



POLITECNICO DI BARI
ISTITUTO DI GEOLOGIA APPLICATA E GEOTECNICA
UNIVERSITÀ DI ANCONA (SEDE AMMINISTRATIVA)
UNIVERSITÀ DI FIRENZE

DOTTORATO DI RICERCA
INGEGNERIA GEOTECNICA
XI Ciclo

MECCANISMI DI DEFORMAZIONE DI PENDII IN
FORMAZIONI STRUTTURALMENTE COMPLESSE
Il caso della frana Acquara-Vadoncello (Senerchia-AV)

Tutore:
Prof. Vincenzo Cotecchia

Dottorando:
Francesco Santoro

Gennaio 2000

a Laura e Michele

Ringraziamenti

Il presente lavoro di ricerca è stato possibile anche grazie alla Comunità Economica Europea (Programma ambiente - Unità di climatologia e rischio naturale Contratto EV5V-CT94-0451) che si ringrazia nella persona del coordinatore del progetto di ricerca Prof. Ing. Vincenzo Cotecchia.

Un generale ringraziamento va rivolto a tutti coloro che, a vario titolo, hanno contribuito allo svolgimento di questo lavoro.

In particolare si ringrazia il tutore Prof. Ing. Vincenzo Cotecchia per aver reso disponibili le sue impareggiabili capacità scientifiche ed organizzative e la Dott. Ing. Federica Cotecchia per l'insostituibile apporto scientifico e didattico.

Alla Dott. Francesca Santaloia ed al Prof. Ing. Claudio Cherubini vanno i ringraziamenti per l'apporto sperimentale e tecnico offerto.

Per la documentazione fotografica resa disponibile e per la collaborazione prestata in fase di redazione e di editing, inoltre, si ringraziano il Dott. Janusz Wasowski, il Dott. Ezio Magoga, il Dott. Francesco Paolo Ramunni ed il Sig. Michele Quattrocchi.

INDICE GENERALE

CAPITOLO 1 PRESENTAZIONE DELLA RICERCA	1
1.1 - Obiettivi della ricerca	2
1.2 - Metodologia e strumenti di analisi	5
<i>1.2.1 - Background della ricerca: dati ed analisi disponibili</i>	5
<i>1.2.2 - Il codice di calcolo</i>	6
1.3 - Fasi di sviluppo della ricerca	8
CAPITOLO 2 CARATTERIZZAZIONE DELL'AREA	9
2.1 - Inquadramento geologico dell'area	10
2.2 - Assetto idrogeologico dell'area	12
2.3 - Processi deformativi nell'area	14
2.4 - La frana Vadoncello	16
<i>2.4.1 - Geomorfologia del pendio prima del Dicembre 1993</i>	16
<i>2.4.2 - Evento franoso del Dicembre 1993</i>	17
CAPITOLO 2 FIGURE E TABELLE	19
CAPITOLO 3 INDAGINI E MONITORAGGI IN SITO	28
3.1 - Introduzione	29
3.2 - Monitoraggi di superficie	30
<i>3.2.1 - Monitoraggio topografico</i>	30
<i>3.2.2 - Monitoraggio del clima</i>	32
<i>3.2.3 - Monitoraggio dell'attività sismica</i>	34
3.3 - Indagini e monitoraggi in profondità	37
<i>3.3.1 - Posizionamento dei sondaggi e fasi di monitoraggio</i>	37
<i>3.3.2 - Profili stratigrafici</i>	39
<i>3.3.3 - Monitoraggi inclinometrici</i>	40
<i>3.3.4 - Monitoraggi piezometrici</i>	41
3.4 - Analisi comparata dei dati	44
<i>3.4.1 - Zona di monte</i>	44
<i>3.4.2 - Zona di corpo in colata</i>	45
<i>3.4.3 - Zona di piede</i>	46
3.5 - Modello geologico del pendio Vadoncello	48
3.6 - Meccanismi di deformazione del pendio Vadoncello	51
CAPITOLO 3 FIGURE E TABELLE	53

CAPITOLO 4 INDAGINI DI LABORATORIO	72
4.1 - Introduzione	73
4.2 - Riconoscimento e classificazione dei materiali	74
4.3 - Prove meccaniche	78
4.3.1 - <i>Prove edometriche</i>	78
4.3.2 - <i>Prove di taglio diretto</i>	81
4.3.3 - <i>Prove triassiali</i>	83
4.3.3 - <i>Prove di taglio residuo</i>	86
4.4 - Caratterizzazione meccanica dei materiali in sito	88
4.5 - Modello geotecnico del pendio Vadoncello	90
CAPITOLO 4 FIGURE E TABELLE	91
CAPITOLO 5 IL CODICE DI CALCOLO FLAC 3.30	116
5.1 - Introduzione	117
5.2 - Descrizione generale	120
5.2.1 - <i>Caratteristiche generali</i>	120
5.2.2 - <i>Confronto con altri metodi di calcolo</i>	122
5.3 - Trattazione del problema dell'equilibrio al finito	124
5.3.1 - <i>Metodi alle differenze finite</i>	124
5.3.2 - <i>Metodo di calcolo esplicito</i>	125
5.3.3 - <i>Analisi Lagrangiana</i>	127
5.3.4 - <i>Equazione del moto ed equazione di equilibrio</i>	128
5.3.5 - <i>Legge costitutiva</i>	129
5.3.6 - <i>Condizioni al contorno</i>	130
5.4 - Formulazione numerica	132
5.4.1 - <i>La griglia</i>	132
5.4.2 - <i>Equazioni alle differenze finite</i>	133
5.4.3 - <i>Dumping meccanico</i>	139
5.4.4 - <i>Stabilità della soluzione</i>	142
5.5 - I modelli costitutivi adoperati nel calcolo	146
5.5.1 - <i>Modello costitutivo Mohr-Coulomb</i>	146
5.5.2 - <i>Modello costitutivo Mohr-Coulomb con strain-softening/hardening</i>	152
5.6 - Sequenza di operazioni nella modellazione	154
5.6.1 - <i>Principi generali della modellazione numerica</i>	154
5.6.2 - <i>Obiettivi dell'analisi</i>	155
5.6.3 - <i>Schematizzazione del sistema fisico</i>	156
5.6.4 - <i>Raccolta dati</i>	157
5.6.5 - <i>Elaborazione di un modello semplice</i>	157

5.6.6 - <i>Affinamento del modello di calcolo</i>	158
5.6.7 - <i>Esecuzione dei calcoli</i>	159
5.6.8 - <i>Studio parametrico</i>	159
5.6.9 - <i>Raccolta ed organizzazione dei risultati</i>	159
5.7 - Prove effettuate sul codice di calcolo	160
CAPITOLO 5 FIGURE E TABELLE	162
CAPITOLO 6 MODELLAZIONE NUMERICA	167
6.1 - Fasi della modellazione numerica	168
6.1.1 - <i>Descrizione della griglia adottata ed implicazioni numeriche</i>	169
6.1.2 - <i>Suddivisione della griglia in regioni</i>	173
6.1.3 - <i>Condizioni di vincolo al contorno</i>	176
6.1.4 - <i>Implementazione delle proprietà meccaniche dei materiali</i>	177
6.1.5 - <i>Implementazione dei due distinti livelli di falda</i>	181
6.1.6 - <i>Implementazione dell'effetto di trascinamento al piede</i>	183
6.2 - Processo di calcolo e grandezze indagate	186
CAPITOLO 6 FIGURE E TABELLE	190
CAPITOLO 7 RISULTATI DELLA MODELLAZIONE	208
7.1 - Introduzione	209
7.2 - Modellazione in condizioni di pendio saturo	210
7.2.1 - <i>Analisi dei movimenti nel pendio</i>	210
7.3 - Modellazione in presenza di falde	214
7.3.1 - <i>Analisi dei movimenti nel pendio</i>	214
7.3.2 - <i>Confronto con risultati di analisi di stabilità all'equilibrio limite</i>	217
7.4 - Modellazione in presenza di falde e di trascinamento al piede	221
7.4.1 - <i>Analisi dei movimenti nel pendio</i>	221
7.5 - Analisi comparata delle modellazioni numeriche effettuate	224
7.5.1 - <i>Confronto tra le diverse modellazioni effettuate</i>	225
7.5.2 - <i>Confronto con i dati di monitoraggio</i>	229
CAPITOLO 7 FIGURE E TABELLE	232
CAPITOLO 8 CONCLUSIONI	252
BIBLIOGRAFIA	259

INDICE DELLE FIGURE

Figura 2.01 - Sezione geologica schematica degli Appennini meridionali	20
Figura 2.02 - Vista schematica dell'alta valle del Fiume Sele	21
Figura 2.03 - Carta geologica dell'alta valle del Fiume Sele	22
Figura 2.04 - Carta geologica dell'area di Senerchia	23
Figura 2.05 - Carta geomorfologica delle Frane Vadoncello e Serra dell'Acquara	24
Figura 2.06 - Profilo topografico Frana Vadoncello pre 1993	25
Figura 2.07 - Vista dall'alto della corona della Frana Vadoncello del 1993	26
Figura 2.08 - Vista parziale della corona della Frana Vadoncello del 1993	26
Figura 2.09 - Vista della scarpata della Frana Vadoncello del 1993	27
Figura 2.10 - Vista della zona di canale della Frana Vadoncello del 1993	27
Figura 3.01 - Rete di monitoraggio GPS	54
Figura 3.02 - Rete di controllo per il monitoraggio topografico	55
Figura 3.03 - Indicazione della posizione delle tracce dei profili topografici	56
Figura 3.04 - Profili topografici longitudinali	57
Figura 3.05 - Velocità di spostamento (metri/mese) nell'ambito della Frana Vadoncello	58
Figura 3.06 - Periodi di ritorno delle piogge giornaliere cumulate	59
Figura 3.07 - Distribuzione degli epicentri degli eventi sismici nell'area Irpina (1991-1995)	60
Figura 3.08 - Distribuzione degli epicentri degli eventi sismici con magnitudo maggiore di 3.0 nell'area Irpina (1991-1995)	60
Figura 3.09 - Posizione dei sondaggi profondi	61
Figura 3.10 - Stratigrafia di dettaglio del sondaggio P4	62
Figura 3.11 - Stratigrafia di dettaglio del sondaggio P2	63
Figura 3.12 - Stratigrafia di dettaglio del sondaggio P1	64
Figura 3.13 - Livelli piezometrici nella zona di corpo (P2) ed eventi piovosi	65
Figura 3.14 - Confronto dati di monitoraggio profondo - Zona di monte (P4 ed I4)	66
Figura 3.15 - Confronto dati di monitoraggio profondo - Zona di corpo in colata (P2 ed I2)	67
Figura 3.16 - Confronto dati di monitoraggio profondo - Zona di piede (P1 ed I1)	68
Figura 3.17 - Modello geologico del pendio Vadoncello nella forma	

	desunta dalle interpretazioni morfologiche e stratigrafiche	69
Figura 3.18 -	Modello geologico del pendio Vadoncello nella forma assunta nella modellazione numerica	70
Figura 4.01 -	Abaco di plasticità per terreni in frana ed in sito	92
Figura 4.02 -	Indice di Liquidità per terreni in frana ed in sito	93
Figura 4.03 -	Indice dei vuoti per terreni in frana ed in sito	93
Figura 4.04 -	Variazione dell'Indice di Plasticità con la profondità	94
Figura 4.05 -	Variazione dell'Indice di Plasticità nell'area nel pendio Vadoncello	95
Figura 4.06 -	Variazione del peso specifico naturale con la profondità	96
Figura 4.07 -	Prove edometriche su campioni naturali e ricostituiti	97
Figura 4.08 -	Prove edometriche di scarico e ricarica	97
Figura 4.09 -	Rigidezza edometrica di campioni naturali e ricostituiti	98
Figura 4.10 -	Prova di taglio diretto drenata	99
Figura 4.11 -	Stati di consolidazione dei provini sottoposti a prova di taglio diretto drenata	100
Figura 4.12 -	Prova triassiale drenata - Complesso C - Sondaggio I6 - Profondità 34.25 metri	101
Figura 4.13 -	Prova triassiale drenata - Complesso D - Sondaggio P4 - Profondità 22.40 metri	102
Figura 4.14 -	Prova triassiale drenata - Complesso E - Sondaggio P4 - Profondità 40.65 metri	103
Figura 4.15 -	Prova triassiale drenata - Complesso F - Sondaggio P3 - Profondità 31.40 metri	104
Figura 4.16 -	Prova triassiale drenata - Complesso G - Sondaggio P3 - Profondità 4.60 metri	105
Figura 4.17 -	Prova triassiale drenata - Complesso H - Sondaggio P2 - Profondità 7.65 metri	106
Figura 4.18 -	Prova triassiale drenata - Complesso I - Sondaggio I1 - Profondità 21.20 metri	107
Figura 4.19 -	Variazione con l'Indice di Plasticità del modulo di rigidezza a taglio e dei corrispondenti valori normalizzati rispetto alla pressione efficace media	108
Figura 4.20 -	Variazione con l'Indice di Plasticità del modulo di rigidezza volumetrico e dei corrispondenti valori normalizzati rispetto alla pressione efficace media	108
Figura 4.21 -	Variazione dell'angolo di resistenza a taglio residuo con la profondità	109

Figura 4.22 - Modello geotecnico del pendio Vadoncello	110
Figura 5.01 - Ciclo del metodo di calcolo esplicito	163
Figura 5.02 - Scomposizione degli elementi quadrangolari	163
Figura 5.03 - Criterio di rottura Mohr-Coulomb nel FLAC	164
Figura 5.04 - Modello Mohr-Coulomb: domini usati nella legge di flusso	164
Figura 5.05 - Diagramma di flusso nella modellazione numerica del comportamento al finito di un sistema fisico	165
Figura 5.06 - Provino cubico elastico-Compressione uniassiale	166
Figura 6.01 - Sezione A-A' del pendio Vadoncello modellata numericamente	191
Figura 6.02 - Contorno della griglia di discretizzazione - Altezza totale	192
Figura 6.03 - Contorno della griglia di discretizzazione - Altezza ridotta	193
Figura 6.04 - Suddivisione in regioni della griglia di discretizzazione	194
Figura 6.05 - Caratterizzazione meccanica materiale Complesso B (Contraente)	195
Figura 6.06 - Caratterizzazione meccanica materiale Complesso C (Contraente)	196
Figura 6.07 - Caratterizzazione meccanica materiale Complesso D (Contraente)	197
Figura 6.08 - Caratterizzazione meccanica materiale Complesso E (Contraente)	198
Figura 6.09 - Caratterizzazione meccanica materiale Complesso F (Contraente)	199
Figura 6.10 - Caratterizzazione meccanica materiale Complesso I (Contraente)	200
Figura 6.11 - Caratterizzazione meccanica materiale Complesso A (Dilatante)	201
Figura 6.12 - Caratterizzazione meccanica materiale Complesso C (Dilatante)	202
Figura 6.13 - Caratterizzazione meccanica materiale Complesso D (Dilatante)	203
Figura 6.14 - Caratterizzazione meccanica materiale Complesso E (Dilatante)	204
Figura 6.15 - Caratterizzazione meccanica materiale Complesso G (Dilatante)	205
Figura 6.16 - Caratterizzazione meccanica materiale Complesso H (Dilatante)	206
Figura 6.17 - Livelli di falda implementati nel modello numerico	207

Figura 7.01 - Indicazione dei punti rilevanti nella descrizione delle deformazioni del pendio Vadoncello	233
Figura 7.02 - Leggenda esplicativa del contenuto di una rappresentazione grafica prodotta con il FLAC	234
Figura 7.03 - Vettori spostamento - Intero pendio - Pendio saturo	235
Figura 7.04 - Regioni di spostamento uniforme - Intero pendio - Pendio saturo	236
Figura 7.05 - Vettori spostamento - Zona di scarpata - Pendio saturo	237
Figura 7.06 - Regioni di spostamento uniforme - Zona di scarpata - Pendio saturo	238
Figura 7.07 - Vettori spostamento - Intero pendio - Pendio saturo - Assenza complesso F	239
Figura 7.08 - Vettori spostamento - Intero pendio - Doppia falda	240
Figura 7.09 - Regioni di spostamento uniforme - Intero pendio - Doppia falda	241
Figura 7.10 - Regioni di spostamento uniforme - Zona di scarpata - Doppia falda	242
Figura 7.11 - Analisi di stabilità con il metodo di Janbu (da Trizzino et al., In stampa)	243
Figura 7.12 - Vettori spostamento - Intero pendio - Doppia falda e trascinamento al piede	244
Figura 7.13 - Regioni di spostamento uniforme - Intero pendio - Doppia falda e trascinamento al piede	245
Figura 7.14 - Regioni di spostamento uniforme - Zona di scarpata - Doppia falda e trascinamento al piede	246
Figura 7.15 - Sovrapposizione delle regioni di spostamento uniforme per le tre modellazioni - Intero pendio	247
Figura 7.16 - Sovrapposizione delle regioni di spostamento uniforme per le tre modellazioni - Zona di scarpata	248
Figura 7.17 - Vista laterale nel Novembre 1995 della casa presente in sito	249
Figura 7.18 - Vista dalla scarpata di frana nel Novembre 1995 della case presente in sito	249

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 3.01 - Riepilogo delle strumentazioni installate nei sondaggi profondi	71
Tabella 4.01 - Proprietà indice dei terreni del pendio Vadoncello (1)	111
Tabella 4.02 - Proprietà indice dei terreni del pendio Vadoncello (2)	112
Tabella 4.03 - Peso specifico naturale	113
Tabella 4.04 - Angoli di resistenza a taglio e deformazioni assiali in condizioni Pseudo Critiche	113
Tabella 4.05 - Moduli di rigidezza a taglio e volumetrica e corrispondenti valori normalizzati rispetto alla pressione efficace media	114
Tabella 4.06 - Angoli di resistenza a taglio residuo	114
Tabella 4.07 - Caratteristiche meccaniche dei materiali assunte nella modellazione numerica	115
Tabella 7.01 - Dati e risultati dell'analisi di stabilità globale	250
Tabella 7.02 - Confronto tra i risultati delle differenti modellazioni numeriche effettuate	251

INDICE ANALITICO DELLE FIGURE E DELLE TABELLE

Figura 2.01	10
Figura 2.02	10
Figura 2.03	10
Figura 2.04	11; 12; 14; 15; 34; 35
Figura 2.05	13; 17; 48
Figura 2.06	16
Figura 2.07	17
Figura 2.08	17
Figura 2.09	17
Figura 2.10	17
Figura 3.01	30
Figura 3.02	30
Figura 3.03	30; 31
Figura 3.04	31
Figura 3.05	31; 32; 51
Figura 3.06	33
Figura 3.07	35
Figura 3.08	35
Figura 3.09	37; 40; 41; 42; 43; 44; 45; 46; 48; 51; 78
Figura 3.10	40
Figura 3.11	40
Figura 3.12	40
Figura 3.13	43; 44; 45
Figura 3.14	44; 51
Figura 3.15	45
Figura 3.16	46; 51
Figura 3.17	48; 50; 51; 74; 76; 84; 177
Figura 3.18	50; 51; 74; 77; 90; 170; 173; 177
Figura 4.01	75
Figura 4.02	75
Figura 4.03	75
Figura 4.04	76
Figura 4.05	77
Figura 4.06	77
Figura 4.07	78; 79; 80; 81
Figura 4.08	78; 81
Figura 4.09	80
Figura 4.10	82
Figura 4.11	82
Figura 4.12	83; 84
Figura 4.13	83; 84
Figura 4.14	83; 170
Figura 4.15	83; 84
Figura 4.16	83; 84

Figura 4.17	83; 84
Figura 4.18	83; 84
Figura 4.19	86
Figura 4.20	86
Figura 4.21	87
Figura 4.22	90; 170; 173; 177; 179; 186; 188; 210; 212; 214; 221
Figura 5.01	126; 188
Figura 5.02	132; 134; 136; 138
Figura 5.03	148
Figura 5.04	150
Figura 5.05	154; 168; 169; 173
Figura 5.06	160
Figura 6.01	170
Figura 6.02	171
Figura 6.03	173; 178
Figura 6.04	175; 210
Figura 6.05	179
Figura 6.06	179
Figura 6.07	179
Figura 6.08	179; 213
Figura 6.09	179; 212
Figura 6.10	179
Figura 6.11	181
Figura 6.12	181
Figura 6.13	181
Figura 6.14	181
Figura 6.15	181
Figura 6.16	181
Figura 6.17	183; 214; 221
Figura 7.01	209; 230
Figura 7.02	209
Figura 7.03	210; 212
Figura 7.04	210; 212; 225
Figura 7.05	212
Figura 7.06	212; 225
Figura 7.07	213
Figura 7.08	214
Figura 7.09	215; 225
Figura 7.10	216; 225
Figura 7.11	218; 219; 220
Figura 7.12	221
Figura 7.13	221; 226
Figura 7.14	223; 226
Figura 7.15	225; 226; 227
Figura 7.16	225; 226; 227; 228
Figura 7.17	230
Figura 7.18	230
Tabella 3.01	37; 42; 43

Tabella 4.01.....	74; 76; 83
Tabella 4.02.....	74; 83
Tabella 4.03.....	77
Tabella 4.04.....	84
Tabella 4.05.....	86
Tabella 4.06.....	86; 177
Tabella 4.07.....	88; 89; 90; 177; 187; 188
Tabella 7.01.....	218; 219
Tabella 7.02.....	225

CAPITOLO 1

PRESENTAZIONE DELLA RICERCA

1.1 - Obiettivi della ricerca

Lo scopo fondamentale della ricerca, i cui contenuti e fasi di sviluppo sono esposti nell'ambito della presente tesi, è quello di indagare i meccanismi di deformazione attivi in un pendio costituito da terreni le cui caratteristiche, sia su larga scala sia alla scala dell'elemento di volume, sono classificabili rispettivamente come mega-strutture complesse e come meso-strutture complesse (D'Elia B. et al.; 1998), proprie di formazioni che, di norma, si definiscono "strutturalmente complesse" (Esu F.; 1977).

Lo studio è stato svolto in considerazione dell'incidenza che la conoscenza ed il controllo di processi deformativi e di rottura in ammassi di terreno e roccia di questa natura hanno sulla prevenzione del rischio e sull'economia del territorio. La progettazione e l'utilizzo del territorio in zone di catena sede di dette formazioni, come quella ove è situato il pendio analizzato nel presente lavoro di ricerca, richiedono la conoscenza del comportamento costitutivo ed al finito di formazioni di terreni e/o rocce fortemente tettonizzate, caratterizzate quindi dalla presenza di superfici di taglio e discontinuità, sia di origine tettonica sia dovuti a pregressi fenomeni franosi (AGI; 1985).

Il presente lavoro intende essere un contributo alla conoscenza del comportamento al finito di detti materiali, alla luce anche di una pregressa analisi del loro comportamento geotecnico in laboratorio.

A tale scopo si è indagato lo stato e l'evoluzione di un pendio sito su un versante dell'Appennino Meridionale; in particolare, nelle immediate vicinanze dell'abitato di Senerchia (AV), nell'alta valle del Fiume Sele, il pendio Vadoncello.

La prima problematica che si è inteso affrontare nella ricerca è stata quella relativa alla definizione di una metodologia di analisi dei processi evolutivi in pendii di litostratigrafia complessa in formazioni tettonizzate, che inquadrasse tutti gli elementi di studio necessari alla comprensione dei processi cui si è accennato, dallo studio geologico e geotecnico sperimentale in sito all'analisi del comportamento dei materiali in laboratorio, fino alla modellazione numerica del

loro comportamento al finito. Lo studio del problema sul campo, ossia dell'instabilità del pendio Vadoncello, è stato quindi mirato alla proposizione ed all'applicazione di una metodologia di analisi finalizzata alla conoscenza del processo deformativo in atto nel pendio, della sua estensione, della rilevanza dei diversi fattori che lo determinano e alla conseguente valutazione della validità della metodologia proposta ai fini del conseguimento degli obiettivi. Utilizzando i dati ottenuti da una pregressa campagna di indagine e monitoraggio in sito, si è ricostruito l'assetto geologico ed idrogeologico del pendio e si sono indagate le caratteristiche meccaniche dei terreni. L'insieme di questi dati, caratterizzazioni ed informazioni sono confluite nella definizione di un modello numerico il più possibile rappresentativo della realtà. I risultati della modellazione numerica cui la presente ricerca si riferisce sono stati, quindi, confrontati con le rilevazioni del processo deformativo svolte in sito con apposite campagne di monitoraggio.

La seconda problematica affrontata nella ricerca ha riguardato le modalità di implementazione di assetti litostratigrafici complessi, quali quelli di pendii in formazioni strutturalmente complesse, nell'ambito di codici di calcolo numerico, nonché la scelta della tipologia di calcolazione capace di simulare processi deformativi caratterizzati da grandi spostamenti, che tipicamente si manifestano nell'area interessata dalla ricerca (appennino meridionale). Infine, la comprensione dei fenomeni deformativi che interessano un pendio nelle complesse condizioni geologiche, stratigrafiche, morfologiche, idrogeologiche e meccaniche quali quelle del pendio Vadoncello, obiettivo finale dello studio, è ritenuta utile alla comprensione dei meccanismi deformativi propri di altri pendii ricadenti nella stessa area o, comunque, caratterizzati da analoghe complessità.

La peculiarità dell'approccio adottato nella ricerca, di cui si sono brevemente esposti gli obiettivi, è nel coniugio di una forte attenzione rivolta allo studio del sito ed all'osservazione del processo reale, con un'altrettanta forte attenzione rivolta all'analisi numerica.

Il processo reale, sebbene complesso, è stato attentamente valutato nel dettaglio e ne è stata fornita una interpretazione poi confrontata con i risultati dello studio numerico che, comunque, è stato il principale oggetto della presente tesi. Lo

studio in sito è stato infatti oggetto di precedenti studi (EEC Report; 1996, Santalucia F. et al.;1999), dei quali il presente lavoro può ritenersi un utile prosieguo.

Altrettanto importante è stato lo sforzo fatto nell'interpretare il comportamento dei materiali, per i quali si è cercato di simulare il più fedelmente possibile la legge costitutiva, nell'ambito della modellazione numerica, pur nei limiti delle informazioni sperimentali disponibili circa il loro comportamento. La complessità dell'assetto litostratigrafico presente in sito e riportato, per quanto semplificato, nel modello numerico ha, comunque, reso molto complesso il modello stesso. Tale circostanza ha rappresentato un ulteriore elemento condizionante per la scelta della legge costitutiva da adottare nel calcolo, non permettendo la implementazione di leggi costitutive più complesse di quanto non lo sia quella elasto-plastica di Mohr-Coulomb.

I risultati della modellazione numerica condotta sono stati confrontati con i meccanismi di evoluzione del pendio osservati in sito grazie alla disponibilità di dati di monitoraggio ottenuti nell'ambito dello svolgimento di un programma di ricerca, già finanziato dalla Comunità Economica Europea, che ha interessato, in particolare modo, la zona in cui ricade il pendio Vadoncello.

1.2 - Metodologia e strumenti di analisi

1.2.1 - Background della ricerca: dati ed analisi disponibili

Nell'ambito di una ricerca finanziata dalla Comunità Economica Europea (Programma ambiente - Unità di climatologia e rischio naturale) (EEC Report; 1996), durata 24 mesi a partire dal Dicembre 1994, il pendio Vadoncello, di cui si è esaminato il comportamento nella presente ricerca, è stato oggetto di una intensa e vasta campagna di indagine e monitoraggio in sito.

In particolare sono state realizzate rilevazioni topografiche convenzionali e GPS, perforazione di sondaggi profondi per ricostruzioni stratigrafiche e per prelievo di campioni indisturbati e disturbati, installazione di strumentazione nei fori di sondaggio (piezometri ed inclinometri), rilevazioni climatiche e rilevazioni sismiche.

L'insieme dei dati disponibili sono serviti al duplice scopo di caratterizzare il pendio in studio da un punto di vista geologico, idrogeologico e geotecnico nonché di fornire le prime indicazioni utili alla comprensione del meccanismo di deformazione.

Dunque i risultati delle indagini effettuate sul pendio Vadoncello e del suo monitoraggio sono stati di fondamentale importanza nel corso della ricerca avendo fornito un ampio background alle scelte di modellazione numerica fatte nel corso della ricerca stessa.

Come anticipato in precedenza, nel corso delle attività di indagine del pendio, sono stati prelevati un gran numero di campioni di terreno disturbati e indisturbati successivamente sottoposti a prove di laboratorio.

Il programma di prove ha consentito di ottenere dati utili alla caratterizzazione, da un punto di vista meccanico, dei materiali presenti nel pendio.

Le prove effettuate sono consistite, essenzialmente, in prove per la caratterizzazione comparazionale dei materiali, prove edometriche, prove di taglio diretto, prove di taglio residuo e prove triassiali.

Ancora una volta, l'insieme dei dati resi disponibili ha consentito, da una parte, di meglio definire la caratterizzazione geologica del pendio e, dall'altra, di scegliere la legge costitutiva dei materiali ed i relativi parametri.

1.2.2 - Il codice di calcolo

Fase decisiva nella ricerca è stata la scelta e l'utilizzo di un codice di calcolo numerico appropriato alla modellazione delle grandi deformazioni aventi sede nel pendio in analisi.

La scelta, a seguito essenzialmente di studi bibliografici, è ricaduta sul codice F.L.A.C. prodotto e distribuito dalla società Itasca Consulting Group Ltd.

Il codice FLAC (il cui nome è un acronimo dell'espressione anglosassone Fast Lagrangian Analysis of Continua) è un codice di calcolo basato sul metodo delle differenze finite (FDM). Le ragioni della scelta di questo particolare codice di calcolo sono da ricercarsi essenzialmente nel fatto, da una parte, che si tratta di un codice appositamente progettato e realizzato per applicazioni in campo geotecnico, come dimostrato ad esempio dalle leggi costitutive in esso implementate e, d'altra parte, che consente, grazie al metodo di calcolo esplicito implementato nei metodi FDM, di esaminare problemi con grandi deformazioni. Ciò è il caso del pendio Vadoncello in quanto sede di una frana caratterizzata da deformazioni dell'ordine della decina di metri.

Da non sottovalutare, tra le ragioni della scelta fatta circa il codice di calcolo utilizzato, la possibilità, offerta dal FLAC, di poter essere programmato allo scopo di eseguire autonomamente una serie di complesse e ripetitive operazioni, che, vista la complessità del caso reale studiato, dal principio è parsa essere una necessità imprescindibile.

Si ritiene utile osservare come non sia stato possibile reperire in bibliografia esempi di applicazione di un metodo di calcolo alle differenze finite proprio del FLAC, allo studio di un pendio che presenti le complessità morfologiche, geologiche, idrogeologiche e geotecniche, per di più accompagnate dalle grandi deformazioni osservate, presenti nel pendio Vadoncello. Questo aspetto, peraltro,

rafforza ancora di più la necessità, oltre che l'esigenza, di considerare l'approccio della modellazione numerica condotta nell'ambito della presente ricerca, come essenzialmente qualitativo.

1.3 - Fasi di sviluppo della ricerca

Le fasi fondamentali della ricerca sono state, per grandi linee, quelle riportate nel seguito:

1. inquadramento geologico dell'area in cui ricade il pendio studiato;
2. esame critico dei dati di monitoraggio disponibili allo scopo di ampliare la comprensione dei processi deformativi in sito e di definire il modello geologico del pendio considerato;
3. esame critico dei dati delle prove di laboratorio allo scopo di definire il modello geotecnico del pendio considerato e, di stabilire la legge costitutiva da implementare nel modello numerico;
4. scelta, sulla base della valutazione dei dati di monitoraggio e di laboratorio, di una condizione morfologica di riferimento su cui impostare la modellazione;
5. implementazione dei dati di sito e di laboratorio nel modello numerico;
6. valutazione critica dei primi risultati della modellazione allo scopo di apportare opportune modifiche al modello numerico;
7. graduale perfezionamento del modello numerico con l'aggiunta di ulteriori fattori influenti nel comportamento meccanico del pendio;
8. interpretazione dei risultati ottenuti;
9. confronto dei risultati ottenuti dal modello numerico con i dati di monitoraggio;
10. individuare, in conclusione, una metodologia di analisi da adottare nei riguardi di problemi che presentino un simile livello di complessità.

Da un punto di vista metodologico, ovviamente, la ricerca ha anche avuto lo scopo di saggiare le capacità di impostazione del programma di lavoro stesso.

CAPITOLO 2

CARATTERIZZAZIONE DELL'AREA

2.1 - Inquadramento geologico dell'area

La catena appenninica, nella sua porzione meridionale, si è iniziata a formare durante la tettonogenesi neogenica, manifestandosi, in quella fase, come una struttura a falde di ricoprimento con approfondimento verso il Mare Adriatico.

In epoca successiva, a partire dall'Oligocene Superiore-Miocene Inferiore, ha preso origine l'intero settore appenninico, in fase di continuo sollevamento che è rappresentato da una struttura a falde costituita da unità tettoniche adriatico-vergentesi. In Figura 2.01 è riportata una sezione schematica della regione meridionale della catena degli Appennini (Sella M et al.; 1988).

L'alta valle del Fiume Sele si viene a collocare nella parte occidentale dell'Appennino Campano-Lucano (Figura 2.01). In Figura 2.02 è riportata una rappresentazione prospettica della valle recante l'indicazione dei principali elementi che la caratterizzano da un punto di vista morfologico e formazionale. La valle ha uno sviluppo ad andamento pressoché Nord-Sud, ed altro non è se non che una depressione strutturale, un graben, formatosi durante il Pliocene superiore (Ortolani F, Torre M; 1981).

Come può evincersi dalla Figura 2.03 (Bonardi G. et al; 1988) in cui è riportata una carta geologica dell'alta valle del Fiume Sele, questa è interamente delimitata da massicci carbonatici: ad Ovest si individuano i Monti Picentini (aventi immersione NE) mentre ad Est si riconosce il gruppo del Monte Marzano (avente immersione SO).

In gran parte della valle (Figura 2.03) affiorano i terreni di epoca Oligocene-Cretaceo superiore appartenenti al Complesso Sicilide e, in particolare, i termini della Formazione delle Argille Varicolori siano essi i membri argillosi che quelli calcareo-marnosi di Sant'Arcangelo. Il contatto tra questa formazione geologica e i sottostanti depositi carbonatici è di natura tettonica.

Da un punto di vista litologico, i membri argillosi sono rappresentati da alternanze irregolari di argille scure e policrome, notevolmente tettonizzate e coesistenti a strati o blocchi, disposti in vario modo, di marne, calcareniti, calcilutiti, calcari marnosi e arenarie. Il membro di Sant'Arcangelo, invece, è

costituito in prevalenza da una sequenza marnosa-calcareo, rappresentata da calcari marnosi grigi e giallastri con intercalazioni di argille grigio-verdi scagliettate, di marne argillose, di argille marnose.

Il Figura 2.04 è rappresentata una carta geomorfologia del versante Sud-Est sotto l'abitato di Senerchia, ove è localizzata la frana Vadoncello che si colloca sul lato sinistro del pendio Serra dell'Acquara.

Sia il pendio in frana di Serra dell'Acquara che quello di Vadoncello riportati nella Figura 2.04 sono formati, sino a profondità più o meno elevate, dalle successioni calcareo-marnose e argillose delle Argille Varicolori.

Con particolare riferimento all'area in esame, l'abitato di Senerchia sorge su un placcone detritico carbonatico (Figura 2.04), sovrastante la sequenza argillosa della Formazione delle Argille Varicolori, con uno spessore massimo dell'ordine dei 100 metri, delimitato a monte da una faglia che lo pone a contatto con il versante dei Monti Picentini (Cotecchia V. et al.; 1986).

Il placcone è costituito da clasti carbonatici angolosi o poco arrotondati immersi in una matrice limosa-sabbiosa. Sono altresì presenti in esso piccoli strati e lenti di paleosuoli e limi vulcanici alterati. Nella zona del cimitero l'aspetto diventa quello delle megabrecce carbonatiche, di dimensioni pari a diverse decine di metri cubi, sulle quali, in maniera discontinua poggia un detrito carbonatico più fine. Secondo Cotecchia V. et al. (1986) questo placcone può essere considerato come deposito di versante associato ad accumuli di frana, il cui detrito proveniva dal dilavamento delle frane affioranti lungo le pendici dei Monti Picentini e si può ritenere che si sia formato in corrispondenza delle fasi glaciali e interglaciali del Quaternario Medio. La migliore esposizione di questo placcone si ha in corrispondenza del versante destro della frana Vadoncello, ove il deposito presenta un'inclinazione di circa 30°. Tale inclinazione è stata interpretata da Cotecchia V. et al. (1986) come l'effetto di un antico movimento rotazionale profondo con superficie di scivolamento all'interno delle Argille Varicolori del Complesso Sicilide.

2.2 - Assetto idrogeologico dell'area

La coesistenza delle successioni carbonatiche fratturate e carsificate dei Monti Picentini, della sequenza argillosa e calcareo-marnosa della Formazione delle Argille Varicolori e dei litotipi del placcone detritico, determina l'assetto idrogeologico del versante Sud-Est sotto l'abitato di Senerchia (Figura 2.04).

In funzione delle loro litologie e del loro grado di permeabilità, le diverse successioni sedimentarie presenti nell'area sono state distinte in tre principali unità idrogeologiche (Cotecchia V. et al, 1986; Celico P. et al., 1987):

1. la principale unità idrogeologica è da individuarsi nelle successioni carbonatiche dei Monti Picentini. Tale complesso, nel suo insieme, risulta altamente permeabile a causa di estesi assetti di fratture di origine tettonica influenzate, altresì, da processi carsici. Le rocce dolomitiche, in esso contenute, risultano micro-fessurate e sono relativamente meno permeabili dei calcari carsificati sovrastanti. Il complesso si comporta come un serbatoio di accumulo costantemente alimentato e rappresenta, quindi, il principale acquifero dell'area dando luogo a sorgenti con portate dell'ordine dei 3 metri cubi al secondo;
2. la seconda unità idrogeologica, in ordine di grado di permeabilità, è rappresentata dalla placcone detritico carbonatico su cui giace l'abitato di Senerchia. Il flusso idrico si colloca essenzialmente nell'ambito di livelli grossolani, con andamento fortemente influenzato dalla posizione delle aree di prelievo e di alimentazione, nonché dalla morfologia e dalla scarsa permeabilità del substrato su cui poggia. Tale substrato, infatti, è rappresentato dalle successioni sedimentarie tettonizzate della Formazione delle Argille Varicolori, appartenenti al Complesso Sicilide. Le Formazioni argillose presenti nel Complesso Sicilide costituiscono per il placcone detritico sovrastante una vera e propria barriera impermeabile;
3. la terza ed ultima unità idrogeologica è rappresentata proprio dalla formazione delle Argille Varicolori le quali sono rappresentate da

successioni che, a causa della loro composizione litologica, risultano scarsamente permeabili e nelle quali, orizzonti e livelli di maggiore permeabilità, coincidono con livelli litoidi maggiormente alterati, oppure con le parti argillose-limose più alterate e scompaginate.

Nell'area in esame, infine, è possibile riscontrare la presenza di alcune sorgenti che si manifestano al contatto tra il placcone detritico carbonatico e la Formazione della Argille Varicolori. Una di esse è collocata circa 200 metri ad Ovest della zona di monte del pendio Vadoncello (Figura 2.05). Queste sorgenti, caratterizzate da valori di portata modesti, dell'ordine di 0.2 litri/sec, risultano in diretta correlazione con falde superficiali.

2.3 - Processi deformativi nell'area

Il versante su cui ha sede la frana Vadoncello, come raffigurato in Figura 2.04, è il versante sudorientale dell'abitato di Senerchia. Lungo tale versante coesistono diverse frane, di cui alcune attualmente attive, sono riportate in Figura 2.04. Tali frane sono (Cotecchia V. et al.; 1986):

1. Serra dell'Acquara (traslazionale);
2. Vadoncello (movimento complesso);
3. Cimitero (rotazionale);
4. Pergola (rotazionale e traslazionale)

La più importante, se non altro per dimensioni, è la frana di Serra dell'Acquara. Essa si estende per una lunghezza di circa 2500 metri, una larghezza di circa 500 m con una superficie di scivolamento avente profondità massima di circa 33 metri (Cotecchia V. et al., 1986). Quindici ore dopo la forte scossa di terremoto del 23 Novembre 1980, la frana di Serra dell'Acquara subì spostamenti traslazionali nella zona di monte ad una quota tra i 475 ed i 490 metri s.l.m.. A questo evento fece seguito un processo di scivolamento tipo mudslide (Hutchinson J.N.; 1988). Dopo dieci giorni, al piede della frana, si osservò un sollevamento di circa 20 metri e, circa un mese dopo l'evento sismico, il piede stesso si mosse ulteriormente verso valle.

La porzione di monte della frana Serra dell'Acquara è delimitata a Ovest (Figura 2.04) da una faglia che delimita il placcone detritico carbonatico. Questa faglia è attraversata dalla scarpata posteriore della frana del Cimitero, che è il relitto di un corpo di frana rotazionale (Cotecchia V. et al.; 1986) con superficie di scivolamento localizzata, in profondità, nell'ambito della Formazione delle Argille Varicolori del Complesso Sicilide. Questa frana non è stata riattivata a seguito dell'evento sismico del 23 Novembre 1980, quando l'attività franosa si manifestò sul versante sinistro della frana Serra dell'Acquara nella parte di piede

della frana Vadoncello (frana sussidiaria Vadoncello del 1980) dove affiorano terreni argillosi.

Per completare la descrizione degli eventi franosi presenti nell'area si cita (Figura 2.04) la presenza, a Nord-Est dell'abitato di Senerchia, della frana della Pergola, anch'essa non riattivatasi a seguito dell'evento sismico del 1980.

Dal 1980 fino al 1993 non si sono verificati, a carico di nessuna delle citate frane, spostamenti significativi, ad eccezione per qualche piccola retrogressione della scarpata della frana Vadoncello del 1980.

Il 29 Dicembre del 1993 si manifestò, sul pendio Vadoncello, una improvvisa accelerazione dei movimenti di masse superficiali, verificandosi uno scivolamento rotazionale a monte della scarpata della frana sussidiaria del 1980, accompagnato da una colata più a valle. Il termine colata, utilizzato nel seguito per riferirsi al processo di movimento nella zona centrale del corpo della frana Vadoncello del 1993, va qui a definire un processo intermedio tra quello definito come scivolamento di fango (mudslide) da Hutchinson J.N. (1988) e quello definito colata di terra (earthflow) da Cruden D.M. e Varnes D.J. (1996) dal momento che, sebbene si verificano notevoli deformazioni nell'ambito di questa porzione della frana, il corpo della frana nella zona centrale e di valle del pendio è ancora soggetto a movimenti a blocco aventi origine profonda.

2.4 - La frana Vadoncello

2.4.1 - Geomorfologia del pendio prima del Dicembre 1993

La morfologia del versante Vadoncello prima dell'evento di frana del Dicembre 1993, è stata ricostruita in base alla topografia riportata, in scala 1:5000, in una carta topografica del 1981 e quindi successiva all'evento sismico ed agli eventi franosi del 1980.

Considerando il profilo topografico del 1981 lungo la sezione ad asse parallelo alla direzione principale del movimento franoso del 1993, riportato in Figura 2.06, le pendenze assumono i seguenti valori:

- ◆ 15°-20° nella zona tra la scarpata della frana sussidiaria del 1980 e la scarpata della frana del 1993;
- ◆ 5°-12° in corrispondenza della zona centrale della frana sussidiaria del 1980;
- ◆ 0°-5° nella zona di piede, in corrispondenza della sovrapposizione della frana Vadoncello con la frana Serra dell'Acquara.

Confrontando le rilevazioni topografiche di superficie effettuate nell'area in esame nel 1995 con quelle del 1981, l'evento del 1993 appare non avere provocato riduzioni significative nelle pendenze medie del pendio. Dopo l'evento del 1993, se si esclude la scarpata vera e propria, le pendenze nella zona di monte, hanno valori di 10°-15°, mentre nella zona di colata, ad eccezione della parte terminale, tali pendenze non superano i 10°.

La lunghezza totale della frana era, nel 1995, a seguito dell'evento del 1993, di oltre 550 m, la sua larghezza massima di circa 140 m, mentre il dislivello tra piede e corona era di circa 90 m.

2.4.2 - Evento franoso del Dicembre 1993

I principali meccanismi di rottura che hanno interessato il pendio Vadoncello dal 1993, per come apparivano nei primi mesi del 1994 (EEC Report; 1996), sono stati sostanzialmente due, l'uno localizzato a monte della scarpata della frana Vadoncello del 1980 e l'altro a valle (Figura 2.05).

Nella zona di monte, raffigurata nelle Fotografie di Figura 2.07 e 2.08, si individua un meccanismo di rottura principalmente di natura rotazionale, a cui sono associati scivolamenti più superficiali e crolli, e che coinvolge le successioni argillose e marnose con intercalazioni calcareo-marnose delle Argille Varicolori. Sul lato orientale della corona il meccanismo lambisce il detrito carbonatico ivi posizionato e che, a sua volta, giace sulla Formazione delle Argille Varicolori del Complesso Sicilide.

A causa di questa diversa natura litologica dei litotipi affioranti lungo la scarpata principale, mostrata nelle Fotografie delle Figure 2.07 e 2.09, la morfologia della nicchia di distacco è irregolare. A partire dal 1993 sino al 1996, ovvero per il periodo di osservazione nell'ambito del progetto di ricerca CEE, è stato possibile osservare un arretramento più pronunciato e repentino in corrispondenza delle zone della scarpata in cui affioravano litotipi a composizione maggiormente argillosa (Figura 2.05) che ha parzialmente interessato una casa colonica presente poche decine di metri più a Nord della scarpata del 1993 come riportato in Figura 2.05 e nella Fotografia di Figura 2.07.

Il detrito proveniente dalla rottura di monte pare alimentare la testa di una colata di notevole importanza, con canale nella zona centrale del pendio (Fotografia di Figura 2.10) e che comunque appare muoversi a blocco con notevoli deformazioni interne, suggerendo profondità non inferiori ai 7-10 m che, quindi può classificarsi come movimento complesso.

Da un punto di vista geomorfologico, risulta importante osservare che la zona di piede e di accumulo della frana Vadoncello si sovrappone al corpo della frana principale di Serra dell'Acquara. Questa interazione al piede ovviamente influenza notevolmente il comportamento complessivo del pendio Vadoncello e sarà considerata in fase di definizione delle condizioni al contorno del modello

numerico del pendio Vadoncello nei modi discussi al successivo Paragrafo 6.1.6.

Alla luce di quanto affermato, quella di Vadoncello può essere considerata una frana complessa e composita, composta da un meccanismo di frana rotazionale a monte e da un meccanismo di colata classificabile come uno scorrimento di fango (mudslide) secondo Hutchinson J.N. (1988) o, altrimenti, colata di terra (earthflow) secondo Cruden D.M. e Varnes D.J. (1996).

CAPITOLO 2

FIGURE E TABELLE

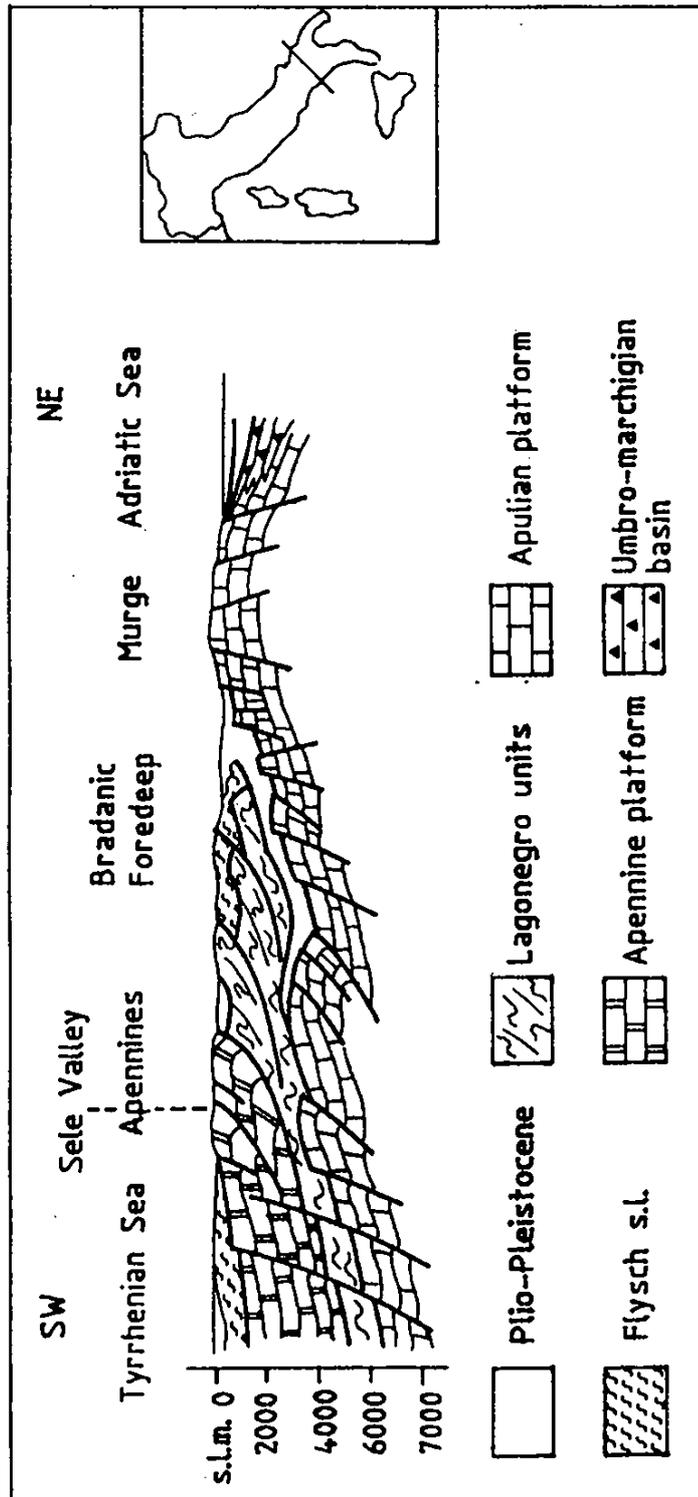


Figura 2.01 - Sezione geologica schematica degli Appennini meridionali

(Sella M. et al; 1988)

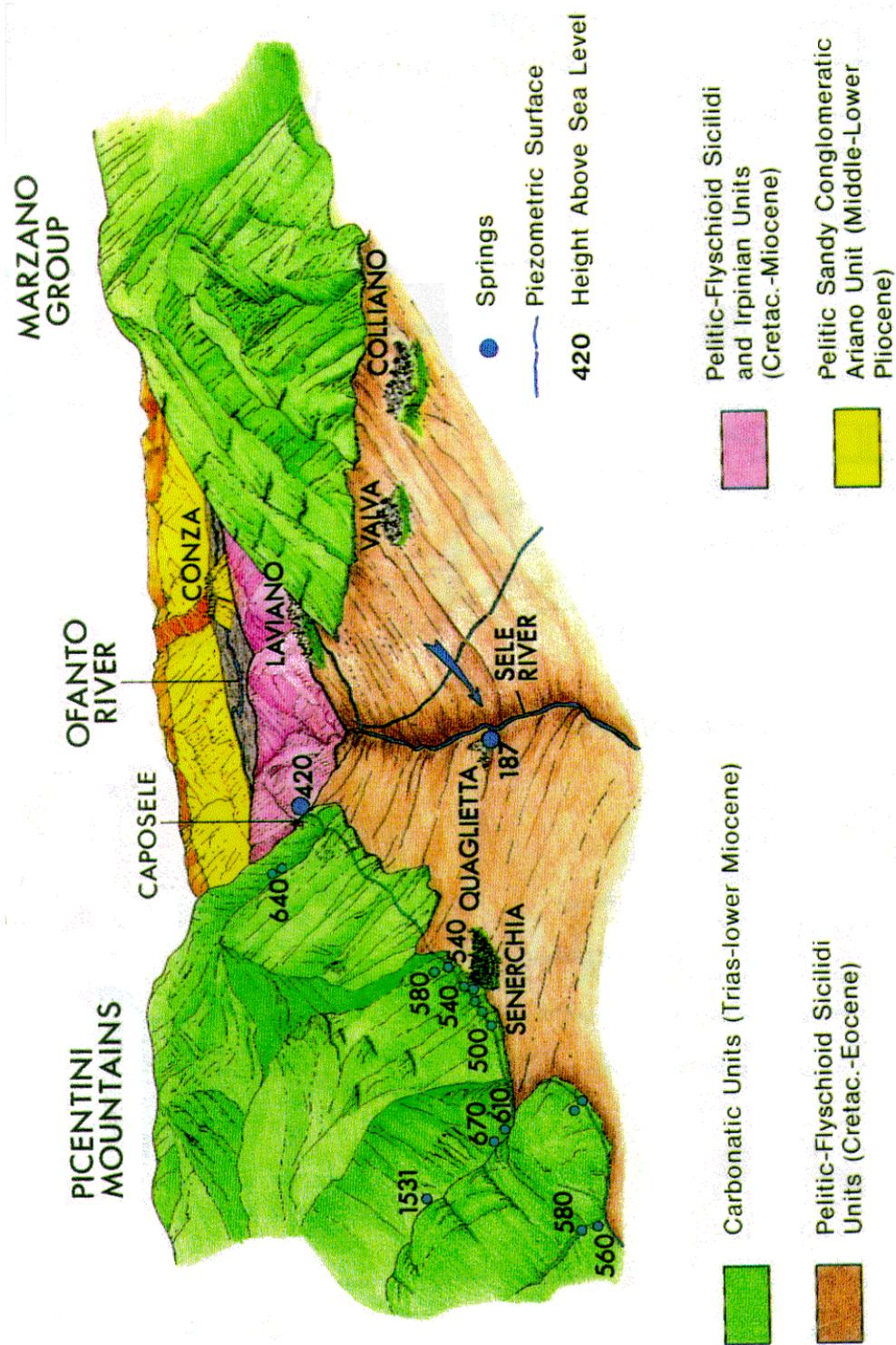
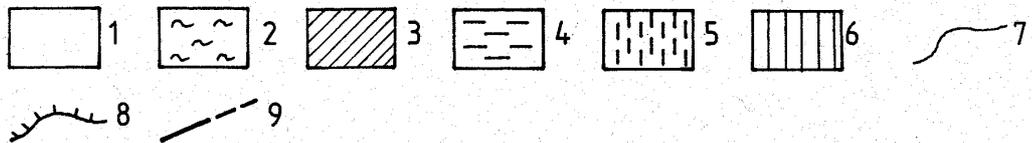
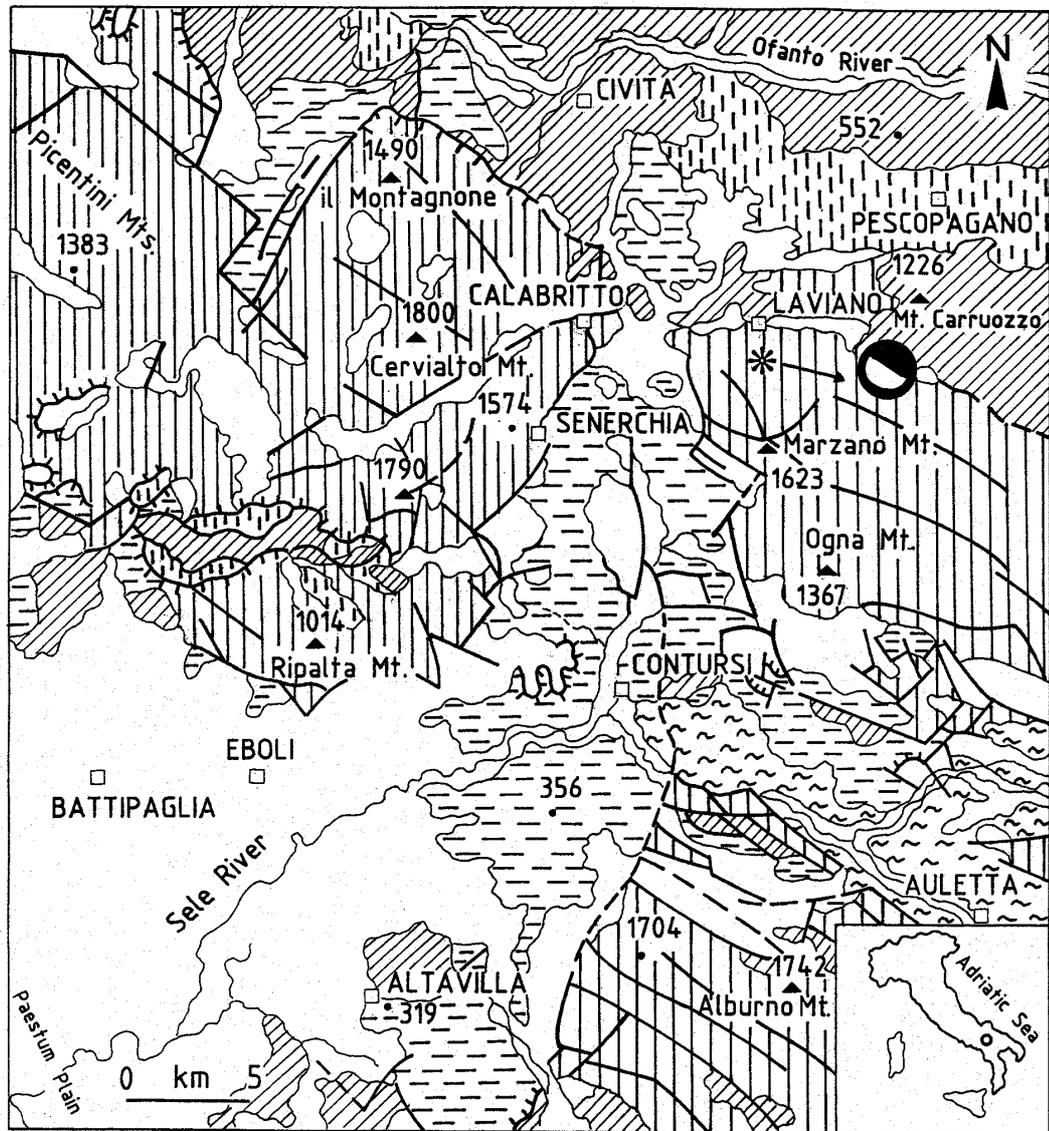


Figura 2.02 - Vista schematica dell'alta valle del Fiume Sele

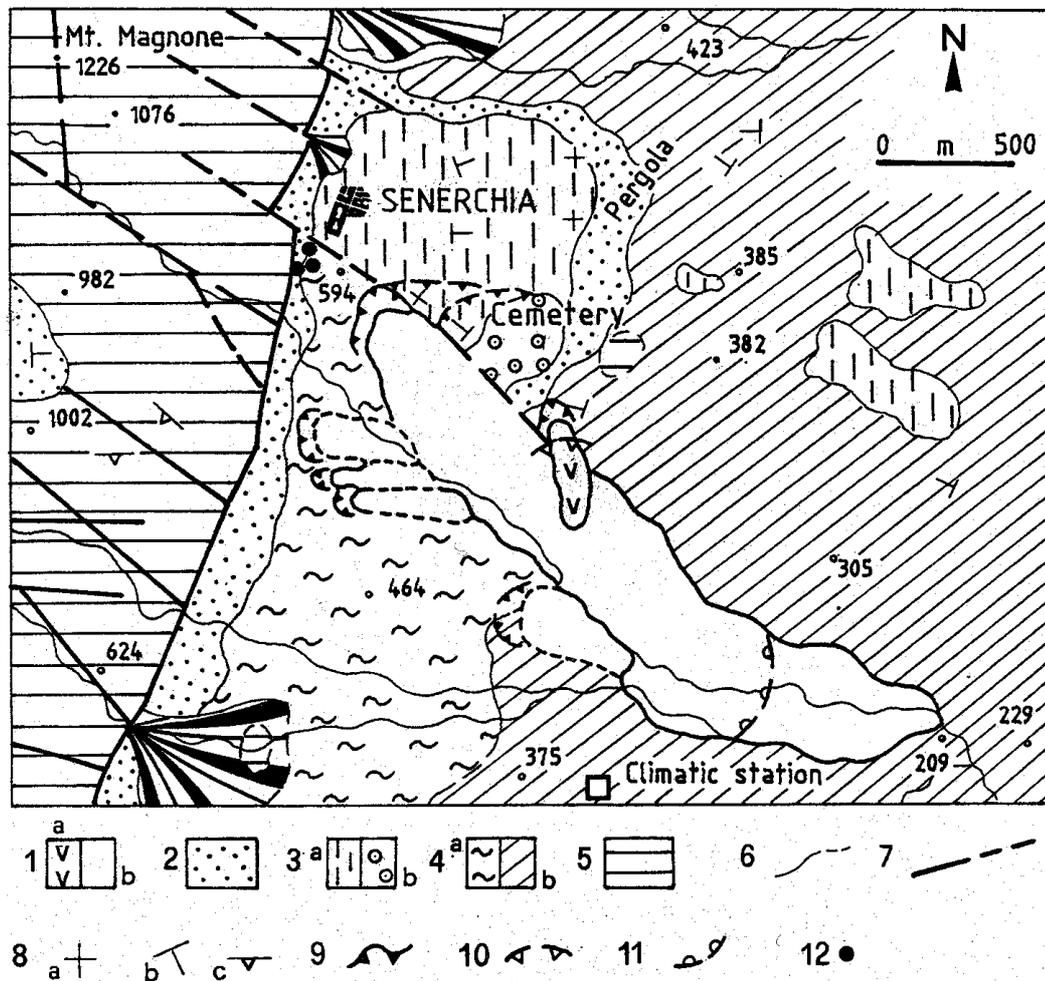
(Cotecchia V. et al.: 1986)



1: depositi sedimentari Quaternari; 2: depositi di fossa (unità di Calvello; Pleistocene Inferiore-Pliocene Inferiore); 3: unità litologiche neogeniche; 4: Complesso Sicilide (Miocene Inferiore-Cretaceo); 5: II unità di Lagonegro (Oligocene-Triassico Inferiore); 6: unità carbonatica (Eocene-Triassico Superiore); 7: contatto stratigrafico; 8: contatto tettonico; 9: faglia.

Figura 2.03 - Carta geologica dell'alta valle del Fiume Sele

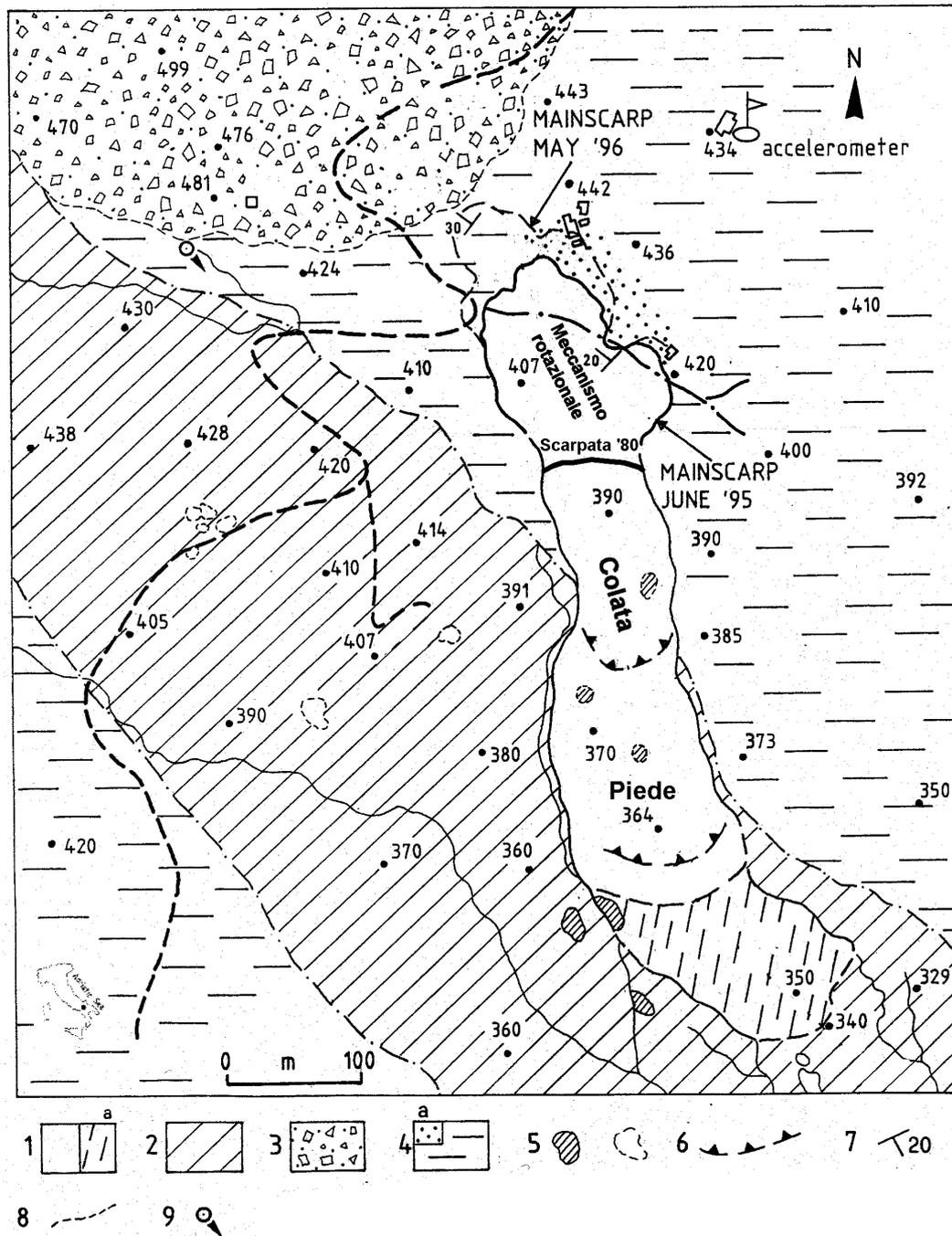
(Bonardi G. et al.; 1988)



- 1: Frana Vadoncello (a) e Frana Serra dell'Acquara (b); 2: detrito sciolto, depositi eluviali e colluviali; 3: placcone detritico carbonatico (a) e depositi di megabrecce (b); 4: Formazione delle Argille Varicolori (Paleogene-Cretaceo Superiore) con strati o blocchi calcareo-marnosi (a) e interstrati di calcare, di marne e argille (b); 5: unità Picentina (Cretaceo-Triassico Superiore) calcari e calcari dolomitici; 6: contatto stratigrafico; 7: faglia; 8: inclinazione di strati (a) 0°-10°, (b) 10°-45°, (c) >45°; 9: corona di frana; 10: corona della Frana Vadoncello del 1980; 11: piede riattivato della Frana Serra dell'Acquara del 1980; 12: sorgenti principali.

Figura 2.04 - Carta geologica dell'area di Senerchia

(Santaloia F. et al.; 1999)



1: Frana Vadoncello 1993-1995 con sovrapposizione alla Frana Serra dell'Acquara (a); 2: Frana Serra dell'Acquara; 3: placcone detritico carbonatico; 4: Formazione delle Argille Varicolori con detriti calcarei flottanti (a); 5: pozze d'acqua stagionali; 6: piedi intermedi; 7: inclinazione degli strati; 8: contatto stratigrafico; 9: sorgenti.

Figura 2.05 - Carta geomorfologica delle Frane Vadoncello e Serra dell'Acquara

(EEC Report; 1996)

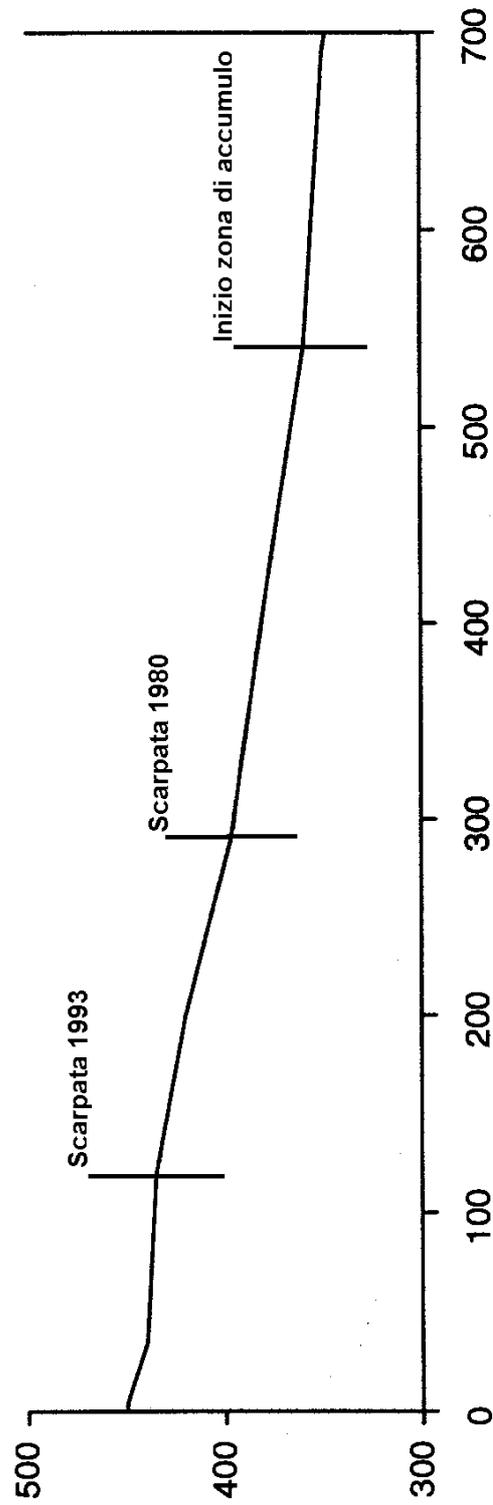


Figura 2.06 - Profilo topografico Frana Vadoncello pre 1993



Figura 2.07 - Vista dall'alto della corona della Frana Vadoncello del 1993



Figura 2.08 - Vista parziale della corona della Frana Vadoncello del 1993



Figura 2.09 - Vista della scarpata della Frana Vadoncello del 1993



Figura 2.10 - Vista della zona di canale della Frana Vadoncello del 1993

CAPITOLO 3

INDAGINI E MONITORAGGI IN SITO

3.1 - Introduzione

Il pendio oggetto della presente ricerca è stato sottoposto ad indagini e monitoraggi nell'ambito di un progetto di ricerca finanziato dalla Comunità Economica Europea (EEC Report; 1996) che si proponeva di studiare, in un'area sismica, l'incidenza dei fattori climatici sull'evoluzione delle frane, allo scopo essenzialmente di individuare criteri di predizione dei movimenti franosi che potessero essere applicati per scopi di protezione civile nonché di utilizzo del territorio

Durante questo progetto di ricerca, l'intero versante orientale dell'abitato di Senerchia (AV), nell'alta valle del Sele, fu oggetto di un intenso programma di indagini e monitoraggi che possono racchiudersi in due categorie: indagini e monitoraggi in superficie ed indagini e monitoraggi in profondità.

L'insieme dei dati disponibili quale risultato di questa ricerca e del suo proseguimento nel 1997-1998 e nel 1999 (Santaloia F. et al.; 1999), sarà utilizzato nel corso della presente ricerca con duplice finalità, da una parte quella di ottenere indicazioni geologiche, idrogeologiche e geotecniche per impostare la parte numerica della ricerca stessa, dall'altra parte di definire termini di confronto per i meccanismi di deformazione di pendio risultanti dall'analisi numerica. Attraverso questo confronto sarà quindi possibile o meno validare sia le scelte modellistiche effettuate, di cui si discuterà nei prossimi Capitoli 4 e 6, sia la metodologia adottata discussa nel Capitolo 1 e 6.

3.2 - Monitoraggi di superficie

Nel periodo 1994-1996 fu condotta un'intensa campagna di rilievi topografici successivamente ripresa nel 1998. Alla campagna topografica tradizionale fu affiancato anche un monitoraggio topografico con apparecchiature GPS di precisione di cui in Figura 3.01 si riporta la rete di riferimento. Tale tecnica, ancora in fase di sviluppo, è risultata sufficientemente precisa ed economicamente vantaggiosa per evidenziare movimenti anche molto piccoli, ma i risultati ottenuti sono risultati di un livello ancora poco adeguato per gli scopi della presente ricerca.

3.2.1 - Monitoraggio topografico

Basandosi sui risultati di uno studio geomorfologico preliminare (Wasowski J.; 1994) del pendio Vadoncello, dopo l'evento franoso verificatosi nel 1993 allo scopo di effettuare un dettagliato rilievo morfologico di superficie, nonché di controllare i movimenti della frana, fu progettata e realizzata una rete di controllo topografico rappresentata in Figura 3.02. La rete originariamente consisteva in un sistema di cinque capisaldi T1-T5, denominati stazioni di controllo, che formavano una rete di triangolazione. Una ulteriore stazione di controllo T5bis fu aggiunta in seguito per sopperire alla perdita della stazione T5 per effetto di un allargamento della corona del pendio verificatosi agli inizi del 1996. La rete delle cinque stazioni di controllo fu utilizzata come riferimento per effettuare misurazioni su ventinove punti (picchetti) distribuiti nell'area interessata dai movimenti di frana. Ulteriori punti di misura sono rappresentati dalla testa delle diverse perforazioni realizzate nell'ambito della frana (Figura 3.02).

Il monitoraggio, effettuato mediante quattro cicli di misurazioni che hanno coperto un arco di tempo di quattordici mesi (dal Marzo 1995 al Maggio 1996), ha fornito precise ricostruzioni morfologiche sia secondo la sezione longitudinale principale del pendio, sia secondo cinque sezioni trasversali posizionate come indicato in Figura 3.03. Il monitoraggio topografico ha altresì fornito misurazioni degli spostamenti orizzontali e verticali dei diversi punti di misura nel corso del

tempo.

In Figura 3.04 sono schematicamente riportati i tre profili topografici longitudinali ai quali ci si riferisce nel seguito.

Allo scopo di effettuare confronti con la situazione morfologica precedente l'evento franoso del 1993, prendendo a base l'unica fonte disponibile rappresentata dalla carta topografica in scala 1:5000 datata 1981, è stato ricostruito, secondo la stessa sezione longitudinale di Figura 3.03 un profilo topografico in data 1981 (Figura 3.04A).

La prima ricostruzione topografica direttamente rilevata secondo la sezione longitudinale di Figura 3.03, risale al Gennaio 1995 ed è riportata schematicamente in Figura 3.04B. Lungo la sezione scelta, le misure sono state effettuate con una cadenza di 15-30 m, dando luogo ad una restituzione molto dettagliata della morfologia. In seguito, con metodologia del tutto simile, sono stati tracciati altri tre profili topografici longitudinali di cui due nel 1995 ed uno nel Maggio 1996 riportato in Figura 3.04C.

Il confronto tra il profilo pre-1993 ed il profilo Gennaio 1995 evidenzia come l'evento franoso del 1993 abbia procurato una significativa retrogressione della scarpata principale, di circa 105 m.

Il confronto tra il profilo Gennaio 1995 e Maggio 1996 mostra come le principali modificazioni morfologiche abbiano interessato l'area di monte, cosa questa direttamente collegabile alla natura retrogressiva della frana del 1993.

L'analisi dei dati topografici (EEC Report; 1996) ha consentito di identificare tre aree principali nell'ambito del pendio Vadoncello caratterizzate da spostamenti orizzontali quasi uniformi nell'ambito di ciascuna area. Queste aree (A, B e C) sono riportate in Figura 3.05 (Santaloia F. et al.; 1999) in cui sono riportati i valori minimi e massimi degli spostamenti e le velocità medie degli stessi spostamenti misurati in corrispondenza di ciascuno dei quattro cicli di misurazioni effettuati. Le velocità di spostamento nelle aree A e B rispettivamente riguardano il fenomeno di retrogressione a monte e quello di colata della Frana Vadoncello, mentre, nell'area C, riguardano la zona di accumulo della colata della Frana Vadoncello e, in parte, il deposito della Frana Serra dell'Acquara. I valori più

elevati di velocità di spostamento si sono manifestati nell'area B durante il secondo periodo di osservazione, tra il 18 Maggio ed il 23 Giugno 1995 (maggiori di 30 metri al mese), mantenendosi ancora molto elevati (circa 20 metri al mese) nel terzo periodo di osservazione, tra il 23 Giugno ed il 14 Ottobre 1995, quando si sono avute le massime velocità di spostamento sia nell'area B sia nell'area C. Da questa analisi si desume come la Frana Vadoncello abbia avuto una attività media massima nel periodo tra la fine di Giugno e la fine di Ottobre 1995 rispetto all'intero periodo di osservazione.

