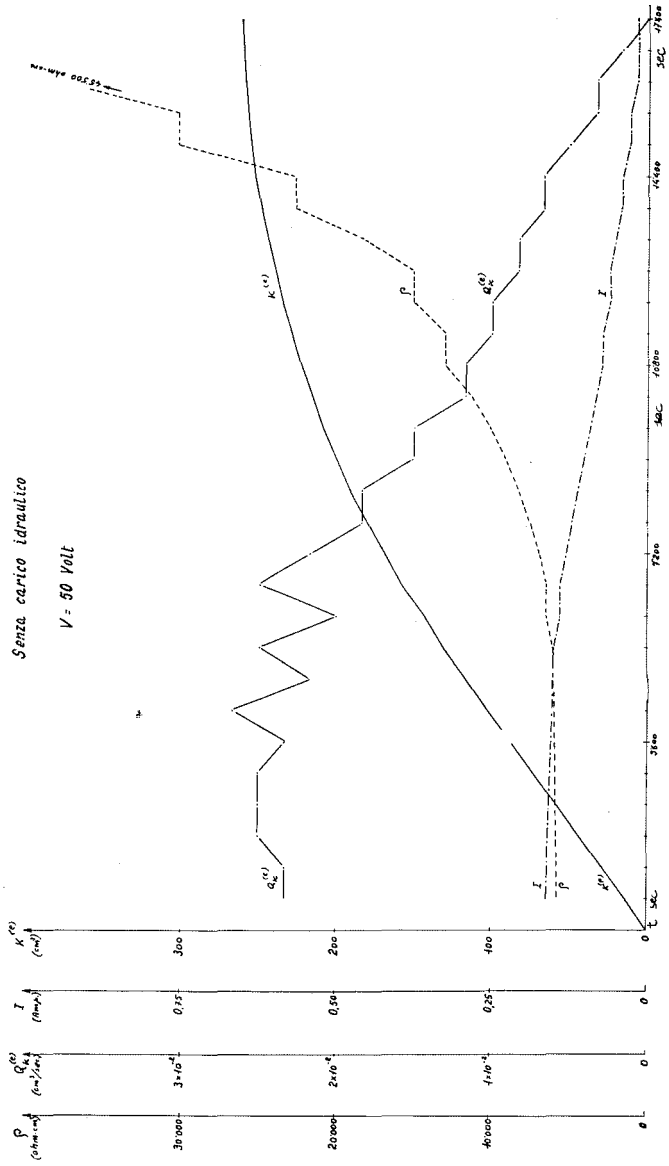


Fig. 3<sub>1</sub>

menti inapplicabile in certi suoli aventi un  $K$  minimo. Col sistema anodi a carico costante, questo non sarebbe infatti possibile.

Come del resto lo stesso "squeezing" elettrosilicato (EGE), viene valorizzato nelle sue reali possibilità immissive nei suoli, se affiancato più che da piezoadescamenti (additivi all'anodo), da pretrattamenti EGO, (il risultato non ha bisogno d'ulteriori commenti), e giustifica il nostro nuovo indirizzo applicativo.

§ 4) - La teoria dei piani polari (complanarità di poli lineari), trae la sua origine dal tubolare. Dalla loro  $\Sigma(l, r)$ , complanare d'omopolari accostati, si passa alla coppia di piani eteropolari spaziali (*bipiani polari*), con sufficiente approssimazione. Dal monolettrodo (Fig. 41) in foro di sonda non tubato (*anodo iniettivo dell'EGE*), associato o no ad un sistema compressorio d'innescò (per eventuali "cake" da rimuovere), si va alla coppia piana a tubolari verticali, spaziatura  $d$ , (piano  $xy$  superficie orizzontale del suolo,  $z > 0$  in basso, catodo all'origine, lungo  $z$  ( $\Sigma l_K, \Sigma r_K$ ); anodo lungo  $x$  ( $0, d$ ), parallelo a  $z$  ( $\Sigma l_A, \Sigma r_A$ ).

Simboli, coefficienti, si ripetono come nei paragrafi 1) e 2), altrettanto dicasi per le formule di base, relative alla corrente c.c. immessa nel suolo umido, l'idroflusso che ne deriva (EGO), idrodepressioni nel terreno trattato (polari e interpolari).

Deriviamo ora, per il nostro assunto particolare (bipiani elettrodometrici) le formule specifiche (piani polari nei suoli). Poiché l'intensità di c.c. si esprime con:

$$[4_1] \quad J = \varrho^{-1} \cdot \text{grad } E, \quad (= 2\pi\varrho^{-1}, S \cdot E),$$

$E$  potenziale elettrico,  $E(\infty) = 0$ ; la tensione geoelettrica  $V$  si scrive, indicando con  $\phi$  i potenziali tubolari,

$$[4_2] \quad V = S \cdot E \cdot (\phi_A - \phi_K)$$

dove:

$$[4_3] \quad \left\{ \begin{array}{l} \phi_K = (2l_K)^{-1} \cdot 1g \frac{\sqrt{x^2 + y^2 + (z+l_K)^2} + (z+l_K)}{\sqrt{x^2 + y^2 + (l_K-z)^2} - l_A - z} \\ \phi_A = (2l_A)^{-1} \cdot 1g \frac{\sqrt{(z+l_A)^2 + (x-d)^2 + y^2} + (z+l_K)}{\sqrt{(l_A-z)^2 + (x-d)^2 + y^2} - (l_A-z)} \end{array} \right.$$

$$[4_4] \quad S = (C_A + C_K - 2C)^{-1},$$

la resistenza ohmica

$$[4_5] \quad R = \rho(\phi_A - \phi_K) / 2\pi.$$

Così le geodepressioni idriche, sia la generica  $h$ , che l'anodica  $h_A$ , che la catodica  $h_K$ , saranno funzioni delle  $\phi$ , e precisamente:

$$[4_6] \quad h = \phi_K \left( h_{kt} - \beta SE \frac{K_i}{K} \right) + ES \frac{K_i}{K} (\phi_A - \beta \phi_K);$$

dove

$$t = C_K^{-1}; \beta = \frac{C}{C_K}; \left( \frac{K_i}{K} \right) = \text{coefficiente d'efficacia di Lomizé.}$$

$$[4_7] \quad h_A = \beta h_K + \frac{K_i}{K} \gamma E; \gamma < 1; \gamma = C_K^{-1} (C_A C_K - C^2) / (C_A + C_K - 2C)$$

Passando dalla coppia al bipiano elettrodo, le l.d.e. fluiranno normalmente a tali piani verticali, analoghe alle linee d'idroflusso migranti al catodo (a meno di piccoli scostamenti di traiettorie dovuti

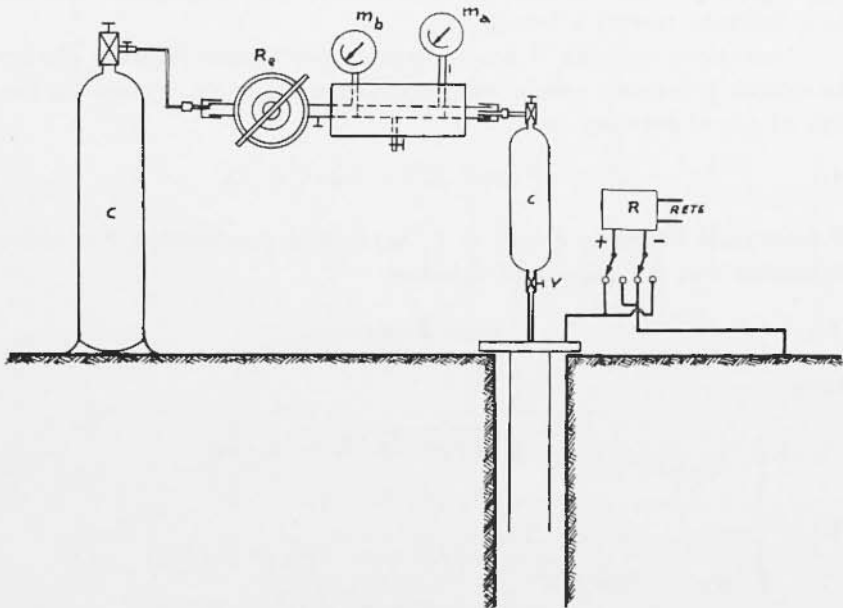


Fig. 4. - Anodo tubolare, con ausilio di compressore, in foro di sonda, manometri regolatori.

alle specifiche anisotropie) avviando, quel che conta, a geometriche disuniformità di comportamento elettrico.

Non ci soffermiamo, sulle variazioni di geo-resistenza  $R$  ohmica di tubi infissi al suolo, in funzione delle loro lunghezze  $l$ , diametri  $\phi_a$ ;  $R$  diminuendo con l'aumentare di  $l$ ; con il numero dei poli accostati (un po' meno se si considerano gli effetti mutui), crescendo invece con  $\phi_a$  (diametri): (v. Figg. 4<sub>1</sub> e 4<sub>2</sub>).

