

Pressioni neutre associate a perdite da gallerie idrauliche in pressione

R. JAPPELLI, C. VALORE, F. FEDERICO

SOMMARIO: Si analizza il processo di filtrazione, in condizioni di moto piano e stazionario, da una galleria idraulica in pressione a sezione circolare. Il problema viene risolto nell'ipotesi che il terreno — nel quale si sviluppa la galleria — sia omogeneo e isotropo nei riguardi della permeabilità; abbia scheletro solido incompressibile e non sia inizialmente sede di falda. Si forniscono le espressioni in forma chiusa della pressione neutra e della cadente piezometrica nel generico punto del campo di moto.

L'analisi pone in evidenza che anche in presenza di perdite modeste o del tutto trascurabili, rispetto alla portata convogliata dalla galleria, i valori della pressione neutra e della cadente piezometrica possono risultare assai elevati con evidenti conseguenze sulla sicurezza del complesso galleria-terreno.

1. Introduzione

La costruzione di una galleria modifica sempre ed in vario modo lo stato di tensione e deformazione nel terreno circostante. L'entità delle modifiche dipende principalmente dalle caratteristiche fisico-meccaniche dei terreni interessati, nonché dalle modalità di esecuzione dello scavo e del rivestimento.

Per l'analisi del processo di deformazione del complesso terreno-rivestimento e per la ricerca di eventuali meccanismi di rottura è necessario far riferimento allo stato di sollecitazione effettiva e quindi alle variazioni di pressione neutra indotte nell'intorno significativo del manufatto [VIGGIANI, 1973].

La costruzione della galleria può innescare processi di drenaggio, quando si sviluppa sotto falda, in quanto le quote piezometriche all'interno del cavo sono minori di quelle esistenti all'interfaccia terreno-rivestimento. Durante l'esercizio di gallerie in pressione, invece, le quote piezometriche all'interno risultano spesso più elevate di quelle all'interfaccia; si verifica, in tal caso, un processo di filtrazione dal manufatto verso i terreni circostanti, sempreché la galleria non sia munita di rivestimento impermeabile.

In entrambi i casi, la presenza della galleria può indurre forti perturbazioni sull'andamento e sull'intensità delle pressioni neutre; tali perturbazioni possono propagarsi a distan-

ze considerevoli dal manufatto, talvolta dell'ordine di alcune decine di diametri.

L'analisi del comportamento del sistema galleria-terreno, sotto ipotesi del tutto generali, richiede, com'è noto, la soluzione di un problema di interazione terreno-rivestimento; la soluzione dipende anche dai caratteri del processo di filtrazione. Quest'ultimo risulta, a sua volta, condizionato dalla risposta del rivestimento in presenza di eventuali difetti di tenuta. È evidente quindi, che i processi di deformazione e di filtrazione sono interdipendenti. Basti osservare, al riguardo, che il processo iniziale di deformazione può indurre lesioni nel rivestimento: queste determinano una modifica della configurazione del sistema e delle pressioni neutre. Ne conseguono ulteriori modifiche dello stato di tensione e di deformazione.

L'analisi del problema « accoppiato », prima descritto, presenta difficoltà analitiche pressoché insormontabili, anche dopo l'introduzione di notevoli semplificazioni delle leggi costitutive dei terreni, della geometria del problema, della legge del moto. Conviene, quindi, trattare preliminarmente alcuni problemi di filtrazione, che possono essere studiati per via analitica; il problema generale potrà essere risolto per via numerica.

Le soluzioni analitiche consentiranno, fra l'altro, di controllare e di tarare le soluzioni numeriche [GIBSON, 1974].

Secondo questa linea di ricerca è stata proposta la soluzione semplificata di un primo problema, che riguarda il moto vario di filtrazione verso una galleria non rivestita, il cui fronte avanza con velocità costante in un mezzo omogeneo isotropo, sede di una falda originariamente in quiete [FEDERICO, 1984].

Prof. Ing. Ruggiero JAPPELLI - Ordinario di Geotecnica nella II Università di Roma.

Prof. Ing. Calogero VALORE - Associato di Geotecnica nell'Università della Calabria - Arcavacata di Rende.

Dr. Ing. F. FEDERICO - Ricercatore di Geotecnica nella II Università di Roma.

Nella presente nota si studia il processo di filtrazione da gallerie in pressione, in condizioni di moto piano e stazionario, sempre nell'ipotesi che lo scheletro solido del terreno sia indeformabile.

Lo studio ha preso le mosse da un precedente lavoro [BOUVARD, 1975], nel quale sono formulate le equazioni della linea libera e delle linee equipotenziali, nonché le espressioni della portata filtrante dalla galleria.

Per gli scopi della presente ricerca il problema è stato riproposto in termini più generali. Sono state determinate, in forma chiusa, le espressioni analitiche della pressione neutra e della cadente piezometrica nel generico punto del campo del moto di filtrazione. Si è proceduto, infine, ad una calcolazione numerica, i cui risultati sono stati rappresentati in grafici, dai quali può agevolmente valutarsi l'influenza dei principali parametri.

2. Posizione del problema

Si considera una galleria di forma cilindrica, con asse orizzontale e sezione retta circolare, di raggio R_0 costante, priva di rivestimento, ovvero con rivestimento infinitamente permeabile o con coefficiente di permeabilità pari a quello del terreno (fig. 1). Con R_0 nel seguito si intenderà il raggio dello scavo in assenza di rivestimento o quando quest'ultimo risulti infinitamente permeabile; nel rimanente caso R_0 è il raggio interno del rivestimento.

La galleria convoglia un fluido incomprimibile, di peso specifico γ_w , a pressione costante $\gamma_w \cdot H_0$.

Il terreno è omogeneo ed isotropo nei riguardi della permeabilità k e si estende indefinitamente al di sotto della galleria. Il moto di filtrazione è retto dalla legge di Darcy e si esplica in regime stazionario nei piani ortogonali all'asse della galleria; si ammette inoltre, che non si manifestino fenomeni di risalita capillare.

L'analisi del processo di filtrazione può essere condotta ammettendo che le caratteristiche del moto nei piani *verticali* normali all'asse della galleria risultino dalla sovrapposizione di un moto originato da una sorgente puntiforme e di un moto uniforme. Entrambi questi ultimi moti si sviluppano in una regione piana *orizzontale* delimitata da due frontiere rettilinee ed impermeabili, parallele alla dire-

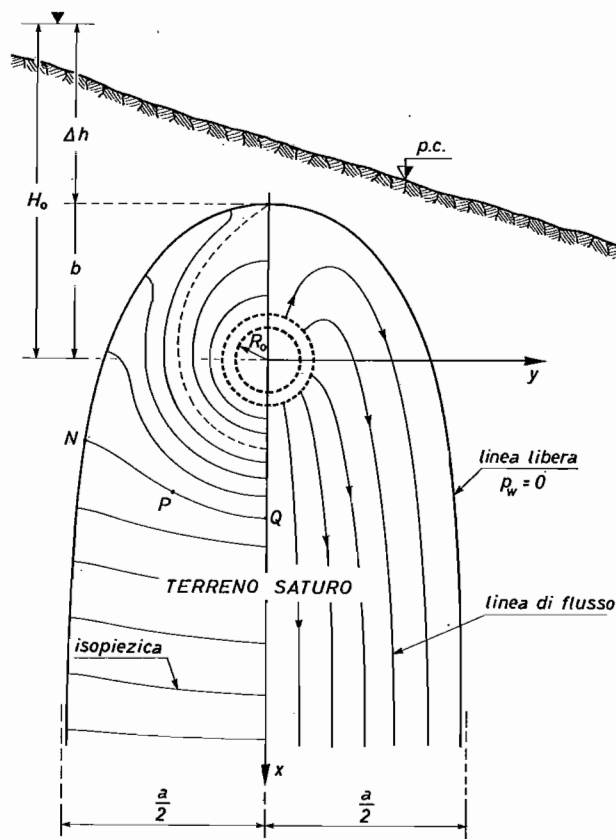


Fig. 1. - Schema di riferimento per l'analisi del problema.

zione del moto uniforme e poste alla distanza $2a$, incognita [BEAR, 1972; BOUVARD, 1975; POLUBARINOVA-KOCHINA, 1962].

