

# ON THE DANGER OF RUPTURE ON THE INTERFACE BETWEEN FRESH AND SALT WATER FOR PENETRATING WELLS IN KARST GEOHYDROLOGICAL STRATUM

FERDINANDO FREGA, GIUSEPPE CORRADO FREGA & MARIO FALACE

*(\*)Università della Calabria - Dipartimento di Ingegneria Civile - Via Pietro Bucci, Cubo 42 B - 87036 Arcavacata di Rende (CS), Italy  
Corresponding author: mario.falace@gmail.com*

## EXTENDED ABSTRACT

Il moto di un liquido di peso specifico  $\gamma$  adagiandosi su un altro liquido di peso specifico  $\gamma^* > \gamma$  è stato indagato, seguendo il Muskat, nell'ipotesi che i filetti liquidi giungano ad un pozzo di prelievo seguendo le stesse traiettorie che seguirebbero se l'interfaccia fra i due liquidi si mantenesse piana durante il moto.

È interessante tuttavia indagare se in una falda in pressione di spessore costante poggiante su acqua salata con interfaccia orizzontale allo stato di equilibrio si possa escludere il pericolo di rottura dell'interfaccia con intrusione entro il pozzo di acqua salata. Ricavata la condizione di equilibrio vengono considerati i possibili andamenti di curve che obbediscono alla disequazione di trascinarsi del liquido di peso specifico maggiore.

Queste possibili curve risentono delle pendenze che assume l'interfaccia fra i due liquidi quando si emungono le varie portate da far affluire al pozzo di prelievo. Esistono allora vari comportamenti del fenomeno. Con pendenze moderate non vi è pericolo di rottura generante l'intrusione salina. In corrispondenza di pendenze molto forti la curva si presenta concava verso l'alto e diverge anziché convergere verso il pozzo.

Nella condizione limite di equilibrio la portata massima del pozzo corrispondente alla pendenza piezometrica che rispetta la condizione di equilibrio in riferimento alle varie profondità di penetrazione del pozzo nella falda.

Gli inevitabili errori connessi con i vari procedimenti grafici illustrati nelle figure non inficiano tuttavia il valore di un orientamento di massima che consente di ottenere indicazioni circa la massima portata compatibile con le installazioni di sollevamento.

Queste ultime hanno assunto negli ultimi tempi caratteristiche di potenza e di portata capaci purtroppo di sconvolgere la qualità delle acque da emungere.

L'argomento della protezione delle acque di falda dall'intrusione salina è di grande attualità ed importanza per l'approvvigionamento idrico. Infatti le acque di falda costituiscono un'importante riserva idrica nel contrasto dei crescenti fenomeni siccitosi. Pertanto questi studi rivestono, da sempre, una certa importanza per il decisivo apporto che le succitate acque sotterranee possono dare all'incremento delle risorse idriche.

Infatti le acque presenti nelle falde acquifere sono quelle che per infiltrazione attraverso i suoli costituiti da sabbia, ghiaia o da altri elementi minuti attraversano detto mezzo poroso fino a incontrare strati non permeabili e accumulano costituendo preziosi depositi per l'ecosistema e per le attività antropiche, sia dal punto di vista qualitativo (essendo relativamente limitate le fonti di inquinamento) sia quantitativo in quanto le formazioni di suolo di tipo alluvionale sopracitate costituiscono una parte rilevante della superficie terrestre. Pertanto dette falde acquifere, se ben valorizzate, costituiscono una riserva importante e sostanzialmente distribuita.

Tale preziosa riserva risulta ancora più preziosa laddove, anche a causa di parametri geomorfologici, la disponibilità idrica superficiale è ridotta, per cui riveste grande interesse il corretto sfruttamento e la protezione della citata risorsa sotterranea.