La direzione assunta dagli spostamenti (Figura 3.05) mostra che nella zona C, ed a maggior ragione nella parte di sovrapposizione della frana Vadoncello con la frana Serra dell'Acquara, velocità dell'ordine dei cinque centimetri al mese hanno avuto direzione simile a quella della massima pendenza del corpo di frana di Serra dell'Acquara, differenziandosi dalla direzione assunta dagli spostamenti lungo tutto il resto della Frana Vadoncello. Analogamente per la stazione di controllo T4, posizionata al di fuori della frana Vadoncello e del pendio Serra dell'Acquara, si sono registrati spostamenti in direzione ancora della massima pendenza del pendio Serra dell'Acquara anche se di entità più limitata (circa un centimetro al mese). Queste ultime due osservazioni dimostrano che la Frana Serra dell'Acquara continua a muoversi nella sua direzione, influenzando il piede del pendio Vadoncello ed influenzandone, probabilmente, la stessa attività franosa. Questo aspetto verrà preso in considerazione nel definire le condizioni al contorno della modellazione numerica condotta nei modi discussi nel successivo Paragrafo 6.1.5, per tenere conto, appunto, dell'effetto del trascinamento al piede della Frana Vadoncello da parte della più grande Frana Serra dell'Acquara.

Si configurerebbero, quindi, due meccanismi di movimento: uno superficiale e più veloce riguardante essenzialmente il pendio Vadoncello e l'altro, più lento e profondo, riguardante essenzialmente il corpo del pendio di Serra dell'Acquara.

3.2.2 - Monitoraggio del clima

Polemio M. (1997) ha condotto un'analisi statistica dei dati relativi ai periodi di ritorno delle piogge giornaliere cumulate per intervalli di tempo compresi tra 1

e 180 giorni volta a caratterizzare gli effetti delle precipitazioni piovose sull'attività delle frane presenti nell'area di Senerchia. Questa analisi ha dimostrato che il periodo di ritorno di eventi piovosi verificatisi nei giorni immediatamente precedenti la riattivazione delle stesse frane è notevolmente inferiore ai 10 anni. In particolare, prima dell'evento franoso verificatosi sul pendio Vadoncello nel Dicembre del 1993, i dati riportati in Figura 3.06 (Polemio M.; 1997) dimostrano, evidenziando periodi di ritorno molto bassi (minori di 2 anni), che gli eventi piovosi non possono, da soli essere visti come la causa dell'improvvisa riattivazione della Frana Vadoncello.

Allo scopo di indagare sull'influenza dei processi climatici sullo sviluppo dei processi deformativi nel pendio Vadoncello, agli inizi del Marzo 1995 fu installata in prossimità dello stesso pendio, una stazione climatica ad acquisizione automatica (Polemio M.; 1996) dotata di un pluviometro, di uno strumento per la misurazione delle precipitazioni nevose, di un termometro e di un evaporimetro.

La stazione climatica è rimasta operativa per circa 500 giorni.

L'insieme dei dati raccolti nel corso dell'intera campagna di monitoraggio, corrispondenti a circa 400 giorni di misura ha permesso di desumere le seguenti osservazioni (Polemio M. e Trizzino R; 1999):

1. l'evento piovoso massimo giornaliero è stato di circa 51 mm;
2. la media delle precipitazioni piovose è stata di circa 2 mm;
3. la percentuale di giorni piovosi è stata del 34%
4. l'estate del 1995 è stata, rispetto a dati medi stagionali, particolarmente secca ed è stata seguita da improvvise ed intense piogge agli inizi della stagione invernale;
5. l'evaporazione giornaliera massima è stata di 33 mm, con un totale di circa 1100 mm, concentrati per la maggior parte nel periodo Marzo-Settembre 1996;
6. la minima temperatura rilevata è stata di -4° C con un massimo di circa 28°

C;

7. nel periodo invernale, non solo il valore medio, ma anche le variazioni di temperatura giornaliere, sono risultate più contenute delle corrispondenti valutate nel periodo estivo
8. nel periodo di monitoraggio non si sono verificate nevicate.

Dalle osservazioni precedenti e, in particolare delle osservazioni 4, 5 e 7, si può desumere come la massima attività della frana Vadoncello in termini di spostamenti, verificatasi nel periodo Giugno-Ottobre 1995 è stato, da un punto di vista climatico, un periodo secco. Questa osservazione, a sua volta, permette di dedurre che il meccanismo deformativo in atto nel pendio Vadoncello a seguito degli eventi del 1993, non possa essere direttamente collegabile agli eventi piovosi. Come si discuterà nel seguente Paragrafo 3.3.4, questi eventi, però, condizionano il flusso idrico all'interno del complesso idrogeologico più superficiale presente nell'ambito dei materiali in colata influenzando il movimento di quest'ultima.

3.2.3 - Monitoraggio dell'attività sismica

L'area in cui è situato il pendio Vadoncello è caratterizzata da periodi di attività sismica anche abbastanza intensa, seguiti da periodi di relativa quiescenza.

L'evento sismico del 23 Novembre 1980 con epicentro in Laviano (Figura 2.04), magnitudo $M_s = 6.9$, accelerazione 0.33 g registrata a Sturno e durata 70 secondi (Cotecchia V. et al.; 1986), si stima, in base ai dati disponibili, che sia solo uno dei circa dieci eventi sismici con accelerazione superiore a 0.1 g che, negli ultimi 500 anni, si sia verificato nella zona (del Gaudio V. et al.; 1997).

Durante il periodo 1993-1996 l'intera area è stata soggetta a numerosi eventi sismici minori. Uno dei periodi in cui si è manifestata un'intensa attività sismica è quello che copre la primavera e l'estate del 1996.

Il 3 Aprile 1996, alle ore 13:04:35 (EEC Report; 1996) con epicentro

equidistante tra gli abitati di Caposele e Senerchia (Figura 2.04), a circa 30 km dall'abitato di Senerchia, si è verificato l'evento sismico più importante del periodo di osservazione avente magnitudo 4.3 (Del Gaudio V. et al.; 1997). Le registrazioni effettuate a Caposele hanno fornito una durata di 15-20 secondi e picchi di accelerazione di 0.030 g, 0.036 g e 0.026 g rispettivamente per le componenti verticale, Nord ed Est. Lo stesso evento, registrato per mezzo di un sismografo installato in prossimità del pendio Vadoncello (Del Gaudio V. et al.; 1997) ha fornito una durata di 20-25 secondi con picchi di accelerazione non molto diversi da quelli registrati a Caposele e pari a 0.023 g, 0.043 g e 0.041 g rispettivamente in direzione verticale, Nord ed Est.

D'altra parte, nel corso del 1995, tra i mesi di Febbraio e Marzo fu monitorata, nell'area di Senerchia, un'attività sismica iniziata con un evento di magnitudo 2.4 seguito, a breve distanza di tempo, da un altro evento di magnitudo 3.4 culminata con una scossa di magnitudo 3.6 il 19 Marzo. Nell'arco dei cinque mesi successivi, hanno fatto seguito circa 30 scosse di magnitudo compresa tra 1.9 e 2.9.

Allo scopo di valutare le possibili influenze di eventi sismici di tale rilievo nei riguardi dei movimenti di massa nell'area e in particolare sul pendio Vadoncello, Calcagnile G. et al. (EEC Report; 1996) hanno verificato, relativamente al periodo 1991-1995 se un'attività sismica come quella descritta rientra nella sismicità media dell'area. In Figura 3.07 è rappresentata la distribuzione degli eventi sismici verificatisi nel periodo 1991-1995 nell'area dell'Irpinia. In Figura 3.08, sono, invece, riportati solo gli epicentri degli eventi sismici aventi magnitudo superiore a 3.0. La comparazione tra questa ultima Figura 3.08 e la precedente Figura 3.07, consente di desumere come la maggior parte degli eventi riportati nella Figura 3.07 abbiano entità abbastanza ridotta. L'analisi della distribuzione temporale degli eventi sismici condotta sempre da Calcagnile et al. (EEC Report; 1996), nell'arco del quinquennio di analisi 1991-1995, ha mostrato come nel Febbraio 1995, in effetti, vi sia stato un picco nell'attività sismica rispetto alla media mentre, nel Dicembre 1993, periodo di attivazione della frana Vadoncello, si è osservato un minimo in tale attività.

Le osservazioni appena riportate conducono alla formulazione dell'ipotesi che non sia possibile stabilire una immediata e diretta correlazione temporale tra attività sismica e movimenti di massa sul pendio Vadoncello. Viceversa, gli eventi sismici, non particolarmente intensi ma frequenti, sottoponendo i terreni presenti nell'ambito del pendio Vadoncello a continue variazioni di carico. Considerate le caratteristiche meccaniche di questi materiali, di cui si discuterà al Paragrafo 4.4, queste continue sollecitazioni sismiche possono essere la causa del lento meccanismo profondo di cui si discuterà al paragrafo 3.6.

3.3 - Indagini e monitoraggi in profondità

La ricostruzione degli assetti stratigrafici, piezometrici e deformativi nel pendio Vadoncello è stata svolta mediante la terebrazione di sondaggi e la installazione di strumentazione come discusso nel seguito.

3.3.1 - Posizionamento dei sondaggi e fasi di monitoraggio

I sondaggi profondi sono stati terebrati in due fasi successive, la prima delle quali nel Novembre 1994 e la seconda alla fine del 1995. Un gran numero di apparecchiature installate durante la prima fase di sondaggi è andata quasi immediatamente persa a causa della repentina accelerazione degli spostamenti della Frana Vadoncello avvenuta nei primi mesi del 1995. Per questa ragione, i sondaggi nella seconda fase sono stati terebrati in zone caratterizzate da basse velocità di spostamento, allo scopo di garantire agli stessi un più lungo periodo di operatività.

In Figura 3.09 si riporta una planimetria della zona in studio recante l'indicazione della posizione dei sondaggi, indicando con le lettere I e P rispettivamente i sondaggi in cui sono state installate apparecchiature inclinometriche oppure piezometriche.

In Tabella 3.01 (EEC Report; 1996), si riportano, per ogni sondaggio terebrato, le profondità di perforazione nonché la tipologia e le profondità di installazione delle apparecchiature di indagine.

Durante la prima fase furono realizzate otto perforazioni distribuite essenzialmente lungo l'asse longitudinale del corpo di frana in direzione del movimento principale; sei di queste perforazioni, eseguite in zone del pendio caratterizzate da elevate velocità di spostamento, sono andati rapidamente persi.

I due sondaggi, eseguiti nella regione di piede (P1-I1), hanno una distanza mutua di circa 30 metri e raggiungono la profondità di circa 40 metri. Una delle due perforazioni (P1) è stata equipaggiata con due piezometri Casagrande e l'altra (I1) con un inclinometro.

In modo del tutto analogo altre due coppie di sondaggi (P2-I2 e P3-I3) sono stati realizzati nella zona centrale del corpo di frana. I sondaggi della coppia P2-I2, hanno raggiunto profondità di 32 metri e 23 metri rispettivamente, mentre i sondaggi della coppia P3-I3, posizionati più a monte rispetto alla coppia P2-I2, hanno raggiunto profondità di circa 22 metri. I sondaggi P2 e P3 sono stati equipaggiati con piezometri elettrici e Casagrande, mentre i sondaggi I2 ed I3 con inclinometri.

Vista la natura retrogressiva della frana, è stato realizzato, raggiungendo la profondità di 35 metri, il sondaggio I4, attrezzato con un inclinometro, nella zona della corona, in una posizione presumibilmente predisposta al coinvolgimento da parte dei meccanismi retrogressivi.

Infine, con lo scopo di indagare gli apporti idrici profondi provenienti da monte, è stato realizzato il sondaggio P4, di 57 metri di profondità, in una zona molto più a monte rispetto alla scarpata del 1993. Tale perforazione è stata attrezzata con piezometri elettrici e Casagrande

Durante la prima fase di indagine, nei sondaggi furono prelevati ventidue campioni indisturbati utilizzando campionatori Osterberg, Mazier e Shelby, oltre ad un notevole numero di campioni disturbati. Questi campioni sono stati quindi sottoposti a prove di laboratorio, di cui si discuterà nel successivo Capitolo 4.

Immediatamente dopo la fine della prima campagna di perforazioni, durante la Primavera-Estate del 1995, la frana manifestò una notevole evoluzione come evidenziato dal monitoraggio topografico discusso nel precedente Paragrafo 3.2.1. La ripresa dell'attività con notevoli accelerazione dei movimenti di pendio portò alla perdita, appunto, di un gran numero degli inclinometri e piezometri dapprima elencati.

Sette perforazioni furono successivamente realizzate nel 1996 con profondità variabili da 22 a 52.7 metri nelle tre aree della frana di corona, di piede e a valle del piede. Per quanto riguarda le perforazioni attrezzate con inclinometri, due furono eseguite nella zona della corona (I5 ed I6), con profondità di 36.0 e 40.2 metri, ed un'altra, con profondità di 33.0 metri, a valle del piede della frana, ma all'interno del corpo di frana di Serra dell'Acquara (I7). Le quattro perforazioni

attrezzate con piezometri furono realizzate una nella regione della corona (P5: 52.7 metri, piezometri elettrici), una al piede (P6: 23.0 metri, piezometri elettrici) ed una a valle della zona di piede (P7: 22.0 metri, piezometro a tubo aperto), cui si aggiunge la perforazione P5bis nella zona di monte (52.0 metri, piezometro a tubo aperto) nelle immediate vicinanze delle perforazione P5 in sostituzione di quest'ultima, le cui apparecchiature non hanno mai funzionato. Inoltre, al fondo del foro I5 è stato installato un piezometro elettrico.

Durante questa fase della campagna geognostica furono prelevati 11 campioni indisturbati a varie profondità, utilizzando campionatori Osteberg e Mazier oltre, ancora una volta, ad un notevole numero di campioni disturbati. Anche questi campioni, come quelli della prima fase, sono stati sottoposti a prove di laboratorio (Capitolo 4).

A tutto l'insieme di perforazioni elencato va aggiunta una perforazione (N1), effettuata in prossimità del sondaggio P4, con la quale, per mezzo di una sonda nucleare a raggi gamma, sono state indagate le variazioni della densità relativa e del contenuto naturale d'acqua con la profondità.

3.3.2 - Profili stratigrafici

Le perforazioni eseguite sia durante la prima fase di sondaggi sia durante la seconda furono del tipo a carotaggio continuo. Questo al fine di ricostruire le stratigrafie lungo le verticali di perforazione e di desumere la sezione litostratigrafica del pendio.

Dalle prime ricostruzioni litostratigrafiche effettuate in base ai dati ottenuti nella prima fase di sondaggi (Wasowski J.; 1995) è stato possibile desumere che, a profondità elevate, è possibile riconoscere una sequenza di torbiditi carbonatiche, marnose ed argillose.

I sondaggi della seconda fase, considerata la loro ubicazione predominantemente a monte, hanno consentito di estendere questa evidenza anche a questa zona del pendio.

La correlazione tra i profili litostratigrafica tra i diversi sondaggi è risultata

notevolmente complessa a causa della frequente intercalazione di strati differenti, di limitata estensione laterale come conseguenza dei processi tettonici che ne hanno comportato la dislocazione dando luogo (Wasowski J.; 1995) a caotiche variazioni con la profondità di rocce e terreni. Questo aspetto è evidenziato nelle Figure 3.10, 3.11 e 3.12 (EEC Report; 1996) nelle quali sono riportate le ricostruzioni stratigrafiche relative alle perforazioni P4 (zona di monte), P2 (zona di corpo) e P1 (zona di Piede) esemplificative della caotica successione di strati in generale riscontrata per mezzo delle indagini in profondità del pendio Vadoncello.

Un attento studio delle ricostruzioni stratigrafiche ha però permesso di identificare definite alternanze e/o successioni di strati nell'ambito del pendio che sono state distinte in Complessi come discusso nel successivo Paragrafo 3.5.

3.3.3 - Monitoraggi inclinometrici

Come anzidetto, nel corso della prima campagna geognostica quattro perforazioni, I1, I2, I3 e I4 (Figura 3.09), furono equipaggiate con tubi inclinometrici. La profondità di questi inclinometri era, rispettivamente, di 36.30, 17.50, 20.50 e 33.00 m.

Al fondo di ciascuno dei citati tubi inclinometri, fu posizionato un corpo morto costituito da un tubo metallico di diametro 50 mm e lunghezza 100 cm, in modo tale da identificare le zone di deformazione più profonde di piegamento dell'inclinometro ove, invece, la sonda inclinometrica ne identifica le zone di piegamento superiori. In tal modo si è potuto sfruttare al massimo gli inclinometri nella definizione locale delle profondità ed ampiezze delle bande di taglio.

Le letture inclinometriche ebbero inizio nel Marzo 1995.

Sin dall'inizio delle misurazioni, l'inclinometro I3 (collocato nella parte di alimentazione della colata) risultò inutilizzabile a causa di un'occlusione verificatasi a circa 5.0 m di profondità e dovuta ad un movimento di terra superficiale originatosi nella parte Ovest della scarpata.

L'11 Maggio 1995, nell'inclinometro I4 non fu possibile far scendere al di sotto di circa 9.0 m la sonda inclinometrica, mentre era ancora possibile far

risalire il corpo morto lasciato al fondo.

Nello stesso periodo nell'inclinometro I2 si registrò un'occlusione ad una profondità di circa 4.5 m e, contemporaneamente, il blocco della risalita del corpo morto.

Il 22 Maggio 1995 nell'inclinometro I4 non fu possibile far risalire il corpo morto lasciato sul fondo del foro oltre i 15.0 m.

Il 2 Giugno 1995 nell'inclinometro I1 si iniziarono a riscontrare notevoli difficoltà nel far superare alla sonda inclinometrica la profondità di 16-17 m fino a quando, il 26 Agosto 1995, questo inclinometro risultò completamente ostruito a questa profondità (Paragrafo 3.4.3).

Durante la seconda fase i sondaggi I5, I6 e I7 furono attrezzati, con tubi inclinometrici.

Anche in questa fase, al fondo di ciascuno dei tubi citati, venne lasciato un corpo morto. Nel Marzo 1996 iniziarono le letture inclinometriche relative a questa seconda fase di sondaggi che si protrassero fino al Settembre 1996. Durante questo periodo non furono registrate deformazioni significative in nessuno dei tre inclinometri installati I5, I6 ed I7 (Figura 3.09). Per quanto riguarda i due inclinometri di monte (I5 ed I6) ciò è evidentemente dovuto ad un rallentamento nella velocità di retrogressione della frana.

Meno chiara è l'assenza di deformazione registrata dall'inclinometro I7 posizionato a valle del piede della frana Vadoncello nel corpo della frana Serra dell'Acquara. La causa potrebbe ricercarsi o nell'intervallo temporale di misurazione troppo breve, oppure nello scarso approfondimento dell'inclinometro stesso che per ragioni tecniche fu arrestato a 24 m invece dei 35 m programmati in base allo spessore della frana Serra dell'Acquara (Cotecchia V. et al.; 1986).

3.3.4 - Monitoraggi piezometrici

Nel corso della prima fase di sondaggi, furono installati nove piezometri di Casagrande nelle quattro perforazioni P1, P2, P3 e P4 e sei piezometri elettrici

nelle tre perforazioni P2, P3 e P4 (Figura 3.09 e Tabella 3.01). In particolare i piezometri Casagrande furono collocati due in P1 (17.5 m e 21.2 m), due in P2 (7.8 m e 15.5 m), due in P3 (8.5 m e 15.8 m) e tre in P4 (12.0 m, 18.8 m e 34.0 m) mentre i piezometri elettrici furono installati due in P2 (7.30 e 15.30 m), due in P3 (8.30 e 15.50 m) e due in P4 (28.30 e 46.00 m).

Nel corso della seconda campagna di sondaggi, avendo rilevato nella prima fase di monitoraggio che i piezometri Casagrande non avevano fornito le risposte agli eventi piovosi altrimenti rilevate dai piezometri elettrici, sono stati installati prevalentemente piezometri di quest'ultimo tipo che, effettuando misure automatiche con tempi variabili dai 30 minuti alle 6 ore, potevano registrare rapide variazioni nei livelli piezometrici conseguenti agli eventi piovosi. In particolare (Figura 3.09) furono installati due piezometri a tubo aperto in P5bis e P7, due piezometri elettrici in P5 e due in P6 (14.0 e 20.0 metri) (Tabella 3.01).

La scelta delle profondità a cui posizionare i piezometri fu effettuata sulla base delle caratteristiche di permeabilità dei materiali incontrati nelle perforazioni di modo che i piezometri fossero posti in corrispondenza di zone caratterizzate da maggiore permeabilità (brecce carbonatiche, marne siltose fratturate)

Il monitoraggio piezometrico della frana Vadoncello ebbe inizio nel Febbraio 1995 e tutti i piezometri Casagrande furono persi entro il Luglio 1995, mentre i piezometri elettrici hanno avuto una vita più lunga perché i cavi elettrici non risultavano essere interessati dal tranciamento del tubo in PVC di rivestimento del sondaggio e potevano scorrere adattandosi alle deformazioni degli stessi tubi. (Polemio M.; 1996).

Le letture nel piezometro al piede della frana, P1 hanno ivi rilevato un unico livello di falda abbastanza stabile nel tempo. Questo piezometro è stato perso a metà Estate 1995.

Il piezometro P4 posizionato nella zona della corona, ha mostrato la presenza di tre livelli di falda stabili di cui uno estremamente superficiale a profondità di circa 2.0 metri. Questo piezometro è stato perso nel Luglio 1995 a causa di una repentina retrogressione della frana.

In generale i dati piezometrici rilevati dai piezometri più profondi (Tabella

3.01) definiscono un complesso idrogeologico profondo caratterizzato da livelli piezometrici variabili tra 12.8 e 15.0 metri di profondità sotto il piano campagna. I piezometri elettrici installati in questo complesso idrogeologico non hanno mai mostrato variazioni nel livello piezometrico in concomitanza con gli eventi piovosi intensi e di breve durata registrati dalla stazione climatica installata nelle immediate vicinanze del pendio Vadoncello (Paragrafo 3.2.2).

Viceversa, le letture dei piezometri a profondità inferiori nel corpo di frana, localizzati intorno ai 7.0-9.0 metri sotto il piano campagna, identificano un complesso idrogeologico collocato nell'ambito dei materiali di colata, caratterizzati da elevati valori di permeabilità in grande. Il flusso idrico nell'ambito di questo complesso idrogeologico risulta caratterizzato da livelli piezometrici non costanti nel tempo ed appare essere notevolmente influenzato dagli eventi piovosi, come mostrato in Figura 3.13 in cui si riportano le letture del piezometrico elettrico posizionato nel sondaggio P2 (Figura 3.09) a profondità di 7.3 metri ed i dati di piovosità corrispondenti allo stesso periodo di monitoraggio.

In figura è evidente come, a seguito degli intensi eventi piovosi del Marzo 1995, si sia verificato, in un tempo di circa 15 ore, un innalzamento del livello piezometrico registrato dal piezometro elettrico posto a profondità di 7.3 metri di circa 1.4 metri (ossia con variazione di pressione interstiziale di circa 15 kPa), che si è in seguito dissipato in circa 20 ore. I dati relativi al piezometro elettrico posizionato alla profondità di 15.30 metri, invece, non mostrano alcuna risposta allo stesso evento piovoso.

3.4 - Analisi comparata dei dati

Nell'ambito del presente paragrafo si presenta una analisi dei risultati dei monitoraggi piezometrici ed inclinometrici relativi a tre diverse zone del pendio, ovvero le zone di monte fuori frana, di colata e di piede.

Nello sviluppare l'esame di detti dati di monitoraggio si è altresì esaminata l'incidenza dell'evento piovoso maggiormente significativo verificatosi durante il periodo di osservazione che si estende dal 3 Febbraio al 26 Giugno 1995 cui ha fatto seguito la perdita dei relativi inclinometri.

3.4.1 - Zona di monte

Per quanto attiene la zona di monte, si è fatto riferimento ai dati ottenuti dai tre piezometri posti in P4 e dall'inclinometro in I4 (Figura 3.09), sinteticamente rappresentati in Figura 3.14.

Questi sondaggi, nel periodo di monitoraggio considerato, si trovavano in una posizione abbastanza distante dalla scarpata e potevano essere allora considerati fuori frana.

Si ritiene utile ricordare che il sondaggio strumentato con l'inclinometro (I4) ha una profondità di 33.00 m e che nel sondaggio P4 sono state installate tre celle piezometriche Casagrande a profondità, rispettivamente di 12.00, 18.80 e 34.00 m.

Durante il periodo di osservazione 3 Febbraio-26 Giugno 1995, l'evento piovoso di maggiore entità, registrato nel periodo 20-31 Marzo 1995, fu di 53 mm di pioggia (Figura 3.13).

Dall'analisi delle letture piezometriche, è possibile dedurre che, dopo il primo periodo di equilibramento delle pressioni nel piezometro, i tre livelli di piezometrici distinti, a profondità pari a circa 2.00, 5.00 e 9.00 m sono rimasti stabili e non paiono essere stati influenzati dall'evento meteorico citato cosa, questa, da porre anche in relazione a quanto discusso in precedenza nell'ambito

del Paragrafo 3.3.4 circa i tempi di risposta osservati per i piezometri Casagrande.

In seguito ai dati ottenuti con l'indagine inclinometrica effettuata il 19 Aprile 1995, si possono individuare, più o meno chiaramente, tre zone di taglio in profondità, la più profonda, a profondità di circa 26 metri, la seconda a circa 15 metri con spostamenti sottostanti dell'ordine di 4-5 mm l'ultima e più superficiale, a circa 9 metri con spostamenti sottostanti dell'ordine di 6-7 mm.

L'inclinometro I4 risultò tranciato, tra l'11 ed il 22 Maggio 1995, sia a 15 sia a 9 metri di profondità.

3.4.2 - Zona di corpo in colata

Al fine dell'analisi dei dati di monitoraggio per la zona centrale della frana, si fa riferimento (Figura 3.09) ai due piezometri Casagrande posti in P2 ed all'inclinometro in I2 (Figura 3.15). Entrambi i sondaggi considerati si trovano in posizione centrale, nella zona di colata.

Si ricorda che il sondaggio strumentato con l'inclinometro, ovvero il sondaggio I2, aveva profondità di 17.50 m, mentre le celle piezometriche in P2 sono state poste a profondità di 7.80 m e 15.50 m.

Durante il periodo di osservazione 3 Febbraio-26 Giugno 1995, l'evento piovoso di maggiore entità è stato registrato, ancora una volta, nel periodo tra il 20 ed il 31 Marzo 1995, ed è pari a 53 mm di pioggia (Figura 3.13).

Dall'analisi delle letture piezometriche, è possibile dedurre due livelli piezometrici distinti a profondità pari a circa 7.50 e 12.00 m. In questo caso, mentre il livello piezometrico inferiore non sembra influenzato dall'evento meteorico citato, il livello più superficiale manifesta, immediatamente in seguito all'evento e in accordo con quanto discusso nel Paragrafo 3.3.4 e riportato in Figura 3.13, un lieve innalzamento valutabile in qualche decina di centimetri, che inizia a smorzarsi dopo circa due mesi dall'evento stesso, dimostrando come i piezometri Casagrande, rispetto ai piezometri elettrici, abbiano tempi di risposta molto più lenti.

In seguito ai dati ottenuti con l'indagine inclinometrica effettuata il 19 Aprile 1995, si può evidenziare soltanto un movimento rotatorio di corpo rigido dell'intero tubo inclinometrico, sintomo che nella fase di monitoraggio, detto inclinometro avesse la base collocata al di sopra della banda di taglio sottostante le più rapide deformazioni superficiali del corpo in colata.

L'inclinometro I2 risultò tranciato ad una profondità di circa 4.5 metri l'11 Maggio 1995 a causa dei più veloci processi deformativi interni alla colata a piccole profondità

3.4.3 - Zona di piede

Per la zona di piede si fa riferimento ai dati provenienti dai due piezometri installati in P1 ed all'inclinometro installato in I1 (Figura 3.09). In Figura 3.16 sono rappresentati i dati relativi a questi monitoraggi.

Entrambi i sondaggi considerati si trovano al centro della zona di piede, nella zona di sovrapposizione della frana Vadoncello con la frana Serra dell'Acquara.

È opportuno ricordare che il sondaggio inclinometrico I1, ha avuto una profondità di 36.30 m mentre le celle piezometriche in P1 sono state collocate a profondità di 17.50 m e 21.20 m.

Durante il periodo di osservazione, che va dal 3 Febbraio al 26 Giugno 1995, nonostante il maggiore evento piovoso di 53 mm verificatosi tra il 20 ed il 31 Marzo 1995, l'evento piovoso di maggiore interesse (pari a 38 mm di pioggia) è stato registrato nel periodo tra il 10 ed il 20 Maggio 1995, non risultando, il primo, in alcun modo correlabile ai livelli piezometrici rilevati dalle celle Casagrande installate in P1.

Dall'analisi delle letture piezometriche si può riscontrare come entrambi i piezometri, sebbene collocati a profondità differenti, riportino lo stesso livello piezometrico ad una profondità di circa 15.00 m. L'evento meteorico riportato non appare avere alcun effetto sul livello piezometrico.

Nell'inclinometro I1 sono state effettuate quattro letture.

La prima lettura, del 28 Aprile 1995, non ha evidenziato alcun tipo di deformazione o di zone di incipiente deformazione. Ben diverso, invece, il risultato della lettura del 22 Maggio 1995, che mostra una chiara superficie di taglio alla profondità di circa 16-17 metri contraddistinto da una differenza tra gli spostamenti sottostanti (pari a circa 5 mm) e quelli dei terreni superiori di circa 20 mm. Contemporaneamente si evidenzia anche una discontinuità negli spostamenti alla profondità di circa 23 metri.

Le due bande di taglio profonde così identificate sono confermate dalle letture inclinometriche del 30 Maggio e del 2 Giugno 1995. In particolare alla profondità di circa 16.50 metri si sono verificati spostamenti relativi tra i terreni superiori ed inferiori rispettivamente pari a 30 mm e a 5 mm.

Si fa notare che gli spostamenti relativi lungo le bande di taglio profonde qui evidenziati al piede del pendio Vadoncello, nell'ambito dei terreni di quello che nel Paragrafo successivo 3.5 verrà definito come Complesso I, ovvero del corpo di frana di Serra dell'Acquara, attivi nel Maggio 1995, implicavano bande di taglio profonde attive nel pendio già prima della fase di massima attività avutasi nel 1995 (Paragrafo 3.2.1). La massima attività del pendio Vadoncello, quindi, appare coinvolgere terreni profondi al piede ed a monte, quindi necessariamente anche nella zona centrale del pendio, così come almeno superficialmente i terreni della frana Serra dell'Acquara come indicato dal monitoraggio topografico discusso nel Paragrafo 3.2.1.

L'inclinometro I1 risultò tranciato a circa 16.50 metri il 26 Agosto 1995.

3.5 - Modello geologico del pendio Vadoncello

Sulla scorta delle ricostruzioni litostratigrafiche effettuate in base ai numerosi carotaggi (Wasowski J.; 1995; Wasowski J. e Lasorsa M.; 1995; Wasowski J. e Falco P.; 1996) e dei dati di laboratorio caratterizzanti geotecnicamente i materiali presenti in sito e di cui si discuterà nel seguente Capitolo 4, Santaloia F. et al. (1999) hanno definito, secondo la sezione A-A' di Figura 3.09, lo schema geologico schematico del pendio Vadoncello, riportato in Figura 3.17 nella quale vengono anche riportate le variazioni topografiche occorse a partire dal 1980.

Come evidenziato al precedente Paragrafo 3.3.2, nonostante l'elevato grado di rimaneggiamento riscontrato (Wasowski J.; 1995), è stato possibile raggruppare i terreni presenti nel pendio Vadoncello secondo nove distinti Complessi.

Il complesso A rappresenta il margine sudorientale delle megabrecce carbonatiche e del detrito calcareo fine ad esse sovrapposto, in parte coinvolto dalla frana del Cimitero (Figura 2.05).

Questo complesso galleggia sul complesso B rappresentato, principalmente, da argilla, da marnosa a debolmente marnosa, talora con struttura scagliosa, di colore da marrone chiaro a grigio chiaro o scuro. In esso sono presenti strati fratturati di marna e calcare marnoso grigio. Verso il basso si individuano intercalazioni sabbiose.

Il complesso C è costituito da argilla talora marnosa e limosa, sovente a scaglie, da grigia marrone a grigia scura, con intercalazioni più o meno continue di marna grigia e/o avana e rari livelli di calcare marnoso grigio e di arenaria grigia scura.

Dal complesso C, procedendo verso il basso, si passa al complesso D, formato in prevalenza da argilla grigia scura, fessurata e a scaglie, con intervalli di marna e marna calcarea grigia chiara, maggiormente presenti al tetto del complesso. E' stato individuato un livello di arenaria fine grigia chiara.

Il sottostante complesso E è rappresentato da argilla marnosa grigia chiara e/o verdastra intercalata ad argille grigio verdi, calcare marnoso e marna grigia e/o

grigio-verdastra. Livelli di arenarie limose fini sono presenti.

Infine, il complesso F è costituito da peliti, da grigio a grigio scura, a luoghi limose e a scaglie, con intervalli marnosi e strati centimetrici di arenarie grigie e grigio-scure.

Escluso il complesso A, gli altri complessi appartengono alle successioni della Formazione delle Argille Varicolori descritte al paragrafo 2.1. A causa dei diversi eventi tettonici e gravitativi cui sono stati sottoposti in sito, i singoli complessi presentano un assetto caotico. In questo scenario, gli strati lapidei, di cui i maggiori spessori si rilevano nel complesso E, si presentano intensamente fratturati e per questo privi di una loro continuità laterale, spesso si ritrovano sotto forma di clasti e/o blocchi dispersi in una matrice argillosa o argilloso-marnosa, sovente fissile e a scaglie. Nell'insieme i diversi complessi sono inclinati verso monte. Secondo la classificazione della complessità strutturale proposta da Esu F. (1977), essi mostrano complessità variabili tra A_2 , B_2 e B_3 .

Il complesso G comprende il detrito di frana (complessità A_2 - B_2) proveniente dalle diverse nicchie di distacco formatesi durante i molteplici eventi franosi che hanno coinvolto il versante Vadoncello a partire dal dicembre 1993 fino all'Inverno del 1996, data in cui sono stati eseguiti gli ultimi sondaggi. In base alla natura litologica del complesso, esso è composto principalmente da tre depositi di frana tra loro parzialmente sovrapposti e talora separati da terreno vegetale. Il detrito di frana relativo all'evento 1993 è costituito da argilla a scaglie, grigia scura passante a grigia giallastra, a luoghi limoso-sabbiosa con clasti marnosi e carbonatici. Il deposito successivo all'evento suddetto è rappresentato da clasti di marna grigia verdastra immersi in una matrice argillosa soffice da grigia a gialla marrone. Su di esso poggia parzialmente l'ultimo deposito di frana in esame, definito da una scarsa matrice argillosa limoso-sabbiosa grigio-chiara e gialla, con abbondanti clasti di marna/marna calcarea grigia verdastra e calcare biancastro, quest'ultimo proveniente, soprattutto, da un megablocco carbonatico che delimita la scarpata sinistra della frana. Il movimento gravitativo che ha dato origine al complesso G è classificabile, come anzidetto, come colata di terra (Cruden D.M. e Varnes D.J.; 1996). Detto complesso, a seguito degli eventi del

1993, è lungo 550 m, largo 140 m e profondo al massimo circa 10 m (Figura 3.17). E' importante evidenziare che nessuna superficie di scorrimento e relativa banda di taglio sono state evidenziate lungo tutti i sondaggi. Inoltre, data la natura e l'assetto dei litotipi presenti nell'area, non è evidente una netta e chiara distinzione tra il materiali in posto ed il complesso G tranne.

La parte più a valle del complesso G si sovrappone (Figura 3.17) a quello che viene definito complesso H e rappresenta il deposito della frana Vadoncello relativa all'evento 1980, il quale, a sua volta, giace sul corpo scorrimento di fango di Serra dell'Acquara ovvero sul complesso I.

Il complesso H (complessità A_2-B_2) è costituito da argilla grigia e grigia scura, scagliosa e talora limosa, con clasti di marna e arenaria.

Il complesso I (complessità A_2-B_2) è rappresentato, in prevalenza, da argilla sabbiosa limosa con clasti carbonatici passante verso il basso ad argilla grigia a grigia scura con clasti marnosi, calcarei e arenacei. Inoltre, in esso a diverse profondità è stato ritrovato del terreno vegetale che raggiunge lo spessore di circa 4 m in I1. L'eterogeneità litologica e la struttura del complesso I sono connesse ai diversi eventi franosi che l'hanno prodotto (Cotecchia V. et al.; 1986).

In Figura 3.18 è riportato il modello geologico del pendio Vadoncello estrapolato da quello di Figura 3.17 con ampliamento in profondità e semplificato nelle disposizioni stratigrafiche, in modo da poter essere assunto a base della definizione della maglia del modello numerico. L'ampliamento, fino a profondità non direttamente indagate, è stato effettuato a seguito di considerazioni geostrutturali circa la disposizione, la successione e l'inclinazione dei Complessi appena definiti. Le semplificazioni stratigrafiche, invece, sono state effettuate sulla base dei valori dell'Indice di Plasticità secondo quanto esposto al successivo Paragrafo 4.2.

3.6 - Meccanismi di deformazione del pendio Vadoncello

Sulla base dei dati di monitoraggio inclinometrico riportati ai Paragrafi 3.3.3 e 3.4, si può ipotizzare il seguente meccanismo di deformazione attivo nel pendio Vadoncello (Santaloia F. et al.; 1999).

Gli spostamenti a profondità tra i 9 e i 15 metri, rilevati dalle letture inclinometriche in I4 (Figura 3.09 e Figura 3.14), possono essere indicativi o di un meccanismo di rottura a carattere rotazionale retrogressivo nella zona di monte del pendio avente profondità maggiore di 9 metri, oppure della presenza di un meccanismo di deformazione più lento e progressivo, rispetto ai veloci spostamenti registrati a profondità inferiori ai 9 metri dal piano campagna, attivo a profondità maggiori di 5-10 metri. I dati relativi alle letture inclinometriche effettuate in I1 (Figura 3.09 e Figura 3.16), che mostrano l'attività di ampie deformazioni di taglio a profondità sia di circa 16-17 metri sia di circa 23 metri, sembrerebbero confermare l'ipotesi di spostamenti lenti nel pendio al di sotto del corpo di colata rappresentato dal Complesso G di Figura 3.17 e 3.18. Le letture inclinometriche di Figura 3.16, confrontate con i valori di spostamenti superficiali medi nel periodo 18 Maggio-23 Giugno 1995, riportati in Figura 3.05, mostrano come spostamenti superficiali e spostamenti profondi, nella zona di piede (Figura 3.09), erano entrambi significativi già prima della fase di massima attività del Giugno-Ottobre 1995.

Queste osservazioni hanno condotto ad ipotizzare che i veloci processi di movimento superficiali (scivolamento rotazionale e colata di terra) che si sono manifestati in superficie al pendio Vadoncello siano connessi a spostamenti profondi molto lenti. Questi stessi spostamenti lenti sono stati rilevati anche all'interno del Complesso I definito al Paragrafo 3.5 e, perciò, connessi, ai movimenti superficiali lenti della Frana Serra dell'Acquara descritti al Paragrafo 3.2.1, e riportati in Figura 3.05.

Il meccanismo di deformazione attivo in profondità nel pendio Vadoncello può essere definito come un meccanismo progressivo di deformazione caratterizzato da lente deformazioni plastiche e da movimenti irrecuperabili.

A tal riguardo, come di discuterà nel successivo Capitolo 4, i terreni collocati a grandi profondità nell'ambito del pendio Vadoncello e coinvolti da queste deformazioni lente, hanno mostrato scarse caratteristiche di resistenza ed uno stato tensionale in sito prossimo alla superficie di grande snervamento dove, per grande snervamento ci si riferisce a quello che Burland J.B. (1990) definisce snervamento e Leroueil S. e Vaughan P.R. (1990) definiscono snervamento secondario ed è rappresentativo dello stato del terreno in corrispondenza del quale, per variazioni delle proprietà inelastiche del terreno, si manifestano riduzioni della rigidità ed aumenti dell'indice di compressione. Questa condizione li rende disponibili a deformazioni plastiche significative anche in concomitanza di ridotte variazioni di carico dovute, ad esempio, ad eventi sismici e a variazioni morfologiche, le quali, a loro volta, sono provocate dalle stesse lente deformazioni profonde.

CAPITOLO 3

FIGURE E TABELLE

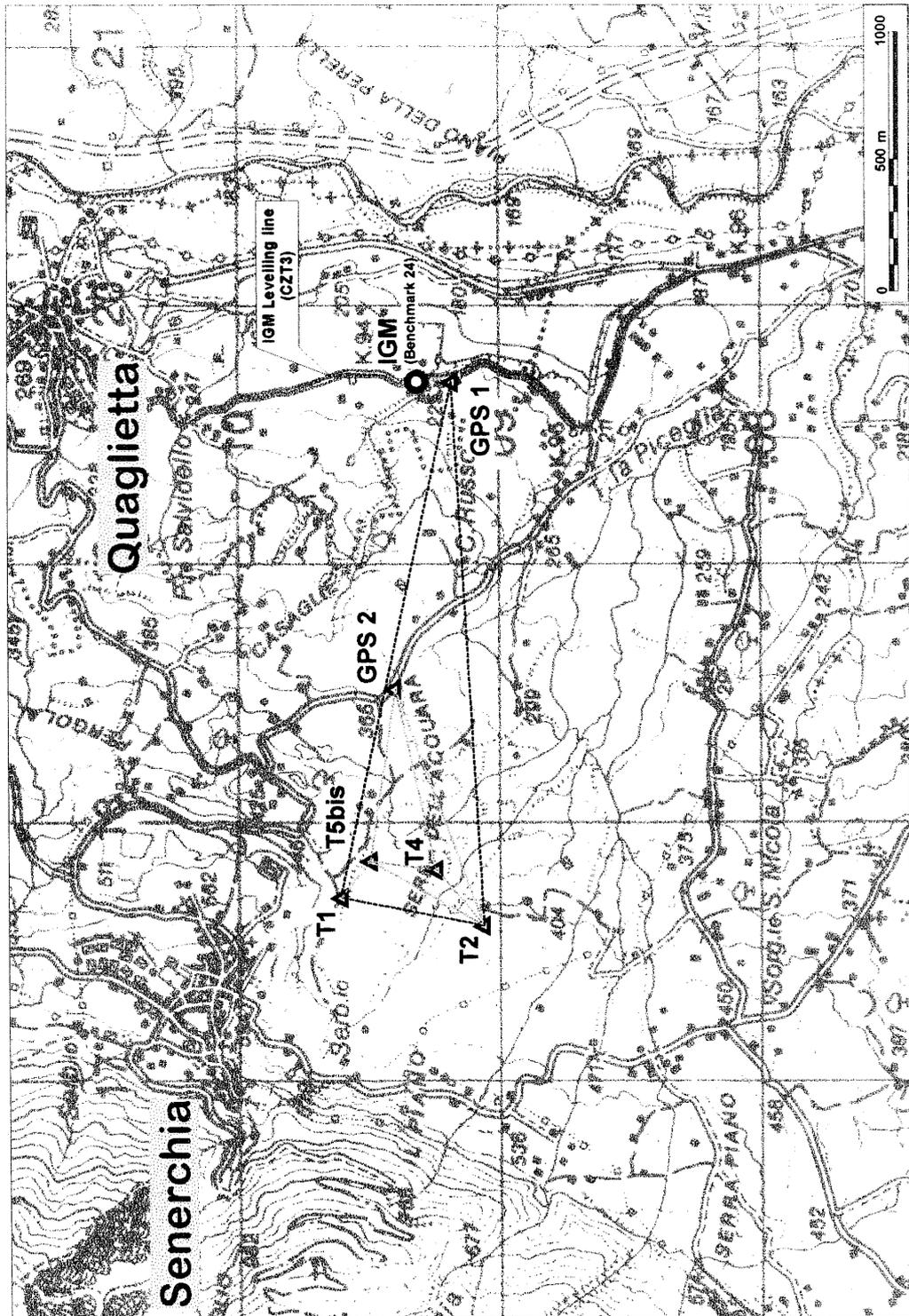


Figura 3.01 - Rete di monitoraggio GPS

(EEC Report; 1996)

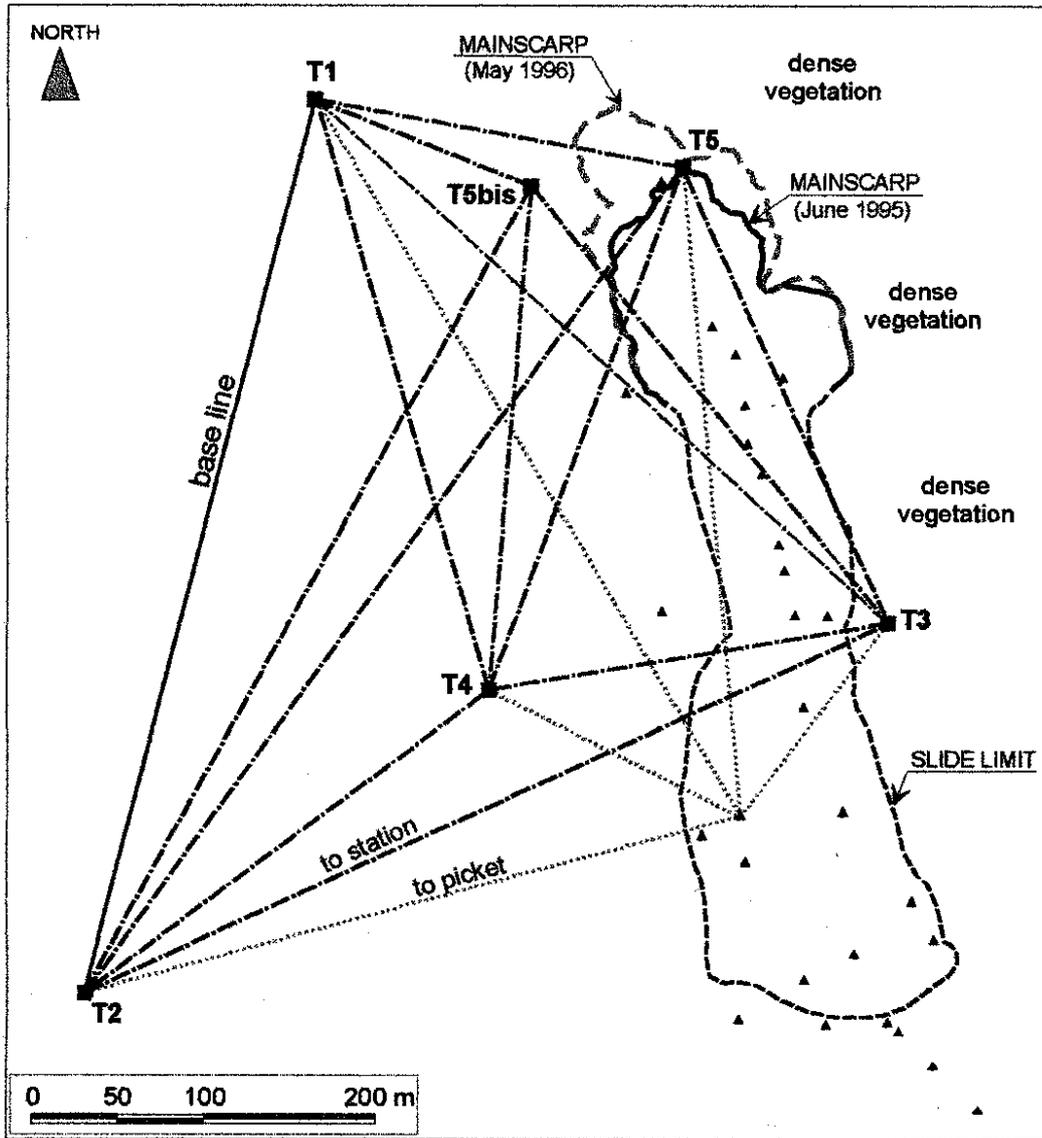


Figura 3.02 - Rete di controllo per il monitoraggio topografico

(Wasowski J. e Mazzeo D.; 1998)

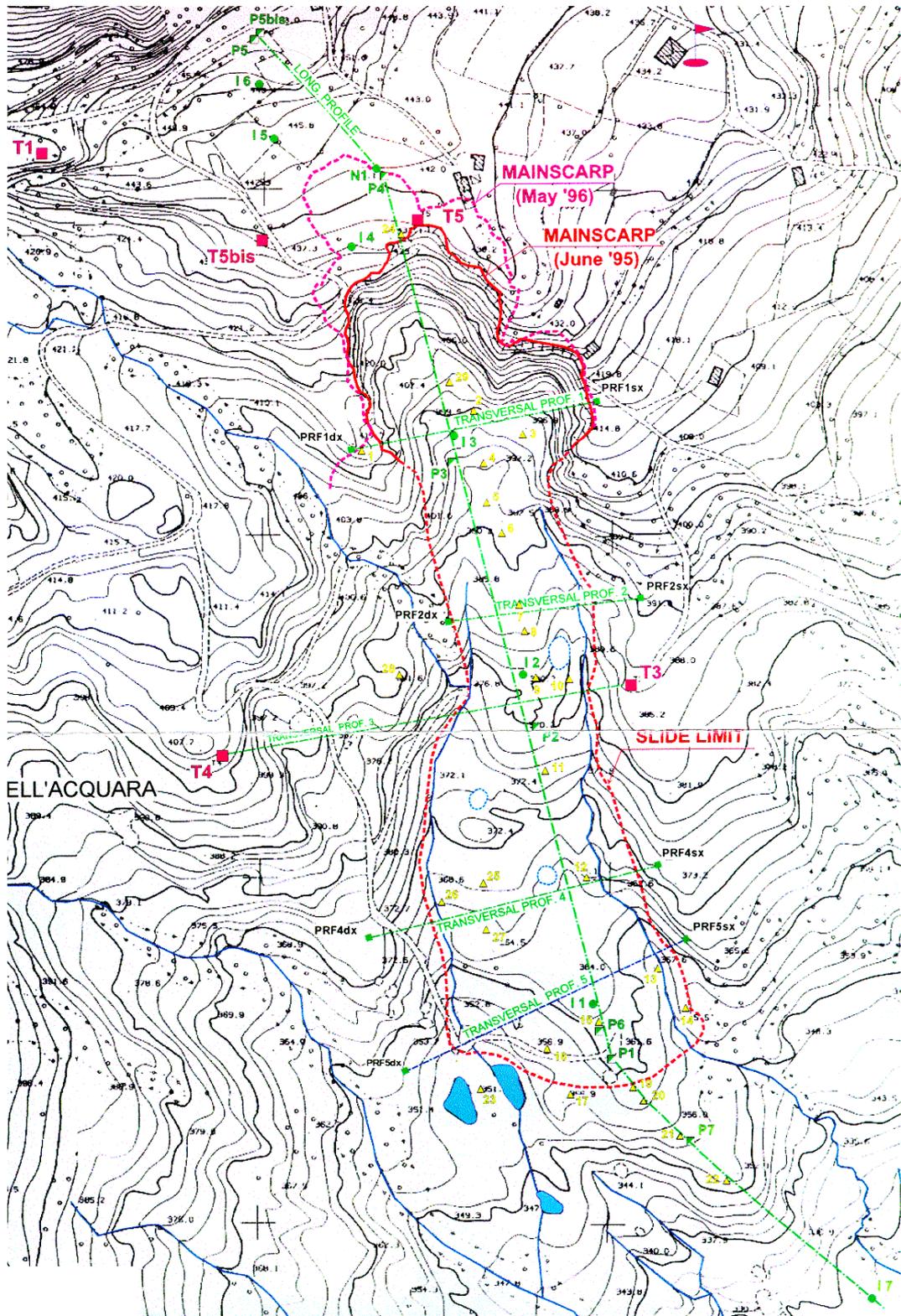
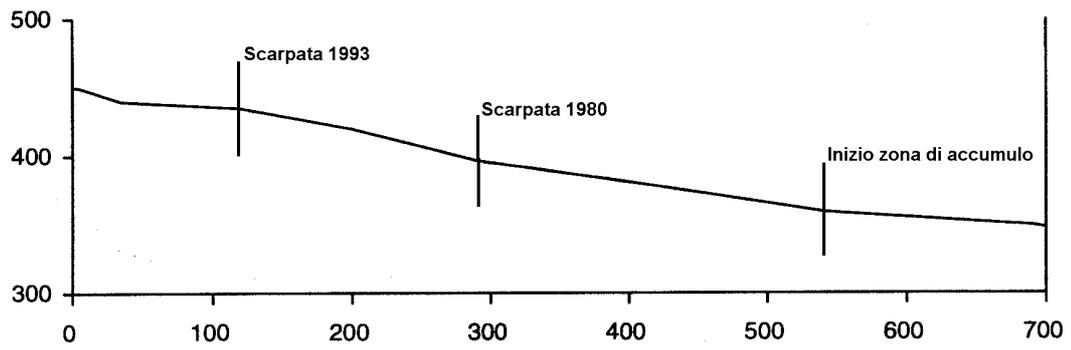
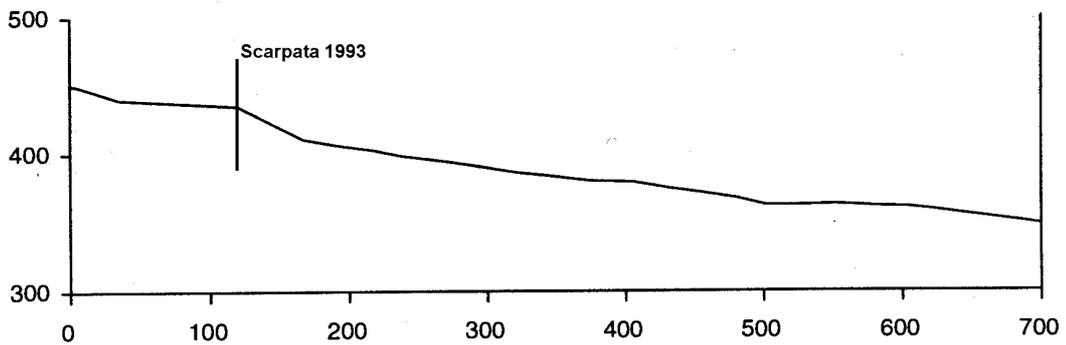


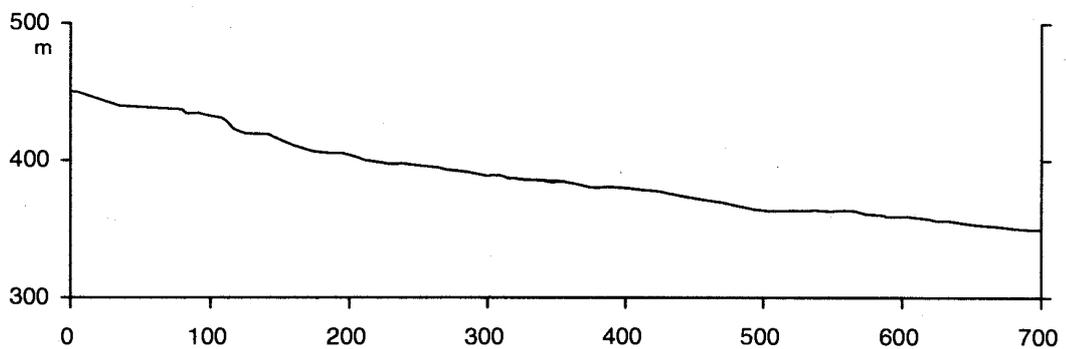
Figura 3.03 - Indicazione della posizione delle tracce dei profili topografici



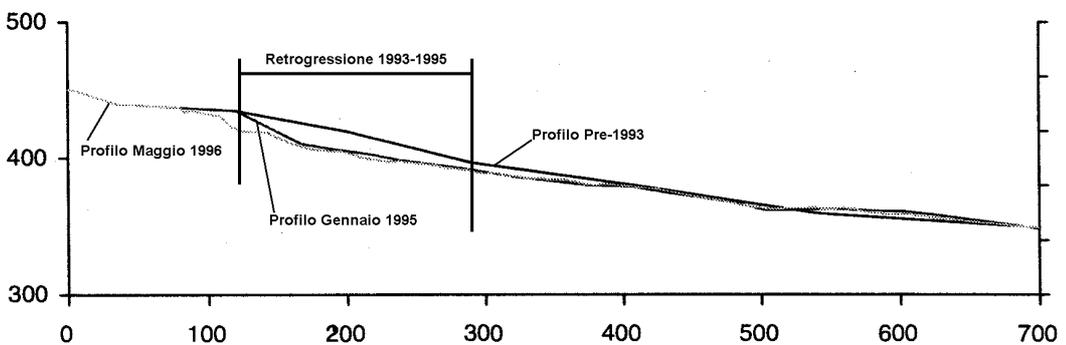
A: Profilo topografico longitudinale Pre-1993 da carta topografica 1980 1:5000



B: Profilo topografico longitudinale Gennaio 1995

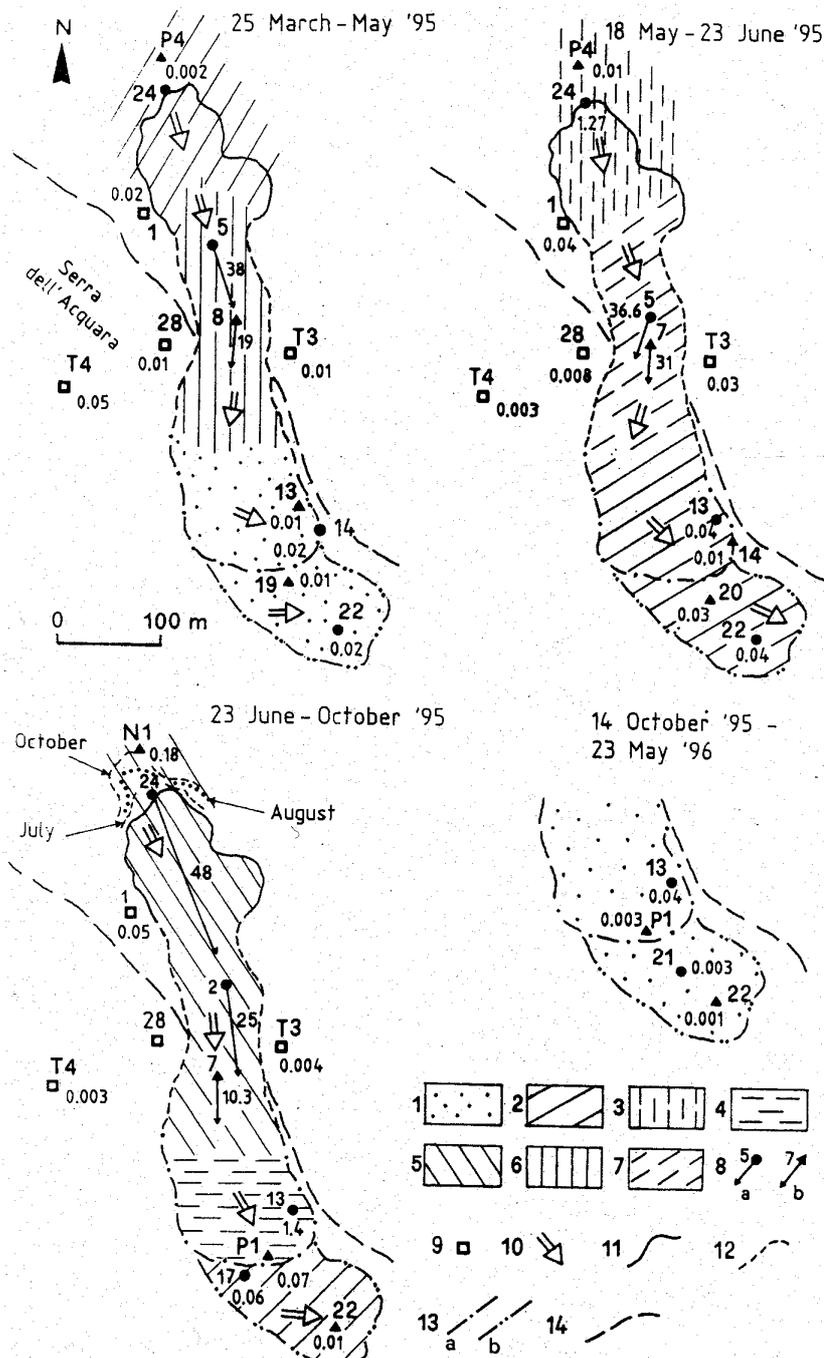


C: Profilo topografico longitudinale Maggio 1996



Sovrapposizione dei tre profili topografici longitudinali A, B e C

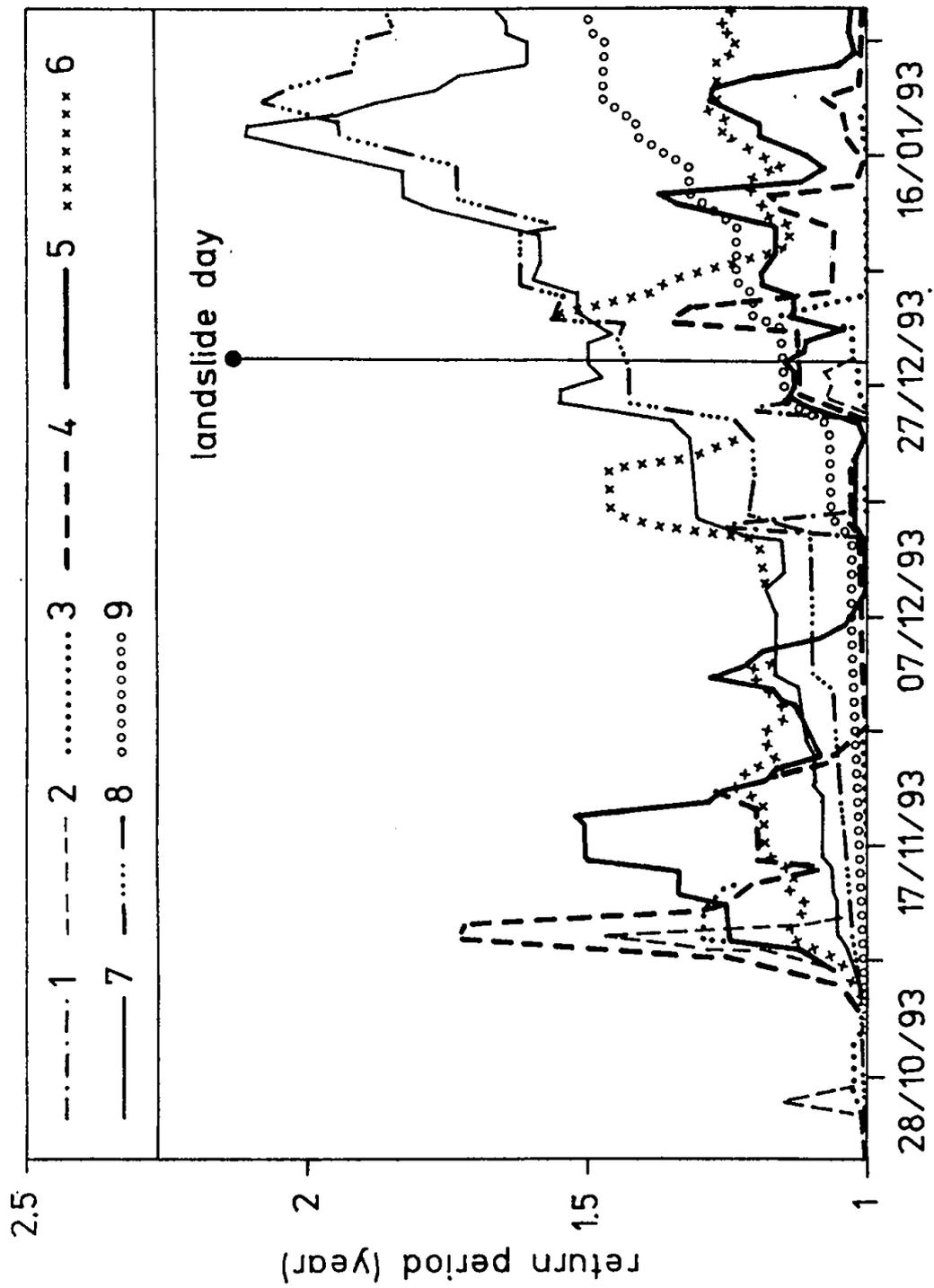
Figura 3.04 - Profili topografici longitudinali



1: 0-0.02; 2: 0.02-0.20; 3: 0.20-0.40; 4: 0.40-10.0; 5: 10.0-20.0; 6: 20.0-30.0; 7: > 30.0; 8: velocità massima (a) e minima (b); 9: stazioni di controllo topografiche al di fuori della Frana Vadoncello; 10: direzioni principali di spostamento; 11: area A; 12: area B; 13: area C zona di accumulo della colata (a) parte del deposito di Serra dell'Acquara (b); 14: limite laterale della Frana Serra dell'Acquara

Figura 3.05 - Velocità di spostamento (metri/mese) nell'ambito della Frana Vadoncello

(Santaloia F. et al.; 1999)



1: 1; 2: 5; 3: 10; 4: 20; 5: 30; 6: 60; 7: 90; 8: 120; 9: 180 giorni

Figura 3.06 - Periodi di ritorno delle piogge giornaliere cumulate

(Santaloia F. et al.; 1998)

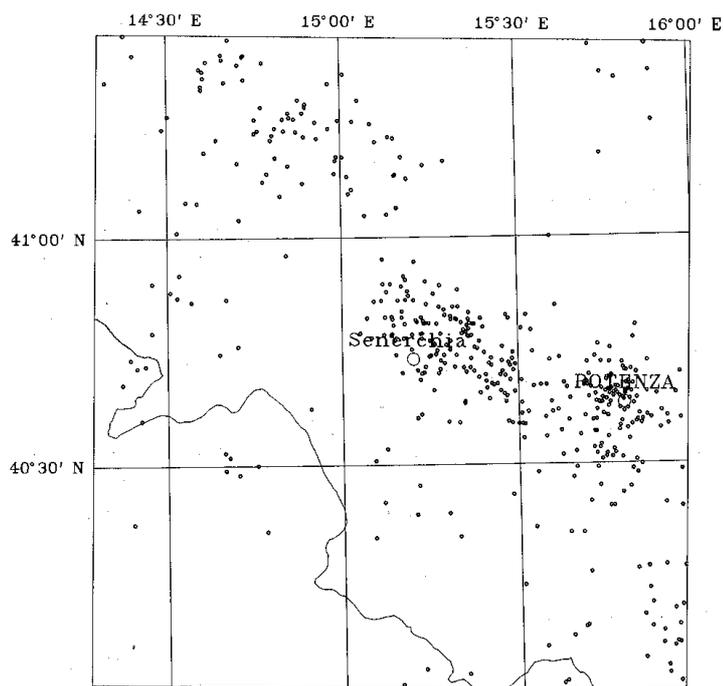


Figura 3.07 - Distribuzione degli epicentri degli eventi sismici nell'area Irpina (1991-1995)
(EEC Report; 1996)

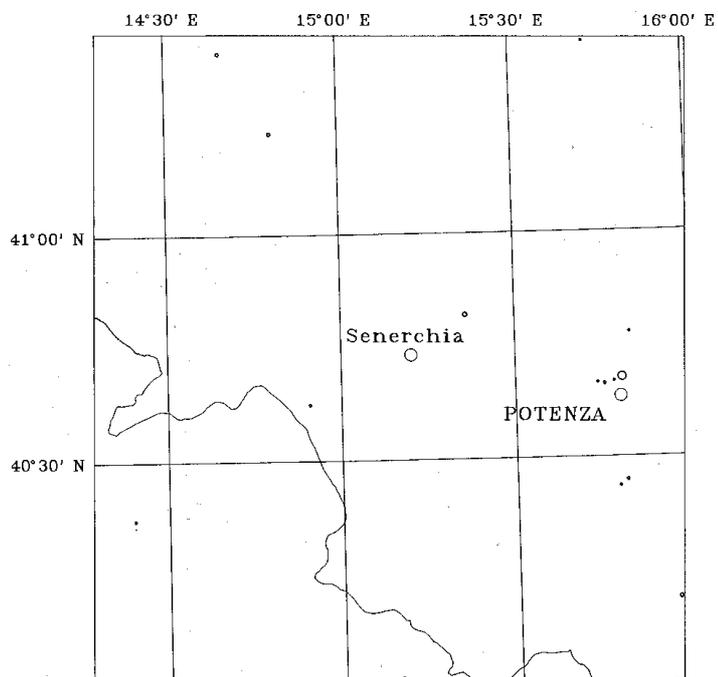
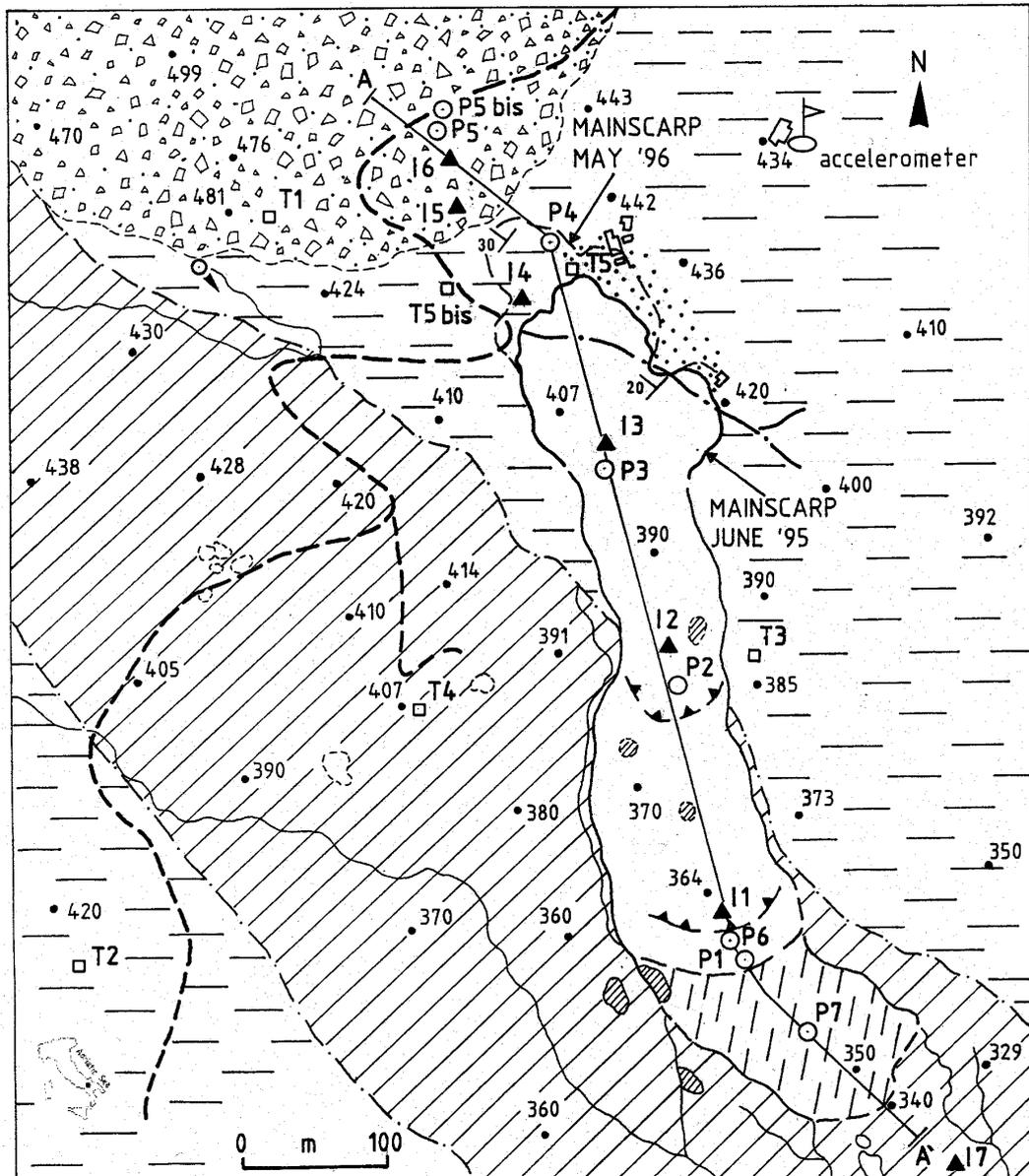


Figura 3.08 - Distribuzione degli epicentri degli eventi sismici con magnitudo maggiore di 3.0
nell'area Irpina (1991-1995)
(EEC Report; 1996)



- 1  2  3  4  5  6  7 
- 8  9  10  11  12 

1: Frana Vadoncello 1993-1995 con sovrapposizione alla Frana Serra dell'Acquara (a); 2: Frana Serra dell'Acquara; 3: placcone detritico carbonatico; 4: Formazione delle Argille Varicolori con detriti calcarei flottanti (a); 5: pozze d'acqua stagionali; 6: piedi intermedi; 7: inclinazione degli strati; 8: contatto stratigrafico; 9: sorgenti; 10: traccia della sezione geologica schematica; 11 piezometri (P) ed inclinometri (I); 12: stazioni di controllo della rete topografica del pendio.

