POLITECNICO DI TORINO
Repository ISTITUZIONALE

Ottimizzazione della stima della pressione capillare di soglia di caprock mediante metodo dinamico

Original
Ottimizzazione della stima della pressione capillare di soglia di caprock mediante metodo dinamico / Vespo, V.S., Messori, A., Musso, G.. - ELETTRONICO. - 1:(2024), pp. 105-110. (Incontro Annuale dei Ricercatori di Geotecnica Gaeta 04/09/24 - 06/09/24).

Availability:
This version is available at: 11583/2994204 since: 2024-11-06T16:18:14Z

Publisher:
Edizione AGI

Published
DOI:

Terms of use:

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

Publisher copyright

(Article begins on next page)

27 November 2026

OTTIMIZZAZIONE DELLA STIMA DELLA PRESSIONE CAPILLARE DI SOGLIA DI CAPROCK MEDIANTE METODO DINAMICO

Vincenzo Sergio Vespo
Politecnico di Torino
vincenzosergio.vespo@polito.it

Alessandro Messori
Eni S.p.A.
Alessandro.messori@eni.com

Guido Musso
Politecnico di Torino
guido.musso@polito.it

Sommario

Il metodo dinamico permette di stimare la pressione capillare di soglia di caprock in tempi molto più rapidi, qualche ora dall'iniezione del fluido non bagnante, rispetto al metodo standard (step-by-step). Affinché la stima della pressione capillare di soglia sia accurata è necessario rispettare le assunzioni su cui si basa il metodo, andando a identificare la portata efficace d'acqua uscente corrispondente all'inizio della penetrazione del fluido non bagnante. Tale operazione risulta non semplice sperimentalmente, data l'entità esigua e non costante di volume uscente dal provino, a causa della bassa porosità e permeabilità intrinseca che contraddistingue i caprocks. Tale difficoltà viene "convenzionalmente" superata considerando il valore costante di portata efficace, ottenibile a tempi maggiori all'istante di incipiente penetrazione del fluido non bagnante. Ciò comporta però una sovrastima della pressione capillare di soglia. Nella presente nota vengono forniti suggerimenti per l'ottimizzazione della stima della pressione capillare di soglia mediante il metodo dinamico.

1. Introduzione

Ogni anno nel mondo vengono emessi nell'atmosfera circa 40 miliardi di tonnellate di CO_2, contro una soglia di 18 miliardi di tonnellate che consentirebbe di non aggravare ulteriormente i cambiamenti climatici in atto (Pörtner et al., 2022). Per limitare le emissioni di CO_2 in atmosfera sono state proposte diverse strategie, una delle quali è la cattura e lo stoccaggio di anidride carbonica in formazioni geologiche profonde (CCS). La capacità di stoccaggio geologico stimata nel mondo è di circa 10^{11} tonnellate di CO_2, superiore a quella necessaria per limitare il riscaldamento globale a 1.5°C entro il 2100. Pertanto, una scelta accurata del sito di stoccaggio e un'attenta gestione della fase di iniezione della CO_2 nel sottosuolo, permetterebbe l'isolamento permanente della CO_2. I siti idonei allo stoccaggio sono principalmente le falde acquifere saline profonde e i giacimenti esausti di idrocarburi e gas naturale (Metz et al., 2005).

La presenza di rocce di copertura (caprock) è un prerequisito essenziale per l'accumulo naturale di fluidi nel sottosuolo prima e per poter considerare qualsiasi ambiente ideale per lo stoccaggio sotterraneo di CO_2 poi. Queste rocce sono caratterizzate da un'elevata pressione capillare di soglia, e da una bassa permeabilità e porosità. Queste proprietà permettono al caprock di intrappolare la CO_2 che si accumula al di sotto di esso, essendo la CO_2 meno densa dell'acqua. Dunque per raggiungere l'obiettivo di isolare permanentemente la CO_2 nel sottosuolo, è essenziale che non si verifichino perdite che comportino la riemissione di CO_2 nell'atmosfera.

