



Doctoral Thesis

## The role of the fluid phase during deformation and low grade metamorphism

**Author(s):**

Simpson, Guy D.H.

**Publication Date:**

1998

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-002024715> →

**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. 12845

**THE ROLE OF THE FLUID PHASE DURING  
DEFORMATION AND LOW GRADE METAMORPHISM**

A dissertation submitted to the  
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZÜRICH

For the degree of  
DOCTOR OF NATURAL SCIENCES

Presented by

**Guy D. H. Simpson**

B.Sc.(Hon.), M.Sc., University of Otago, Dunedin, New Zealand

Born August 16, 1970

Citizen of New Zealand

Accepted on the recommendation of

Prof. Dr. A.B. Thompson	ETH Zürich	Examiner
Dr. J.A.D. Connolly	ETH Zurich	Co-examiner
Dr. H. Stünitz	Basel University	Co-examiner

1998

## ABSTRACT

*The relationship between deformation and dehydration has been investigated in Hercynian regionally metamorphosed rocks exposed on NW Sardinia. Two episodes of prograde mineral growth ( $M_1$  and  $M_2$ ) involving dehydration are recognised: growth of chlorite/phengite porphyroblasts at anchizone metamorphic conditions, contemporaneous with the first phase of deformation,  $D_1$ , and growth of biotite from chlorite and phengite coincident with the second phase of deformation,  $D_2$ . Deformation during both episodes of dehydration is characterised by penetrative axial planar foliations defined by well-developed phyllosilicate preferred orientations quantified by XRD textural goniometry, tight to isoclinal similar folds (interlimb angles  $< 40^\circ$ ), and mineral-filled veins (hydrofractures) oriented parallel to axial planar foliations, that formed contemporaneously with the development of the penetrative foliations. No prograde mineral growth occurred during  $D_2$  at chlorite-zone conditions.  $D_2$  deformation in the absence of dehydration is characterised by non-penetrative crenulation cleavages, poorly developed phyllosilicate preferred orientations, relatively open (interlimb angles  $> 40^\circ$ ), low-strain similar folds and minor brittle deformation. Systematic variations in macrofold interlimb angles, with respect to the timing of mineral growth, indicate that enhanced shortening (c. 80 %) occurred during dehydration. Microfabrics show that the onset of dehydration is associated with the transition from a crenulation cleavage to a penetrative foliation. The presence of axial planar hydrofractures that formed coevally with dehydration and fabric development requires that supralithostatic fluid pressures and low differential stresses ( $< c. 20$  MPa) accompanied dehydration. These features demonstrate a connection between the timing of dehydration and the style of deformation.*

*A time-independent, cellular automaton model based on the elastic mechanics of tensile (mode I) microcracks was developed to investigate the evolution of rock strength and hydraulic connectivity during progressive dehydration. Fluid produced by dehydration is assumed to be accommodated by microcracks, which propagate through a simulated rock matrix due to elevated fluid pressures. Crack propagation affects rheology by stress relaxation and interaction, and affects hydrology by permitting fluid flow between neighbouring cracks. Numerical simulations with undrained boundary conditions show that reactions releasing small quantities of fluid ( $< 0.25$  wt. %) in a rock matrix with zero initial hydraulic connectivity induce large strength reductions (ca. 80-90%). Strength reduction occurs abruptly at the onset of dehydration and continues until approximately 10 % reaction, when a low-strength plateau is reached. Subsequent reaction causes almost no further effect on rock strength until the percolation threshold is attained, at which point the strength drops to zero. Results with drained boundary conditions yield similar strength reductions before hydraulic connectivity of the crack network is achieved. Thereafter, fluid drainage allows partial strength recovery. The results indicate that the dominant rheological response induced by dehydration is caused by the generation of fluid*

*overpressures and is unrelated to the establishment of hydraulic connectivity coinciding with attainment of the percolation threshold. Although rocks characterised by zero initial hydraulic connectivity retain additional strength relative to rocks with initial hydraulic connectivity, the magnitude of this additional strength is small (< 20 % original strength).*