La sorgente puntiforme è equidistante dalle due frontiere e ha portata q — da determinare — pari alla portata del moto uniforme.

Si segnala che alcune delle ipotesi, come quelle riguardanti la permeabilità del rivestimento e l'omogeneità del terreno, potrebbero essere rimosse, ammettendo che in prossimità del contatto rivestimento-terreno le linee di flusso abbiano andamento radiale [BOUVARD, 1975].

3. Soluzione

L'analisi del processo di filtrazione, nelle precedenti ipotesi, è stata sviluppata con il metodo delle trasformazioni conformi [BOUVARD, 1975]. Sono già disponibili le equazioni della linea libera e delle linee equipotenziali, nonché le espressioni della portata filtrante e della velocità di filtrazione, che si richiamano brevemente.

Il sistema di riferimento è indicato in fig. 1; l'origine degli assi cartesiani ortogonali x, y coincide con il centro della sezione retta della galleria; l'asse x è orientato verso il basso.

In tale riferimento, l'espressione del *potenziale complesso* $f(z) = \varphi + i\psi$ del moto di filtrazione può scriversi come segue:

$$f(z) = \frac{q}{2\pi} \cdot \ln \left(\text{Sh} \frac{\pi z}{2a} \right) + \frac{3q}{4a} z \quad (1)$$

essendo q la portata filtrante dal tronco di galleria di lunghezza unitaria, a la massima estensione orizzontale, incognita, del dominio del moto e z la variabile complessa

$$z = x + iy \quad (2)$$

Dalla (1), dopo una serie di passaggi per i quali si rimanda all'appendice, è possibile determinare le espressioni della funzione φ , nota come *potenziale della velocità di filtrazione* e della *funzione di flusso* ψ :

$$\varphi(x, y) = \frac{q}{2\pi} \cdot \ln \sqrt{\text{Sh}^2 \frac{\pi x}{2a} + \sin^2 \frac{\pi y}{2a} + \frac{3qx}{4a}} \quad (3)$$

$$\psi(x, y) = \frac{q}{2\pi} \cdot \text{arctg} \left[\frac{\text{tg} \frac{\pi y}{2a} + \text{Th} \frac{\pi x}{2a} \cdot \text{tg} \frac{3\pi y}{2a}}{\text{Th} \frac{\pi x}{2a} - \text{tg} \frac{\pi y}{2a} \cdot \text{tg} \frac{3\pi y}{2a}} \right] \quad (4)$$

Dalle relazioni (3) e (4) si ottengono le equazioni delle *linee equipotenziali* o isopieziche e delle *linee di flusso*. La prima equazione può scriversi nel modo seguente:

$$y(x) = \pm \frac{2a}{\pi} \cdot \arcsin \sqrt{e^{\frac{4\pi}{a} \left(c - \frac{3x}{4a} \right)} - \text{Sh}^2 \frac{\pi x}{2a}} \quad (5)$$

Per l'equazione delle linee di flusso si ottiene:

$$x(y) = \frac{2a}{\pi} \cdot \text{arcTh} \left[\frac{\text{tg} \left(\frac{\pi y}{2a} \right)}{\text{tg} \left(\omega - \frac{3\pi y}{2a} \right)} \right] \quad (6)$$

C, ω sono due parametri che definiscono, rispettivamente, la posizione delle linee equipotenziali e delle linee di flusso nel campo del moto.

Dalle relazioni (4) o (6), si ricava, inoltre, la seguente equazione della *linea libera*, che delimita la zona interessata dal moto di filtrazione:

$$x(y) = \frac{2a}{\pi} \cdot \text{arcTh} \left[\frac{3 \sin^2 \left(\frac{\pi y}{2a} \right) - \cos^2 \left(\frac{\pi y}{2a} \right)}{3 \cos^2 \left(\frac{\pi y}{2a} \right) - \sin^2 \left(\frac{\pi y}{2a} \right)} \right] \quad (7)$$

Dalla (7), per $x = 0$ risulta $y = \pm a/3$; per $y = 0$ si ottiene $x = -b = -a (\ln 2)/\pi$. La grandezza b rappresenta, quindi, la massima altezza della linea libera sull'asse della galleria.

Per definizione, la funzione φ è eguale al prodotto $-k h(x, y)$, dove $h(x, y)$ è la quota piezometrica in un generico punto, riferita all'asse y ; di conseguenza, le *componenti u e v della velocità di filtrazione* sono espresse dalla derivata parziale della funzione φ , rispettivamente secondo x e y :

$$u = -k \frac{\partial h}{\partial x} = \frac{q}{8a}$$

$$\left[\frac{\text{Sh} \left(\frac{\pi x}{a} \right)}{\text{Ch}^2 \left(\frac{\pi x}{2a} \right) - \cos^2 \left(\frac{\pi y}{2a} \right)} \right] + \frac{3q}{4a} \quad (8a)$$

$$v = -k \frac{\partial h}{\partial y} = \frac{q}{8a}$$

$$\left[\frac{\sin\left(\frac{\pi y}{a}\right)}{\operatorname{Ch}^2\left(\frac{\pi x}{2a}\right) - \cos^2\left(\frac{\pi y}{2a}\right)} \right] \quad (8b)$$

La portata filtrante q si determina imponendo che per valori infinitamente grandi dell'ascissa x , la direzione del flusso sia verticale. Trascurando nella (8a) il valore di $\cos^2(\pi y/2a)$ rispetto al $\operatorname{Ch}^2(\pi x/2a)$, e sviluppando, si ottiene:

$$q = k \cdot a \quad (9)$$

Per la determinazione del valore di a , che rappresenta la massima estensione orizzontale del dominio del moto, si può fare riferimento all'equazione seguente:

$$H_0 - b = \Delta h = \int_{-R_0}^{-b} \frac{u_{(y=0)}}{k} dx \quad (10)$$

con la quale si esprime la condizione che la variazione di quota piezometrica, Δh , dalla chiave della galleria alla sommità della linea libera sia pari all'integrale della cadente piezometrica $u_{(y=0)}/k$ nell'intervallo d'interesse, e ciò per la definizione di cadente secondo Darcy. L'estremo superiore dell'intervallo d'integrazione $-b$ è pari a $-(a \ln 2)/\pi$.

L'equazione (10) — e le analoghe (12), (12a) e (28) ricavate nel seguito — sono in effetti approssimate, dal momento che l'espressione del potenziale complesso è stata determinata nell'ipotesi di sorgente puntiforme e non di sorgente di forma circolare con raggio R_0 .

La variazione di quota piezometrica Δh , determinata tramite la (10), è pertanto approssimata. L'approssimazione è accettabile ai fini tecnici per gli usuali valori del rapporto H_0/R_0 .

