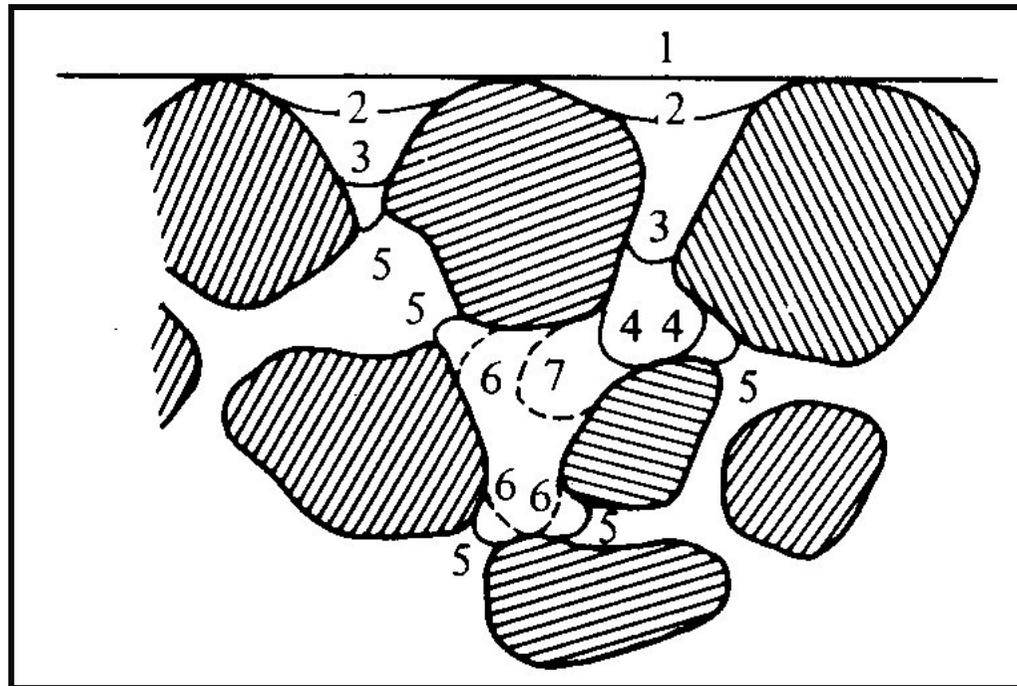


IL MOTO NELLA ZONA INSATURA

➤ La ritenzione dell'umidità

Le superfici da 1 a 4 rappresentano le successive fasi di drenaggio dell'acqua da un mezzo poroso. Al crescere del drenaggio l'acqua si ritira negli spazi interstiziali con superfici a curvatura crescente ed aumentando il carico di suzione.



Le superfici da 5 a 7 rappresentano le successive fasi di ripristino dell'acqua nel mezzo poroso. Al progredire del processo l'acqua rientra negli spazi interstiziali con superfici a curvatura decrescente e diminuendo il carico di suzione.

