

Experimental characterization of reservoir rocks and geotechnical materials

Low frequency attenuation, ultrasonic velocities and local pore pressure effects

Doctoral Thesis

Author(s):

Tisato, Nicola

Publication date:

2013

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-009900702>

Rights / license:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#)

DISS. ETH NO. 21106

**EXPERIMENTAL CHARACTERIZATION OF RESERVOIR ROCKS
AND GEOTECHNICAL MATERIALS: LOW FREQUENCY
ATTENUATION, ULTRASONIC VELOCITIES AND LOCAL PORE
PRESSURE EFFECTS**

A dissertation submitted to
ETH ZURICH

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by
NICOLA TISATO

Master of Science in Geology
University of Padova (Italy)

Date of birth 16/04/1979
citizen of Italy

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Jean-Pierre Burg – ETH Zurich – Examiner
PD Dr. Erik H. Saenger – ETH Zurich – Co-examiner
Dr. Alexandre Schubnel – ENS Paris – Co-examiner

2013

Abstract

Exploration geophysics, forecasting of geo-hazards and geodynamic studies require the improvement of geophysical methods for subsurface imaging. The better the physical properties of the geomaterials are constrained the higher is the accuracy of the subsurface model. Physical properties of geomaterials are correctly defined not only when elastic parameters are precisely evaluated, but also when the correct rheological model is considered (e.g. frequency dependent moduli). For instance, imaging of crustal domains is more accurate when viscoelasticity is taken into account. This is especially true when the subsurface domains are impregnated with liquids such as water, hydrocarbons or magma.

Attenuation and dynamic moduli are the parameters required to define material viscoelasticity. Presently they are little investigated in the range of the seismic frequencies. Viscoelasticity of few lithologies has been measured and only at limited physical conditions. In addition, the role of fluids in enhancing viscoelasticity is still poorly understood, and a unified theory explaining how fluids interplay with seismic waves, generating attenuation, does not still exist. The research presented in this thesis aims to improve our understanding of physical properties of geomaterials. The thesis is divided into three parts with specific goals.

The first goal of this research was to design, build and calibrate a new experimental machine capable to measure seismic wave attenuation for frequency ranging from 0.1 to 100 Hz: the “Broad Band Attenuation Vessel” (BBAV). This instrument measures seismic wave attenuation in decimetric-sized samples at confining pressures up to 25 MPa. In addition, the peculiarities of the BBAV had allowed developing a methodology to measure fluid pressure transients as a consequence of a variation of vertical stress in a partially saturated sample.

The BBAV was employed to achieve the second goal of the research which was to identify and describe the mechanisms responsible for seismic wave attenuation in partially saturated rocks. The target was assessed with the production of two distinct datasets: i) seismic wave attenuation values in a typical reservoir rock at different saturation conditions and confining pressures, and ii) innovative measurements of pore pressure transients as a consequence of stress variations. Numerical and analytical modeling of the laboratory data played a dominant role in the appraisal of the goal, because they allowed comparing the results with theories. The comparison indicates that wave-induced fluid flow on the mesoscopic scale is the dominant mechanism creating attenuation in the reported experiments. But they also indicate that the attenuation is dependent on crack closure, which is closely related to the wave-induced fluid flow in the microscopic scale.

The third goal of the research was to characterize the elastic properties of compacted bentonite. This material is used to isolate waste repositories from the environment. In the case of nuclear waste disposals it is crucial to provide accurate physical properties of the compacted bentonite because, in that case, remote sensing can monitor correctly the physical-chemical variations happening in the sealing device. Thus, the variation of seismic velocities of compacted bentonite was studied as a function of water content, temperature and confining pressure. New experimental tools have been designed and built to fulfill the goal. Empirical relations between elastic properties of compacted bentonite and physical conditions have been established and justified with theories. High temperature experiments indicate that dehydration regime might compromise the sealing properties of bentonite.

The three goals of the research could be extended if methodology improvements will be encountered. The present dissertation can help improving geophysical technologies which are valid tools for exploration geophysics, geodynamic studies, and forecasting of geo-hazards.

