

Effetti della tettonica traslativa sulla circolazione idrica

Vincenzo Francani (*Tethys Srl*)

14 marzo 2023

Riassunto

Lungo le faglie trasformi la circolazione idrica assume particolare rilievo per le seguenti cause:

1. Questo tipo di faglie comporta stiramento dei due blocchi di roccia che ne sono interessati, coinvolgendo una fascia di territorio di grande estensione, in cui la deformazione avviene in più fasi e con diverse direzioni di movimento, prevalentemente orizzontale. Nelle rocce fragili, dai movimenti lungo le discontinuità, si producono faglie anche transpressive minori con strutture a fiore positive, prodotte dal movimento verso l'alto di blocchi di roccia che determinano settori a elevata permeabilità (anche 1-0,1 m/giorno). L'effetto saliente è la creazione lungo le faglie transpressive di zone di detensionamento nelle quali i ricercatori hanno individuato anche ampi movimenti gravitativi profondi.
2. Nelle rocce calcaree i fenomeni descritti si ripetono, ma sono ampliati dal carsismo; inoltre le strutture a fiore sono generalmente molto più estese per la maggiore deformabilità delle rocce, in specie se hanno subito un'intensa fratturazione. I bacini idrogeologici dei corpi idrici sotterranei sono quindi tendenzialmente alquanto più estesi di quelli dalle rocce fragili, e alimentano maggiori afflussi verso i corpi idrici ricettori. Quando il basamento impermeabile dell'acquifero carbonatico viene a emergere sui fondi vallivi, si hanno sorgenti con portate anche superiori al centinaio di m³/s, come nel Gruppo delle Grigne (Fiumelatte, sorgenti della Valle del t.Pioverna). Nel caso di rocce sedimentarie, è frequente che l'estrusione del basamento poco permeabile, fenomeno tipico delle faglie transpressive, porti invece alla formazione di sorgenti numerose anche di discreta portata.
3. Nelle rocce sedimentarie con elevata componente argillosa o comunque poco permeabili, i fenomeni descritti sono ridotti, sia per la scarsa permeabilità dei terreni superficiali, sia per l'intasamento dei condotti da parte di argille di alterazione.

Abstract

Translational faults have a marked hydrogeological role, due to causes that be summarized as follows:

1. *This type of fault involves stretching the two blocks of rock that are affected, involving a strip of territory of great lateral extension. For rocks with brittle behavior in this area there is a degradation of the quality of the rock. Stretching takes place in several phases and with different directions of movement, mainly vertical. From the movements along the discontinuities, even minor transpressive faults are produced with flower structures that open upwards determining sectors with high permeability (even 1-0.1 m / day). The main effect is the creation of large and deep detensioning zones to which deep gravitational movements also correspond.*
2. *In ductile rocks, in particular calcareous plastic rocks, the phenomena described are amplified by karst; moreover, the flower structures are generally much more extensive due to the great deformability of the rocks, also accompanied by an intense fracturing. The hydrogeological basins of groundwater bodies are therefore wide and deep, feeding considerable inflows towards receiving water bodies. When the deep impermeable base emerges on the valley bottoms, there are sources of hundreds of cubic meters /s, as in the Grigne Group (Fiumelatte, sources of the Valle del t.Pioverna). In the case of sedimentary rocks, it is frequent that the extrusion of the basement, a*

typical phenomenon of transpressive faults, leads to the formation of numerous springs even of discrete flow.

- 3. In rocks with a high clayey component or in any case not very permeable, the phenomena described are reduced, both for the poor permeability of the surface soils, and for the clogging of the ducts operated by the sedimentation of the alteration clays.*

Premessa

Lungo le maggiori faglie trascorrenti si nota l'addensarsi di movimenti franosi, anche di grandi dimensioni, e sovente di sorgenti di grande portata. E' noto che questi sono gli effetti dell'indebolimento della compagine rocciosa, in seguito alle deformazioni alle quali la roccia è soggetta durante la genesi di questo tipo di dislocazione. Spesso la superficie di rottura di queste dislocazioni è curvilinea, come si verifica di frequente per faglie traspressive. E' noto infatti che queste dislocazioni vedono sommarsi alle spinte che generano faglie trasformi, sforzi non diretti nella medesima direzione, che possono presentare in alcuni casi ampie zone di fratturazione.

La complessità degli eventi che accompagnano la trascorrenza e la loro varietà, rendono utile la rassegna proposta in questo articolo delle tipologie di faglie trascorrenti, in cui si espongono alcuni esempi dei riflessi sul campo di pressioni e portate che si instaura in tali strutture, prendendo in considerazione casi di rocce cristalline, calcaree e flyschoidi.

L'argomento è stato esaminato dalla letteratura con il sussidio e il conforto di dati di regime idrico, di caratteri idrochimici e isotopici, tenuto conto anche dei parametri rilevati prima e dopo i sismi (es. Fronzi e al., 2021 per il terremoto delle Marche). Numerosi sono anche gli esempi ricavabili dalla letteratura estera, della quale si può citare come riferimento Caine, J.S., Evans, J.P., Forster, C.B. (1996).

1. Gneiss, micascisti e filladi, serpentiniti

Le rocce a comportamento fragile subiscono comunque gli effetti di questo tipo di dislocazione, mostrando intorno alle faglie trascorrenti ampie fasce di rocce degradate e fratturate. In questa zona di degrado vediamo che in specie le rocce più scistose come filladi e micascisti, sono sottoposte a piegamenti e caoticizzazione, faglie secondarie con cataclasi. Sono frequenti le scaglie tettoniche di gessi e marmi. Le filladi si distinguono tra queste le rocce per il fatto che danno luogo a situazioni di pericolosa instabilità. Nelle rocce cristalline più duttili, come micascisti, serpentiniti e filladi, si osservano in effetti piegamenti accentuati e scaglie tettoniche anche a grande distanza dalla faglia principale.

