



CTG
Italcementi Group

Impianto idroelettrico di Olmo al Brembo
DIGA DI CASSIGLIO
APPESANTIMENTO CORPO DIGA
11- Indagini geostrukturali e geomeccaniche
sulla roccia di fondazione

**Impianto idroelettrico di Olmo al Brembo
DIGA DI CASSIGLIO
APPESANTIMENTO CORPO DIGA
11- Indagini geostrutturali e geomeccaniche
sulla roccia di fondazione**

CTG
Italcementi Group

Dott. F. BAILO e Dott. G. PARIS
Direzione Centrale Ingegneria
Servizio Geologico

Bergamo, 02/05/05



1. PREMESSA E CONCLUSIONI.....	3
2. INDAGINI GEOGNOSTICHE IN SITU	4
2.1 <i>Sondaggi a carotaggio continuo in roccia</i>	<i>4</i>
2.2 <i>Prove dilatometriche</i>	<i>5</i>
2.3 <i>Prove di permeabilità Lugeon.....</i>	<i>6</i>
3. TEST DI LABORATORIO.....	7
3.1 <i>Parametri fisici: determinazione della massa volumica apparente.....</i>	<i>7</i>
3.2 <i>Parametri meccanici di resistenza da prove di compressione monoassiale e triassiale</i>	<i>7</i>
3.3 <i>Parametri meccanici di deformabilità da prove di compressione monoassiale e triassiale</i>	<i>8</i>
3. CARATTERIZZAZIONE GEOSTRUTTURALE E GEOMECCANICA DELL'AMMASSO ROCCIOSO.....	9
3.1 <i>Rilievo delle discontinuità.....</i>	<i>9</i>
3.2 <i>Classificazione geomeccanica</i>	<i>11</i>

1. PREMESSA E CONCLUSIONI

La diga di Cassiglio (Italgen S.p.A) è ubicata nel comune omonimo in Val Brembana (BG), tra le q. 630 m e 610 m s.l.m. circa.

Si tratta di una diga a gravità massiccia, con pianta rettilinea e muratura in calcestruzzo. Lo sviluppo al coronamento è di 66,80 m, il ciglio sfiorante è a quota 626 m s.l.m., mentre il punto più depresso dell'alveo vicino al piede di valle della diga è posto a q. 610 m s.l.m. L'altezza di massima ritenuta del manufatto è di m 20,60.

Nei primi mesi del 2005 sono state effettuate indagini suppletive di carattere geotecnico sulla roccia di fondazione, comprendenti sondaggi a carotaggio continuo, test in situ nei fori degli stessi sondaggi (prove dilatometriche e Lugeon), test di laboratorio (prove fisiche, monoassiali e triassiali su campioni di roccia), ed infine un rilievo geostrutturale e geomeccanico di dettaglio con determinazione di RMR e GSI.

Tale studio, inserito tra i lavori di ristrutturazione dell'opera d'arte, che prevede l'ispessimento del paramento di monte in conformità con il progetto di adeguamento statico e funzionale, ha permesso di fornire al progettista i parametri geomeccanici indispensabili per la modellizzazione della nuova opera.

I carotaggi, distribuiti lungo la sezione d'imposta, hanno evidenziato per l'ammasso roccioso dolomitico un RQD mediamente attorno al 40%, con una zona particolarmente fratturata in corrispondenza del sondaggio S.4 (RQD=10%), realizzato in sponda sinistra. In tale settore, già bonificato in passato dalla Rodio, durante le prove Lugeon si sono anche raggiunti i valori più elevati di U.L.(8,33), che comunque indicano una permeabilità ridotta ($47,4 \times 10^{-7} m/s$) dell'ammasso roccioso. I moduli di deformabilità ricavati con il dilatometro in foro variano da un minimo di 3000 MPa per la roccia più fratturata (RQD=0-10%) ad un massimo di 7000 MPa per quella più integra (90-100%).

I campioni di laboratorio su spezzoni di carota hanno fornito un valore medio di massa volumica apparente di $2,81 \text{ g/cm}^3$ e una resistenza a compressione monoassiale pari a 51 MPa. Il modulo E_t medio ricavato dalle monoassiali risulta circa 18000 MPa, quello ricavato dalle triassiali 42000 MPa circa. L'analisi geostrutturale e geomeccanica ha evidenziato la presenza di 4 sistemi di discontinuità (di cui 3 aventi direzione quasi parallela alla diga ed uno ortogonale ad essa): l'ammasso roccioso risulta in generale poco anisotropo e dotato di discrete caratteristiche geotecniche. Ad esempio, i parametri attritivi ricavati tramite le classiche correlazioni empiriche di letteratura a partire da RMR e GSI mostrano, nell'ambito delle tensioni di progetto, angoli di picco d'ammasso compresi tra 62° e 60° circa; sulle discontinuità, molto scabre e generalmente poco alterate, gli angoli d'attrito calcolati sono di poco inferiori ($52-57^\circ$).

Il modulo elastico calcolato empiricamente è mediamente intorno a 7600 MPa. Fa eccezione una stretta fascia di roccia più fratturata in sponda sinistra, in corrispondenza del sondaggio S4, dove si ricava un modulo elastico di circa 3200 Mpa. Questi dati sono ben confrontabili con quelli ricavati tramite le prove dilatometriche ed in particolare un valore di 3000 Mpa può essere indicato cautelativamente come parametro di progetto.

I valori di coesione di picco sono rispettivamente 0.58 e 0.04 Mpa per la roccia normale e quella “fratturata” mentre le resistenze a compressione per i due tipi d’ammasso sono pari a 4.68 e 2.03 MPa.

2. INDAGINI GEOGNOSTICHE IN SITU

Le indagini geognostiche in situ hanno compreso:

- sondaggi
- prove di permeabilità Lugeon
- prove dilatometriche

2.1 Sondaggi a carotaggio continuo in roccia

Nell’Allegato 1 (So.Ge.Tec.) sono illustrati i mezzi meccanici, le procedure, l’ubicazione e le caratteristiche dei sondaggi effettuati. Si tratta di 5 sondaggi Ø 101 mm che, dalla passerella del coronamento, attraversano il corpo diga a distruzione di nucleo, continuano a carotaggio continuo presso il contatto calcestruzzo-roccia e penetrano abbondantemente nella roccia stessa di fondazione, sia della base (3 sondaggi verticali) che delle spalle (2 sondaggi inclinati).

Nella tabella di seguito sono riportati i sondaggi effettuati, le profondità del contatto manufatto-roccia di fondazione, la profondità totale raggiunta e l’inclinazione sulla verticale degli stessi.

Sondaggio	Profondità Contatto m	Profondità Totale m	Inclinazione °
S1	10,60	25	20 verso SE
S2	20,50	35	90
S3	20,50	35	90
S4	20,15	35	90
S5	15,20	30	40 verso W

La stratigrafia e le carote recuperate hanno messo in evidenza un contatto calcestruzzo-roccia privo di scollamenti e cavità, ben cementato e privo di alterazioni che lo possano rendere friabile e facilmente erodibile.

La roccia è rappresentata da dolomia, appartenente alla *Dolomia Principale* grigio-chiara di età triassica, con stratificazione non sempre presente e generalmente evidenziata da laminazioni sinsedimentarie inclinate circa 35°. Nei carotaggi oltre alla St, si evidenziano 2-3 sistemi di fratture principali variamente inclinate, generalmente chiuse e spesso sigillate da dolomite.

Ad intervalli irregolari si possono notare anche numerosi livelli brecciati, dallo spessore decimetrico, con clasti angolosi centimetrici ben cementati da dolomite (*dolomia brecciata*).

Nelle tabelle di fig. 1 e nel disegno 980.GEO.049 viene riportata la distribuzione dei valori di RQD lungo i sondaggi effettuati attraverso la roccia di fondazione. I valori mediamente sono compresi tra 68 e 32% circa. L’unica zona perforata con basso valore di RQD (0% nei primi 3 m sotto il contatto, in media 8,7% lungo i 15 m perforati) si ritrova nel settore del sondaggio S4. Qui la roccia

di fondazione, particolarmente fratturata, è stata già oggetto di bonifiche della Rodio nel 1989, che ne ha consolidato e impermeabilizzato i primi 3 m.

2.2 Prove dilatometriche

Le prove dilatometriche permettono la determinazione delle caratteristiche di deformabilità dell'ammasso roccioso entro i fori di sondaggio, attraverso una sonda che si fa aderire alle pareti e che si gonfia a vari livelli di pressione.

Nell'Allegato 2 (*Sial.Tec.Engineerig*) sono descritte le metodologie e le attrezzature per le prove dilatometriche e i relativi risultati. Le prove sono state precedute da un rilievo televisivo lungo tutti e 5 i sondaggi perforati per osservare le condizioni delle pareti del foro e scegliere gli intervalli più idonei per realizzare le dilatometrie. Si sono così scartati S4 e S1, dove l'acqua torbida impediva una valutazione visiva delle condizioni dei fori.

Le 10 prove programmate sono state effettuate nei sondaggi verticali S2 –S3 e nel sondaggio inclinato S5.

Nella tabella seguente sono elencati i sondaggi, le profondità e i valori medi dei moduli di deformabilità e di elasticità trovati in base agli spostamenti dei 3 trasduttori potenziometrici della sonda (scartando i risultati del 1° gradino di pressione).

Sondaggio	Prova	Profondità m	Modulo di Deformabilità MPa	Modulo Elastico MPa
S2	1	32,70	6810	13565
	2	29,30	4869	9729
	3	24,50	4543	13575
S3	1	24,50	4538	10929
	2	23,50	3758	10685
	3	22,00	5943	16120
S5	1	28,50	3326	3589
	2	26,50	3002	9240
	3	23,70	6094	10930
	4	22,50	7370	8107

Il modulo di deformabilità è quello misurato durante il carico di una pressione, registra la deformazione della roccia ed è quello generalmente più usato. Il modulo elastico è quello misurato durante lo scarico di una pressione ed indica il recupero della roccia, ossia la sua capacità di ritornare alla situazione originaria.

Diagrammati con i valori di RQD, i moduli mostrano un ben preciso trend, variabile con la qualità della roccia, andando da circa 3000 MPa a 7000 MPa per la deformabilità durante il carico e da circa 3000 MPa a 16000 MPa per l'elasticità durante lo scarico. In particolare dove la roccia è compatta si ottengono i valori più elevati, dove la roccia è fratturata si hanno i valori più bassi.

2.3 Prove di permeabilità Lugeon

Nei fori di sondaggio, in avanzamento durante la perforazione, si sono effettuate 25 prove Lugeon (5 prove per ogni sondaggio) in tratti di 3 m di foro, partendo dal contatto calcestruzzo-roccia di fondazione. Le procedure e i risultati sono riportati nell'Allegato 1 (*So.Ge.Tec.*)

La prova Lugeon è impiegata per la valutazione della permeabilità o anche solo della fatturazione degli ammassi rocciosi, il cui potere di assorbimento dell'acqua, immessa ad almeno 5 livelli di pressione in tratti di foro isolati, vengono tramutati in Unità Lugeon. Questa è definita dalla portata d'acqua in litri al minuto assorbita da un tratto di foro di lunghezza 1 m alla pressione di 10 kg/cm². Una Unità Lugeon (U.L.) vale circa 10⁻⁷ m/sec.

Nella tabella seguente sono riportati i sondaggi, la profondità di prova, i valori delle U.L., quelli della permeabilità K e il tipo di flusso che si verifica.

Sondaggi	Prova Lugeon	Profondità m	U.L.	K 10 ⁻⁷ m/sec	Tipo di flusso
S1	k1	10-13	0	-	-
	k2	13-16	0	-	-
	k3	16-19	0	-	-
	k4	19-22	0	-	-
	k5	22-25	0	-	-
S2	k1	20-23	1,07	2,977	Dilavamento con debole dilatazione
	k2	23-26	2,83	9,040	Dilavamento con debole dilatazione
	k3	26-29	4,17	13,490	Dilavamento con debole dilatazione
	k4	29-32	0	-	-
	k5	32-35	0	-	-
S3	k1	20-23	0	-	-
	k2	23-26	0	-	-
	k3	26-29	0,10	0,3418	Moto laminare
	k4	29-32	0,50	1,548	Moto laminare
	k5	32-35	0	-	-
S4	k1	20-23	8,33	47,450	Moto turbolento
	k2	23-26	1,67	8,291	Moto turbolento
	k3	26-29	4,93	15,300	Moto laminare
	k4	29-32	1,33	5,684	Moto turbolento
	k5	32-35	1,27	4,259	Moto turbolento tendente al laminare
S5	k1	16,5-18	0,87	1,232	Moto turbolento tendente al laminare
	k2	18-21	2,80	6,123	Moto laminare
	k3	21-24	0,80	2,250	Laminare con debole dilatazione
	k4	24-27	0,77	2,311	Laminare con debole dilatazione
	k5	27-30	3,33	19,730	Moto turbolento

I valori di K risultano molto bassi e indicano che la roccia, anche quando molto fratturata, è caratterizzata da fratture chiuse e pressoché impervie.