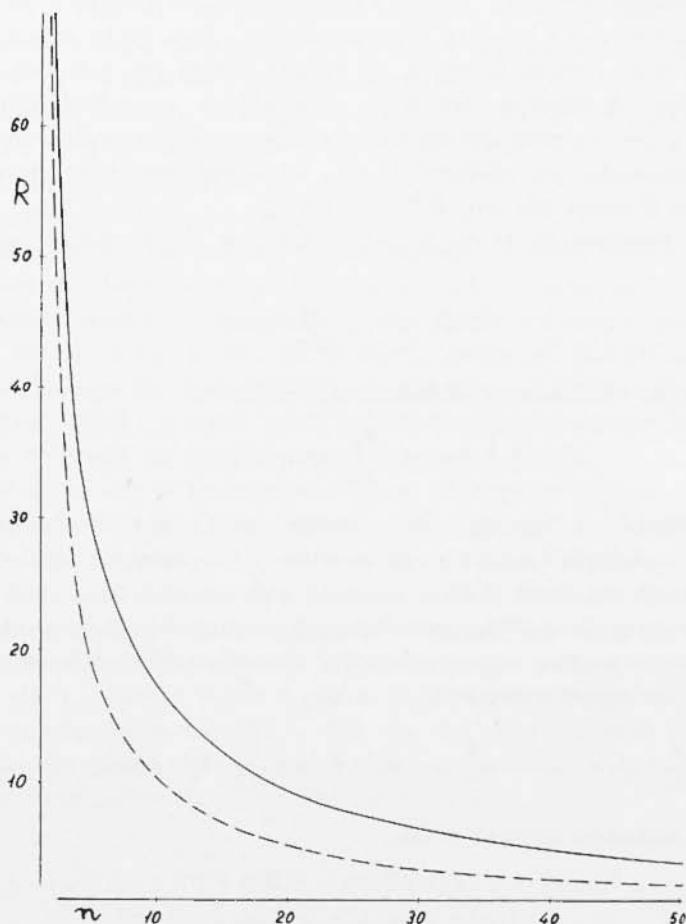


Fig. 4<sub>2</sub> - Diagrammi ( $R, n$ ). L'azione mutua  $R$  è data dalla linea continua; senza mutua, tratteggiata. Piano polare ( $R, n$ ).  $R$  resistenza (in Ohm);  $n$  numero elementi. Spaziatura  $< 1$ , (tra elettrodo e elettrodo omonomi, accostati: loro  $\Sigma =$  piano polare).

Resistenza ohmica  $R$  di  $n$  elementi "slim hole", in suolo omogeneo.

La Fig. 4<sub>3</sub> dà la resistenza ohmica  $(R, n)\%$ , con gli andamenti d'azione mutua o no, d'elementi tubolari, astiformi, verticali nel suolo. Vogliamo soffermarci brevemente sulle disuniformità di c.e., geobipolarità monodimensionali, simmetriche rispetto alla mezzaria. Con polarità macropuntiformi, lineari, pur sussistendo un c.e. minimo in mezzaria etero-polare (minore del c.e. critico), l'EGO cessa (non altrove; massimo presso gli elettrodi); tale *cedimento elettrico* implica quello di resistenza geomeccanica. Da qui l'esigenza intanto d'uniformità di c.e., raggiungibile con i predetti bipiani elettrici. Non basta emungere, in altri termini, l'acqua tellurica dai catodi lineari per auto-consolidare un terreno, si possono instaurare permeabilità apparenti diverse da punto a punto: in mezzaria addirittura impermeabilità, occlusione idrica, non avvenendo, per carenza di c.e., la sbucciatura elettronica delle molecole d'acqua per cui:  $H^2O \rightarrow (H^2O)^+$ .

Un semplice elettrodo cilindrico fornisce il suo potenziale come segue:

$$V(r) = - \frac{I_0}{2\pi} \lg r;$$

una coppia eteronoma (spaziatura  $d$ ), dà in  $P$ :

$$V_p = \frac{I_0}{2\pi} \lg (r_+/r_-),$$

e esplicitando i diametri dei tubolari  $(2r_+)$ ,  $(2r_-)$  — lo sviluppo dell'elettrodologia permette di modificare accentuate disuniformità geometriche dei flussi elettrici e fluidi: tali risultati sono stati recentemente integrati dall'impiego d'elementi conduttori a sbarra *geocircuitali* o pseudoelettrodici, opportunamente inseriti, per modificare disuniformità di densità elettrica — si ha:

$$r_+ = \frac{d}{2} + x, r_- = \frac{d}{2} - x, \Delta V = \frac{I_0}{2\pi} \lg (d-q_+) (d-q_-)/q_+q_-.$$

Causa simmetria inversa si ha:

$$V(-x) = -V(x); V(0) = 0; \lim V(x) = \pm \infty, \\ (\text{per } x = -d_+/2, x = -d_-/2)$$

I c.e.E risultano allora funzioni simmetriche a minimo in 0 (mezzaria), dati da:

$$[4_8] \quad E_{x,0} = 4 \Delta V/d \cdot \lg (d-q_+) (d-q_-)/q_+q_-;$$



quindi la  $\bar{x}$  per cui il e.c. può superare un prefissato minimo è dato da

$$\bar{x} = \frac{1}{2} \sqrt{d^2 - k/E_x}, \quad \bar{x} \leq |x| \leq Kd; \quad K = d \cdot E_{x,0}.$$

Con  $d^2 \leq K/E_x$ , il e.c. assume il valore d'effettiva limitazione. Sia  $E_x = 1V/cm$ ,  $d = 150$  cm,  $q_+ = q_- = 2$  cm; resistività  $\rho = 10^9 \Omega cm$ ,  $\Delta V = 150$  Volt.

Allora  $\bar{x} = \sim 55$  cm (spazio utilizzabile, il resto non attivo). Tutto ciò si modifica con dispositivo biplanare, anche se realizzato a  $\Sigma$  di elementi monodimensionali (permettenti regolazioni d'amperaggio, manovre di inserimenti e disinserimenti d'unità).

Ulteriori vantaggi si avranno, occorre ancora rilevare, soprattutto con l'uso di "sbarre interpolari", (su cui riferiremo a parte), apportando cioè uniformità geometriche ed elettriche, il tutto ripercuotendosi su quelle geomeccaniche, (altrimenti imperfette).

Là dove non si hanno "condensazioni" visibili, permanendo il collegamento elettrico tuttavia in ambiti sotto i valori di e.c. critici, l'elettrorisanamento si pronuncia in altre forme, riduzione dell'affinità idrica, scorrevolezza sabbie (e. Rénard), impermeabilizzazione, riduzione delle capacità di rigonfiamento e contrazione. Essenziale è tenere la "durata" EGE minore di quella (regolabile) di coagulazione iniettata, e ciò si controlla all'apparizione del legante al catodo.

S'è detto che le traiettorie o filetti di corrente d'acqua tellurica coincidono con la l.d.f. elettrica (deviatore di gravità, anisotropie a parte). Ogni elemento di volume terroso  $dV'$ , umido ( $\rho' \cdot dx \cdot dy \cdot dz$ ), espelle liquido al catodo per azione EGO, in scorrimento fluido combaciante con le traiettorie di forza elettrica. Se  $(pdV)$  è la quantità d'acqua espulsa, post-traiettoria  $l$ , l'emungimento comporta un lavoro:  $dL = \rho dV$ ; il lavoro totale è, per la deidratazione complessiva, dato dall'integrale triplo rispetto a  $(dx, dy, dz)$ . Con elettrodi bipiani si possono eguagliare le espressioni della percorrenza  $l$  in termini di "filetto idraulico" e di "corrente" (densità  $i$ ):

$$\begin{aligned} [4_0] \quad \int_B^A \left( \frac{dx}{dl} dx + \frac{dy}{dl} dy + \frac{dz}{dl} dz \right) &= \\ &= \int_B^A \left( \frac{i_x}{|i|} dx + \frac{i_y}{|i|} dy + \frac{i_z}{|i|} dz \right), \end{aligned}$$

per cui  $|L|$  risulta un prodotto d'integrale di linea e di volume. Chiamiamo  $L$  lavoro, piuttosto che energia, in quanto quest'ultima si considera da stati iniziali a finali, mentre  $L$  dipende dal modo in cui esso si è svolto (variando la modalità di essiccamento, s'altererà la traiettoria, il che porta a dissimmetrie nel lavoro prosciugante per uno stesso volume).

Quanto sopra è vero, ammessa la coincidenza delle linee di percorrenza elettriche e fluide, in parallelepipedi, cilindri con traiettorie assiali. Se tali linee non divergono eccessivamente (usando polarità diverse), il lavoro elementare è  $dL = \mu\varrho\lambda dV$ , con  $\mu$  costante del terreno,  $\lambda$  fattore di struttura o di forma. Ne segue §3) la proporzionalità del lavoro speso  $L = Kt^4$ , alla quarta potenza della dimensione lineare ( $K$  coefficiente di forma), minimo usando bipiani polari.

I "coefficienti di forma" si calcolano preliminarmente, caratterizzando configurazioni, forme e gli stessi volumi terrosi da prosciugare, esigendo però diversi consumi elettroenergetici (per un uguale emungimento idrico).

