

# POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale

in Ingegneria Civile

Tesi di Laurea Magistrale

**CARATTERIZZAZIONE DEGLI AMMASSI ROCCIOSI PER LO STUDIO  
DELLE CONDIZIONI DI STABILITÀ:  
IL CASO DEL VALLONE DI ELVA**



**Relatore:**

Prof.ssa Ing. Maria Rita Migliazza

**Correlatore:**

Prof. Ing. Claudio Scavia

**Candidata:**

Maria Teresa Carriero

**A.A. 2019/2020**



## **SOMMARIO**

---

---

<b>1. INTRODUZIONE .....</b>	<b>13</b>
<b>2. STRUMENTI TEORICI E METODOLOGICI .....</b>	<b>17</b>
<b>2.1. CARATTERIZZAZIONE DELLE DISCONTINUITÀ.....</b>	<b>20</b>
2.1.1. RILIEVO E DEFINIZIONE DEI PARAMETRI CARATTERISTICI DELLE DISCONTINUITÀ.....	22
2.1.2. TIPOLOGIE E TECNICHE DI RILIEVO.....	35
2.1.2.1. IL RILIEVO TRADIZIONALE.....	35
2.1.2.2. IL RILIEVO DA NON CONTATTO .....	36
2.1.3. PARAMETRI MECCANICI E CRITERI DI RESISTENZA .....	39
<b>2.2. CARATTERIZZAZIONE DELLA MATRICE ROCCIOSA .....</b>	<b>43</b>
<b>2.3. CARATTERIZZAZIONE DEGLI AMMASSI ROCCIOSI.....</b>	<b>47</b>
2.3.1. IL CRITERIO DI RESISTENZA DI HOEK & BROWN (1988,2002) .....	47
2.3.2. I SISTEMI DI CLASSIFICAZIONE.....	49
<b>2.4. MECCANISMI DI INSTABILITÀ NEGLI AMMASSI ROCCIOSI .....</b>	<b>51</b>
<b>3. CASO DI STUDIO: LA STRADA DEL VALLONE DI ELVA.....</b>	<b>55</b>
<b>3.1. CENNI STORICI .....</b>	<b>56</b>
<b>3.2. INQUADRAMENTO GENERALE.....</b>	<b>68</b>
<b>3.3. INQUADRAMENTO GEOLOGICO E MORFOLOGICO .....</b>	<b>70</b>
<b>4. IL RILIEVO FOTOGRAMMETRICO .....</b>	<b>72</b>

<b>4.1.</b>	<b>ELEMENTI TEORICI DI FOTOGRAMMETRIA.....</b>	<b>74</b>
<b>4.2.</b>	<b>STRUMENTI PER IL RILIEVO .....</b>	<b>76</b>
<b>4.3.</b>	<b>ELABORAZIONE DEI DATI FOTOGRAMMETRICI – AGISOFT METASHAPE .....</b>	<b>80</b>
4.3.1.	IMPOSTAZIONI DI BASE .....	84
4.3.2.	CREAZIONE DEL CHUNK.....	84
4.3.3.	CARICAMENTO E ALLINEAMENTO DELLE IMMAGINI.....	85
4.3.4.	IMPOSTAZIONE DEL SISTEMA DI RIFERIMENTO E POSIZIONAMENTO DEI MARKER .....	87
4.3.5.	GENERAZIONE DELLA NUVOLA DENSA.....	89
4.3.6.	GENERAZIONE DELLA MESH 3D.....	90
<b>5.</b>	<b>IL RILIEVO DA NON CONTATTO .....</b>	<b>92</b>
5.1.	STRUMENTI PER IL RILIEVO DA NON CONTATTO – ROCKSCAN .....	93
5.2.	IL RILIEVO DEI SISTEMI DI DISCONTINUITÀ .....	95
5.3.	ESTRAZIONE DEI DATI DI SPAZIATURA.....	98
5.4.	ELABORAZIONE DEI RISULTATI .....	99
5.5.	RISULTATI OTTENUTI .....	104
<b>6.</b>	<b>ANALISI DEI CINEMATISMI .....</b>	<b>105</b>
6.1.	SCIVOLAMENTO PLANARE .....	107
6.2.	VOLUME DEI BLOCCHI.....	112
6.3.	CONCLUSIONI SULL’ANALISI.....	116

<b>7.</b>	<b>MODELLAZIONE NUMERICA DELLA “FRANA”</b>	<b>117</b>
<b>7.1.</b>	<b>DISCRETE ELEMENT METHOD - DEM</b>	<b>122</b>
7.1.1.	SCHEMATIZZAZIONE DELLE DISCONTINUITÀ E DEI BLOCCHI	124
7.1.2.	RAPPRESENTAZIONE DEI CONTATTI FRA I BLOCCHI	124
7.1.3.	CLASSIFICAZIONE DEI CONTATTI TRA I BLOCCHI	128
7.1.4.	MOTO DI BLOCCHI RIGIDI	129
7.1.5.	AGGIORNAMENTO DELLE FORZE DI SUB-CONATTO	131
7.1.6.	COULOMB-SLIP JOINT MODEL	133
<b>7.2.</b>	<b>IL CODICE DI CALCOLO 3DEC</b>	<b>136</b>
<b>7.3.</b>	<b>FASI DELLA MODELLAZIONE</b>	<b>137</b>
<b>7.4.</b>	<b>MODELLAZIONE NUMERICA DEL CASO IN ESAME</b>	<b>143</b>
7.4.1.	GEOMETRIA DEL MODELLO	144
7.4.2.	DIVISIONE IN SEZIONI	149
7.4.3.	DEFINIZIONE DELLE PROPRIETÀ DEI GIUNTI	151
7.4.4.	DEFINIZIONE DELLE CONDIZIONI AL CONTORNO	156
7.4.5.	DISTRIBUZIONE DELLA PRESSIONE IDROSTATICA	156
<b>7.5.</b>	<b>SIMULAZIONI EFFETTUATE</b>	<b>160</b>
7.5.1.	ASSENZA DI ACQUA	162
7.5.2.	GIUNTO COMPLETAMENTE SATURO	164
7.5.3.	GIUNTO PARZIALMENTE SATURO	167

7.5.4. VALORI DI COESIONE SUL PIANO DI SCIVOLAMENTO.....	169
<b>7.6. CONCLUSIONI SUI RISULTATI OTTENUTI.....</b>	<b>170</b>
<b>8. CONCLUSIONI.....</b>	<b>171</b>
<b>9. BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>181</b>
<b>ALLEGATO 1: SCHEDE DEL RILIEVO GEOMECCANICO .....</b>	<b>I</b>
<b>ALLEGATO 2: ANALISI DEI CINEMATISMI .....</b>	<b>XXII</b>
<b>ALLEGATO 3: FILE DI INPUT 3DEC .....</b>	<b>XLIII</b>

## INDICE DELLE FIGURE

---

Figura 2.1: Esempio di ammasso roccioso con discontinuità e blocchi.....	18
Figura 2.2: Modi elementari di sollecitazione della fessura .....	21
Figura 2.3: Schemi indicanti direzione ( $\alpha$ ), inclinazione ( $\beta$ ) ed immersione ( $\alpha \pm 90^\circ$ ) di tre piani diversamente orientati (ISRM, 1981). .....	24
Figura 2.4: (a sinistra) reticolo equatoriale della proiezione equiarea, (a destra) reticolo polare della proiezione equiarea.....	25
Figura 2.5: Misura della spaziatura in una superficie esposta dell'affioramento (ISRM, 1993).....	26
Figura 2.6: Le rugosità in diversa scala delle discontinuità sono determinate con prove su scala differente (1, prova di taglio in laboratorio; 2, prova di taglio in situ). L'ondulazione può essere caratterizzata con l'angolo "i" (ISRM, 1993). .....	28
Figura 2.7:(a sinistra) Pettine di Barton, (a destra) Profili di rugosità e relativi intervalli di valori di JRC (Barton & Choubey, 1977). .....	29
Figura 2.8: Esempio di reticolo equiarea polare che rappresenta la giacitura di tre famiglie di discontinuità. ....	33
Figura 2.9: Schizzi di masse rocciose indicanti la forma dei blocchi: a blocchi, irregolare, tabulare e colonnare (ISRM 1993). .....	34
Figura 2.10: Bussola e scanline per il rilievo delle discontinuità.....	36
Figura 2.11: (in alto) modello digitale del settore A2_b; (in basso) interfaccia del software Rockscan e stereogramma dei piani rilevati del settore A2_b. ....	37
Figura 2.12: Schema della scatola di Hoek. ....	39
Figura 2.13: a) curve di tensione tangenziale ( $\tau$ ) spostamento tangenziale ( $\mu$ ) per discontinuità piane; b) resistenza al taglio di una discontinuità piana secondo il criterio di coulomb (De Vallejo, 2005). .....	40
Figura 2.14: Il criterio bilineare di Patton. ....	41
Figura 2.15: Confronto tra l'involuppo di resistenza di Barton con quello di Mohr-Coulomb. ....	42

<i>Figura 2.16: Schemi di prove comunemente eseguite nella meccanica delle rocce.</i> .....	43
<i>Figura 2.17: Costruzione dell'involuppo di rottura da 3 prove triassiali.</i> .....	44
<i>Figura 2.18: (sinistra) Prove di trazione indirette: prova Brasiliana; (destra) prova di flessione su più punti.</i> 44	
<i>Figura 2.19: Attrezzatura per il Point Load Test.</i> .....	45
<i>Figura 2.20: Criterio di Hoek &amp; Brown nel piano <math>\sigma_1 - \sigma_3</math> (modificato da Hoek &amp; Brown, 1980).</i> .....	46
<i>Figura 2.21: Meccanismo di scivolamento planare (Hoek &amp; Bray, 1981).</i> .....	51
<i>Figura 2.22: Meccanismo di ribaltamento (Hoek &amp; Bray, 1981).</i> .....	52
<i>Figura 2.23: Meccanismo di scivolamento a cuneo (Hoek &amp; Bray, 1981).</i> .....	53
<i>Figura 3.1: Inquadramento geografico (Google Earth).</i> .....	56
<i>Figura 3.2: Foto storiche con indicazione del vecchio sentiero (Bersani, Baudino, 2004).</i> .....	57
<i>Figura 3.3: Foto storiche nicchia della Madonna del Vallone, lapide che ricorda i benefattori della Strada (Bersani, Baudino, 2004).</i> .....	58
<i>Figura 3.4: Foto storiche della mulattiera, (a destra) in alto, sopra la carrozzabile, il vecchio sentiero; in basso la vecchia mulattiera (Bersani, Baudino, 2004).</i> .....	59
<i>Figura 3.5: Foto storica dell'inizio dei lavori della carrozzabile nei primi anni Venti (Bersani, Baudino, 2004).</i> .....	60
<i>Figura 3.6: Evento franoso del 11 dicembre 2014, settore B6 (provincia.cuneo.gov.it).</i> .....	61
<i>Figura 3.7: Evento franoso del 28 febbraio 2015, FRANA (minotariccoinforma.it).</i> .....	62
<i>Figura 3.8: Evento franoso del 2 giugno 2018, settore B2 (notizie.provincia.cuneo.gov.it).</i> .....	63
<i>Figura 3.9: (a sinistra) mappa CTR della stazione ELVA – ELVA, (a destra) fotografia della stazione ELVA – ELVA (arpa.piemonte.it).</i> .....	64
<i>Figura 3.10: Confronto fra i due percorsi per raggiungere il paese di Elva (maps.google.it).</i> .....	66
<i>Figura 3.11: Mappa del Vallone di Elva (ITHACA, ISPRA).</i> .....	68
<i>Figura 3.12: Evoluzione schematica delle Api Occidentali (Beltrando et alii, 2010).</i> .....	70

<i>Figura 3.13: Schema geologico della Val Maira (webgis.arpa.piemonte).....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 4.1: Il principio della fotogrammetria: il confronto fra la singola fotografia (a) non sufficiente per definire la posizione dei punti sul terreno, due fotografie(b) che da due centri di presa contengono lo stesso oggetto (Cannarozzo, Cucchiarini, Meschieri, 2012). .....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 4.2: Rete di stazioni permanenti CORS utilizzata come riferimento. ....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 4.3: Materializzazione dei punti di controllo: (a) colorazione di marker altamente visibili (30x30 cm) lungo la strada, utilizzando un modello appositamente realizzato; (b) un marcatore orizzontale; (c) un marcatore verticale. ....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 4.4: La rete topografica con vertici di riferimento (rosso), marcatori orizzontali (blu), marcatori verticali e punti naturali (verde).....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 4.5: Aree della strada del Vallone di Elva. ....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 4.6: (a sinistra) ortofoto con indicazione delle sezioni di strada alta e bassa; (a destra) nuvole di punti delle sue sezioni da terra, software Metashape. ....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 4.7: Ortofoto Strada Alta.....</i>	<i>82</i>
<i>Figura 4.8: Ortofoto Strada Bassa e Franone. ....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 4.9: Impostazione delle preferenze del software.....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 4.10:Caricamento delle foto. ....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 4.11: (a sinistra) Allineamento delle foto, (a destra) posizionamento delle camere e nuvola di punti sparsa per il settore A1_b.....</i>	<i>86</i>
<i>Figura 4.12: Importazione delle coordinate dei marker da un file di testo.....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 4.13: Posizionamento di un marker.....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 4.14: Errore totale Chunck.....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 4.15: (a sinistra) Generazione della nuvola densa, (a destra) nuvola densa per il settore A1_b.....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 4.16: (a sinistra) Generazione della mesh 3D, (a destra) Mesh 3D per il settore A1_b. ....</i>	<i>91</i>
<i>Figura 5.1: Settaggio dei parametri di orientamento interno della camera. ....</i>	<i>96</i>

<i>Figura 5.2: Selezione dei piani di discontinuità tramite il software Rockscan, esempio del settore A1_b. ....</i>	<i>97</i>
<i>Figura 5.3: Rilievo delle spazature tramite il software Rockscan, esempio del settore A1_b. ....</i>	<i>98</i>
<i>Figura 5.4: Confronto tra il rilievo tradizionale e tramite Rockscan, esempio del settore A1_b. ....</i>	<i>100</i>
<i>Figura 5.5: Analisi di frequenza per la valutazione della spazatura per il piano di strato, esempio del settore A1_b. ....</i>	<i>102</i>
<i>Figura 5.6: Analisi di frequenza per la valutazione della spazatura per il set di discontinuità K1, esempio del settore A1_b. ....</i>	<i>102</i>
<i>Figura 5.7: Analisi di frequenza per la valutazione della spazatura per il set di discontinuità K2, esempio del settore A1_b. ....</i>	<i>103</i>
<i>Figura 6.1: (a sinistra) Comando per l'analisi cinematica in Dips; (a destra) indicazione sullo Stereonet dei parametri del piano di scivolamento. ....</i>	<i>107</i>
<i>Figura 6.2: Analisi cinematica software Dips, esempio del settore A1_b. ....</i>	<i>108</i>
<i>Figura 6.3: Foto del settore A1_b con indicazione dei piani che possono andare svincolare blocchi. ....</i>	<i>109</i>
<i>Figura 6.4: Analisi cinematica software Dips, esempio del settore B2. ....</i>	<i>110</i>
<i>Figura 6.5: Cinematismo tridimensionale ipotizzato nel settore B2. ....</i>	<i>111</i>
<i>Figura 6.6: Rappresentazione dei parametri di spazatura e di angolo tra le discontinuità (Kim et al., 2006). ....</i>	<i>113</i>
<i>Figura 6.7: Analisi di frequenza per la valutazione del volume dei blocchi, esempio del settore A1_b. ....</i>	<i>114</i>
<i>Figura 7.1: Foto scattata da drone dell'intera area in esame. ....</i>	<i>118</i>
<i>Figura 7.2: Foto che visualizza gli strati di cui è formato l'ammasso. ....</i>	<i>119</i>
<i>Figura 7.3: Individuazione dei piani di discontinuità e di debolezza. ....</i>	<i>120</i>
<i>Figura 7.4: Porzione di materiale precedentemente franato. ....</i>	<i>120</i>
<i>Figura 7.5: Rappresentazione dei contatti tra i blocchi. ....</i>	<i>124</i>

<i>Figura 7.6: Visualizzazione del piano comune come una lastra rigida sostenuta da una corda elastica (3DEC, Online Manual Table of Contents).....</i>	<i>126</i>
<i>Figura 7.7: Alcune delle posizioni possibili del piano comune (3DEC, Online Manual Table of Contents). ....</i>	<i>127</i>
<i>Figura 7.8: Coulomb slip model, per coesione uguale a zero (3DEC, Online Manual Table of Contents). ....</i>	<i>135</i>
<i>Figura 7.9: Algoritmo implementato nel codice di calcolo 3DEC. ....</i>	<i>137</i>
<i>Figura 7.10: Interfaccia del software 3DEC. ....</i>	<i>143</i>
<i>Figura 7.11: Piani di discontinuità individuati. ....</i>	<i>145</i>
<i>Figura 7.12: Ritaglio del parallelepipedo di partenza. ....</i>	<i>146</i>
<i>Figura 7.13: Modello di base del pendio.....</i>	<i>147</i>
<i>Figura 7.14: Sezionamento della lastra in blocchi. ....</i>	<i>148</i>
<i>Figura 7.15: Geometria del modello totale. ....</i>	<i>148</i>
<i>Figura 7.16: Numerazione delle regioni.....</i>	<i>150</i>
<i>Figura 7.17: Lastra dopo l'inserimento dei giunti verticali e orizzontali per andare ad ottenere le fasce.....</i>	<i>150</i>
<i>Figura 7.18: Modello definitivo. ....</i>	<i>151</i>
<i>Figura 7.19: (a sinistra) Involuppo di rottura di Hoek &amp; Brown sul piano <math>\sigma</math>-<math>\tau</math>; (a destra) involuppo di rottura sul piano <math>\sigma_1</math>-<math>\sigma_3</math>.....</i>	<i>154</i>
<i>Figura 7.20: Schizzi della schematizzazione delle distribuzioni. ....</i>	<i>156</i>
<i>Figura 7.21: (sopra) Distribuzione con pressione agente su tutto il pendio; (sotto) Distribuzione pressione agente solo su metà pendio. ....</i>	<i>158</i>
<i>Figura 7.22: Grafici delle unbalanced forces: (a sinistra) l'equilibrio è raggiunto al primo step; (a destra) si generano spostamenti all'interno del modello.....</i>	<i>161</i>
<i>Figura 7.23: Grafici delle unbalanced forces: (a sinistra) 100% di ponti di roccia; (a destra) 0.25% di ponti di roccia. ....</i>	<i>163</i>

<i>Figura 7.24: Modello numerico dopo 10000 timestep: (a sinistra) 100% di ponti di roccia; (a destra) 0.1% di ponti di roccia</i> .....	163
<i>Figura 7.25: Figura 7.26: Distribuzione con pressione agente su tutto il pendio</i> .....	164
<i>Figura 7.27: Grafici delle unbalanced forces: (a sinistra) 100% di ponti di roccia; (a destra) 10% di ponti di roccia</i> .....	165
<i>Figura 7.28: Modello numerico dopo 10000 timestep: (a sinistra) 100% di ponti di roccia; (a destra) 5% di ponti di roccia</i> .....	166
<i>Figura 7.29: Distribuzione pressione agente solo su metà pendio</i> .....	167
<i>Figura 7.30: Grafici delle unbalanced forces: (a sinistra) 100% di ponti di roccia; (a destra) 5% di ponti di roccia</i> .....	168
<i>Figura 7.31: Modello numerico dopo 10000 timestep: (a sinistra) 100% di ponti di roccia; (a destra) 3% di ponti di roccia</i> .....	169
<i>Figura 8.1: Tavole riassuntive sui risultati del rilievo geomeccanico: strada alta</i> .....	174
<i>Figura 8.2: Tavole riassuntive sui risultati del rilievo geomeccanico: strada bassa e frana</i> .....	175
<i>Figura 8.3: Tavole riassuntive sui risultati dell'analisi dei cinematismi: strada alta</i> .....	176
<i>Figura 8.4: Tavole riassuntive sui risultati dell'analisi dei cinematismi: strada bassa e frana</i> .....	177
<i>Figura 8.5: Modello numerico dopo 10000 timestep: 0.1% di ponti di roccia</i> .....	179
<i>Figura 8.6: Modello numerico dopo 10000 timestep: (a sinistra) 5% di ponti di roccia, giunto completamente saturo; (a destra) 3% di ponti di roccia, giunto parzialmente saturo</i> .....	180

## INDICE DELLE TABELLE

---

<i>Tabella 2.1: Descrizione della persistenza (fonte ISRM, 1993) .....</i>	<i>27</i>
<i>Tabella 3.1: Dati della rete meteoidrografica per i giorni precedenti a ciascun evento (arpa.piemonte.it)....</i>	<i>64</i>
<i>Tabella 4.1: Voli e immagini nelle diverse aree. ....</i>	<i>78</i>
<i>Tabella 4.2: Errori totali per ogni settore. ....</i>	<i>89</i>
<i>Tabella 5.1: Numero di piani rilevati per ogni settore. ....</i>	<i>95</i>
<i>Tabella 5.2: Numero di valori di spaziatura per ogni settore (Legenda: N.P.: set “Non Presente”; N.I.: “Non Individuato”).....</i>	<i>101</i>
<i>Tabella 5.3: Valori di minimo, massimo, media e moda per le spaziature del settore A1_b. ....</i>	<i>103</i>
<i>Tabella 6.1: Classi di volumi e corrispondenti valori (Palmstrom, 2005). ....</i>	<i>113</i>
<i>Tabella 6.2: Valori di minimo, massimo, media e moda per le spaziature del settore A1_b. ....</i>	<i>114</i>
<i>Tabella 6.3: Valori di minimo, massimo, media e moda per il volume dei blocchi nel settore A1_b. ....</i>	<i>115</i>
<i>Tabella 7.1: Esempio di calcolo delle combinazioni di contatto tra 2 blocchi.....</i>	<i>125</i>
<i>Tabella 7.2: Tipologie di contatto tra i blocchi. ....</i>	<i>128</i>
<i>Tabella 7.3: Passaggi chiave per la modellazione in 3DEC. ....</i>	<i>137</i>
<i>Tabella 7.4: Modelli costitutivi per i giunti nel software 3DEC.....</i>	<i>139</i>
<i>Tabella 7.5: Comandi per prescrivere le condizioni al contorno di tensione/carico e spostamento/velocità in 3DEC. ....</i>	<i>141</i>
<i>Tabella 7.6: Comandi per la risoluzione del problema.....</i>	<i>142</i>
<i>Tabella 7.7: Parametri per il calcolo dell’involuppo di rottura .....</i>	<i>154</i>
<i>Tabella 7.8: Proprietà dei giunti. ....</i>	<i>155</i>
<i>Tabella 7.9: Percentuali di ponti di roccia.....</i>	<i>162</i>

<i>Tabella 7.10: Percentuali di ponti di roccia. ....</i>	<i>164</i>
<i>Tabella 7.11: Percentuali di ponti di roccia. ....</i>	<i>168</i>
<i>Tabella 7.12: Coesione e resistenza a trazione applicate al piano di scivolamento. ....</i>	<i>170</i>

## ***1. INTRODUZIONE***

---

La caratterizzazione dell'ammasso roccioso e lo studio della stabilità dello stesso hanno come punto di partenza indispensabile il rilievo geomeccanico.

Nel presente lavoro di tesi vengono illustrate le tecniche da non contatto per il rilievo geomeccanico che fanno sì che, nella procedura di rilievo, si snelliscano i tempi di restituzione dei risultati e si riducano i rischi associati alle modalità di esecuzione. Inoltre, gli attuali metodi progettuali, nel campo dell'ingegneria delle rocce, si basano su un approccio di tipo probabilistico, atto a ridurre il grado di incertezza per mezzo di trattamenti statistici delle misure.

Nel presente lavoro di tesi queste procedure vengono applicate al caso della Strada del Vallone di Elva, che si estende per circa 9 km di carrozzabile con pareti a strapiombo e dodici gallerie scavate nella roccia. Ad oggi, a causa di recenti dissesti, la strada risulta chiusa al traffico dall'autunno 2014. Tuttavia, la strada riveste per gli abitanti di Elva un ruolo di fondamentale importanza per la sopravvivenza del comune poiché, questi ritengono che essa rappresenti l'accesso più veloce al paese e che abbia un valore storico, ambientale e paesaggistico inestimabile, riconosciuto recentemente anche dal FAI (Fondo Ambiente Italiano).

Di contro, le zone potenzialmente instabili riguardano un tratto lungo diversi chilometri, per cui risulta difficile prevedere un intervento che interessi contestualmente l'intera lunghezza della provinciale. Il presente studio ha avuto lo scopo di acquisire tutte le informazioni preliminari in grado di fornire una conoscenza approfondita dell'ammasso roccioso attraverso azioni di rilievo che consentano di studiare la struttura degli ammassi alla scala di versante in modo da individuare e misurare la presenza di discontinuità, la loro orientazione e spaziatura al fine di definire la distribuzione statistica dei volumi dei blocchi che possono distaccarsi.

Nella prima parte del lavoro di tesi si illustrano gli strumenti teorici e metodologici per affrontare la caratterizzazione geomeccanica. In particolare, viene definita la caratterizzazione delle discontinuità ed i parametri caratteristici che ne determinano il comportamento meccanico. Inoltre, si delineano le caratteristiche dell'ammasso roccioso, inteso come continuo equivalente, i principali metodi di classificazione e il criterio di

resistenza associato. Infine, viene descritta la procedura per l'analisi dei cinematismi adottando un'analisi che verte sulla modellazione del discontinuo: il Test di Markland.