Nei primi dieci anni di stoccaggio, il meccanismo principale che impedisce la migrazione della CO_2 dalla roccia serbatoio all'atmosfera è l'intrappolamento stratigrafico. Tuttavia, perdite attraverso il caprock possono avvenire se la sovrappressione della CO_2 supera la pressione capillare di soglia della roccia di copertura (p_c^*). Pertanto è necessario determinare la pressione capillare di soglia del caprock, in modo da potere definire un'adeguata pressione di iniezione della CO_2. Negli ultimi vent'anni, la misurazione della pressione capillare di soglia è diventata di conseguenza un importante argomento di ricerca su cui si sono concentrati gli sforzi di diversi gruppi di ricerca (ad esempio Egermann et al., 2006; Boulin et al., 2013; Amann-Hildenbrand et al., 2015; Kawaura et al., 2014).

La determinazione diretta della pressione capillare di soglia in laboratorio richiede un aumento graduale della pressione del fluido non bagnante a monte di un campione saturo di acqua. Il metodo richiede un deflusso continuo, che può richiedere giorni per stabilirsi a causa delle caratteristiche idrauliche e la bassa porosità che contraddistingue i caprocks (Boulin et al., 2013). La procedura è molto precisa ma lunga, soprattutto quando vengono applicati piccoli incrementi di pressione. Ad esempio, il test su Opalinus Clay in Amann-Hildenbrand et al. (2015), permeabilità intrinseca $k = 10^{-21}$ m^2, ha avuto una durata di 150 giorni.

Per ridurre le tempistiche necessarie alla determinazione della pressione capillare di soglia di caprocks, diverse metodologie alternative al metodo diretto (step-by-step) sono state proposte, tra cui il metodo dinamico (Egermann et al., 2006). Poiché questo metodo alternativo non è progettato per determinare direttamente la sovrappressione minima che consente il flusso del fluido non bagnante attraverso il provino, la sua interpretazione si basa su assunzioni che hanno un impatto sulla stima (Vespo et al., 2024).

Questa nota si propone di investigare i processi fisici che avvengono durante le prove eseguite secondo il metodo dinamico. Per lo scopo, è stato implementato un modello numerico sul software agli elementi finiti Comsol Multiphysics® per esplorare i limiti e i vantaggi della metodologia e per proporre azioni utili per ottimizzare la stima della pressione capillare di soglia.

2. Metodo dinamico

Il metodo dinamico è stato proposto per la prima volta da Egermann et al. (2006), e consiste nell'iniettare il fluido non bagnante a monte del campione saturo d'acqua ad una pressione costante (p_{nw}^{inlet}), tale che la differenza di pressione imposta tra monte e valle del provino ($\Delta p_t = p_{nw}^{inlet} - p_w^{outlet}$) sia maggiore di p_c^*. Inizialmente, il circuito idraulico di drenaggio a monte del provino è saturo di acqua, pertanto si impone un flusso monofase di fluido bagnante. Dalla misura della portata in uscita (Q_w) si determina la permeabilità intrinseca del provino (k):

$$k = \frac{\mu_w L}{A} \frac{Q_w}{\Delta p_t} \tag{1}$$

dove L è la lunghezza del provino, A è l'area della sezione del provino, μ_w è la viscosità dinamica dell'acqua.

In seguito, si procede con l'iniezione del fluido non bagnante. Quando quest'ultimo raggiunge la superficie del provino, si verifica una significativa diminuzione della portata d'acqua uscente Q_w^{eff} , a causa del salto di pressione capillare all'interfaccia tra acqua e fluido non bagnante.

