

**ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA**

---

**FACOLTÀ DI INGEGNERIA**

**CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA PER L'AMBIENTE E IL TERRITORIO**

**DICAM**

**TESI DI LAUREA**

in  
Geologia Tecnica LS

**ANALISI DELLE CONDIZIONI DI STABILITÀ**

**DEI VERSANTI IN LOCALITÀ LE CELLE**

**(SAN LEO, RIMINI)**

**CANDIDATO:**  
Nicola Celli

**RELATORE**  
Chiar.mo Prof.  
Lisa Borgatti

**CORRELATORI**  
Dott. Claudio Corrado Lucente  
Dott. Francesco Ronchetti

Anno Accademico 2009/10  
Sessione III

<b>1. INTRODUZIONE.....</b>	<b>4</b>
<b>2. DESCRIZIONE DEI FENOMENI DI DISSESTO NELL'ALTA VAL MARECCHIA.....</b>	<b>7</b>
2.1. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO.....	7
2.2. GEOLOGIA DELL'AREA DI STUDIO.....	8
2.3. STORIA GEOLOGICA DELLA VALMARECCHIA.....	8
2.4. FENOMENI FRANOSI NELL'AREA MARCHIGIANA.....	11
2.5. LE CARATTERISTICHE DEI FENOMENI FRANOSI IN EMILIA-ROMAGNA.....	14
2.6. FRANE NELLA VALMARECCHIA.....	16
2.7. GEOLOGIA E DISSESTI DEL TERRITORIO DI SAN LEO.....	17
2.8. LE CELLE: DESCRIZIONE DEL MOVIMENTO FRANOSO.....	20
2.9. GEOLOGIA DELL'AREA LE CELLE.....	21
2.10. ANALISI DEI FENOMENI DI DISSESTO.....	22
<b>3. METODI DI INDAGINE.....</b>	<b>27</b>
3.1. PRELIEVO DI CAMPIONI DAL SOTTOSUOLO.....	27
3.2. PROVE GEOTECNICHE.....	31
3.3. COSTIPAMENTO CON PROVA PROCTOR.....	35
3.4. PROVA DI TAGLIO DIRETTO CON SCATOLA DI CASAGRANDE.....	36
3.5. CARATTERIZZAZIONE DELL'AMMASSO ROCCIOSO.....	39
3.6. INDICI DI QUALITÀ E CLASSIFICAZIONI GEOMECCANICHE.....	40
3.6.1. <i>Rock Quality Designation index (RQD)</i> .....	41
3.6.2. <i>Rock Mass Rating (RMR)</i> .....	42
3.6.3. <i>Geological Strength Index (GSI)</i> .....	44
3.7. ROCLAB.....	47
3.8. INDAGINE SISMICA A RIFRAZIONE.....	48
3.9. MONITORAGGIO DEGLI SPOSTAMENTI PROFONDI TRAMITE SISTEMA INCLINOMETRICO.....	49
<b>4. STUDIO DELLA PARETE ROCCIOSA DI LE CELLE.....</b>	<b>52</b>
4.1. ASPETTI GEOLOGICI.....	53
4.2. RILIEVO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO.....	58
4.3. RISULTATI DELLA CAMPAGNA DI INDAGINI GEOGNOSTICHE DEL 2009.....	61
4.3.1. <i>Prospezione geofisica</i> .....	61
4.3.2. <i>Sondaggio meccanico a rotazione</i> .....	65
4.4. SONDAGGI IN SITU (FEBBRAIO 2011).....	67
<b>5. MODELLAZIONE NUMERICA.....</b>	<b>72</b>
5.1. GENERALITÀ.....	72
5.2. DALLA REALTÀ AL MODELLO GEOLOGICO.....	73

5.3.	DAL MODELLO GEOLOGICO AL MODELLO NUMERICO .....	74
5.4.	DAL MODELLO NUMERICO AI RISULTATI .....	80
5.5.	CARATTERISTICHE DI PHASE2.....	81
5.6.	MODELLO NUMERICO DEL VERSANTE DI LE CELLE .....	82
5.6.1.	<i>Proprietà dei materiali</i> .....	85
5.7.	RISULTATI.....	87
5.7.1.	<i>Criterio di rottura di Mohr-Coulomb</i> .....	87
5.7.2.	<i>Criterio di rottura di Hoek-Brown</i> .....	92
<b>6.</b>	<b>PROPOSTE DI MITIGAZIONE .....</b>	<b>95</b>
6.1.	GENERALITÀ.....	95
6.1.1.	<i>Opere per il controllo dell'erosione</i> .....	95
6.1.2.	<i>Opere superficiali di stabilizzazione</i> .....	95
6.1.3.	<i>Opere di sostegno</i> .....	96
6.1.4.	<i>Opere di difesa dalla caduta massi</i> .....	97
6.1.5.	<i>Opere di drenaggio</i> .....	97
6.1.6.	<i>Opere speciali</i> .....	98
6.2.	INTERVENTI SUL VERSANTE DI LE CELLE (PROPOSTA DEL 2009) .....	98
6.2.1.	<i>Generalità</i> .....	98
6.2.2.	<i>Interventi immediati</i> .....	99
6.2.3.	<i>Interventi differiti</i> .....	100
6.3.	PROPOSTE DI INTERVENTO FUTURE .....	100
<b>7.</b>	<b>CONCLUSIONI.....</b>	<b>103</b>
<b>8.</b>	<b>BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA.....</b>	<b>106</b>

## 1. INTRODUZIONE

La probabilità di catastrofi idrogeologiche è particolarmente alta nel nostro paese, non solo a causa dell'elevata suscettibilità che i terreni mostrano verso le diverse tipologie di dissesto idrogeologico ma anche in rapporto alla crescente antropizzazione del territorio, che ne aumenta la vulnerabilità e di conseguenza il rischio. Il dissesto idrogeologico, a causa degli ingenti danni arrecati ai beni e all'uomo, rappresenta per l'Italia un problema di notevole rilevanza, sia per il numero di vittime che per i danni prodotti alle abitazioni, alle industrie ed alle infrastrutture.

Con i termini “dissesto idrogeologico” e “rischio idrogeologico” si vuole genericamente definire quei fenomeni e quei danni, reali o potenziali, causati dalle acque, siano esse superficiali (in forma liquida o solida) o sotterranee. Le manifestazioni più tipiche di questo genere di fenomeni sono: frane, alluvioni, erosioni costiere, subsidenza e valanghe. Il principale fattore che predispone il territorio al dissesto idrogeologico è la conformazione geologica e geomorfologica, ma stanno assumendo sempre un peso più rilevante le cause di origine antropica, eventualmente legate ai cambiamenti climatici ma soprattutto ad un uso del territorio non attento alle caratteristiche ed ai delicati equilibri idrogeologici del territorio stesso.

Se prendiamo in esame i fenomeni di tipo franoso, notiamo che essi hanno nel nostro Paese un impatto socio – economico assai rilevante. Infatti, l'Italia rientra tra i primi paesi al mondo nella classifica dei danni in termini economici e in termini di perdita di vite umane. Nel sito della Protezione Civile è possibile consultare i dati risultanti dalle statistiche delle ricerche effettuate dal Gruppo Nazionale Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche (GNDCI) del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR); esse, come si nota dalla tabella sottostante (Tab. 1), descrivono molto bene la gravità della situazione.

*Tab. 1.1 – Censimento delle frane dal 1918 al 1994 (Progetto AVI del GNDCI-CNR)*

Frane censite	32.000
Località interessate	21.000
Vittime e dispersi nel XX sec.	5.939
Stima dei danni provocati mediamente ogni anno	1-2 miliardi di €

Inoltre, in un rapporto effettuato dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio

assieme all'Unione delle Province d'Italia nel 2003, viene indicato come in Italia le aree a rischio di dissesto elevato e molto elevato siano diverse migliaia e coprano una superficie di 13.760 km<sup>2</sup>, pari al 4,5% del territorio italiano.

Il continuo verificarsi di questi fenomeni di dissesto ha indotto una politica di gestione del rischio che affrontasse il problema non solo durante le emergenze, ma attuando piani di previsione e prevenzione che consistono nell'individuazione delle condizioni di rischio e nell'adozione di interventi per minimizzare l'impatto degli eventi.

Tra questi piani di prevenzione del rischio rientra il PAI, ovvero il Piano stralcio per l'Assetto Idrogeologico. Esso rappresenta uno strumento per la pianificazione territoriale, redatto dalle Autorità di Bacino con lo scopo di ridurre il rischio idrogeologico entro valori compatibili con gli usi del suolo in atto, in modo tale da salvaguardare l'incolumità delle persone e ridurre al minimo i danni ai beni esposti.

La stesura del Piano di Bacino, ai sensi dell'art. 17, comma 6-ter della Legge n°183/89, può avvenire per Piani Stralcio, in modo da consentire di affrontare i problemi in base alla loro urgenza.

I contenuti del Piano fanno riferimento alla Legge 183/89 e agli atti successivi.

Per raggiungere gli obiettivi prefissati dal PAI le Autorità di Bacino definiscono ed individuano, mediante la perimetrazione su apposita cartografia, delle aree del territorio che sono soggette a rischio idraulico e idrogeologico, individuandone una classe di rischio; tali aree dovranno essere messe in sicurezza ponendo dei vincoli che ne regolamentano l'utilizzo e intervenendo sul territorio, definendo un quadro generale degli interventi da effettuare ed il relativo fabbisogno finanziario.

Il Piano per l'Assetto Idrogeologico costituisce, quindi, lo strumento conoscitivo, normativo e tecnico – operativo che pianifica e programma le azioni e le norme d'utilizzo finalizzate alla conservazione, alla difesa ed alla valorizzazione del suolo ed alla corretta utilizzazione delle acque, in base delle caratteristiche fisiche e ambientali del territorio. Inoltre il PAI estende l'indagine alle situazioni di potenziale rischio, offrendosi come uno strumento di pianificazione specialistica, ai fini della tutela del territorio, costituendo un chiaro punto di riferimento per effettuare programmi urbanistici coerenti con le esigenze del territorio stesso.

L'obiettivo primario rimane quindi quello della prevenzione e della pianificazione degli interventi urbanistici in modo da evitare situazioni di potenziale pericolo per l'incolumità delle persone e degli immobili attraverso uno strumento che segna le linee guida degli interventi sul territorio.

Ultimamente, anche grazie ad una lunga serie di fatti di cronaca il problema della stabilità dei versanti si sta rivelando di interesse crescente per i singoli cittadini ma soprattutto per le pubbliche amministrazioni che spendono ogni anno cifre ingenti per risanare aree colpite da fenomeni di dissesto idrogeologico.

Questi tipi di fenomeni possono avere evoluzioni anche su scala molto ampia; pensiamo per esempio alle deformazioni gravitative profonde di versante: processi indotti dalla gravità che possono avere un'evoluzione temporale molto lunga ed interessare interi versanti, dislocando volumi di roccia anche di centinaia di migliaia di metri cubi, su aree di diversi chilometri quadri e per profondità di diverse decine, frequentemente centinaia di metri (Dramis et al., 1985; Soldati, 2004). In questi casi, la pericolosità può essere dovuta sia al collasso dell'intero versante sia all'evoluzione del fenomeno in termini di frane minori, ma pur sempre potenzialmente catastrofiche.

Oggetto del presente elaborato è proprio l'analisi di un fenomeno di dissesto minore inserito nel panorama più ampio e geologicamente più complesso del territorio del comune di San Leo nella Valmarecchia e più in particolare la creazione di un modello matematico, sviluppato con il codice a elementi finiti Phase<sup>2</sup> (Rocscience Inc., 2007), finalizzato alla simulazione dell'evoluzione del versante in relazione allo stato di tensione litostatica a cui è sottoposto e all'azione di scalzamento al piede compiuto dai dissesti a carico delle argille al piede della scarpata.

Sul versante attivo verranno eseguite diverse analisi conoscitive e si ricaveranno una serie di dati con i quali si simulerà una prova triassiale attraverso il programma Roclab (Rocscience Inc, 2007). I parametri di coesione e angolo di attrito (e i parametri equivalenti di Hoek-Brown) ottenuti attraverso la simulazione verranno a loro volta introdotti nel modello agli elementi finiti con il quale si otterrà lo scenario delle possibili evoluzioni del versante.

Attraverso questo studio sarà poi possibile assumere adeguate contromisure atte a stabilizzare l'intero versante e a mettere in sicurezza l'abitato in adiacenza della scarpata facendo delle proposte di mitigazione.

## 2. DESCRIZIONE DEI FENOMENI DI DISSESTO NELL'ALTA VAL MARECCHIA

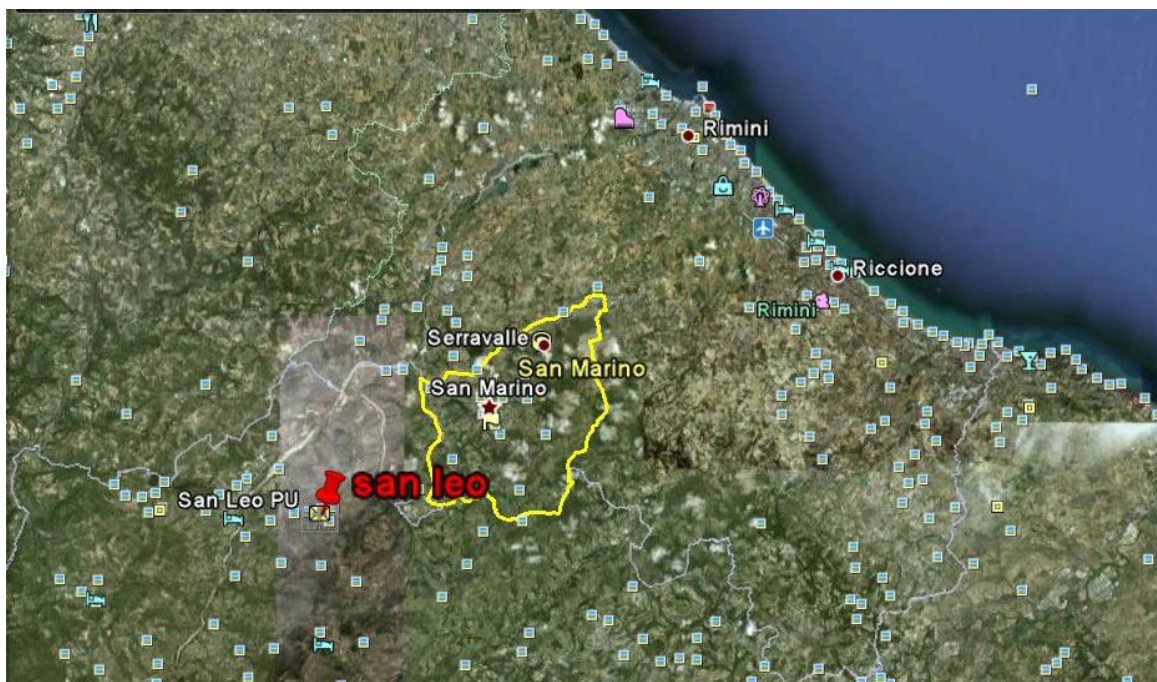
### 2.1. Inquadramento geografico

San Leo è un comune di 3034 abitanti (fonte ISTAT aggiornata al 1/1/2010), situato in Emilia-Romagna, nella Provincia di Rimini (coordinate GPS 43°53'46.88"N 12°20'35.99"E). Esso sorge a circa 32 km dal capoluogo di provincia, nella Valmarecchia (sul tracciato della SS 258), su un enorme ammasso roccioso tutt'intorno invalicabile. San Leo è situato ad un'altitudine di 589 m s.l.m. ed ha una superficie di 53,32 km<sup>2</sup>, e vi si accede attraverso un'unica strada tagliata nella roccia (fonte sito del comune di San Leo).

Il territorio comunale è suddiviso nelle frazioni di Azienda, Capicchio, Castelnuovo, Montefotogno, Montemaggio, Pietracuta, Pietramaura, Santa Lucia, Tausano, Torello (Fig. 1.2, Fig. 1.3). Il comune di San Leo è appartenuto alle Marche (provincia di Pesaro e Urbino) dai tempi dell'unità d'Italia fino al 15 agosto 2009, quando ne è stato distaccato congiuntamente ad altri sei comuni dell'Alta Valmarecchia in attuazione dell'esito di un referendum svolto il 17 e 18 dicembre 2006. Contro la variazione territoriale le Marche hanno ricorso presso la Corte Costituzionale, ma questa ha ritenuto il ricorso infondato. Se analizziamo la posizione del Comune di San Leo dal punto di vista idrologico, esso è collocato nel bacino idrografico del Fiume Marecchia.



Figura 1.2 Vista satellitare dell'Italia (fonte google earth)



*Fig. 1.3 Vista satellitare della Valmarecchia e di San Leo (google earth)*

## **2.2. Geologia dell'area di studio**

Il Comune di San Leo ricade nel territorio dell'alta Val Marecchia. Nei prossimi paragrafi si cercherà di analizzare in maniera dettagliata morfologia, stratigrafia e geologia della zona circostante il Comune di San Leo per poi rivolgerci con maggiore precisione all'area oggetto di studio. In questa fase di inquadramento generale è risultata utile al raggiungimento del fine la consultazione del sito internet del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna e quello del Sistema Informativo Territoriale, Urbanistico ed Ambientale (SITUA) della Provincia di Rimini, dai quali è stato possibile trarre le informazioni di nostro interesse. Oltre a questo la consultazione del sito dell'autorità di bacino Conca-Marecchia si è rivelata particolarmente utile per l'acquisizione del PAI (Piano Assetto Idrogeologico) e di una serie di dati riguardanti gli eventi più significativi della Valmarecchia.

## **2.3. Storia geologica della Valmarecchia**

Dal punto di vista dei terreni affioranti l'area di San Leo, così come gran parte del territorio compreso tra il Fiume Marecchia e il Conca, è caratterizzata dal complesso alloctono (cioè un complesso geologico la cui formazione è avvenuta in zone assai diverse dalla loro collocazione attuale) della cosiddetta colata della Valmarecchia (più correttamente definita



“Coltre della Valmarecchia”); tale unità geologica si colloca al di sopra di un substrato autoctono rappresentato dai terreni della successione Umbro – Marchigiana – Romagnola.

La coltre è formata da un insieme di formazioni che hanno avuto origine in luoghi differenti, depositandosi nel corso del tempo in bacini sedimentari diversi, e che sono traslate, sopra – scorrendo sui terreni autoctoni, fino a raggiungere l'attuale posizione. Tali formazioni appartengono ai Complessi Liguri (così denominati poiché la loro formazione è avvenuta nell'area dell'antico bacino ligure – piemontese) e sono composte da materiali con caratteristiche eterogenee che, per l'effetto dei sopracitati movimenti geologici quali scorrimenti e traslazioni, sono stati rimescolati, inglobando altri terreni. L'insieme autoctono può essere ulteriormente suddiviso in una successione “paleoautoctona” rappresentata dalle unità litostratigrafiche deposte prima dell'arrivo della Coltre della Val Marecchia e una successione costituita dalle unità litostratigrafiche deposte al di sopra della Coltre della Val Marecchia, in cui è ulteriormente possibile distinguere una parte interna “parautoctona”, depostasi negli stadi finali della messa in posto della coltre alloctona e che quindi ha subito traslazioni rispetto alla successione paleoautoctona, e una più esterna successione “neoautoctona” solo blandamente deformata (Fig. 1.4).

Le unità della Coltre della ValMarecchia possono essere suddivise in unità che hanno subito importanti traslazioni (“alloctono”, cioè le Liguridi) e quelle deposte sulle unità alloctone mentre queste si deformavano (“semialloctono”, cioè la Successione Epiligure).

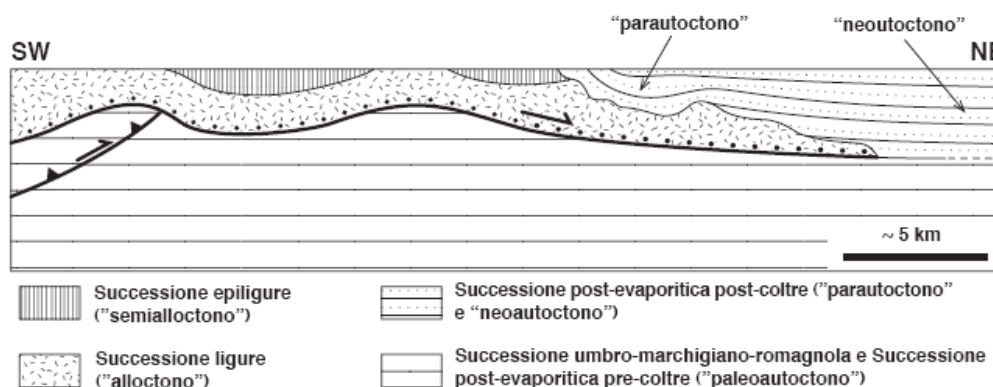


Fig.1.4 Sezione geologica schematica attraverso l'area studiata (da De Feyter, 1991)

Per queste ragioni la coltre presenta un carattere eterogeneo ed è formata prevalentemente da terreni di carattere argilloso ed argilloso – marnoso, inglobanti blocchi di svariate dimensioni per lo più di natura calcarea (da pochi metri ad interi rilievi come nel caso dello sperone sul quale si erige il nucleo storico del Comune di San Leo).

Si ipotizza che tale fenomeno geodinamico sia avvenuto in contemporanea alle principali fasi di sollevamento, e quindi dell'orogenesi, dell'Appennino centro – settentrionale; infatti si ritiene che le pieghe formate dalla compressione con asse nord – est che hanno originato i rilievi appenninici, assieme al dislivello da esse generato, abbiano comportato la precedente descritta traslazione del terreno alloctono. Tale processo ha avuto inizio nel Paleocene (periodo che va da 65 ad 1,8 milioni di anni fa); la messa in posizione della coltre nel territorio Marecchiese è avvenuta in due fasi distinte: la prima è avvenuta nel Miocene superiore, più precisamente nel periodo cosiddetto Tortoniano, mentre, la seconda nel Pliocene inferiore; dopo quest'ultima fase la coltre si è assestata, assumendo la posizione attuale. Il principale fattore che ha permesso la traslazione dei terreni Liguri da ovest verso est è il fatto che essi contengono le cosiddette Argille Varicolori, le quali, a causa della loro granulometria e delle loro scadenti proprietà geotecniche, sono molto sensibili all'azione erosiva degli agenti atmosferici. In particolare, l'infiltrazione delle acque meteoriche determina una plasticizzazione progressiva del terreno, che favorisce poi l'innescio di fenomeni franosi quali colate e scorrimenti che, evolvendo in maniera retrogressiva, lasciano la formazione calcareo-arenacea senza un sostegno, favorendo, per l'appunto, lo scorrimento di quest'ultima, a diverse scale. A lungo termine, a causa del processo erosivo appena descritto, si ha la formazione dei cosiddetti “sassi” che caratterizzano il territorio della Valmarecchia e tra i quali è possibile collocare la placca calcareo – arenacea sulla quale è stato costruito il nucleo storico di San Leo; infatti, l'erosione da parte degli agenti atmosferici, intacca ed asporta velocemente i materiali argilloso – marnosi in superficie, facendo emergere, in rilievo, blocchi costituiti dalle rocce più resistenti, generalmente calcari e arenarie.

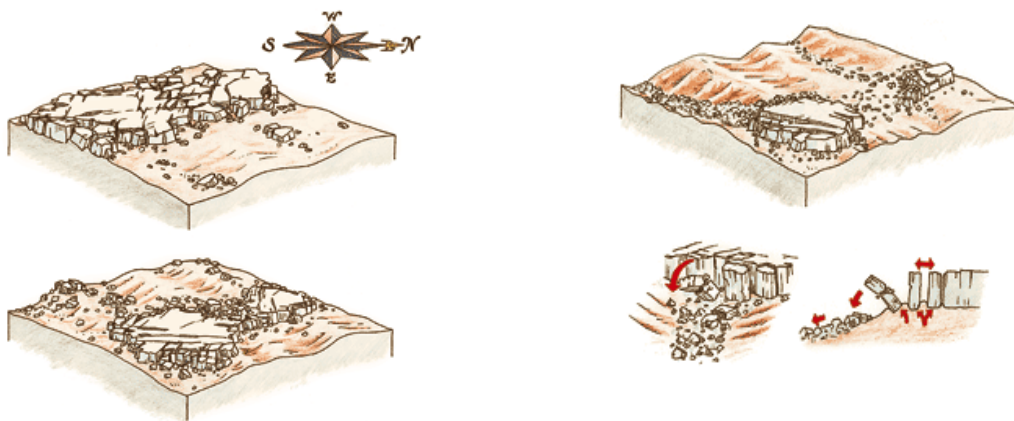


Fig. 1.5 Evoluzione geomorfologica dei terreni della coltre della Valmarecchia.

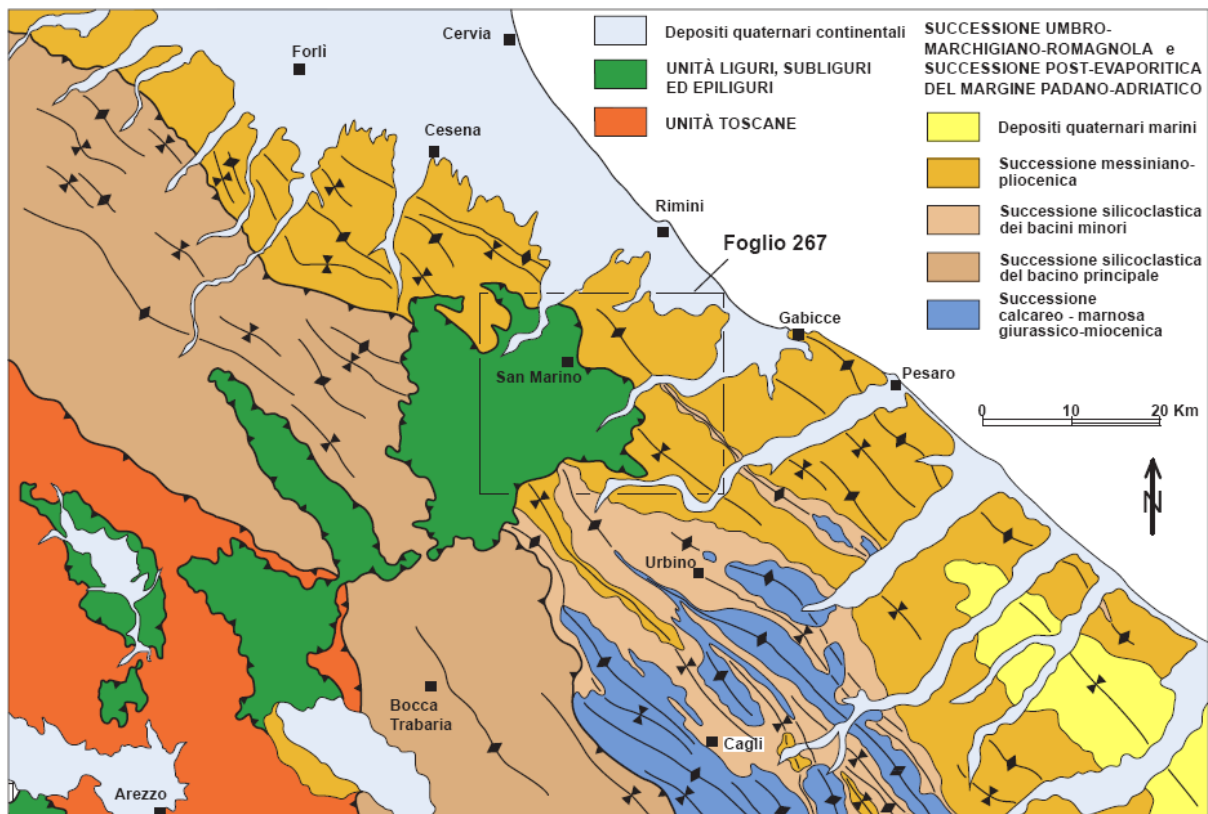


Fig. 1.6. Schema tettonico della Valmarecchia (Guerra e Nesci, 2004)

## 2.4. Fenomeni franosi nell'area marchigiana

L'analisi dei dati geomorfologici derivati dalle diverse banche dati utilizzate dal Progetto IFFI Marche ha permesso di archiviare, per l'intero territorio regionale, 42.522 fenomeni franosi, 39.788 dei quali cartografabili (superficie fenomeno franoso > 1600 m<sup>2</sup>) e 2735 non

cartografabili (superficie fenomeno franoso < 1600 m<sup>2</sup>). Essi coprono una superficie di 1881,79 kmq rappresentano il 19,41% dell'intero territorio regionale.

In relazione alle diverse caratteristiche litologiche, strutturali e morfologiche peculiari della regione marchigiana sono riconoscibili differenti tipologie di fenomeni franosi raggruppabili schematicamente in movimenti gravitativi ad evoluzione rapida e lenta.

I primi corrispondono a fenomeni di crollo e *block slides* e sono osservabili in corrispondenza delle dorsali montuose e di versanti ripidi caratterizzati da rocce litoidi prevalentemente calcaree e calcareo-marnose. Questi fenomeni sono presenti principalmente nella provincia di Ascoli Piceno con 443 eventi franosi su 840.

Nelle aree ad alta energia del rilievo sono inoltre frequenti, tra i movimenti franosi a rapida evoluzione, fenomeni tipo *slide*, *debris flow*, *debris avalanche* che interessano depositi eluvio-colluviali e materiali clastici accumulati in fasi morfoclimatiche precedenti (Fig. 1.9). Sempre nelle aree dei rilievi carbonatici sono frequenti le Deformazioni Gravitative Profonde di Versante (DGPV) e fenomeni tipo *lateral spreading* riconoscibili per la presenza di contropendenze, trincee, scarpate e irregolarità dei versanti. Questa tipologia è frequente nelle zone interne del pesarese (84 su un totale di 172).

Nelle zone in cui affiorano sedimenti plio-pleistocenici, prevalentemente pelitici o pelitico-arenacei, caratterizzate da minore acclività, sono diffusissimi i fenomeni franosi ad evoluzione lenta; la tipologia di movimento che prevale è quella del colamento. In genere questi fenomeni interessano il substrato e le coltri eluvio-colluviali. In queste aree sono assai diffusi anche fenomeni meno profondi quali i soliflussi. Nelle zone di impluvio, dove sono riscontrabili notevoli spessori di depositi alterati ed eluvio-colluviali, sono frequenti le colate di fango che si originano in occasione di piogge intense. Nelle aree collinari dove affiorano i sedimenti pelitici e pelitico-arenacei plio-pleistocenici, la naturale instabilità di tali terreni è stata accelerata da una cattiva gestione del territorio e soprattutto da una scarsa manutenzione della rete di smaltimento delle acque superficiali. Inoltre le profonde modifiche delle modalità produttive del sistema agricolo, che schematizzando sono riassumibili in minor presenza antropica sul territorio e diminuzione di copertura vegetazionale, hanno determinato negli ultimi trenta anni la rottura di delicati equilibri naturali. Lo sviluppo insediativo ed infrastrutturale, imposto da nuovi processi socio-economici, è avvenuto in modo spesso incontrollato occupando territori la cui stabilità era da considerarsi precaria, innescando fenomeni franosi in zone che storicamente erano stabili. Per cui tra le cause del dissesto idrogeologico si deve considerare l'azione antropica uno degli agenti morfogenetici maggiormente attivi nel determinare l'evoluzione del paesaggio e delle forme che lo

caratterizzano.