In conclusione, si osserva che la presenza di un'interfaccia alla base di strati di acqua che trasportano acqua che galleggia sull'acqua di mare, quando questa raggiunge la terra, è puramente un'ipotesi teorica. Infatti siffatta interfaccia è sostituita da una vera e propria zona di diffusione salina, il cui spessore è funzione della permeabilità dei mezzi porosi di trasporto dell'acqua e dell'estensione dell'alimentazione del torrente oltre ad altri fattori tra cui i mezzi di raccolta. Risulta molto importante il valore della permeabilità ( $f$ ) ed il rapporto di pompaggio dal pozzo. L'estrazione dai pozzi per uso domestico con forte pompaggio a rapporto  $q_c$  porta la contaminazione della falda da parte dell'acqua salata. In molti paesi sono stati tuttavia osservati fenomeni come quelli sopra descritti basati sull'idrogeologia carsica della costa adriatica pugliese. Forse a conferma dei risultati teorici sopra menzionati, il prof. Vincenzo Cotecchia, dall'osservazione del comportamento di circa duecento pozzi nella regione Puglia, ha stabilito, sia per motivi pratici che per evitare l'intrusione di acqua salata, che il cono di intrusione deve essere tenuto all'interno di una profondità di penetrazione dell'ordine di  $0.1 H - 0.2 H$ . L'intrusione dell'acqua marina, salata, in falde acquifere sulla fascia costiera è spesso descritta nella letteratura tecnica come riportato in trattazione e nella bibliografia citata. In questi studi si possono rinvenire alcune situazioni di tipo locale.

**ABSTRACT**

The necessary conditions are found in which in a stratum of uniform thickness under pressure, resting on salt water with horizontal interface in state of equilibrium, it is possible know the danger of rupture of this interface with intrusion of salt in the well.

**KEYWORDS:** penetrating well, non penetrating well, cone of intrusion of salt water, cone of intrusion of salt water in karst coast

**INTRODUCTION**

Many studies have been carried on the movement of a liquid of specific weight  $\gamma$  on a another liquid of specific weight  $\gamma^* > \gamma$ .

After a preliminary study by ORABONA & COTECCHIA (1959), DAMIANI (1963), following Muskat, have described the rupture of intrusion cone in the case of a non-penetrating and penetrating wells for various values.

**PRELIMINARY STUDY**

The rupture condition as already described in introduction doesn't seem easy to adapt to practical applications.

Let us, then, consider as in Figure 1 a stratum under pressure, consisting of a liquid of specific weight  $\gamma$  initially in equilibrium condition, confined by two horizontal planes, one constituent the roof, the other resting on another stratum of heavier liquid characterized by  $\gamma^*$ .

In the stratum of specific weight  $\gamma$  in the section contained between two velocity equipotential, the propelling inclination will be:

$$J = \Delta h / \Delta s \tag{1}$$

When volume  $\tau$  in the considered space contains the liquid of specific weight  $\gamma^*$ , the drawing force per unit of weight of the liquid displaced gives as resultant:

$$\gamma \tau J = \gamma \tau \Delta h / \Delta s \tag{2}$$

the gravity component is given by:

$$(\gamma^* - \gamma) = \Delta h^* / \Delta s \tag{3}$$

where  $\Delta h^*$  is the length of the section of the line of flow between the two velocity equipotential above mentioned.