Figura 3.09 - Posizione dei sondaggi profondi

(Santaloia F. et al.; 1999)

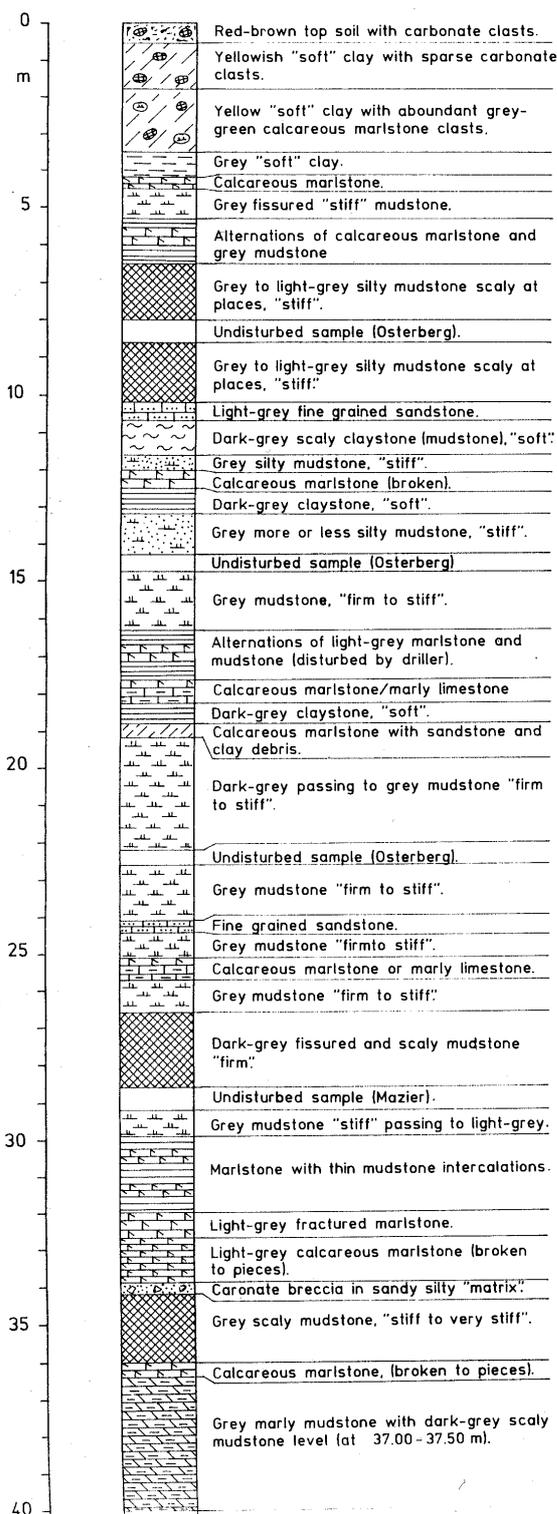


Figura 3.10 - Stratigrafia di dettaglio del sondaggio P4

(Wasowski J.; 1995)

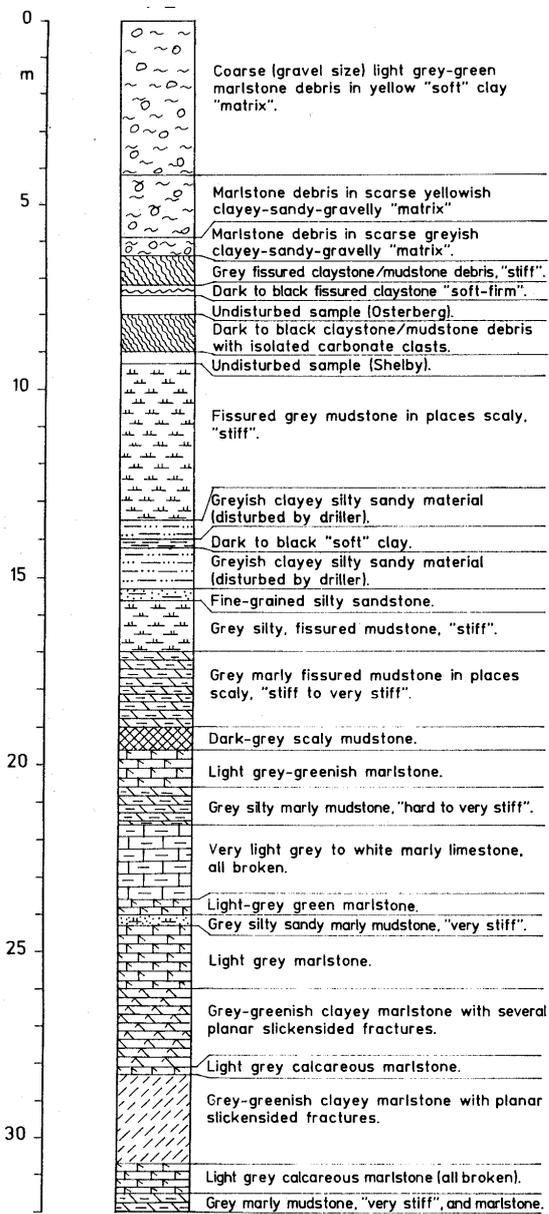


Figura 3.11 - Stratigrafia di dettaglio del sondaggio P2

(Wasowski J.; 1995)

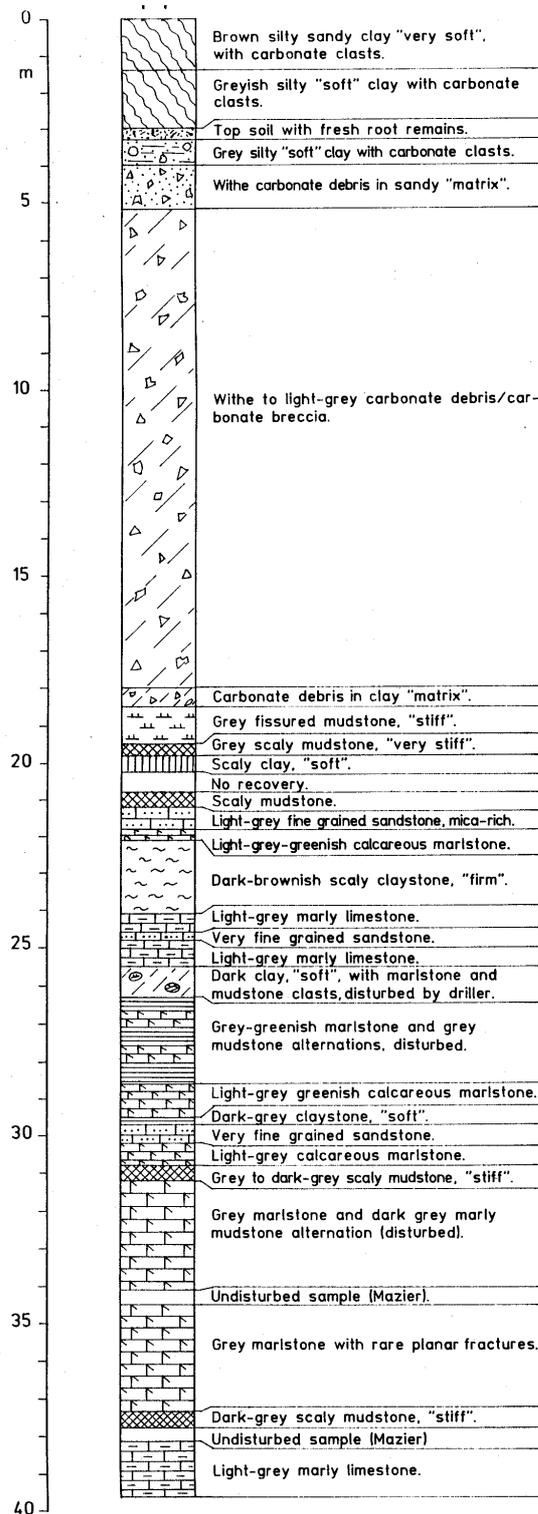
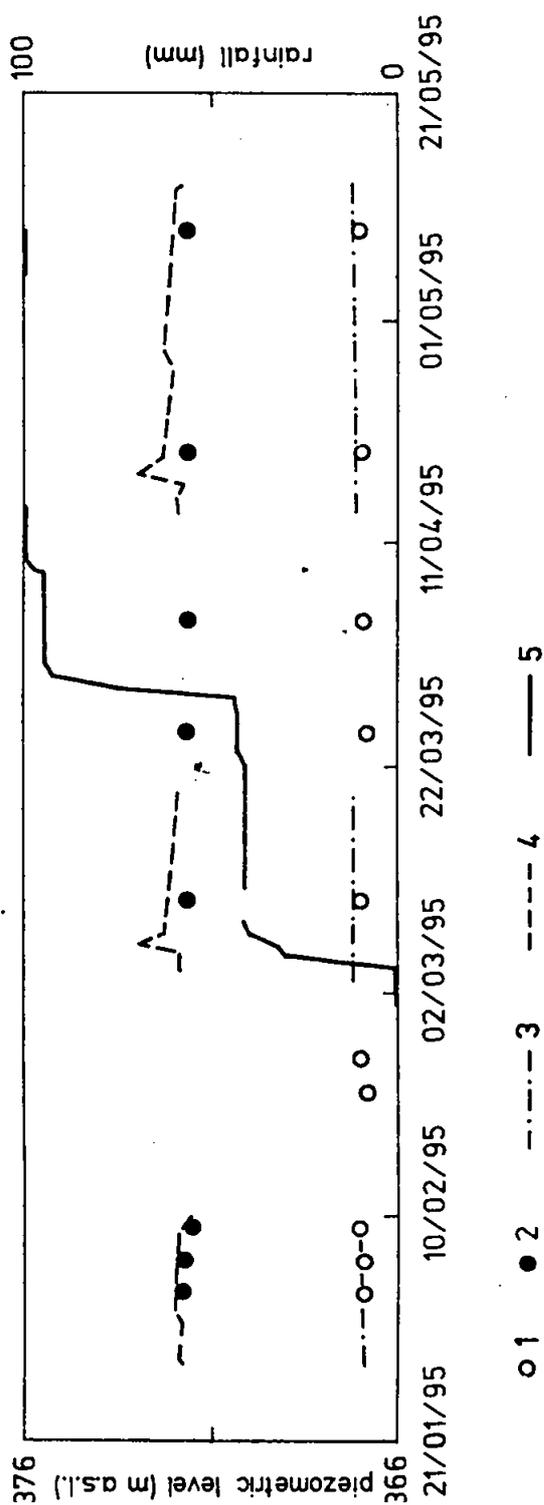


Figura 3.12 - Stratigrafia di dettaglio del sondaggio P1

(Wasowski J.; 1995)



1: piezometro Casagrande (15.50 metri); 2: piezometro Casagrande (7.80 metri); 3: piezometro elettrico (15.30 metri); 4: piezometro elettrico (7.30 metri); 5: pioggia cumulata

Figura 3.13 - Livelli piezometrici nella zona di corpo (P2) ed eventi piovosi

(Santaloia et al.; 1999)

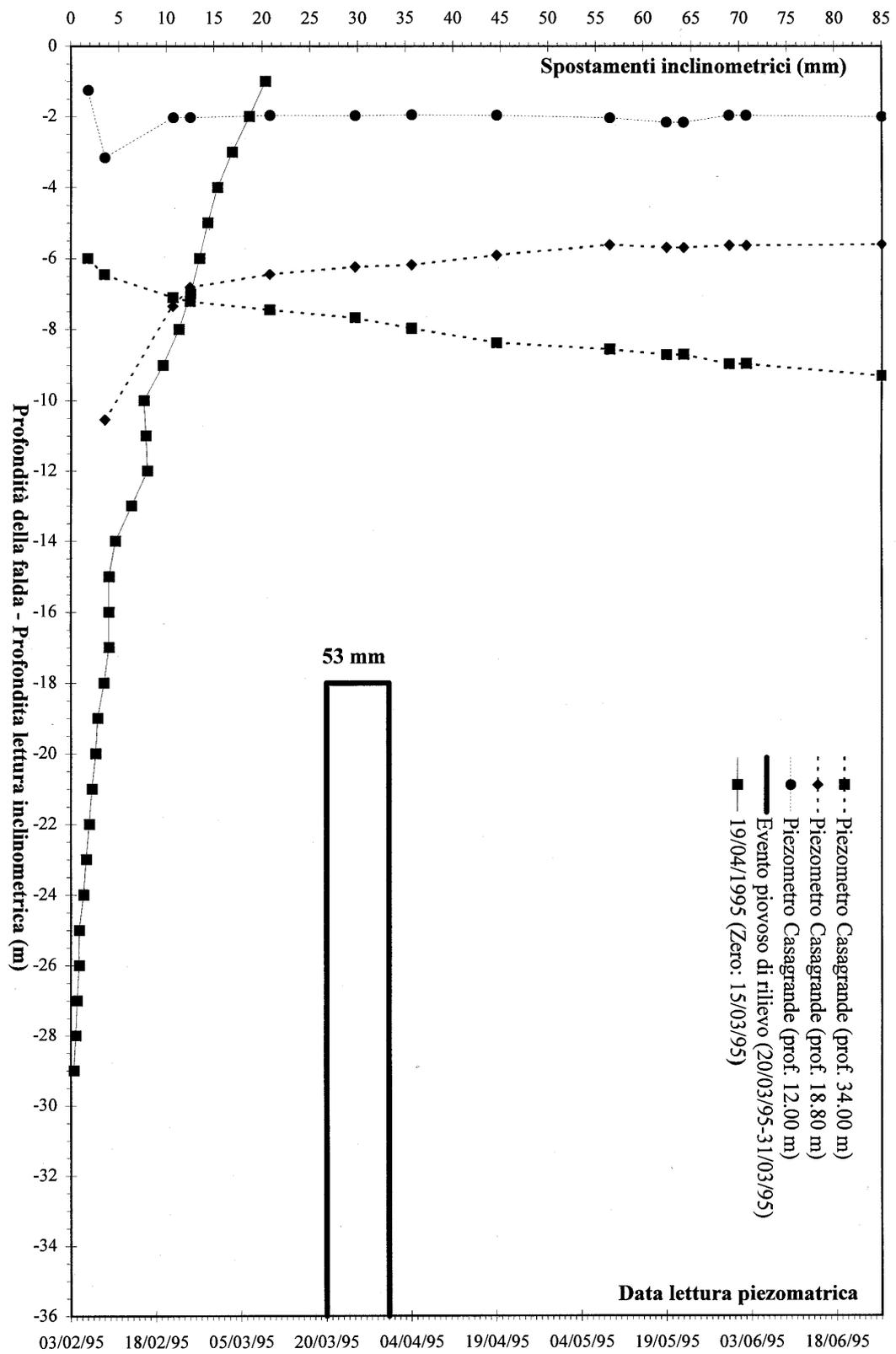


Figura 3.14 - Confronto dati di monitoraggio profondo - Zona di monte (P4 ed I4)

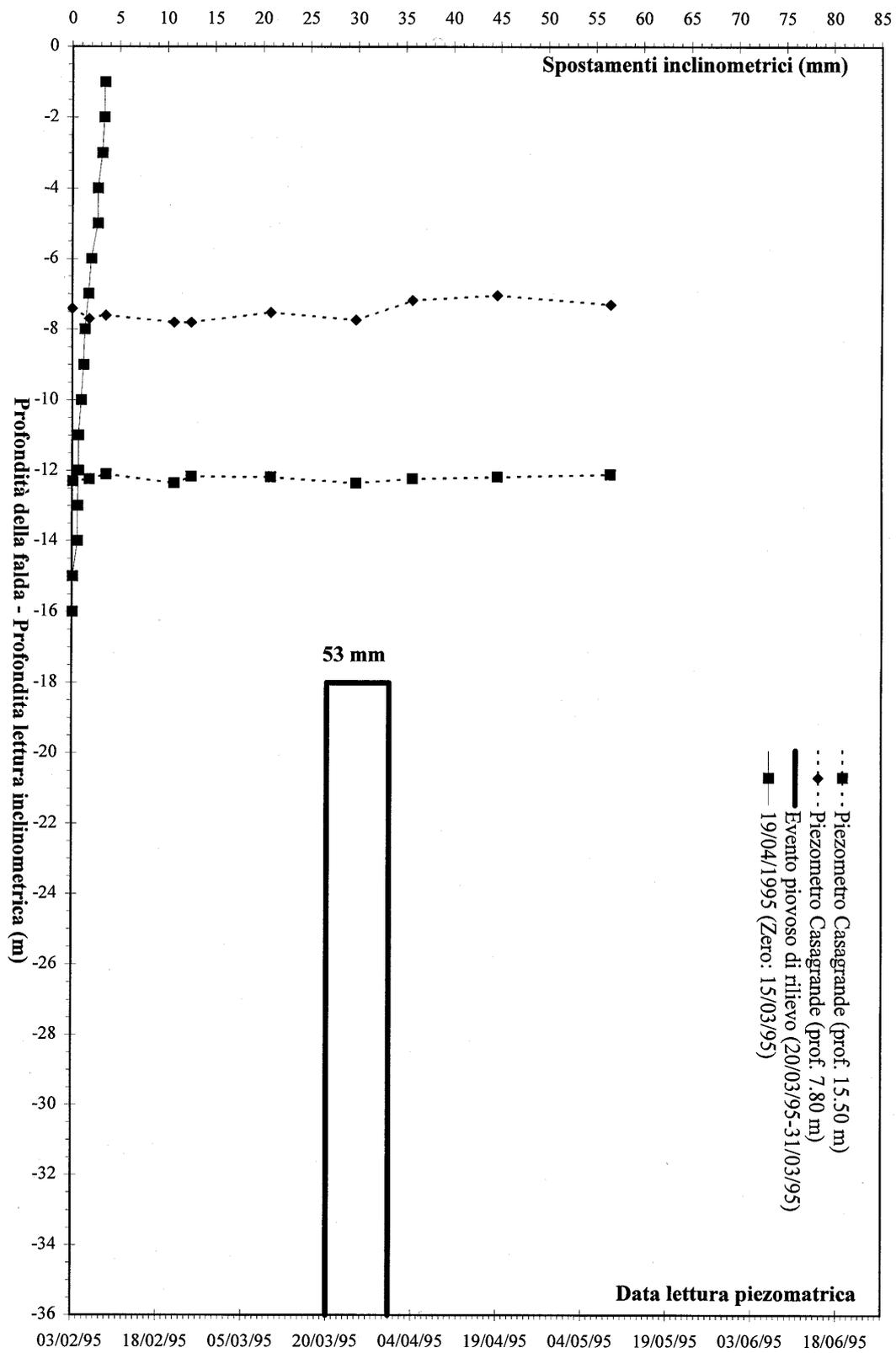


Figura 3.15 - Confronto dati di monitoraggio profondo - Zona di corpo in colata (P2 ed I2)

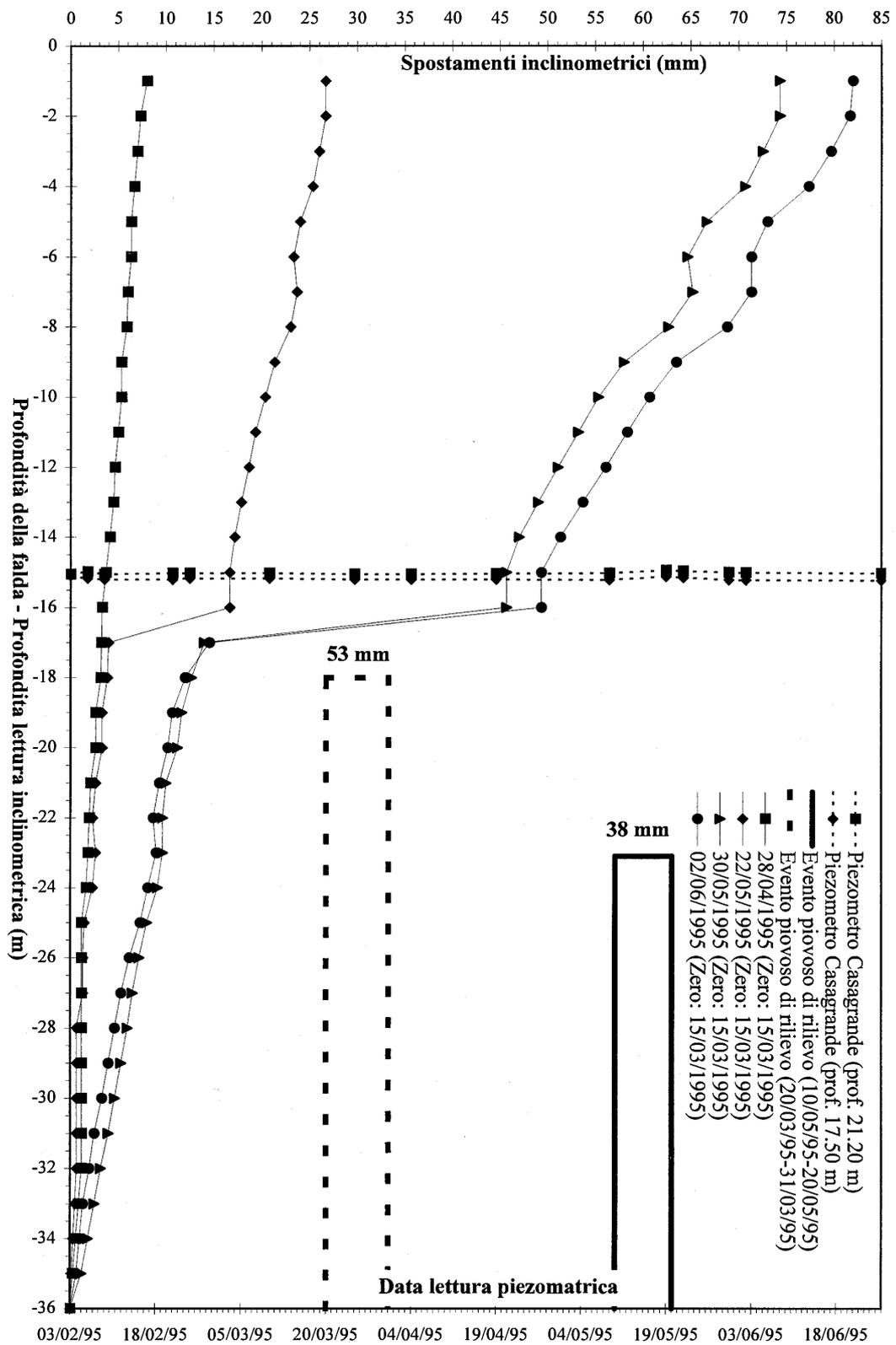


Figura 3.16 - Confronto dati di monitoraggio profondo - Zona di piede (P1 ed II)

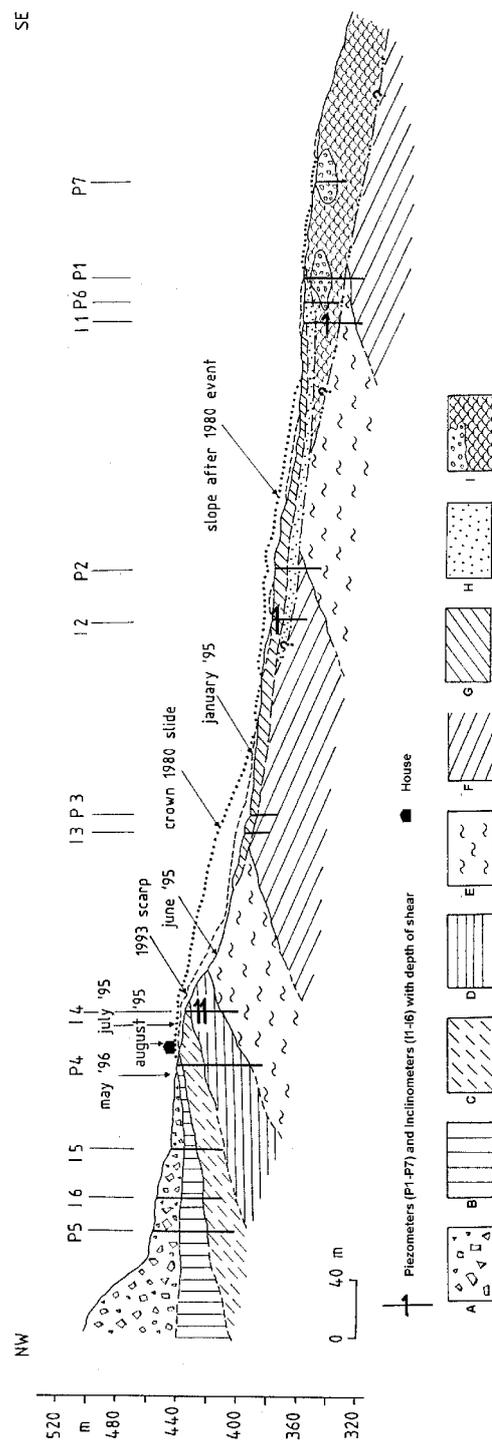


Figura 3.17 - Modello geologico del pendio Vadoncello nella forma desunta dalle interpretazioni morfologiche e stratigrafiche

(Santaloia et al.; 1999)

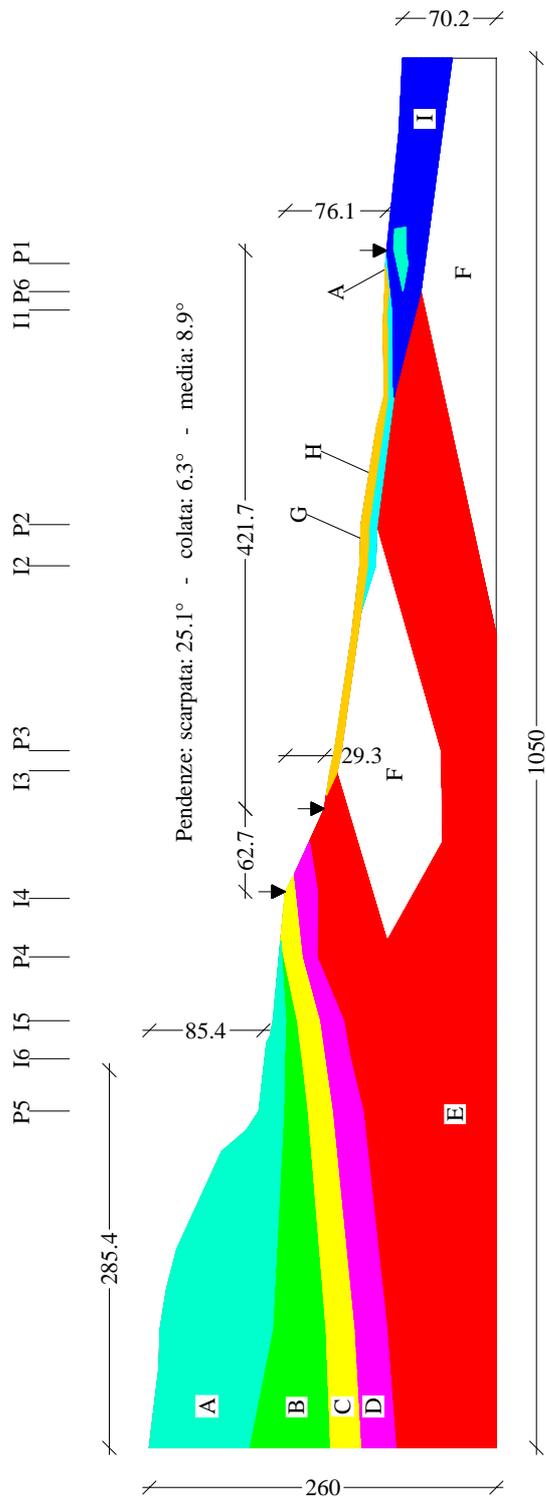
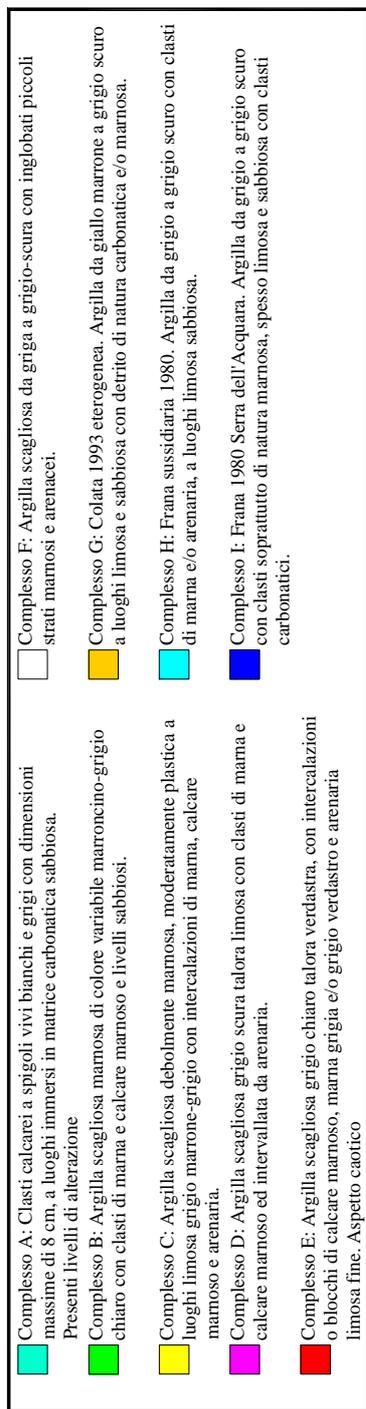


Figura 3.18 - Modello geologico del pendio Vadoncello nella forma assunta nella modellazione numerica

Sondaggio	Profondità (m)	Profondità inclinometro (m)	Tipo di piezometro e profondità (m)
P5bis	52.0	---	Tubo aperto
P5	52.7	---	Tubo aperto
I6	40.2	40.0	---
I5	36.0	30.0	---
P4	57.3	---	Casagrande 12.0 Casagrande 18.8 Elettrico 28.3 Casagrande 34.0 Elettrico 46.0
I4	35.0	33.0	---
I3	22.0	20.6	---
P3	21.5	---	Elettrico 08.3 Casagrande 08.5 Elettrico 15.5 Casagrande 15.8
I2	23.0	17.5	---
P2	32.0	---	Elettrico 07.3 Casagrande 07.8 Elettrico 15.3 Casagrande 15.5
I1	40.1	36.3	---
P6	23.0	---	Elettrico 14.0 Elettrico 20.0
P1	39.6	---	Casagrande 17.5 Casagrande 21.2
P7	22.0	---	Tubo aperto
I7	33.0	30.0	---

Tabella 3.01 - Riepilogo delle strumentazioni installate nei sondaggi profondi

(Dati EEC Report; 1996)

CAPITOLO 4

INDAGINI DI LABORATORIO

4.1 - Introduzione

Le indagini di laboratorio di cui si discuterà nell'ambito del presente Capitolo, sono state eseguite sia presso la City University di Londra e presso i laboratori londinesi della Laing Technology Services, sotto la supervisione della Dott.ssa R.E. Fearon, del Dott. M.R. Coop e del Prof. J.H. Atkinson (EEC Report; 1996), sia presso il Laboratorio Geotecnico dell'Istituto di Geologia Applicata e Geotecnica (IGAG) del Politecnico di Bari, sotto la supervisione della Dott.ssa F. Cotecchia e della Dott.ssa F. Santaloia.

Le prove, condotte sui campioni prelevati nell'area della frana durante le due fasi di indagine in sito (Paragrafo 3.3), possono essere suddivise in prove di riconoscimento e classificazione dei materiali e prove per la determinazione delle proprietà meccaniche degli stessi materiali.

L'analisi dei risultati delle prove di laboratorio ha avuto un duplice scopo:

1. essere di ausilio alla definizione ed alla validazione del modello geologico del pendio Vadoncello proposto sulla base delle osservazioni stratigrafiche discusse ai precedenti Paragrafi 3.3.2 e 3.5;
2. definire i parametri di input della modellazione numerica a riguardo della legge costitutiva dei differenti materiali, implementata nelle diverse regioni della griglia di discretizzazione nei modi descritti ai successivo Paragrafi 6.1.2 e 6.1.4.

4.2 - Riconoscimento e classificazione dei materiali

La classificazione ed il riconoscimento dei materiali sono state perseguiti per mezzo di una serie di prove (EEC Report; 1996, Santaloia F. et al.; 1999):

1. prove per la determinazione della distribuzione granulometrica;
2. prove per la determinazione dei limiti di Atterberg;
3. prove per la determinazione del contenuto di materiale organico;
4. prove al diffrattometro per determinazioni mineralogiche.

Le proprietà indice dei materiali prelevati nel pendio, sono state determinate sia su campioni rimaneggiati secondo procedimenti standard ASTM, sia su campioni fortemente destrutturati mediante macinazione con un tritacarne allo scopo di frantumare ogni possibile residuo scaglioso ancora presente nel campione. (Fearon R. e Coop M.R.; 1999). Lo scopo di queste due diverse tipologie di preparazione è dovuta al fatto di volere comprendere quanto il differente grado di destrutturazione, indotta da queste due tecniche di preparazione del campione, conducesse a risultati differenti. Fearon R. e Coop M.R. (1999) hanno constatato che il rimaneggiamento standard non conduce alla completa disaggregazione delle particelle di argilla che formano le scaglie presenti nel campione, per cui considerano poco appropriato l'utilizzo delle proprietà indice per l'interpretazione della natura delle argille scagliose presenti nel pendio Vadoncello le cui caratteristiche sono state discusse nel Paragrafo 3.5 e riportate nelle Figure 3.17 e 3.18.

Un riepilogo di tutti i dati di riconoscimento disponibili è riportato nelle Tabelle 4.01 e 4.02.

In base alle osservazioni mosse da Fearon R. e Coop M.R. (1999), i dati ottenuti, questa volta da campioni preparati secondo procedure standard, relativi al Limite Liquido ed all'Indice Plastico riportati nella carta di plasticità di Figura

4.01 (Limite Liquido variabile tra 25% e 80% ed Indice di Plasticità variabile tra 10% e 55%) potrebbero essere sottostimati proprio a causa della tecnica di misura standard adottata e, quindi, inadeguati per confrontare la natura dei terreni argillosi presenti nell'ambito del pendio Vadoncello con quella di altri terreni argillosi non scagliosi. La Figura 4.01, comunque, rimane utile al confronto tra i differenti materiali argillosi, similmente scagliosi, presenti nel pendio Vadoncello, ed evidenzia come tra i Complessi B, C e D, rappresentativi di terreni in posto, ed i Complessi G, H ed I ossia quelli coinvolti dai fenomeni franosi, non si abbiano nette differenze di plasticità. Il complesso maggiormente plastico è risultato il Complesso C, seguito dal Complesso D e da quello F.

Quasi tutti i campioni trattati sono al di sopra della retta A e la maggior parte di essi sono classificabili come CH e, quindi come argille inorganiche ad alta plasticità.

In Figura 4.02 ed in Figura 4.03 rispettivamente, vengono riportati le variazioni del Limite Liquido e dell'Indice dei Vuoti al variare della profondità. Il raffronto di queste due figure mostra come le variazioni delle proprietà riportate in ciascuna di esse, segua andamenti paragonabili. Questa circostanza parrebbe mostrare che le variazioni del volume specifico dei terreni con la profondità sono dovute essenzialmente alle differenze nelle meso-strutture dei terreni stessi (Picarelli L.; 1998), e solo marginalmente alle variazioni delle loro proprietà indice.

Facendo riferimento alla Figura 4.02, si può verificare come i valori assunti dall'Indice di Liquidità per i terreni in posto, facenti parte dei complessi B, C e D, siano scarsamente influenzati dalle variazioni di profondità e leggermente inferiori ai corrispondenti valori assunti dai terreni in frana dei complessi G, H ed I. La prima circostanza è probabilmente dovuta al disturbo delle meso-strutture dei materiali in posto, mentre la seconda circostanza conduce all'ipotesi che i movimenti di frana abbiano ulteriormente disturbato la struttura dei materiali originali. Il fatto che le meso-strutture dei materiali in posto risultino disturbate è la causa principale del fatto che le proprietà meccaniche dei materiali non migliorino molto con la profondità se non a grandi profondità. Questo aspetto ha condizionato la scelta dei parametri della legge costitutiva Mohr-Coulomb

adottata nel corso della modellazione numerica, nei termini discussi al successivo Paragrafo 4.4.

L'analisi dei valori assunti dall'Indice di Plasticità, pur con le differenze riscontrabili in Tabella 4.01 tra i valori assunti dalle determinazioni City University e Laing, che possono essere ricondotte, in base alle considerazioni di Fearon R. e Coop M.R. (1999), a diverse tecniche di lavorazione dei materiali nei due casi, si è dimostrata fondamentale nella fase di impostazione della ricerca per due ragioni essenziali:

1. validare il modello geologico proposto sulla base di osservazioni e monitoraggi in sito;
2. riconoscere la uniformità geotecnica di alcuni litotipi presenti nel modello geologico di Figura 3.17 altrimenti apparentemente differenti in base alle sole osservazioni stratigrafiche, e comunque non riproducibili nel modello numerico date le loro ridotte dimensioni.

In Figura 4.04, è riportato l'andamento dell'Indice di Plasticità con la profondità per come rilevato da campioni provenienti da differenti posizioni nell'ambito del pendio; nel grafico sono state mantenute differenti le determinazioni effettuate presso i laboratori City University e Laing. Una correlazione tra i dati statisticamente corretta è impossibile data la loro marcata dispersione.

L'approccio seguito è stato quello di correlare i valori dell'Indice di Plasticità, solo localmente, lungo ogni singola verticale indagata. Ovvero, piuttosto che considerare l'insieme di valori di Indice di Plasticità e correlare tali valori alle profondità di prelievo dei campioni, indipendentemente dal luogo di prelievo, si è tenuto conto, nella correlazione, della localizzazione del prelievo intesa come sondaggio di provenienza. Un rappresentazione schematica di queste correlazioni è riportata in Figura 4.05 dove vengono riportati, per ogni sondaggio effettuato nell'area in studio, i valori assunti dall'Indice di Plasticità in corrispondenza della

profondità di prelievo del relativo campione.

L'analisi degli andamenti locali dell'Indice di Plasticità con la profondità alla luce del variare dei Complessi interessati dalle determinazioni dell'Indice di Plasticità stesso, mostra come vi sia un buon livello di similitudine tra gli andamenti dei valori dell'Indice di Plasticità nell'ambito di ogni singolo Complesso il che valida ulteriormente il modello geologico di Figura 3.18 quindi preso come base per la modellazione numerica.

Di particolare rilevanza ai fini della ricerca in oggetto sono risultati anche i valori assunti dal peso dell'unità di volume che vengono riportati nella Tabella 4.03 e graficamente rappresentati in Figura 4.06.

I valori assunti dal peso dell'unità di volume naturale, variano tra 19.8 kN/m^3 e 21.7 kN/m^3 . Come evidenziato nel grafico di Figura 4.06, l'andamento del peso specifico naturale al variare della profondità è alquanto disperso da un punto di vista statistico. Volendo, comunque, tentare una correlazione si può notare come, nell'ambito della regressione lineare determinata, il peso specifico naturale passi da valori dell'ordine di 20.5 kN/m^3 a valori dell'ordine di 21.5 kN/m^3 . Sia nel caso in cui si considerino i valori originali della grandezza indagata, sia nel caso si considerino i valori scaturiti dalla regressione lineare, la variabilità del peso dell'unità di volume naturale con la profondità è alquanto contenuta. Sulla base di questa considerazione si è deciso di utilizzare, nel corso della modellazione numerica, un unico valore del peso dell'unità di volume indipendentemente dalla profondità scegliendo il valore di 21.0 kN/m^3 .

4.3 - Prove meccaniche

4.3.1 - Prove edometriche

Presso il Laboratorio Geotecnico dell'IGAG del Politecnico di Bari sono state eseguite alcune prove edometriche ad alta pressione su campioni indisturbati. Si considereranno esemplificativi i risultati ottenuti per tre di questi campioni provenienti dai sondaggi P5 (campione P5₁) e I6 (campioni I6₁ ed I6₃) (Figura 3.09), appartenenti ai complessi B (P5₁ ed I6₁) e C (I6₃). I tre campioni considerati, caratterizzati da elevata plasticità, hanno una frazione argillosa variabile tra il 53% ed il 61%. Le prove per la determinazione del contenuto in calcite, effettuate al diffrattometro a raggi X, indicano che il campione P5₁ è un'argilla debolmente marnosa (12% di calcite), mentre sia il campione I6₁ che il campione I6₃ sono marne argillose (rispettivamente 31% e 35% di calcite). La composizione mineralogica dei tre campioni è risultata pressoché uguale, con una media del 51% di minerali argillosi, 26% di calcite, 15% di quarzo, 2% di feldspati e tracce di pirite e siderite. I minerali argillosi sono costituiti da illite-smectite (79% con maggioranza di illite), caolinite (15%), illite (4%) e clorite (2%) (Santaloia F. et al.; 1999)

In Figura 4.07 sono riportati i risultati delle prove edometriche ad alta pressione ($\sigma'_{vMax} = 18 \text{ MPa}$) svolte sui campioni descritti dopo ricostituzione in laboratorio ad un contenuto iniziale d'acqua pari a circa il 150% del Limite Liquido (Burland J.B.; 1990), allo scopo di definire le curve compressione intrinseca (ICL) per compressione mono-dimensionale dei materiali (Burland J.B.; 1990). Nella stessa Figura 4.07 sono anche riportati i risultati delle prove edometriche ad alta pressione ed a rigonfiamento impedito ($\sigma'_{vMax} = 18.7 \text{ MPa}$) effettuate sugli stessi campioni indisturbati.

In Figura 4.08 sono, invece, mostrati i risultati di prove edometriche durante le quali i campioni indisturbati sono stati dapprima scaricati a basse pressioni e dopo ricaricati.

Le differenze nei valori assunti dall'indice dei vuoti per i campioni I6₃ ed I6_{3b} di Figura 4.07 e per i campioni P5₁ e P5_{1b} delle Figure 4.07 e 4.08 sono essenzialmente dovute alle disomogeneità dei terreni in sito nell'ambito dello stesso campione.

Gli indici di compressione misurati per i campioni ricostituiti per valori di $\sigma'_v = 100 \text{ kPa} \div 1000 \text{ kPa}$, C_c^* , sono risultati, per i campioni I6₁ e I6₃, rispettivamente pari a 0.44 e 0.52. Nonostante il fatto che gli Indici di Plasticità non possano essere considerati, per i materiali presenti nell'ambito del pendio Vadoncello, rappresentativi della natura dei campioni provati (Fearon R. e Coop M.R.; 1999), i valori di C_c^* secondo la correlazione proposta da Schofield A.N. e Wroth C.P. (1968), $C_c^* = G_s \cdot IP/2$, sono risultati pari a 0.45 e 0.56 rispettivamente per I6₁ e I6₃ e quindi vicini ai valori misurati. Evidentemente le proprietà indice delle argille in esame possono essere correlate alle proprietà intrinseche ottenute sottoponendo a prova i materiali ricostituiti secondo procedure standard.

In Figura 4.07 si può osservare che le curve edometriche dei campioni indisturbati sono collocate a sinistra della ICL. Questo aspetto, già riscontrato per altre argille scagliose appenniniche (Guerriero G. et al.; 1995 e Picarelli L. e Olivares L.; 1998), è rappresentativo degli effetti sul comportamento meccanico della meso-struttura scagliosa che da luogo ad indici di ricompressione C_r particolarmente elevati, indice di compressione C_c bassi e bassi valori dell'indice dei vuoti. Nell'intervallo di valori dell'indice dei vuoti iniziali per i campioni indisturbati, la ICL del materiale ricostituito è caratterizzata da rigidità abbastanza elevate e si correla a valori elevati della pressione verticale efficace. Di conseguenza lo stato dei campioni naturali si mantiene, durante la compressione, a sinistra della ICL raggiungendola, come evidenziato in Figura 4.07, solo in corrispondenza di pressioni molto elevate, al contrario di quanto avviene generalmente per argille sensitive non scagliose, aventi indice dei vuoti iniziali decisamente più elevati dei campioni naturali di Figura 4.07 e curve di ricompressione che intersecano la curva di compressione intrinseca prima del grande snervamento (Burland J.B.; 1990, Cotecchia F. e Chandler R.J.; 1997 e

Cotecchia F. e Chandler R.J.; 1999). Qui per grande snervamento ci si riferisce allo stato che Burland J.B. (1990) definisce snervamento e Leroueil S. e Vaughan P.R. (1990) definiscono snervamento secondario e che è rappresentativo dello stato del terreno in corrispondenza del quale, per variazioni delle proprietà inelastiche del terreno, si manifestano significative riduzioni della rigidità, aumento dell'indice di compressione e forte danno strutturale.

Per ciascuno dei campioni di Figura 4.07, la pressione di grande snervamento (valutata con la tecnica di Casagrande nel punto di massima curvatura della curva di compressione edometrica) si colloca a sinistra delle curve ICL.

In Figura 4.09, dove si riporta l'andamento della rigidità mono-dimensionale $M = d\sigma'_v / d\varepsilon_v$ al variare della pressione verticale efficace σ'_v , è possibile identificare valori della pressione verticale a grande snervamento paragonabili a quelli individuati in Figura 4.07. Questi valori corrispondono, nel grafico di Figura 4.09, a pressioni verticali efficaci σ'_v inferiori a quelle cui corrispondono minimi della rigidità M (Janbu N. e Senneset K.; 1979). In Figura 4.09 si può osservare come i valori di rigidità M relativi ai campioni di argilla naturale siano sempre superiori, per qualsiasi valore di pressione, a quelli relativi al corrispondente campione ricostituito anche se di poco, mentre, per argille sensitive naturali non scagliose si osserva in genere che i valori di rigidità sono molto più elevati prima del grande snervamento e più bassi dopo il grande snervamento rispetto ai valori assunti dai corrispondenti campioni ricostituiti ed a parità di pressione verticale efficace. La causa principale di questa differenza di comportamento tra argille scagliose e non è dovuta al fatto che le argille sensitive subiscono una notevole degradazione strutturale in corrispondenza del grande snervamento (Cotecchia F. e Chandler R.J.; 1998), mentre le argille scagliose si trovano, già prima del grande snervamento, in una condizione alquanto disturbata, che non viene sostanzialmente modificata all'insorgere del grande snervamento. Ciò comporta che lo stato di grande snervamento non è, per le argille scagliose, altrettanto definito di quanto non lo sia per le argille non scagliose e sensitive.

In Figura 4.08 si osserva come i campioni indisturbati di argille scagliose siano caratterizzate da indici di rigonfiamento C_s elevati in cicli di rigonfiamento-

ricarico per cui C_s è solo poco inferiore a C_c (rispettivamente $C_s = 0.05 \div 0.15$ e $C_c = 0.15 \div 0.20$). Le cause di questo comportamento possono essere essenzialmente due. La prima causa sta nella elevata presenza di minerali rigonfianti nelle argille considerate. La seconda causa è probabilmente dovuta all'assenza di forti legami tra le scaglie che, quindi, non si oppongono al rigonfiamento. La elevata capacità di rigonfiamento dei terreni presenti nel pendio Vadoncello probabilmente comporta deformazioni anche significative durante le fasi di riumidificazione dei terreni stessi a causa di variazioni nel livello piezometrico o di infiltrazioni d'acqua dovute ad eventi meteorici.

A causa della notevole isteresi dei cicli di scarico-ricarico (Figura 4.08), in fase di ricarica gli stati tensionali corrispondenti al grande snervamento si spostano più in alto e più a sinistra delle curve ICL rispetto agli strati di grande snervamento dei campioni non rigonfiati prima della compressione. Le curve di ricomprensione di Figura 4.08, comunque, tendono a ricongiungersi alle stesse curve di compressione normale definite in Figura 4.07 (NCL), che perciò possono essere considerate involucri di stato limite in condizioni di compressione edometrica per i corrispondenti campioni. Se questi involucri di stato limite ed i relativi stati di grande snervamento giacciono sulla superficie di stato limite del materiale nello spazio volume specifico v -sforzo deviatorico q -tensione media efficace p' , i dati riportati in Figura 4.07 implicano che i campioni indisturbati di argille scagliose hanno una superficie di stato limite più piccola e caratteristiche di resistenza più scadenti rispetto a quelle dei corrispondenti materiali ricostituiti.

4.3.2 - Prove di taglio diretto

Sempre presso il Laboratorio Geotecnico del Politecnico di Bari sono state eseguite prove di taglio diretto drenate su provini ottenuti dal campione I6₃ descritto al precedente Paragrafo 4.3.2. I provini sono stati consolidati a pressioni verticali efficaci comprese tra 98 kPa e 980 kPa. I risultati di queste prove sono riassunti in Figura 4.10.

Entrambi i provini consolidati a pressione verticale efficace di 980 kPa e 784

kPa mostrano un aumento dell'angolo di resistenza a taglio $\phi' = \arctan(\tau/\sigma'_v)$ con la deformazione di taglio, evidenziando un comportamento incrudente accompagnato da un comportamento volumetrico contraente fino a grandi deformazioni. Solo in corrispondenza di deformazioni molto grandi, ϕ' tende a ridursi verso il valore residuo (Fearon R.; 1998) $\phi'_r = 5^\circ \div 6^\circ$. Questi provini, quindi, sembrano esibire un comportamento “wet” secondo la meccanica dello stato critico (Schofield A.N. e Wroth C.P.; 1968) e raggiungono una condizione finale qui definita di “pseudo stato critico”, in quanto caratterizzata da incrementi nulli della resistenza e della deformazione volumetrica all'avanzare della deformazione di taglio con angoli di resistenza a taglio $\phi'_{CS} = 12^\circ \div 15^\circ$ dopo spostamenti di 2-3 millimetri. La Figura 4.11 mostra che lo stato di consolidazione raggiunto da questi due provini nel piano $e - \log \sigma'_v$, è molto prossimo alla curva di compressione normale NCL del campione I6₃ come dovrebbe verificarsi in caso di comportamento “wet”.

I provini consolidati a pressioni verticali efficaci inferiori (98 kPa, 392 kPa e 588 kPa), invece, mostrano un comportamento dilatante e rammollente sino da valori bassi della deformazione di taglio, esibendo quindi un comportamento “dry”. Lo stato di consolidazione di questi provini e, in modo particolare, del provino consolidato a 98 kPa appare collocarsi, come riportato in Figura 4.11, a sinistra rispetto alla curva di compressione normale NCL del campione I6₃.

In Figura 4.11 diventa, quindi, possibile distinguere due differenti domini, nel piano $e - \log \sigma'_v$, uno relativo a campioni che, collocandosi in prossimità della curva di compressione normale NCL, esibiscono un comportamento “wet” ed un altro relativo a campioni che si collocano più a sinistra della curva di compressione normale NCL ed esibiscono un comportamento “dry”. Questa osservazione risulta essere in accordo con la meccanica dello stato critico.

Il valore massimo dell'angolo di attrito mostrato dai provini provenienti dal campione I6₃ varia da valori molto bassi, in corrispondenza dello pseudo stato critico $\phi'_{CS} = 12^\circ \div 15^\circ$, fino a valori più elevati relativi alla resistenza di picco di provini che mostrano un comportamento dilatante e rammollente e, in particolare,

$\phi'_p \cong 24^\circ$, per il provino consolidato ad una pressione verticale efficace di 98 kPa. Questi bassi valori dell'angolo di resistenza a taglio ϕ' confermano le scadenti caratteristiche di resistenza dei terreni presenti nel pendio Vadoncello, che sono risultate più basse per i campioni naturali che per quelli ricostituiti. Le proprietà meccaniche non migliorano all'aumentare della profondità almeno entro le profondità indagate (Tabelle 4.01 e 4.02).

4.3.3 - Prove triassiali

I materiali presenti nell'ambito del pendio Vadoncello, sono stati sottoposti ad una serie di prove triassiali allo scopo di determinare le loro caratteristiche di resistenza e rigidezza (EEC Report; 1996, Fearon R.; 1998).

Tutte le prove triassiali sono state effettuate sempre sia sui campioni indisturbati sia sui corrispondenti campioni ricostituiti ottenuti secondo la metodologia convenzionale di ricostituzione. Le prove triassiali sono state tutte effettuate con l'ausilio di apparecchiature stress-path controllate automaticamente.

I provini naturali indisturbati sono stati sottoposti a taglio drenato dopo consolidazione a valori di tensione media efficace p' stimata in base alle profondità di prelievo in sito del campione.

Le superfici di rottura dei provini sono state, per la maggior parte delle prove effettuate, composite e multiple, caratteristica questa probabilmente dovuta alla presenza di discontinuità interne al campione e, quindi, al materiale di origine. Da notare, inoltre, che non si è osservata alcuna orientazione predominante delle particelle presenti a margine delle superfici di rottura cosa questa probabilmente dovuta al fatto che la rottura si è manifestata per livelli di deformazione non sufficienti a provocare questo effetto.

Nelle Figure 4.12-4.18, per i materiali direttamente considerati nella modellazione numerica ed afferenti ai diversi Complessi definiti nel precedente Paragrafo 3.5 (Figura 3.17), vengono riportati i diagrammi della tensione deviatorica nonché della deformazione volumetrica in funzione della deformazione assiale.

Dall'analisi di questi grafici si evince come i campioni naturali, sottoposti a taglio drenato, abbiano esibito nella maggior parte dei casi un comportamento duttile, senza significativi picchi di resistenza. Una blanda rammollenza associata a dilatanza è stata osservata per il campione NCA (Figura 4.16), prelevato ad una profondità di 4.6 m nell'ambito del Complesso G (Figura 3.17). Da un punto di vista delle deformazioni volumetriche i materiali provenienti dai Complessi a maggiori profondità C (Figura 4.12), D (Figura 4.12), E (Figura 4.13) ed F (Figura 4.15) mostrano un comportamento debolmente contraente mentre i materiali più superficiali, dei Complessi G (Figura 4.16), H (Figura 4.17) ed I (Figura 4.18), mostrano un comportamento moderatamente dilatante.

Come discusso nei precedenti Paragrafi 4.3.1 e 4.3.2, dopo consolidazione allo stato tensionale di sito, i terreni caratterizzati da un comportamento dilatante raggiungono resistenze di picco con valori dell'angolo di resistenza a taglio ϕ'_p variabili tra 23° e 30° (Fearon R.; 1998), mentre i terreni caratterizzati da un comportamento contraente, mostrano un comportamento "wet" con valori massimi dell'angolo di resistenza a taglio ϕ'_{cs} compresi tra 12° e 17° (Fearon R.; 1998) che non migliorano all'aumentare della profondità. Questi risultati appaiono in accordo con quelli delle prove di taglio diretto discusse al precedente Paragrafo 4.3.2. I terreni profondi sembra si trovino in uno stato di consolidazione prossimo alla superficie di stato limite, tanto che anche minime variazioni di carico possono indurre in essi stati di grande snervamento, dando origine a grandi deformazioni plastiche. Di conseguenza, come accennato al Paragrafo 3.6, questa condizione e le deformazioni conseguenti appaiono essere un fattore critico per la stabilità del pendio Vadoncello. Lo stato dei materiali, prossimo al grande snervamento, è possibilmente la causa del manifestarsi dei lenti movimenti monitorati in profondità.

In Tabella 4.04 si riportano i valori dell'angolo di resistenza a taglio in condizioni di pseudo stato critico, ϕ'_{cs} relativamente ai campioni prelevati dai materiali direttamente interessati dalla modellazione numerica. Rispetto ai valori determinati da Fearon R. (1998), per evitare di penalizzare in modo significativo le caratteristiche di resistenza dei materiali in sito ed a vantaggio di stabilità per

l'intero pendio, i valori dell'angolo di resistenza a taglio in condizioni di pseudo stato critico, ϕ'_{CS} , sono stati leggermente aumentati assumendo valori compresi tra $\phi'_{CS} = 13^\circ$ e $\phi'_{CS} = 22^\circ$.

Le considerazioni precedenti hanno permesso, come discusso al successivo Paragrafo 4.4, di utilizzare una legge costitutiva per i terreni presenti nell'ambito del pendio Vadoncello elasto-plastica, con involuppo di rottura Mohr-Coulomb, differenziando gli involuppi stessi per i materiali contraenti e per quelli dilatanti.

Nelle stesse prove triassiali in stress-path dinanzi discusse, sono state eseguite, tra le altre misure della rigidità in corrispondenza di piccoli valori deformazione a taglio compresi tra 0.01% e 1% utilizzando i bender elements.

Comunque, ai fini della modellazione numerica, in considerazione della legge costitutiva adottata a rappresentare il comportamento meccanico dei terreni presenti nel pendio Vadoncello, i valori del modulo di rigidità al taglio G in dominio elastico sono stati dedotti dai di prova considerando la pendenza media della curva $q - \epsilon_s$ a più elevati valori della deformazione di taglio.

Partendo dal diagramma tensione deviatorica-deformazione assiale $q' - \epsilon_a$ è stato ricavato il valore di deformazione assiale ϵ_a corrispondente al 75% del valore massimo dello sforzo deviatorico massimo q'_{max} , ossia $q'_{75\%}$. Questo valore di $\epsilon_{a75\%}$, riportato sul diagramma deformazioni volumetriche-deformazioni assiali $\epsilon_v - \epsilon_a$, ha consentito di valutare il corrispondente livello di deformazione volumetrica $\epsilon_{v75\%}$ raggiunto e quindi il corrispondente valore di $\epsilon_{s75} = \epsilon_{a75\%} - \frac{\epsilon_{v75\%}}{3}$. Il valore $\epsilon_{s75\%}$, unitamente al valore di sforzo deviatorico precedentemente assunto, ovvero $q'_{75\%}$, permette di determinare il valore del modulo di rigidità a taglio attraverso la relazione $G' = \frac{q'_{75\%}}{3 \cdot \epsilon_{s75\%}}$. Come si dirà in seguito, il comportamento dei terreni nell'ambito del modello numerico è stato ipotizzato elastico lineare sino al raggiungimento del valore q'_{max} .

È stato assunto un coefficiente di Poisson $\nu = 0.35$ in base a dati di letteratura

relativi a materiali simili a quelli del caso in questione, e si è supposto che tale valore si mantenga costante nell'intera area in esame per cui, data la relazione $K' = \frac{2 \cdot G' \cdot (1 + \nu)}{3 \cdot (1 - 2 \cdot \nu)}$, è stato determinato il corrispondente valore del modulo di rigidezza volumetrica.

I valori dei moduli di rigidezza ottenuti come descritto in precedenza, i cui valori sono riportati in Tabella 4.05, una volta normalizzati rispetto alla pressione equivalente p' di sito, sono stati posti in relazione all'Indice di Plasticità del materiale, come supposto dalla riconosciuta relazione tra G' e p'^m con n funzione dell'Indice Plastico IP (Viggiani G. e Atkinson J.H.; 1995)

Scopo dell'analisi delle correlazioni G'/p' -IP e K'/p' -IP riportate nelle Figure 4.19 e 4.20, è stato quello di definire una relazione tramite la quale dedurre i valori dei moduli di rigidezza da adottare nella modellazione numerica per le zone del pendio per cui mancassero misure dirette di dette grandezze. Nelle Figure 4.19 e 4.20 sono riportate le regressioni lineari utilizzate a tale scopo.

4.3.3 - Prove di taglio residuo

Allo scopo di determinare la resistenza residua dei materiali presenti nel pendio Vadoncello e, in particolare, dei materiali coinvolti dal movimento franoso, sono state condotte alcune prove di taglio residuo utilizzando l'apparecchiatura di taglio anulare di Bishop (EEC Report; 1996, Fearon R.; 1998).

Sono state eseguite sei prove di taglio residuo su campioni rimaneggiati ottenendo, così, sei valori di angolo di resistenza residua. I risultati di tali prove sono riassunti in Tabella 4.06

L'angolo resistenza residua per i materiali presenti nell'area di studio, è risultato variabile tra 5.0° e 6.9° . In Figura 4.21 sono diagrammati gli angoli di resistenza residua misurati in funzione della profondità di prelievo dei corrispondenti campioni. In figura si nota come non si evidenzia alcuna influenza della profondità sul valore dell'angolo di resistenza residua.

Nel corso della modellazione numerica, si è adottato un angolo di resistenza residua pari a 5.7° costante con la profondità.

4.4 - Caratterizzazione meccanica dei materiali in sito

Considerate le osservazioni riportate nel precedente Paragrafo 4.3, ai fini della modellazione numerica delle proprietà meccaniche dei materiali presenti nell'ambito del pendio Vadoncello, si è distinto il comportamento meccanico dei terreni con comportamento contraente ed incrudente da quello dei terreni con comportamento dilatante e rammollente.

Per entrambe le tipologie di terreni nella modellazione numerica è stato assunto un modello costitutivo elasto-plastico con inviluppo di resistenza Mohr-Coulomb a flusso non associato come discusso nel successivo Paragrafo 6.1.4 in quanto i dati disponibili per la caratterizzazione meccanica dei diversi terreni afferenti ai Complessi non erano sufficienti per la scelta di modelli elasto-plastici più complessi, a più parametri come, ad esempio, tra quelli implementati nel codice di calcolo FLAC, il modello costitutivo Cam-Clay modificato.

I materiali presenti a grandi profondità nel pendio, maggiori di circa 20-25 metri, per i quali si è riconosciuto un comportamento contraente ed incrudente e basse caratteristiche di resistenza, con angoli massimi di resistenza a taglio in condizioni di pseudo stato critico $\phi'_{CS} = 12^\circ \div 17^\circ$ sono stati modellati nelle loro caratteristiche di resistenza secondo un inviluppo di Mohr-Coulomb rettilineo passante per l'origine (coesione intercetta $c' = 0$). Come anticipato al Paragrafo 4.3.3, rispetto ai citati valori dell'angolo ϕ'_{CS} determinati da Fearon R. (1998), per evitare di penalizzare in modo significativo le caratteristiche di resistenza dei materiali in sito ed a vantaggio di stabilità per l'intero pendio, questi valori stati leggermente aumentati assumendo valori compresi tra $\phi'_{CS} = 13^\circ$ e $\phi'_{CS} = 22^\circ$ (Tabella 4.07). Solo in corrispondenza degli ultimi 50 metri di profondità della griglia di discretizzazione, si è assunto che i valori di coesione intercetta c' aumentino, con i modi descritti al successivo Paragrafo 6.1.4, in virtù di una possibile diagenesi per compattazione dei materiali che possano aver influito positivamente sul disturbo delle meso-strutture dei materiali stessi.

I materiali più superficiali del pendio e, quindi, essenzialmente i materiali in

frana, per i quali è stato individuato un comportamento dilatante e rammollente, sono stati modellati nelle loro caratteristiche di resistenza secondo involucri di Mohr-Coulomb curvilinei, al fine di implementare nel modello la variabilità reale della coesione intercetta c' e dell'angolo di resistenza a taglio ϕ' con la pressione verticale efficace σ'_v , e quindi con la profondità. Partendo, infatti, dal valore di picco dell'angolo di resistenza a taglio $\phi'_p = 23^\circ \div 30^\circ$ dedotto dal rapporto $(q/p')_{\max}$ valutato in base ai risultati delle prove triassiali, si è assunto un valore dell'angolo di resistenza a taglio ϕ' intermedio tra un valore massimo corrispondente a valori esigui della pressione verticale efficace σ'_v (per gli strati più superficiali) ed il valore $\phi'_{cs} = 13^\circ \div 22^\circ$ corrispondente a valori più elevati della stessa σ'_v (per gli strati a profondità fino a circa 20-25 metri). Si è quindi definito un involucro di resistenza curvilineo interpolante stati $\tau - \sigma'$ connessi a ϕ'_{\max} ($\sigma'_v \Leftarrow$ profondità $\cong 0$ m), ϕ'_p e ϕ'_{cs} ($\sigma'_v \Leftarrow$ profondità $\cong 20 - 25$ m). I valori di c' e ϕ' nell'ambito degli intervalli di variabilità di σ'_v adottati nella definizione di detti involucri curvilinei sono discussi nel Paragrafo 6.1.4.

Dopo lo snervamento, per valori di deformazione di taglio maggiori del 20%, si è assunta una riduzione nelle caratteristiche di resistenza, fino al raggiungimento, al 50% di deformazione di taglio, del valore di angolo di resistenza a taglio residuo $\phi'_R = 5.7^\circ$.

In Tabella 4.07 sono riportati, per ogni materiale modellato numericamente, le caratteristiche di resistenza e le rigidzze adottate nella modellazione.

4.5 - Modello geotecnico del pendio Vadoncello

Sulla scorta delle osservazioni fatte al paragrafo precedente circa il comportamento dei materiali in sito è stato possibile mettere a punto un modello geotecnico che, prendendo le mosse dal modello geologico discusso al precedente Paragrafo 3.5 e riportato in Figura 3.18, tiene conto delle differenze nei comportamenti meccanici dei materiali presenti lungo il pendio Vadoncello.

Il modello geotecnico adottato viene riportato in Figura 4.22 nella quale, per ogni regione individuata nell'ambito della griglia di discretizzazione con i modi descritti al successivo Paragrafo 6.1.2, vengono riportate le caratteristiche meccaniche dei materiali.

Per ogni regione viene indicato con la lettera C il comportamento Contraente e con la lettera D il comportamento Dilatante.

Sempre con riferimento alle singole regioni viene, altresì, indicato il campo di variabilità assunto dai valori della coesione intercetta c' e dall'angolo di resistenza a taglio ϕ' per come sono stati numericamente modellati. Gli intervalli di variabilità riportati in Figura 4.22 relativamente ad ogni regione sono in alcuni casi differenti da quelli riportati nelle Tabella 4.07 (si vedano ad esempio i valori relativi alle regioni G, H ed A di piede) in quanto in figura vengono riportati solo i valori relativi alle reali profondità raggiunte delle stesse regioni.

CAPITOLO 4

FIGURE E TABELLE

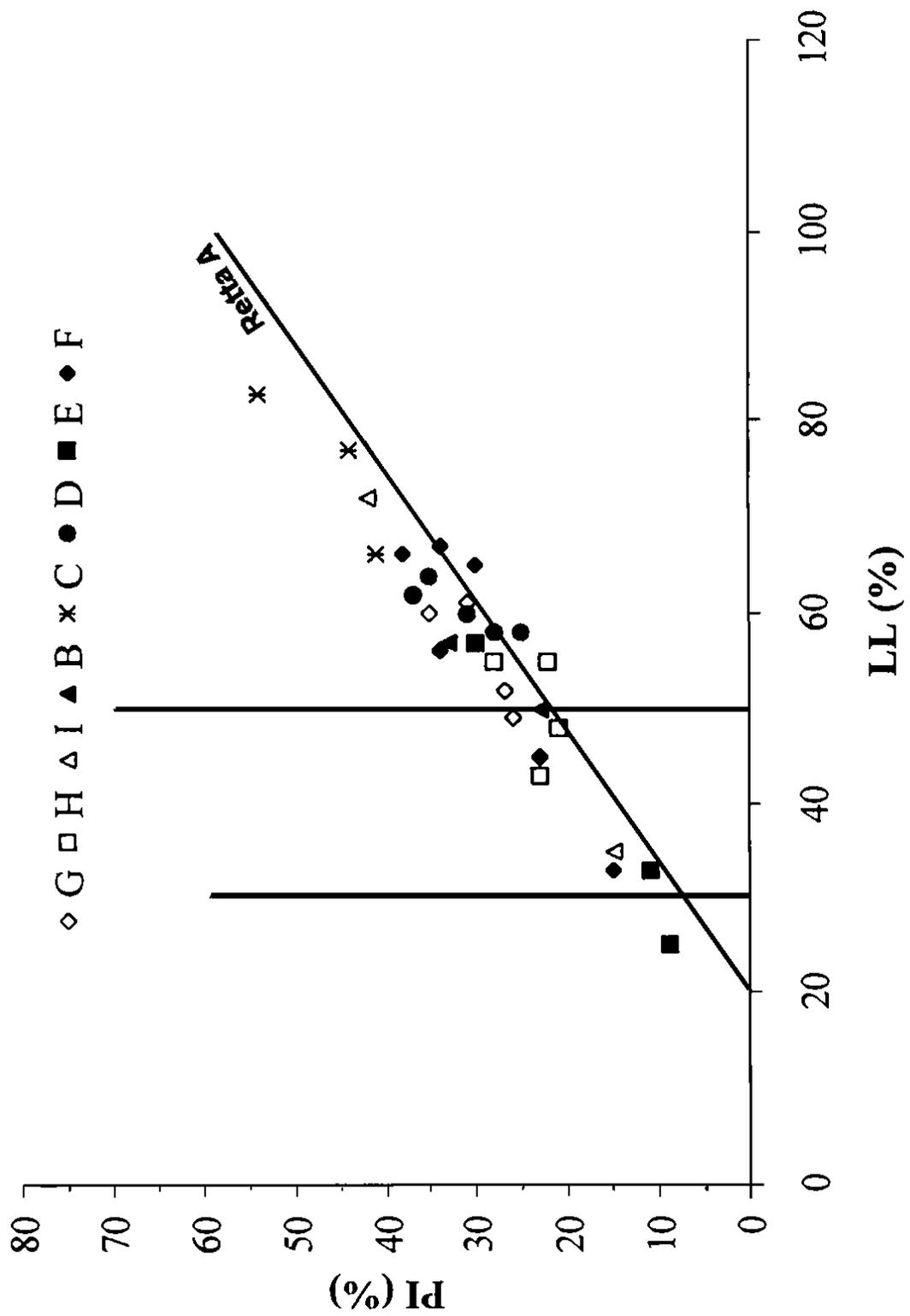


Figura 4.01 - Abaco di plasticità per terreni in frana ed in sito

(Santaloia et al.; 1999)

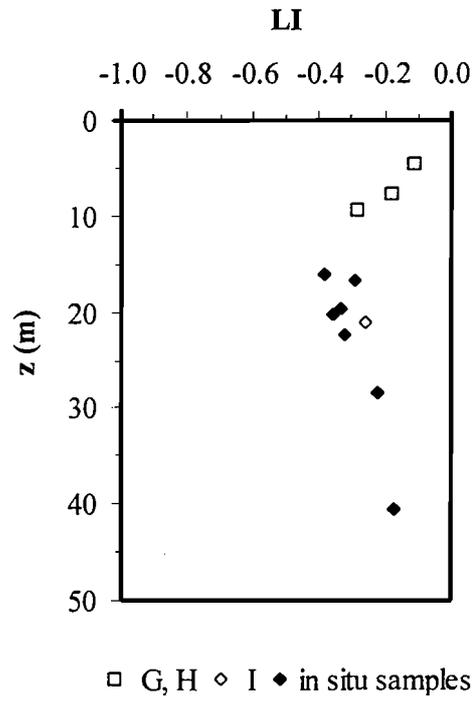


Figura 4.02 - Indice di Liquidità per terreni in frana ed in sito
(Santaloia F. et al.; 1999)

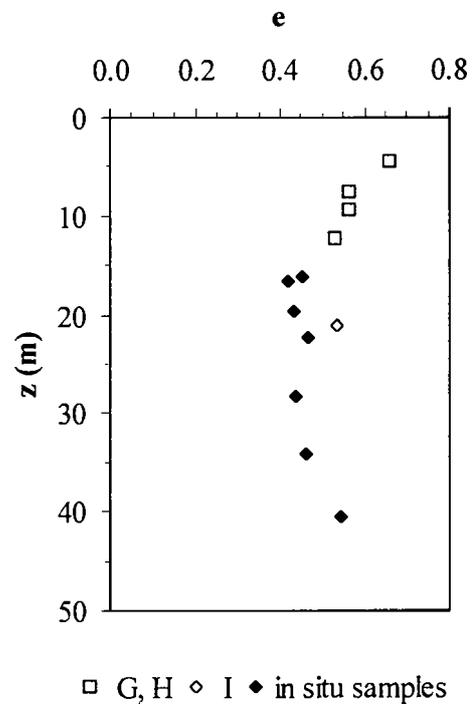


Figura 4.03 - Indice dei vuoti per terreni in frana ed in sito
(Santaloia F. et al.; 1999)

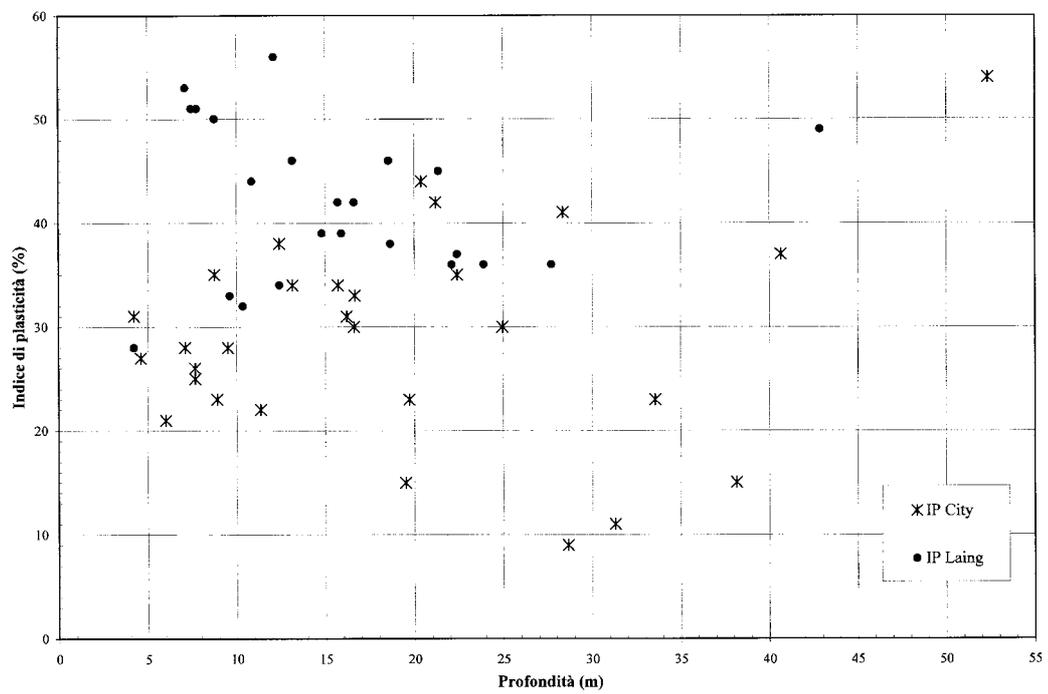


Figura 4.04 - Variazione dell'Indice di Plasticità con la profondità

(Dati EEC Report; 1996)

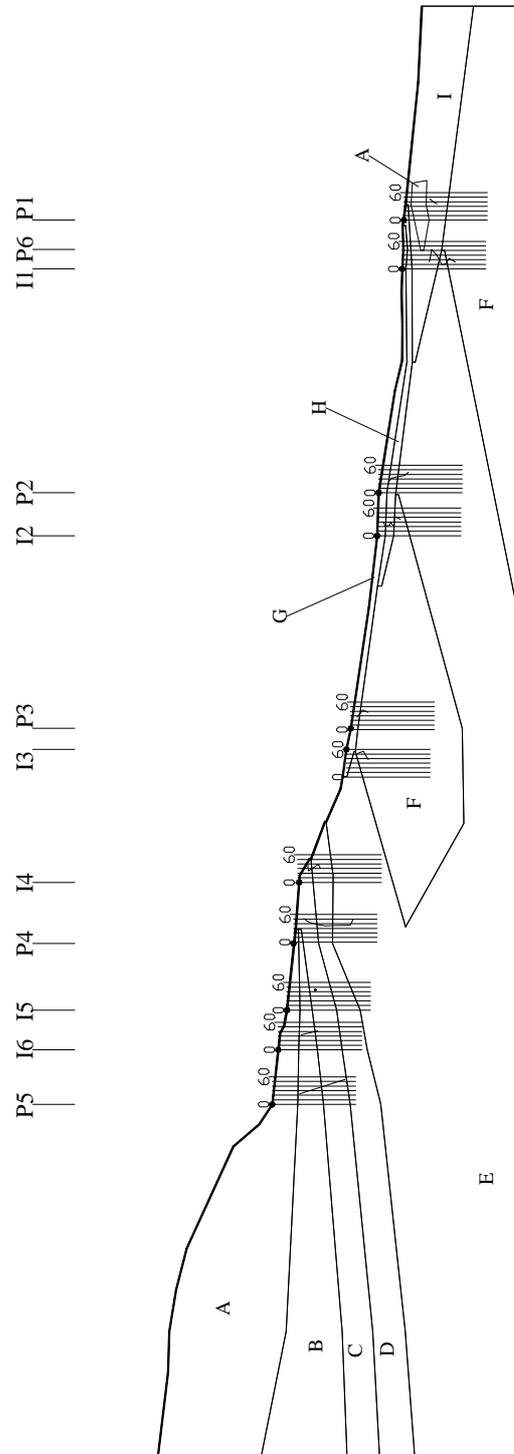


Figura 4.05 - Variazione dell'Indice di Plasticità nell'area nel pendio Vadoncello

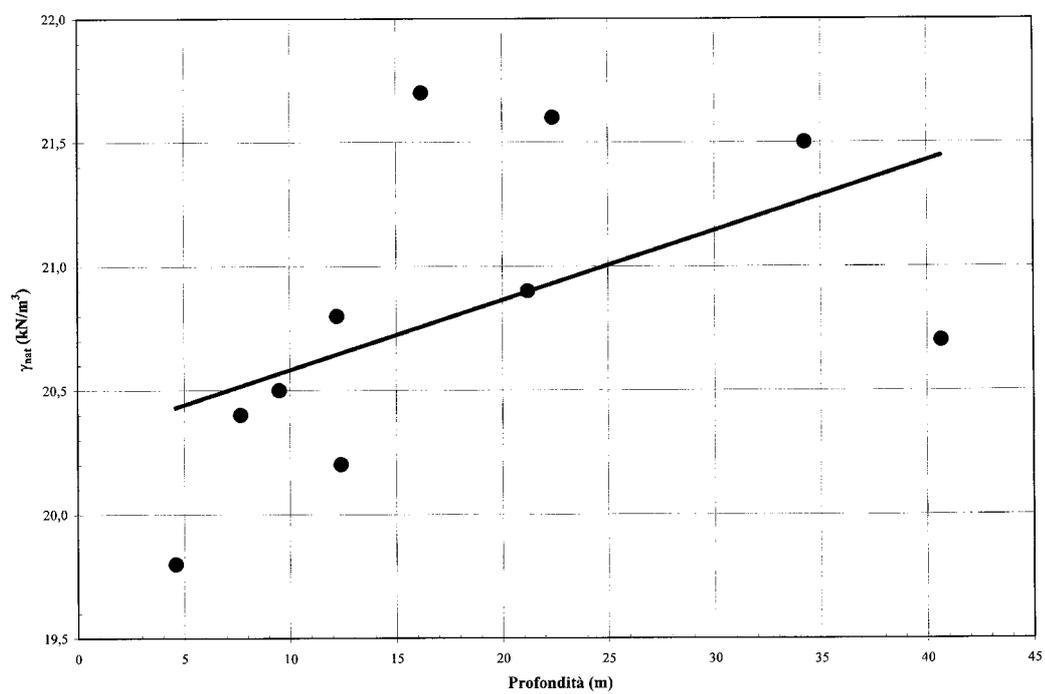


Figura 4.06 - Variazione del peso specifico naturale con la profondità

(Dati EEC Report; 1996)