Negli ortogneiss si nota che si sviluppano frequentemente faglie secondarie con cataclasi e frequenti fault gouge, che favoriscono localmente la circolazione idrica.

La morfologia di queste aree è caratterizzata da fasce di frattura estese e spesso tra di loro ben collegate, che crea le premesse per un elevato stato di alterazione superficiale, a cui segue in profondità una spessa zona di decadimento delle caratteristiche meccaniche anche di molte decine di metri, fino al contatto con roccia più compatta ma percorsa da fasce di frattura più permeabili fino a 400-500 m dalla superficie.

Tali condizioni si riscontrano in tutte le regioni, ad esempio nel settentrione presso Genova a contatto con la linea Sestri Voltaggio in Liguria , nei metabasalti del M. Figogna , in Valtellina lungo la Linea Insubrica e in Trentino.

Nel caso della Linea Insubrica della Valtellina la zona di degrado si estende per oltre 2 km di ampiezza, interessando prevalentemente gneiss minuti, ma anche ortogneiss, micascisti e filladi, e produce un'ampia area di detensionamento nella quale sono presenti anche movimenti gravitativi profondi ben descritti da un'ampia e ben documentata letteratura .

Al decadimento delle proprietà meccaniche della roccia contribuisce la genesi di **faglie transpressive** sulle quali si impostano le valli che scendono dai versanti della Valtellina.

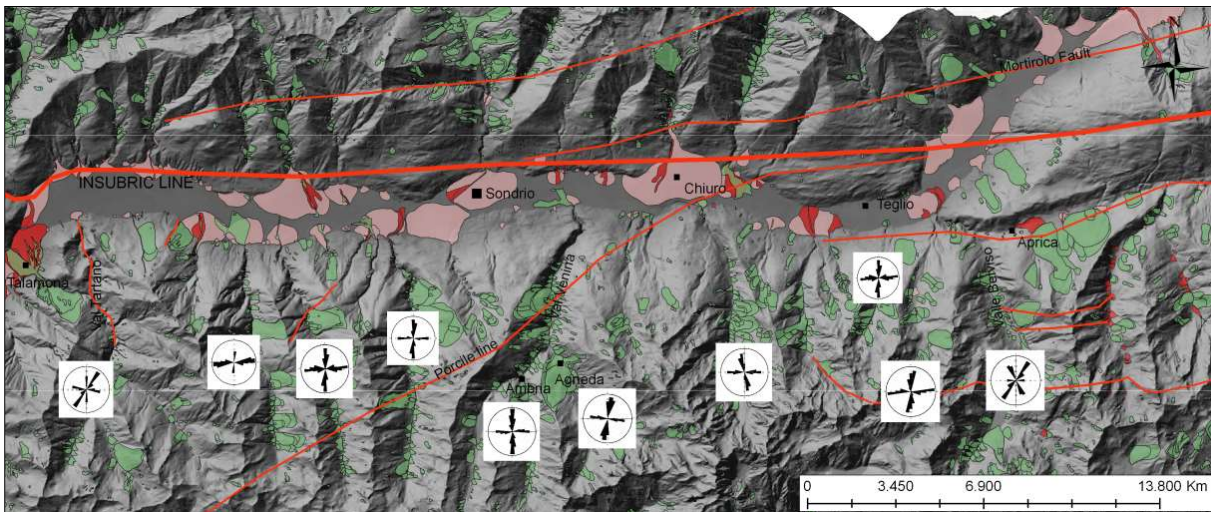


Figura 1 Il sistema di faglie del versante meridionale della Valtellina, fra la Linea Insubrica e La linea Orobica

Dalle analisi effettuate dalla Regione Lombardia, di cui si riporta una sintesi modificata nella figura 1, si nota che l'area appare dominata morfologicamente da una serie di faglie dirette E-O e subverticali, che storicamente hanno dato luogo a più o meno estese frane. Questi aspetti sono simili in tutta la larga fascia rappresentata dalla figura 1, e sono evidenziate nello schema di figura 2, che descrive l'assetto delle discontinuità principali.

Di queste, l'analisi sul terreno evidenzia la particolare struttura, che comporta con grande frequenza la presenza di fault gouge che si intersecano con strutture che ne sono prive.

La roccia mostra evidenza di movimenti di grandi blocchi per scivolamento lungo i livelli di gouge , e di distacco soprattutto lungo le dislocazioni con strutture a fiore, che per la loro maggiore apertura e permeabilità consentono l'infiltrazione e l'aumento di pressione neutra nelle fratture.

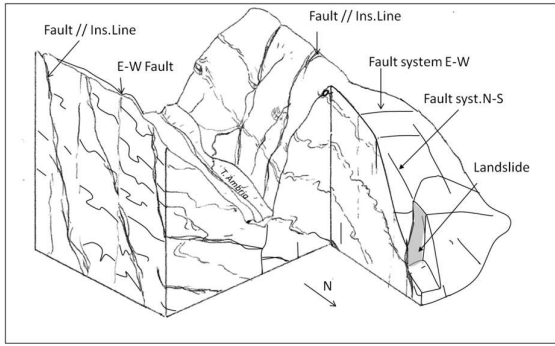


Figura 2 schema della genesi idrogeologica delle frane delle valli laterali

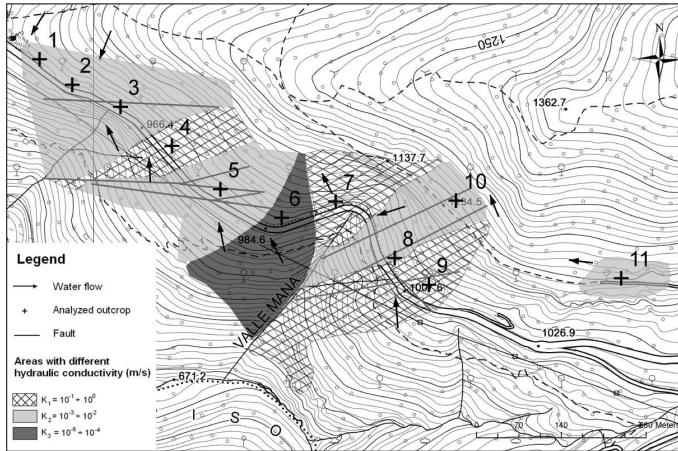


Figura 3: distribuzione della permeabilità media nel tratto franoso

Queste condizioni si sviluppano a poca distanza le une dalle altre (figura 4 e 5) e su estensioni lineari così estese da produrre su aree molto ampie condizioni di debolezza e franosità.