*The spatial distribution of a single generation of axial planar synmetamorphic veins exposed in greenschist facies rocks on NW Sardinia was investigated with the aim of gaining insight into the processes controlling the fracture spacing. The vein spacing distribution measured along linear profiles is non-uniform and approximately lognormal. Although the vein abundance and absolute vein spacing is strongly influenced by rock type, the vein spacing distribution is independent of rock type. Comparison of the observed spacing data with synthetically-generated fracture distributions indicates that the observed distribution can be reproduced by the process of Kolmogorov fragmentation, but cannot be reproduced by either random, even-bisection or fractal processes. These results are interpreted to indicate that the positions of the fractures which become veins are interdependent. In an attempt to explain the interdependency of fracture positions, the perturbations of stress and fluid pressure associated with an isolated open underpressured axial planar fracture were investigated. Simple calculations show that the fluid pressure drop inside a fracture coinciding with failure locally perturbs the adjacent stress and fluid pressure fields such that the surrounding rock, extending over a lateral extent equivalent to approximately two fracture lengths, is instantaneously driven into a critical stress state that satisfies the failure condition. This tends to localise the nucleation of subsequent fractures close to existing fractures. This mechanism can explain the existence of non-random or clustered fracture or vein spacing distributions forming by hydrofracture.*

*Mechanisms proposed for the formation of metamorphic quartz veins are evaluated by considering simple models based on the assumption that the kinetics of silica dissolution and precipitation are fast in comparison to silica transport. The models are used to determine parameters required to form veins by various mechanisms, which are then compared with constraints imposed by consideration of the time- and length- scale of metamorphic processes. Results indicate that mechanisms involving large scale steady state advective fluid flow (either fracture-induced focusing or thermal convection) cannot explain the occurrence of quartz veins due to the unrealistically large vertical length scale (> 1000 m) over which hydraulic connectivity must be maintained. A mechanism whereby fluid is recycled on a local scale by pressure variations caused by episodic brittle failure is demonstrated to contribute to, but not entirely account for, the formation of quartz veins. Steady state diffusive mass transfer driven by local stress gradients may be important for the formation of veins if fractures, in differentially stressed rocks, remain open for a time interval on the order of  $10^5$  years. It is concluded that metamorphic quartz veins are most likely formed by a combination of silica precipitation from a fluid mobilised on a local scale due to episodic failure and local diffusion induced by stress induced chemical potential*

gradients. Thus, metamorphic quartz veins are interpreted as passive features which form in response to local processes driven by deformation under high fluid pressures.

The phase relations of divariant and trivariant assemblages involving combinations of phengite, chlorite, biotite, K-feldspar, quartz and H<sub>2</sub>O were calculated with THERMOCALC for the KFMASH system and the KMASH and KFASH subsystems. The stability fields of the various equilibria are represented in pressure-temperature projections by contouring sets of compositional isopleths for the Tschermak (Mg<sub>1</sub>Si<sub>1</sub>Al<sub>2</sub>) and FeMg<sub>1</sub> exchange vectors, buffered by the coexisting phyllosilicate phases. Four multivariant equilibria, which occur in different regions of pressure-temperature-composition space, are potentially useful as thermobarometers for low-medium grade metamorphic rocks of granitic and pelitic composition. Thermobarometric calculations performed here show reasonable agreement with respect to experimental and field-based data and calculations performed with alternative data bases and solution models, at phengite compositions close to the muscovite end-member, but display progressively larger discrepancies towards the celadonite end-member. Fortunately, because celadonite-rich compositions (i.e. > 50 mol% celadonite) are unusual in nature, the actual differences resulting from the choice of data and solution models are anticipated to be significantly less than 5 kb for any given temperature and composition. This study demonstrates the potential value of multivariant assemblages for obtaining thermobarometric estimates, but indicates that the current errors associated with such calculations may be on the order of 1 kb.