Dopo un breve inquadramento geografico e geomorfologico del sito in questione, e a seguito di una prima parte relativa ai cenni di fotogrammetria, si articola la descrizione dei rilievi aerofotogrammetrici con drone e terrestri, presupposti per la generazione dei modelli tridimensionali, e la descrizione del software "*Agisoft Metashape*" che, in questa sede, ha permesso di ottenere modelli a mesh e texture (DSM) a partire da acquisizioni di immagini (algoritmo Structure from Motion).

La fase di rilievo topografico fotogrammetrico e la restituzione dei DSM è stata svolta in collaborazione con gruppo di Geomatica del Politecnico di Torino, in due fasi successive: una a luglio e una a novembre 2019. Questa attività ha portato alla realizzazione di tre modelli di grandi dimensioni al fine di coprire tutti i dieci chilometri di strada.

I DSM utilizzati per l'esecuzione del rilievo geostrutturale, finalizzato all'ottenimento dei dati di orientazione delle discontinuità e delle loro spaziature, sono stati ricostruiti sulla base delle sole foto da terra, in modo da ottenere modelli di maggior dettaglio. Il rilievo non contatto è stato eseguito attraverso l'impiego del software "*Rockscan*" che permette l'identificazione automatica dell'orientazione e della posizione delle superfici di discontinuità.

I dati di orientazione e di spaziatura sono stati trattati statisticamente al fine di determinarne la distribuzione di frequenza rappresentative, definire i possibili cinematismi ed individuare i volumi potenzialmente instabili. Inoltre, attraverso l'utilizzo delle proiezioni stereografiche, i dati ottenuti dal rilievo da non contatto sono stati confrontati con quelli del rilievo tradizionale.

Il sesto capitolo, infine riguarda l'analisi dei cinematismi potenzialmente attivabili nei settori studiati, attraverso l'utilizzo del software "*Dips7.0, RocScience Inc.*", considerando quindi la stabilità dei vari settori solo rispetto alle condizioni geometriche, escludendo quelli che possono essere i parametri di resistenza delle discontinuità o le forze esterne agenti, come per esempio la spinta idrostatica, l'azione pseudo-statica di un sisma, o eventuali sistemi di rinforzo e/o stabilizzazione.

Lo studio si conclude con le analisi di stabilità per l'interpretazione del grosso fenomeno di scivolamento che ha interessato la SP104 nel febbraio del 2015. In particolare, la modellazione, realizzata attraverso il metodo agli elementi discreti implementato nel codice di calcolo "3DEC", ha avuto come obiettivo quello di investigare sulle possibili cause che hanno provocato tale distacco e di simulare l'influenza di alcune caratteristiche dei giunti, come per esempio la presenza dei ponti di roccia in determinate condizioni.

## ***2. STRUMENTI TEORICI E METODOLOGICI***

---

Gli ammassi rocciosi sono mezzi naturali, soggetti a stati di tensione e deformazione esistenti e caratterizzati da una rete di discontinuità di diversa natura che ne rendono il carattere discontinuo, non omogeneo e generalmente non isotropo. Sono costituiti, quindi, da una serie di blocchi di roccia intatta, separati da discontinuità (giunti, faglie, piani di stratificazione) che rappresentano “piani di debolezza”. L'insieme dei blocchi e delle discontinuità costituisce l'ammasso roccioso, condizionato nel suo comportamento macroscopico dalle caratteristiche meccaniche della roccia intatta e soprattutto dalle caratteristiche geometriche e meccaniche delle discontinuità.



*Figura 2.1: Esempio di ammasso roccioso con discontinuità e blocchi.*

Quando si ha a che fare con il comportamento meccanico di solidi, un'assunzione comune è che essi siano mezzi continui, omogenei ed isotropi, ma gli ammassi rocciosi sono molto più complessi e le loro proprietà fisiche e meccaniche variano in relazione alle caratteristiche geologiche del sito, alla presenza di contatti e di discontinuità, allo stato di tensione pre-esistenti, alla presenza di flusso d'acqua nelle discontinuità ed alla scala del problema. La loro caratterizzazione non può prescindere dalla definizione delle caratteristiche meccaniche della roccia e delle discontinuità e dalle caratteristiche geometriche di queste ultime.

In generale lo studio delle condizioni di stabilità di un ammasso roccioso ed in particolare quello inerente alle condizioni di stabilità di un versante in roccia o di un fronte di scavo prevede innanzitutto la scelta di un modello geomeccanico che descriva adeguatamente l'ammasso roccioso. Il modello deve essere in grado rappresentare l'esplicitarsi di cause di potenziali instabilità, che portino, in termini cinematici, all'insorgere di movimenti e alla loro propagazione. Per di più, il modello deve considerare quelle che sono le resistenze intrinseche del materiale coinvolto, in grado di contrastare la perdita di equilibrio statico. Quindi la scelta del modello di calcolo è strettamente legata al grado di fratturazione dell'ammasso roccioso, confrontato con le dimensioni dell'opera stessa (*Barton, 1973*). Risulta fondamentale, l'individuazione di quello che si definisce "Representative Elementary Volume" (REV) o volume elementare rappresentativo, che stabilisce il minimo volume richiesto affinché una certa proprietà misurata sia indipendente dalle dimensioni del campione.

L'analisi di stabilità di un versante in roccia spesso riguarda la mobilitazione di blocchi, cunei o volumi che si mobilitano lungo i sistemi di discontinuità presenti. La scelta del modello ricade quindi in quella del discontinuo, in cui è necessario caratterizzare l'ammasso roccioso attraverso la definizione delle caratteristiche meccaniche della matrice rocciosa, o roccia intatta, di cui esso è costituito, e la caratterizzazione geometrica (orientazione, persistenza, spaziatura, etc.) e meccanica delle discontinuità.

Nel seguito verranno quindi evidenziati quelli che sono gli strumenti teorici e metodologici generali, utilizzati non solo per la caratterizzazione geomeccanica delle discontinuità, della roccia intatta e degli ammassi rocciosi nel loro complesso, nonché alcuni degli strumenti di misura e di calcolo che si possono impiegare per individuazione dei possibili cinematismi e l'analisi delle condizioni di stabilità.

Inizialmente vengono definite le caratteristiche delle discontinuità e i parametri caratteristici ad esse associate, nonché le tecniche di rilievo tradizionali e più innovative e di interpretazione dei dati utili a riconoscere i meccanismi di rottura associati al comportamento meccanico delle discontinuità. Negli ultimi anni sempre più diffuse sono le tecniche di rilievo delle discontinuità basate sul rilievo fotogrammetrico o laser-scanner degli ammassi rocciosi. Per tale ragione nel capitolo vengono esposti quelli che sono gli

elementi teorici di fotogrammetria, utili a comprendere gli strumenti utilizzati nel rilievo geostrutturale di non contatto.

Si analizzeranno brevemente, quelle che sono le caratteristiche necessarie per definire il comportamento meccanico della matrice rocciosa in modo da delineare i parametri fondamentali per l'individuazione delle caratteristiche dell'ammasso roccioso, inteso come continuo equivalente. Quindi si illustreranno i principali metodi di classificazione e il criterio di resistenza associato.

In fine viene descritta la procedura per l'analisi di stabilità, andando ad analizzare i meccanismi principali di instabilità degli ammassi rocciosi. L'individuazione dei cinematismi che si possono verificare, partendo dai dati di giacitura dei sistemi di discontinuità, è possibile grazie all'applicazione del test di Markland (*Markland, 1972*).

Nei problemi di carattere discontinuo il metodo che viene utilizzato per la modellazione numerica è il "Distinct Element Method" (DEM). Nei capitoli successivi si esporranno quelli i principali aspetti di questo metodo e del codice di calcolo utilizzato che in questo caso è "3DEC", Three-Dimension Distinct Element Code.

## 2.1. CARATTERIZZAZIONE DELLE DISCONTINUITÀ

---

I sistemi discontinuità in un ammasso roccioso rappresentano elementi di debolezza che influiscono sullo stato tensionale, sulle caratteristiche di resistenza e deformabilità dell'ammasso. Per tale motivo è necessario comprendere a fondo le proprietà geometriche, meccaniche e idrologiche delle discontinuità ed il modo in cui esse influenzano le proprietà meccaniche dell'ammasso roccioso e, quindi, come questi rispondono a perturbazioni tensionali e o deformative in essi indotte azioni antropiche (scavi a cielo aperto o sotterranei) o naturali (pressioni idrauliche dei fluidi lungo le rette di fratture, azioni sismiche, etc).

Dal punto di vista meccanico una discontinuità può essere intesa come un'interruzione di continuità degli spostamenti. Considerando le due facce di una singola discontinuità, a causa dell'apertura o chiusura o dello scorrimento delle facce stesse, un punto su una di

esse subisce uno spostamento relativo sia in direzione normale ( $Dn$ ) che in direzione tangenziale ( $Ds$ ) rispetto al corrispondente punto appartenente all'altra.

Negli ammassi rocciosi queste fratture si originano per fenomeni diversi a seconda della storia geologica, e in generale nascono per combinazione di tre modi elementari di sollecitazione della fessura:

- a) Apertura (Modo I): in cui  $Dn \neq 0$
- b) Scivolamento nel piano (Modo II) in cui  $Ds \neq 0$
- c) Strappo (Modo III)

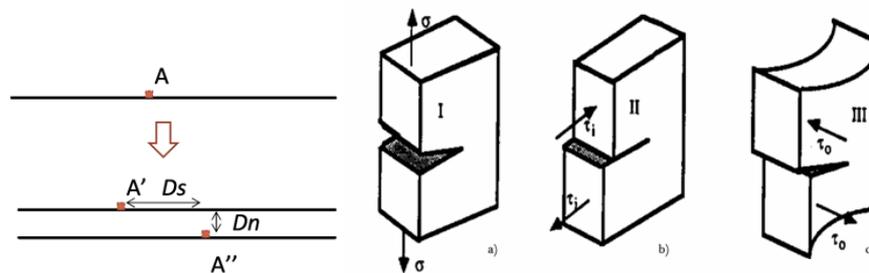


Figura 2.2: Modi elementari di sollecitazione della fessura.

Le discontinuità sono presenti negli ammassi rocciosi sottoforma di faglie o famiglie di giunti. Le faglie si formano per sollecitazioni di taglio in cui i piani subiscono grandi spostamenti. Questi possono avvenire lungo piani ben definiti o, nella maggior parte dei casi, lungo fasce di materiale altamente fratturato e alterato. I giunti sono fratture di dimensioni ridotte dovute a sollecitazioni di taglio e/o trazione subite dalla matrice rocciosa. Possono trovarsi singolarmente o in genere come sistemi (famiglie o set), formati da una serie di fratture caratterizzate da orientamento simile, alle quali può essere attribuita la stessa genesi. Nell'ammasso roccioso possono esistere anche zone di eterogeneità orientata del materiale, detta scistosità, che non rappresenta un vero e proprio piano di discontinuità, poiché, essendo stratificazioni cementate, vale l'ipotesi di continuità degli spostamenti, ma ne rappresentano comunque dei piani di debolezza meccanica.

Sotto l'aspetto ingegneristico, in particolare nei problemi di stabilità dei versanti, risulta fondamentale analizzare l'interazione spaziale delle discontinuità e la conseguente

formazione di blocchi che possono mobilitarsi per raggiungimento di condizioni critiche lungo singoli piani di discontinuità estesi e persistenti. Il possibile scorrimento relativo di due blocchi è condizionato dalle le caratteristiche geometriche (orientazione, spaziatura, persistenza, numero dei sistemi di discontinuità presenti, etc.) e meccaniche delle discontinuità quali la resistenza al taglio offerta dalle superfici a contatto.

La Società Internazionale di Meccanica delle Rocce (*ISRM,1981*) descrive le procedure da seguire per la caratterizzazione quantitativa delle discontinuità e indica quelle che sono le prove di laboratorio e di sito per la definizione della resistenza al taglio, illustrando le modalità di esecuzione delle stesse. Per descrivere compiutamente le discontinuità, l'ISRM indica dieci parametri caratteristici fondamentali (riportati nel seguito) che vengono stimati direttamente da dati collezionati in sito attraverso rilievi con tecniche tradizionali, fotogrammetrici o laser scanner.

#### 2.1.1. RILIEVO E DEFINIZIONE DEI PARAMETRI CARATTERISTICI DELLE DISCONTINUITÀ

La prima operazione da effettuare per l'analisi di un ammasso roccioso è quindi il rilievo delle discontinuità, in modo da raccogliere le proprietà geometriche delle stesse. Le otto caratteristiche fondamentali, quali orientazione, spaziatura e frequenza, continuità o persistenza, rugosità, resistenza delle pareti, apertura, riempimento e presenza di filtrazioni di acqua, permettono di desumere altri due parametri che sono: il numero di famiglie di discontinuità nonché forma e dimensione dei blocchi.

Il rilievo delle discontinuità avviene in sito, lungo affioramenti dell'ammasso roccioso in superficie o attraverso fori di sondaggio in profondità. I metodi di rilievo dipendono dalla scala del problema e si dividono in generale in:

- *Rilievo tradizionale*: metodi classici a piccola e media scala quali: stendimenti, finestre di rilievo e fori di sondaggio.
- *Tecniche automatiche*: metodi su piccola, media e grande scala come quelli fotogrammetrici aerei e terrestri o laser scanner.

Le tecniche tradizionali presentano una serie di svantaggi dovuti al fatto che possono essere condotte in situazioni di scarsa sicurezza con tempi di esecuzione lunghi e costosi.

Essi vengono generalmente condotti lungo stendimenti lineari e quindi prevedono il riconoscimento delle sole discontinuità intercettate dalla bindella metrica. Oltre a ciò, non tutte le pareti possono essere accessibili inducendo risultato che potrebbe essere statisticamente non rappresentativo dei sistemi presenti, in quanto presenta errori indotti dalla soggettività di chi esegue il rilievo e dalle possibilità di accesso diretto agli affioramenti. Da qui lo sviluppo e l'impiego sempre più frequente di rilievi definiti di non-contatto che consentono il rilievo di interi affioramenti.

Ovviamente, alcuni parametri, quali ad esempio la resistenza delle pareti, l'apertura le caratteristiche del riempimento, ecc, possono essere determinate con facilità solo attraverso i rilievi a contatto.

A prescindere dalla tecnica di rilievo, i parametri geometrici necessari per la caratterizzazione geomeccanica di un ammasso roccioso vengono riportati qui di seguito, secondo le raccomandazioni ISRM.

### **1. Orientazione:**

L'orientazione rappresenta la giacitura della discontinuità nello spazio e viene definita attraverso due angoli che sono usualmente definiti sulla base dell'inclinazione del piano rispetto all'orizzontale e della direzione di immersione del piano:

- *Dip*: l'angolo definito tra la retta di massima pendenza del fronte e la sua proiezione sull'orizzontale, tale angolo varia tra  $0^\circ$  e  $360^\circ$ ;
- *Dip Direction*: angolo definito in senso orario tra l'orizzontale proiettata ed il nord, definito tra  $0^\circ$  (strato orizzontale) e  $90^\circ$  (strato verticale).

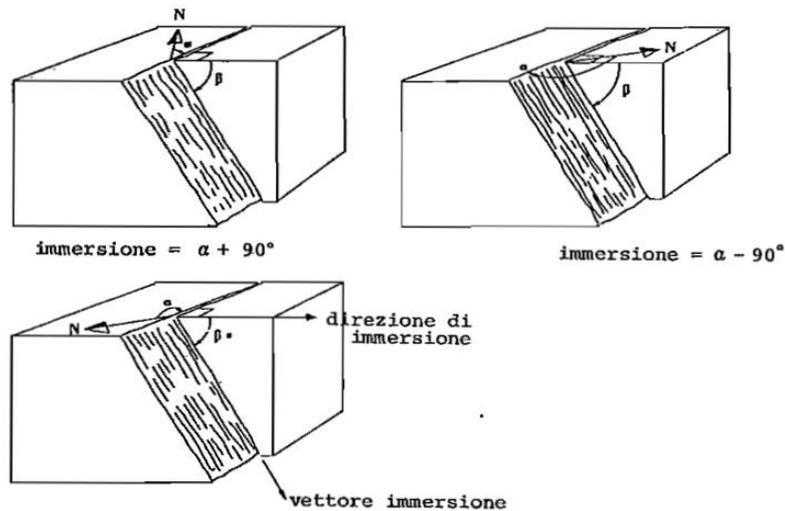


Figura 2.3: Schemi indicanti direzione ( $\alpha$ ), inclinazione ( $\beta$ ) ed immersione ( $\alpha \pm 90^\circ$ ) di tre piani diversamente orientati (ISRM, 1981).

Si può anche definire la giacitura di un piano di discontinuità attraverso la sua direzione (angolo che forma una linea orizzontale tracciata sul piano di discontinuità con il nord magnetico, misurando in senso orario) e la sua inclinazione (De Vallejo, 2005). Le discontinuità sono generalmente definite attraverso questi angoli, o possono essere rappresentate anche attraverso la retta normale al piano chiamata "polo" che avrà anche esso una dip e una dip direction. Queste misure, nell'ambito di un rilievo tradizionale, vengono effettuate tramite una bussola con inclinometro.

Risulta utile, soprattutto per riconoscere i cinematismi nei problemi di stabilità, la rappresentazione grafica delle discontinuità attraverso la tecnica della proiezione sferica. Si utilizzano i reticoli stereografici e in particolare: il "reticolo equatoriale della proiezione equiarea", dove si possono rappresentare piani e poli, e il "reticolo polare della proiezione equiarea", sul quale si possono rappresentare solo poli.

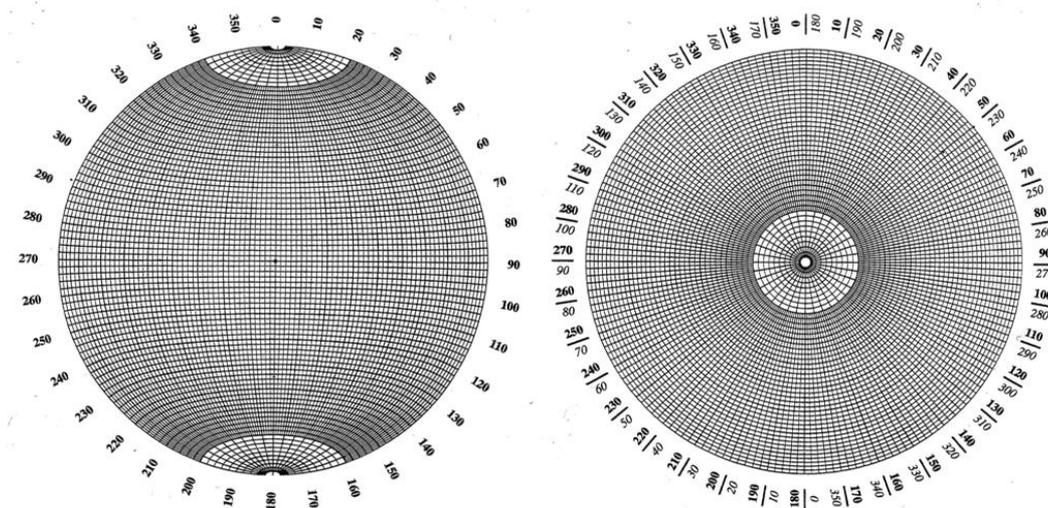


Figura 2.4: (a sinistra) reticolo equatoriale della proiezione equiarea, (a destra) reticolo polare della proiezione equiarea.

## 2. Spaziatura:

La spaziatura si definisce come la minima distanza tra due discontinuità adiacenti, appartenenti alla stessa famiglia, misurata in direzione ortogonale alle stesse. Questa è fondamentale perché influenza la dimensione dei blocchi ed è utile per la scelta del modello geomeccanico rappresentativo dell'ammasso. Nel rilievo tradizionale si utilizza la rotella metrica (Figura 2.5) di almeno 3 metri graduata in millimetri, che deve essere collocata quando è possibile in direzione ortogonale alla traccia superficiale delle discontinuità. Se così non è sarà necessario apportare delle correzioni per ottenere la vera spaziatura (ISRM, 1993).

In particolare, presa la distanza misurata  $d$ , la spaziatura reale si ottiene, tenendo conto dell'angolo  $\alpha$  tra la discontinuità e la linea di campionamento:

$$S = d \cdot \sin \alpha$$

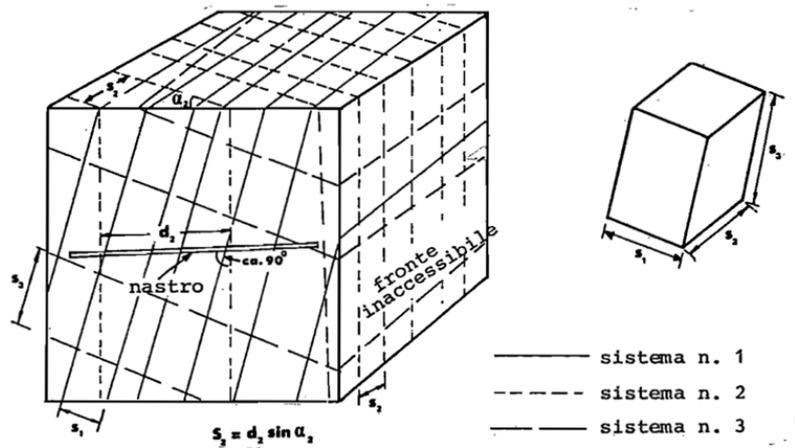


Figura 2.5: Misura della spaziatura in una superficie esposta dell'affioramento (ISRM, 1993).

È utile fare riferimento alla spaziatura media o al valore modale, che può essere ricavato per ciascun sistema di discontinuità o riferirsi all'intero ammasso. La spaziatura media viene misurata lungo uno stendimento di lunghezza  $L$  in cui vengono rilevate  $N$  discontinuità:

$$S_m = \frac{L}{N} \quad [m]$$

Un altro metodo è quello di esprimere la spaziatura attraverso la frequenza delle discontinuità, ossia il numero di discontinuità per unità di lunghezza. La frequenza caratteristica dell'ammasso è pari alla somma delle frequenze dei singoli sistemi.

$$\lambda = \frac{N}{L} = \frac{1}{S_m} \quad [m^{-1}]$$

$$\lambda_{tot} = \sum_i \lambda_i$$

In questo modo è possibile, con un numero di misure sufficientemente grande, costruire una distribuzione statistica dei valori misurati e rappresentarli in un istogramma. In particolare, la distribuzione statistica utilizzata è quella di frequenza esponenziale negativa, che approssima adeguatamente l'andamento delle misure.

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x}$$

### 3. Persistenza:

Le discontinuità nella realtà non sono piani indefinitamente estesi e vengono interrotte da zone di roccia intatta detti “ponti di roccia”. La continuità o persistenza di un piano di discontinuità rappresenta la sua estensione superficiale, misurata secondo la direzione del piano e lungo la sua immersione (*De Vallejo, 2005*).

La persistenza  $K$  è data dal rapporto tra la somma delle aree discontinue e l'area totale di riferimento.  $K$  varia, quindi, tra 0 e 1, valori limite che rappresentano, rispettivamente, la situazione di roccia intatta e di discontinuità infinitamente estesa.

$$K = \lim_{A \rightarrow \infty} \frac{\sum_i a_i}{A}$$

Essendo uno dei parametri più difficili da quantificare è possibile intenderla in modo semplificato considerando la lunghezza della traccia visibile sulla superficie libera, e sarà pari al rapporto tra somma delle lunghezze degli  $i$ -esimi segmenti di giunto e la lunghezza totale del segmento.

$$K = \lim_{L \rightarrow \infty} \frac{\sum_i l_i}{L}$$

Per valori elevati di persistenza l'ammasso risulterà molto più condizionato dalla presenza delle discontinuità, e in generale l'estensione di queste nell'ammasso roccioso è classificata nel modo seguente:

*Tabella 2.1: Descrizione della persistenza (fonte ISRM, 1993).*

Persistenza	Lunghezza [m]
Molto bassa	<1
Bassa	1:3
Media	3:10
Elevata	10:20
Molto elevata	>20

#### 4. Forma della superficie:

Le superfici delle discontinuità sono composte da asperità che seguono una distribuzione di tipo frattale. Si verifica sperimentalmente che la resistenza a taglio delle discontinuità dipende dall'inclinazione delle asperità ed è tanto più grande quanto le asperità sono inclinate. Per la stima della resistenza la scala è fondamentale per questo di parla di:

- *Ondulazione*: a grande scala (decimetrica e metrica) relativamente al piano medio delle discontinuità;
- *Rugosità*: a piccola scala (millimetrica e centimetrica).

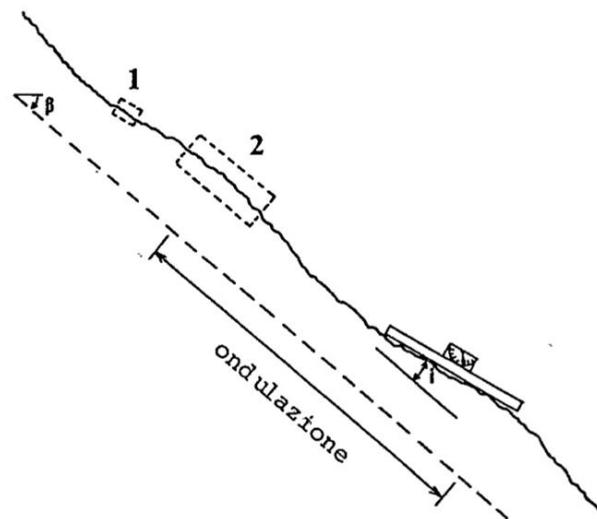


Figura 2.6: Le rugosità in diversa scala delle discontinuità sono determinate con prove su scala differente (1, prova di taglio in laboratorio; 2, prova di taglio in situ). L'ondulazione può essere caratterizzata con l'angolo " $\beta$ " (ISRM, 1993).