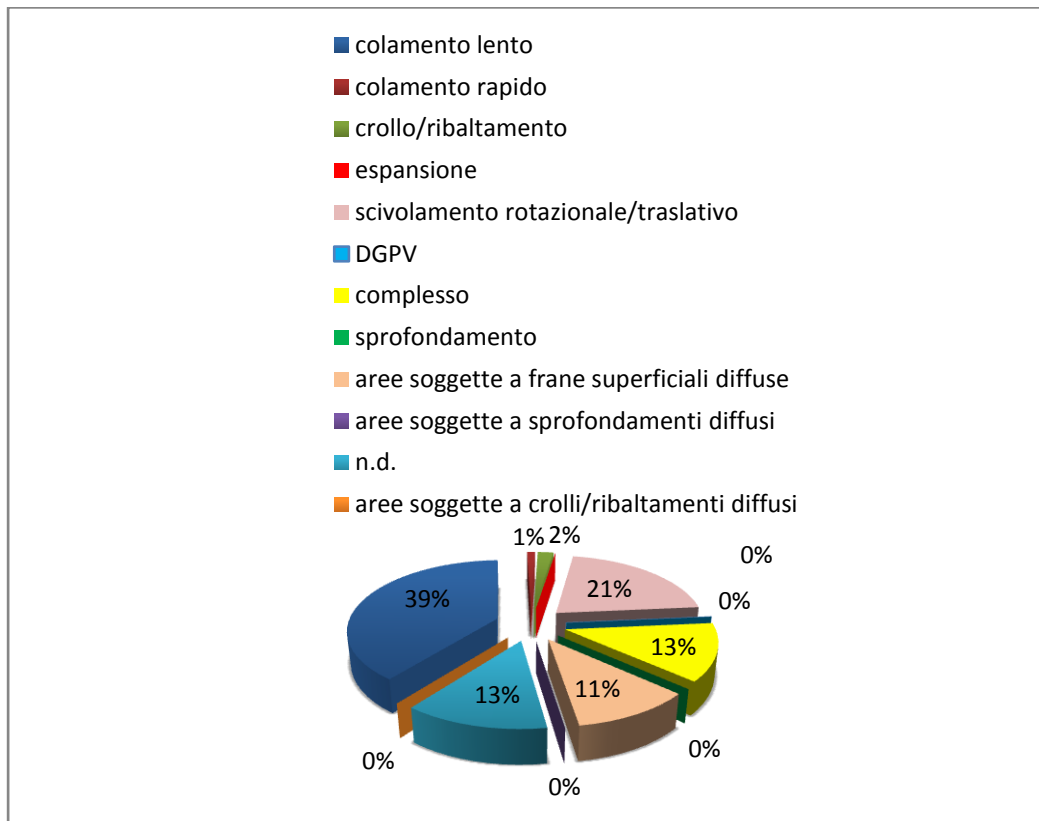
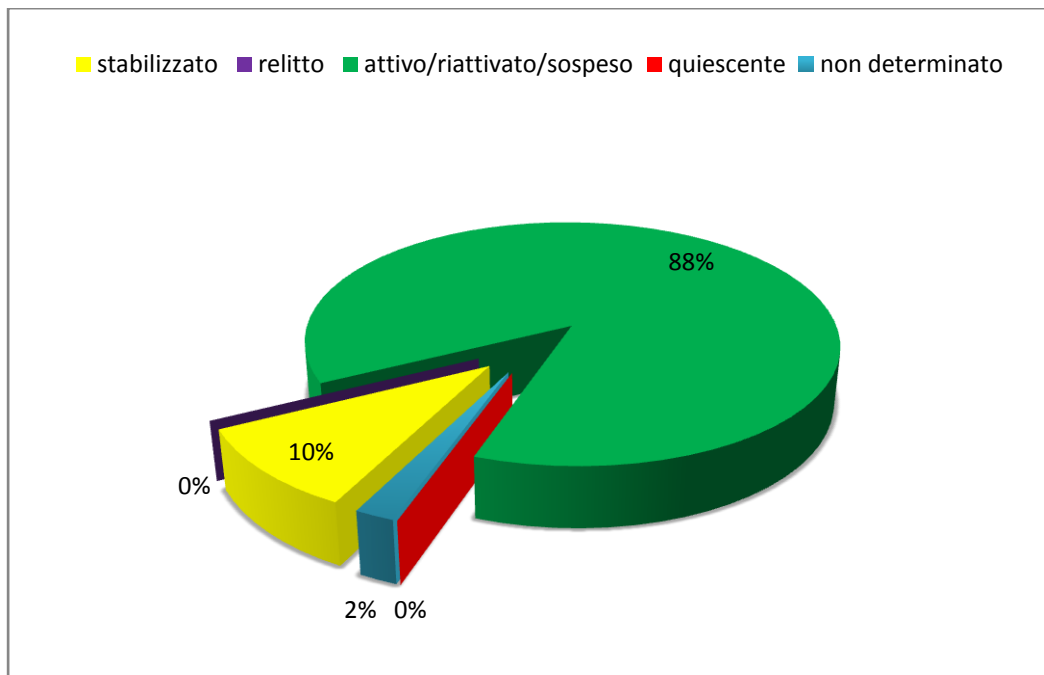


Figura 1.9 Suddivisione delle aree in frana a seconda del tipo di movimento

I movimenti gravitativi attivi/riattivati/sospesi rappresentano percentualmente una quota predominante dei fenomeni archiviati, sia relativamente a ciascuna tipologia di frana, sia in assoluto rispetto all'intero numero di fenomeni franosi (fig. 1.10).



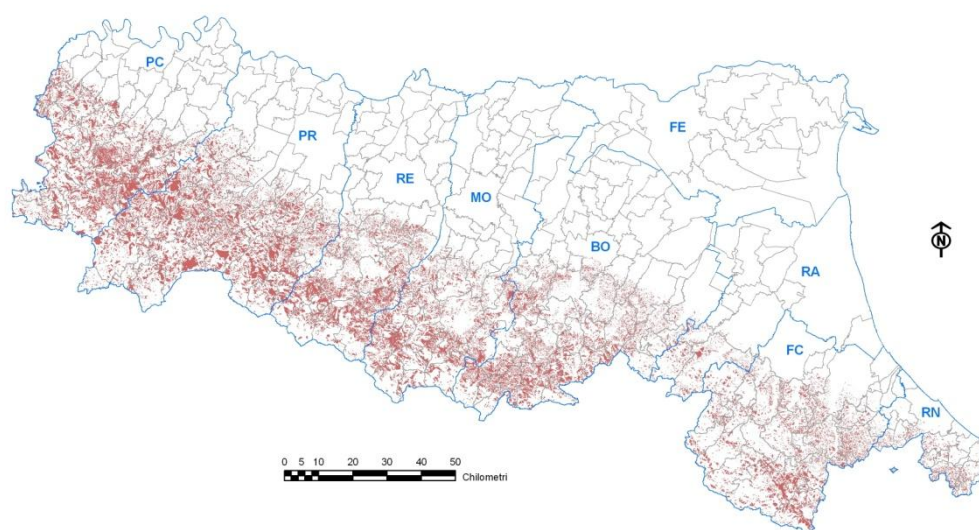
*Figura 1.10 Suddivisione dei fenomeni franosi per stato di attività*

L'analisi geologia-frane ha evidenziato, tra le formazioni principalmente interessate dai dissesti, l'arenaria di Monte Senario (I.F. indice di franosità 83,31%) e la Formazione di monte Morello (I.F. indice di franosità 56,98%). Ciò può essere imputato alle caratteristiche litologiche e strutturali delle due formazioni. Entrambe infatti costituiscono il complesso epiligure della colata gravitativa della Valmarecchia, affiorando per pochi kmq chilometri quadrati, quasi tutti in dissesto. Anche le formazioni caotiche indifferenziate mostrano un elevato indice di franosità, pari al 56,13%, con una notevole frequenza di frane di scorrimento e colamento. Le restanti litologie mostrano valori pressoché stabili intorno al 17%.

## **2.5. Le caratteristiche dei fenomeni franosi in Emilia-Romagna**

Il Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli (SGSS) della Regione Emilia-Romagna (RER) ha creato un archivio, in continuo aggiornamento, dei fenomeni franosi presenti nel territorio, con riportate le informazioni documentali sulla riattivazione delle frane, allo scopo di avere una cartografia del dissesto che sia affidabile nel tempo, senza tralasciare le cosiddette “frane storiche”, ovvero quei fenomeni in attuale stato di quiescenza che, si presume, in un futuro prossimo potrebbero riprendere la loro attività. In questo modo, consultando l'archivio delle frane nell'apposita sezione sul sito web del SGSS della RER è possibile trovare molteplici informazioni che ci permettono di conoscere il territorio, e conseguentemente gestirlo, in maniera adeguata.

Attualmente l'Emilia-Romagna, assieme alla Lombardia e alle Marche, è una delle regioni più franose d'Italia; infatti, dai dati del progetto nazionale IFFI (Inventario dei Fenomeni franosi in Italia) risulta che il nostro territorio, sia montano che collinare, risulta interessato da accumuli di frane attive o quiescenti per oltre il 20%.



*Figura 1.11 Distribuzione delle frane in Emilia Romagna (fonte [www.regione.Emilia-Romagna.it](http://www.regione.Emilia-Romagna.it))*

I dati risultanti da tale studio sono riassunti nella tabella (Tab. 1.12) sottostante che offre una panoramica completa della situazione del dissesto idrogeologico nella Regione Emilia Romagna.

*Tab. 1.12 Dati riepilogativi sul dissesto Regionale aggiornati al 2006 estratti dal rapporto interno “elaborazione statistica sulle frane dell’Emilia-Romagna”*

Area Totale Regionale	22.122,0 km <sup>2</sup>
Area Collina e Montagna	10.541,5 km <sup>2</sup>
Area Pianura	8.947,7 km <sup>2</sup>

Area totale in frana	2.510,7 km <sup>2</sup>
Area in frana Attiva	699,5 km <sup>2</sup>
Area in frana Quiescente	1.810,9 km <sup>2</sup>
Area in frana Stabilizzata	0,28 km <sup>2</sup>
Numero totale di frane	70.037
Numero di frane attive	38.178
Numero di frane quiescenti e stabilizzate	31.859
Dimensione media frane	3,55 ha
I.F. regionale totale	11,35 %
I.F. regionale area collinare e montana	23,82 %
Dimensione media frane attive	1,83 ha
Dimensione media frane quiescenti	5,63 ha

## 2.6. Frane nella Valmarecchia

Sono noti da tempo numerosi movimenti franosi nella parte media e alta della Valmarecchia caratterizzati sia da crolli che da ribaltamenti dalle pareti rocciose dei rilievi emergenti dal substrato argilloso, sia dalla mobilitazione della coltre stessa a seguito di periodi di piogge persistenti. Secondo le ricerche di Gori e Vannucci (1990) sull'evoluzione dei processi geomorfologici, risulta che i sedimenti della coltre della Valmarecchia presentano, a grande scala, un comportamento meno plastico dei litotipi pliocenici, mostrando di fatto una più alta percentuale di frane attive e di forme calanchive rispetto a questi ultimi. Nei litotipi pliocenici assumono maggiore sviluppo le fenomenologie di tipo marcatamente plastico, quali il *creep* (lenti smottamenti del suolo) e il soliflusso (stati deformativi molto superficiali del suolo). La ragione di questo comportamento è da ricercarsi in due fattori distinti: il primo costituito dalla presenza nella matrice argillosa della coltre di livelli marnosi che diminuiscono sensibilmente la plasticità dell'insieme; il secondo l'intensa tettonizzazione subita da questa formazione che ha determinato un assetto giaciturale disordinato e casuale, con una struttura a scaglie non sempre orientate lungo un pendio, secondo i massimi valori di resistenza al taglio. Nella coltre si è accertato che la maggiore frequenza dei fenomeni gravitativi si sviluppa in genere lungo i fianchi occidentali dei rilievi. Le frane attive nelle argille plioceniche sembrano orientate



preferibilmente a nordest. Per le argille plioceniche sembrano più diffusi i processi di deformazione superficiale, quali creep e soliflussi, che si attivano là dove la pendenza dei versanti supera il 15%. La mobilizzazione della coltre argillosa tende con il tempo a scalzare alla base i rilievi calcarei ed arenacei dispersi nella coltre alloctona minando la loro stabilità. Questa mobilizzazione è agevolata anche dalla presenza di sorgenti che si attivano alla base dei rilievi stessi per la presenza in essi di fratture permeabili che facilitano la discesa dell'acqua piovana di infiltrazione verso la loro base.

Le frane più importanti della Valmarecchia sono quella di Sant'Agata Feltria che nel marzo del 1934 devastò parte dell'abitato. La stessa zona, in base a testimonianze storiche, fu coinvolta da movimenti franosi anche in precedenza nel 1561, nel 1644 e nel 1815.

Un'altra zona che è stata ripetutamente colpita da frane è quella di Perticara dove, oltre ai crolli di massi rocciosi dal monte Perticara, come quello accaduto il 3 settembre 1906, si sono avuti ripetuti scivolamenti di materiali argillosi. Uno di questi è quello che si è verificato il 30 gennaio 1885.

Un altro evento catastrofico che produsse la distruzione dell'abitato di Maiolo, provocando numerose vittime, si verificò la notte del 29 maggio 1700.

Un anno di eventi franosi violenti fu il 1812. Particolarmente funestata da scoscendimenti fu la zona di Fragheto, nella valle del torrente Senatello.

Merita infine particolare attenzione il rilievo di San Leo, che è stato interessato sia da crolli di massi rocciosi dalle sue rupi scoscese, sia da frane nelle zone calanchive argillose alla sua base, specialmente sul lato settentrionale.

Risulta evidente che eventi franosi che hanno colpito la Valmarecchia nel corso di tempi storici sono legati sia alla sua costituzione geologica, sia al ritorno ciclico di particolari periodi piovosi legati alle fluttuazioni climatiche a breve (dell'ordine dei decenni) o a lungo periodo (dell'ordine delle centinaia di anni) di cui si ha documentazione per tutto l'emisfero settentrionale.

## **2.7. Geologia e dissesti del territorio di San Leo**



*Figura 1.13 Vista della rupe di San Leo*



*Figura 1.14 Fotografia di un'area in dissesto attivo (San Leo, RN) presso il Fosso Campone (San Leo)*

Il Comune di San Leo, facilmente riconoscibile grazie alla maestosa rupe calcareo arenacea su cui è collocato, si estende in destra idrografica del Fiume Marecchia. La rupe è costituita dai

calcari della formazione di San Marino poggiati con un contatto trasgressivo marcato da livelli ciottolosi sulle Argille Varicolori.

Le principali formazioni che, dal punto di vista geologico, affiorano nel suo territorio sono la Successione umbro-romagnolo-marchigiana e la coltre della Valmarecchia.

La coltre della Valmarecchia è rappresentata da unità Liguri (Argille Varicolori, costituite da argilliti, argille policrome e subordinatamente arenarie, siltiti e calcari marnosi; Formazione di Pugliano costituita da calcareniti alternate ad argilliti, calcilutiti a base calcarenitica alternati a peliti), e dalle Unità Epiliguri (Formazione di San Marino, calcari organogeni massicci e Formazione di Monte Fumaiolo, biocalcareniti arenacee alternate ad arenarie glauconitiche).

La successione Umbro-Marchigiano-Romagnola affiora con le argille azzurre (peliti grigio azzurre con sporadiche intercalazioni di arenarie giallastre) depositatesi successivamente all'arrivo della coltre della Valmarecchia.

La sovrapposizione di unità lapidee su terreni argillosi è una delle situazioni geologiche più sfavorevoli per ciò che riguarda la stabilità dei versanti, a causa della diversa risposta dei materiali alle sollecitazioni indotte dall'erosione o da scavi artificiali. In conseguenza del carattere selettivo dell'erosione l'unità lapidea tende inoltre a formare "placche" isolate limitate da scarpate sub-verticali che nel caso di San Leo sono diventate sede un abitati storico di grande valore (Casagli, 1994).

Tutta la rupe è intensamente fratturata presentando oltre a un sistema di fratture radiali anche sistemi verticali a direzione N-S, che suddividono la placca in blocchi progressivamente ribassati verso il margine ovest che presenta le quote inferiori (relazione geologica Le Celle, 2009).

Evidenze di vasti fenomeni franosi si riscontrano in modo particolare lungo la parete nord, sottostante il forte, dove sono visibili scavernamenti, superfici di distacco rotazionali e grossi blocchi di roccia legati a crolli avvenuti nel passato.

I fenomeni più intensi sono quindi concentrati lungo il margine esterno della struttura con distacchi di cunei di roccia la cui forma è legata all'intersezione dei vari sistemi di fratturazione.

La cinematica di queste frane non si esaurisce nei soli fenomeni localizzati ai margini della placca, ma va ricollegata a deformazioni gravitative profonde dovute al carico litostatico gravante sui litotipi argillosi che rispondono a tali sollecitazioni con cedimenti differenziali, lungo le numerose fratture; tali fenomeni sono più marcati nella parte centrale della placca rispetto alle zone periferiche.

I cedimenti sono accompagnati da lenti ma costanti rifluimenti verso le zone esterne meno sollecitate determinando così rigonfiamenti alla base della rupe.

Movimenti franosi sono comunque diffusi su tutto il territorio del comune e coinvolgono la rete viaria principale e secondaria; si segnalano quelli localizzati nel bacino del Rio Maggio innescati dalla forte azione erosiva esercitata dal corso d'acqua principale e da alcuni fossati ad esso affluenti, tra cui il fosso Campone ed il fosso Seripa, disposti rispettivamente a nord est e a sud del capoluogo.

In occasione degli intensi eventi meteorici dell'ottobre 2000 si sono registrati dissesti lungo il fosso di Poggio Zocchi, che scorre a nord est del capoluogo, la cui esondazione ha provocato gravi danni alle infrastrutture viarie coinvolgendo anche un agriturismo, e lungo il fosso delle Iole presso la località omonima, che ha coinvolto la sede stradale ed alcuni ponticelli. Altri danni sono stati registrati alla rete fognaria pubblica in più punti (ad esempio in località Le Celle) e ad alcuni manufatti annessi al depuratore del capoluogo.

La complessa evoluzione morfologica della rupe e del sottostante pendio, come evidenziato dai numerosi studi condotti negli ultimi anni, si manifesta quindi con una serie di fenomeni di instabilità determinati dall'interazione tra la placca rocciosa rigida ed il substrato argilloso deformabile e dalle particolari condizioni strutturali variabili anche a piccola scala.

## **2.8. Le Celle: descrizione del movimento franoso**

I dati relativi al movimento franoso localizzato in località "Le Celle" e alla situazione geologica e stratigrafica dell'area sono stati ricavati dalla relazione geologica e dal programma di pronto intervento realizzati nel novembre 2009 a cura del Dott. Geologo Fabio Fabbri.

In data 24/03/2009 si accertava la necessità di definire un quadro conoscitivo sull'entità e sulle tendenze di progressione evolutiva dei dissesti in atto che minacciano di coinvolgere i fabbricati residenziali della borgata Le Celle. Si riscontrava a seguito delle intense piogge del periodo autunnale e invernale un aggravamento dei fenomeni di instabilità lungo il versante sottoposto all'abitato determinando condizioni di rischio per la pubblica e privata incolumità.

Considerata l'estensione della superficie interessata dai movimenti franosi, la natura dei terreni, la tipologia dei processi di mobilitazione in atto e quelli incombenti, al fine di formulare un attendibile modello dello scenario di instabilità in atto, è stato svolto un programma di indagini basato su una serie di rilievi geologico-geomorfologici di dettaglio con riferimento particolare allo stato di fratturazione della parete rocciosa e all'analisi dei processi

di mobilitazione dei materiali argillosi lungo il versante. Inoltre si è realizzato un rilevamento topografico dell'area, un'indagine sismica a rifrazione e un sondaggio a rotazione con carotaggio continuo spinto fino nel substrato formazionale per l'analisi diretta della stratigrafia e la taratura dei dati geofisici.

## 2.9. Geologia dell'area Le Celle

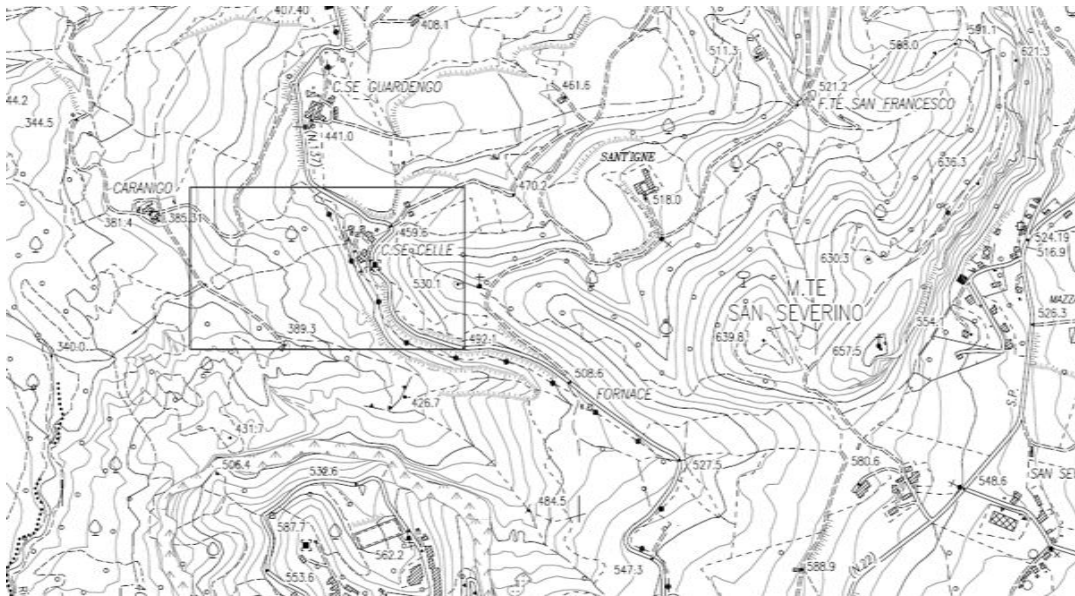


Figura 1.15 Mappa dell'area di Le Celle (relazione geologica 2009)

Il versante in dissesto in località Le Celle, si sviluppa in destra idrografica del fosso Campone.

Il territorio in esame è caratterizzato da un ampio assortimento di unità geologiche:

- Sequenza epiligure con litologia calcarea, calcarenitico-arenacea e arenaceo-conglomeratica;
- Unità liguri (Argille Varicolori prevalentemente argilloso-marnose) e depositi pliocenici intrappenninici argillosi e arenacei.

Le suddette unità geologiche interagiscono tra loro configurando due principali scenari di evoluzione della struttura geologica, a breve e lungo termine:

1) sovrapposizione stratigrafica delle formazioni epiliguri sulla unità ligure delle Argille varicolori. Tale assetto, correlato alla addensata fatturazione degli ammassi rocciosi dove interviene una dinamica attività idrogeologica, instaura relazioni perturbanti tra le due diverse compagini formazionali dalle quali conseguono corrispettive accelerate evoluzioni geomorfologiche. L'avvicinarsi di franamenti delle argille alla base delle placche rocciose incentivano i crolli dalle pareti fratturate prive di sostegno al piede. Analogamente crolli dalle

pareti mobilitano il substrato argilloso anch'esso densamente tettonizzato e predisposto all'instabilità soprattutto nei primi metri, dove maggiore è il suo stato di decompressione. La contestualità dei fenomeni di crollo e di mobilitazione delle argille basali produce infine frane complesse che si accumulano lungo la valle fino a determinare ammassi detritici di notevole spessore soggetti a rimobilizzazione, soprattutto nei periodi stagionali più sfavorevoli.

2) sovrascorrimento della successione epiligure e delle unità liguri (rappresentate localmente dalle argille Varicolori), sui depositi pliocenici. Il meccanismo di sovrascorrimento dell'unità ligure è riconducibile al classico modello di accavallamento indotto dalle tensioni orogenetiche compressive orientate in senso nord-orientale.

## **2.10. Analisi dei fenomeni di dissesto**

I fenomeni di instabilità della borgata Le Celle, in evoluzione da anni, hanno subito una sensibile accelerazione per effetto delle intense precipitazioni meteoriche invernali e primaverili del 2009, producendo ulteriore arretramento delle scarpate di frana verso la parete rocciosa e aggravando la tendenza allo scalzamento.

Lo sviluppo longitudinale del bacino principale di frana attivo è circa 280 metri con ampiezza trasversali comprese tra 90 e 100 metri nel tratto prossimale e 40-44 m in quello medio e distale. Ne deriva una configurazione planimetrica più ampia alle quote superiori rispetto a quella di valle dove si restringe notevolmente fino all'unghia, attestata circa alla quota assoluta di metri 378.

Il dato saliente emerso dall'analisi comparativa delle foto aeree è quello di una attività dei dissesti che rimane dinamicamente in evoluzione alle quote superiori del bacino di frana principale, dove si assiste anche a continue modificazioni dei coronamenti delle scarpate di frana. Le porzioni medie e terminali del bacino di frana principale, conservano sostanzialmente la loro preesistente perimetrazione denotando una prolungata condizione di quiescenza. I risultati prodotti dall'osservazione delle foto satellitari permettono di identificare gli episodi di mobilitazione del terreno più recenti.

La sintesi dei risultati delle osservazioni e delle indagini svolte in tempi diversi, permette di schematizzare le seguenti principali tendenze di evoluzione dei dissesti:

- Da circa metà del bacino principale di frana attivo verso la pista di cantiere in prossimità della quale è attestata l'unghia, non si notano sostanziali modifiche topografiche dal 1994 al novembre 2009.

- Nel periodo intercorso tra il 2003 e il 2007 si è verificato il maggior trend di evoluzione in arretramento delle scarpate di frana lungo il coronamento principale.
- Dal 2007 al 2009 si è avuto un intervallo di rallentamento dei fenomeni.
- Riattivazione dei dissesti nei primi mesi del 2009 con ulteriore retrogressione della corona.

Dal 2003 alla fine del 2009 la scarpata è arretrata di 9 metri, l'evoluzione è stata accelerata a causa della presenza del fosso e dall'azione dell'acqua proveniente dalla strada e dal versante a monte, che scola nel corpo di frana.

Si rivela, attraverso i dati dell'indagine geofisica, un'imbibizione dei materiali troppo spinta per essere naturale per cui si ipotizza anche lo sversamento di acque chiare provenienti dalle abitazioni.

Il movimento generale del dissesto più profondo è molto lento mentre i corpi più superficiali si muovono, ad ogni evento, dai 60 cm ai 2 m nella parte centrale.

La corona arretra ma le quote della scarpata di frana dove affiora la roccia in posto rimangono sostanzialmente le stesse, segno di eventi poco profondi che interessano soltanto la porzione più superficiale dell'ammasso roccioso.

Si noti ora l'evoluzione del versante di Le Celle in una successione di immagini satellitari che rappresentano l'area dal 1994 al 2010 (Google earth).

Si può notare come nelle prime immagini l'area compaia quasi inalterata e fittamente rivestita da una copertura vegetale che progressivamente è stata erosa e ha lasciato il terreno scoperto.

Nelle immagini in cui compare una linea bianca a delimitare l'area in dissesto, (Fig. 1.15, 1.16, 1.17) essa rappresenta l'ambito in dissesto attivo nel rilevamento di Giugno 2010 per poter effettuare un immediato raffronto visivo tra l'area dei dissesti odierna e quella delle date precedenti.



Legenda

- estensione ambito in dissesto attivo - rilievo 2009
- estensione ambito in dissesto attivo - situazione anno 1994
- rimobilizzazioni superficiali (colata attiva) anno 1994
- tagli laterali ed emersione piani di scivolamento
- tagli e scavo di frana attiva (in stabilizzazione)

Figura 1.16 Immagine satellitare di Le Celle anno 1994 (relazione geologica 2009)



Legenda

- estensione ambito in dissesto attivo rilievo 2009
- estensione ambito in dissesto attivo - situazione anno 2000
- rimobilizzazioni superficiali (colata attiva) anno 2000
- tagli laterali ed emersione piani di scivolamento
- tagli e scavo di frana attiva (in stabilizzazione)

Figura 1.17 Immagine satellitare di Le Celle anno 2000 (relazione geologica 2009)





*Figura 1.18 immagine satellitare di Le Celle 22/8/2002 (google earth)*



*Figura 1.19 Immagine satellitare di Le Celle 27/9/2003 (google earth)*



*Figura 1.20 Immagine satellitare di Le Celle 7/6/2010(google earth)*

- Fronti di frana attiva
- Rimobilizzazioni superficiali nell'anno di osservazione
- Tagli laterali ed emersione piani di scivolamento
- Estensione ambito in dissesto attivo

## 3. Metodi di indagine

### 3.1. Prelievo di campioni dal sottosuolo

Spesso nella Geologia Applicata e nella Geotecnica non sono note a priori la sequenza stratigrafica del sottosuolo, le condizioni di falda e le proprietà meccaniche dei materiali presenti in sito. Per questo motivo, data l'estrema variabilità delle situazioni naturali e delle tipologie dei terreni, si rende necessario l'impiego di mezzi di sondaggio e di indagine geognostica con lo scopo di determinare le proprietà sopra elencate ma soprattutto caratteristiche fisiche, meccaniche e idrauliche dei terreni.

Questo scopo può essere perseguito attraverso diversi metodi:

- Realizzazione di scavi (pozzi, cunicoli, trincee);
- Esecuzione di sondaggi e analisi di laboratorio.

Concentrandosi sulla seconda metodologia si può affermare che questa è attualmente la più utilizzata per merito di tempi e costi di esecuzione relativamente contenuti e per la possibilità di attraversare qualsiasi tipo di terreno anche a grande profondità e sottofalda (Fig. 3.2).

Per contro, si riscontra una certa difficoltà di campionamento in terreni a grana grossa incoerenti e un possibile disturbo dei campioni per penetrazione del fluido di perforazione, dilavamento e caduta di detriti sul fondo del foro. Solitamente ai sondaggi puntuali con analisi di laboratorio vengono associate indagini in sito e prove geofisiche con lo scopo di estendere i parametri ottenuti in laboratorio a porzioni di terreno più estese.

Le tecniche di perforazione più comuni sono: sistema a mano, sistema a percussione, sistema a rotazione, sistema a rotopercussione. Nella tabella sottostante (Tab. 3.1) sono elencate le caratteristiche e le peculiarità di ciascuno di questi metodi in relazione alla destinazione d'uso.

Metodo	Movimento utensile	Trasmissione movimento	Disgregazione terreno	Asportazione detriti	Sostegno delle cavità	Profondità massima	Orientamento possibile	Campi di impiego
Percussione	Alternativo	A corda	Urto	Discontinua Con curetta	Con colonna di manovra	~ 100 m	-	Pozzi per acqua. Campionamento. Pali di fondazione.
Rotazione	Rotativo	Con aste	Taglio. Urto Urto e taglio Abrasion	Continua, con circolazione diretta di fango	Con fango (1)	12+15000 m	Prevalentemente verticale ma possibile in tutte le direzioni	Perforazioni in ogni tipo di terreno. Ricerca e produzione di idrocarburi e di "energia geotermica". Indagini geominarie, geognostiche e geotecniche. Campionature. Coltivazioni. Pozzi per acqua. Fori da mina. Bullonature, iniezioni di consolidamento, prove idrauliche, drenaggi. Pali di fondazione
				Continua, con circolazione diretta di acqua	Senza (1)	~1000 m		
				Continua, con circolazione di aria o di schiume stabili	Senza			
		Continua, con circolazione inversa di fluido (acqua, fango)	Senza o con fango	~150 m	Verticale	(1) In fori poco profondi impiegata talvolta una colonna di manovra		
		Con turbina idraulica	Taglio. Abrasion	Con aste elicoidali continua o discontinua	Senza o con colonna di manovra	~200 m	Tutte le direzioni (2)	Indagini geognostiche. Perforazioni di grande diametro. Pali di fondazione. Coltivazioni di acquiferi
			Urto e taglio Urto Abrasion	Continua con circolazione di liquido	Senza o con fango	12+15000 m	Da verticale a orizzontale (in profondità)	(2) Esclusa perforazione discontinua
Rotopercussione	Senza	-	Urto di un martello sull'utensile	Continua con circolazione di aria o di acqua	Senza	~200 m	Tutte le direzioni	Fori da mina. Fori per bullonature, per ancoraggi, per iniezioni, per prove idrauliche, per indagini geognostiche, per drenaggi, per ricerca e coltivazione di acquiferi

Tabella 3.1 Caratteristiche e applicazioni dei vari metodi di perforazione (appunti geologia tecnica, Borgatti)

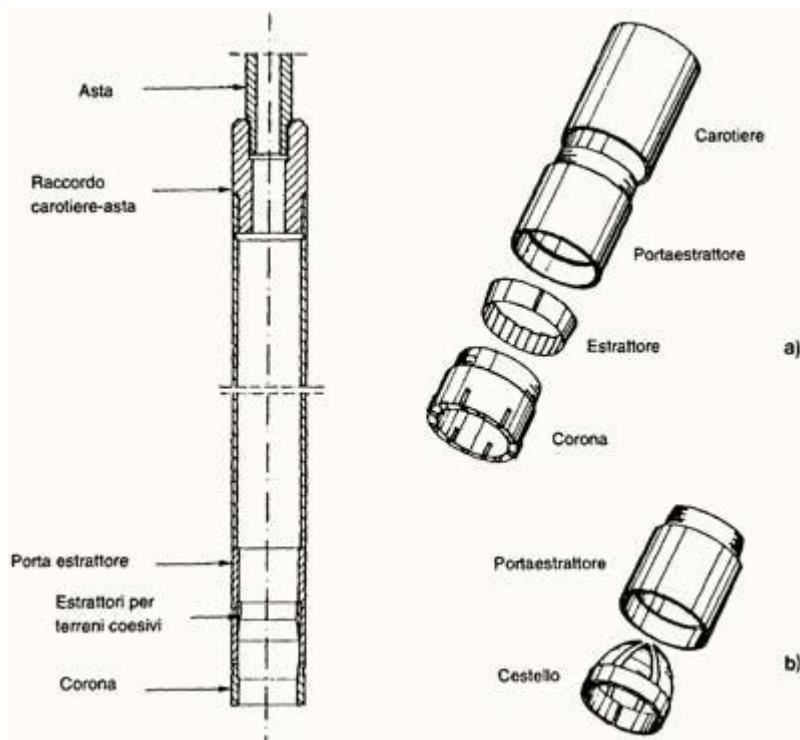


Figura 3.2 Carotiere doppio (www.Provepenetrometriche.com)



*Figura 3.3 Realizzazione di un carotaggio con sistema a rotazione*

In passato le sonde erano comunemente eseguite con sistema a percussione mentre negli ultimi decenni vengono prevalentemente eseguite con sistemi a rotazione.

Il sistema a rotazione (Fig. 3.2) presenta intuitivamente innumerevoli vantaggi rispetto alla percussione con l'unico inconveniente di necessitare di una certa quantità di acqua per la perforazione.

Le sonde moderne sono tutte idrauliche e sono composte da un telaio sul quale è montata la torre di perforazione, la pompa fanghi, l'argano, la morsa ecc.

La torre monta lateralmente la cosiddetta "testa di rotazione" la quale scorre in direzione verticale grazie all'azione di un sistema di pistoni che forniscono la spinta. Quindi l'energia trasmessa all'utensile di perforazione per l'avanzamento è suddivisibile in: rotazione, spinta, energia del fluido iniettato per disgregare e asportare il terreno.