IL MOTO NELLA ZONA INSATURA

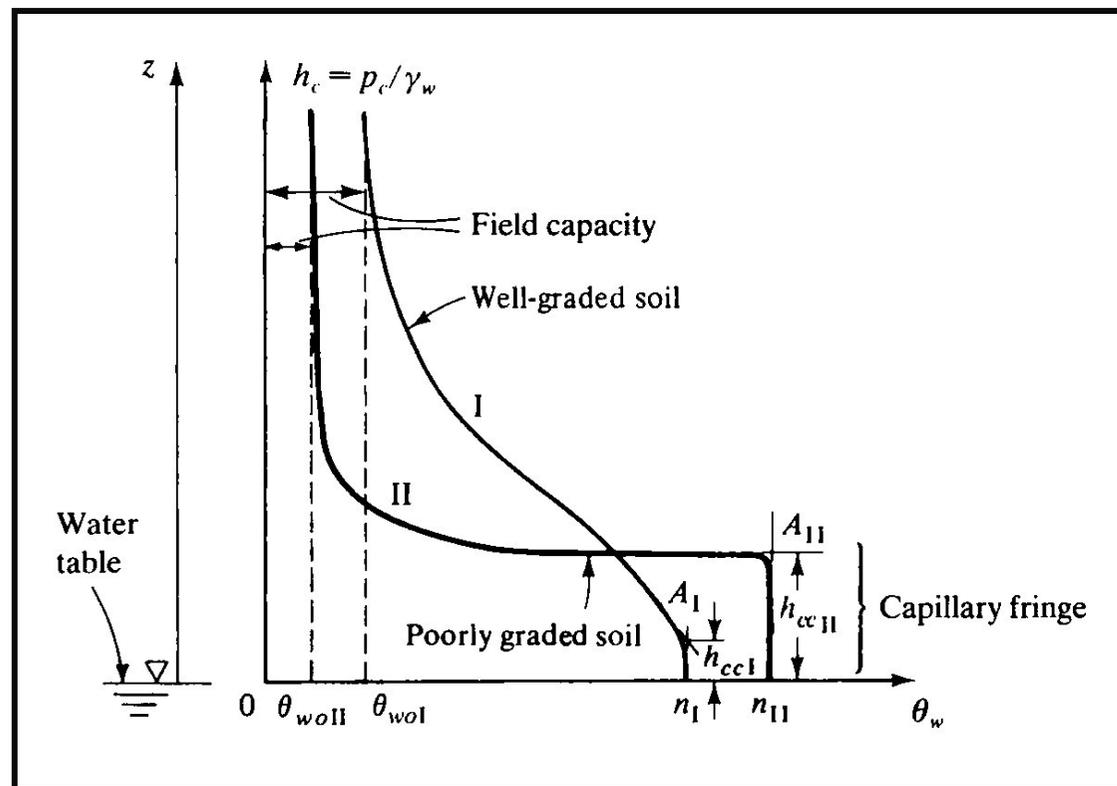
➤ La curva di ritenzione

Le curve di ritenzione rappresentano la quantità d'acqua che viene ritenuta nel terreno dalle forze di capillarità che agiscono in senso opposto alla gravità.

Il punto A rappresenta il carico capillare critico h_{cc} .

A partire da terreno saturo, se si provoca un piccolo carico capillare non si verifica alcuna intrusione di aria fino a raggiungere il valore critico.

Superato il valore critico i pori di dimensioni maggiori cominciano a drenare l'acqua e la diminuzione di θ_w diviene rilevante.



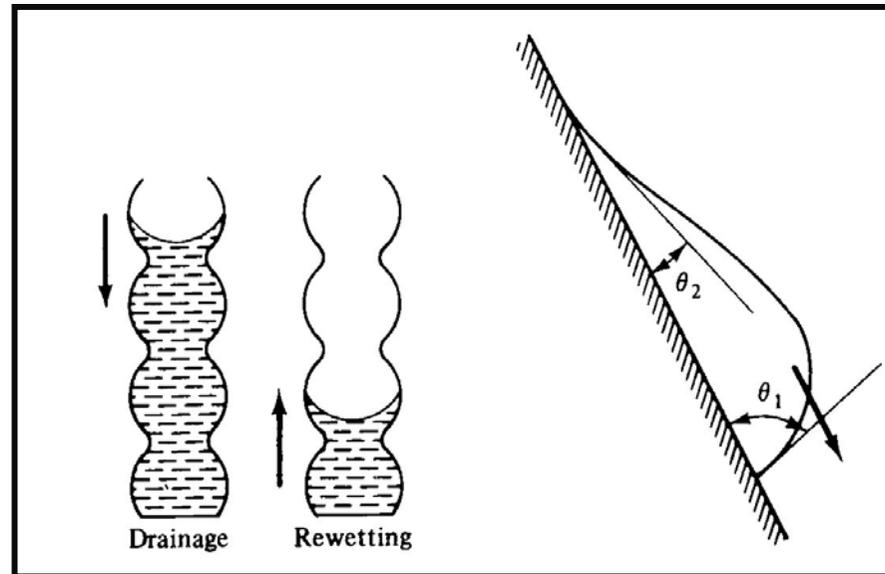
La forma della curva di ritenzione, e quindi il valore della pressione critica, dipende dalla distribuzione delle dimensioni dei meati e dalla forma caratteristica dei meati del mezzo poroso.