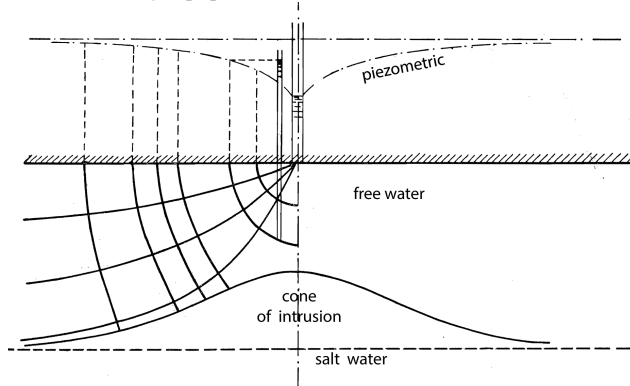


Fig. 1 - Scheme of cone of intrusion

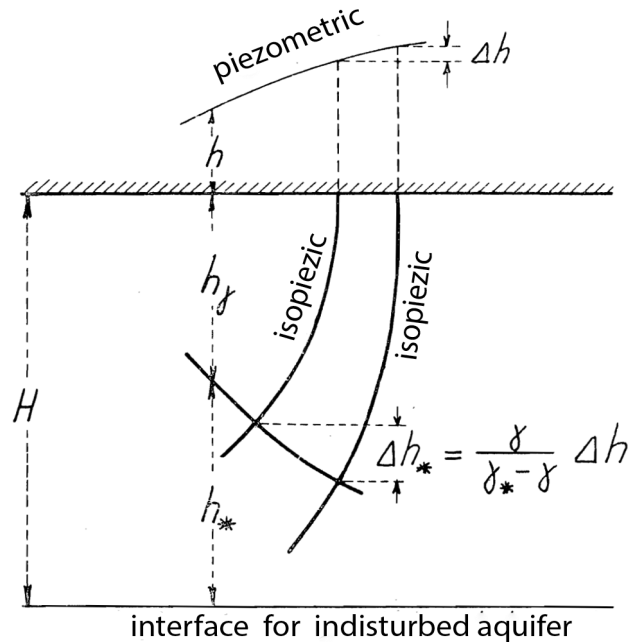


Fig. 2 - Isopiezic and equipotential lines

Therefore taking

$$\lambda = \gamma / (\gamma^* - \gamma) \tag{4}$$

The condition of dragging or equilibrium is

$$\Delta h^* < -\lambda \Delta h \tag{5}$$

or

$$|J^*| < |\lambda J| \tag{6}$$

in which the equilibrium corresponds to the sign of equality.

The piezometric line of the heavier liquid, for the height of the liquid of specific weight  $\gamma$  is

$$h + h_g + (\gamma^* / \gamma) h^* = 0 \tag{7}$$

Then the condition of equilibrium is

$$d(dx [h + h_g + (\gamma^* / \gamma) h^*]) = 0 \tag{8}$$

Now, from Figure 2, H being constant, we have

$$(dh/dx) + (dh^*/dx) = 0 \tag{9}$$

and therefore also

$$(dh/dx) - (dh^*/dx) + (\gamma^* / \gamma)(dh^*/dx) = 0 \tag{10}$$

from which relation (5) results with lower sign.

**THE POSSIBLE TREND OF A CURVE WHICH OBEYS CONDITIONS (5) WITH THE LOWER SIGN**

For the curve requested it is necessary to distinguish the case of quite small inclination JK and the case of marked slope J\*.

In the first case the line of interface follows very closely the line of the piezometric load acting on the upper limit, but when that approaches the axis of the well, the slope decreases until it disappears.

In Figure 3 we can describe with the line ABC that movement.

For very marked slopes the curve diverges instead of converging toward the well as A'B' in Figure 3.

**THE CASE OF PENETRATIONS**

In case of non-penetrating well, with  $b=0$  penetration, to determining the isopiezic lines by the use of Tab. 1 given in (DAMIANI, 1963) adapted by the adoption of the equipotential zero revised and corresponding to the interface at a distance from the well axis equal to the of the high  $H$  at the undisturbed stratum, we have the situation in Figure 4.

We consider also that the draw-back of the well could be disregarded and therefore the relative velocity equipotential coincide with the vertical one.

In Figure 4 the thin line marks the velocity equipotential and thick line the trace of the interface surface for the various hypotheses as below for  $q_c$  (vertical rate):

- line a: undisturbed stratum;
- line b: pumping at a rate less than the critical  $q_c$ ;
- line c: pumping at a rate equal to  $q_c$ ;
- line d: pumping at salt water into the well.

The limit line  $c$  meets the well axis at the high  $H$  of the undisturbed interface. This height corresponds to isopiezic 9, at the height of  $0.567 H$ .

In case of karst coast of Apulia region an acceptable figure for  $\lambda$  is 35; therefore for the isopiezic 9 in question we have the height

$$0.567 H / 35 = 0.0162 H \quad (11)$$

and dividing by 9 we find us between two equipotential lines of whole number the equidistance of isopiezic to be  $0,0018 H$ . For this value we can write for the critical rate of pumping  $q_c$

$$(q_c / fH^2) = 0,0449 \quad (12)$$

where the coefficient of permeability being indicated by  $f$ .

For example with  $f = 0,001 \text{ m/s}$  and  $H = 50 \text{ m}$   $q_c$  would be about  $0.11 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Follow the same procedure for a penetrating well with  $b=0.2$  a dept of  $0.20 H$ , using the Tab. 2, we have the relative drawing (Fig. 5) in which are present the same lines of those traced in Figure 4.

The limit line meets the axis at the height of  $0.505 H$ , which in the graph corresponds to the number equipotential of the value 7.4. The piezometric variation between two whole number