Questo è un neo-teorema del lavoro §1), che trova conferma sperimentale, con ripercussioni di *rendimento elettrodologico, massimo con i bipiani*.

Non si escludono naturalmente altri dispositivi elettrodici centrati, come ad es. un anodo centrale a catodi circolari (che qui ora vedremo), anch'essi a minor consumo energetico.

Al pregio pertanto d'omogeneità d'elettroazioni con idonee polarità, s'aggiunge quello del *rendimento tecnico-economico ben maggiore*, a cui s'accompagna.

Le ripercussioni degli accennati sviluppi elettrodometrici, non si limitano perciò alle fondamentali definizioni dei campi elettrici da produrre in modo efficiente, invadono altri settori, non meno importanti, del *rendimento tecnico-economico dei vari dispositivi*, ed è quanto abbiamo dimostrato.

Con polarità miste (mono-bidimensionali, a struttura e morfologie diverse) necessita prefigurare la distribuzione dei c.e., le zone attive e no, escludendo quest'ultime, o, conoscendone l'esistenza, evitarle.

La "scelta elettrodica" dipende dal problema che si affronta. Tuttavia soluzioni ottimali di massima rimangono, come la bidimensionale, quelle comportanti c.e. uniformi geometricamente e in valore assoluto.

A fine di mostrare come con polarità monodimensionali — a morfologia varia — si possono risolvere problemi EGO geomeccanici, senza incorrere in pseudosoluzioni, esponiamo un nostro procedimento per conseguire *elettroancoraggi*, localizzati a profondità volute, in prosecu-

zione di tubolari anodici, simili a i bulbi cementanti di routine piezo-iniettivi; dagli ancoraggi è poi agevole risalire a *palificazioni* per ascensum, o a *piattaforme* con elettroazioni a polarità livellate in profondità subanodiche [v. § 3), § 4), § 5)].

Passiamo a considerare un sistema polare monodimensionale misto, atto ad elettroazioni omogenee. E cioè un catodo circolare orizzontale, anodo assiale verticale, infisso al suolo: dispositivo generico di localizzazione di nuclei (di consolidamento, deumidificazione, plastizzazione) subanodici, in ambiti ristretti (a profondità volute), lasciando indenni i terreni limitrofi (v. § 5).

Conservando le notazioni precedenti [v. § 1), § 2)], le formule ricavate per una singola coppia, le trascriveremo esplicitando i termini capacitivi, per cui il potenziale elettrico e la c.e. risultano:

$$[4_{10}] \quad V = (\phi_A - \phi_K) E / (C_A + C_K - 2C);$$

$$\text{c. tellurica} \quad J = 2\pi E / \rho (C_A + C_K - 2C).$$

L'abbassamento generico di pressione interpolare:

$$[4_{11}] \quad h = \frac{h_K}{C_K} \phi_K + \frac{K_e}{K} \frac{E}{C_A + C_K - 2C} \left( \phi_A - \frac{C}{C_K} \phi_K \right);$$

$$\text{all'anodo:} \quad h_A = \frac{C}{C_K} h_K + \frac{K_e}{K} E \cdot \frac{C_A C_K - C^2}{(C_A + C_K - 2C)} C_K;$$

$$t = \frac{1}{C_K}; \quad \beta = \frac{C}{C_K}; \quad S = (C_A + C_K - 2C)^{-1};$$

$$\gamma = \frac{1}{C_K} \cdot (C_A C_K - C^2) / (C_A C_K - 2C), \quad (\leq 1).$$

$h_A$ ,  $h_A$  (prosciugamento all'anodo) raggiunge il massimo per  $\gamma = 1$ , ciò avviene quando  $C_A$ , tenendo limitati  $C_K$  e  $C$ , tende all'infinito. Il che significa che sembra conveniente ridurre al massimo la capacità ( $1/C_A$ ), assumere cioè un anodo molto sottile.

Bisogna tener presente che in questo caso  $S$  diventa molto piccola, di conseguenza la corrente debole e lungo il *tempo d'equilibrio*: questo particolare tempo caratteristico ( $\tau_{eq}$ ) verrà illustrato in seguito, in genere supera il "tempo di consolidamento" ben noto. Occorre tener conto di entrambi tali tempi caratteristici per "riconsegnare" un geo-equilibrio d'alto grado al terreno elettrottrattato.

D'altronde ciò che interessa maggiormente non è solo prosciugare le immediate adiacenze all'anodo, non basta considerare  $h_A$ , deve prevalere l' $h$  generico. Nell'espressione di  $h$ , che decide effetti essiccanti spaziali,  $\phi_A$  e  $\phi_K$  entrano a far parte solo attraverso  $t$ ,  $S$ ,  $\beta$  (indipendenti supponiamo dai loro diametri, del resto, non troppo variabili);  $t$  capacità catodica,  $S$  capacità mutua. Per aver quindi forti prosciugamenti in tutta la zona, conviene usare tubolari non sottili, e distinguere: se si lavora in condizioni in cui  $h_K > \frac{K_c}{K} E$ , (idraulicità), è importante l'uso di catodi a grosso diametro; altrimenti, sia i catodi che gli anodi, avranno uguale influenza (un prosciugamento proporzionale all'intensità di corrente). Nell'espressione di  $h$  generica, appaiono in più le  $\phi_A, \phi_K$ , non presenti in  $h_A$ , i potenziali cioè di cariche unitarie distribuite sull'anodo e sul catodo; allora  $\phi_A$  prevale nella zona anodica,  $\phi_K$  nella catodica. Quindi, ammesso che  $h_K = \frac{K_c}{K} E$ , siano dello stesso ordine di grandezza, l'effetto EGO predomina presso l'anodo, quello idraulico presso il catodo. Se  $h_K \gg \frac{K_c}{K} E$ , l'effetto Darcy prevale ovunque, e la *struttura dell'anodo ha poca influenza*. Predominando invece l'EGO, la *struttura dei catodi non è del tutto indifferente*; si fa sentire principalmente attraverso il coefficiente  $S$ . Ma anche operando a corrente costante (che annulla l'effetto di  $S$ , essendo anche  $J$  proporzionale a  $S$ ), la struttura del catodo si risente ancora se  $\beta\phi_K$  è confrontabile con  $\phi_A$ , il che comporta  $J$  cost,  $b_K \ll \frac{K_c}{K} E$ , allontanando il catodo dalla zona di prosciugamento.

Queste sono norme di *operatività, di scelte di strutture elettrodiche*, a seconda i *geotipici, se a facies idraulica, o a facies elettrocinetica*.

Ciò premesso, trasferiamo questi risultati nell'esame del neodispositivo, a cominciare da  $\phi_A, \phi_K$ . Il cerchio catodico, collocato in superficie, abbia il raggio  $R$ , l'anodo verticale  $l$ , un'estremità del centro del cerchio, ( $d_K, d_A$  raggi rispettivi). Il reperto cilindrico abbia  $z$  per asse anodico,  $r$  indichi la distanza da esso d'un generico punto.

Al difficile calcolo esatto, sostituiremo una buona approssimazione, supponendo gli elettrodi sufficientemente distanziati, in modo da non disturbarsi a vicenda.

La  $\phi_A$  rappresenta il potenziale di un conduttore sottile, tubolare, lunghezza  $2l$ , tenuto conto dell'immagine speculare, parallelo a  $z$ ,

centro in 0 (origine del reperto):

$$[4_{12}] \quad \phi_A = (2l)^{-1} \lg \frac{z + l + \sqrt{(z + l)^2 + r^2}}{z - l + \sqrt{(z - l)^2 + r^2}}$$

Il potenziale del cerchio di carica unitaria:

$$[4_{13}] \quad \phi_K = \frac{2}{\pi} [(R + r)^2 + z^2]^{-1/2} \cdot K \left( 2 \sqrt{\frac{Rr}{z^2 + (R + r)^2}} \right),$$

$K(x)$  integrale ellittico di 1<sup>a</sup> specie (tabellato).

Passando al calcolo dei coefficienti  $C_K$ ,  $C_A$ ,  $C$  si ha:

$$[4_{14}] \quad C_A = l^{-1} \lg \frac{4l}{e \cdot a_A},$$

( $e = \text{cost. di Eulero}^{(2)}$ ),

$$[4_{15}] \quad C = l^{-1} \lg \frac{l + \sqrt{l^2 + R^2}}{R},$$

si calcola come il potenziale dell'anodo sul catodo, valore che assume  $\phi_A$ , per  $z = 0$ ,  $r = R$ ;

$$[4_{16}] \quad C_K = \frac{1}{\pi R} \lg \left( \frac{8R}{d_K} \right)$$

$\phi_K$  è il valore che assume in superficie catodica, ove l'argomento della  $K$  è molto vicino all'unità,  $K(x) \sim \lg(4/\sqrt{1-x^2})$ .

L'argomento della funzione ellittica  $K(x)$  è subito ricavabile: per  $r \sim R$ ,  $z \rightarrow 0$  (spessore minimo), ( $1 - x^2 = d_K^2/4R^2$ ), i diametri entrano solo in  $C_A$  e  $C_K$ , non in altri coefficienti, tutti così esattamente calcolati.