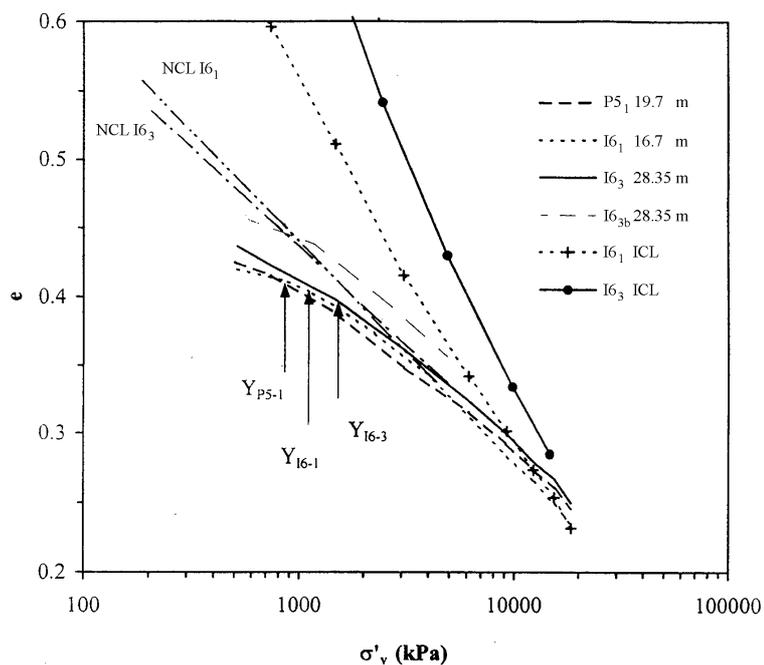


Figura 4.07 - Prove edometriche su campioni naturali e ricostituiti
(Santaloia F. et al.; 1999)

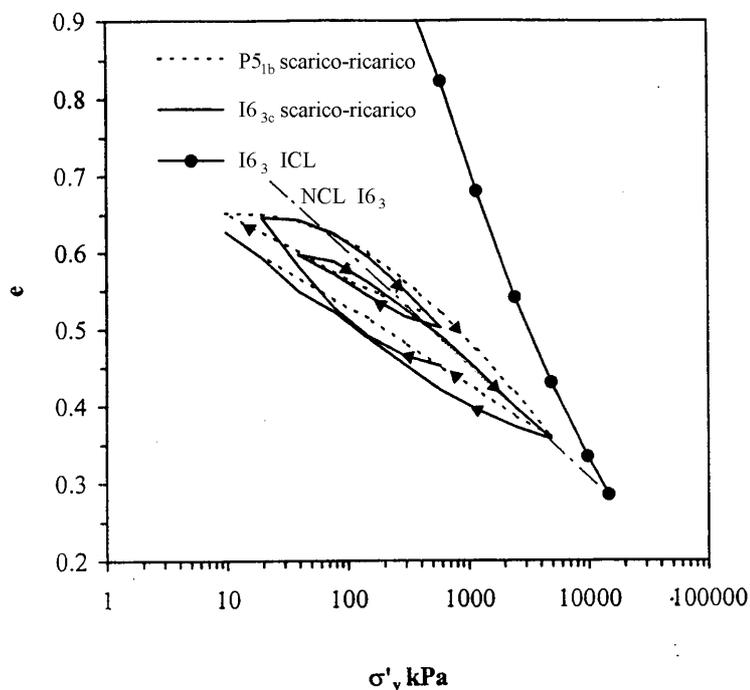


Figura 4.08 - Prove edometriche di scarico e ricarico
(Santaloia F. et al.; 1999)

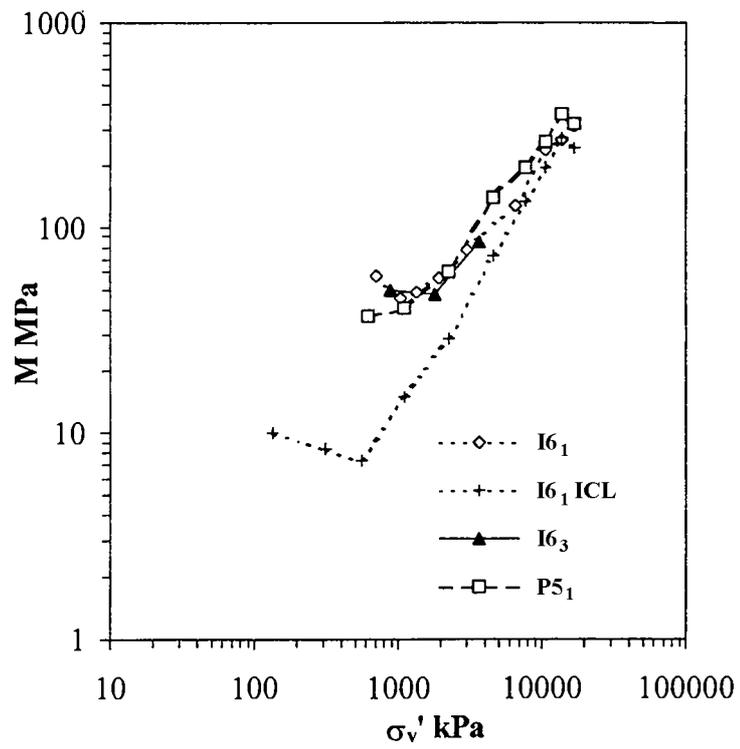


Figura 4.09 - Rigidezza edometrica di campioni naturali e ricostituiti

(Santaloia F. et al.; 1999)

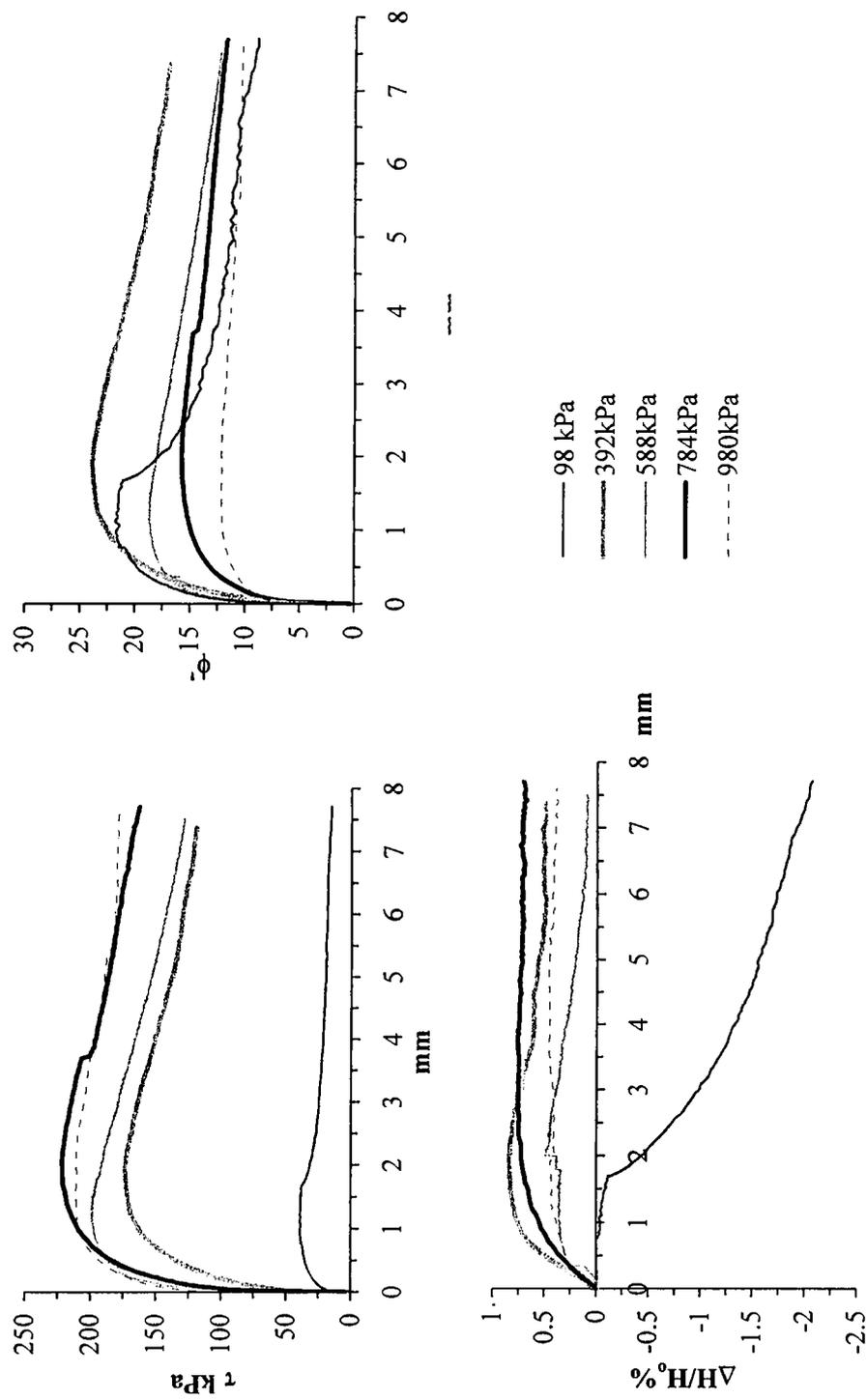


Figura 4.10 - Prova di taglio diretto drenata

(Santaloia F. et al.; 1999)

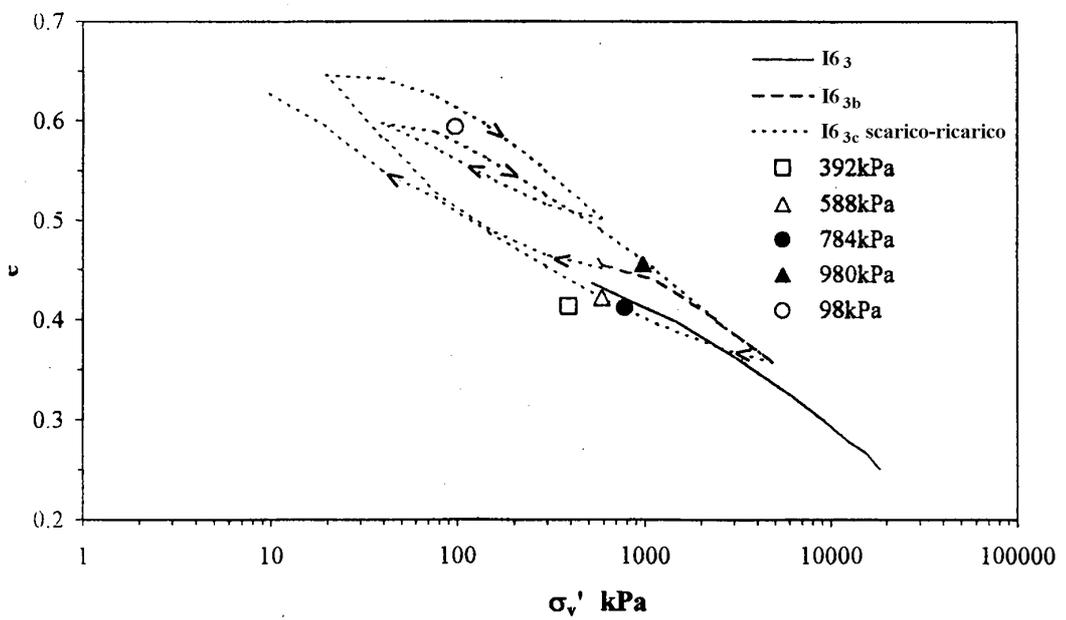


Figura 4.11 - Stati di consolidazione dei provini sottoposti a prova di taglio diretto drenata

(Santaloia F. et al.; 1999)

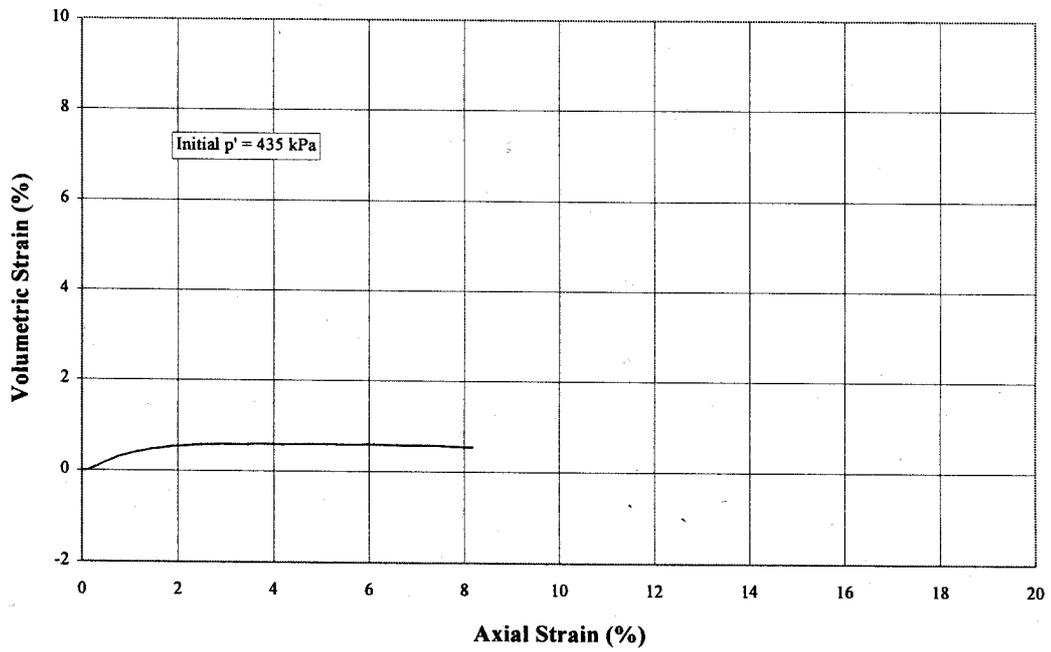
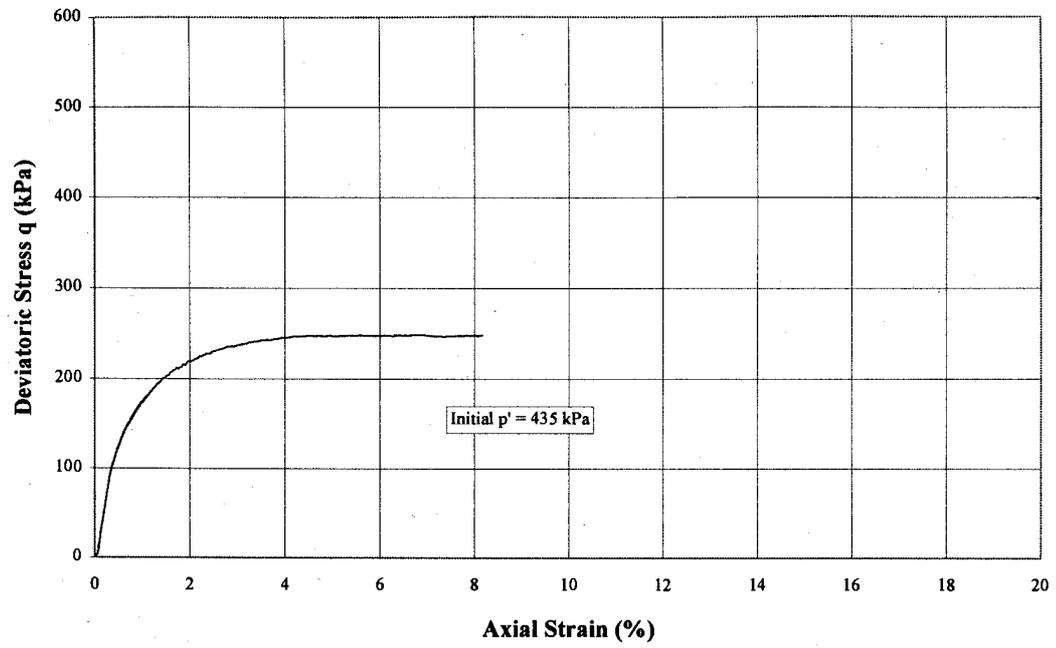


Figura 4.12 - Prova triassiale drenata - Complesso C - Sondaggio I6 - Profondità 34.25 metri
(EEC Report; 1996)

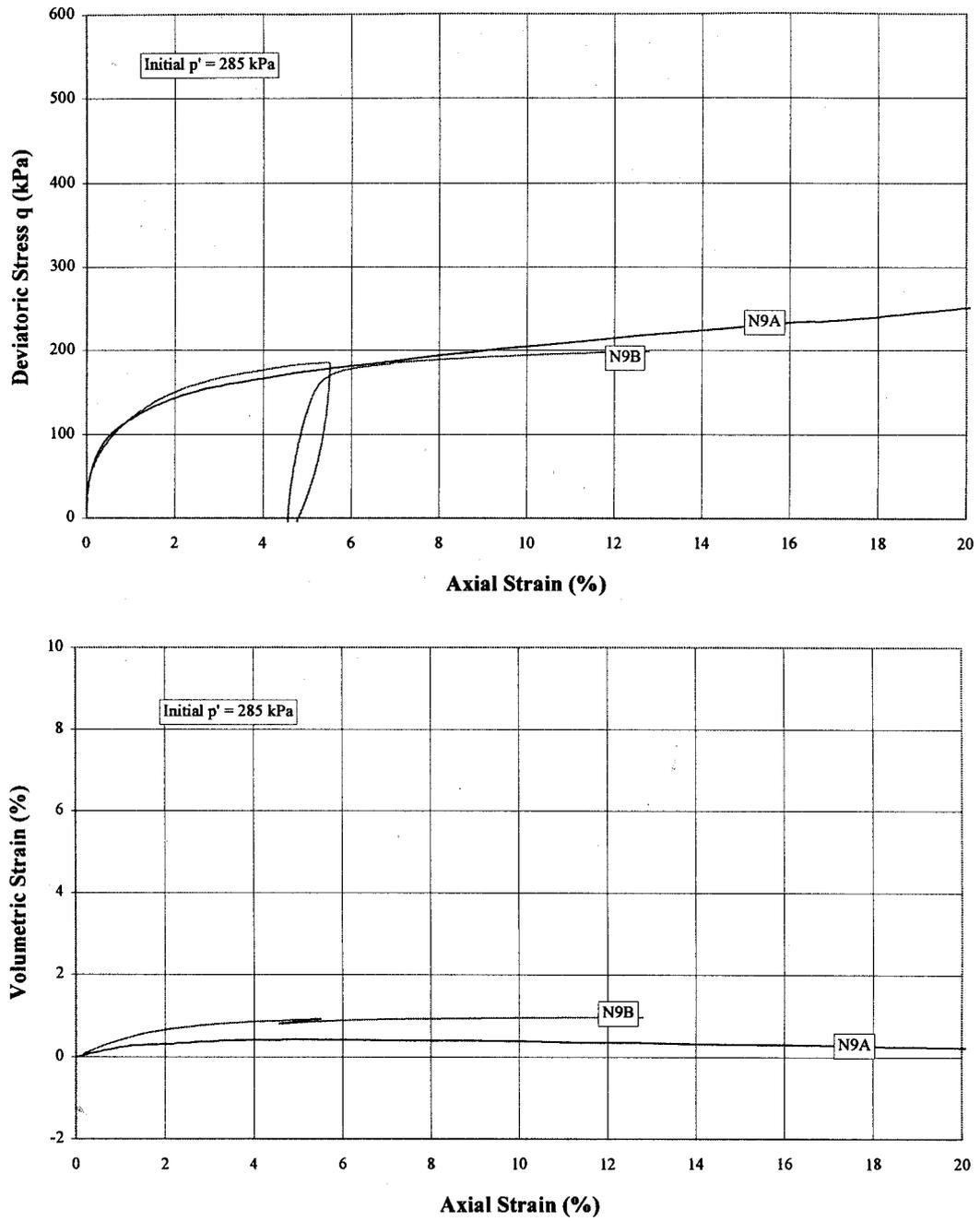


Figura 4.13 - Prova triassiale drenata - Complesso D - Sondaggio P4 - Profondità 22.40 metri
(EEC Report; 1996)

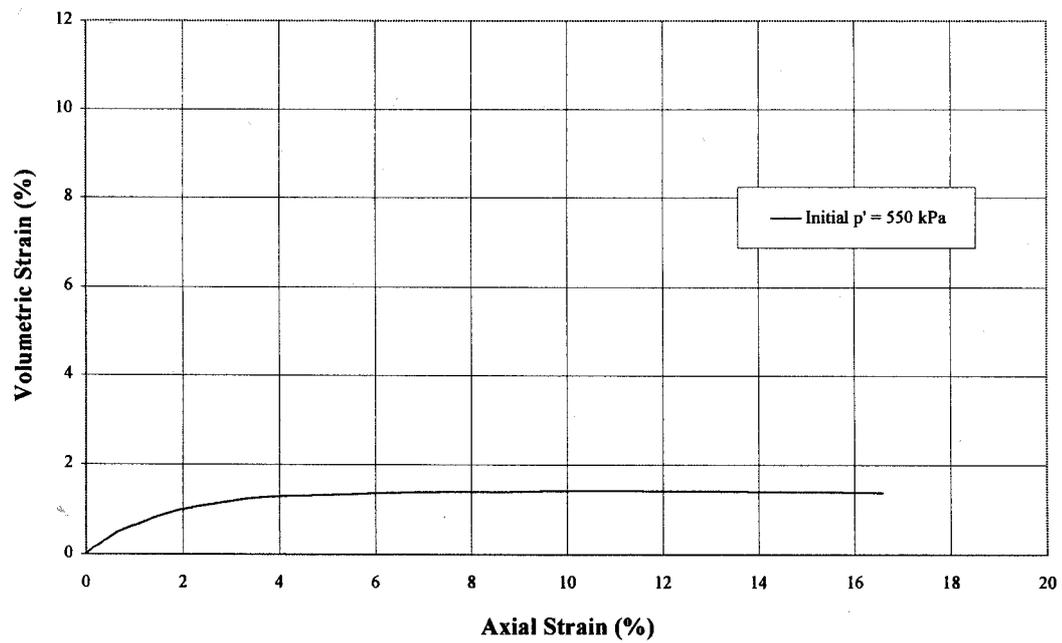
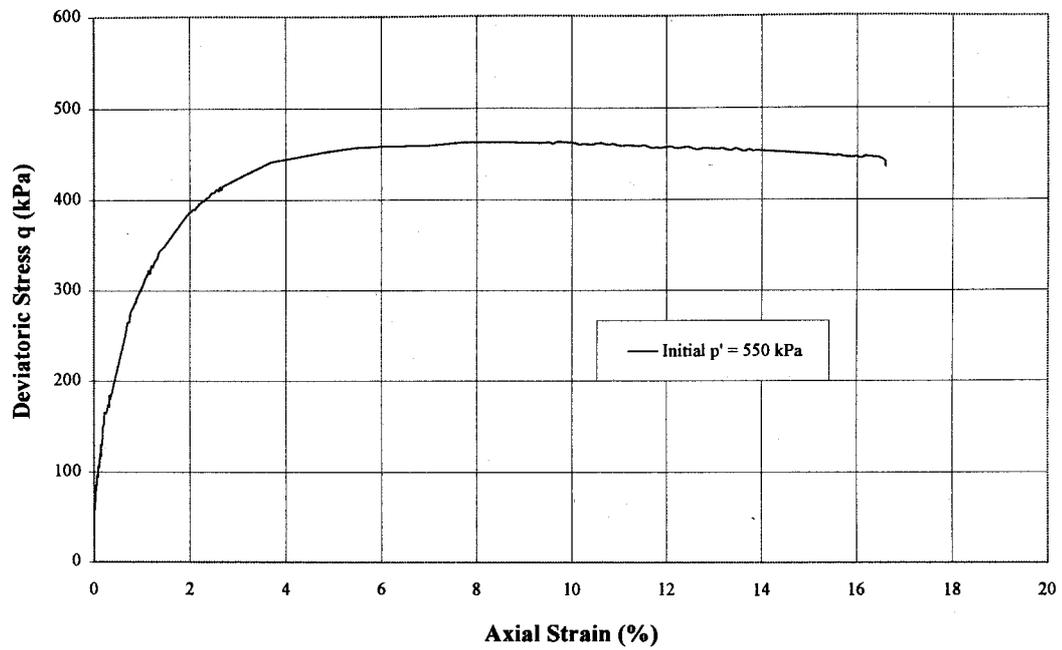


Figura 4.14 - Prova triassiale drenata - Complesso E - Sondaggio P4 - Profondità 40.65 metri
(EEC Report; 1996)

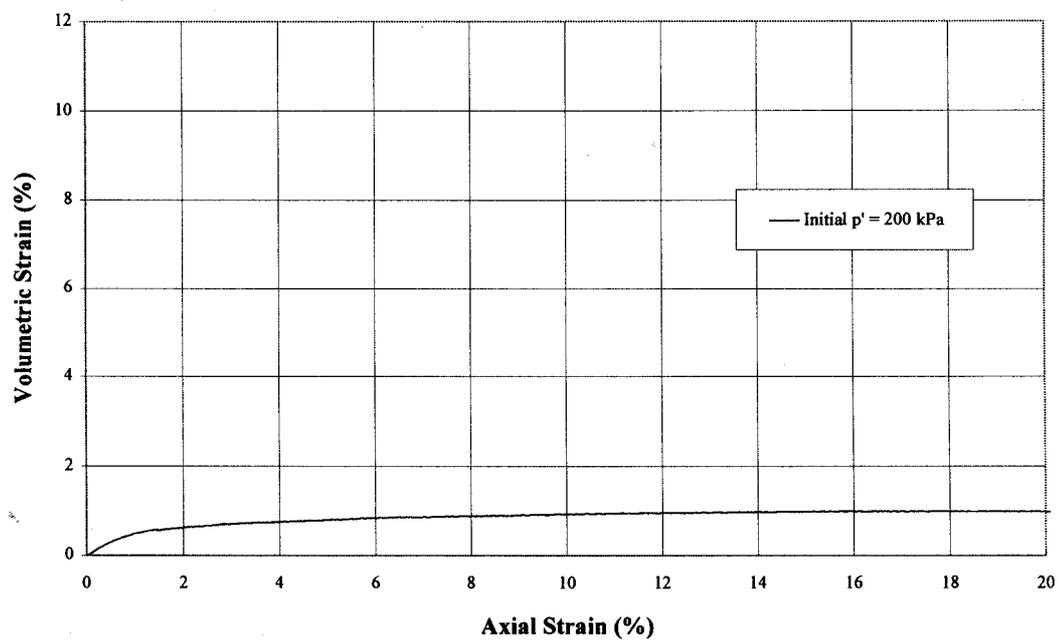
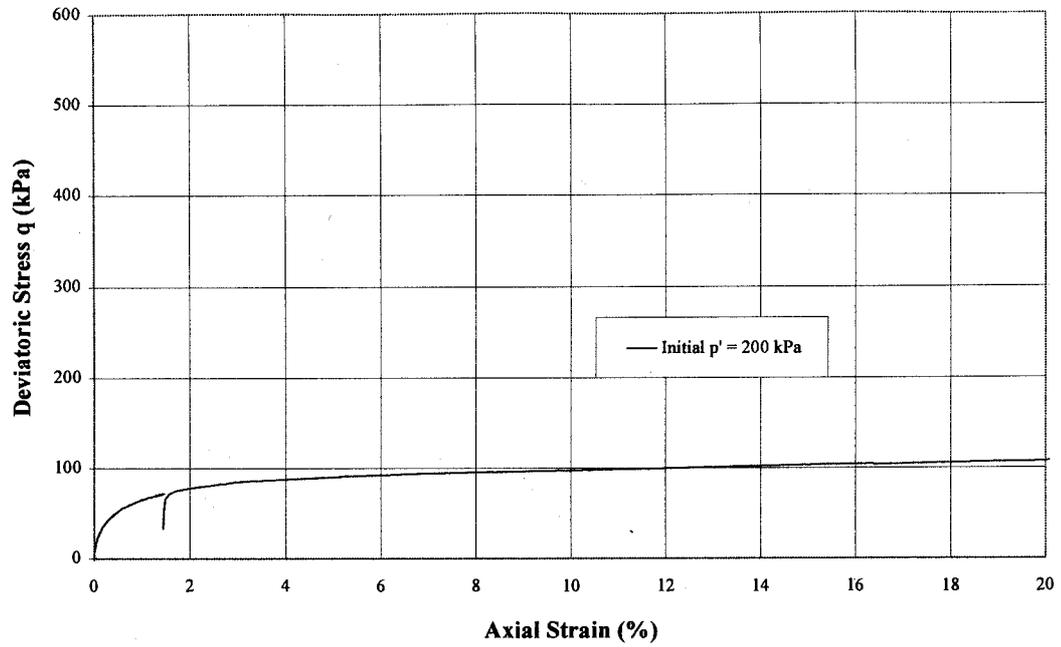


Figura 4.15 - Prova triassiale drenata - Complesso F - Sondaggio P3 - Profondità 31.40 metri
(EEC Report; 1996)

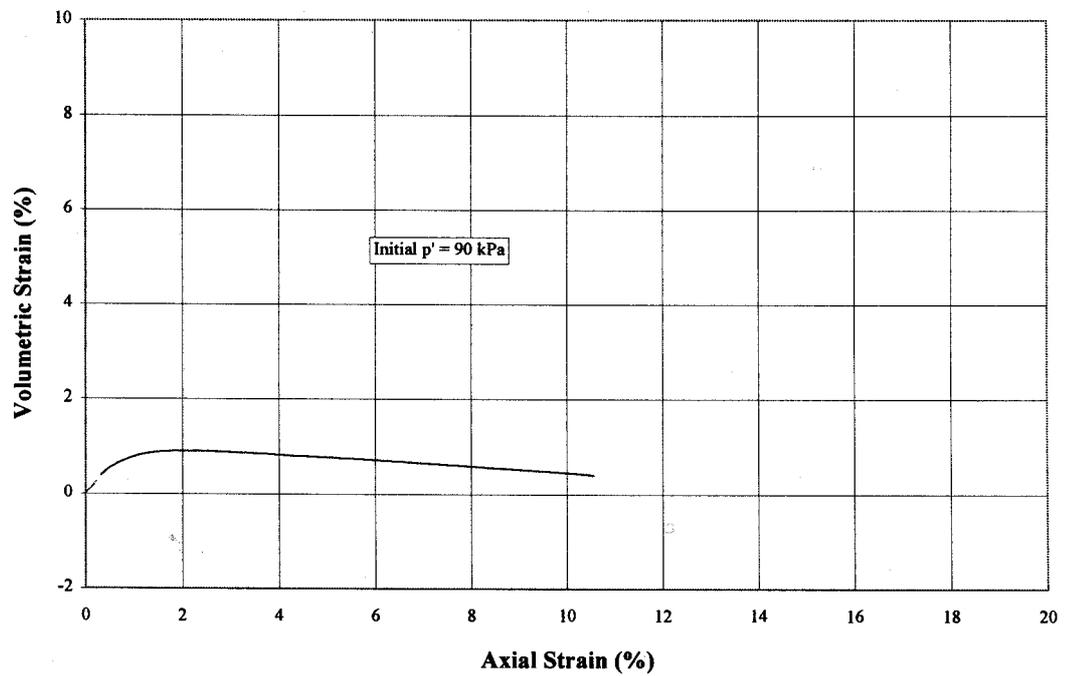
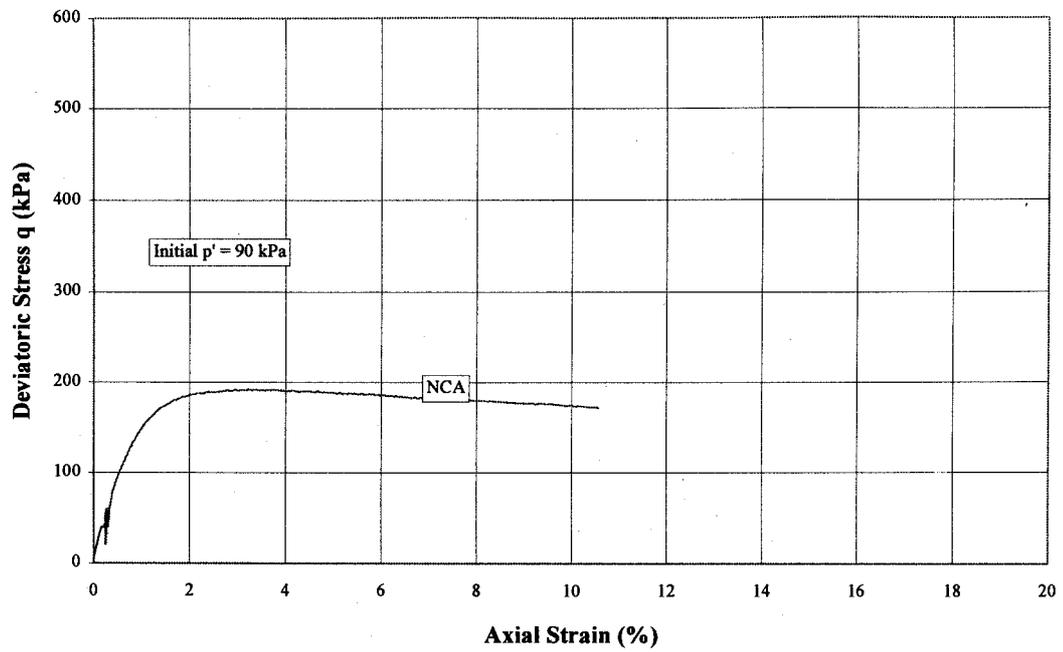


Figura 4.16 - Prova triassiale drenata - Complesso G - Sondaggio P3 - Profondità 4.60 metri

(EEC Report; 1996)

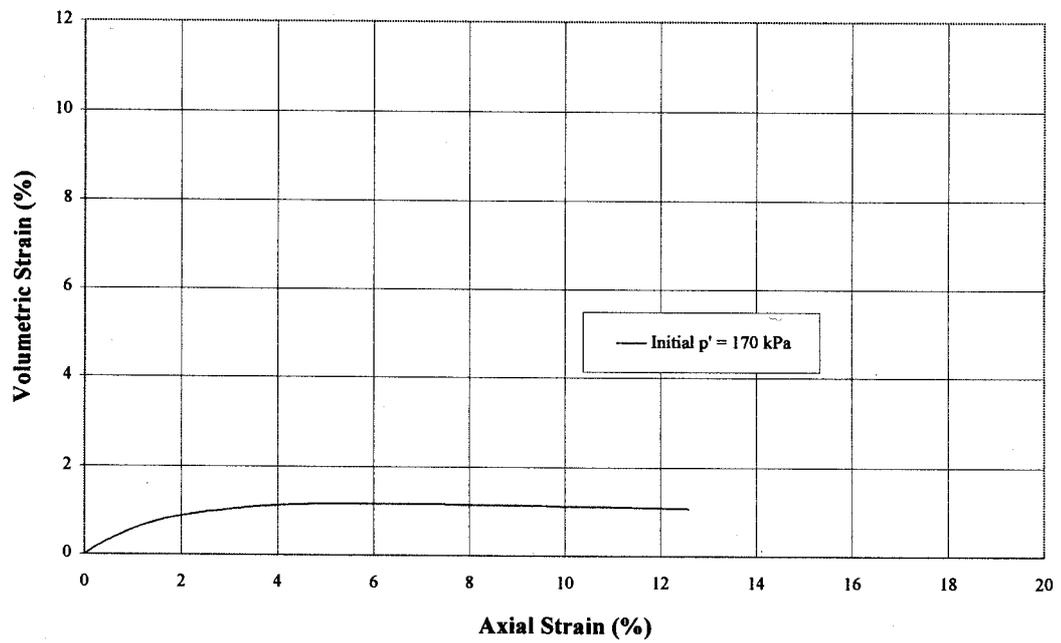
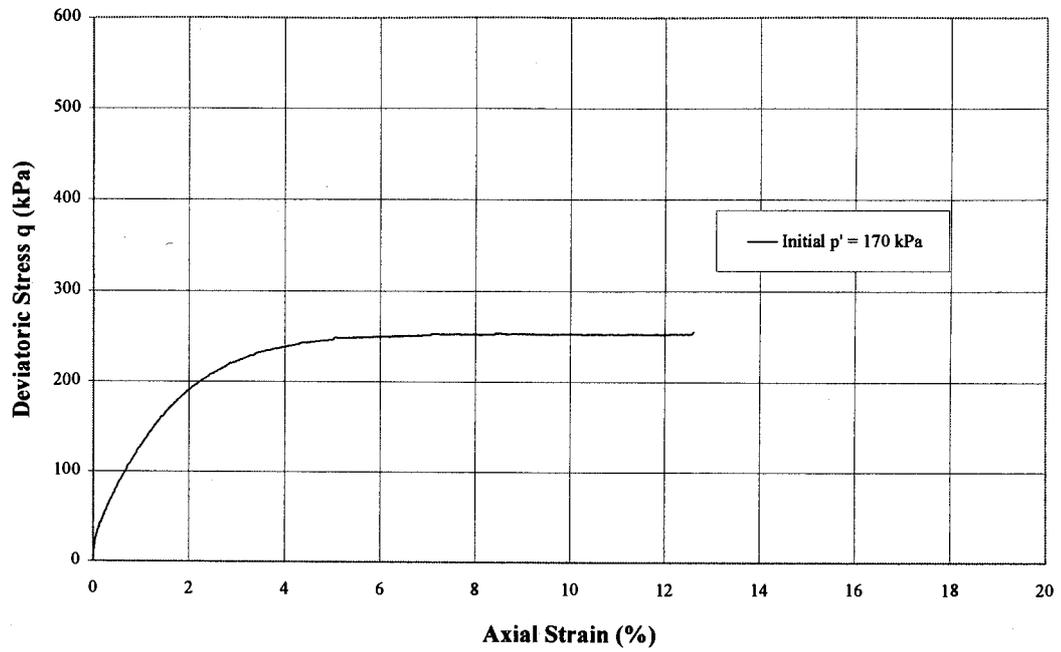


Figura 4.17 - Prova triassiale drenata - Complesso H - Sondaggio P2 - Profondità 7.65 metri
(EEC Report; 1996)

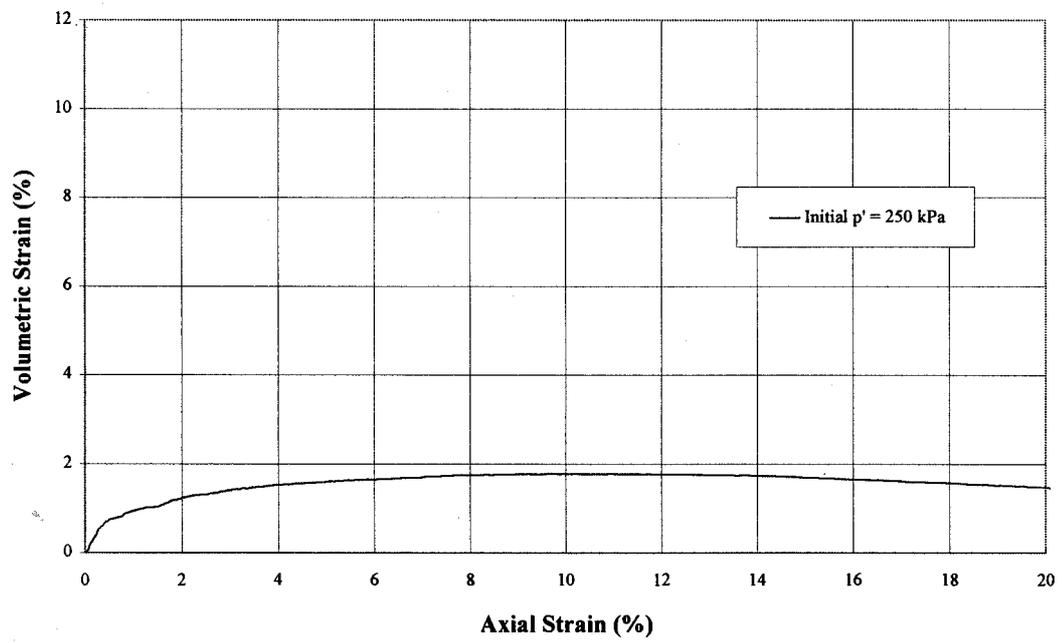
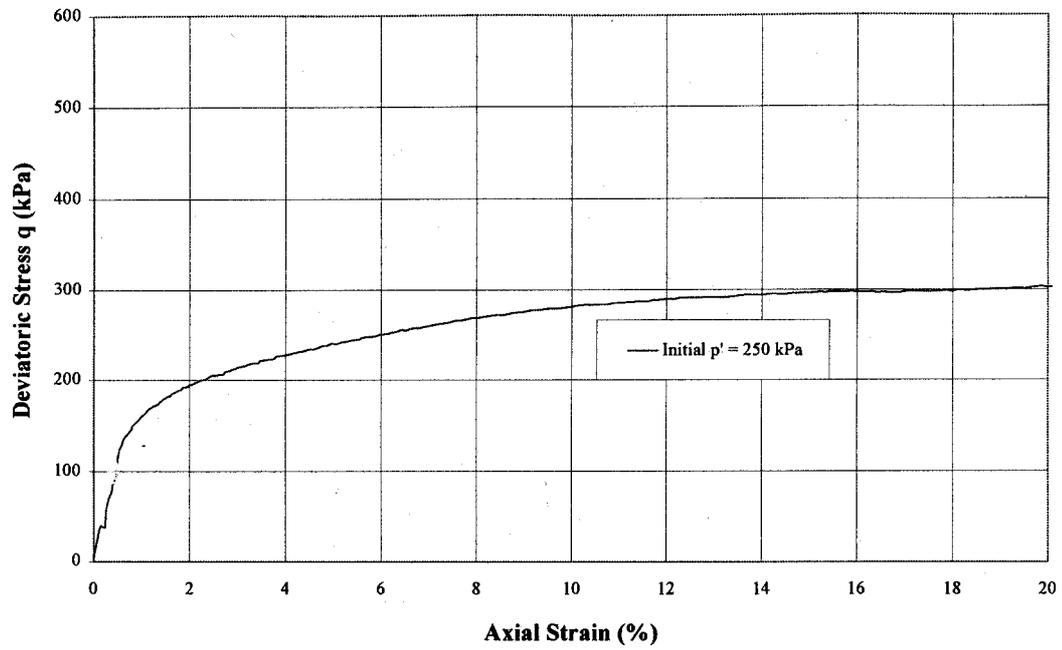


Figura 4.18 - Prova triassiale drenata - Complesso I - Sondaggio II - Profondità 21.20 metri
(EEC Report; 1996)

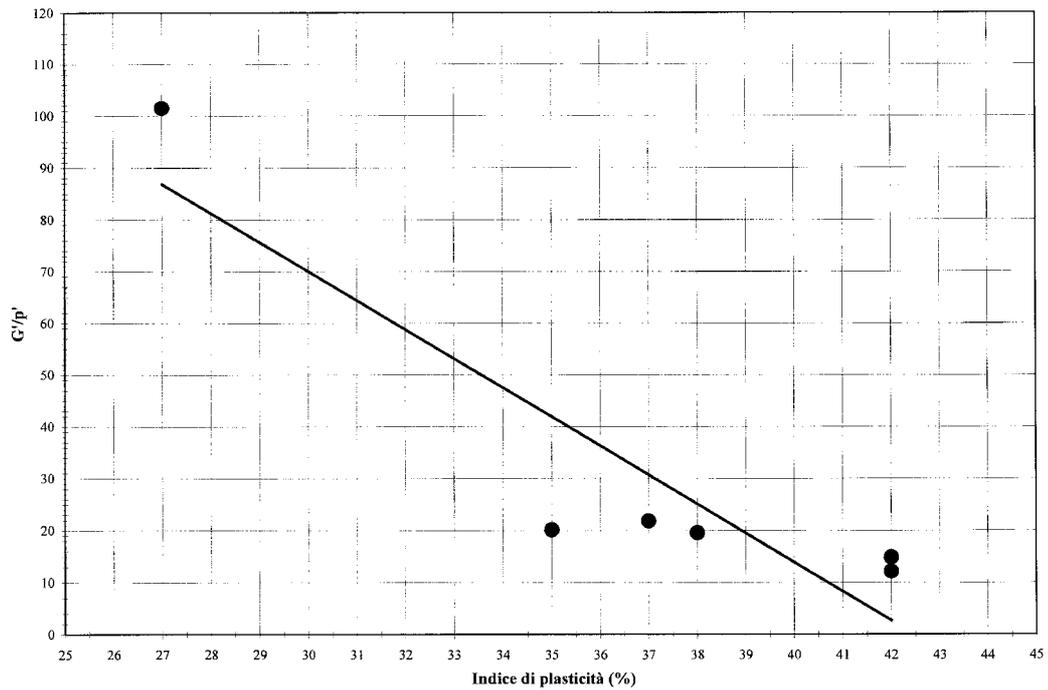


Figura 4.19 - Variazione con l'Indice di Plasticità del modulo di rigidezza a taglio e dei corrispondenti valori normalizzati rispetto alla pressione efficace media

(Dati EEC Report; 1996)

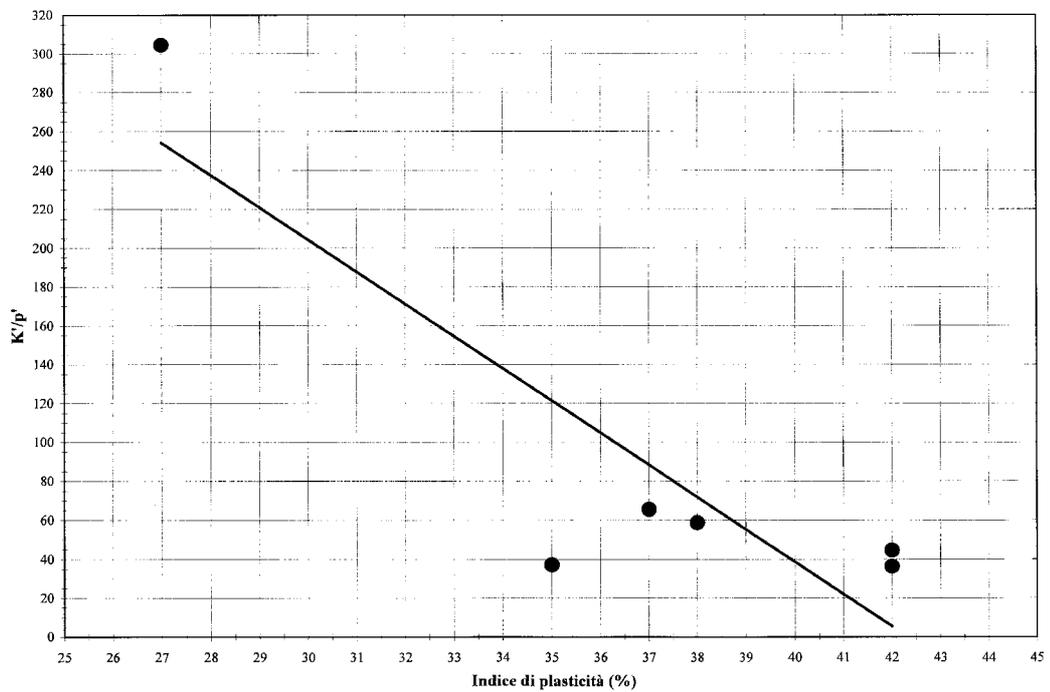


Figura 4.20 - Variazione con l'Indice di Plasticità del modulo di rigidezza volumetrico e dei corrispondenti valori normalizzati rispetto alla pressione efficace media

(Dati EEC Report; 1996)

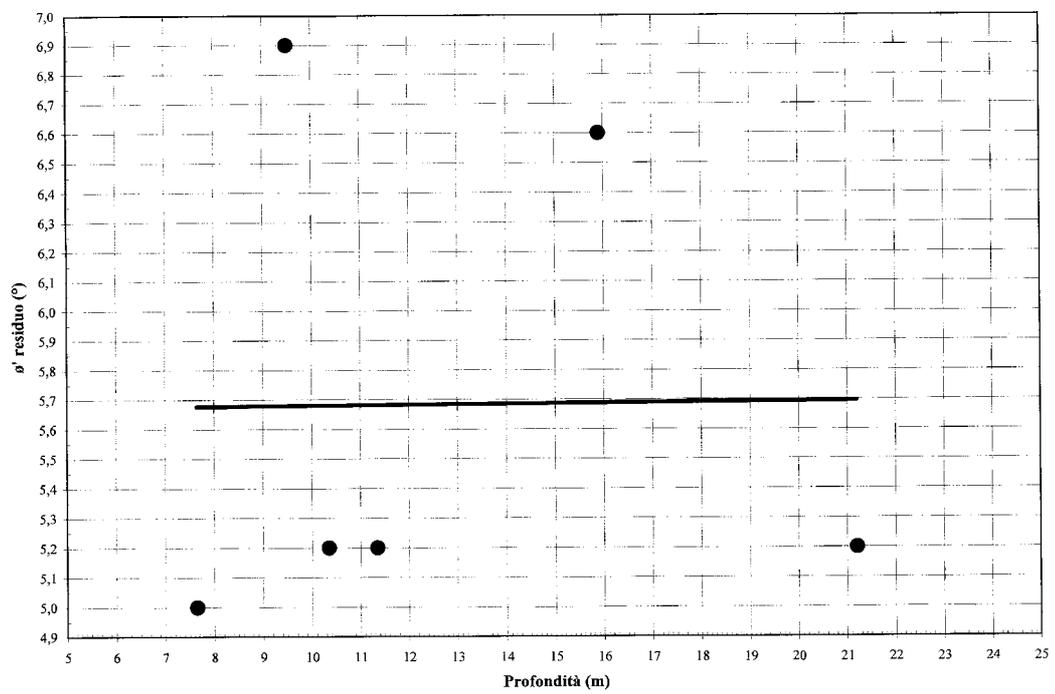


Figura 4.21 - Variazione dell'angolo di resistenza a taglio residuo con la profondità

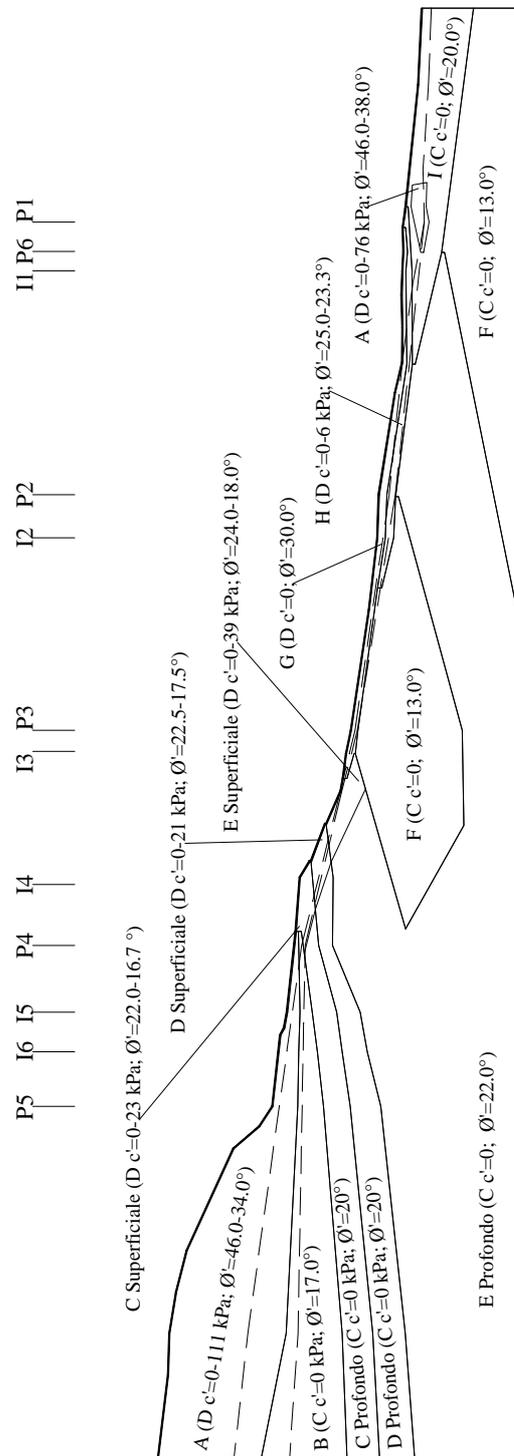


Figura 4.22 - Modello geotecnico del pendio Vadoncello

Sondaggio (numero)	Profondità media (m)	C. acqua City		C. Acqua Laing		LL City		LL Laing		LP City		LP Laing		IP City		IP Laing		IL City		IL Laing		IC City		IC Laing			
		(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	
I1 Dis.	19,50																										
I1 Ind.	21,20		19					35																			
I1 Dis.	24,95							72																			
I1 Ind.	28,65							57																			
I1 Dis.	31,30							25																			
I1 Dis.	33,55							33																			
I1 Dis.	38,15							45																			
I2 Dis.	4,20							33																			
I2 Dis.	6,00							61																			
I2 Dis.	8,90							48																			
I2 Dis.	9,50		19,1					43																			
I2 Ind.	11,35							55																			
I2 Dis.	12,20							55																			
I2 Dis.	13,15							67																			
I2 Dis.	16,60							65																			
I3 Dis.	7,75							17																			
I3 Dis.	12,10							84																			
I3 Dis.	15,70							56																			
I4 Dis.	7,10							58																			
I4 Ind.	7,65							58																			
I4 Dis.	14,80							14																			
I4 Ind.	16,20		17,1					60																			
I5 Ind.	20,40		17,3					77																			
I6 Ind.	16,65		18,4					57																			
I6 Ind.	28,35		16,1					66																			
I6 Ind.	34,25		16,8					66																			
P1 Dis.	18,55							19																			
P1 Dis.	22,40							63																			
P1 Dis.	23,90							59																			
P2 Ind.	7,65		18,4					49																			
P2 Dis.	9,60							14																			
P2 Dis.	10,35							15																			
P2 Dis.	12,40							18																			
P2 Dis.	18,65							17																			
P2 Dis.	21,35							19																			
P3 Ind.	4,60		22					52																			
P3 Dis.	8,75							60																			
P3 Ind.	12,40		23,8					66																			
P4 Dis.	7,45							18																			
P4 Dis.	10,85							21																			
P4 Dis.	15,90							20																			
P4 Dis.	22,10							17																			
P4 Ind.	22,40		17,7					64																			
P4 Dis.	27,70							16																			
P4 Ind.	40,65		18,7					62																			
P4 Dis.	42,85							15																			
P5 Ind.	19,70							50																			
P5 Ind.	52,35							83																			

Tabella 4.01 - Proprietà indice dei terreni del pendio Vadoncello (1)

(Dati EEC Report; 1996)

Sondaggio	Profondità media (m)	C. acqua (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	IL	Saturazione %	Indice Vuoti
I1 Ind.	21,20	19	72	30	42	-0,26	96,00	0,533
I2 Ind.	9,50	19,1	55	27	28	-0,282	94	0,564
I2 Ind.	12,20	19,4						0,546
I2 Ind.	12,20	18,7					96	0,529
I4 Ind.	16,20	17,1	60	29	31	-0,384	92	0,453
I6 Ind.	16,65	14,4	57	24	33	-0,291	93,7	0,422
I6 Ind.	28,35	16	66	25	41	-0,22		0,438
I6 Ind.	34,25	16,8						0,463
P2 Ind.	7,65	18,4	49	23	26	-0,177	97	0,563
P3 Ind.	4,60	22	52	25	27	-0,111		0,659
P3 Ind.	12,40	23,8	66	28	38	-0,111	100	0,65
P4 Ind.	22,40	17,7	64	29	35	-0,323	100	0,467
P4 Ind.	40,65	18,7	62	25	37	-0,17	98	0,544
P5 Ind.	19,70	16	50	27	23	-0,478	100	0,436
P5 Ind.	19,70	19,40					96,3	0,577

Tabella 4.02 -Proprietà indice dei terreni del pendio Vadoncello (2)

(Santaloia F. et al.; 1999)

Sondaggio	Profondità media	γ_{nat}
(numero)	(m)	(kN/m³)
I1 Ind.	21,20	20,9
I2 Ind.	9,50	20,5
I2 Ind.	12,20	20,8
I4 Ind.	16,20	21,7
I6 Ind.	34,25	21,5
P2 Ind.	7,65	20,4
P3 Ind.	4,60	19,8
P3 Ind.	12,40	20,2
P4 Ind.	22,40	21,6
P4 Ind.	40,65	20,7

Tabella 4.03 -Peso specifico naturale

(Dati EEC Report; 1996)

Sondaggio	Profondità media	$\phi'_{PseudoCS}$ (Naturale)	$\epsilon_{PseudoCS}$ (Naturale)	$\phi'_{PseudoCS}$ (Ricostituito)	$\epsilon_{PseudoCS}$ (Ricostituito)
(numero)	(m)	(°)	(%)	(°)	(%)
I1 Ind.	21,20	21,3	10,0	14,3	16,0
I4 Ind.	16,20	19,5	5,0	29,5	8,0
I6 Ind.	34,25	12,6	4,0		
P2 Ind.	7,65	25,0	8,0		
P3 Ind.	4,60	30,9	8,0		
P3 Ind.	12,40	10,0	6,0	17,8	8,0
P4 Ind.	22,40	14,3	9,0	21,1	10,0
P4 Ind.	40,65	17,3	8,0	24,2	10,0

Tabella 4.04 -Angoli di resistenza a taglio e deformazioni assiali in condizioni Pseudo Critiche

(Dati EEC Report; 1996)

Sondaggio	Profondità media	p'	G' (75%q')	K' (75%q')	G'/p'	K'/p'
(numero)	(m)	(kPa)	(kPa)	(kPa)		
I1 Ind.	21,20	250	3709,22	11127,66	14,84	44,51
I6 Ind.	34,25	435	5265,42	15796,26	12,10	36,31
P3 Ind.	4,60	90	9135,63	27406,89	101,51	304,52
P3 Ind.	12,40	200	3909,55	11728,65	19,55	58,64
P4 Ind.	22,40	285	5735,31	10563,34	20,12	37,06
P4 Ind.	40,65	550	11998,90	35996,71	21,82	65,45

Tabella 4.05 -Moduli di rigidezza a taglio e volumetrica e corrispondenti valori normalizzati rispetto alla pressione efficace media

(Dati EEC Report; 1996)

Sondaggio	Profondità media	ϕ' residuo
(numero)	(m)	(°)
I1 Ind.	21,20	5,2
I2 Ind.	9,50	6,9
I2 Dis.	11,35	5,2
I4 Ind.	7,65	5,0
P2 Dis.	10,35	5,2
P4 Dis.	15,90	6,6

Tabella 4.06 -Angoli di resistenza a taglio residuo

(Dati EEC Report; 1996)

Zona	Comportamento	θ' (°)	Profondità			Profondità			Profondità			Profondità			G' (kPa)	K' (kPa)
			Min: (m)	Max: (m)	θ' (°)	Min: (m)	Max: (m)	θ' (°)	Min: (m)	Max: (m)	θ' (°)	Min: (m)	Max: (m)	θ' (°)		
A	Dilatante	>>>>>	34,0	111,0	38,0	54,0	42,0	22,0	46,0	0,0	576682	1730044				
B	Contraente	17,0									3099	9296				
C	Dilatante	>>>>>	14,0	50,0	16,7	23,0	19,3	9,0	22,0	0,0	6023	18068				
C	Contraente	20,0														
D	Dilatante	>>>>>	15,0	46,0	17,5	21,0	20,0	8,0	22,5	0,0	3748	11245				
D	Contraente	20,0														
E	Dilatante	>>>>>	18,0	39,0	20,0	18,0	22,0	7,0	24,0	0,0	12679	38036				
E	Contraente	22,0														
F	Contraente	13,0									5400	16200				
G	Dilatante	>>>>>	20,0	67,0	23,3	31,0	26,7	12,0	30,0	0,0	8654	25962				
H	Dilatante	>>>>>	20,0	33,0	21,7	15,0	23,3	6,0	25,0	0,0	5153	15458				
I	Contraente	20,0									3380	10140				

Tabella 4.07 -Caratteristiche meccaniche dei materiali assunte nella modellazione numerica

CAPITOLO 5

IL CODICE DI CALCOLO FLAC 3.30

5.1 - Introduzione

FLAC 3.30 è un codice di calcolo bidimensionale esplicito alle differenze finite per elaborazioni ingegneristiche nel campo, in particolare, della meccanica dei terreni. E' prodotto e distribuito dalla società Itasca Consulting Group, Inc. con sede in Minneapolis, Minnesota, USA.

Questo programma simula il comportamento dei terreni, delle rocce o di altri materiali che possono manifestare un comportamento elasto-plastico quando viene raggiunto il limite di snervamento del materiale stesso.

I materiali vengono rappresentati mediante elementi, oppure zone, che costituiscono una griglia che viene geometricamente trattata per adattarsi alla forma dell'oggetto che deve essere modellato. Ciascun elemento si comporta, in risposta alle forze applicate oppure ai vincoli al contorno, seguendo una legge tensioni-deformazioni assegnata che può essere elastica oppure elasto-plastica a anche lineare oppure non lineare.

Il materiale può snervarsi e dare esperienza di grandi deformazioni plastiche mentre la griglia, nel caso di analisi alle grandi deformazioni, si deforma per seguire i movimenti del materiale (o dei materiali) che vengono rappresentati nel corso dell'analisi.

Il metodo di calcolo esplicito ovvero Lagrangiano adottato dal FLAC, insieme al tecnica di zonazione con discretizzazione mista di cui si tratterà nel seguito, consente di modellare sia il collasso plastico che le conseguenti grandi deformazioni di natura plastica.

Come conseguenza dell'approccio di calcolo esplicito alle differenze finite adottato, inoltre, non vengono create matrici nel corso del calcolo e, quindi, possono essere effettuate modellazioni bidimensionali anche molto complesse senza necessità di macchine elaboratrici dalle grandi prestazioni.

Il metodo di calcolo esplicito presenta, però, degli inconvenienti in termini, ad esempio, di limiti alla dimensione del più piccolo intervallo temporale da considerare nel corso della calcolazione (timestep) oppure nella tipologia e nella

entità di smorzamento numerico (dumping) da adottare. Tali inconvenienti vengono per lo più risolti, come descritto meglio nel seguito, mediante la scalatura automatica delle forze di inerzia e nell'adozione di un meccanismo numerico di dumping automatico.

Il FLAC incorpora modelli costitutivi come il Mohr-Coulomb con e senza incrudimento-rammollimento, in grado di permettere la simulazione di materiali con comportamento plastico irreversibile. Inoltre il FLAC contiene alcune caratteristiche particolari tra cui:

- ◆ implementazione di elementi di interfaccia per simulare la presenza di piani privilegiati di scorrimento o separazione;
- ◆ possibilità di effettuare analisi con stati di tensione piana, di deformazione piana oppure assial-simmetrica;
- ◆ implementazione di modelli per analisi di problemi di consolidazione oppure studio delle falde;
- ◆ possibilità di esaminare, mediante grafici o tabelle, l'andamento di ogni variabile coinvolta dal calcolo nell'arco del tempo di simulazione.

Il FLAC contiene anche un semplice quanto potente linguaggio di programmazione interno (FISH) che consente di creare funzioni personalizzate e particolare per analizzare particolari caratteristiche nell'ambito di un modello o, addirittura, di creare una legge costitutiva da hoc per il materiale modellato.

Il FLAC si presenta come un codice di calcolo che necessita della digitazione di una serie di comandi da tastiera (command-driven) distinguendosi, in questo, dai codici di calcolo che effettuano le operazioni che di volta in volta vengono richiamate da un elenco di operazioni possibili (menu-driven).

Sebbene i codici menu-driven siano inizialmente più semplici da utilizzare ed apprendere, il vantaggio dei codici command-driven, nel campo della ingegneria, sono svariati ad esempio:

1. il linguaggio di input è basato su termini di uso comune, quindi facilmente riconoscibili e memorizzabili;
2. le simulazioni in campo ingegneristico, essendo spesso strettamente legate ad attività reali, consistono, generalmente, in una lunga sequenza di operazioni: l'immissione di comandi in forma sequenziale, quindi, meglio si avvicina alla susseguirsi di operazioni nella realtà;
3. i comandi di input del FLAC possono essere agevolmente raggruppati in un file di testo modificabile con un qualsiasi software di wordprocessing. Inoltre diversi file di comandi possono essere collegati l'uno all'altro per consentire analisi frazionate nel tempo;
4. la struttura command-driven di input consente di sviluppare pre- e post-processor per trattare in modo automatico i dati di input nonché i risultati in output.

5.2 - Descrizione generale

Nel seguito si tratteranno le differenze tra il metodo di calcolo adottato dal FLAC e quelli adottati da altri codici di calcolo simili, nonché si provvederà a fornire una descrizione delle caratteristiche generali del codice stesso.

5.2.1 - Caratteristiche generali

Il FLAC è stato concepito essenzialmente per applicazioni di ingegneria geotecnica. Il codice di calcolo, infatti, incorpora rappresentazioni numeriche espressamente destinate all'analisi della risposta meccanica dei terreni e delle rocce.

Il codice incorpora nove modelli di materiali: il modello nullo (ad esempio per simulare scavi), due modelli elastici (isotropo e trasversalmente isotropo) e sei modelli elasto-plastici (ad esempio Mohr-Coulomb, strain-hardening/softening e Cam-Clay modificato). Utilizzando il linguaggio di programmazione incorporato (FISH) è possibile inoltre implementare altri modelli costitutivi che si desidera siano attivi in base al problema da modellare. Nell'ambito della stessa griglia di discretizzazione, differenti zone possono avere differenti leggi costitutive e/o proprietà. Può essere, inoltre, specificata una distribuzione lineare o statistica ai valori attribuiti alle differenti proprietà o parametri in gioco.

È possibile utilizzare nell'ambito della griglia, se necessario, un'interfaccia oppure un piano di scorrimento per rappresentare dei piani sui quali, nel reale, possa verificarsi scivolamento e/o separazione (come nel caso di faglie o giunti).

La formulazione base del FLAC assume uno stato di deformazione piano. Questa condizione è generalmente associabile a strutture estese prevalentemente in una sola direzione ed aventi sezione costante oppure a scavi a sezione costante che risultano sollecitati da carichi agenti nel piano della generica sezione considerata. In aggiunta, il FLAC offre la possibilità di modellare situazioni di tensione piana con analisi elastiche ed elasto-plastiche alla Mohr-Coulomb come, ad esempio, piastre caricate solo nel proprio piano. In questo caso le tensioni

normali alla sezione considerata vengono poste uguali a zero. Vi è anche la possibilità di condurre analisi in condizioni di geometrie assial-simmetriche. In questo caso viene adottato un sistema di coordinate cilindrico.

In tutti i tipi di analisi appena descritti viene, comunque, valutata anche la componente di tensione perpendicolare al piano della sezione (σ_{zz}) che viene tenuta in considerazione ed utilizzata, nei casi di analisi in condizioni di deformazione piana oppure in condizioni di assial-simmetria, per definire la superficie di snervamento nello spazio generale delle tensioni.

Per quanto attiene le condizioni al contorno, possono essere specificate sia velocità (ovvero spostamenti) sia tensioni (ovvero forze).

È possibile, inoltre, definire eventuali stati tensionali interni all'ammasso studiato derivanti, ad esempio, da fenomeni di consolidazione gravitazionale.

È possibile definire la posizione della falda per effettuare modellazioni agli sforzi efficaci.

È bene osservare come tutte le proprietà assegnate possono essere definite, all'occorrenza, mediante gradienti oppure mediante distribuzioni statistiche.

Il FLAC incorpora un potente ambiente di sviluppo, denominato FISH, che consente all'utente, mediante la scrittura di appositi programmi, di definire nuove variabili e nuove funzioni. I programmi, immessi mediante un file, vengono interpretati dal FISH e i diversi comandi e funzioni così implementati vengono memorizzati nell'area di lavoro della memoria del FLAC dalla quale vengono eseguiti quando richiamate nel corso della modellazione.

Alcune delle opportunità offerte dal FISH possono essere così riassunte:

- ◆ variazioni non lineari delle proprietà dei materiali nell'ambito di una zona;
- ◆ stampa di grafici e tabelle di variabili definite dall'utente;
- ◆ implementazione di generatori automatici di griglia;
- ◆ servo controlli per test numerici;

- ◆ definizione di condizioni al contorno particolari;
- ◆ automazione di analisi parametriche;
- ◆ definizione di leggi costitutive particolari.

Nell'ambito del FLAC sono integrate capacità di stampa di tabelle e, in particolare, di grafici. Questo consente all'utente di generare grafici sia sullo schermo che su stampante di ciascuna variabile coinvolta nella modellazione. È possibile graficizzare più variabili sovrapposte, oppure l'andamento dei valori assunti da una particolare variabile nel corso dell'esecuzione dei calcoli. Questa caratteristica risulta particolarmente utile quando si voglia monitorare l'andamento di alcune variabili fino all'occorrenza dell'equilibrio ovvero della rottura.

5.2.2 - Confronto con altri metodi di calcolo

Volendo tracciare le linee di confronto tra il FLAC e gli altri metodi di calcolo e modellazione numerica, la prima cosa da osservare è che mentre il FLAC incorpora un metodo di calcolo alle differenze finite, gli altri, in generale, utilizzano metodi di integrazione agli elementi finiti. La differenza, quindi, è essenzialmente legata alla differenza nell'approccio con cui si persegue la risoluzione del problema dell'equilibrio al finito mediante la discretizzazione in elementi.

Entrambi i metodi di calcolo si occupano, in effetti, di tradurre alcune equazioni differenziali rappresentative di condizioni di equilibrio oppure di relazioni sforzi-deformazioni, in equazioni algebriche le quali, in ultima analisi, pongono in relazione gli spostamenti nodali con le forze nodali.

Il FLAC si differenzia, essenzialmente per i seguenti aspetti:

1. viene utilizzato uno schema di calcolo che implementa una tecnica di discretizzazione differente per le porzioni deviatoriche e isotropiche degli

sforzi e delle deformazioni. Tale tecnica, nota come discretizzazione mista (Marti J. e Cundall P.A.; 1982), ha lo scopo di modellare con maggiore accuratezza i casi di collasso plastico e di grandi deformazioni plastiche. Tale schema viene riconosciuto in letteratura come più appropriato, in queste circostanze, rispetto agli schemi adottati usualmente dai metodi ad elementi finiti;

2. vengono adottate le equazioni dinamiche del moto anche quando si modella un fenomeno essenzialmente statico consentendo di seguire processi fisicamente instabili senza difficoltà da un punto di vista numerico;
3. viene utilizzato uno schema di soluzione esplicito nel quale ogni grandezza rilevante nel calcolo viene determinata direttamente da quelle da cui dipende ad ogni ciclo di calcolo e per ogni elemento della griglia di discretizzazione. Gli schemi di soluzione espliciti consentono di seguire leggi sforzi-deformazioni non lineari, siano esse elastiche oppure elasto-plastiche, pressoché nello stesso tempo di calcolo utilizzato per seguire analoghe leggi lineari e senza utilizzare considerevoli quantità di memoria. Inoltre non è necessario, con tale schema di calcolo, immagazzinare grosse matrici ottenendo, così, il duplice risultato di poter eseguire modellazioni anche complesse con macchine non caratterizzate da elevata capacità di elaborazione, nonché di poter eseguire simulazioni a grandi deformazioni pressoché nello stesso tempo impiegato per eseguire simulazioni a piccole deformazioni;
4. gli elementi contenuti nella griglia vengono numerati in termini di righe e colonne piuttosto che in modo sequenziale. Questo consente di identificare più semplicemente gli elementi sia in fase di immissione delle proprietà che in quella di valutazione della soluzione proposta;
5. i tempi di convergenza dipendono essenzialmente dal rapporto esistente, nel sistema modellato, tra il minimo periodo naturale di oscillazione ed il massimo.

5.3 - Trattazione del problema dell'equilibrio al finito

Nel seguito si esamineranno i presupposti teorici alla base del codice di calcolo FLAC.

Dal momento che il FLAC viene descritto come un programma di calcolo esplicito alle differenze finite, che esegue un'analisi Lagrangiana, saranno proprio questi termini ad essere esaminati e descritti per primi.

Nel FLAC, inoltre, la soluzione di un problema richiama le equazioni del moto, le leggi costitutive e le condizioni al contorno. Nel seguito vengono richiamate le equazioni alle base di ciascuna di queste fasi.

5.3.1 - Metodi alle differenze finite

Il metodo alle differenze finite rappresenta, probabilmente, il metodo più antico utilizzato per la soluzione di un set di equazioni differenziali, una volta assegnati i valori di tensione o di deformazione iniziali e/o le condizioni al contorno.

Nel metodo alle differenze finite, ciascuna derivata presente nel set delle equazioni differenziali che governano un dato problema, viene sostituita direttamente da un'equazione algebrica scritta, per punti discreti dello spazio, in termini di differenze finite tra le variabili di campo coinvolte (per esempio tensioni e deformazioni); queste variabili risultano indefinite all'interno di un elemento.

Al contrario, i metodi agli elementi finiti, hanno la caratteristica essenziale che le differenti grandezze di campo (per esempio tensioni e deformazioni) variano, nell'ambito di ciascun elemento, in modo assegnato, utilizzando specifiche funzioni controllate da un certo numero di parametri. La formulazione consiste, in questo caso, nella modifica di questi parametri allo scopo di minimizzare termini di errore o di energia.

Entrambi i metodi producono una serie di equazioni algebriche da risolvere. Sebbene le predette equazioni algebriche siano ottenute mediante metodi

sostanzialmente differenti, queste sono spesso identiche o, quanto meno, molto simili.

I metodi di calcolo agli elementi finiti, spesso combinano le matrici degli elementi in grosse matrici globali di rigidezza cosa, questa, che non viene, generalmente, effettuata dai metodi alle differenze finite poiché risulta abbastanza agevole, da un punto di vista dei calcoli da effettuarsi, rigenerare ad ogni step l'intero set di equazioni alle differenze finite. Il FLAC utilizza un metodo di calcolo esplicito, ovvero risolve le equazioni di volta in volta che servono mentre i metodi agli elementi finiti utilizzano un metodo di calcolo implicito ovvero risolvono le equazioni tutte in una volta all'inizio di ogni step.

I metodi di calcolo alle differenze finite, contrariamente a quanto generalmente ritenuto, possano essere utilizzati non solo nel caso di griglie rettangolari. Wilkins M.L. (1964) presentò un metodo che consente di derivare le equazioni alle differenze finite per elementi di qualsiasi forma. Usando il metodo di Wilkins M.L., nel FLAC è possibile definire contorni di qualsiasi forma ed è possibile assegnare a ciascun elemento ogni tipo di proprietà.

5.3.2 - Metodo di calcolo esplicito

Sebbene il FLAC si ovviamente orientato verso la ricerca di una soluzione statica per un determinato problema, nell'ambito della formulazione, vengono utilizzate le equazioni dinamiche del moto.

La principale ragione di questa scelta, è da ricercarsi nel fatto che si desidera ottenere una soluzione numericamente stabile anche nel caso in cui il sistema fisico che si sta modellando divenga instabile. Qualora si verifichi una instabilità fisica, nella realtà un'aliquota dell'energia di deformazione del sistema viene convertita in energia cinetica parte della quale, nel corso della sua conversione in energia potenziale, si dissipa, sotto forma di calore, all'esterno del sistema. Questo processo viene direttamente modellato dal FLAC in quanto vengono inclusi nelle equazioni risoltrici termini legati all'inerzia; in questo modo, quindi, così come viene gestita numericamente la generazione di energia cinetica, ne

viene gestita anche la dissipazione. Al contrario gli schemi di calcolo che non includono termini inerziali devono utilizzare le più disparate tecniche per trattare numericamente questo tipo di instabilità ottenendo risultati anche corretti, ma metodologicamente discutibili.