L'ondulazione viene valutata principalmente a livello qualitativo mentre, la rugosità viene misurata in campagna con diversi metodi sia a livello quantitativo che qualitativo. Il metodo più diffuso è quello che prevede l'utilizzo del pettine di Barton (Figura 2.7). La valutazione della scabrezza è data dal confronto visivo tra i profili ricavati su provini di 10 cm, con 10 profili standard ai quali è stato associato un valore di rugosità definito dal parametro JRC, Joint Roughness Coefficient, compreso tra 0 e 20.

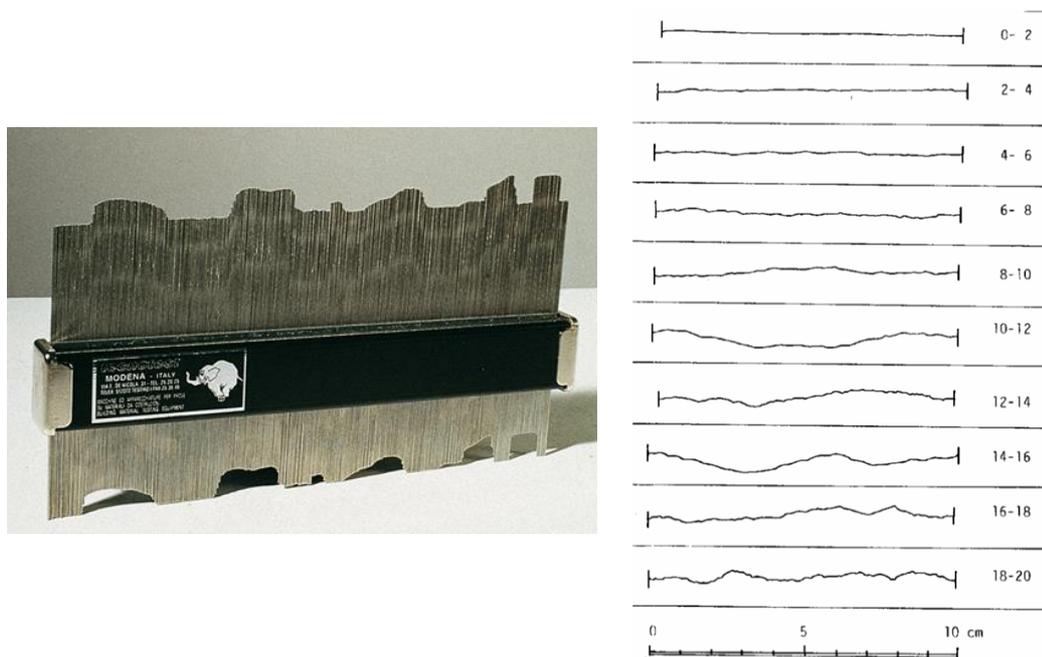


Figura 2.7:(a sinistra) Pettine di Barton, (a destra) Profili di rugosità e relativi intervalli di valori di JRC (Barton & Choubey, 1977).

### 5. Resistenza delle pareti:

Altrettanto fondamentale per la stima della resistenza a taglio delle discontinuità e delle deformabilità delle stesse, è la resistenza delle superfici. Questa dipende dal tipo di matrice di cui sono costituite le asperità, dall'alterazione e dalla presenza di riempimento. Infatti, le superfici spesso sono alterate da filtrazione di acque meteoriche, per cui la loro resistenza sarà minore rispetto a quella della matrice rocciosa.

La prova che ci permette di stimare la resistenza in campagna è quella sclerometrica, effettuata con lo sclerometro o martello di Schmidt utilizzato direttamente sulla superficie. Attraverso i risultati di questa prova è possibile stimare il valore del JCS, Joint Compressive Strength, che è un parametro prossimo al valore di resistenza a compressione monoassiale del materiale di superficie.

Le discontinuità naturali sono soggette ad effetti di scala, ciò significa che i parametri determinati sui campioni di laboratorio non possono essere considerati rappresentativi delle condizioni in sito. In laboratorio, la scabrezza è ricondotta alla tessitura della superficie del giunto, cioè alle asperità superficiali; mentre in sito ci si riferisce

all'ondulosità del versante. A causa di questa differenza, la resistenza al taglio delle discontinuità scabre subisce notevoli variazioni alle diverse scale. L'effetto scala della superficie delle discontinuità e della resistenza al taglio è stato studiato da molti autori, con risultati a volte contraddittori.

L'opinione largamente condivisa circa l'effetto scala della resistenza al taglio delle discontinuità deriva dal lavoro di Bandis (*Bandis et al., 1981*). La resistenza al taglio dei giunti dipende principalmente dalla scabrezza e dall'ondulosità dei piani, quindi dalla superficie di prova. Da prove di taglio su discontinuità riprodotte in laboratorio, si è osservato che all'aumentare della grandezza del campione la resistenza al taglio di picco decresce (effetto scala negativo), mentre lo spostamento tangenziale di picco aumenta. Il fenomeno è tanto più accentuato quando più la discontinuità è scabra. Questo comportamento dipendente dalla scala è in parte attribuito alla variazione della resistenza delle asperità intatte ed in parte alla variazione della geometria della superficie: Barton e Bandis (*Barton & Bandis, 1982*) hanno introdotto una correzione empirica sull'effetto scala per i parametri JRC e JCS nel criterio di resistenza al taglio:

$$JCS_n = JCS_0 \left( \frac{L_n}{L_0} \right)^{(-0.03JCS_0)}$$

$$JRC_n = JRC_0 \left( \frac{L_n}{L_0} \right)^{(-0.02JRC_0)}$$

in cui:

- $JRC_n$  e  $JCS_n$  sono i valori di scabrezza e di resistenza del giunto alla scala del sito;
- $JRC_0$  e  $JCS_0$  sono i valori di scabrezza e di resistenza ottenuti in laboratorio (ad esempio attraverso profilometro e sclerometro);
- $L_n$  è lunghezza del giunto alla scala del sito;
- $L_0$  è la lunghezza di riferimento alla scala del laboratorio.

Tuttavia, si evidenzia che per discontinuità superiori ai cinque metri, i valori di JRC e JCS calcolati con questo metodo sottostimano la resistenza al taglio.

## **6. Apertura:**

L'apertura è la distanza tra i lembi affacciati di una discontinuità in cui lo spazio interposto è riempito di aria o acqua o altro tipo di riempimento. L'apertura da un'idea di quanta acqua percolare nelle discontinuità, ed è quindi importante anche per la considerazione delle tensioni efficaci che agiscono sulle pareti. I giunti quindi possono essere considerati aperti o chiusi e la loro apertura viene misurata direttamente con una riga graduata in millimetri, un calibro od uno spessimetro e classificate secondo le raccomandazioni ISRM.

## **7. Riempimento:**

Il riempimento è il materiale che separa le pareti adiacenti di una discontinuità e solitamente è costituito da sabbia, ghiaia, limo, argilla breccia più o meno fine e milonite, materiali con caratteristiche di resistenza inferiori a quelli della roccia. In alcuni casi possono essere presenti strati di minerali e discontinuità cementate (vene di quarzo e calcite).

Il riempimento influenza il comportamento delle discontinuità per cui bisogna descrivere le sue proprietà e il suo stato: ampiezza, grado alterazione, mineralogia, granulometria particelle, resistenza del riempimento, spostamenti, contenuto acqua e permeabilità.

## **8. Presenza di acqua:**

L'acqua all'interno di un ammasso roccioso deriva generalmente dal flusso che circola nelle fratture (permeabilità secondaria), nonostante in certe rocce permeabili anche le infiltrazioni attraverso la matrice rocciosa (permeabilità primaria) possono essere importanti (*De Vallejo, 2005*).

In alcuni casi l'acqua filtra nelle discontinuità e si può avere acqua che scorre o acqua in pressione, a seconda della portata rispetto all'apertura. Misurare la portata nella frattura è molto difficile per cui in generale si indica: assenza di acqua, stillicidio o venuta d'acqua. La descrizione delle filtrazioni nelle discontinuità viene descritta nelle raccomandazioni ISRM 1993.

### **9. Numero delle famiglie di discontinuità:**

Il numero di sistemi di discontinuità, la loro spaziatura caratteristica e l'orientazione relativa influenza non solo la morfologia degli ammassi rocciosi affioranti ma anche il comportamento meccanico degli ammassi rocciosi, sia in termini di resistenza che di deformabilità. Il numero di sistemi determina la misura in cui la massa rocciosa può deformarsi senza che si provochi la fratturazione della roccia integra. Il numero di sistemi potrebbe essere un fattore determinante per la stabilità di un pendio roccioso dal momento che tradizionalmente l'orientazione delle discontinuità relativamente al fronte del pendio è considerato di primaria importanza. La probabilità di instabilità è legata alla presenza di un numero sufficiente di sistemi, ma un gran numero di famiglie potrebbe cambiare la potenziale modalità di instabilità del pendio da traslatorio o di ribaltamento a rotazionale circolare (*ISRM, 1993*).

Per determinare quelle che sono le famiglie di giunti presenti all'interno dell'area in esame è necessario individuare quelli che sono i parametri che si ripetono e legarli ad ogni sistema, e distinguerli da quelli non sistematici. In questo caso è importante tenere in considerazione la spaziatura dei singoli sistemi in modo da definire la dimensione dei blocchi.

Il numero di discontinuità presenti può essere rappresentato visivamente come parte della presentazione dei dati di orientazione. Il numero di sistemi di discontinuità che compaiono localmente deve essere descritto in modo individuale. Graficamente le famiglie di discontinuità sono individuabili attraverso proiezione stereografica, diagrammi a rosetta, diagrammi a blocchi o simboli sulle carte geologiche.

Nella proiezione stereografica la distribuzione spaziale dei dati è rappresentata sul reticolo di Schmidt-Lambert. Riportando i poli delle giaciture misurate in campagna sul reticolo si individuano linee di egual densità, e il valore centrale della concentrazione può essere assunto come il valore di orientazione media di quel determinato insieme di discontinuità, con una certa dispersione.

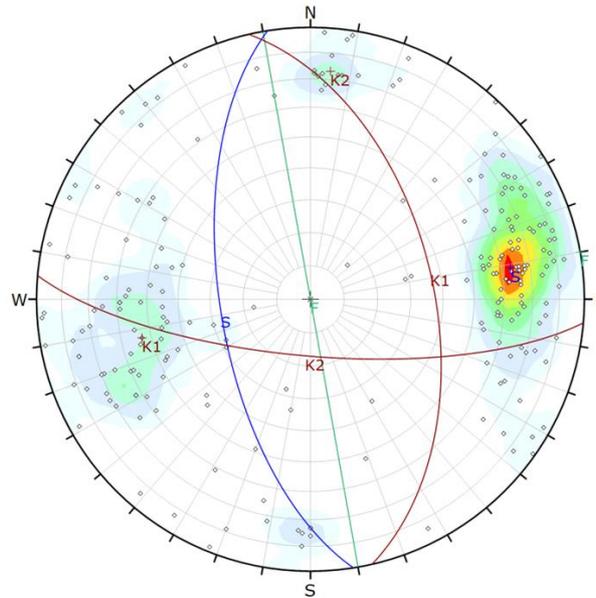


Figura 2.8: Esempio di reticolo equiarea polare che rappresenta la giacitura di tre famiglie di discontinuità.

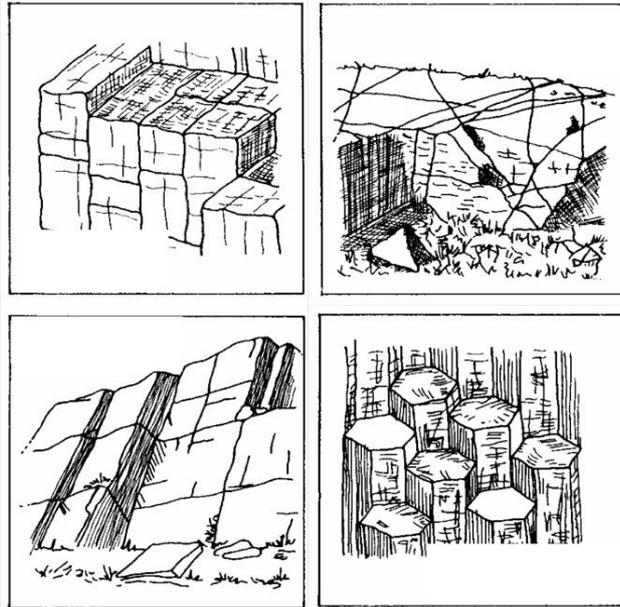
### 10. Dimensione e volume dei blocchi:

L'intersezione delle discontinuità, la loro spaziatura e persistenza determinano nell'ammasso roccioso la formazione di blocchi, e la loro forma è influenzata dal numero di sistemi e dalla loro orientazione relativa. Le proprietà combinate di dimensione dei blocchi e la resistenza al taglio esercitata tra loro determinano il comportamento meccanico della massa rocciosa sotto certe condizioni di tensione (*ISRM, 1993*). La dimensione dei blocchi può essere ricavata attraverso l'indice della dimensione dei blocchi che è dato dal rapporto fra il prodotto dei valori di spaziatura delle famiglie e il prodotto dei loro angoli relativi (*Palmstrom, 1996*):

$$I_b = \frac{S_1 \cdot S_2 \cdot S_3}{\gamma_{12} \cdot \gamma_{13} \cdot \gamma_{23}}$$

Un altro metodo potrebbe essere quello di valutare il numero volumetrico delle discontinuità  $J_V$ , che rappresenta il numero totale delle discontinuità che intersecano una unità di volume della massa rocciosa:

$$J_V = \frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} + \frac{1}{S_3}$$



*Figura 2.9: Schizzi di masse rocciose indicanti la forma dei blocchi: a blocchi, irregolare, tabulare e colonnare (ISRM 1993).*

## 2.1.2. TIPOLOGIE E TECNICHE DI RILIEVO

---

Come già detto, il rilievo è una delle principali operazioni necessarie per la caratterizzazione dell'ammasso roccioso. Lo studio e l'identificazione dei sistemi di giunti che caratterizzano il versante è possibile proprio grazie alla programmazione e realizzazione di campagne di rilievi geostrutturali e geomeccanici.

Nella pratica si distinguono generalmente rilievi geomeccanici speditivi, in cui vengono misurati soltanto alcuni parametri fondamentali, rilievi di dettaglio e di grande dettaglio, in cui si misurano più parametri. Nel caso di rilievi di dettaglio vengono valutati tutti i parametri necessari per la caratterizzazione dell'ammasso roccioso, mentre nel caso di grande dettaglio si misurano ulteriori parametri richiesti esplicitamente dalla finalità del lavoro.

### 2.1.2.1. IL RILIEVO TRADIZIONALE

---

Nel rilievo tradizionale l'operatore, posto direttamente "a contatto" con la parete rocciosa, effettua misurazioni in modo da poter caratterizzare l'ammasso roccioso. L'obiettivo è quello di riconoscere e caratterizzare le famiglie di discontinuità, e definirne i parametri geomeccanici ad esse associati.

Gli approcci utilizzati nel rilievo delle discontinuità sono due: il primo prevede di realizzare degli stendimenti in cui le misurazioni vengono fatte una bandella metrica, fornendo la misura progressiva corrispondente alla posizione della discontinuità stessa. Il secondo approccio si basa sulla misurazione e parametrizzazione di tutte le discontinuità presenti all'interno di una finestra di rilievo. Attraverso questi approcci quindi è possibile individuare i sistemi di discontinuità e associarne i parametri caratteristici di orientazione, spaziatura e frequenza, persistenza, rugosità, resistenza delle pareti, apertura, riempimento e condizioni idrauliche.

Tuttavia, il rilievo tradizionale presenta alcuni limiti, dovuti al fatto che le misure sono localizzate. Si presentano errori dovuti all'imprecisione, infatti è possibile misurare valori di spaziatura maggiori rispetto alla lunghezza della scanline e quindi il valore caratteristico di una certa popolazione viene quindi sottostimato. Anche il basso numero di campioni può

portare a deviazioni dal valore medio, portando a stime imprecise. In fine, l'orientazione relativa tra lo stendimento e una o più famiglie può portare ad una non corretta quantificazione della spaziatura. Questo è detto errore di Terzaghi, in cui risultano favorite le famiglie che presentano maggior persistenza e orientazione perpendicolare alla scanline (Terzaghi, 1965).



Figura 2.10: Bussola e scanline per il rilievo delle discontinuità.

#### 2.1.2.2. IL RILIEVO DA NON CONTATTO

---

I metodi di rilievo “indiretto” o “non contatto” sono metodi in cui le misure non vengono fatte direttamente sulla parete in roccia, ma vengono effettuate da remoto, avvalendosi di tecnologie basate sulla fotogrammetria digitale. Grazie all’utilizzo di opportuni codici di calcolo, le misure vengono effettuate sul DSM, Digital Surface Model, modello rappresentato da punti quotati disposti secondo griglie planimetriche regolari o irregolari.

Questa tecnica nasce dall’analisi di immagini bidimensionali e dal riconoscimento, su quest’ultime, di tracce di discontinuità sia manualmente (Tsoutrelis et al., 1990; Crosta, 1997) che automaticamente (Reid & Harrison, 2000; Hadjigeorgiou et al., 2003; Lemy & Hadjigeorgiou, 2003; Grenon et al. 2004). Successivamente la tecnica si è evoluta attraverso l’uso della stereofotogrammetria (Hagan, 1980; Harrison, 1993; Gaich et

*al.,2004, 2006; Birch, 2006*) e dei rilievi a scansione laser, nei quali si trattano nuvole dense di punti (*Kemeny et al. 2003, 2006; Dolan, 2006*).

Questo approccio è stato impiegato ed applicato, fornendo ottimi risultati a confronto con quelli del rilievo tradizionale, al rilievo geometrico di affioramenti rocciosi superficiali (*Kemeny et al., 2003,2006; Roncella e Forlani, 2005; Trinks et al., 2005; Feng e Roshoff, 2006; Haneberg, 2006; Slob et al., 2007; Ferrero et al., 2009; Sturzenegger e Stead, 2009; Gigli e Casagli, 2011; Lato et al., 2012*).

L'applicazione di queste metodologie consolidate ha portato all'estrazione dei piani di discontinuità e delle loro caratteristiche geometriche, operando sulle immagini e sul DSM, ottenuti mediante rilievo fotogrammetrico (*Ferrero et al.,2010*). Si possono quindi ottenere misure di giacitura, spaziatura e persistenza delle discontinuità, attraverso opportuni software, come in questo caso tramite il software "Rockscan" (*Ferrero et al., 2009*).

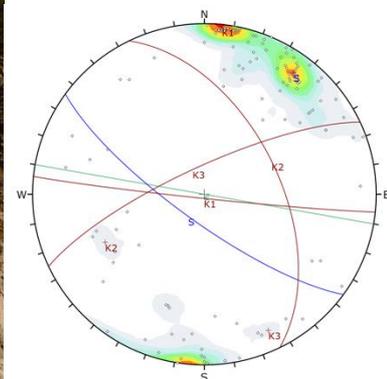
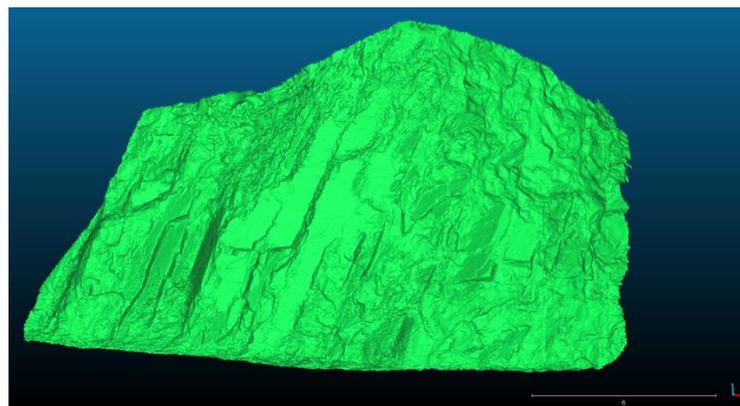


Figura 2.11: (in alto) modello digitale del settore A2\_b; (in basso) interfaccia del software Rockscan e stereogramma dei piani rilevati del settore A2\_b.

I vantaggi principali del rilievo da non contatto, rispetto a quello tradizionale, riguardano la rapidità e l'accuratezza con cui vengono effettuate le misure che risultano ripetibili nel tempo (*Ferrero et al., 2010*). Il rilievo indiretto inoltre da la possibilità di poter rilevare l'intera parete, al contrario del rilievo tradizionale che è condizionato dall'accessibilità del sito. In questo modo si dispone di una popolazione di misure sufficientemente grande da poter caratterizzare le discontinuità attraverso distribuzioni statistiche con un determinato grado di affidabilità.

### 2.1.3. PARAMETRI MECCANICI E CRITERI DI RESISTENZA

---

Nei problemi di stabilità degli ammassi rocciosi la conoscenza delle caratteristiche di resistenza a taglio delle discontinuità è di notevole importanza. In particolare, è conveniente studiare il comportamento meccanico delle discontinuità lungo due direzioni: normale al piano di discontinuità e tangenziale a esso.

Per la caratterizzazione delle discontinuità la prova di laboratorio che permette di determinarne il comportamento meccanico è quella di taglio diretto nella scatola di Hoek. Si eseguono diverse prove applicando e mantenendo costante, per ciascuna prova, il carico assiale di compressione. Lo sforzo di taglio viene incrementato fino a quando non si raggiungono le condizioni di scorrimento ed infine si misurano gli spostamenti assiali e tangenziali tra le due parti del provino.

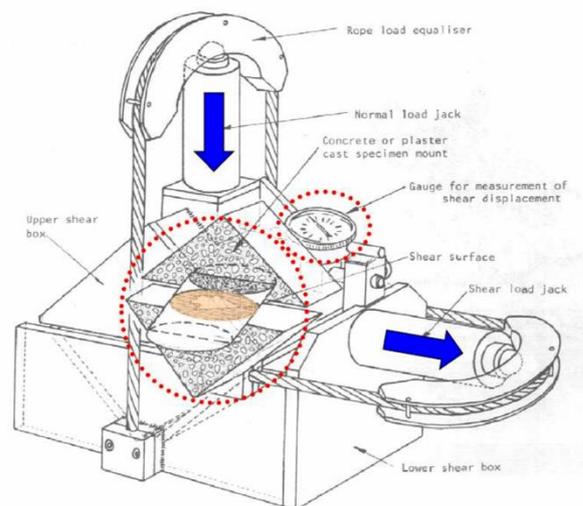


Figura 2.12: Schema della scatola di Hoek.

In questo modo si riesce a descrivere il comportamento del giunto sia nelle condizioni di picco che in quelle residue. Nello scorrimento del provino le asperità vengono scavalcate provocando uno spostamento verticale e la conseguente apertura del giunto, cioè il fenomeno della dilatanza. All'aumentare dello sforzo assiale il comportamento tende a essere duttile aumentando la resistenza a taglio fino ad un limite massimo funzione del tipo di materiale, per cui le asperità si rompono.

Per l'interpretazione del comportamento e la stima della resistenza a taglio ci diversi modelli teorici e/o empirici.

Il più antico e utilizzato è il *criterio lineare di Mohr-Coulomb* (1773) che permette di determinare i valori di resistenza in condizioni residue, cioè considerando idealmente delle discontinuità lisce.

L'involuppo di resistenza è di tipo lineare in cui la resistenza a taglio è direttamente proporzionale allo sforzo normale e all'angolo di attrito residuo, secondo l'equazione:

$$\tau_r = \sigma_n \cdot \tan\phi_r$$

Il criterio si utilizza per la caratterizzazione di  $r$  campioni resi artificialmente lisci in laboratorio o giunti reali estremamente alterati. Il criterio non da buoni riscontri per la resistenza a taglio di picco, in quanto gli involuppi di rottura di picco non sono lineari con angolo d'attrito variabile in funzione dello sforzo normale applicato.

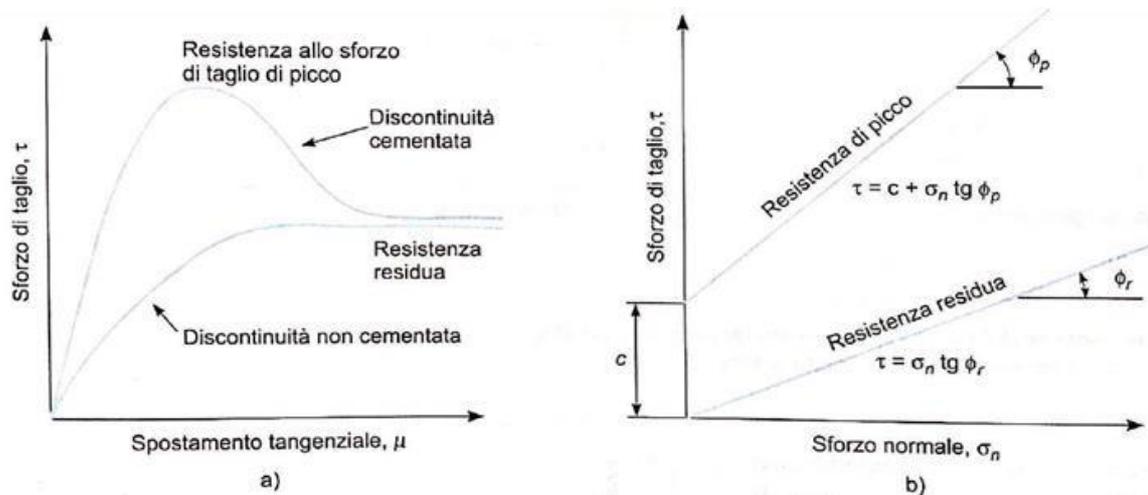


Figura 2.13: a) curve di tensione tangenziale ( $\tau$ ) spostamento tangenziale ( $\mu$ ) per discontinuità piane; b) resistenza al taglio di una discontinuità piana secondo il criterio di coulomb (De Vallejo, 2005).