Tutto ciò permette di risalire alle  $h$  e alle  $h_K$  cost. (*linee di livello pericatodiche*).

Particolarmente semplici le espressioni per  $r = 0$ ,  $z > l$  riferentesi all'*ancoraggio elettrico* profondo, subanodico  $z > l$ , che si riducono a:

$$[4_{17}] \quad \phi_A = l^{-1} \cdot \lg [(z + l)/(z - l)]; \quad \phi_K = (R^2 + z^2)^{-1/2},$$

da cui si possono ricavare le  $h$ , a diverse profondità sotto l'anodo, nonché le altre grandezze EGO pertinenti:

$$[4_{18}] \quad J = SE \cdot 2\pi/\rho; \quad V = SE \cdot [l^{-1} \lg (z + l) / (z - l) - (R^2 + z^2)^{-1/2}]$$

$$[4_{10}] \quad S = [t^{-1} \lg 4l/c \cdot d_A + \frac{1}{\pi R} \lg SR/d_K - \frac{2}{l} \lg (\sqrt{z^2 + R^2} + R)/R]^{-1}$$

L'elettropolazione subanodica esaminata è a vaste ripercussioni applicative; dall'ancoraggio si può procedere, con l'EUGE consolidante, a strutturazioni iniettive nel terreno colonnari, oppure a piattaforme, procedendo dal basso verso l'alto, fino alla superficie del suolo, o dal basso lateralmente ad isoquote.

§ 5) - Nelle Figg. 5<sub>1</sub>, 5'<sub>1</sub>, 5<sub>2</sub>, appaiono neodispositivi polari per elettroancoraggi, puntelli sotto l'estremità anodica tubolare infissa al suolo; morfologia e volume del blocco d'indurimento (Fig. 5'<sub>1</sub>); la "pressa elettromotica" potendo realizzare "orditure diverse di consolidamento", con sfnestature (additive) lungo le generatrici delle tubazioni (consolidamenti verticali e orizzontali, dai plinti alle platee basali portanti). Con elettroiniezioni subanodiche (ad es. monosili-silicatico-cloruro di Ca), Fig. 5<sub>1</sub>, si può procedere, s'è detto, dal basso verso l'alto, estraendo man mano il tubo anodico (ad elementi avvitati), postgittata cementizia; oppure spostandosi lateralmente, infine mettendo in parallelo più elementi polari per realizzare *paratie, diaframmi*.

In Fig. 5<sub>2</sub> il neodispositivo, oggetto del paragrafo, è ad elettroazioni precedenti invece dall'alto verso il basso. Sia in [5<sub>1</sub>], che in [5<sub>2</sub>] si evita la dispersività elettrica spaziale, ben nota nei geobipoli, comportante consumi proibitivi (un'efficace progettazione polare richiede, come si vede, tutta una serie di condizionamenti). Dispositivi qui misti, elettrodi di superficie, di profondità, dall'anodo assiale all'anodo di simmetria di superficie (v. Figg. 5<sub>1</sub>, 5<sub>2</sub>), che permettono d'interessare volumi di terreno geometricamente ben delimitati e distinti. Le polarità, sia in Fig. 5<sub>1</sub> che in Fig. 5<sub>2</sub>, sono commutabili; e le nostre teorie le contemplano; per la Fig. 5<sub>1</sub> vedi paragrafo 4.

Si considera un parallelepipedo terroso aperto, indefinito, delimitato dai piani ( $\pm a/2$ ),  $y = 0$ ,  $y = b$  (polari), coppia di piastre che formano i 2 lati del parallelepipedo (oggetto del § 5).

Il conduttore filiforme orizzontale, disteso sulla superficie ( $xz$ ) del suolo (Fig. 5<sub>3</sub>) (leggermente interrato) lungo  $z$ , diametro  $d$ , rientra nel geocircuito con polarità simmetriche, verticali, piastriformi, parallele al filo (geotripolarità mista). Le coordinate lungo  $x$  delle piastre siano:  $x = \pm a/2$ , e l'infissione diparte da  $y = 0$ , a  $y = b$ , quindi una simmetria volumetrica.

Diamo risultati valevoli per unità di lunghezza dei poli, lungo  $z$ , la teoria potendosi applicare a porzioni finite di suolo, moltiplicando le

DISPOSITIVI SIMMETRICI ELETTRODICI MISTI.

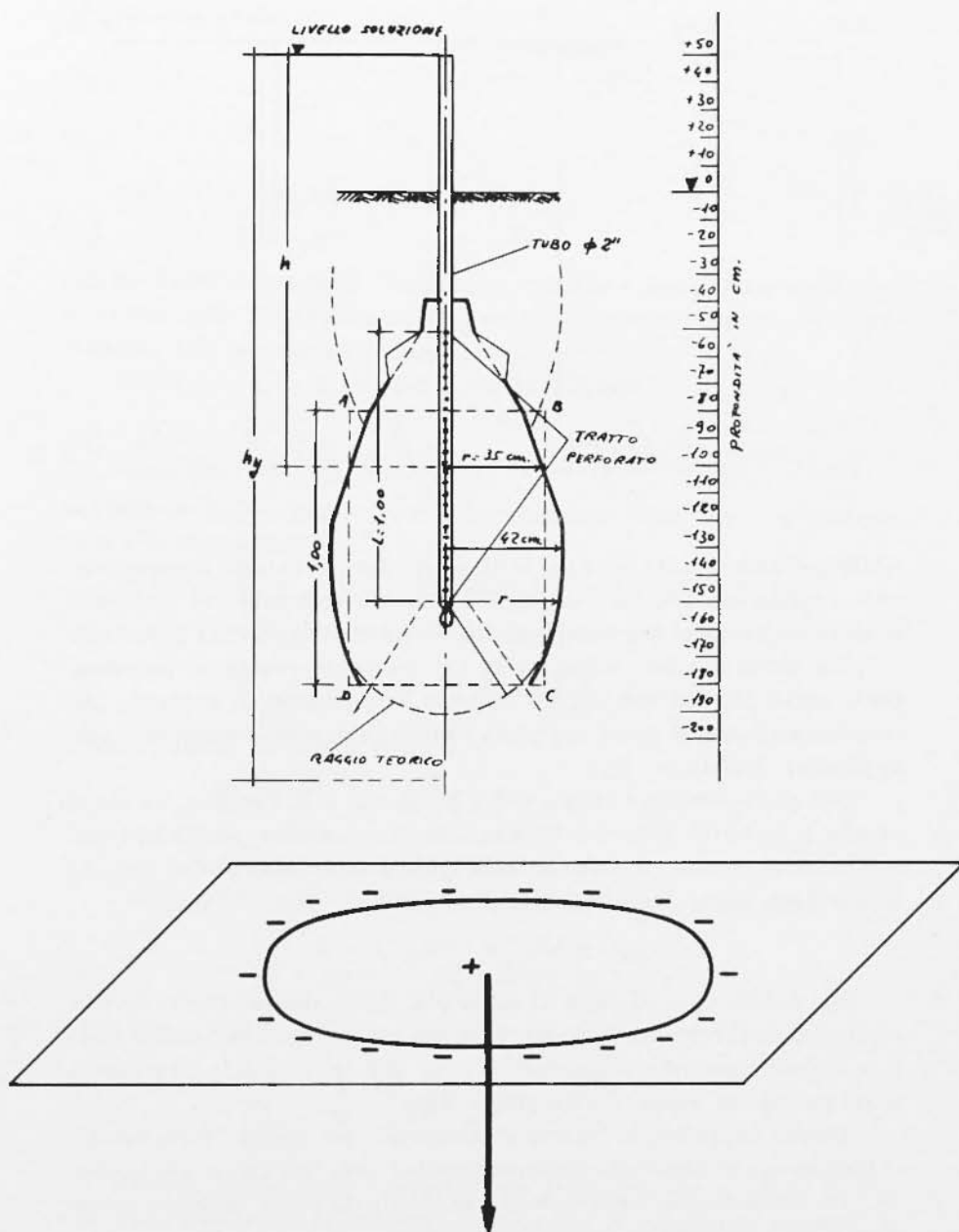


Fig. 5. - Anodo assiale. Bulbo di consolidamento elettrosilicatico perianodico-terminale; (ancoraggio elettrico, v. § 4). L'elettro-ancoraggio è a nucleo allungato, conseguito con anodo terminale bucherellato o perforato.



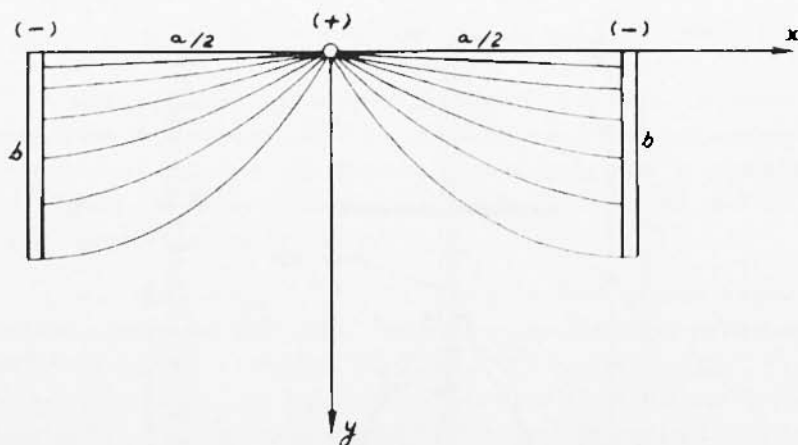


Fig. 5<sub>2</sub> - Anodo centrale esteso in superficie. Massimo rendimento.

relative grandezze intensive per le dimensioni reali (l'anodo lineare, centrale, orizzontale, piuttosto esteso, l'affiancamento bicatodico realizzato a piani equivalenti per complanarità di tubolari (-) sottili accostati).

