

GRUPPO NAZIONALE DI GEOFISICA DELLA TERRA SOLIDA



33^o convegno
nazionale

Bologna
25-27 novembre 2014
Palazzo della Regione

ATTI

Tema 1: Geodinamica



ISTITUTO NAZIONALE DI
OCEANOGRAFIA E DI
GEOFISICA SPERIMENTALE



PROGETTAZIONE DI UNA RETE GEODETICA INTEGRATA DI MONITORAGGIO AD ALTA PRECISIONE LUNGO FASCE DI TERRITORIO INTERESSATE DA DEFORMAZIONE DI FAGLIE ATTIVE. CASO STUDIO DEL MONTE ETNA

G. De Guidi, S. Scudero, S. Imposa

Dipartimento di Scienze Biologiche Geologiche e Ambientali, Università di Catania

Introduzione. Studi di natura morfo-strutturale indicano che il versante orientale dell'edificio etneo è caratterizzato da una dinamica estensionale con direzione E-O (Rasà *et al.*, 1996). In quest'area (Fig. 1) la deformazione è accomodata da strutture di taglio a prevalente componente normale, denominate in letteratura "sistema delle Timpe" ed è confinata a nord e a

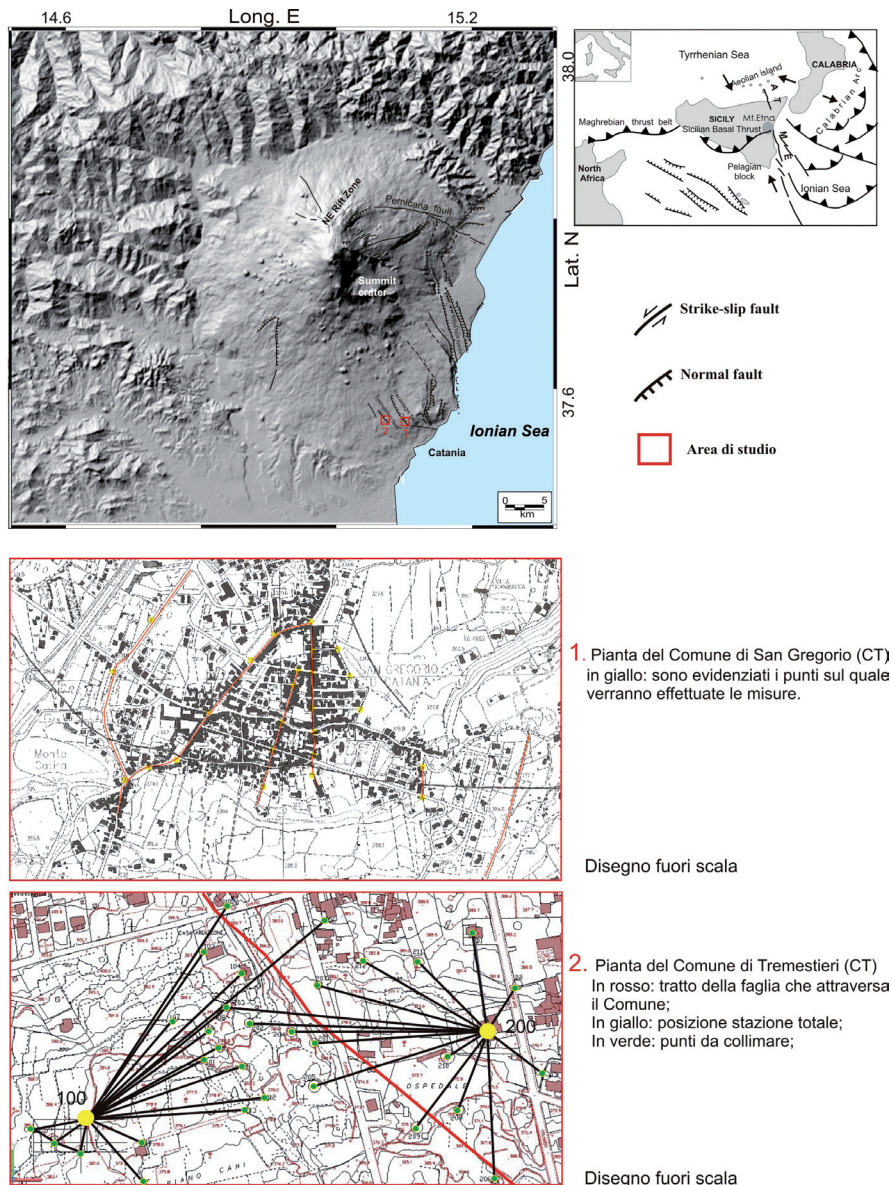


Fig. 1 – Mappa morfostrutturale del Monte Etna, in alto a destra è rappresentato uno schema tettonico del Mediterraneo centrale, in basso le mappe delle aree campione per il monitoraggio geodetico di alta precisione.