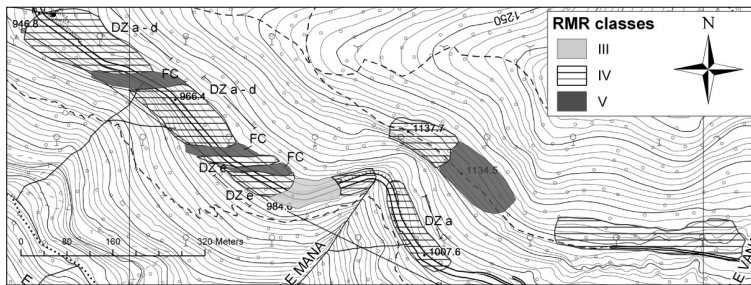


Figura 4: distribuzione delle classi qualitative dell'ammasso roccioso

La circolazione idrica rimane confinata a portate unitarie ridotte, e le sorgenti di maggiore interesse sono concentrate al piede dei movimenti gravitativi profondi, purtroppo frequenti nella zona di degrado meccanico impostata sulla Linea Insubrica.

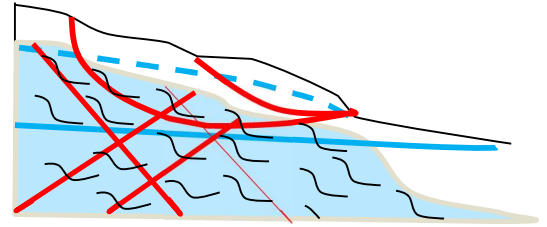
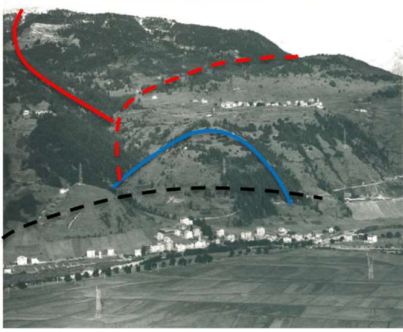


Figura 5 : un esempio di movimento gravitativo profondo lungo faglia trascorrente presso Bormio (Gattinoni e al,2019). La linea rossa continua rappresenta la porzione occidentale della zona di distacco, a tratteggio è indicata una delle vicarianti principali che attraversano il DGPV; in blu la nicchia di distacco di un movimento franoso secondario (modificata Gattinoni e al.2019) A destra schema geologico della zona di frana profonda presso Bormio(Gattinoni e al.2019). Sono indicate in rosso le superfici di scorrimento principali, in rosso e arancio le zone di frattura principali lungo le quali avviene la circolazione idrica affiorante nella copertura detritica e glaciale nella quale si sviluppa il DGPV

Nelle rocce metamorfiche basiche come serpentiniti e metabasalti, si sono riscontrate deformazioni più ampie di quelle delle rocce intrusive. Ad esempio nella Val Polcevera i metabasalti (unità tettonica del M.Figogna) danno luogo in corrispondenza di faglie traspressive a strutture fiorite che coprono oltre un km², come risulta dalla figura seguente.

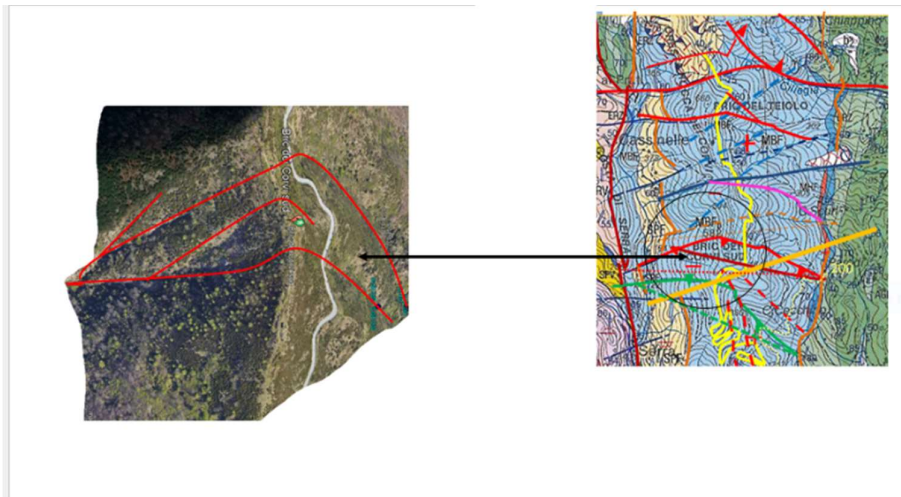


Figura 6: faglia traspressiva del Bric dei Corvi (Genova) e relativa rappresentazione geologica, modificata dal Foglio Genova. Nella foto a sinistra sono riportate le sorgenti. Si nota sulla carta geologica la presenza nella parte occidentale della carta geologica della zona Sestri Voltaggio, che una faglia trasforme verticale diretta N-S. separa dall'unità del M.Figogna affiorante sul rilievo dei Bric dei Corvi

Di conseguenza, la circolazione idrica di questo settore è più estesa e interconnessa, e le sorgenti dell'area indicata hanno portate anche di 5 l/s, 20 volte alla media dell'area.