La commutazione polare della c.c. (corrente continua) immessa, porta anodi laterali con catodo centrale in superficie. È evidente che così commutando si potrà applicare l'EGE; in precommutazione è solo applicabile l'EGO.

Nel piano verticale  $(x, y)$ , "0" è la traccia di  $z$ , l'origine, su cui si adagia la polarità filiforme di mezzaria. La porzione parallelepipedica indefinita di terreno, a striscia rettangolare superficiale, offre (Fig. 5<sub>2</sub>) una sezione retta, delimitata dai piani in:

$$x = \pm b/2, \quad y = 0, \quad y = b.$$

Nei calcoli ci si riferisce al solito alla figura doppia che si ottiene completando il rettangolo mediante la sua immagine, riflettendolo sulla  $y = 0$ , delimitazione rettangolare  $x = \pm a/2, y = \pm b/2$ ; il problema si riduce ad un piano, indipendente da  $z$ .

Diamo dapprima la "teoria stazionaria", poi quella "transitoria", ci limiteremo all'elettrodo filiforme anodico (più facilmente risolvibile).

La stazionarietà, contempla il calcolo di un'unica funzione armonica  $\varphi$ , che soddisfa le seguenti condizioni:

$$[5_1] \quad \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = 0;$$

al contorno di ha:

$$[5_{2a}] \quad \frac{\partial \sigma}{\partial y} = 0, \text{ per } y = \pm b;$$

$$[5_{2\beta}] \quad \varphi = 0, \text{ per } x = \pm a/2$$

All'origine una singolarità per la  $\varphi$ :

$$[5_3] \quad \varphi = -\lg r;$$

siffatta funzione  $\varphi$  si può determinare partendo dalla teoria delle funzioni ellittiche. Noi seguiremo una via più elementare, derivando direttamente due espressioni della  $\varphi$ .

Posto  $z = x + iy$ , si osservi che la funzione:

$$[5_4] \quad \varphi_a = -\lg \left| 2 \operatorname{sh} \frac{z\pi}{2b} \right| = -\frac{1}{2} \log 2 \left( \operatorname{ch} \frac{\pi x}{b} - \cos \frac{\pi y}{b} \right),$$

soddisfa la [5<sub>1</sub>] — parte reale d'una funzione analitica — e soddisfa altresì le [5<sub>2a</sub>] e [5<sub>3</sub>].

Inoltre la  $\varphi_a$  si può sviluppare in serie, avendosi, per  $x > 0$ :

$$\begin{aligned} \varphi_a &= -R_e [\lg \exp (\pi x/2b) + \lg [1 - \exp (-\pi x/2b)]] = \\ &= -\pi x/2b + R_e \sum_{n=1}^{\infty} n^{-1} \cdot l \end{aligned}$$

o considerando la parità della  $\varphi_a$ :

$$[5_5] \quad \varphi_a = -\frac{\pi}{2b} |x| + \sum_{n=1}^{\infty} n^{-1} e^{-|x|n\pi/b} \cdot \cos \frac{n\pi}{b} y.$$

Sviluppando la  $(\varphi - \varphi_a)$  in serie di  $\cos \left( y n \frac{\pi}{b} \right)$ , si ha pure:

$$[5_6] \quad (\varphi - \varphi_a) = \frac{1}{2} \psi_0 + \sum \psi_n \cos \frac{n\pi}{b} y,$$

con

$$[5'_6] \quad \psi_n = \frac{1}{2b} \cdot \int_{-b}^{+b} (\varphi - \varphi_a) \cos \left( \frac{n\pi}{b} y \right) dy.$$

Essendo anche la  $(\varphi - \varphi_a)$  funzione armonica che soddisfa la [5<sub>1</sub>] e la [5<sub>2a</sub>], condizioni al contorno, risulta che le  $\psi_n$  devono rispondere alle equazioni:

$$[5_7] \quad \frac{d^2 \psi_n}{dx^2} - \frac{n^2 \pi^2}{b^2} \psi_n = 0,$$

risultare continue con la derivata prima — singolarità già inclusa nella  $\varphi_a$  — e in virtù della [5<sub>3</sub>], obbedire alle condizioni ai limiti:

$$[5'_7] \quad \psi_0 (\pm a/2) = \pi a/2b; \quad \psi_n (\pm a/2) = -\frac{1}{n} l^{-n\pi a/2b}, \quad n \geq 1.$$

La soluzione del sistema [5<sub>7</sub>], [5'\_7], è data da:

$$[5_8] \quad \psi_n = \pi a/2b; \quad \psi_n = -\frac{2}{n} (1 + e^{n\pi b/a})^{-1} \cdot \operatorname{ch} n(\pi x/b).$$

Mediante la [5<sub>8</sub>], si ottiene per la  $\varphi$ :

$$[5_9] \quad \varphi = \varphi_a + \frac{\pi a}{4b} - 2 \sum_{n=1}^{\infty} n^{-1} (e^{n\pi a/b} + 1)^{-1} \cdot \operatorname{ch} n\pi \frac{x}{b} \cos ny \frac{\pi}{b},$$

dove la  $\varphi_a$  è data dalla [5<sub>4</sub>].

Sostituendo la [5<sub>3</sub>] per  $\varphi_a$  nella [5<sub>9</sub>] si ottiene alternativamente:

$$[5'_9] \quad \varphi = \frac{\pi}{2b} \left( \frac{a}{2} - |x| \right) + \sum_{n=1}^{\infty} n^{-1} (\operatorname{ch} n\pi a/2b)^{-1} \operatorname{sh} \frac{n\pi}{b} \left( \frac{a}{2} - |x| \right) \cos \frac{n\pi y}{b}$$

Per ragioni di convergenza è da preferirsi la [5<sub>9</sub>], salvo per valori di  $x$  vicini ai bordi ( $\pm a/2$ ): il problema è risolto.

Altra espressione di  $\varphi$  si può ottenere partendo invece dalla:

$$[5_{10}] \quad \varphi_\beta = \operatorname{lg} \left| \operatorname{ctg} \frac{\pi z}{2a} \right| = \frac{1}{2} \operatorname{Lg} \frac{\operatorname{ch} \frac{\pi y}{a} + \cos \frac{\pi x}{a}}{\operatorname{ch} \frac{\pi y}{a} - \cos \frac{\pi x}{a}},$$

che soddisfa alle [5<sub>1</sub>], [5<sub>2</sub>β], [5<sub>3</sub>].

Per questa  $\varphi_\beta$ , si ricava uno sviluppo analogo, dato che, per  $y > 0$

$$\varphi_\beta = R_e \operatorname{lg} \left[ (1 + e^{i\pi z/a}) / (1 - e^{i\pi z/a}) \right] = 2 R_e \sum_{n=0}^{\infty} (2n+1)^{-1} \cdot e^{i(2n+1)\pi z/a}$$

oppure:

$$[5_{11}] \quad \varphi_\beta = 2 \sum_{n=0}^{\infty} (2n+1)^{-1} e^{-(2n+1)\frac{\pi}{a}|y|} \cdot \cos (2n+1) \pi \frac{x}{a}.$$

Sviluppando la  $(\varphi - \varphi_\beta)$  in serie di  $\cos (2n+1) \pi \frac{x}{a}$  e procedendo in maniera analoga come sopra, si perviene a due espressioni simili

alle  $[\delta_9]$ ,  $[\delta'_9]$  date dalle:

$$[\delta_{12}] \quad \varphi = \varphi_\beta + 4 \sum_{n=0}^{\infty} (2n+1)^{-1} [e^{2(2n+1)\pi b/a} - 1]^{-1} \\ \operatorname{ch}(2n+1) \frac{y}{a} \cos (2n+1) \pi \frac{x}{a},$$

il  $\cos \varphi_\beta$  è dato dalla  $[\delta_{10}]$ ,  
o, alternativamente:

$$[\delta'_{12}] \quad \varphi = 2 \sum_{n=0}^{\infty} (2n+1)^{-1} \left[ \operatorname{sh} (2n+1) \pi \frac{b}{a} \right]^{-1} \operatorname{ch} (2n+1) \frac{\pi}{a} \\ \cdot (b - |y|) \cos (2n+1) \frac{\pi}{a} x.$$

Anche qui la  $[\delta_{12}]$  è da preferirsi alla  $[\delta'_{12}]$ , eccezion fatta per la vicinanza ai bordi  $y = \pm b$ .