In corrispondenza dell'asse x , la componente u della velocità di filtrazione è data dall'espressione seguente:

$$u_{(y=0)} = \frac{q}{4a} \left[3 + \frac{\operatorname{Ch}\left(\frac{\pi x}{2a}\right)}{\operatorname{Sh}\left(\frac{\pi x}{2a}\right)} \right] \quad (11)$$

Sostituendo la (11) nella (10) e svolgendo l'integrale si ottiene la seguente equazione, in forma implicita, nell'incognita a :

$$H_0 - \frac{3}{4} R_0 = \frac{a}{2\pi} \left[\ln\left(\frac{1}{2}\right) + \right. \\ \left. - \ln \operatorname{Sh}\left(\frac{\pi R_0}{2a}\right) \right] \quad (12)$$

Nel caso in cui risulti $R_0/a \ll 1$, sviluppando in serie la funzione $\operatorname{Sh}(\pi R_0/a)$ e considerando solo il primo termine, è possibile semplificare la relazione (12) come segue:

$$H_0 - \frac{3}{4} R_0 \approx \frac{a}{2\pi} \ln \frac{a}{\pi R_0} \quad (12a)$$

Nell'ipotesi che il piano di campagna sia orizzontale, imponendo che la profondità m dell'asse della galleria sia pari all'altezza b della linea libera (fig. 2), la (12a) può risciversi nel modo seguente:

$$H_0^* = \frac{3}{4} R_0 + \frac{m}{2 \ln 2} \ln \frac{m}{R_0 \ln 2} \quad (12b)$$

Nel caso che la superficie topografica non sia orizzontale, il corrispondente valore di H_0^*

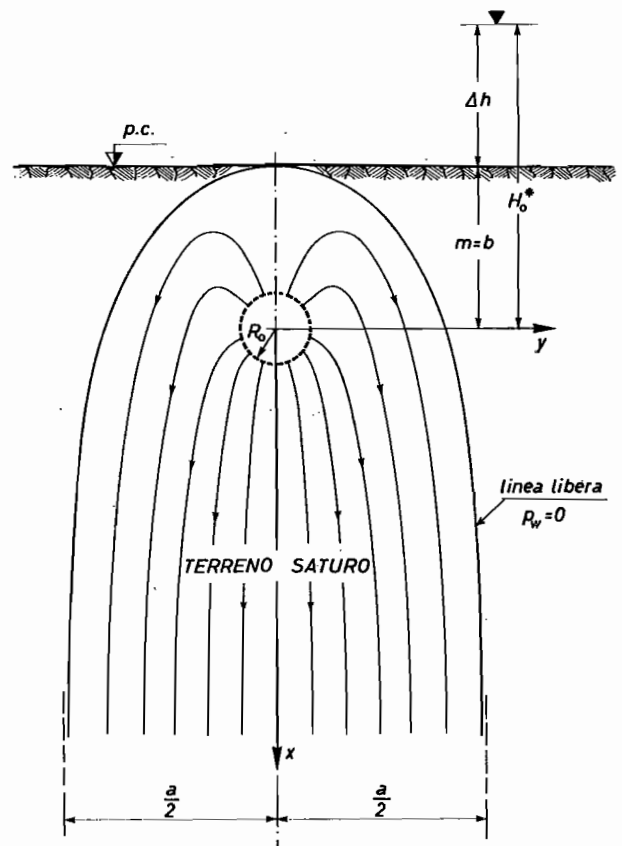


Fig. 2. - Schema di riferimento per la determinazione di H_0^* .

è agevolmente determinabile [VALORE, FEDERICO, 1986].

Non è superfluo rilevare che per valori dell'altezza $H_0 > H_0^*$ le soluzioni analitiche prima esposte, perdono di validità, così come le formule seguenti.

La *cadente piezometrica* J , è definita dalla nota relazione:

$$J = - \frac{dh}{ds} \quad (13)$$

ove s indica l'ascissa curvilinea misurata lungo una linea di flusso. Richiamando le relazioni (8a), e (8b), la (13) si scrive come segue:

$$\begin{aligned} dh &= \frac{\partial h}{\partial x} dx + \frac{\partial h}{\partial y} dy = \\ &= - \frac{u}{k} dx - \frac{v}{k} dy \end{aligned} \quad (14)$$

$$J = \frac{3}{4} \cos \alpha + \frac{1}{8} \frac{\left[\operatorname{Sh} \left(\frac{\pi x}{a} \right) \right] \cos \alpha + \left[\sin \left(\frac{\pi y}{a} \right) \right] \sin \alpha}{\operatorname{Ch}^2 \left(\frac{\pi x}{2a} \right) - \cos^2 \left(\frac{\pi y}{2a} \right)} \quad (18)$$

I valori dell'angolo α e delle sue funzioni trigonometriche elementari $\sin \alpha$, $\cos \alpha$, da introdurre nella (18), in funzione dei valori

$$\sin \alpha = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha}} \quad (19a)$$

$$\cos \alpha = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha}} \quad (19b)$$

$$\begin{aligned} &\frac{dy}{dx} = \operatorname{tg} \alpha = \\ &= \frac{\left[\operatorname{tg}^2 \left(\omega - \frac{3\pi y}{2a} \right) + \operatorname{tg}^2 \frac{\pi y}{2a} \right]}{\left(1 + \operatorname{tg}^2 \frac{\pi y}{2a} \right) \operatorname{tg} \left(\omega - \frac{3\pi y}{2a} \right) + \left(3 \operatorname{tg} \frac{\pi y}{2a} \right) \left[1 + \operatorname{tg}^2 \left(\omega - \frac{3\pi y}{2a} \right) \right]} \end{aligned} \quad (19c)$$

Il valore della costante $\omega = 2\pi\psi/q$ da introdurre nelle (19a, b, c), è definito dalla relazione (4), in funzione delle coordinate del punto.

In corrispondenza dell'asse x , la relazione (18) si semplifica nel modo seguente:

$$J_x = \frac{3}{4} \cos \alpha + \frac{1}{4} \cos \alpha \operatorname{CTh} \left(\frac{\pi x}{2a} \right) \quad (20)$$

L'espressione della cadente J diventa, pertanto:

$$J = \frac{u}{k} \frac{dx}{ds} + \frac{v}{k} \frac{dy}{ds} \quad (15)$$

Se si indica con α l'angolo che la tangente alla linea di flusso in un generico punto forma con l'asse x , valgono le:

$$\frac{dx}{ds} = \cos \alpha \quad (16)$$

$$\frac{dy}{ds} = \sin \alpha \quad (17)$$

Sostituendo le relazioni (16, 17) e (8a, b) nella (15) si ottiene l'espressione della cadente J del moto di filtrazione in un punto generico di coordinate x , y :

delle coordinate del generico punto, possono ricavarsi utilizzando le seguenti espressioni:

Per motivi di simmetria, l'angolo α assume il valore zero nei punti dell'asse x disposti al di sotto della galleria ed il valore π nei punti al di sopra di quest'ultima.

Per i punti con ascissa positiva si ha, pertanto:

$$J_x = \frac{3}{4} + \frac{1}{4} \operatorname{CTh} \left(\frac{\pi x}{2a} \right) \quad (20a)$$

per i punti con ascissa negativa, si ha invece:

$$J_x = -\frac{3}{4} + \frac{1}{4} \text{CTh} \left(\frac{\pi x}{2a} \right) \quad (20b)$$

Se x tende a valori infinitamente grandi, la funzione $\text{CTh}(\pi x/2a)$ tende al valore unitario e, di conseguenza, anche la cadente piezometrica tende al valore unitario. In corrispondenza dell'ascissa $x = -b$, invece, la cadente assume il valore nullo, essendo

$$J_{(x=-b)} = -\frac{3}{4} - \frac{1}{4}$$

$$\text{CTh} \left(-\frac{1}{2} \ln 2 \right) = 0.$$

Per la ricerca della *pressione neutra* $p_w(P)$ in un generico punto $P(x, y)$ del dominio del moto si considerino i punti Q, P, N , appartenenti alla medesima equipotenziale (fig. 1).

Il punto N giace sulla linea libera e risulta perciò $p_w(N) = 0$. Vale, pertanto, la seguente relazione:

$$h_P = h_N = -x_N$$

da cui:

$$p_w(P) = \gamma_w (x_P - x_N) \quad (21)$$

Dalla (21) si deduce che, per calcolare la pressione neutra in un generico punto P , di ascissa x_P , è sufficiente conoscere l'ascissa del

$$\arcsin \sqrt{\frac{4\pi \left(C_P - \frac{3x}{4a} \right)}{e} - \text{Sh}^2 \left(\frac{\pi x}{2a} \right)} - \text{arctg} \sqrt{\frac{3\text{Sh} \left(\frac{\pi x}{2a} \right) + \text{Ch} \left(\frac{\pi x}{2a} \right)}{3\text{Ch} \left(\frac{\pi x}{2a} \right) + \text{Sh} \left(\frac{\pi x}{2a} \right)}} = 0 \quad (23)$$

che, risolta per tentativi, fornisce il valore dell'incognita x_N .