IL MOTO NELLA ZONA INSATURA

➤ Fenomeno di Isteresi

Se al drenaggio si fa seguire un processo di imbibizione si osserva che la curva di ritenzione $h_c = h_c(\theta_w)$ risulta diversa da quella ottenuta durante la fase di drenaggio.

Si verifica infatti un fenomeno di **ISTERESI**, dovuto a due diversi fattori:



- **Effetto INCHIOSTRO**: quando l'acqua rientra in canali molto stretti richiede un incremento locale di suzione. Nel suolo si verifica un fenomeno di instabilità in cui l'interfaccia non può avanzare fino a quando non viene riempito anche un meato vicino. L'equilibrio viene raggiunto con un diverso valore di θ_w

Effetto GOCCIA: l'angolo di contatto di una superficie che avanza è diverso da quello di una superficie che arretra.

IL MOTO NELLA ZONA INSATURA

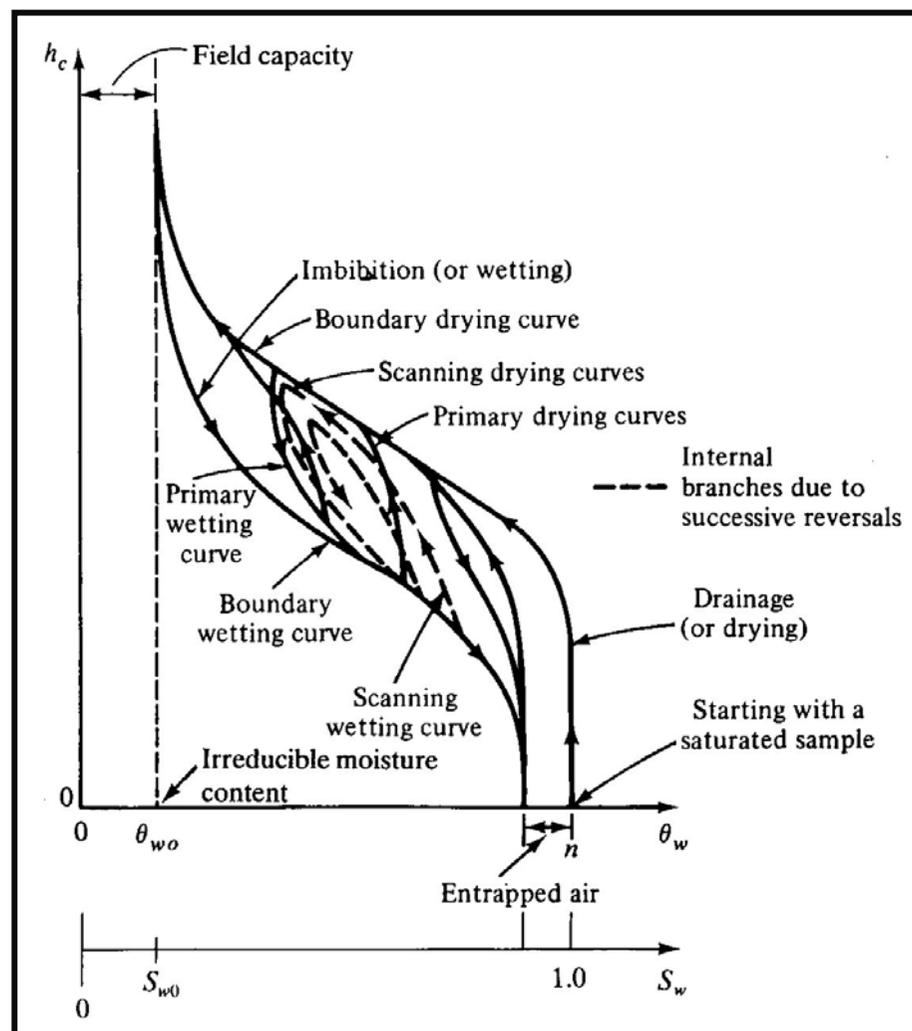
➤ Curva di Isteresi

Nella CURVA di ISTERESI, le componenti dovute al drenaggio ed all'imbibizione formano un anello chiuso.