Un altro criterio utilizzato è il *criterio di Patton* (1966) nel quale si va a considerare la scabrezza delle discontinuità attraverso l'inclinazione delle asperità. Il modello idealizzato da Patton considera le asperità come "denti di sega" con la stessa inclinazione e

caratteristiche di resistenza pari a quelle della roccia intatta. Il criterio di rottura è di tipo bilineare:

$$\tau_r = \sigma_n \cdot \tan(\varphi_r + i) \quad \text{se } \sigma_n < \sigma_{tp}$$

$$\tau_r = c_p + \sigma_n \cdot \tan \varphi_r \quad \text{se } \sigma_n > \sigma_{tp}$$

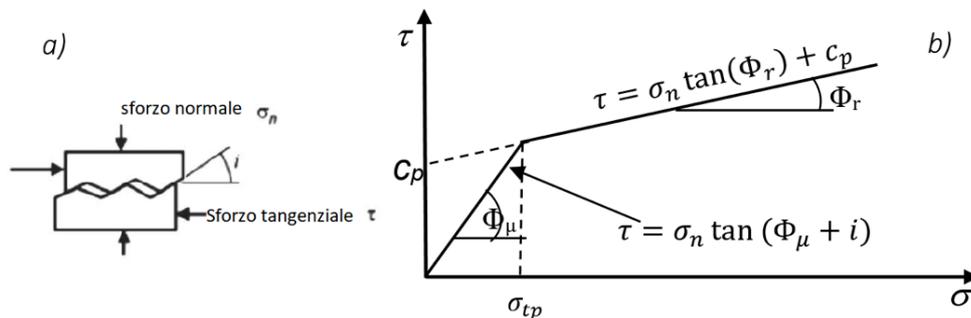


Figura 2.14: Il criterio bilineare di Patton.

Questo criterio presenta però delle limitazioni dovute alla definizione dei parametri, come all'angolo di inclinazione delle asperità e lo sforzo normale che determina la rottura delle asperità.

Il criterio più utilizzato per rappresentare l'andamento non lineare della resistenza è il *criterio di Barton* (1973) nel quale si sostituisce l'inclinazione delle asperità con una formulazione contenente il parametro di rugosità JRC (Joint Roughness Coefficient) ed il parametro di resistenza della matrice rocciosa JCS (Joint Compressive Strength), secondo la seguente relazione:

$$\tau_p = \sigma_n \cdot \tan \left( \varphi_r + JRC \cdot \log_{10} \frac{JCS}{\sigma_n} \right)$$

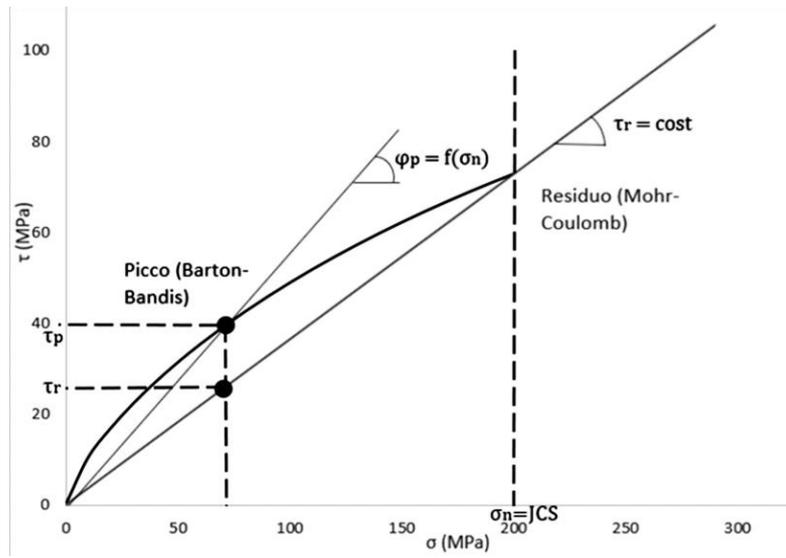


Figura 2.15: Confronto tra l'involuppo di resistenza di Barton con quello di Mohr-Coulomb.

## 2.2. CARATTERIZZAZIONE DELLA MATRICE ROCCIOSA

La matrice rocciosa contiene microdifetti che fanno sì che il provino di laboratorio può considerarsi un REV, studiando la matrice rocciosa come un continuo equivalente. Le prove di laboratorio sono utili in questo caso per classificare e definire le proprietà indice, quali porosità, permeabilità e velocità sonica, e ricavare i parametri di deformabilità e resistenza con prove di compressione monoassiale e triassiale, prove di trazione diretta e Brasiliane e prove di taglio.

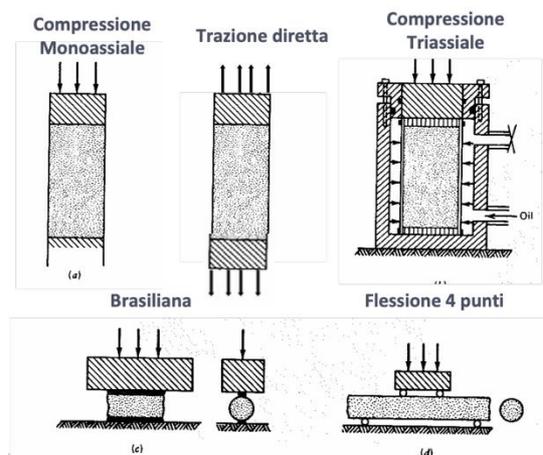


Figura 2.16: Schemi di prove comunemente eseguite nella meccanica delle rocce.

La prova di compressione monoassiale è una delle più utilizzate, e si basa sull'ipotesi che in ogni punto del provino si abbia uno stato tensionale del tipo:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_a & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Lo sforzo assiale viene aumentato fino ad arrivare a rottura per cui si ha  $\sigma_a = C_o$ , cioè al valore di resistenza a compressione monoassiale. Valutando anche le deformazioni assiali e radiali è possibile ricavare il modulo di elasticità e il coefficiente di Poisson della roccia intatta. In particolare, questi parametri di deformabilità vengono convenzionalmente valutati per un livello tensionale pari a  $C_o/2$ , in quanto la prova viene eseguita a controllo di velocità di deformazione in modo da seguire il post picco. La resistenza a compressione è influenzata dall'effetto scala e dal rapporto di forma del provino.

Le prove triassiali vengono eseguite mantenendo la tensione di confinamento costante e aumentando progressivamente lo sforzo assiale fino a rottura. Eseguendo diverse prove sullo stesso materiale con diversi valori di  $\sigma_3$  si ricavano i corrispondenti valori di  $\sigma_1$  ed è così possibile ricavare l'involuppo di rottura secondo il criterio di Coulomb.

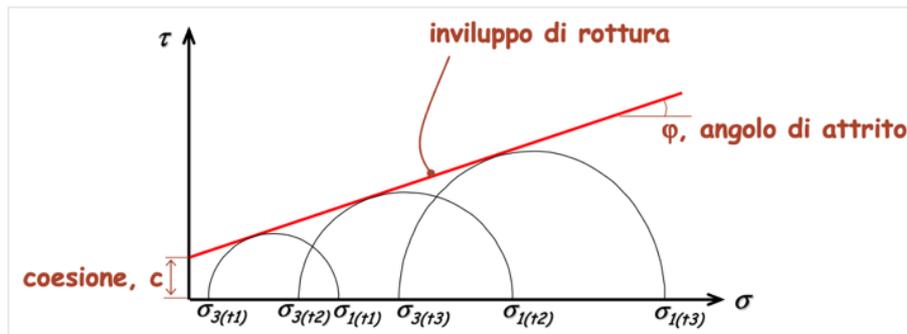


Figura 2.17: Costruzione dell'involuppo di rottura da 3 prove triassiali.

La resistenza a trazione della roccia intatta può essere determinata attraverso prove di trazione diretta o indiretta. Nelle prime lo sforzo di trazione viene applicata direttamente al provino, mentre in quelle di tipo indiretto al provino viene indotta una sollecitazione di trazione imponendo un'azione di compressione. Nella prova di trazione Brasiliana viene applicato su un provino discoidale un carico diametrale di compressione che induce nel centro del provino una sollecitazione combinata di compressione e trazione. Nella prova di flessione su barretta a tre o quattro punti, carichi concentrati vengono applicati sul campione prismatico in modo da indurre sollecitazioni di trazione.

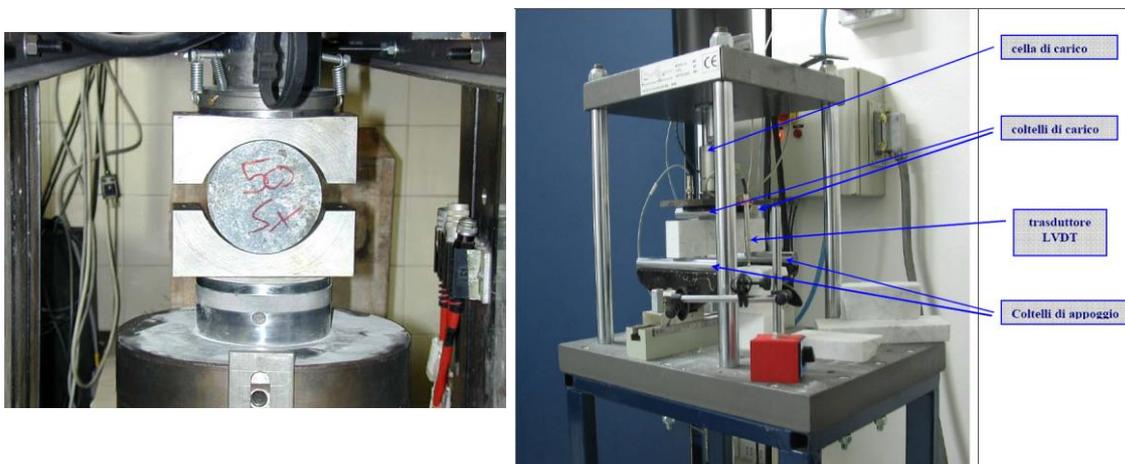


Figura 2.18: (sinistra) Prove di trazione indirette: prova Brasiliana; (destra) prova di flessione su più punti.

Un metodo speditivo per la stima della resistenza a compressione monoassiale è quello del “*Point Load Test*”. Nella “*Prova Point Load*” o “*Prova di Carico Concentrato*” viene esercitata su un campione di roccia o materiale litoide una compressione monoassiale puntiforme fino a provocarne la sua rottura. In questo modo, si ottiene l’Indice di Resistenza  $I_s$ , attraverso il quale è possibile ricavare, empiricamente, la resistenza a compressione monoassiale del materiale di prova,  $C_o$ . In particolare, l’indice di resistenza è dato dal rapporto tra carico massimo applicato e la distanza tra le punte, prima e dopo l’applicazione del carico a rottura:

$$I_s = \frac{P_{max}}{D^2}$$

In alcuni casi si può dire che  $C_o \cong 20 \cdot I_s$ .



Figura 2.19: Attrezzatura per il *Point Load Test*.

I vantaggi delle “*Prova Point Load*” sono dovuti: alla facilità di trasporto dell’attrezzatura, per cui è possibile eseguire queste prove direttamente in sito, sui campioni appena prelevati; al ridotto valore del carico di rottura dei provini, che è circa dieci volte inferiore rispetto a quello da applicare nelle prove di compressione uniassiali; all’uso di provini di qualsiasi forma e dimensione (fino ad un diametro massimo di 102 mm), con notevole risparmio di tempi e costi per la non necessaria preparazione dei provini.

Anche per la matrice rocciosa, così come per gli ammassi rocciosi, l'evidenza sperimentale evidenzia un comportamento prettamente non lineare e può essere descritto attraverso il criterio proposto da Hoek e Brown ampiamente descritto nei paragrafi successivi.

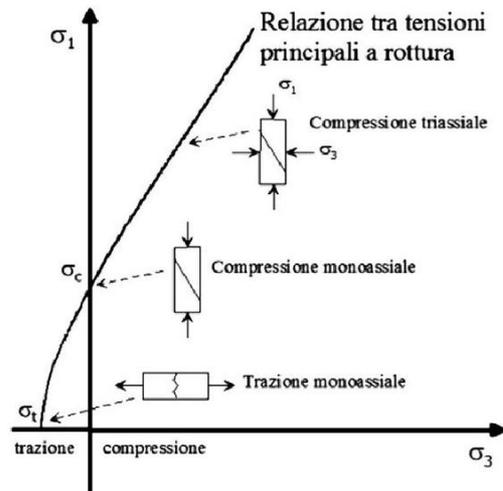


Figura 2.20: Criterio di Hoek & Brown nel piano  $\sigma_1 - \sigma_3$  (modificato da Hoek & Brown, 1980).

## 2.3. CARATTERIZZAZIONE DEGLI AMMASSI ROCCIOSI

---

I sistemi di classificazione sono utilizzati nello studio degli ammassi rocciosi perché permettono di stimare le caratteristiche meccaniche di deformabilità e resistenza considerando l'ammasso come un mezzo continuo equivalente. Attraverso la suddivisione in classi di diversa qualità è possibile stimare, con relazioni empiriche, i parametri geomeccanici, come angolo d'attrito, coesione e deformabilità, e utilizzare il criterio di Hoek & Brown.

Nelle analisi di stabilità dei versanti l'utilizzo dei sistemi di classificazione per caratterizzare l'ammasso roccioso risulta problematico, in quanto in questo caso è necessario affrontare il problema considerando il mezzo discontinuo, in cui le singole discontinuità influenzano sensibilmente la stabilità dei volumi di roccia. Per questo in questi casi esistono dei sistemi di classificazione dedicati, come quello "*Slope Mass Rating*" (SMR) sviluppato da Romana (1985) per la valutazione della stabilità dei pendii rocciosi.

### 2.3.1. IL CRITERIO DI RESISTENZA DI HOEK & BROWN (1988,2002)

---

Il criterio di Hoek & Brown è il criterio di resistenza maggiormente utilizzato nella meccanica delle rocce sia per gli ammassi rocciosi che per la roccia intatta. È un criterio di tipo empirico, non lineare espresso nel piano  $\sigma_1$  e  $\sigma_3$ , e la sua formulazione differisce leggermente da quella introdotta per la determinazione dei parametri di resistenza della roccia intatta.

La formulazione è analoga all'originale, ma negli anni sono state introdotte delle modifiche al fine di ottenere risultati più corrispondenti ai dati sperimentali. La differenza principale riguarda l'introduzione di un parametro che tiene conto del danneggiamento generato nell'ammasso da azioni dinamiche, detto coefficiente di disturbo D (Hoek, Carranza Torres e Corkum, 2002).

Il criterio presenta la seguente formulazione:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \cdot \left( m_b \cdot \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s_b \right)^a$$

dove i parametri  $m_b$ ,  $s_b$  e  $a$  sono definiti in funzione di GSI e D:

$$m_b = m_i \cdot e^{\frac{GSI-100}{28-14D}}$$

$$s_b = e^{\frac{GSI-100}{9-3D}}$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \cdot \left( e^{\frac{-GSI}{15}} - e^{\frac{-20}{3}} \right)$$

Sulla base del parametro D e sul valore del GSI è possibile definire anche il modulo di deformabilità con alcune relazioni empiriche:

$$E_d = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} \cdot 10^{\frac{GSI-10}{40}} \quad [GPa] \quad \text{per } \sigma_{ci} < 100 \text{ MPa}$$

$$E_d = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \cdot 10^{\frac{GSI-10}{40}} \quad [GPa] \quad \text{per } \sigma_{ci} > 100 \text{ MPa}$$

Nel 2006 Hoek e Diederichs definirono una nuova formulazione per il calcolo del modulo di deformabilità:

$$E_d = 100000 \cdot \left( \frac{1 - \frac{D}{2}}{1 + e^{\frac{75-25D-GSI}{11}}} \right) \quad [MPa]$$

Nel caso in cui è noto il modulo di elasticità relativo alla matrice rocciosa e valida la seguente relazione:

$$E_d = E_i \cdot \left( 0.02 + \frac{1 - \frac{D}{2}}{1 + e^{\frac{60+15D-GSI}{11}}} \right) \quad [MPa]$$

### 2.3.2. I SISTEMI DI CLASSIFICAZIONE

---

I metodi di classificazione permettono di suddividere l'ammasso roccioso in classi di diversa qualità dal punto di vista delle loro proprietà meccaniche globali. Questi metodi esaminano alcune fondamentali caratteristiche della roccia intatta e delle discontinuità dando, a seconda delle diverse situazioni, dei valori quantitativi, per ognuna di esse. I principali sistemi di classificazione sono:

- *RMR*: Rock Mass Rating, Bieniawski, (1973, 1984,1989);
- *Q*: Quality system, Barton et al., (1974);
- *RMi*: Rock Mass index, Palmostrøm, (1996);
- *GSI*: Geological Strength Index, Hoek, (1994);
- *SMR*: Slope Mass Rating, Romana, (1985).

Uno dei primi sistemi di classificazione è il sistema RMR "*Rock Mass Rating*", introdotto e sviluppato da Bieniewski (1973, 1984, 1989). Questo sistema è ampiamente utilizzato per la classificazione di ammassi rocciosi di qualunque genere e in particolare per quelli interessati da opere in sotterraneo. Negli anni alcuni autori hanno fornito diverse relazioni con il valore di RMR la stabilità di pendii in roccia (Orr, 1992, 1996; Laubscher, 1976; Hall, 1985; Steffen, 1978; Robertson, 1988). Nel 1985 Romana (Romana, 1985, 1993, 1995) ha proposto un supplemento al concetto di RMR, presentando un sistema particolarmente adatto ai versanti, che è quello del SMR "*Slope Mass Rating*", approvato anche dallo stesso Bieniewski nel 1989.

Il metodo SMR propone di sommare al valore di RMR di base, alcuni fattori di correzione, sulla base dell'orientamento relativo fra le discontinuità ed il fronte del versante, aggiungendo infine un ulteriore fattore che tiene conto del metodo di scavo:

$$SMR = RMR_b - (F_1 \cdot F_2 \cdot F_3) + F_4$$

Dove  $RMR_b$  è valutato secondo la proposta di Bieniewski del 1979,  $F_1$ ,  $F_2$  e  $F_3$  sono fattori correttivi legati alla pendenza e  $F_4$  è un fattore di correzione per la metodologia di scavo.

Un altro sistema di classificazione ampiamente utilizzato è il GSI, l'indice di resistenza geologica, introdotto da Hoek (1994). Questo permette di valutare una stima della riduzione della resistenza dell'ammasso roccioso in relazione a differenti condizioni geologiche. Attraverso l'analisi di tipo visivo della struttura dell'ammasso è possibile definire la qualità dell'ammasso roccioso, in relazione alle caratteristiche di interconnessione tra i blocchi e alle condizioni delle superfici di contatto espresse in termini di rugosità ed alterazione.

## 2.4. MECCANISMI DI INSTABILITÀ NEGLI AMMASSI ROCCIOSI

Nello studio della stabilità di pendii, falesie o fronti di scavo, in presenza di materiale roccioso, uno dei fenomeni di instabilità più frequente e gravoso, da un punto di vista tecnico, è quello delle frane da crollo. Le frane da crollo sono fenomeni che comportano il distacco di masse di roccia coerente e fratturata, di grandezza variabile da alcuni decimetri a diverse centinaia di metri cubi, che si stacca secondo piani preesistenti fortemente verticalizzati.

L'analisi dei crolli è molto complessa in quanto può riguardare sia la valutazione dell'equilibrio geostatico dei blocchi, sia la previsione della propagazione del movimento lungo il versante fino all'arresto. Inoltre, per la valutazione della pericolosità, è necessario ricostruire un modello meccanico di propagazione, conoscendo l'area potenzialmente instabile, il tipo di cinematismo e le cause della possibile instabilizzazione, in modo da utilizzare un modello di calcolo per gli spostamenti adeguato.

I crolli in roccia sono influenzati dalle condizioni strutturali e geometriche dell'ammasso, oltre che dalle caratteristiche meccaniche dello stesso. Sono molto diffusi in diversi ambiti geografici e geomorfologici come scarpate montane, rilievi collinari o falesie costiere. La traiettoria di propagazione dei blocchi è influenzata dal tipo di cinematismo che è combinazione, in generale, di tre processi principali: scivolamenti planari, ribaltamenti nel piano e rotture a cuneo.



Figura 2.21: Meccanismo di scivolamento planare (Hoek & Bray, 1981).

Lo *scivolamento planare* (Figura 2.21) rappresenta una tipologia di cinematismo in cui i movimenti avvengono lungo una superficie assimilabile ad un piano. L'ampiezza della

frattura può essere definita da altre discontinuità laterali, che sono superfici di rilascio e non contribuiscono alla stabilità. Affinché si abbia questo tipo di instabilità devono concorrere quattro condizioni strutturali:

- la direzione d'immersione della discontinuità planare deve essere inclusa in un intervallo di  $\pm 20^\circ$  rispetto alla direzione d'immersione del fronte;
- l'inclinazione della discontinuità planare deve essere minore di quella del fronte;
- l'inclinazione della discontinuità planare deve essere maggiore dell'angolo di attrito dell'ammasso roccioso;
- l'estensione laterale della potenziale massa instabile deve essere definita da superfici laterali di rilascio che non influenzano la stabilità della massa (Giani G.P., 1988).

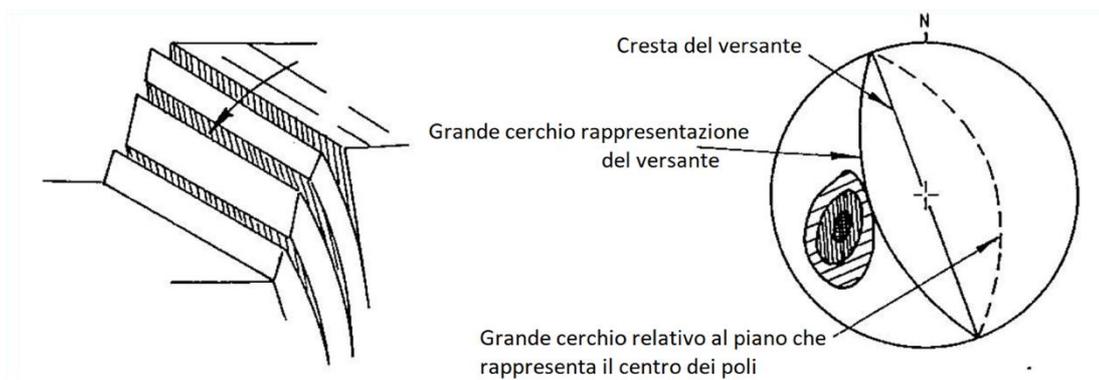


Figura 2.22: Meccanismo di ribaltamento (Hoek & Bray, 1981).

Il meccanismo di *ribaltamento* (Figura 2.22) si manifesta in ammassi rocciosi frammentati, con presenza di famiglie di discontinuità approssimativamente parallele al versante e che immergono fortemente inclinate nel versante stesso. Si formano blocchi o colonne che ruotano attorno a un punto fisso mentre una certa quantità di scivolamento avviene tra gli stessi blocchi o colonne. Alla base sei blocchi si possono avere piani con inclinazione minore o maggiore dell'angolo d'attrito, e nel secondo caso si può parlare di ribaltamento con scivolamento, che si distingue dal ribaltamento puro. L'innescarsi del movimento è dato dal fatto che la proiezione verticale del centro di massa del blocco deve cadere al di fuori della base d'appoggio, e, anche in questo caso, le condizioni strutturali necessarie per il ribaltamento sono:

- la direzione d'immersione dei blocchi o colonne deve essere approssimativamente parallela a quella del fronte (orientativamente in un intervallo di  $\pm 20^\circ$ );
- i blocchi e le colonne, dati dall'intersezione di due famiglie di discontinuità, devono immergere nel fronte;
- presenza di famiglie di discontinuità che definiscono la base dei blocchi potenzialmente instabili (Giani G.P., 1988).

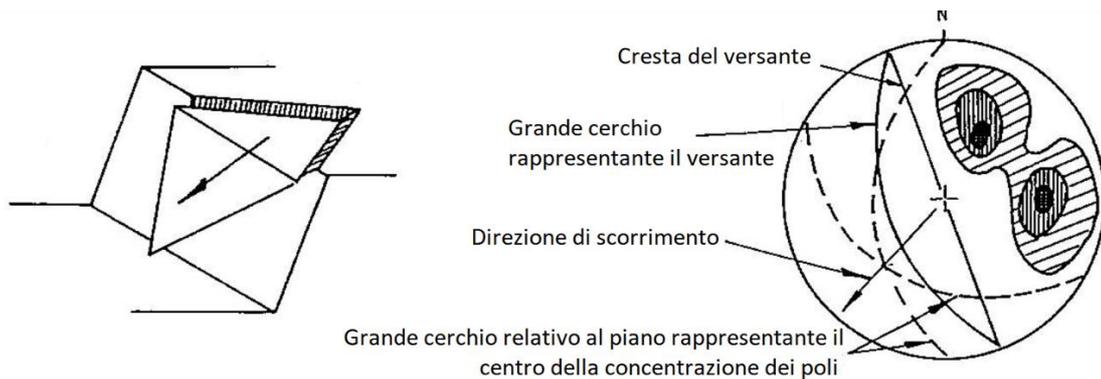


Figura 2.23: Meccanismo di scivolamento a cuneo (Hoek & Bray, 1981).

Infine, il cinematismo di *scivolamento a cuneo* (Figura 2.23) è caratterizzato da cunei di roccia che scivolano lungo due discontinuità che si intersecano, entrambe immergenti fuori dal versante ad un angolo obliquo rispetto allo stesso. Le condizioni strutturali necessarie affinché si verifichi lo scivolamento a cuneo sono le seguenti:

- la retta d'intersezione deve avere una direzione d'immersione che approssimi quella del fronte;
- l'inclinazione della retta d'intersezione deve essere minore dell'inclinazione del fronte;
- l'inclinazione della retta d'intersezione deve essere maggiore dell'angolo di attrito dell'ammasso roccioso (Giani G.P., 1988).