È da osservare, tuttavia, che il procedimento appena esposto non è più valido quando l'equipotenziale per il generico punto P non interseca la linea libera. Quest'ultimo caso si verifica se il punto P è ubicato in prossimità della galleria, più precisamente, quando il valore della costante C_P ad esso corrispondente, assume valori minori di $C^* = -(\ln 8)/2\pi \approx -0,331$. L'isopiezica ($C = C^*$) è indicata a tratteggio in fig. 1.

punto N appartenente alla linea libera e alla equipotenziale passante per P .

L'equazione dell'equipotenziale per P è definita dalla (5), che può utilizzarsi per determinare il valore della costante $C = C_P$ relativo alla linea in esame.

Si ha, infatti:

$$\sin^2 \left(\frac{\pi y_P}{2a} \right) = e^{4\pi \left(C_P - \frac{3x_P}{4a} \right)} - \text{Sh}^2 \left(\frac{\pi x_P}{2a} \right)$$

da cui:

$$4\pi \left(C_P - \frac{3x_P}{4a} \right) = \ln \left[\sin^2 \left(\frac{\pi y_P}{2a} \right) + \text{Sh}^2 \left(\frac{\pi x_P}{2a} \right) \right]$$

e, quindi:

$$C_P = \frac{1}{4\pi}$$

$$\left\{ \ln \left[\sin^2 \frac{\pi y_P}{2a} + \text{Sh}^2 \frac{\pi x_P}{2a} \right] + \frac{3\pi x_P}{a} \right\} \quad (22)$$

Risolviendo il sistema formato dalle equazioni della linea equipotenziale (5) per P e della linea libera (7) si ricava la seguente equazione, in forma implicita:

È possibile superare questa limitazione adottando un diverso procedimento di calcolo. Si consideri, allo scopo, il punto Q , disposto sull'equipotenziale per P e sul ramo positivo dell'asse x .

Vale la relazione seguente:

$$h_P = h_Q$$

ovvero:

$$-x_P + \frac{p_w(P)}{\gamma_w} = -x_Q + \frac{p_w(Q)}{\gamma_w} \quad (24)$$

Dalla (24) si ricava:

$$p_w(P) = p_w(Q) - \gamma_w (x_Q - x_P) \quad (25)$$

Osservando che:

$$p_w(Q) = \gamma_w [H_o - \Delta h(Q) + x_Q] \quad (26)$$

$$\Delta h(Q) = \int_{+R_o}^{x_Q} \frac{u_{(y=0)}}{k} dx = \frac{q}{4ak} \int_{+R_o}^{x_Q} \left[3 + \frac{\frac{\pi x}{2a} - \frac{\pi x}{2a}}{e + e} \right] dx \quad (28)$$

Svolgendo l'integrale si ottiene la seguente espressione:

$$\Delta h(Q) = \frac{a}{2\pi} \left[\ln \operatorname{Sh} \frac{\pi x_Q}{2a} - \ln \operatorname{Sh} \frac{\pi R_o}{2a} \right] + \frac{3}{4} (x_Q - R_o) \quad (29)$$

Si osservi, adesso, che la relazione (22), in corrispondenza del punto Q diventa:

$$C_Q = \frac{1}{4\pi} \ln \operatorname{Sh}^2 \frac{\pi x_Q}{2a} + \frac{3}{4} \frac{x_Q}{a} \quad (30)$$

Si ottiene, pertanto:

$$\Delta h(Q) = a \left[C_P - \frac{1}{2\pi} \ln \operatorname{Sh} \frac{\pi R_o}{2a} - \frac{3}{4} \frac{R_o}{a} \right] \quad (33)$$

Sostituendo la (33) nell'espressione (27) si può scrivere, in definitiva:

$$p_w(P) = \gamma_w \left[H_o + x_P - aC_P + \frac{3}{4} R_o + \frac{a}{2\pi} \ln \operatorname{Sh} \frac{\pi R_o}{2a} \right] \quad (34)$$

che, nota la grandezza a , fornisce l'espressione della pressione neutra, seppure approssimata, in forma esplicita, valida per qualsiasi punto del dominio del moto.

Si osservi che alla medesima espressione (34) si perviene anche quando il punto Q giace sul ramo negativo dell'asse x , com'era peraltro da attendersi.

4. Analisi dei risultati

A parziale riepilogo di quanto esposto, si propongono, sinteticamente, le espressioni del-

e sostituendo l'espressione (26) nella (25), si ottiene:

$$p_w(P) = \gamma_w [H_o + x_P - \Delta h(Q)] \quad (27)$$

L'espressione della perdita di carico $\Delta h(Q)$, in corrispondenza del punto Q, posto sul ramo positivo dell'asse x , è la seguente:

Utilizzando la (30), si può riscrivere l'espressione (29) nel modo seguente:

$$\Delta h(Q) = aC_Q - \frac{a}{2\pi} \ln \operatorname{Sh} \frac{\pi R_o}{2a} + \frac{3}{4} R_o \quad (31)$$

Dal momento che, per ipotesi, la linea passante per i punti P e Q è una linea equipotenziale, è valida la seguente identità:

$$C_P = C_Q \quad (32)$$

le grandezze di maggiore interesse ai fini applicativi.

La larghezza a della fascia di terreno interessato dal moto si può calcolare, risolvendo la seguente equazione:

$$H_o - \frac{3}{4} R_o = \frac{a}{2\pi} \ln \frac{a}{\pi R_o} \quad (12)$$

La massima altezza b della linea libera sull'asse della galleria è data da:

$$b = a (\ln 2) / \pi.$$

La portata filtrante q da un tronco di galle-

ria di lunghezza unitaria, in un terreno di permeabilità k , si calcola con la semplice formula

$$q = k \cdot a \quad (9)$$

$$p_w(P) = \gamma_w \left[H_0 + x_p - aC_p + \frac{3}{4} R_0 + \frac{a}{2\pi} \ln \operatorname{Sh} \frac{\pi R_0}{2a} \right] \quad (34)$$

dove la costante C_p è data dalla (22).

Infine la cadente piezometrica J , anch'essa in

$$J = \frac{3}{4} \cos \alpha + \frac{1}{8} \frac{\left[\operatorname{Sh} \left(\frac{\pi x}{a} \right) \right] \cos \alpha + \left[\sin \left(\frac{\pi y}{a} \right) \right] \sin \alpha}{\operatorname{Ch}^2 \left(\frac{\pi x}{2a} \right) - \cos^2 \left(\frac{\pi y}{2a} \right)} \quad (18)$$

essendo α l'angolo che la tangente alla linea di flusso, nel punto P , forma con l'asse x .

Le equazioni e le formule innanzi richiamate sono state utilizzate per la valutazione e la discussione dei risultati.

In fig. 3 sono riportati i valori della massima estensione orizzontale a del campo di filtrazione, in funzione della pressione in galleria, espressa come altezza piezometrica. I calcoli sono stati effettuati per quattro valori del raggio R_0 , rispettivamente di 1, 2, 3 e 4 m.

Si osserva che l'ampiezza a cresce con H_0 e può raggiungere valori piuttosto elevati, dell'ordine di parecchie decine di diametri. L'influenza del raggio R_0 risulta trascurabile per bassi valori dell'altezza H_0 . In ogni caso, a parità di H_0 , al crescere del raggio R_0 , il valore di a aumenta.

