



Il ruolo dei fisici nel mondo della ricerca petrolifera

Vittorio De Tomasi, Gianluca Gabriellini, Carlo Alberto Mora

Il ruolo dei fisici nel mondo della ricerca petrolifera

La ricerca e la produzione di idrocarburi richiedono l'uso di conoscenze complesse:

- remote sensing (sismica, gravimetria, metodi elettrici, nucleari, ...)
- fisica dei fluidi e dei mezzi porosi (proprietà viscoelastiche, fluidodinamica, termodinamica, chimica-fisica delle interazioni fluido-matrice, ecc.)
- calcolo numerico (imaging, modeling, signal/image/volume/processing, CFD, FEM in ambienti di calcolo HPC/MPI, FPGA, GPU)

Le tecniche di simulazione giocano oggi un ruolo essenziale nella ricerca di idrocarburi

- riduzione rischio minerario
- analisi "what if ?"
- migliore gestione produzione/vita del giacimento
- riduzione impatto ambientale e dei rischi connessi alle operazioni

Il ruolo dei fisici nel mondo della ricerca petrolifera

Alcuni numeri sull'industria petrolifera:

- pozzi in perforazione negli USA: 2026 (ottobre 2011, www.ogj.com)
- costo di perforazione di un pozzo: 10 – 200 M\$
- volume di un giacimento *giant*: $5 \cdot 10^8$ barili (1 barile = 159 l)
- prezzo di un barile di petrolio: 80 – 100 \$
- produzione giornaliera mondiale di petrolio: $8.32 \cdot 10^7$ barili
- riserve mondiali di petrolio: $1.48 \cdot 10^{12}$ barili

Ogni tecnologia che migliori l'esplorazione e/o la produzione di idrocarburi ha un rilevante impatto economico.

I fisici hanno un ruolo non trascurabile nell'industria petrolifera.

Il ruolo dei fisici nel mondo della ricerca petrolifera

Un breve panorama sulle attività degli autori:

Carlo Alberto Mora

- modelli termodinamici per acid gas

Gianluca Gabriellini

- inversione simultanea di anomalie magnetiche e gravimetriche

Vittorio De Tomasi

- soluzione dell'equazione dell'acustica a densità costante in 3D con il metodo delle differenze finite
- modelli (visco)elastici per la predizione dei moduli elastici delle rocce

Il ruolo dei fisici nel mondo della ricerca petrolifera

La produzione di idrocarburi è spesso associata all'estrazione di prodotti indesiderati, in particolare H_2S e CO_2 . Diversi motivi (ambientali, commerciali, ecc.) non ne permettono lo smaltimento, ed è quindi utile reiniettarli (come avviene nei giacimenti cosiddetti *sour*).

Per farlo occorre comprendere come questi gas reagiscano con le rocce e i fluidi del giacimento, in modo da evitare effetti indesiderati.

La scarsità di modelli e misure relative alle proprietà di un sistema $H_2O + H_2S/CO_2$ in particolare per le alte pressioni e temperature ha richiesto uno studio ad hoc per la comprensione del loro comportamento, mediante l'analisi in laboratorio di miscele di questi gas, eventualmente con alcani. I modelli termodinamici disponibili in letteratura sono stati confrontati con dati di laboratorio, e si sono individuati i modelli migliori, nonché l'errore connesso.

E' stato in particolare investigato un modello di tipo molecolare (il modello associativo), dove l'equazione di stato è costruita tramite la termodinamica perturbativa. Questi modelli permettono una adeguata trattazione di sistemi caratterizzati da legame ad idrogeno all'interno di miscele in cui sono presenti molecole polari (H_2O e H_2S) e dipoli indotti (CO_2).

Il ruolo dei fisici nel mondo della ricerca petrolifera

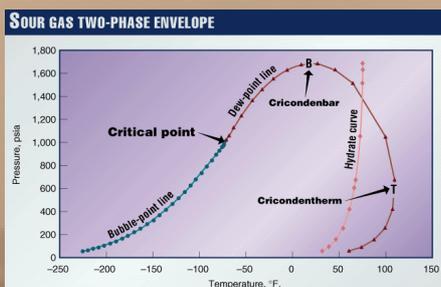


Diagramma di stato tipico di una miscela di più componenti, per esempio acqua - gas acido. All'interno dell'involuppo il sistema è bifasico: una fase è composta prevalentemente dal componente acqua con gas disciolto, l'altra è prevalentemente costituita dal componente gas e presenta un contenuto di acqua vaporizzata. Si indicano rispettivamente "fase acqua" e "fase non acquosa".