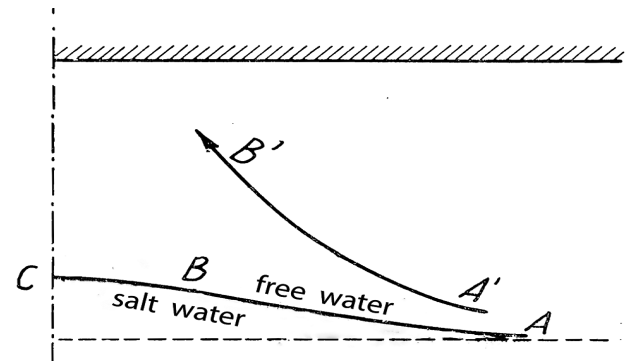


Fig. 3 - Possible trend of a curve

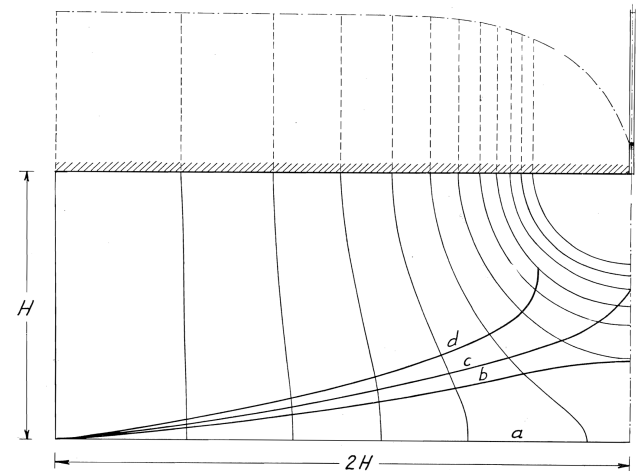


Fig. 4 - Scheme of cone of intrusion in case of non penetration well

equipotential is therefore

$$(0.505/35) H (1/7.4) = 0.00195 H \quad (13)$$

The equidistance assumed for the equipotential is 0.05 instead of 0.5 as before. Therefore the ratio assumed equal to

$$0.0018 H / 0.05 \quad (14)$$

must be substituted by

$$0.00195 H / 0.05 \quad (15)$$

For the value  $q_c$  finally results :

$b = 0$

$y / x$	0	0.01	0.02	0.2	0.4	0.6	1.0	1.4	1.8	2.0	2.2
0.00	$\infty$	199.7595	99.7595	9.7479	4.7137	2.9929	1.5057	0.7456	0.2290	0.0193	- 0.1681
0.05	39.7612	38.9843	36.9001	9.4508	4.6765	2.9825	1.5040	0.7452	0.2289	0.0192	- 0.1681
0.10	19.7656	19.6663	19.3770	8.6980	4.5698	2.9522	1.4990	0.7440	0.2286	0.0190	- 0.1683
0.20	9.7834	9.7709	9.7337	6.8422	4.2073	2.8407	1.4799	0.7395	0.2272	0.0181	- 0.1689
0.40	4.8573	4.8557	4.8509	4.3151	3.3368	2.5098	1.4153	0.7234	0.2221	0.0149	- 0.1713
0.60	3.3234	3.3229	3.3214	3.1337	2.6918	2.1943	1.3402	0.7033	0.2152	0.0102	- 0.1748
0.80	2.6995	2.6992	2.6984	2.5982	2.3342	1.9885	1.2818	0.6859	0.2083	0.0050	- 0.1791
0.90	2.5649	2.5647	2.5640	2.4787	2.2484	1.9352	1.2647	0.6799	0.2052	0.0025	- 0.1813
1.00	2.5202	2.5199	2.5193	2.4385	2.2186	1.9158	1.2573	0.6763	0.2026	0.0000	- 0.1837

Tab. 1 - Curve in case of non penetrating well

$$q_c / fH^2 = 0.0433 \tag{16}$$

With the before indicated value for  $f$  and  $H$

$$q_c = 0.108 \text{ m}^2/\text{s} \tag{17}$$

**CONCLUSIONS**

Finally, we observe that the presence of an interface at the base of water-carrying water tables floating on sea-water, when this last reaches land, is purely a theoretical assumption. In fact the interface is substituted with a real zone of saline diffusion, the thickness of which is a function of the permeability of the water-carrying means and of the extent of feeding of the creek in addition to other factors including the means of collection.

It is very important the value of permeability ( $f$ ) and the ratio of pumping from the well.

The extraction from wells for domestic use with strong pumping at  $q_c$  ratio brings the bad contamination of aquifer with the saline water.

In many countries however were observed phenomena like the above mentioned based on the karst hydrogeology of the Adriatic coast.