La perforazione a rotazione è attualmente il metodo di scavo più utilizzato per lo scavo di pozzi, la ricerca petrolifera, il prelievo di campioni e per l'installazione di piezometri e inclinometri.

L'utensile di perforazione (scalpello) è posto alla fine della batteria di perforazione e l'asta superiore è collegata direttamente alla testa motrice che imprime il movimento rotatorio.

Le aste di perforazione sono costituite da:

- Aste di perforazione (L=3-4.5-6-9 m);
- Un certo numero di aste pesanti poste sopra lo scalpello e di diametro superiore alle aste di perforazione stesse.

Si possono distinguere, nella perforazione a rotazione, metodi a carotiere e metodi a distruzione di nucleo con fango di perforazione. Per il prelievo di campioni il metodo utilizzato è quello a carotaggio continuo che consente di prelevare campioni di qualità superiore e in cui l'avanzamento avviene tramite un carotiere dotato di scarpa tagliente posto in fondo alla batteria di aste.

A seconda del tipo di carotiere utilizzato il campione sarà più o meno disturbato; le pareti dello scavo sono sostenute mediante tubi di rivestimento manovrati mediante ganasce e giratubi.

Con le dovute cautele il metodo consente di estrarre un campione in grado di fornire le corrette informazioni stratigrafiche e sul quale è possibile compiere analisi di laboratorio.

Per campioni indisturbati (o a disturbo limitato) s'intendono quelli prelevati con apparecchiature idonee a conferire il massimo grado di qualità compatibilmente con la natura del terreno e cioè, in base alla classificazione proposta dalle Raccomandazioni AGI (1977). Tale classificazione "misura" la qualità del campione in base alla quantità di informazioni geotecniche da esso derivabili.

In particolare:

- Q.4 – Q.5 per terreni coesivi: possibilità di determinare tutte le caratteristiche con la sola eventuale eccezione di quelle meccaniche di resistenza e deformabilità;
- Q.2 – Q.3 per terreni incoerenti o in ogni caso difficili: determinabilità della reale composizione granulometrica e possibilmente anche del contenuto d'acqua naturale.

Solitamente si richiedono:

- Q2 o superiore (0.5-1 kg) per prove di classificazione (granulometria, limiti Atterberg etc.)
- Q2 o superiore (5-10 kg) per prove di compattazione (Proctor) in terre con  $D_{max} = 5-20$  mm.
- Q5 per caratteristiche meccaniche ( $\emptyset$  min 80-100 mm, L min. 60 cm).

#### PRELIEVO CAMPIONI DA SCAVI

Campioni Disturbati: (Q1-Q3): rappresentativi, raccolti manualmente e posti in cassette, barattoli, sacchi di plastica.

Campioni Indisturbati: (Q4-Q5): da fronti di scavo freschi, raccolti e conservati in cilindri campionatori con coperchi a tenuta. Una volta infisso, il campionatore è estratto scavandogli

attorno. Possono essere anche raccolti Campioni a Blocco (distaccati a zolla), da avvolgere in involucri impermeabili e posti in cassa ad imballo morbido.

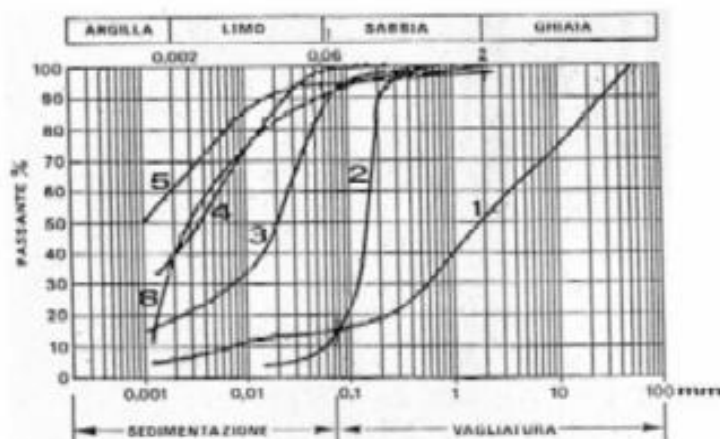
### PRELIEVO CAMPIONI DA SONDAGGIO

Campioni Disturbati: (Q1-Q3): ottenuti con normali utensili di perforazione (carotiere) o campionatori in situazioni difficili. Raccolti in casse catalogatrici (Q1-Q2) o sacchetti o tubi a tenuta (Q3). Campioni a Disturbo Limitato o Indisturbati: (Q4-Q5): ottenuti con appositi strumenti campionatori.

## 3.2. Prove geotecniche

Sul campione indisturbato, in sede di laboratorio, possono essere effettuate una serie di prove atte a stabilire una serie di parametri caratterizzanti la roccia o il terreno che si sta analizzando. Tra i parametri investigati quelli che risultano maggiormente utili sono l'umidità naturale del campione, la granulometria, la resistenza al taglio, l'angolo di attrito e la coesione nel caso di materiali fini.

Con il termine granulometria si intende la distribuzione percentuale dei grani di un campione di terreno secondo le dimensioni, rappresentata con una curva. La granulometria è determinata con l'analisi meccanica a mezzo di vagli o setacci con maglie unificate per il materiale a grana grossa e con il metodo del densimetro, cioè misurando la densità di una sospensione di terra per il materiale a grana fine. I risultati sono usualmente rappresentati in una curva di distribuzione secondo le dimensioni. La percentuale  $p\%$  di materiale più fine di una certa dimensione è riportata in ordinata in scala naturale, mentre il corrispondente diametro dei grani  $d$  in mm è riportato in ascissa in scala logaritmica. La forma della curva è indicativa della distribuzione percentuale, cosicché terre uniformi sono rappresentate da linee quasi verticali, mentre terre ben graduate occupano parecchi cicli della scala logaritmica. Spesso la granulometria del terreno riflette la sua origine.



*Figura 3.4. Esempio di curva granulometrica (fonte [www.geotestsannio.com](http://www.geotestsannio.com))*

L'andamento di una curva granulometrica è importante specialmente per le terre granulari e può essere espresso dal coefficiente di uniformità:

$$C = D_{60}/D_{10}$$

Dove  $D_{60}$  e  $D_{10}$  rappresentano rispettivamente i diametri delle maglie del setaccio in cui passa il 60% e il 10% dei grani del terreno in ingresso. L'uniformità è massima per  $C=1$  e si parla di materiale praticamente uniforme fino a  $C=2$ , di materiale poco graduato fino a  $C=6$ , per valori superiori di materiale ben graduato e per valori di  $C>15$  di materiale decisamente ben graduato.

Un campione di terreno è costituito da un insieme di particelle solide e da un insieme di vuoti riempiti da fluidi; schematicamente può essere diviso nelle tre fasi che lo compongono: solida liquida e gassosa. Si indica il volume del solido con  $V_s$ , quello dell'acqua con  $V_w$ , quello del gas  $V_g$ .

Poiché le relazioni tra il volume del liquido e del gas variano in funzione delle condizioni dell'acqua del terreno così come al variare dei carichi, è conveniente indicare tutto il volume non occupato dalle particelle solide o volume dei vuoti con  $V_v$ .

Si definisce allora la porosità con:

$$n = V_v/V$$

e viene espresso in percentuale anche se più spesso si fa riferimento all'indice dei vuoti:

$$e = V_v/V_s$$

Tra la porosità  $n$  e l'indice dei vuoti  $e$  si hanno le seguenti relazioni:

$$n = e/(1+e)$$

$$e = n/(1-n)$$

Una delle più importanti proprietà, specialmente delle terre a grana fine, è il contenuto naturale di acqua definito da:

$$w = P_w/P_s$$

in cui  $P_w$  è il peso dell'acqua e  $P_s$  il peso del solido essiccato a 105 gradi Celsius, temperatura alla quale evapora completamente l'acqua libera o interstiziale.



I terreni sotto la falda freatica si trovano allo stato saturo mentre la maggior parte dei terreni sopra la falda freatica ha i vuoti riempiti di acqua e parte di aria. Anche alcuni terreni sommersi possono avere delle piccole quantità di aria o gas. Il grado di saturazione è definito da:

$$Sr \% = V_w/V_u$$

Pertanto il terreno può trovarsi, oltre che nella situazione trifase anche in una situazione bifase dove i vuoti sono riempiti solo da acqua (terreno saturo  $Sr = 100\%$ ) o solo da aria (terreno asciutto  $Sr = 0$ ).

Il peso della unità di volume  $\gamma$  è una delle più importanti proprietà fisiche di un terreno ed è definita da:

$$\gamma = P/V$$

con  $P$  peso totale e  $V$  volume totale. Se il terreno è saturo il peso unitario viene indicato con  $\gamma_{sat}$  se asciutto con  $\gamma_d$  dato da:

$$\gamma_d = P_s/V$$

In pratica è talvolta conveniente determinare il peso unitario indirettamente facendo riferimento al peso unitario dei costituenti solidi definito da:

$$\gamma_s = P_s/V_s$$

$\gamma_s$  può essere determinato in laboratorio; i valori più frequenti sono compresi tra 26.5 e 27.5  $\text{Kn/m}^3$  ma possono variare tra 25 e 29  $\text{Kn/m}^3$  Indicando con  $\gamma_w$  il peso unitario dell'acqua e il peso unitario del terreno immerso con:

$$\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$$

Si ha poi il peso specifico dei grani:

$$Gs = \gamma_s / \gamma_w$$

Mentre il grado di saturazione è dato da:

$$Sr = (Gs * w) / e$$

La presenza dell'acqua nei vuoti del terreno influenza principalmente il comportamento dei terreni a grana fine (argille, limi). Ne consegue che è importante sia conoscere il contenuto d'acqua in un deposito naturale di terreno sia confrontare questo contenuto d'acqua con alcuni valori importanti del contenuto d'acqua, valori che costituiscono in un certo modo i limiti del comportamento del terreno.

I limiti di Atterberg sono dei contenuti d'acqua determinati in laboratorio con procedure standardizzate che rappresentano abbastanza bene dei passaggi critici di comportamento del terreno.

Se si fa aumentare con continuità il contenuto d'acqua  $w$ , si vede che lo stato del terreno argilloso passa da quello di solido-fragile a quello di semisolido, quindi a quello plastico e infine a quello fluido. A queste variazioni continue di stato possiamo abbinare una variazione della risposta deformazionale del terreno. Il contenuto d'acqua che separa il passaggio dal solido fragile al semisolido è detto limite di ritiro  $w_s$ , quello dal semisolido al plastico è detto limite di plasticità  $w_p$  e quello dallo stato plastico allo stato fluido limite di liquidità  $w_l$ ; la differenza tra il limite di liquidità e il limite di plasticità è detto indice di plasticità e indica il contenuto d'acqua nel quale il terreno è allo stato plastico. Il limite di liquidità si determina a mezzo dell'apparecchio di Casagrande ed è il contenuto d'acqua per il quale il solco tracciato con apposita spatola sulla terra posta in un cucchiaino si richiude dopo 25 cadute.

Il limite di plasticità viene determinato formando per rotolamento dei cilindri che raggiungano un diametro di circa 3 mm ed è il contenuto d'acqua corrispondente al formarsi delle prime screpolature.

Il limite di ritiro viene determinato per progressivo essiccamento di un provino, misurando via via il volume e l'umidità, ed è il contenuto d'acqua per cui non si ha ulteriore riduzione di volume e, proseguendo l'evaporazione, l'aria entra nei vuoti del terreno.

I limiti di Atterberg costituiscono una prova importante perché presentano una notevole fedeltà nei risultati sperimentali, anche se l'apparecchiatura sperimentale di prova è piuttosto semplice. Essi vengono determinati sulla frazione passa al setaccio 40 (0.42 mm).

I valori dei limiti di Atterberg, detti anche limiti di consistenza, ed in particolare di  $I_p$  dipendono innanzitutto dal tipo di argilla; si ha infatti una corrispondenza tra la composizione mineralogica e i limiti di Atterberg.

I limiti di Atterberg dipendono dalla percentuale di argilla che granulometricamente corrisponde alla percentuale di materiale inferiore ai 2 micron.

Da questo punto di vista si fa riferimento al coefficiente di attività:

$$A = I_p / \% < 2 \mu m$$

In base al quale le terre possono essere così divise:

$A < 0.75$  terre inattive

$A > 1.25$  terre attive

$0.75 < A < 1.25$  terre mediamente attive

La consistenza del terreno è misurata dall'indice di consistenza:

$$I_c = (w_l - w) / I_p$$

O dall'indice di liquidità  $I_L$

$$I_L = (w - w_p) / I_p = 1 - I_c$$

Questi sono indici che mettono in relazione il contenuto d'acqua naturale con  $w_1$  e  $w_p$  e che costituiscono un parametro importante per spiegare il comportamento delle argille.

### 3.3. Costipamento con prova Proctor

La prova Proctor viene fatta per valutare il costipamento di un terreno. Viene valutata l'influenza del contenuto di acqua sul costipamento. La prima prova venne fatta nel 1933. La prova Proctor viene eseguita seguendo la metodologia AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials). Ci sono 2 tipi di prova AASHTO: quella standard e quella modificata; la standard ha una fustella con un diametro di 101,6mm ed un'altezza di 116,4 mm, mentre la modificata ha un diametro di 152,4mm ed un'altezza di 116,4 mm. La prova Proctor è una procedura utilizzata per determinare la massima massa volumica (densità) del secco della terra ottenuta tramite costipamento meccanico. L'umidità corrispondente è definita umidità ottima ed è per questa che si ha la massima densità raggiungibile con l'energia di costipamento impegnata.

In condizioni di terra umida infatti l'azione dell'acqua facilita l'addensamento dei granuli: il maggiore costipamento si avrà in corrispondenza dell'umidità ottima. Quantità invece maggiori di acqua causano un nuovo allontanamento degli inerti ottenendo quindi un minor addensamento.

La prova consiste nel disporre di un campione di terra passante al setaccio 5 della serie UNI 2332 (o setaccio 4 della serie ASTM) che viene disposto in una fustella cilindrica di date dimensioni ( $d = 151$  mm) e costipato mediante un pestello di peso 2,495 kg per la standard e 4,535 kg la modificata e fatto cadere per 25 volte da un'altezza di 30,5 cm sul materiali costituito da 3 strati per la standard, mentre la modificata ha 5 strati, il pestello fatto cadere da un'altezza di 45,7 cm per 56 volte. A costipamento ultimato si misura il contenuto d'acqua della terra e la sua densità secca, data dal rapporto tra il peso del materiale essiccato in stufa a 105 °C ed il volume dello stesso a costipamento avvenuto. La prova viene ripetuta su campioni dello stesso materiale con contenuti d'acqua via via crescenti, ottenendo diversi valori della densità secca. Inserendo in un grafico con ascisse il contenuto d'acqua e come ordinate la densità secca è possibile determinare la curva Proctor (o curva di addensamento) riconoscibile dalla classica forma a campana. Dallo studio della curva Proctor si determina il contenuto ottimo d'acqua in corrispondenza del quale si ha la massima densità della terra presa in esame.

$E = (\text{Peso maglio} * h * \text{ncolpi a strato} * n \text{ strati}) / \text{Volume fustella}$

Il grafico ottenuto mediante i campioni con un crescente contenuto d'acqua formano una parabola con la concavità verso il basso, il massimo della curva sarà il contenuto d'acqua ottimale e la densità secca ottimale (Figura 2.4).

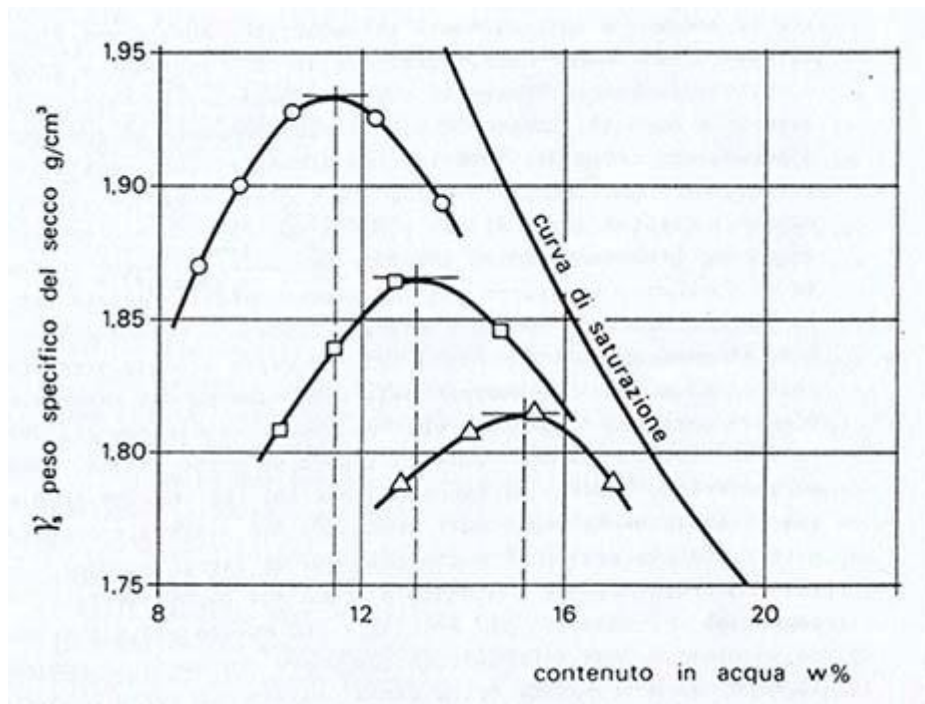


Figura 3.5 Grafico prova proctor con provini a contenuto d'acqua crescente (<http://dieta.unipv.it>)

### 3.4. Prova di taglio diretto con scatola di Casagrande

Tale prova di taglio diretto consolidata drenata, è eseguita su campioni indisturbati per la determinazione dei valori di angolo di attrito, attrito residuo e coesione.

Il provino è alto 30 mm e del diametro di 50 o 60 mm. Si utilizzano almeno tre provini che vengono inizialmente consolidati. Ciascun provino viene alloggiato nella scatola di Casagrande e sottoposto a consolidazione, mediante l'applicazione per step di carico di 0.75-1.0-1.5 la tensione verticale geostatica in sito.

Terminata la fase di consolidazione, mantenendo il carico assiale costante, il provino viene portato a rottura a velocità costante, mediante uno spostamento della parte inferiore della scatola ad opera del motore azionato dalla macchina di taglio.

Durante la fase di rottura, ad ogni spostamento della parte inferiore della scatola, corrisponderà un aumento del carico, registrato da un anello dinamometrico. Si potrà in questo modo determinare la forza che agisce sul piano orizzontale rispetto allo spostamento fino al punto di rottura del provino.

La scatola di taglio diretto impone la rottura su un piano orizzontale facendo traslare la parte superiore della scatola rispetto a quella inferiore. Dopo aver raggiunto uno spostamento orizzontale di diversi mm, la prova è interrotta e la parte superiore della scatola viene ricondotta alla posizione originale. La fase di taglio viene quindi ripetuta per determinare le condizioni residue.

I dati graficati determinano l'involuppo a rottura dei provini da cui è possibile ricavare:

- L'angolo di attrito interno  $\phi$  (coefficiente angolare della retta di interpolazione).
- La coesione  $c$  (intercetta sull'asse delle ordinate).

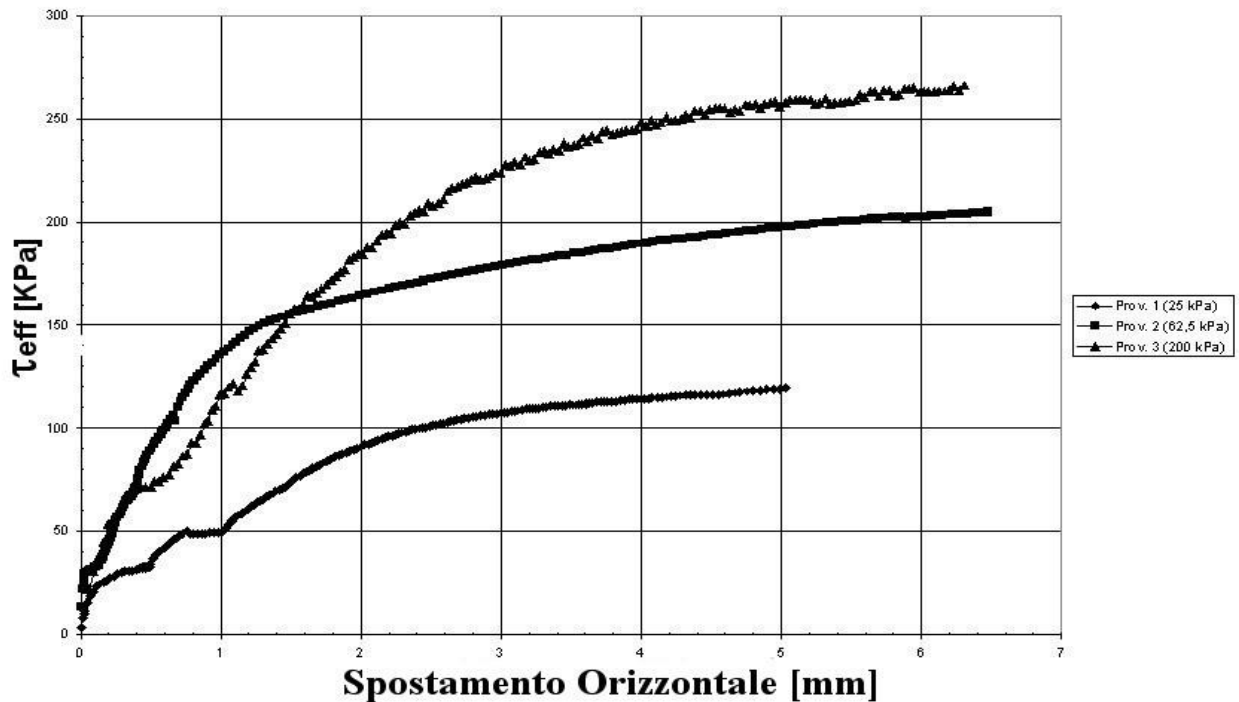


Figura 3.6. Curva Sforzi – Spostamenti ([www.vercelli.polito.it](http://www.vercelli.polito.it))

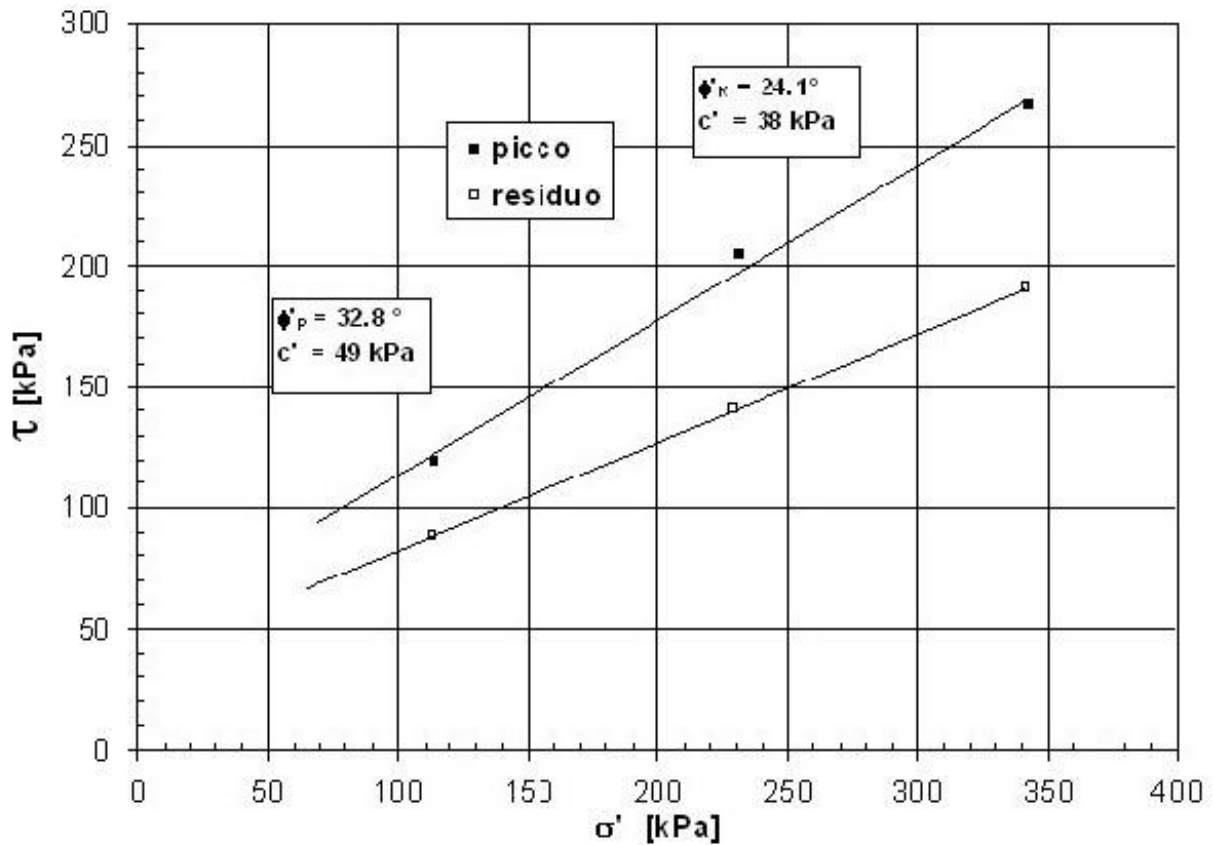


Figura 3.7 Curva Tau - Sigma. (Tratto da [www.vercelli.polito.it](http://www.vercelli.polito.it))

Generalmente è possibile distinguere i terreni in due categorie principali in base ai parametri meccanici:

- Terreni granulari (sabbie e ghiaie) con elevati angoli di attrito e coesione pressoché nulla;
- Terreni coesivi (limi ed argille) con bassi angoli di attrito e coesione più o meno elevata.

Di seguito sono riportati i valori indicativi di  $\phi'$  e  $c'$  di alcuni terreni.

Litotipo	Angolo di attrito $\phi'$ (°)	Coesione efficace $c'$ (kPa)
Sabbia a grana grossa mediamente addensata	38-42	0
Sabbia fina da poco addensata a poco limosa	32-35	0
Limo sabbioso – limo argilloso	28-30	0-10

Argilla limosa	24	10
Argilla ONC	14	20-40
Marne argillose	30-33	50-80
Piroclastiti	30-32	0

### 3.5. Caratterizzazione dell'ammasso roccioso

Per ammasso roccioso si intende l'insieme di roccia intatta e piani di discontinuità che interessano una determinata massa rocciosa. Il termine discontinuità è del tutto generico ed indica semplicemente un'interruzione nella continuità della roccia intatta; nel termine non vi è quindi nessun accenno al meccanismo genetico della frattura, che può essere sia di natura primaria (stratificazione, piani di strutture sedimentarie ecc.), che secondaria (discontinuità tettoniche, di alterazione, di detensionamento, di raffreddamento ecc.).

La caratterizzazione geologico-geotecnica dell'ammasso roccioso consiste principalmente nella individuazione dei parametri che definiscono gli stati e le situazioni tipiche della struttura in esame.

Quando l'ammasso roccioso è molto fratturato per la presenza di più sistemi di discontinuità, che lo scompongono in blocchi, in termini di resistenza si valuta un comportamento globale dell'ammasso. Per le dimensioni e le collocazioni del volume significativo dell'ammasso, non è possibile, evidentemente, realizzare prove in situ o in laboratorio, che forniscano dati rappresentativi del comportamento globale.

Esistono comunque diversi metodi attraverso i quali si può pervenire ad una caratterizzazione geotecnica a seconda dei casi:

- Metodi indiretti basati su indici di qualità (classificazioni geomeccaniche);
- Valutazioni e stime empiriche (basate su informazioni e stime precedentemente ottenute attraverso l'analisi di altri casi simili);
- Modelli matematici basati su back analysis (analisi a ritroso);
- Prove di laboratorio e in situ.

Gli indici di qualità derivanti dalle classificazioni geomeccaniche permettono una stima approssimata del comportamento dell'ammasso. Per alcuni di essi vengono fornite correlazioni tra classi di qualità degli ammassi rocciosi e relativi parametri di resistenza (coesione  $c$  e angolo di resistenza al taglio  $\phi$ ).

I metodi empirici si fondano su criteri di rottura che permettono di valutare la resistenza di un ammasso roccioso in funzione dello stato di sforzo, dalle proprietà del materiale roccia che

costituisce i singoli blocchi dell'ammasso e dell'influenza delle discontinuità sul comportamento dell'ammasso.

I metodi basati su back analysis permettono di valutare la resistenza dell'ammasso roccioso tramite la modellazione numerica di un fenomeno reale, di cui sono note le condizioni intrinseche e al contorno (stratigrafia, spessore, presenza di acqua ecc.) e il cinematismo (tipologia della rottura, superficie di scivolamento ecc).

Si può eseguire una suddivisione di questi metodi anche in base ai diversi approcci che vengono utilizzati per analizzare l'ammasso roccioso ovvero:

- come un mezzo continuo, ovvero prescindendo dalle discontinuità presenti (Bieniawski, 1989);
- come mezzo discontinuo tenendo conto esplicitamente delle discontinuità presenti (Barton, 1973).

Con il primo generalmente si determina l'entità della riduzione delle caratteristiche della roccia intatta causata da disturbi geologici o da lavori eseguiti o in fase di progetto.

Tale entità viene solitamente stimata mediante il ricorso a classificazioni che permettono di ricalcolare, per l'ammasso, i parametri di angolo di attrito e coesione.

Analoghi risultati si possono ottenere tramite il metodo di Hoek e Brown (2002) che consente di determinare lo stato di tensione massimo sopportabile dall'ammasso roccioso discontinuo assumendo che eventuali cedimenti possano prodursi solo in corrispondenza delle discontinuità delle quali si cercherà di prevedere il comportamento.

### **3.6. Indici di qualità e classificazioni geomeccaniche**

Gli ammassi rocciosi possono essere studiati in modo semplificato e classificati in relazione al loro comportamento e alle loro prestazioni, distinguendo vari campi di applicazione.

Le classificazioni geomeccaniche furono elaborate con l'obiettivo di fornire indici di qualità mediante l'analisi sistematica, effettuata con criteri il più possibile standardizzati, di alcuni parametri caratteristici degli ammassi rocciosi. Gli indici di qualità, espressi da un numero, forniscono indicazioni sulla qualità complessiva dell'ammasso, sulla base della differenziazione di classi di qualità. Esistono inoltre relazioni che permettono di stimare da tali indici i parametri di resistenza dell'ammasso, potendone in questo modo studiare il comportamento nell'esecuzione di lavori di scavo, gallerie e versanti in pendenza.

In seguito vedremo più nel dettaglio alcuni tra i più utilizzati metodi di classificazione, ovvero Deere (RQD), Bieniawski (RMR), Hoek-Brown (GSI).



### 3.6.1. Rock Quality Designation index (RQD)

L'indice RQD è stato sviluppato Deere per fornire una stima quantitativa della qualità dell'ammasso roccioso sulla base dell'analisi di un carotaggio della lunghezza minima di 200 cm.

L'indice è definito come rapporto percentuale tra la somma degli elementi più lunghi di 10 cm e la lunghezza totale come illustrato in figura numero.

Non vengono considerati nel conteggio le rotture provocate dal distacco della carota e quindi vengono indicati con L=0 i tratti che non presentano tratti lunghi almeno 10 cm (Fig. 3.7).

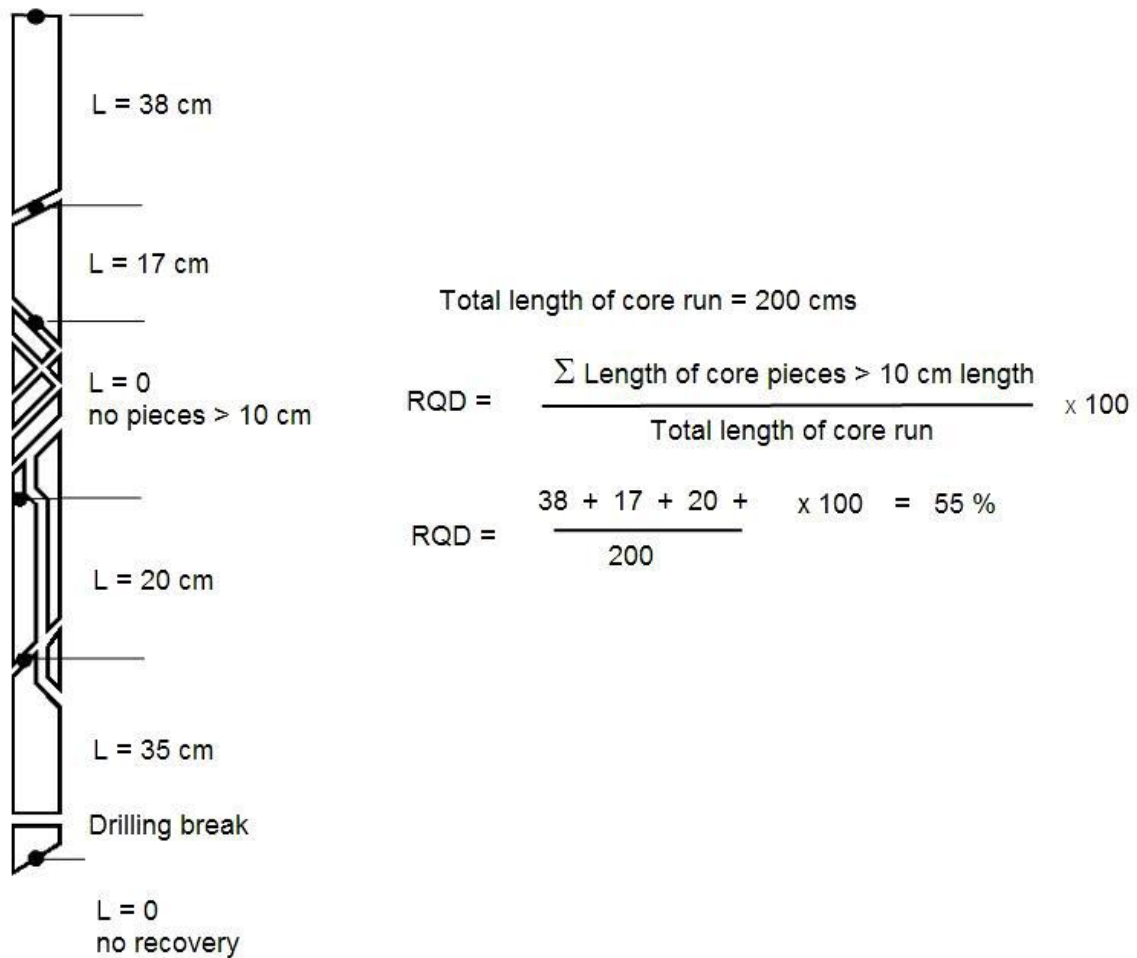


Figura 3.8 calcolo RQD su una carota (www.roscience.com)

La correlazione tra il valore dell'indice RQD e la qualità dell'ammasso roccioso è rappresentata nella tabella sottostante.

