

DISS. ETH NO. 17833

**DYNAMICS OF SUBDUCTION AND IMPLICATIONS FOR PLATE KINEMATICS:
INSIGHTS FROM NUMERICAL AND LABORATORY MODELS**

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of

Doctor of Sciences

presented by

ERIKA DI GIUSEPPE

Laurea in Fisica, Università degli Studi di Roma 'La Sapienza'

Born in Tivoli on November 17th, 1979

Citizen of Italy

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Domenico Giardini, examiner
Prof. Dr. Claudio Faccenna, co-examiner
Dr. Jeroen van Hunen, co-examiner
Prof. Dr. Hans-Peter Bunge, co-examiner

2008

ABSTRACT

Subduction process is a key process in plate tectonics. As revealed by global kinematic data from subduction zones, slabs are not static features, but trenches show different styles of migration on Earth. The goal of this thesis is the understanding of the dynamics of subduction zones and its implications for plate kinematics.

We perform both numerical (in two- and three-dimensional setup) and laboratory models (naturally three-dimensional) in order to systematically investigate the effects of the geometrical and rheological parameters on the subduction dynamics (Chapter 3). Trench migration depends on a complex combination of model parameters that can be summarized into the slab stiffness. Stiffer slabs cause the trench to advance, whereas more flexible slabs lead to trench retreat. Given the fact that also on Earth the oldest (and therefore probably stiffest) plates have the fastest advancing trenches, we hypothesize that the ability of slab to unbend after subduction forms the dominant control on trench migration.

In fact, oceanic lithosphere grows older by thickening and strengthening (Chapter 4). Global databases reveal that the age of the slab at trench may control the subduction style: old and thick slabs show a negative trench velocity (advancing style), while youngest, thin slabs have a positive trench velocity (roll-back). We propose that the lithosphere ageing varies the slab stiffness. A comparison between the numerical results and the kinematic data from modern subduction zones in two different frames with different amount of net rotation is carried out. Looking at the age at which the transition from retreating to advancing style occurs in nature, we propose an effective lithosphere/mantle viscosity of approximately 200 during bending of the lithosphere into the subduction zone.

Later, we focus our attention on the change in the style of trench migration of the Izu-Bonin-Mariana trench (Chapter 5). The Izu-Bonin-Mariana trench, that is the oldest subduction zone

of the Earth, after a long episode of trench rollback started advancing, reaching its present day kinematic configuration. We propose that this change is related to the entrance at trench of a progressively older (stiffer) oceanic lithosphere. Our models are able to reproduce this process, and can reconcile the shape of Izu Bonin-Mariana slab with its present-day configuration, showed by the tomographic images, in which the young slab is laying on the 660 km discontinuity, and sub-vertical (almost overturned) old lithospheric material is descending into the mantle.

Both laboratory and numerical models have been conducted to improve our understanding of the role that the resistance of the slab to bending and its coupling to the ambient mantle play in subduction dynamics over geological time scales (Chapter 5 and Chapter 6). The combining of the experimental results and kinematic data of subduction zones allows us to say that a lithosphere/upper mantle viscosity contrast of 150-500 is necessary to obtain realistic trench/subducting plate velocity ratios observed in nature. These results are in agreement with the results of our numerical models that inferred a viscosity ratio ranging between 100 and 200 (Chapter 5).

RIASSUNTO

La subduzione è un processo molto importante nella tettonica delle placce. Le zone di subduzione non sono delle entità statiche, infatti i trenches possono essere soggetti a fenomeni dinamici di diverso tipo in funzione di molteplici fattori. Il processo di subduzione avviene nel momento in cui la placca si piega in corrispondenza del trench e penetra nel mantello. Questo meccanismo suggerisce che lo slab venga indebolito in qualche modo quando subduce nel mantello. Lo scopo di questa tesi è la comprensione della dinamica del processo di subduzione e le sue implicazioni cinematiche nel moto delle placche. Sono stati eseguiti sia modelli numerici (in due e tre dimensioni) sia esperimenti in laboratorio (ovviamente tridimensionali), con lo scopo di investigare in modo sistematico gli effetti dei parametri geometrici e reologici sulla dinamica delle zone di subduzione.

Per mezzo di simulazioni numeriche (Capitolo 4), si è trovato che gli slabs possono muoversi in *roll-back* oppure avanzare: il modo in cui uno slab subduce dipende da una complessa combinazione dei parametri utilizzati nei modelli. Siamo stati in grado di ridurre tale complessità grazie a una semplice legge di scala. Diversi parametri sono stati combinati tra loro in modo da ottenere un unico parametro, a cui è stato dato il nome di *slab stiffness*. Slabs più rigidi (*stiffer*) avanzano, mentre slabs più flessibili, pertanto più deboli, si muovono in *roll-back*. In generale, dal punto di vista energetico, slabs che avanzano dissipano più energia di quelli che si muovono in *roll-back*. Dall'osservazione che anche in natura le placche più vecchie (e probabilmente più rigide) avanzano, si è ipotizzato che l'abilità di uno slab di ripiegarsi dopo essere penetrato nel mantello sia la causa principale del modo in cui avviene la migrazione del trench.

Sulla Terra, la litosfera oceanica si ispessisce con il tempo e diventa più rigida (Capitolo 5), i database mondiali mostrano che l'età dello slab determina il modo di subduzione della

placca: slab vecchi e spessi (conseguentemente rigidi) rivelano valori della velocità dei trench negativi (slab che avanza); mentre slabs più giovani e sottili (deboli) hanno velocità positive (slab in *roll-back*). Nello stesso capitolo, i risultati dei modelli numerici sono stati combinati con i dati cinematici di zone di subduzione, ottenuti con due diversi sistemi di riferimento, i quali differiscono per i valori di *net-rotation*. In base all'età dello slab, in base alla quale avviene la transizione dallo stile di *roll-back* a quello in avanzamento, si è proposto che il rapporto di viscosità effettiva tra litosfera e mantello debba essere di circa 200, affinché si possa ottenere una corrispondenza tra i modi di subduzione rilevati dai dati naturali e quelli ottenuti con i modelli numerici.

Poiché i dati globali confermano che esiste una relazione di proporzionalità inversa tra l'età della litosfera in corrispondenza del trench e il moto del trench stesso, ci concentriamo sul cambiamento dello stile di subduzione che avviene in corrispondenza della zona di subduzione Izu-Bonin-Mariana (Charter 6). Il trench di Izu-Bonin-Mariana, che risulta essere la più vecchia zona di subduzione del mondo, raggiunge la sua odierna configurazione cinematica di avanzamento dopo un lungo episodio di *roll-back*. Supponiamo che questo cambiamento sia dovuto all'entrata in subduzione di materiale litosferico che diventa sempre più vecchio, e quindi più rigido. I risultati dei nostri modelli numerici tridimensionali sono in grado di conciliare la cinematica del trench con l'attuale geometria della placca in subduzione, rilevata dalla sismicità e dalle immagini tomografiche.

I modelli di laboratorio sono stati realizzati con lo scopo di studiare il ruolo della resistenza dello slab e gli effetti dell'interazione in tempi geologici dello slab con il mantello circostante sulla dinamica della subduzione (Capitolo 8). Attraverso la combinazione tra i risultati analogici e i dati cinematici delle zone di subduzione in quattro diversi sistemi di riferimento, possiamo affermare che un rapporto di viscosità tra la litosfera e il mantello superiore variabile tra 150 e 500 è necessario per ottenere la variazione tra i diversi modi di subduzione trovati in natura. Questi risultati sono in accordo con quelli ottenuti tramite i modelli numerici (Capitolo 5).