Nel disegno 980.GEO.049 i dati Lugeon (U.L.) sono comparati con quelli riferibili alla qualità dell'ammasso (RQD). Si noti il buon accordo tra i dati, con U.L. direttamente proporzionale al grado di fratturazione della roccia.

In particolare si osserva una generale buona condizione idraulica della zona d'imposta della diga, soprattutto in spalla destra. I valori U.L. più elevati (4,93 e 8,33) riguardano la zona del sondaggio S4, che è anche la più fratturata e già sottoposta a consolidamento. Non si raggiungono in ogni caso valori preoccupanti e confermano la scarsa permeabilità dell'ammasso.

3. TEST DI LABORATORIO

Su 18 campioni prelevati dalle cassette delle carote relative ai sondaggi S1, S2, S3 e S5 sono state realizzate alcune prove di laboratorio. Dalle carote del sondaggio S4 non è stato possibile il prelievo di nessun provino, dato il basso RQD delle carote.

Dei campioni avviati al laboratorio 15 appartengono alla dolomia, 3 alla "dolomia brecciata".

Le prove di laboratorio consistevano:

- *determinazione della massa volumica apparente (n°18)*
- *prove monoassiali (n°12)*
- *prove triassiali (n°6).*

La finalità era quella di ottenere dati validi per una caratterizzazione fisica e meccanica della roccia. Nell' Allegato 2 (*Sial.Tec. Engineering*) sono illustrate le metodologie ed i risultati ottenuti.

3.1 Parametri fisici: *determinazione della massa volumica apparente*

Questo parametro fisico si è determinato su tutti i campioni. Si tratta del peso di volume, dove alla massa solida si somma quella dei vuoti. Non è un peso specifico, ma una densità, il cui valore medio è $2,81 \text{ g/cm}^3$ ($2,78 \text{ g/cm}^3$ per il litotipo brecciato).

Dato il tipo di roccia, si ritiene che questo valore medio sia rappresentativo del peso dell'ammasso.

3.2 Parametri meccanici di resistenza da prove di compressione monoassiale e triassiale

Le caratteristiche di resistenza della roccia, come il carico di rottura, sono state valutate con 12 prove monoassiali e 6 triassiali a deformazione controllata. Le resistenze triassiali dipendono dalla pressione di confinamento (8 e 16 MPa) che viene man mano applicata al provino.

Nella Tabella seguente si riportano pertanto, per i due tipi di roccia trovati, dolomia e dolomia brecciata, i soli valori medi del carico di rottura di picco e residuo della compressione monoassiale. I due litotipi dimostrano di avere caratteristiche di resistenza meccanica del tutto simili.

Litotipo	Resistenza a compressione monoassiale MPa	
	Resistenza di picco σ_p	Resistenza residua σ_{res}
Dolomia	51,21	4,93
Dolomia brecciata	47,22	3,15

3.3 Parametri meccanici di deformabilità da prove di compressione monoassiale e triassiale

I parametri di deformabilità sono stati ricavati strumentando i provini sottoposti alle prove di compressione mono e triassiale. In particolare si sono calcolati i valori del modulo secante e tangente delle curve di compressione e dei rispettivi coefficienti di Poisson.

Di seguito sono riportati i valori medi dei moduli e dei coefficienti, che caratterizzano le rocce della fondazione:

Litologia	Compressione Monoassiale				Compressione Triassiale			
	Modulo E_t	Modulo E_s	ν_t	ν_s	Modulo E_t	Modulo E_s	ν_t	ν_s
	MPa	MPa			MPa	MPa		
Dolomia	17995	6554	0,34	0,25	46267	31311	0,43	0,28
Dolomia brecciata	15661	5303	0,37	0,18	-	-	-	-

Anche dal punto di vista della deformabilità si nota che tra dolomia e dolomia brecciate non c'è gran diversità. Le marcate differenze che si possono notare tra i valori delle triassali e quelli delle monoassiali, sono invece imputabili alla presenza nei provini di numerosi giunti, che hanno fortemente influenzato il risultato delle prove.

Il disturbo è stato ridimensionato nelle triassiali dalla pressione di contenimento fornita al campione.

Nella tabella della pagina successiva compare un elenco completo di tutte le misure dei moduli di deformazione e dei coefficienti di Poisson ottenuti con le prove monoassiali e triassiali per i vari sondaggi.

I parametri elencati mostrano una variabilità legata alla qualità della roccia, ossia alla sua fratturazione o alla variazione di composizione litologica. In questo caso vista la sostanziale omogeneità di comportamento tra le due litologie, la variazione dei moduli tra un sondaggio e l'altro e a diversa profondità, si riferisce come già detto alla microfratturazione, più sviluppata in certi settori che in altri.

Sondaggi	Profondità m	Litologia	Compressione Monoassiale				Compressione Triassiale			
			Modulo E_t	Modulo E_s	ν_t	ν_s	Modulo E_t	Modulo E_s	ν_t	ν_s
			MPa	MPa	-	-	MPa	MPa		
S1	16,72	Dolomia	7.313	3.310	Nd	0,25				
	17,45	Dolomia brecciata	31.448	8.971	Nd	0,18				
	19,40	Dolomia	18.891	6.698	Nd	0,27				
	19,64	Dolomia					40.130	32.571	0,35	0,18
	21,07	Dolomia	29.213	9.131	Nd	0,32				
	21,33	Dolomia	32.827	10.170	Nd	0,17				
	22,34	Dolomia					45.955	35.100	nd	0,32
	22,85	Dolomia	15.730	7.716	0,34	0,25				
	24,15	Dolomia					61.425	34.191	0,45	0,26
	24,40	Dolomia					49.213	31.602	0,49	0,29
S2	29,27	Dolomia					28.172	15.096	0,40	0,28
S3	21,10	Dolomia					52.708	39.307	0,46	0,37
S5	17,29	Dolomia brecciata	5.191	2.692	0,38	0,22				
	17,57	Dolomia brecciata	10.345	4.247	0,35	0,14				
	20,74	Dolomia	10.963	4.635	Nd	0,32				
	22,11	Dolomia	28.245	10.521	Nd	0,19				
	25,51	Dolomia	10.932	4.031	0,33	0,17				
	25,79	Dolomia	7.843	2.800	Nd	0,35				

3. CARATTERIZZAZIONE GEOSTRUTTURALE E GEOMECCANICA DELL'AMMASSO ROCCIOSO

3.1 Rilievo delle discontinuità

Un rilievo geostrutturale di dettaglio è stato eseguito in corrispondenza dello sbarramento, sugli affioramenti rocciosi presenti in entrambe le sponde vallive. Esso ha portato alla definizione dell'assetto strutturale della sezione d'imposta alla scala mesoscopica, permettendo di evidenziare i principali sistemi di discontinuità'.

Di questi sono stati ricavati i seguenti parametri geostrutturali e geomeccanici:

- a) Giacitura (Immersione e Inclinazione);
- b) Spaziatura (in centimetri);
- c) Persistenza lineare (in metri);
- d) Apertura (in millimetri);

- e) Tipo di terminazione;
- f) Riempimento;
- g) Alterazione;
- h) Andamento del giunto;
- i) Rugosità'.

Nei DWG 980.GEO.050-51 sono riportati i diagrammi equiareali di Schmidt con i poli, le isodensità e i cerchi massimi dei piani di discontinuità rilevati sulle 2 sponde, mentre gli stereogrammi di DWG 980.GEO.052 considerano complessivamente tutte le giaciture delle discontinuità rilevate.

Utilizzando un criterio statistico di frequenza sui vari reticoli, i **più importanti e ricorrenti sistemi di discontinuità** sono risultati i seguenti (Foto1-5):

$$St = 220^\circ/40^\circ$$

$$K1 = 60^\circ/50^\circ$$

$$K2 = 313^\circ/73^\circ$$

$$K3 = 218^\circ/65^\circ$$

Fra queste, le famiglie St, K1 e K2 si rilevano con continuità nell'ammasso roccioso, mentre la famiglia K3 localmente scompare. La famiglia K2 risulta quasi ortogonale alla diga, mentre le altre sono circa in direzione con essa. A tal proposito si osservi la mappa geologica della sezione d'imposta riportata in DWG 980.GEO.053 con gli stereogrammi dei cerchi massimi relativi alle famiglie di giunti rilevate sulle due singole sponde ed un diagramma a rosa di tutte le discontinuità. Le principali caratteristiche geomeccaniche di tali famiglie sono riportate nella tabella riassuntiva di fig.2.

Per quanto riguarda la **spaziatura**, tutte le famiglie di discontinuità sono caratterizzate da valori modali dell'ordine di poche decine di centimetri. Nelle tabelle delle figg.3-4 compaiono degli istogrammi derivanti da stendimenti sul terreno, con le spaziature dei singoli sistemi di giunti, nonché con le spaziature risultanti dalla combinazione di tutti i sistemi di giunti, come suggerito dalle normative ISRM.

Le famiglie St, K2 e K3 si distinguono inoltre nella sezione d'imposta per la presenza di rari giunti più importanti (non rilevati negli stendimenti) aventi spaziature comprese tra 5 e 20 m.

L'analisi della **persistenza** dei giunti ha messo in evidenza che la maggior parte dei giunti appartenenti alle varie famiglie si estendono tra 1 e 5 m. I giunti più importanti si estendono fino a una quindicina di metri quando appartengono alla famiglia K1, mentre sono lunghi alcune decine di metri quando appartengono a St, K2 e K3 .

L'**apertura** delle discontinuità è da considerarsi sempre serrata per la St e con aperture max millimetriche per i giunti delle altre discontinuità, soprattutto in corrispondenza delle fratture più persistenti.

Il **riempimento** spesso è assente, oppure rappresentato da dolomite. In rarissimi casi, nelle fratture più importanti dei sistemi K2-K3 si osserva talora cataclasite con spessore di pochi millimetri.

L'**alterazione** dei giunti è generalmente da bassa a media, con ossidazioni marcate presenti solo sui giunti più importanti e persistenti. I valori di JCS mostrano valori medi intorno a 40 Mpa.

L'**andamento** delle discontinuità è solitamente ondulato, la **rugosità** generalmente elevata con JRC compresa tra 14 e 16.

Per quanto riguarda l'**acqua** non sono state mai osservate venute d'acqua d'alcun genere né a monte né a valle della diga.

In merito alle **caratteristiche attrittive dei giunti**, per ottenere un dato di riferimento si può far ricorso alla nota legge di Barton che fornisce la resistenza di un giunto di roccia in funzione di alcuni indici già utilizzati per la classificazione tecnica dell'ammasso roccioso.

Il criterio di Barton può essere espresso dalle equazioni:

$$\tau_A = \sigma \tan [\phi_b + \text{JRC} \text{Log} (\text{JCS} / \sigma)]$$

$$\tau_B = \sigma \tan (70^\circ)$$

$$\tau = \text{minimo} (\tau_A , \tau_B)$$

dove è:

τ : resistenza al taglio

σ : tensione normale effettiva agente sulla frattura

ϕ_b : angolo di attrito di base (angolo residuo) della roccia che costituisce le pareti della frattura

JRC: "joint roughness coefficient", parametro che quantifica la scabrezza della frattura

JCS: "joint wall compression strength" dipendente dal grado di alterazione delle pareti del giunto

I valori di JRC e di JCS sono stati ricavati utilizzando in campagna rispettivamente il Pettine di Barton e lo sclerometro di Schmidt.