All'equilibrio le fugacità delle due fasi sono uguali.

$$F^{(ass)} = RT \sum_i x_i \left[\sum_{A_i} \left(\ln X^{A_i} - \frac{X^{A_i}}{2} \right) + \frac{M_i}{2} \right]$$

$$X^{A_i} = \left(1 + N_A \sum_j \sum_{B_j} \rho_j X^{B_j} \Delta^{A_i B_j} \right)^{-1}$$

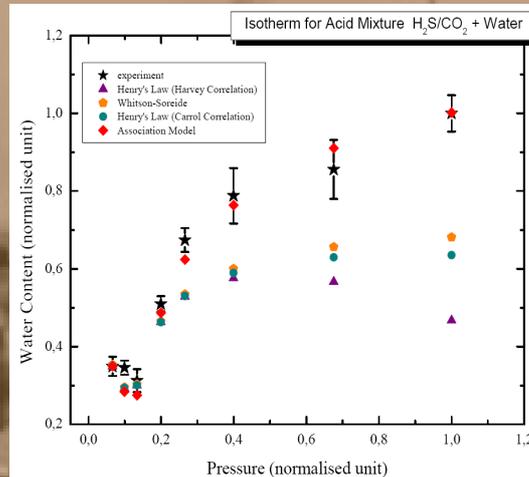
$$\Delta^{A_i B_j} = u_{ij}^3 g^{(seg)} K^{A_i B_j} \left[\exp \frac{\epsilon^{A_i B_j}}{kT} - 1 \right]$$

Contributo delle forze dispersive e di legame a idrogeno per l'energia di Helmholtz totale (F), secondo il modello associativo (Chapman). Il modello considera la presenza di differenti tipi di legame nel sistema, descritti dalla energia di legame ϵ e dalla frazione di volume occupata K.

Da questa equazione si ricava il potenziale chimico, e quindi la fugacità associata al componente della miscela.

Il ruolo dei fisici nel mondo della ricerca petrolifera

Un test di laboratorio in condizioni isoterme ha misurato la frazione di acqua contenuta nella fase non acquosa. Le misure sono state comparate con le previsioni di diversi modelli. Il modello associativo è in ottimo accordo con le misure sperimentali, in particolare per le pressioni più elevate. La legge empirica di Henry non è invece in grado di prevedere correttamente il contenuto acquoso.



Il ruolo dei fisici nel mondo della ricerca petrolifera

Usati principalmente nelle fasi iniziali dell'esplorazione petrolifera, la gravimetria e la magnetometria costituiscono un metodo d'indagine non invasivo e a basso costo per delineare le strutture geologiche che si estendono su vaste aree.

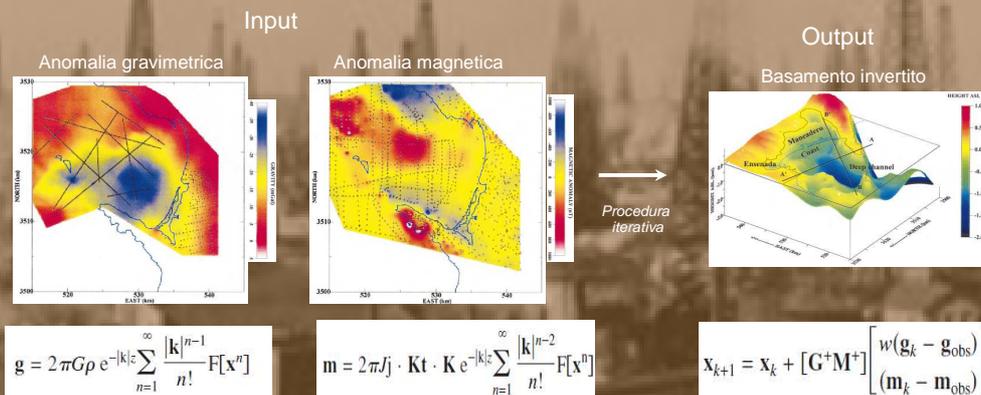
La misura accurata del campo gravitazionale terrestre, del campo magnetico e dei loro gradienti costituisce un requisito indispensabile per avere dati idonei alla successiva fase del processing.

Sulla base degli studi svolti in collaborazione con alcuni centri di ricerca, sono in fase di sviluppo tecnologie innovative per la misura in ambiente marino dei campi di potenziale, che garantiscono un notevole incremento del rapporto S/N rispetto alla tecnologia attualmente in uso.