Tabella 3.9 correlazione tra RQD e qualità dell'ammasso

<b>RQD</b>	<b>Qualità della roccia</b>
0-25	Molto scadente
25-50	Scadente
50-75	Discreta
75-90	Buona
90-100	Eccellente

Palmstrom (1982) consiglia, quando non è disponibile roccia intatta ma sono presenti evidenti tracce di fatturazione nelle carote estratte, di valutare l'indice RQD dal numero di discontinuità per unità di volume. La relazione è, nel caso di ammassi rocciosi privi di argilla:

$$RQD\% = 115 - 3.3J_v$$

Dove  $J_v$  è il numero di discontinuità presenti in un metro cubo di roccia.

### **3.6.2. Rock Mass Rating (RMR)**

Il sistema di classificazione geomeccanica RMR viene proposto da Bieniawski (1978-1989) e consiste nell'assegnazione di un punteggio all'ammasso roccioso sulla base di sei parametri:

- Resistenza a compressione monoassiale;
- Indice RQD;
- Spaziatura delle discontinuità;
- Condizioni delle discontinuità con particolare riferimento alla loro apertura, alla scabrezza e alla presenza o meno di materiali di riempimento;
- Condizioni idrauliche;
- Giacitura delle discontinuità;

Ciascun parametro viene valutato in maniera quantitativa con l'assegnazione di un "rating"; la somma dei vari punteggi fornisce a sua volta il Basic Rock Mass Rating.

Per applicare la classificazione RMR si divide l'ammasso roccioso in zone o tratti che presentano caratteristiche geologiche più o meno uniformi, in coerenza con le osservazioni di campagna, nelle quali vengono raccolti i dati nonché effettuate le misure riferite alle proprietà e caratteristiche della matrice rocciosa e delle discontinuità.

Una volta ottenuti i punteggi che risultano dall'applicazione dei cinque parametri della classificazione si effettua la correzione per l'orientazione delle discontinuità e si ottiene il valore numerico con il quale si classifica l'ammasso roccioso.

Per esempio un ammasso classificato “molto buono” sarà un ammasso roccioso resistente, poco fratturato, senza infiltrazioni importanti e poco alterato, che non presenta grandi problemi di stabilità e di resistenza. Si può dedurre che avrà capacità portante elevata, permetterà lo scavo di scarpate con alta pendenza e non necessiterà misure di stabilizzazione e rinforzo nelle gallerie.

Resistenza a compress. uniassiale	[MPa]	>250	100-250	50-100	25-50	5-25	1-5	<1
Resistenza al "Point load test"	[MPa]	>10	4-10	2-4	1-2			
$P_1$		15	12	7	4	2	1	0

RQD	(%)	90-100	75-90	50-75	25-50	<25
$P_2$		20	17	13	8	3

Spaziatura delle discontinuità	[cm]	>200	60-200	20-60	6-20	<6
$P_3$		20	15	10	8	5

Stato delle discontinuità	$P_4$
Chiuse e non continue. Superf. molto rugose. Pareti asciutte.	30
Apertura < 0,1mm, non continue. Superfici rugose. Pareti umide.	25
Apertura < 0,1mm, continue e senza riempimento. Superfici rugose. Pareti bagnate.	20
Apertura di 1-5mm, continue. Riempimento di argilla con potenza < 5mm. Superfici lisce.	10
Apertura > 5mm, continue. Riempimento di argilla molle di potenza > 5mm.	0

Acqua nella massa		$P_5$
Venute in 10m di galleria $Q_{10}$ [l/min]	Condizioni generali della roccia	
nessuna	perfettamente asciutta	15
< 10	umida	10
10-25	bagnata	7
25-125	stillicidi	4
125	venuta d'acqua	0

Orientamento delle fratture	$P_6$		
	Gallerie	Fondazioni	Pendii
molto favorevole	0	0	0
favorevole	-2	-2	-5
discreta	-5	-7	-25
sfavorevole	-10	-15	-50
molto sfavorevole	-12	-25	-60

Figura 3.10 Tabelle dei coefficienti di calcolo dell'RMR (Beniawski, 1976)

### 3.6.3. Geological Strength Index (GSI)

L'indice di resistenza geologica GSI (Hoek e Brown, 1980) si ricava mediante l'esame principalmente visivo della roccia in sito che costituisce l'ammasso roccioso.

Vengono analizzate il grado di fatturazione della roccia e tipologia e frequenza delle superfici di discontinuità dell'ammasso.

Combinando opportunamente le varie osservazioni si ottiene il valore di GSI espresso da un numero variabile da 0 a 100. Il valore di GSI è ottenuto quindi da stime quantitative dell'ammasso roccioso ed è utilizzato per valutarne indirettamente le caratteristiche di deformabilità e resistenza e non per una sua classificazione geomeccanica. E' possibile determinare il valore GSI in funzione dell'indice BRMR, secondo la relazione proposta da Hoek (1994):

$$GSI = BRMR - 5$$

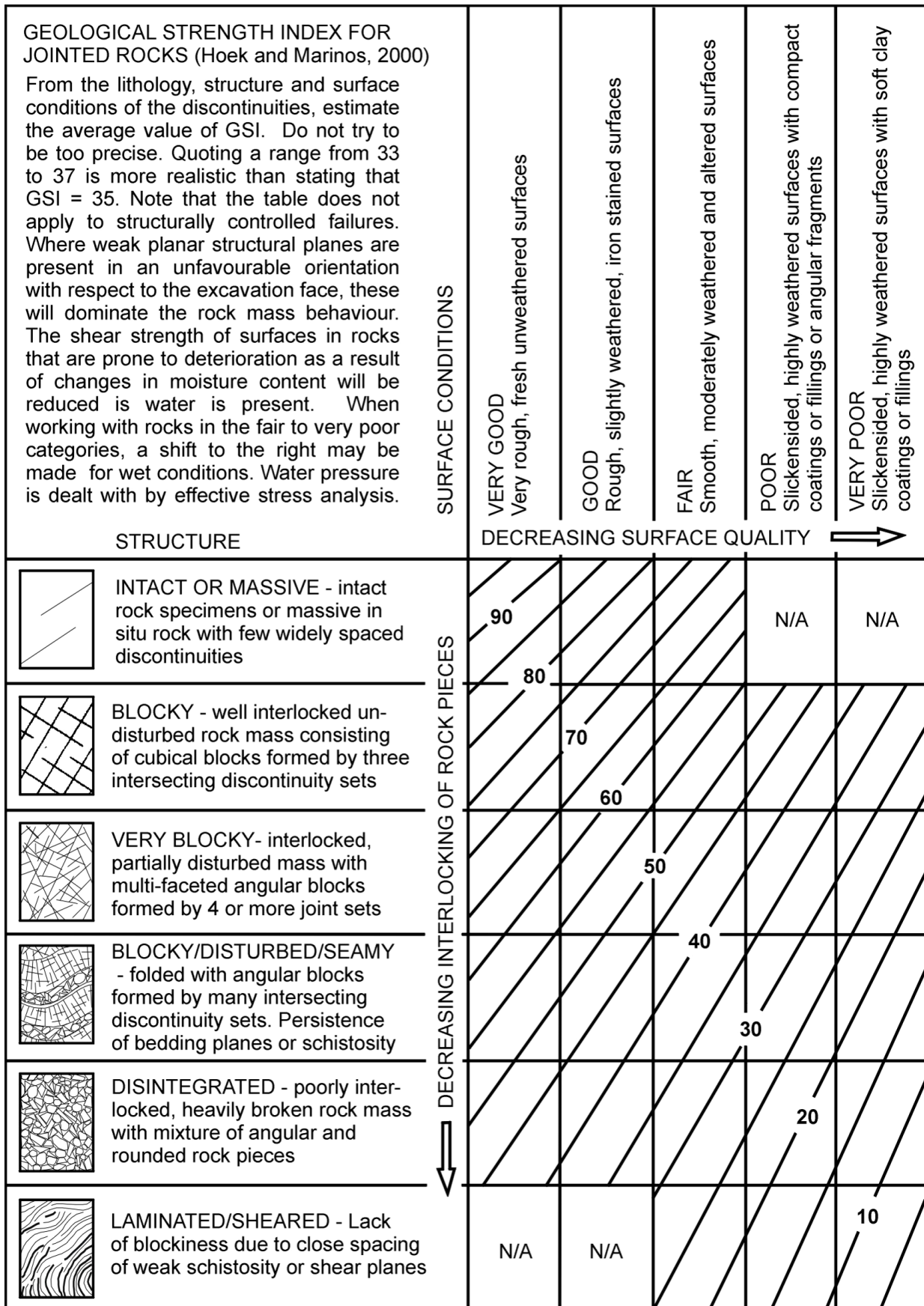


Figura 3.11 Grafico per la stima del GSI (Hoek et al. 2000)

### 3.7. Roclab

Non essendo in possesso di informazioni specifiche sulle caratteristiche meccaniche degli ammassi rocciosi presenti nell'area in esame, per la loro valutazione si è ricorsi all'utilizzo del programma RocLab (Rocscience Inc. 2002).

Questo programma si basa sul metodo per la stima della resistenza di ammassi rocciosi fratturati, proposto da Hoek e Brown (1980a, 1980b) e fondato sulla valutazione del grado di incastro tra i blocchi di roccia e della condizione delle superfici. Il metodo è stato modificato più volte (Hoek 1983; Hoek, Brown 1988; Hoek, Wood, Shah, 1992) e nel corso degli anni è stato sviluppato un nuovo criterio di classificazione, il *Geological Strength Index* (Hoek 1994; Hoek, Kaiser, Bawden 1995; Hoek, Brown 1997; Hoek, Marinos, Benissi, 1998), recentemente esteso per ammassi rocciosi eterogenei (Marinos, Hoek, 2000) e di cui si è già parlato.

RocLab permette di ottenere le caratteristiche meccaniche dell'ammasso roccioso, partendo dalla stima di alcuni parametri:

- la resistenza a compressione uniassiale della roccia intatta ( $c_i$ );
- la costante  $m_i$ , legata alla proprietà di attrito della roccia;
- l'indice GSI;
- il fattore di disturbo ( $D$ );
- il modulo di Young ( $E_i$ ).

Queste proprietà di base dovrebbero essere determinate da prove di laboratorio, come descritto da Hoek e Brown (1997) ma, in molti casi, ciò non risulta possibile. Per soddisfare questa esigenza, vengono utilizzate tabelle che permettono di stimare i valori di questi parametri.

In particolare la definizione dell'indice GSI è basata su una valutazione della struttura, della litologia e delle condizioni delle superfici di discontinuità nella massa rocciosa; è possibile effettuare una stima tramite esame visivo della roccia affiorante.

Al fine di fornire la gamma dei più probabili valori di GSI per ammassi rocciosi di vari tipi è stata elaborata una serie di tabelle indicative da Marinos e Hoek (2000). In RocLab, per l'analisi dei versanti, in cui il grado di confinamento è ridotto, viene utilizzata la componente minima dello sforzo principale ( $\sigma_3$ ) compresa tra zero e  $\sigma_v$ , dove quest'ultimo è calcolato come il prodotto tra unità di peso e profondità dell'ammasso roccioso.

L'assegnazione di valori ai parametri descritti finora permette di ottenere una stima delle proprietà meccaniche dell'ammasso roccioso; per i dettagli sulla procedura che viene eseguita

si rimanda all'articolo di Hoek and Brown del 1997. I risultati comprendono i parametri  $m$ ,  $s$  e  $a$  del criterio di rottura di Hoek-Brown e i parametri equivalenti del metodo Mohr-Coulomb.

### **3.8. Indagine sismica a rifrazione**

Le indagini geofisiche con metodi sismici sono indispensabili per conseguire dal piano campagna un'esplorazione dettagliata e continua del sottosuolo e come supporto principale di correlazione stratigrafica che generalmente è basata soltanto su un'interpolazione di informazioni puntuali, ottenute tramite sondaggi geognostici e su rilevamenti geologici di superficie.

Le prospezioni si basano, tramite le tecniche a riflessione e rifrazione, sulla determinazione della velocità di propagazione delle onde elastiche longitudinali attraverso il terreno, a seguito di energizzazioni sismiche generate dalla superficie.

E' noto che il valore della velocità sismica dipende dal grado di compattezza dei terreni investigati e quindi i due parametri sono tra di loro direttamente proporzionali.

L'elaborazione dei sismogrammi consente la ricostruzione di sezioni rappresentanti i profili sismostratigrafici, caratterizzati da valori di velocità espressi in km/s e l'ubicazione di fenomeni dislocativi.

Durante l'interpretazione dei dati, in presenza di materiali eterogenei appartenenti alla medesima formazione, potranno distinguersi più livelli che delimitano strati a consistenza differenziata; viceversa nel caso di reale omogeneità, i contatti saranno di origine litologica.

Per il buon esito delle indagini è opportuno effettuare la taratura delle velocità tramite sondaggi sismici in foro (tecnica downhole) e disporre della colonnina stratigrafica del foro eseguito a carotaggio continuo. La metodologia a rifrazione è ritenuta affidabile per indagini geognostiche estese fino a poche decine di metri di profondità; essa è particolarmente indicata per ottenere indicazioni vertico-laterali sulla consistenza dei terreni fino al substrato sismico locale ed è essenziale che non sussistano, nei materiali di copertura, inversioni di velocità con l'aumentare della profondità.

Nei casi in cui sia accertata o si sospetti, nella ricostruzione stratigrafica e tettonica del sottosuolo, la presenza di strati di terreno caratterizzati da proprietà elastiche inferiori a quelli soprasanti, l'esistenza di fenomeni dislocativi e per raggiungere obiettivi abbastanza profondi con stendimenti di geofoni relativamente corti, va utilizzata la tecnica a riflessione.



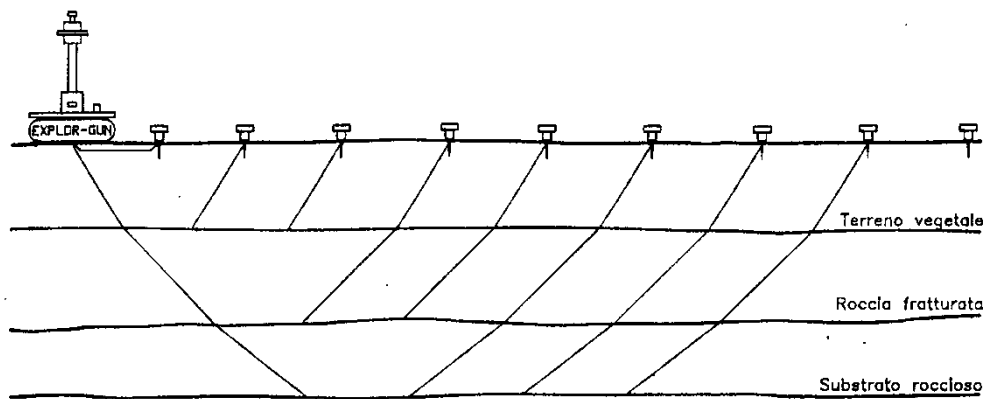


Figura 1 - Schema di esecuzione di un rilievo sismico a rifrazione.

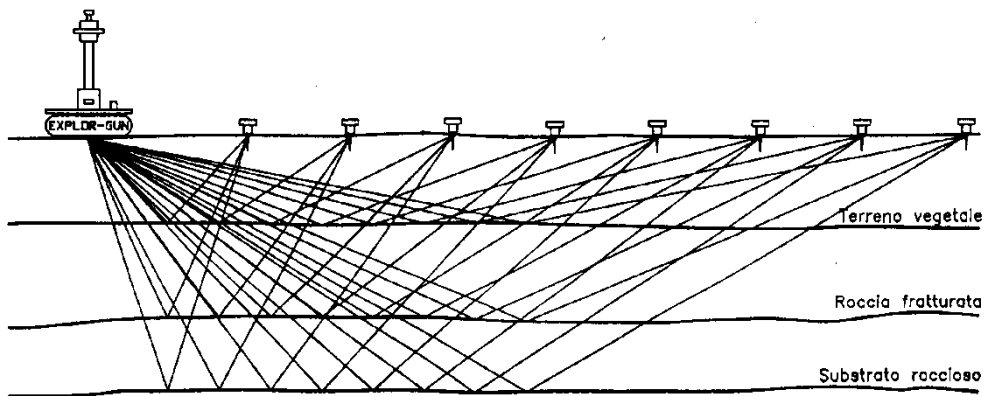


Figura 2 - Schema di esecuzione di un rilievo sismico a riflessione

Figura 3.12 Schema di esecuzione di una prova sismica a rifrazione e a riflessione (relazione geologica, 2009)

### 3.9. Monitoraggio degli spostamenti profondi tramite sistema inclinometrico

L'inclinometro è uno strumento che può essere installato in un foro di sondaggio in presenza di superfici di discontinuità nel sottosuolo. Lo scopo di questo strumento una volta posato in opera è quello di registrare tutti gli eventuali spostamenti avvenuti lungo l'asse del foro di sondaggio eseguito in modo da ottenere informazioni sull'evoluzione storica di un evento franoso o comunque sullo spostamento relativo di due superfici attraversate dal tubo inclinometrico.

Il sistema inclinometrico è costituito da:

- Il tubo inclinometrico, un tubo guida in plastica, ferro o alluminio, provvisto di quattro scanalature ortogonali, che viene alloggiato nel foro di sondaggio. Se com'è auspicabile, la profondità del foro supera quella della superficie di scorrimento della frana da monitorare, la parte più profonda del tubo inclinometrico risulta ancorata al substrato stabile, cosicché ogni eventuale movimento del terreno sovrastante viene registrato da una deformazione del tubo stesso.
- La sonda inclinometrica removibile dotata di rotelle che servono per garantire la centralità rispetto al tubo e, contemporaneamente, forniscono un riferimento per l'orientazione dei sensori; scorre lungo le guide del tubo inclinometrico, misurandone le deviazioni rispetto alla verticale. A intervalli di lettura costanti, l'assetto della sonda inclinometrica viene registrato.
- La centralina di acquisizione (normalmente l'acquisizione è a mano ma esistono sistemi digitali).
- Inoltre è necessario avere la sonda testimone che viene calata nel tubo prima di avere effettuato la misura reale per verificare la percorribilità del tubo stesso.

La prima misura viene utilizzata come riferimento per tutte le letture successive e viene detta "lettura di zero". Le misure vengono trasformate in spostamenti orizzontali e dal confronto delle misure alle varie quote si ricavano l'entità, la direzione e il verso dello spostamento.

La frequenza delle letture così come l'accuratezza nell'acquisizione sono funzione del contesto in cui si esegue il monitoraggio; solitamente le letture vengono fatte ogni metro o mezzo metro (Fig. 3.13).

Di norma viene utilizzato nel monitoraggio di frane profonde e superficiali lente, ma può essere usata anche in frane veloci preventivando la breve durata del tubo nel tempo e la possibile perdita della sonda. L'obiettivo è quello di verificare la profondità del piano o dei piani di scivolamento e di quantificare l'entità degli incrementi degli spostamenti e la loro direzione. I tubi inclinometrici non dovranno presentare fuori piombo superiori al 3% della lunghezza anche su tratti parziali (campo di misura della sonda  $\pm 30^\circ$  rispetto alla verticale) le letture possono essere eseguite su due o 4 guide a seconda della precisione richiesta.

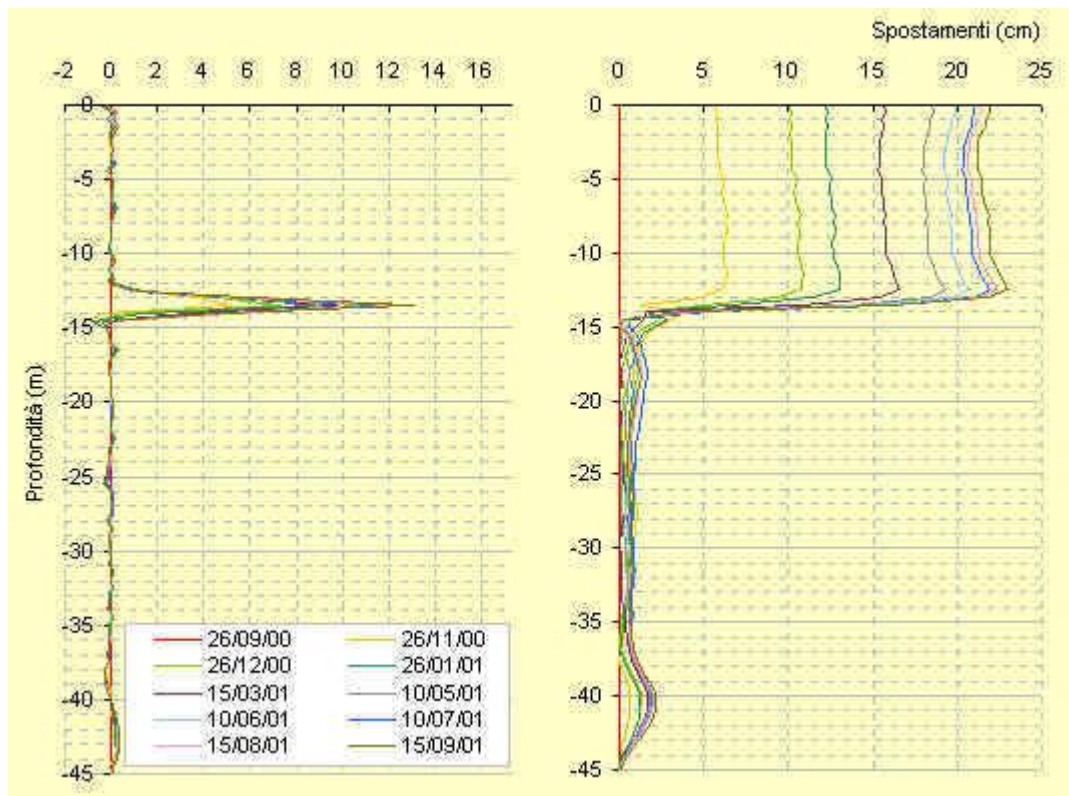


Figura 3.13 Esempio di grafico degli spostamenti rilevati da un inclinometrico (dal sito [www.irpi.to.cnr.it/geomon/sia%20it.htm](http://www.irpi.to.cnr.it/geomon/sia%20it.htm))

## 4. Studio della parete rocciosa di Le Celle



*Figura 4.1 Vista del versante in dissesto di Le Celle (San Leo, RN)*



*Figura 4.2 Vista dal basso del movimento franoso del Maggio 2009 (relazione geologica 2009)*

## 4.1. Aspetti geologici

La struttura geologica del territorio di San Leo è strettamente correlata ai processi che hanno prodotto il sollevamento e migrazione verso nord-est dell'Appennino settentrionale. Alle tensioni orogenetiche compressive responsabili della progradazione di tutta la catena montuosa in senso adriatico si sono aggiunti ulteriori meccanismi di scomposizione tettonica intervenuti in fasi successive dove, a fenomeni di retro scorrimento (successione epiligure sui depositi pliocenici), si associano strutture derivate da una tettonica di distensione (dislocazioni dirette e zone collassate).

In sostanza lo schema tettonico dell'ambito territoriale che comprende l'area di studio può essere così sintetizzato (Figura 4.3, 4.4,4.5):

I depositi pliocenici affioranti alla base della parete rocciosa di C.Celle, sono sottoposti a sforzi di compressione dai fronti di sovrascorrimento delle unità liguri e dal fronte di retroscorrimento della successione epiligure con vettore di movimento orientato localmente verso ovest.

- Le Unità liguri, espresse nella zona dalle argille varicolori, evidenziano nelle aree di affioramento assetto generalmente sub-verticale derivato dalla prolungata azione delle spinte orogenetiche compressive che, in questi terreni, hanno agito per un tempo assai più lungo rispetto ai depositi sedimentati successivamente.
- I fronti di sovrascorrimento e retro scorrimento sono a luoghi interrotti e dislocati da faglie che esercitano anche effetto trascorrente. L'azione intensa degli eventi è riflessa nel territorio in esame da numerosi sistemi di fratture responsabili di produrre in maniera più sensibile negli affioramenti rocciosi a comportamento rigido corrispettive discontinuità strutturali.

Nell'area in esame si osservano diversi tipi di deposito quaternario di tipo continentale la cui formazione è dovuta alle spinte tettoniche descritte precedentemente.

Tra i più importanti si ricordano:

### **Deposito di frana in evoluzione per colamento**

Le superfici di taglio all'interno di questa sono multiple, temporanee e generalmente non vengono conservate. I materiali coinvolti sono per lo più coesivi. I depositi più frequenti sono

costituiti in prevalenza da una matrice pelitica e/o pelitico sabbiosa che include clasti di dimensione variabile.

#### **Deposito di frana attiva per scivolamento**

Deposito originato dal movimento verso la base del versante di una massa di terra o roccia, che avviene in gran parte lungo una superficie di rottura sottile di intensa deformazione di taglio.

#### **Deposito di frana attiva complessa**

Deposito messo in posto da una combinazione di due o più tipi di movimento. Nel territorio in esame, la frana complessa cartografata si riferisce al crollo di roccia dalla parete settentrionale di San Leo che, impattando violentemente sulle argille basali ne ha sollecitato la mobilitazione.

#### **Deposito di frana quiescente per scivolamento**

Deposito originato da meccanismi analoghi a quelli descritti per fenomeni di scivolamento attivi in un contesto in cui le frane quiescenti tendono ad essere riattivate dalle masse di terreno giunte a causa di episodi di frane in evoluzione.

#### **Deposito eluvio-colluviale**

Coltre di materiale detritico generalmente fine (sabbie, limi e peliti) prodotto da alterazione in situ o selezionato dall'azione mista delle acque di ruscellamento e della gravità.

#### **Detrito di falda**

Accumulo detritico costituito da materiale litoide eterometrico, con frammenti litoidi di dimensione variabile tra qualche cm<sup>3</sup> a qualche m<sup>3</sup>, privo di matrice o in matrice o in matrice sabbioso-pelitica alterata, di origine gravitativa frequentemente alla base di scarpate e lungo i versanti più acclivi.

I maggiori accumuli presenti nella zona si registrano alla base delle pareti della placca rocciosa di San Leo.

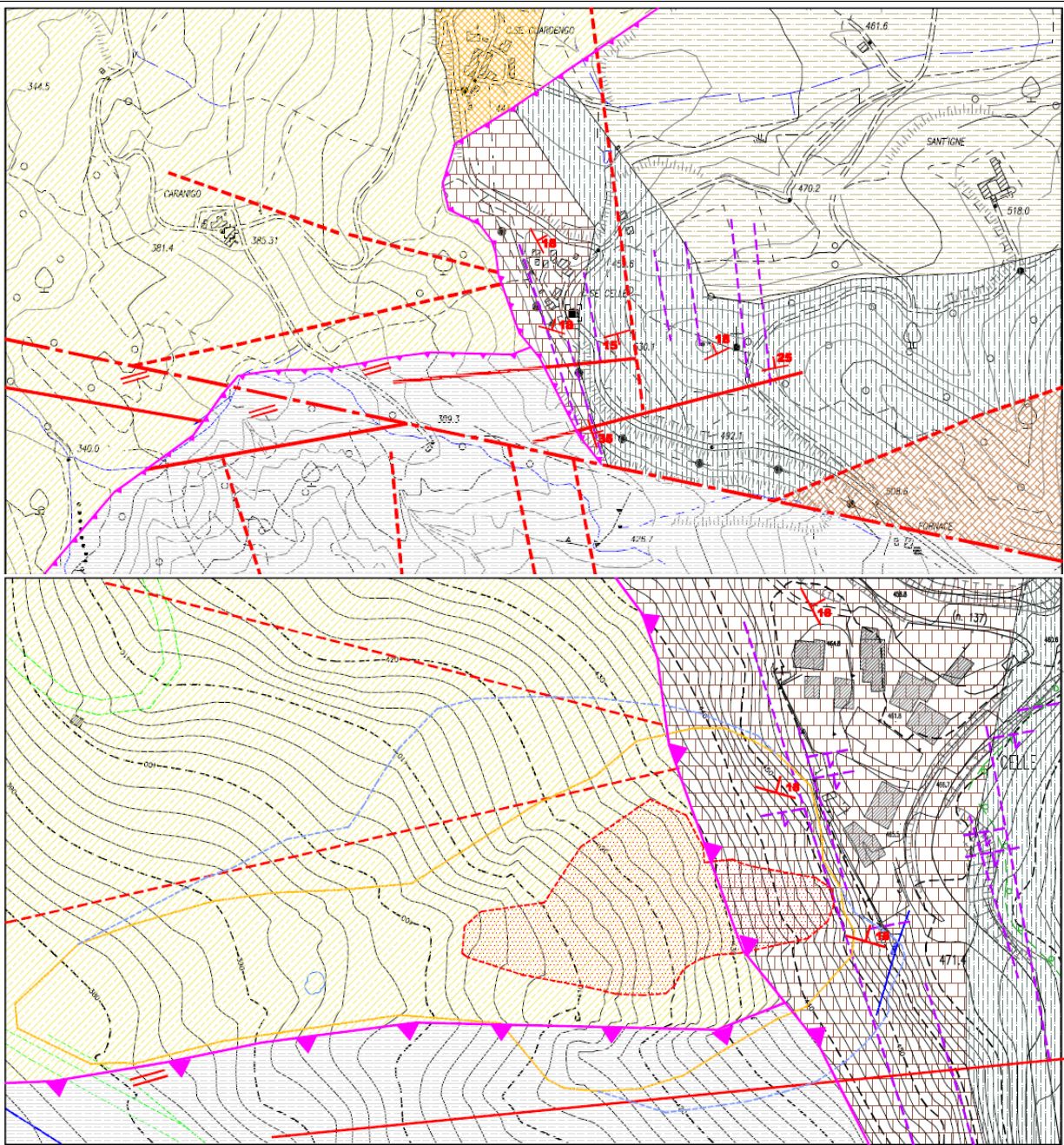


Figura 4.3, 4.4 Dettaglio carta geologica di Le Celle scala 1/5000, 1/1000 (relazione geologica)

## Legenda

- isopse principali (10m)
- isopse secondarie (2m)
- fossi
- carraie/piste interpoderali
- ristagni e acquitrini
- ▭ ambito dissesto attivo rilievo del 22/07/2009
- ▭ estensione ambito in dissesto attivo
- ▭ zona di potenziale evoluzione del dissesto
- faglie certe
- - - faglie presunte
- · - faglie trascorrenti
- ~ sovrascostimenti
- ~ principali sistemi di fratturazione e immersione
- 1 sistema "parietale" 180°N immersione WSW 50°
- 2 80°N immersione SSE 41°/50°

## Geologia

- ▭ FAA Formazione delle Argille Azzurre  
litofacies pelitico/arenacea membro 2a  
Pliocene Inf.–medio
- ▭ FAA Formazione delle Argille Azzurre  
litofacies arenacea membro 2b  
Pliocene Inf.–medio
- ▭ AQV Formazione di Acquaviva  
Tortoniano – Messiniano Inf.
- ▭ MFU2 Formazione di Monte Fumaio  
Membro della Vetta  
Burdigaliano sup.–Serravalliano
- ▭ MFU1 Formazione di Monte Fumaio  
Membro di Monte Aquilone  
Burdigaliano sup.–Serravalliano
- ▭ SMN Formazione di San Marino  
membro SMN1 membro di base  
Burdigaliano sup.–Langhiano inf.
- ▭ AVR Argille Varicolori  
Cretacico inf.–Eocene inf.
- 18 Giacitura, direzione e immersione degli strati

Figura 4.5 legenda della figura 4.3, 4.4 (Relazione geologica, 2009)

Dal punto di vista geologico-stratigrafico l'area è caratterizzata da una serie di formazioni tipiche del territorio della Valmarecchia, di cui si può vedere l'ubicazione in pianta in figura 4.3, 4.4, e che si trovano descritte al seguito.