2. Rocce carbonatiche

Le **rocce carbonatiche** consentono l'infiltrazione e la circolazione d'acqua anche per carsismo. Quella che nelle rocce cristalline è la coltre superficiale detensionata e alterata, nei calcari costituisce l'epicarso, in cui la circolazione idrica è marcata per la spesso rilevante permeabilità che deriva dalla presenza di condotti carsici ben interconnessi, dove i depositi argillosi derivanti dall'alterazione non ne occludono l'apertura. Dall'epicarso, che può avere alcune decine di metri di spessore massimo, nascono sorgenti, in particolare al contatto con la sottostante roccia meno permeabile.

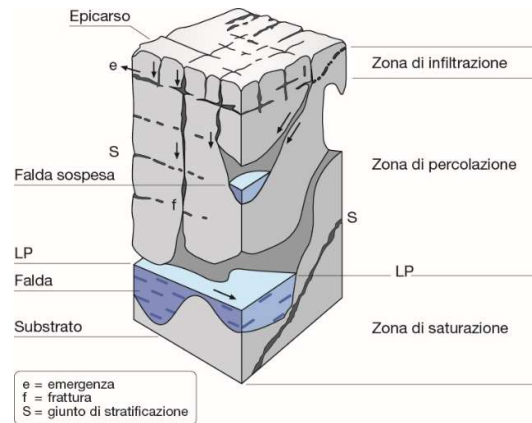


Figura 7 schema della circolazione carsica, dove si nota nella zona di percolazione la presenza di un acquifero locale sostenuto da rocce meno permeabili

In queste circostanze le acque sotterranee che si approfondiscono oltre l'epicarso tendono ad accumularsi al contatto con i livelli impermeabili profondi, e danno luogo a risorse idriche

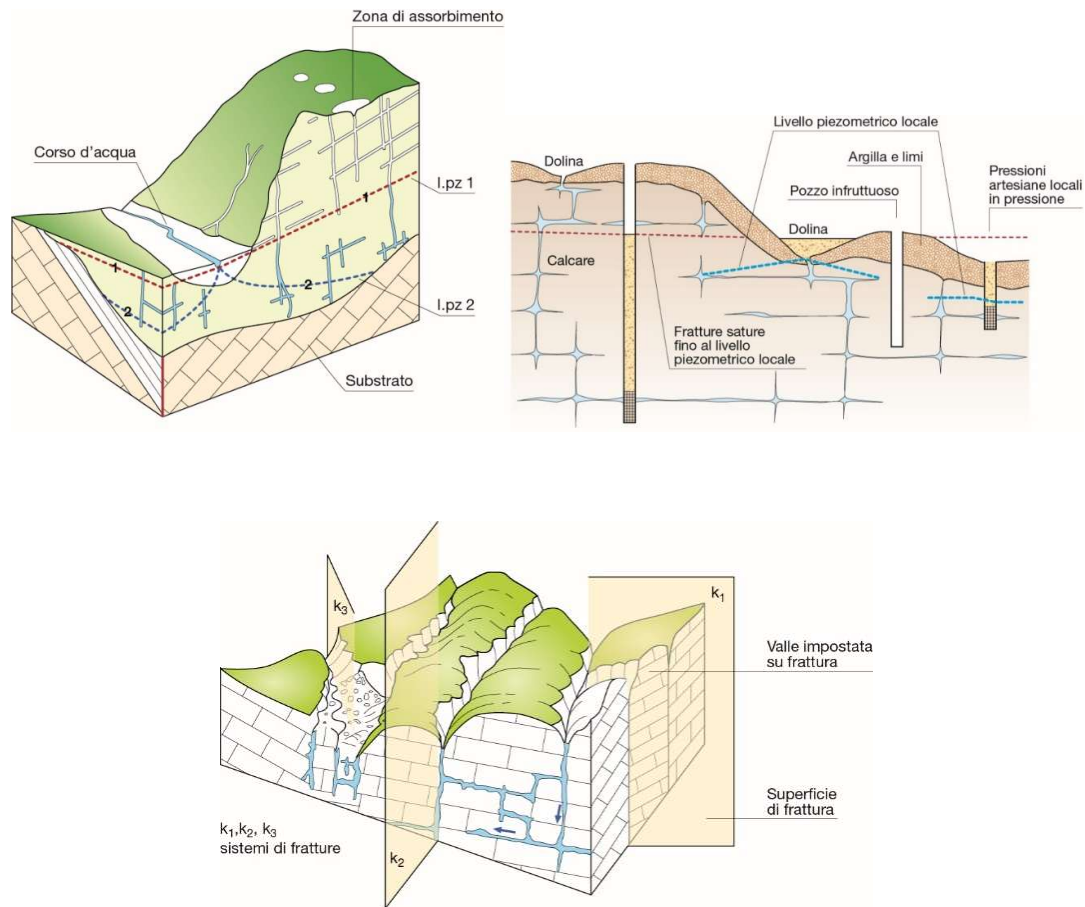


Figura 8 : Il corso d'acqua si comporta come una sorgente lineare: riceve da una falda superficiale le acque provenienti dai calcari e le trasmette alla falda profonda

Ne deriva che gli avvallamenti impostati sulle zone di frattura ricevono acque sotterranee lungo il loro percorso, e si comportano come **sorgenti lineari**, che diventano a loro volta una fonte di alimentazione per l'acquifero posto a valle. In tal modo la circolazione idrica dei calcari si distingue per la sovrapposizione della circolazione superficiale e sotterranea, che in molti casi devono essere esaminate con pari accuratezza e le cui connessioni diventa essenziale comprendere chiaramente.