La sequenza di calcolo incorporata nel FLAC segue le seguenti fasi (Figura 5.01):

1. vengono richiamate le equazioni del moto per derivare nuovi valori delle velocità e degli spostamenti a partire dalle tensioni e dalle forze;
2. a partire dalle velocità vengono ottenute le variazioni tensionali e, quindi, i nuovi valori di tensione;

Le due operazioni descritte costituiscono un ciclo di calcolo ed ogni ciclo di calcolo impiega un timestep.

La cosa importante da osservare è che nell'ambito di ciascuna fase del ciclo vengono aggiornate, per ciascun elemento della griglia di discretizzazione, tutte le variabili coinvolte nell'analisi a partire da valori noti che restano costanti nell'ambito del ciclo stesso. Per esempio, in occasione della seconda parte del ciclo, a partire dalle velocità calcolate nel corso della prima parte del ciclo, vengono determinati i nuovi valori delle tensioni; durante l'esecuzione dei calcoli si assume che le velocità non varino in nessun punto della griglia di discretizzazione, ovvero le tensioni appena calcolate non determinano alcuna variazione sulle velocità quindi, quando il calcolo passerà all'elemento successivo, le tensioni saranno calcolate in funzione di velocità non corrette per l'elemento attuale.

Questo approccio potrebbe sembrare scorretto, dal momento che è noto come la variazione di una tensione in qualsiasi elemento della griglia, si ripercuota su tutti gli elementi della griglia stessa. La liceità di tale comportamento è da ricercarsi nel fatto che il timestep adottato (durante il quale viene eseguito un intero ciclo di calcolo) è talmente ridotto da risultare inferiore al tempo fisico necessario perché, nella realtà, l'informazione si propaghi. Naturalmente, dopo

diversi cicli di calcolo, le variazioni tensionali e deformative possono propagarsi nell'ambito dell'intera griglia seguendo un processo noto con il nome di rilassamento, proprio come avverrebbe nella realtà.

Quello appena descritto rappresenta, sostanzialmente, il metodo di calcolo esplicito; il concetto cardine risulta essere, quindi, che "l'onda di calcolo" precede sempre "l'onda fisica" così che il calcolo possa essere effettuato su grandezze che si mantengono costanti per il periodo del calcolo stesso.

Si possono distinguere diversi vantaggi nell'utilizzo di un tale metodo di calcolo di cui il principale è quello che non si rendono necessarie iterazioni durante il calcolo delle tensioni a partire dalle deformazioni per un elemento, anche se la legge costitutiva risulta essere notevolmente non lineare proprio perché per ogni elemento il calcolo viene effettuato singolarmente per ogni ciclo di calcolo. Al tempo stesso si presenta un notevole svantaggio, rappresentato proprio dalla necessità di avere un timestep limitato, ovvero si rendono necessari un gran numero di step prima di potere ottenere una soluzione equilibrata e congruente.

5.3.3 - Analisi Lagrangiana

Dal momento che, vista la natura del metodo adottato dal FLAC, non si ha la necessità di creare una matrice globale di rigidità, diventa un'operazione alquanto banale aggiornare le coordinate dei nodi della griglia al termine di un ciclo di calcolo nel caso si stia effettuando un'analisi a grandi deformazioni. Gli incrementi di spostamento vengono, così, sommati alle coordinate dei nodi in modo tale che la griglia si muova e si deformi insieme al materiale che rappresenta. Questo modo di procedere viene definito Lagrangiano, in contrapposizione ad una formulazione Euleriana, nella quale il materiale si muove e si deforma relativamente ad una griglia fissata. Da un punto di vista della legge costitutiva, relativamente ad un ciclo di calcolo ci si trova ancora nel campo delle piccole deformazioni, mentre, considerando un certo numero di cicli di calcolo abbiamo a che fare con una formulazione a grandi deformazioni.

5.3.4 - Equazione del moto ed equazione di equilibrio

Nella sua forma più semplice, l'equazione del moto pone in relazione l'accelerazione, $\frac{d\dot{u}}{dt}$, di una massa, m , con la forza applicata, F , che può essere variabile con il tempo. Tale equazione del moto nota, come equazione di Newton, può essere scritta, riferendosi, ad esempio, ad un sistema molla-massa, nella forma:

$$m \frac{d\dot{u}}{dt} = F \quad (1)$$

Quando agiscono diverse forze sulla stessa massa, l'equazione (1) può essere rivista, quando l'accelerazione tende a zero, come l'equazione di equilibrio statico. È proprio questa banale proprietà dell'equazione del moto che viene sfruttata nel FLAC per risolvere problemi statici. Si noti che le leggi di conservazione della quantità di moto e dell'energia possono essere ricavate da questa equazione essendo implicitamente integrate nell'equazione (1).

In un corpo continuo solido, l'equazione (1) può essere generalizzata come segue:

$$\rho \frac{\partial \dot{u}_i}{\partial t} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i \quad (2)$$

dove: ρ = densità;

t = tempo;

x_i = componenti del vettore coordinate;

g_i = componenti dell'accelerazione di gravità (forze di massa);

σ_{ij} = componenti del tensore delle tensioni.

5.3.5 - Legge costitutiva

Le altre equazioni che caratterizzano un solido deformabile sono quelle rappresentative della legge costitutiva, ovvero dalla legge tensioni-deformazioni.

In un primo momento, a partire dalla variazione di velocità, viene determinata la velocità di deformazione:

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial \dot{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \dot{u}_j}{\partial x_i} \right] \quad (3)$$

dove: $\dot{\epsilon}_{ij}$ = componenti della velocità di deformazione;

\dot{u}_i = componenti della velocità;

La legge costitutiva ha la forma:

$$\sigma_{ij} := f(\sigma_{ij}, \dot{\epsilon}_{ij}, \kappa) \quad (4)$$

dove: $f()$ = funzione rappresentativa della legge costitutiva;

κ = parametro che tiene conto della storia del materiale;

$:=$ = rappresenta una sostituzione.

In genere, le leggi costitutive elasto-plastiche non lineari, sono scritte in forma incrementale a causa del fatto che non esiste una proporzionalità ed una relazione

diretta tra tensioni e deformazioni. L'equazione (4) consente di ricavare una nuova stima per il tensore delle tensioni una volta noto il precedente tensore delle tensioni e la velocità di deformazione. La più semplice espressione di una legge costitutiva è rappresentata da quella per un materiale elastico isotropo:

$$\sigma_{ij} := \sigma_{ij} + \left[\delta_{ij} \left(K - \frac{2}{3} G \right) \dot{\epsilon}_{kk} + 2G \dot{\epsilon}_{ij} \right] \Delta t \quad (5)$$

- dove: δ_{ij} = delta di Kronecker;
 Δt = durata di un ciclo di calcolo (timestep);
 G = modulo di rigidezza al taglio;
 K = modulo di rigidezza volumetrica.

È bene osservare che alle componenti del tensore di tensione ricavate mediante l'applicazione della legge costitutiva, devono essere sommate, nel caso di grandi deformazioni, aliquote derivanti dalle rotazioni e, più in generale, dagli spostamenti di corpo rigido che si verificano internamente al corpo solido.

5.3.6 - Condizioni al contorno

Nel FLAC, al contorno di un corpo solido, possono essere applicate sia tensioni sia spostamenti. Gli spostamenti vengono specificati per mezzo di velocità assegnate a determinati nodi; in questo caso, per quel particolare nodo, viene richiamata l'equazione (2). Nel caso in cui al contorno vengano applicate delle tensioni le forze nodali vengono determinate come segue:

$$F_i = \sigma_{ij}^b n_j \Delta s \quad (6)$$

- dove: n_i = versore uscente dal segmento del contorno considerato;
- Δs = lunghezza del segmento del contorno considerato
- σ_{ij}^b = tensione agente sul segmento considerato;
- F_1 = forza risultante (sommata alle forze agenti in quel nodo).

5.4 - Formulazione numerica

La formulazione numerica del FLAC è concettualmente simile a quella del rilassamento dinamico proposta da Otter J.R.H. et al. (1966). Nel FLAC è stato implementato l'approccio proposto da Wilkins M.L. (1964) che consente di trattare griglie di discretizzazione aventi forme arbitrarie con alcune modifiche messe a punto allo scopo da una parte di tenere conto, nello svolgimento dei calcoli, dell'insorgere di grandi deformazioni e, d'altra parte, di consentire l'utilizzo di una procedura di dumping particolare come si chiarirà nel seguito.

5.4.1 - La griglia

Nel FLAC il corpo solido viene suddiviso dall'utente mediante una griglia composta da elementi quadrilateri. Il FLAC suddivide ciascun elemento in due coppie sovrapposte di elementi triangolari a deformazione costante. I quattro sub-elementi triangolari, in Figura 5.02, vengono indicati con le lettere a, b, c e d.

Procedendo in questo modo il vettore forza applicato in ciascun nodo è il risultato della media dei due vettori forza provenienti da ciascuna coppia di triangoli; in questo modo la risposta dell'elemento quadrangolare nel suo insieme risulta, per caricamento simmetrico, sicuramente simmetrica. Nell'ambito di un tale modo di procedere, qualora una delle coppie di triangoli diventasse notevolmente distorta per effetto delle deformazioni subite dalla griglia di discretizzazione con il procedere del calcolo, ovvero se l'area di uno dei due triangoli diventasse molto più piccola dell'area del suo triangolo complementare, il quadrilatero corrispondente non verrebbe preso in considerazione e verrebbe presa in considerazione solo la forza nodale rinveniente dall'altro quadrilatero. È evidente che, nel caso in cui anche l'altra coppia di triangoli risultasse notevolmente distorta, non potendo procedere con l'elaborazione, questa si arresterebbe generando un messaggio di errore.

L'utilizzo di elementi triangolari elimina, inoltre, completamente il problema della deformazione a clessidra che potrebbe, invece, verificarsi se si utilizzassero

elementi quadrangolari a deformazione costante. Per deformazione a clessidra si deve intendere la forma che assumerebbe un elemento quadrangolare della griglia. In particolari casi di deformazione, infatti, i poligoni con più di tre lati possono subire combinazioni di spostamenti nodali tali da dare, all'elemento stesso, una forma localmente convessa derivante dall'intreccio di due lati opposti. Una tale combinazione di spostamenti nodali non verrebbe interpretata, nell'ambito del metodo di calcolo, come una vera e propria deformazione e, quindi, non darebbe luogo alla comparsa di alcuna forza atta ad ostacolarla. Se un tale evento fosse lasciato libero di verificarsi, il risultato sarebbe quello di avere deformazioni non ostacolate da alcuna forza che, quindi, altererebbero la soluzione finale.

5.4.2 - Equazioni alle differenze finite

Per ciascun triangolo le equazioni alle differenze finite sono derivate dal teorema della divergenza di Gauss generalizzato (Malvern L.E.; 1969):

$$\oint_S n_i f ds = \iint_A \frac{\partial f}{\partial x_i} dA \quad (7)$$

dove: \oint_S = integrale esteso al contorno di una superficie chiusa;

n_i = versore uscente dalla superficie s ;

f = scalare, vettore o tensore (a seconda dei casi);

x_i = vettori di posizione;

ds = elemento infinitesimo del contorno della superficie;

\iint_A = integrale esteso all'area della superficie.

Se si definisce il valore medio del gradiente della grandezza f nell'ambito dell'area A come:

$$\left\langle \frac{\partial f}{\partial x_i} \right\rangle = \frac{1}{A} \iint_A \frac{\partial f}{\partial x_i} dA \quad (8)$$

Sostituendo tale valore nell'equazione (7) si ottiene:

$$\left\langle \frac{\partial f}{\partial x_i} \right\rangle = \frac{1}{A} \oint_s n_i f ds \quad (9)$$

Quest'ultima equazione facendo riferimento alla Figura 5.02, applicata al caso di un sub-elemento triangolare e riscritta in termini di differenze finite, assume l'aspetto:

$$\left\langle \frac{\partial f}{\partial x_i} \right\rangle = \frac{1}{A} \sum_s \langle f \rangle n_i \Delta s \quad (10)$$

dove: Δs = lunghezza di un lato del triangolo;

$\langle f \rangle$ = valore medio della grandezza lungo un lato del triangolo;

\sum_s = sommatoria estesa ai tre lati del triangolo.

Sempre con riferimento alla Figura 5.02, l'equazione (10) consente di scrivere, per un particolare sub-elemento triangolare, la velocità di deformazione, $\dot{\epsilon}_{ij}$, in termini di velocità nodali sostituendo, in ambo i membri, ad f il vettore velocità media:

$$\frac{\partial \dot{u}_i}{\partial x_j} \cong \frac{1}{2A} \sum_s (\dot{u}_i^{(a)} + \dot{u}_i^{(b)}) n_j \Delta s \quad (11)$$

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \dot{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \dot{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (12)$$

dove: a, b = sono due nodi consecutivi del triangolo.

Si noti che, nel caso di una variazione lineare di velocità passando dal nodo (a) al nodo (b), l'equazione (11) risulterebbe identica a quella che si otterrebbe da una integrazione esatta.

Le equazioni (11) e (12) possono essere utilizzate per ricavare le componenti del tensore delle tensioni.

Quando si trattano numericamente materiali che possono dare luogo a snervamento, un problema che comunemente si presenta, è la condizione di incompressibilità che deve essere garantita localmente alla griglia di discretizzazione, una volta raggiunte le condizioni di grande snervamento ed una volta insorte le grandi deformazioni plastiche ed al fine di garantire stabilità numerica alla soluzione. L'uso di geometrie caratterizzate da assial-simmetria oppure da deformazioni piane comporta, a tale scopo, l'applicazione di un vincolo cinematico nella direzione fuori dal piano che comporta, frequentemente, a causa del fatto che gli elementi vengono sovravincolati, una sovrastima dei carichi di collasso. Il fenomeno, noto con il nome di bloccaggio della griglia ovvero di elementi eccessivamente rigidi, viene discusso in dettaglio da Nagtegaal J.C. et al. (1974). Per risolvere tale inconveniente, nel FLAC si ricorre all'artificio di mantenere separate le componenti isotropiche di tensioni e deformazioni dalle rispettive componenti deviatoriche.

Tale procedura, esaurientemente trattata da Marti J. e Cundall P.A. (1982), prende il nome di discretizzazione mista dal fatto, appunto, che le componenti isotropiche e deviatoriche dei tensori di tensione e di deformazione vengono discretizzate in modo differente.

Le componenti isotropiche dei tensori di tensione e di deformazione, vengono mantenute costanti nell'ambito dell'intero elemento quadrangolare, mentre le rispettive componenti deviatoriche vengono trattate separatamente per ciascuno dei quattro sub-elementi triangolari in cui si scompone l'elemento quadrangolare.

Questo modo di procedere, comporta che, per ogni elemento della griglia di discretizzazione, vengano memorizzate sedici componenti del tensore di tensione e altrettante del tensore di deformazione.

Con la tecnica di discretizzazione mista, la deformazione volumetrica viene mediata per ciascuna coppia di triangoli. La velocità di deformazione dei due triangoli (a) e (b) della Figura 5.02 vengono, similmente a quanto avviene per la coppia di triangoli (c) e (d) trattate nel modo seguente:

$$\begin{aligned}
 \dot{\epsilon}_{11}^a &= \frac{\dot{\epsilon}_m + \dot{\epsilon}_d^a}{2} \\
 \dot{\epsilon}_{11}^b &= \frac{\dot{\epsilon}_m + \dot{\epsilon}_d^b}{2} \\
 \dot{\epsilon}_{22}^a &= \frac{\dot{\epsilon}_m + \dot{\epsilon}_d^a}{2} \\
 \dot{\epsilon}_{22}^b &= \frac{\dot{\epsilon}_m + \dot{\epsilon}_d^b}{2} \\
 \dot{\epsilon}_{12}^a &= \dot{\epsilon}_{12}^a \\
 \dot{\epsilon}_{12}^b &= \dot{\epsilon}_{12}^b
 \end{aligned} \tag{13}$$

$$\text{dove: } \dot{\epsilon}_m = \frac{\dot{\epsilon}_{11}^a + \dot{\epsilon}_{22}^a + \dot{\epsilon}_{11}^b + \dot{\epsilon}_{22}^b}{2};$$

$$\dot{\epsilon}_d^a = \dot{\epsilon}_{11}^a - \dot{\epsilon}_{22}^a$$

$$\dot{\epsilon}_d^b = \dot{\epsilon}_{11}^b - \dot{\epsilon}_{22}^b$$

Gli indici (a) e (b) sono rappresentativi di ciascuno dei due triangoli.

A partire dalle componenti del tensore di deformazione calcolate in questo modo, applicando la legge costitutiva (eventualmente tenendo anche conto degli spostamenti di corpo rigido) si possono ricavare le nuove componenti del tensore delle tensioni.

A seconda dei casi, qualora le componenti isotropiche di tensione nei due triangoli non fossero già uguali per effetto della legge costitutiva adottata, si ricorre, allo scopo di eguagliarle, nuovamente alla discretizzazione mista ma, questa volta, con riferimento alle tensioni:

$$\sigma_0^a = \sigma_0^b := \left[\frac{\sigma_0^a \cdot A^a + \sigma_0^b \cdot A^b}{A^a + A^b} \right] \quad (14)$$

dove: σ_0^a = tensione isotropica nel triangolo a;

σ_0^b = tensione isotropica nel triangolo b;

A^a = area del triangolo a;

A^b = area del triangolo b;

:= = rappresenta una sostituzione.

A causa del metodo esplicito adottato dal FLAC, la legge costitutive viene richiamata, quindi, una sola volta per ogni elemento e per ogni ciclo di calcolo. Non sono necessarie iterazioni dal momento che il timestep utilizzato viene mantenuto sufficientemente piccolo in modo da evitare che le informazioni possano fisicamente propagarsi da un elemento al successivo nell'ambito di un singolo timestep.

Una volta che sono state ricalcolate le tensioni, vengono determinate le forze applicate a ciascun nodo. Le tensioni in ciascun sub-elemento triangolare agiscono come trazioni sui lati del triangolo. Ciascuna trazione viene considerata essere equivalente a due forze uguali agenti in corrispondenza delle estremità del

lato considerato e, quindi, ciascun angolo riceve due contributi da ciascun lato che vi concorre per cui, facendo riferimento ancora alla Figura 5.02:

$$F_i = \frac{1}{2} \sigma_{ij} (n_j^{(1)} S^{(1)} + n_j^{(2)} S^{(2)}) \quad (15)$$

È bene ricordare che ciascun elemento quadrangolare è, in effetti, rivisto come due coppie di sub-elementi triangolari. Per ogni coppia, i due triangoli che la costituiscono avranno, di volta in volta, due nodi del quadrilatero originario in comune e due distinti. Per i nodi in comune, le forze rinvenienti dai due triangoli ivi concorrenti vengono sommate. Le forze nodali determinate per ciascuna delle due coppie di triangoli vengono mediate per dare luogo al contributo alla forza nodale da parte di un particolare quadrilatero.

Allo scopo di determinare il vettore forza nodale netta, le forze nodali di tutti gli elementi quadrangolari concorrenti in un nodo verranno sommate tra loro ed a tutti i contributi dovuti all'applicazione di carichi esterni nonché alle forze di massa dovute alla gravità.

In particolare le forze di gravità vengono valutate secondo l'espressione:

$$F_i^{(g)} = g_i m_g \quad (16)$$

Nella precedente equazione, m_g rappresenta la massa gravitazionale concentrata nel nodo ed assunta pari ad un terzo della somma delle masse dei triangoli connessi al nodo considerato.

Se un elemento quadrangolare non esiste (per esempio è caratterizzato da materiale nullo), il suo contributo tensionale alla forza nodale risultante viene, ovviamente, trascurato. Se il corpo si trova in equilibrio oppure in una condizione di deformazione costante nel tempo (per esempio grande deformazione plastica) la risultante delle forze nodali nel nodo sarà nulla, altrimenti il nodo risulterà

soggetto ad un'accelerazione valutabile secondo la forma alle differenze finite della seconda legge del moto di Newton che ci consente di determinare le velocità nodali:

$$\dot{u}_i^{(t+\Delta t/2)} = \dot{u}_i^{(t-\Delta t/2)} + \sum F_i^{(t)} \frac{\Delta t}{m} \quad (17)$$

Come si può notare soprattutto osservando gli apici, l'espressione precedente è valutata alla metà di un timestep: si può dimostrare che così facendo gli errori di primo ordine di annullano. Resta, comunque, evidente che le velocità vengono valutate ad un tempo spostato in avanti di metà timestep rispetto al tempo al quale vengono valutate forze e spostamenti.

5.4.3 - Dumping meccanico

Per risolvere problemi statici, gli effetti determinati a seguito dell'applicazione delle equazioni del moto, devono essere in qualche modo smorzati, ovvero devono ridursi con il procedere della calcolazione. Nel FLAC, l'obiettivo è quello di raggiungere una condizione di costanza (sia essa equilibrio oppure grandi deformazioni plastiche) in modo numericamente stabile e con un minimo sforzo da un punto di vista dei calcoli effettuati.

Nei metodi usuali di rilassamento dinamico lo smorzamento utilizzato è di natura viscosa ovvero proporzionale alla velocità (ovvero l'intensità delle forze di smorzamento è proporzionale alla velocità dei nodi). L'utilizzo di uno smorzamento di carattere viscosa, proporzionale alla velocità, comporta tre notevoli difficoltà:

1. lo smorzamento introduce delle forze di massa che, essendo errate nelle zone soggette a grandi deformazioni plastiche, possono influenzare, in alcuni casi, le modalità di collasso;

2. la costante di proporzionalità ottimale dipende dagli autovalori della matrice delle velocità i quali non sono noti a meno che non venga effettuata un'analisi modale completa. In un problema lineare la determinazione degli autovalori richiede uno sforzo in termini di calcolo maggiore dello stesso rilassamento dinamico mentre, in un problema non lineare, gli autovalori potrebbero essere addirittura indefiniti;
3. nella sua forma usuale, lo smorzamento proporzionale alla velocità viene applicato in modo uguale per ogni nodo. È immediato osservare come possano esserci zone della griglia che richiedano, invece, differenti forze di smorzamento con differenti entità (una zona è stabile un'altra è in condizioni di collasso).

Allo scopo di risolvere i precedenti problemi potrebbero essere proposte molte forme alternative di smorzamento. Nei terreni e nelle rocce, ad esempio, lo smorzamento, in natura, si manifesta mediante il fenomeno dell'isteresi: se la pendenza della curva di scarico è maggiore di quella della curva di carico si verifica una perdita di energia rappresentativa, appunto, di un fenomeno di smorzamento. Questo tipo di smorzamento potrebbe essere simulato numericamente, ma si presentano almeno due difficoltà. La prima difficoltà riguarda il fatto che non si conoscono con esattezza i cicli di isteresi per i diversi materiali. La seconda difficoltà, invece, riguarda la possibilità che si verifichi un indesiderato accumulo di deformazioni irreversibili.

Cundall J. (1982), per risolvere tali problematiche, propose uno smorzamento ancora basato su forze viscosi, ma, in questo caso, la costante di viscosità viene continuamente modificata in modo che l'energia assorbita dallo smorzamento risulti proporzionale alla variazione di energia cinetica nel tempo del sistema nel suo complesso. Le modifiche alla costante di viscosità vengono effettuate grazie ad un servomeccanismo numerico che cerca di mantenere costante (ad esempio pari a 0.5) il seguente rapporto

$$R = \frac{\sum_{\text{tutti i nodi}} P}{\sum_{\text{tutti i nodi}} \dot{E}_k} \quad (17)$$

dove: P = energia di smorzamento in un nodo;

\dot{E}_k = variazione di energia cinetica nel tempo;

Con questa tipologia di smorzamento, viene completamente superata la difficoltà di cui al precedente punto 2 e parzialmente superata la difficoltà di cui al precedente punto 1 dal momento che, man mano che il sistema raggiunge una condizione di costanza, la variazione di energia cinetica tende a zero e, conseguentemente il fattore di smorzamento tende, anch'esso, a zero.

Allo scopo di superare tutte le difficoltà discusse dinanzi, nel FLAC viene adottato uno smorzamento secondo il quale la forza di smorzamento applicata ad un nodo risulti proporzionale, in modulo, alla grandezza della forza sbilanciata agente nel nodo ed inversamente proporzionale alla massa nodale fittizia introdotta per garantire stabilità numerica alla soluzione ed abbia una direzione ed un verso tali da fare in modo che l'energia derivante sia sempre dissipata.

Per meglio chiarire il tipo di smorzamento adottato, si ritiene opportuno riscrivere l'equazione (17), mediante la quale si calcolava la velocità nodale, tenendo conto dell'effetto dello smorzamento:

$$\dot{u}_i^{(t+\Delta t/2)} = \dot{u}_i^{(t-\Delta t/2)} + \left[\sum F_i^{(t)} - \alpha \left| \sum F_i^{(t)} \right| \operatorname{sgn}(\dot{u}_i^{(t-\Delta t/2)}) \right] \frac{\Delta t}{m_n} \quad (18)$$

dove: α = costante posta uguale a 0.8;

$\operatorname{sgn}()$ = segno assunto dall'espressione tra parentesi;

m_n = massa nodale fittizia derivante da .

In breve, lo smorzamento adottato risulta localmente variabile.

5.4.4 - Stabilità della soluzione

Come evidenziato in precedenza, il metodo di soluzione esplicito adottato nel FLAC non è incondizionatamente stabile: deve risultare, perché lo sia, che la velocità del “fronte di calcolo” sia maggiore della massima velocità di propagazione delle informazioni all’interno del corpo solido. Allo scopo deve essere scelto un opportuno valore del timestep che risulti inferiore al valore del timestep critico in corrispondenza del quale si ha proprio l’uguaglianza tra velocità del “fronte di calcolo” e velocità di propagazione delle informazioni.

La condizione di stabilità per un solido elastico discretizzato in elementi di dimensione Δx è esprimibile come:

$$\Delta t < \frac{\Delta x}{C} \quad (19)$$

dove: C = massima velocità di propagazione delle informazioni

Nella generalità dei casi la velocità C coincide con la velocità dell’onda p:

$$C_p = \sqrt{\frac{K + 4G/3}{\rho}} \quad (20)$$

Per un singolo sistema massa-molla la condizione di stabilità è:

$$\Delta t < 2\sqrt{\frac{m}{k}} \quad (21)$$

dove: m = massa;

k = rigidezza.

Nel caso più generale di un sistema costituito da materiale solido e da una rete comunque articolata ed interconnessa di sistemi massa-molla il timestep critico è correlato al più piccolo periodo naturale del sistema T_{\min} :

$$\Delta t < \frac{T_{\min}}{\pi} \quad (22)$$

È evidente come sia assolutamente impraticabile l'approccio di determinare gli autovalori rappresentativi dei periodi di oscillazione dell'intero sistema, per questa ragione nel FLAC si adotta il seguente approccio semplificato che consiste nel determinare il timestep critico locale.

Dal momento che il FLAC è strutturato per ottenere una soluzione statica di un problema, le masse nodali, come riportato nell'equazione (18), possono essere riviste come fattori di rilassamento nell'equazione del moto. Questi fattori di rilassamento, ovvero le masse, possono essere modificate opportunamente per ottimizzare la velocità di convergenza della soluzione.

Si noti che le forze gravitazionali non vengono alterate a seguito di queste modifiche delle masse inerziali nei nodi, in quanto esse vengono determinate in virtù dell'espressione (16).

Per la determinazione del timestep critico si fa un'assunzione di base secondo la quale la migliore convergenza possibile si ottiene quando i valori dei timestep critici locali sono uguali cosa, questa, che si verifica, come deducibile dall'equazione (22), quando, ad esempio, i periodi naturali di tutte le parti considerate sono uguali.

Per semplicità, dipendendo il periodo naturale di ciascuna parte del sistema, dalla sua massa, viene posto il timestep critico pari all'unità e vengono modificate le masse inerziali nei nodi assumendo un fattore di sicurezza, per il timestep critico, pari a 0.5. Questa correzione si rende indispensabile a causa del fatto che

tale quantità viene solo stimata e non calcolata.

Utilizzando l'equazione (19) per un sub-elemento triangolare di area A e stimando la minima distanza di propagazione per la zona come $\frac{A}{\Delta x_{\max}}$ si ottiene:

$$\Delta t = \frac{A}{C_p \Delta x_{\max}} \quad (23)$$

Sostituendo, come affermato, il valore $\Delta t=1$ e tenendo conto che, dall'espressione (20) si ricava $C_p^2 \rho = K + 4G/3$, si ottiene:

$$\rho = \frac{(K + 4G/3) \Delta x_{\max}^2}{A^2} \quad (24)$$

Osservando che $m_z = \rho A$ si ottiene:

$$m_z = \frac{(K + 4G/3) \Delta x_{\max}^2}{A} \quad (25)$$

Considerando la massa nodale (m_{gp}) di un triangolo pari ad un terzo dell'intera massa del triangolo si ha:

$$m_{gp} = \frac{(K + 4G/3) \Delta x_{\max}^2}{3A} \quad (26)$$

Infine, la massa nodale in ciascun nodo della griglia del FLAC risulterà pari alla somma di tutte masse dei triangoli connessi a quel nodo:

$$m_n = \sum \frac{(K + 4G/3)\Delta x_{\max}^2}{6A} \quad (27)$$

nella quale la ragione della ulteriore divisione per due è da cercarsi nella presenza di due coppie di triangoli.

L'equazione (27) definisce, appunto, la massa nodale fittizia utilizzata, ad esempio, nell'equazione (18) per la determinazione delle velocità nodali tenendo conto dell'effetto di smorzamento che è necessario introdurre per rendere numericamente stabile la soluzione.

5.5 - I modelli costitutivi adoperati nel calcolo

I materiali caratterizzati da comportamento plastico subiscono deformazioni permanenti dipendenti dal percorso di carico. Per schematizzare il loro comportamento i modelli costitutivi plastici sono caratterizzati dalla funzione di snervamento, dalla funzione di hardening/softening e dalla legge di flusso.

La funzione di snervamento definisce la combinazione di tensioni per la quale ha luogo il flusso plastico. Questa funzione è rappresentata da una superficie limite nello spazio generale delle tensioni, per cui i punti contenuti all'interno di questa superficie definiscono stati tensionali per cui il materiale manifesta un comportamento elastico mentre i punti appartenenti alla superficie definiscono stati tensionali per cui il materiale ha un comportamento plastico.

Le leggi di flusso specificano la direzione, nello spazio generale delle tensioni, del vettore rappresentativo degli incrementi di deformazione plastica; il flusso viene detto associato se le funzioni di snervamento e quella potenziale coincidono e non associato in caso contrario.

5.5.1 - Modello costitutivo Mohr-Coulomb

Il modello costitutivo alla Mohr-Coulomb è volto a rappresentare il comportamento meccanico di un materiale perfettamente plastico.

Nella implementazione nell'ambito del codice di calcolo FLAC del modello costitutivo Mohr-Coulomb, la superficie di snervamento è definita mediante una funzione di snervamento per taglio e mediante una funzione di snervamento per trazione. La prima di queste due funzioni deriva dall'applicazione del criterio di rottura di Mohr-Coulomb mentre la seconda si ottiene applicando un criterio di rottura a trazione.

La legge di flusso per taglio può essere associata o non associata mentre la legge di flusso per trazione è associata.

L'implementazione di questo modello costitutivo nel FLAC avviene nello

spazio generale delle tensioni utilizzando, quindi, le tre tensioni principali σ_1 , σ_2 , σ_3 . In questa rappresentazione, la tensione σ_{zz} , normale al piano di analisi, è una tensione principale e viene identificata con una di queste. Le tensioni vengono ordinate, con la convenzione che le tensioni di compressione sono negative, in modo che;

$$\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3 \quad (27)$$

I corrispondenti incrementi di deformazione $\Delta\varepsilon_1$, $\Delta\varepsilon_2$, $\Delta\varepsilon_3$, vengono scomposti nelle aliquote elastica e plastica usando gli apici, rispettivamente, e e p:

$$\Delta\varepsilon_i = \Delta\varepsilon_i^e + \Delta\varepsilon_i^p \quad i = 1,2,3 \quad (28)$$

Le espressioni alle differenze finite della legge elastica di Hooke in termini delle tensioni e delle deformazioni principali sono:

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_1 &= \alpha_1 \Delta\varepsilon_1^e + \alpha_2 (\Delta\varepsilon_2^e + \Delta\varepsilon_3^e) \\ \Delta\sigma_2 &= \alpha_1 \Delta\varepsilon_2^e + \alpha_2 (\Delta\varepsilon_1^e + \Delta\varepsilon_3^e) \\ \Delta\sigma_3 &= \alpha_1 \Delta\varepsilon_3^e + \alpha_2 (\Delta\varepsilon_1^e + \Delta\varepsilon_2^e) \end{aligned} \quad (29)$$

dove: $\alpha_1 = K+4G/3$

$\alpha_2 = K-2G/3$

$G =$ modulo di rigidezza al taglio;

$K =$ modulo di rigidezza volumetrica.

Seguendo le convenzioni sull'ordine delle tensioni principali riportato nelle disuguaglianze (27), le superfici di snervamento per taglio e per trazione possono essere rappresentate nel piano (σ_1, σ_3) come illustrato in Figura 5.03.

La superficie di snervamento di taglio è definita, dal punto A al punto B, per mezzo del criterio di rottura di Mohr-Coulomb:

$$f^s = \sigma_1 - \sigma_3 N_\phi + 2c\sqrt{N_\phi} \quad (30)$$

Dal punto B al punto C è definita la superficie di snervamento per trazione mediante un criterio di rottura per trazione:

$$f^t = \sigma^t - \sigma_3 \quad (31)$$

dove: ϕ = angolo di attrito interno;

c = coesione;

σ^t = tensione di trazione;

$$N_\phi = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi}$$

Si noti che solo la tensione principale massima e quella minima sono utilizzate nella formulazione dello snervamento per taglio; la tensione intermedia non ha effetto.

Per un materiale attritivo e coesivo, $\phi \neq 0$ e $c \neq 0$, la tensione di trazione non può superare il valore limite:

$$\sigma_{\max}^t = \frac{c}{\tan \phi} \quad (32)$$

Qualora il materiale avesse solo un comportamento coesivo e non attritivo ($\phi=0$ e $c \neq 0$), per risolvere l'indeterminazione nel calcolo del valore da attribuire a σ_{\max}^t in base all'equazione (32), si adotta la convenzione di porre $\sigma_{\max}^t = 0$

Nel caso in cui la legge di flusso plastico sia non associata, la funzione potenziale di taglio assume la forma:

$$g_s = \sigma_1 - \sigma_3 N_\psi \quad (33)$$

$$\text{dove: } N_\psi = \frac{1 + \sin \psi}{1 - \sin \psi}$$

$$\psi = \text{angolo di dilatanza}$$

La legge di flusso è associata per la rottura per trazione ed è quindi derivata dalla funzione potenziale:

$$g^t = -\sigma_3 \quad (34)$$

Nello spazio tridimensionale delle tensioni, la presenza di differenti funzioni di snervamento comporta la comparsa di spigoli che hanno origine proprio dall'intersezione delle superfici piane rappresentative delle funzioni di snervamento. Le corrispondenti leggi di flusso plastico potrebbero, nell'intorno di tali spigoli, dare luogo a situazioni di ambiguità nella definizione della correzione

plastica da adottare. Per risolvere tale situazione di ambiguità, nel codice di calcolo FLAC, si adotta una tecnica che, relativamente ad uno spigolo taglio-trazione e con riferimento al piano (σ_1, σ_3) , viene graficamente illustrata in Figura 5.04.

Tale tecnica comporta la definizione di una funzione $h(\sigma_1, \sigma_3)=0$ che è rappresentata dalla bisettrice dell'angolo formato, nel piano (σ_1, σ_3) , dalle rette di equazione $f^s = 0$ e $f^t = 0$. Questa funzione ha l'espressione:

$$h = \sigma_3 - \sigma^t + \alpha^p (\sigma_1 - \sigma^p) \quad (35)$$

$$\text{dove: } \alpha^p = \sqrt{1 + N_\phi^2} + N_\phi \text{ (costante);}$$

$$\sigma^p = \sigma^t N_\phi - 2c \sqrt{N_\phi} \text{ (costante).}$$

Un punto che, nel piano (σ_1, σ_3) , venga a trovarsi al di sopra di una delle due rette rappresentative delle due superfici di snervamento adottate, rappresenta uno stato tensionale che comporta una violazione di uno dei due criteri di rottura adottati.

La retta di equazione $h=0$ definendo, al di sopra delle rette rappresentative delle superfici di snervamento, due semipiani distinti, ha proprio lo scopo consentire di individuare quale dei due criteri di rottura sia stato violato.

Se si ricade nel dominio 1, viene dichiarata uno snervamento per taglio ed il punto rappresentativo dello stato tensionale viene ricondotto sulla curva $f^s = 0$ utilizzando una legge di flusso derivata dalla funzione potenziale g^s . Se si ricade nel dominio 2, ha luogo uno snervamento per trazione ed il punto rappresentativo dello stato tensionale viene ricondotto sulla curva $f^t = 0$ utilizzando una legge di flusso derivata dalla funzione potenziale g^t .

La tecnica illustrata, applicabile per piccoli incrementi di deformazioni, comporta che, in corrispondenza di ciascun ciclo di calcolo e nell'occorrenza di flusso plastico venga utilizzata una sola legge di flusso e, quindi, una sola correzione tensionale. In particolare se il punto rappresentativo dello stato tensionale dovesse seguire esattamente il confine tra i due domini, le correzioni vengono adottate alternativamente tra i due criteri.

Il modello Mohr-Coulomb, nella forma sin qui discussa, è implementato nel FLAC secondo la seguente metodologia.

In una prima fase vengono valutate, a partire dalle componenti degli incrementi di deformazione valutate per il ciclo corrente ed applicando la legge elastica di Hooke, le componenti del relativo incremento tensionale che, sommate alle attuali componenti delle tensioni definiscono un nuovo stato tensionale σ_{ij}^I . Con riferimento allo stato tensionale appena definito, vengono calcolate ed ordinate, seguendo l'ordine riportato nelle disuguaglianze (27), le tensioni principali ($\sigma_1^I, \sigma_2^I, \sigma_3^I$) e le relative direzioni. Se queste tensioni definiscono un punto nello spazio generale delle tensioni che viola uno dei criteri di rottura adottati, si rende necessario applicare una correzione ai valori tensionali desunti dall'applicazione della legge elastica, allo scopo di determinare il nuovo stato tensionale effettivo. Può ovviamente verificarsi, facendo riferimento all'espressione (35), o che $h(\sigma_1^I, \sigma_3^I) \leq 0$ oppure che $h(\sigma_1^I, \sigma_3^I) > 0$ e, quindi, viene dichiarato, rispettivamente, lo snervamento per taglio oppure quello per trazione e viene adottata la correzione plastica opportuna assumendo che le direzioni principali non vengano modificate dalla correzione stessa.

Se il valore calcolato per la σ_3 supera in un elemento il valore σ^t , contemporaneamente alla correzione plastica cui si è fatto precedentemente riferimento, la resistenza a trazione, relativamente a quel particolare elemento, viene immediatamente posta uguale a zero allo scopo di simulando un immediato e totale rammollimento a trazione.

In questo modello che, come già affermato, ha lo scopo di rappresentare il comportamento meccanico di un materiale perfettamente plastico, le deformazioni

plastiche non vengono, ovviamente, calcolate anche allo scopo di ridurre i tempi di calcolo.

Possono verificarsi casi in cui l'analisi che si intende condurre coinvolga materiali che non manifestano un repentino crollo della resistenza a trazione oppure casi in cui la determinazione delle deformazioni plastiche assume importanza rilevante. In questi casi risulta indispensabile, pur mantenendo costanti le caratteristiche meccaniche dei materiali all'aumentare della deformazione plastica, ricorrere al modello costitutivo Mohr-Coulomb con strain-softening/hardening.

5.5.2 - Modello costitutivo Mohr-Coulomb con strain-softening/hardening

Il modello di comportamento di cui si discuterà al presente Paragrafo ovvero il modello Mohr-Coulomb con strain-softening/hardening è basato sul modello Mohr-Coulomb.

Nel modello Mohr-Coulomb si assume che il comportamento meccanico del materiale e, quindi, le proprietà che lo controllano, rimangano costanti anche dopo l'insorgere dello snervamento plastico.

Nel modello costitutivo Mohr-Coulomb con strain-softening/hardening, vi è la possibilità di far variare i valori attribuiti alle proprietà caratterizzanti il comportamento meccanico di materiali come la coesione, l'angolo di attrito interno, l'angolo di dilatanza e la resistenza a trazione, dopo l'insorgenza dello snervamento plastico. In particolare i primi tre parametri ovvero coesione, angolo di attrito interno ed angolo di dilatanza possono variare come funzione lineare di un parametro posto in relazione alla deformazione plastica per taglio. Allo stesso modo è possibile definire la riduzione di resistenza a trazione come funzione lineare di un parametro relazionato alla deformazione plastica per trazione.

Le funzioni di snervamento sia le funzioni potenziale, nonché le leggi di flusso e le correzioni plastiche adottate per le tensioni, seguono le stesse procedure valide nel caso del modello Mohr-Coulomb e descritte nel precedente Paragrafo 5.5.1.

Durante i diversi cicli di calcolo, gli incrementi di deformazione plastica per taglio e per trazione vengono di volta in volta sommati nei due parametri ε_s^p ed ε_t^p che saranno utilizzati per definire le variazioni dei valori assunti dalle proprietà meccaniche di materiali all'aumentare della deformazione plastica.

Le funzioni rappresentative dell'andamento, all'aumentare della deformazione plastica, delle quattro proprietà meccaniche prima richiamate vengono approssimate dal FLAC per mezzo di spezzate nei piani $\phi - \varepsilon_s^p$, $c - \varepsilon_s^p$, $\psi - \varepsilon_s^p$ e $\sigma^t - \varepsilon_t^p$.

Il modello Mohr-Coulomb con strain-softening/hardening è implementato nel FLAC secondo la seguente metodologia.

Fissando l'attenzione su un particolare ciclo di calcolo, in modo del tutto analogo a quanto accade nel modello Mohr-Coulomb, i valori delle tensioni che definiscono lo stato tensionale corrente, vengono determinati, a partire dagli incrementi di deformazione, ricorrendo ai valori correnti delle proprietà meccaniche dei materiali che, però, in questo caso, sono variabili per ogni ciclo.

Nell'ambito dello stesso ciclo di calcolo, inoltre, sempre a partire degli incrementi di deformazione e limitatamente alle aliquote plastiche di tali incrementi, vengono aggiornati i valori dei due parametri ε_s^p ed ε_t^p e, in base ai valori da essi assunti, vengono valutate, in base alle appropriate leggi di variazione assegnate, i valori delle proprietà meccaniche da utilizzare nel successivo ciclo di calcolo per la determinazione del nuovo stato tensionale.

Risulta evidente come, la determinazione dei valori assunti dai parametri ε_s^p ed ε_t^p e, quindi, dei valori assunti dalle proprietà meccaniche di volta in volta attribuiti ai materiali, proceda sempre avanti di un ciclo di calcolo rispetto all'avanzamento del calcolo delle tensioni. In un metodo di calcolo esplicito, come quello implementato nel codice di calcolo FLAC, questo errore, attesa la minima dimensione assunta dal timestep, può ritenersi estremamente ridotto.

5.6 - Sequenza di operazioni nella modellazione

Scopo di questo paragrafo è essenzialmente illustrare la sequenza delle operazioni che sono state compiute nello studio del pendio Vadoncello utilizzando il codice di calcolo FLAC.

In Figura 5.05 si riporta un diagramma di flusso delle operazioni compiute nel corso del processo di modellazione numerica.

5.6.1 - Principi generali della modellazione numerica

La risoluzione numerica di problemi al finito in campo geotecnico si scontra con la difficoltà di definire con precisione il modello ed i dati da immettervi che non sono sempre tutti disponibili e difficilmente lo sono in quantità soddisfacente.

Starfield A.M. e Cundall J. (1988) forniscono utili suggerimenti per modellare numericamente sistemi per cui si abbia una limitata disponibilità di dati. Accettando il fatto che i dati delle differenti grandezze coinvolte nella modellazione non saranno mai tutti completamente disponibili, è spesso improponibile attendersi, da una modellazione numerica, risultati direttamente applicabili alla progettazione. Un modello numerico è, nella maggior parte dei casi, soprattutto utile per fornire un'idea del meccanismo deformativo che può verificarsi in un particolare sistema fisico come, ad esempio in un pendio. Costruire un modello eccessivamente complesso può talvolta essere sovrabbondante ed avere come conseguenza quella di produrre risultati di difficile comprensione al pari dello stesso fenomeno fisico modellato.

In questa ottica il codice di calcolo FLAC (come ogni altro codice in questo campo) più come un ulteriore elemento di analisi del comportamento al finito di un particolare sistema fisico piuttosto che uno strumento di progettazione di dettaglio.

Il modello costruito per schematizzare il reale non deve mai essere considerato una scatola chiusa, bensì deve essere aggiornato e modificato, laddove necessario, nel corso dello studio. Nel caso dello studio del pendio Vadoncello, infatti, si sono

realizzate numerose modifiche al modello numerico originariamente predisposto. Tali modifiche sono state volte, inizialmente, alla velocizzazione del processo di calcolo stesso, hanno fatto seguito modifiche alle proprietà meccaniche dei materiali atte a meglio rappresentare il reale ed a comprendere l'influenza di tali variazioni sul meccanismo di deformazione che si andava determinando. Ulteriori modifiche hanno, infine, riguardato essenzialmente le condizioni al contorno, sempre nell'ottica di meglio rappresentare il reale.

5.6.2 - Obiettivi dell'analisi

Il livello di dettaglio che si richiede dall'analisi numerica, sia in termini di input che, quindi, in termini di output, è strettamente correlato agli obiettivi che si desidera raggiungere con la modellazione stessa.

Volendo comprendere il meccanismo deformativo di un grande pendio in terra come il caso del pendio Vadoncello, si rende necessario mettere a punto un modello numerico che, senza risultare estremamente lento in fase di elaborazione e senza comportare particolari complessità in fase di immissione dei dati, sia il più accurato possibile.

Le principali problematiche legate allo studio del pendio Vadoncello possono così riassumersi:

1. assetto geologico noto solo parzialmente, questa, che comporta la formulazione di diverse ipotesi non direttamente confermabili da indagini e dati di sito;
2. comportamento meccanico dei terreni coinvolti assunto sulla base di poche informazioni puntuali, questa, che ha comportato, notevoli approssimazioni ed estrapolazioni;
3. regime di filtrazioni nel pendio note solo in parte che ha la diretta conseguenza di consentire una definizione approssimata dei livelli di falda presenti in sito.

Nel caso in esame, si ha, quindi, a che fare con problemi che, considerata la loro entità, influenzano notevolmente il livello di dettaglio raggiungibile con la modellazione.

Nel corso dello studio numerico del pendio Vadoncello, quindi, gli obiettivi perseguiti dalla modellazione saranno soprattutto legati alla comprensione dei meccanismi di deformazione globali del pendio stesso al variare di alcune condizioni come le proprietà meccaniche dei terreni presenti in sito, la presenza di livelli di falda, la presenza di particolari condizioni di vincolo.

5.6.3 - Schematizzazione del sistema fisico

Nella predisposizione di un modello numerico, risulta di importanza fondamentale una schematizzazione del problema fisico volta alla individuazione ed alla caratterizzazione dei principali elementi da considerare nell'ambito della modellazione stessa. Nel caso in esame dello studio del pendio Vadoncello, sono state considerate le seguenti problematiche, con i relativi coinvolgimenti in termini di modellazione, allo scopo, appunto, di schematizzare il problema in studio:

1. Entità dei movimenti che ci si deve attendere in relazione alle dimensioni in gioco. Influenza sulle scelte delle dimensioni della porzione di reale da modellare e sulla metodologia di analisi da attuare (piccole oppure grandi deformazioni);
2. Presenza nel sistema di eventuali discontinuità tali da influenzare il comportamento. Necessità di implementare nel modello la presenza di elementi di interfaccia;
3. Presenza di eventuali notevoli variazioni stratigrafiche nell'ambito del solido oggetto di studio. Influenza sulle dimensioni da adottare per gli elementi della griglia di discretizzazione e, di conseguenza, sulla velocità di

elaborazione del modello;

4. Influenza nel comportamento del sistema da parte di falde acquifere. Necessità o meno di implementare la presenza di uno o più livelli di falda;
5. Particolari azioni esterne che agiscono sul sistema. Necessità di considerare particolari condizioni di vincolo al contorno per tenere conto, ad esempio, di opere di stabilizzazione oppure trascinamenti al piede oppure spinte a monte.

5.6.4 - Raccolta dati

In base alla schematizzazione effettuata con la metodologia illustrata al precedente Paragrafo, è stato possibile definire quali dovevano essere i dati di cui si dovesse disporre per eseguire correttamente la modellazione numerica:

1. dati geometrici come la topografia di superficie;
2. dati stratigrafici e relative interpretazioni geologiche;
3. caratterizzazione meccanica delle strutture geologiche coinvolte;
4. comportamento dei materiali e definizione delle relative leggi costitutive;
5. condizioni iniziali per l'analisi (stato tensionale in sito, pressioni interstiziali);
6. modifiche allo stato di caricamento del sistema per azione di carichi esterni quali sovraccarichi e/o movimenti esterni al sistema che interagiscono con esso.

5.6.5 - Elaborazione di un modello semplice

Dall'analisi delle problematiche richiamate nel precedente Paragrafo 5.6.3 e facendo riferimento ai dati reperiti sulla scorta delle indicazioni fornite al precedente Paragrafo, è scaturita la scelta di un modello numerico semplificato.

Una volta sottoposto ad elaborazione, si è avuta la possibilità di verificare la risposta del modello numerico semplificato adottato alla schematizzazione assunta per il sistema fisico.

Solo dopo che i primi risultati ottenuti della modellazione semplificata, in seguito a numerose modifiche in termini soprattutto di discretizzazione e proprietà meccaniche dei materiali, sono risultati congruenti con la schematizzazione fatta del problema fisico, si è passati da un modello numerico semplificato ad uno più dettagliato cui, di volta in volta, si sono aggiunti ulteriori elementi atti a consentire il raggiungimento degli obiettivi che si erano prefissi per l'analisi.

5.6.6 - Affinamento del modello di calcolo

Come accennato in precedenza, ad un primo modello semplificato, hanno fatto seguito modelli numerici più complessi e più vicini alle reali condizioni del pendio studiato.

Durante le fasi di preparazione delle differenti modellazioni sono stati tenuti presenti i seguenti punti fondamentali:

1. tempo richiesto per effettuare una singola elaborazione completa;
2. imposizione di frequenti interruzioni, e successive riprese, nell'elaborazione di un particolare modello numerico per consentire la verifica, già in fase iniziale, della congruenza tra i risultati e la schematizzazione del problema fisico effettuata;
3. creazione, nel modello, una serie di punti di monitoraggio del comportamento (possibilmente coincidenti con monitoraggi reali) allo scopo di effettuare un costante confronto tra modello numerico, schematizzazione effettuata e dati dei monitoraggi reali;
4. tracciamento continuo della massima forza sbilanciata presente nel modello numerico nel corso dell'elaborazione, allo scopo di controllare lo stato di convergenza del modello stesso.

5.6.7 - Esecuzione dei calcoli

Una volta accertato che il modello rispondesse alla schematizzazione fatta del sistema fisico e, laddove possibile, una volta verificato che i dati desunti dai punti di monitoraggio numerico fossero quanto meno paragonabili a quelli desunti da monitoraggi reali, si è potuto procedere con l'elaborazione dei differenti modelli predisposti atti a rappresentare i diversi scenari ipotizzati.

5.6.8 - Studio parametrico

È sempre opportuno effettuare più analisi numeriche del problema che si riferiscano a scelte alternative sia relativamente alle scelte dei parametri interessati nella modellazione sia alle configurazioni di carico e/o di vincolo per le quali si possono avere delle perplessità.

In tale ottica, con riferimento ad alcuni fattori che rientrano nel problema, si è condotto uno studio parametrico.

5.6.9 - Raccolta ed organizzazione dei risultati

La fase, finale dell'analisi numerica del pendio Vadoncello è stata quella della scelta dei dati da utilizzare per illustrare i risultati della modellazione stessa.

Si è preferito fare sempre riferimento nella presentazione dei risultati a grandezze di uso comune tralasciando alcune grandezze tipiche del codice di calcolo utilizzato.

Si è preferito utilizzare grafici piuttosto che tabelle.

È stato realizzato un apposito programma, implementato all'interno dello stesso modello numerico, atto ad evidenziare un aspetto del fenomeno deformativo studiato ritenuto particolarmente rilevante le variazioni nelle entità degli spostamenti.

5.7 - Prove effettuate sul codice di calcolo

Allo scopo di verificare l'attendibilità dei risultati di applicazioni del codice di calcolo FLAC nell'analisi numerica del pendio Vadoncello, sono state effettuate alcune semplici prove di applicazione, il cui risultato fosse noto a priori.

Scopo di queste prove è stato essenzialmente quello di cercare di stimare, partendo da casi semplici, il livello di possibile errore commesso nella simulazione numerica del pendio oggetto di studio.

Le applicazioni sono state riferite a modelli particolarmente semplici, sia da un punto di vista geometrico, sia dal punto di vista della legge costitutiva adottata. Sono stati infatti considerati provini cubici o cilindrici mentre, da un punto di vista comportamentale, con legge costitutiva elastica oppure elastica-perfettamente plastica.

Una delle prime prove effettuate ha coinvolto un provino cubico avente lato 10 cm costituito da un materiale con comportamento meccanico linearmente elastico e trasversalmente isotropo. Tale provino è stato sottoposto a compressione uniassiale con espansione laterale libera e si sono analizzati i valori degli spostamenti orizzontali ottenuti. Si è riscontrato un errore nella previsione di questi spostamenti soprattutto per quanto riguarda il rispetto delle condizioni di simmetria. Tale errore è risultato di diversi ordini di grandezza inferiore alla dimensione del provino. In Figura 5.06 è riportato, sull'asse delle ordinate ed espresso in cm, l'entità dello spostamento orizzontale del punto baricentrico al provino mentre, in ascisse ed espresso come numero assoluto, è riportato il numero di ciclo di calcolo. Si evidenzia, dopo una iniziale oscillazione prima della condizione di stabilità, un valore del citato spostamento di circa $2.5 \cdot 10^{-8}$ cm pari, cioè, a circa il $2.5 \cdot 10^{-7}$ % in luogo dell'atteso valore zero.

In modo del tutto analogo è stata effettuata una prova su un provino cilindrico costituito da materiale elastico-perfettamente plastico, per il quale è stata simulata una prova triassiale drenata con piastre di carico prive di attrito. Anche in questo caso l'errore riguarda essenzialmente i fenomeni deformativi. In particolare si è

evidenziato, con l'avanzamento del calcolo, un avanzamento tanto della deformazione quanto della plasticizzazione che non rispetta le condizioni di assial-simmetria geometrica e di carico proprie della prova.

Riportandoci al caso oggetto di studio del pendio Vadoncello, si ritiene, a prendendo spunto dai risultati ottenuti da queste semplici prove effettuate, tracciare alcune considerazioni:

1. il pendio oggetto di studio è caratterizzato complessità geometriche e stratigrafiche notevolmente maggiori di quelle delle semplici prove condotte;
2. il comportamento meccanico dei terreni considerati nell'ambito del pendio è ben lungi dall'essere paragonabile ai semplici comportamenti assunti per i materiali nel corso delle prove condotti;
3. il meccanismo di deformazione previsto per il pendio nel suo complesso è tale da comportare deformazioni di carattere plastico per i terreni coinvolti.

Le osservazioni precedentemente effettuate, ancora una volta, conducono alla conclusione di considerare i risultati della modellazione certamente validi da un punto di vista qualitativo mentre, da un punto di vista quantitativo, saranno considerati attendibili solo gli ordini di grandezza e non già i valori assunti dalle diverse grandezze interessate ovvero, essenzialmente, spostamenti orizzontali e verticali.

CAPITOLO 5

FIGURE E TABELLE

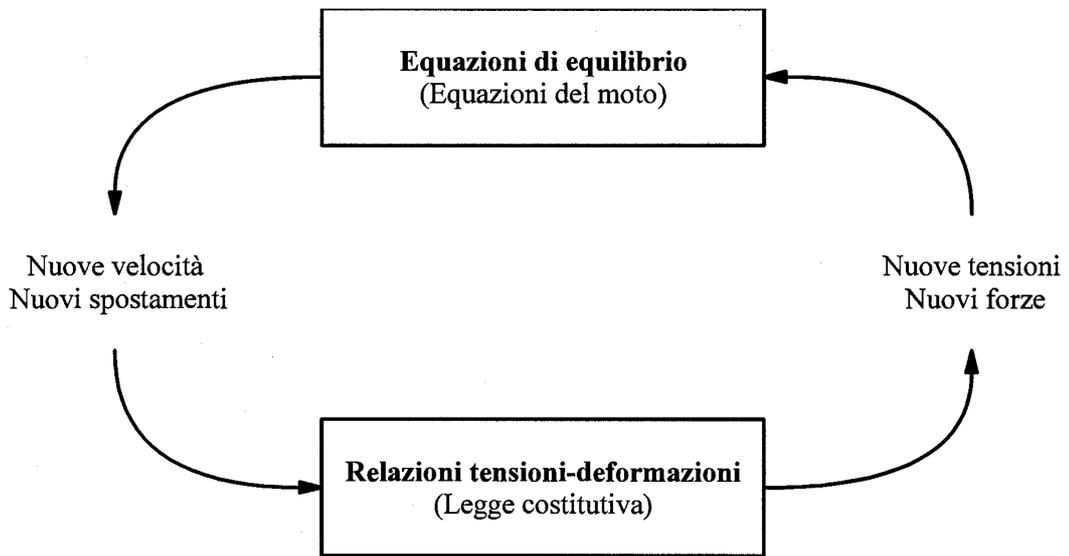
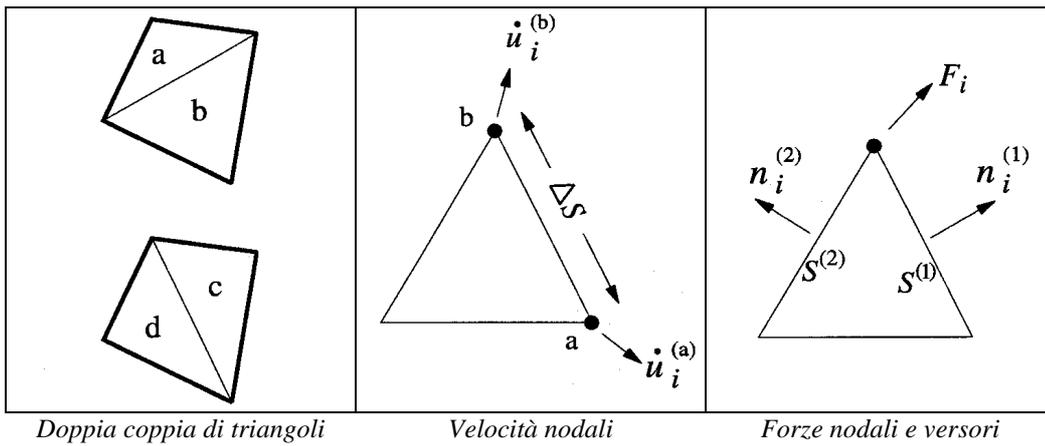


Figura 5.01 - Ciclo del metodo di calcolo esplicito



Doppia coppia di triangoli

Velocità nodali

Forze nodali e versori

Figura 5.02 - Scomposizione degli elementi quadrangolari

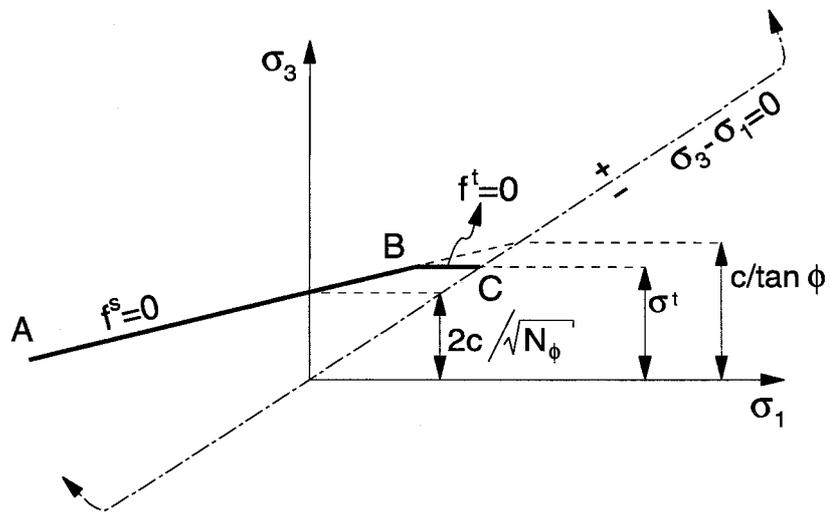


Figura 5.03 - Criterio di rottura Mohr-Coulomb nel FLAC

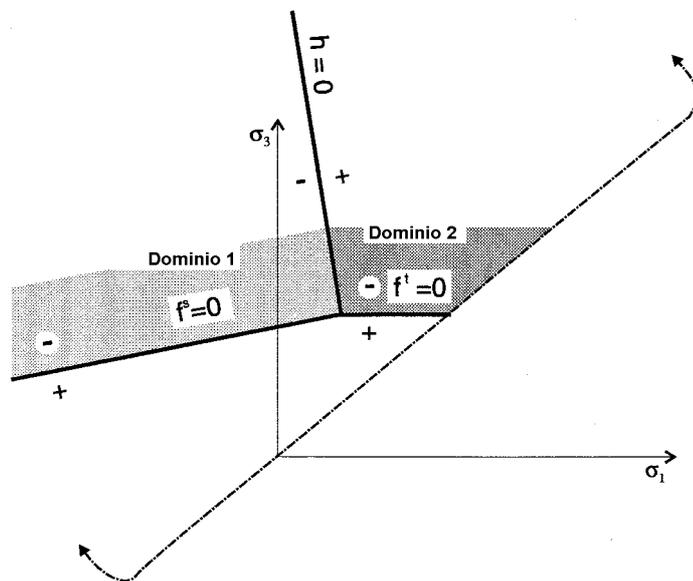


Figura 5.04 - Modello Mohr-Coulomb: domini usati nella legge di flusso

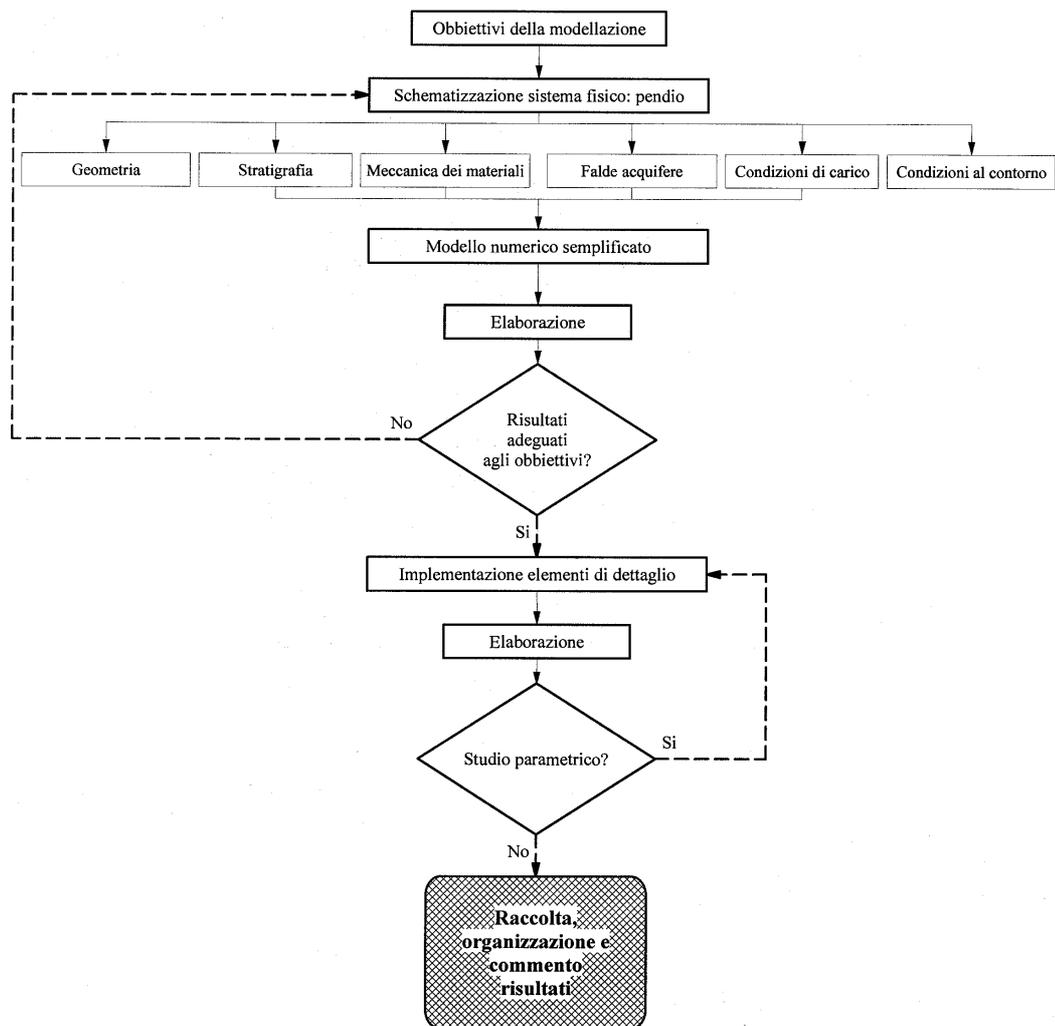


Figura 5.05 - Diagramma di flusso nella modellazione numerica del comportamento al finito di un sistema fisico

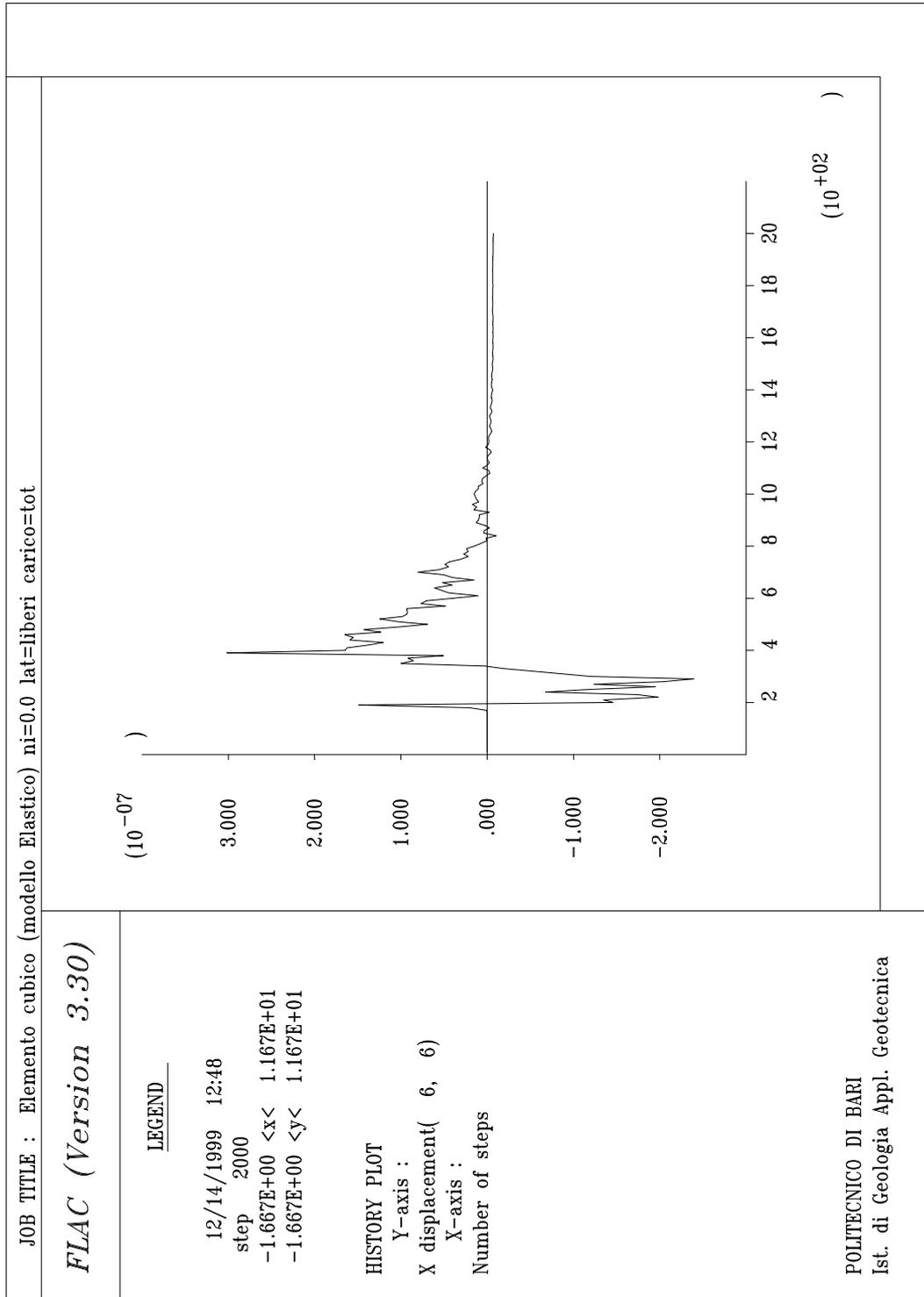


Figura 5.06 - Provino cubico elastico-Compressione uniassiale
(Unità di misura adottate: Ordinate: cm; Ascisse: numero puro)

CAPITOLO 6

MODELLAZIONE NUMERICA

6.1 - Fasi della modellazione numerica

La modellazione numerica condotta nel corso di questo studio, ha riguardato il pendio Vadoncello nelle condizioni in cui esso si trovava nel Gennaio 1995 allo scopo di modellare gli avvenimenti verificatisi nel corso del 1995 dopo, quindi, il grande evento franoso del 1993 di cui gli avvenimenti del 1995 possono essere considerati una prosecuzione.

La modellazione è stata svolta applicando gran parte dei criteri generali illustrati nel capitolo precedente.

In primo luogo si è definita la prerogativa della modellazione numerica ossia la comprensione qualitativa del meccanismo di deformazione del pendio. Data la estrema difficoltà nel quantificare con accuratezza tutti i fattori e le variabili che caratterizzano il pendio in studio, si è esclusa la finalità di una valutazione quantitativa accurata dei fenomeni deformativi limitando tale valutazione ai soli ordini di grandezza.

In tale ottica si è definito un modello che richiedesse tempi di elaborazione non particolarmente elevati e che, quindi, fosse facilmente gestibile per operare le modifiche che si rendessero di volta in volta necessarie per renderlo il più possibile vicino alla realtà seguendo la procedura riportata nella seconda fase diagramma di flusso riportato in Figura 5.05.

Alcuni aspetti, ritenuti fattori essenziali o critici per il comportamento meccanico del pendio studiato, come la morfologia, la stratigrafia e le proprietà meccaniche dei terreni coinvolti, sono stati definiti sin dal principio con un elevato livello di dettaglio.

Due aspetti sono subito apparsi di fondamentale importanza da definire: le dimensioni geometriche della porzione di pendio da modellare ed il livello di discretizzazione necessaria per rappresentarla numericamente.

Il passaggio successivo è stato quello di suddividere la griglia in regioni, internamente uniformi, che potessero essere rappresentative delle differenti unità litostratigrafiche, geologiche e geotecniche presenti in sito.

Di importanza fondamentale, a questo punto, è stata la definizione delle condizioni al contorno e, in particolare, dei vincoli da applicare al contorno della griglia.

Durante queste ultime due fasi della predisposizione del modello numerico si è proceduto di pari passo alla caratterizzazione, sempre da un punto di vista numerico, delle proprietà dei materiali, in modo da potere implementare le relative leggi costitutive all'interno delle singole regioni che si andavano definendo.

Raggiunto questo stadio, la gran parte della impostazione del modello numerico poteva ritenersi conclusa e potevano essere avviate le prime simulazioni numeriche.

I risultati delle prime simulazioni sono servite, coerentemente alla prima fase del diagramma di flusso riportato in Figura 5.05, allo scopo di valutare la eventuale necessità di apportare variazioni per migliorare il comportamento del modello in relazione alla schematizzazione fatta del sistema fisico.

I passi successivi compiuti, coerentemente, questa volta, alla seconda fase del diagramma di flusso riportato in Figura 5.05, hanno avuto lo scopo rappresentare meglio, per mezzo del modello numerico, la realtà: sono stati definiti i due livelli di falda presenti in sito ed è stato simulato l'effetto di trascinamento subito dal piede della frana Vadoncello ad opera della frana Serra dell'Acquara.

6.1.1 - Descrizione della griglia adottata ed implicazioni numeriche

Il primo passo nella definizione della griglia da utilizzare per la discretizzazione del pendio oggetto di studio è stato la scelta della sezione di pendio su cui soffermare l'attenzione.

Per la definizione della sezione di pendio da sottoporre a modellazione numerica, sono stati tenuti in considerazione i seguenti aspetti:

1. i risultati delle indagini topografiche riportati al Paragrafo 3.2.1 e, in particolare, il profilo topografico longitudinale relativo al Gennaio 1995;

2. i risultati delle indagini stratigrafiche descritte nel paragrafo 3.3.2 e riassunte nel modello geologico riportato in Figura 3.18.
3. la caratterizzazione meccanica dei materiali presenti in sito che, con i modi illustrati nel Capitolo 4, ha dato origine al modello geotecnico riportato in Figura 4.22.

In particolare il monitoraggio topografico ha orientato la scelta della traccia della sezione del pendio da considerare ai fini della modellazione numerica. Questa, coerentemente a quanto fatto per lo studio topografico dell'area, è stata posta quale una spezzata costituita da tre segmenti, come riportato in Figura 6.01. Nella scelta della traccia della sezione si è cercato di seguire la direzione di massima pendenza.

Una volta fissata la posizione e l'estensione della parte centrale della citata spezzata in modo tale da interessare la porzione di pendio coinvolta degli eventi franosi verificatisi nel corso del 1995, il segmento di monte è orientato in modo da intercettare il breccione carbonatico mentre il segmento di valle è diretto coerentemente alla direzione del movimento del piede del pendio ossia secondo la direzione della frana Serra dell'Acquara.

La lunghezza della sezione studiata e, quindi, della griglia di discretizzazione è stata fissata in 1050 metri.

Definita la dimensione longitudinale della griglia di discretizzazione, resta da fissarne la sua altezza, ovvero della profondità a cui arrestare l'indagine numerica. Non volendo condizionare in alcun modo le profondità delle deformazioni si sono assunte, per la griglia di discretizzazione, altezze di circa 200 metri a valle e di 390 metri a monte.

Per portare a termine la definizione della griglia di discretizzazione resta da definire il livello di discretizzazione da adottare e, quindi, la dimensione da assegnare agli elementi della griglia.

Un'accurata analisi in particolare del modello geotecnico proposto e riportato in Figura 4.14, ha evidenziato, quasi diffusamente ed uniformemente lungo tutto il

pendio, una notevole differenza nella frequenza di variazione delle proprietà geologico-tecniche in direzione verticale, valutabile in circa 2.00 metri, rispetto alla frequenza di variazione delle stesse proprietà in direzione orizzontale, valutabile in circa 5.00 metri.

Quanto osservato ha portato a due importanti conseguenze:

1. la pressoché omogenea variabilità delle proprietà geologico-tecniche riscontrata lungo tutta la porzione di pendio analizzata, ha consentito di mantenere costante il livello di discretizzazione nell'ambito del modello numerico. È stato possibile, così, non introdurre nel modello numerico elementi interfaccia che, se pure indispensabili per effettuare variazioni locali del livello di discretizzazione generale, rappresentando delle discontinuità fittizie, possono dare luogo a condizionamenti del comportamento delle masse al finito;
2. i passi di discretizzazione adottati sono stati di 1.00 metri in direzione verticale e di 3.00 metri in direzione orizzontale. Tali valori risultano approssimativamente in rapporto costantemente pari a 0.5 con i valori delle frequenze di variazione osservate per le proprietà geologico-tecniche in direzione verticale ed orizzontale.