sud rispettivamente dal sistema strutturale della “Pernicana” a cinematica sinistra e dal sistema di faglie “Tremestieri–Trecastagni” con prevalente cinematica destra (Monaco *et al.*, 1997, 2010). In letteratura sono stati proposti tre distinti e contrastanti modelli che spiegano l’origine del processo che ha portato allo sviluppo di questi sistemi strutturali che trasferiscono la maggior parte dell’estensione a est: deformazione profonda, scorrimento superficiale e movimenti di blocchi tettonici (Firth *et al.*, 1996). Di solito episodi di movimenti asismici osservati lungo il sistema di faglie delle Timpe (Rasà *et al.*, 1996; Azzaro *et al.*, 2013), non sono accompagnati da terremoti locali. Il creep sulle faglie si verifica come spostamento secolare e come episodi di spostamento, chiamati “eventi di creep”, che durano da poche ore a giorni e con spostamenti da un millimetro a poche decine di millimetri. I tassi di creep, ottenuti dall’analisi di documenti storici e da indagine di terreno in 16 siti all’Etna (Rasà *et al.*, 1996) variano notevolmente (da 0,5-2,3 cm/anno). Gli autori hanno mostrato che si possono distinguere due diversi tipi di slip asismico: i) un movimento quasi-continuo a lungo periodo in alcuni segmenti di faglie asismiche, e (ii) un movimento intermittente, di breve durata, pre e post-sismico in segmenti di faglia sismicamente attivi. I tassi di deformazione nel lungo periodo, ricavati da marker geologici, sono mediamente di 1-2 mm/anno (Monaco *et al.*, 1997), mentre sono ancora più elevati i tassi di deformazione misurati nel breve periodo con ricevitori satellitari GNSS e interferometria (fino a 15-20 mm/anno; (Gugliemino *et al.*, 2011). De Guidi *et al.* (2012) hanno mostrato che le faglie del versante orientale etneo obbediscono a leggi di scala differenti per almeno due ordini di grandezza rispetto a quelle valide a scala globale. Considerato il carattere eterogeneo del cinematismo delle strutture etnee nonché la diversa modalità di rilascio della deformazione (deformazione cosismica e creep asismico), è in corso uno studio sperimentale (Fig. 2) per la realizzazione di una rete di monitoraggio geodetico lungo le fasce di deformazione interessate dai segmenti di faglie etnee, mediante l’utilizzo integrato di strumentazione topografica di ultima generazione quale stazione totale e ricevitori G.N.S.S. (Global Navigation Satellite System).

Lo scopo principale è quello di caratterizzare il comportamento cinematico delle fasce di territorio interessate dai segmenti di taglio e le eventuali interazioni tra esse, in particolare per quel che concerne la determinazione in superficie dei vettori di velocità e di deformazione. Quest’analisi permetterà di definire la quantità di movimento a breve e medio periodo, distinguere il tasso dei movimenti veloci (terremoti) rispetto ai movimenti lenti (creep) e consentire quindi di acquisire nuovi dati per l’analisi delle relazioni tra il campo di stress tettonico regionale e quello locale, quest’ultimo influenzato anche dalle dinamiche del sistema vulcanico.

Obiettivi. Per la caratterizzazione del comportamento delle faglie dell’Etna lo studio delle deformazioni in superficie è di fondamentale importanza; insieme ad informazioni di natura geologica, geofisica e sismologica, lo studio della deformazione attraverso monitoraggio topografico di alta precisione, mira a definire un modello di crescita delle strutture attive dell’Etna. Il monitoraggio della deformazione superficiale, attraverso la definizione ed evoluzione nel tempo del campo deformativo delle aree interessate da strutture attive, consente di ottenere precise informazioni sulla dinamica del campo di stress locale da cui ottenere un modello di distribuzione dello slip sul piano di faglia e conseguentemente quello relativo al ciclo sismico. Le faglie attive dell’Etna sono caratterizzate da stili deformativi (cosismico e creep) ed entrambi questi comportamenti possono alternarsi in una stessa faglia o in differenti porzioni della stessa.