Una prima lettura degli esempi disponibili consente di rilevare che le dislocazioni più interessanti per i loro riflessi idrogeologici sono sovrascorrimenti e le faglie, fra le quali assumono particolare incidenza quelle trascorrenti e le loro molteplici tipologie

2.1 Sovrascorrimenti e pieghe faglia

I sovrascorrimenti (faglie inverse a basso angolo) comportano la fratturazione intensa della roccia, quasi sempre con *gouge*, su estensioni di territorio molto vaste, drenanti quindi bacini idrogeologici estesi e resi permeabili dalle ampie zone di frattura ben interconnesse, nel senso indicato da Gattinoni e Scesi (2004).

I sovrascorrimenti sono favorevoli alla genesi di sorgenti di grande portata e continuità nel corso dell'anno.

Vanno distinte le porzioni di bacino che si trovano alla base delle masse sovrascorse da quelle che si trovano invece nella parte sommitale della dislocazione; le prime infatti hanno inclinazione ridotta, e favoriscono l'accumulo delle acque sotterranee, le seconde il drenaggio. Conseguenza di grande importanza delle forti spinte che generano i sovrascorrimenti è il fatto che, come per le faglie trascorrenti, la fascia di roccia dislocata e fratturata che comprende il sovrascorrimento può essere larga anche diversi km, con riflessi sulla morfologia (molti avvallamenti paralleli al sovrascorrimento) e sulla circolazione idrica sotterranea molto intensi ed estesi.

Una piega faglia si verifica quando i singoli segmenti della faglia si sovrappongono e si collegano tra loro, e sono distinte in base al senso dello scorrimento (orizzontale o verticale).

Il tipo di strutture che si formano lungo la faglia a scorrimento orizzontale dipendono dal senso di slittamento rispetto al senso dello scavalcamento.

Quando una faglia sinistra scavalca a destra o una faglia destra scavalca a sinistra, si forma una curva restringente \downarrow . Queste sono aree, dette duplex contrazionali, che subiscono un sollevamento, una compressione della crosta e l'esumazione del substrato poco permeabile. Un esempio di planimetria di duplex contrazionale limitato da una curva restringente è rappresentato nella figura 9. Come osservato in esposizioni affioranti fortemente erose o da indagini geofisiche subsuperficiali, le pieghe restrittive definiscono comunemente strutture "a fiore positivo".

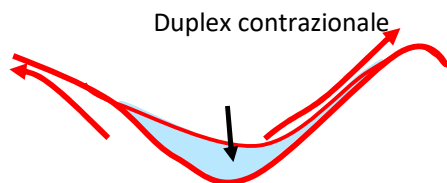


Figura 9: Carta geologica semplificata di un duplex contrazionale determinato dalla compressione del nucleo (in colore) per lo slittamento degli ammassi rocciosi separati dalle due faglie transpressive.

2.2 Faglie trascorrenti

La faglia di **trazione o taglio (tear fault)** è una trascorrente in cui la superficie di scorrimento è circa verticale e i cui blocchi si spostano lateralmente l'uno accanto all'altro. Queste dislocazioni sono associate preferenzialmente a faglie inverse e sovrascorrimenti le cui spinte generano la separazione dei blocchi con piani che contengono la direzione di movimenti, lungo i quali si sviluppa una rilevante fratturazione della roccia. L'afflusso delle acque converge nei punti in cui le vicarianti del sovrascorrimento e delle faglie di trazione si incontrano, Nella figura semplificata è indicata la localizzazione preferenziale delle sorgenti.

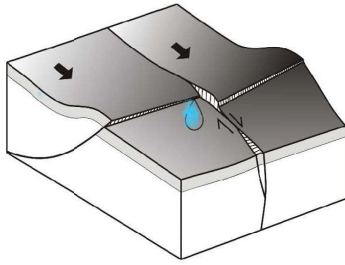


Figura 10 :localizzazione preferenziale delle sorgenti lungo le faglie di trazione

Un altro effetto importante di questa struttura consiste nel fatto che i corsi d'acqua si impostano lungo la rete di zone di frattura così originata, dalle quali possono ricevere una consistente alimentazione .

2.3 Faglie transpressive

Le zone di taglio transpressive sono caratterizzate da un'associazione di strutture che suggerisce una compressione normale alla zona e un taglio **parallelo** alla zona.

Le faglie **transpressive** danno luogo anche a estese strutture a fiore positive, come in forma più limitata si è detto per le rocce cristalline, che fanno emergere il substrato poco permeabile coperto dalle rocce calcaree.

Le sorgenti che ne derivano si alimentano dalla riserva idrica profonda immagazzinata nella roccia calcarea, e quindi possono comportare il rilascio di notevoli volumi d'acqua nel corso dell'anno ; per la profondità raggiunta dal circuito dal quale provengono queste acque , talora sono termali e mineralizzate.

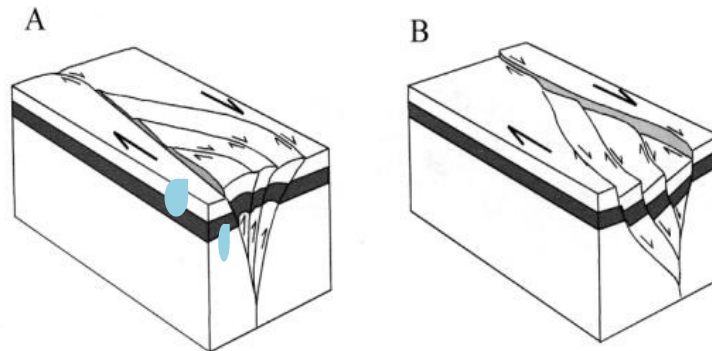


Figura 11: strutture a fiore positiva (a sinistra) e negativa , con le sorgenti che emergono per l'estrusione del substrato

3.Rocce sedimentarie a elevato contenuto di argille

I Flysch e le arenarie possono ospitare litozone poco permeabili per la presenza di livelli argillosi o marnosi o per l'elevato contenuto di argilla nel sedimento originario. I fenomeni dianzi descritti per le rocce calcaree hanno diffusione molto ampia e comune in tutta l'area alpina (calcescisti) e appenninica (formazione di Molare, Flysch) . In queste aree si riscontra che gli aspetti descritti per le rocce calcaree sono attenuati o quasi del tutto annullati, secondo il tenore di argilla presente e la sua distribuzione nelle diverse litozone.