Le  $[\delta_9]$ ,  $[\delta'_9]$ ,  $[\delta_{12}]$ ,  $[\delta'_{12}]$ , sono tutte convergenti, adatte per il calcolo numerico della  $\varphi$ . Nel loro uso, in questi calcoli, è da tener conto dei seguenti principi: 1) in zone lontane dai bordi, convergono meglio le  $[\delta_9]$ ,  $[\delta_{12}]$ ; 2) presso i bordi  $x = \pm \frac{a}{2}$  convergono meglio le  $[\delta_{12}]$  e  $[\delta'_{12}]$ ; presso i bordi  $y = \pm b$ , le  $[\delta_9]$ ,  $[\delta'_9]$ ; 3) se  $a > b$  convergono meglio le  $[\delta_9]$  e  $[\delta'_9]$ ; se  $b > a$  le  $[\delta_{12}]$  e  $[\delta'_{12}]$ .

Osserviamo ancora la  $\varphi$  nelle immediate vicinanze dell'origine; posto  $r^2 = x^2 + y^2$ ,  $f(r)$  sia un valore approssimato di  $\varphi$ , a meno di grandezze che tendono a 0, con  $r \rightarrow 0$ ; si hanno dalle  $[\delta_9]$ ,  $[\delta_{12}]$ , le due espressioni per  $f(r)$ :

$$[\delta_{13}] \quad f(r) = \lg \frac{b}{\pi r} + \frac{\pi a}{4b} - 2 \sum_{n=1}^{\infty} n^{-1} (e^{n\pi a/b} - 1)$$

$$[\delta'_{13}] \quad f(r) = \lg \frac{2a}{\pi r} + 4 \sum_{n=0}^{\infty} (2n+1)^{-1} [e^{2(2n+1)\pi b/a} - 1]^{-1}.$$

La scelta tra  $[\delta_{13}]$ ,  $[\delta'_{13}]$  è di nuovo condizionata da  $b/a$ .

*Cio premesso passiamo al nostro problema stazionario.*

Al solito indichiamo con  $V(x, y)$  il potenziale,  $E$  la tensione alimentatrice,  $J$  la c.e.,  $\rho$  la resistività del terreno; normalizzando il c.e., con  $V = 0$  al catodo,  $V = E$  all'anodo. Il raggio dell'elettrodo filiforme centrale sia "molto piccolo" rispetto alle dimensioni  $a$  e  $b$ , in maniera che si possa, sopra  $r = d$ , identificare la  $\varphi$  con  $f(r)$ , determinata dalle  $[\delta_{13}]$ ,  $[\delta'_{13}]$ .

Il potenziale  $V$  deve soddisfare le [5<sub>1</sub>], [5<sub>2</sub>], avere una singolarità del tipo log all'origine; in più  $V = 0$ , per  $x = \pm a/2$ ,  $V = E$  per  $r = d$  (elettrodo centrale anodico);  $V = E$  per  $x = \pm a/2$ ;  $V = 0$ , per  $r = 0$  (se tale polarità funziona da catodo).

Confrontando queste condizioni con la [5<sub>2a</sub>], e tenendo presente che per  $r = d$ , si ha  $\varphi = f(d)$ , si perviene alle seguenti espressioni di  $V$ :

$$[5_{14}] \quad V = E \frac{1}{f(d)} \varphi(x, y),$$

(con anodo centrale orizzontale),

mentre:

$$[5'_{14}] \quad V = E \left[ 1 - \frac{1}{f(d)} \varphi(xy) \right],$$

(con catodo centrale orizzontale).

L'intensità di corrente  $J$  si ha moltiplicando per  $\pi/\rho$  il coefficiente del log, quindi:

$$[5_{15}] \quad J = \pi E / \rho f(d).$$

L'apparire di  $\pi$  in luogo di  $2\pi$ , è legato alla circostanza che, come posto, metà della corrente è fittizia, poichè riguarda l'immagine riflessa sulla superficie orizzontale del suolo.

Le georesistenza ohmica (per unità di lunghezza, in direzione  $z$ ), è  $\rho f(d)/\pi$ .

L'effetto idromigratorio EGO:  $H_0$  sia la pressione iniziale nel suolo,  $H(xy)$  pressione di regime in un punto generico, nella stazionarietà,  $H_0$  (supposta costante), pressione al catodo;  $h$ ,  $h_K$  relativi prosciugamenti ( $H_0 - H$ ), ( $H_0 - H_0$ );  $h$  si calcola nella stazionarietà, fase di regime, nota la distribuzione  $V$ . Infatti la condizione d'assenza di idroflusso (suolo) esterno, anodo al centro, comporta:

$$[5_{16}] \quad h - \frac{k_c}{k} V = \text{cost.},$$

e considerando che sul catodo  $h = h_K$ , e convenzionalmente  $V = 0$ , la [5<sub>16</sub>] si trasforma in:

$$[5'_{16}] \quad h = h_K + \frac{k_c}{k} V,$$

formula spesso incontrata (2,3,4).

In virtù delle [5<sub>14</sub>], [5'<sub>14</sub>], la [5'<sub>16</sub>] diventa:

$$[5'_{17}] \quad h = h_K + \frac{K_e}{K} \frac{E}{f(d)} \varphi(x, y),$$

(con cavo centrale anodico),

$$[5'_{17}] \quad h = h_K + \frac{K_e}{K} E \left( 1 - \frac{\varphi(x, y)}{f(d)} \right),$$

(con cavo centrale catodico).

In ambo i casi il grado di prosciugamento varia da un minimo catodico al massimo anodico, dato dalla:

$$[5'_{18}] \quad h_A = h_K + \frac{K_e}{K} E.$$

Possiamo ora ricavare l'andamento di  $h$  durante il processo di prosciugamento (anodo in superficie, in mezzaria).

Per  $t = 0$ ,  $H$  e  $h$  assumono i valori  $H_0$  e  $h_0$ : si tratta ora di determinare, nel campo  $-\frac{a}{2} \geq x \geq \frac{a}{2}$ ,

$$-b \geq y \geq +b, \quad 0 \geq t \geq \infty,$$

una funzione continua, insieme con le sue derivate, a meno d'una singolarità log all'origine, soddisfacente all'equazione:

$$[5'_{19}] \quad \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = C \frac{\partial h}{\partial t}; \quad \text{condizioni iniziali}$$

$$[5'_{20}] \quad h = 0, \quad \text{per } t = 0; \quad \text{ai limiti.}$$

$$[5'_{21\alpha}] \quad \frac{\partial h}{\partial y} = 0, \quad \text{per } h = \pm b$$

$$[5'_{21\beta}] \quad h = h_K, \quad \text{per } x = \pm a/2.$$

Non dovendosi pronunciare alcun flusso d'acqua all'anodo, la funzione

$$\left[ h - \frac{K_e}{K} E \varphi/f(d) \right], \quad \left( h \pm \frac{K_e}{K} V \right),$$

deve risultare regolare all'origine; singolarità "log" che, in virtù della [5<sub>3</sub>] risulta del tipo:

$$[5'_{22}] \quad h = \pm h_0 \lg r; \quad \text{per } r = 0,$$

avendo posto

$$[523] \quad h_\varepsilon = \frac{K}{K_\varepsilon} E/f(d).$$

Prima di procedere dobbiamo dimostrare il seguente lemma; sia  $F(xy)$  una funzione regolare in qualche rettangolo  $-a \leq x \leq a$ ,  $-\beta \leq y \leq \beta$ , salvo l'origine, dove ha la forma:

$$F(xy) = A \lg r + f(xy); \quad (A = \text{cost}; f, \frac{\partial f}{\partial x} \text{ integrabili}).$$

Posto:  $g(x) = \int_{-\beta}^{+\beta} \psi(y) F(xy) dy$ ;  $\psi(y)$  continua,  $g(x)$  risulta pure tale,

insieme alla sua derivata, salvo in  $x = 0$ , dove ha un salto:

$$g'(+\theta) - g'(-\theta) = 2\pi A \psi(0).$$

Le proprietà di continuità, eccezion fatta per l'ultima relazione, conseguono da noti teoremi di analisi; al fine di dimostrare questa relazione notiamo:

$$g'(\varepsilon) \pm g'(-\varepsilon) = \int_{-\beta}^{+\beta} \psi(y) \left[ \left( \frac{\partial F}{\partial x} \right)_{x=\varepsilon} \pm \left( \frac{\partial F}{\partial x} \right)_{x=-\varepsilon} \right] dy =$$

$$2A \int_{-\beta}^{+\beta} \psi(y) \frac{\varepsilon}{y^2 + \varepsilon^2} dy + \theta(\varepsilon) = 2A \int_{-\beta/2}^{+\beta/2} \psi(\varepsilon Z) \frac{dZ}{1+Z^2} + \theta(\varepsilon);$$

$$\theta(\varepsilon) \rightarrow 0, \quad \varepsilon \rightarrow 0.$$

Il 1° termine tende a  $2A\psi(0) \int_{-\infty}^{+\infty} dz(1+z^2)^{-1}$ , con  $\varepsilon \rightarrow 0$ ; cioè a  $2\pi A\psi(0)$ ,

il che dimostra il lemma.