Nelle figg.5-8 si fornisce una rappresentazione grafica del criterio di resistenza di Barton, applicato ai sistemi di discontinuità St e K1-K3 riconosciuti nell'ammasso roccioso. Nei grafici viene rappresentata anche un'interpolazione lineare nel campo delle tensioni reputate significative nel caso in oggetto (0-1 Mpa). La rappresentazione lineare risulta la più immediata, facendo riferimento ai noti parametri del criterio di resistenza di Mohr Couloumb. Accanto ai grafici vengono riportati i parametri corrispondenti alle rappresentazioni lineari.

In prima analisi, senza considerare le caratteristiche di coesione dei giunti, si può osservare che i giunti possiedono elevate proprietà attrittive, con angoli compresi tra 52° e 57°.

3.2 Classificazione geomeccanica

Per definire gli indici di qualità dell'ammasso roccioso è stata utilizzata la ben nota classificazione geomeccanica Rock Mass Rating (RMR) di Bieniawski (1989).

Tale classificazione si basa sulla definizione dei seguenti parametri:

- Resistenza a compressione monoassiale della roccia intatta C_0 ;
- RQD: indice di recupero percentuale modificato;
- Spaziatura delle discontinuità;
- Condizioni delle discontinuità (persistenza lineare, grado di separazione, rugosità, riempimenti, alterazione delle superfici);
- Condizioni idrauliche;
- Orientazione delle discontinuità in rapporto alla direzione dello scavo o del versante.

A ciascuno di tali parametri l'Autore assegna un punteggio (rating), la cui somma definisce l'indice RMR che permette di suddividere gli ammassi rocciosi in cinque classi qualitative.

Nel caso in oggetto si è voluto assegnare un rating differente a seconda che l'ammasso roccioso si trovi in buone condizioni o risulti affetto da maggior fratturazione.

In merito all'indice da attribuire a C_0 per la roccia intatta (*RMR1*), è stato considerato un valore di 51 Mpa, come risultato dalle prove di compressione monoassiale.

Per quanto riguarda la valutazione di RQD (*RMR2*, vedi tabella di fig.1 e DWG 980.GEO.049) è stato assunto un valore del 40% per le zone buone e del 10% per quelle più fratturate (sponda sinistra sondaggio S.4).

Per le spaziature (*RMR3*) sono state scelte quelle comprese tra 6 e 20 cm per l'ammasso roccioso "sano" e minori di 6 cm per l'ammasso "fratturato".

Le condizioni dei giunti (*RMR4*) sono da buone a molto buone nel caso generale, e discrete nella roccia fratturata.

Per le condizioni idrauliche (*RMR5*), si è scelta la situazione peggiore, cioè quella di roccia "sommersa".

Infine nella valutazione della correzione dei giunti (*RMR6*), è stato assegnato un rating corrispondente ad una orientazione "sfavorevole".

I risultati di RMR sono riportati nelle tabella di fig.9. L'ammasso roccioso viene classificato come scadente ($RMR = 32$), e molto scadente nel caso in cui sia fratturato ($RMR = 15$). GSI vale 57 nel primo caso e 40 nel secondo.

Nella stessa tabella vengono riportati anche i valori di GSI (Hoek), ϕ e C dell'ammasso roccioso, ottenuti con classiche correlazioni empiriche di letteratura (Beniawski e Hoek). Per ricavare ϕ , si è fatto uso dei diagrammi delle figg.10-11, ove si fornisce per i due tipi di ammasso roccioso una rappresentazione grafica del criterio di resistenza di Hoek e Brown, coniugando il criterio lineare di resistenza di Mohr Coulomb come fatto in precedenza per i giunti.

Gli angoli d'attrito di picco sono pari a 62° e 60° circa, rispettivamente per l'ammasso "sano" e "fratturato", e sono di poco superiori ai valori di ϕ ricavati lungo le discontinuità ($52-57^\circ$).

I valori di coesione di picco sono rispettivamente 0.58 e 0.27 Mpa mentre le resistenze a compressione d'ammasso sono pari a 4.68 e 2.03 MPa.

I moduli elastici infine sono compresi fra 7631 Mpa (roccia sana) e 2868 Mpa (roccia fratturata), anche questi ben in accordo con quelli ricavati tramite le prove dilatometriche.

FIGURE

Fig. 1: Valutazione RQD sui carotaggi in roccia;

Fig.2 Caratteristiche geomeccaniche dei principali sistemi di discontinuità all'interno della roccia di fondazione;

Fig.3 Istogrammi spazature dei principali sistemi di discontinuità;

Fig.4 Istogrammi spazature medie totali delle discontinuità nell'ammasso roccioso;

Fig.5-8: Stima della resistenza al taglio sulle diverse famiglie di discontinuità (Barton);

Fig.9: Tabella dei coefficienti di valutazione RMR e GSI;

Fig.10-11: Curve caratteristiche dell'ammasso roccioso (Hoek-Brown)con stima dei parametri di resistenza e deformabilità.

FOTO

Foto 1: Vista d'insieme della spalla destra della diga; andamento bancate St;

Foto 2: Vista d'insieme della spalla sinistra: andamento bancate St;

Foto 3: Sponda dx: discontinuità del sistema K2;

Foto 4: Sponda dx: discontinuità dei sistemi K1 ed St;

Foto 5: Sponda dx valle diga: discontinuità dei sistemi K1 e K3 .

DISEGNI

DWG.980.GEO.049: Ubicazione sondaggi e prove in foro RQD e UL.

DWG.980.GEO.050: Proiezioni stereografiche delle discontinuità dei poli rilevate in sponda dx;

DWG.980.GEO.051: Proiezioni stereografiche delle discontinuità dei poli rilevate in sponda sx;

DWG.980.GEO.052: Proiezioni stereografiche complessive delle discontinuità dei poli;

DWG.980.GEO.053: Rilievo geologico e geostrutturale della roccia di fondazione.

ALLEGATI

All.1: Sondaggi geognostici e prove di permeabilità Lugeon (SO.GE.TEC.);

All.2: Prove dilatometriche e di laboratorio su campioni di roccia (SIAL.TEC.ENGINEERING);

DIGA DI CASSIGLIO - SEZIONE D'IMPOSTA (sponda DX + sponda SX)
FORMAZIONE ROCCIOSA: DOLOMIA PRINCIPALE

CLASSE AMMASSO ROCCIOSO: R1 (R2)

ALTERAZIONE MATERIALE ROCCIA: W1-W2

CARATTERISTICHE GEOMECCANICHE DEI SISTEMI DI DISCONTINUITA' RICONOSCIUTI

Sistema	Giacitura media (imm./incl.)	Spaziatura (cm) moda	Persistenza lineare (m)	Apertura	Terminazione	Riempimento	Alterazione disc.	Andamento	Acqua	Rugosità	JRC	JCS σ_c (MPa)
St	220°/40°	6-20	0.5-15 (>20)	GMC	DD-XD (XX)	- Do	LA (MA)	O	-	R-MR	16	(r = 25) 41
K1	60°/50°	6-20	0.5-15	GMC-GC	DD-XD	- Do	LA (MA)	O	-	R-MR	16	(r = 27) 48
K2	313°/73°	6-20	1.5->20	GMC-GC	XX-XD-DD (F)	- Do (Ct)	LA-MA	O	-	R-MR	14 (Sk)	(r = 25) 41
K3	218°/65°	6-20	1 - >15	GMC-GC	XX-XD-DD (F)	- Do (Ct)	LA-MA	O	-	R-MR	14 (Sk)	(r = 23) 38

LEGENDA

Apertura

GMC = Giunti molto chiusi: < 0.1 mm
 GC = Giunti chiusi: 0.1-1 mm
 GMOA = Giunti mod. aperti: 1-5 mm
 GA = Giunti aperti: > 5mm

Riempimento

Ca = Calcite
 Do=Dolomite
 Ag =Argilla
 Ct = Cataclaste

Rugosità

MR = Molto rugoso
 R = Rugoso
 DR = Debolmente rugoso
 L = Liscio
 Sk = Slickensides

Alterazione discontinuità

F = Fresca
 Roccia senza segni visibili di alterazione
 LA = Leggermente Alterata
 Roccia con leggera decolorazione
 MA = Mediamente alterata
 La superficie è alterata ma la roccia sotto la superficie è fresca e non decolorata
 AA = Altamente alterata
 La roccia è alterata sia in superficie che in profondità ma è sana lontano dalle discontinuità
 CA = Completamente alterata
 La roccia sia vicino che lontano dalle discontinuità è completamente alterata

Terminazione

x = Non visibili sull'affioramento
 d = Contro una discontinuità
 r = In roccia
 F = Faglia

Acqua

I=Impossibile
 A=Asciutta
 T=Tracce
 Classe ammasso roccioso

Alterazione materiale roccia

W1 fresca
 Nessuna traccia di alterazione. Possibile decolorazione delle superfici delle discontinuità maggiori

W2

leggermente alterata
 La decolorazione che può essere presente ovunque, indica alterazione sul materiale roccia e/o sulle superfici delle discontinuità. Materiale localmente più debole della condizione W1

W3

mediamente alterata
 Meno del 50% del materiale roccia è decomposto e/o disgregato in una terra. In modo discontinuo è presente roccia fresca o decolorata.

W4

altamente alterata
 Più del 50% del materiale roccia è decomposto e/o disgregato in una terra. In modo discontinuo è presente roccia fresca o decolorata.

W5

completamente alterata
 Tutto il materiale roccia è decomposto e/o disgregato in una terra. La tessitura originale dell'ammasso roccioso è per lo più riconoscibile.

DIGA DI CASSIGLIO - SPAZIATURA DELLE DISCONTINUITA'