È importante osservare inoltre, che anche per elevati valori dell'ampiezza a del campo

La pressione neutra $p_w(P)$ in un generico punto P del campo di moto assume l'espressione approssimata seguente

un generico punto P del campo di moto, assume la seguente espressione:

di moto, nel caso in cui la permeabilità del terreno sia modesta, i valori della portata filtrante dalla galleria risultano molto piccoli. Ad esempio, se $a = 200$ m e $k = 10^{-6}$ cm/sec, si ottiene dalla relazione (9) $q = 2 \cdot 10^{-6}$ m³/sec per metro lineare di galleria. Per un tronco di lunghezza $L = 1000$ m, le perdite (portata filtrante) sono pari a $Q = q \cdot L = 2$ l/sec, e quindi sicuramente trascurabili rispetto alla portata che la galleria può convogliare.

Per quanto riguarda la pressione neutra p_w si è considerato, a titolo di esempio, il punto G di coordinate $x = 0$, $y = 20$ m indicato in fig. 4. Anche in questo caso, i calcoli sono stati effettuati per valori di H_0 compresi fra 10 m e 110 m e per i citati valori del raggio R_0 .

Si osservi, innanzitutto, che la pressione neutra è nulla se $y(G) \geq a/3$. Richiamando la (12a) e ponendo $a = 3 \cdot y(G) = 60$ m si ottiene,

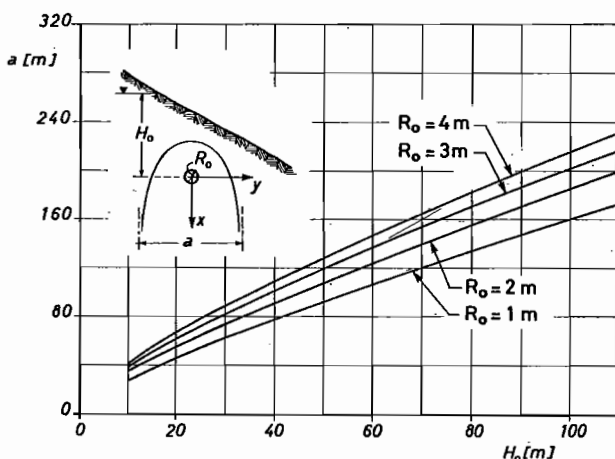


Fig. 3. - Valori della massima estensione orizzontale a del campo di filtrazione, in funzione dell'altezza H_0 .

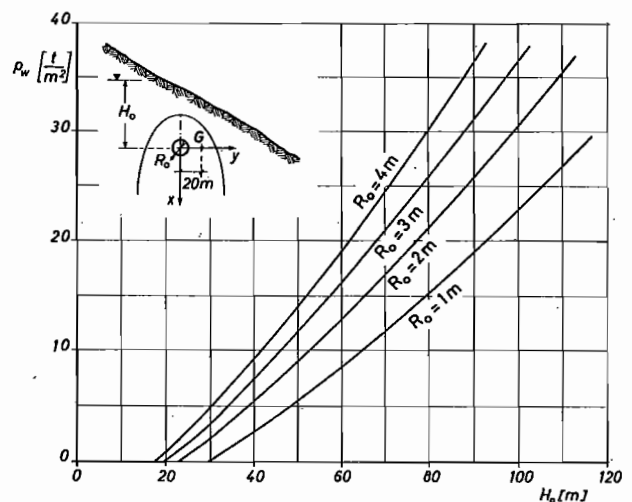


Fig. 4. - Valori della pressione neutra p_w nel punto G in funzione dell'altezza H_0 .

per assegnato R_0 , il valore particolare \bar{H}_0 , per il quale la linea libera passa per il punto G:

$$\bar{H}_0 = \frac{3}{4} R_0 + \frac{60}{2\pi} \ln \frac{60}{\pi R_0}$$

Il valore della pressione neutra cresce rapidamente con H_0 e risulta, inoltre, fortemente dipendente da R_0 , crescendo con quest'ultimo a parità di H_0 .

Lungo segmenti orizzontali, a varie profondità, la pressione neutra assume l'andamento indicato nel grafico di fig. 5, tracciato per $H_0 = 70$ m, $R_0 = 1$ m.

In fig. 6 sono rappresentati i valori della cadente piezometrica J , calcolati nel punto $B(R_0, 0)$. La cadente cresce con H_0 ; a parità di H_0 aumenta considerevolmente al diminuire del raggio R_0 . Ad esempio, per $R_0 = 0,1$ m, la cadente è superiore a 100, anche per modesti valori di H_0 .

L'andamento della cadente lungo l'asse x , è illustrato in fig. 7. Al crescere di x la cadente tende al valore unitario; inoltre, al tendere di x al valore $-b = -a(\ln 2)/\pi$ la cadente tende a zero, come già segnalato.

In prossimità della galleria, i valori della cadente risultano particolarmente elevati.

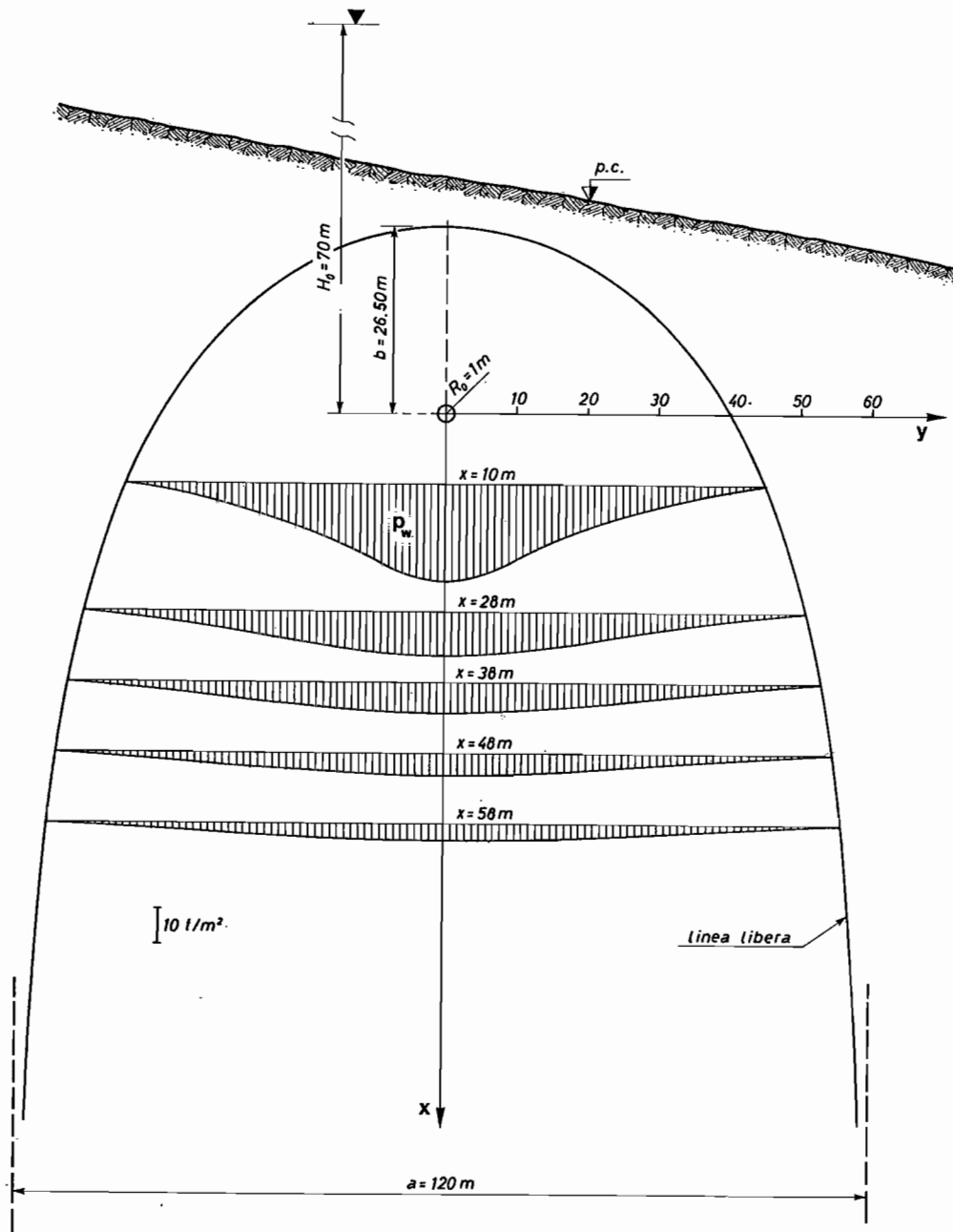


Fig. 5. - Distribuzione delle pressioni neutre lungo piani orizzontali.