Durante la fase di definizione della griglia di discretizzazione è stato necessario operare alcune semplificazioni al modello geotecnico proposto allo scopo di evitare errori nella generazione della griglia stessa in corrispondenza di punti del modello geotecnico dove si avesse a che fare con spessori inferiori a due volte la dimensione del passo di discretizzazione verticale adottato, ovvero inferiori a 2.00 metri.

Al termine di tutto il processo di definizione della griglia di discretizzazione, essa è risultata essere costituita da 350 elementi in direzione orizzontale e 390 elementi in direzione verticale per un totale di 136500 elementi; in Figura 6.02 se ne riportano i contorni.

Dei 136500 elementi, circa 33000, posti nella parte superiore della griglia, vengono immediatamente eliminati e non più coinvolti nei calcoli, quando, allo scopo di definire il profilo topografico di superficie, si assegna ad essi il modello costitutivo nullo, rappresentativo nel codice di calcolo FLAC, delle regioni di spazio non occupate da alcun materiale.

Si ritiene utile precisare che la definizione la definizione del profilo topografico di superficie, non è stata fornita direttamente, ma è indirettamente scaturita dalla suddivisione della griglia in regioni con le metodologie ed i modi descritti nel successivo Paragrafo 6.1.2.

A seguito di una prima serie di calcolazioni effettuate utilizzando la griglia di discretizzazione sin qui descritta e di cui si discuterà più in dettaglio al Paragrafo 6.2, si sono subito evidenziati alcuni problemi fondamentali:

1. il numero di cicli di calcolo necessario per raggiungere la convergenza della soluzione era molto elevato;
2. l'esecuzione di ogni singolo ciclo di calcolo richiedeva tempi molto lunghi;
3. profondità dei processi deformativi risultanti dal calcolo non superiore a 60-70 metri.

Queste osservazioni hanno indotto ad una semplificazione della griglia di discretizzazione in termini di numero di elementi.

Considerate le complessità stratigrafiche presenti in sito, si è esclusa la possibilità di ridurre il numero degli elementi della griglia di discretizzazione mediante una riduzione del livello di discretizzazione adottato utilizzando passi di discretizzazione più ampi.

La riduzione del numero di elementi della griglia di discretizzazione, quindi, è stata ottenuta mediante una riduzione nelle dimensioni assegnate alla griglia stessa. Non potendo ridurre le dimensioni longitudinali della griglia perché risultavano di notevole importanza nell'ambito della stessa modellazione

numerica in quanto direttamente legate alla morfologia ed alla topografia del pendio studiato, l'unica possibilità è stata quella di ridurre l'altezza.

Facendo anche riferimento alla terza delle osservazioni prima riportate, la dimensione verticale massima, a monte, del modello è stata, quindi, fissata in 260 metri.

La griglia di discretizzazione, così modificata, è risultata essere costituita da 350 elementi in direzione orizzontale e 260 elementi in direzione verticale per un totale di 91000 elementi; in Figura 6.03 sono riportati i contorni della griglia di discretizzazione dopo la riduzione.

Anche in questo caso dei 91000 elementi complessivamente presenti nella griglia, circa 33000 situati nella parte superiore, vengono immediatamente eliminati e non più coinvolti nei calcoli, ancora una volta mediante assegnazione del modello costitutivo nullo, per consentire la definizione del profilo topografico di superficie.

Le prime calcolazioni condotte utilizzando la griglia di discretizzazione semplificata, di cui si discuterà nel successivo Paragrafo 6.2, hanno immediatamente mostrato come gli scopi che ci si prefiggevano al momento della modifica del modello stesso potessero dichiararsi raggiunti e, attesa l'accettabile velocità di elaborazione raggiunta, tutti gli ulteriori sviluppi del modello numerico (seconda fase del diagramma di flusso riportato in Figura 5.05) sono stati effettuati sulla base della griglia di discretizzazione appena definita.

6.1.2 - Suddivisione della griglia in regioni

Una volta definita, con i modi descritti al Paragrafo precedente, la griglia di discretizzazione, si è reso indispensabile individuare nel suo ambito una serie di regioni che, internamente uniformi, rappresentassero, il più possibile fedelmente, sia gli andamenti stratigrafici presenti in sito sia le variazioni di proprietà meccaniche dei materiali così come suggerito, rispettivamente, dal modello geologico riportato in Figura 3.18 e dal modello geotecnico riportato in Figura 4.22.

La necessità di definire queste regioni in modo il più possibile preciso e dettagliato, ha indotto ad adottare un artificio sia procedurale che numerico mettendo a punto, sostanzialmente, un pre-processor grafico per la definizione delle regioni.

Il pre-processor grafico realizzato si avvale dell'ausilio del codice per disegno vettoriale AutoCAD versione 14.0 prodotto dalla società Autodesk e dell'ambiente di sviluppo di applicazioni Delphi versione 4.0 prodotto dalla società Borland.

Facendo uso del codice AutoCAD, si è eseguito un disegno del modello geotecnico adottato per la zona in studio adottando, nel corso della rappresentazione grafica, come unità di misura il metro.

Nella rappresentazione grafica effettuata si è fatto in modo, sebbene si verificassero frequenti ed apparentemente inutili sovrapposizioni, che ciascuna regione del modello caratterizzata da differenti proprietà geologiche e meccaniche, venisse graficamente rappresentata mediante una polilinea continua chiusa indipendente.

Utilizzando il linguaggio di programmazione implementato all'interno del codice AutoCAD, ovvero l'AutoLisp, è stato creato un programma che, selezionando singolarmente ogni polilinea chiusa, si occupa di esportare in un file di testo, sotto forma di tabella, le coordinate bidimensionali dei nodi della polilinea con una precisione di quattro cifre decimali. Ricordando che la rappresentazione grafica del pendio è stata realizzata adottando come unità di misura il metro, la precisione delle coordinate di ciascun vertice delle diverse regioni del modello geotecnico è, quindi, del decimo di millimetro.

Ogni file di testo così generato, ha richiesto però, alcune modifiche sia per essere sintatticamente accettato dal codice di calcolo FLAC sia per essere completato con le istruzioni necessarie al codice stesso per la delimitazione di una regione chiusa nell'ambito della griglia di discretizzazione.

A tale scopo è stato realizzato un programma utilizzando il Delphi che, accettando in input il file di testo generato dall'AutoCAD mediante l'AutoLisp produce in output un file, ancora testuale, ma interpretabile come file di input del

FLAC.

Nel codice di calcolo FLAC, le istruzioni necessarie per definire, nell'ambito della griglia di discretizzazione, con la massima precisione possibile, le diverse regioni chiuse ed omogenee cui saranno applicate le differenti proprietà dei materiali sono essenzialmente due: *Gen Table N* e *Table N*.

La logica utilizzata è quella di costruire, mediante l'istruzione *Table N*, una tabella che contenga le coordinate bidimensionali rappresentative dei vertici di una spezzata chiusa. In questa istruzione *N* rappresenta il numero della tabella ed ha lo scopo di consentire ad altre istruzioni di riferirsi ad una specifica tabella.

Una volta generata la tabella, utilizzando il comando *Gen Table N*, il codice di calcolo FLAC delimita, nell'ambito della griglia di discretizzazione, una regione chiusa delimitata, appunto, dalla spezzata chiusa le coordinate dei cui vertici sono memorizzate nella tabella specificata.

In Figura 6.04 è riportata la griglia di discretizzazione opportunamente suddivisa, con la metodologia appena descritta, in regioni distinte una dall'altra.

Durante la fase di definizione delle differenti regioni nell'ambito della griglia di discretizzazione è stato necessario, come già in fase di definizione della griglia stessa, effettuare alcune semplificazioni al modello geotecnico proposto allo scopo di evitare errori nella generazione della griglia in corrispondenza di punti del modello geotecnico dove si avesse a che fare con spessori inferiori a 2.00 metri. Un esempio di situazioni di questo genere è rappresentato dall'angolo acuto che, sia nel modello geologico sia in quello geotecnico, caratterizza l'inclusione di entrambe le due regioni F nell'ambito della regione E. Condizioni di questo tipo, sono state risolte in modo automatico ancora utilizzando il programma realizzato in Delphi troncando, laddove necessario, gli angoli acuti presenti nei contorni delle varie regioni e sostituendoli con segmenti verticali oppure orizzontali di lunghezza pari, quanto meno a due metri.

È opportuno osservare che, sebbene la suddivisione della griglia di discretizzazione sia effettuata in modo da rispecchiare il più possibile fedelmente il modello geologico e geotecnico proposti, la complessità dello stato dei materiali in sito richiederebbe, in alcuni casi, una ulteriore suddivisione delle diverse

regioni. Le regioni che verrebbero a definirsi coinvolgerebbero, però, pochissimi elementi, dando luogo a notevoli difficoltà nell'evitare errori nella generazione della griglia di discretizzazione connessi alla presenza di spessori inferiori ai due metri. Piuttosto che incorrere in queste difficoltà, si è preferito, in queste parti del modello numerico, attribuire le proprietà meccaniche direttamente ai singoli elementi interessati.

6.1.3 - Condizioni di vincolo al contorno

Prima di ipotizzare qualsiasi altra operazione sul modello numerico, si rende indispensabile definire le condizioni di vincolo adottate per il modello stesso.

Le condizioni di vincolo nel codice di calcolo FLAC, come in ogni altro codice che prevede una discretizzazione del reale, vengono definite imponendo opportune condizioni iniziali ai nodi presenti al contorno della griglia di discretizzazione.

È bene osservare che, nella sua versione finale alleggerita, la griglia di discretizzazione utilizzata nella modellazione del pendio Vadoncello, è caratterizzata da tre contorni da assoggettare a condizioni di vincolo opportune: uno a monte con 261 nodi, uno a valle con 72 nodi ed uno alla base con 351 nodi.

Le condizioni di vincolo scelte sono tali da rispettare il più possibile il prevedibile comportamento naturale in sito.

Per il contorno alla base è stata impostata una condizione di vincolo del tipo a cerniera che, pur impedendo spostamenti dei nodi in direzione orizzontale e verticale, consente al nodo stesso di ruotare.

Per i due contorni laterali, invece, è stata imposta una condizione di vincolo del tipo a carrello con cerniera che consente ogni tipo di movimento ad esclusione degli spostamenti ortogonali alla linea del contorno stesso.

Risulta utile osservare che, nel codice di calcolo FLAC, essendo la formulazione basata sulle leggi della dinamica, condizioni di vincolo come quelle che si sono imposte al modello numerico vengono riviste come impedimento non

già agli spostamenti, ma alle velocità: per ogni nodo si impedisce, infatti, la componente di velocità piuttosto che la componente dello spostamento in una particolare direzione.

In particolare l'istruzione utilizzata nel codice di calcolo FLAC per vincolare il valore di una componente di velocità in un nodo ad un valore iniziale nullo è l'istruzione *Fix x y i,j*.

L'istruzione comporta che, nel corso della calcolazione, venga costantemente mantenuta nulla la componente della velocità di un particolare nodo della griglia di discretizzazione, individuato mediante la sua posizione in termini di riga e colonna (*i,j*), in direzione *x* oppure *y*.

6.1.4 - Implementazione delle proprietà meccaniche dei materiali

Per quanto riguarda la definizione delle proprietà meccaniche da attribuire ai materiali che, nei modi definiti al precedente Paragrafo 6.1.2, sono collocati nelle differenti regioni del modello, si è fatto riferimento essenzialmente al modello geotecnico riportato in Figura 4.22 messo a punto per il pendio Vadoncello, che trae origine dall'analisi dei dati di monitoraggio riportati al Capitolo 3, dei dati geologici riportati nelle Figure 3.17 e 3.18 e delle prove di laboratorio discusse nel Capitolo 4. In particolare il comportamento meccanico dei materiali e le loro caratteristiche di resistenza sono discussi nel Paragrafo 4.4. Nella Tabella 4.07 sono riassunte le proprietà meccaniche dei differenti litotipi coinvolti nella modellazione numerica.

I materiali presenti in sito sono stati tutti modellati secondo un comportamento elasto-plastico con legge costitutiva alla Mohr-Coulomb rammollente. In particolare, in campo elastico il comportamento meccanico dei diversi materiali è stato definito in base ai valori assegnati alla rigidezza volumetrica K' ed alla rigidezza al taglio G' entrambi riportati in Tabella 4.06.

Il comportamento meccanico dei materiali in campo plastico, nell'ambito del modello costitutivo adottato è stato invece distinto per i materiali che hanno mostrato un comportamento contraente, da quello relativo ai materiali che hanno

mostrato un comportamento dilatante.

Materiali con comportamento contraente.

I materiali che hanno mostrato un comportamento contraente sono, essenzialmente, tutti i materiali presenti in sito a profondità maggiori di circa 20 metri, nonché i materiali presenti anche a basse profondità al piede del pendio e parte del corpo di frana Serra dell'Acquara (Complesso I).

Per questi materiali, così come stabilito nel Paragrafo 4.4, la legge costitutiva adottata nella modellazione è quella elasto-plastica rammollente con criterio di rottura di Mohr-Coulomb. I parametri di resistenza del terreno sono rappresentati da coesione nulla ($c'=0$) e angolo massimo di resistenza a taglio a snervamento posto pari a quello esibito dal terreno in condizioni di pseudo stato critico ($\phi'=\phi'_{CS}$).

Post-snervamento l'angolo di resistenza a taglio è stato posto costante fino a valori di deformazione plastica di taglio ϵ_s^p del 20%. Superato questo limite, il valore assunto dall'angolo di resistenza a taglio, con legge di variazione lineare, viene ridotto fino al valore di angolo di resistenza residua raggiunto per $\epsilon_s^p = 50\%$ e quindi posto costante per valori superiori di deformazione plastica di taglio.

Il comportamento contraente è stato simulato, mediante l'opportuna definizione dei valori di K' e G' , solo in campo elastico assumendo, in campo plastico, conformemente a quanto dedotto dalle prove triassiali condotte in laboratorio e riferite al precedente Paragrafo 4.3.3, un comportamento a stato critico caratterizzato da variazione nulla di deformazioni volumetriche. La legge di flusso adottata, quindi, è non associata e coerente con questo comportamento.

In prossimità della base del modello, ovvero in prossimità della base della griglia di discretizzazione il cui contorno è riportato in Figura 6.03, allo scopo di tenere in considerazione un possibile effetto di diagenesi da compattazione si sono adottati valori di coesione intercetta non nulli. Si è assunto, quindi, un miglioramento delle proprietà meccaniche dei materiali a grandi profondità non indagate direttamente nel corso dello sviluppo della campagna geognostica di cui

si è discusso al Paragrafo 3.3.

Partendo dal valore nullo assunto dalla coesione intercetta c' fino ad una profondità circa 50 metri al di sopra della base della griglia di discretizzazione, questa, in corrispondenza della base stessa, ha raggiunto il valore di 100 kPa seguendo una legge di variazione lineare con l'aumentare della profondità. La variazione nel valore assunto dalla coesione al variare della profondità è stata attribuita localmente ai singoli elementi della griglia di discretizzazione interessati mediante una opportuna funzione che è stata definita utilizzando il linguaggio di programmazione interno del FLAC, il FISH.

Nelle Figure 6.05-6.10, sono riportati, per ciascuno dei complessi per i quali, in determinate regioni del pendio riportate in Figura 4.22, è stato attribuito un comportamento contraente, i seguenti diagrammi:

- A: rappresentazione grafica della legge di variazione con la deformazione plastica di taglio ϵ_s^p per l'angolo di resistenza a taglio ϕ' ;
- B: involucro di rottura di Mohr-Coulomb coincidente con la rappresentazione, nel piano di Mohr della superficie di snervamento del materiale;
- C: simulazione numerica di una prova triassiale drenata, con piastre di carico prive di attrito, nel piano sforzo deviatorico q ; deformazione assiale ϵ_a .

Materiali con comportamento dilatante.

I materiali che hanno mostrato un comportamento dilatante sono, essenzialmente, la quasi totalità dei materiali presenti a profondità fino ai 20 metri, ovvero i materiali maggiormente disturbati per effetto degli stessi movimenti franosi. Anche in questo caso, come riportato nel Paragrafo 4.4, la legge costitutiva è stata assunta elasto-plastica Mohr-Coulomb rammollente. Rispetto al caso precedente, però, si hanno due fondamentali differenze nel comportamento modellato per i materiali:

1. come evidenziato nel Paragrafo 4.4, l'inviluppo di resistenza massima corrisponde alla condizione di massima dilatanza ed è da considerarsi un inviluppo di picco. Tale inviluppo, assunto secondo il criterio di Mohr-Coulomb è curvilineo ossia, al variare della tensione efficace σ' e quindi della pressione geostatica in sito con la profondità, si ha una variazione dell'angolo di massima obliquità delle tensioni. In particolare per implementare tale inviluppo curvilineo di picco nel modello si è assunta una variazione della coesione intercetta c' e dell'angolo di resistenza a taglio ϕ' con la profondità seguendo intervalli di 5 metri facendo c' e, contemporaneamente, facendo diminuire ϕ' all'aumentare della profondità.
2. in campo plastico le caratteristiche c' e ϕ' di resistenza del materiale non vengono poste costanti, bensì si è assunto un comportamento rammollente fino al raggiungimento delle condizioni di resistenza residua. In particolare, così come accade per i materiali caratterizzati da un comportamento contraente, per deformazioni plastiche di taglio fino al 20%, l'angolo di resistenza a taglio è stato posto pari a quello di picco ϕ'_p . Per deformazioni di taglio comprese tra il 20% ed il 50%, l'angolo di resistenza a taglio è stato assunto in riduzione lineare al variare di ϵ_s^p fino al valore residuo;
3. a differenza del caso dei materiali caratterizzati da un comportamento contraente, per i quali il flusso plastico, non associato, veniva definito in modo da non destare l'insorgere di variazioni volumetriche, all'insorgere della deformazione plastica di taglio, l'angolo di dilatanza, inizialmente posto uguale all'angolo di resistenza a taglio, diminuisce linearmente all'aumentare di ϵ_s^p fino ad annullarsi in corrispondenza di $\epsilon_s^p = 25\%$.

In base a quanto appena esposto, si evince come le osservazioni riportate al termine del Paragrafo 6.1.2 sulla necessità di definire localmente, per ogni singolo elemento della griglia di discretizzazione, le proprietà dei materiali, siano riferite essenzialmente ai materiali a comportamento dilatante, data la necessità di implementare variazioni nelle caratteristiche di resistenza dei materiali nei primi

10-15 metri di profondità.

Nelle Figure 6.11-6.16, per ciascuno dei materiali per i quali è stato implementato un comportamento dilatante, sono riportati:

A: rappresentazione grafica della legge di variazione dell'angolo di resistenza a taglio ϕ' e dell'angolo di dilatanza ψ' al variare della deformazione plastica di taglio ϵ_s^p ;

B: involucro di rottura ad andamento curvilineo nel piano di Mohr-Coulomb ed involucri di rottura rettilinei scelti per i diversi strati di spessore 5 metri definiti all'aumentare della profondità;

D: simulazione numerica di una prova triassiale drenata, con piastre di carico prive di attrito, nel piano sforzo deviatorico q ; deformazione assiale ϵ_a .

6.1.5 - Implementazione dei due distinti livelli di falda

Come evidenziato nel Capitolo 3, il pendio Vadoncello è interessato, nella zona di monte ed in parte nella zona di colata, dalla presenza di due distinti livelli di falda che si congiungono in prossimità del centro dello sviluppo longitudinale del pendio stesso.

Il codice di calcolo FLAC consente di definire un solo livello di falda quindi, per configurare le condizioni di falda presenti in sito nei terreni più superficiali, sono state applicate pressioni interstiziali opportune in corrispondenza degli elementi della griglia di discretizzazione situati al di sopra del livello di falda più profondo come descritto nel seguito.

Il livello di falda più profondo è stato, come anticipato, definito utilizzando una procedura diretta, ovvero sfruttando essenzialmente due istruzioni specifiche del codice di calcolo FLAC ovvero l'istruzione *Water Table N* e l'istruzione *Table N*.

Anche in questo caso, come nel caso della definizione delle regioni a diverso comportamento meccanico nell'ambito della griglia di discretizzazione, la logica

utilizzata è stata quella di costruire, mediante l'istruzione *Table N*, una tabella contenente le coordinate bidimensionali rappresentative dei vertici di una spezzata, in questo caso, aperta. In questa istruzione, si ricorda, *N* rappresenta il numero della tabella ed ha lo scopo di consentire ad altre istruzioni di riferirsi ad una specifica tabella.

Una volta generata la tabella, utilizzando il comando *Water Table N*, il codice di calcolo FLAC costruisce, nell'ambito della griglia di discretizzazione, una superficie di falda a partire dalla spezzata aperta, le coordinate dei cui vertici sono memorizzate nella tabella specificata.

La definizione della superficie di falda utilizzando questo comando comporta, in modo automatico, lo stabilirsi di una opportuna distribuzione di pressioni interstiziali al di sotto della superficie di falda stessa.

Il problema da risolvere resta quello della definizione del livello di falda superiore.

L'approccio seguito è stato quello di definire una tabella in cui sono state memorizzate le coordinate dei vertici della spezzata che avrebbe rappresentato, qualora il codice lo avesse concesso, appunto, il secondo livello di falda.

Utilizzando il linguaggio di programmazione interno al FLAC, ovvero il FISH, è stata creata una funzione specifica che, ad ogni ciclo di calcolo, effettuasse una serie di operazioni:

1. scorrere l'intera griglia di discretizzazione in direzione orizzontale determinando la coordinata orizzontale mediana per di ciascuna delle 350 colonne di elementi;
2. determinare a partire dalla coordinata orizzontale appena fissata, mediante un'interpolazione lineare da effettuarsi tra i valori delle coordinate dei vertici estremi del segmento interessato, la coordinata verticale del punto appartenente a ciascuna delle due superfici di falda;
3. calcolare la distanza, note le coordinate dei rispettivi punti, tra le due superfici di falda ed eventualmente interrompere il procedimento se tale

distanza risultasse nulla, sintomo, che si è raggiunta una zona del pendio in cui i livelli di falda si sono ricongiunti;

4. determinare il numero di elementi della griglia di discretizzazione compresi, per più della metà della loro superficie, tra i due livelli di falda;
5. calcolare, seguendo una legge di variazione lineare con la profondità, l'incremento di pressione interstiziale indotto dalla presenza del livello di falda superiore in corrispondenza del baricentro di ciascuno degli elementi della griglia di discretizzazione appena individuati;
6. applicare in corrispondenza di ognuno degli elementi presi in considerazione al punto 4 il corrispondente valore di pressione interstiziale basandosi sul calcolo effettuato al punto 5.

Nell'adottare questa metodologia si è ben consapevoli di sovrastimare leggermente le pressioni interstiziali che sarebbero presenti nella zona più superficiale del pendio rispetto a quelle che si avrebbero in regime di filtrazione. La relativa semplicità dell'approccio adottato e, soprattutto, la velocità nell'effettuare i calcoli necessari, hanno comunque suggerito di proseguire con questa metodologia.

L'andamento dei due livelli di falda così come impostati nel modello numerico è rappresentato in Figura 6.17.

6.1.6 - Implementazione dell'effetto di trascinamento al piede

L'implementazione dell'effetto di trascinamento del piede della frana Vadoncello nell'ambito del modello numerico approntato, è strettamente legata alla particolare situazione reale che si modella.

Si ricorda che la modellazione numerica condotta nel corso di questo studio, ha riguardato il pendio Vadoncello nelle condizioni in cui esso si trovava nel Gennaio 1995 allo scopo di modellare gli avvenimenti verificatisi nel corso del 1995.

Da un'accurata analisi dei dati di monitoraggio topografico è stato possibile stimare che, proprio nel periodo Gennaio 1995-Dicembre 1995, ovvero nel lasso di tempo modellato numericamente, il piede della frana Vadoncello, essenzialmente ad opera dell'effetto di trascinamento provocato dal movimento della frana Serra dell'Acquara, ha subito uno spostamento verso valle di circa 0.60 metri come riportato nel Paragrafo 3.2.1.

Per potere implementare nel modello numerico l'effetto di trascinamento al piede si è assunto che lo spostamento al piede di 0.60 metri verificatosi nel lasso di tempo Gennaio 1995-Dicembre 1995 si sarebbe dovuto verificare, da un punto di vista numerico, nell'ambito del numero di cicli necessari al modello numerico per raggiungere la condizione di convergenza della soluzione a partire dalle condizioni iniziali imposte che, appunto, sono quelle, come più volte richiamato, presenti in sito nel Gennaio 1995.

Il numero di cicli preso in considerazione è quello dimostratosi necessario per raggiungere la condizione di convergenza della soluzione nel caso di assenza dell'effetto di trascinamento, pari a 400000, con la riserva di variare tale numero di cicli qualora non si fosse dimostrato sufficiente per l'ottenimento dell'equilibrio e della congruenza all'atto dell'applicazione dell'effetto di trascinamento stesso, cosa, non verificatasi.

Per implementare questo effetto nell'ambito del modello numerico realizzato, si è utilizzando il linguaggio di programmazione interno del FLAC, ovvero il FISH, e si è, definita una funzione che, in corrispondenza di ogni ciclo di calcolo inducesse al modello una condizione al contorno corrispondente ad uno spostamento in direzione orizzontale di tutti i vincoli di piede simultaneamente, pari allo spostamento totale stimato (0.60 metri) rapportato al numero di cicli (400000). Procedendo in questo modo si simulare l'effetto del trascinamento ipotizzandolo continuo e costante per tutto l'elaborazione come se questo fosse stato continuo e costante per tutto il periodo Gennaio 1995-Dicembre 1995.

In particolare l'istruzione utilizzata nel codice di calcolo FLAC per attuare lo spostamento dei nodi appartenenti al contorno di valle in direzione orizzontale senza modificare le condizioni di vincolo ivi presenti è l'istruzione *Ini Xdis*

Valore i,j .

L'istruzione specificata, opportunamente reiterata per mezzo della specifica funzione predisposta, consente, nel corso della calcolazione ed in corrispondenza di ogni ciclo di calcolo, di applicare ad un particolare nodo della griglia di discretizzazione, individuato mediante la sua posizione in termini di riga e colonna (i,j), uno spostamento la cui entità è indicata da *Valore* in direzione x (*Xdisp*).

6.2 - Processo di calcolo e grandezze indagate

L'analisi numerica del comportamento del pendio Vadoncello, come premesso al precedente Paragrafo 6.1, ha lo scopo di inquadrare il comportamento deformativo del pendio da un punto di vista principalmente qualitativo, nell'ambito di un confronto tra risultati dell'elaborazione numerica e l'interpretazione del comportamento dedotta dall'analisi dei dati di indagine e di monitoraggio in sito (Capitolo 3).

Si ritiene utile precisare che la modellazione numerica condotta riguarda una particolare configurazione morfologica riferita ad un preciso momento (Gennaio 1995) della storia evolutiva del pendio stesso. Allo stesso tempo, però, il processo di calcolo è tale da simulare interamente la storia tensionale e deformativa del pendio fino dalla sua formazione. Questa incongruenza fa sì che i risultati possano aiutare solo a definire i meccanismi deformativi generali allo scopo di servire da supporto nella valutazione di effetti provocati da variazioni, ad esempio, nelle condizioni di carico.

In tale ottica le grandezze indagate nel corso della modellazione sono essenzialmente gli spostamenti dei nodi della griglia di discretizzazione. Per ciascun nodo, infatti, il codice di calcolo FLAC calcola, ad ogni ciclo di calcolo, le componenti di spostamento in direzione orizzontale e verticale e, quindi, fornisce la direzione, il verso ed il modulo dello spostamento stesso.

Il calcolo degli spostamenti è stato utilizzato sia per generare una rappresentazione vettoriale del processo deformativo, sia per individuare zone del modello caratterizzate da valori simili di spostamenti che, quindi, configurino porzioni di pendio coinvolte in un livello di deformazione e di evoluzione morfologica simile.

La rappresentazione grafica dei vettori spostamento è stata generata, per ciascuna simulazione effettuata, con riferimento all'intero pendio in Figura 4.22. Allo scopo è stata utilizzata la capacità di rappresentazione grafica propria del FLAC mediante il comando *Plot Disp*.

Come accennato in precedenza, i moduli dei vettori spostamento sono stati

trattati numericamente per mezzo di una funzione appositamente definita utilizzando il linguaggio di programmazione FISH al fine di distinguere le zone di pendio cui afferiscono moduli di spostamento interni a quattro intervalli. Ciascuno di detti intervalli ha ampiezza pari a metà dell'ordine di grandezza degli spostamenti stessi.

Questa suddivisione del pendio in regioni contraddistinte da valori di spostamenti appartenenti allo stesso intervallo ha avuto lo scopo di analizzare ed interpretare gli spostamenti ed i corrispondenti meccanismi di deformazione nelle diverse zone del pendio.

Per ragioni meramente numeriche è stato, inoltre, tenuto sotto controllo l'evolversi, con il susseguirsi dei cicli di calcolo, di una grandezza rappresentativa dello stato di convergenza della modellazione stessa ovvero la massima forza sbilanciata.

Il primo processo di calcolo è stato svolto con un modello numerico in cui si simula una condizione di totale saturazione dei terreni presenti nel pendio in assenza di sovrappressioni interstiziali. È stato durante questa fase che, vista la necessità di rendere più rapido il processo di calcolo, si è ridotta l'altezza della griglia di discretizzazione una volta verificato che a profondità superiori a 60-70 metri non si manifestavano deformazioni significative.

Una volta ottimizzati questi aspetti essenzialmente numerici dell'analisi si è passati alla simulazione di casi più prossimi al reale, introducendo, come riportato nei precedenti Paragrafi 6.1.5 e 6.1.6, dapprima i due livelli di falda e, dopo, l'effetto di trascinamento al piede.

È bene osservare come tutte le simulazioni effettuate si sono svolte in due fasi. Nel corso della prima fase, si sono implementate tutte le proprietà fisiche e meccaniche dei diversi materiali così come definite nel precedente Paragrafo 6.1.4, ad eccezione della coesione c' , dato che il modello è stato portato all'equilibrio con valori particolarmente elevati di c' , circa 100 volte maggiori dei valori riportati nel Paragrafo 4.4 e riassunti nella Tabella 4.07. Lo scopo di questa procedura di calcolo è propria del metodo di calcolo esplicito implementato nel FLAC. L'applicazione dell'accelerazione di gravità viene svolta con una singola

operazione (carico immediato) e da origine ad un processo di compattazione gravitativa, riprodotto, numericamente, in modo essenzialmente dinamico. Tale processo di compattazione segue le leggi del moto e non si arresta finché la velocità nei nodi non si riduce a zero. In un problema di stabilità di pendii, quale quello affrontato, è essenziale che questo processo duri il meno possibile e che non provochi l'accumularsi di deformazioni plastiche. Assumere valori molto elevati per la coesione intercetta c' equivale ad imporre al materiale un comportamento elastico per tutta questa fase, con il duplice vantaggio di accelerare il processo di consolidazione ed evitare l'accumularsi di deformazioni plastiche. Una volta raggiunto l'equilibrio è possibile passare alla seconda fase, durante la quale il modello, ormai sottoposto ad uno stato di carico rappresentato dalle tensioni di consolidazione nell'ipotesi di comportamento puramente elastico, subisce una riduzione della coesione intercetta c' ai valori reali scelti come mostrato in Figura 4.22 ed in Tabella 4.07. Gli spostamenti ottenuti in fase di consolidazione elastica sono annullati nel calcolo degli spostamenti finale, cosicché questi ultimi sono da attribuirsi al ridistribuirsi nella maglia dello stato tenso-deformativo, in campo elasto-plastico, al diminuire della coesione c' .

Durante la prima fase di consolidazione elastica, risultando il sistema fortemente non in equilibrio, le deformazioni calcolate e, quindi, gli spostamenti nodali, possono avere oscillazioni anche ampie; qualora il periodo di tali oscillazioni coincidesse con il minimo periodo di oscillazione del sistema definito al precedente Paragrafo 5.4.4, potrebbe verificarsi, a livello numerico, una condizione simile alla condizione fisica di risonanza che porterebbe alla determinazione di spostamenti e deformazioni molto elevate recuperabili integralmente, all'avvicinarsi dell'equilibrio, solo se il comportamento dei materiali è elastico.

Durante la seconda fase, la riduzione della coesione intercetta c' al suo valore reale viene avvertita dal sistema in conseguenza all'annullamento delle deformazioni elastiche che, comportando uno sbilanciamento tensionale, riattiva il ciclo di calcolo definito graficamente in Figura 5.01.

È proprio in concomitanza con l'avvio della seconda fase di calcolo durante la

quale si abbatte il valore della coesione intercetta c' che, provocandosi nel modello numerico uno sbilanciamento repentino, si destano deformazioni anche plastiche non corrispondenti esattamente alla realtà. Tali deformazioni, particolarmente presenti ed evidenti a profondità elevate, di entità di qualche decimetro, verranno, nel Capitolo seguente costantemente trattate come errore numerico.

CAPITOLO 6

FIGURE E TABELLE

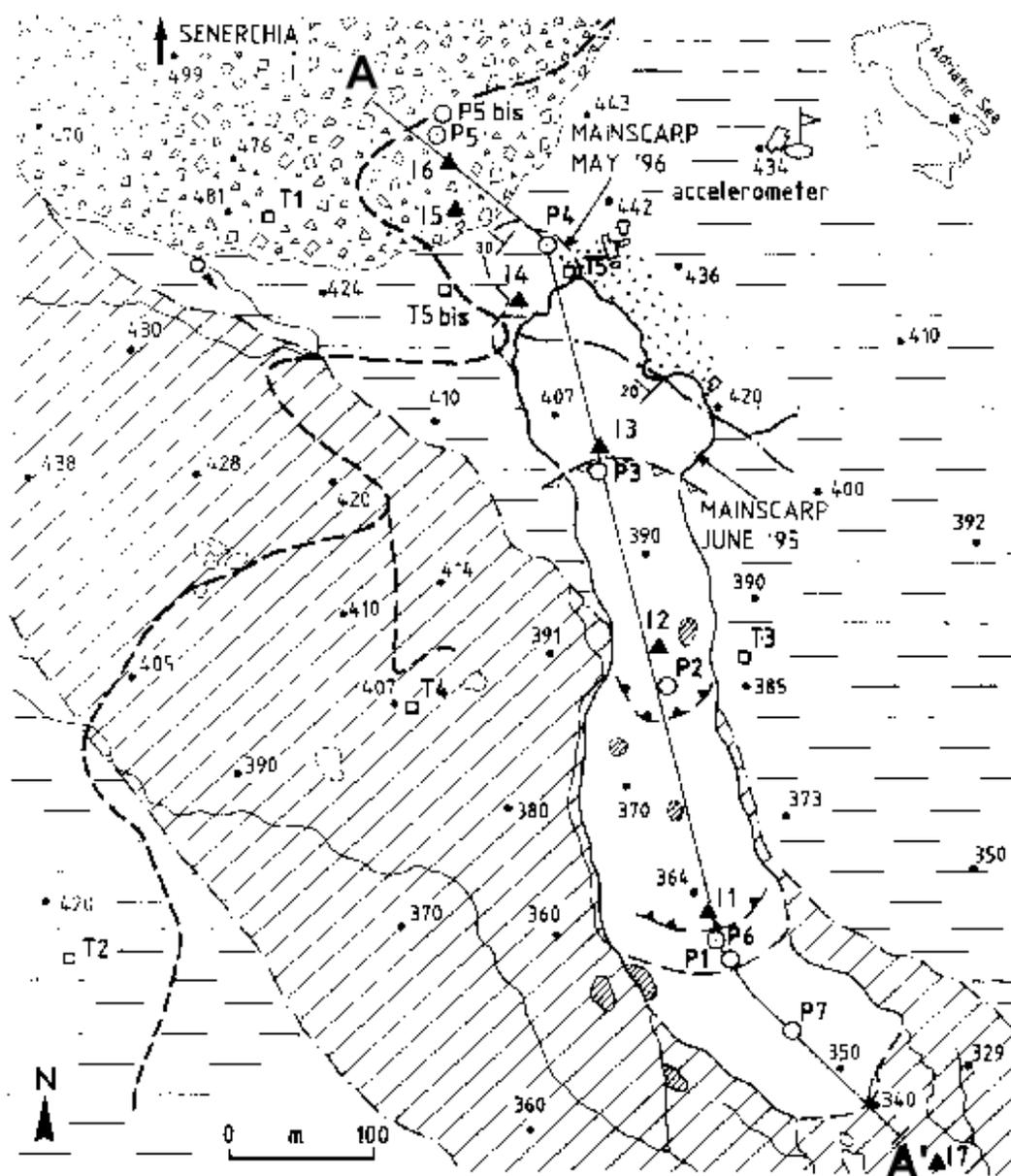


Figura 6.01 - Sezione A-A' del pendio Vadoncello modellata numericamente

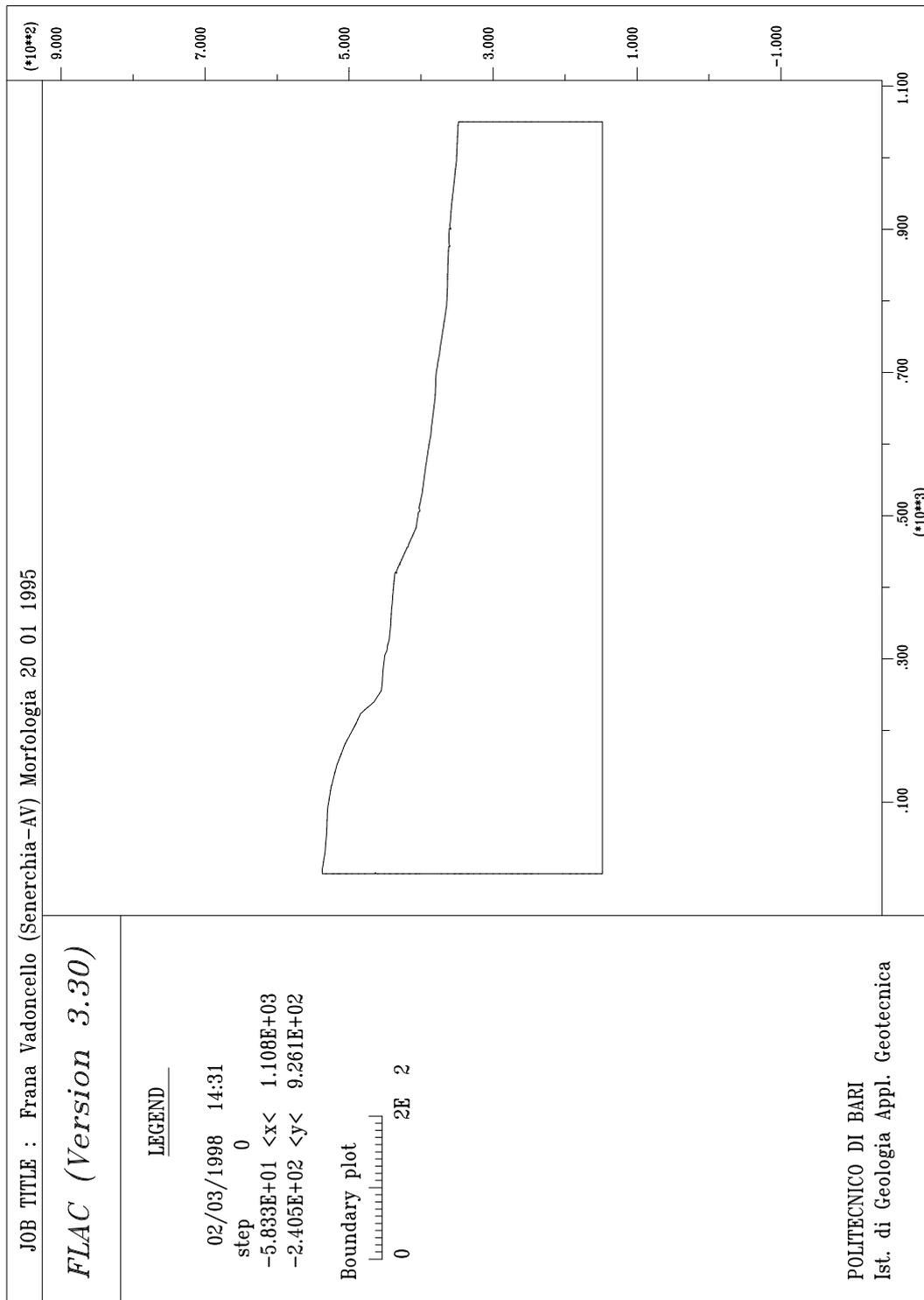


Figura 6.02 - Contorno della griglia di discretizzazione - Altezza totale

(Unità di misura adottate: Ordinate: m; Ascisse: m)

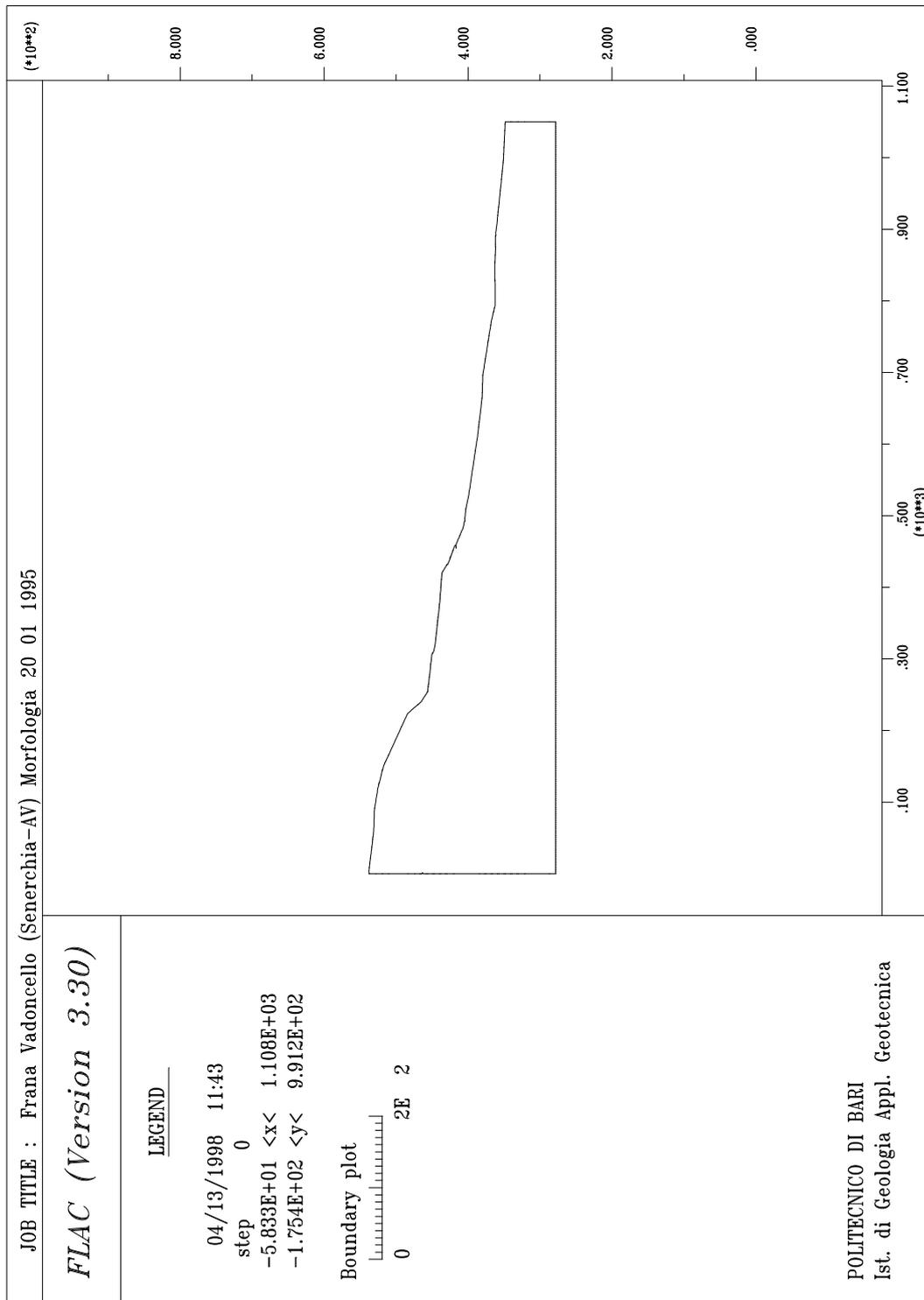


Figura 6.03 - Contorno della griglia di discretizzazione - Altezza ridotta

(Unità di misura adottate: Ordinate: m; Ascisse: m)

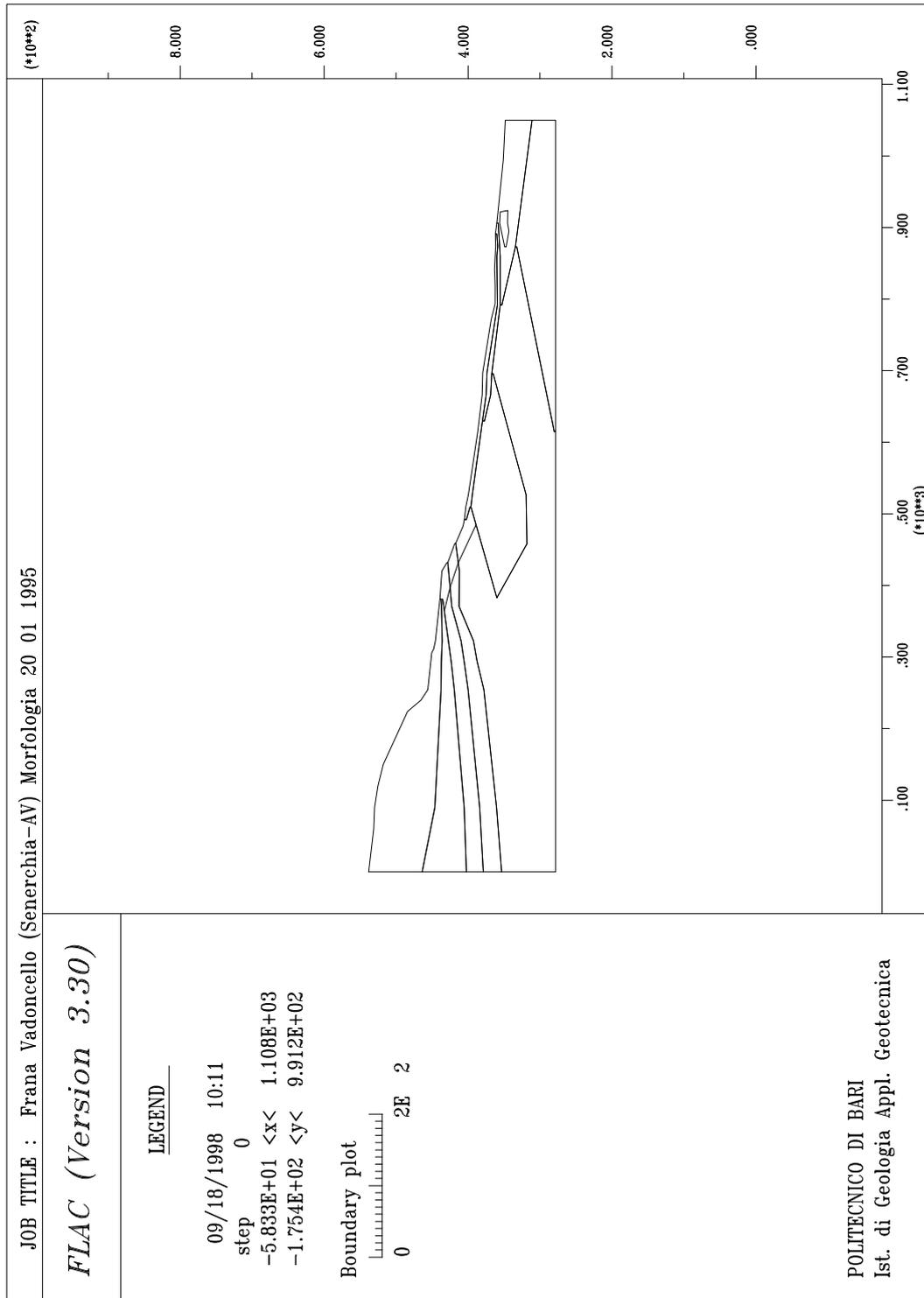
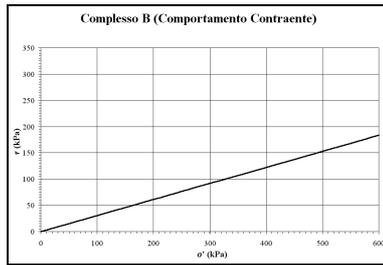
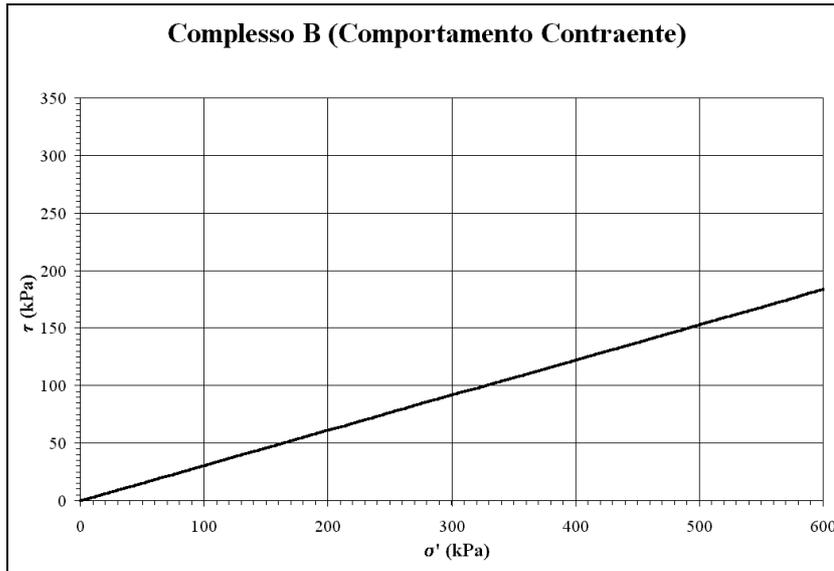


Figura 6.04 - Suddivisione in regioni della griglia di discretizzazione

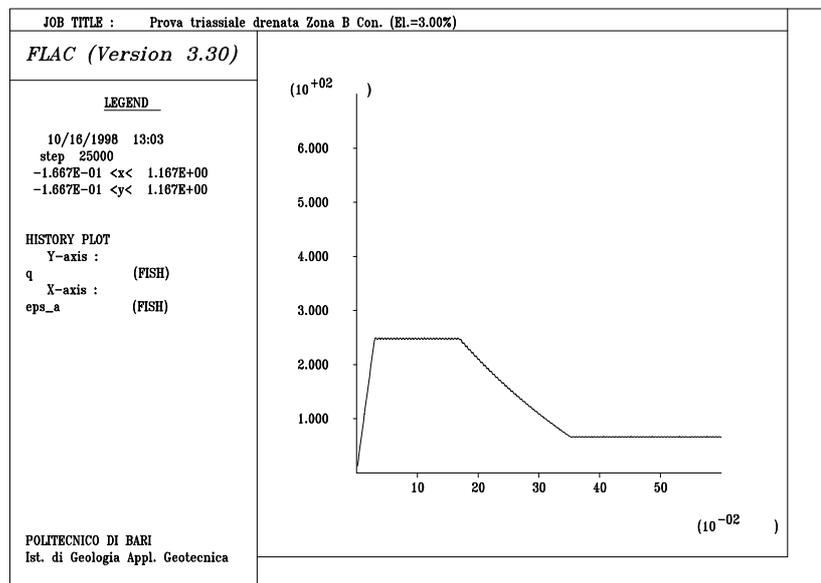
(Unità di misura adottate: Ordinate: m; Ascisse: m)



A - Andamento angolo di resistenza a taglio con la deformazione plastica di taglio

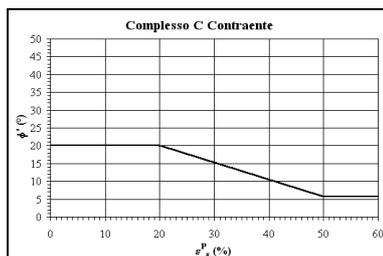


B - Involuppo di rottura nel piano Mohr-Coulomb

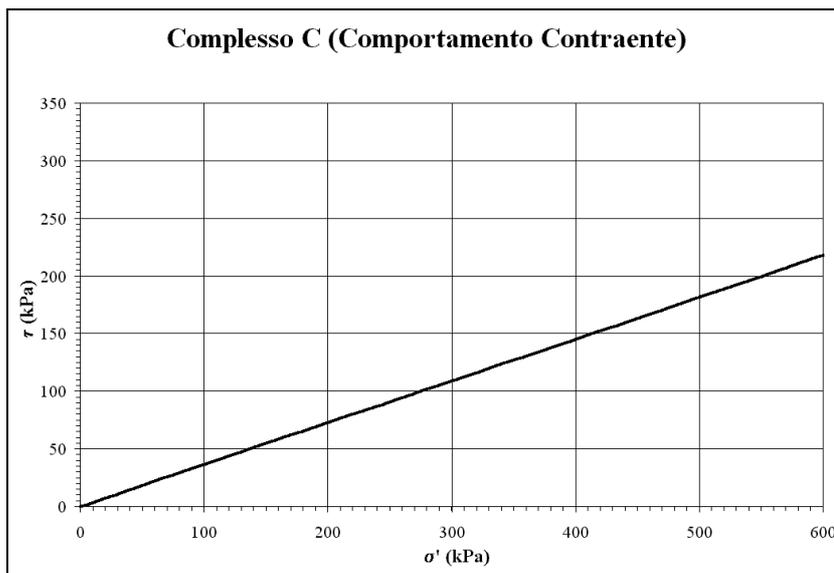


C - Simulazione numerica di una prova triassiale drenata
(Unità di misura adottate: Ordinate: kPa; Ascisse: numero puro (%))

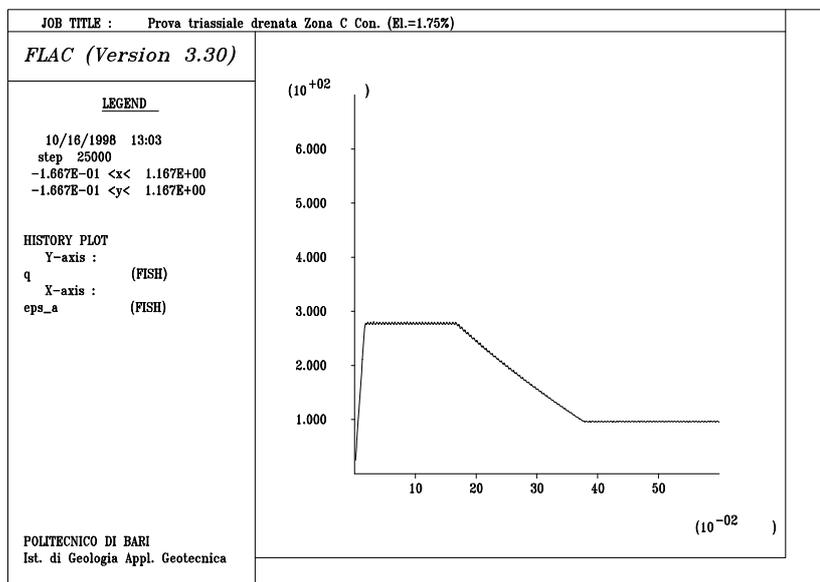
Figura 6.05 - Caratterizzazione meccanica materiale Complesso B (Contraente)



A - Andamento angolo di resistenza a taglio con la deformazione plastica di taglio

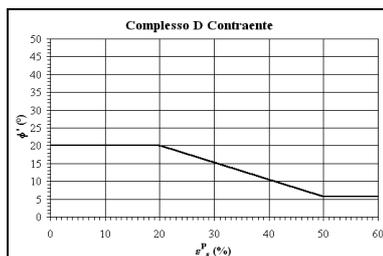


B - Inviluppo di rottura nel piano Mohr-Coulomb

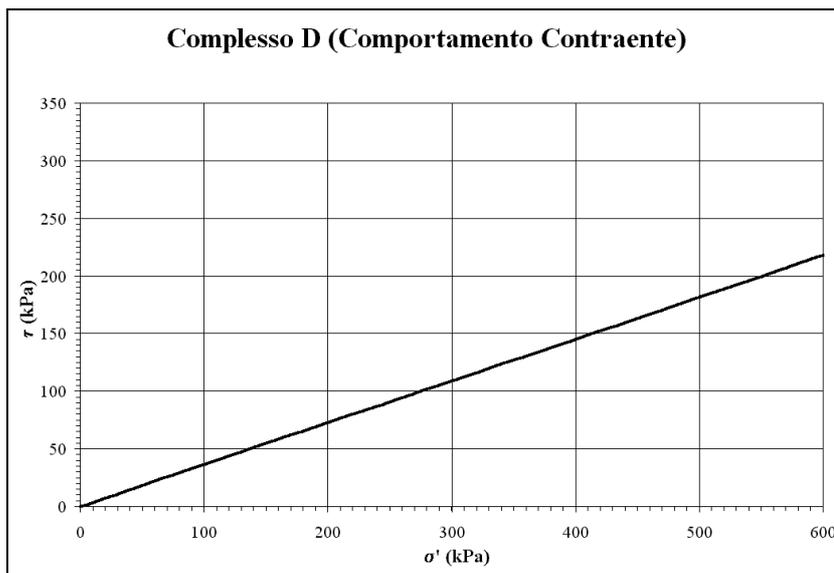


C - Simulazione numerica di una prova triassiale drenata
 (Unità di misura adottate: Ordinate: kPa; Ascisse: numero puro (%))

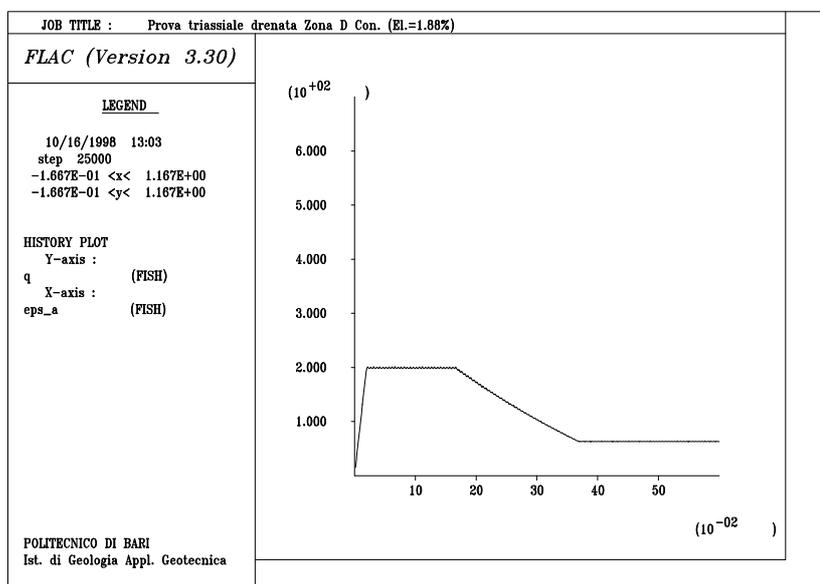
Figura 6.06 - Caratterizzazione meccanica materiale Complesso C (Contraente)



A - Andamento angolo di resistenza a taglio con la deformazione plastica di taglio

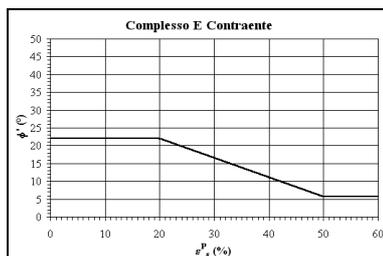


B - Inviluppo di rottura nel piano Mohr-Coulomb

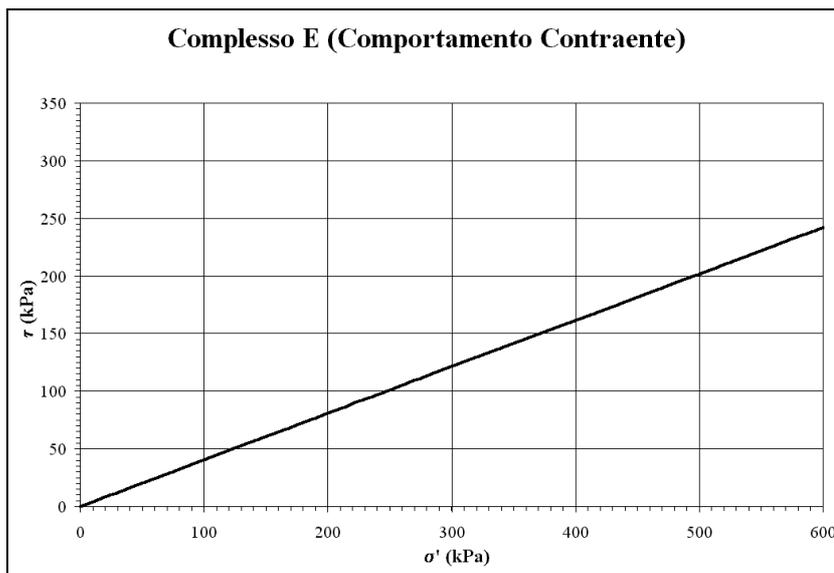


C - Simulazione numerica di una prova triassiale drenata
(Unità di misura adottate: Ordinate: kPa; Ascisse: numero puro (%))

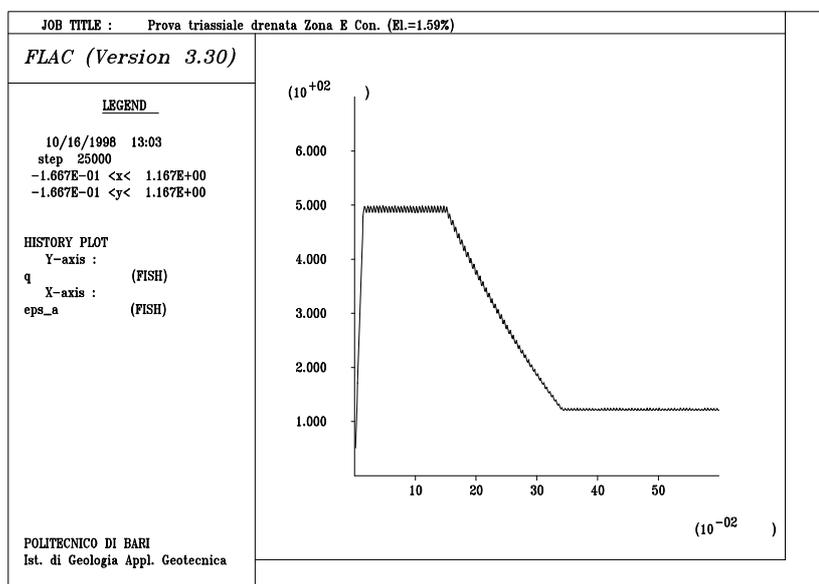
Figura 6.07 - Caratterizzazione meccanica materiale Complesso D (Contraente)



A - Andamento angolo di resistenza a taglio con la deformazione plastica di taglio

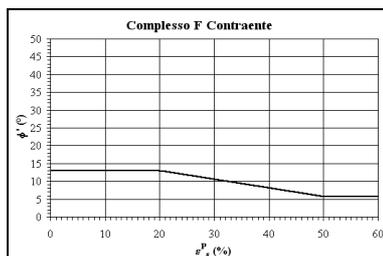


B - Inviluppo di rottura nel piano Mohr-Coulomb

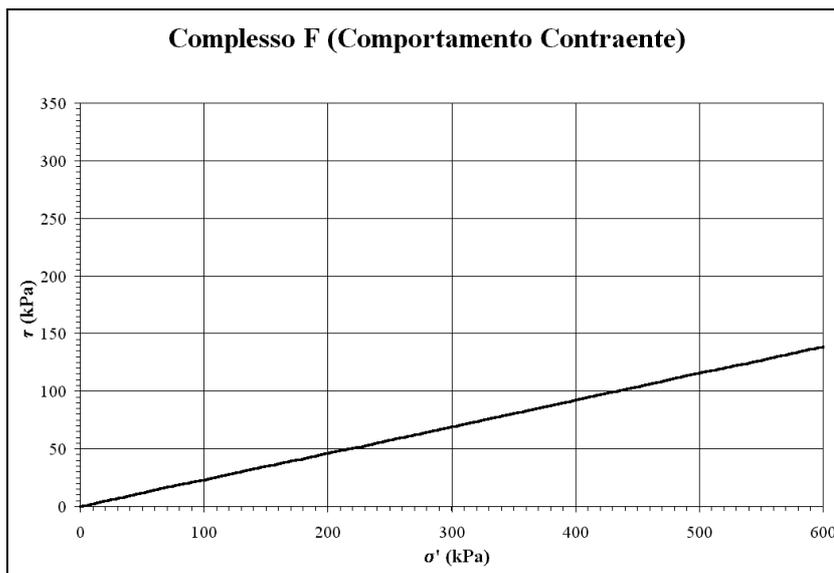


C - Simulazione numerica di una prova triassiale drenata
(Unità di misura adottate: Ordinate: kPa; Ascisse: numero puro (%))

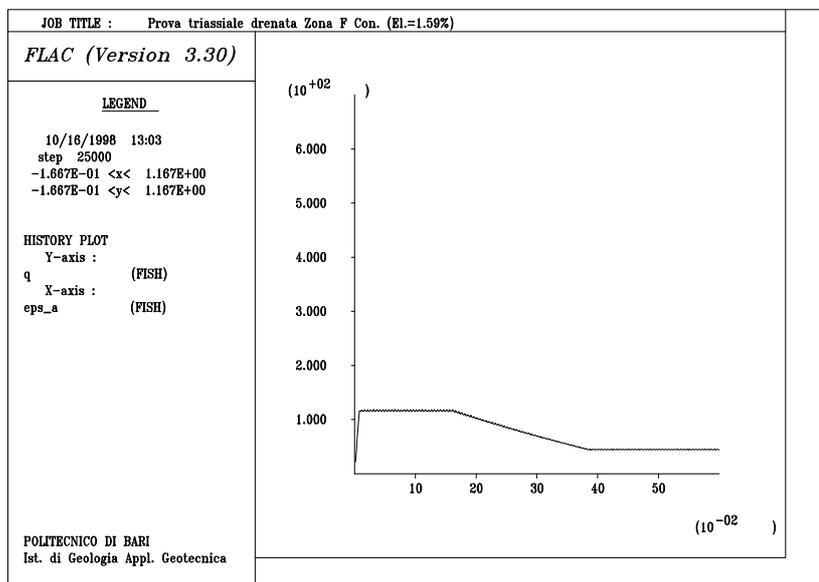
Figura 6.08 - Caratterizzazione meccanica materiale Complesso E (Contraente)



A - Andamento angolo di resistenza a taglio con la deformazione plastica di taglio

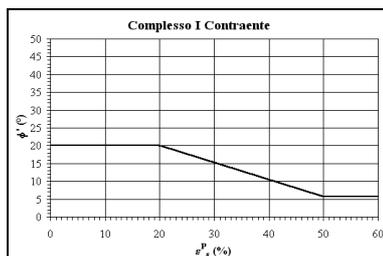


B - Inviluppo di rottura nel piano Mohr-Coulomb

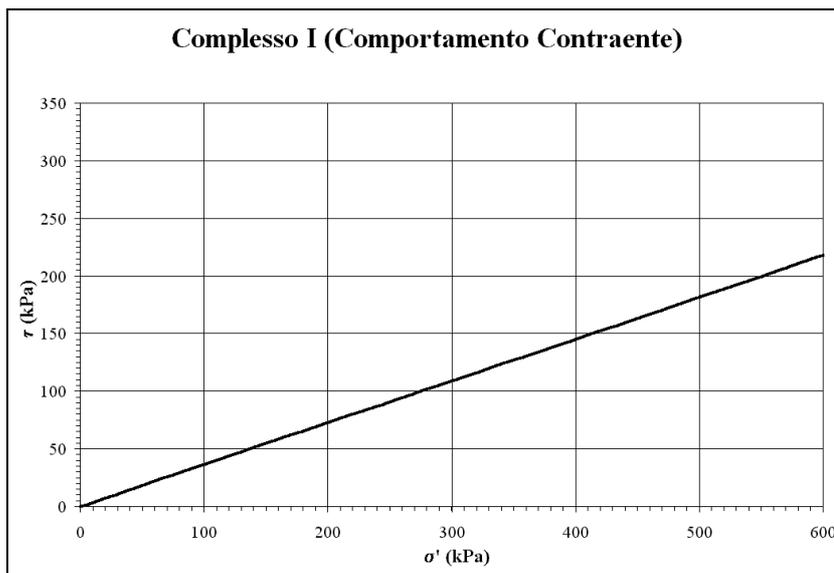


C - Simulazione numerica di una prova triassiale drenata
(Unità di misura adottate: Ordinate: kPa; Ascisse: numero puro (%))

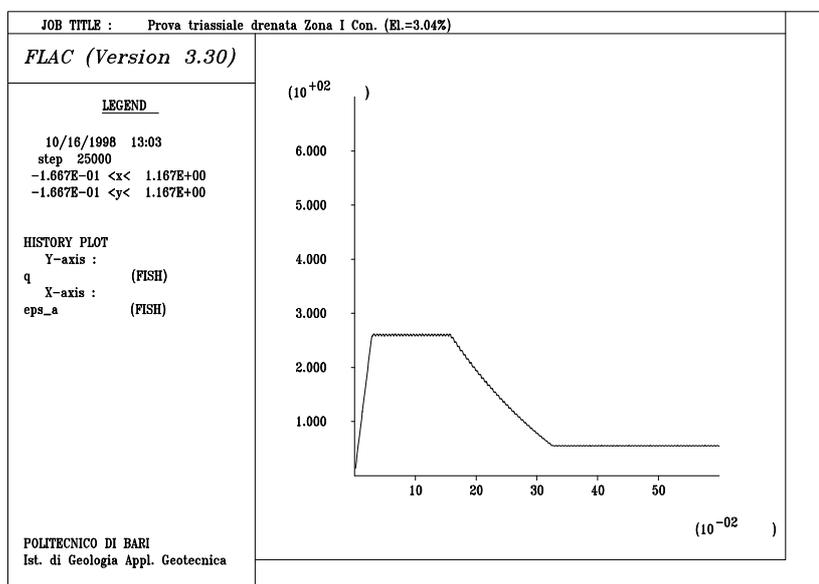
Figura 6.09 - Caratterizzazione meccanica materiale Complesso F (Contraente)



A - Andamento angolo di resistenza a taglio con la deformazione plastica di taglio

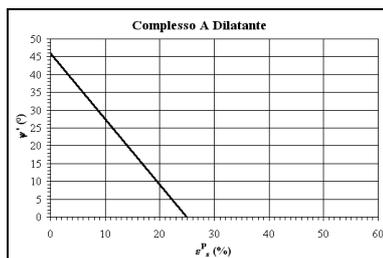


B - Inviluppo di rottura nel piano Mohr-Coulomb

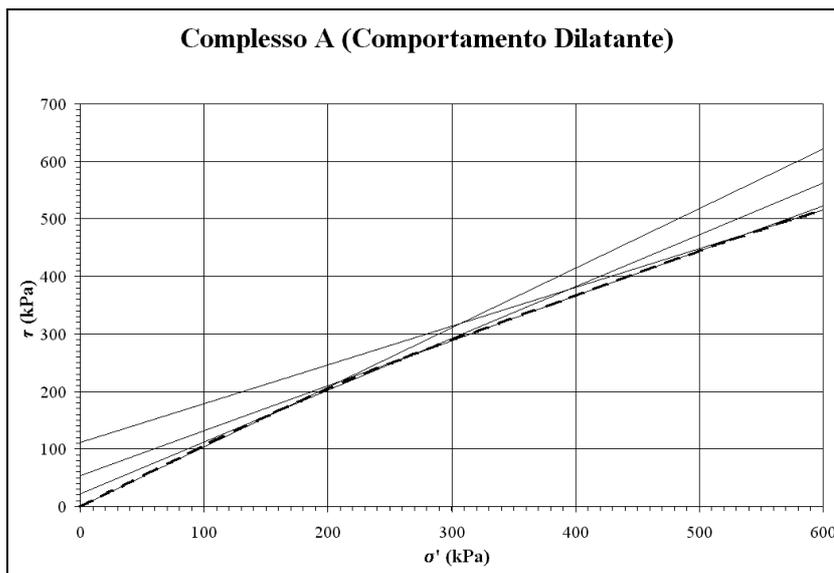


C - Simulazione numerica di una prova triassiale drenata
(Unità di misura adottate: Ordinate: kPa; Ascisse: numero puro (%))

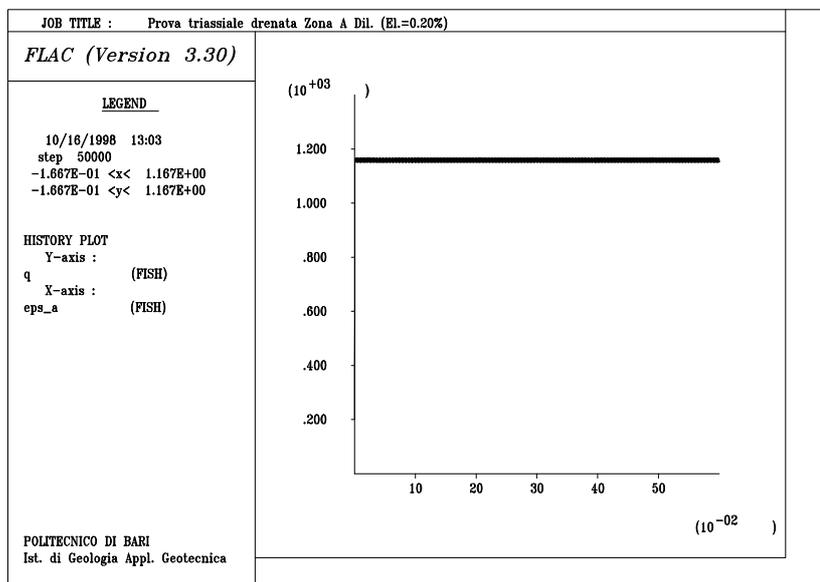
Figura 6.10 - Caratterizzazione meccanica materiale Complesso I (Contraente)



A - Andamento angolo di dilatanza con la deformazione plastica di taglio

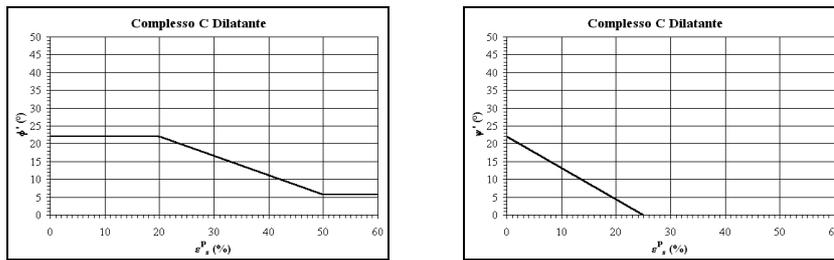


B - Inviluppo di rottura nel piano Mohr-Coulomb

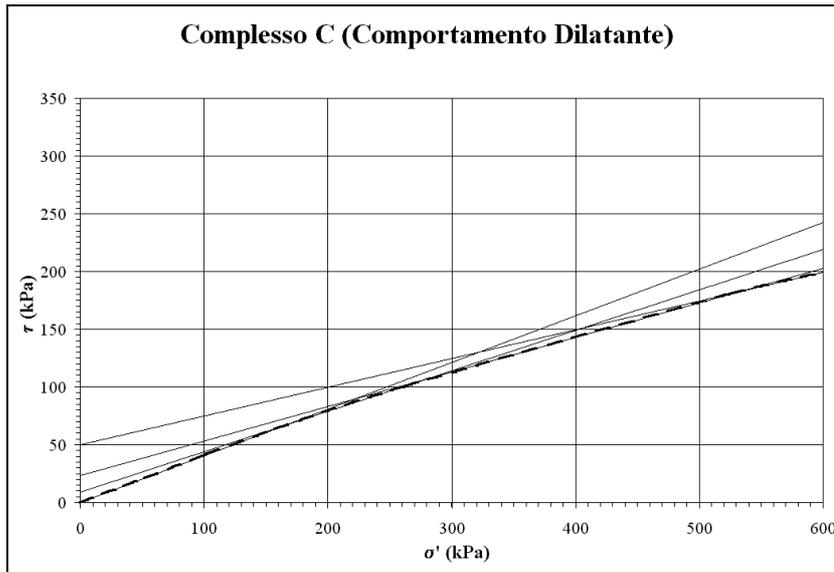


C - Simulazione numerica di una prova triassiale drenata
 (Unità di misura adottate: Ordinate: kPa; Ascisse: numero puro (%))

