

DISS. ETH NO. 17706

# **RHEOLOGY AND PHYSICAL PROPERTIES OF CRYSTAL BEARING MAGMAS**

A dissertation submitted to the

SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH

For the degree of

Doctor of Sciences

*Presented by*

**Luca Caricchi**

Master in Earth Sciences, University of Perugia, Italy

born on February 23, 1979

citizen of Italy

*Accepted on the recommendation of*

Prof. Dr. Peter Ulmer

PD Dr. Luigi Burlini

Prof. Dr. Max W. Schmidt

Prof. Dr. Kelly Russell

ETH Zürich

ETH Zürich

ETH Zürich

University of British Columbia

Examiner

Co-Examiner

Co-Examiner

Co-Examiner

**Abstract**

A series of experiments were performed to determine the rheological and physical properties of crystal-bearing magmas at confining pressures between 250 and 300 MPa and temperatures between 20 and 1000 °C. The data were used to compute flow laws able to describe the rheological behavior of partially crystallized magmas inside volcanic conduits and to quantify the effect of the suspended solid fraction on the propagation velocity of seismic waves.

The rheology of crystal-bearing magmas was studied in a system composed of a haplogranitic silicate melt and quartz particles. The high chemical stability of this system enables rigorous control on the parameters relevant for rheology such as the degree of crystallinity and the composition of the melt phase. The experiments provided the possibility to separate and determine the effects of crystal fraction and deformation rate on the viscosity of magma. The results were summarized in a system of equations that account for the complex non-Newtonian behavior of partially crystallized magmas and that were implemented in a numerical code used to simulate the flow dynamics inside volcanic conduits. The numerical modeling revealed that previous codes, which considered magmas as Newtonian fluids, largely overestimated the depth at which the fragmentation of magma takes place. This implies that the recalculated physical properties of magma at the fragmentation depth (e.g. magma vesicularity) were incorrect, inducing significant errors on the reconstruction of eruptive scenarios.

The rheological behavior of natural samples from the 1538 AD eruption of Monte Nuovo volcano (Phlegrean fields, Italy) was investigated for two principal reasons: i) The Phlegrean Fields are a highly populated area (about 1 million inhabitants) and the knowledge of the rheological properties of a potential eruptive magma is fundamental for volcanic risk assessment; ii) The material is characterized by the presence of elongated feldspar crystals (about 40-45 vol. %) making it ideal for the study of the effect of elongated crystals on magma rheology. The rheological behavior was characterized as a function of temperature and strain rates. The presence of elongated suspended crystal reduced sensibly the maximum packing fraction (crystal fraction at which the viscosity increases exponentially) of the system. The

viscosity resulted 1-1.5 order of magnitude higher with respect to the viscosity of materials with comparable crystal fractions containing sub-spherical particles.

Data obtained in this study were combined with literature data to define a mathematical algorithm describing the rheological properties of crystal-bearing magmas over a wide range of crystal fractions and strain rates. Experimental data from each publication were analyzed to extract information on crystallinity, strain rates and crystal shapes. The knowledge of the experimental conditions and the geometrical properties of the particles provided the possibility to assign a physical meaning to the fitting parameters employed in these equations. This, in turn allows describing the variations of viscosity for a variety of different suspensions as a function of crystal fraction, crystal shape and stress conditions.

The advancements made on the understanding of the rheological behavior of crystal-bearing materials were supplemented with a study aimed to determine the physical properties of magmatic suspensions. The propagation velocities of shear ( $V_s$ ) and compressional ( $V_p$ ) waves were measured on material covering a wide range of crystal fractions (from 0 to 0.7) at 200 MPa confining pressure and temperatures up to 1000 °C. These data, in turn, were utilized to compute elastic moduli. The results reveal a remarkable correspondence between the principal increase of the elastic moduli of the material as function of the crystal fraction, and the onset of an exponential increase of viscosity. Propagation of shear waves, increase of  $V_p$ , and a dramatic increase of viscosity are caused by the transition from a liquid-solid suspension to a crystal mush (particles generate a continuous framework) with increasing crystal fraction. The strong differences in elastic properties between solid-liquid suspensions and crystal mushes allow the distinction between a liquid dominated and a relatively highly crystallized magmatic reservoir using the inversion of seismic data. Highly crystallized magmas have very high viscosity that reduces their potential to erupt. Thus, the dataset presented here, combined with seismic inversion tools, could potentially represent a powerful tool to evaluate the probability of a volcanic eruption from a given subvolcanic magma reservoir.