Riassunto

La geofisica di esplorazione, alcune previsioni di catastrofi naturali e gli studi di geo-dinamica necessitano del miglioramento delle prospezioni geofisiche. Più precisa è la definizione delle proprietà fisiche dei geo-materiali più accurato sarà il modello del sottosuolo ottenuto. Le proprietà fisiche dei materiali non sono definite correttamente solo quando i valori sono corretti, ma anche quando viene considerato il modello reologico più fedele alla realtà (es. moduli elastici dipendenti dalla frequenza). Per esempio, le prospezioni geofisiche risultano più accurate quando si considera la visco-elasticità, in particolare quando il sottosuolo risulta impregnato di fluidi come acqua, idrocarburi o magma.

Attenuazione e moduli elastici dinamici sono necessari per definire la “visco-elasticità” di un materiale, e sono attualmente poco studiati nella banda delle frequenze sismiche. Ad Oggi la visco-elasticità è stata investigata solo per poche litologie e limitate condizioni sperimentali. Inoltre il ruolo dei fluidi nell’aumento dell’attenuazione è ancora poco compresa e non esiste ancora una teoria unificata che definisca come fluidi e onde sismiche interagiscano creando attenuazione. La ricerca presentata in questa tesi mira a migliorare le conoscenze sulle proprietà fisiche dei geo-materiali. La tesi è divisa in tre parti ognuna con uno specifico obiettivo.

Il primo obiettivo della ricerca era la progettazione, la realizzazione e la calibrazione di un nuovo strumento in grado di misurare attenuazione delle onde sismiche nella banda di frequenze 0.1–100 Hz: il “Broad Band Attenuation Vessel” (BBAV). Questo strumento misura l’attenuazione delle onde sismiche in campioni decimetrici confinati fino a 25 MPa. In aggiunta le peculiarità del BBAV hanno permesso lo sviluppo di una metodologia per misurare i transienti di

pressione dei fluidi che impregnano il campione, quale conseguenza di una variazione dello stress verticale.

Il BBAV è stato utilizzato per raggiungere il secondo obiettivo della ricerca che era l'identificazione e la descrizione dei meccanismi responsabili dell'attenuazione delle onde sismiche in rocce parzialmente sature. Il fine è stato raggiunto con la produzione di due distinte serie di dati: i) valori di attenuazione delle onde sismiche per una tipica roccia serbatoio sottoposta a saturazione e pressioni di confinamento variabili e ii) inedite misure di transienti di pressione dei fluidi quale conseguenza di una variazione di stress. Un contributo fondamentale, al raggiungimento dell'obiettivo, è stato apportato dalla modellazione numerica e analitica dei dati di laboratorio. La modellazione ha permesso di comparare i dati con la teoria. La comparazione indica come il flusso di fluidi indotto dalle onde, alla scala mesoscopica, sia il meccanismo che genera attenuazione negli esperimenti presentati. Inoltre l'attenuazione risulta dipendente anche dalla chiusura delle cricche che è relazionata maggiormente al flusso di fluidi indotto dalle onde, alla scala microscopica.

Il terzo obiettivo della ricerca era lo studio delle proprietà elastiche della bentonite pressata. Questo materiale è utilizzato per isolare dall'ambiente i depositi di rifiuti. Nel caso di rifiuti radioattivi è fondamentale disporre di valori accurati delle proprietà elastiche perchè, in quel caso, le tecniche di rilevamento remoto possono monitorare correttamente le variazioni fisico-chimiche che avvengono nel dispositivo di isolamento. Perciò le variazioni di velocità sismiche nella bentonite pressata sono state studiate in funzione del contenuto in acqua, temperatura e pressione confinante. Nuove apparecchiature sperimentali sono state progettate e realizzate per raggiungere l'obiettivo. Relazioni empiriche tra le proprietà elastiche della bentonite pressata e le condizioni sperimentali sono state scoperte e giustificate con la teoria. Esperimenti condotti ad alta temperatura indicano che la deidratazione potrebbe compromettere le proprietà isolanti della bentonite.

I tre obiettivi sono stati raggiunti e potranno essere estesi se le metodologie verranno sviluppate ulteriormente. La presente ricerca potrà aiutare a migliorare le

tecnologie geofisiche in quanto importanti strumenti per la geofisica esplorativa, gli studi di geodinamica e alcune previsioni di catastrofi naturali.