Queste condizioni, necessarie per i tre meccanismi, sono fondamentalmente di tipo geometrico, e in realtà l'analisi completa richiede la valutazione di parametri dinamici come la presenza di filtrazione e di vegetazione, di azioni instabilizzanti come quelle sismiche o di carichi applicati al versante, e di cambiamenti geometrici dello stesso, dovuti a lavori per la realizzazione di strade o altre opere ingegneristiche. Tuttavia, l'analisi meccanica delle

condizioni di stabilità dei pendii rocciosi presenta spesso notevoli limitazioni, connesse soprattutto al grado di incertezza con cui possono essere determinati alcuni parametri fondamentali, quali la resistenza al taglio e, soprattutto, le pressioni dell'acqua all'interno delle discontinuità. Per tale motivo è spesso più efficace esprimere il grado di sicurezza dei pendii mediante analisi basate su criteri cinematici, piuttosto che in base ad analisi meccaniche rigorose in termini di fattore di sicurezza (*Francioso & Schiattarella, 2002*). Il rilievo geomeccanico quindi assume una notevole importanza, in quanto permette di andare a caratterizzare le discontinuità e quindi le geometrie utili a riconoscere il tipo di cinematiso. I rilievi vengono effettuati secondo le indicazioni dell'ISMR, considerate universalmente come linee guida per la caratterizzazione delle discontinuità come precedentemente esposte nel Capitolo 2.1. precedente.

### ***3. CASO DI STUDIO: LA STRADA DEL VALLONE DI ELVA***

---

Il caso in esame è quello della così detta “Strada del Vallone” o “Orrido di Elva”, Strada Provinciale 104, che conduce al Comune di Elva, in Provincia di Cuneo. Il paese si trova a 1637 metri di altezza sulle Alpi Cozie ed è direttamente collegato da questa strada alla Valle Maira, attraverso la Strada Provinciale 422. La strada si estende per circa 9 km di carrozzabile con pareti a strapiombo e dodici gallerie scavate nella roccia.

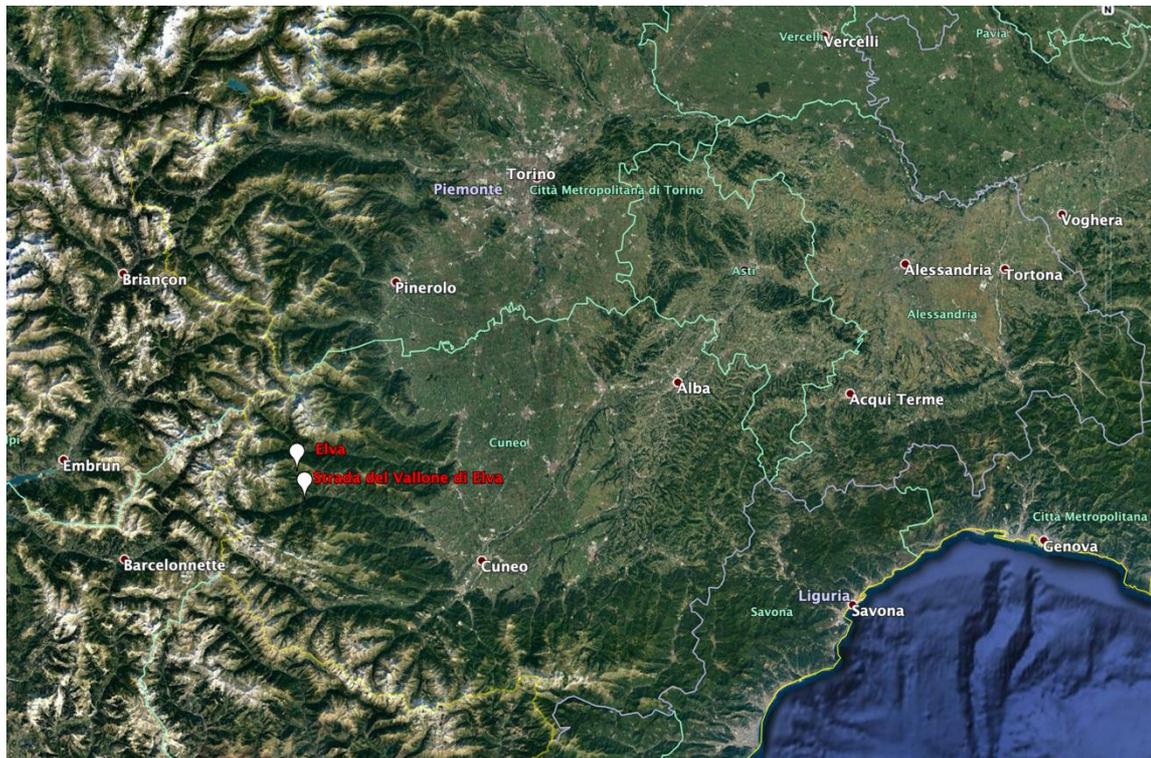
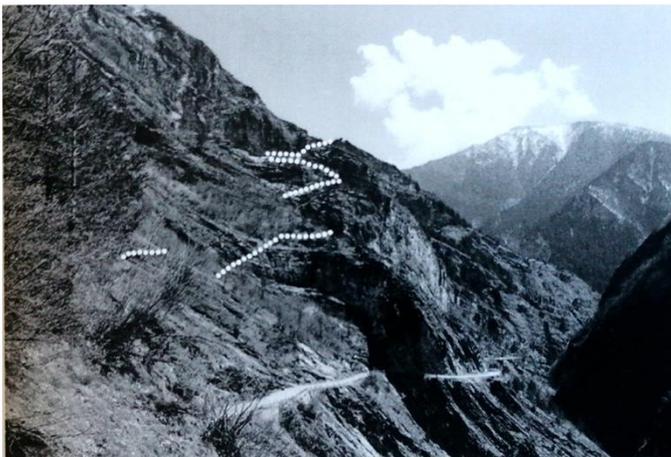
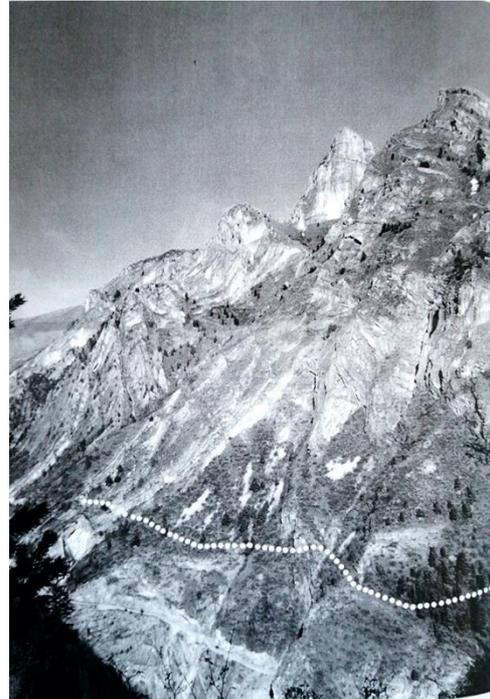
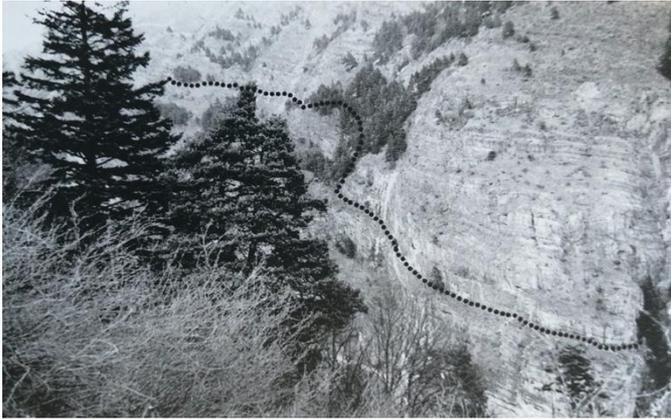


Figura 3.1: Inquadramento geografico (Google Earth).

### 3.1. CENNI STORICI

---

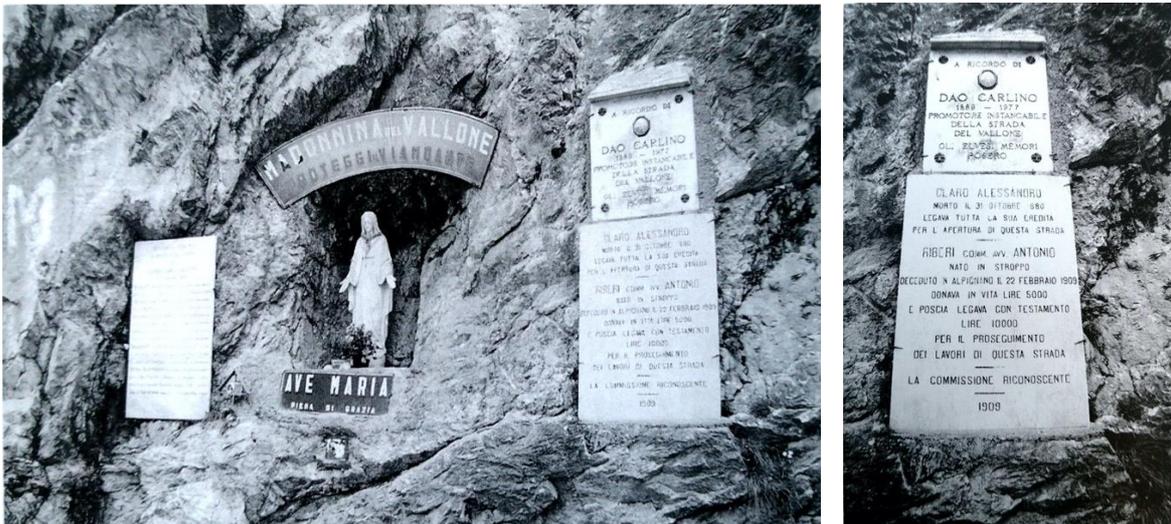
Osservando la carta topografia di questo luogo si evince come Elva comunichi con il corso principale della Valle Maira grazie a un solco netto e profondo, un taglio nord-sud, capace in teoria di ridurre distanze e tempi di percorrenza. La realtà però è che quel Vallone, una volta chiamato della Comba, per lungo tempo non fu percorribile. La scelta del percorso, come dimostrano le tracce degli antichi itinerari (Figura 3.2), fu difficile e il cammino, prima che il sentiero divenisse mulattiera e infine strada carrozzabile, fu lungo e contrastato dai comportamenti della gente, dalle discussioni e dai contrasti di opinione, dagli interessi particolari, dai rapporti con le comunità confinanti e con le autorità lontane (Bersani, Baudino, 2004).



*Figura 3.2: Foto storiche con indicazione del vecchio sentiero (Bersani, Baudino, 2004).*

Sin dal febbraio 1763 la comunità di Elva lottava per la funzionalità del collegamento Elva – Val Maira via Stroppo che risultava molto scarsa. Il primo passo, seppur infruttifero, verso la risoluzione del problema avvenne il 12 luglio 1837, quando il giovane principe Vittorio Emanuele II si trovò proprio a Elva. Il Parroco don Pietro Giordana presenta al principe i problemi, indicando nel Vallone il sito più appropriato per una strada e presentando il progetto per la costruzione di una nuova strada lungo il vallone detto “Bedale Maggiore”, alias la Comba. La pratica seguì il suo corso per ritornare infine nel 1840 a Elva con la raccomandazione di soprassedere, in quanto la strada era giudicata troppo pericolosa. Del resto, non tutti gli elvesi erano d'accordo e troppo difficile, oltre che molto costoso, sarebbe risultato l'impegno. In più, all'epoca sul fondo della Valle Maira non correva ancora una strada adeguata, una carrozzabile cui raccordarsi, per cui si decise almeno di attendere la conclusione del prolungamento della carrozzabile della Valle Maira da Alma Macra fino a Stroppo.

La svolta decisiva si ebbe nel 1880 quando, alla sua morte, Alessandro Claro, oste alle Traverse, legò tutti i suoi beni al Comune perché provvedesse all'apertura di una strada nel Vallone. Prove tangibili sono presenti lungo l'attuale strada, in particolare all'altezza della statua della Madonna del Vallone, dove è presente una lapide dedicata proprio ai benefattori della Strada (Figura 3.3).



*Figura 3.3: Foto storiche nicchia della Madonna del Vallone, lapide che ricorda i benefattori della Strada (Bersani, Baudino, 2004).*

Nel febbraio 1891 il Comune di Stroppio respinge la domanda di Elva di consentire che il sentiero nel Vallone attraversi il suo territorio, poiché riteneva rischioso il transito di persone ed animali per il pericolo caduta sassi. In realtà, le preoccupazioni riguardavano i danni economici del dirottamento del traffico mercantile, da e per Elva, che avrebbe seguito un altro itinerario. Il Consiglio Comunale di Elva ricorre a personalità della provincia, fra cui il prefetto, e allo stesso Giovanni Giolitti raggiungendo un'intesa, così che il 18 ottobre venne autorizzata la ripresa dei lavori del sentiero.

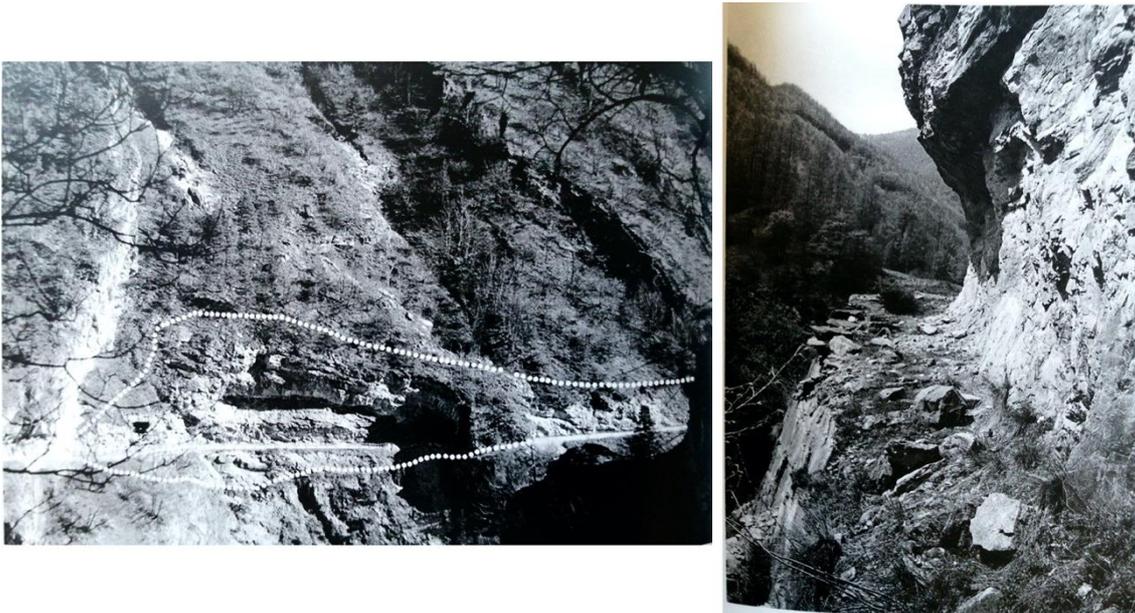
Il transito sul sentiero si rivelò pericolosissimo, così che si decise di trasformarlo in mulattiera (

Figura 3.4). L'evoluzione non fu facile tanto che, dal 1893, si dovette aspettare il 1934 per il transito del primo mulo con carico. Nel 1936 fu interrotta nuovamente per mancanza di fondi, e solo nel 1939 Il Capo del Governo Benito Mussolini in visita a Cuneo accolse

l'istanza degli elvesi e dispone una consistente erogazione che consentì la ripresa dei lavori. Tuttavia, lo scoppio della guerra con la Francia (giugno 1940) li interrompe nuovamente.

La fine di questa travagliata storia si ebbe solo nel 1956 quando, finalmente, vennero conclusi i lavori. Sempre nello stesso anno, vennero aperte altre strade carrozzabili che raccordavano Elva con il Colle di Sampeyre e con Stroppo, passando per Cucchiales e San Martino si poté congiungere al Colle della Cavallina e quindi con la strada Elva - Colle Sampeyre.

Dopo sessant'anni di lavori, che portarono anche alla morte di molti operai, l'isolamento di Elva fu così infine superato. Il proseguimento di tale scopo è da attribuirsi all'impegno di pubblici amministratori come Chiaffredo Dao, Antonio Garneri, Carlino Dao; parroci quali don Giovanni Chiotti; privati cittadini tanto convinti da legare all'impresa i loro beni e il loro denaro; più i molti volontari che donarono il proprio lavoro.



*Figura 3.4: Foto storiche della mulattiera, (a destra) in alto, sopra la carrozzabile, il vecchio sentiero; in basso la vecchia mulattiera (Bersani, Baudino, 2004).*

L'isolamento condizionò fortemente la vita di quella collettività da sempre obbligata ad affrontare il problema delle comunicazioni, che a quel tempo stava a significare strade per far comunicare i territori circostanti, fossero la Val Maira a sud o la Val Varaita a nord. Tuttavia, questo non impedì lo svilupparsi di una comunità numerosa che arrivò, nel 1901,

a superare le 1300 anime, con le sue peculiarità e per nulla chiusa al mondo. Lo dimostrano i mestieri itineranti dei suoi uomini che "vanno in Piemonte a pettinare la canapa" o a fare gli arrotini. Lo dimostra soprattutto la straordinaria vicenda dei "cavié", famosi raccoglitori di capelli che forse, già a fine Settecento e poi nell'Ottocento fino a metà Novecento, percorsero l'Italia settentrionale ma anche Francia e Spagna arrivando pure in Scandinavia per incettare il capello greggio. Era questo selezionato e lavorato a Elva, quindi venduto ai fabbricanti di parrucche di tutto il mondo, da Parigi a Londra, da Berlino a New York (Bersani, Baudino, 2004).



*Figura 3.5: Foto storica dell'inizio dei lavori della carrozzabile nei primi anni Venti (Bersani, Baudino, 2004).*

Sulla stampa locale è stato possibile trovare alcune indicazioni non esaustive riguardo ai principali e più recenti dissesti che hanno portato, con un'ordinanza della Provincia di Cuneo, la chiusura al traffico della strada che permane ad oggi dall'autunno 2014. A quelli descritti nel seguito si devono sommare crolli di minor intensità, diffusi lungo l'intera strada e possono riguardare anche singoli blocchi di volume variabile ma che manifestano, comunque, un elevato grado di rischio data che le pareti rocciose da cui si distaccano sono aggettanti direttamente sulla strada.

Un primo dissesto è avvenuto l'11 dicembre 2014 a circa un chilometro dal bivio della provinciale della Valle Maira: "una frana di rocce e detriti, con un fronte di circa dieci metri

di lunghezza ha travolto e distrutto anche il guardrail” (da [provincia.cuneo.gov.it](http://provincia.cuneo.gov.it)) (Figura 3.6). Da quel momento, il paese rimane comunque raggiungibile percorrendo la provinciale S335 di Stroppa, che collega il paese di Elva al fondo valle, ma presenta un passo che sale fino a una quota di 2.000 m.

In particolare, il punto del distacco di tale dissesto è uno di quelli individuati nel presente studio, denominato come “B6”, uno di quei settori in cui è stato eseguito, il rilievo geomeccanico (Allegato 1) descritto nei capitoli successivi.

A due mesi di distanza, il 28 febbraio 2015, si registra un evento franoso, di grandi proporzioni, tra la seconda e terza galleria, nel settore individuato di seguito come “FRANA” (Figura 3.7). L'imponente frana di rocce, terra e neve si è abbattuta sulla strada a circa 2.5 chilometri dal bivio con la provinciale dell'alta Valle Maira. Alla critica situazione del primo dissesto, per il quale lo sgombero del materiale non era nemmeno incominciato, si aggiunge un nuovo fronte di detriti di circa 70 metri, con una stima di materiale crollato pari a mille metri cubi, di cui 700 da rimuovere dalla strada (da [minotariccoinforma.it](http://minotariccoinforma.it)).



*Figura 3.6: Evento franoso del 11 dicembre 2014, settore B6 ([provincia.cuneo.gov.it](http://provincia.cuneo.gov.it)).*

La situazione si fa sempre più complessa e la comunità di Elva rimane, non isolata ma gravemente disagiata nella sua accessibilità e nella esigibilità dei suoi diritti primari. Infatti, a quel tempo, anche la provinciale 335 aveva molti problemi, e necessitava di interventi urgenti di consolidamento dei movimenti franosi, di sistemazione del manto bituminoso e

paravalanghe. Attualmente, dopo alcuni interventi di sistemazione e asfaltatura, la strada che da Stroppo conduce fino a Elva è percorribile, mentre la situazione del Vallone è ancora difficile e non risolvibile in tempi brevi.



*Figura 3.7: Evento franoso del 28 febbraio 2015, FRANA (minotariccoinforma.it).*

Il più recente e ultimo dissesto riscontrato fin ora si è verificato il 2 giugno 2018, a poche centinaia di metri a monte della provinciale della Valle Maira, nel settore individuato nel seguito con il nome “B2” (Figura 3.8). Anche in questo caso la frana è stata di grandi dimensioni e ha invaso tutta la carreggiata.



*Figura 3.8: Evento franoso del 2 giugno 2018, settore B2 (notizie.provincia.cuneo.gov.it).*

Si possono fare solo alcune ipotesi su quelle che sono le cause dei vari dissesti. Per esempio, l'innesco e la propagazione del movimento potrebbero essere stati provocati da forti precipitazioni o dalla presenza di neve.

Attraverso il portale del "ARPA PIEMONTE – Banca dati meteorologica" è possibile consultare e avere accesso, tramite Internet, ai dati della rete meteoidrografica pubblicati. Effettuando una ricerca per comune si può individuare una stazione, prossima al sito d'interesse, e consultare per ogni anno i dati registrati.

In questo caso è stata selezionata la stazione di "Elva" denominata con il codice "S2572", e sono stati estrapolati i dati meteorologici registrati nei giorni precedenti per ciascuno dei tre eventi. La stazione si trova a Nord-Est rispetto alla strada del Vallone vicino a alla Borgata Martini del comune di Elva (Figura 3.9). La quota del sito è di 1770 metri.



Figura 3.9: (a sinistra) mappa CTR della stazione ELVA – ELVA, (a destra) fotografia della stazione ELVA – ELVA (arpa.piemonte.it).

Nella Tabella 3.1 di seguito sono riportati i dati e le informazioni anagrafiche della stazione selezionata:

Tabella 3.1: Dati della rete meteorografica per i giorni precedenti a ciascun evento (arpa.piemonte.it).

Evento	Data	Precipitazione dalle 9 alle 9 (mm)	Precipitazione dalle 0 alle 0 (mm)	Neve Fresca (cm)	Neve al Suolo (cm)	T media (°C)	T max (°C)	T min (°C)
11 dicembre 2014	30/11/2014	35,8	31,8	0	5	3,1	4,3	1,7
	01/12/2014	19,6	21,0	0	5	2,0	3,4	0,1
	02/12/2014	5,0	10,6	0	3	2,3	5,8	0,9
	03/12/2014	0,6	0,6	0	3	1,1	2,1	0,3
	04/12/2014	3,8	3,4	0	3	0,8	2,3	0,0
	05/12/2014	2,0	2,4	0	0	0,4	2,0	-0,3
	06/12/2014	3,2	3,2	3	3	0,2	2,3	-0,6
	07/12/2014	2,0	2,0	10	13	0,8	7,9	-1,9
	08/12/2014	10,4	10,4	0	8	1,3	7,8	-2,1
	09/12/2014	0,0	0,0	1	9	-3,2	1,2	-5,2
	10/12/2014	3,4	3,4	6	13	1,6	6,4	-4,6
11/12/2014	0,4	0,4	0	11	4,1	8,5	1,5	

28 febbraio 2015	15/02/2015			6	81	-4,5	1,6	-7,5
	16/02/2015			27	108	-3,3	-0,5	-5,1
	17/02/2015			12	119	0,1	8,1	-3,6
	18/02/2015			0	103	0,1	6,5	-3,7
	19/02/2015			0	94	1,5	9,4	-3,5
	20/02/2015			0	88	-0,1	7,6	-6,2
	21/02/2015			5	92	-4,2	1,1	-6,3
	22/02/2015			15	105	-2,0	7,0	-6,1
	23/02/2015			0	96	1,7	8,6	-2,3
	24/02/2015			0	96	-2,4	-0,1	-4,1
	25/02/2015			0	91	-1,0	5,0	-4,8
	26/02/2015			0	86	-1,8	5,8	-5,6
	27/02/2015			0	86	-2,0	4,2	-5,8
	28/02/2015			2	88	-1,5	4,7	-4,1
2 giugno 2018	20/05/2018	3,2	3,2	0	0	6,7	10,1	5,5
	21/05/2018	13,2	12,4	0	0	6,8	11,1	5,0
	22/05/2018	17,2	6,6	0	0	6,0	7,3	5,2
	23/05/2018	10,6	22,0	0	0	8,6	12,7	5,5
	24/05/2018	1,2	1,2	0	0	11,7	17,4	6,1
	25/05/2018	0,0	0,0	0	0	14,0	19,0	8,4
	26/05/2018	0,0	0,0	0	0	13,3	18,6	9,4
	27/05/2018	13,8	13,8	0	0	12,8	18,1	8,4
	28/05/2018	6,6	6,4	0	0	8,6	9,6	7,4
	29/05/2018	14,4	14,4	0	0	11,1	16,4	6,3
	30/05/2018	3,6	0,2	0	0	9,9	12,6	8,5
	31/05/2018	9,8	13,4	0	0	9,9	15,2	7,2
	01/06/2018	0,2	0,2	0	0	12,3	17,7	6,9
	02/06/2018	0,0	0,0	0	0	12,8	18,8	9,3

Nonostante le condizioni di rischio che permangono lungo l'intera provinciale SP 104, gli abitanti del paese considerano questa strada ancora di fondamentale importanza per la sopravvivenza del comune di Elva, tanto che hanno costituito il "Comitato per la riapertura della Strada del Vallone", ritenendo l'Orrido di Elva l'accesso più veloce al paese rispetto alla Provinciale 335 o la 128 agibile solo nella bella stagione.