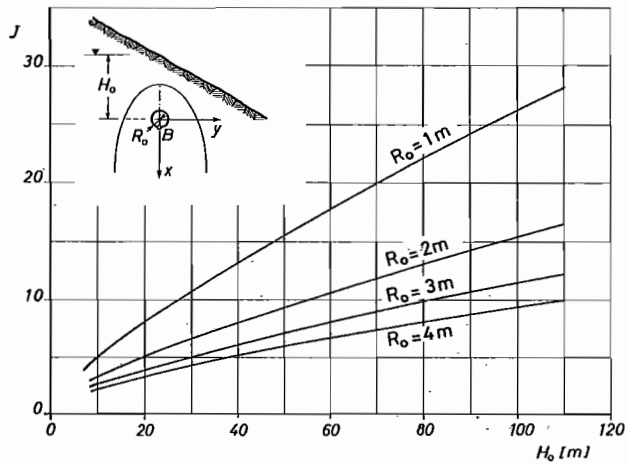


Fig. 6. - Valori della cadente piezometrica J nel punto B , in funzione dell'altezza H_0 .

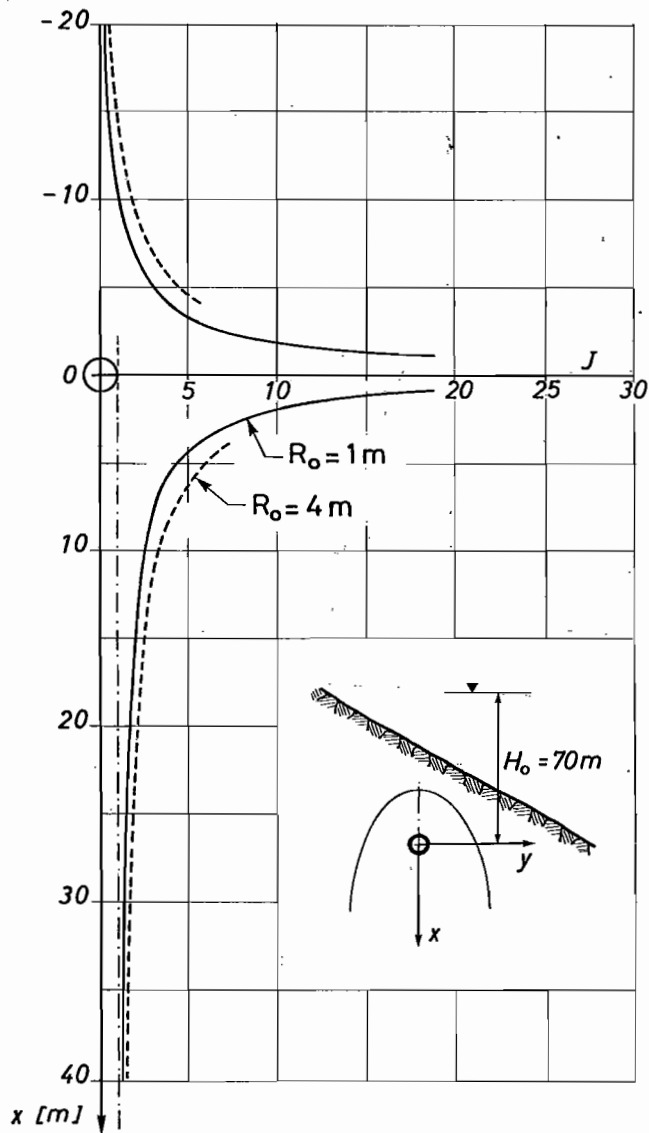


Fig. 7. - Andamento della cadente piezometrica J lungo l'asse x .

5. Conclusioni

Lo studio dei processi di deformazione indotti nello scheletro solido del terreno dal moto dell'acqua ha assunto particolare rilievo con lo sviluppo dei metodi e delle tecniche di intervento e di lavoro nel sottosuolo per la realizzazione di manufatti sotterranei, che spesso modificano — in maniera diversa nelle fasi di scavo, di posa in opera dei rivestimenti e di esercizio — il regime delle pressioni neutre.

L'analisi del comportamento terreno-rivestimento, sotto ipotesi del tutto generali, richiede la soluzione di complessi problemi di interazione, nei quali la conoscenza del processo di filtrazione assume notevole importanza. Quest'ultimo è condizionato, a sua volta, dalle deformazioni, che hanno luogo nel terreno e nel rivestimento.

Le soluzioni rigorose sono rare, sia pure in presenza di condizioni iniziali ed al contorno particolarmente semplici.

Il problema viene perciò risolto, generalmente, con metodi approssimati, rinunciando all'analisi in forma « accoppiata ».

Seguendo questa via, l'analisi del moto di filtrazione da gallerie in pressione, oggetto del presente studio, è stata condotta nell'ipotesi semplificativa che lo scheletro solido del terreno sia incomprimibile e che la galleria non sia rivestita ovvero che il rivestimento presenti diffuse fessurazioni.

Prendendo le mosse da un precedente lavoro, sono state determinate — in forma chiusa — le espressioni analitiche della cadente piezometrica e della pressione neutra nel generico punto del campo di moto; è stato determinato, altresì, il valore della pressione del fluido in galleria, per il quale la linea libera risulta tangente alla superficie topografica.

Le nuove soluzioni, e quelle disponibili, sono state inquadrate organicamente allo scopo di consentire una prima utilizzazione per valutare, ad esempio, in presenza di liquidi inquinanti provenienti da gallerie o da tubazioni interrate in pressione, la forma e l'ampiezza della zona del sottosuolo interessata dal moto, nonché la portata filtrante.

La ricerca prosegue per lo studio dei fenomeni di erosione interna e per l'identificazione dei meccanismi di rottura, che potrebbero manifestarsi nel terreno per effetto delle elevate sollecitazioni indotte dal moto in presenza del manufatto.

Gli Autori hanno contribuito in egual misura allo sviluppo della ricerca.

BIBLIOGRAFIA

- BEAR J. (1972) - *Dynamics of fluids in porous media*. American Elsevier.
- BOUVARD M. (1975) - *Les fuites des galeries en charge en terrain sec. Rôle du revêtement, des injections, du terrain*. La Houille Blanche, n. 4, pp. 255-265.
- FEDERICO F. (1984) - *Il processo di drenaggio da una galleria in avanzamento*. Rivista Italiana di Geotecnica, n. 4, pp. 191-208.
- GIBSON R. E. (1974) - *The Analytical Method in Soil Mechanics*. Rankine Lecture, Geotechnique, Vol. 24, n. 2, pp. 115-140.
- POLUBARINOVA-KOCHINA P. Y. (1962) - *Theory of groundwater movement*. Princeton University Press.
- VALORE C., FEDERICO F. (1986) - *Instabilità dei versanti per effetto di filtrazioni da gallerie in pressione*. XVI Convegno Nazionale di Geotecnica, vol. 2, pp. 213-222, Bologna.
- VIGGIANI C. (1973) - *Tensioni e deformazioni indotte dal moto dell'acqua nei mezzi porosi*. Rivista Italiana di Geotecnica, n. 2-3, pp. 149-157.