Le informazioni derivanti dalle misure di deformazione possono costituire la base per lo sviluppo di un modello che comprenda sia le leggi di scala (De Guidi *et al.*, 2012) che gli stili deformativi, suggerendo la verifica sperimentale del modello teorico di Gudmundsson *et al.* (2013), relativo al controllo che le proprietà meccaniche delle rocce hanno sul rapporto geometrico lunghezza-dislocamento delle faglie. Inoltre ricostruendo lo strain-field locale è possibile ottenere un modello di distribuzione dello slip sul piano di faglia e modellare il ciclo sismico attraverso l’assegnazione degli opportuni parametri di resistenza (Okada, 1985). I risultati attesi possono essere utili a mitigare gli effetti disastrosi causati dalla deformazione.

Variazioni del tasso di fault creep, insorgenza di movimenti in strutture precedentemente “ferme”, cessazione del movimento lungo faglie in precedenza attive, potrebbero essere precursori di un imminente terremoto.

Metodologia. La metodologia con cui si intende progettare la rete di monitoraggio topografico rappresenta una funzione importante per acquisire i dati di velocità relativi alle porzioni di territorio delimitate dai segmenti di taglio: tali informazioni, insieme a dati di altra natura consentono di definire i modelli per l’analisi della deformazione. Pertanto, essa deve essere calibrata in relazione al sistema che si sta misurando, alla tipologia e all’ordine di grandezza del movimento, alla precisione della strumentazione, alle condizioni morfologiche dei luoghi (Mc Farland *et al.*, 2013).

La struttura topologica e organizzativa del lavoro di rilievo topografico è fortemente gerarchica. Si procede con la realizzazione di reti di livelli successivi che dipendono nella loro definizione dai livelli superiori.

La rete principale costituisce dunque l’ossatura di tutto il rilievo in quanto essa definisce il sistema di riferimento locale e ad essa si collegano tutte le altre reti secondarie e di dettaglio.

La rete principale di inquadramento è perciò solitamente realizzata come struttura autonoma, intrinsecamente determinata con misure sovrabbondanti tali da permettere controlli statisticamente validi.

Nella pratica comune, si considera sempre la rete di livello superiore come infinitamente precisa, cioè si considerano le coordinate dei punti come fissi nella compensazione. Questo modo di procedere, anche se non è rigoroso in quanto ogni punto determinato attraverso operazioni di misura ha una propria incertezza, risulta valido dal punto di vista operativo poiché permette una funzionale suddivisione del lavoro. Utilizzando opportuni algoritmi detti “di stima e predizione” (compensazione ai minimi quadrati) è comunque possibile tenere conto delle incertezze delle coordinate dei punti della rete di livello superiore e stimare in modo più efficiente i parametri statistici relativi alle reti secondarie.

Le reti secondarie e quelle di dettaglio possono essere anche calcolate e compensate autonomamente, in un loro sistema di riferimento, e quindi inserite nel sistema locale generale del rilievo con trasformazioni opportune. Tale distribuzione definisce una griglia con requisiti geometrici legati al grado di precisione richiesto, in rapporto ai tassi di deformazione, i cui nodi sono distribuiti in modo uniforme e in numero sufficiente a coprire la fascia di deformazione prodotta dalla struttura.



Fig. 2 – Squadra operatori in fase di misurazione con stazione totale e ricevitore GNSS.

L’uso di un sistema combinato (stazione totale e ricevitore GNSS) consente di trovare un sistema di misurazione dei movimenti relativi tra i capisaldi opportunamente installati nel terreno (siti permanenti), nonché di georeferire gli stessi rispetto ad un sistema di riferimento geografico e/o chilometrico.

La rete di monitoraggio topografico in progetto prende in considerazione due segmenti di faglia del sistema Tremestieri-Trecastagni che sviluppano fasce di deformazione al suolo all’interno dei centri abitati rispettivamente di Tremestieri Etneo e San Gregorio di Catania. Essi sono stati scelti come strutture campione perché presentano gli effetti morfo-strutturali in zone di taglio con comportamento cinematico di tipo trascensivo con componente di

movimento orizzontale destra. Sono inoltre strutture attive che hanno fatto registrare processi di deformazione cosismici e asismici.