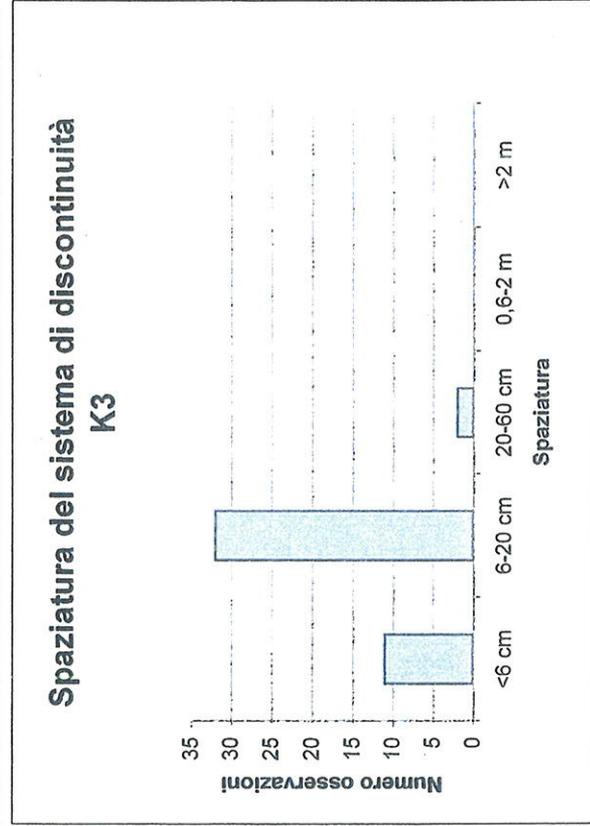
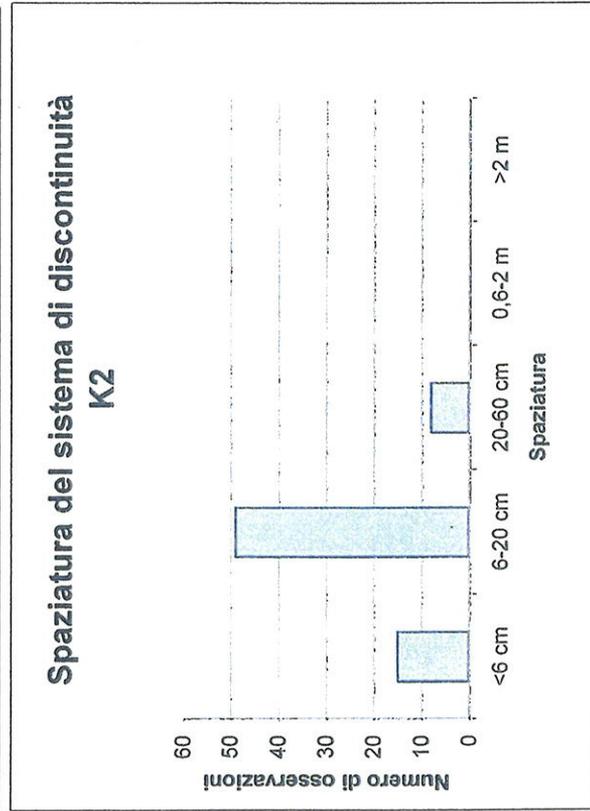
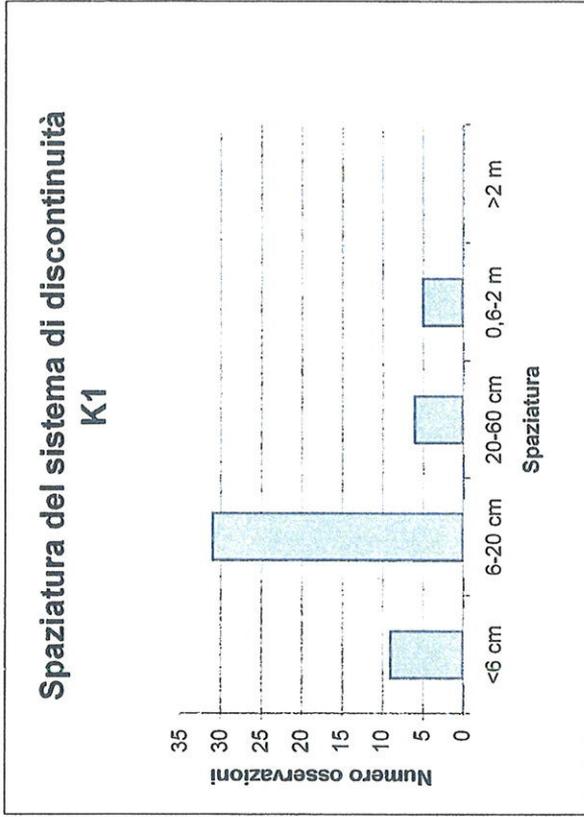
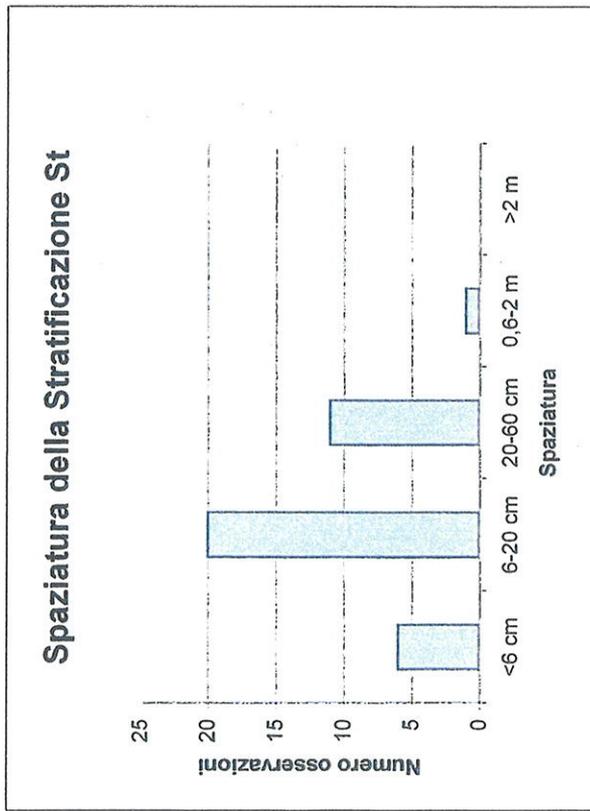


Fig.3

DIGA DI CASSIGLIO - SPAZIATURA DELLE DISCONTINUITA'

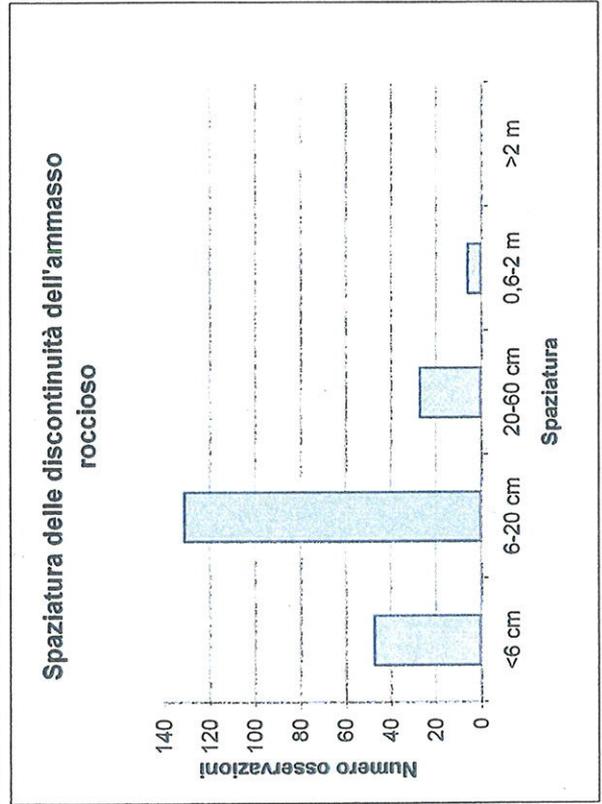
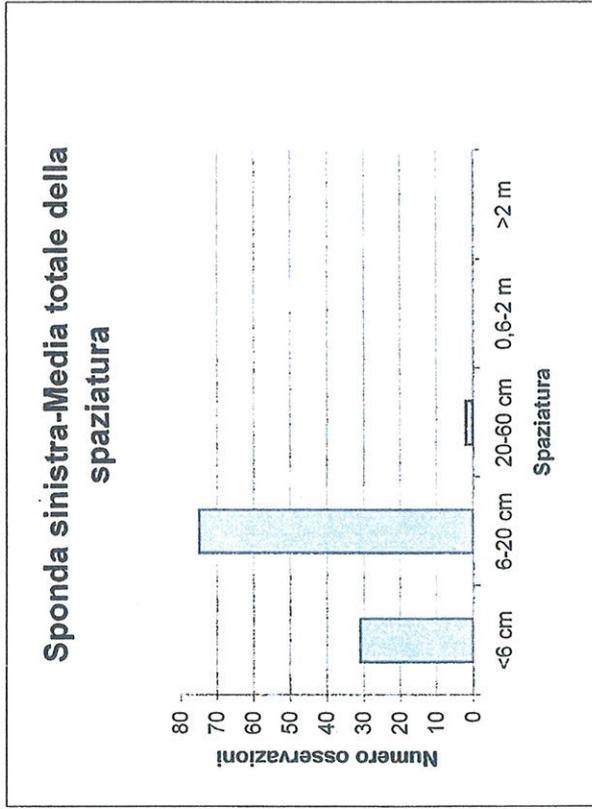
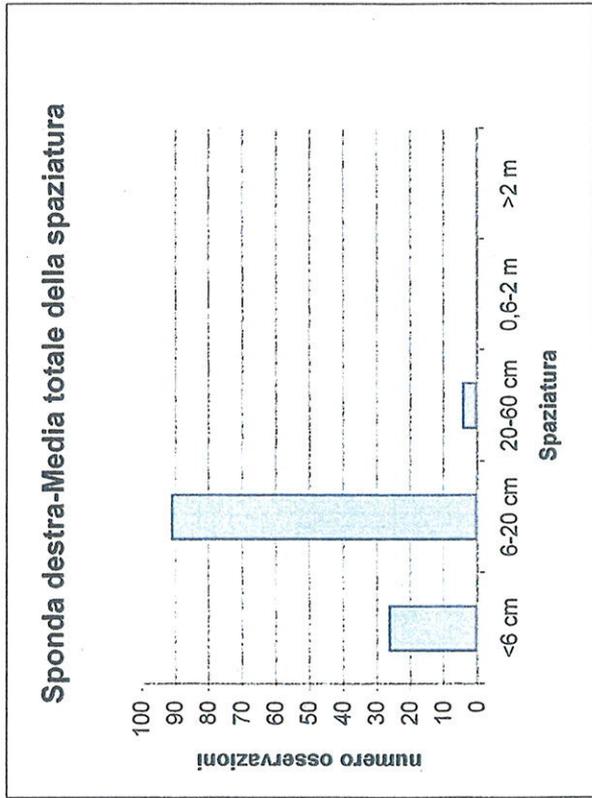


Fig.4

ITALGEN
 DIGA DI CASSIGLIO
 STIMA DELLA RESISTENZA AL TAGLIO DELLE DISCONTINUITA' DELLA ROCCIA SI FONDAZIONE

Famiglia di Discontinuita': **K1**
 Unità geomeccanica: **DOLOMIA PRINCIPALE**
 Litotipo: **DOLOMIA**

Criterio di Barton

JCS	480 kg/cm ²
JRC	16
ϕ_{base}	30 °
c	0 kg/cm ²

Criterio di Mohr-Coulomb equivalente

ϕ (1)	56.79 °
c (1)	0 kg/cm ²
sigma (1)-(2)	0.00 kg/cm ²
ϕ (2)	56.8 °
c (2)	0 kg/cm ²

(la curva di Barton è approssimata con una spezzata bilineare)

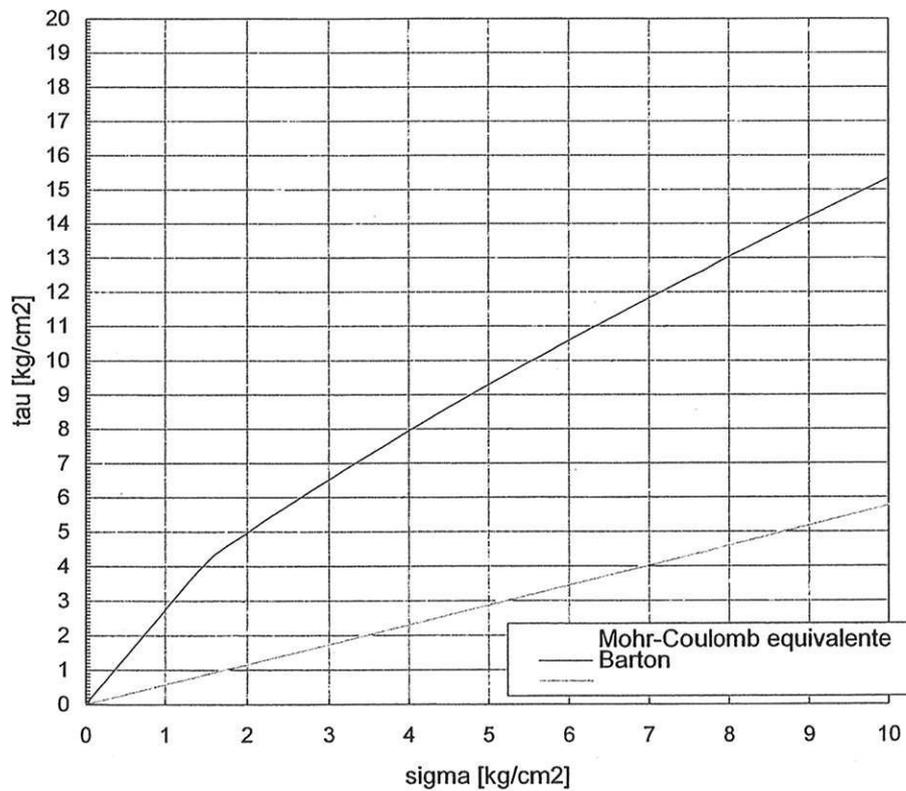


Fig.6

ITALGEN
 DIGA DI CASSIGLIO
 STIMA DEI PARAMETRI MECCANICI DELLA ROCCIA DI FONDAZIONE

Unità geomeccanica: **DOLOMIA FRATTURATA**

Classificazione tecnica dell'ammasso roccioso

GSI 42

Materiale roccioso alla scala del provino di laboratorio

Resistenza a compressione uniassiale 51 MPa
 Parametro di resistenza m del criterio di Hoek e Brown 35