Una statistica delle strutture idrogeologiche prodotte dalle faglie trasformi su circa 40 sorgenti lombarde, rilevate per lo più mediante foto aeree e con verifiche in loco, mette in evidenza nel loro bacino di alimentazione vi è un aumento del numero delle discontinuità di grande persistenza, della permeabilità media e dell' RMR della roccia.

La conseguenza più diretta risulta un aumento delle portate di circa il 15% rispetto alle sorgenti di semplice faglia di compressione e distensione,

Nelle rocce interessate da faglie trasformi, si nota inoltre che la varianza delle portate, presa uguale a 1 quella della rocce cristalline, è circa il doppio nelle rocce scistose, aumenta di 0,2 volte nei bacini in cui affiorano rocce sedimentarie marnose o argillose, e di circa 20 volte nelle aree calcaree con carsismo sviluppato.

Si nota anche un considerevole aumento della portata delle sorgenti in funzione della classe RMR media delle rocce del bacino idrogeologico, parallelo a quello riscontrato per la varianza delle portate.

4. Esempi di effetti della tettonica traslazionale sulle rocce calcaree e in rocce sedimentarie a elevata componente argillosa

Un esempio sulla zona compresa fra il massiccio delle Grigne e quello del M Arera, mostra come la tettonica traslazionale e la presenza di strutture "a fiore" legate a faglie di trazione e a faglie transpressive produca importanti sorgenti nella zona di S. Brigida (BG)

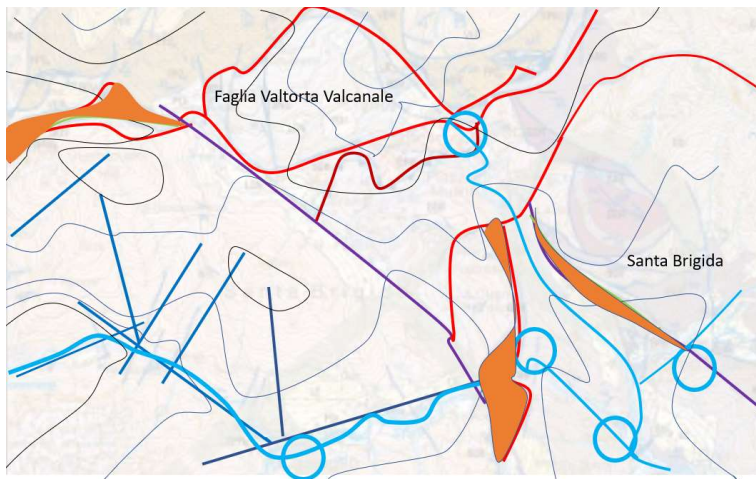


Figura 12 : Le sorgenti sono indicate con i cerchi, le faglie di trazione in viola, i sovrascorrimenti e le faglie transpressive in rosso e le faglie di compressione in blu. In arancio sono riportate le formazioni sedimentarie di debole permeabilità

Dalla figura si deduce che la rete idrografica superficiale è impostata sulle faglie di trazione dirette ONO ESE determinate dalle spinte in direzione ortogonale che hanno generato la faglia di Valtorta

Queste faglie interrompono la rete di faglie di compressione e di trazione minori, legate ai sovrascorrimenti di Dolomia Principale diretti prevalentemente NO SE, sulle quali è impostata la rete idrografica della parte occidentale della carta.

Le sorgenti di Santa Brigida , che sono quelle di maggiore portata, nascono da strutture a fiore legate alle faglie di traspressione e a quelle di trazione, che portano ad affiorare i sedimenti marnosi del Trias medio .

Strutture di questo tipo si sviluppano anche nelle rocce a rilevante componente argillosa. In Liguria, ad esempio, si realizzano fra Arquata Scrivia da un lato e Voltaggio dall'altro ampie zone caratterizzate da gradi faglie di traspressione. In affioramento compaiono quasi esclusivamente unità a elevata componente argillosa , come le marne di Rigoroso e la formazione di Molare .La complessa circolazione idrica dà luogo a molte sorgenti superficiali e lungo i corsi d'acqua, ma gli afflussi idrici in profondità sono di scarso interesse, dal momento che la copertura delle rocce arenacee e argillose ostacola l'infiltrazione, e si realizzano quasi esclusivamente lungo le faglie traspressive, dove le permeabilità possono raggiungere il m/giorno, in un contesto che varia solitamente da 0,001 a 0,1 m/giorno. La complessa tettonica dell'area è rappresentata nel disegno della figura 13.