È possibile iniziare il processo di drenaggio in qualsiasi punto della curva di imbibizione ed il processo di imbibizione da qualsiasi punto della curva di drenaggio (linee tratteggiate).

Pertanto, la relazione tra pressione capillare e saturazione espressa dalla curva di ritenzione dipende anche dalla storia di drenaggio-imbibizione del campione di terreno in esame.

Per assegnata pressione di capillarità, si ottiene una maggiore saturazione durante il drenaggio rispetto alla fase di imbibizione.



IL MOTO NELLA ZONA INSATURA

➤ Equazioni del moto

Sembra naturale cercare di estendere il concetto di permeabilità utilizzato per il moto in mezzo saturo anche nel caso insaturo, modificandone il valore per tener conto della presenza del secondo fluido (aria) che occupa parte degli spazi interstiziali.

Anche in questo caso infatti le equazioni del moto possono essere derivate mediando le equazioni di bilancio della quantità di moto per ciascuna fase.

Si può ancora utilizzare dunque l'equazione di Darcy generalizzata per descrivere separatamente il moto delle due fasi, con la differenza che in questo caso la permeabilità di ciascuna fase sarà funzione del grado di saturazione:

$$\mathbf{q}_w = -\mathbf{K}_w(S_w) \cdot \nabla \phi_w$$

$$\mathbf{q}_a = -\mathbf{K}_a(S_a) \cdot \nabla \phi_a$$

in cui \mathbf{K}_w e \mathbf{K}_a sono le conduttività idrauliche effettive dell'acqua e dell'aria.

Ad esempio per l'acqua:

$$K_w = k_w \cdot \frac{\rho_w g}{\mu}$$

IL MOTO NELLA ZONA INSATURA

➤ Permeabilità Relativa

In caso di mezzo isotropo può essere utile fare riferimento alla PERMEABILITA' RELATIVA, definita come rapporto tra la permeabilità effettiva e quella a saturazione:

$$k_{wr} = \frac{k_w(S_w)}{k_w|_{S_w=1}}, \quad k_{ar} = \frac{k_a(S_a)}{k_a|_{S_a=1}}$$

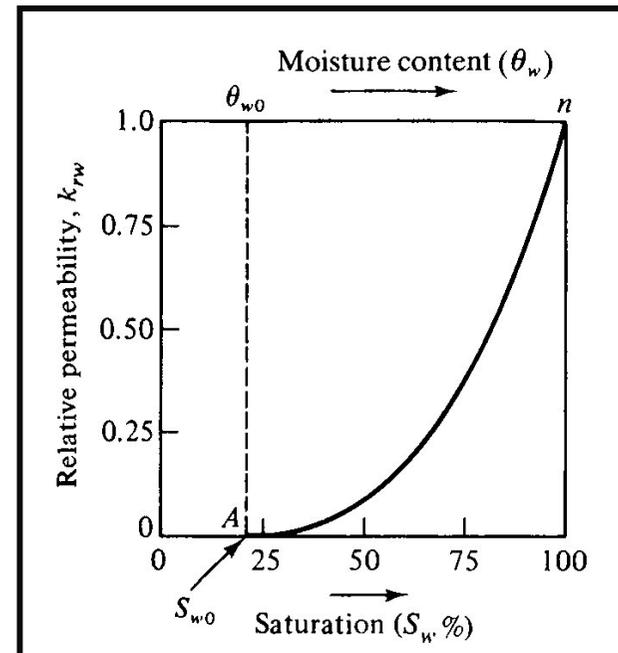
In figura è rappresentata la variazione della permeabilità relativa con il grado di saturazione S_w per un mezzo poroso isotropo in base alle esperienze di Wyckoff e Botset (1936).

Diversi autori hanno proposto relazioni analitiche tra la conduttività idraulica effettiva ed il grado di saturazione:

Childs e Collis-George (1950)

$$K_w(S_w) = B\theta_w^3 / M^2$$

con M = area superficiale specifica della fase solida e B una costante.