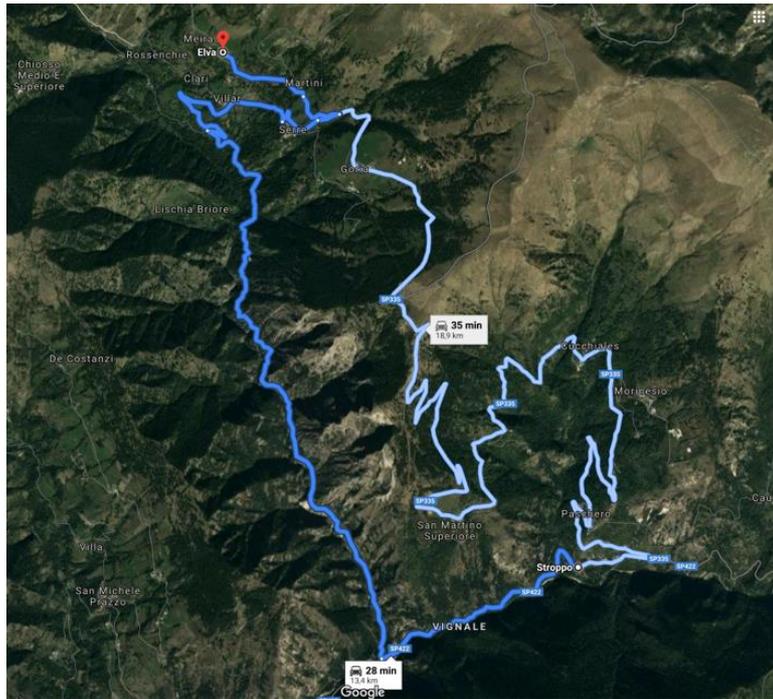


Figura 3.10: Confronto fra i due percorsi per raggiungere il paese di Elva (maps.google.it).

Inoltre, bisogna concedere a questa strada il proprio valore storico, ambientale e paesaggistico, riconosciuto recentemente anche dal FAI (Fondo Ambiente Italiano).

Dato che le zone potenzialmente instabili riguardano un tratto lungo diversi chilometri con pareti aggettanti a lato della strada, è difficilmente prevedibile un intervento che interessi contestualmente l'intera lunghezza della provinciale. Si rendono in tal caso opportune una serie di attività, aventi lo scopo di acquisire tutte le informazioni necessarie per l'individuazione dei possibili cinematismi di instabilità, condurre le analisi per definirne le condizioni di stabilità delle pareti rocciose, individuare la tipologia degli interventi utili alla messa in sicurezza e la definizione dei livelli di pericolosità per una migliore pianificazione degli eventuali interventi di stabilizzazione.

Il presente studio ha proprio lo scopo di acquisire tutte le informazioni preliminari in grado di fornire una conoscenza approfondita dell'ammasso roccioso attraverso azioni di rilievo che consentano di studiare la struttura degli ammassi alla scala di versante allo scopo di individuare e misurare la presenza di discontinuità, della loro orientazione e spaziatura al fine di definire la distribuzione statistica dei volumi dei blocchi che possono distaccarsi.

Oggigiorno, tali azioni possono fare affidamento a tecnologie innovative ma ormai consolidate, in grado di integrare diverse informazioni e consentire tempestive previsioni e risposte risolutive agli eventi di dissesto. Data l'estensione del problema e l'inaccessibilità delle pareti rocciose, lo studio proposto si basa sui metodi di rilievo di non-contatto che prevedono il rilievo fotogrammetrico (da terra e/o da drone) delle pareti rocciose con l'ottenimento di un modello digitale di superficie (DSM) in grado di ricostruire la morfologia tridimensionale dei versanti e la determinazione di una serie di informazioni molto dettagliate ed utili per le successive analisi di stabilità.

I DSM saranno quindi impiegati per l'esecuzione del rilievo geostrutturale finalizzato all'ottenimento dei dati di orientazione delle discontinuità e delle loro spazature attraverso l'impiego di software specificatamente sviluppati (Rockscan) attraverso procedure automatiche o semi-automatiche.

Una volta ottenuti i dati di orientazione e di spaziatura saranno trattati statisticamente al fine di determinarne la distribuzione di frequenza rappresentative, definire i possibili cinematismi ed individuare i volumi potenzialmente instabili.

Tale processo di analisi viene illustrato nel dettaglio nei capitoli successivi. Lo studio si conclude con le analisi di stabilità per l'interpretazione del grosso fenomeno di scivolamento che ha interessato la SP104 nel febbraio del 2015.

### 3.2. INQUADRAMENTO GENERALE

La Val Maira, tipico solco valico di origine glaciale, fa parte delle Alpi Cozie Meridionali e ha un'estensione di 60 km, dal displuvio alpino italo francese alla pianura con andamento ovest-est, e viene tagliata a metà dal Torrente Maira che le dà il nome. La valle confina a Nord con la Valle Varaita; a Sud con la Valle Grana nella parte bassa e con la Valle Stura nella parte alta; a Ovest con la Francia e a Est sbocca nella pianura padana. Inoltre, la valle si caratterizza per diversi importanti valloni laterali che in essa confluiscono, arricchendone la varietà e la spettacolarità ambientali.

Fra questi valloni si contraddistingue il Vallone di Elva, chiamato in principio Vallone della Comba, che è una delle tante valli secondarie della Valle Maira, e si trova nella parte alta, sul lato orografico sinistro della valle, in prossimità di Ponte Marmora. A rappresentare grossolanamente il territorio elvese potrebbe prestarsi l'immagine di un imbuto, una gola che risale allargandosi verso Nord. Ampia e ridente la conca superiore, contornata da un ventaglio di alte montagne; strettissima, lunga e inaccessibile per le pareti a strapiombo la Comba di collegamento con il fondo della Valle Maira.

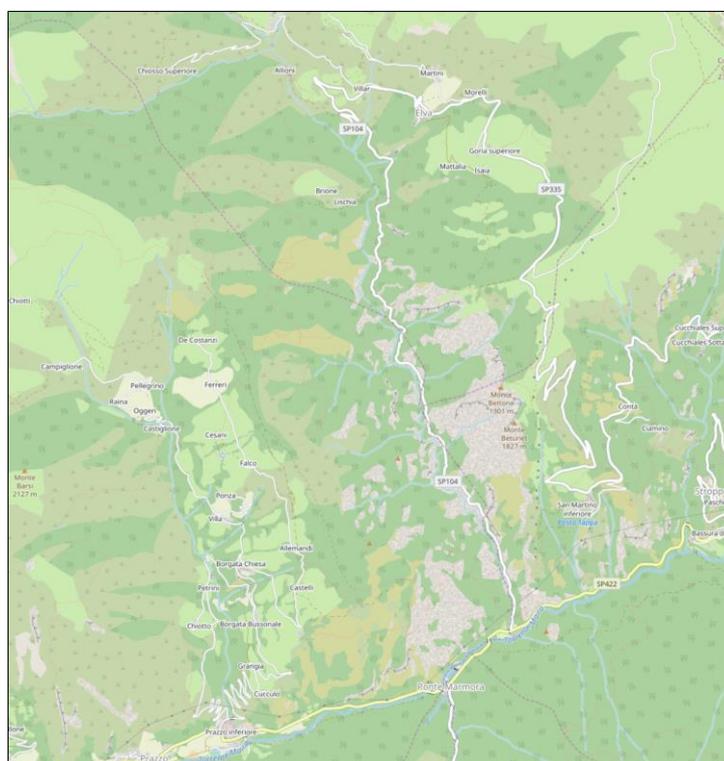


Figura 3.11: Mappa del Vallone di Elva (ITHACA, ISPRA).

Il territorio in cui sorge il vallone è quello esposto a meridione e quindi meglio soleggiato, che è stato il più favorevole agli insediamenti abitativi. L'altitudine varia dai 160 metri, del punto inferiore, ai 3064 del dominante Pelvo d'Elva. Molto importante agli effetti delle comunicazioni è il Colle di Sampeyre, in antico d'Elva, che a 2284 metri di altitudine collega a nord le Valli Maira e Varaita. Il capoluogo si trova nella borgata Serre a 1637 metri (*Bersani, Baudino, 2004*).

### 3.3. INQUADRAMENTO GEOLOGICO E MORFOLOGICO

La Val Maira, percorsa dal torrente Maira da cui prende il nome, è lunga circa 60 km ed attraverso di essa sono esposte vari tipi di rocce metamorfiche tipiche delle Alpi Occidentali.

Le Alpi, viste nel loro insieme, sono state originate dalla collisione continentale tra due placche continentali, la placca Europa (a NO) e quella Adria (a SE), originariamente separate da un dominio oceanico, detto oceano Ligure-Piemontese e sviluppatosi nel Giurassico.

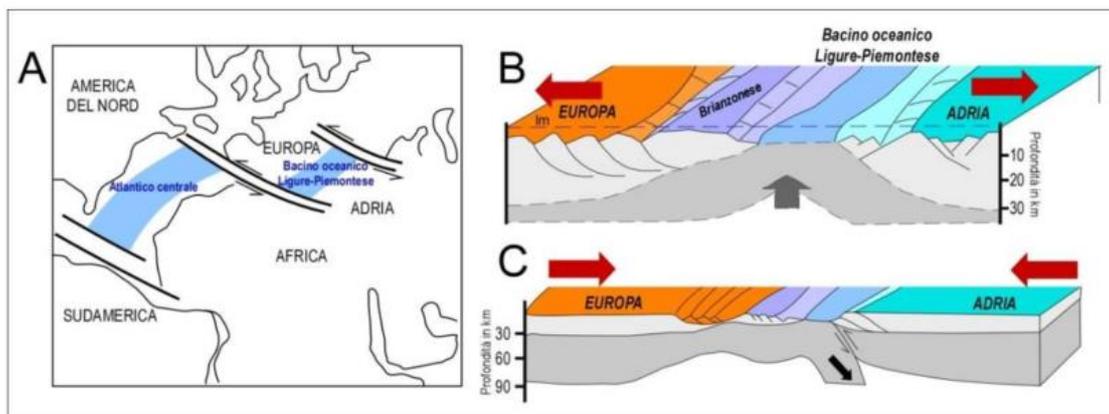


Figura 3.12: Evoluzione schematica delle Alpi Occidentali (Beltrando et alii, 2010).

In Figura 3.12 è illustrata quella che è stata l'evoluzione schematica delle Alpi Occidentali dal rifting giurassico all'orogenesi alpina:

- A) Apertura del Bacino oceanico Ligure-Piemontese nel Giurassico in relazione ai movimenti relativi tra Europa e Africa e all'apertura dell'Oceano Atlantico.
- B) Illustrazione semplificata della paleogeografia al Giurassico medio-superiore con l'oceano Ligure-Piemontese sviluppato tra i due continenti Europa e Adria (propaggine settentrionale di Africa) in allontanamento tra di loro. È anche indicativamente riportato il livello del mare (1m).
- C) Durante il Cretaceo, in risposta alla convergenza fra i due blocchi continentali, ha inizio la progressiva subduzione del dominio Ligure-Piemontese, la cui completa chiusura porterà alla collisione continentale (Usseglio et alii, 2016).

La geologia di dettaglio della valle può essere ricavata dal Foglio 78-79 Argentera-Dronero alla scala 1:100000 e dalla Carta geologica del Piemonte a scala 1.250000 (*web gis arpa piemonte e Piana et al., 2017*).

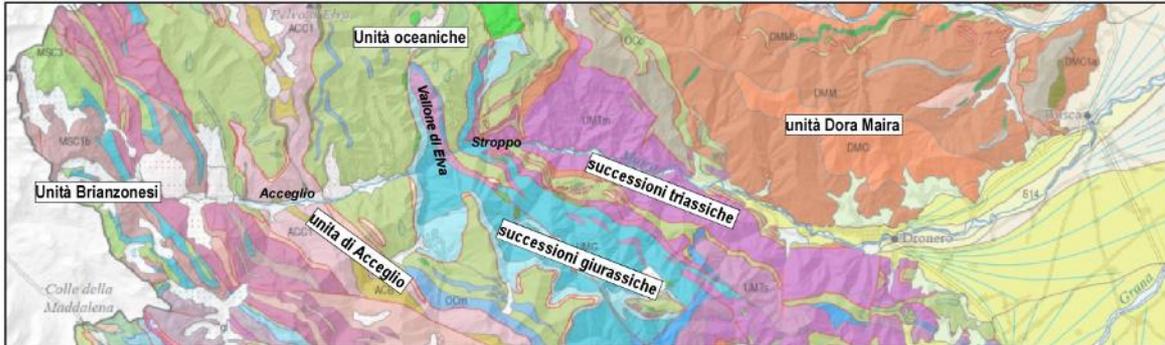


Figura 3.13: Schema geologico della Val Maira (*webgis.arpa.piemonte*)

Il tratto inferiore della valle, da Dronero fino a San Damiano, è inciso nei micascisti e nei miscascisti gneissici dell'Unità continentale del Dora Maira. Il tratto di valle compreso tra San Damiano e Stroppo è caratterizzato dalla esposizione di potenti successioni di rocce carbonatiche (dolomie e marmi dolomitici) di età Triassica, con strati immergenti verso Ovest e mostranti intense deformazioni dovute a pieghe. Queste successioni, le quali ricordano lo sviluppo di potenti piattaforme carbonatiche nel Triassico in corrispondenza del margine continentale, sono ricoperte da successioni giurassiche caratterizzate da calcescisti con intercalazioni di brecce. Risalendo la valle, al di sopra delle successioni carbonatiche triassiche, sono presenti successioni che originariamente (prima delle complesse trasformazioni metamorfiche avvenute con la collisione continentale) sono state deposte nel dominio oceanico: si tratta di calcescisti con intercalazioni di pietre verdi (serpentiniti e metabasiti). Il tratto superiore della valle è caratterizzato nella zona di Acceglio da micascisti e quarziti e quindi da successioni carbonatiche del cosiddetto dominio Brianzonese.

Facendo particolare riferimento al tratto di valle analizzato nel presente studio, in corrispondenza del vallone dell'Elva le dolomie grigiastre del Norico (Triassico superiore), risultano fortemente verticalizzate, con una immersione verso ovest ad alto angolo. Definiscono un una piega ettometrica ben visibile nel panorama del Monte Bittone e sono delimate da una faglia orientata circa N-S passante sul versante destro del vallone stesso.

#### ***4. IL RILIEVO FOTOGRAMMETRICO***

---

Il rilievo fotogrammetrico è uno strumento di indagine non distruttiva che permette di una ricostruzione tridimensionale dell'area di indagine, attraverso l'acquisizione di dati numerici e tematici. In questo modo è possibile determinare le caratteristiche topografiche del sito in esame e, in caso di necessità, effettuare controlli sistematici sui versanti e sulle eventuali opere di consolidamento. L'elaborazione dei dati e le scelte sul campo sono influenzate dal risultato che si vuole raggiungere, e quindi legate a ogni specifico caso.

I dati del rilievo numerico sono gestiti da software di grafica, e attraverso alcuni codici è possibile leggerli ed elaborarli sia su video che su supporto cartaceo. In questo caso attraverso il software "*Agisoft, Metashape*" è stato possibile elaborare i dati e ricostruire i modelli tridimensionali delle zone in esame.

La fase di rilievo topografico fotogrammetrico e la restituzione dei DSM è stata svolta in collaborazione con gruppo di Geomatica del Politecnico di Torino. Nello specifico questa attività ha riguardato il rilievo da terra e da aria di circa 9 km di versante prospiciente la strada. In particolare, sono stati eseguiti circa 2000 rilievi fotogrammetrici ottenendo nuvole molto dense, con più di 2 miliardi di punti. Nel paragrafo 4.2 si descriverà più dettagliatamente quelle che sono state le procedure e gli strumenti utilizzati.

Al fine della successiva analisi con il software "*Rockscan*" sono stati ricostruiti modelli di dettaglio sulla base delle sole foto da terra. Di fondamentale importanza, per realizzazione di qualunque modello, è la sua georeferenziazione, cioè l'attribuzione di coordinate geografiche a un oggetto grafico. Per la georeferenziazione di un modello sono necessari almeno 3 punti di coordinate note. Le zone interessate dai modelli di dettaglio sono zone di dimensioni ridotte e non contenevano generalmente alcun punto materializzato per il rilievo generale. I modelli di dettaglio sono stati georeferenziati materializzando sulle foto dei punti materiali naturali di cui sono state desunte le coordinate dal modello generale ricostruito. Ovviamente l'errore aumenta, ma ai fini del rilievo geostrutturale e della misura delle spazature risulta essere un errore contenuto.

In particolare, i rilievi topografici saranno utili all'individuazione di quelli che possono essere i possibili interventi, mentre quelli di dettaglio vengono utilizzati per i rilievi geostrutturali con il software Rockscan.

#### 4.1. ELEMENTI TEORICI DI FOTOGRAMMETRIA

Il principio che sta alla base della fotogrammetria è quello di poter definire la posizione, la forma e le dimensioni di elementi attraverso misure automatiche o interattive condotte su due immagini bidimensionali piane dell'oggetto prese da due differenti posizioni.

Per poter determinare le posizioni dei punti di un oggetto nell'ambiente reale del territorio utilizzando le posizioni dei punti corrispondenti sulla fotografia, è necessario definire le relazioni geometriche fra le posizioni tridimensionali dei punti dell'oggetto e quelle delle loro immagini sul piano della fotografia (Cannarozzo *et al.*, 2012). Per ogni punto nello spazio è possibile individuare un così detto "punto omologo" sull'immagine. Il fotogramma può essere considerato come una prospettiva centrale, infatti i segmenti che collegano i punti dell'oggetto con i loro corrispondenti sull'immagine (stella proiettante) passano tutti per il medesimo punto, detto centro di presa, che si trova a pochi centimetri dal piano fotografico, detta distanza principale. Il centro di presa rappresenta il punto dell'obiettivo della camera e la distanza principale, che si mantiene fissa, può essere considerata uguale alla distanza focale.

Considerando il singolo fotogramma non è possibile andare a definire la posizione e le dimensioni dell'oggetto tridimensionale, per cui sono necessarie due fotografie, della stessa camera, che riprendono lo stesso oggetto da punti di presa differenti.

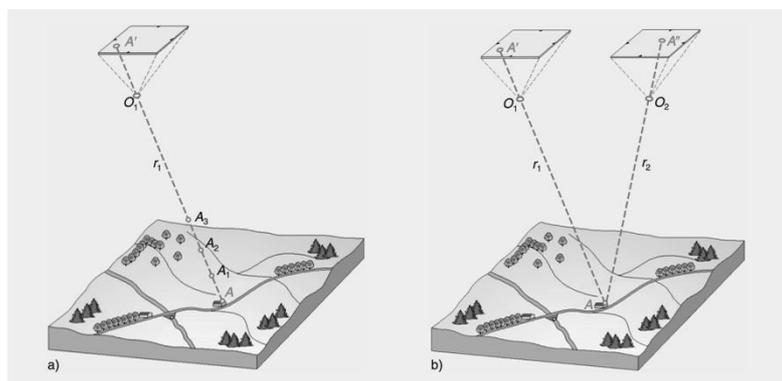


Figura 4.1: Il principio della fotogrammetria: il confronto fra la singola fotografia (a) non sufficiente per definire la posizione dei punti sul terreno, due fotografie (b) che da due centri di presa contengono lo stesso oggetto (Cannarozzo, Cucchiari, Meschieri, 2012).

Per sfruttare questo principio è necessario conoscere le posizioni nello spazio dei centri di presa e l'orientamento del sensore fotografico, ed è quindi necessario ottenere queste informazioni dalle stesse fotografie, attraverso un certo numero di punti di appoggio sul terreno, attraverso operazioni di tipo topografico.

Nel rilievo fotogrammetrico tradizionale si riconoscono sempre le seguenti fasi:

- *acquisizione*: operazioni riguardanti la presa delle immagini fotografiche;
- *orientamento*: operazioni per la determinazione dei parametri che consentono di posizionare i centri di presa, la posizione dei piani dei sensori fotografici con la stessa posizione nello spazio che essi avevano al momento della presa, quindi la ricostruzione della forma e delle dimensioni dell'oggetto ripreso;
- *restituzione*: operazioni che consentono di effettuare misure sul modello dell'oggetto ricostruito, utilizzando strumenti, detti restitutori, in grado di produrre, come risultato finale, un modello tridimensionale, un disegno, un insieme numerico di coordinate o una immagine rettificata e raddrizzata (ortofoto) (Cannarozzo et al., 2012).

Nell'attività di pianificazione e progettazione di un rilievo, sia aereo che terrestre, è fondamentale la risoluzione spaziale, cioè la scelta della scala di restituzione. Questa caratteristica viene definita attraverso G.S.D. (Ground Sampling Distance) ossia la distanza tra il centro di due pixel consecutivi espressa in unità di misura territoriale (3deffe.com). Questo parametro dipende dalla risoluzione della macchina fotografica, dalla lunghezza focale e dall'altezza di volo, e all'aumentare del parametro aumenta il dettaglio della fotografia.

È importante fare una distinzione tra GSD e accuratezza del rilievo, che si divide in accuratezza relativa e assoluta. L'accuratezza relativa è la misura di come i punti sono posizionati relativamente uno con l'altro in un modello ricostruito (in un'ortofoto o in un D.S.M.). L'accuratezza assoluta invece si riferisce alle differenze tra la posizione dei punti nel modello ricostruito e la loro effettiva posizione sulla terra. In questo senso ci si affida ai punti di controllo misurati a terra con strumentazione topografica, chiamati Ground

Control Points (G.C.P.). L'accuratezza assoluta dell'intero rilievo aerofotogrammetrico non può essere maggiore di quella con cui sono rilevati i Ground Control Points (*3dmetrica.it*).

#### 4.2. STRUMENTI PER IL RILIEVO

---

Nell'area oggetto di studio si è scelto di utilizzare tecniche di rilievo terrestri e aeree, attraverso S.A.P.R., Sistemi Aerei a Pilotaggio Remoto, meglio noti come droni. La scelta di utilizzare entrambe le tecnologie risiede nel fatto che le pareti della strada sono pseudo-verticali ed essendo la careggiata di larghezza ridotta non dà la possibilità all'operatore di riprendere parti del fronte molto alte, che invece risultano visibili attraverso il rilievo aereo, eseguito a distanze maggiori. Per la valutazione della pericolosità del versante e per effettuare analisi più dettagliate delle pareti sono stati realizzati rilievi fotogrammetrici con fotocamera terrestre lungo tutta la strada.

Il prodotto principale dell'elaborazione fotogrammetrica è la nuvola densa di punti dalla quale è possibile costruire un modello DSM, Digital Surface Model. Questo prodotto è ottenuto attraverso software che eseguono l'elaborazione fotogrammetrica di immagini digitali.

Il rilievo aerofotogrammetrico digitale permette di realizzare il posizionamento satellitare GNSS, cioè di collimare alcuni punti sulla superficie, contrassegnati attraverso alcuni marcatori, individuabili nei fotogrammi stessi. In questo modo è stato possibile georeferenziare il modello partendo dai Ground Control Points ricavati dal drone, riconoscendone la loro posizione su i fotogrammi terrestri.

La strada del Vallone di Elva è un ambiente complesso le cui caratteristiche hanno richiesto un'attenta pianificazione del volo. Utilizzando criteri standard di risoluzione del terreno e accuratezza dei prodotti fotogrammetrici, è stato scelto di eseguire voli manuali con esperti piloti UAV per garantire un livello di sicurezza elevato.

Un passo cruciale, in modo da garantire un approccio rigoroso in termini di accuratezza e precisione, è quello di realizzazione di una rete topografica utilizzando sia GNSS e topografiche tradizionali tecniche. Sono state misurate le coordinate di 22 vertici, attraverso un ricevitore GNSS geodetico in modalità statica (1 ora per ciascun punto).

Le coordinate sono state stimate considerando una soluzione multibase (tramite il software Leica Geo Office® v.8.4) con le stazioni permanenti Ostana e Demonte delle CORS (stazioni di riferimento operative continue) del distretto piemontese (Figura 4.2), ottenendo un alto livello di precisione ( $\sigma_{max} = 3 \text{ mm}$  in direzione verticale).

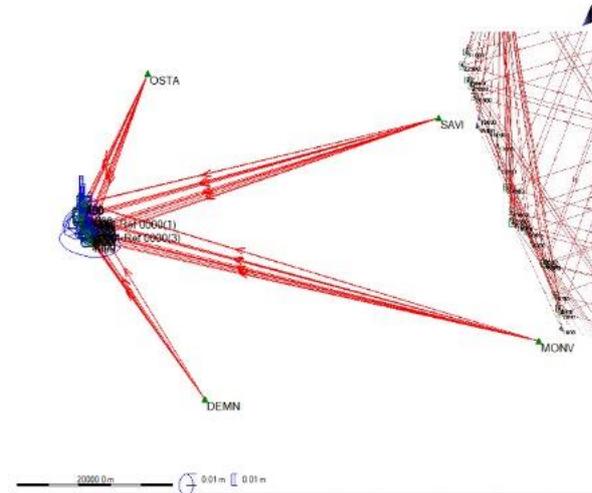


Figura 4.2: Rete di stazioni permanenti CORS utilizzata come riferimento.

In base ai vertici di riferimento ottenuti con rilevamento GNSS RTK, sono stati acquisiti alcuni punti di controllo fotogrammetrico attraverso dei marker, sia sulla superficie orizzontale delle strade che sulle facciate rocciose verticali (Figura 4.3).