## RIASSUNTO

*Il presente lavoro studia la relazione tra deformazione e disidratazione nelle rocce metamorfiche di età ercinica affioranti nella Sardegna nordoccidentale. Si riconoscono due episodi di crescita mineralogica prograde comportanti disidratazione. Il primo episodio è caratterizzato dalla crescita porfiroblastica di fengite e clorite in condizioni anchimetamorfiche, contemporanea alla prima fase di deformazione,  $D_1$ . Il secondo episodio comporta la crescita di biotite da clorite e fengite, contemporanea alla seconda fase di deformazione,  $D_2$ . In entrambi gli episodi di disidratazione la deformazione è caratterizzata da i) pieghe isoclinali a ventaglio (angolo di apertura  $< 40^\circ$ ); ii) formazione di una foliazione di piano assiale a carattere penetrativo, evidenziata dalla orientazione preferenziale dei fillosilicati, orientazione quantificata da analisi al goniometro tessiturale XRD; e iii) vene (fratture idrauliche) parallele alla suddetta foliazione. La seconda fase di deformazione è contraddistinta dall'assenza di cristallizzazioni prograde in zona cloritica. In assenza di disidratazione la deformazione è caratterizzata da i) pieghe a ventaglio relativamente aperte (angolo di apertura  $> 40^\circ$ ); ii) un clivaggio di crenulazione poco sviluppato; e iii) limitata deformazione fragile. La variazione sistematica degli angoli di apertura relativa alla formazione contemporanea o meno delle pieghe con la crescita mineralogica, testimonia come il raccorciamento sia accentuato (ca. 80 %) durante la disidratazione. Le microstrutture indicano che con l'incedere della disidratazione avviene una transizione da clivaggio di crenulazione a clivaggio a carattere penetrativo. La presenza di fratture idrauliche parallele al piano assiale coeve alla disidratazione ed allo sviluppo del 'fabric', è indicativa del fatto che la disidratazione sia stata accompagnata da pressioni di fluido sopralitostatiche e da bassi sforzi differenziali ( $< ca. 20 \text{ MPa}$ ). I suddetti fenomeni dimostrano la stretta relazione tra stile di deformazione ed età della deformazione.*

*L'evoluzione della resistenza delle rocce e della connettività idraulica susseguente a disidratazione progressiva è stato studiato grazie ad un modello numerico. Presupposto del modello è che i fluidi generati dalla disidratazione vengano accomodati in microfratture, le quali, grazie alle elevate pressioni di fluido che si vengono a creare, si propagano nella matrice. Il propagarsi delle fratture si ripercuote sulla reologia, facendo rilassare ed interagire gli sforzi, e sulla idraulica, permettendo il flusso di fluidi tra fratture vicine. Le simulazioni numeriche in condizioni di limite non drenate mostrano come reazioni che liberano piccole quantità di fluido ( $< 0.25 \text{ wt. } \%$ ) in una matrice rocciosa con connettività idraulica iniziale uguale a zero causino una drastica riduzione della resistenza delle rocce (ca. 80-90%). Questa riduzione avviene, istantaneamente, all'inizio della disidratazione e continua fino a che la reazione sia avvenuta pressappoco per il 10%, quando la resistenza si stabilizza. L'ulteriore procedere della reazione non produce altri effetti fino a che la soglia di percolazione viene raggiunta, dopo di che la roccia non sarà più in grado di sostenere alcuno sforzo differenziale. Nel caso di condizioni di limite drenate i risultati sono simili finché si raggiunge la connettività idraulica della rete di fratture, dopo di che il*

---

*drenaggio di fluidi consente un recupero parziale della resistenza. I risultati indicano come la principale risposta reologica alla disidratazione sia causata dallo sviluppo di sovrappressioni di fluido e non sia da mettere in relazione con l'istaurarsi della connettività idraulica coincidente al raggiungimento della soglia di percolazione. Sebbene i campioni con connettività iniziale uguale a zero mantengano una resistenza superiore ai campioni con connettività iniziale l'ammontare di tali valori è minimo (<20% resistenza iniziale).*