Egermann et al. (2006) postulano l'esistenza di un fronte netto di penetrazione "tipo pistone" del fluido non bagnante, che divide il volume del provino in una parte satura di fluido non bagnante e una satura di acqua. L'ingresso del fluido non bagnante nei pori comporta un salto di pressione in corrispondenza del fronte ($p_c^\circ = p_{nw}^{front} - p_w^{front}$), con p_c° assunto dagli Autori pari alla pressione capillare di soglia del mezzo poroso p_c^*:

$$\begin{gathered} \Delta p_t = p_{nw}^{inlet} - p_w^{outlet} = \left(p_{nw}^{inlet} - p_{nw}^{front}\right) + \left(p_{nw}^{front} - p_w^{front}\right) + \left(p_w^{front} - p_w^{outlet}\right) \\ \Delta p_t = \Delta p_{nw} + p^\circ{}_c + \Delta p_w \end{gathered} \tag{2}$$

dove Δp_{nw} è la differenza di pressione alle estremità del volume di provino satura di fluido non bagnante e Δp_w è la differenza di pressione alle estremità del volume di provino saturo di acqua.

Nel determinare p_c° gli Autori considerano gli istanti iniziali nei quali il fluido non bagnante permea solo l'ingresso del provino (da cui $\Delta p_{nw} = 0$), e determinano Δp_w dalla misura della portata d'acqua uscente Q_w^{eff} :

$$\Delta p_w = \frac{\mu_w L}{k_{\text{int}} A} Q_w^{eff} \tag{3}$$

Combinando la (1), la (2) e la (3) si ottiene p_c°:

$$p^\circ_c = \Delta p_t - \Delta p_w = \frac{\mu_w L}{kA}\left(Q_w - Q_w^{eff}\right) = \Delta p_t \left(1 - \frac{Q_w^{eff}}{Q_w}\right) \tag{4}$$

Il metodo richiede quindi la valutazione del solo rapporto Q_w^{eff}/Q_w, oltre di Δp_t, per stimare la pressione capillare di soglia del materiale.

3. Modello numerico

La fase di iniezione del fluido non bagnante effettuata secondo il metodo dinamico è stata simulata numericamente con il codice FEM Comsol Multiphysics®, impiegando un sistema accoppiato di equazioni differenziali costituito dal bilancio di massa dell'acqua (5) e dal bilancio di massa del fluido non bagnante (6):

$$\phi\rho_w \frac{\partial S_w}{\partial\left(p_{nw}-p_w\right)} \frac{\partial\left(p_{nw}-p_w\right)}{\partial t} + \phi S_w \beta_w \rho_w \frac{\partial p_w}{\partial t} + \nabla \cdot \left[-\frac{k k_{r,w} \rho_w}{\mu_w} \nabla\left(p_w + \rho_w g z\right) \right] = 0 \tag{5}$$

$$\phi\rho_{nw} \frac{\partial S_{nw}}{\partial\left(p_{nw}-p_w\right)} \frac{\partial\left(p_{nw}-p_w\right)}{\partial t} + \phi S_{nw} \beta_{nw} \rho_{nw} \frac{\partial p_{nw}}{\partial t} + \nabla \cdot \left[-\frac{k k_{r,nw} \rho_{nw}}{\mu_{nw}} \nabla\left(p_{nw} + \rho_{nw} g z\right) \right] = 0 \tag{6}$$

dove S_w e S_{nw} sono il grado di saturazione del fluido bagnante e non bagnante; $k_{r,w}$ e $k_{r,nw}$ sono la permeabilità relativa del fluido bagnante e non bagnante; ρ_w e ρ_{nw} sono la densità del fluido bagnante e non bagnante; p_w e p_{nw} sono la pressione del fluido bagnante e non bagnante; ϕ è la porosità del mezzo poroso; β_w e β_{nw} sono la compressibilità del fluido bagnante e non bagnante ($\beta_w = 4.5 \cdot 10^{-10}$ Pa^{-1}); μ_{nw} è la viscosità dinamica del fluido non bagnante.