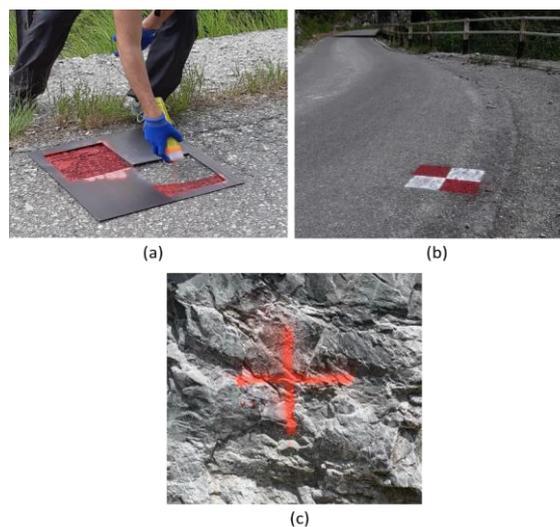
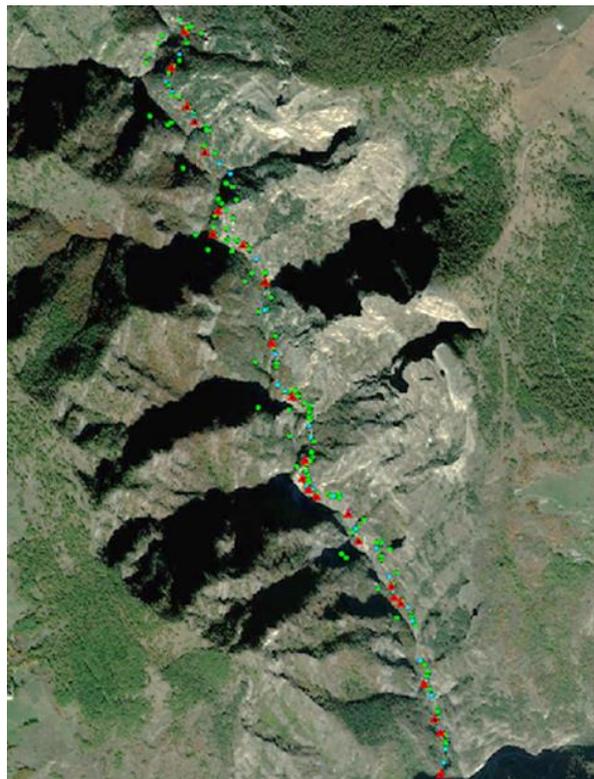


Figura 4.3: Materializzazione dei punti di controllo: (a) colorazione di marker altamente visibili (30x30 cm) lungo la strada, utilizzando un modello appositamente realizzato; (b) un marcatore orizzontale; (c) un marcatore verticale.

Le coordinate sono state stimate con una precisione di pochi centimetri ( $\sigma_{max} = 3\text{ cm}$ ) con ambiguità di fase fissa per tutti i punti. Infine, è stata misurata, la posizione di 54 marker verticali (Figura 4.3 - c) e 120 capisaldi naturali, attraverso una stazione totale (Leica Stazione Image) posizionata sul vertice di riferimento. Tutte le misurazioni sono state successivamente regolate con lo strumento software MicroSurvey StarNet v.9.0, al fine di ottenere le coordinate finali: lo scarto quadratico medio delle coordinate stimate è inferiore a 1 cm. La Figura 4.4 mostra la rete topografica finale.



*Figura 4.4: La rete topografica con vertici di riferimento (rosso), marcatori orizzontali (blu), marcatori verticali e punti naturali (verde).*

L'acquisizione delle immagini ha richiesto due giorni considerando i venti e le condizioni meteorologiche, per 11 voli (Tabella 4.1).

*Tabella 4.1: Voli e immagini nelle diverse aree.*

Area	Nadir	Oblique	Total
HR	3 flights, 505 images	5 flights, 395 images	8 flights, 900 images
LR	4 flights, 340 images	3 flights, 259 images	7 flights, 599 images
LL	2 flights, 48 images	2 flights, 137 images	4 flight, 185 images

Le facciate rocciose "quasi verticali" suggeriscono l'uso di un approccio misto per la geometria del blocco, combinando immagini nadirali, a circa 100 metri dal livello della strada, e immagini oblique con una distanza media di circa 50 metri dalle superfici rocciose. Sono stati utilizzati due UAV commerciali (DJI Phantom 4, con una fotocamera FC6310, sensore CMOS da 20 Mpixel, lunghezza focale 8,8 mm).

Al fine di coprire tutti e dieci i chilometri di strada, il sondaggio è stato diviso in tre diverse aree (Figura 4.5), vale a dire:

- *Strada Bassa*: cioè la sezione che va dall'imbocco dalla strada Provinciale 422 fino alla frana (LR);
- *Strada Alta*: cioè dalla frana alla fine della strada (HR);
- *Frana* (LL).

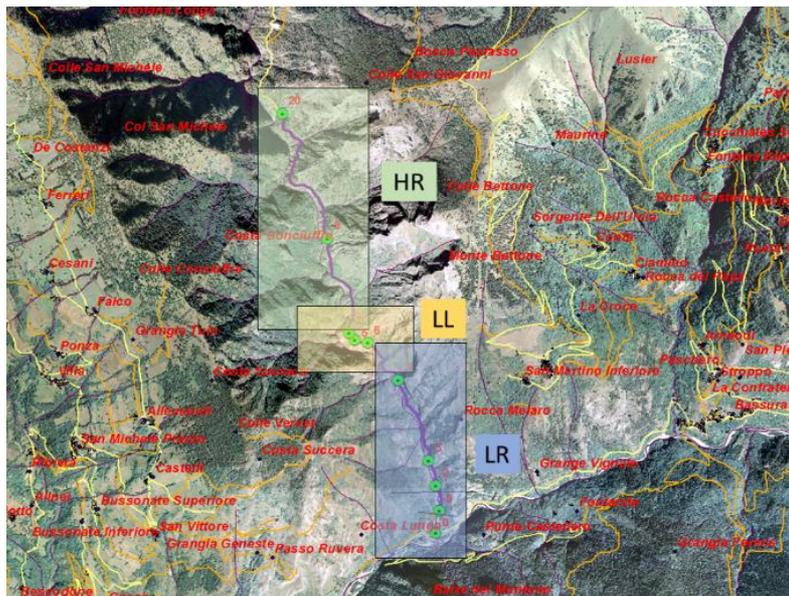


Figura 4.5: Aree della strada del Vallone di Elva.

#### 4.3. ELABORAZIONE DEI DATI FOTOGRAMMETRICI – AGISOFT METASHAPE

---

Per l'elaborazione dei dati acquisiti tramite fotogrammetria aerea e terrestre è stato utilizzato il software *Agisoft "Metashape"*. Si tratta di un software di elaborazione di immagini che lavora individuando i punti omologhi tra i diversi fotogrammi, e permette di ricostruire il modello 3D, il DTM e l'ortofoto dell'area.

Gli algoritmi implementati in questa tipologia di software sfruttano la tecnica "*Structure from Motion*" (*SfM*) che permette, partendo da immagini 2D di ricostruire oggetti 3D. Partendo da quelli che sono i principi della fotogrammetria classica, insieme a tecnologie di *imaging* e *machine learning*, il software ricostruisce il modello da immagini digitali molto definite.

La prima fase è quella del rilevamento ed estrazione delle features, cioè l'individuazione dei punti di legame, detti keypoints, e la loro descrizione tramite vettori di numeri, detti descriptor, e successivamente si esegue l'accoppiamento delle features, cioè il matching di tutti i punti omologhi individuati nelle immagini. Il software ricava automaticamente i parametri di calibrazione della fotocamera e la posizione di presa per ogni fotogramma con procedura iterativa, per questo, grazie alla tecnica *SfM*, è possibile utilizzare fotocamere di qualsiasi tipo e non necessariamente fotocamere calibrate o camere fotogrammetriche, come nella fotogrammetria tradizionale. Calcolati orientamento interno ed esterno di ogni immagine, è il software a calcolare le coordinate dei punti nello spazio ricostruendo così la nuvola densa di punti, i quali ereditano il colore dai pixel delle immagini.

Per il caso in esame sono stati ricostruiti, attraverso *Metashape*, dei modelli di maggior dettaglio di alcuni settori, partendo dal modello generale dell'intera strada. In particolare, sono state ricostruite sia attraverso rilievo da terra che da drone, le nuvole di punti dell'intera strada sezionandola nelle tre parti individuate nel paragrafo precedente: "*Strada Bassa*"; "*Strada Alta*" e "*Frana*". In particolare, per la frana, è stato realizzato un modello di dettaglio attraverso il solo rilievo aerofotogrammetrico.

Per chiarezza si riportano nella Figura 4.6 seguente le immagini delle nuvole di punti con indicazione degli stessi sull'ortofoto.

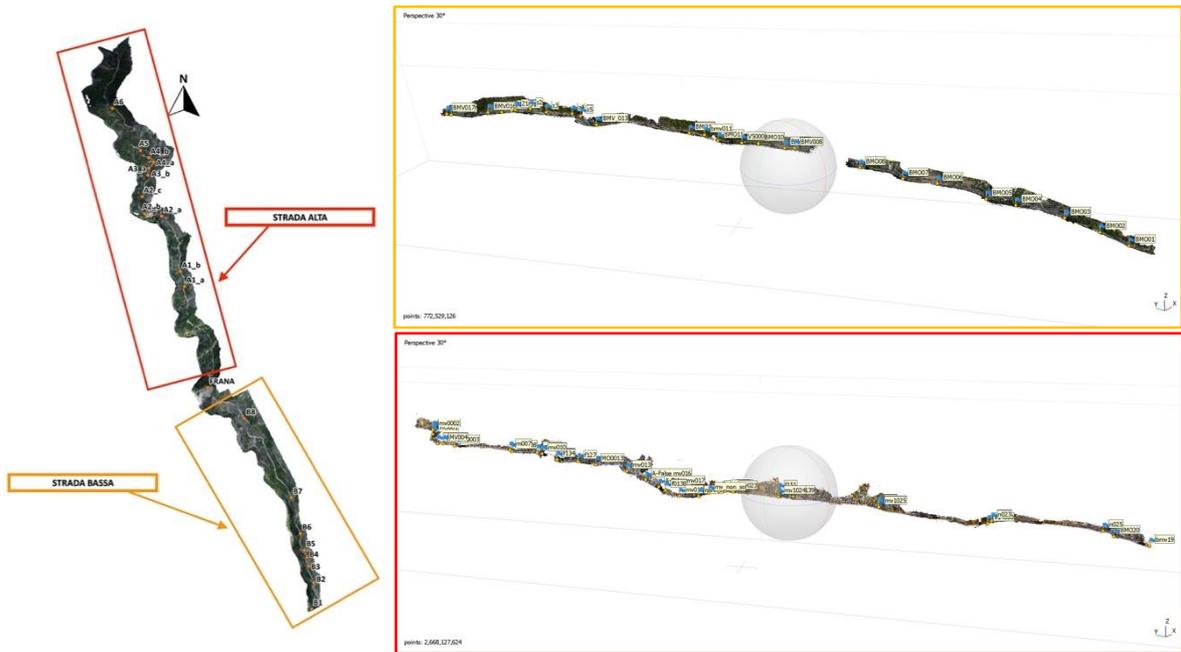


Figura 4.6: (a sinistra) ortofoto con indicazione delle sezioni di strada alta e bassa; (a destra) nuvole di punti delle sue sezioni da terra, software Metashape.

Le zone interessate dai modelli di dettaglio sono zone di dimensioni ridotte e non contenevano generalmente alcun punto materializzato per il rilievo generale. I modelli di dettaglio sono stati georeferenziati materializzando sulle foto dei punti materiali naturali di cui sono state desunte le coordinate dal modello generale ricostruito.

Quindi, sono stati individuati, sui fotogrammi corrispondenti, alcuni marcatori in modo da georiferire i 19 modelli di dettaglio minori dei settori di interesse. Ovviamente l'errore aumenta, ma hai fini del rilievo geostrutturale e della misura delle spazature risulta essere un errore contenuto.

I modelli costruiti sono stati utilizzati successivamente per il rilievo non contatto con il software "Rockscan" di cui si parlerà nel Capitolo 5. Nei paragrafi seguenti, si descrivono quelli che sono stati i passaggi principali per la costruzione dei modelli, utilizzando come esempio uno dei 19 modelli.

Nella Figura 4.7 e Figura 4.8 si riportano gli ortofoto in scala 1:5000 in modo da visualizzare meglio la posizione di tutti i settori.



Figura 4.7: Ortofoto Strada Alta.



Figura 4.8: Ortofoto Strada Bassa e Franone.

### 4.3.1. IMPOSTAZIONI DI BASE

---

Il punto di partenza per l'elaborazione dei dati è quello di andare a modificare quelle che sono le impostazioni di base del software tramite il comando dal menu principale *“Tools – Preferences settings”*.

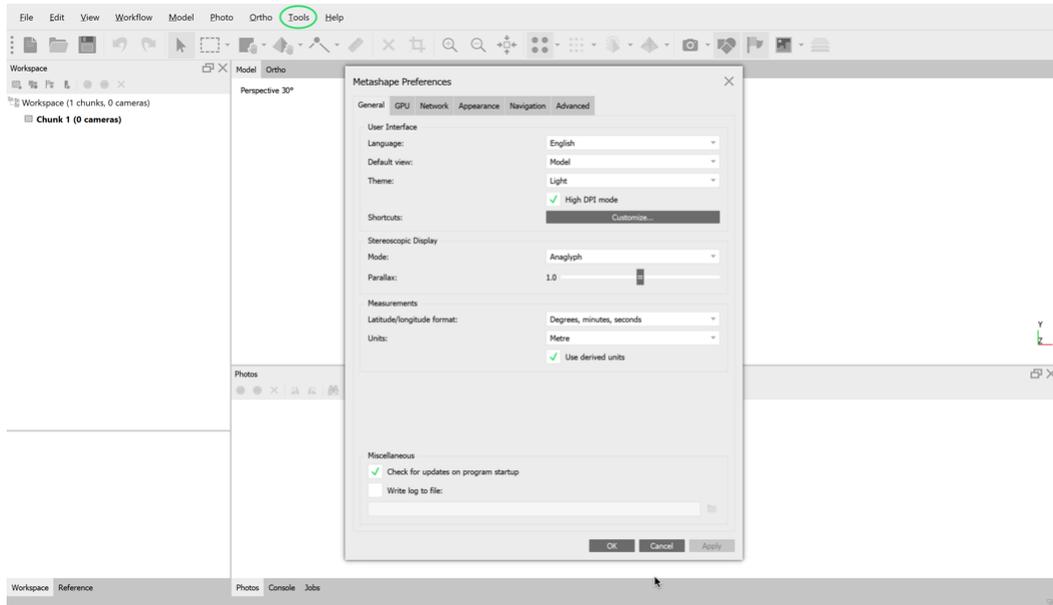


Figura 4.9: Impostazione delle preferenze del software.

### 4.3.2. CREAZIONE DEL CHUNK

---

Nella creazione della nuvola di punti delle due sezioni della strada alta e bassa è stato utile poter lavorare parallelamente sia con le immagini della fotogrammetria aerea sia con quelle terrestri, utilizzando due *Chunk* diversi del *Workspace*. L'utilizzo di *Chunk* differenti fa sì che si possano unire nuvole di punti di parti diverse attraverso il comando *“Workflow – Align Chunks”*, in modo da allinearle e successivamente attraverso il comando *“Workflow – Merge Chunks”* in modo da unirle insieme. È possibile spostarsi da un *Chunk* all'altro semplicemente con un doppio click del mouse.

#### 4.3.3. CARICAMENTO E ALLINEAMENTO DELLE IMMAGINI

---

Attraverso il comando “*Workflow – Add Photos*” o con la corrispondente icona nella barra di comando del *Workspace*, è possibile caricare le immagini desiderate nel nuovo progetto.

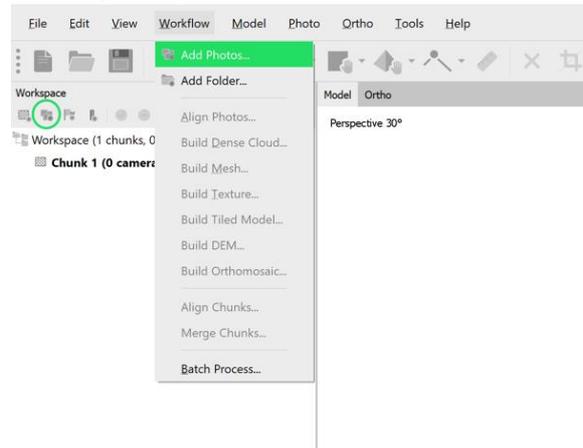


Figura 4.10: Caricamento delle foto.

Al caricamento delle immagini, accanto ad ognuna di esse possono comparire due acronimi:

- *NC (Not Calibrated = non calibrata)*: segnala che i dati EXIF disponibili non sono sufficienti a stimare la lunghezza focale della fotocamera. In questo caso *Metashape* presuppone che la foto sia stata scattata con un obiettivo da 50 mm (rif.to pellicola da 24x36 mm). Se la lunghezza focale effettiva differisce significativamente da questo valore, può essere richiesta la calibrazione manuale.
- *NA (Not Aligned = non allineata)*: Segnala che i parametri di orientamento esterno della fotocamera in relazione alla foto analizzate non sono stati ancora stimati. Le immagini caricate da *Metashape* non saranno allineate finché non sarà eseguito il passo successivo - allineamento delle foto (photo alignment) (*Agisoft Metashape User Manual*).

I fotogrammi devono avere necessariamente una sovrapposizione minima del 60% in modo che il software riesca a effettuare l'operazione di “matching” con scopo di mettere in relazione elementi corrispondenti su immagini differenti, di trovare i punti comuni tra di

esse, i matching points sui quali verranno basate le successive elaborazioni. Gli algoritmi di matching possono essere riassunti nelle seguenti categorie:

- *area based*: si considerano i valori radiometrici nell'intorno del punto, partendo da un punto noto su un fotogramma si individua la posizione del suo omologo sugli altri;
- *feature based*: per prima cosa si estraggono punti sui vari fotogrammi, e successivamente l'algoritmo individua le corrispondenze fra i diversi set di punti;

L'algoritmo che porta a risultati migliori è quello *feature based* in quanto si riesce ad ottenere una descrizione qualitativa e quantitativa. Selezionate tutte le entità distinte nelle immagini l'algoritmo procede con l'accoppiamento, scegliendo le coppie che hanno un grado di somiglianza sufficiente, sulla base del contenuto radiometrico o altre misure di somiglianza.

Questa operazione è effettuata da *Metashape* attraverso il comando "*Workflow – Align Photos*", in cui il software individua i punti omologhi, ricavando in automatico i parametri di calibrazione della fotocamera e la posizione di presa per ogni fotogramma, elaborando una prima nuvola di punti a densità ridotta denominata "*Point Cloud*", cioè nuvola di punti sparsa.

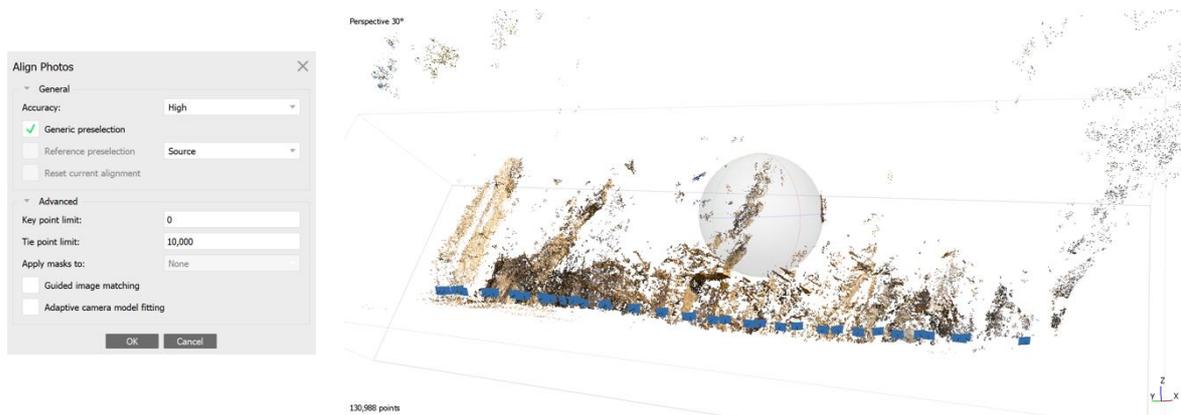


Figura 4.11: (a sinistra) Allineamento delle foto, (a destra) posizionamento delle camere e nuvola di punti sparsa per il settore A1\_b.

#### 4.3.4. IMPOSTAZIONE DEL SISTEMA DI RIFERIMENTO E POSIZIONAMENTO DEI MARKER

Per l'orientazione di un modello sono necessarie le coordinate di almeno 3 punti. Il modello può essere georiferito utilizzando le coordinate dei marker, le coordinate di presa o entrambe.

Si vanno a collimare i punti di appoggio, cioè punti presenti in più fotogrammi, in modo da migliorare l'allineamento delle foto e la sua localizzazione. In particolare, nel caso in esame sono stati selezionati sui fotogrammi dei modelli maggiori, alcuni punti in modo da ricostruire i modelli più piccoli. Le coordinate dei marker, sottoforma di file di testo, vengono caricate all'interno del software spostandosi nella finestra "Reference" e selezionando il tasto "Import".

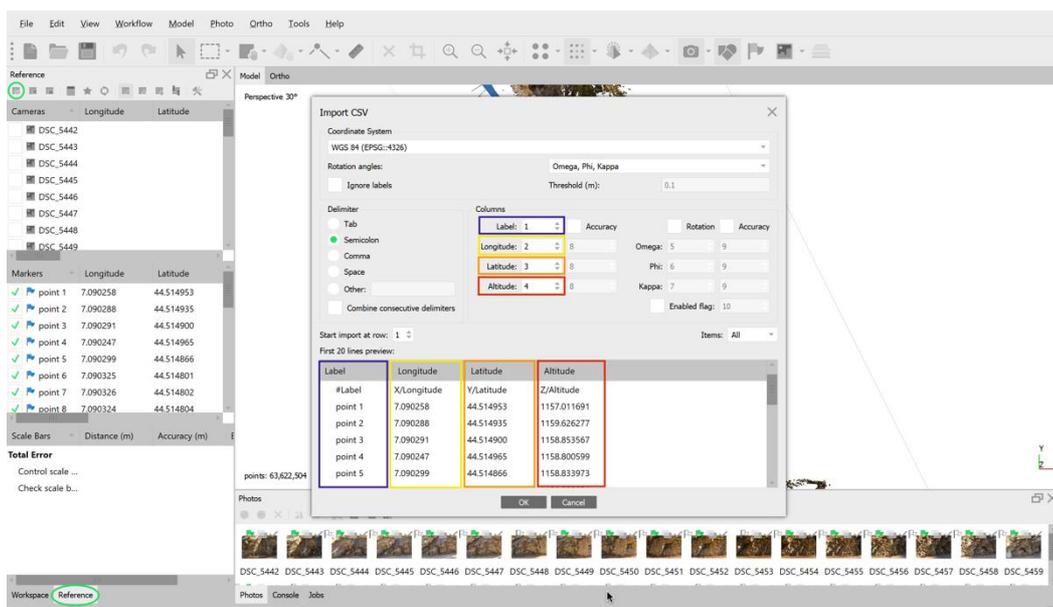


Figura 4.12: Importazione delle coordinate dei marker da un file di testo.

Il posizionamento dei marker è stato eseguito attraverso un approccio manuale, visualizzando le foto in cui erano visibili i marker, individuandoli e aggiungendo le proiezioni di tali punti attraverso il tasto destro del mouse selezionando il comando "Place marker". Se un marker viene posizionato in almeno due foto allineate, Metashape in automatico troverà le sue proiezioni in tutte le altre foto e le indicherà con una bandierina bianca.

Andando a rifinire manualmente la proiezione del punto in ciascuna foto l'icona cambierà colore, da bianca a verde.

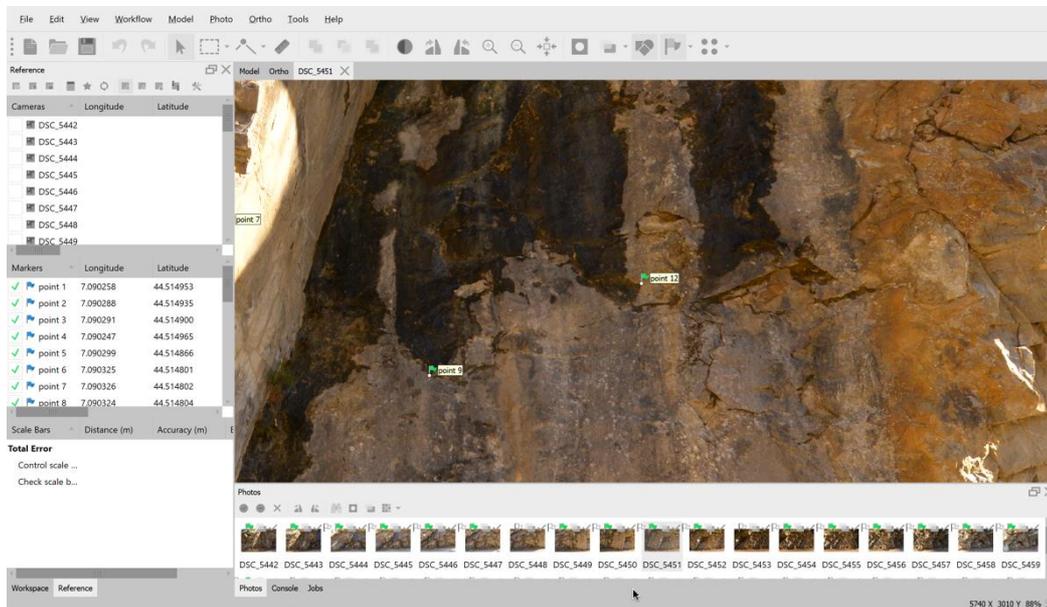


Figura 4.13: Posizionamento di un marker.