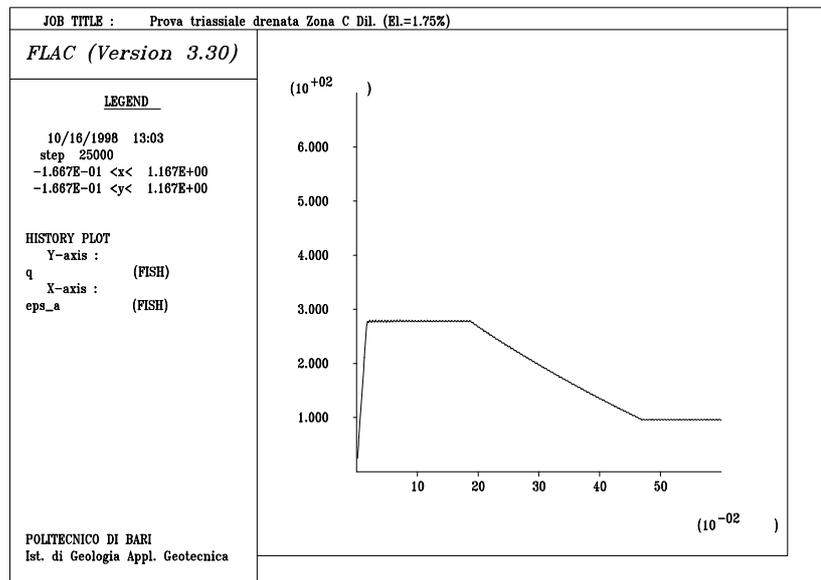
Figura 6.11 - Caratterizzazione meccanica materiale Complesso A (Dilatante)



A - Andamento angolo di resistenza a taglio e di dilatanza con la deformazione plastica di taglio

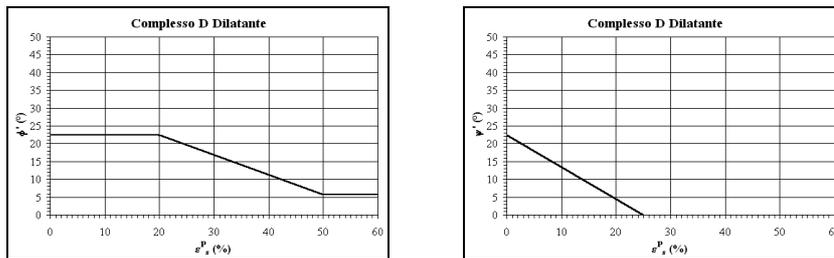


B - Involuppo di rottura nel piano Mohr-Coulomb

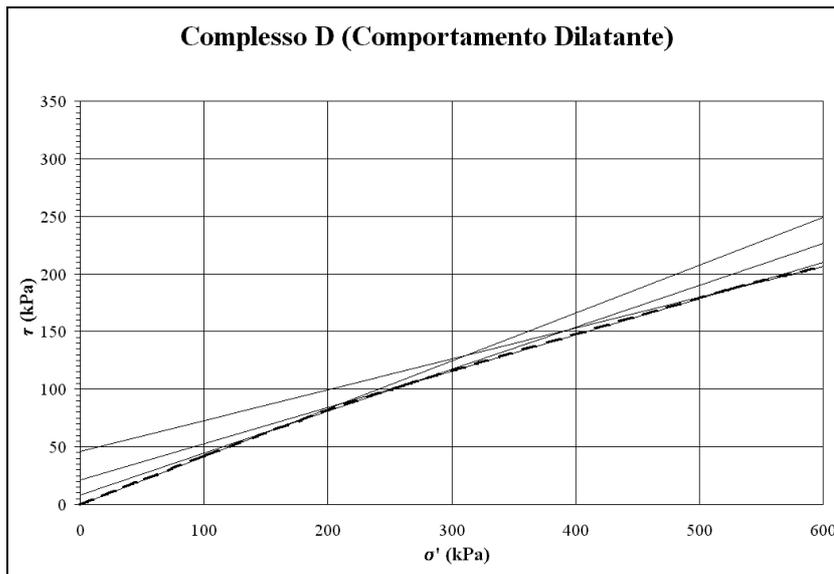


C - Simulazione numerica di una prova triassiale drenata
 (Unità di misura adottate: Ordinate: kPa; Ascisse: numero puro (%))

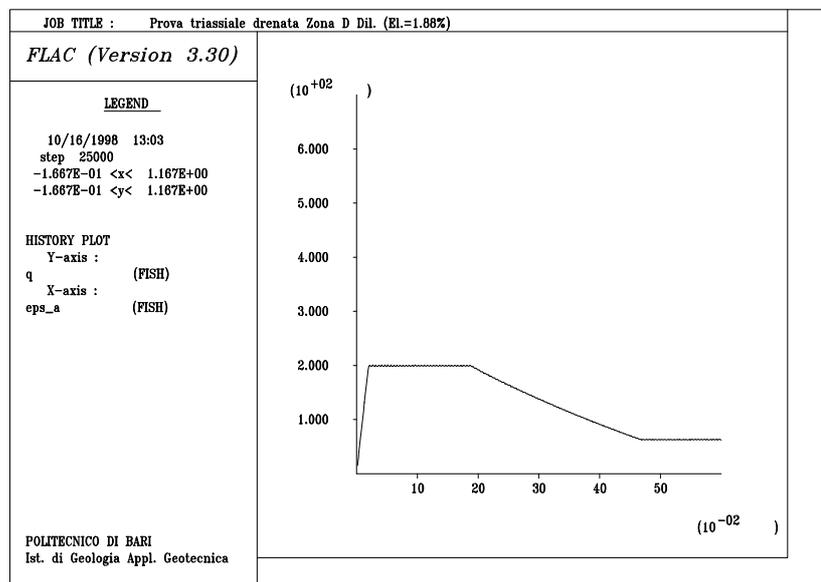
Figura 6.12 - Caratterizzazione meccanica materiale Complesso C (Dilatante)



A - Andamento angolo di resistenza a taglio e di dilatanza con la deformazione plastica di taglio

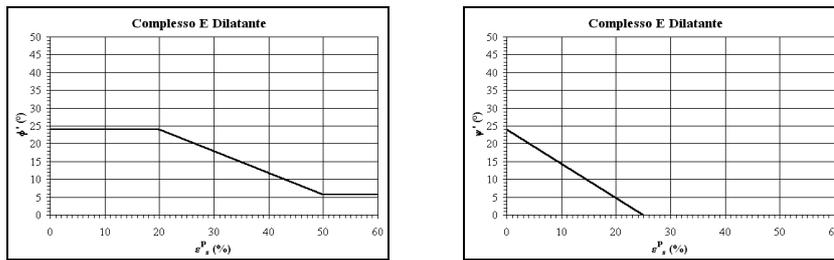


B - Involuppo di rottura nel piano Mohr-Coulomb

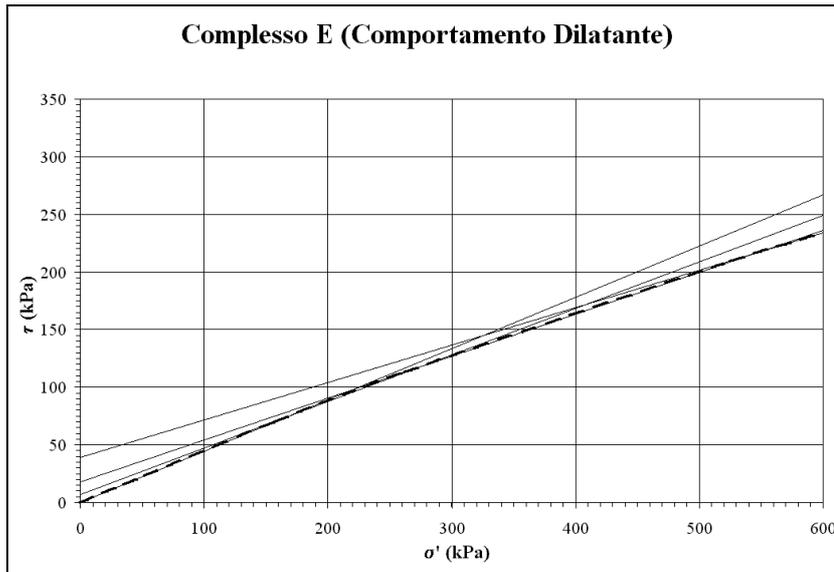


C - Simulazione numerica di una prova triassiale drenata
 (Unità di misura adottate: Ordinate: kPa; Ascisse: numero puro (%))

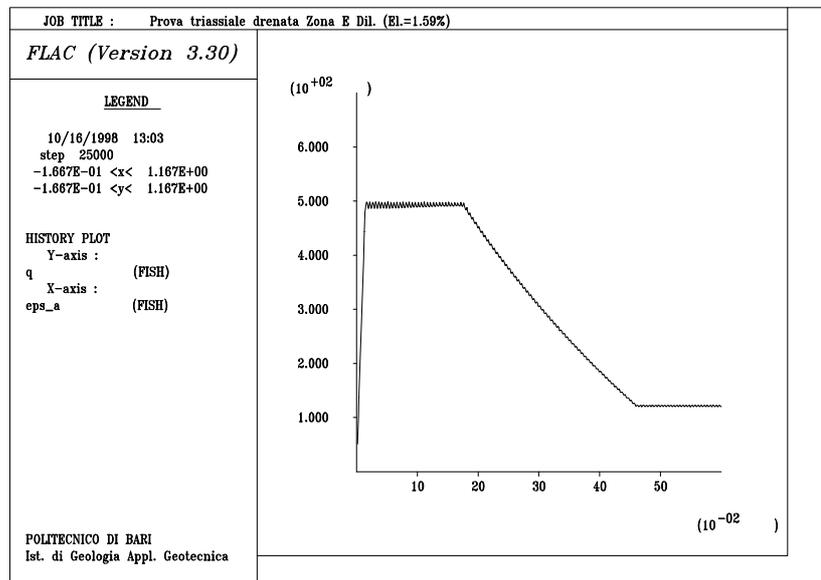
Figura 6.13 - Caratterizzazione meccanica materiale Complesso D (Dilatante)



A - Andamento angolo di resistenza a taglio e di dilatanza con la deformazione plastica di taglio

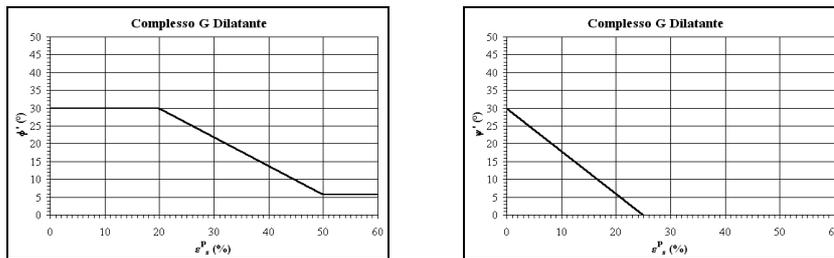


B - Involuppo di rottura nel piano Mohr-Coulomb

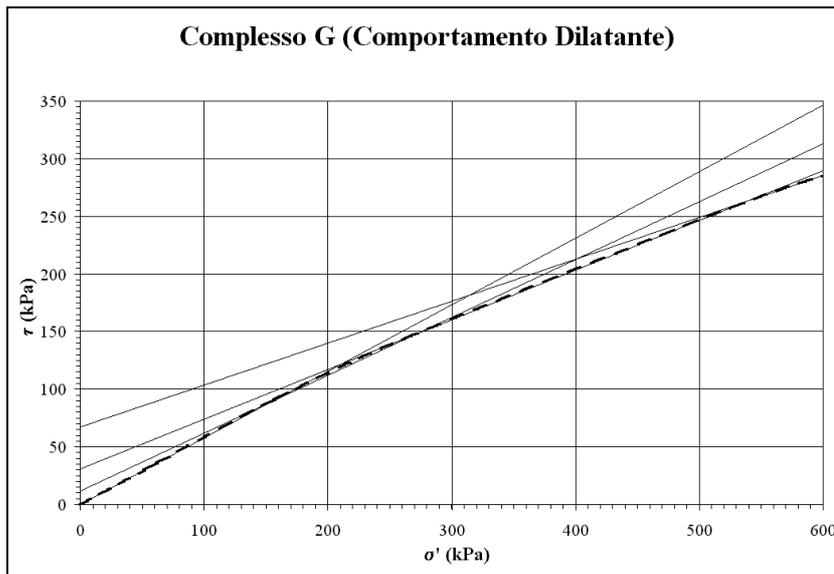


C - Simulazione numerica di una prova triassiale drenata
 (Unità di misura adottate: Ordinate: kPa; Ascisse: numero puro (%))

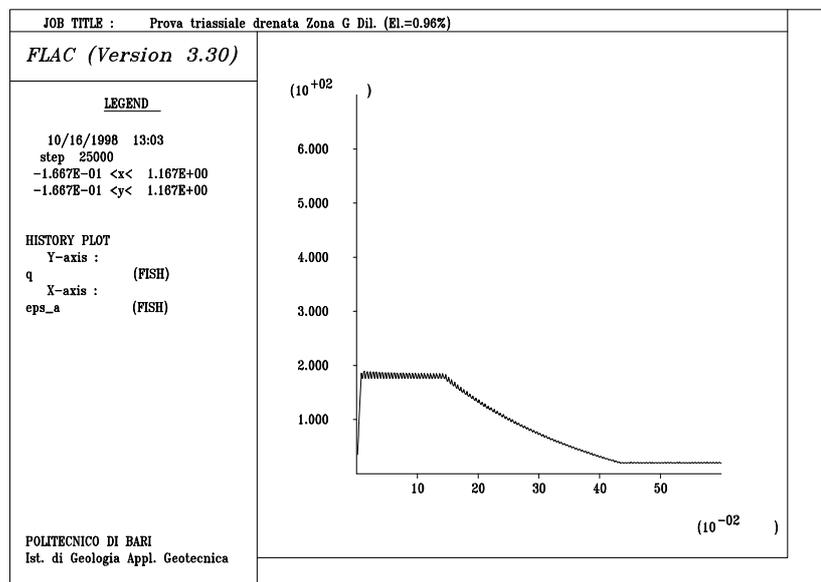
Figura 6.14 - Caratterizzazione meccanica materiale Complesso E (Dilatante)



A - Andamento angolo di resistenza a taglio e di dilatanza con la deformazione plastica di taglio

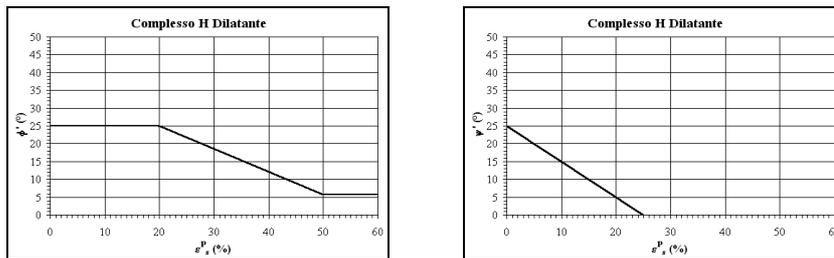


B - Involuppo di rottura nel piano Mohr-Coulomb

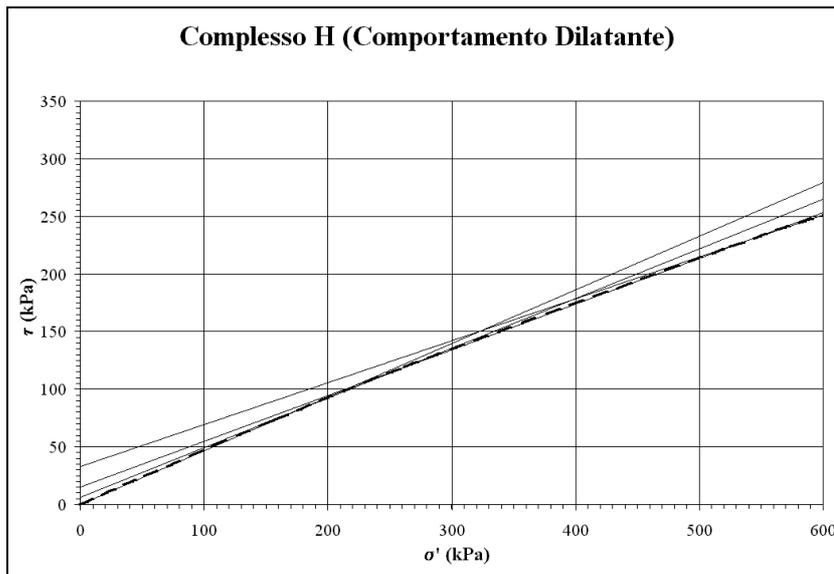


C - Simulazione numerica di una prova triassiale drenata
(Unità di misura adottate: Ordinate: kPa; Ascisse: numero puro (%))

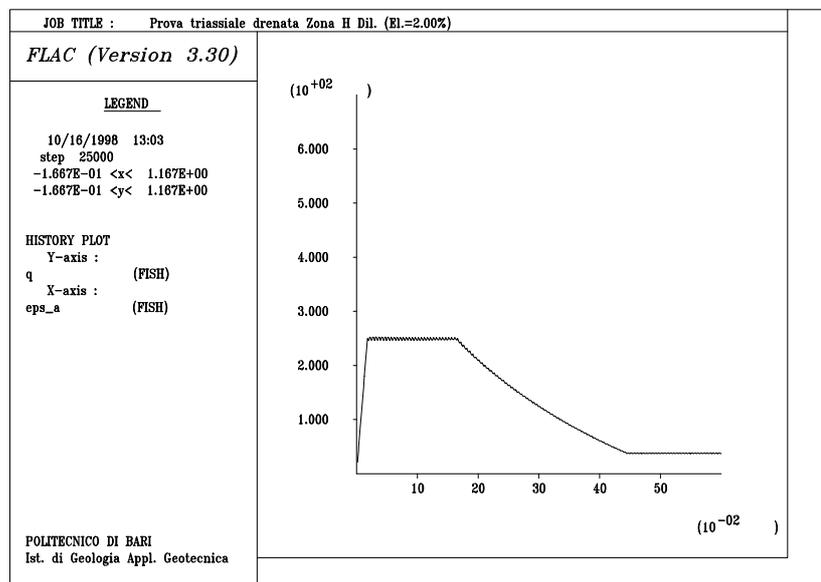
Figura 6.15 - Caratterizzazione meccanica materiale Complesso G (Dilatante)



A - Andamento angolo di resistenza a taglio e di dilatanza con la deformazione plastica di taglio



B - Involuppo di rottura nel piano Mohr-Coulomb



C - Simulazione numerica di una prova triassiale drenata
 (Unità di misura adottate: Ordinate: kPa; Ascisse: numero puro (%))

Figura 6.16 - Caratterizzazione meccanica materiale Complexo H (Dilatante)

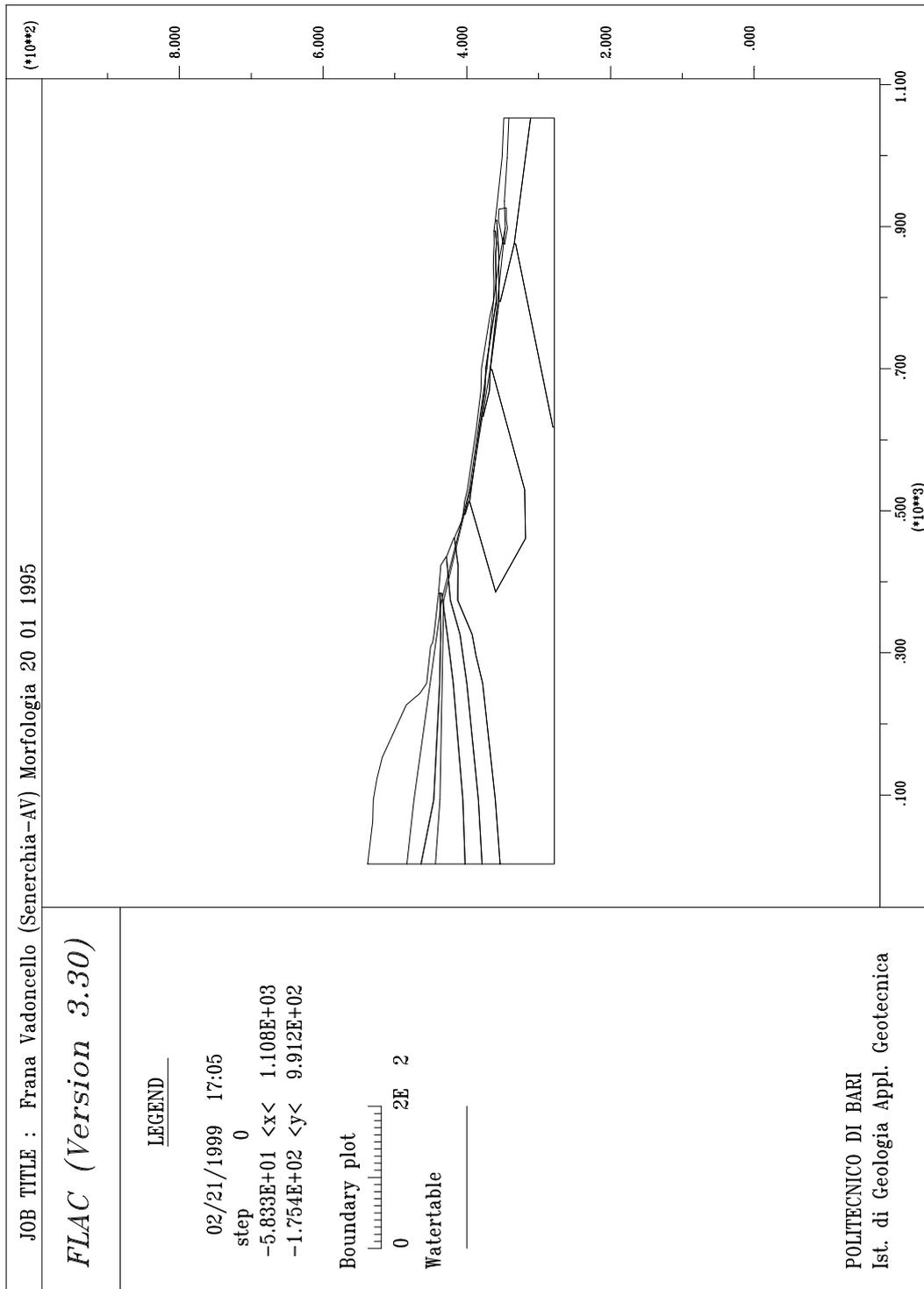


Figura 6.17 - Livelli di falda implementati nel modello numerico

(Unità di misura adottate: Ordinate: m; Ascisse: m)

CAPITOLO 7

RISULTATI DELLA MODELLAZIONE

7.1 - Introduzione

Nell'ambito del presente Capitolo si discuterà dei risultati delle modellazioni numeriche effettuate relativamente al pendio Vadoncello.

Come discusso nel precedente Capitolo 6, la modellazione numerica è stata svolta per stadi intendendo, con ciò, che i differenti fattori che possono avere influenza nel determinare il processo deformativo del pendio studiato sono stati aggiunti progressivamente nei successivi processi di calcolo. In particolare si analizzeranno le seguenti simulazioni numeriche effettuate:

1. modellazione in condizioni di pendio saturo;
2. modellazione in presenza di falde;
3. modellazione in presenza di falde e di trascinamento al piede.

Verranno inoltre discusse alcune modifiche applicate al modello numerico nel corso della prima modellazione effettuata e, relativamente alle condizioni al contorno proprie della seconda modellazione effettuata, si discuterà del confronto con i risultati rinvenuti dall'analisi del pendio Vadoncello con un metodo di calcolo globale.

Nel fornire la descrizione dei risultati delle diverse modellazioni condotte si farà riferimento alla posizione di alcuni sondaggi profondi (P1, P2, P3, P4, I1, I2, I3, I4) nonché ad alcuni punti morfologicamente significativi del pendio (inizio e fine scarpata) la cui posizione è riportata in Figura 7.01.

In Figura 7.02 viene riportata una legenda esplicativa del contenuto delle varie rappresentazioni grafiche prodotte con il FALC e relative alle differenti modellazioni condotte.

7.2 - Modellazione in condizioni di pendio saturo

Nell'ambito del presente Paragrafo si discuterà della modellazione condotta in condizioni di terreni saturi in tutto il pendio, ma assenza di falda e, quindi, con pressioni interstiziali nulle.

Il pendio, in questa fase, modellato in modo completo da un punto di vista stratigrafico e delle caratteristiche meccaniche dei materiali, ossia secondo la sezione geotecnica riportata in Figura 4.22, assumendo tutti i terreni coinvolti nella modellazione in condizioni di saturazione. In questa fase non è stata considerata la presenza di pressioni neutre imputabili alla presenza di falde acquifere e sono stati considerati i limiti verticali di monte e di valle della griglia di discretizzazione fissi in direzione orizzontale.

Il modello numerico adottato per il caso in esame è riportato in Figura 6.04.

7.2.1 - Analisi dei movimenti nel pendio

La porzione di pendio su cui si è soffermata l'attenzione nell'analisi dei risultati della modellazione, come riportato in Figura 7.03, si estende a partire da circa 20 metri a monte del sondaggio P4 (circa 70 metri a monte del limite della scarpata Gennaio 1995) fino a circa 50 metri a valle del sondaggio P1 (già in zona di interazione con la frana Serra dell'Acquara).

Nel caso considerato i risultati della modellazione numerica, nell'ambito del pendio, mostrano la presenza di tre regioni a spostamento circa uniforme, nei termini chiariti al precedente Paragrafo 6.2, e, quindi, contraddistinte da differenti valori dei moduli di spostamento che sono stati assunti come rappresentativi di ciascuna regione. Le predette regioni sono individuate, nella Figura 7.04, dalle lettere A, B e C . Viene trascurata una quarta regione in cui i moduli degli spostamenti calcolati, pari a circa 0.10 metri, sono ritenuti, nell'ottica di quanto chiarito nel precedente Paragrafo 6.2, nei limiti di errore della calcolazione condotta.

Nell'area A, ossia nell'ambito degli spostamenti più superficiali, aventi modulo

medio di circa 10 metri, si distinguono due meccanismi di movimento, configuranti due processi di rottura che, insieme, sembrano dare luogo ad una frana superficiale composta (Cruden D.M. e Varnes D.J.; 1996). Il primo processo di rottura, a monte, ha carattere essenzialmente rotazionale, l'altro, a valle, ha, invece, carattere di colata.

Il meccanismo superficiale a carattere rotazionale si estende essenzialmente a partire dalla scarpata principale del Gennaio 1995, con origine circa 15 metri a monte del sondaggio I4 proseguendo verso valle fino quasi a raggiungere il piede della scarpata stessa. L'estensione longitudinale di questo meccanismo di rottura è di circa 70 metri mentre la sua profondità massima, nonché il suo spessore massimo, è di circa 13 metri sulla verticale del limite a monte della scarpata Gennaio 1995. Il meccanismo è, quindi, definibile come scivolamento rotazionale.

Il secondo meccanismo superficiale, a carattere essenzialmente di colata, interessa la zona di canale immediatamente a valle della scarpata principale Gennaio 1995 e, prendendo origine in corrispondenza del piede dello scivolamento rotazionale, prosegue fino a circa 10 metri a valle del sondaggio P2 estendendosi per circa 240 metri. La massima profondità e, quindi, il massimo spessore, determinata per questa tipologia di movimento è di poco meno di 2 metri.

Gli spostamenti che si determinano nella regione B, aventi un modulo medio di circa 3 metri, configurano un processo di movimento a carattere essenzialmente rotazionale.

La regione B ha origine, con caratteristiche essenzialmente traslazionali, a monte della posizione in cui ha origine la precedente zona A, ovvero considerevolmente a monte del sondaggio P4, e prosegue, a partire da P4, con caratteristiche rotazionali, fino a circa 35 metri a monte del sondaggio I2, con una estensione longitudinale, quindi, maggiore di 280 metri. La massima profondità di questa regione è di circa 50 metri in corrispondenza del ciglio della scarpata principale Gennaio 1995, e ha uno spessore massimo di circa 40 metri, in corrispondenza circa del piede della scarpata stessa.

L'ultima regione di spostamenti individuata, la regione C, riguarda zone a

maggiori profondità ed è contraddistinta da un modulo medio di spostamento di circa 1.5 metri. Anche in questo caso, riguardati nel loro complesso, questi spostamenti definiscono un meccanismo di movimento essenzialmente rotazionale.

Questa regione di spostamenti profondi ha origine, analogamente a quanto osservato per la regione B con caratteristiche traslazionali, considerevolmente a monte del sondaggio P4. A partire dalla verticale per tale sondaggio, la regione, quindi, prosegue con andamento rotazionale sino a circa 15 metri a valle del sondaggio P2, per una estensione longitudinale maggiore di 360 metri. La massima profondità raggiunta da questa zona è di circa 100 metri in corrispondenza del ciglio della scarpata principale Gennaio 1995, e il suo massimo spessore è di circa 50 metri lungo una verticale posta circa 30 metri a valle del sondaggio P3.

La variazione da rotazionale a traslazionale osservabile nella porzione di monte delle due regioni B e C è, essenzialmente dovuto ad aver implementato, in questa parte del pendio, la presenza del breccione carbonatico che, con le sue caratteristiche di resistenza molto elevate, non consente di essere attraversato, ma solo lambito, dalle regioni di spostamento testé citate.

Nelle Figure 7.05 e 7.06 vengono riportati, rispettivamente, i vettori spostamento e i contorni delle regioni caratterizzate da moduli di spostamento assimilabili, per la zona di scarpata del Gennaio 1995. Queste Figure, quindi, rappresentano un ingrandimento parziale, in zona di monte, delle precedenti e già citate Figure 7.03 e 7.04.

Confrontando le Figure 7.03 e 7.04 rappresentative dell'andamento delle deformazioni nel pendio per il caso in esame con il modello geotecnico riportato in Figura 4.22, si nota come una parte del limite inferiore della regione di spostamenti più profonda, ovvero la regione C prima citata, e, in particolare, la porzione più a valle di essa, lambisca il contorno del "complesso F" del modello geotecnico assunto a base della modellazione e riportato nella citata Figura 4.14.

Considerate le scadenti caratteristiche di resistenza del "complesso F" (Figura 6.09), per fugare il dubbio che i risultati del calcolo fossero fortemente

condizionati dall'estensione di questo complesso, la cui profondità, d'altra parte, non è stata verificata in fase di indagine geognostica, è stato effettuato un ulteriore calcolo eliminando il "complesso F" e considerando la relativa regione quale parte integrante del circostante "complesso E", avente caratteristiche di resistenza superiori (Figura 6.08).

I risultati del calcolo, illustrati in Figura 7.07, dimostrano come, a parte un piccolo arretramento verso monte del piede della regione C, di circa 10 metri, l'andamento in profondità delle tre regioni A, B e C, rimane pressoché immutato, cosa, questa, significativa del fatto che la presenza del "complesso F" e, quindi, di materiali dalle caratteristiche meccaniche più scadenti, non condiziona a priori l'evolversi del fenomeno deformativo profondo.

7.3 - Modellazione in presenza di falde

Come accennato in introduzione al presente Capitolo, esaurita la prima fase di calcolazioni riguardante il caso di pendio in condizioni sature ma senza falde, il modello numerico è stato arricchito di un nuovo fattore ritenuto determinante nella evoluzione del processo deformativo del pendio stesso ossia la presenza di due falde, una profonda e l'altra superficiale sospesa, con il conseguente instaurarsi di una distribuzione di pressioni interstiziali non nulle nell'ambito del pendio stesso.

I due livelli di falda, implementati con le modalità descritte nel precedente Paragrafo 6.1.5, sono ritenuti essere rappresentativi del regime idrogeologico cui, come illustrato nel precedente Paragrafo 2.2, risultano sottoposte le aree di pendio in esame.

La definizione numerica del pendio da un punto di vista stratigrafico e delle caratteristiche dei materiali resta quella definita secondo la sezione geotecnica riportata in Figura 4.22, così come, per i limiti verticali di monte e di valle della griglia di discretizzazione, restano impediti gli spostamenti orizzontali.

Il modello numerico assunto a base delle calcolazioni che si sono condotte in questo caso è riportato in Figura 6.17.

7.3.1 - Analisi dei movimenti nel pendio

Anche nell'analisi dei risultati della modellazione per il caso in esame, come nel caso precedente, l'attenzione è stata posta alla porzione di pendio che ha origine considerevolmente a monte della scarpata Gennaio 1995 (circa 70 metri) fino, a valle, alla zona di interazione con la frana di Serra dell'Acquara. In particolare, come riportato in Figura 7.08, il punto di origine della porzione analizzata si colloca circa 20 metri a monte del sondaggio P4, mentre il punto finale è posizionato circa 50 metri a valle del sondaggio P1.

Anche in questo caso, sempre nell'accezione definita al precedente Paragrafo 6.2, i risultati della modellazione hanno permesso di distinguere, nell'ambito della

porzione di pendio analizzata, quattro regioni caratterizzate da spostamenti quasi uniformi che sono, quindi, state contraddistinte da differenti valori del modulo di spostamento, giudicato rappresentativi di ciascuna regione. Ancora una volta, però, come nel precedente caso esaminato, solo tre regioni sono state considerate coinvolte in un livello di deformazione significativo. La quarta regione, quella generalmente più profonda, non è stata considerata in quanto, come discusso nel Paragrafo 6.2, i moduli degli spostamenti calcolati sono stati considerati rientranti nel limite di errore del processo di calcolo, essendo risultati pari a circa 0.15 metri, e, quindi, estremamente piccoli. Le tre regioni significative sono riportate in Figura 7.09 contraddistinte dalle lettere A,B e C.

Nell'ambito della regione A, quella più superficiale, il valore medio dei moduli di spostamento è circa 14.5 metri. In questa regione si evidenziano, ancora una volta, due differenti meccanismi di deformazione che, rivisti come meccanismi di rottura e presi contemporaneamente in considerazione danno forma ad una frana, secondo la classificazione di Cruden D.M. e Varnes D.J. (1996), superficiale composta. I due processi di rottura hanno caratteri differenti nella porzione di monte rispetto a quella di valle risultando, rispettivamente, rotazionale e di colata.

Il meccanismo di tipo rotazionale interessa essenzialmente la zona della scarpata del Gennaio 1995, ha origine circa 30 metri a monte del sondaggio I4 e prosegue verso valle arrestandosi al piede della scarpata Gennaio 1995 stessa. Longitudinalmente questo meccanismo si estende per circa 90 metri con una profondità massima di circa 20 metri valutata al ciglio della scarpata Gennaio 1995. Il meccanismo, anche in questo caso, è quindi definibile di scivolamento rotazionale.

Il meccanismo di colata si manifesta nella zona di canale a valle della scarpata principale del Gennaio 1995, ha origine, appunto, proprio in corrispondenza del piede del meccanismo rotazionale estendendosi fino a circa 35 metri a monte del sondaggio I1 ovvero circa 120 metri a valle del sondaggio P2. L'estensione longitudinale di questa regione risulta di circa 350 metri, mentre la profondità media di questo tipo di movimento è di circa 2.5 metri lungo pressoché tutta la sua estensione, per raggiungere il valore massimo di 4.5 metri a circa 45 metri a

monte del sondaggio I2.

La successiva regione di spostamenti, la regione B, è contraddistinta da valori medi del modulo del vettore spostamento pari a circa 5 metri e si evidenzia, nel suo ambito, una tipologia di movimento tipicamente rotazionale sebbene, nella porzione più a monte si possa distinguere una zona a comportamento tendenzialmente traslazionale.

La regione B, a monte, ha origine ben oltre la posizione, indicabile come limite del comportamento traslazionale, assunta dal sondaggio P4 e prosegue sino a circa 10 metri a monte del sondaggio I2. L'estensione di questa regione è superiore ai 310 metri; la massima profondità valutata per essa in corrispondenza del ciglio della scarpata Gennaio 1995 è di circa 60 metri con uno spessore massimo, misurato al piede della stessa scarpata, di circa 45 metri.

La regione di spostamenti più profonda, la regione C, è caratterizzata ancora da un movimento di tipo rotazionale, con modulo medio di spostamento pari a circa 2.5 metri. L'origine di questa regione è sempre notevolmente più a monte del sondaggio P4, dove sembra ancora, in questo caso, configurarsi una tipologia di deformazione rotazionale, mentre il punto di termine è collocato a circa 40 metri a valle del sondaggio P2 per una estensione longitudinale complessiva che supera i 390 metri. La massima profondità raggiunta dalla zona in esame è di circa 100 metri in corrispondenza del ciglio della scarpata Gennaio 1995 ed il massimo del suo spessore si raggiunge in un punto posto circa 5 metri a monte del sondaggio P3 dove si raggiunge il valore di circa 40 metri.

Risultando, anche in questo caso di notevole rilevanza il comportamento deformativo in corrispondenza della zona della scarpata del Gennaio 1995, nella Figura 7.10 sono riportati i contorni delle regioni caratterizzate da moduli di spostamento assimilabili, con particolare riferimento, appunto, alla zona di scarpata Gennaio 1995 analogamente a quanto effettuato nella Figura 7.09 in relazione all'intero sviluppo del pendio.

7.3.2 - Confronto con risultati di analisi di stabilità all'equilibrio limite

In via preliminare, al fine di effettuare una valutazione di massima delle condizioni di stabilità globale del pendio Vadoncello e del ruolo giocato da alcuni fattori, quali il livello piezometrico ed il sisma, nell'innescare sia nell'accelerare i movimenti di pendio, si fa riferimento alle analisi della stabilità all'equilibrio limite svolte da Del Gaudio V. et al. (1999).

Le verifiche di stabilità sono state condotte utilizzando un codice di calcolo basato sul metodo di Janbu. Il metodo si basa sulla procedura generalizzata di suddivisione in strisce dell'ammasso di terreno e sulla definizione di uno stato nominale di equilibrio plastico, espresso dalla relazione $\tau = \tau_f / F$, nella quale τ è lo sforzo di taglio agente all'equilibrio, τ_f è la resistenza al taglio ed F è un fattore di sicurezza che rappresenta il grado di mobilitazione dei parametri di resistenza. In un'analisi rigorosa, occorrerebbe considerare due distinti valori per F , ovvero F_c ed F_ϕ , allo scopo di esprimere il possibile diverso grado di mobilitazione della componente coesiva e di quella attrittiva. Inoltre il fattore F dovrebbe essere considerato variabile lungo la superficie di rottura. Tuttavia, nell'analisi all'equilibrio limite del pendio Vadoncello, come generalmente è consuetudine per questa tipologia di analisi, è stata introdotta l'assunzione semplificativa $F = F_c = F_\phi = \text{Cost.}$. Il programma di calcolo utilizzato fornisce sia il classico fattore di sicurezza F_0 in condizione statiche, sia un fattore di sicurezza di tipo "pseudo-statico" F_s , ottenuto introducendo un'azione sismica con componenti orizzontale $S_h = K_h \cdot W$ e verticale $S_v = K_v \cdot W$, dove W è il peso della massa di terreno da analizzare, mentre K_h e K_v sono i coefficienti sismici rispettivamente orizzontale e verticale espressi in termini dell'accelerazione di gravità g . Il codice di calcolo utilizzato consente di calcolare anche l'accelerazione critica del pendio definita da Sarma S.K. (1973) come il minimo valore dell'accelerazione sismica orizzontale K_c necessario per portare l'ammasso instabile in condizioni di equilibrio limite, cioè $F_s = 1$.

Sul pendio Vadoncello, assumendo come sezione geologica quella proposta da

Wasowski J. (1995) e schematicamente riportata in Figura 7.11, le analisi di stabilità globale sono state condotte in forma parametrica, assumendo alcuni intervalli di variabilità per i parametri meccanici e piezometrici in gioco (Figura 7.11) e quantificandone gli effetti in termini di fattore di sicurezza medio lungo le superfici di rottura assunte.

Il profilo topografico assunto nell'analisi di stabilità globale qui discussa, riferito al Gennaio 1995, è lo stesso adottato nel corso della modellazione numerica alle differenze finite di cui al presente lavoro. Altresì, i parametri di resistenza (c' e ϕ') assunti per i materiali, non sono molto discordi da quelli adottati nella stessa modellazione numerica alle differenze finite.

Poiché, infatti, più corpi si muovono a diverse velocità nel pendio ed in esso non si ha chiara evidenza di un'unica superficie di rottura, si è proceduto esaminando indipendentemente i diversi possibili meccanismi roto-traslazionali ivi attivi che sono riportati in Figura 7.11. Per ognuno di essi Del Gaudio V. et al. (1999) calcolano il coefficiente di sicurezza F . Per quanto riguarda, in particolare, le condizioni piezometriche, si sono assunti tre diversi possibili livelli di falda ripetendo le analisi con diversi valori del rapporto di pressioni interstiziali R_u , corrispondenti a completa assenza di falda, falda a 7 metri di profondità dal piano campagna nella zona centrale del pendio e terreno sommerso con filtrazione parallela al piano campagna come riportato in Tabella 7.01.

Per quanto riguarda l'incidenza delle azioni sismiche sul pendio, si è calcolata l'accelerazione critica in ciascuna delle situazioni ipotizzate.

I risultati dell'analisi sono riportati nella Tabella 7.01. In particolare, la superficie 1 di Figura 7.11, relativa ad un movimento rotazionale di scarpata, è risultata instabile anche in assenza di falda ed azioni sismiche. La superficie 2 (Figura 7.11), che coinvolge un movimento rotazionale più esteso, mentre risulta stabile in assenza di falda nel pendio, raggiunge condizioni di instabilità, caratterizzate da un fattore di sicurezza $F=0.70$, già per un livello di falda a profondità intermedia in buon accordo con quanto previsto dai risultati della modellazione numerica alle differenze finite discussa al precedente Paragrafo 7.3.1. La stessa superficie 2 inoltre richiede un valore di accelerazione critica K_c ,

in assenza di falda, alquanto ridotto e pari a 0.04g. La superficie 3 (Figura 7.11) relativa al movimento traslazionale della zona centrale del pendio, è risultata stabile per tutti e tre i livelli di falda ipotizzati fornendo valori di accelerazione critica K_c variabili tra 0.05 e 0.20. L'ultima superficie considerata, ovvero la superficie 4 che incorpora la superficie 2 e la superficie 3 si è dimostrata, in assenza di sollecitazioni sismiche, instabile solo in condizione di filtrazione parallela al piano campagna, esibendo, invece, in assenza di falda e nel caso di falda in posizione intermedia a 7 metri di profondità dal piano campagna, valori di accelerazione critica K_c variabili tra 0.01 per falda intermedia e 0.11 in assenza di falda.

Considerando che, nel periodo 1993-1995, come discusso al Paragrafo 3.2.3, si sono avuti nell'area del pendio Vadoncello diversi eventi sismici con valori di accelerazione orizzontale dell'ordine di 0.01g ed anche, a volte, maggiori, i risultati dell'analisi di stabilità globale condotta parrebbero confermare le ipotesi, fatte al Paragrafo 3.6 e riprese nel Capitolo 4, circa il fatto che i terreni collocati a grandi profondità nell'ambito del pendio Vadoncello, mostrando scarse caratteristiche di resistenza ed un stato tensionale in sito prossimo alla superficie di snervamento sono soggetti a notevoli deformazioni plastiche, che si manifestano come rottura in un'analisi di stabilità globale come quella condotta, anche in concomitanza di ridotte variazioni di carico dovute, come nel caso indagato, ad eventi sismici non particolarmente intensi.

Si è proceduto, inoltre, anche al calcolo, per ciascuna delle quattro potenziali superfici di rottura ipotizzate, del fattore di sicurezza pseudo-statico introducendo nelle verifiche un valore di accelerazione sismica pari a 0.1g, agente in direzione sub-orizzontale. Per tenere conto dell'effetto sismico sulle pressioni interstiziali, si è assunta, nel corso di queste calcolazioni, una sovrappressione interstiziale di 30 kPa.

In Tabella 7.01 vengono riportati i valori assunti dal coefficiente di sicurezza in condizioni "pseudo-statiche" per le varie superfici di scivolamento ipotizzate e raffigurate in Figura 7.11. I fattori di sicurezza F_s ottenuti, corrispondenti ad un'accelerazione sub orizzontale di 0.1g, mostrano come, in assenza di falda la

superficie 2 sia instabile mentre per falda in posizione intermedia, solo la superficie 3 relativa al solo moto traslazionale del corpo del pendio, risulta stabile mentre la superficie 4 comprensiva di tutti i meccanismi ipotizzati risulta instabile.

7.4 - Modellazione in presenza di falde e di trascinamento al piede

Nell'ultimo processo di calcolo, il modello numerico è stato arricchito mediante l'aggiunta dell'ultimo fattore considerato di influenza nel processo deformativo ossia l'effetto di trascinamento al piede prodotto dal movimento della frana Serra dell'Acquara di cui, si ricorda, la frana Vadoncello è una sussidiaria in zona di piede.

La definizione numerica del pendio da un punto di vista stratigrafico e delle caratteristiche dei materiali resta quella definita secondo la sezione geotecnica riportata in Figura 4.22 così come i livelli di falda modellati sono quelli illustrati in Figura 6.17.

7.4.1 - Analisi dei movimenti nel pendio

Si fa riferimento ancora una volta nell'analisi dei risultati della modellazione, come illustrato in Figura 7.12, alla porzione di pendio compresa tra un punto posto circa 20 metri più a monte del sondaggio P4 (ovvero 70 metri più a monte del ciglio della scarpata del Gennaio 1995) e un punto posto circa 50 metri più a valle del sondaggio P1, in zona di interazione con la frana Serra dell'Acquara.

Sono distinguibili, anche in questo caso, tre regioni nelle quali i moduli dei vettori spostamento sono pressoché uniformi così come indicato al precedente Paragrafo 6.2. Queste regioni, indicate in Figura 7.13 con le lettere A, B e C, sono state caratterizzate da un valore unico del modulo di spostamento considerato rappresentativo dell'intera regione. Anche in questo caso, e sempre alla luce di quanto riportato nel Paragrafo 6.2, viene trascurata una quarta regione, a profondità più elevate, in cui i moduli di spostamento, attestandosi intorno a valori medi di circa 0.10 metri, vengono ritenuti trascurabili in quanto nell'ordine di grandezza dell'errore della calcolo stessa.

Esaminando singolarmente le differenti regioni, si può notare come quella più superficiale, ovvero la regione A, sia caratterizzata da un valore medio del modulo di spostamento di circa 10 metri e vi si configuri una frana, secondo Cruden D.M.

e Varnes D.J. (1996), superficiale composta. Si distinguono, infatti, due movimenti distinti rappresentativi di altrettanti meccanismi di deformazione: il primo, a monte, a carattere rotazionale ed il secondo, a valle, a carattere traslazionale.

Il meccanismo superficiale di tipo rotazionale coinvolge quasi esclusivamente la zona della scarpata del Gennaio 1995, avendo origine a circa 30 metri a monte del sondaggio I4 e proseguendo fino quasi al piede della scarpata stessa. L'estensione longitudinale di questo processo deformativo è, quindi, circa uguale a 90 metri, mentre il massimo approfondimento è di circa 20 metri in corrispondenza del limite superiore della scarpata Gennaio 1995.

Il meccanismo superficiale di tipo traslazionale ha carattere di colata. Esso ha origine in corrispondenza della parte più bassa della scarpata del Gennaio 1995, ovvero del piede del meccanismo precedentemente descritto. Tale colata si estende longitudinalmente per circa 450 metri occupando pressoché tutta la lunghezza della zona di canale del pendio arrestandosi circa 30 metri a valle del sondaggio P1, ovvero circa 220 metri a valle del sondaggio P2. La massima profondità, per la zona caratterizzata da questa tipologia di movimento, si attesta intorno ai 8 metri in corrispondenza del sondaggio I1, con un valore medio, nella zona a ridosso della scarpata Gennaio 1995 di circa 3.6 metri.

La regione B, a profondità intermedia, risulta caratterizzata da moduli di spostamento di circa 4 metri, e da un processo deformativo di tipo roto-traslazionale. Questa ha origine notevolmente più a monte del sondaggio P4, si estende per una lunghezza complessiva maggiore di 380 metri, fino a circa 60 metri a valle del sondaggio I2. In questa regione la massima profondità si registra in corrispondenza del limite di monte della scarpata del Gennaio 1995, con un valore di circa 50 metri, mentre il massimo spessore, di circa 35 metri, si ha al piede della stessa scarpata.

In ultima analisi, la regione C, relativa a zone a profondità maggiori, è caratterizzata da valori dei moduli di spostamento pari circa a 2 metri e da un meccanismo deformativo roto-traslazionale.

La regione vede origine, ancora una volta, notevolmente più a monte del

sondaggio P4 ed ha termine circa 20 metri a monte del sondaggio I1, ovvero circa 150 metri a valle del sondaggio P2. In questo caso l'estensione della regione C risulta longitudinalmente maggiore di 490 metri. La massima profondità di questa regione, valutata lungo la verticale del ciglio della scarpata Gennaio 1995, è di circa 90 metri mentre il suo massimo spessore è di circa 45 metri lungo la verticale del sondaggio P3.

Anche nel caso appena esaminato, si è ritenuto utile, visto la notevole rilevanza assunta, riportare, mediante ingrandimento della Figura 7.13, nella Figura 7.14 i contorni delle regioni prima definite relativamente alla sola zona della scarpata del Gennaio 1995.

7.5 - Analisi comparata delle modellazioni numeriche effettuate

Come illustrato nei Paragrafi precedenti lo studio numerico del pendio Vadoncello è stato condotto per stadi successivi.

Partendo dalla più semplice condizione di saturazione dei terreni, ma in assenza di falde nel pendio, è stata introdotta dapprima la presenza delle falde acquifere e, successivamente, l'effetto di trascinamento al piede.

Si intende qui porre a confronto i risultati dei singoli processi numerici relativi ai suddetti stadi di modellazione, al fine di desumere gli effetti sul comportamento deformativo del pendio dei singoli fattori introdotti e di interpretare le cause dell'instabilità del pendio Vadoncello secondo il solo approccio numerico. Successivamente si discuterà la rappresentatività dei risultati della modellazione per il processo deformativo realmente osservato in sito e si valuterà se l'interpretazione della meccanica del pendio in base alle osservazioni di sito è corroborata dai risultati numerici.

Dall'analisi comparata dei risultati numerici si desumono quattro principali valutazioni:

1. i risultati delle simulazioni numeriche relative ai tre stadi della modellazione, individuano meccanismi di deformazione nel pendio Vadoncello che sono qualitativamente analoghi tra di loro;
2. le principali differenze tra i risultati delle diverse modellazioni riguardano essenzialmente l'estensione, sia longitudinale sia verticale, dei meccanismi di deformazione sovrapposti nel pendio nonché l'entità degli spostamenti che caratterizzano gli stessi meccanismi;
3. in termini qualitativi si rileva un buon accordo tra i risultati della modellazione più completa effettuata (Paragrafo 6.1.6) e le condizioni deformative del pendio Vadoncello osservate in sito;
4. per quanto riguarda l'aspetto quantitativo dei risultati ottenuti, si fa presente che gli spostamenti calcolati sono effetto del processo di equilibramento del

pendio proprio del calcolo esplicito discusso al precedente Paragrafo 6.2. Tali spostamenti, quindi, includono almeno parte delle deformazioni dei terreni sotto l'azione della forza di gravità al contrario di quanto avviene per quelli desunti in sito che sono solo quelli attuali ossia conseguenti allo stato di equilibrio corrente delle masse di terreno, già consolidate al loro stato tensionale efficace. L'equilibrio attuale non essere ancora statico, bensì accompagnato da lente deformazioni plastiche permanenti profonde, come discusso nel Paragrafo 4.4. I risultati numerici paiono configurare meccanismi profondi di deformazione che però vanno apprezzati solo da un punto di vista qualitativo, in quanto in essi è verosimilmente inclusa un'aliquota deformativa dovuta al processo di carico dei terreni da una condizione scarica al loro stato tensionale attuale.

7.5.1 - Confronto tra le diverse modellazioni effettuate

In Tabella 7.02, vengono sinteticamente riassunti i risultati altresì riportati graficamente in Figura 7.15 in cui compare, anche, il topografico della porzione di pendio analizzata.

Per un più dettagliato esame dei risultati relativamente alla porzione di pendio occupata dalla scarpata del Gennaio 1995, Figura 7.16 si riporta un ingrandimento della precedente Figura 7.15 relativamente a questa zona del pendio.

In Figura 7.15, così come in Figura 7.16, vengono riportati i limiti delle tre regioni di spostamento pressoché uniforme che, per le varie calcolazioni, sono state, di volta in volta, desunte così come discusso nel Paragrafo 6.2.

In particolare: i risultati in termini di limiti delle regioni caratterizzate da modulo di spostamento quasi simile nel caso della prima modellazione effettuata, ovvero nel caso di terreni in condizioni sature ma non sotto falde (Stadio I - Figure 7.04 e 7.06), sono rappresentati mediante linee tratto-punto. I risultati della seconda modellazione, ovvero nel caso in cui sono presenti le due falde acquifere (Stadio II - Figure 7.09 e 7.10), sono riportati con linee tratteggiate. Infine i risultati dell'ultima modellazione effettuata, nel caso di presenza di un

trascinamento al piede della frana (Stadio III - Figure 7.13 e 7.14), sono stati raffigurati mediante tratto continuo.

Si può subito osservare come l'entità degli spostamenti calcolati cresca nella simulazione in cui è stata considerata la presenza delle falde acquifere (Stadio II) indipendentemente dalla regione di spostamenti presa in esame. L'introduzione del trascinamento al piede fa sì che le entità degli spostamenti calcolati subiscano una riduzione fino a valori intermedi tra quelli relativi allo Stadio I e quelli relativi allo Stadio II. In particolare i valori dei moduli di spostamento nella regione A più superficiale, sono simili nello Stadio I e nello Stadio III.

L'introduzione successiva dei fattori di instabilità: falde acquifere e trascinamento al piede, comporta una progressiva estensione verso valle ed una contemporanea variazione negli spessori delle regioni A B e C caratterizzate, per ciascuno dei differenti Stadi della modellazione, da valori dei moduli di spostamento quasi simili.

Confronto tra Stadio I e Stadio II della modellazione

Facendo riferimento alle Figure 7.15 e 7.16, si può osservare che, l'introduzione nel modello numerico della presenza dei due livelli di falda acquifera, a partire dalla condizione di pendio saturo, comporta un incremento di circa il 50% nella entità degli spostamenti caratterizzanti le singole regioni di spostamento individuate nell'ambito del pendio.

Passando dallo Stadio I allo Stadio II della modellazione, la porzione a comportamento rotazionale della regione A subisce un ingrandimento longitudinale di circa 20 metri quasi per intero nella direzione di monte ed un incremento della profondità raggiungendo i 20 metri con un incremento di circa 7 metri. La zona di colata, a fronte di un lieve aumento medio dello spessore, che raggiunge circa i 2.5 metri nello Stadio II a partire da circa 2.0 metri nello Stadio I, manifesta, sempre nello Stadio II, un notevole aumento, di circa 110 metri, nell'estensione longitudinale raggiungendo i 350 metri ed arrestandosi in prossimità del sondaggio P2, in corrispondenza di una zona del pendio caratterizzata da una certa diminuzione della pendenza fino ad una inversione in

un tratto ridotto.

Sempre al passaggio tra Stadio I e Stadio II della modellazione, le regioni B e C, subiscono, al contrario della regione A, modifiche dimensionali alquanto ridotte. Sono entrambe allungate in direzione di valle per circa 30 metri. La profondità e lo spessore della regione B subiscono incrementi di circa 10 e 5 metri passando, rispettivamente, dallo Stadio I allo Stadio II mentre, per la regione C, a fronte di una sostanziale invarianza nella profondità mantenutasi attorno ai 100 metri, si manifesta una certa riduzione nello spessore che passa da circa 50 metri allo Stadio I a circa 40 metri allo Stadio II. La causa principale è essenzialmente da cercarsi nella variazione di forma assunta dalla sovrastante regione B che, in particolare modo nella zona di valle, si approfondisce di circa 20 metri nello Stadio II rispetto a quanto non lo fosse allo Stadio I, compenetrando in zone prima di pertinenza della regione C.

Dall'analisi di questi risultati relativi, appunto, al I e II Stadio della modellazione numerica, ovvero al caso di terreni nel pendio in condizioni sature ma in assenza di falde ed al caso di presenza delle due acquifere, si può trarre la conclusione che la presenza delle falde acquifere quale causa instabilizzante, comporta la modifica essenzialmente dei processi deformativi più superficiali producendo, per questi, estensioni ed accelerazioni.

Confronto tra Stadio II e Stadio III della modellazione

Le differenze nei risultati della modellazione numerica tra gli Stadi II e III, ossia relative alla introduzione della simulazione del trascinamento al piede della frana, sono ancora riportate nelle Figure 7.15 e 7.16 e riguardano sia l'estensione delle regioni caratterizzate da moduli di spostamento quasi simili A, B e C sia l'entità di questi stessi spostamenti.

Come anticipato dinanzi, il trascinamento al piede comporta una generale riduzione nell'entità degli spostamenti in tutto il pendio rispetto al caso della modellazione condotta in presenza di falde acquifere, ma con spostamenti dei vincoli al piede impediti in direzione orizzontale. I valori degli spostamenti assunti a rappresentare le differenti regioni B e C, sono, infatti, risultati compresi

tra quelli determinati allo Stadio I ed allo Stadio II della modellazione. Fa eccezione, in questa tendenza, la regione di spostamento A per la quale il valore di spostamento rappresentativo è simile a quello ottenuto allo Stadio I di modellazione.

Il processo deformativo superficiale a carattere rotazionale della regione A nella zona di monte, valutato allo Stadio III di modellazione è risultato simile, in quanto ad estensione longitudinale e profonda, a quello valutato al II Stadio tanto che, come riscontrabile in Figura 7.16, i contorni delle regioni di spostamento per le due modellazioni sono sostanzialmente sovrapponibili. Differente è l'evoluzione subita, passando dal II al III Stadio di modellazione, dalla porzione a carattere di colata della stessa regione A. In questo caso, oltre ad aver raggiunto valori di profondità di circa 3.6 metri al quasi al piede della scarpata Gennaio 1995, l'estensione del fenomeno è notevolmente aumentata verso valle di circa 100 metri raggiungendo uno sviluppo complessivo di circa 450 metri. Da notare anche come, in prossimità del piede del pendio, ormai raggiunto da tale processo deformativo, la regione A raggiunge circa gli 8 metri di profondità laddove si verifica dapprima una diminuzione e poi una ripresa della pendenza nel profilo topografico.

Le regioni B e C, risultano anch'esse più estese verso valle, per effetto del trascinarsi al piede, rispettivamente di circa 70 e 100 metri, di quanto non lo fossero nel caso di assenza di tale trascinarsi, con estensioni longitudinali che risultano essere maggiori di 380 e 490 m. Al contrario le stesse regioni risultano meno estese in profondità allo Stadio III di modellazione di quanto non lo fossero allo stadio II. In particolare, la regione B vede la sua massima profondità attestarsi a circa 50 metri e, analogamente, il massimo spessore raggiungere circa 35 metri, subendo, entrambi i valori, una riduzione di circa 10 metri. In modo del tutto analogo, anche se forse meno evidente, la massima profondità raggiunta dalla regione C si attesta a circa 90 metri con una riduzione di circa 10 metri mentre la sua profondità massima viene ad essere incrementata di circa 5 metri raggiungendo i 45 metri.

I risultati numerici, quindi, paiono suggerire che un processo deformativo superficiale veloce ed un processo deformativo profondo lento sono plausibilmente attivi simultaneamente nel pendio Vadoncello a causa della sua morfologia e delle scadentissime caratteristiche meccaniche dei materiali. In particolare il processo profondo mostrato dai risultati della modellazione numerica suggerisce che le condizioni di carico del pendio, anche in assenza di falda e trascinamento al piede, comportano che i materiali presenti nel pendio a profondità maggiori si trovino in condizioni plastiche e, quindi, a snervamento, oppure in condizioni di plasticizzazione imminente. Il risultato di questo stato dei materiali profondi è che la loro deformazione può essere attivata anche da limitate variazioni di carico.

La sommersione dei terreni sotto falda provoca una accentuazione dei processi deformativi che, comunque, nel caso di vincolo di piede bloccato, rimangono confinati nell'ambito del pendio Vadoncello stesso.

Il lento muoversi della frana Serra dell'Acquara, invece, comporta un notevole estensione verso valle ed un lieve decremento delle profondità dei processi deformativi più profondi mentre i processi deformativi superficiali si estendono a tal punto da superare il limite di estensione dello stesso pendio Vadoncello.

7.5.2 - Confronto con i dati di monitoraggio

La modellazione numerica che implementa i due livelli di falda acquifera e l'effetto di trascinamento al piede (Stadio III) risulta, tra quelle effettuate, quella che meglio simula i meccanismi di pendio osservati in sito. Nel seguito si confrontano con maggiore dettaglio i risultati di questa modellazione i dati di monitoraggio.

Nell'ambito di questi confronti risulteranno di particolare rilevanza tutti gli eventi che, nel corso della campagna di monitoraggio, sono stati rilevati nel 1995. Si farà, quindi, essenzialmente, riferimento ai dati ricavati nel corso della prima campagna di sondaggi come descritti nel precedente Paragrafo 3.3. Il fatto di riferirsi a questo periodo di tempo è dovuto al fatto che, avendo assunto a base

della modellazione numerica condotta, il profilo topografico rilevato nel Gennaio 1995 ed essendosi verificato nell'Ottobre 1995 un evento franoso di notevole rilevanza ai danni del pendio esaminato conclusosi, nei suoi effetti, nel Dicembre 1995, la modellazione numerica si riferisce al processo deformativo verificatosi nel 1995.

Per quanto riguarda la zona di monte del pendio, si fa riferimento, essenzialmente ai sondaggi P4 ed I4, nonché alla casa colonica ivi presente (Figura 7.01). Per quanto attiene al sondaggio P4, la modellazione numerica, fornendo valori di spostamento significativi ricadenti nella regione di spostamenti B, riconosce la sua perdita di funzionalità verificatasi nel Luglio 1995. Per quanto riguarda il sondaggio I4, i risultati della modellazione evidenziano che questo sondaggio intercetta il passaggio da regione di spostamenti A a regione di spostamenti B ossia intercetta una zona caratterizzata da una notevole variazione nell'entità degli spostamenti. La profondità a cui si verifica questa intersezione è di circa 16.0 metri e ben riflette il fatto che a profondità di circa 9.0 e 14.0 metri, le letture inclinometriche effettuate in sito, hanno manifestato una variazione nella velocità degli spostamenti sintomo di una probabile rottura per taglio. Inoltre, a metà del mese di Maggio 1995 non fu più possibile far risalire il carrello di fondo oltre i 15 di profondità. Per quanto riguarda, infine, la casa colonica, si può osservare come la modellazione numerica evidenzi che questa giace a cavallo del limite che segna il passaggio dalla regione di spostamenti A alla regione di spostamenti B. Questo risultato è coerente con le osservazioni di sito di notevoli danneggiamenti strutturali ai danni della stessa casa verificatisi nell'Estate del 1995 e raffigurati nelle fotografie di Figura 7.17 e 7.18.

Nella zona centrale del pendio, interessata dal fenomeno di colata, sono collocati quattro sondaggi, due nella parte più alta, I3 e P3, e due in quella più bassa, I2 e P2. Per quanto riguarda i due sondaggi P2 e P3, può solo rilevarsi come la loro posizione sia tale da essere pienamente compatibile, in termini di spostamenti calcolati dalla modellazione numerica, con la loro perdita di funzionalità verificatesi nel Maggio e nel Febbraio 1995 rispettivamente. Congruentemente i due sondaggi inclinometrici I2 ed I3 occlusi, entro il Maggio 1995, ad un profondità di circa 4.5-5.0 metri, fornito evidenze di sito di ciò

altrimenti risultato dalla modellazione numerica. Infatti la modellazione numerica mostra una variazione nella grandezza degli spostamenti ad una profondità di circa ad un profondità di circa 3.6 metri al passaggio tra la regione di spostamenti A e la regione di spostamenti B

Infine, nella zona di piede, in cui sono posizionati i sondaggi I1 e P1, la modellazione numerica ha mostrato variazioni nell'entità degli spostamenti ad un profondità di circa 8.0 metri. Questo risultato è di discreto riscontro alle misure inclinometriche effettuate in I1 che, manifesta la presenza di un netto taglio a circa 16.0-17.0 metri di profondità accompagnata da bande di deformazione più profonde e meno profonde. Una di queste bande di deformazione più superficiali, si attesta ad una profondità di circa 7.0 metri prossima a quella desunta a seguito della modellazione numerica. Per quanto riguarda, infine, il sondaggio P1, considerata la sua posizione per cui questo sondaggio attraversa una zona di marcata discontinuità nell'entità degli spostamenti calcolati dalla modellazione numerica al passaggio tra la regione di spostamenti A ed una porzione stabile (nel senso discusso al Paragrafo 7.4.1) del pendio, può solo rilevarsi che la sua perdita di funzionalità, verificatasi nell'Estate 1995, è presumibilmente riconosciuta dai risultati della modellazione.