### Depositi pliocenici intrappenninici

#### Argille azzurre

Argille, argille marnose, localmente siltose, marne argillose e siltose, grigie e grigio-azzurre, talora grigio plumbeo, a stratificazione mal distinguibile per bioturbazione; locali intercalazioni di sabbie fini in strati sottili e medi.

Nella parte inferiore della formazione localmente sono presenti sottili livelli discontinui di biocalcareni fini e siltiti, giallo, o ocra se alterate, sottilmente laminate. Frequenti microfossili; l'ambiente di sedimentazione varia da piattaforma, localmente litorale a scarpata.

#### Litofacies pelitico arenacea

Prevalenti argille ed argille marnose grigio-azzurre, siltose fossilifere, in strati sottili e molto sottili, con sottilissimi livelli di sabbie fini, intensamente bioturbate; rari intervalli pelitico-arenacei, con arenarie giallastre, molto sottili. Argille marnose, siltose e sabbiose; arenarie grigie, giallastre se alterate, poco cementate, in strati sottili e medi, con abbondanti biosomi e bioclasti grossolani; saltuarie calcareniti con clasti quarzosi e argille marnose, siltose e sabbiose; presenti strati con abbondanti microfossili e minor contenuto in sabbia e silt.

#### Litofacies arenacea



Arenarie in strati da spessi a molto spessi con livelli di tritume conchigliare e nuclei a maggiore cementazione o corpi arenacei lenticolari intercalati alle argille, costituiti da arenarie a granulometria da medio-fine a medio grossolana di colore giallastro.

### **Successione epiligure**

#### **Formazione di Acquaviva**

Questa formazione marca in Valmarecchia la ripresa di sedimentazione dopo la lacuna avvenuta nel Tortoniano. E' caratterizzata da potenti banchi di conglomerato, passanti lateralmente e verso l'alto ad arenarie giallastre poco cementate. Nella parte inferiore possono essere presenti intercalazioni di argille sabbiose talora con lenti di lignite.

#### **Formazione di monte Fumaiolo**

Arenarie ibride grigio giallastre non gradate a stratificazione medio-sottile talora con megaripples. Alternanza di pacchi di strati medi e spessi di arenarie silicoclastiche con significative componenti di allocasti carbonatici a granuli verdi e masse sabbiose bioturbate in cui non è raro rinvenire gusci di bivalvi o frammenti di questi. L'organizzazione interna dei livelli arenitici è data da gradazione e laminazione piano parallela.

#### **Membro della vetta**

Alternanza di strati medi e spessi di arenarie ibride con granuli carbonatici e verdi (glauconite) e di marne sabbiose bioturbate con gusci integri o in frammenti di bivalvi. La stratificazione è netta e regolare con laminazione incrociata a basso angolo.

#### **Membro di monte aquilone**

Banchi e strati amalgamati di arenarie miste con glauconite e calcari arenacei a stratificazione piano-parallela e incrociata a basso angolo con intercalazioni di marne sabbiose bioturbate e fossilifere.

#### **Formazione di San Marino**

I caratteri lito- paleontologici, accreditano l'attribuzione di questi depositi alla parte antistante di una piattaforma carbonatica, dove ad un'iniziale tendenza trasgressiva ne fa seguito una regressiva. La formazione è caratterizzata alla base da depositi di mare molto basso: biocalciruditi con briozoi, coralli, echinidi, bivalvi, poi nella parte mediana sopraggiungono calcari organogeni massicci e verso l'alto calcareniti con stratificazione obliqua e struttura ad onde.

### **Unità liguri**

#### **Argille varicolori**

E' una formazione litologicamente molto eterogenea, costituita in prevalenza dall'alternanza ripetuta di strati o lembi di argille policrome; si intercalano strati di marne, siltiti

manganesifere e in via subordinata intervengono anche torbiditi pelitico arenacee e calcari marnosi, mentre più frequenti sono le intercalazioni lentiformi di marne concoidi grigio-chiare o biancastre. Questa unità si presenta molto deformata e spesso intensamente rimaneggiata. Lo spessore delle argille Varicolori è difficilmente valutabile a causa dell'intensa tettonizzazione, tendenzialmente in aumento verso le porzioni più nord-orientali della Coltre della Valmarecchia dove è stimabile in circa 600-700 metri.

L'età di queste argille è riferibile ad un ampio intervallo cronologico che, come segnalato da numerosi autori è compreso tra l'Aptiano e l'eocene inferiore. Localmente costituiscono la base di imposta della placca rocciosa di San Leo e di gran parte del contermino arco epiligure.

## **4.2. Rilievo geologico e geomorfologico**

Con il termine “natura del substrato roccioso” si suole indicare tutte le caratteristiche salienti che contraddistinguono i vari litotipi. La natura della composizione mineralogica e le caratteristiche fisico chimiche non sono infatti sufficienti alla definizione dei requisiti meccanici dell'ammasso roccioso che possono essere anche molto differenti da quelli della roccia intatta (Bruschi, 2004).

Sul versante di Le Celle, al fine di formulare un attendibile modello dello scenario di instabilità in atto si è svolto un rilevamento geologico e geomorfologico di dettaglio, con particolare riferimento allo stato di fatturazione della parete rocciosa sovrapposta ai dissesti e all'analisi dei processi di mobilizzazione lungo il versante.

Si sono indagate soprattutto le famiglie di fratture principali visibili negli affioramenti rocciosi (figura 4.3) sottostanti i fabbricati e parzialmente alterate dagli agenti atmosferici, ma comunque significative al fine di analizzare i fenomeni di distacco che interessano tutta la parte alta del pendio.



*Figura 4.6 Fotografia di un affioramento roccioso della scarpata di Le Celle*

In generale esistono molti tipi di fratture che possono essere divise in una serie di tipologie ricorrenti:

- Piano di stratificazione; le rocce sedimentarie si depositano in strati che conservano la forma tabulare e possono costituire superfici di debolezza.
- Foliazione; struttura planare formatasi in seguito all'orientazione parallela di minerali tabulari all'interno del corpo roccioso.
- Giunti (o discontinuità); fratture che tagliano le rocce e in cui non sono riscontrabili movimenti relativi se non quelli che le hanno formate.
- Clivaggio; rappresenta un'evidenza diretta di un processo deformativo subito da un corpo roccioso costituito da strati a diversa competenza.
- Scistosità; si sviluppa attraverso un allineamento parallelo di minerali lamellari, generalmente miche. Può considerarsi una foliazione in rocce metamorfiche la cui tessitura è regolata dalla disposizione dei minerali.

Lo stato di fratturazione di un ammasso roccioso testimonia la storia deformativa del dominio strutturale a cui appartiene e la sua analisi ha come obiettivi principali tanto la ricostruzione

del processo de formativo quanto lo studio di stabilità dell'ammasso stesso somma del materiale roccia e dei piani di discontinuità (Bruschi,2004).

Dal momento che il comportamento di un corpo così identificato dipende dall'interazione di questi elementi, le analisi si dovranno concentrare sulla definizione e descrizione più quantitativa possibile delle caratteristiche della roccia e delle fessure presenti al fine di identificare zone omogenee.

Per l'elaborazione dei dati acquisiti in campagna e per l'identificazione delle famiglie di fratture principali si è utilizzato il programma Dips (Rocscience).

Dips è progettato per l'analisi interattiva dei dati geologici relativi alle direzioni delle discontinuità raccolti in campagna. Il programma è di semplice applicazione e, una volta compiuta la proiezione stereografica delle fratture osservate, consente l'utilizzo di strumenti avanzati per l'analisi dei dati.

Dall'indagine in parete dell'affioramento roccioso su cui è impostata la borgata C. Celle, si registrano due principali famiglie di fratture con ulteriori famiglie coniugate

- K1 (160° N) immersione WSW 50 gradi (sistema cosiddetto parietale);
- K2 (80°N) immersione SSE 41-50 gradi.

In rapporto agli angoli che si realizzano fra i principali sistemi di fratture e la loro emersione lungo le pareti perimetrali dell'affioramento roccioso di C. Celle, le potenziali geometrie di destabilizzazione per crollo assumono:

- a) Forme colonnari dove i sistemi di fratture si incrociano reciprocamente predisponendo, in relazione alla loro spaziatura, la destabilizzazione di masse di varie dimensioni.
- b) Forme tabulari prodotte dai crolli connessi al sistema di fratturazione orientato circa parallelamente alla parete (sistema parietale), con volumi di roccia mobilitabili corrispondenti alla spaziatura delle discontinuità.

Il maggiore rischio incombente è dato dalle fratture parietali specialmente lungo il ciglio della scarpata dove insistono alcuni fabbricati e in cui le fratture parietali risultano aperte e prefigurano una predisposizione al crollo/ribaltamento. Nonostante le destabilizzazioni per crollo del paramento roccioso non si siano verificate in misura significativa ciò non dispensa dal considerare la fascia di coronamento della scarpata rocciosa sottoposta alle abitazioni come ambito caratterizzato da stabilità alquanto precaria. La tendenza del pendio sembra lo porti a deteriorarsi ulteriormente per i processi di degradazione meteo-climatica e per lo scalzamento al piede prodotto dalla mobilitazione delle argille. Nell'analisi delle discontinuità effettuata con Dips emerge inoltre una terza famiglia di discontinuità di minore rilevanza ai fini delle geometrie dei distacchi di roccia in parete.

### 4.3. Risultati della campagna di indagini geognostiche del 2009

Allo scopo di assumere elementi conoscitivi sufficientemente attendibili per formulare la modellazione dello scenario di dissesto in evoluzione all'interno del bacino principale di frana attiva si sono eseguiti una investigazione geognostica tramite sondaggio a rotazione con carotaggio continuo e un'indagine geofisica con metodo sismico a rifrazione ad onde di pressione P.

#### 4.3.1. Prospezione geofisica

La finalità specifica della prospezione geofisica, è quella di ricostruire i livelli rifrangenti associati a interfacce tra materiali con caratteristiche di consistenza differenziata per lo studio dei terreni soggetti a movimenti gravitativi. L'elaborazione dei sismogrammi, ha consentito sia la ricostruzione dei profili rappresentanti i profili sismostratigrafici rappresentati da valori di velocità espressi in km/s , sia l'ubicazione dei fenomeni dislocativi.

L'investigazione geognostica, nel caso in esame, è servita soprattutto come taratura dell'indagine geofisica e per la identificazione del deposito formazionale costituente il substrato argilloso essendovi nel territorio diversi depositi formazionali e/o membri a prevalente composizione pelitica.

La prospezione geofisica ha consentito l'identificazione di massima della seguente successione sismo stratigrafica (Fig. 4.8):

- Velocità delle onde dirette, comprese tra 0.16 e 0.30 km/s, associabili a materiali incoerenti superficiali costituiti da argille sciolte con clasti calcarenitici; il valore di velocità sismica di 0.8 km/s, all'inizio della linea longitudinale al versante, è ascrivibile ad un livello superficiale di alterazione delle argille marnose sottostanti che lungo tale tratto di stendimento sono affioranti.
- Velocità rifratte variabili da 1.3 a 1.7 km/s, riconducibili a terreni argilloso-marnosi fratturati da mediamente consistenti a consistenti; le velocità basse caratterizzano lo spessore dei terreni franosi mentre quelle più alte, in condizioni di asciutto, si possono ritenere abbastanza stabili ma nel caso di infiltrazione di acqua piovana nelle fratture diventeranno anch'essi instabili e quindi potenzialmente franosi soprattutto nei tratti di versanti molto acclivi.

- Velocità sismiche rifratte passanti da 2.0 a 2.5 km/s ascrivibili a marna argillosa (substrato sismico locale) di discreta consistenza che aumenta con l'aumentare della profondità dal piano campagna.

Per ciò che riguarda la modalità di prova questa è stata realizzata utilizzando una massa battente rappresentata da un maglio di 10 kg che un operatore fa cadere da circa due metri su una piastra d'acciaio.

I geofoni da 10 hz (con asse strumentale verticale per la ricezione delle onde p) posizionati sul terreno ad intervalli di 5 e 10 metri in funzione del dettaglio richiesto, collegati tra loro da cavi elettrici e tramite questi al sismografo, sono stati disposti lungo tre linee: L (longitudinali al corpo di frana) T1 e T2 (trasversali alla frana) rappresentate in figura 4.4.

La lunghezza della linea longitudinale è di 235 m mentre le due linee trasversali misurano 115m con stendimenti di rispettivamente 48, 24, 24 geofoni, si realizzano scoppi ogni 3-4 geofoni.

Le posizioni di tutti i geofoni e i punti di scoppio sono stati rilevati e riportati in planimetria(Fig. 4.7).

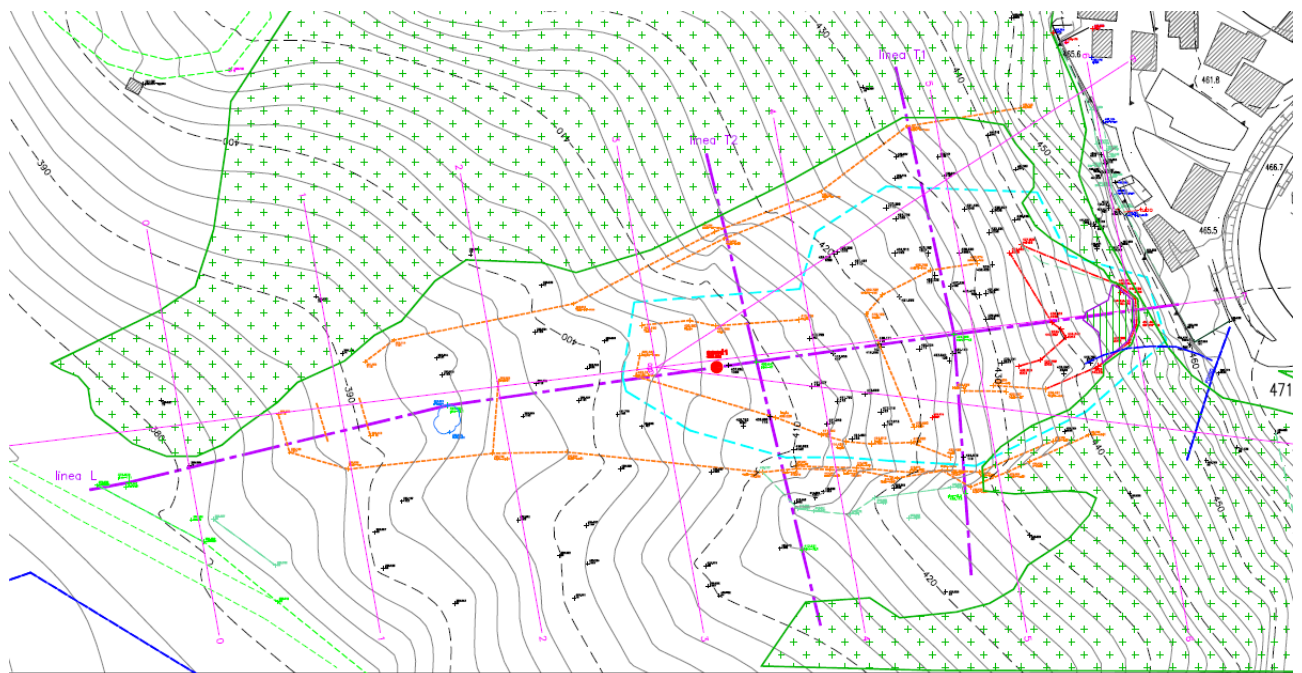


Figura 4.7 Linee sismiche riportate in pianta (relazione geologica 2009)

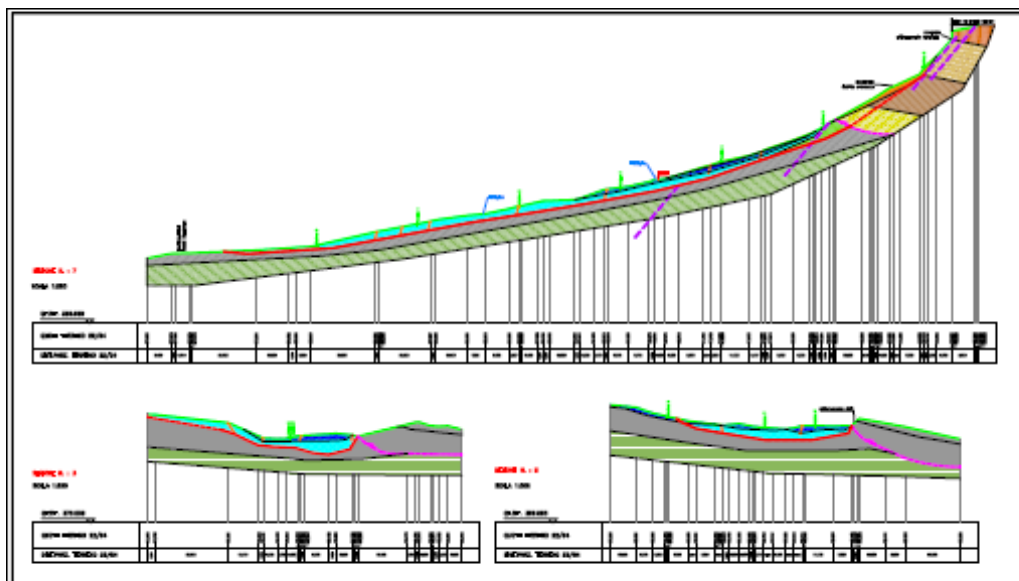


Figura 4.8 Sezioni geologiche ricostruite tramite sismica (relazione geologica)

Effettuata la taratura della strumentazione, si è proceduto alla prospezione sismica a rifrazione in modo tale che dopo ogni energizzazione (o somma di energizzazioni) su ciascun punto d'impatto prestabilito, si fosse acquisito e registrato il segnale su hard disk presente sul sismografo per la successiva elaborazione.

Inoltre è stato utilizzato un sensore piezoelettrico applicato all'apparato energizzatore, il quale costituisce il dispositivo di trigger per l'inizio della registrazione; tale segnale viene trasmesso tramite impulsi via cavo elettrico al sismografo.

I dati acquisiti, dopo amplificazione, conversione analogico/digitale e filtraggio, sono stati registrati nel supporto magnetico di cui è dotato il registratore di campagna.

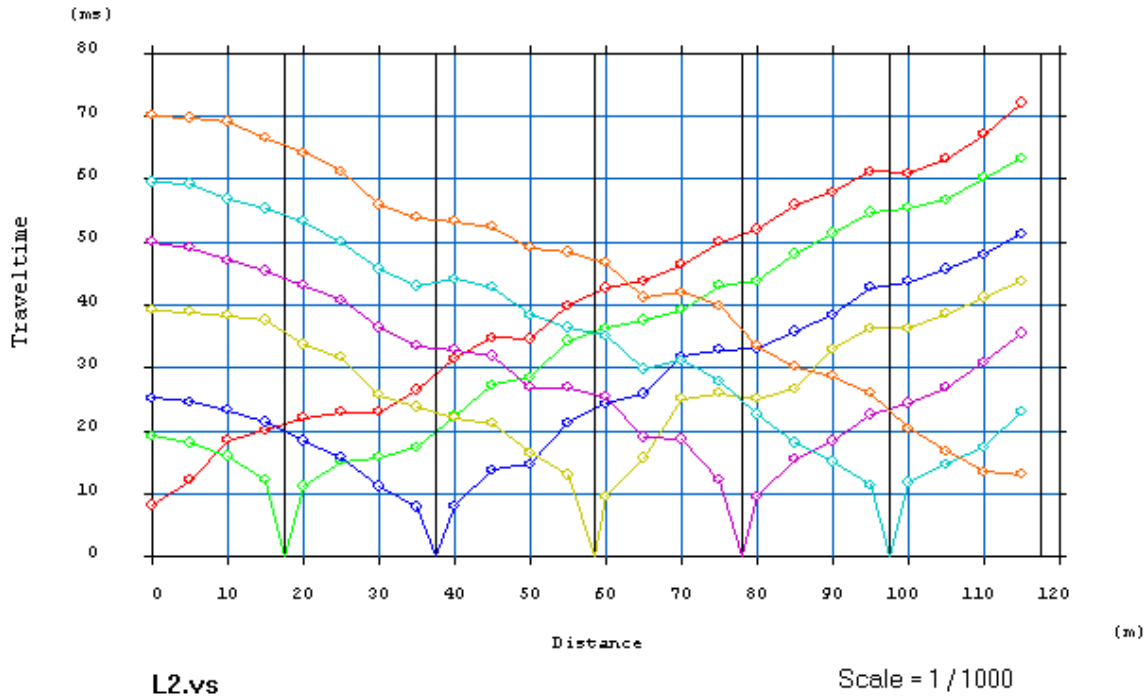


Figura 4.9 Risultati ottenuti dalla sismica T1 graficati (relazione geologica 2009)

La prima operazione eseguita, terminata la fase di acquisizione dati in campagna, è stata leggere su ciascuna traccia di ogni sismogramma il primo arrivo dell'onda di compressione (P) utilizzando un programma fornito dalla Seistronix. Di ogni file di dati acquisito in campagna è stato quindi creato un nuovo file con i tempi di arrivo in millesimi di secondo;

Tali dati sono stati poi graficizzati tramite AutoCAD per ottenere la rappresentazione delle linee interpolate Tempi-Distanze (Dromocrone) delle linee sismiche come documento della prospezione eseguita(Figura 4.9).

Le sezioni sismostratigrafiche riportano il profilo del terreno ottenuto mediante rilievo topografico e le discontinuità fisiche riscontrate all'interno dei mezzi attraversati con indicazione delle rispettive velocità di propagazione degli impulsi sismici, espresse in chilometri/secondo (Km/sec.).

La finalità della prospezione eseguita, consisteva essenzialmente nell'acquisire informazioni dettagliate e continue relative agli spessori sismici dei terreni presenti nell'area franosa in località C. Celle di San Leo.

La lunghezza dei singoli stendimenti e lo stato dei terreni investigati hanno consentito d'intercettare l'ultimo contrasto significativo delle velocità rifratte ad una profondità massima di circa 20 metri dal piano campagna sulla sezione dello stendimento realizzato



longitudinalmente al movimento franoso. L'indagine ha consentito, insieme alle altre indagini eseguite, di costruire un modello geologico coerente con la geologia dell'area.

I punti d'intersezione fra le linee e l'ubicazione del sondaggio geognostico S1, sono indicati sulle sismosezioni.

#### 4.3.2. Sondaggio meccanico a rotazione

Il sondaggio meccanico a rotazione con carotaggio continuo, eseguito in corrispondenza della sezione sismica trasversale T2, ha evidenziato uno spessore della copertura detritica di frana di circa 4 metri, sovrapposto a terreni del substrato argilloso pliocenico (Fig. 4.11).

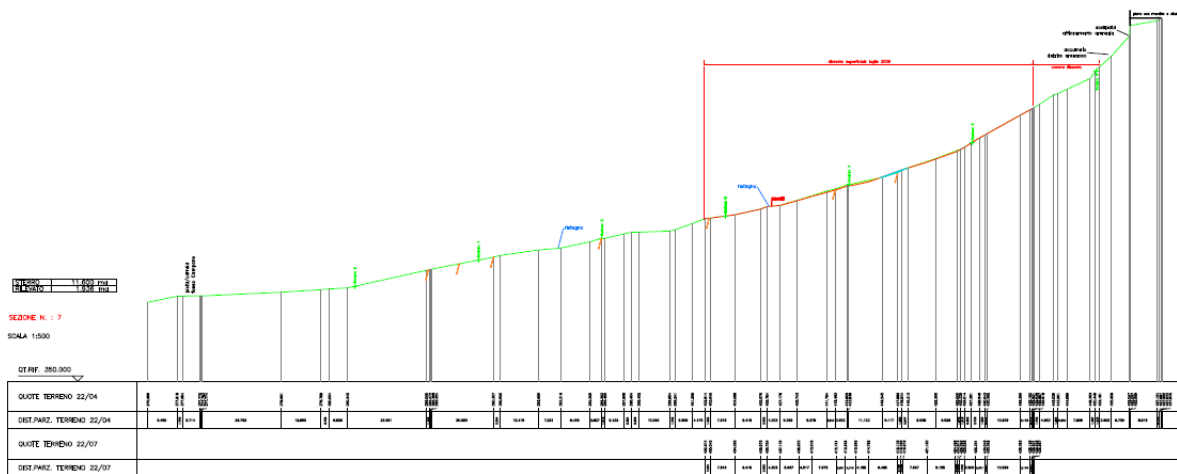
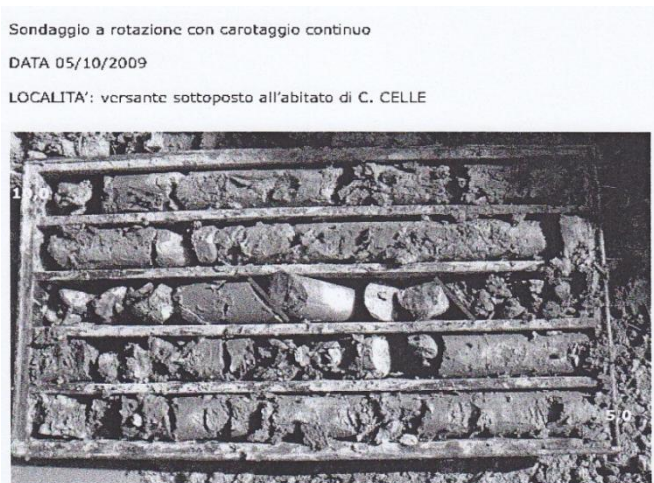


Figura 4.10 Sezione topografica del profilo della scarpata con indicata la posizione del sondaggio (reazione geologica)



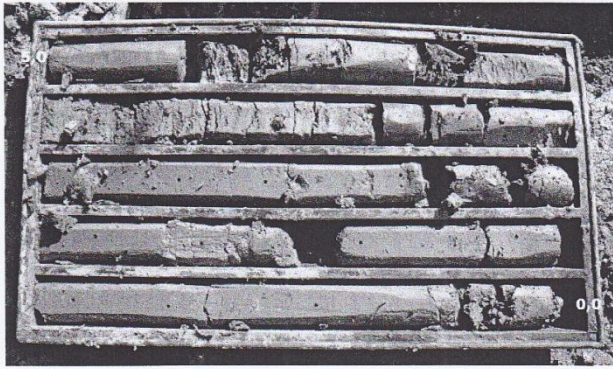


Figura 4.11 Scatole di sondaggio in località Le Celle 2009 (relazione geologica)

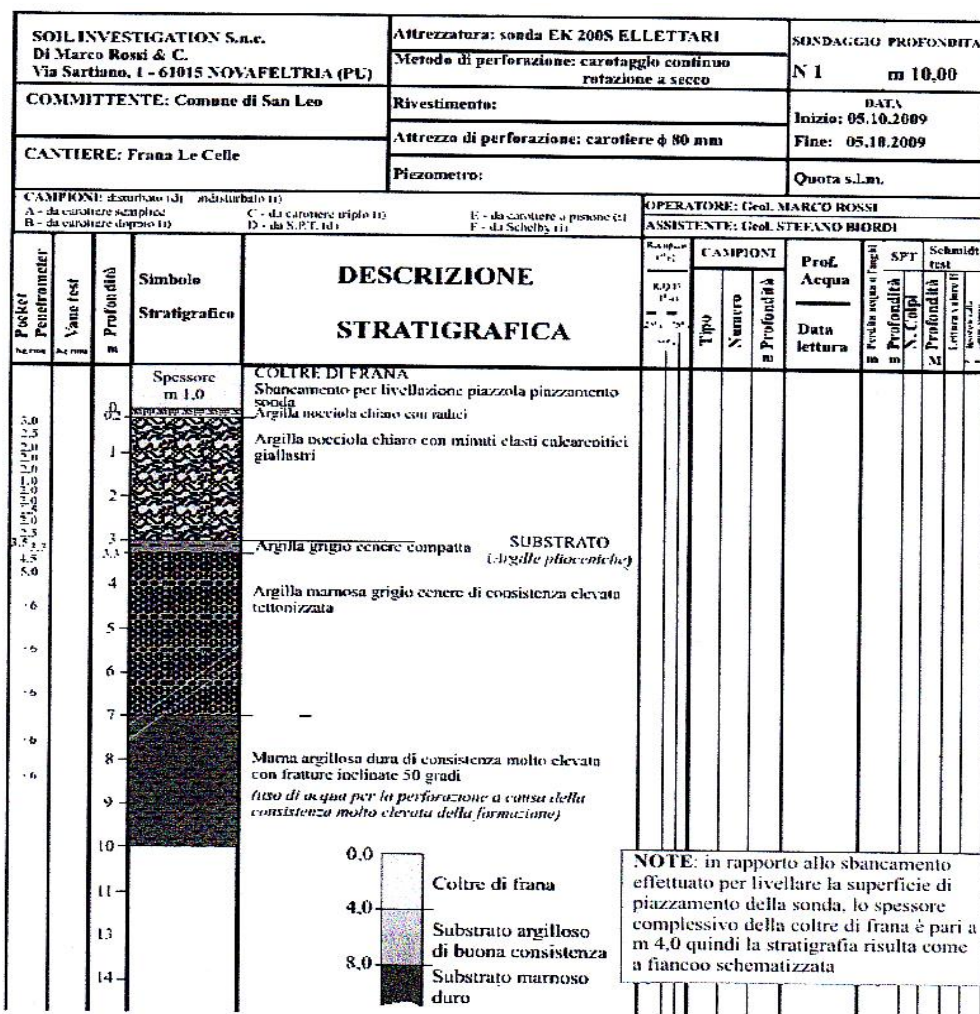


Figura 4.12 Descrizione del sondaggio in località Le Celle ( fonte relazione geologica 2009)

I terreni del substrato pliocenico nonostante una buona resistenza misurata con pocket penetrometro durante l'estrazione delle carote, sono caratterizzati da incipiente decompressione superficiale e tettonizzazione diffusa, con tendenza ad un progressivo incremento di consistenza da circa 8 metri di profondità dal piano campagna.

Inoltre tra 7.25 e 7.60 metri di profondità si sono evidenziate nelle carote estratte superfici di taglio nette di 50° che superiormente si risolvono in orizzonti intensamente tettonizzati (struttura scagliosa).

#### **4.4. Sondaggi in situ (febbraio 2011)**

A causa dell'incremento delle deformazioni e dell'erosione nei pressi dei fabbricati nella borgata di "Le Celle" si è realizzata una nuova campagna di sondaggi in situ consistente in:

- un carotaggio continuo a rotazione fino alla profondità di 30 metri dal piano campagna realizzato nel vialetto antistante i fabbricati verso il versante in dissesto;
- il posizionamento di un tubo inclinometrico nel foro del carotaggio con orientazione della guida principale in direzione del pendio;
- un rilievo in parete per determinare apertura, inclinazione, grado di riempimento e distanza tra le fratture

Per la perforazione del sondaggio si è utilizzato il carotiere semplice nei primi tre metri di profondità per poi passare al carotiere doppio che possiamo vedere nella figura sottostante. Nella parte di perforazione che ha interessato la roccia più dura la corona tagliente in widia è stata sostituita da una corona diamantata che risulta più resistente e garantisce un avanzamento più rapido in roccia dura. Al contrario la corona diamantata risulta più delicata e fragile di quella in widia nel caso di carotaggio secco o dispersione del fluido di perforazione e quindi sarebbe meglio non utilizzarla in rocce intensamente fratturate o con ampie fratture aperte.



*Figura 4.13 Corone taglienti in widia (relazione geologica 2009)*

Dopo i primi 15 m di perforazione si è inserito un tubo di rivestimento con lo scopo di prevenire eventuali crolli delle pareti e di facilitare le manovre di inserimento ed estrazione del carotiere. Nella tabella sottostante si possono osservare i risultati del carotaggio sintetizzati.