IL MOTO NELLA ZONA INSATURA

➤ Conduttività Idraulica Relativa

Irmay (1954) propone una relazione simile ma riferita alla conduttività idraulica relativa:

$$K_w(S_e) = K_0 S_e^3$$

in cui:

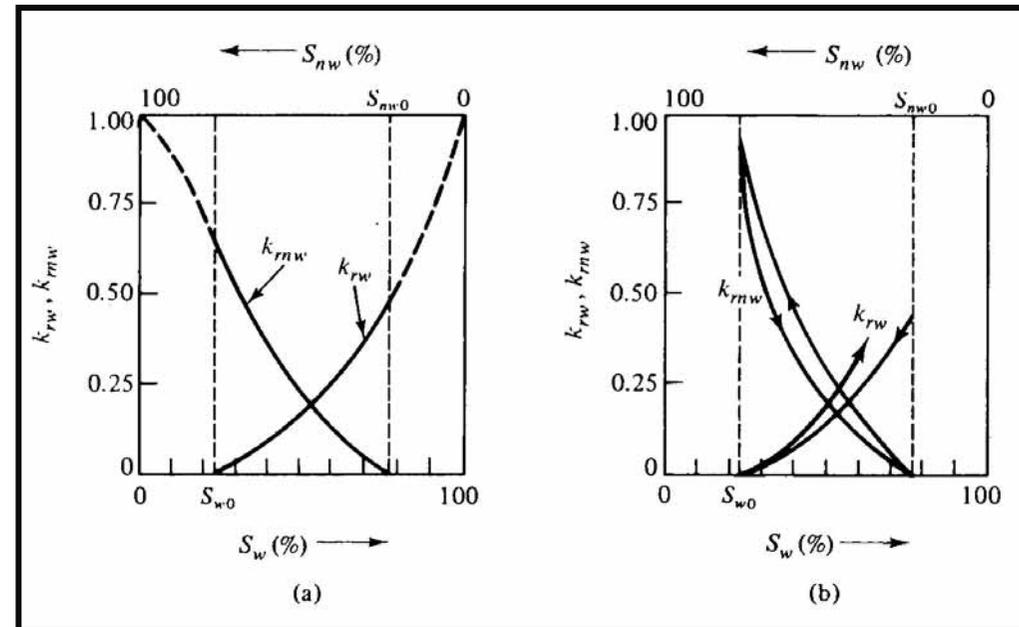
$$S_e = \frac{(S_w - S_{w0})}{(1 - S_{w0})}$$

rappresenta la SATURAZIONE EFFETTIVA e K_0 è la conduttività idraulica satura.

Brooks e Corey (1964) hanno proposto una forma generalizzata espressa in funzione della pressione di capillarità nella forma:

$$k_{wr} = (p_{cc} / p_c)^{(2+3\lambda)/\lambda} \quad p_c \geq p_{cc}$$

in cui p_{cc} è la pressione di capillarità critica e λ un fattore di distribuzione della dimensione dei meati.



(w = wetting phase; nw = non-wetting phase)

IL MOTO NELLA ZONA INSATURA

➤ Conduttività Idraulica Relativa

Gardner (1958) propone una relazione empirica:

$$K_w(\psi) = \frac{a}{b + \psi^m}$$

in cui a , b ed m sono costanti, con $m \approx 2$ per suoli compatti ed $m \approx 4$ per la sabbia, oppure:

$$K_w(\psi) = K_0 \exp(-a\psi)$$

che non interpreta molto bene i dati sperimentali ma è conveniente nella modellazione analitica e numerica.

Burdine (1953) propone una relazione tra permeabilità relativa e curva di ritenzione, $p_c(S_w)$:

$$k_{wr}(S_e) = S_e^2 \cdot \int_0^{S_e} \frac{dS_w}{p_c^2(S_w)} \bigg/ \int_0^1 \frac{dS_w}{p_c^2(S_w)}$$

Mualem (1976) suggerisce invece la relazione:

$$k_{wr}(S_e) = S_e^{0.5} \cdot \int_0^{S_e} \frac{dS_w}{p_c(S_w)} \bigg/ \int_0^1 \frac{dS_w}{p_c(S_w)}$$

(entrambe richiedono di conoscere la curva di ritenzione $p_c = p_c(S_w)$).