Le simulazioni sono state eseguite considerando un provino omogeneo aventi proprietà analoghe a quelle dell'Opalinus Clay Shale studiato da Favero & Laloui (2018): porosità pari a 0.18, permeabilità intrinseca pari a $1.5 \cdot 10^{-20}$ m^2. Come fluido non bagnante è stato considerata l'anidride carbonica in condizioni supercritiche "scCO$_2$" (a 35 °C, $\rho_{scCO_2} = 816$ kg/m^3, $\beta_{scCO_2} = 5 \cdot 10^{-9}$ Pa^{-1}, $\mu_{scCO_2} = 7.6 \cdot 10^{-5}$ Pa·s), essendo quest'ultima la condizione di stato alla quale la CO$_2$ si trova nella roccia serbatoio a profondità maggiori di 800 metri ($p_{scCO_2} > 7.37$ MPa, $T > 31$ °C). La curva di pressione capillare del materiale è stata implementata nel modello numerico mediante la relazione di Brooks & Corey (1964):

$$\hat{S}_w = \begin{cases} \left(\dfrac{p_b}{p_c}\right)^{\lambda} & \text{for } p_c \geq p_b \\ 1 & \text{for } p_c < p_b \end{cases} \tag{7}$$

dove λ e p_b sono parametri caratteristici del mezzo (pari rispettivamente a 0.65 e 6.23 considerando il sistema scCO$_2$/H$_2$O); p_c è la pressione capillare ($p_c = p_{nw} - p_w$); $\hat{S}_w$ è il grado di saturazione efficace ($\hat{S}_w = (S_w - S_{wr})/(1 - S_{wr})$); S_{wr} è il grado di saturazione residuo (posta pari a 0.03).

Coerentemente, la permeabilità relativa al fluido bagnante e non bagnante è stata definita secondo le leggi di Brooks & Corey (1966) di seguito riportate:

$$k_{r,w} = \left(\hat{S}_w\right)^{\frac{2+3\lambda}{\lambda}} \tag{8}$$

$$k_{r,nw} = \left(1-\hat{S}_w\right)^2 \left[1-\left(\hat{S}_w\right)^{\frac{2+\lambda}{\lambda}}\right] \tag{9}$$

Le analisi numeriche sono state condotte implementando un modello monodimensionale del provino avente un'altezza pari a 40 mm e un diametro di 20 mm (diametro considerato per la valutazione del volume uscente dal provino). La temperatura imposta nel simulare la fase di iniezione del fluido non bagnante è stata pari a 35 °C. Le seguenti condizioni iniziali sono state imposte per il fluido bagnante e non bagnante: p_w^0 = 15 MPa, p_{nw}^0 = 0 MPa. La pressione dell'acqua a valle è stata mantenuta pari a 15 MPa per tutta la simulazione. La fase inziale di flusso di acqua attraverso il provino è stata posta pari a 6 ore, con successiva fase di iniezione di $scCO_2$ alla medesima pressione, per successivi 21 giorni.

4. Risultati e discussione

Il parametro chiave nell'interpretazione del metodo dinamico (Eq. (4)) è il rapporto Q_w^{eff}/Q_w. In tutte le simulazioni, tale rapporto è risultato non costante, poiché la portata che si registra dopo che la $scCO_2$ raggiunge la superficie del provino evolve nel tempo. Identificare il momento esatto in cui valutare Q_w^{eff}/Q_w è cruciale per una stima accurata della pressione capillare di soglia col metodo dinamico. Secondo le ipotesi del metodo, la stima dovrebbe essere calcolata quando la penetrazione della $scCO_2$ è limitata, in modo che la caduta di pressione della fase non bagnante all'interno del provino possa essere considerata nulla ($\Delta p_{nw} = 0$).