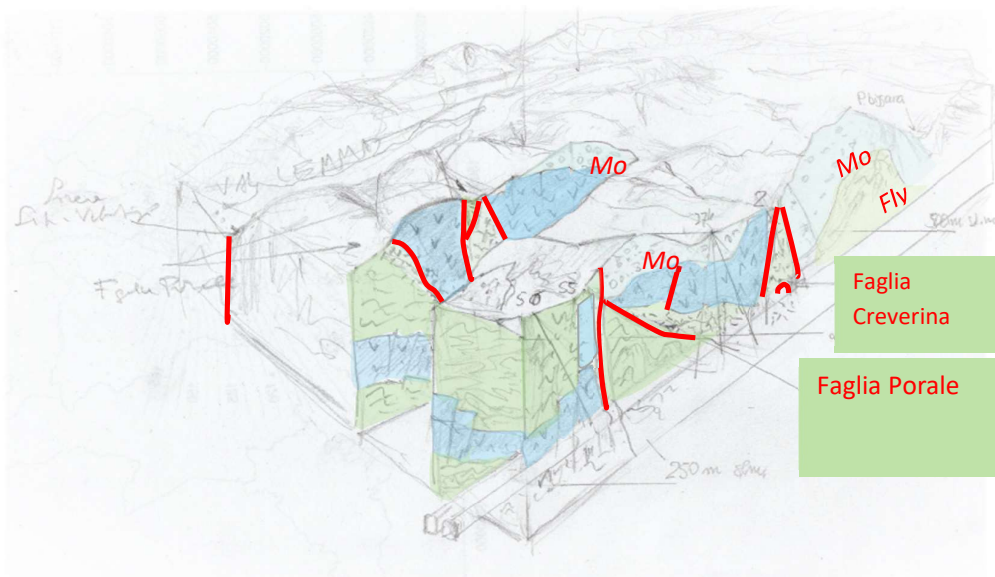


Figura 13 l'assetto idrogeologico di un'area dell'appennino ligure presso Voltaggio in cui la formazione di Molare (Mo) ricopre in traspressione argilloscisti (in blu) metabasalti (verde) e Flysch . L'area è interessata da un tunnel che ha direzione NS. Si nota l'esistenza di faglie traspressive (Porale e Creverina) , che danno luogo a strutture a fiore lungo la faglia Porale.

5.Considerazioni sugli effetti delle faglie traslazionali sulla circolazione idrica sotterranea

Un esame statistico elementare delle strutture idrogeologiche prodotte dalle faglie trasformi ha coinvolto circa 50 sorgenti lombarde in Valtellina e nel bacino lariano, in zone di faglia considerate trasformi. Il rilevamento è stato eseguito per lo più mediante foto aeree e con verifiche in loco. Si è accertato su questo ridotto campione un aumento del numero delle discontinuità all'interno del bacino idrogeologico della permeabilità media, e dell' RMR della roccia.

Volendo prendere in considerazione questi aspetti, anche se al momento del tutto carenti per la scarsità di dati disponibili, un primo confronto mostra che risulta che nelle aree a tettonica trasforme le portate risultano mediamente superiori di circa il 15% rispetto alle sorgenti di semplice faglia di compressione e distensione.

Un altro confronto può essere fatto esaminando solo le sorgenti derivanti da bacini idrogeologici nei quali siano presenti faglie trasformi.

Il rendimento delle fonti, stimato come portata media annua, può essere un buon indicatore della risposta dell'ammasso roccioso in un contesto caratterizzato dal medesimo comportamento climatico, e si è cercato di visualizzarne gli aspetti fondamentali nell'area lariana e della Valtellina.

Considerando in questa zona solo le rocce interessate da faglie trasformi, questo primo esame suggerisce che la varianza delle portate, presa uguale a 1 quella della rocce cristalline, è circa il doppio nelle rocce scistose, aumenta di 0,2 volte nei bacini in cui affiorano rocce sedimentarie marnose o argillose, e di circa 20 volte nelle aree calcaree con carsismo sviluppato. Si è notata inoltre una generica correlazione fra il comportamento degli ammassi rocciosi, che si può sintetizzare nella matrice di correlazione fra cr (rocce cristalline), sc (scistose), sedimentarie marnose (sed marn) e calcaree. Questa traccia è ricavabile dalla matrice di correlazione riportata di seguito, da cui si ricava, come prevedibile, che le rocce sedimentarie

			sed	
	cr	scistose	marn	calcari
cr	1	0,13	0,031	0,0001
scistose		1	0,027	0,0003
sed				
marn			1	0,0005
calcari				1

e quelle cristalline hanno un rendimento molto diverso, formando due gruppi ben separati. La resa delle sorgenti nei massicci carbonatici è del tutto singolare, come risulta sia dal predetto valore della portata media delle sorgenti considerate, sia da quello della varianza delle portate delle singole sorgenti, molto elevata nel caso dei calcari rispetto a quello delle altre unità.

Altre semplici elaborazioni portano a sottolineare un considerevole aumento del rendimento delle sorgenti in funzione della classe RMR media delle rocce del bacino idrogeologico, parallelo a quello riscontrato per la varianza delle portate.

6. Discussione dei risultati

Si deve osservare che nel corso di questo studio non si sono trovati elementi sufficienti per integrare i dati di portata delle sorgenti con quelli risultanti dall'esame delle piezometrie delle falde delle pianure alluvionali. Appare inoltre necessario un confronto con i dati meteorologici per una migliore definizione dei valori da introdurre nelle statistiche. È quindi opportuno che si approfondiscano e integrino i dati utilizzati in questo studio, preferibilmente partendo dall'analisi

di strutture locali, in cui morfologia e climatologia siano sufficientemente uniformi da permettere un obiettivo controllo della validità dei risultati ottenuti.

Conclusioni

Si può ricavare da questa iniziale rassegna che i fenomeni idrogeologici nelle aree a tettonica traslazionale abbiano aspetti non riscontrabili per zone con faglie di altro tipo, in quanto queste strutture sono connesse con un sensibile flusso idrico sotterraneo, prodotto dallo stato di detensionamento derivante dalle particolarità della genesi di queste dislocazioni. Lo studio indica quindi che l'argomento esposto ha un'oggettiva importanza ai fini pratici per localizzare le aree in cui si ha una buona produttività idrica e quelle in cui si è realizzato un decadimento delle proprietà meccaniche della roccia. Si sottolinea quindi l'utilità dell'approfondimento di questo tema ai fini di una razionale pianificazione della difesa dal dissesto idrogeologico.