Ammasso roccioso

Parametro di danneggiamento per la tecnica di scavo [0 no danno, 1 max danno] 0
 Parametro di resistenza m del criterio di Hoek e Brown (picco) 4.410
 Parametro di resistenza s del criterio di Hoek e Brown (picco) 0.001589
 Parametro di resistenza m del criterio di Hoek e Brown (residuo) 2.205
 Parametro di resistenza s del criterio di Hoek e Brown (residuo) 0.000064
 Resistenza a compressione uniassiale ammasso (picco) 2.03 MPa
 Resistenza a compressione uniassiale ammasso (residuo) 0.41 MPa
 Angolo attrito di picco criterio linearizzato 60.0 °
 Coesione di picco criterio linearizzato 0.27 MPa
 Angolo attrito residuo criterio linearizzato 56.5 °
 Coesione residua criterio linearizzato 0.06 MPa
 Modulo elastico ammasso 3218 MPa

criterio di resistenza dell'ammasso roccioso

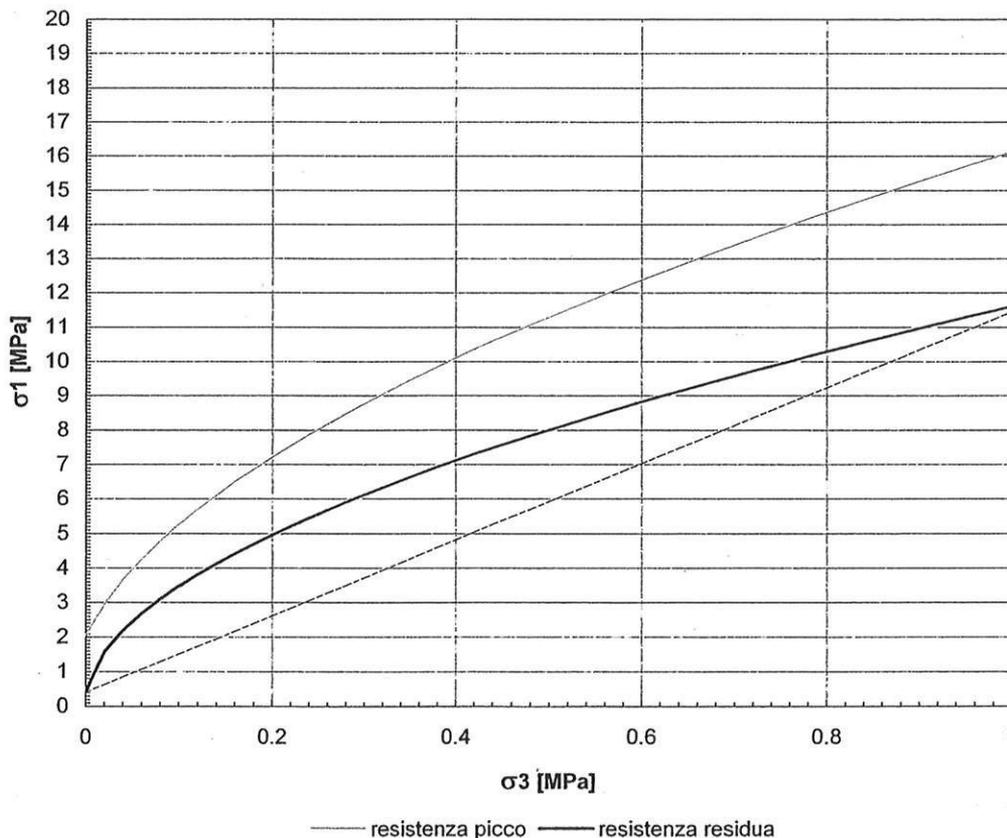


Fig.11



Foto 1: Diga di Cassiglio: vista d'insieme della spalla destra. Si notino le grandi bancate di Dolomia Principale che immergono verso l'invaso artificiale. .



Foto 2: Diga di Cassiglio: vista d'insieme della spalla sinistra. Viene evidenziato l'andamento delle bancate di dolomia che immergono versol'invaso.



Foto 3: Diga di Cassiglio, sponda dx: discontinuità del sistema K2.

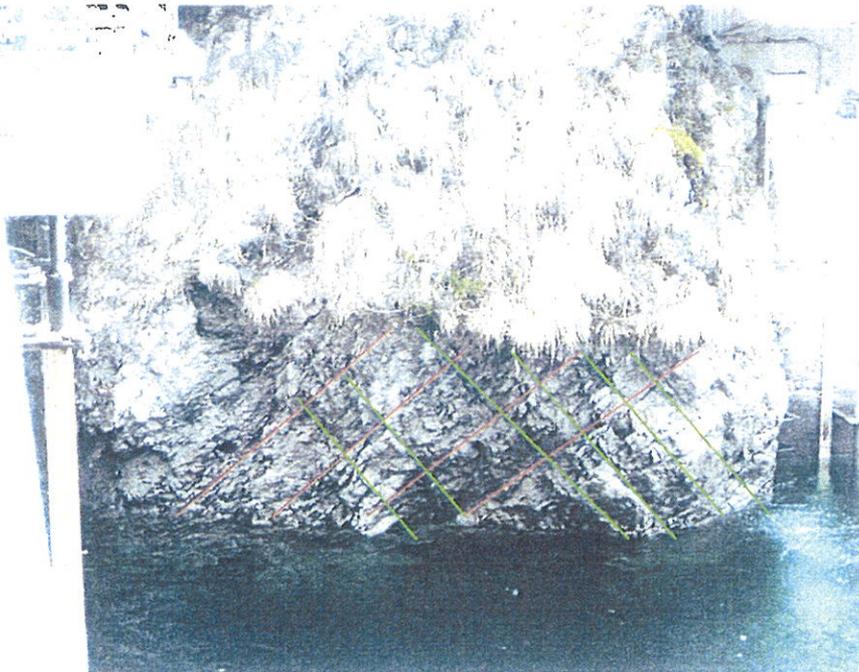


Foto 4: Sponda dx, discontinuità dei sistemi K1 (rosso) e St (verde).



Foto 5: Diga di Cassiglio, sponda dx valle diga: discontinuità dei sistemi K1 (rosso) e K3 (azzurro).

1

2

3

4

5

A

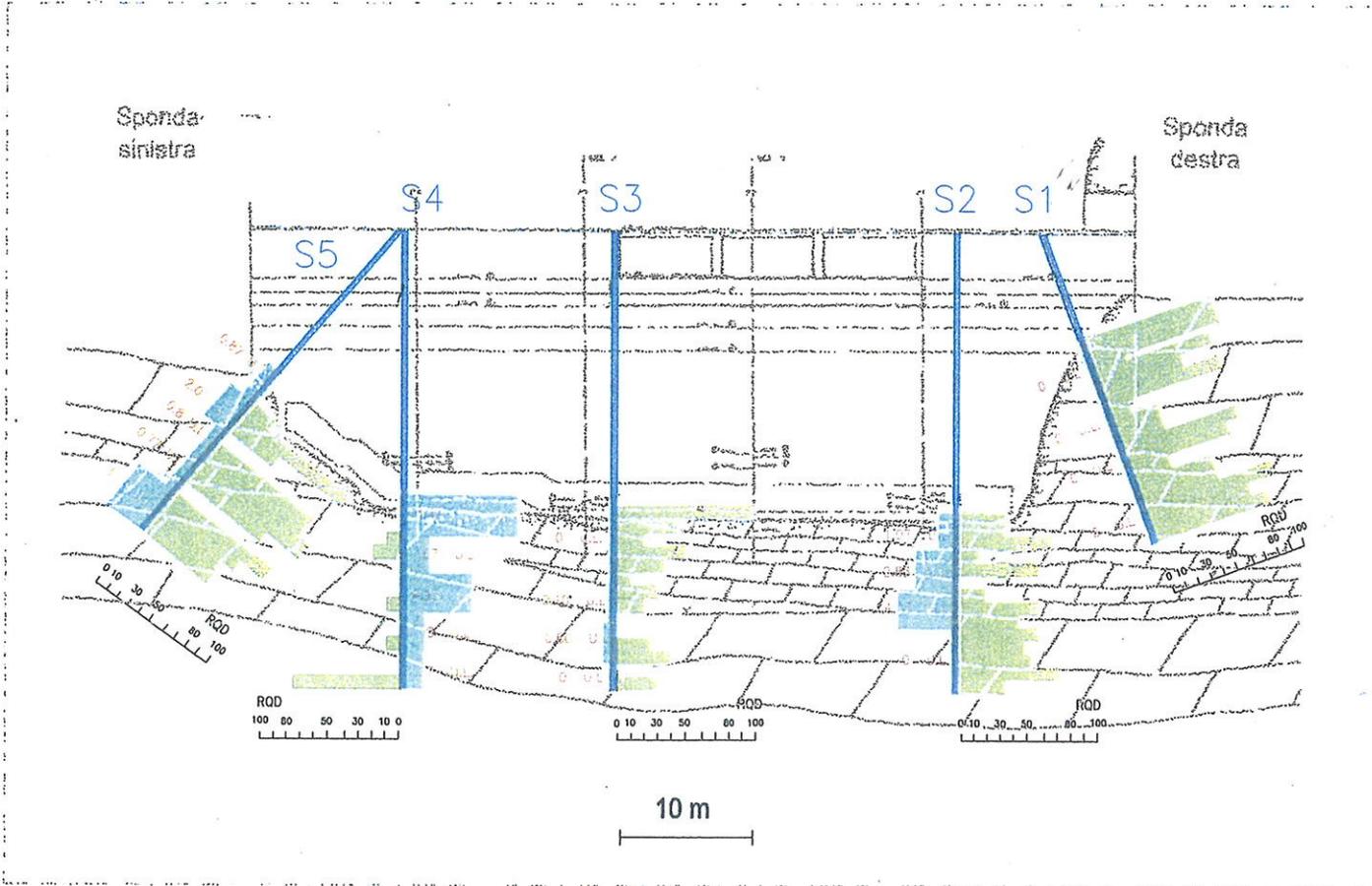
B

C

D

E

F



- PROVE LUGEON
- ROCK QUALITY DESIGNATION



CTG
Italcementi Group
Servizio Geologico Bergamo

COMPANY ITALGEN

PLANT DIGA DI CASSIGLIO

This document is property of CTG SpA and it shall neither be copied nor reproduced nor disclosed to any third party without authorization in writing from CTG SpA.