La Figura 1 mostra l'evoluzione temporale del rapporto Q_w^{eff}/Q_w ricavato dalle analisi numeriche imponendo diversi valori di p_{nw}^{inlet}. Si può apprezzare che la portata efficace diminuisce con il tempo in tutti gli scenari, e tende a stabilizzarsi in tempi diversi a seconda della pressione p_{nw}^{inlet} applicata. Anche quando Δp_t è molto piccolo (cioè Δp_t = 0.67 MPa, p_{nw}^{inlet} = 15.67 MPa), il rapporto Q_w^{eff}/Q_w va a zero solo dopo una fase transitoria che dura circa 6 ore dal momento in cui la $scCO_2$ raggiunto la superficie del campione. Quando la $scCO_2$ raggiunge la superficie del provino l'acqua smette di fluire attraverso il campione, tuttavia inizialmente la pressione dell'acqua all'interno del campione è maggiore della pressione dell'acqua a valle del provino. Tale sovrapressione si dissipa col tempo finché la pressione dell'acqua risulta ovunque pari a quella imposta a valle. Solo a partire da questo momento il rapporto Q_w^{eff}/Q_w tende a zero. La dissipazione della pressione interstiziale richiede l'instaurarsi di un processo di flusso transitorio che generalmente dipende dalle proprietà idrauliche e meccaniche del mezzo poroso e dei suoi costituenti.

Quando la pressione capillare a monte è ben al di sotto del valore di soglia, come nello scenario con p_{nw}^{inlet} = 15.67 MPa, la $scCO_2$ non è in grado di penetrare all'interno del provino e, supponendo che non vi siano deformazioni di volume, il processo transitorio è controllato solo dalla comprimibilità e viscosità dell'acqua e dalla permeabilità del campione.

Per valori di p_{nw}^{inlet} inferiori a 23,71 MPa l'evoluzione temporale di Q_w^{eff}/Q_w è pressoché la stessa e, in particolare, la portata tende a zero nel tempo. Piccole differenze sono dovute solo all'effetto di una piccola quantità di $scCO_2$ che si accumula sulla superficie del provino senza effettivamente fluire al suo interno (cioè si desatura solo la superficie del campione). Come confermato dall'analisi numerica, in questi casi non si verifica alcuna penetrazione apprezzabile di $scCO_2$.

Per valori più alti di p_{nw}^{inlet} l'evoluzione temporale di Q_w^{eff}/Q_w segue solo inizialmente lo stesso andamento dei casi precedenti. L'istante in cui le soluzioni divergono è funzione di p_{nw}^{inlet}, cioè del Δp_t applicato al campione, e si riduce all'aumentare di Δp_t. Per valori di p_{nw}^{inlet} pari a 23.71 MPa, 28.4 MPa e 33.09 MPa, un valore pressoché costante di Q_w^{eff}, diverso da zero, viene raggiunto dopo circa 10 ore dal momento in cui la $scCO_2$ ha raggiunto la superficie del campione. Le notevoli differenze negli andamenti temporali di Q_w^{eff}/Q_w rispetto ai casi precedenti, e la persistenza di una portata efficace a tempi lunghi, è dovuta alla penetrazione di $scCO_2$. Questa analisi dei risultati numerici suggerisce che,

per soddisfare le ipotesi del metodo dinamico, Q_w^{eff}/Q_w dovrebbe essere valutato nell'istante temporale in cui tale rapporto diverge dal valore ottenuto applicando un Δp_t che non supera la pressione capillare di soglia, e che tale istante temporale indica l'inizio della penetrazione della $scCO_2$ all'interno del provino.

Ad esempio, per lo scenario con p_{nw}^{inlet} =23.71 MPa, Q_w^{eff}/Q_w dovrebbe essere preso a t_{inj} poco inferiore a 2 ore. Così facendo, tramite l'Eq. (4) si ottiene un valore di p_c° pari a 6.80 MPa, prossimo all'effettivo valore di pressione capillare di soglia del materiale, che è pari a 6.91 MPa (per maggiori dettagli consultare Vespo et al., 2024). Si osservi che p_c^* è maggiore di 6,70 MPa (ovvero p_{nw}^{inlet} = 21,70 MPa), valore di Δp_t per il quale, secondo l'interpretazione fornita in Figura 1, non si verifica alcun flusso di CO_2.