Bibliografia

- Agostoni S. Papini M. (1988). Influenza delle miloniti sulla stabilità dei versanti in val Tartano. *Le strade anno I.XXXX*, n.1251.
- Antonellini, M., Aydin, A., (1995). Effetto della faglia sul fluid flow in arenarie porose: geometria e distribuzione spaziale. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 79, 642–671.
- Ben-zion Y. e Sammis C.G., (2003). Caratterizzazione delle zone di faglia. *Geofisica pura e applicata*, 0033 – 4553/03/040677–39.
- Bieniawski, Z.T. (1989). Classificazioni ingegneristiche delle masse rocciose. *Wiley, New York*
- Budhu, M. e Gobin, R. (1996). Instabilità dei versanti da infiltrazioni di acque sotterranee. *J. Hyd Engrg., ASCE*, 122(7), 415-417.
- Caine, J.S., Evans, J.P., Forster, C.B. (1996). Architettura della zona di faglia e struttura di permeabilità. *Geologia* 24, 1025-1028.
- Cavailhes T., Sizun J.P., Labaume P., Chauvet A., Buatier M., Soliva R., Mezri L., Charpentier D., Leclere H., Trave A., Gout C. (2013). Influenza della foliazione delle rocce di faglia sulla permeabilità della zona di faglia: il caso di arenarie arkosiche profondamente sepolte (Grés d'Annot, SE France). *Toro AAPG*, 97 (7) (2013), pp. 1521-1543.
- De Paola N., Collettini C., Faulkner D. R. e Trippetta F. (2008). Architettura della zona di faglia e processi di deformazione all'interno di rocce evaporitiche nella crosta superiore. 27, tc4017, DOI:10.1029/2007tc002230, 2008
- Evans, J.P., Forster, C.B., Goddard, J.V. (1997). Permeabilità delle rocce legate alla faglia e implicazioni per la struttura idraulica della zona di faglia. *Giornale di geologia strutturale* 19, 1393-1404.
- Faulkner D.R., Jackson C.A.L., Lunn R.J., Schlische R.W., Shipton Z.K., Wibberley C.A.J (2010). Una revisione dei recenti sviluppi riguardanti la struttura, la meccanica e le proprietà di flusso dei fluidi delle zone di faglia, *Journal of Structural Geology*, 32: 1557-1575.
- Foster C.B., Evans J.P. (1991). Idrogeologia delle faglie di spinta e dei fogli di spinta cristallini: risultati di studi combinati di campo e modellistica. *Lettere di ricerca geofisica*, vol. 18, 5: 979-982.
- Francani V. (1969). I movimenti franosi della Val Tartano. *Geologia Tecnica, IPI, Milano*.
- Francani V., Papini M., Volpatti P. (1989). Indagine geologica sulla frana della Pruna. *Le strade*, n.1258.

Gattinoni P., Scesi L. (2004): "Studio degli effetti della rugosità sulla circolazione idrica in un ammasso roccioso". Quaderni di Geologia Applicata, Pitagora .

Gattinoni P., Scesi L. (2007). "Controllo della rugosità sulla conducibilità idraulica nelle fratture", *Hydrogeology Journal*, 15: 201-211.

Gattinoni P. (2009). Modellazione parametrica delle frane per la valutazione della suscettibilità idrogeologica: dalla Valle del Crati alla frana di Cavallerizzo (Sud Italia). *Pericoli naturali*, 50: 161-178.

P. Gattinoni,*, M. Consonni e al. (2019)- Tunnelling in landslide areas connected to deep seated gravitational deformations. An example in Central Alps. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Elsevier, Paris.

Gaetani M. Jadoul (1979) - La struttura delle Alpi Bergamasche. Atti dell'Accademia Nazionale dei Lincei, Classe di Scienze Fisiche, Matematiche e Naturali, Rendiconti Lincei Matematica E Applicazioni

GeoIFFI (2006). L'inventario regionale (1:10.000) delle frane e degli eventi idrogeologici, Regione Lombardia, Italia [www.cartografia.regione.lombardia.it7GeoIFFI]

Gosso G., Spalla M.I., Bini A., Siletto G.B., Berra F. e Forcella F. (2012). Note Illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000, Foglio 057 Malonno. APAT - Dipartimento Difesa del Suolo-Servizio Geologico d'Italia, Roma.

Gudmundsson A. (2000). Zone di faglia attive e flusso delle acque sotterranee. *Lettere di ricerca geofisica*, vol. 27, n. 18, pagine 2993-2996.

Lopez D. L., Smith L. (1995). Flusso di fluidi in zone di faglia: analisi dell'interazione tra circolazione convettiva e flusso topografico delle acque sotterranee. *Water Resources Research*, Volume 31, Numero 6, pagine 1489-150.

Pozzi R. (1970). Lineamenti idrogeologici della Provincia di Sondrio. *Geologia Tecnica*, n.4,ed. IPI,Milano

Rawling G.C, Goodwin L.B, Wilson J.L. (2001). Architettura interna, struttura di permeabilità e significato idrologico dei tipi di zone di faglia contrastanti. *Geologia*, 29, 43-46.

Rouleau A., J. E. Gale (1985). Caratterizzazione statistica del sistema di frattura nel Granito di Stripa, Svezia. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, 22, 353-367,

Scesi L., Gattinoni P. (2009). Circolazione dell'acqua nelle rocce. *Springer 2009*, p. 172, ISBN: 9048124166.

Scheingross J.S., Minchew B.M., Mackey B. H., Simons M., Lamb M. P. e Hensley S. (2013). Controlli delle zone di faglia sulla distribuzione spaziale delle frane a lento movimento. *Bollettino GSA*; marzo/aprile 2013; v. 125; n. 3/4; pagg. 473-489.

Shields, A. (1936). Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung. *Mitteilung der preussischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau*, 26, Berlino.