Perhaps in conformation of the theoretical results above, COTECCHIA (1963) from the observation of the behaviour of about

$$b = 0,2$$

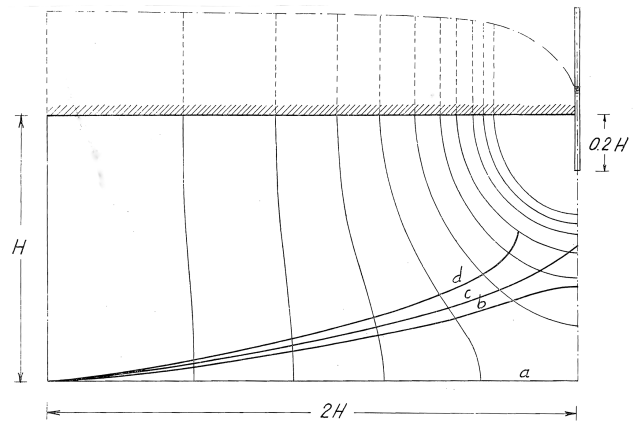


Fig. 5 - Scheme of cone of intrusion in case of penetration well

200 wells in Apulia establishes on a practical grounds, that for avoid the intrusion of salt water, the intrusion cone should be kept at a penetration of the order of  $0.1 H-0.2 H$ .

The sea water encroachment in costal aquifers is often described in the technical literature (KOHONT, 1964; SOUZA & VOSS, 1986; TROISI *et alii*, 1992).

In this studies we can find some local situations.

y / x	0	0.01	0.02	0.20	0.40	0.60	1.00	1.40	1.80	2.00	2.20
0.00	$\infty$	3.18556	2.58507	0.74538	0.39472	0.25627	0.13056	0.06460	0.01917	0.00057	— 0.01615
0.10	$\infty$	3.06177	2.46327	0.70821	0.38573	0.25332	0.13005	0.06449	0.01914	0.00055	— 0.01616
0.20	$\infty$	1.88617	1.58534	0.60888	0.36145	0.24505	0.12856	0.06415	0.01906	0.00051	— 0.01618
0.21	1.59603	1.51434	1.38729	0.59700	0.35842	0.24399	0.12836	0.06410	0.01905	0.00051	— 0.01618
0.22	1.30570	1.28085	1.22419	0.58501	0.35532	0.24289	0.12816	0.06406	0.01904	0.00050	— 0.01618
0.40	0.46683	0.46658	0.46585	0.39537	0.29453	0.21934	0.12349	0.06297	0.01877	0.00037	— 0.01625
0.60	0.30274	0.30268	0.30252	0.28277	0.23938	0.19349	0.11758	0.06154	0.01841	0.00019	— 0.01635
0.80	0.24254	0.24251	0.24211	0.23278	0.20792	0.17623	0.11306	0.06040	0.01813	0.00005	— 0.01640
0.90	0.23002	0.23000	0.22993	0.22188	0.20042	0.17182	0.11182	0.06008	0.01805	0.00001	— 0.01642
1.00	0.22603	0.22601	0.22595	0.21837	0.19797	0.17034	0.11140	0.05998	0.01803	0.00000	— 0.01642

Tab. 2 - Curve in case of penetrating well

**REFERENCES**

COTECCHIA V. (1963) - *Geohydrological aspects of the cretaceous limestones aquifer in Apulia and their bearing of the practical avoidance of sea water contamination in extraction from wells and springs*. ONU Special Found Technical Meeting of Karst Hydrology, Athens, Greece.

DAMIANI A. (1963) - *Sulla rotture del cono di intrusione nei pozzi penetranti in falde acquifere poggianti in acqua marina di invasione del continente*. Ingegneria Civile, 6,

KOHONT F. A. (1964) - *The flow of fresh water and salt water in he Biscayne aquifer of the Miami area, Florida*. Sea Water in Costal Aquifers Geological Survey, Water supply Paper 1613-c, Washington, D.C.

ORABONA E. & COTECCHIA V. (1959) - *La stratificazione salina nelle falde con superfici di fondo rappresentate dall'acqua marina e precisazioni sul comportamento idraulico dei pozzi relativi a siffatte falde*. Ingegneria Sanitaria, 1,

SOUZA W. R. & VOSS C. I. (1986) - *Modeling a regional aquifer containing a narrow transition between fresh water and salt water using solute transported. Part II - Analysis of a costal aquifer system*. 9<sup>th</sup> SWIM Proceedings.

TROISI S., FALICO C. & COSCARELLI R. (1992) - *La simulazione dell'intrusione marina in falde costiere. Applicazione alla falda di Reggio Calabria*. Atti del XIV Corso di Aggiornamento in Tecniche per la Difesa dall'Inquinamento.

Received April 2017 - Accepted November 2017