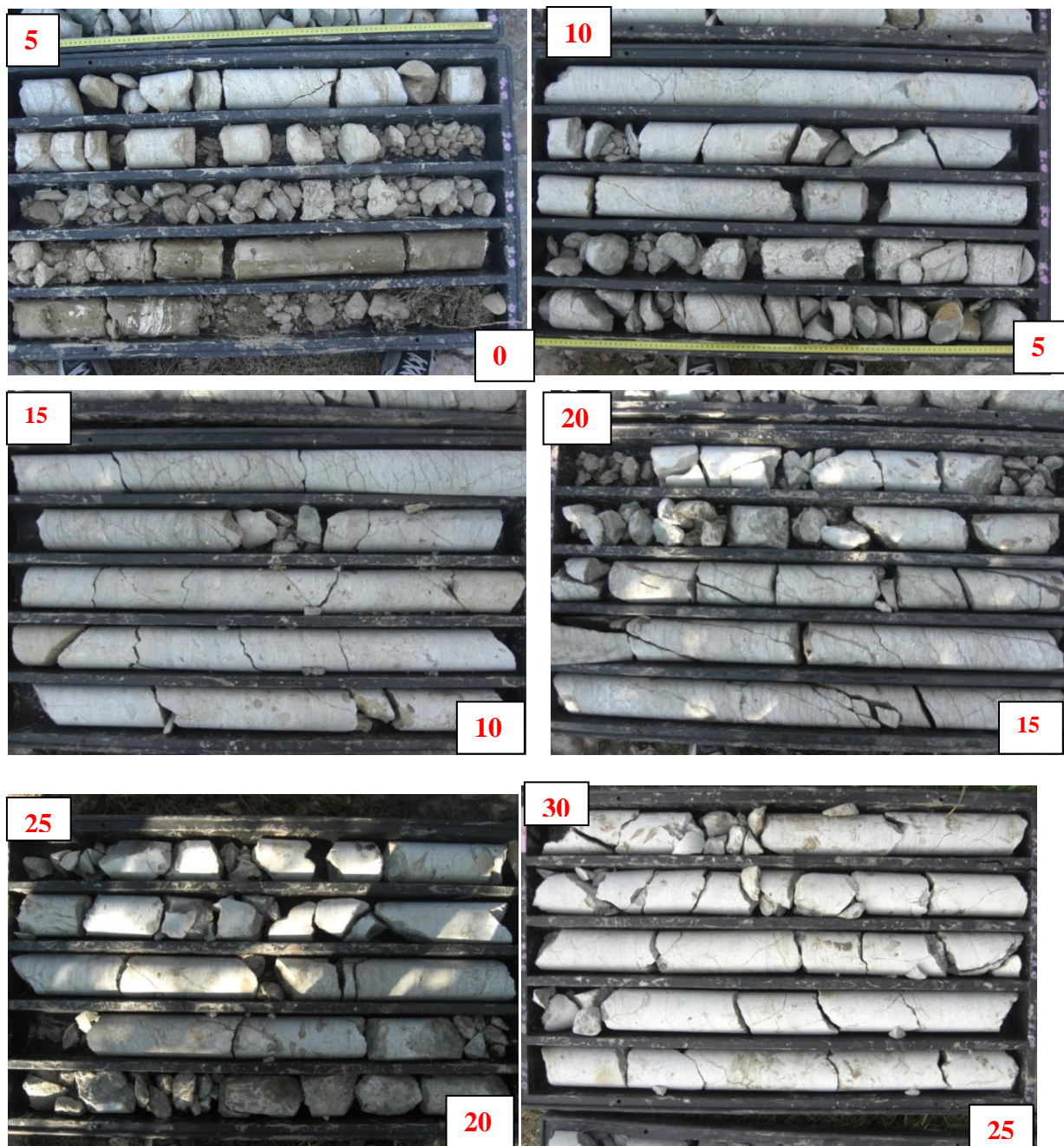


Figura 4.14 Carote estratte nel sondaggio a Le Celle (zona fabbricati) Febbraio 2011

Tabella 4.15 Descrizione delle carote estratte e stima RQD

Distanza dal piano campagna (m)	Indice RQD	Descrizione delle carote
0-1	Non disponibile	Terreno di riporto fino a 0.65m con resti vegetali e laterizi, 0.65-1.7m limo-argilloso nocciola passante a limo
1-2	Non disponibile	

		sabbioso fine, da 1.7-2m sabbioso fine
2-3	Non disponibile	2.0-3.2 ciottoli di calcarenite in matrice limosa nocciola, con matrice asportata nel corso del carotaggio
3-4	10+14= 24	3.2-5m Colore bianco con patina di ossidazione rossastra nelle fratture
4-5	12+11+20+14= 57	
5-6	16+12= 28	5-6.15colore alterato, patina
6-7	11+20=31	6.15-7 breccia con cemento calcareo, inclusi fini argillitici
7-8	28+11+40+11= 90	Nuova facies non più calcarenitica ma più calcarea, calcari laminati fino alla quota di massima di sondaggio
8-9	16+14+17+13= 60	
9-10	100	
10-11	21+35+21= 77	
11-12	32+18+20+13+10= 93	
12-13	13+23+26+18+14= 94	
13-14	25+39= 64	
14-15	100	
15-16	100	
16-17	100	
17-18	20+13+19+14+15= 81	
18-19	17+20+12= 49	
19-20	12+11+13+16= 52	
20-21	17+10+14+10= 51	
21-22	20+25+29= 74	
22-23	32+10+25+20= 87	
23-24	25+10+13+11= 59	
24-25	20+10+10+10+14= 64	
25-26	100	
26-27	100	
27-28	20+18+16+26= 80	
28-29	13+11+11+11+14+19= 79	
29-30	25+26+15= 66	

Tabella 4.16 Analisi dei piani di frattura e della loro inclinazione

<b>Distanza dal piano campagna (m)</b>	<b>Fratture e piani che si individuano nelle carote</b>	<b>Materiale di riempimento</b>
4-5	4.4m(65°) 4.95(70°)	Argilloso ossidato
5-6	5.02(15°) 5.60(30°)	Prelievo campione(5.4-5.6)
6-7	6.2(75°)	Poco alterata
7-8	7.7(65°)	Frattura aperta
8-9	8.1(45°) 8.15(35°) 8.25(60°) 8.45(30°)	
9-10	9.2(60°) 9.9(55°)	
10-11	10.2(30°) 10.5(55°) 10.8(55°)	Frattura aperta
11-12	11.0(45°) 11.80(70°+40°)	Fratture ossidate
12-13	12.15(48°) 12.45(32°) 12.55(27°) 12.75(60°)	
13-14	13.7(56°) 13.8(35°)	
14-15	14.20,14.30(55°) 14.65(55°)	L'ultima in direzione opposta. Prelievo campione (14.40-14.75)
15-16	15.0(30°) 15.4,15.45,15.8(65°)	15.4 molto alterata, le altre chiuse
16-17	16.2(75°) 16.6(67°) 16.8(60°)	Fratture chiuse con riempimento fino a 2mm
17-18	17.1(76°) 17.4,17.6,17.75(70°)	Riempimento spesso circa 2mm argilla scura
18-19	18.2(62°) 18.4(55°) 18.6(65°)	
19-20	19.95(78°)	Riempimento grigio scuro
20-21	20.55(60°)	
21-22	21.4(70°) 21.65(60°)	
22-23	22.15(55°) 22.55(38°) 22.8(50°)	
23-24	23.35(60°)	
24-25	24.1(45°) 24.3(35°)24.65(50°) 24.70(75°) 24.95(52°)	
25-26	25.1(65°) 25.25(40°) 25.3(35°) 25.45(40°+55°) 25.8(70°) 25.95(55°)	25.8, 25.95 fratture chiuse

26-27	26.2(37°) 26.35(50°) 26.4(40°) 26.6(30°+60°)	
27-28	27.1(65°) 27.3(65°) 27.5(35°) 27.6(55°) 27.65(50°)	
28-29	28.1(60°+40°) 28.25(40°+65°) 28.95(60°)	
29-30	29.15, 29.25, 29.3, 29.4(50°+75°) 29.55(60°) 30.0(65°)	Fatturazione chiusa e incrociata 30.0 aperta

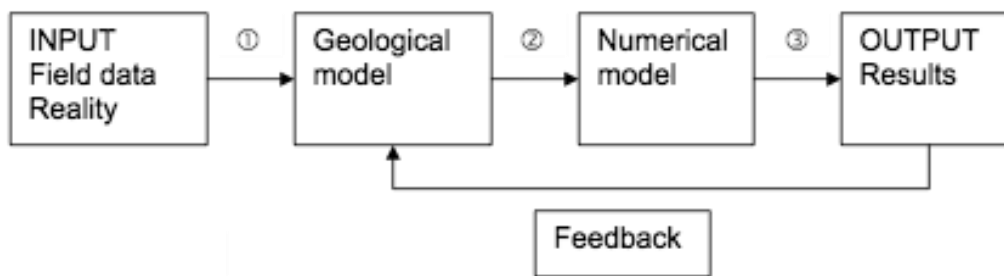
## 5. Modellazione numerica

### 5.1. Generalità

Il significato della parola “modellazione” non è univoco, ma presenta accezioni diverse anche per figure professionali coinvolte in questo processo. Infatti, se per un geologo possono risultare più interessanti gli aspetti riguardanti i processi tettonici e geomorfologici, le unità strutturali e l’origine della catena montuosa etc. un esperto di metodi numerici si concentrerà sulla discretizzazione della geometria del corpo, sulle sue proprietà meccaniche e sulle condizioni iniziali e al contorno.

Entrambi gli aspetti sono necessari per arrivare alla creazione di un modello che aiuti l’interpretazione e la predizione del comportamento di un ammasso roccioso. L’applicazione di un modello allo studio del comportamento di un determinato fenomeno franoso dipende soprattutto dalle caratteristiche dello stesso: è difficile ottenere procedure che si adattino a tutte le situazioni, ma si possono comunque utilizzare delle regole generali, adattando poi ogni passaggio al caso in esame. In figura 5.1 sono rappresentate le varie fasi che scandiscono la costruzione di un modello numerico.





*Figura 5.1 Schema del processo di modellamento*

Ognuna di queste fasi può introdurre errori che vanno a modificare il risultato finale: è quindi molto importante che tutto il lavoro sia eseguito in maniera critica e anche i risultati finali siano esaminati con questo punto di vista. Si possono identificare tre diversi processi (Imiriland Project, Guidelines on the use of numerical methods for the prediction of failure, 2004), che saranno descritti nei paragrafi seguenti:

1. dalla realtà al modello geologico;
2. dal modello geologico al modello numerico
3. dal modello numerico ai risultati.

## **5.2. Dalla realtà al modello geologico**

Questo processo richiede la comprensione dei meccanismi agenti a un livello globale e cerca di riprodurne i comportamenti in un modello geologico.

La prima fase consiste prevalentemente nella raccolta dei dati necessari a una descrizione della realtà la più completa possibile; ciò viene effettuato soprattutto mediante rilevamento di campagna insieme all'utilizzo di diversi metodi di indagine geognostica o telerilevamento, come GPS, interferometria radar, prospezioni e sondaggi.

Il rilevamento delle caratteristiche geomorfologiche e dei corpi franosi e la loro interpretazione in termini di strutture deformative superficiali sono generalmente ritenuti molto utili per comprendere la possibile evoluzione dei fenomeni gravitativi e per valutare il grado di instabilità dei versanti (Giardino, 1996).

Lo scopo di questo lavoro consiste nell'identificazione della geometria, sia superficiale che profonda, e della struttura dell'ammasso roccioso; inoltre sarebbe utile arrivare a una caratterizzazione dei materiali e alla definizione delle loro proprietà.

Il primo processo è sicuramente una delle maggiori fonti di errori, sia per l'approssimazione che possiamo trovare nella definizione di alcuni dei dati, sia perché non sempre è possibile ottenere tutti gli elementi che sarebbero necessari per la creazione del modello. Questo può essere dovuto sia alla mancanza di fondi, sia all'impossibilità nell'utilizzo di alcuni strumenti, sia alle caratteristiche del fenomeno, che a volte impediscono fisicamente lo svolgimento di determinate indagini.

Risulta chiaro che il modello è una semplificazione della realtà, che si basa su ipotesi, soprattutto se i dati non sono completi, e che comunque non può riflettere fedelmente tutte le caratteristiche del corpo di frana, ad esempio sarà necessario fare delle supposizioni sui comportamenti in profondità e sui meccanismi agenti.

Si parte quindi dalla realtà per arrivare a un modello che comunque risulta essere qualitativo, ma che deve contenere tutti gli elementi necessari alla caratterizzazione dell'area. Il risultato ottenuto viene usato per implementare il modello numerico, è quindi importante che, chi ha lavorato sul modello geologico fornisca delle indicazioni sul comportamento, sulle possibili cause di instabilità e sui fattori predisponenti e innescanti del movimento.

In molti casi è presente un meccanismo prevalente che condiziona il comportamento del fenomeno franoso, e su cui il modello numerico dovrebbe quindi concentrarsi. Infatti, è importante ricordare che il modello numerico non è in grado di tenere in considerazione tutti i diversi aspetti che possono essere inseriti nel modello geologico (discontinuità, infiltrazioni, risposta sismica etc.); è necessario quindi focalizzare l'attenzione sul meccanismo considerato principale e tralasciare quegli aspetti che non condizionano in maniera sensibile il comportamento del fenomeno in esame.

### **5.3. Dal modello geologico al modello numerico**

Lo studio tecnico di un versante non può tralasciare l'analisi, in termini numerici, della probabilità di innesco di un possibile movimento su porzioni di esso o sull'intero pendio.

Questo passaggio che termina con la costruzione del modello numerico coinvolge almeno due figure professionali, il geologo e l'esperto di metodi numerici; risulta molto importante la comunicazione tra questi, che deve essere diretta e collaborativa, così da arrivare a un prodotto che si basi sulle caratteristiche peculiari del modello geologico. Come già accennato nel paragrafo precedente, non è possibile inserire tutti gli aspetti caratterizzanti la geologia del versante nel modello matematico: è necessario operare delle scelte e privilegiare quei

meccanismi che, secondo lo studio effettuato per la creazione del modello geologico, vanno ad influenzare il comportamento del fenomeno in misura maggiore.

In questa fase potrebbe risultare necessario lo svolgimento di esperimenti di laboratorio, utili ad integrare i dati disponibili e ad arrivare ad una migliore caratterizzazione del materiale e delle sue proprietà; in questo caso una particolare attenzione dovrà essere posta nell'individuazione degli eventuali effetti di scala che potrebbero indurre a un'erronea determinazione dei parametri, infatti non è detto che un provino di dimensioni ridotte stesso sia rappresentativo del comportamento della roccia in posto.

Diversi autori (Jing e Hudson, 2002; Carter et al., 2000; Zaman et al., 2000; Stead et al., 2001) hanno riconosciuto e catalogato gli approcci che possono essere utilizzati per la creazione di un modello numerico, alcuni semplificativi e schematici, altri più complessi.

Generalmente, per l'analisi dei fenomeni franosi, si utilizzano modelli che cercano di catturare il meccanismo che caratterizza maggiormente il processo in questione, oppure viene costruito un modello onnicomprensivo, anche se ciò risulta naturalmente più oneroso e spesso non determina un significativo miglioramento dei risultati.

In alcuni casi sarebbe utile, prima di arrivare allo sviluppo di questi sistemi, svolgere delle analisi preliminari utilizzando un approccio basato su programmi meno elaborati, che si basano su esperienze precedenti o su modelli semplificati.

Sono possibili diverse classificazioni dei modelli esistenti, innanzitutto in base alla discretizzazione dello spazio che utilizzano.

Possono essere suddivisi in:

- **Metodi continui** (per esempio agli elementi finiti, alla differenze finite etc.). Sono basati sulla discretizzazione delle equazioni di equilibrio e risultano particolarmente adatti a quelle situazioni in cui la rottura avviene in rocce deboli o altamente fratturate ed è controllata da deformazioni che avvengono in materiale intatto o secondo un numero ristretto di discontinuità. **Metodi discreti** (analisi delle deformazioni discontinue, elementi distinti etc.). Quando il versante comprende famiglie di fratture che ne controllano il meccanismo di rottura, è consigliato l'utilizzo di questo tipo di modelli, che prestano una particolare attenzione al ruolo giocato dalle discontinuità. L'idea di base consiste nel considerare l'area di interesse come un insieme **di blocchi o particelle** rigidi, che muovendosi entrano in contatto tra di loro, sviluppando reazioni che vengono aggiornate durante il processo e che determinano il comportamento dell'ammasso roccioso (Itasca, 2004).

**Recenti sviluppi** permettono di effettuare, sia nei modelli continui che discreti, simulazioni complesse che tengono in considerazione anche: fenomeni quali l'accoppiamento idromeccanico, criteri costitutivi del materiale definiti dall'utente consentendo poi lo svolgimento di analisi dinamiche (Stead et al., 2005).

Nonostante l'introduzione di questi miglioramenti, è possibile che **questi modelli** non riescano a simulare correttamente i fenomeni di rottura progressiva di un versante e, in particolare, la dinamica delle complesse distorsioni interne, della dilatazione e della fratturazione (Stead et al., 2006).

Per questo può risultare utile l'utilizzo di codici più complessi, i codici ibridi, che combinano i vantaggi delle tecniche continue e discontinue per la modellazione dei comportamenti delle rocce.

Questi codici sono, ad esempio, in grado di riprodurre la formazione e la propagazione di fratture, inoltre mostrano un interessante potenziale nella descrizione di particolari fenomeni, come i collassi provocati da fenomeni di piping o l'influenza della pressione idrostatica sull'instabilità di alcune tipologie di versanti.

Sono stati sviluppati codici con la capacità di effettuare una ridefinizione della griglia a seconda della situazione, ovvero codici che usano una griglia di elementi finiti per rappresentare sia l'ammasso roccioso che singoli blocchi delimitati da discontinuità, accoppiata con un modello agli elementi discreti capace di riprodurre le deformazioni che coinvolgono le discontinuità. Se il carico applicato è maggiore di quello limite di rottura nel modello a elementi finiti si genera una frattura, la ridefinizione della griglia permette la propagazione della frattura attraverso gli elementi della griglia stessa (Stead et al., 2001).

Un movimento franoso può essere descritto in tre fasi (Hungri, 2008):

- **instabilità**, quando una porzione di un versante stabile inizia a distaccarsi dal materiale confinante;
- **distacco**, quando il volume instabile si separa dal resto dell'ammasso roccioso, con un'accelerazione. In questa fase sono possibili meccanismi di frammentazione e liquefazione;
- **propagazione**, in cui il volume instabile si muove dall'area di distacco all'area di deposizione. Durante questa fase il materiale può rimanere coerente, scivolando su una discontinuità basale, o, più comunemente, frammentarsi e mescolarsi.

Teoricamente i modelli numerici sono in grado di simulare tutte le fasi, anche se in realtà il distacco non sempre viene modellato.

Infatti questa fase di disintegrazione di una massa coerente in un insieme di frammenti di roccia è ancora poco compresa e i vari meccanismi che la compongono sono difficili da prevedere quantitativamente.

I modelli numerici d'innescò, invece, vengono usati nel tentativo di determinare, sulla base di elementi geomeccanici, la probabilità di accadimento di una frana.

I modelli di propagazione si occupano dell'individuazione, per un dato volume di materiale mobilizzato, delle aree coinvolte dalla propagazione del materiale e dell'intensità associata a tale propagazione.

Questi modelli possono essere usati per simulare sia le traiettorie di singoli massi sia i comportamenti di fenomeni complessi e ampi.

Per quanto riguarda i modelli d'innescò, nella quasi totalità dei casi, la probabilità di rottura nel tempo di un versante non può essere determinata; può essere numericamente calcolata solo una probabilità non temporale, si veda, per esempio, Einstein (1988) e Scavia et al. (1990). La valutazione di questa probabilità risulta ancora più complessa nel caso di grandi frane, aumentando il numero di parametri geometrici e meccanici e la loro variabilità spaziale e temporale.

Nella preparazione del modello, è necessario definire l'ambito in cui operare (modelli 2D o 3D) e scegliere l'approccio metodologico più consono (mezzo discontinuo o mezzo continuo equivalente).

Le analisi riguardanti l'innescò del fenomeno risultano, nella maggior parte dei casi, finalizzate alla ricerca del fattore di sicurezza di un determinato pendio e alla stima della probabile superficie di rottura.

Generalmente tutti i modelli che si occupano dell'analisi della fase di innescò del fenomeno si basano sulla teoria dell'equilibrio limite, qui di seguito illustrata.

Il metodo dell'equilibrio limite è di gran lunga il metodo di analisi di stabilità più utilizzato in campo geologico-tecnico.

In generale, il calcolo di una soluzione all'equilibrio limite si svolge 3 fasi:

1. Si individua un meccanismo arbitrario di collasso del versante e si traccia una superficie di scorrimento di tentativo; essa può consistere di una qualsiasi combinazione di linee rette o curve assemblate tra loro in modo da riprodurre il meccanismo di rottura ipotizzato.
2. Si calcola l'equilibrio statico della massa risolvendo le forze o i momenti e calcolando la resistenza mobilizzata lungo la superficie predefinita.
3. Si esamina l'equilibrio statico rispetto ad un'altra superficie fino a trovare il cinematismo critico per il problema in esame.

In pratica, il metodo consiste nel calcolo delle forze agenti lungo una superficie di scorrimento predefinita e delle resistenze disponibili lungo la stessa superficie. La condizione di equilibrio limite è verificata quando le forze agenti uguagliano quelle resistenti: in questo caso lo stato tensionale medio lungo la superficie di scorrimento giace sull'involuppo di rottura del terreno ed il versante si trova sul punto di collasso. Nei pendii stabili, la resistenza mobilizzata in condizioni di equilibrio statico è minore di quella disponibile e ciò viene espresso convenzionalmente tramite un fattore di sicurezza **F** definito come:

$$F = \text{resistenze mobilizzate/resistenze disponibili}$$

Il fattore di sicurezza del versante è quello corrispondente alla superficie di scorrimento più critica (**F** più basso) tra le varie superfici di prova.

Le resistenze disponibili sono generalmente definite dalla relazione di Mohr-Coulomb (vedi sopra) ma il metodo può essere applicando anche considerando altri criteri di rottura.

Il metodo dell'equilibrio limite si basa sulle seguenti assunzioni (Nash, 1987):

- la massa di terreno è considerata perfettamente rigida
- la rottura del versante avviene per scorrimento di una massa di terreno lungo una superficie
- al momento della rottura, la resistenza del terreno viene completamente mobilizzata lungo l'intera superficie.

Queste ipotesi, pur semplificando notevolmente la soluzione del problema, introducono delle importanti limitazioni.

L'analisi all'equilibrio limite prende in considerazione la distribuzione delle tensioni normali efficaci lungo la superficie di rottura ipotizzata. A questo scopo il corpo di frana viene suddiviso in conci, ognuno dei quali è soggetto al sistema di forze riprodotto in figura, dove:

**W** = peso totale del concio di larghezza *b* e altezza *h*;

**N** = forza totale normale alla base del concio;

**S<sub>m</sub>** = forza di taglio agente alla base di ogni concio;

**E** = forza normale interconcio;

**X** = forza di taglio interconcio;

**D** = carico esterno lineare;

**kW** = carico sismico orizzontale applicato al centroide di ogni concio;

**A** = risultante delle forze esterne dell'acqua;

**l** = lunghezza della base del concio;

**α** = angolo di inclinazione della base del concio;

$\omega$  = angolo di inclinazione del carico lineare;

$D$   $f$  = distanza tra il punto di applicazione di  $N$  e il centro di rotazione;

$f_1$  = distanza tra il punto di applicazione di  $E$  e il centro di rotazione;

$x$  = distanza orizzontale tra la linea centrale di ogni concio e il centro di rotazione;

$e$  = distanza verticale tra il centroide di ogni concio e il centro di rotazione;

$d$  = distanza perpendicolare dalla risultante di un carico esterno lineare  $D$  e il centro di rotazione;

$a$  = distanza perpendicolare dalla risultante delle forze esterne dell'acqua e il centro di rotazione;

$R$  = raggio di una superficie di scorrimento circolare o braccio del momento associato alla resistenza mobilizzata  $S_m$  per una superficie di scorrimento di forma non-circolare.

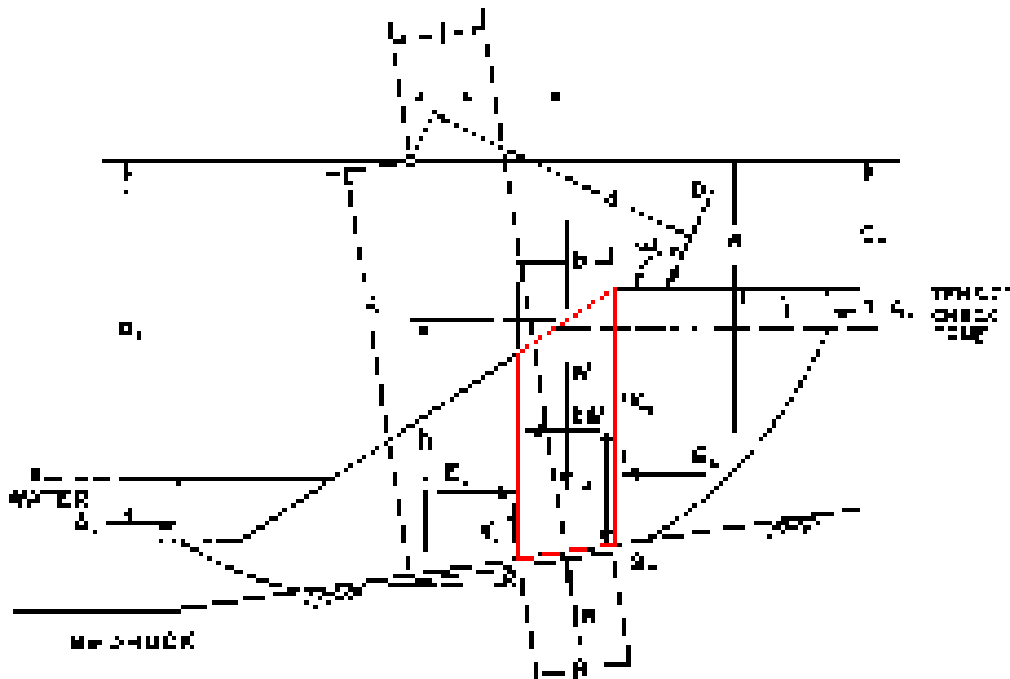


Figura 5.2 Schematizzazione delle forze agenti su un concio

Se si suppone di dividere la massa potenzialmente instabile in  $n$  concii, sarà necessario determinare le seguenti  $6n-2$  incognite:

- $n$  forze normali  $N$  agenti alla base del concio (la distribuzione delle pressioni interstiziali  $u$  è assunta nota);
- $n$  forze tangenziali  $S_m$ ;

- **n-1** forze normali interconco **E**;
- **n-1** forza tangenziali interconco **X**;
- **n** distanze **f** tra il punto di applicazione di **N** e il centro di rotazione o dei momenti;
- **n-1** distanze **f1** tra il punto di applicazione di **E** e il centro di rotazione o dei momenti;
- **1** valore del Fattore di Sicurezza.

Per farlo si hanno a disposizione l'equazione del fattore di sicurezza e le 3 equazioni della statica, ovvero equilibrio delle forze orizzontali, delle forze verticali e dei momenti.

Il sistema presenta un numero di incognite maggiore del numero di equazioni (**4n**), il problema risulta perciò staticamente indeterminato. Per arrivare a una soluzione è necessario introdurre delle assunzioni per renderlo risolvibile dal punto di vista numerico. Proprio nelle assunzioni adottate dai vari autorisi differenziano i numerosi schemi risolutivi dell'equilibrio limite attualmente disponibili.

#### 5.4. Dal modello numerico ai risultati

Quest'ultima fase del processo si riferisce al calcolo del modello stesso che, come è stato evidenziato dall'esempio nel capitolo precedente, non è esente da errori, specialmente nell'assegnazione dei valori ai parametri di input.

Possono essere rilevati, in questa fase, problemi di scala, se i risultati dipendono dalle dimensioni del modello e della griglia utilizzate, di incertezza sulla quantificazione delle proprietà dei materiali o di interpretazione dei risultati stessi.

Risulta però abbastanza facile porre rimedio a questi ultimi, in caso di dubbio è infatti possibile ripetere la procedura più volte, compiendo in questo modo un'analisi dell'influenza che la variazione dei parametri ha sul risultato finale (analisi di sensitività).

La qualità dei risultati che il modello numerico fornisce dipende in larga misura dalla qualità del processo precedente, dei dati, della discretizzazione, dell'accettabilità delle ipotesi iniziali. Risulta possibile verificare la validità dei risultati e, se è necessario, ripetere il calcolo apportando dei cambiamenti nel processo precedente: è come se questo passaggio fornisse un'analisi di feedback sui precedenti.

Nella maggior parte dei casi il primo passo da compiere per arrivare al risultato finale è la realizzazione di un modello preliminare, che descrive la creazione dello stato iniziale degli sforzi agenti sull'ammasso roccioso. Questa situazione può essere ottenuta con vari metodi,



per esempio applicando la forza di gravità all'intera massa e ponendo gli spostamenti pari a zero.

A questo punto si possono inserire nel modello le forze di instabilità agenti, giungendo così ai risultati voluti. Infine è consigliabile una comparazione dei risultati con la realtà, che può portare a correzioni anche nel modello geologico utilizzato, e naturalmente, se nel sito in esame è presente, con gli spostamenti rilevati da un sistema di monitoraggio.

## 5.5. Caratteristiche di Phase2

Phase2 è un programma bidimensionale agli Elementi Finiti. Viene utilizzato per risolvere un'ampia gamma di problemi di ingegneria civile, geotecnica e mineraria.

Nell'analisi numerica agli elementi finiti l'ammasso roccioso è trattato come un sistema continuo e viene studiata la sua risposta a carichi statici o dinamici.

I vantaggi di questo tipo di analisi rispetto ai modelli all'equilibrio limite consistono principalmente nel fatto che:

- 1) non è necessario specificare alcuna superficie di rottura;
- 2) si possono includere nell'analisi sia il comportamento elastico che quello plastico.

La caratteristica fondamentale del metodo agli elementi finiti è di suddividere la geometria del modello in esame in porzioni discrete chiamate appunto *elementi finiti*. Questi, che solitamente hanno una forma semplice (triangolare o quadrata), sono collegati fra di loro da *nodi* in condivisione. L'insieme di elementi finiti e nodi è conosciuto con il nome di *mesh*. Questa discretizzazione del modello viene applicata dopo aver assegnato le proprietà ai materiali che lo costituiscono.

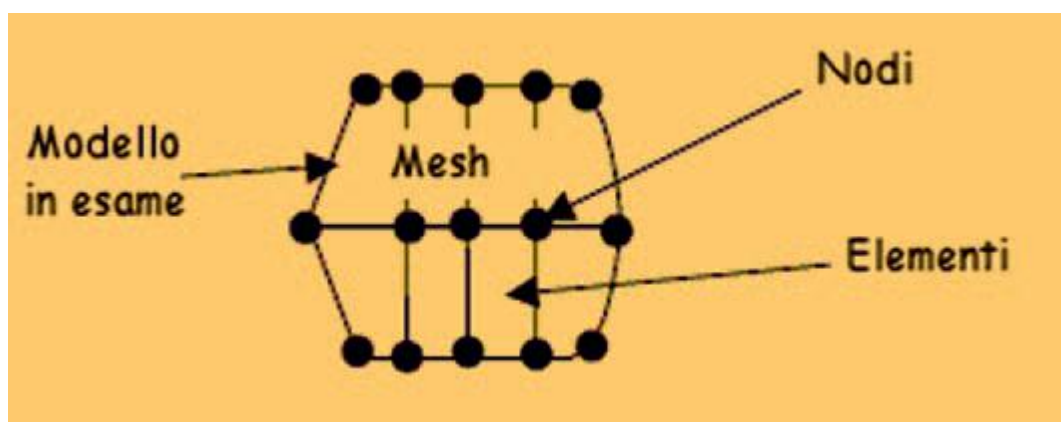


Figura 5.3 Esempio di discretizzazione di un modello nell'analisi agli elementi finiti. (Gambassi 2007)

In Phase2 possono essere considerati vari modelli di comportamento del materiale e le proprietà richieste come input per l'analisi naturalmente varieranno a seconda del criterio di rottura scelto. Una volta assegnate queste proprietà e aver discretizzato il modello, si procede con la cosiddetta tecnica della riduzione delle resistenze al taglio (SSR), che consente di analizzare la stabilità dell'ammasso roccioso in esame al diminuire delle condizioni di resistenza.

I concetti e i passaggi alla base del metodo SSR sono molto semplici. Il fattore di sicurezza di un versante stabile viene determinato nelle tre fasi seguenti:

- 1) viene creato, come detto sopra, un modello agli elementi finiti del versante;
- 2) si riducono di un fattore scelto gli involucri di resistenza al taglio del materiale del versante;
- 3) viene rielaborata l'analisi con i nuovi parametri di resistenza ridotti.

Si procede con le riduzioni delle resistenze fino a che le elaborazioni del modello non convergono ad un risultato. Il fattore di riduzione critico in corrispondenza del quale inizia ad aver luogo la "non convergenza" viene considerato il fattore di sicurezza. Per questo valore avverrà la rottura del versante.

In Phase2 il metodo SSR può essere applicato sia in modo automatico, mediante un'apposita "routine", oppure suddividendo la modellazione in varie fasi (*stages*) ad ognuna delle quali verranno assegnati parametri di resistenza dell'ammasso sempre più bassi, secondo un criterio scelto da chi sta effettuando l'analisi.

## **5.6. Modello numerico del versante di Le Celle**

Per l'analisi del comportamento del versante è stato utilizzato un modello numerico multifase, generato con il codice continuo agli elementi finiti Phase<sup>2</sup> (Rocscience Inc., 2007) già descritto in precedenza.

Nell'inserimento dei dati sull'ammasso roccioso, sono stati invece utili i programmi Dips (Rocscience) e Roclab (Rocscience) che, unitamente allo studio della letteratura esistente e ai dati storici sulla Valmarecchia hanno consentito di ricavare i parametri caratteristici da inserire nel modello agli elementi finiti.

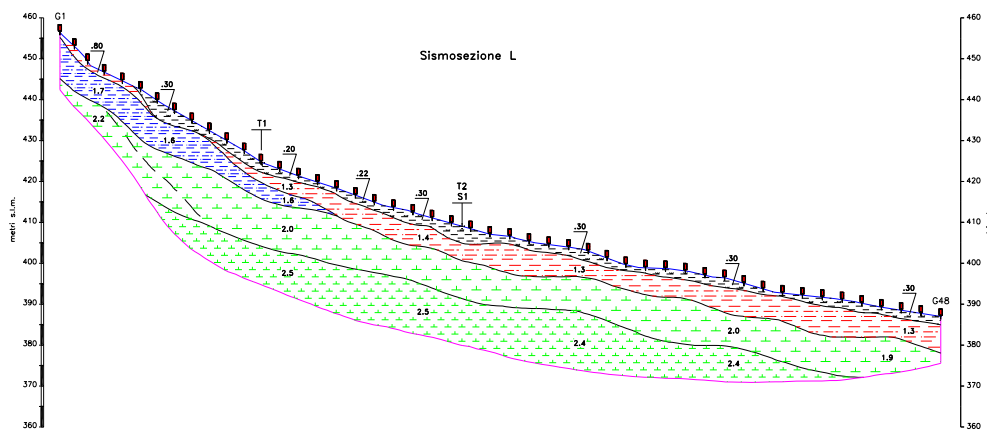
L'obiettivo di questo studio è quello di determinare il fattore di sicurezza del versante utilizzando il metodo della riduzione della resistenza al taglio (SSR).