Una volta acquisiti e processati, i dati gravimetrici e magnetometrici devono essere elaborati per ricavarne informazioni geologiche. Un grande interesse viene riservato ai metodi di inversione, che consentono di risalire alla profondità, alla distribuzione spaziale, alla densità e/o suscettività delle rocce. La ricerca è attualmente orientata verso quegli algoritmi di inversione che consentono l'integrazione con dati provenienti da altri metodi di prospezione geofisica (sismica, well logs ecc.)

Il ruolo dei fisici nel mondo della ricerca petrolifera

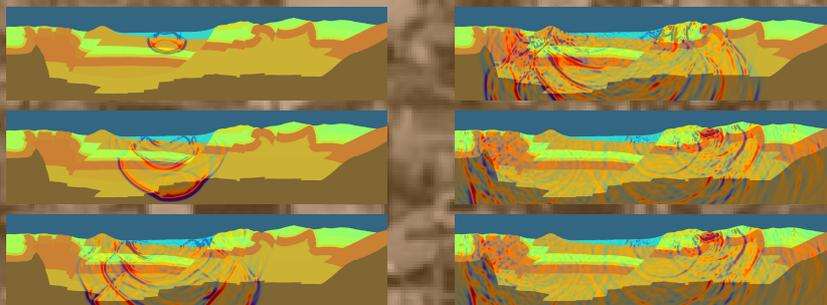
Esempio di Joint Inversion 3D di dati gravimetrici e magnetometrici*



*Joint inversion of gravity and magnetic data for two-layer models, GEOPHYSICS, VOL. 71, NO. 3 MAY-JUNE 2006; P. L35-L42, 9 FIGS.10.1190/1.2194514

Il ruolo dei fisici nel mondo della ricerca petrolifera

Per meglio comprendere i fenomeni connessi con la propagazione delle onde sismiche nella crosta terrestre è utile disporre di strumenti di modellistica, in grado di simulare al computer la propagazione delle onde sismiche in un mezzo di forma complicata. Il metodo dell'iconale comunemente utilizzato non è in grado di fornire risultati adeguati, e si preferisce risolvere l'equazione delle onde con il metodo delle differenze finite. Si ottiene così la simulazione di tutti i modi di propagazione ondosa (riflessioni, rifrazioni, diffrazioni, ecc.).



Esempio di soluzione FD acustica in un modello 2D

Il ruolo dei fisici nel mondo della ricerca petrolifera

Il calcolo della soluzione FD è particolarmente oneroso in 3D. Instabilità e dispersione numerica richiedono l'uso di una griglia di calcolo fine. Per migliorare l'efficienza di calcolo si è studiato uno schema FD $O(\Delta t^4, \Delta x^4)$:

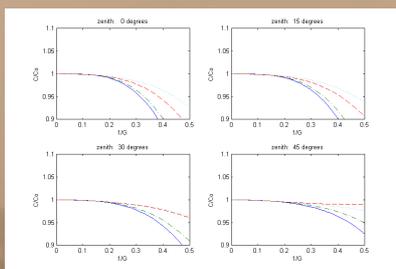
$$p(x, y, z, t + \Delta t) = -p(x, y, z, t - \Delta t) + 2p(x, y, z, t) + c^2 \Delta t^2 (\nabla^2 p(x, y, z, t)) + \frac{c^4 \Delta t^4}{12} (\nabla^4 p(x, y, z, t)) + O(\nabla^2 c \nabla^2 p)$$

Invece di ricorrere alle tecniche tradizionali FD 1-D per il calcolo del laplaciano, si sono calcolati i coefficienti di approssimazione per uno schema FD 3-D:

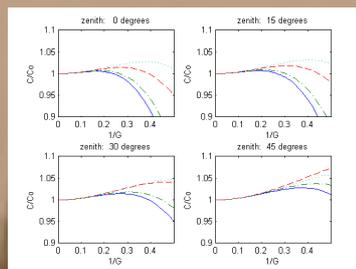
$$c^2 \Delta t^2 (\nabla^2 p(x, y, z, t)) + \frac{c^4 \Delta t^4}{12} (\nabla^4 p(x, y, z, t)) \equiv \sum_{i,j,k=-2}^2 c_{i,j,k} p(x_i + i, y_j + j, z_k + k)$$

Fra le possibili soluzioni se ne è individuata una stabile, che è risultata competitiva rispetto agli schemi $O(\Delta t^2, \Delta x^{10})$ normalmente utilizzati. Infatti la dispersione e l'anisotropia numerica del nuovo schema sono particolarmente contenuti, permettendo quindi di utilizzare una griglia di calcolo compatta.