ELENCO DEI SIMBOLI

a	massima estensione orizzontale del campo di moto
b	massima altezza della linea libera sull'asse della galleria
C	parametro che definisce la posizione della generica linea equipotenziale nel campo di moto
C_P, C_Q	valori del parametro C, rispettivamente in corrispondenza dei punti P e Q
C^*	valore critico del parametro C
e	base dei logaritmi naturali
$f(z)$	potenziale complesso
h	quota piezometrica
h_P	valore della quota piezometrica nel punto P
H_0	altezza piezometrica del fluido in galleria
H_0^*	valore critico dell'altezza H_0
$\bar{H}_0(G)$	valore di H_0 per il quale la linea libera passa per un assegnato punto G
i	unità immaginaria
J	cadente piezometrica
k	coefficiente di permeabilità
m	profondità dell'asse della galleria dal piano di campagna
p_w	pressione neutra
$p_w(P)$	valore della pressione neutra nel punto P
q	portata filtrante da un tronco di galleria di lunghezza unitaria
R_0	raggio dello scavo in assenza di rivestimento o quando quest'ultimo risulti infinitamente permeabile; raggio interno del rivestimento con coefficiente di permeabilità pari a quello del terreno
s	ascissa curvilinea misurata lungo una generica linea di flusso
u, v	componenti della velocità di filtrazione, rispettivamente secondo gli assi x, y
x, y	assi del sistema di riferimento
x_P	valore della coordinata x nel punto P
z	variabile complessa

α	angolo formato in un generico punto P dalla tangente alla linea di flusso passante per P con l'asse x
γ	argomento di un generico numero complesso
γ_w	peso specifico del liquido in galleria
Δh	variazione di quota piezometrica misurata lungo l'asse x dalla chiave della galleria alla sommità della linea libera
$\Delta h(Q)$	variazione di quota piezometrica misurata lungo l'asse x, dal contorno della galleria al punto Q
η	variabile adimensionale
λ, μ	parti, rispettivamente reale ed immaginaria, di un generico numero complesso
ξ	variabile adimensionale
ρ	modulo di un generico numero complesso
ϕ	potenziale della velocità di filtrazione
ψ	funzione di flusso
ω	parametro che definisce la posizione delle linee di flusso nel campo di moto.

APPENDICE

Determinazione del potenziale della velocità ϕ e della funzione di flusso ψ

Il potenziale complesso $f(z)$ del moto di filtrazione è espresso dalla relazione seguente [BOUVARD, 1975]:

$$f(z) = \frac{q}{2\pi} \cdot \ln \left(\text{Sh} \frac{\pi z}{2a} \right) + \frac{3q}{4a} z \quad (A1)$$

Com'è noto, il potenziale complesso è legato al potenziale della velocità ϕ ed alla funzione di flusso ψ dalla relazione:

$$f(z) = \phi + i\psi \quad (A2)$$

essendo i l'unità immaginaria e z la variabile complessa $z = x + iy$.

Si può scrivere, pertanto:

$$\frac{2\pi}{q} (\phi + i\psi) = \ln \left[\text{Sh} \frac{\pi}{2a} (x + iy) \right] + \frac{3\pi}{2a} (x + iy)$$

ovvero:

$$\frac{2\pi}{q} (\phi + i\psi) = \ln \left[\text{Sh} \frac{\pi}{2a} (x + iy) \right] + \frac{3\pi}{2a} (x + iy) \quad (A3)$$

La (A3) può risciversi come segue:

$$e^{\frac{2\pi\phi}{q}} \cdot e^{i \frac{2\pi\psi}{q}} = \left[\text{Sh} \frac{\pi}{2a} (x + iy) \right] + \frac{3\pi}{2a} (x + iy) \quad (A4)$$

Esplicitando l'espressione della funzione seno iperbolico, si ottiene:

$$\frac{2\pi\varphi}{q} \cdot e^{i\frac{2\pi\psi}{q}} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\pi x}{2a} \cdot e^{-\frac{\pi y}{2a}} - \frac{\pi x}{2a} \cdot e^{\frac{\pi y}{2a}} - i \frac{\pi y}{2a} \cdot e^{-\frac{\pi x}{2a}} - i \frac{\pi y}{2a} \cdot e^{\frac{\pi x}{2a}} \right) \cdot e^{\frac{3\pi x}{2a}} \cdot e^{i\frac{3\pi y}{2a}} \quad (A5)$$

Dalle formule di Eulero è noto che:

$$e^{ir} = \cos r + i \sin r \quad (A6,a)$$

$$e^{-ir} = \cos r - i \sin r \quad (A6,b)$$

Di conseguenza, la (A5) si riscrive nel modo seguente:

$$\frac{2\pi\varphi}{q} \cdot e^{i\frac{2\pi\psi}{q}} = \frac{1}{2} \left\{ e^{\frac{\pi x}{2a}} \left(\cos \frac{\pi y}{2a} + i \sin \frac{\pi y}{2a} \right) + e^{-\frac{\pi x}{2a}} \left(\cos \frac{\pi y}{2a} - i \sin \frac{\pi y}{2a} \right) \right\} + \left\{ e^{\frac{3\pi x}{2a}} \left(\cos \frac{3\pi y}{2a} + i \sin \frac{3\pi y}{2a} \right) \right\} \quad (A7)$$

Raggruppando opportunamente i vari addendi del secondo membro, la (A7) può essere trasformata nella relazione che segue:

$$\frac{2\pi\varphi}{q} \cdot e^{i\frac{2\pi\psi}{q}} = \left[\cos \frac{\pi y}{2a} \cdot \text{Sh} \frac{\pi x}{2a} + i \sin \frac{\pi y}{2a} \cdot \text{Ch} \frac{\pi x}{2a} \right] \cdot e^{\frac{3\pi x}{2a}} \left[\cos \frac{3\pi y}{2a} + i \sin \frac{3\pi y}{2a} \right] \quad (A8)$$

Ponendo, per semplicità:

$$\xi = \frac{\pi x}{2a} \quad (A9,a)$$

$$\eta = \frac{\pi y}{2a} \quad (A9,b)$$

e sviluppando il prodotto dei termini del secondo membro, la (A8) diventa:

$$\frac{2\pi\varphi}{q} \cdot e^{i\frac{2\pi\psi}{q}} = e^{3\xi} [\cos \eta \cos 3\eta \text{Sh} \xi + i \sin \eta \cos 3\eta \text{Ch} \xi + i \cos \eta \sin 3\eta \text{Sh} \xi + i^2 \sin \eta \sin 3\eta \text{Ch} \xi] \quad (A10)$$

Separando i coefficienti delle parti reale ed immaginaria del secondo membro della (A10) si ottiene la seguente relazione:

$$\frac{2\pi\varphi}{q} \cdot e^{\frac{2\pi\psi}{q}} = e^{3\xi} [\cos \eta \cos 3\eta \text{Sh} \xi - \sin \eta \sin 3\eta \text{Ch} \xi] + i \{ e^{3\xi} [\sin \eta \cos 3\eta \text{Ch} \xi + \cos \eta \sin 3\eta \text{Sh} \xi] \} \quad (A11)$$

Ponendo, pertanto:

$$\lambda = e^{3\xi} \cdot [\cos \eta \cos 3\eta \text{Sh} \xi - \sin \eta \sin 3\eta \text{Ch} \xi] \quad (A12,a)$$

$$\mu = e^{3\xi} \cdot [\sin \eta \cos 3\eta \text{Ch} \xi + \cos \eta \sin 3\eta \text{Sh} \xi] \quad (A12,b)$$

e sostituendo le (A12a, b) nella (A11) si ottiene:

$$\frac{2\pi\varphi}{q} \cdot e^{i\frac{2\pi\psi}{q}} = \lambda + i\mu \quad (A13)$$

Si ricordi, adesso, che un qualsiasi numero complesso $\lambda + i\mu$ può essere posto in forma polare $\lambda + i\mu = \rho e^{i\gamma}$, mediante le relazioni seguenti:

$$\rho = \sqrt{\lambda^2 + \mu^2} \quad (A14,a)$$

$$\gamma = \text{arctg} \frac{\mu}{\lambda} \quad (A14,b)$$

La (A13), pertanto, può essere riscritta come segue:

$$\frac{2\pi\varphi}{q} \cdot e^{i\frac{2\pi\psi}{q}} = \rho e^{i\gamma} \quad (A15)$$