Il metodo SSR (*Shear Strength Reduction*) si basa su un concetto abbastanza semplice: i parametri del versante vengono ridotti di un fattore SRF (*Strength Reduction Factor*) per effettuare le analisi di stabilità.

Il processo viene ripetuto per diversi valori di SRF, fin quando il modello è considerato instabile, ovvero i risultati delle analisi non convergono.

In questo modo viene determinato il fattore critico SRF, o fattore di sicurezza, del versante.

La modellazione numerica è stata svolta su una sezione longitudinale del corpo di frana estratta dalla relazione geologica del Geol. Fabbri e coincidente con la linea di stendimento geofonica già indagata con la sismica, sulla quale si sono integrati i dati geologici ottenuti (Figura 5.4).



*Figura 5.4 Sezione del profilo longitudinale L della scarpata di Le Celle con interpretazione dell'indagine sismica a rifrazione e ubicazione delle linee geofoniche (relazione geologica)*

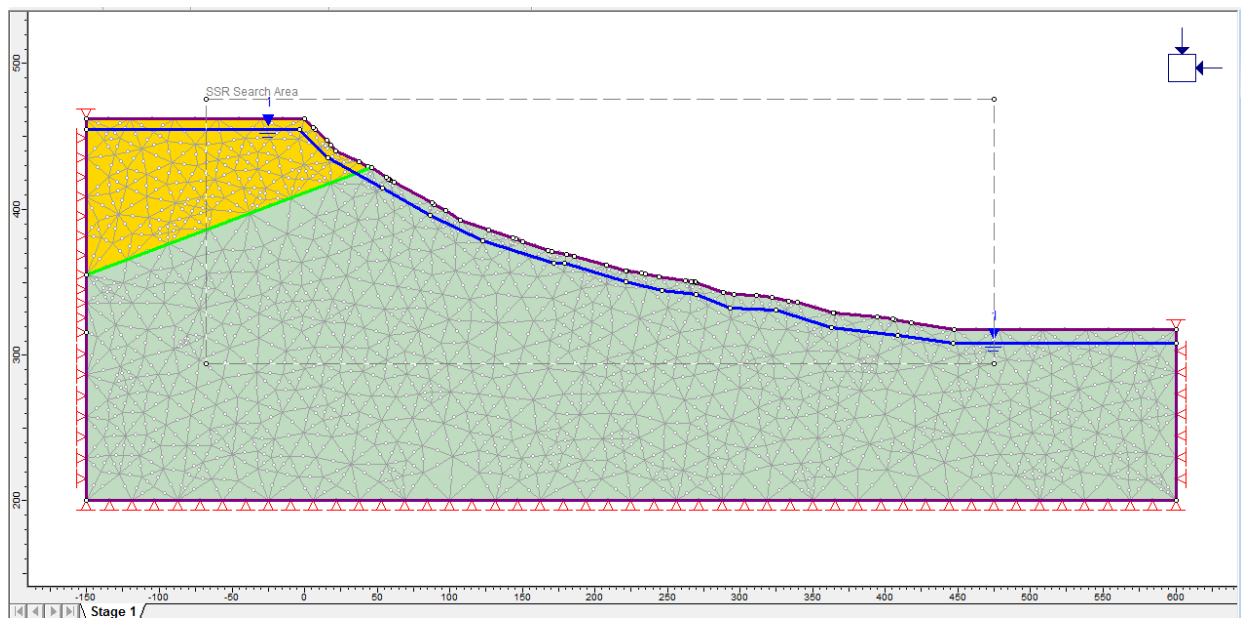
In ambiente Phase2, dopo la definizione delle impostazioni iniziali come unità di misura, tipo di analisi e determinazione dello strength reduction factor si è proceduto con l'inserimento della geometria, importando le coordinate direttamente dal foglio di Autocad e correggendole, facendo coincidere lo 0 dell'asse delle ascisse con l'inizio della scarpata.

Il modello è stato discretizzato con una griglia uniforme, triangolare a sei nodi mantenendo il numero degli elementi finiti a 300 (Figura 5.5). Questa scelta è stata effettuata a causa della complessità del modello discretizzato in un numero maggiore di elementi, che tendeva a restituire la soluzione numerica con tempi di calcolo troppo lunghi.

Un'altra assunzione fatta al fine di semplificare il calcolo e ottenere la soluzione più velocemente è stata ottenuta tramite il comando SRS search area che consente di investigare un'area del modello più ridotta rispetto all'intero profilo, ma che esclude (nel nostro caso) la possibilità di individuare scorrimenti ad una profondità superiore ai 150 m dal piazzale dei fabbricati, caso peraltro inverosimile. Questo non dovrebbe comunque influenzare i risultati del nostro modello in quanto gli studi effettuati in campagna e la relazione geologica del 2009 tendono ad escludere la possibilità di un movimento profondo di una tale entità.

Per ciò che riguarda le condizioni al contorno si sono tenuti fissi il bordo inferiore e anche quelli laterali, dal momento che essi si trovano a sufficiente distanza dalla superficie pendenza del versante, mentre la superficie superiore si è lasciata libera di muoversi.

Come campo delle tensioni si è scelto quello gravitazionale, lasciando il rapporto tra spinta verticale e spinta orizzontale pari a uno. Questa assunzione viene solitamente fatta quando non si conosce la distribuzione delle tensioni orizzontali in un pendio (ovvero nella grande maggioranza dei casi) ed è quindi buona norma lasciare la tensione idrostatica.



*Figura 5.5 Modello numerico del versante di Le Celle*

Per ciò che riguarda invece le condizioni idrauliche del versante, nel corso del carotaggio continuo a rotazione è stata individuata una falda freatica circa 7 metri dal piano di campagna nel piazzale dei fabbricati. La scelta è stata quella di mantenere questa profondità costante su tutto il pendio.

Il modello numerico Phase2 consente anche uno studio più approfondito sulle condizioni idrauliche e sui moti di filtrazione; attraverso la finestra “groundwater” è infatti possibile impostare un diverso livello di falda ai lati sinistro e destro del modello e con informazioni su porosità, granulometria e grado di fratturazione il programma restituisce il modello di filtrazione nell’ammasso indagato.

Nel caso di Le Celle numerose informazioni sulla risposta idraulica dei terreni non erano disponibili, per questo motivo si è utilizzata un’unica linea piezometrica che si attesta lungo tutto il pendio a una profondità circa costante.

### **5.6.1. Proprietà dei materiali**

Non essendo in possesso di informazioni di laboratorio sulle caratteristiche meccaniche degli ammassi rocciosi presenti nell’area in esame, per la loro valutazione si è ricorsi all’utilizzo del programma RocLab (Rocscience Inc., 2002).

Dopo l’analisi visiva dell’ammasso roccioso e l’inserimento dei dati in input tramite le apposite tabelle il programma restituisce istantaneamente i valori cercati e traccia il risultato in 2 differenti grafici. Il primo grafico fornisce i risultati dei due metodi sul diagramma tensione principale maggiore – tensione principale minore, il secondo sul diagramma tensione normale – tensione di taglio. Si può notare come la linea descritta dai parametri di Mohr-Coulomb non passi per l’origine e sia rettilinea a differenza di quanto accade con i parametri di Hoek-Brown.

Dopo aver selezionato i valori dalle tabelle Roclab restituisce in output i valori di  $m_b$ ,  $s$  e  $a$  del criterio di rottura di Hoek-Brown e i parametri equivalenti del metodo Mohr-Coulomb (Fig. 5.6)

Il procedimento è stato ripetuto variando il valore del parametro di disturbo ( $D$ ), per ottenere sia le proprietà di picco ( $D=0$ ) che residue ( $D=0.7$ ).

Nel nostro caso il programma è stato utilizzato per la stima dei parametri riferiti alle calcareniti della Formazione di S. Marino e questi valori sono stati corretti con i dati reperibili in letteratura. Si noti che il versante non è costituito da un unico materiale, ma sulla base dei dati raccolti, si possono individuare due unità geologiche, che nel modello sono rappresentate da due unità distinte. L’inclinazione e il punto sulla superficie per cui la retta passa sono stati determinati tramite l’osservazione diretta della tavola E6 (relazione geologica, 2009) in cui sono riportati i risultati e l’interpretazione della prospezione sismica e tramite osservazioni di campagna.

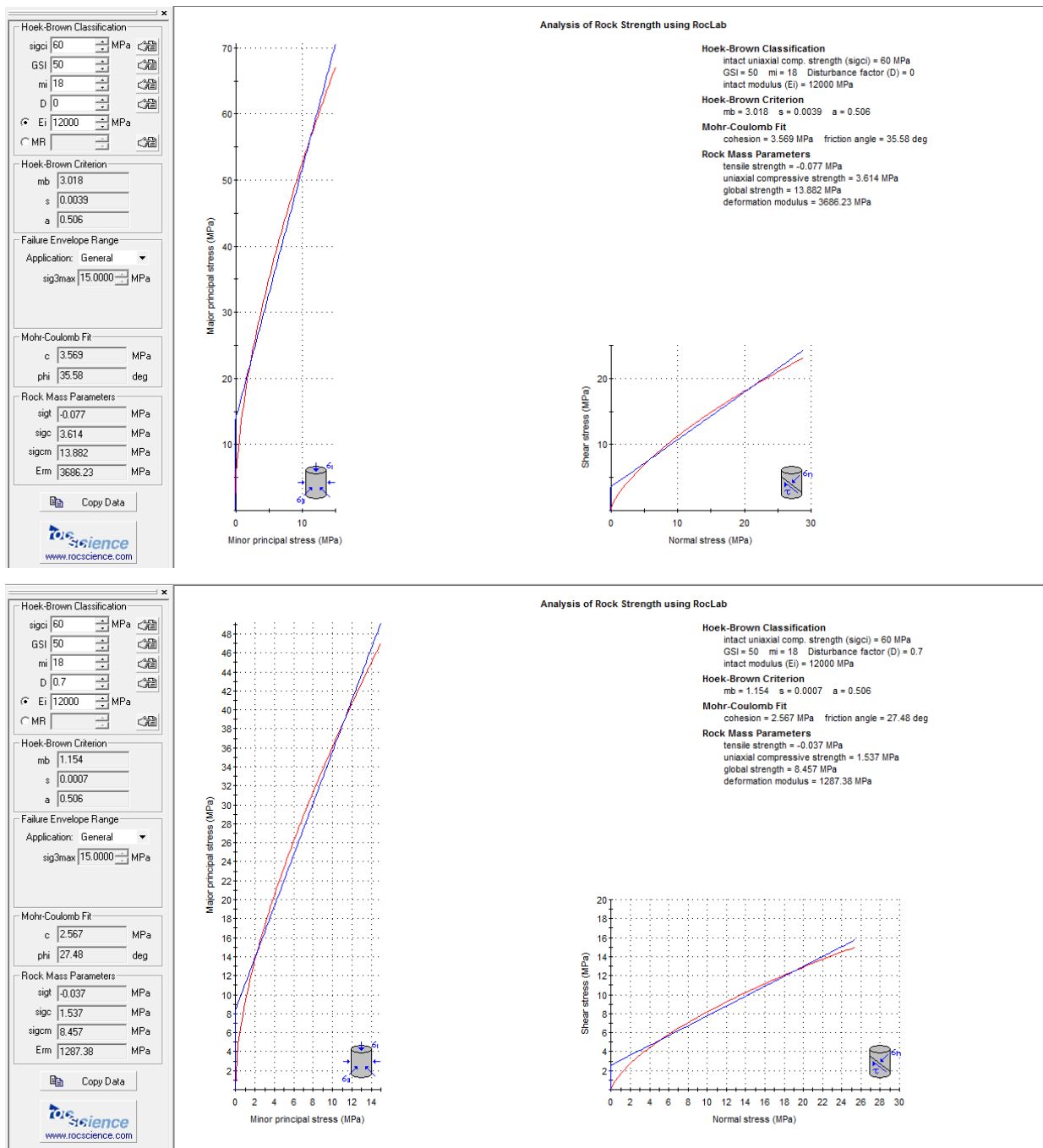


Figura 5.6 Risultati Roclab dell'ammasso roccioso di Le Celle; parametri di picco  $D=0$  e residui  $D=0.7$

Il processo di determinazione dei parametri dell'ammasso roccioso attraverso Roclab è stato effettuato solo per la parte superiore della scarpata, ovvero per la Formazione di San Marino. Per il substrato su cui poggia la Formazione di San Marino, caratterizzato da terreni argillosi (Argille Varicolori) con caratteristiche meccaniche più scadenti, si sono invece utilizzati i

parametri di resistenza al taglio e angolo di attrito di picco e residui reperibili in letteratura (Ambra et al. 2004).

*Tabella 5.7 Parametri della formazione di S. Marino utilizzati nell'analisi di Mohr-Coulomb*

	Resistenza a trazione	Angolo di attrito	Coesione
Parametri di picco	10 Mpa	36°	4 Mpa
Parametri residui	-	27°	2.5 Mpa

*Tabella 5.8 Parametri delle argille Varicolori utilizzati nell'analisi di Mohr-Coulomb*

	Resistenza a trazione	Angolo di attrito	Coesione
Parametri di picco	0 Mpa	27°	0.2 Mpa
Parametri residui	-	9°	0 Mpa

## 5.7. Risultati

Utilizzando il programma Phase<sup>2</sup>, sono state svolte analisi finalizzate ad analizzare la stabilità del pendio.

Il vantaggio dell'utilizzo di un metodo agli elementi finiti rispetto ai metodi tradizionali (equilibrio limite) consiste nel fatto che non è necessario formulare ipotesi sulla forma o sulla localizzazione della superficie di rottura.

Utilizzando la geometria di base descritta in precedenza e variando di volta in volta parametri, condizioni al contorno o criteri di rottura sono stati realizzati diversi modelli:

1. versante con criterio di rottura di Mohr-Coulomb;
2. versante con criterio di rottura di Mohr-Coulomb e riduzione delle caratteristiche meccaniche dell'ammasso roccioso.
3. Versante con criterio di rottura di Hoek Brown;

### 5.7.1. Criterio di rottura di Mohr-Coulomb

Il primo criterio di rottura con cui è stato analizzato numericamente il versante di Le Celle è quello di Mohr- Coulomb. I valori utilizzati per la definizione delle caratteristiche dell'ammasso roccioso sono quelli derivati da RocLab, considerando un indice GSI pari a 50 e un fattore di disturbo pari a 0.0 per i parametri di picco e a 0.7 per quelli residui. Nella figura sottostante sono visibili i risultati relativi alla prima computazione realizzata con i

parametri precedentemente ricavati e descritti nel paragrafo precedente. I valori di angolo di attrito e resistenza al taglio ottenuti da Roclab sono stati rivisti e leggermente corretti confrontandoli con i valori utilizzati in altri elaborati riferiti alla stessa area (D'Ambra et al. 2004).

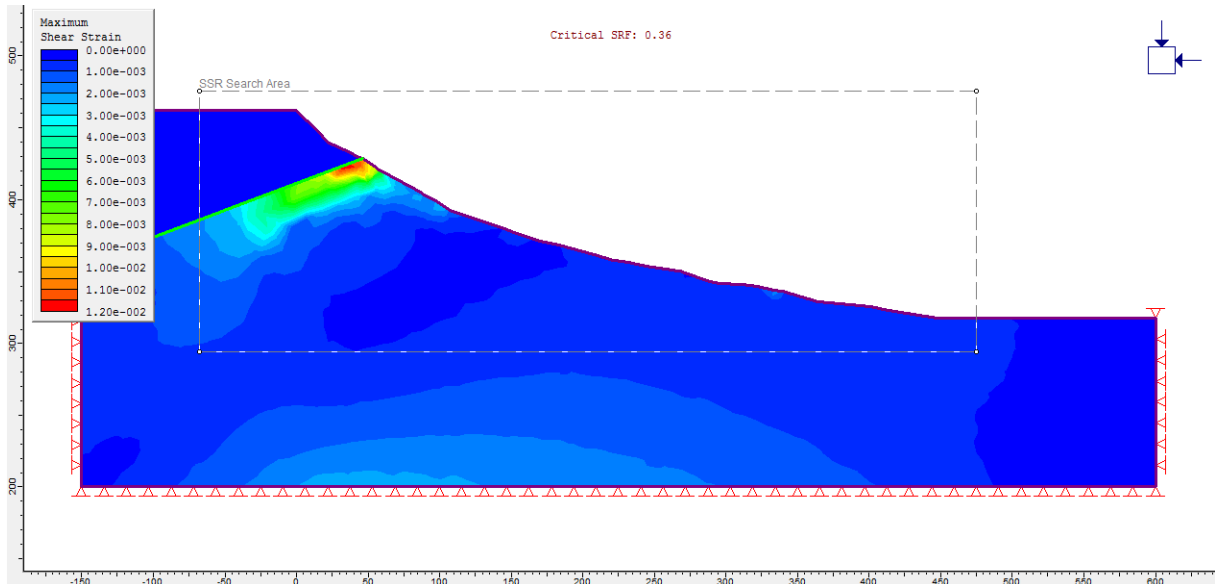


Figura 5.9 Risultati della modellazione numerica del versante di Le Celle con parametri di Mohr-Coulomb, SRF critico=0.36

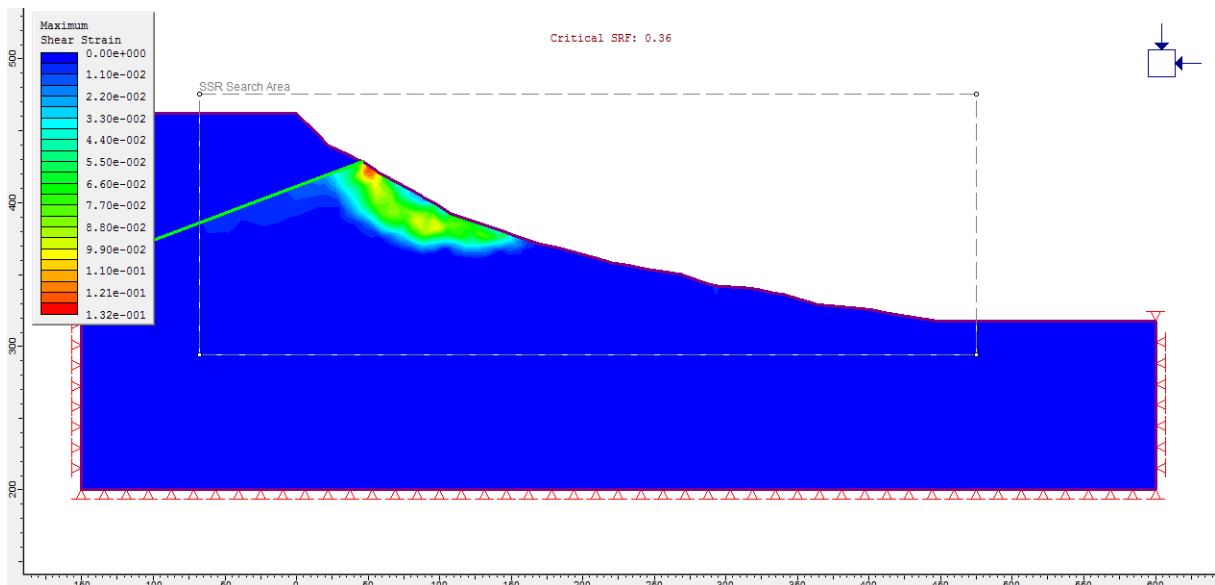


Figura 5.10 Risultati della modellazione numerica del versante di Le Celle con parametri di Mohr-Coulomb, SRF=1



La zona analizzata si trova tra una quota di 462 metri s.l.m. e 317 metri s.l.m. come rappresentato in figura ma si può vedere come i maggiori dissesti vadano a localizzarsi nella zona di affioramento delle argille Varicolori, all'interfaccia tra i due materiali, già a valori di SRF piuttosto bassi. Nella seconda figura invece vediamo come ad un valore maggiore del coefficiente SRF il dissesto vada ad estendersi nella zona più superficiale della scarpata raggiungendo anche quote tali da intaccare la Formazione di S. Marino (Fig. 5.10).

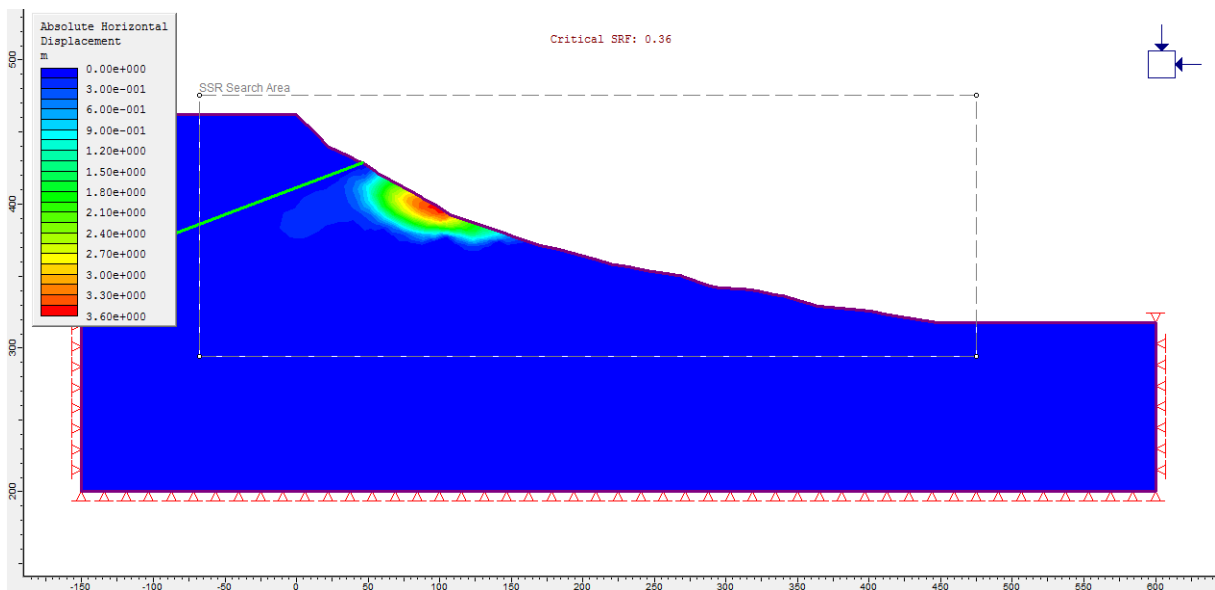


Figura 5.11 Valori assoluti degli spostamenti orizzontali sul versante  $SRF=1$

In figura 5.11 si può notare la rappresentazione del modulo degli spostamenti orizzontali; i valori massimi si trovano ad una quota leggermente inferiore rispetto ai punti maggiormente instabili rappresentati in figura 5.9 e 5.10.

Naturalmente i valori degli spostamenti sono da intendere in maniera qualitativa e non quantitativa, anche a causa delle semplificazioni che sono state introdotte per la definizione del modello e della metodologia adottata nell'analisi.

Sempre nell'interpretazione del modello è possibile inserire dei set di joint per simulare il comportamento della fratturazione soprattutto nella parte alta del versante.

Nel caso in esame sono state inserite tre famiglie di joints inclinate rispettivamente rispetto all'asse delle ascisse  $60^\circ, -50^\circ, 15^\circ$  con i valori positivi che indicano rotazioni antiorarie. Due delle famiglie descritte sono ben visibili nella figura sottostante (Figura 5.12).

Alle famiglie di fratture sono stati assegnati angoli di attrito di 27 gradi pari ai valori residui della formazione di San Marino.

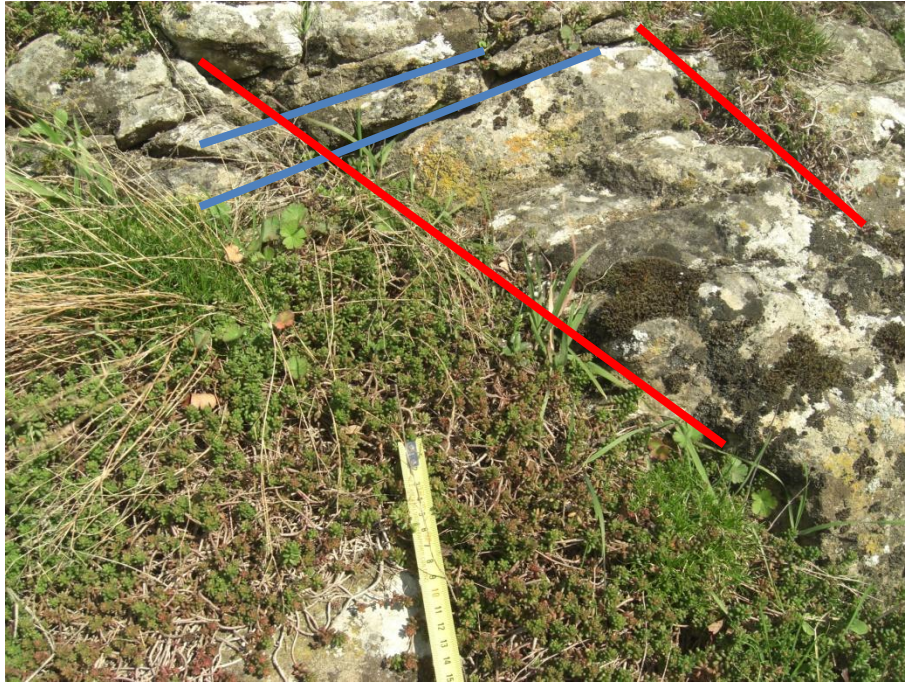


Figura 5.12 Dettaglio della scarpata con evidenziate 2 famiglie di fratture

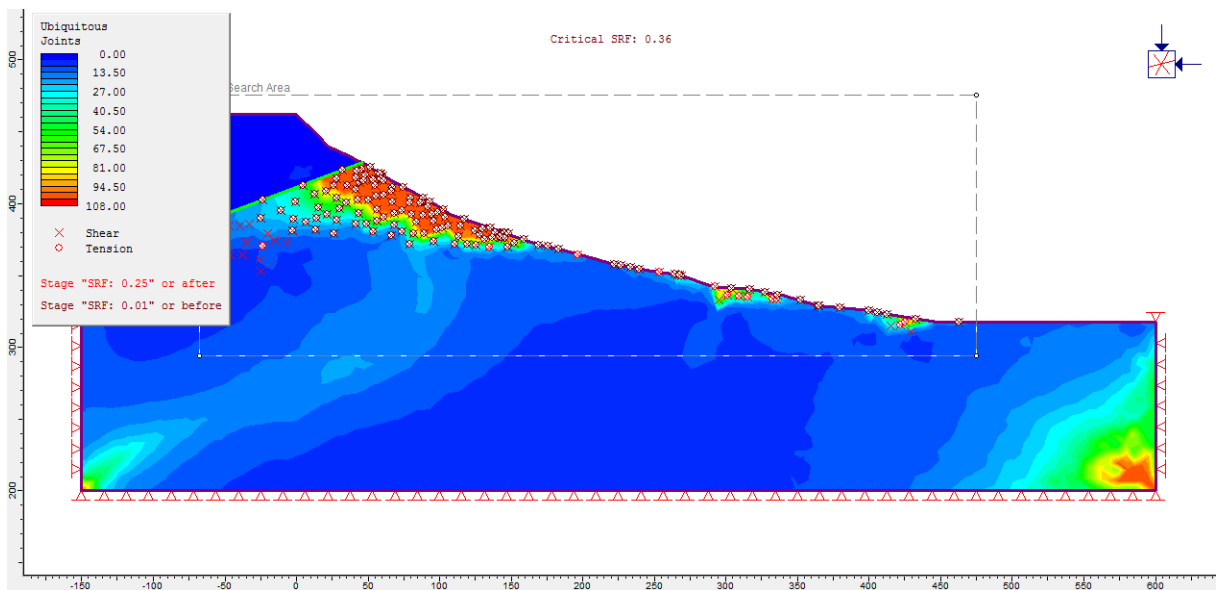


Figura 5.13 Versante fratturato con elementi evidenziati che presentano rottura per taglio o tensione e valutato con criterio di Mohr-Coulomb  $SRF=1$

In figura sono stati evidenziati gli elementi della griglia che presentano rottura, per taglio o per tensione; questi risultano essere in accordo con le caratteristiche geomorfologiche dell'area nonostante la parte superiore del versante, caratterizzata dalla formazione di S. Marino, risulti debolmente intaccata dal fenomeno di instabilità.

In realtà anche questo fenomeno è del tutto normale in quanto l'ammasso calcarenitico è caratterizzato da parametri geomeccanici piuttosto buoni, in particolare rispetto a quelli delle argille varicolori. Tali parametri potrebbero essere ridefiniti, per meglio analizzare il comportamento della porzione più superficiale maggiormente erosa e dilavata e di conseguenza instabile.

Inoltre le deformazioni nella parte media del pendio potrebbero facilmente causare un una destabilizzazione della porzione superiore del versante e arretramento generale della scarpata.

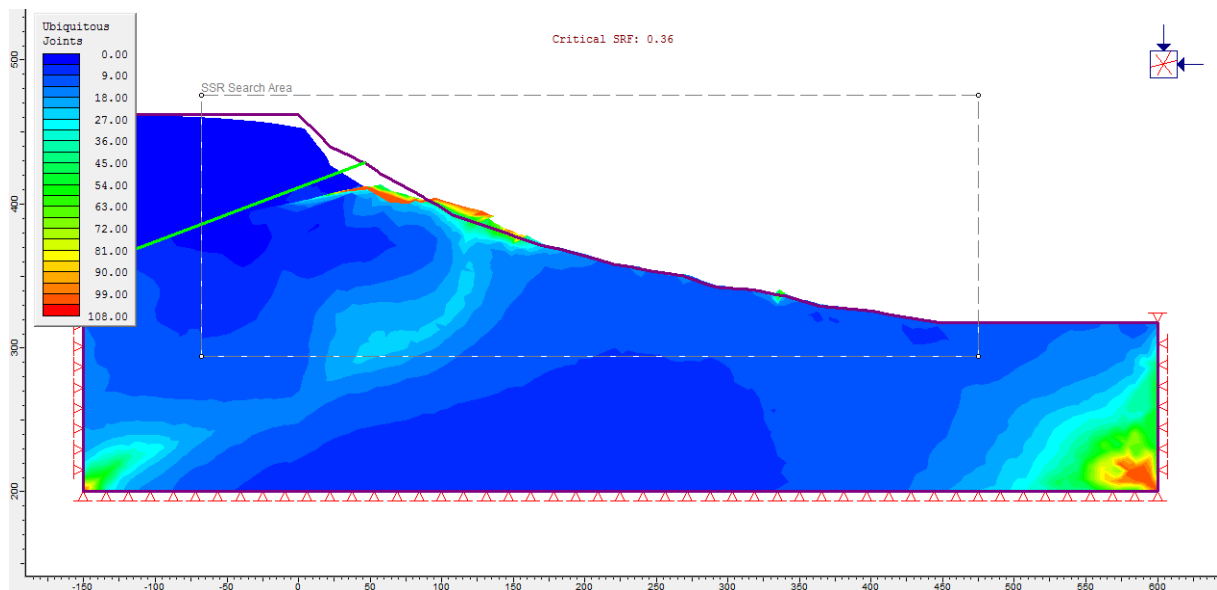


Figura 5.14 Deformazioni del contorno di frana criterio di Mohr Coulomb  $SRF=0.36$

Quello che si vede nell'immagine precedente (Fig. 5.14) è l'esatta rappresentazione di quanto descritto, con la parte alta del pendio, che non presenta elementi giunti a rottura, destabilizzata dai fenomeni di instabilità nella porzione sottostante del pendio.

In campagna queste destabilizzazioni superficiali di materiale sono analoghe a quelle visibili in figura e hanno la forma di scorrimenti rotazionali superficiali.



*Figura 5.15 Distacchi di materiale nel ciglio della scarpata di Le Celle*

### 5.7.2. Criterio di rottura di Hoek-Brown

Lo stesso tipo di analisi può essere fatta anche sfruttando il criterio di rottura di Hoek-Brown, impiegato di default all'interno del programma Phase<sup>2</sup>.

Roclab restituisce in uscita, oltre ai parametri di resistenza al taglio e angolo di attrito caratteristici del criterio di Mohr-Coulomb, anche i parametri equivalenti di Hoek-Brown:  $m_b$ ,  $s$ ,  $a$  che possono essere inseriti nella tabella di definizione delle proprietà dei materiali variando il criterio di analisi di Mohr-Coulomb in Hoek-Brown.

*Tabella 5.16 Parametri della formazione di S. Marino utilizzati nell'analisi di Hoek-Brown*

	Sigci	Mb	S
Parametri di picco	60	2.851	0.0039
Parametri residui	-	1.09	0.0007

A differenza della formazione di S. Marino, per ciò che riguarda le argille Varicolori, l'analisi svolta è ancora con criterio di Mohr-Coulomb data l'impossibilità di osservare direttamente il substrato argilloso e di inserire i dati ottenuti in Roclab.