Lo studio del campo deformativo attraverso la tecnica del rilievo con stazione totale rappresenta una tecnica di geodesia “terrestre” che misura distanze e angoli tra capisaldi. La metodologia che verrà utilizzata consiste nella strutturazione di una griglia di punti collegati da basi di lunghezza inferiore ai 500 metri, disposti lungo una fascia di territorio che comprende la struttura di deformazione. I capisaldi principali verranno posizionati esternamente e sufficientemente lontani dalla zona di deformazione e monitorati con ricevitore satellitare GNSS (Global Navigation Satellite System) mentre i punti secondari verranno rilevati con teodolite. I “monumenti” relativi ai punti di monitoraggio principali saranno strutturati artificialmente con boccole per l’innesto di pilastri porta strumento, vincolate permanentemente alla roccia affiorante, per gli altri punti, invece, verranno sfruttati siti permanenti su rocce affioranti e su manufatti stabili, corredati di target o mini-prismi a posizione fissa. Le misure verranno effettuate periodicamente con frequenza costante, analizzando le deformazioni misurate e valutando lo spostamento cumulativo di ogni punto rispetto ai punti fissi esterni. In particolare per la faglia di Trecastagni, relativamente alla porzione che attraversa il centro abitato di San Gregorio, verranno effettuate misurazioni lungo allineamenti, ortogonali alla struttura, coincidenti con le strade del piano viario del paese, realizzando dei pozzetti per la messa in posto dei monumenti per l’innesto dello strumento di misura (teodolite-prisma e ricevitore GNSS). Le misure effettuate quindi su poligoni aperte, ortogonali alla struttura e vincolate ai punti esterni, consentiranno di misurare lo spostamento cumulativo di ogni caposaldo.

I punti di monitoraggio principali saranno strutturati artificialmente mediante l’installazione di boccole per l’innesto di pilastri (in acciaio) porta strumento, vincolate permanentemente alla roccia affiorante, Verranno inoltre sfruttati siti permanenti esistenti quali, rocce affioranti e manufatti stabili, corredati di target o mini-prismi a posizione fissa.

La scelta dei punti permanenti per il monitoraggio è stata eseguita secondo i seguenti criteri:

- Visibilità dalla stazione di misura;
- Punti permanenti (nello spazio e nel tempo):

La caratteristica di ciascun punto è di essere permanente nel tempo, quindi indeformabile e stabile: affioramenti di roccia vulcanica massiva, che ricadono in aree non soggette a piani di urbanizzazione futuri; fabbricati di limitate elevazioni che non presentano indizi di instabilità pertanto non suscettibili a movimenti oscillatori

- Angolo d’incidenza nel punto di collimazione:

Tale angolo è stato misurato al fine di stabilire che tipo di bersaglio collimatore scegliere, per angoli prossimi a 90° si utilizzano i target invece per angoli minori i miniprismi. Tutto ciò per ottenere la misura distanziometrica con sistema laser più precisa possibile. in modo da ridurre al minimo l’errore angolare di collimazione, che comporta la scelta dell’elemento collimatore (target e miniprisma)

Le misure verranno effettuate periodicamente con frequenza costante, analizzando le deformazioni misurate e valutando lo spostamento cumulativo di ogni punto rispetto ai punti fissi esterni. Figura 1 inquadramento area con carta annessa

Il programma di sviluppo di tale progetto prevede una scansione delle operazioni secondo l’ordine seguente:

- installazione dei capisaldi per le misurazioni delle deformazioni attraverso le linee di faglia;
- campagne di misure geodetiche bimestrali e straordinarie in occasione di eventuali crisi sismiche;
- elaborazione e analisi delle deformazioni misurate.

Risultati attesi. La realizzazione della rete di monitoraggio geodetica di alta definizione lungo una porzione di territorio interessato da un tratto della faglia di Tremestieri Etneo, consentirebbe

di avvalersi di modelli che permettano l'individuazione del rapporto tra cinematismi profondi (meccanismi focali) e le deformazioni riscontrate in superficie.