Per una funzione  $F$  pari di  $x$ , questa relazione diventa:

$$[524] \quad g'(+\theta) = g'(-\theta) = \pi A \psi(0)$$

Ritornando al nostro problema, ci limiteremo alle  $x > 0$ , essendo  $h$  una funzione pari di  $x$ . Sviluppiamo la  $h$  in serie di  $\cos n\pi y/b$ , ponendo:

$$[525] \quad h = \frac{1}{2} h_0 + \sum_{n=1}^{\infty} h_n \cos n\pi y/b;$$



$$[526] \quad h_n = b^{-1} \int_{-b}^{+b} h \cos(ny\pi/b) dy.$$

Moltiplicando la [519] per  $\cos(n\pi y/b)$ , integrando tra  $-b$ ,  $+b$ , e tenendo conto della [521a], si perviene per  $h_n$  all'equazione differenziale (con  $C$  coefficiente di consolidamento):

$$[527] \quad \frac{\partial^2 h_n}{\partial x^2} - \frac{n^2 \pi^2}{b^2} h_n = C \frac{\partial h_n}{\partial t},$$

a cui si aggiungono la condizione iniziale [520] che dà:

$$[528] \quad h_n = 0 \text{ per } t = 0;$$

quella catodica [521 $\beta$ ] che dà:

$$[529] \quad h_n = 2h_K, \quad h_n = 0, \quad n \geq 1, \quad \text{per } x = a/2;$$

la condizione per  $x = 0$ , che si ottiene dalla [522] applicando il nostro lemma con  $F = h$ , cioè:  $\mathcal{A} = -h_c$ ,  $\psi = b^{-1} \cos(n\pi y/b)$ , che dà:

$$[530] \quad \frac{\partial h_n}{\partial x} = -\frac{\pi}{b} h_c, \quad \text{per } x = 0.$$

Per risalire alla  $h_n$ , applichiamo la trasformata di Laplace alla [527], tenendo conto della [528] e cioè:

$$[531] \quad \frac{d^2 \bar{h}_n}{dx^2} - \left( cs + \frac{n^2 \pi^2}{b^2} \right) \bar{h}_n = 0,$$

a cui si aggiungono le condizioni ai limiti ottenute dalla trasformazione delle [529], [530], date dalle:

$$[532] \quad \bar{h}_n = \frac{2}{s} h_K, \quad \bar{h}_n = 0, \quad n \geq 1 \quad \text{per } x = \frac{a}{2};$$

$$[533] \quad \frac{d\bar{h}_n}{dx} = -\frac{\sigma}{bs} h_c, \quad \text{per } x = 0.$$

Il sistema [531] — [533], si risolve immediatamente. Posto per brevità:

$$\sigma_n^2 = cs + n^2 \pi^2 / b^2,$$

si ha:

$$[534] \quad \bar{h}_n = \frac{\pi h_c}{b} \frac{1}{s} \frac{\text{sh} \sigma_n \left( \frac{a}{2} - x \right)}{\sigma_n \text{ch} \sigma_n a/2}, \quad (n \geq 1)$$

$$[5_{25}] \quad \bar{h}_0 = \frac{\pi h_c}{b} \frac{1}{s} \frac{\operatorname{sh} \sigma_0 \left( \frac{a}{2} - x \right)}{\sigma_0 \operatorname{ch} \sigma_0 a/2} + 2h_K \frac{1}{s} \frac{\operatorname{sh} \sigma_0 r}{\operatorname{ch} \sigma_0 a/2}.$$

Determineremo l'antitrasformata col solito metodo dei residui: i poli delle trasformate, tutti semplici, sono dati, oltre che da  $S = 0$ , dai valori:

$$\sigma_{nm} = 2(m+1)\pi i/a, \text{ oppure: } \sigma_{nm} = -\frac{\lambda_{nm}}{abc}, \text{ avendo posto:}$$

$$[5_{26}] \quad \lambda_{nm} = \pi^2 ab \left[ \frac{n^2}{b^2} + (2m+1)^2/a^2 \right], \text{ } (\lambda_{nm} \text{ è un numero puro}).$$

Porremo inoltre:

$$[5_{27}] \quad \theta = t/abc, \text{ introducendo cioè un nuovo tempo caratteristico } (\tau = abc).$$

Il polo  $S = 0$ , dà come contributo:

$$\frac{h_c}{n} \frac{\operatorname{sh} \frac{n\pi}{b} \left( \frac{a}{2} - x \right)}{\operatorname{ch} (n\pi a)/2b}, \text{ per } n \geq 1;$$

mentre per  $n = 0$  dà:

$$\frac{\pi h_c}{b} \left( \frac{a}{2} - x \right) + 2h_K$$

Sommando i contributi dati da questo polo, sostituiti nella [5<sub>25</sub>]; si ottiene in virtù della [5<sub>9</sub>], l'espressione  $(h_K + h_{c\varphi})$ , che rappresenta la parte stazionaria che coincide con la [5<sub>17</sub>]. Passiamo ai residui provenienti dai poli  $S_{nm}$ , che si trovano mediante il teorema de l'Hôpital.

Per  $n \geq 1$ , come residuo si ottiene:

$$-\frac{4\pi h_c}{\lambda_{nm}} \cos(2m+1)\pi \frac{x}{a} \cdot l \lambda_{nm} \theta,$$

a cui si aggiunge per  $n = 0$  un termine in  $h_K$ , dato da:

$$\frac{8l_K}{(2m+1)} (-1)^m \cos(2m+1)\pi \frac{x}{a} \cdot l - \lambda_{0m} \theta'$$

Sostituendo nella [5<sub>25</sub>], e posto

$$[5_{28}] \quad \theta = \pi^2 \frac{b}{a} \theta' = \pi^2 t/ca^2,$$

si ha:

$$\begin{aligned}
 [539] \quad h &= h_K \left[ 1 - \frac{1}{\pi} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^m}{2m+1} \cos(2m+1) \pi \frac{x}{2a} e^{-(2m+1)^2 \theta} + \right. \\
 &+ h_e \left( \varphi - 2\pi h_e \sum_{m=n}^{\infty} \frac{\varepsilon_m}{\lambda_{nm}} \cos h\pi \frac{y}{b} \cos(2m+1) \pi \frac{x}{a} e^{-\lambda_{nm} t} \right); \\
 &\quad (\varepsilon_0=1; \varepsilon_n=2; n \geq 1)
 \end{aligned}$$

Il 1° termine, rappresenta l'effetto puramente idraulico, il 2° quello puramente EGO; le serie convergono, e sono adatte al calcolo numerico, basta nella doppia somma ordinare le  $\lambda_{nm}$  in ordine crescente. Si noti che per  $t=0$ , il termine in  $h_K$  presenta una discontinuità sui bordi  $x = \pm a/2$ , che proviene dall'aver imposto  $h_K \neq 0$ ,  $H_K \neq H_0$ , il che si rifletterà nel noto fenomeno d'una *portata iniziale molto grande (caratteristica dell'apporto idrostatico)*.

L'influenza dei termini contenenti il tempo  $t$ , si fa man mano meno sentire col crescere del tempo, scompare quando  $t$  diventa grande rispetto a  $\tau = abc$ .

Più rigorosamente scompare quando  $t$  diventa grande rispetto al maggiore dei due tempi caratteristici ( $ca^2$  e  $cab$ ), si hanno in genere grandezze notevolmente diverse tra di loro).

Le valutazioni della *portata*  $q_K$ , e del *flusso totale* migrante  $Q_K$ , sempre per unità di lunghezza in direzione dell'asse  $z$ , sono date da:

$$[540] \quad q_K = K \int_{-b}^{+b} \left[ \left( \frac{\partial h}{\partial x} dy \right)_{x=a/2} + q_K I \right],$$

che in virtù delle [515] e [525] si scrive:

$$[541] \quad q_K = k \left[ v \left( \frac{\partial h}{\partial x} \right)_{a/2} + \pi h e \right],$$

mentre la  $Q_K$  si ricava da:

$$[542] \quad Q_K = \int_0^t q_K dt.$$

Invece del calcolo diretto della [539], passiamo attraverso la trasformata, e si ha:

$$[543] \quad \bar{q}_K = \pi k h e s^{-1} \left( 1 - 1/\operatorname{ch} \frac{a}{2} \sqrt{cs} \right) + 2bk \sqrt{c} h_K (s)^{-1/2} \cdot 1h \frac{a \sqrt{cs}}{2}$$

$$[544] \quad \bar{Q}_K = \pi k h_e s^2 \left( 1 - 1/\operatorname{ch} \frac{a}{2} \sqrt{cs} \right) + \\ + 2bk \sqrt{c} h_K (s)^{3/2} \cdot \operatorname{th} \frac{a}{2} \sqrt{c} - \sqrt{S}$$

I poli sono dati da  $S_m (= S_{om}) = -c^{-1} (2m+1)^2 \pi^2 / a^2$ , e da  $S = 0$  per  $\bar{Q}_K$  solamente.