DEPT. CENTRALI IDROELETTRICHE

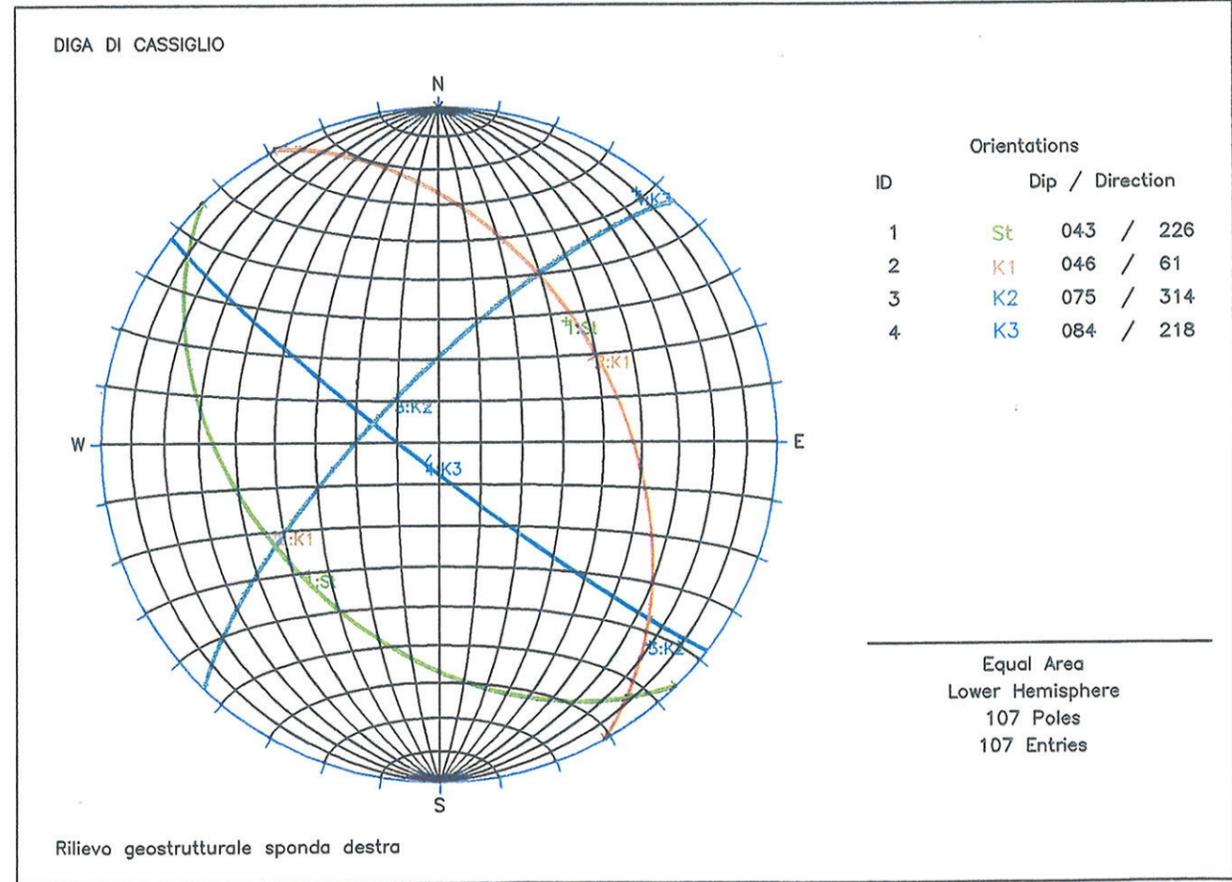
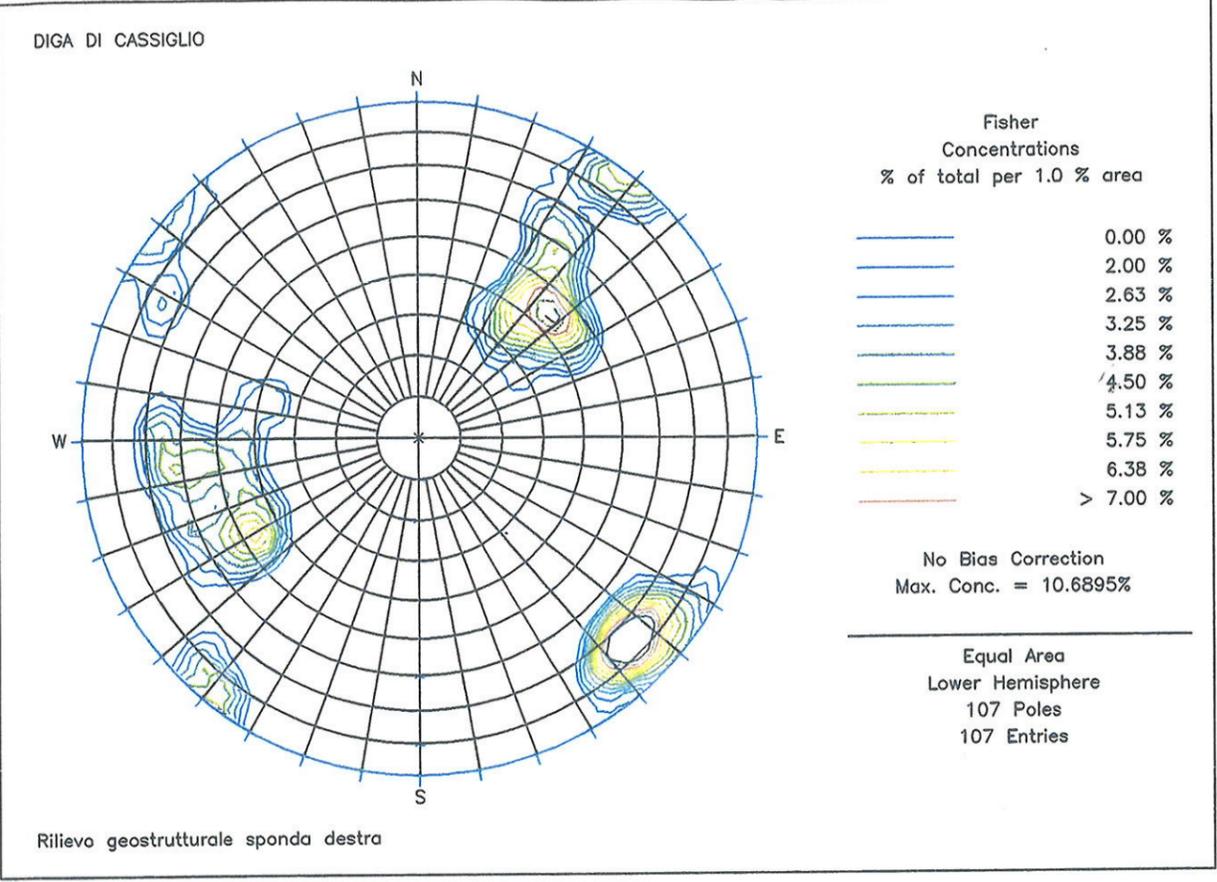
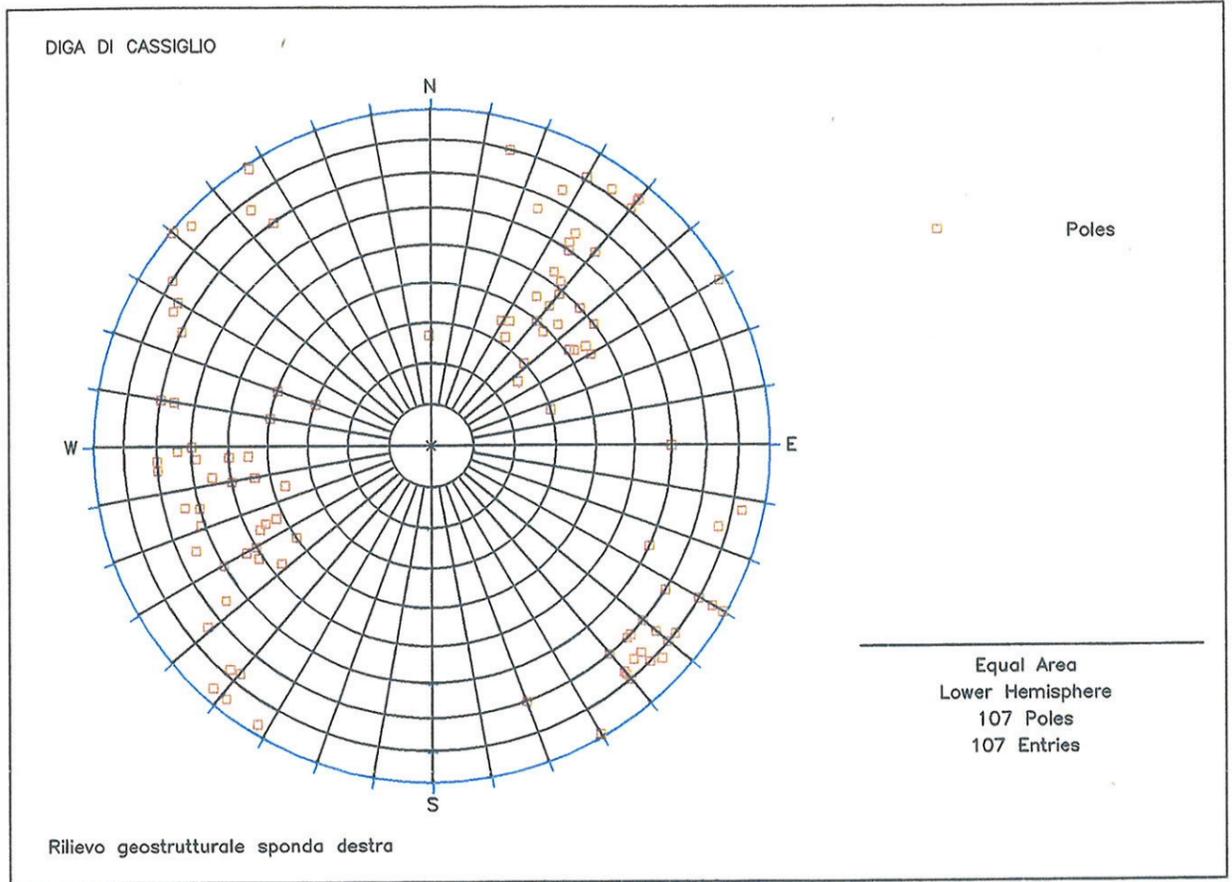
UBICAZIONE SONDAGGI E PROVE IN FORO. RQD - U.L.