L'uso di un sistema combinato (total station e ricevitore G.N.S.S.) consente di trovare un sistema di misurazione (analitico-matematico) sia dei movimenti relativi tra i capisaldi opportunamente installati nel terreno (siti permanenti), sia di georeferire gli stessi rispetto ad un sistema di riferimento geografico e/o chilometrico. L'idea di sviluppare un modello per il monitoraggio di questa porzione di terreno nasce da un progetto di più ampie dimensioni che prevede, l'estensione del monitoraggio a tutte le fasce del territorio "Etno" interessate a strutture di taglio simicamente attive.

Tali strutture si distinguono per caratteristiche geometriche - cinematiche (faglie di tipo deep slip, strike slip e a comportamento misto) nonché per tipologia di deformazione: cosismica e/o tempo dipendente (creep asismico).

Esempi di deformazione lenta con tassi di deformazione dell'ordine di qualche millimetro l'anno, sono stati ben rilevati e registrati (rif. Tesi Battaglia, 2012) relativamente a porzioni discrete della struttura. Altri settori della stessa faglia, hanno invece fatto registrare deformazioni dell'ordine dei cm in intervalli di tempo estremamente ristretti (mesi- giorni) per porzioni di faglia discrete (interviste ai residenti, anno 2005).

Questa variabilità spazio-temporale induce chiaramente a porsi diversi quesiti che chiamano in gioco l'intervento di studi specialistici in differenti ambiti delle discipline geologiche.

Tuttavia occorre prima fare una fondamentale premessa, che richiama le leggi che spiegano il comportamento meccanico delle strutture, e sulla base delle quali è possibile valutare le eventuali associazioni strutturali che compongono una zona di taglio. Dal punto di vista cinematico possiamo classificare la faglia di Tremestieri come una struttura trascorrente, con una parziale componente di tipo "deep-slip". Dal punto di vista dinamico essa è una struttura la cui deformazione è il risultato di un campo di sforzi con l'asse di stress principale intermedio, orientato verticalmente lungo il piano di taglio, mentre le componenti di stress principali, massima e minima, sono disposte sul piano orizzontale ortogonalmente l'una rispetto all'altra e rispetto alla componente verticale.

Generalmente le strutture di taglio trascorrenti sono spiegabili attraverso modelli di taglio semplice (o modello di Riedel -Riedel, 1929) in cui la deformazione viene rappresentata da un ellissoide dello "strain" i cui assi principali ruotano progressivamente. Le strutture di taglio governate da meccanismi di taglio semplice sono caratterizzate da associazioni strutturali complesse in cui possono coesistere faglie normali, inverse, trascorrenti. Nel caso in esame è importante valutare l'ipotesi di coesistenza di tali strutture la cui evidenza cinematica in superficie può essere celata sia dall'intervento antropico sia dal fatto che possa trattarsi di strutture cieche.

L'implementazione di un sistema di monitoraggio alla "mesoscala", con sistemi di misurazione topografica di alta precisione, assume in queste condizioni un valore di importanza rilevante, poiché consente di rilevare, osservare e analizzare il campo di deformazione in modo dettagliato. In questo modo è possibile definire le fasce di deformazione, il loro stile ed evoluzione spazio-temporale in ambienti in cui la valutazione del rischio sismico rappresenta uno studio fondamentale per la prevenzione degli effetti sulle strutture antropiche. A tal proposito modelli analitici quali quello definito da Okada (1985), consentono di simulare la condizione in cui le informazioni geodetiche permettono di modellizzare un piano di faglia in assenza di evidenze geometriche e cinematiche sufficientemente chiare in superficie.

Risultati del campo di deformazione permettono, inoltre, di ricostruire i parametri dello strain e quindi, in relazione ai parametri geomeccanici del mezzo interessato dalla deformazione, di risalire al campo di stress locale. Ed è in questa fase che entrano in gioco le informazioni provenienti da altre discipline geologiche quali la geofisica, che attraverso differenti metodi di rilievo per mezzo di indagini (noise, down-hole, ReMi, MASW, sismica a rifrazione e georadar) nonché l'analisi della sismicità storica e strumentale, consentono di acquisire dati utili a

rilevare la presenza di zone in cui si registrano picchi di accelerazione di situ e le caratteristiche geomeccaniche del mezzo.