Valutando i residui col m. de l'Hôpital, dall'a. trasformata [543] si ha:

$$[545] \quad q_K = 4kh_e \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^m}{2m+1} \exp [-(2m+1)^2 \theta] + \\ + 8 \frac{b}{a} kh_K \exp [-(2m+1)^2 \theta]$$

$$[546] \quad Q_K = ca^2 kh_e \left[ \frac{\pi}{8} - \frac{4}{\pi^2} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^m}{(2m+1)^2} \exp [-(2m+1)^2 \theta] + \right. \\ \left. + cabkh_K \left[ 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{m=1}^{\infty} (2m+1)^{-2} \exp [-(2m+1)^2 \theta] \right] \right]$$

Per la quantità d'acqua totale estraibile dal predetto terreno per ( $\theta = \infty$ ), si ottiene:

$$[547] \quad Q_K(\infty) = \frac{\pi}{8} ca^2 kh_e + cabkh_K; \\ (\text{per } h_e \text{ v. la [523]}).$$

Nelle tre ultime formule il 1° termine risulta proporzionale a  $h_e$  (cioè a  $J$ , e si riferisce all'EGO), il 2° proporzionale a  $h_K$ , e riguarda puramente l'effetto idraulico presente se la pressione estrattiva  $H_K < H_e$  iniziale, ( $h_K > 0$ ); i termini tra parentesi della [546], e le  $\sum$  delle [545], dipendono solo da  $\theta$ , serie rapidamente convergenti (da tabellare).

Se indichiamo con  $\bar{\tau} = ca^2/\pi^2$ , tempo caratteristico riguardante il flusso d'acqua, si vede che per tempi d'ordine di grandezza  $\bar{\tau}$ , si fa sentire solo il 1° termine delle sommatorie: per tempi raggiungenti qualche multiplo di  $\bar{\tau}$ , il flusso si estingue. Si noti che  $\bar{\tau}$  non dipende dalla profondità catodica  $b$ : ciò significa che per  $b \gg a$ , in cui come risulta dalla [535] hanno ancora luogo variazioni di pressione per un tempo dell'ordine di grandezza  $\tau = c a b$ , queste variazioni riguardano solo un riassetamento strutturale all'interno del terreno, che si dovrà lasciar compiere.

Segnaliamo due *costanti temporali*: *idrologica l'una*, indipendente dall'infissione catodica, *l'altra EGO dipendente* da quest'ultima; *una costante di ristrutturazione* del suolo (durata quasi sempre maggiore della prima), indipendente dall'estrazione o dalla semplice idromigrazione al catodo, *un autoriequilibrio postesicazione*.

L'andamento fenomenico iniziale è diverso e distinguibile nelle due componenti, idrica e osmotica; per la prima la portata iniziale è  $\infty$ , (causa il brusco salto di pressione, da  $H_0$  a  $H_K$ ), il flusso totale rimane però poi finito, andamento notoriamente parabolico; per la seconda (EGO) la portata parte da un valore costante ( $\rho KcJ$ ), e il flusso già all'inizio presenta un andamento lineare.

Significativo è il comportamento dei coefficienti moltiplicatori nelle espressioni in parentesi della [5<sub>46</sub>], il che è praticamente lo stesso, quello dell'acqua totale dato dalla [5<sub>47</sub>], fluido estratto o no, in quanto i contributi dati dai due termini, dipendono, dai parametri in maniera essenzialmente diversa. Per il termine relativo all'effetto Darcy, esso è proporzionale ad  $a b h_K$ , il che è anche intuitivo, siccome quest'effetto conferisce in tutto il volume la pressione  $H_K$ , e quindi la quantità d'acqua emunta è proporzionale al volume da cui viene estratta.

Riferendosi al solo effetto Darcy (potendo pompare l'acqua ad una pressione bassa), *conviene usare elettrodi profondi*, e per accelerare il processo diminuire  $\bar{\tau}$ , cioè  $a$ . Diversamente si comporta il termine che rappresenta l'EGO: l'acqua estratta è qui proporzionale ad  $(a^2J)$ . Ciò significa che, ad "intensità di c.e. costante", il liquido prelevato non dipende da  $b$ . Con un dato amperaggio si estrae una certa quantità d'acqua tellurica, *indipendentemente dalla profondità catodica, ed è quindi inutile disporre di catodi più profondi*.

Usufruendo di "tensione costante", l'intensità di corrente stessa dipenderà da  $b$ , attraverso  $f(d)$ . In virtù delle [5'<sub>13</sub>], [5<sub>13</sub>], la  $f(d)$  si scrive:

$$[5_{48}] \quad f(d) = \lg \frac{2a}{\pi a} + g\left(\frac{b}{a}\right); \quad g(x) = \frac{\pi}{4x} + \lg \frac{x}{2} - 2 \sum_{n=1}^{\infty} n^{-1} (e^{n\pi/x} + 1)^{-1} = \\ = 4 \sum_{n=0}^{\infty} (2n+1)^{-1} [\exp 2/(2n+1) \pi x - 1].$$

Siccome  $2a/\pi d$  è piuttosto grande, la  $g$  è trascurabile già per  $x = 1$ ,  $b = a$ . Per conoscere per quali  $b/a$ , il termine  $g$  abbia ancora influenza, occorrerebbe tabellare  $g(x)$ .

In ogni caso si vede che per *tensione costante*, se  $b/a$  oltrepassa un certo limite, l'intensità di corrente e quindi l'acqua espulsa non

aumentano più (inutile approfondire i catodi). Il processo può ritornare efficiente se si allontanano contemporaneamente i catodi essendo il deflusso proporzionale ad  $a^2$ , (a tensione costante).

Tale risultato è intuitivo, ricordando che il prosciugamento ha praticamente luogo solo in una zona perianodica. Portare l'infissione  $b$  oltre un certo limite non serve, in quanto la zona anodica rimane quella che è. Allontanando però contemporaneamente i catodi, come s'è detto, si allarga la zona anodica, quella cioè più soggetta al prosciugamento.

Fissati  $b$ ,  $E$ , conviene quindi aumentare  $a$ , fino a rendere trascurabile la  $g(x)$ , ammesso naturalmente che tutta la zona interessi per il prosciugamento.

In ogni caso questo prosciugamento non andrà molto in profondità; una valutazione di quest'ultima è già fornita dalla [57] della teoria stazionaria.

Conviene condurre un'ispezione preliminare del suolo da trattare, per orientarsi sulla tipolitologia, grado d'idraulicità, e questo con l'approfondire i catodi, se si risente o no di maggiore portata estrattiva. Per prefissati  $a$  ed  $E$ , l'entità d'infissione catodica ha i suoi limiti, si è visto, ritrovabili teoricamente e sperimentalmente. Distinte le evoluzioni processuali deidratanti (nel tempo), idraulico e EGO, si può riconoscere l'entità di quest'ultima dal valore asintotico del deflusso parabolico.

*Di particolarmente nuovo è l'introduzione di due tempi  $\tau_1$ ,  $\tau_2$ , caratteristici, uno di deidratazione (già noto), l'altro qui introdotto di ristrutturazione o riassetto, procedendo nella elettroenergizzazione fino alla estinzione di  $\tau_2$ , dopo l'esaurimento  $\tau_1$  dell'idroestrazione catodica.*

#### BIBLIOGRAFIA

- (1) BELLUIGI A., 1957-1958. — *Teoria Generale dell'Elettrogeosmosi EGO tridimensionale*. 3 Memorie in "Geofisica Pura e Applicata" (pag. 55).  
 BELLUIGI A., 1957. — Idem in "Bautechnik" (Berlin).  
 BELLUIGI A., 1958. — *Proprietà fondamentali EGO stazionaria*. "Geofisica Pura e Applicata", Milano, (107-124).
- (2) BELLUIGI A., 1958. — *La non stazionarietà dei fenomeni EGO*, idem (Aprile).  
 BELLUIGI A., 1958. — *Aspetti diversi applicativi dell'EGO trans*. "Annali di Geofisica", XI, Roma.

- BELLUIGI A., 1959: *Applicazioni elettrogeocinetiche*, idem 1959.
- BELLUIGI A., 1969. - *Dispositivi elettrodici preferenziali nell'elettroprosciugamento dei suoli umidi*. "Giornale del Genio Civile", Roma.
- BELLUIGI A., 1965. - *Sui pali sospesi elettroaciculari*. "ANAS".
- BELLUIGI A., 1968. - *Qualificazioni mecano-elettriche dei gruppi di pali di fondazione*, "Annali di Geofisica", **XXI**.
- (<sup>2</sup>) BELLUIGI A., 1960. - *Bifilarità elettrodiche aperte e chiuse*. "Annali di Geofisica". **XIII**.
- BELLUIGI A., 1959. - *Aspetto EGO bidimensionale variabile col tempo*. "Geofisica Pura e Applicata", Milano.
- BELLUIGI A., 1960. - *Modalità d'immissione elettrica di liquidi nel suolo (EGE parziali)*. "Geof. Teorica e Applicata", Trieste.
- (<sup>1</sup>) BELLUIGI A., 1963. - *Opportunità d'un consolidamento elettrogeocinetico delle fondazioni*. "Geof. Teorica e Applicata", Trieste.
- (<sup>3</sup>) Erling S. Sunde "Resistance of Grounding Arrangements" USA Ollendorf "Erdstromme" - Springer, Berlino.
-