Vediamo comunque che i risultati ottenuti sono molto simili, con valori di SRF leggermente diversi ma ordini di grandezza del tutto analoghi; si noti che il valore di SRF critico è esattamente lo stesso (Fig. 5.17).

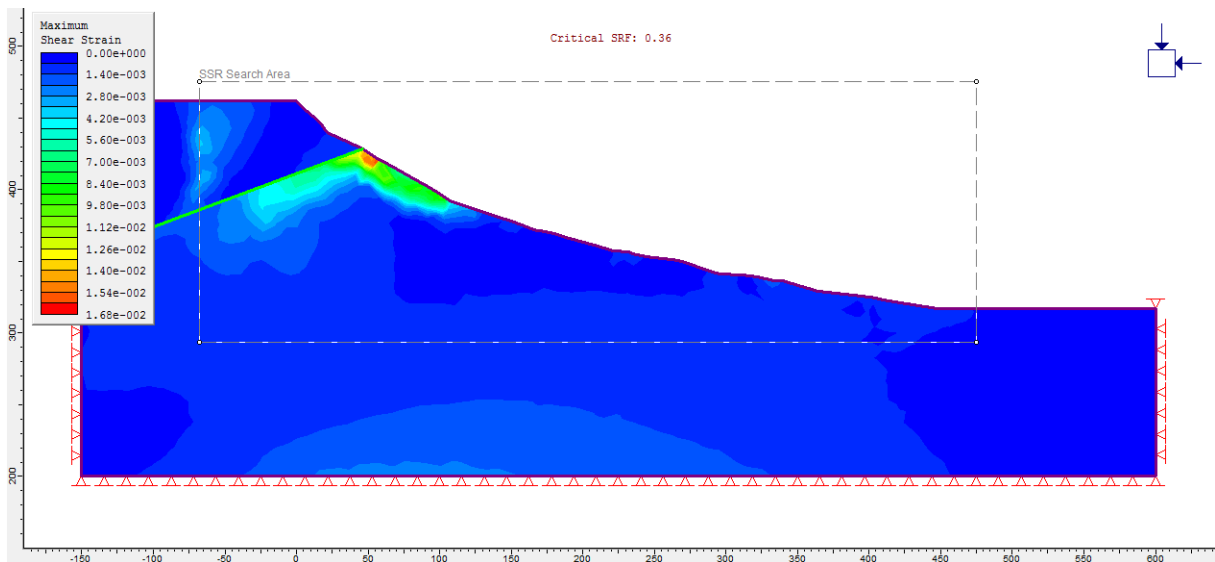


Figura 5.17 Analisi del versante di Le Celle con criterio di Hoek-Brown  $SRF=0.36$

Per meglio modellizzare ciò che accade nella realtà un'altra simulazione che si può effettuare è un'analisi con i parametri di picco della formazione di San Marino assunti pari a quelli residui per tentare di rappresentare i fenomeni di instabilità attivi sul versante.

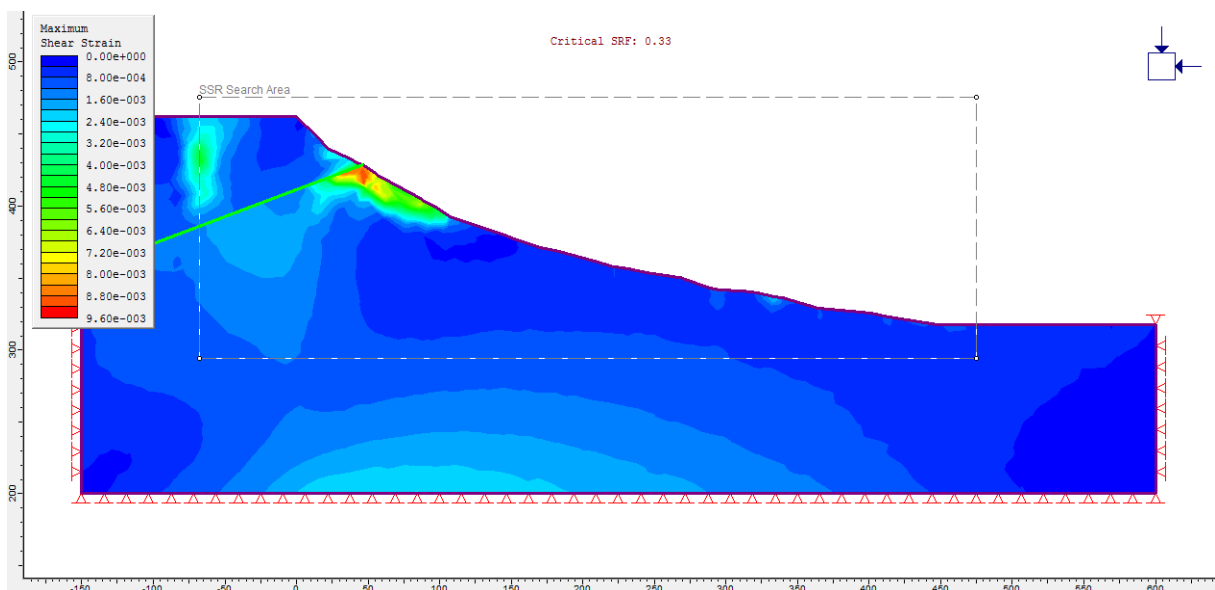


Figura 5.18 Versante analizzato con criterio di Hoek-Brown; con griglia deformata e parametri della formazione di S. Marino ridotti  $SRF=0.33$

Nella figura si nota come la deformazione risulti più accentuata soprattutto nella parte alta del pendio in cui i parametri sono stati variati; il fattore di sicurezza cala ulteriormente giungendo a 0.33.

In tutte le simulazioni effettuate, il modello evidenzia delle deformazioni al contorno esterno nonostante ciò risulti poco verosimile.

Proprio per questo motivo si è scelto un contorno più ampio del necessario, in modo da evitare interazioni tra la risposta della scarpata e il disturbo indotto dal contorno.

Un'ultima operazione effettuabile ai fini della rappresentazione del coefficiente SRF è la trasposizione in un grafico del coefficiente di sicurezza del pendio in funzione della massima deformazione (Figura 5.19).

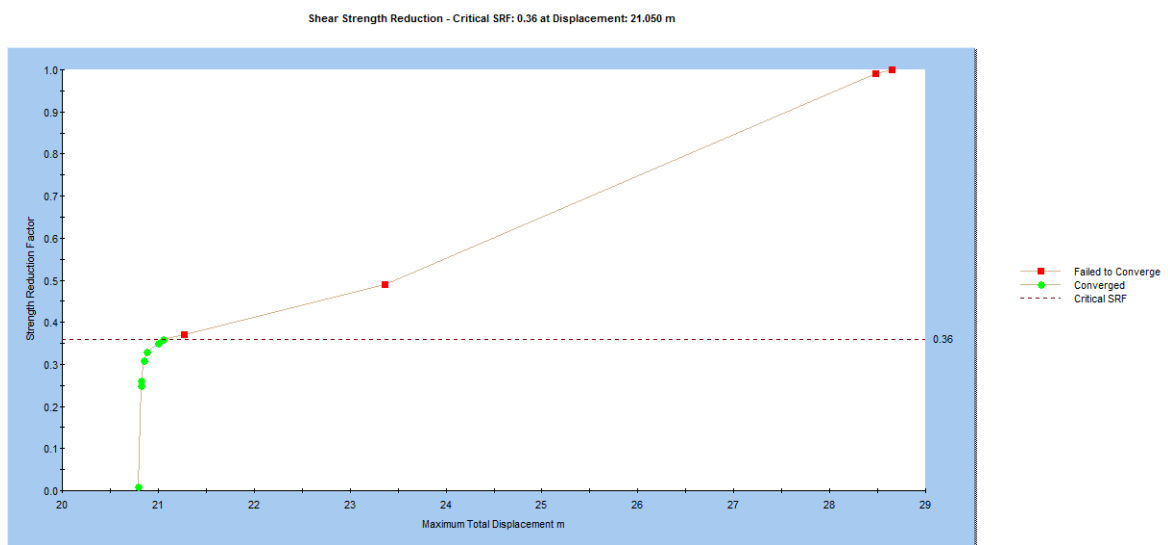


Figura 5.19 Grafico del fattore SRF nel caso di criterio di rottura di Hoek-Brown

Ciò che emerge visto i bassi coefficienti di sicurezza che la parte più superficiale del versante risulta profondamente destabilizzata ed è quindi importante procedere al più presto con degli interventi di stabilizzazione che interessino la parte medio alta del versante.

## **6. Proposte di mitigazione**

### **6.1. Generalità**

Nella pratica ingegneristica gli interventi che vengono effettuati per risanare un versante destabilizzato seguono delle linee guida che possono essere riproposte praticamente in tutti i casi di studio e sono (manuale APAT,2002):

- interventi atti a limitare l'erosione al piede di frana;
- interventi di imboscimento;
- messa in opera di un sistema di drenaggio;
- evitare qualsiasi carico ulteriore sul coronamento di frana.

Nel rispetto di queste regole generali si possono realizzare gli interventi più svariati cercando sempre di considerare, oltre all'efficacia dell'intervento, il suo impatto estetico sull'ambiente e la sua fattibilità dal punto di vista economico.

Le opere di sistemazione dei versanti possono essere ulteriormente suddivise in: opere per il controllo dell'erosione, opere superficiali di stabilizzazione, opere di sostegno vere e proprie, opere di difesa dalla caduta massi, opere di drenaggio e trattamenti speciali chimico-fisici.

#### **6.1.1. Opere per il controllo dell'erosione**

Le opere per il controllo dell'erosione creano condizioni ambientali e di stabilità necessarie all'attecchimento e alla crescita della vegetazione erbacea, arbustiva ed arborea impiantata sulle scarpate e sui pendii in terra o in situazioni particolari di rocce molto alterate. La copertura vegetale, così realizzata, consente un efficace controllo e mitigazione dei fenomeni d'erosione, proteggendo il terreno dall'azione aggressiva delle acque meteoriche e superficiali, del vento e delle escursioni termiche.

Le tipologie che più comunemente trovano applicazione nell'ambito degli interventi di sistemazione e di difesa dall'erosione e dalle frane sono:

- rivestimenti antierosivi con materiali biodegradabili;
- rivestimenti antierosivi con materiali sintetici;
- inerbimenti.

#### **6.1.2. Opere superficiali di stabilizzazione**

L'abbinamento di materiali vivi (talee, piantine radicate) e inerti di legname, o altro materiale (terre, rocce, calcestruzzo, metallo, sintetici ecc.) consente di stabilizzare e consolidare pendii e scarpate instabili, interessati da fenomeni franosi di tipo prevalentemente superficiale. Infatti questa soluzione permette di realizzare strutture di rinforzo del terreno entro cui impiantare talee o piantine radicate. I materiali vivi hanno una funzione non solo ecologica (di rinaturalizzazione), ma anche tecnica: le piante impediscono l'erosione superficiale, intercettando e rallentando il deflusso delle acque meteoriche, e rinforzano con lo sviluppo del loro apparato radicale il terreno, esercitando al tempo stesso un'efficace azione di prosciugamento.

La realizzazione di opere di consolidamento superficiale che utilizzano materiali vegetali vivi in legname o altro materiale sono strettamente correlate con l'esigenza di minimizzare l'impatto ambientale. La loro costruzione necessita di un movimento terra minimo e la struttura garantisce un rapido effetto di consolidamento delle scarpate in dissesto. Se infatti il legno può marcire in tempi relativamente brevi, il radicamento e la crescita delle talee e delle piantine assicurano, nella fase successiva, la stabilità dei versanti.

### **6.1.3. Opere di sostegno**

Le opere di sostegno sono interventi il cui utilizzo è finalizzato a risolvere una serie di situazioni in cui il ruolo della statica diventa predominante negli interventi delle opere strutturali.

Negli ultimi anni le tecniche dell'ingegneria civile sono state ampiamente utilizzate nella sistemazione dei versanti, qualche volta anche con un forte impatto sul paesaggio. Oggi si tende a diversificare le tecniche d'intervento, usando maggiormente le tecnologie naturalistiche e meno il cemento, cercando inoltre di progettare l'opera con qualità formali che tengano conto dell'ambiente in cui sono inserite.

Queste strutture sono impiegate negli interventi di sistemazione e consolidamento dei versanti in frana e nella realizzazione di un'ampia gamma di opere di ingegneria per stabilizzare e/o sostenere terreno o altro materiale, quando per cause naturali o artificiali, quali scavi e riporti, si hanno condizioni che non permettono al terreno di assumere la sua naturale pendenza d'equilibrio. Le opere di sostegno possono essere rigide o flessibili in relazione alla capacità di adattarsi alle deformazioni e/o cedimenti dei terreni o degli ammassi rocciosi, senza rotture o danni significativi. Le opere più utilizzate sono murature, muri cellulari, terre rinforzate, gabbionate, pali e ancoraggi.



#### **6.1.4. Opere di difesa dalla caduta massi**

Il distacco e la caduta di masse rocciose da pareti e versanti costituisce uno dei maggiori rischi geologici al quale sono esposti persone ed infrastrutture di vario tipo, presenti in ambienti rupestri e montani.

Le opere di difesa dalla caduta massi sono comunemente distinte in due principali categorie: “opere di difesa attiva” ed “opere di difesa passiva”. Si definiscono “attive” le opere che hanno la funzione di prevenire, impedire o ridurre il distacco, la caduta e il rotolamento delle masse rocciose. Sono chiamate “passive” le opere che agiscono rallentando, deviando, ostacolando la caduta, il rotolamento e il movimento di masse detritiche.

Le opere di difesa attiva comprendono:

- interventi che migliorano la resistenza meccanica dell'ammasso roccioso: tiranti, chiodi, bulloni, legature, iniezioni di consolidamento, travi o muri, rivestimenti con rete metallica e calcestruzzo proiettato;
- interventi che riducono i processi di degradazione fisica e di erosione superficiale sull'ammasso roccioso: reti metalliche addossate, reticolo di funi metalliche, rivestimenti con reti metalliche;
- interventi che modificano la circolazione idrica superficiale e sotterranea.

Le opere di difesa passiva comprendono:

- reti paramassi;
- interventi di risagomatura dei versanti con formazioni di berme di rallentamento, valli (trincee) e rilevati paramassi;
- realizzazione di barriere ed ostacoli artificiali resistenti, più o meno rigidi e/o deformabili, quali: muri in calcestruzzo, muri in terre rinforzate, muri cellulari, muri in gabbioni, scogliere in grossi massi, gallerie artificiali paramassi.

#### **6.1.5. Opere di drenaggio**

Gli interventi di drenaggio hanno lo scopo di allontanare e di raccogliere le acque superficiali e sotterranee in corrispondenza di pendii instabili o di terreni di fondazione da consolidare, in modo da diminuire le pressioni interstiziali e conseguentemente le spinte del terreno.

Negli interventi di sistemazione e consolidamento dei versanti in frana e nella realizzazione delle opere di ingegneria civile sono utilizzati vari metodi e strumenti per eseguire il drenaggio sia temporaneo che permanente delle aree interessate.

Gli interventi di drenaggio si possono suddividere in due gruppi principali:

-opere di drenaggio di tipo superficiale;

-opere di drenaggio di tipo profondo.

I drenaggi di tipo superficiale, comprendenti le opere di regimazione e drenaggio delle acque superficiali e di sistemazione del pendio di primo intervento, sono quelli di più rapida e facile installazione e manutenzione, ma sono anche quelli che più facilmente si danneggiano e necessitano di manutenzione continua. I più utilizzati sono: cunei drenanti, dreni suborizzontali, trincee drenanti.

I drenaggi profondi, che in genere hanno un carattere definitivo, necessitano di opere e di attrezzature più complesse per la loro installazione e sono più costosi. A fronte di questi svantaggi assicurano però una maggiore efficacia nella stabilizzazione di versanti in frana.

I più utilizzati sono: paratie drenanti, pozzi drenanti, gallerie drenanti.

È prassi consolidata valutare gli effetti del sistema attraverso piezometri che fanno parte integrante del sistema stesso e sono installati contemporaneamente ad esso.

#### **6.1.6. Opere speciali**

Le opere speciali comprendono gli interventi volti a migliorare le caratteristiche fisiche e meccaniche dei terreni e delle rocce. I metodi usati per conseguire questo risultato possono essere suddivisi nelle seguenti tipologie:

- iniezione (iniezioni di miscele consolidanti, jet grouting);
- trattamenti termici (congelamento, cottura ad alte temperature);
- trattamenti chimici (infiltrazione di sali per scambio ionico);
- trattamenti elettrici (elettroosmosi).

L'applicazione di questi trattamenti richiede indagini molto approfondite ed uno studio progettuale basato sui risultati di prove pilota eseguite in sito. I costi d'esecuzione sono in genere molto alti, a causa dell'impiego di attrezzature complesse e di personale specializzato. Per tali motivi, l'impiego di questi metodi per la stabilizzazione di pendii instabili è limitato a casi particolari ad interventi di tipo provvisorio.

## **6.2. Interventi sul versante di Le Celle (proposta del 2009)**

### **6.2.1. Generalità**

Le azioni svolte sul versante di Le Celle per interrompere la rapida progressione dei dissesti in atto si sostanziano nella realizzazione di due principali tipologie di interventi:

- la ricomposizione morfologica del versante con finalità stabilizzanti;

-la regimazione del drenaggio idrico superficiale e ipodermico.

Il conseguimento di effetti concreti nella stabilizzazione di versanti occupati dalle argille, è strettamente rapportato all'impiego di materiali idonei e all'utilizzo di adeguate attrezzature compattatrici.

L'ambito dove è necessario introdurre le maggiori e più efficaci resistenze alla mobilitazione del terreno, è quello posto alla base della parete rocciosa, soggetta a sempre più rapide tendenze di scalzamento con progressivo inasprimento dei gradienti morfologici, cui consegue un corrispettivo aumento delle tensioni destabilizzanti gravitative.

Allo scopo di attribuire al terreno di riporto affidabili condizioni di stabilità si reperiscono materiali idonei caratterizzati da composizioni pressoché costanti e da soddisfacenti proprietà fisico-meccaniche per ottenere i migliori risultati di compattazione.

Ciò permette di costituire un contrafforte con caratteristiche geomeccaniche omogenee e identificabili preventivamente tramite prove e analisi di laboratorio.

Si è scelto di utilizzare fanghi inerti prodotti dall'impianto Frantoio Moni in località Secchiano Marecchia – Comune di Novafeltria (fonte relazione geologica 2009).

La proposta di intervento ha tenuto conto anche dello scenario paesistico-ambientale della zona, adiacente alla placca rocciosa sulla quale è posizionato l'importante patrimonio storico-monumentale della Città di San Leo.

L'obiettivo degli interventi da realizzare nel versante sottoposto alla borgata di Le Celle, è quello di consolidare i terreni argillosi, soggetti a ripetute mobilitazione per colamento e scivolamento.

Per quello che riguarda la metodica d'intervento si è scelto di dividere in due tempi le operazioni di sistemazione a causa dell'impossibilità di attuare l'intervento nel periodo stagionale autunno-inverno.

### **6.2.2. Interventi immediati**

Interventi di contenuta dimensione ma di importante effetto sul contenimento delle argille soprattutto per ciò che riguarda l'allontanamento dell'acqua dal versante.

1. Allontanamento delle acque raccolte dai fabbricati e dalle pertinenze fondiarie poste lungo il ciglio della scarpata che si riversano all'interno del bacino di frana e loro convogliamento nel sistema fognario o nei fossati a valle della scarpata (acque bianche).

2. Esecuzione di una condotta scolante superficiale per allontanare le acque versate nel bacino di frana dalla strada provinciale 137 San Leo-Secchiano. La condotta dovrà essere impostata sul crinale saldo che confina il bacino di frana principale a sud fino al Fosso Campone.

3. Necessità di predisporre un fosso scolante finalizzato ad allontanare le acque evitando la loro dispersione e infiltrazione nel tratto iniziale della coltre di frana più prossima alla base della parete rocciosa.

### **6.2.3. Interventi differiti**

Rappresentano gli interventi organici atti a ottenere una stabilizzazione del versante in frana che richiedono favorevoli periodi stagionali per la loro migliore esecuzione ed efficacia.

1. Realizzazione di un contrafforte stabilizzante al piede della scarpata rocciosa con idonei materiali di riporto (fanghi inerti).
2. Preparazione del piano di imposta del contrafforte in terra compattata tramite incisione in leggera contropendenza nel substrato formazionale argilloso inalterato di elevata consistenza.
3. Realizzazione di trincee drenanti a tergo della briglia in terra eseguita alla base della parete rocciosa raccordate a un pozzetto. Queste opere drenanti hanno il compito di intercettare ed allontanare le acque provenienti dalla parete rocciosa.
4. drenaggi convenzionali adeguatamente disposti lungo il bacino di frana, incastrati nel substrato argilloso e prolungati fino al fondovalle.

### **6.3. Proposte di intervento future**

Lo studio effettuato sulla parete di Le Celle ha messo in evidenza l'entità dei fenomeni che ne governano l'evoluzione e i punti maggiormente critici.

L'interpretazione dell'indagine sismica, insieme al risultato del sondaggio continuo a rotazione ha consentito la ricostruzione della stratigrafia ed ha localizzato indicativamente l'interfaccia che separa la formazione di San Marino calcarenitico-arenacea dal substrato argillitico.

L'indagine svolta consente quindi, grazie al modello numerico, di effettuare un'ipotesi di intervento di consolidamento al fine di stabilizzare in maniera definitiva la parete dissestata.

Dallo studio effettuato e dal comportamento del modello numerico risulta evidente l'importanza che hanno le condizioni idrauliche al fine della stabilità.

Per prima cosa quindi sarà necessario allontanare le acque dalla parte argillosa della parete e convogliarle a valle tramite i fossi adiacenti alla parte bassa della scarpata.

Questo obiettivo può essere raggiunto tramite dei drenaggi superficiali quali canalette o fossi di guardia. Per ciò che riguarda invece il drenaggio profondo finalizzato all'abbattimento della falda freatica l'opera più indicata potrebbe essere una trincea drenante accoppiata

all'utilizzo di dreni (tubazioni traforate in pvc) e a delle canalette di raccolta. Una possibile disposizione potrebbe essere quella indicata in figura 6.1 dove sono rappresentate in grigio le trincee drenanti conferenti ad una canaletta in terra, realizzata longitudinalmente rispetto al versante e rappresentata in verde.



*Figura 6.1 Immagine satellitare di Le Celle con indicata una possibile disposizione delle opere di drenaggio superficiale (trincee drenanti rappresentate in grigio, in verde il fosso)*

La tipologia del riempimento e la profondità della trincea si decideranno in fase di realizzazione.

Per ciò che riguarda invece il sostegno del versante bisognerà tenere conto oltre che dell'aspetto progettuale, anche dell'aspetto paesistico vista la posizione del pendio rispetto alla valle dell'abitato storico di San Leo.

Nella parte alta la soluzione da adottare nel caso di ulteriori distacchi di roccia potrebbe essere l'utilizzo di chiodature e reti metalliche.

Ispirandosi agli interventi già realizzati al di sotto della rupe, per prevenire l'erosione e lo scalzamento al piede dato dal movimento delle argille, la prima opera da realizzare sarà una briglia fondata su pali nella parte bassa del pendio per il contenimento di questo fenomeno e che assolva anche ad una funzione di sostegno per la parte medio-alta del pendio.



*Figura 6.2 Immagine della parte bassa del pendio interessata da colamenti e scorrimenti delle argille*

Per la parte medio-alta del pendio dove, come visibile dai risultati del modello in Phase<sup>2</sup> (Rocscience) si innescano i fenomeni di scorrimento rotazionale (Fig.5.14), l'intervento che pare più appropriato è una successione di gabbionate su diversi livelli dopo un'appropriata riprofilatura del versante che ne consenta la messa in opera.



*Figura 6.3 Esempio di versante stabilizzato con gabbionate (Atlante APAT 2002)*

Si effettua la scelta di questo tipo di intervento in quanto le gabbionate sono delle strutture permeabili, resistenti ed allo stesso tempo molto flessibili in grado di resistere, senza gravi deformazioni dei singoli elementi, ad assestamenti e/o cedimenti del piano di posa o del terreno a tergo dovuti a fenomeni erosivi, a fenomeni franosi, o a scosse sismiche (atlante APAT). Inoltre la facile reperibilità di materiali lapidei nella zona di San Leo fa preferire questa soluzione all'impiego di terre armate che, nonostante abbiano prestazioni stabilizzanti simili, non garantiscono lo stessa regolazione dell'infiltrazione superficiale a causa della scarsa permeabilità.

Infine l'utilizzo di gabbionate ben si coordina con interventi di ingegneria naturalistica quali l'idrosemina che avrà il duplice scopo di impedire l'infiltrazione delle acque meteoriche con conseguente erosione; e di migliorare l'impatto estetico e paesaggistico dell'intervento.

## **7. Conclusioni**

Nel presente elaborato sono stati analizzati gli aspetti geologico-tecnici e le condizioni di stabilità della scarpata sottostante all'abitato in località Le Celle, nel territorio comunale di San Leo, nella Regione Emilia-Romagna.

L'analisi ha compreso una fase di ricerca e caratterizzazione del fenomeno franoso con particolare attenzione alla stratigrafia e alle caratteristiche meccaniche dell'ammasso roccioso su cui è insediato il nucleo abitato.

In seguito, ottenuti i dati necessari, si è proseguita l'analisi indagando il comportamento del versante in frana attraverso una modellazione agli elementi finiti con il programma Phase2.

Infine, si sono effettuate una serie di proposte qualitative di consolidamento al fine di stabilizzare il pendio con delle opere di sostegno atte a mettere in sicurezza l'abitato, e delle opere di drenaggio utili a mitigare i fenomeni di colata indotti che si innescano nei terreni argillosi che affiorano alla base della scarpata della coltre.

In generale, è possibile affermare che i risultati della modellizzazione siano in gran parte in accordo con le evidenze geologiche e geomorfologiche rilevate nell'area di studio.

Riassumendo i risultati ottenuti nel corso della stesura dell'elaborato si può affermare:

- Il rilievo geomorfologico geologico-tecnico in aggiunta alle informazioni già presenti sulla litologia e la stratigrafia del dissesto ha consentito la raccolta di informazioni molto importanti sullo stato di fratturazione dell'ammasso roccioso e sulle sue caratteristiche meccaniche. Tramite l'analisi con il software Dips si sono individuate 3 famiglie principali di fratture e queste sono state utilizzate nella modellazione numerica. L'osservazione diretta della roccia in parete, ha permesso di individuare la geometria dei distacchi di porzioni dell'ammasso e di valutare l'indice GSI caratteristico dell'ammasso stesso.
- Il sondaggio continuo a rotazione realizzato nella zona dei capannoni ha rivelato un substrato roccioso di buona qualità da 5 metri dal piano campagna, con un indice RQD medio che si attesta intorno a 75-90. Le discontinuità presenti sulle carote risultano evidenti anche in parete con una spaziatura decrescente con la profondità.
- La modellazione con il software agli elementi finiti risulta aderente al comportamento reale del versante. Il contorno esterno del modello è stato importato direttamente dal file Autocad del rilievo della sezione sismica longitudinale L e l'attribuzione dei materiali è stata effettuata sempre basandosi sulla ricostruzione del modello geologico del 2009.
- Il modello è stato lanciato diverse volte attribuendo al materiale roccioso e al substrato argilloso diversi valori. La stima dei parametri di Mohr – Coulomb e Hoek- Brown è stata ottenuta dal software Roclab e l'analisi attraverso i due diversi criteri di rottura ha restituito pressoché gli stessi risultati.
- Le condizioni di stabilità del versante sono risultate molto scarse con gli elementi più destabilizzati situati all'interfaccia tra i due materiali, nella formazione argillosa. Il fattore di sicurezza tende a diminuire ulteriormente al peggioramento dei parametri



dell'ammasso roccioso (per simulare l'alterazione subita) e introducendo i set di fratture.

- Anche se le deformazioni orizzontali massime si localizzano solo nella formazione argillosa, il versante risulta deformato anche nella zona di affioramento della formazione di San Marino, come avviene nella realtà. Il movimento risulta in tutti i casi analizzati piuttosto superficiale come risulta evidente dall'esito della prospezione geofisica e dal sondaggio geognostico S1, che individuano una coltre di frana profonda 4-5 metri circa.

I risultati ottenuti risultano emblematici della condizione di instabilità della parete che con un progressivo arretramento sta intaccando l'abitato di Le Celle.

Le opere di drenaggio proposte nella relazione del 2009 e quelle proposte in questo elaborato potrebbero mitigare l'entità dei dissesti che si verificano nei terreni argillosi, abbassando il livello di falda che, in periodi di intense precipitazioni meteoriche, nei terreni fini del substrato raggiunge la quota del piano campagna.

Inoltre, si rende necessaria la messa in opere di strutture di sostegno del versante come gabbionate e paratie su pali al fine di consolidare il pendio e limitare l'erosione, al fine di evitare peggioramenti alle condizioni degli edifici più prossimi alla scarpata che risultano attualmente lesionati nei muri perimetrali e nei solai.

## 8. Bibliografia e sitografia

Borgatti L. (2009) - “Appunti e dispense del corso di Geologia tecnica L-S”

Gottardi G. “Appunti e dispense del corso di consolidamento dei terreni”

APAT (2002) - “Atlante delle opere di sistemazione dei versanti”

Conti S. - “Geologia dell’Appennino Marchigiano-Romagnolo tra le valli del Savio e del Conca”

Conti S. - “La geologia dell’alta Valmarecchia”

Cruden & Varnes (1996) – “Landslide types and processes”

Alberto Bruschi (2004) – “Meccanica delle rocce” Dario flaccorio Editore.

De Feyter (1991) – “Gravity tectonics and sedimentation of the Montefeltro, Italy”

PAI Adb Marecchia – Conca “Allegato 2 – Scheda 26: San Leo-Capoluogo (...)”

Hoek E., Brown E.T. (1980) - “Empirical strength criterion for rock masses”, J. Geotech. Eng..

Hoek E. (1983) - “Strength of jointed rock masses”, 23rd Rankine Lecture.

Hoek E., Brown, E.T. (1988) - “The Hoek-Brown failure criterion” – a 1988 update, in RockEngineering for Underground excavations

Hoek E., Marinos P., Benissi M. (1998) - “Applicability of the Geological Strength Index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses”

Hoek E., Brown, E.T. (1988) – “Rock mass classification”

Progetto IFFI (2007) – “Inventario Fenomeni Franosi in Italia, Metodologia, Risultati e Rapporti Regionali.”

Rocscience Inc. (2002) RocLab Version 1.0 – “Rock Mass Strength Analysis using the Generalized Hoek-Brown failure criterion.”

Dramis F., Maifredi P., Sorriso-Valvo M. (1985) – “Deformazioni gravitative profonde di versante. Aspetti geomorfologici e loro diffusione in Italia.” Soldati 2004

Guerra C. e Nesci O.(1999) - “Geomorfologia e caratterizzazione geotecnica dei depositi di Glacis”

Gori e Vannucci (1987) -“Argille alloctone e parautoctone della Valmarecchia. Relazioni tra caratteri petrografico-fisici e stabilità”.

Nicola Casagli (1994) – “Fenomeni di instabilità in ammassi rocciosi sovrastanti un substrato deformabile: analisi di alcuni esempi nell’appennino settentrionale”

Fabio Fabbri (2009) – “Studio geologico e geomorfologico di un dissesto attivo il località Le Celle in comune di San Leo”. Relazione geologica, relazione tecnica e programma di pronto intervento.

Giardino M., Baggio P. (1996), - “Cartografia geologica e fenomeni di instabilità gravitativa: proposte per una razionale raccolta ed organizzazione dei dati di terreno”

Jing L., Hudson J.A. (2002)- “Numerical methods in rock mechanics”

Stead D., Eberhardt E., Coggan J. and Benko B. (2001) - ”Advanced numerical techniques in rock slope stability analysis - Applications and limitations”

Stead D., Eberhardt E., Coggan J.S. (2005) - “Developments in the characterization of complex rock slope deformation and failure using numerical modelling techniques”

Hungr O., McDougall S. (2008) – “Two numerical models for landslide dynamic analysis.”

Scavia C., Barla G., Bernaudo V. (1990) –“ Probabilistic stability analysis of block toppling failure in rock slopes”

Nash D. (1987) – “ A comparative review of limit equilibrium methods of stability analysis”

Luca Gambassi (2007) – “Modellazione numerica agli Elementi Distinti della frana in roccia di Scasoli (Valle del Savena, Bologna)”

Sonia D’Ambra1, Giovanni Giglio, Albino Lembo-Fazio (2004) - “Arrangement and stabilization of the San Leo cliff”

[www.Emilia-Romagna.it](http://www.Emilia-Romagna.it)

[www.provepenetrometriche.com](http://www.provepenetrometriche.com)

[www.geotestannio.com](http://www.geotestannio.com)

<http://dieta.unipv.it>

[www.vercelli.polito.it](http://www.vercelli.polito.it)

[www.irpi.to.cnr.it/geomon/sia%20it.htm](http://www.irpi.to.cnr.it/geomon/sia%20it.htm)

[www.rocscience.com](http://www.rocscience.com)

[www.regione.emilia-romagna.it/geologia](http://www.regione.emilia-romagna.it/geologia)