*La distribuzione nello spazio di una singola generazione di vene di piano assiale coincidenti al metamorfismo nella facies degli sciti verdi nelle rocce affioranti nella Sardegna nordoccidentale è stata studiata con l'intento di illustrare i processi che regolano la distribuzione delle distanze intercorrenti tra le vene. La distribuzione statistica delle distanze intervenute misurate lungo profili lineari non è uniforme e può essere rappresentata con una distribuzione log-normale. Sebbene l'abbondanza di vene e la loro spaziatura assoluta dipenda fortemente dalla litologia, la distribuzione delle spaziature ne è indipendente. Paragonando le spaziature osservate in campagna con quelle prodotte sinteticamente si stabilisce che la distribuzione osservata può essere prodotta dal processo di frammentazione 'Kolmogorov' ma non può essere generata da processi 'random', di bisezione-equa o frattali. L'interpretazione di questi risultati è che le posizioni delle fratture che diventeranno vene sono interdipendenti. Con l'intento di spiegare tale interdipendenza si sono studiate le perturbazioni dello sforzo e della pressione del fluido associate ad una vena di piano assiale isolata, aperta e in sottopressione. Semplici calcoli mostrano che la caduta di pressione del fluido nella vena associata alla rottura perturba sia il campo di sforzo che la pressione del fluido nella roccia circostante cosicché questa, estendendosi lateralmente di approssimativamente due volte la lunghezza della vena, viene immediatamente a trovarsi in condizioni di sforzo critiche soddisfacenti il criterio di rottura. Questo fenomeno porta alla localizzazione ed al nuclearsi di nuove fratture in prossimità delle fratture già esistenti. Tale meccanismo spiegherebbe la formazione per idrofratturazione di una distribuzione delle spaziature intervenute o interfettura 'non-random' o a grappoli.*

*Si procede ad una valutazione dei meccanismi proposti per la formazione di vene metamorfiche di quarzo considerando modelli semplici basati sul presupposto che la cinetica di dissoluzione e precipitazione di silicio sia più efficiente del trasporto del medesimo. I modelli sono usati per determinare i parametri necessari alla formazione di vene secondo i diversi meccanismi per poi compararli con limiti temporali e spaziali imposti dai processi metamorfici. I risultati indicano che i meccanismi comportanti flusso di fluidi avvertivo 'steady-state' su larga scala (focalizzazione indotta da fratture o convezione termica) non sono in grado di spiegare il formarsi di vene di quarzo, poichè la loro formazione richiederebbe che la connettività idraulica fosse mantenuta per distanze superiori a 1000 m e ciò è irrealistico. Il meccanismo per cui i fluidi vengono riciclati localmente grazie a variazioni di pressione causate dalla rottura fragile episodica risulta*

---

*contribuire alla formazione di vene anche se non è in grado di spiegarle interamente. Il trasporto di materiale per diffusione 'steady-state' causato da gradienti di sforzo locali potrebbe spiegare la formazione delle vene se queste restassero aperte per un lasso di tempo superiore a  $10^5$  anni. Si conclude che la formazione di vene quarzitiche sia dovuta ad una concomitanza di precipitazione di silicio da fluidi mobilizzati localmente grazie a rottura episodica e di diffusione localizzata indotta da gradienti di potenziale chimico dovute a sforzi. Pertanto le vene sono interpretate come strutture passive formatesi in risposta a fenomeni locali causati da deformazione a pressione di fluido elevata.*

*Le relazioni di fase di paragenesi divarianti e trivarianti concernenti una combinazione di fengite, clorite, biotite, feldspato potassico, quarzo e  $H_2O$  sono state calcolate nel sistema KFMASH e nei sottosistemi KMASH e KFLASH. Il campo di stabilità dei vari equilibri è rappresentato in proiezioni pressione-temperatura contornando dei set di isoplete per i vettori di scambio Tschermak ( $Mg_{,1}Si_{,1}Al_2$ ) e  $FeMg_{,1}$ , tamponati dalle fasi di fillosilicati coesistenti. Quattro equilibri multivarianti, localizzati in spazi pressione-temperatura-composizione differenti, sono potenzialmente utili per la stima di limiti termobarometrici del metamorfismo a basso e medio grado in rocce pelitiche e granitiche. I calcoli risultano in accordo con i dati sperimentali e di terreno per composizioni fengitiche vicine al termine muscovite, tuttavia presentano discrepanze progressivamente più importanti (sino a 5 kb) con l'avvicinarsi al termine celadonite. Questo studio conclude che la termobarometria basata su fengite è in grado di fornire limiti pressione-temperatura realistici ma che gli errori associati a tali stime possono essere notevoli, soprattutto per composizioni fengitiche con un contenuto celadonitico superiore a 40-50%.*