CAPITOLO 7

FIGURE E TABELLE

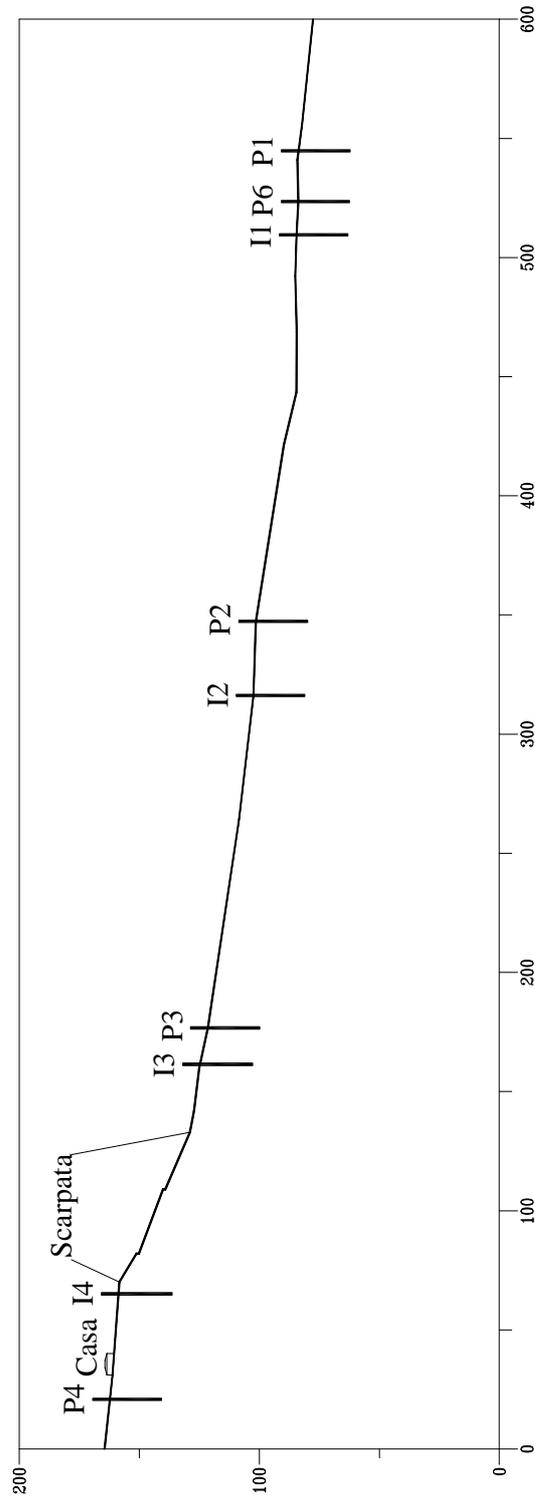


Figura 7.01 - Indicazione dei punti rilevanti nella descrizione delle deformazioni del pendio Vadoncello

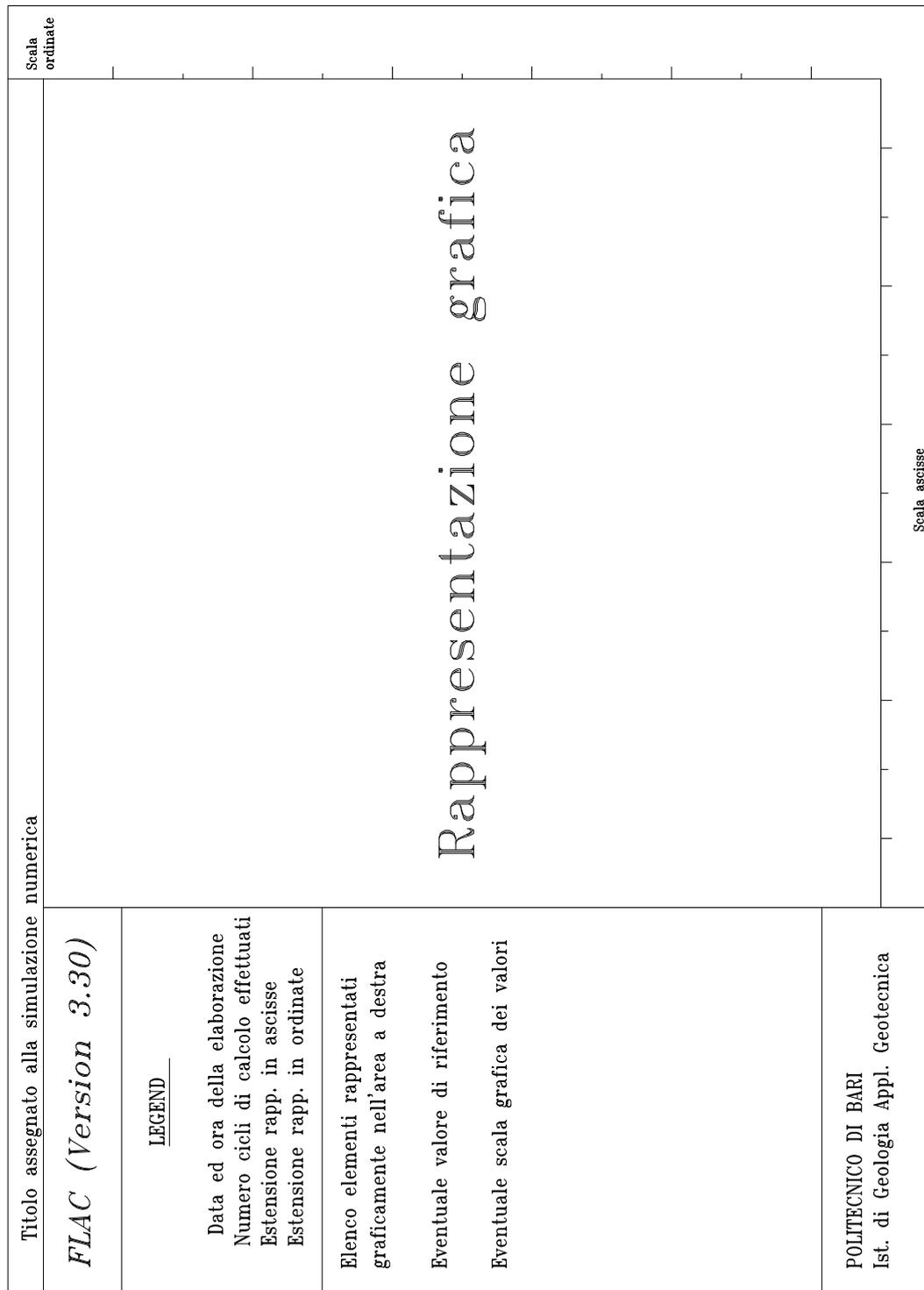


Figura 7.02 - Leggenda esplicativa del contenuto di una rappresentazione grafica prodotta con il
 FLAC

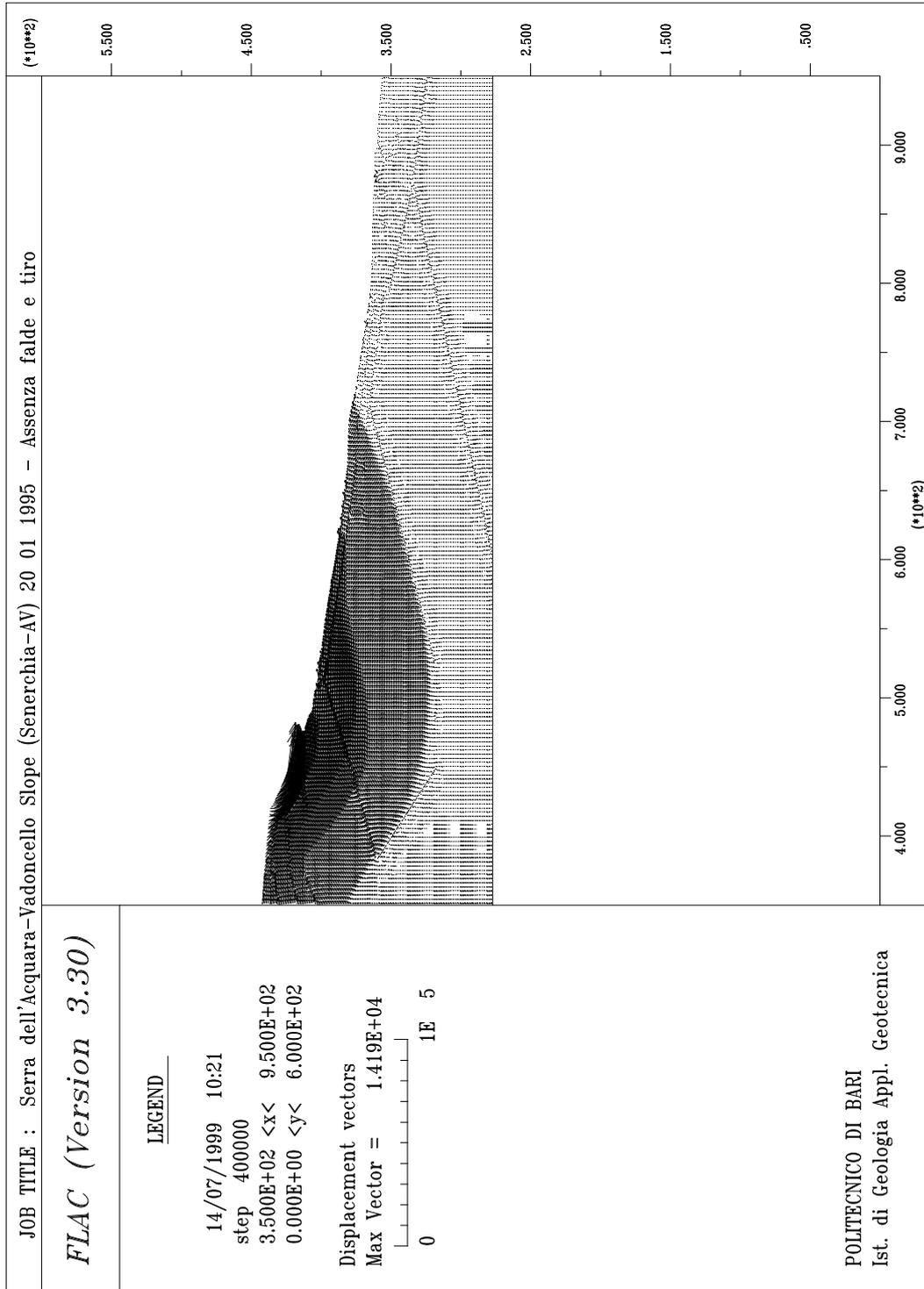


Figura 7.03 - Vettori spostamento - Intero pendio - Pendio saturo
 (Unità di misura adottate: Ordinate: m; Ascisse: m; Spostamenti: mm)

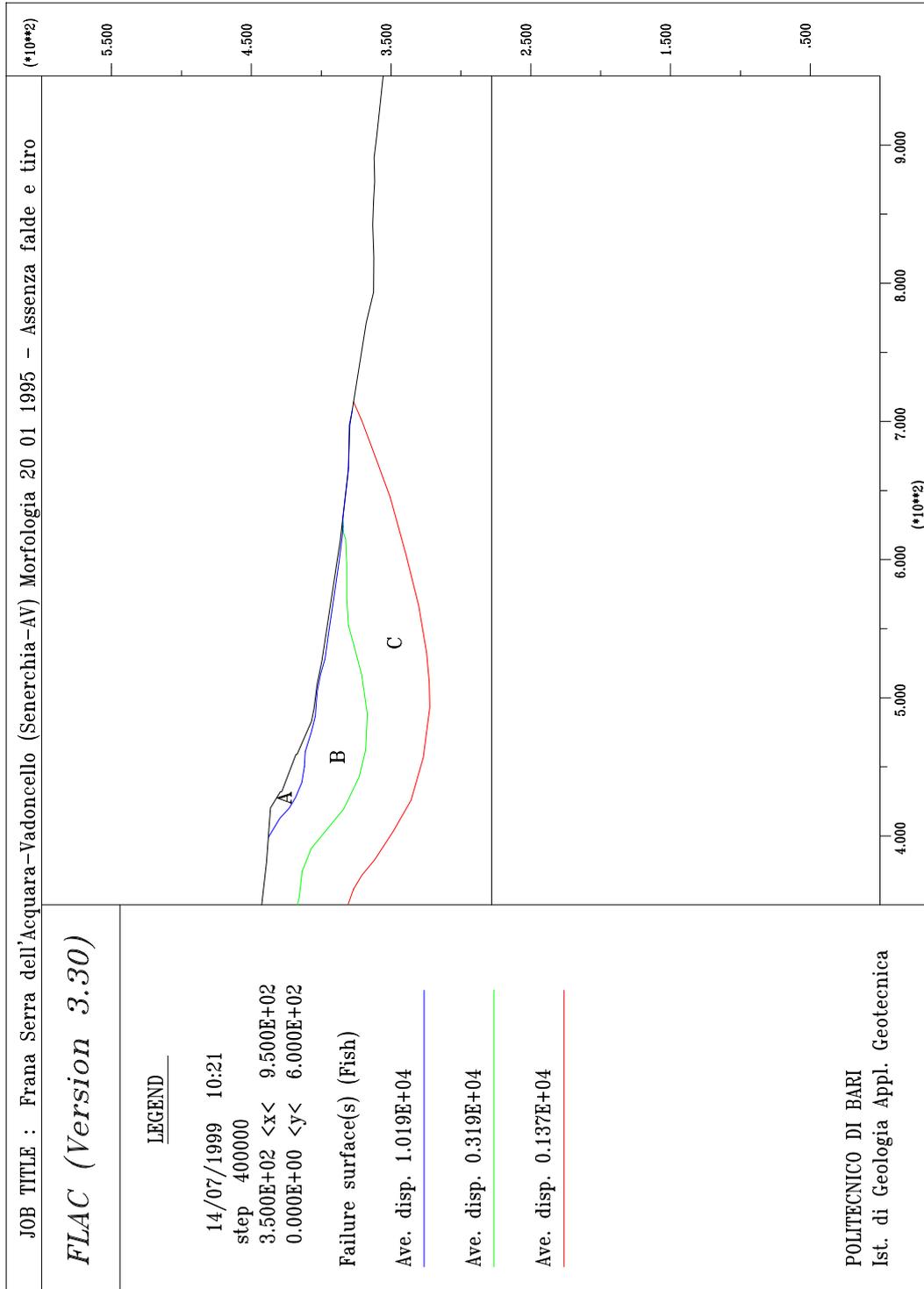


Figura 7.04 - Regioni di spostamento uniforme - Intero pendio - Pendio saturo

(Unità di misura adottate: Ordinate: m; Ascisse: m; Spostamenti: mm)

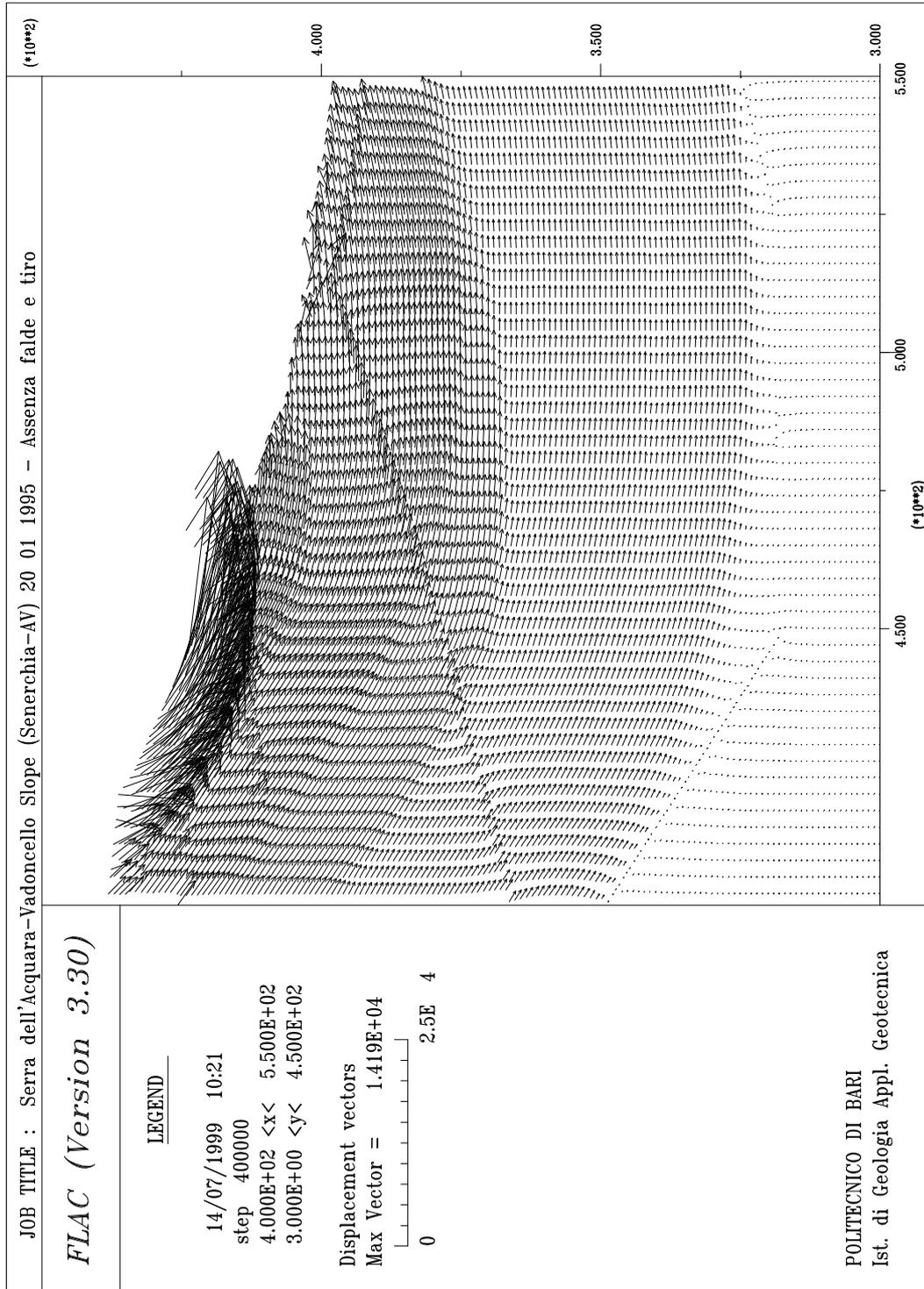


Figura 7.05 - Vettori spostamento - Zona di scarpata - Pendio saturo
 (Unità di misura adottate: Ordinate: m; Ascisse: m; Spostamenti: mm)

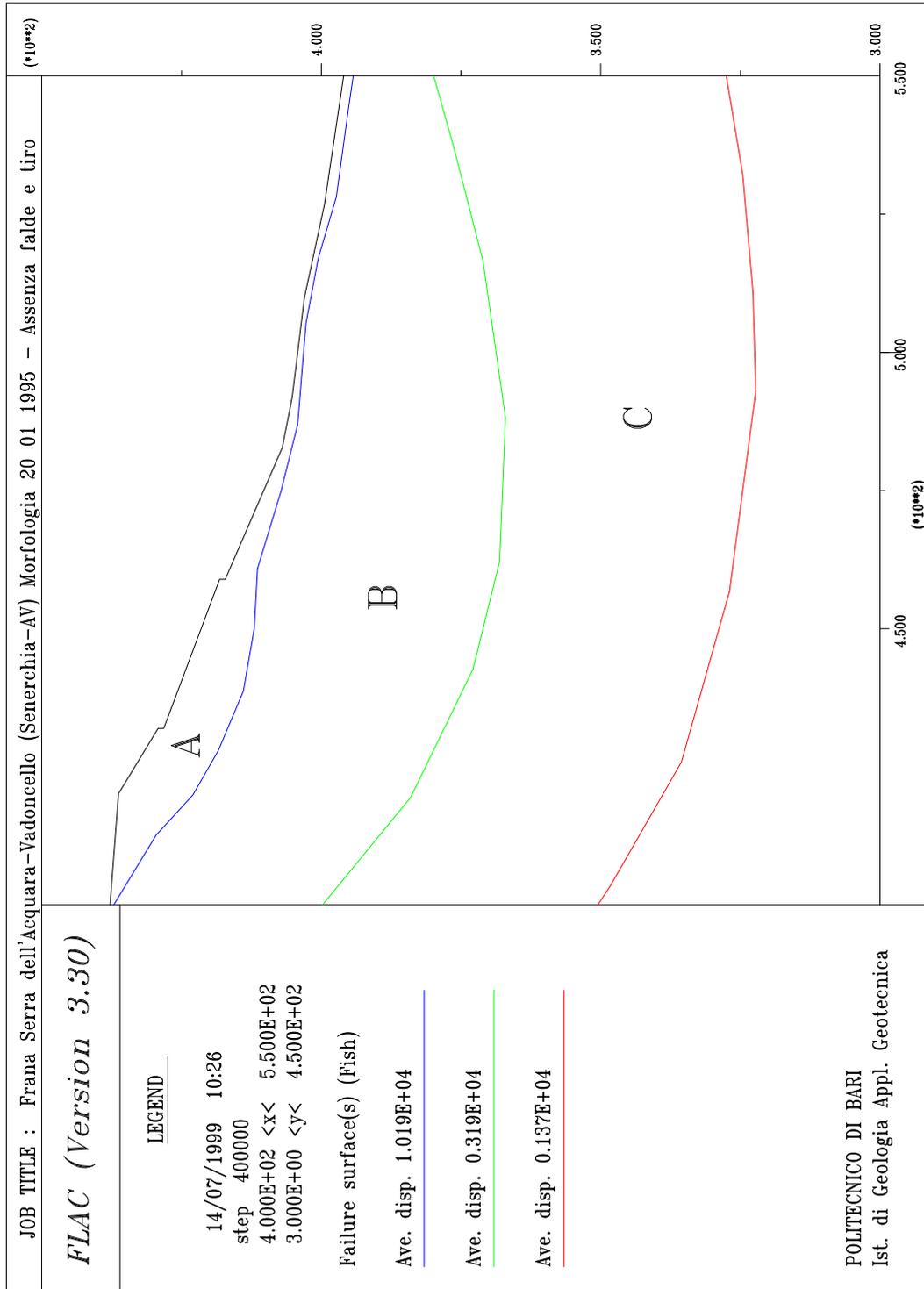


Figura 7.06 - Regioni di spostamento uniforme - Zona di scarpata - Pendio saturo

(Unità di misura adottate: Ordinate: m; Ascisse: m; Spostamenti: mm)

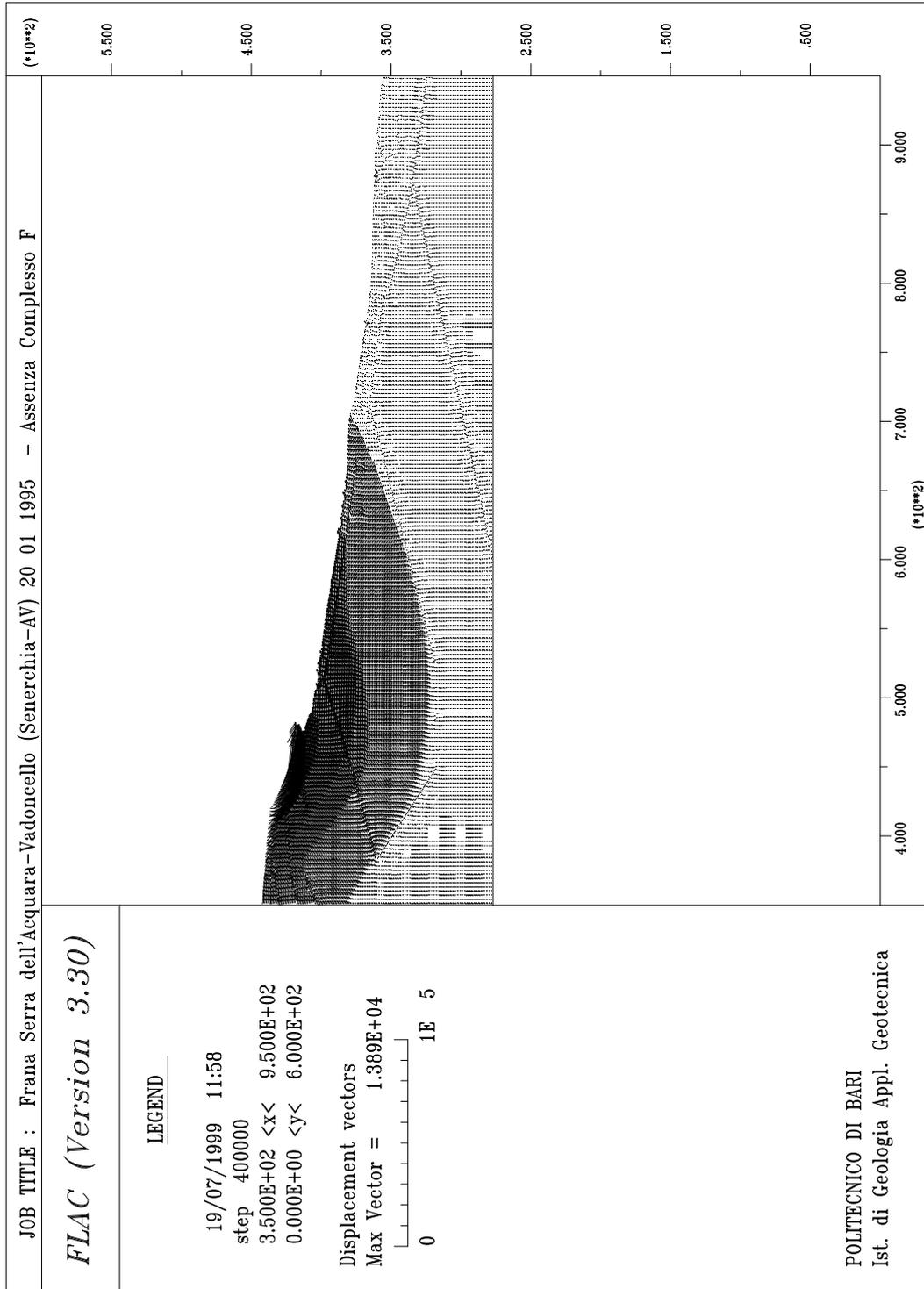


Figura 7.07 - Vettori spostamento - Intero pendio - Pendio saturo - Assenza complesso F

(Unità di misura adottate: Ordinate: m; Ascisse: m; Spostamenti: mm)

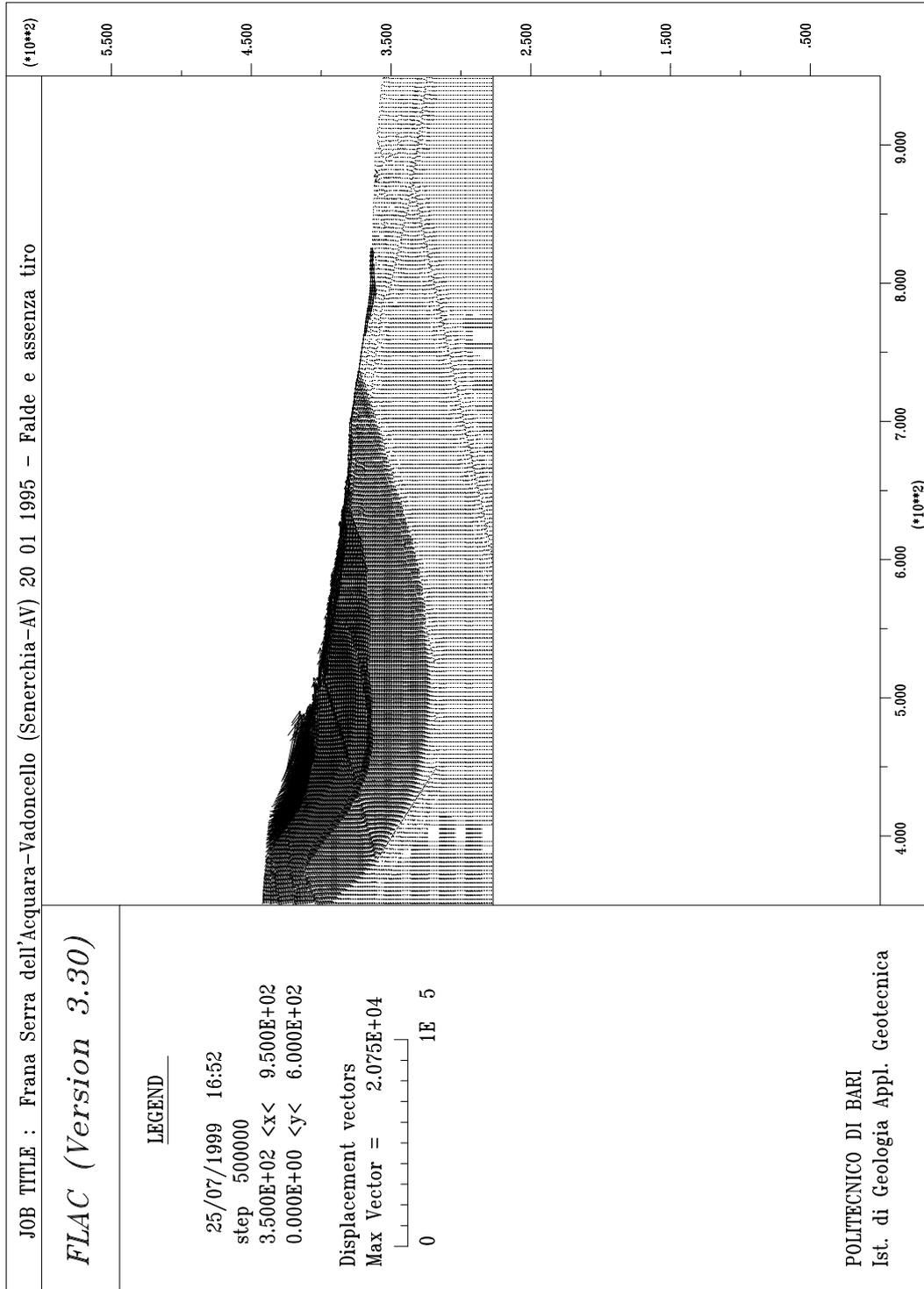


Figura 7.08 - Vettori spostamento - Intero pendio - Doppia falda
 (Unità di misura adottate: Ordinate: m; Ascisse: m; Spostamenti: mm)

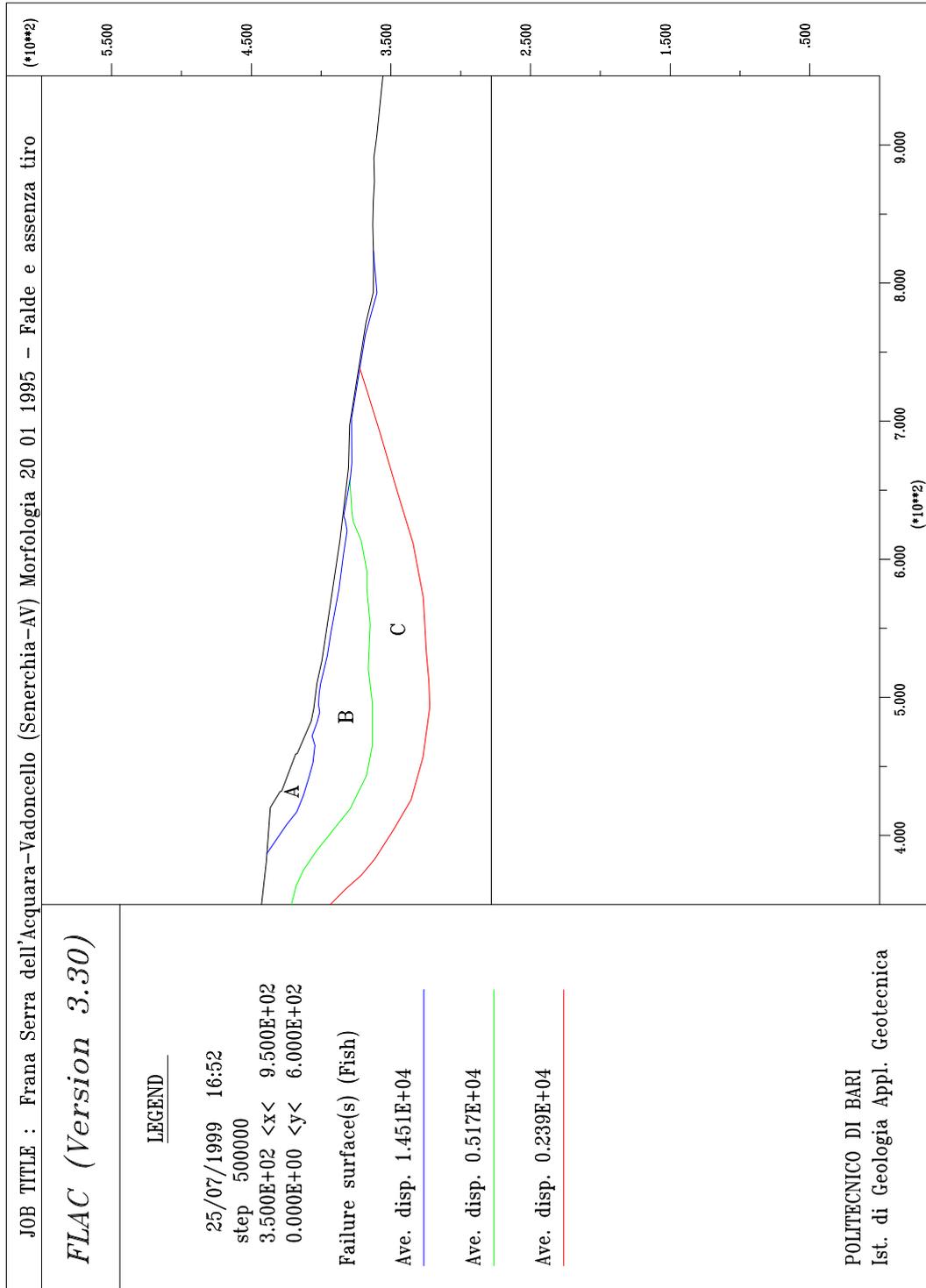


Figura 7.09 - Regioni di spostamento uniforme - Intero pendio - Doppia falda

(Unità di misura adottate: Ordinate: m; Ascisse: m; Spostamenti: mm)

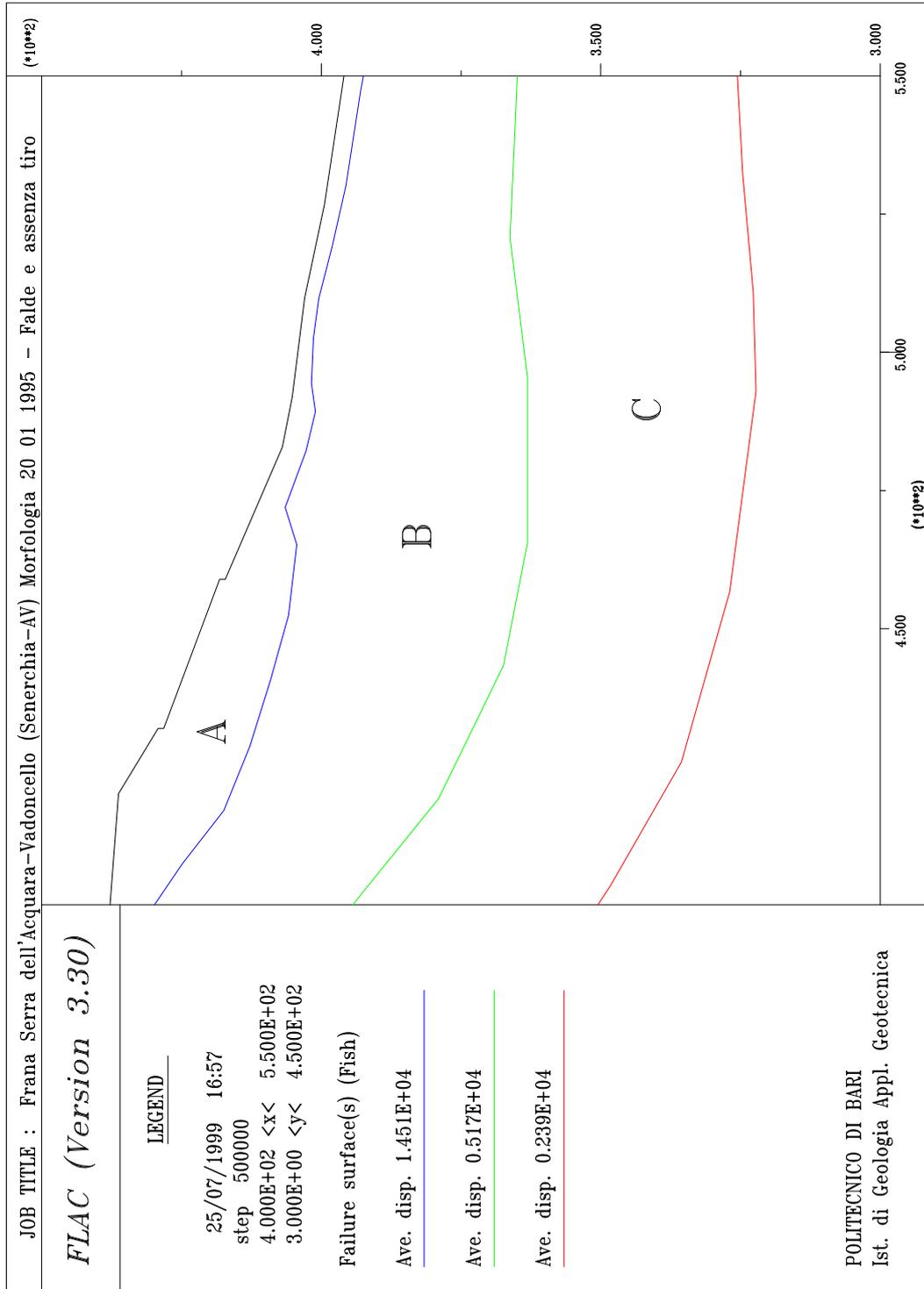


Figura 7.10 - Regioni di spostamento uniforme - Zona di scarpata - Doppia falda

(Unità di misura adottate: Ordinate: m; Ascisse: m; Spostamenti: mm)

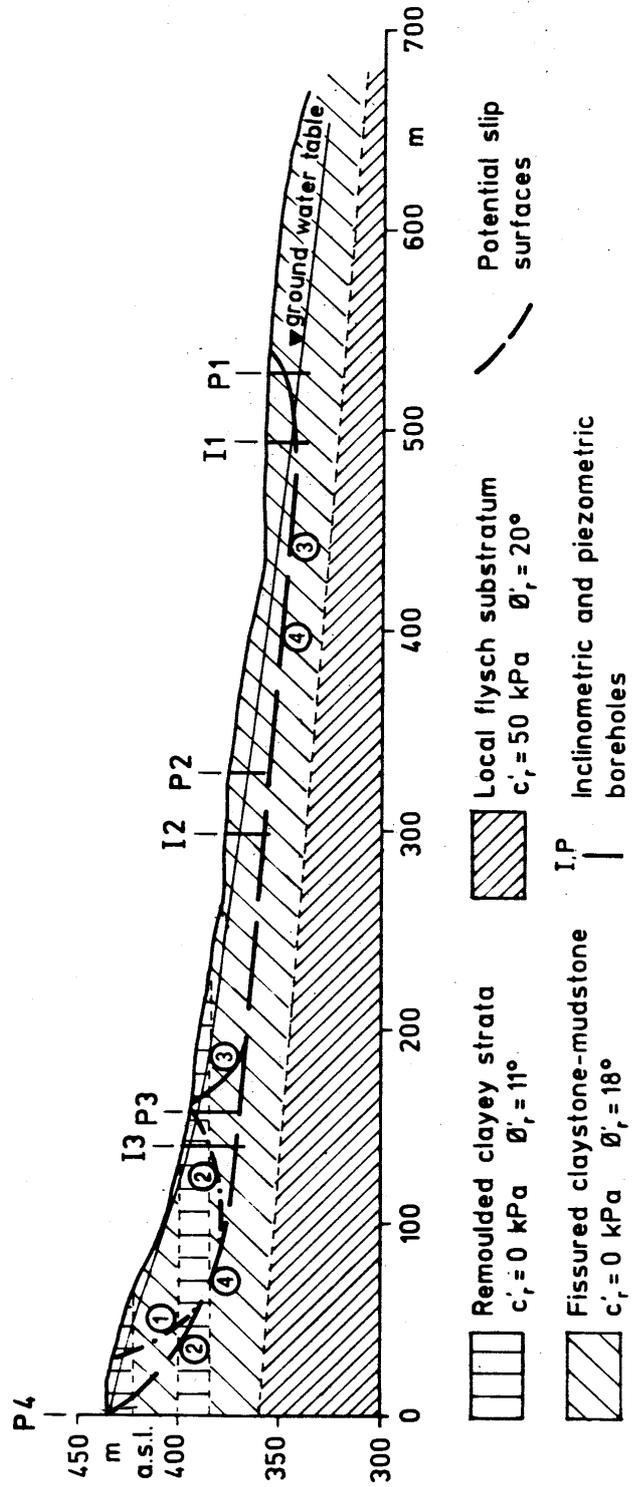


Figura 7.11 - Analisi di stabilità con il metodo di Janbu (da Trizzino et al., In stampa)

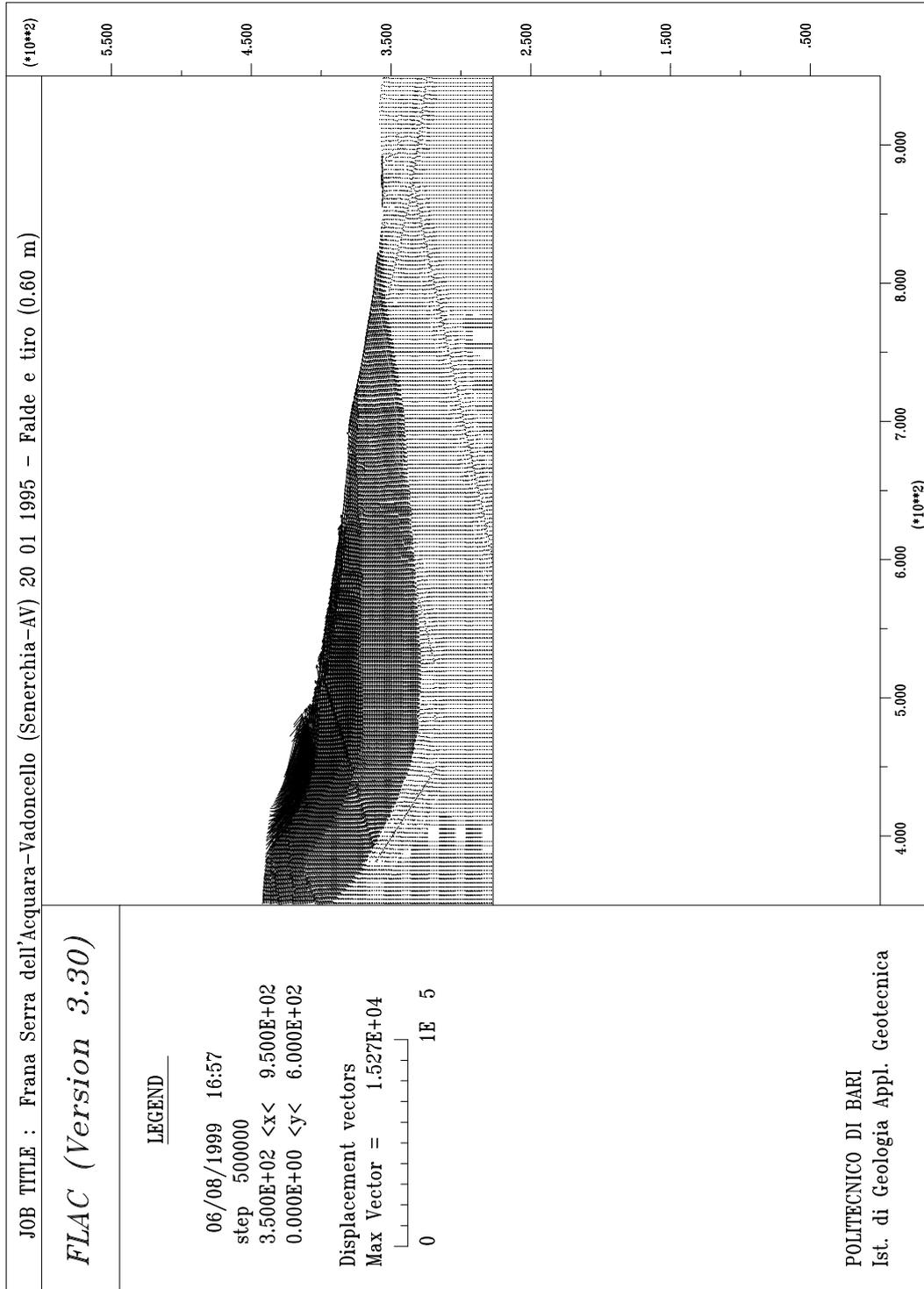


Figura 7.12 - Vettori spostamento - Intero pendio - Doppia falda e trascinamento al piede

(Unità di misura adottate: Ordinate: m; Ascisse: m; Spostamenti: mm)

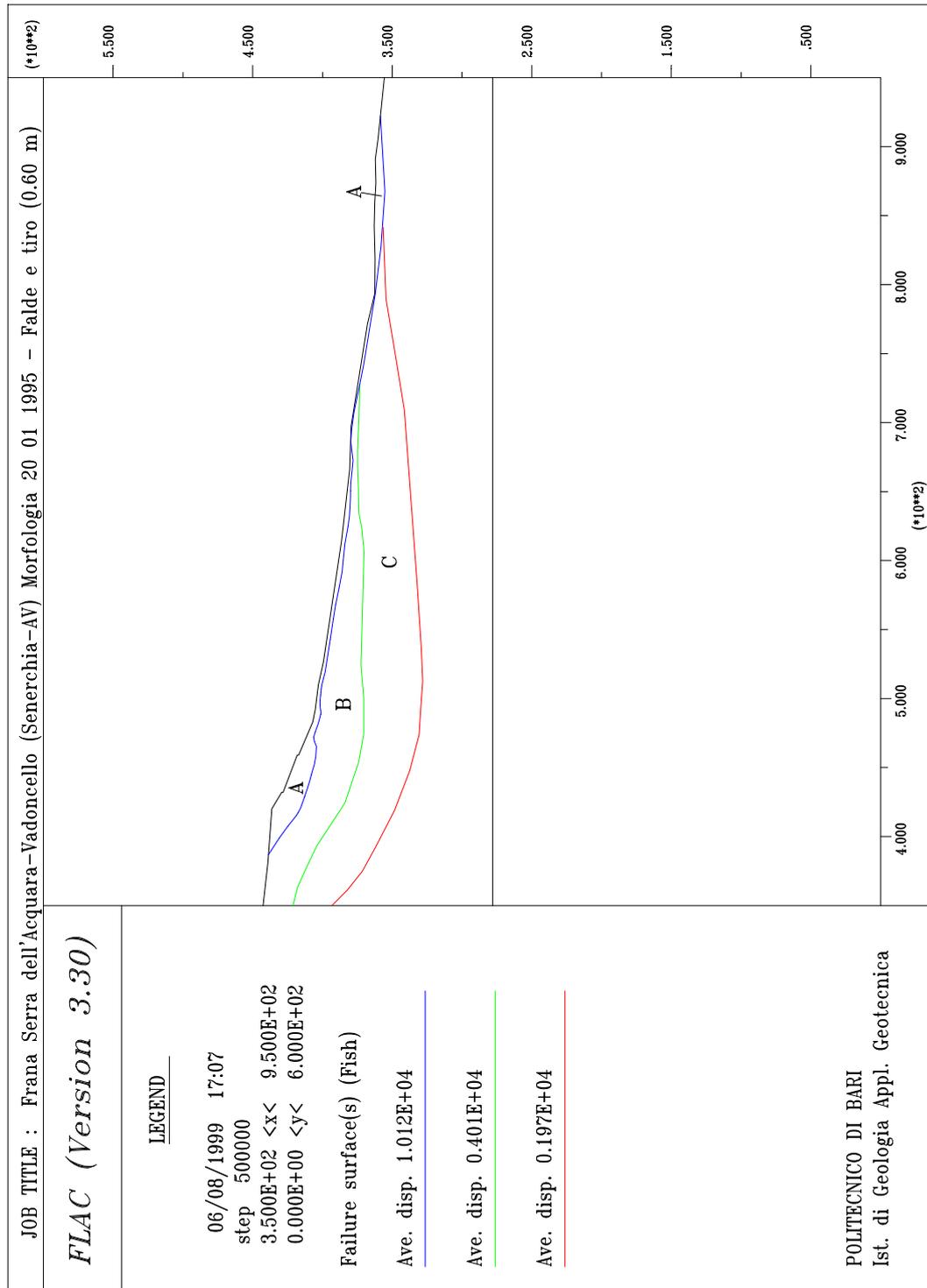


Figura 7.13 - Regioni di spostamento uniforme - Intero pendio - Doppia falda e trascinamento al piede

(Unità di misura adottate: Ordinate: m; Ascisse: m; Spostamenti: mm)

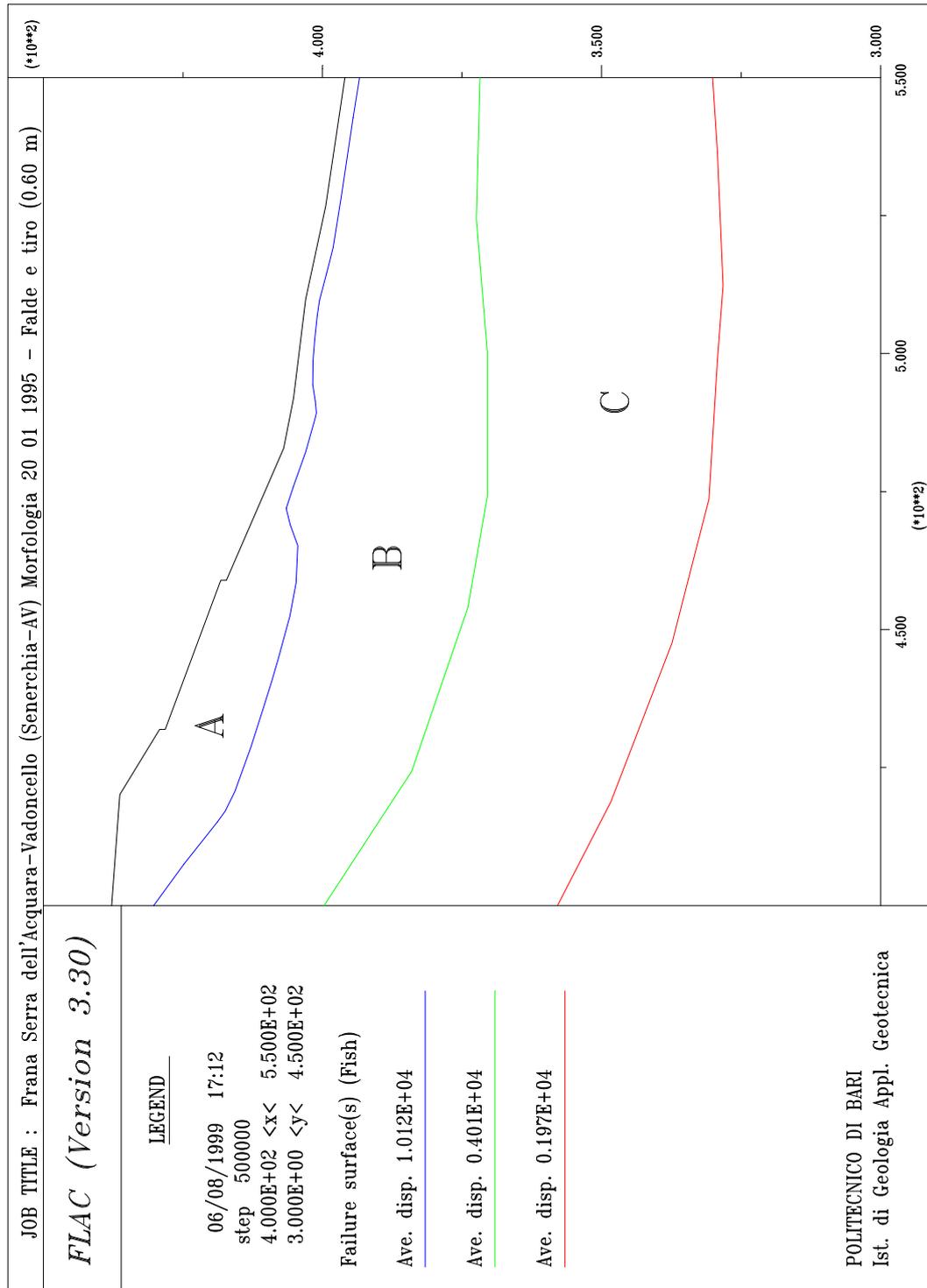


Figura 7.14 - Regioni di spostamento uniforme - Zona di scarpata - Doppia falda e trascinamento al piede

(Unità di misura adottate: Ordinate: m; Ascisse: m; Spostamenti: mm)

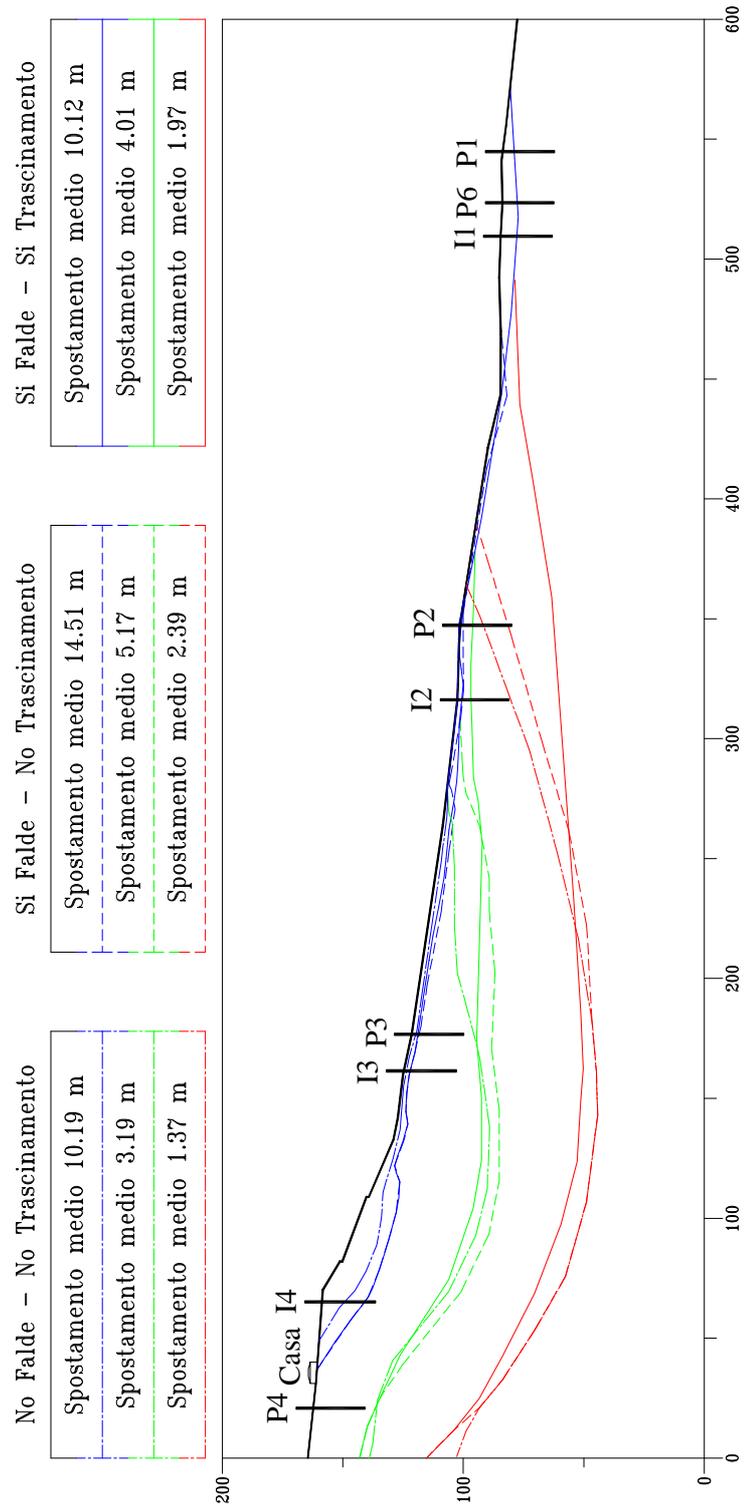


Figura 7.15 - Sovrapposizione delle regioni di spostamento uniforme per le tre modellazioni -
 Intero pendio

(Unità di misura adottate: Ordinate: m; Ascisse: m)

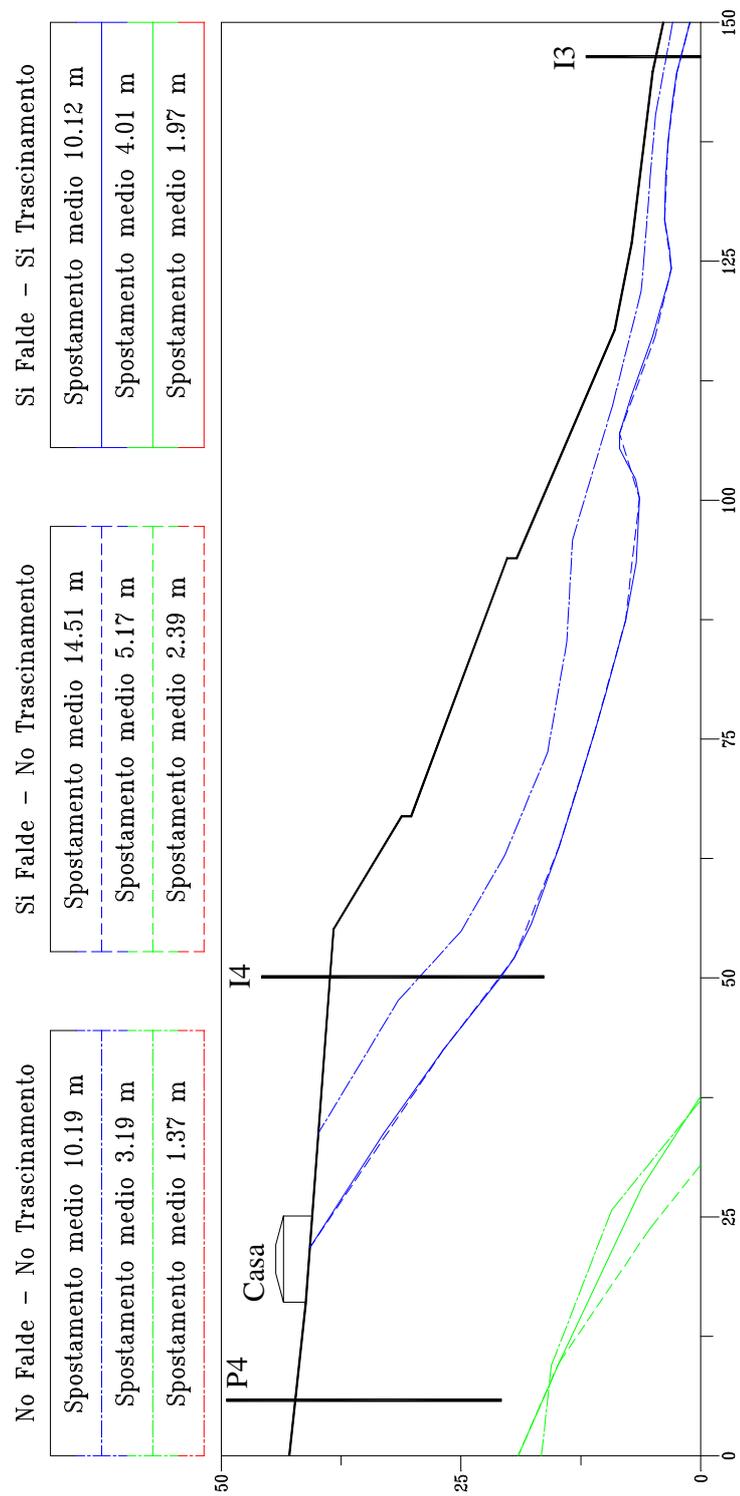


Figura 7.16 - Sovrapposizione delle regioni di spostamento uniforme per le tre modellazioni -
Zona di scarpata

(Unità di misura adottate: Ordinate: m; Ascisse: m)



Figura 7.17 - Vista laterale nel Novembre 1995 della casa presente in sito



Figura 7.18 - Vista dalla scarpata di frana nel Novembre 1995 della case presente in sito

	Rapporto tra le pressioni interstiziali		
	$R_u = 0$	$R_u = 0.3 \div 0.4$	$R_u = 0.48$
	SUPERFICIE 2		
F_0	1.23	0.70	0.55
K_c (g)	0.04	-0.07	-0.10
F_s ($K_h = 0.1g$)	0.85	---	---
	SUPERFICIE 3		
F_0	3.20	2.34	1.61
K_c (g)	0.20	0.11	0.05
F_s ($K_h = 0.1g$)	---	1.04	---
	SUPERFICIE 4		
F_0	2.04	1.27	0.88
K_c (g)	0.11	0.01	-0.03
F_s ($K_h = 0.1g$)	---	0.75	---

Tabella 7.01 -Dati e risultati dell'analisi di stabilita globale

(Dati Del Gaudio V. et al.; 1999)

Regione	Caratteristica	Tipologia di modellazione del pendio		
		Saturo senza falda	Doppia falda	Doppia falda e trascinamento
A Rotazionale	Media spostamenti	10.0 metri	14.5 metri	10.0 metri
	Posizione origine	15 metri monte I4	30 metri monte I4	30 metri monte I4
	Posizione termine	Piede scarpata	Piede scarpata	Piede scarpata
	Estensione longitudinale	70 metri	90 metri	90 metri
	Profondità o spessore massimi	13 metri	20 metri	20 metri
A Traslazionale	Media spostamenti	10.0 metri	14.5 metri	10.0 metri
	Posizione origine	Piede scarpata	Piede scarpata	Piede scarpata
	Posizione termine	10 metri valle P2	120 metri valle P2	220 metri valle P2
	Estensione longitudinale	240 metri	350 metri	450 metri
	Profondità o spessore massimi	2 metri	4.5 metri	8.0 metri
	Profondità o spessore medi	2 metri	2.5 metri	3.6 metri
B	Media spostamenti	3.0 metri	5.0 metri	4.0 metri
	Posizione origine	Monte P4	Monte P4	Monte P4
	Posizione termine	35 metri monte I2	10 metri monte I2	60 metri valle I2
	Estensione longitudinale	>280 metri	>310 metri	>380 metri
	Profondità massima	50 metri	60 metri	50 metri
	Spessore massimo	40 metri	45 metri	35 metri
C	Media spostamenti	1.5 metri	2.5 metri	2.0 metri
	Posizione origine	Monte P4	Monte P4	Monte P4
	Posizione termine	15 metri valle P2	40 metri valle P2	150 metri valle P2
	Estensione longitudinale	>360 metri	>390 metri	>490 metri
	Profondità massima	100 metri	100 metri	90 metri
	Spessore massimo	50 metri	40 metri	45 metri

Tabella 7.02 - Confronto tra i risultati delle differenti modellazioni numeriche effettuate

CAPITOLO 8

CONCLUSIONI

L'indagine ed il monitoraggio dei fenomeni deformativi di origine gravitativa attivi in un pendio in formazioni strutturalmente complesse e fortemente tettonizzate che, tipicamente, caratterizzano l'assetto geologico dell'Appennino Meridionale in generale ed il versante orientale dell'Alta Valle del Sele nel particolare, può fondamentalemente consentire una interpretazione, ancorché solo di massima, dei processi in atto. Ciò è stato verificato nello studio del pendio Vadoncello, oggetto del presente lavoro di ricerca.

Da un'attenta campagna di indagini sui materiali presenti nel pendio Vadoncello e di monitoraggio dei processi in sito, resi possibili da una congrua assegnazione finanziaria ad opera della CEE, benché particolarmente sofisticati, si è potuto avanzare solo una ipotesi sul processo di deformazione in atto sul versante ed alcune proposte indicanti le cause concorrenti ad attivare tale processo. I dati prodotti non sono stati, quindi, sufficienti per rendere inconfutabile l'ipotesi avanzata e per valutare il ruolo e l'importanza delle diverse cause.

Le ragioni di ciò sono essenzialmente da ricercarsi nella complessità stratigrafica, geologica-strutturale, ed idrogeologica, la quale risulta difficilmente riportabile in un quadro di sintesi e controllabile dati, appunto, i molteplici fattori contemporaneamente coinvolti nel problema.

Pur nei limiti qui di sopra sintetizzati, le osservazioni di sito hanno fatto concludere che il processo deformativo del pendio Vadoncello è composto da un meccanismo di superficie da uno di profondità. Il meccanismo di superficie è, a sua volta, composto da un meccanismo di scivolamento rotazionale a monte e, a valle, da un meccanismo di colata, che viene qui riferito a rappresentare un processo di frana intermedio tra scorrimento di fango e colata di terra. Il meccanismo di deformazione attivo in profondità può essere definito come un meccanismo progressivo di deformazione plastica che da luogo a spostamenti irrecuperabili a lenta evoluzione nel tempo.

L'analisi dei dati ottenuti dalle indagini e monitoraggi di sito (Capitolo 3), oltre che permettere di delineare la proposta qui riportata sul meccanismo di deformazione attivo nel pendio in studio, ha altresì consentito di ottenere

informazioni utili ai fini della modellazione numerica del pendio Vadoncello. Detta analisi numerica, data la impossibilità di suffragare le interpretazioni sui processi deformativi con sufficienti dati di sito, è risultata utile quale ulteriore mezzo di analisi degli stessi processi naturali in studio. I dati di monitoraggio sono stati infine utilizzati per confronto con i risultati numerici.

La modellazione numerica, svolta con l'ausilio del codice di calcolo FLAC 3.30 (Capitolo 5), ha tenuto conto il più possibile delle complessità geologiche, stratigrafiche ed idrogeologiche caratterizzanti il pendio Vadoncello.

Particolare attenzione è stata inoltre posta alla meccanica dei terreni e ciò nonostante la limitatezza di dati dovuta alle difficoltà incontrate nella preparazione dei provini da ogni singolo campione. Quest'ultimo aspetto ha fatto sì che per ogni campione si potesse ottenere, nella maggior parte dei casi, solo un provino per prova di taglio triassiale. È da riscontrare, peraltro, la difficoltà nell'effettuare le prove di laboratorio essenzialmente dovuta ai lunghi tempi di esecuzione richiesti dalle stesse che sono risultati dell'ordine dei mesi. Inoltre non è ancora disponibile in letteratura, per materiali simili a quelli presenti nell'ambito del pendio Vadoncello, un chiaro quadro interpretativo del comportamento meccanico.

Nelle prove, i terreni presenti nell'ambito del pendio a grandi profondità hanno, esibito (Capitolo 4) scadenti caratteristiche di resistenza e sono risultati sottoposti ad uno stato tensionale di consolidazione in sito prossimo alla superficie di grande snervamento, rappresentativa di stati tensionali di consolidazione per i quali si manifestano significative riduzioni di rigidità. Questi terreni risultano quindi inclini a manifestare deformazioni plastiche anche significative in concomitanza di sia pur piccole variazioni di carico. Essi hanno esibito un comportamento contraente durante il taglio a pressioni di consolidazione pari a quelle di sito ed un comportamento incrudente con l'avanzare della deformazione di taglio fino a valori di angolo di resistenza al taglio, in condizioni di pseudo stato critico, che risultano bassi. Questi comportamenti sono stati qui definiti di pseudo stato critico in quanto corrispondenti ad incrementi nulli della resistenza e della deformazione

volumetrica all'avanzare della deformazione di taglio. Nell'ambito del modello numerico, si è quindi assunto che, per profondità maggiori di 20-25 metri dal piano campagna, i terreni del pendio Vadoncello abbiano un comportamento contraente ed incrudente sino alle dinanzi citate resistenza di pseudo stato critico; mentre i terreni presenti nell'ambito del modello a profondità inferiori hanno un comportamento dilatante e rammollente. A rappresentare la legge costitutiva di entrambe le tipologie di terreni, attesa la limitatezza dei dati disponibili per la caratterizzazione meccanica mediante modelli elasto-plastici più complessi a più parametri come, ad esempio, tra quelli implementati nel codice di calcolo FLAC, il modello costitutivo Cam-Clay modificato, è stato invece adottato il modello costitutivo elasto-plastico con involuppo di rottura Mohr-Coulomb a flusso non associato e rammollenza a grandissime deformazioni (Capitolo 6). La resistenza dei terreni è stata caratterizzata, per i materiali più profondi, da angoli di resistenza a taglio in condizioni di pseudo stato critico $\phi'_{CS} = 13^\circ \div 22^\circ$ e da coesione intercetta c' nulla, mentre, per i materiali più superficiali, da angoli di resistenza a taglio e valori di coesione intercetta c' variabili, in funzione della profondità, tra valori di picco e valori di pseudo stato critico. Dopo il grande snervamento, all'aumentare delle deformazioni plastiche di taglio, per entrambe le tipologie di terreni considerate si è assunto il raggiungimento per rammollenza delle condizioni di resistenza residua caratterizzate dall'angolo di resistenza $\phi'_R = 5.7^\circ$ e dalla coesione intercetta c' nulla.

Nel modello numerico non si sono implementate discontinuità, in quanto l'assetto dei materiali è stato riscontrato fessurato, come conseguenza della loro tettonizzazione intensa, sino alla scala dell'elemento di volume (meso-struttura), per cui l'influenza della loro tettonizzazione sulla meccanica di pendio viene ad essere già tenuta in conto nella caratterizzazione meccanica dei materiali. La meso-struttura scagliosa e fessurata dei campioni sottoposti a prova ne ha influenzato le proprietà meccaniche, rendendole particolarmente scadenti. Queste sono state come tali implementate nel modello numerico, dando luogo a grandi deformazioni con gradienti di deformazioni localizzati che configurano lo sviluppo, secondo il modello, di superfici di rottura e bande di taglio.

Già dalle prime simulazioni, effettuate considerando i terreni saturi in assenza di pressioni interstiziali dovute a falde, i risultati della modellazione hanno messo in luce (Capitolo 7), in superficie due meccanismi deformativi, uno a monte con caratteristiche rotazionali ed uno con caratteristiche di colata nella zona centrale del pendio e, più in profondità, la presenza di zone di deformazione più lenta.

Il meccanismo superficiale di tipo rotazionale, le cui estensioni longitudinale e verticale sono di circa cento metri e venti metri rispettivamente, coinvolge quasi esclusivamente la zona della scarpata del Gennaio 1995. Il meccanismo superficiale di tipo traslazionale, a carattere di colata, ha origine in corrispondenza della parte più bassa della scarpata del Gennaio 1995, ovvero del piede del meccanismo rotazionale precedentemente descritto, estendendosi longitudinalmente per circa quattrocentocinquanta metri, estensione, questa, pressoché corrispondente alla lunghezza della zona di canale osservata sul pendio, ed approfondendosi al massimo di circa otto metri con valori medi di qualche metro. Le zone di deformazione profonda, caratterizzate da spostamenti di un ordine di grandezza inferiori rispetto ai più veloci spostamenti superficiali, hanno origine già più a monte scarpate del Gennaio 1995 e si estendono longitudinalmente ed in profondità di circa cinquecento metri e novanta metri rispettivamente.

L'implementazione di ulteriori circostanze ritenute condizionanti il meccanismo deformativo del pendio Vadoncello, come le falde acquifere disperse nella successione stratigrafica propria del sito in esame e l'effetto di trascinamento al piede attuato dal lento movimento del corpo di frana di Serra dell'Acquara, osservato a seguito del monitoraggio topografico svolto in sito, ha amplificato l'importanza dei due distinti meccanismi deformativi superficiali. È stato, quindi, confermato che i veloci meccanismi deformativi superficiali sono probabilmente da porre in relazione al lento meccanismo profondo, che, nel caso della modellazione che tiene conto sia della presenza della falde che dell'effetto di trascinamento al piede, sono risultati in buon accordo con i dati di indagine e monitoraggio disponibili. (Capitolo 7).

Nella regione di monte del movimento franoso considerato, l'entità degli

spostamenti e le profondità dei processi deformativi desumibili dalla modellazione numerica sono risultati compatibili con le deformazioni dei rivestimenti di due fori di sondaggio presenti nella zona che hanno comportato la perdita di funzionalità delle strumentazioni ivi installate, nonché con i danneggiamenti strutturali della casa colonica ivi presente.

Nella zona centrale del pendio come in quella di piede, interessate dal fenomeno di colata e dalla relativa zona di accumulo rispettivamente, ancora una volta le profondità del processo deformativo desunte dalla simulazione numerica, nonché la profondità in cui si manifesta una repentina variazione nell'entità degli spostamenti, sono risultate compatibili con le deformazioni dei rivestimenti dei fori di sondaggio presenti nella zona (Capitolo 7).

L'implementazione per stadi successivi dei diversi fattori che maggiormente incidono nel rapporto causa-effetto sul processo di deformazione in studio, ha permesso di indagare l'importanza di ciascuno di essi.

Questi fattori sono individuabili essenzialmente nel comportamento meccanico dei terreni presenti in sito, caratterizzati, come di anzi detto, da proprietà meccaniche scadenti, nella presenza di pressioni interstiziali significative che, se pure in modo non analiticamente indagato, sono a loro volta condizionate dagli eventi meteorici e, infine, nella interazione al piede con la frana di Serra dell'Acquara, ad ulteriore conferma della presenza in sito di meccanismi deformativi profondi.

La modellazione numerica del pendio Vadoncello ha confermato, benché solo a livello qualitativo, che i veloci spostamenti superficiali (scivolamento rotazionale e colata di terra), che si sono verificati in superficie dopo il 1993 e, in particolare, nel periodo Giugno-Ottobre 1995, sono collegati a spostamenti profondi molto lenti. Tali spostamenti sono intrinsecamente effetto delle scadenti caratteristiche di resistenza dei materiali presenti in sito, che li rendono inclini a deformazioni plastiche significative anche all'occorrenza di ridotte variazioni di carico. I cicli di carico-scarico dovuti ai frequenti eventi sismici che si manifestano, con accelerazioni dell'ordine di 0.01g, nell'area in cui ricade il pendio (Appennino Meridionale) probabilmente tengono vivo il meccanismo

deformativo profondo. Processi di infiltrazione, conseguenti ad eventi meteorici, dovuti essenzialmente alle caratteristiche di porosità in grande dei terreni fessurati, probabilmente contribuiscono ad attivare il meccanismo profondo così come questo è probabilmente attivato dalle modifiche morfologiche a loro volta originate dagli stessi spostamenti profondi, nonché dai trascinamenti al piede del pendio ad opera dei lenti spostamenti della frana Serra dell'Acquara.

L'ipotesi che il meccanismo profondo influenzi i meccanismi deformativi veloci in superficie appare quindi verosimile, per quanto non sia comunque possibile stabilire, neppure a seguito delle simulazioni numeriche effettuate, in quale misura questi processi superficiali dipendano effettivamente da quelli profondi e quanto, invece, essi dipendano, indipendentemente dall'attività deformativa profonda.

La metodologia di analisi adottata pare essere stata appropriata ad affrontare problemi di deformazione che investono zone di catena caratterizzate da assetti geologici idrogeologici e geotecnici notevolmente complessi, pur nei limiti qui dinanzi discussi.

BIBLIOGRAFIA

- A.G.I., Associazione Geotecnica Italiana (1985). Geotechnical properties and slope stability in structurally complex clay soils. *Geotechnical Engineering in Italy*, 2, pp.189-225.
- Bishop, A.W. (1967). Progressive failure, with special reference to the mechanism causing it. *Proceedings European Conference Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2, pp.3-10.
- Bonardi, G., D'Argenio, B. e Perrone, V. (1988). Carta geologica dell'Appennino meridionale alla scala 1:25.000. *Memorie della Società Geologica Italiana*, 41, p.1341.
- Burland, J.B. (1990). On the compressibility and the shear strength of natural clays. *Géotechnique*, 40, pp.329-378.
- Celico, P., Guadagno, F.M., Luise, G., Tescione, M. e Vallario, A. (1987). Idrogeologia del monte Polveracchio-Monte Rinone (Monti Picentini, Campania). *Mem. Soc. Geol. It.*, 37, pp.341-362.
- Cotecchia, F. e Chandler, R. J. (1998). One-dimensional compression of a natural clay: structural changes and mechanical effects. *Proceedings of the 2nd International Symposium on Hard Soils-Soft Rocks*, Napoli, Evangelista and Picarelli Eds, 1, pp.103-114.
- Cotecchia, F. e Chandler, R. J. (1999). A general framework for the mechanical of clays. Accepted by *Geotechnique*.
- Cotecchia, F., e Chandler, R.J. (1997). The influence of pre-failure behaviour of a natural clay. *Géotechnique*. Vol. 47(3), pp. 523-544.
- Cotecchia, V., Del Prete, M. e Tafuni, N. (1986). Effects of the earthquake of 23th November 1980 on pre-existing landslides in Senerchia area (Southern Italy). *Geologia Applicata e Idrogeologia*. Vol. 21(4), pp.177-198.
- Cotecchia, V., e Del Prete, M. (1984). The reactivation of large flows in the parts of Southern Italy affected by earthquake of November 1980, with reference to the evolutive mechanism. *Proc. Int. Symp. On Landslides*, 2, pp.33-38. Toronto.
- Cruden, D.M. e Varnes, D.J. (1996). Landslide types and processes. In A.K. Turner e R.L. Schuster (ed.), *Landslides. Investigation and mitigation*, pp. 36-75. Transportation Research Board, Special Report 247. Washington D.C..
- Cundall, P.A. (1976). Explicit Finite Difference Methods in Geomechanics. In *Numerical Methods in Engineering (Proceedings of the EF Conference on Numerical Methods in Geomechanics, Blacksburg, Virginia, 1976)*. Vol. 1, pp. 132-150.
- Cundall, P.A. (1982). Adaptive Density-Scaling for Time-Explicit Calculations. In *Proceedings of the 4th International Conference on Numerical Methods in*

- Geomechanics (Edmonton, 1982)*, pp. 23-26.
- D'Elia, B., Picarelli, L., Leroueil, S. e Vaunat, J. (1999). Geotechnical characterisation of slope movements in structurally complex clay soils and stiff jointed clays. *Rivista Italiana di Geotecnica*. Vol. 32(3), pp. 5-47.
- Del Gaudio, V., Calcagnile, G., Calvaruso, A., Pierri, P. e Trizzino, R. (1997). Attività sismica e franosità: il caso della frana di Serra dell'Acquara (Senerchia, Av). *Atti 16 Incontro Nazionale del Gruppo Nazionale di Geofisica*
- Del Gaudio, V., Trizzino, R., Calcagnile, G., Calvaruso, A. e Pierri, P. (1999). Landsliding in seismic areas: the case of the Acquara-Vadoncello Landslide (Southern Italy). In corso di stampa.
- Desai, C.S., e Christian, J.T. (1977). *Numerical Methods in Geomechanics*. New York: McGraw-Hill.
- EEC Project Report (1996). Landslide evolution controlled by climatic factors in a seismic area. Prediction methods and warning criteria: Final Technical Report. Project coordinator Prof. V. Cotecchia.
- Esu F. (1977). Behaviour of slopes in structurally complex formations. Proceedings International Symposium The Geotechnics of Structurally Complex Formations, Capri. Vol. 2, pp. 292-304.
- Fearon, R. (1998). The behaviour of a structurally complex clay from an italian landslide. PhD thesis, City University, London, pp.303.
- Fearon, R. e Coop, M.R. (1999). Reconstitution - what makes an appropriate reference material?. *Géotechnique*, in press.
- Guerriero, G., Olivares, L. e Picarelli, L. 1995. Modelling the mechanical behaviour of clay shales: some experimental remarks. *Colloquium on Chalk and Shales*, Brussels, 2 (1), pp.20-30.
- Hutchinson, J.N. (1988). General Report: Morphological and geotechnical parameters of landslides in realltion to geology and hydrogeology. *Proceedings 5th International Symposium on Landslides*, 1, pp.3-35.
- Janbu, N. e Senneset, K. (1979). Consolidation tests with continuous loading. *Proceedings of the 10th International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Stockholm, 1, pp.645-654.
- Leroueil, S. e Vaughan, P.R. (1990). The important and congruent effects of structure in natural soils and weak rocks. *Géotechnique*, 40 (3), pp.467-488.
- Malvem, L.E. (1969). Introduction. In *Mechanics of a Continuous Medium*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall.
- Marti, J. e Cundall, P.A. (1982). Mixed Discretisation Procedure for Accurate

- Solution of Plasticity Problems. *Int. J. Num. Methods and Anal. Methods in Geomechanics*, 6, pp.129-139.
- Nagtegaal, J.C., Parks, D.M. e Rice J.R. (1974). On Numerically Accurate Finite Element Solutions in the Fully-Plastic Range. *Comp. Mech. in Appl. Mech. & Eng.*, 4, pp.153-177.
- Ortolani, F. e Torre, M. (1981). Guida all'escursione nell'area interessata dal terremoto del 23 Novembre 1980. *Rend. Soc. Geol. Ital.*, 4, pp.173-214.
- Otter, J.R.H., Cassell, A.C. e Hobbs, R.E. (1966). Dynamic Relaxation (Paper No. 6986). *Proc. Inst. Civil Eng.*, 35, pp.633-656.
- Picarelli, L. (1998). Properties and behaviour of tectonised clay shales in Italy. *Proceedings of the 2nd International Symposium on Hard Soils-Soft Rocks*, Napoli, Evangelista and Picarelli Eds, 3, in press.
- Picarelli, L. e Olivares, L. (1998). "Ingredients for modelling the mechanical behaviour of intensely fissured clay shales". *Proceedings of the 2nd International Symposium on Hard Soils-Soft Rocks*, Napoli (Italy), 12-14 October 1998), Evangelista and Picarelli Eds. Vol. 2, pp.771-780
- Polemio, M. (1997). Rainfall and Senerchia landslides, southern Italy. *Proceedings 2nd Pan-American Symposium on Landslides, 2nd COBRAE*, Rio de Janeiro, pp.175-184.
- Polemio, M. (1996). Gli strumenti di monitoraggio idrogeologico continuo della frana Acquara-Vadoncello di Senerchia. CNR-CERIST, Bari, Rapporto Tecnico Interno, 41, pp.1-17.
- Polemio, M. e Trizzino, R. (1999). Hydrogeological, climatic and stability characterisation of the 1993 Senerchia Landslide (southern Italy). *Landslide News, Prevention Research Institute*, Kjoto, Japan, 12, pp.12-16.
- Santaloia, F., Cotecchia, F. e Polemio, M. (1998). Ground movements in highly tectonized soil slopes: the Vadoncello-Serra dell'Acquara landslides. *Proceedings of the 2nd International Symposium on Hard Soils-Soft Rocks*, Napoli (Italy), 12-14 October 1998), Evangelista and Picarelli Eds. Vol. 3 in press.
- Santaloia, F., Cotecchia, F. e Polemio, M. (1999). "Mechanics of a tectonized soil slope: influence of boundary conditions and rainfalls. Submitted to The Quarterly Journal of Engineering Geology.
- Sarma, S.K. (1973). Stability analysis of embankments and slopes. *Geotechnique*, 23(3), pp.423-433.
- Schofield, A. N. e Wroth, C.P. (1968). *Critical State Soil Mechanics*. Mc. Graw-Hill Book Co., London.

- Sella, M., Turci, C. e Riva, A., (1988). Sintesi geopetrolifera della Fossa Bradanica (avanfossa della catena appenninica meridionale). *Memorie della Società Geologica Italiana*, 41, pp.87-107.
- Starfield, A.M., e Cundall, P.A. (1988). Towards a Metodology for Rock Mechanics Modelling. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 25(3), pp.99-106.
- Viggiani, G. e Atkinson, J.H. (1995). Stiffness of fine grained soils at very small strains. *Geotechnique*, Vol. 45, N. 2, pp.249-265
- Wasowski, J. (1994). Preliminary analysis of the December 1993 Acquara-Vadoncello landslide. Campania region. CNR-CE.RI.S.T., Bari. *Rapp. Tecn. Int. N.40*, 13 p.
- Wasowski, J. (1995). The 1993 Acquara-Vadoncello landslide: detailed description of borehole stratigraphy. CNR-CE.RI.S.T., Bari. *Rapp. Tecn. Int. N.40*, 24 p.
- Wasowski, J. e Falco, P. (1996b). Misure della retrogressione della frana Acquara-Vadoncello nei pressi di Senerchia (AV): primi risultati. CNR-CE.RI.S.T., Bari. *Rapp. Tecn. Int. N.46*, 12 p.
- Wasowski, J. e Falco, P. (1996c). Retrogressive evolution of the Acquara-Vadoncello landslide in Senerchia (Southern Apennines)(extended abs.): *Proc. Int. Conf. "Prevention of Hydrogeological hazards: the role of scientific research"*. Alba (CN), pp.493-496.
- Wasowski, J. e Falco, P. (1996d). The 1993 Acquara-Vadoncello landslide: summary of subsurface field investigation (2nd phase) and detailed description of borehole stratigraphy. CNR-CE.RI.S.T., Bari. *Rapp. Tecn. Int. N.49*, 11 p.
- Wasowski, J. e Lasorsa, M. (1995). Primi risultati delle indagini geognostiche sulla frana di Acquara-Vadoncello del 1993. CNR-CE.RI.S.T., Bari. *Rapp. Tecn. Int. N.39*, 20 p.
- Wasowski, J. e Mazzeo, D. (1998). Some results of topographic monitoring of the Acquara- Vadoncello landslide, Italy. *8th International IAEG Congress*.
- Wasowski, J., e Falco, P. (1996a). Primi risultati delle indagini geostrutturali del margine est dei Monti Picentini nei pressi di Senerchia. CNR-CE.RI.S.T., Bari. *Rapp. Tecn. Int. N.45*, 18 p.
- Wilkins, M.L. (1964). Fundamental Methods in Hydrodynamics. In *Methods in Computational Physics*, Vol.3, pp.211-263. Alder et al., Eds. New York: Academic Press.