Da quest'ultima, separando la parte reale da quella immaginaria, si ottengono le due relazioni seguenti:

$$\frac{2\pi\varphi}{q} = \rho \quad (A16,a)$$

$$\frac{2\pi\psi}{q} = \gamma \quad (A16,b)$$

da cui, richiamando le (A14a, b):

$$\varphi = \frac{q}{2\pi} \ln \sqrt{\lambda^2 + \mu^2} \quad (A17,a)$$

$$\psi = \frac{q}{2\pi} \text{arctg} \left(\frac{\mu}{\lambda} \right) \quad (A17,b)$$

Elevando al quadrato ambo i membri delle (A12a, b) e sommando membro a membro, si ottiene:

$$\lambda^2 + \mu^2 = (e^{3\xi})^2 [\text{Sh}^2 \xi \cos^2 \eta + \text{Ch}^2 \xi \sin^2 \eta]$$

da cui:

$$\ln \sqrt{\lambda^2 + \mu^2} = 3\xi + \ln \sqrt{\text{Sh}^2 \xi \cos^2 \eta + \text{Ch}^2 \xi \sin^2 \eta} \quad (A18)$$

Poiché, per definizione, risulta:

$$\text{Ch}^2 \xi = 1 + \text{Sh}^2 \xi \quad (\text{A19})$$

si ottiene, in definitiva,

$$\varphi = \frac{q}{2\pi} [\ln \sqrt{\text{Sh}^2 \xi + \sin^2 \eta} + 3\xi]$$

ovvero

$$\varphi(x, y) = \frac{q}{2\pi} \ln \sqrt{\text{Sh}^2 \frac{\pi x}{2a} + \sin^2 \frac{\pi y}{2a}} + \frac{3qx}{4a} \quad (\text{A20})$$

che rappresenta l'espressione della funzione potenziale di velocità di filtrazione.

Dividendo, adesso, membro a membro, le relazioni (A21a, b), si può scrivere:

$$\frac{\mu}{\lambda} = \frac{\sin \eta \cos 3\eta \text{Ch} \xi + \cos \eta \sin 3\eta \text{Sh} \xi}{\cos \eta \cos 3\eta \text{Sh} \xi - \sin \eta \sin 3\eta \text{Ch} \xi} \quad (\text{A21})$$

Dividendo per $\cos \eta \cos 3\eta \text{Sh} \xi$ il numeratore ed il denominatore del secondo membro della (A21), si ottiene:

$$\frac{\mu}{\lambda} = \frac{\text{tg} \eta + \text{tg} 3\eta \text{Th} \xi}{\text{Th} \xi - \text{tg} \eta \text{tg} 3\eta}$$

Di conseguenza, la (A17b) può riscriversi nel modo seguente:

$$\psi(x, y) = \frac{2\pi}{q} \arctg \frac{\text{tg} \frac{\pi y}{2a} + \text{Th} \frac{\pi x}{2a} \text{tg} \frac{3\pi y}{2a}}{\text{Th} \frac{\pi x}{2a} - \text{tg} \frac{\pi y}{2a} \text{tg} \frac{3\pi y}{2a}} \quad (\text{A22})$$

La ψ è la funzione di flusso.

SUMMARY

Pore water pressures associated with leakage from pressure tunnels

The construction of a tunnel modifies under different aspects the stress and deformation states in the surrounding ground.

To analyze the deformation process and to search for possible failure mechanisms it is necessary to refer to the effective stresses; to this end a knowledge of the pore pressure increments within a significant zone around the tunnel is required.

Construction operations below groundwater level induce significant modifications in the piezometric heads; as a consequence, a process of gravity drainage takes place, with water flowing into the tunnel. On the contrary, when an unlined tunnel conveys a fluid, with heads higher than those at the interface lining-tunnel, seepage takes place from the tunnel into the surrounding ground.

$$P_w(P) = \gamma_w \left[H_0 + x_p - aC_p + \frac{3}{4} R_0 + \frac{a}{2\pi} \ln \text{Sh} \frac{\pi R_0}{2a} \right]$$

$$J = \frac{3}{4} \cos \alpha + \frac{1}{8} \frac{\left[\text{Sh} \left(\frac{\pi x}{a} \right) \right] \cos \alpha + \left[\sin \left(\frac{\pi y}{a} \right) \right] \sin \alpha}{\text{Ch}^2 \left(\frac{\pi x}{2a} \right) - \cos^2 \left(\frac{\pi y}{2a} \right)}$$

In both cases the presence of the tunnel induces variations of pore pressures which may extend to considerable distances from the ground-tunnel interface.

The stress and deformation analysis of a ground-tunnel system under general boundary conditions is a highly difficult problem of soil-structure interaction, the solution of which is also dependent on the character of the seepage flow from the ground to the tunnel or viceversa, the last being conditioned by the state of service of the lining, as far as cracks and consequent leakage are concerned. It is convenient, therefore, to work preliminarily on some seepage problems, the solution of which can be obtained in closed form under some reasonable simplifying assumptions.

According to this research tendency, a first problem has been studied in a previous paper, dealing with the non-steady seepage process toward an unlined tunnel, progressing at constant rate in a homogeneous isotropic soil below ground water level [FEDERICO, 1984].

A closed form solution has been found under the simplifying assumption of one — dimensional, almost horizontal or vertical flow.

In the present paper the steady state two-dimensional seepage process from a circular tunnel toward the surrounding soil is analyzed assuming that the lining is absent or badly cracked, under the condition that the soil — which is initially dry and with undeformable solid skeleton — is homogeneous and isotropic, and that no capillary phenomena occur.

The analysis starts from the results obtained by BOUVARD [1975], who presented the equations of the free surface and of the equipotential lines.

The seepage field from a tunnel of radius R_0 , due to a fluid pressure $\gamma_w \cdot H_0$, is bounded by a free surface, whose equation is:

$$x(y) = \frac{2a}{\pi} \text{arcTh} \frac{3 \sin^2 \left(\frac{\pi y}{2a} \right) - \cos^2 \left(\frac{\pi y}{2a} \right)}{3 \cos^2 \left(\frac{\pi y}{2a} \right) - \sin^2 \left(\frac{\pi y}{2a} \right)}$$

where a is the maximum width of the flow field (fig. 1) obtained by solving the following equation:

$$H_0 - \frac{3}{4} R_0 \approx \frac{a}{2\pi} \ln \frac{a}{\pi R_0}$$

and γ_w is the unit weight of the fluid.

The flow region (fig. 1) reaches the height $b = a(\ln 2)/\pi$ over the axis of the tunnel. The rate of discharge q from unit length of tunnel in a medium of permeability k , can be computed by means of the simple formula $q = k \cdot a$.

The analytic expressions for the pore pressure p_w and the hydraulic gradient J in the point $P(x, y)$ have been derived and reported in the paper and have the following expressions, respectively:

In the mentioned equations α is the inclination of the tangent to flow line over the abscissa x ; C_p is a parameter, defining the position of the equipotential line in the flow domain.

The results of simple computations shows the influence of fluid pressure and tunnel radius on lateral and upward extension of the seepage field (fig. 3), on the pore pressure (fig. 4) and hydraulic gradient (fig. 6).

Examples of distributions of pore pressures and hydraulic gradient values along given lines are presented in fig. 5 and 7, respectively.

The analysis points out that the seepage field extends to great distances and that pore pressure and hydraulic gradient values can be very high, with possible consequences for the safety of the ground-tunnel system, even when the rate of leakage from the tunnels is negligible.

Lavoro svolto nell'ambito del Nucleo di Studio sulle Grandi Strutture del CNR presso la II Università di Roma.