VISTA DA MONTE

DRAWN UP BY	APP'D BY	DATE	PROJECT CODE	X	DWG N.	REV.	SCALE
Paris	Paris	07.04.05	C480E052			980.GEO.049	00

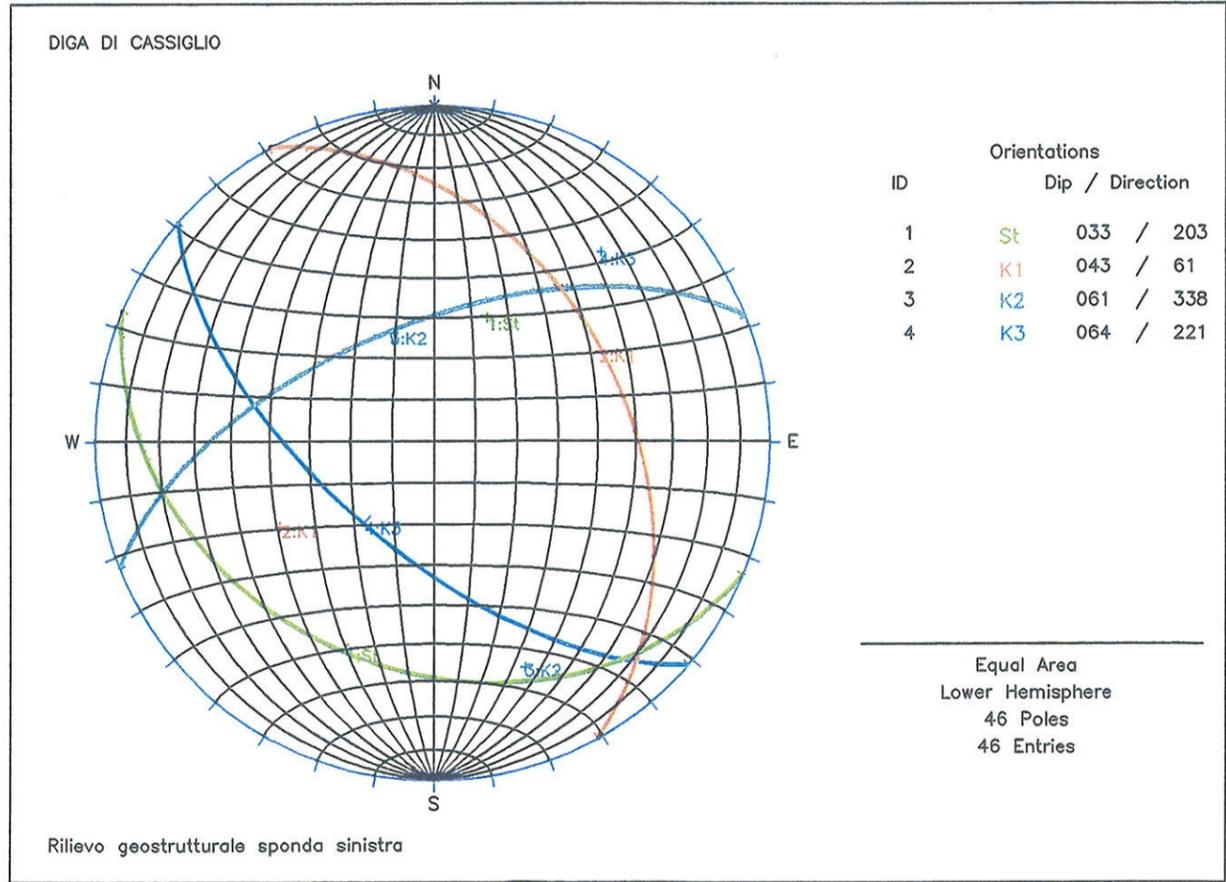
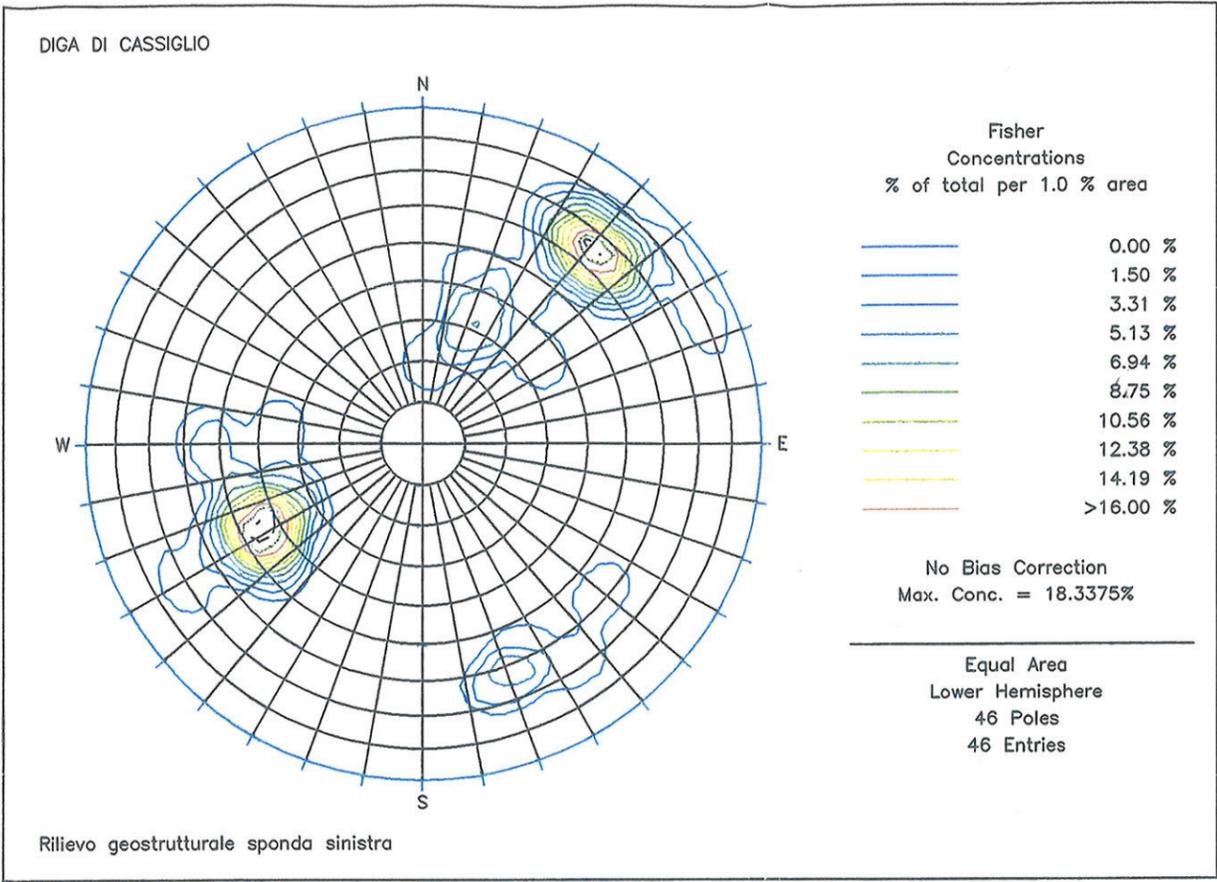
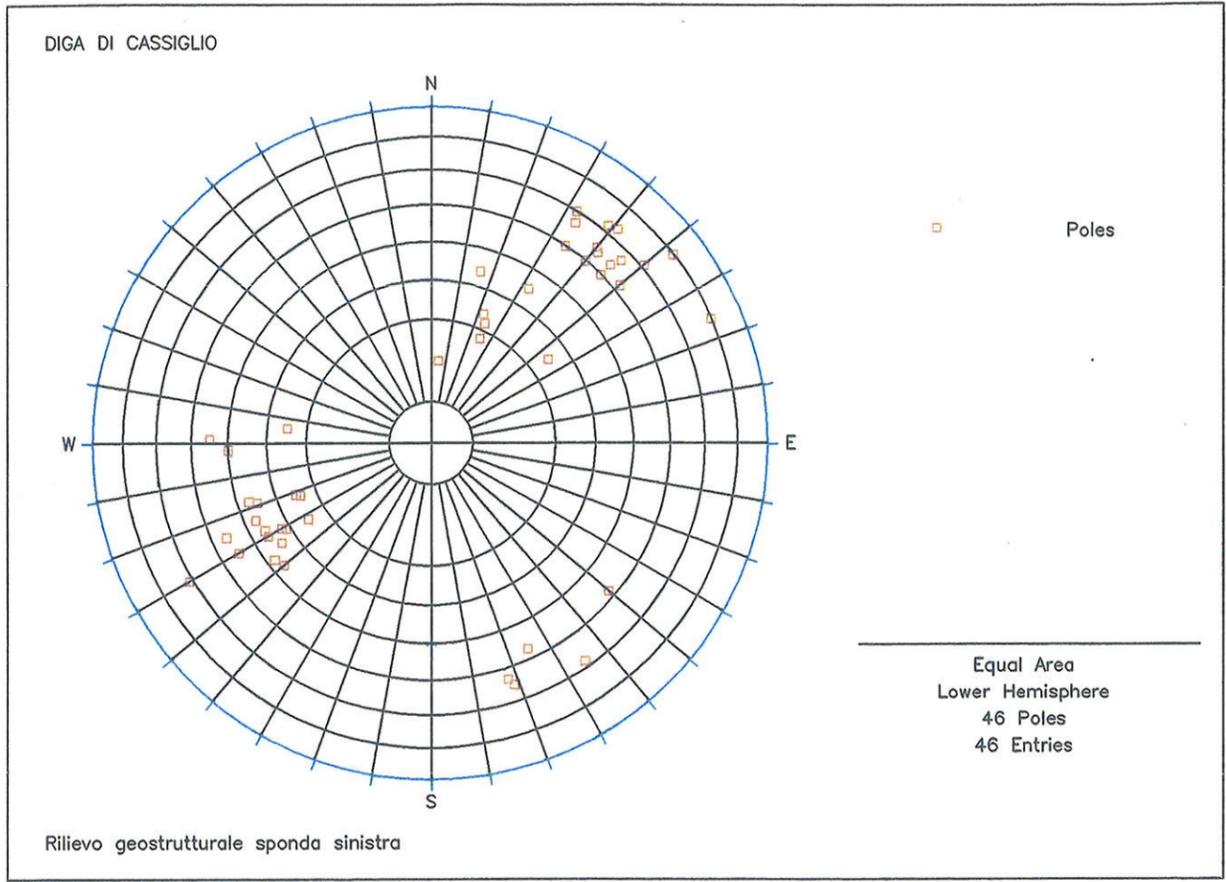
1

2

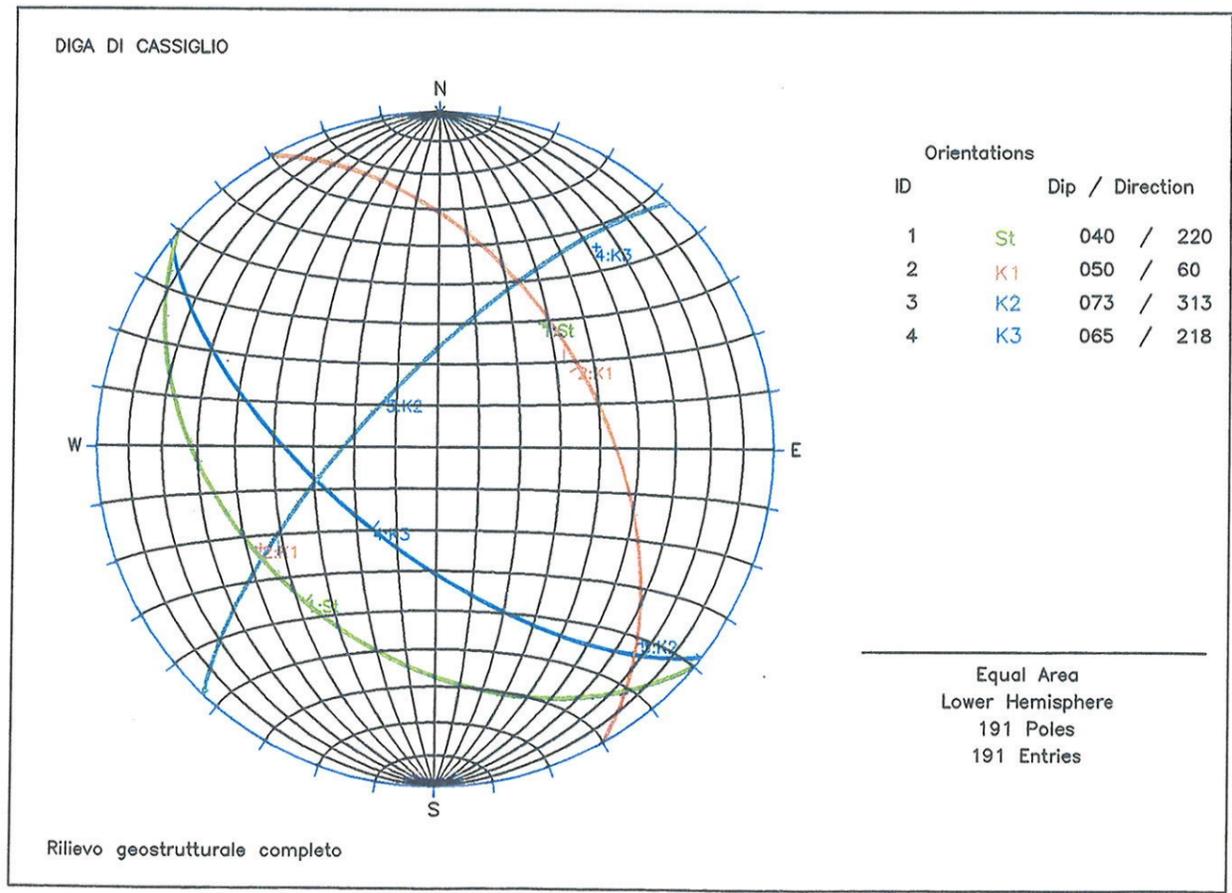
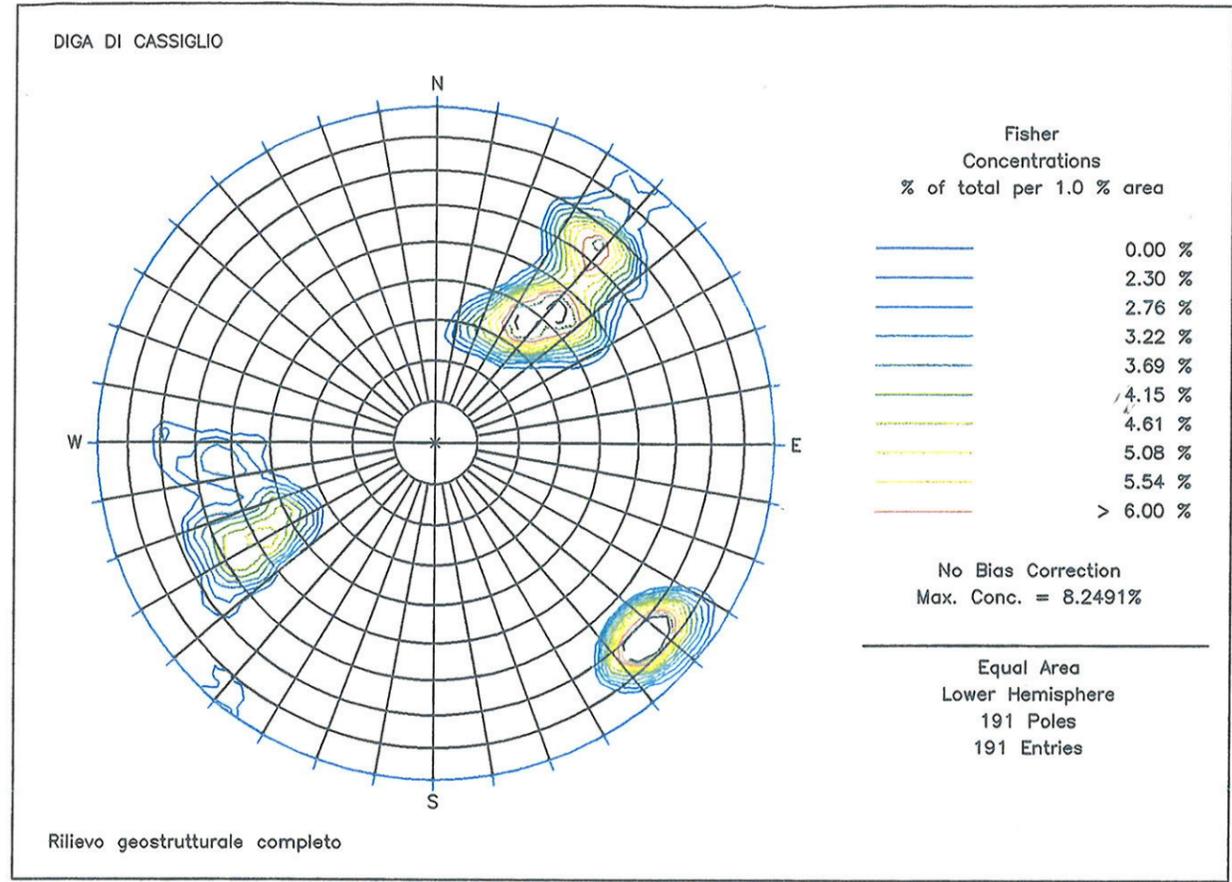
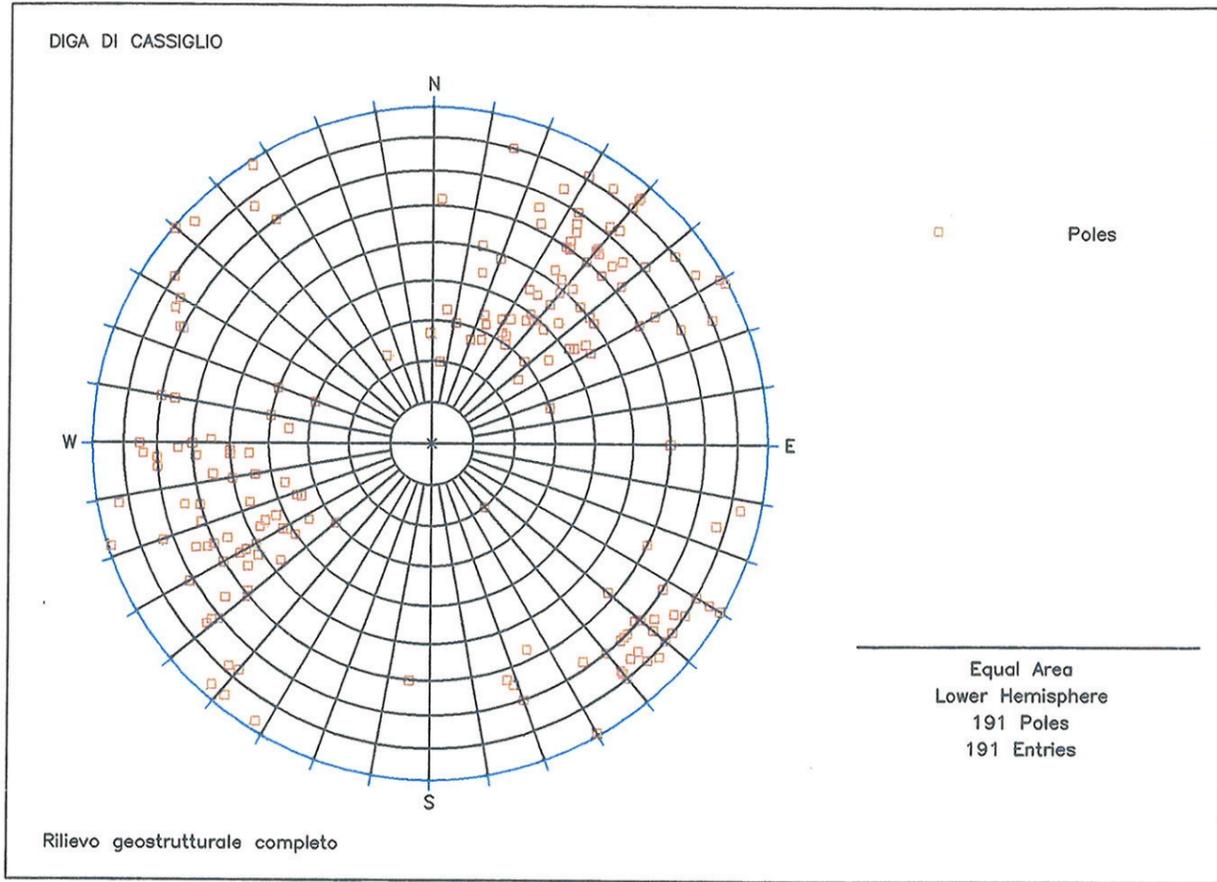