In sintesi, il fine di questo studio è quello di definire il modo di sviluppo (longitudinale e trasversale) del campo di deformazione lungo la zona di taglio, ricostruire lo strain-field indotto dalla struttura, sviluppare un modello di distribuzione dello slip sul piano di faglia e conseguentemente modellare il ciclo sismico attraverso l'assegnazione degli opportuni parametri di resistenza.

Ringraziamenti. Questo lavoro è stato finanziato con fondi DPC INGV V3_6 - 2012-2013 (responsabile C. Ferlito).

Bibliografia

- Azzaro R, Bonforte A, Branca S, Guglielmino F, 2013. *Geometry and kinematics of the fault systems controlling the unstable flank of Etna volcano (Sicily)*. *J Volcanol Geoth Res* 251: 5-15
- De Guidi G, Scudero S, Gresta S., 2012. *New insights into the local crust structure of Mt. Etna volcano from seismological and morphotectonic data*. *J Volcanol Geoth Res* , 223-224, 83-92.
- Firth C., Stewart I., McGuire W.M., Kershaw S. & Vita-Finzi C. (1996) - Coastal elevation changes in eastern Sicily: implications for volcano instability at Mount Etna. In: McGuire, W.M., Jones, A.P., Neuberg, J. (Eds.), *Volcano Instability on the Earth and Other Planets*. Geol. Soc. London, Spec. Publ., 110, 153-167
- Gudmundsson A, De Guidi G, Scudero S (2013). *Length-displacement scaling and fault growth*. *TECTONOPHYSICS*, vol. 608, p. 1298-1309, ISSN: 0040-1951, doi: 10.1016/j.tecto.2013.06.012
- Guglielmino F, Bignami C, Bonforte A, Briole P, Obrizzo F, Puglisi G, Wegmüller U, 2011. *Analysis of satellite and in situ ground deformation data integrated by the SISTEM approach: The April 3, 2010 earthquake along the Pernicana fault (Mt. Etna-Italy) case study*. *Earth and Planetary Plan Science Letters*, 312(3), 327-336.
- Mc Farland FS, Lienkaemper JJ, Caskey SJ, 2013, *Data from Theodolite Measurements of Creep Rates on San Francisco Bay Region Faults, California, 1979-2013*; U.S. Geological Survey Open-File Report 2009-1119, v. 1.5, 18 p. and data files (Available at http://pubs.usgs.gov/of/2009/1119/of2009_1119v1.5)
- Monaco C., Tapponier, P., Tortorici, L., Gyllot, P.Y., 1997. *Late Quaternary slip rates on the Acireale-Piedimonte normal faults and tectonic origin of Mt. Etna (Sicily)*. *Earth and Planetary Sciences Letters* 147, 125-139.
- Monaco C., De Guidi G., Ferlito C., *The Morphotectonic map of Mt. Etna*, in *Ital.J.Geosci. (Boll.Soc.Geol.It.)*, Vol.129, No.3 (2010), pp.408-428, 4 figs., 1 pl. f.t
- Okada T. (1985): *Surface deformation due to shear and tensile faults in a half space*. *Bull Seism Soc. Am.*, 75: 1135-1154.
- Rasà R, Azzaro R, Leonardi O, 1996) *Aseismic creep on faults and flank instability at Mount Etna volcano, Sicily*. *Geol Soc London Sp Pub* 110: 179-192.
- Riedel, W., 1929. *Zur Mechanik geologischer Brucherscheinungen*. *Zentralblatt für Mineralogie Abteilung B*, 354e368.

SOME RESULTS ON ATTENUATION TOMOGRAPHY OF FRIULI VENEZIA GIULIA ITALIAN REGION

S. Gentili, F. Gentile

Centro di Ricerche Sismologiche, Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale, Udine, Italy

Introduction. In the present work we analyze the results achieved by the first attempt to apply 3D S waves attenuation tomography of Gentili and Gentile (2013) on the northernmost part of the Friuli Venezia Giulia Italian region and the westernmost Slovenia zone. The area under study is characterized by a complex tectonic deformation being in a convergent margin between Adria and Eurasia, where the African plate pushes the Eurasian one generating a rotation of the Adria microplate (Mantovani *et al.*, 1996). In detail, the area is a poliphase deformational zone, resulting from the superposition of several Cenozoic-age tectonic phases (Venturini, 1991), with different orientation of the principal axes of stress. Each tectonic phase inherited and re-activated the geological deformations of the previous phase producing a