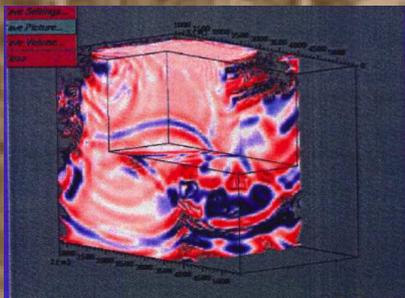
Il ruolo dei fisici nel mondo della ricerca petrolifera



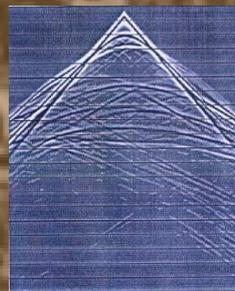
Dispersione schema $O(\Delta t^4, \Delta x^4)$, CFL = 0.5



Dispersione schema $O(\Delta t^2, \Delta x^{10})$, CFL = 0.5



Istantanea del campo d'onde 3D



Sismogramma registrato sul grid di calcolo

Il ruolo dei fisici nel mondo della ricerca petrolifera

Una roccia è un materiale composito, caratterizzato da componenti elementari (sabbia, argilla, gas, olio, acqua) presenti in quantità variabili, e fra loro segregati: sabbia e argilla costituiscono il “*frame*”, i fluidi invece occupano lo spazio dei pori. Scopo della “Rock Physics” è la realizzazione di un modello in grado di descrivere le principali proprietà meccaniche della roccia (densità e moduli elastici) in funzione dei suoi componenti.

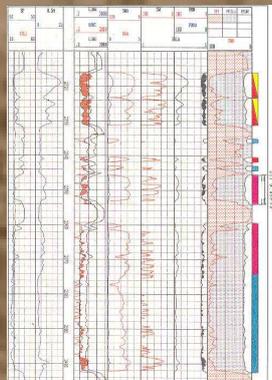
Le proprietà del *frame* vengono descritte mediante opportuni modelli (Hertz-Mindlin, Kuster-Toksoz, ecc.) che idealizzano la distribuzione dei grani di minerale nella roccia. Le misture di minerali vengono trattate con il metodo dei limiti (Voigt/Reuss o Hashin-Shtrikman).

I fluidi vengono miscelati secondo varie regole (limite di Reuss per fluidi miscibili, approssimazione di Brie per fluidi non miscibili, ecc.) dipendenti dal tipo di giacimento in esame.

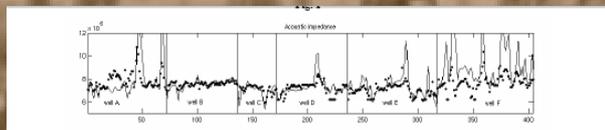
Frame e fluidi vengono poi combinati insieme, solitamente mediante la legge di Gassmann. Il risultato è la predizione della densità e della velocità di propagazione delle onde longitudinali e trasversali nel mezzo composito in funzione della porosità, contenuto di fluidi, pressione, contenuto di argilla.

Il ruolo dei fisici nel mondo della ricerca petrolifera

I modelli fisici vengono calibrati ottimizzando i parametri del modello tramite confronto con i dati provenienti da misure di laboratorio e in pozzo. Poiché le equazioni del modello sono non lineari, si utilizza un processo di ottimizzazione genetico. Il modello calibrato viene poi utilizzato per simulazioni di tipo “what if”, simulando variazioni di composizione e/o pressione del fluido e/o della roccia



well log



log di impedenza acustica e predizione del modello

La tecnica è di grande utilità per lo studio di rilievi sismici “4D”, dove immagini distanziate nel tempo del giacimento permettono di identificare come i fluidi si spostano durante la produzione.

Il modello è attualmente elastico, ma è in corso di studio la sua estensione al caso viscoelastico.

Il ruolo dei fisici nel mondo della ricerca petrolifera

In questa breve presentazione abbiamo mostrato alcuni dei problemi che i fisici affrontano nell'industria petrolifera. Vi sono comunque molti altri problemi che attendono di essere risolti, magari da qualcuno dei fisici qui presenti...

- Uso dell'equazione di Lippmann-Schwinger per l'imaging acustico/elastico
- Sorgenti sismiche marine *ghostless*
- Tecniche di elaborazione e *imaging* di segnali sismici in mezzi dispersivi
- Fluidodinamica di fluidi viscosi in mezzi microporosi
- Ecc...

Alcune risorse web per approfondire:

srb.stanford.edu

sep.stanford.edu

www.morosp.uh.edu

www.cere.dtu.dk

www.eage.org

www.seg.org

www.spe.org