



Doctoral Thesis

Modeling of convergent margins from slab hydration to collisional orogeny

Author(s):

Faccenda, Manuele

Publication Date:

2009

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005978832> →

Rights / License:

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

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH No. 18395

**MODELING OF CONVERGENT MARGINS:
FROM SLAB HYDRATION TO COLLISIONAL OROGENY**

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

(Swiss Federal Institute of Technology)

for the degree of

DOCTOR OF SCIENCES

presented by

MANUELE FACCENDA

Master in Geological Science,

Università degli studi di Perugia, Italy

born 31st August, 1979

citizen of Italy

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Paul J. Tackley, ETH-Zürich

Dr. Taras V. Gerya, ETH-Zürich

Dr. Luigi Burlini, ETH-Zürich

Prof. Dave A. Yuen, MSI-Minneapolis

2009

Abstract

In this thesis, several major dynamical processes characteristic of subduction and collision zones were investigated by means of numerical modeling. The research focuses mainly on the mechanisms behind slab mantle hydration and related implications, and on the style of post-subduction collisional orogens as a function of key physical parameters. The results give new insight into the dynamics of convergent margins and highlight the fundamental role of water in such settings. Four different but related problems are treated in this thesis: 1) how water can penetrate deeply in the subducting slab altering its physico-chemical properties, 2) the seismic anisotropy produced by slab hydration, 3) the onset of post-subduction collisional orogeny and major physical parameters controlling transition from subduction to collision, 4) the role of fluids in determining the style and evolution of post-subduction collisional orogens.

The following four main results has been obtained by solving these problems:

1) Despite the fact that deep slab serpentization has been observed at trenches, the mechanisms that allow deep seawater percolation inside the bending slabs are unknown. We found that downward deep fluid flow is caused by strong variation of the tectonic pressure due to brittle normal faulting causing sub-hydrostatic $\frac{\partial P}{\partial z} < g\rho_{fluid}$ or even negative $\frac{\partial P}{\partial z} < 0$ pressure gradients along bending-related normal faults through which fluids are pumped. The results of the numerical experiment indicate that water can be transported down and stored in the bending area via serpentization of the normal faults. Deep and localized serpentization of the subducting slab has profound implications for the geological/geophysical phenomena observed at subduction zones, such as the seismological properties of the slab, the mechanics of intermediate-depth and deep earthquakes, the presence at depth of dense hydrous magnesium silicate (DHMS) phases that are able to bring water down to lower mantle depths, and the rheological weakening of the mantle wedge due to the formation of larger quantities of hydrated and partially molten mantle rocks.

2) In subduction zones, the teleseismic fast-shear wave component orients generally parallel to the strike of the trench, though a few exceptions have been reported (Cascadia and restricted areas of South America). However, the interpretation of shear wave splitting above subduction zone has been challenging for many years and none of the inferred models appears to be sufficiently complete in explaining the whole range of anisotropic patterns registered worldwide. We found that the amount and the geometry of seismic anisotropies measured in the forearc regions strongly depend on the preferred orientation of hydrated faults in the subducting oceanic plate. The anisotropy originates from the crystallographic preferred orientation (CPO) of highly anisotropic hydrous minerals (serpentine and talc) formed along steeply dipping faults and from the vertical layering (SPO) of either alternating dry and hydrated crust-mantle sections (whose spacing is several times smaller than teleseismic wavelengths) or water-filled fractures due to de-hydration reactions. Faults orientations and estimated delay times are consistent with the observed shear wave splitting patterns in most subduction zones.

3) As previous numerical models of continental collision did account for the effects of a foregoing oceanic subduction, we performed models where collision follows the closure of an ocean. Oceanic subduction produces thinning and upwarping of the overriding lithospheric wedge, such as is observed in Andean-type collisional settings (Cascadia and Central Andes). After collision two main orogenic styles develop depending on the values of key parameters: either (a) slow convergence rates (weak shear heating and consequently strong rheological coupling between plates) and/or a weak lower crust generate a two-sided, thick and narrow symmetrical collisional zone, or (b) high convergence rates (strong shear heating and therefore weak rheological coupling between plates) and a strong lower crust produce a one-sided, thin and broad asymmetrical collisional zone. In both cases, enhanced radiogenic heating favors the formation of midcrustal partially melted channels that propagate toward the surface and the pro-foreland. Partial melting triggers lateral extrusion of metamorphic rocks from different depths (15-23 kbar, $> 700\text{ }^{\circ}\text{C}$) on top of coherent LP-LT units. The geometry of metamorphic isograds (inverted), shapes of P-T paths at different grades and exhumation rates are similar to those observed in parts of the Himalayan chain, indicating that the models capture the essence of real systems. The model results demonstrate that internal radiogenic heat production rate is a crucial parameter in determining the timing of slab breakoff, polarity reversal and exhumation of the inverted metamorphic sequence with respect to the timing of partial melting, but does not affect the orogenic style. Hundreds of km of continental lithosphere are recycled into the mantle in all models, supporting the idea that continental crustal consumption is, indeed,

a common and considerable process during collision. Crustal recycling into the deep mantle during collisional orogeny needs to be considered in models of crustal growth and evolution.