	COMPANY	ITALGEN					
	PLANT	DIGA DI CASSIGLIO					
	DEPT.	CENTRALI IDROELETTRICHE					
PROIEZIONI STEREOGRAFICHE DELLE DISCONTINUITA' RILEVATE IN SPONDA DESTRA							
DRAWN UP BY F. Bailo	APP'D BY F. Bailo	DATE 07.04.05	PROJECT CODE C480E052		DWG N. 980-GEO-050 00	REV.	SCALE

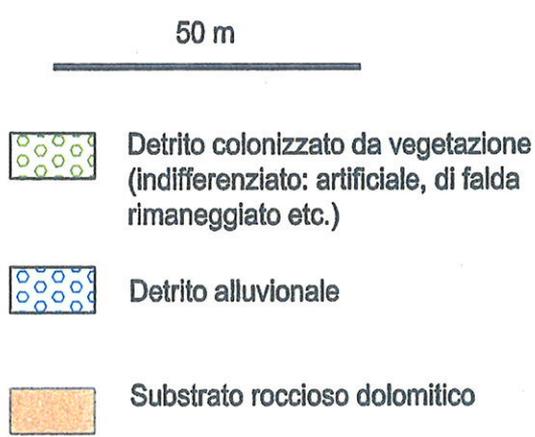
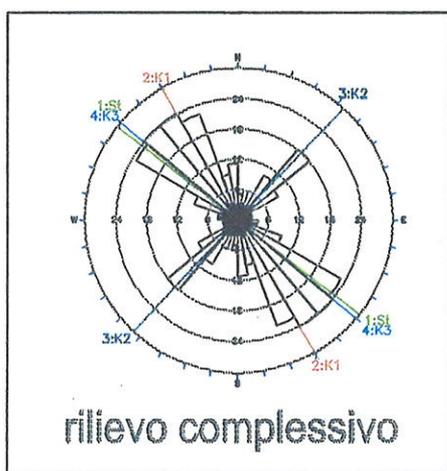
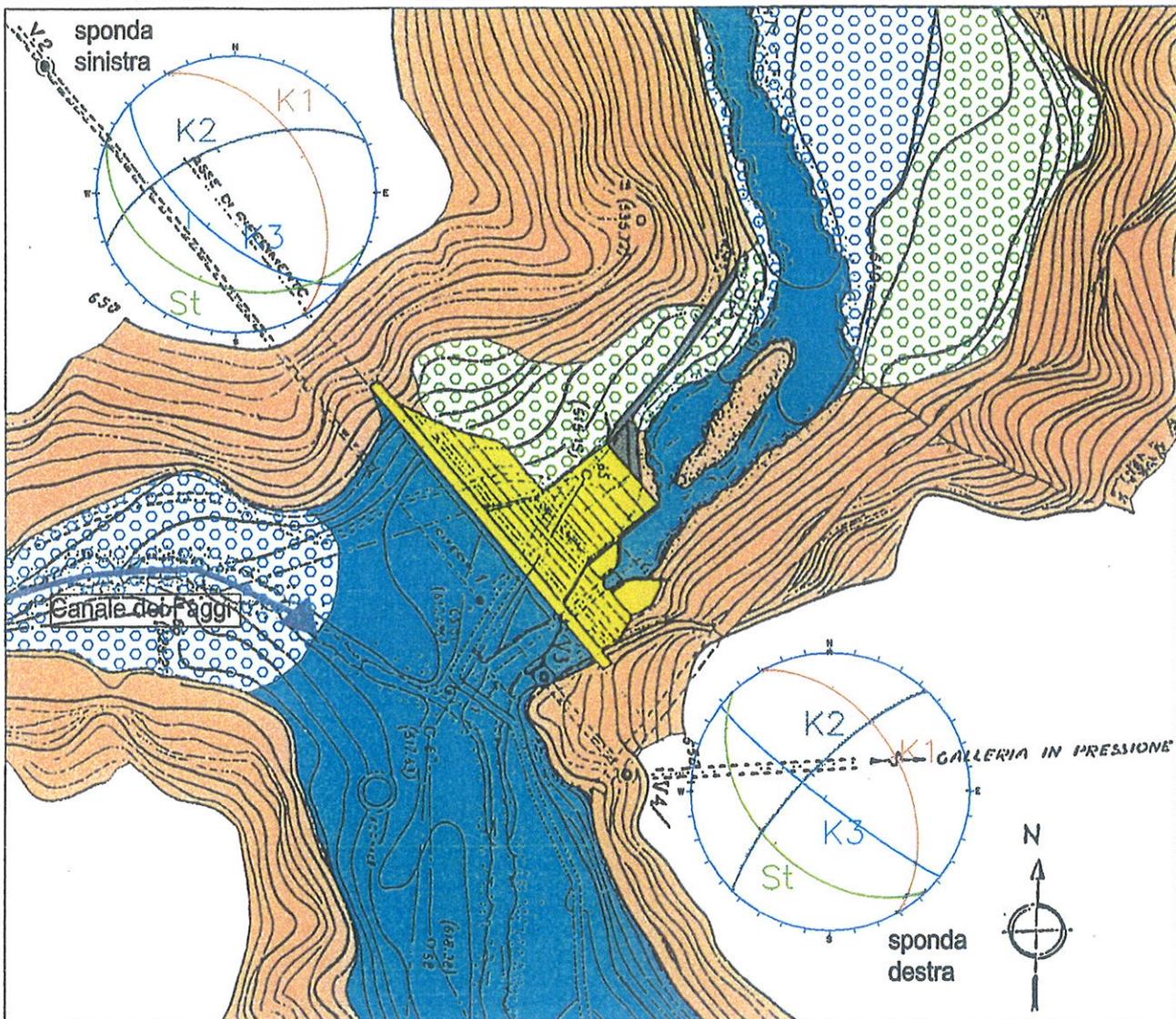
A
B
C
D
E
F
G



	COMPANY	ITALGEN					
	PLANT	DIGA DI CASSIGLIO					
	DEPT.	CENTRALI IDROELETTRICHE					
PROIEZIONI STEREOGRAFICHE DELLE DISCONTINUITA' RILEVATE IN SPONDA SINISTRA							
DRAWN UP BY	APP'D BY	DATE	PROJECT CODE		DWG N.	REV.	SCALE
F. Bailo	F. Bailo	07.04.05	C480E052		980-GEO-051	00	



	COMPANY	ITALGEN					
	PLANT	DIGA DI CASSIGLIO					
	DEPT.	CENTRALI IDROELETTRICHE					
PROIEZIONI STEREOGRAFICHE DELLE DISCONTINUITA' RILEVATE COMPLESSIVO							
DRAWN UP BY	APP'D BY	DATE	PROJECT CODE		DWG N.	REV.	SCALE
F. Bailo	F. Bailo	07.04.05	C480E052		980-GEO-052	00	



CTG
Italcementi Group
Servizio Geologico Bergamo

COMPANY **ITALGEN**
PLANT **DIGA DI CASSIGLIO**
DEPT. **CENTRALI IDROELETTRICHE**

This document is property of CTG SpA and it shall neither be copied nor reproduced nor disclosed to any third party without authorization in writing from CTG SpA.

RILIEVO GEOLOGICO E GEOSTRUTTURALE DELLA ROCCIA DI FONDAZIONE



DRAWN UP BY	APP'D BY	DATE	PROJECT CODE	X	DWG N.	REV.	SCALE
Bailo	Bailo	07.04.05	C480E052		980.GEO.053	00	metrica