## Riassunto

Sono stati realizzati una serie di esperimenti per determinare la reologia e le proprietà fisiche di magmi parzialmente cristallizzati, a pressioni confinanti tra 250 e 300 MPa e temperature comprese tra 500 e 1000 °C. I dati sono stati utilizzati per produrre equazioni in grado di descrivere il comportamento reologico di magmi parzialmente cristallizzati all'interno di condotti vulcanici e capaci di quantificare l'effetto della frazione di cristalli sulla velocità di propagazione delle onde sismiche.

La reologia di magmi contenenti cristalli è stata studiata in un sistema composto di un melt silicatico di composizione aplogranitica nel quale erano sospese particelle di quarzo. Il sistema in questione è stato scelto per la sua stabilità chimica che permette di controllare con estrema accuratezza i parametri rilevanti per la reologia dei magmi: la frazione di cristalli e la composizione del liquido silicatico. Gli esperimenti hanno permesso di determinare l'effetto del contenuto di cristalli e del tasso di deformazione sulla viscosità del magma. I risultati sono stati riassunti in un sistema di equazioni che tengono conto del comportamento non-Newtoniano di magmi parzialmente cristallizzati. Le equazioni sono state utilizzate in modelli numerici che calcolano le dinamiche di flusso all'interno di condotti vulcanici. Queste simulazioni hanno dimostrato che i codici precedenti, che considerano i magmi come fluidi Newtoniani, sovrastimano ampiamente la profondità di frammentazione.

Il comportamento reologico di campioni provenienti dall'eruzione del 1538 del vulcano Monte Nuovo (Campi Flegrei, Italia) è stato investigato per due ragioni principali: i) I Campi Flegrei sono una regione altamente popolata (circa 1 milione di abitanti) e quindi la conoscenza delle caratteristiche reologiche dei magmi che potrebbero essere potenzialmente eruttati è fondamentale per la valutazione del rischio vulcanico. ii) Le lave provenienti da questa eruzione sono caratterizzate dalla presenza di cristalli allungati di feldspato (circa 40-45 % in volume), che sono ideali per lo studio dell'effetto della forma dei cristalli sulla reologia dei magmi. La reologia è stata studiata in funzione della temperatura e del tasso di deformazione. La presenza di cristalli allungati riduce sensibilmente la frazione di massimo impacchettamento (frazione di cristalli alla quale la viscosità aumenta esponenzialmente) del sistema. Il risultato di questo effetto è una viscosità 1-1.5 ordini di grandezza più alta rispetto

alla viscosità di magmi parzialmente cristallizzati contenenti particelle sub-sferiche, per cristallinità comparabili.

I dati presenti in letteratura e quelli prodotti in questo studio sono stati utilizzati per definire algoritmi matematici che descrivono le proprietà reologiche di magmi contenenti cristalli per una gamma continua di frazioni di cristalli e tassi di deformazione. I dati di ogni pubblicazione sono stati analizzati per ottenere informazioni sulla cristallinità, tassi di deformazione applicati e forma dei cristalli. L'interpolazione dei dati ha permesso di assegnare un significato fisico ai parametri utilizzati per tenere conto degli effetti del tasso di deformazione, geometria e forma delle particelle sulla viscosità dei magmi parzialmente cristallizzati. Queste equazioni permettono di generalizzare il comportamento reologico ad una vasta gamma di sospensioni di un solido in un liquido.

Lo studio del comportamento reologico dei materiali parzialmente cristallizzati è stato implementato con uno studio delle proprietà fisiche delle sospensioni magmatiche. Le velocità di propagazione di onde di taglio ( $V_s$ ) e di compressione ( $V_p$ ) è stata misurata in magmi contenenti diverse frazioni di cristalli (0-0.7) a 250 MPa di pressione confinante e temperature fino a 1000 °C. Questi dati hanno permesso di calcolare i moduli elastici. I risultati hanno dimostrato una rimarchevole corrispondenza tra il forte aumento dei moduli elastici dei magmi, in funzione del grado di cristallinità, e l'inizio dell'aumento esponenziale della viscosità. La propagazione di onde di taglio, l'aumento delle  $V_p$  e il drammatico incremento di viscosità sono dovute alla transizione, con l'aumento della cristallinità, da sospensioni di particelle in un fuso a materiali nei quali i cristalli sono in reciproco contatto. La forte differenza di proprietà elastiche tra sospensioni di un solido in un liquido e magmi altamente cristallizzati permette di distinguere, utilizzando l'inversione dei dati sismici, tra magmi totalmente fusi e ricchi in cristalli. La presenza di elevati contenuti di cristalli aumenta in maniera drammatica la viscosità dei magmi e questo riduce la loro possibilità di eruttare; quindi i dati presentati combinati con l'inversione dei dati sismici potrebbero essere usati come uno strumento per assegnare la probabilità di un'eruzione vulcanica.