4) The previous study on continental collision is extended to investigate how mantle fluid (e.g. water, melt) migration rates, together with variable convergence velocities, affect the coupling between the continental plates determining the final orogenic style. Coupled and decoupled collision styles are identified. Low convergence rates and fluids/melts propagation velocities favor continuous coupling and convergence between the plates. Coupled collision zones are characterized by continuous accretion of the weak upper continental crust resulting in the development of a thick and broad crustal wedge, by hot temperature in the inner parts of the orogen due to radiogenic heating of the thickened crust, by compressive orogenic stresses and appearance of a double seismogenic (brittle) layer involving upper crust and sub-Moho mantle. In contrast high convergence rates and fluid/melt percolation velocities produce efficient weakening of the mantle wedge and of the subduction channel triggering complete decoupling of two plates, mantle wedging into the crustal wedge and retreating style of collision. The evolution of fully decoupled collision zones are characterized by the disruption of the accretionary wedge, formation of an extensional basin in the inner part of the orogen and delamination of the weak portion of the continental crust that is first thrust toward the foreland and, subsequently, dissected by extensional tectonics. We found good correlations of our numerical results with some of the major collisional orogens. In particular, the decoupled retreating collision regime reproduces what is observed in the Northern Apennines.

Riassunto

In questa tesi, diversi processi dinamici caratteristici delle zone di subduzione e collisione sono stati studiati grazie alla modellizzazione numerica. La ricerca si concentra principalmente sui meccanismi di idratazione del mantello della placca oceanica e le implicazioni collegate, e sullo stile degli orogeni collisionali che si formano dopo una fase di subduzione in funzione di alcuni parametri fisici chiave. I risultati contribuiscono a far luce sulle dinamiche dei margini convergenti e mettono in evidenza il ruolo fondamentale che ha l'acqua in questi scenari. Quattro problemi differenti ma correlati tra di loro sono trattati in questa tesi: 1) come l'acqua riesce a penetrare in profondità nella placca oceanica alterandone le proprietà fisico-chimiche, 2) l'anisotropia sismica prodotta dalla serpentinizzazione della placca oceanica, 3) l'evoluzione degli orogeni collisionali formati dopo una fase di subduzione e i maggiori parametri fisici che controllano la transizione dalla subduzione alla collisione, 4) il ruolo che i fluidi giocano nel determinare lo stile e l'evoluzione degli orogeni collisionali formati dopo una fase di subduzione.

I quattro seguenti risultati sono stati ottenuti risolvendo questi problemi:

1) Nonostante una serpentinizzazione profonda delle placche in subduzione sia osservata nelle fosse oceaniche, i meccanismi che permettono all'acqua di infiltrarsi a grandi profondità nella placca oceanica in piegamento sono sconosciuti. È stato scoperto che il flusso di fluidi diretto verso il basso e in profondità è causato da una forte variazione della pressione tettonica dovuta alla fagliazione estensionale. Questo fenomeno produce gradienti di pressione sub-idrostatici $\frac{\partial P}{\partial z} < g\rho_{fluid}$ o addirittura negativi $\frac{\partial P}{\partial z} < 0$ lungo le faglie normali associate con il piegamento della placca oceanica e attraverso le quali i fluidi vengono risucchiati. I risultati dell'esperimento numerico indicano che l'acqua può essere trasportata verso il basso e immagazzinata nella zona di piegamento attraverso la serpentinizzazione delle faglie normali. Una profonda e localizzata serpentinizzazione della placca in subduzione ha importanti conseguenze per i fenomeni geologici/geofisici che vengono osservati nelle zone di subduzione, come, per esempio, le proprietà elastiche della placca oceanica, il meccanismo di nucleazione dei terremoti intermedi e profondi, la presenza delle fasi silicatiche di magnesio dense e idrate

(DHMS) che sono capaci di trasportare l'acqua fino al mantello inferiore, e l'indebolimento reologico del cuneo mantellico dovuto alla formazione di più estese quantità di rocce idrate e parzialmente fuse.