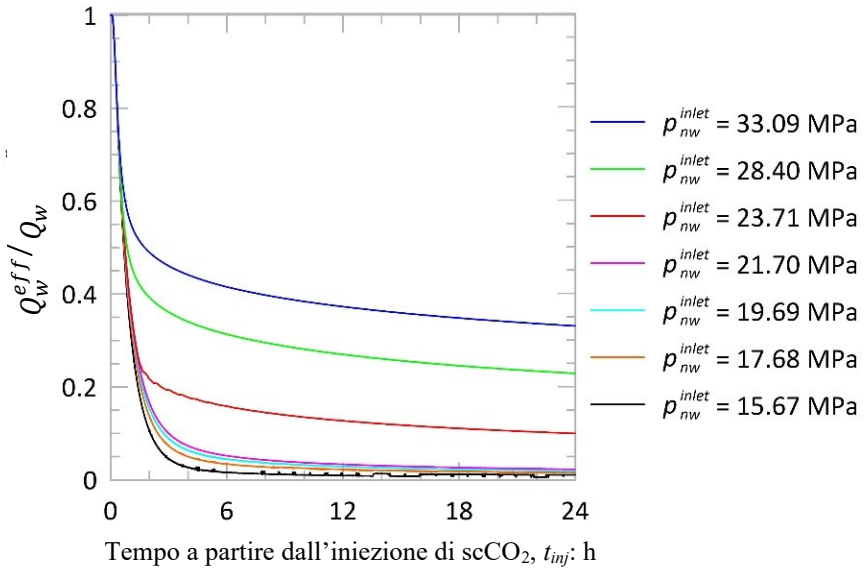

Figura 1. Evoluzione temporale del rapporto Q_w^{eff}/Q_w per differenti valori di pressione del fluido non bagnante a monte

In generale i risultati delle analisi numeriche hanno evidenziato che p_c^* può essere stimato piuttosto accuratamente con il metodo dinamico se la portata efficace Q_w^{eff} viene valutata in un istante temporale prossimo all'incipiente penetrazione del fluido non bagnante, confermando che il metodo dinamico è molto rapido, poche ore, rispetto al metodo step-by-step.

Sperimentalmente si potrebbe pensare di ripetere il test imponendo due diversi valori di Δp_t, uno ben al di sotto della pressione capillare di soglia, per determinare l'evoluzione temporale del rapporto Q_w^{eff}/Q_w in assenza di flusso di $scCO_2$, ed un altro al di sopra di p_c^* per identificare il valore di Q_w^{eff}/Q_w all'istante di inizio penetrazione del fluido non bagnante. Sebbene questa determinazione sia abbastanza semplice mediante analisi numeriche, non lo è sperimentalmente, dove una misurazione accurata del volume uscente di piccola entità è problematica, soprattutto considerando che all'istante di incipiente penetrazione del fluido non bagnante il volume uscente non è costante.

A causa di queste limitazioni, l'ipotesi "convenzionale" fatta in letteratura (ad esempio Boulin et al., 2013, Kawaura et al., 2014) è quella di considerare per la stima della pressione capillare di soglia con il metodo dinamico la portata efficace constante che si ottiene in tempi successivi rispetto all'istante di inizio penetrazione del fluido non bagnante. Poiché tale valore di Q_w^{eff} è però inferiore a quello che invece dovrebbe essere adottato, p_c° sovrastima l'effettiva pressione capillare di soglia del caprock. L'errore che si commette utilizzando il valore constante di Q_w^{eff} nell'Eq. (4) rispetto a p_c^* è riportato in Tabella 1.

La sovrastima di p_c° aumenta all'aumentare di Δp_t, perché la riduzione di Q_w^{eff}, che si verifica tra il momento in cui le ipotesi del metodo sono soddisfatte e il tempo di stabilizzazione della portata uscente, aumenta all'aumentare della pressione del fluido non bagnante applicata a monte (Figura 1). Un

suggerimento per ottimizzare prove sperimentale condotte secondo il metodo dinamico è di verificare il rapporto $p_c^{\circ}/\Delta p_t$, se 0,70 < $p_c^{\circ}/\Delta p_t$ < 1, la sovrastima sarà inferiore al 15%.