2) Nelle zone di subduzione, la componente veloce delle onde telesismiche si orienta generalmente in modo parallelo alla fossa oceanica, sebbene alcune eccezioni sono state documentate (Cascadia e alcune aree ristrette del Sud America). Tuttavia, le interpretazioni della scissione delle onde di taglio sopra le zone di subduzione è stata problematica per molto anni e nessuno dei modelli proposti sembra essere sufficientemente completo nello spiegare l'intero insieme di dati registrati in tutto il pianeta. È stato scoperto che l'intensità e le caratteristiche geometriche delle anisotropie sismiche misurate nelle regioni di avansarco dipendono fortemente dall'orientazione preferenziale delle faglie serpentizzate presenti nella placca oceanica in subduzione. L'anisotropia viene generata dall'orientazione cristallografica preferenziale (CPO) dei minerali idrati altamente anisotropi (serpentino e talco) formati lungo le faglie sub-verticali e dalla stratificazione verticale (SPO) sia di sezioni crostali-mantelliche anidre e idrate alternate (il cui spessore è molte volte più piccolo della lunghezza d'onda telesismica) che di fratture sature di fluidi che si formano a causa della deidratazione della placca oceanica. L'orientazione delle faglie e i tempi di ritardo stimati sono compatibili con i dati di scissione delle onde di taglio osservati nelle zone di subduzione.

3) Poiché i precedenti modelli numerici sulla collisione continentale non hanno tenuto conto degli effetti di una precedente subduzione oceanica, sono state eseguite delle modellizzazioni in cui la collisione avviene dopo la chiusura di un oceano. La subduzione oceanica produce assottigliamento e incurvamento verso l'alto del cuneo litosferico sovrascorrente, come viene osservato nelle zone di collisione di tipo Andino (Cascadia e Ande Centrali). Dopo la collisione due stili orogenici principali si sviluppano a seconda dei valori di alcuni parametri chiave: (a) tassi di convergenza bassi (riscaldamento viscoso basso e conseguentemente forte interazione reologica fra le placche) e/o una crosta inferiore debole generano una zona di collisione simmetrica a doppia vergenza, spessa e stretta, (b) alti tassi di convergenza (forte riscaldamento viscoso e quindi debole interazione reologica fra le placche) e una crosta inferiore resistente producono zone collisionali asimmetriche, poco spesse e ampie. In entrambi i casi, alti valori di calore radiogenico favoriscono la formazione di canali crostali parzialmente fusi che si propagano verso la superficie e l'avanfossa. La fusione parziale attiva l'estrusione laterale di rocce metamorfiche da diverse profondità (15-23 kbar, > 700 °C) sopra dell'unità LT-LP

coerenti. La geometria delle isograde metamorfiche (invertite), la struttura a diversi gradi dei tracciati P-T e i tassi di esumazione sono simili a quelli registrati in alcune porzioni della catena Himalayana, il che indica che i modelli riescono a riprodurre in modo essenziale il sistema reale. I risultati dei modelli dimostrano che il tasso di produzione di calore radiogenico interno è un parametro cruciale nel determinare il momento in cui si ha la delaminazione della placca oceanica, l'inversione della polarità della subduzione e l'esumazione della sequenza metamorfica invertita rispetto al momento in cui si ha la formazione di materiale parzialmente fuso, ma che non influenza affatto lo stile orogenico. Centinaia di km di litosfera continentale sono riciclati nel mantello in tutti i modelli, il che conferma l'idea che la perdita di crosta continentale è un processo comune e importante durante la collisione. Il riciclo di crosta nel mantello profondo durante l'orogenesi collisionale deve essere considerata nei modelli di accrescimento ed evoluzione della crosta.

4) Lo studio precedente sulla collisione continentale viene esteso per capire come il tasso di migrazione dei fluidi nel mantello, insieme a differenti tassi di convergenza, influenzano l'interazione tra le placche continentali determinandone lo stile orogenico finale. Sono state identificate zone di collisione in cui le placche sono sia unite che completamente scoppiate. Bassi tassi di convergenza e velocità di propagazione dei fluidi/fusi favoriscono una continua interazione e convergenza tra le placche. Le zone di collisione in cui le placche sono unite sono caratterizzate da un'accrezione continua della debole crosta continentale superiore che determina lo sviluppo di uno spesso e ampio cuneo crostale, da alte temperature nelle parti interne dell'orogene dovute al calore radiogenico della crosta ispessita, da sforzi orogenici compressivi e la formazione di un doppio strato seismogenico (reologia fragile) nella crosta e nel mantello sottostante la Moho. Diversamente, alti tassi di convergenza e velocità di percolazione dei fluidi/fusi producono un efficiente indebolimento del cuneo mantellico e del canale di subduzione attivando lo scoppio completo fra le due placche, l'incuneamento del mantello nel cuneo crostale e uno stile collisionale di arretramento. L'evoluzione delle zone collisionali in cui le placche sono completamente scoppiate sono caratterizzate dalla distruzione del prisma di accrezione, dalla formazione di un bacino estensionale nelle parti interne dell'orogene e dalla delaminazione della porzione debole della crosta continentale che viene prima spostata verso l'avanzata e, in seguito, viene sezionata dalla tettonica estensionale. Buone correlazioni sono state trovate tra i risultati numerici e alcuni dei maggiori orogeni collisionali. In particolare, il regime collisionale di arretramento in cui le placche sono scoppiate riproduce ciò che viene osservato nell'Appennino settentrionale.