Tabella 1. Errore percentuale $\left(\frac{p_c^{\circ}-p_c^*}{p_c^*}\right)$ *usando il valore constante di* Q_w^{eff} *nell'Eq. (4)*

p_{nw}^{inlet} (MPa)		
23.71	28.40	33.09
error $\left(\frac{p_c^{\circ}-p_c^*}{p_c^*}\right)$: %		
13	50	75

5. Conclusioni

Le analisi numeriche hanno confermato che la stima della pressione capillare di soglia di caprocks mediante il metodo dinamico può essere ottenuta in tempi brevi, qualche ora a partire dall'istante di iniezione del fluido non bagnante. La portata efficace diminuisce durante le prime ore dopo l'iniezione del fluido non bagnante. Le ipotesi del metodo valgono all'istante di incipiente penetrazione del fluido non bagnante, che non è immediato, ma richiede una preventiva diminuzione della pressione dell'acqua a monte del campione. L'istante di incipiente penetrazione del fluido non bagnante dipende dalla pressione imposta a monte. La corrispondente portata efficace è difficile da valutare sperimentalmente e non è quella constante impiegata "convenzionalmente" in letteratura. L'utilizzo dell'approccio "convenzionale" comporta una sovrastima della pressione capillare di soglia, che aumenta all'aumentare della pressione del fluido non bagnante applicata a monte. Per mantenere l'errore di sovrastima entro il 15%, il rapporto tra la pressione capillare soglia stimata e la caduta di pressione imposta alle estremità del provino deve essere compresa tra 0,70 e 1.

Bibliografia

Amann-Hildenbrand, A., Krooss, B. M., Bertier, P., & Busch, A. (2015). Laboratory testing procedure for CO2 capillary entry pressures on caprocks. *Carbon Dioxide Capture for Storage in Deep Geological Formations*, *4*, 383-412.

Boulin, P. F., Bretonnier, P., Vassil, V., Samouillet, A., Fleury, M., & Lombard, J. M. (2013). Sealing efficiency of caprocks: Experimental investigation of entry pressure measurement methods. *Marine and Petroleum Geology*, *48*, 20-30. https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2013.07.010

Brooks, R. H., & Corey, A. T. (1964). *Hydraulic properties of porous media*. Colorado State University, [Hydrology and Water Resources Program].

Brooks, R. H., & Corey, A. T. (1966). Properties of Porous Media Affecting Fluid Flow. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, *92*(2), 61-88. https://doi.org/10.1061/JRCEA4.0000425

Egermann, P., Lombard, J. M., & Bretonnier, P. (2006). *A FAST AND ACCURATE METHOD TO MEASURE THRESHOLD CAPILLARY PRESSURE OF CAPROCKS UNDER REPRESENTATIVE CONDITIONS* International Symposium of the Society of Core Analysts, Trondheim, Norway.

Favero, V., & Laloui, L. (2018). Impact of CO2 injection on the hydro-mechanical behaviour of a clay-rich caprock. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, *71*, 133-141. https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2018.02.017

Kawaura, K., Akaku, K., & Nakano, M. (2014). The threshold capillary pressure affected by the different properties of injection gases. SPWLA Annual Logging Symposium,

Metz, B., Davidson, O., De Coninck, H., Loos, M., & Meyer, L. (2005). *IPCC special report on carbon dioxide capture and storage*. Cambridge: Cambridge University Press.

Pörtner, H.-O., Roberts, D. C., Adams, H., Adler, C., Aldunce, P., Ali, E., Begum, R. A., Betts, R., Kerr, R. B., & Biesbroek, R. (2022). *Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability*. IPCC Geneva, Switzerland:.

Vespo, V. S., Messori, A., & Musso, G. (2024). Threshold capillary pressure of caprocks for CO2 storage: Numerical insight on the dynamic and residual method. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, *135*, 104135. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2024.104135