Dopo il posizionamento di tutti i marker è stato selezionato il comando “Optimize Cameras”, ottenendo l'errore di georeferenziazione, come nell'esempio riportato, ove il settore A1\_b, è pari a 3.8 cm. Nella Tabella 4.2 nella pagina seguente, si riportano gli errori totali per tutti i modelli dei settori evidenziati nell'ortofoto in Figura 4.6 .

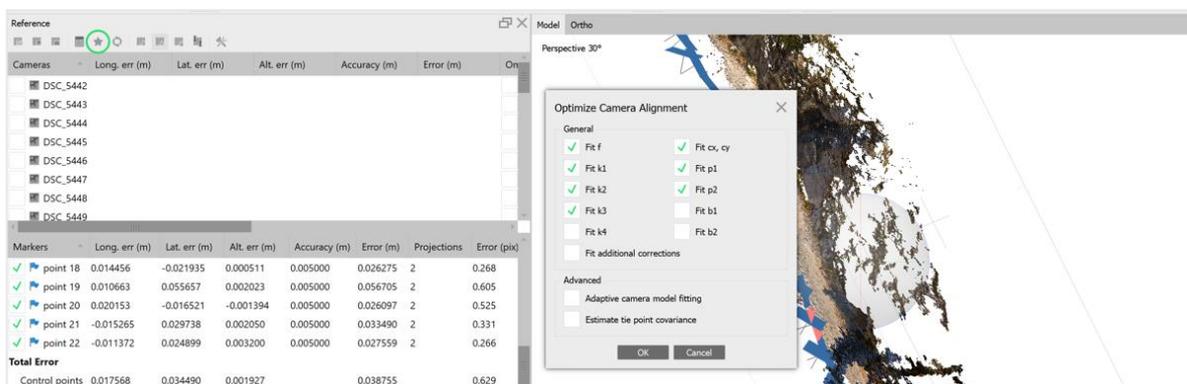


Figura 4.14: Errore totale Chunk.

Tabella 4.2: Errori totali per ogni settore.

Settore	Total error [cm]
B1	4.3
B2	3.6
B3	3.6
B4	5.2
B5	1.9
B6	2.3
B7	2.8
B8	4.0
FRANA	1.2
A1_a	2.2
A1_b	3.8
A2_a	2.7
A2_b	2.7
A2_c	2.8
A3_a	3.2
A3_b	2.9
A4_a	1.2
A4_b	2.2
A5	3.5
A6	5.8

#### 4.3.5. GENERAZIONE DELLA NUVOLA DENSA

---

La fase successiva al posizionamento dei marker è quella della costruzione della nuvola densa di punti o “Dense Cloud” (Figura 4.15). Questa è la procedura che richiede maggiori risorse in termini di tempo e prestazioni del calcolatore. Partendo dalla nuvola sparsa (Figura 4.11) il software aggiunge altri punti attraverso l’analisi di informazioni grafiche delle immagini. Il software sulla base delle posizioni di ripresa stimate delle camere calcola le informazioni complete e necessarie per ogni fotocamera, e combinandole genera un’unica nuvola di punti densa.

L'operazione è effettuata tramite il comando "Build Dense Cloud" del menù "Workflow", andando a specificare la qualità di ricostruzione desiderata. In questo caso si è scelto di lanciare una nuvola in qualità "High" in modo da ottenere una soluzione più dettagliata con una geometria accurata.



Figura 4.15: (a sinistra) Generazione della nuvola densa, (a destra) nuvola densa per il settore A1\_b.

#### 4.3.6. GENERAZIONE DELLA MESH 3D

La fase successiva alla generazione della nuvola di punti è quella della costruzione della mesh triangolare tridimensionale, un reticolo in cui i punti della nuvola diventano i vertici delle facce del modello tridimensionale.

Il software applica il "meshing" andando a trovare la superficie che meglio approssima quella reale, considerando che i punti della nuvola sono punti che giacciono sulla superficie stessa e che, essendo questi in numero finito ma con una distanza relativa sufficientemente piccola, riescono a rappresentare una superficie prossima a quella reale. La triangolazione può eseguita sia in 2D che in 3D, seguendo criteri differenti, a seconda della tipologia di dati di input:

- *Triangolazione 2D*: seguendo il criterio di Delauney (assicura l'assenza di vertici all'interno di circonferenze circoscritte a ciascun triangolo), vengono generati triangoli aventi come vertici punti appartenenti a un piano, comuni solo negli spigoli;

- *Triangolazione 2.5D*: per ogni punto giacente sul piano si ha il corrispondente e unico valore di quota, dato da una funzione lineare delle coordinate planimetriche. Nella triangolazione si genera tale funzione come media pesata delle quote dei vertici del triangolo che contiene ciascun punto. In questo caso il modello viene detto TIN o GRID;
- *Triangolazione 3D*: detta anche “tetraedralizzazione”, corrisponde a una partizione del dominio in input in una serie di tetraedri che avranno in comune solo le facce condivise (vertici, spigoli o triangoli);
- *Superfici generiche per modelli 3D*: in questo caso i dati di input appartengono all’insieme  $R^3$ , ma non essendo nello stesso piano non hanno funzione di quota unica.

L’operazione viene effettuata da *Metashape* attraverso il comando “*Workflow – Build mesh*”, impostando il tipo di superficie su “3D”. Come esempio, il risultato per uno dei settori considerati, è riportato nella Figura 4.16 seguente:

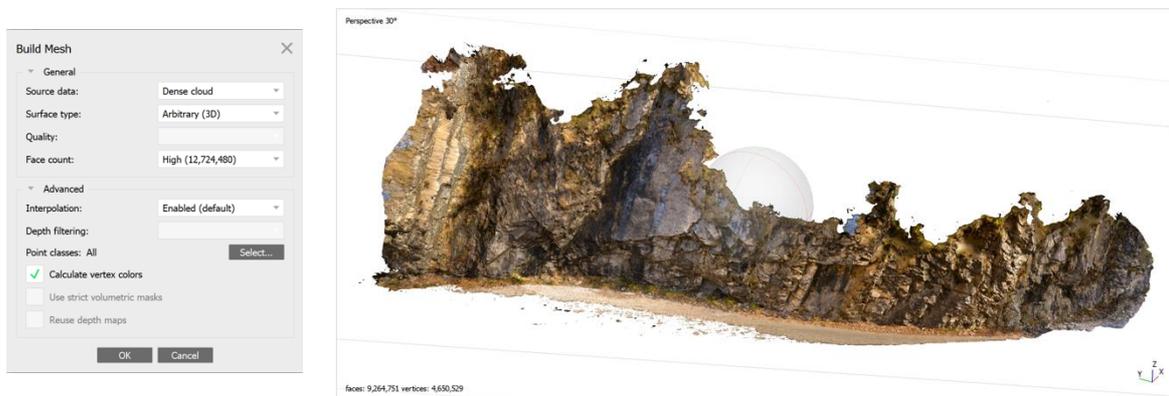


Figura 4.16: (a sinistra) Generazione della mesh 3D, (a destra) Mesh 3D per il settore A1\_b.

In questo modo sono stati realizzati tutti i modelli per i 20 settori considerati, necessari per il rilievo da non contatto, esplicitato nel capitolo seguente. Il rilievo è restituito georeferenziato nel Sistema di Riferimento geografico WGS84, e il suo codice EPSG è il 4326. I modelli sono stati successivamente esportati, per essere elaborati con il software “*Rockscan*” (Ferrero et al., 2009), in coordinate locali, con estensione “.STL”, facendo attenzione ad esportare nello stesso sistema locale anche i parametri di orientamento esterno delle camere.

## ***5. IL RILIEVO DA NON CONTATTO***

---

In questa tipologia di rilievo, come già riportato nel paragrafo 2.1.2.2., l'operatore non necessita di essere a contatto diretto con la parete per effettuare le misure sull'oggetto, ma bensì queste vengono effettuate da remoto. La base su cui uno o più operatori lavorano è il DSM, prodotto dal rilievo fotogrammetrico precedentemente esposto nel Capitolo 4. In questo capitolo si andranno a descrivere quelli che sono gli strumenti e passaggi necessari per il rilievo da non contatto.

### 5.1. STRUMENTI PER IL RILIEVO DA NON CONTATTO – ROCKSCAN

---

Il software utilizzato per il rilievo geostrutturale delle discontinuità è "*Rockscan*" (Ferrero et al., 2009), sviluppato dall'Università di Parma.

Questo programma permette l'identificazione automatica dell'orientazione e della posizione delle superfici di discontinuità, con un'interfaccia che, attraverso l'immagine della parete stessa, consente il riconoscimento visivo e la selezione dei piani di discontinuità. Infatti, il software dà la possibilità all'operatore di andare a inserire una o più fotografie digitali del versante, scattate durante le fasi di rilievo fotogrammetrico, andandole sovrapporre opportunamente al DSM della parete stessa. La selezione dell'area d'interesse sulla fotografia corrisponde, in realtà, alla selezione della relativa porzione di DSM e, quindi, di un certo numero di punti orientati, appartenenti alla superficie della parete selezionata.

Attraverso opportuni processi di segmentazione geometrica del DSM, è possibile determinare il piano o i piani che meglio approssimano la geometria dell'area selezionata e le corrispondenti equazioni caratteristiche. In particolare, l'utente può scegliere a priori se stimare l'equazione di un singolo piano medio della nuvola di punti selezionata (*RansacSingle*), o al contrario determinare automaticamente i piani contenuti nella superficie stessa (*RansacMulti*). L'operatore può definire quelli che sono i valori soglia di precisione con cui identificare i punti appartenenti ad un medesimo piano, in modo da stabilire il numero e l'orientazione dei piani stessi determinati anche in presenza di una rilevante percentuale d'errori grossolani (*Ransac*, cfr Fischler & Bolles 1981; Torr & Murray, 1997; Roncella & Forlani, 2005). L'opzione "*RansacMulti*" è utile nel caso di pendii naturali dove i piani di discontinuità sono limitati in numero, estesi e ben individuabili. Nella

maggior parte dei casi però, le pareti risultano altamente fratturate, per cui è preferibile utilizzare, come nel caso in esame, opzione “*RansacSingle*”.

Dalle equazioni di caratteristiche, è possibile definire l’orientazione, nonché le coordinate del punto baricentrico del piano o dei piani individuati, rispetto al sistema di riferimento del DSM. Il programma “*Rockscan*” (Ferrero et al., 2009) è impostato in modo da elaborare i dati delle nuvole di punti le cui coordinate siano rappresentate in un sistema di riferimento destrorso con asse X orientato verso Est, asse Y verso Nord ed asse Z coincidente con la direzione verticale. Quindi, se l’orientazione del modello è espressa opportunamente rispetto al sistema di riferimento geografico, il software fornisce i dati di giacitura dei piani espressi attraverso la definizione di due angoli caratteristici: l’inclinazione (Dip) e la direzione di immersione (Dip direction) della retta di massima pendenza del piano, considerata con verso diretto verso il basso.

Come precedentemente descritto, allo stesso DSM, il software può associare più di una fotografia (anche se rappresentativa di una porzione di esso) in modo da poter lavorare più efficacemente in relazione all’esposizione dei piani emergenti, che possono essere ben visibili in alcuni fotogrammi e completamente nascosti in altri (Ferrero et al., 2010).

In questo modo si riesce ad individuare un vasto numero di piani, rispetto a quelli individuabili con un rilievo tradizionale condotto lungo alcuni stendimenti in parete. Questo fa sì che sia possibile studiare l’assetto strutturale della parete su una base statistica più ampia, e avere una visione complessiva della parete stessa, facilitando l’individuazione dell’assetto generale dei principali sistemi di discontinuità dell’ammasso, che ne determinano il comportamento meccanico.

## 5.2. IL RILIEVO DEI SISTEMI DI DISCONTINUITÀ

---

L'identificazione dei piani di discontinuità è stata eseguita per ognuno dei 20 settori considerati, riportando i risultati ottenuti nel Allegato 1. A seconda dei casi, sono stati utilizzati uno o più fotogrammi in modo da avere una visione il più possibile completa della parete. Nella seguente Tabella 5.1 è indicato per ogni settore il numero di piani di cui è stato possibile ricavare gli angoli di orientazione.

*Tabella 5.1: Numero di piani rilevati per ogni settore.*

<b>Settore</b>	<b>N. di piani rilevati</b>
B1	106
B2	97
B3	87
B4	96
B5	92
B6	118
B7	166
B8	150
FRANA	157
A1_a	241
A1_b	220
A2_a	74
A2_b	116
A2_c	145
A3_a	97
A3_b	142
A4_a	83
A4_b	121
A5	110
A6	133

Il software *Rockscan* per poter sovrapporre correttamente e senza distorsioni le fotografie al modello digitale, necessita, per ogni immagine, la definizione di alcuni parametri:

- *Parametri di orientamento esterno*: cioè le coordinate del punto di presa  $x, y, z$  e gli angoli cardanici di assetto  $\omega, \phi, \kappa$ ;
- *Parametri di orientamento interno*: lunghezza focale, dimensioni e coordinate del punto centrale del sensore, dimensioni in pixel dell'immagine e parametri di distorsione dell'obiettivo.

Come descritto nel precedente Capitolo 4, questi elementi sono stati ottenuti tramite il software *Metashape* nell'analisi del blocco fotogrammetrico, tramite una auto-calibrazione basata sui risultati dell'allineamento delle immagini del blocco stesso. I parametri di orientamento interno vengono esportati con estensione “.ini” dal Photomodeler adjusted di *Metashape* (Figura 5.1), mentre quelli di orientamento esterno devono essere esportati in file “.txt”.

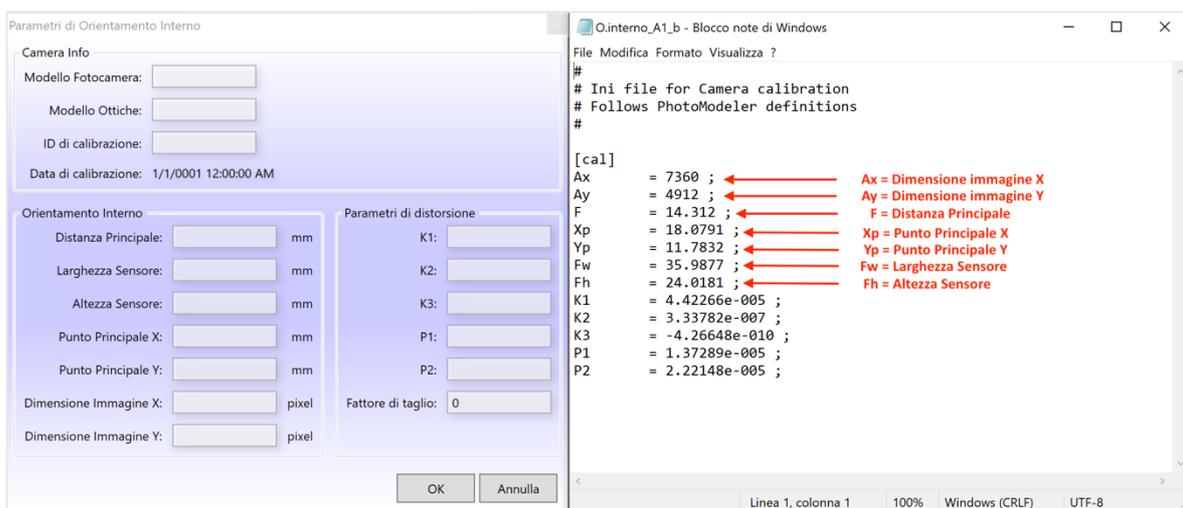


Figura 5.1: Settaggio dei parametri di orientamento interno della camera.

Accoppiando ciascuna fotografia al DSM, con il semplice trascinarsi di quest'ultimo sull'immagine stessa, è possibile andare a tracciare dei poligoni, selezionando le aree sull'immagine che rappresentano i piani di discontinuità (Figura 5.2).

Operando sulle immagini la selezione dei piani è più precisa in quanto è possibile basarsi sui toni RGB dei pixel, sulle ombre e sulla prospettiva nell'identificazione della morfologia. Si può notare che selezionando un piano in un'immagine questo viene proiettato anche negli altri fotogrammi in cui è visibile. In questo modo si può selezionare la medesima area

in un fotogramma con una prospettiva migliore, se in un'immagine quel medesimo piano non è ben visibile.



Figura 5.2: Selezione dei piani di discontinuità tramite il software Rockscan, esempio del settore A1\_b.

Come precedentemente detto, l'estrazione dei piani è stata eseguita in modalità manuale (*RansacSingle*) in quanto questa risulta preferibile nel caso di pareti altamente fratturate. Essendo l'individuazione dei piani di tipo manuale, occorre prestare attenzione nella selezione dei piani poiché: meglio vengono definiti i piani, meno outlier vengono inclusi nelle regioni disegnate, maggiore è la velocità di calcolo e maggiore la precisione con cui viene fornito il risultato.

Il software, oltre alle coordinate del punto baricentrico, fornisce la dip e la dip direction delle discontinuità, attraverso una stima ai minimi quadrati dell'orientazione del piano che meglio approssima la regione di punti selezionata.

### 5.3. ESTRAZIONE DEI DATI DI SPAZIATURA

La tecnica da non contatto non fornisce un rilievo completo, in quanto è necessaria un'analisi visiva e quindi soggettiva, da parte dell'operatore, di quelle che sono, per esempio, le condizioni del giunto o misurazioni del JCS.

Uno dei parametri che è determinabile attraverso il rilievo da non contatto è la spaziatura. In particolare, è stata effettuata la misura della spaziatura tra i giunti che sono stati individuati come appartenenti allo stesso sistema di discontinuità. Il software *Rockscan* dà la possibilità all'utente di effettuare misure di distanza sul DSM, ricavando le coordinate x,y e z degli estremi del segmento, la sua lunghezza e i valori delle sue componenti Dx, Dy e Dz. Per evitare di ricorrere alla correzione di Terzaghi, le misure sono state effettuate cercando di mantenere una direzione ortogonale alle superfici di discontinuità, così da ottenere i valori di spaziatura reale.

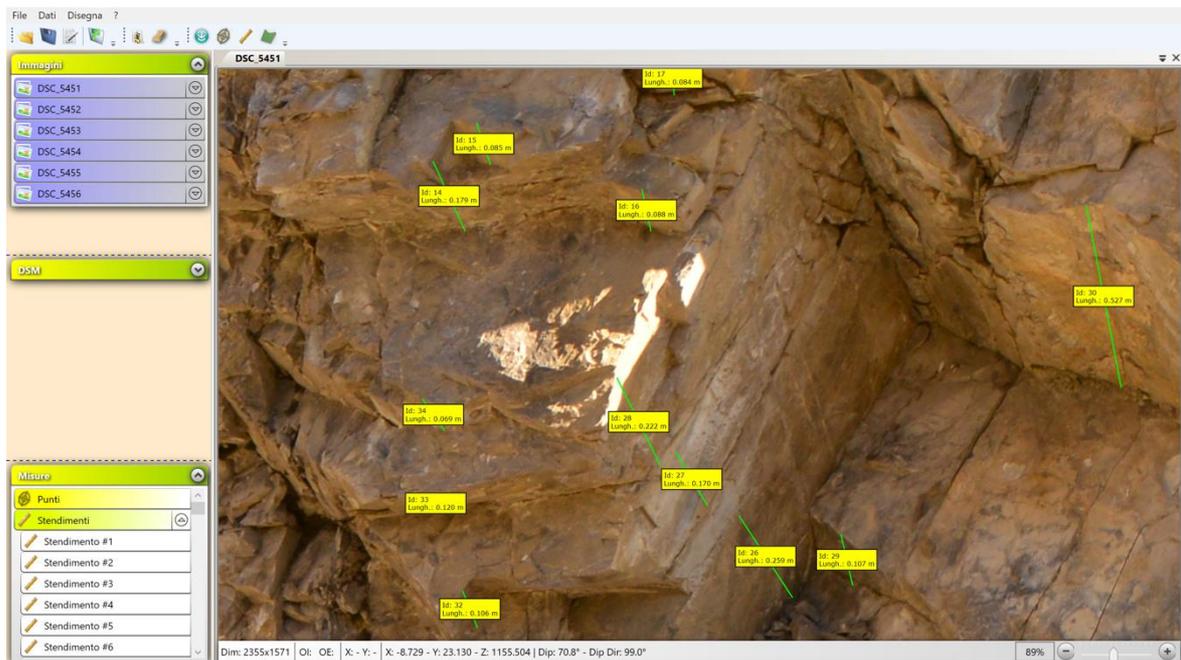


Figura 5.3: Rilievo delle spaziature tramite il software Rockscan, esempio del settore A1\_b.

#### 5.4. ELABORAZIONE DEI RISULTATI

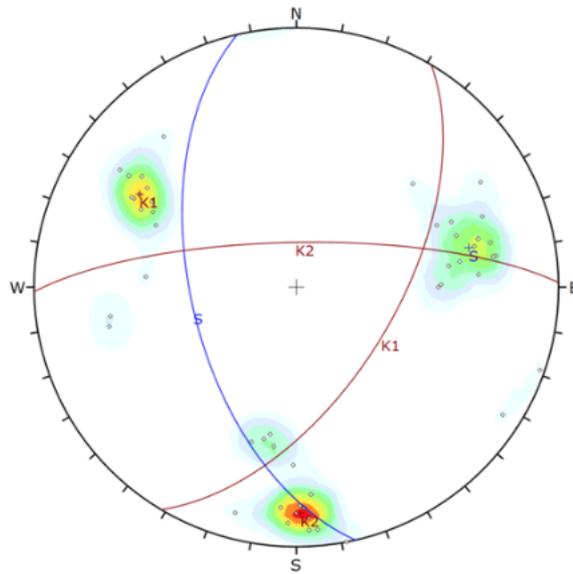
---

I dati di giacitura ottenuti dal rilievo da non contatto sono stati elaborati statisticamente il software con *“Dips7.0, RocScience Inc.”* ottenendo, per ogni settore, lo stereogramma sul quale sono stati individuati i sistemi di discontinuità. I dati sono stati rappresentati su un reticolo stereografico utilizzando una proiezione sferica equiarea nell’emisfero inferiore e, a partire dai cluster dei punti, sono stati selezionati i valori più frequenti, che definiscono i sistemi principali.

I risultati ottenuti per tutti 20 settori sono riportati nelle schede di rilievo in Allegato 1, in cui sono riportati anche i confronti con il rilievo tradizionale. A tal proposito, per quanto riguarda il rilievo tradizionale, nel caso in esame, sono state effettuate esclusivamente delle misurazioni della giacitura dei set di discontinuità attraverso una bussola geologica che permette di misurare direttamente in sito sia l’inclinazione, sia la direzione di immersione. Anche in questo caso i dati raccolti in campagna sono stati elaborati con *“Dips7.0, RocScience Inc.”*, in modo da individuare i sistemi di discontinuità.

Si riporta in Figura 5.4, come esempio, il confronto per il settore A1\_b, al fine di dimostrare la validità dei risultati ottenuti. Si rimanda all’Allegato 1 per i risultati e il confronto per tutti i settori.

## Rilievo tradizionale



Symbol	Feature
○	Pole Vectors

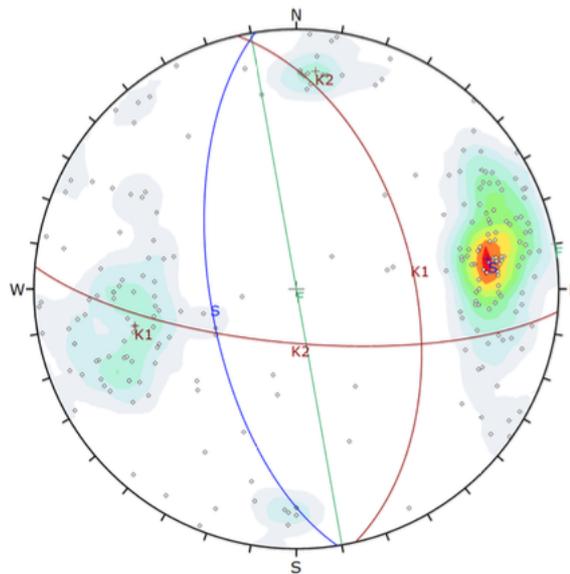
Color	Density Concentrations
	0.00 - 1.90
	1.90 - 3.80
	3.80 - 5.70
	5.70 - 7.60
	7.60 - 9.50
	9.50 - 11.40
	11.40 - 13.30
	13.30 - 15.20
	15.20 - 17.10
	17.10 - 19.00

Contour Data		Pole Vectors
Maximum Density	18.30%	
Contour Distribution	Fisher	
Counting Circle Size	1.0%	

Color	Dip	Dip Direction	Label
Mean Set Planes			
1m	57	257	S
2m	59	121	K1
3m	76	359	K2

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	51 (51 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

## Rilievo tramite Rockscan



Symbol	Feature
○	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
	0.00 - 1.10
	1.10 - 2.20
	2.20 - 3.30
	3.30 - 4.40
	4.40 - 5.50
	5.50 - 6.60
	6.60 - 7.70
	7.70 - 8.80
	8.80 - 9.90
	9.90 - 11.00

Contour Data		Pole Vectors
Maximum Density	10.43%	
Contour Distribution	Fisher	
Counting Circle Size	1.0%	

Color	Dip	Dip Direction	Label
User Planes			
1	90	260	F
Mean Set Planes			
1m	63	261	S
2m	53	77	K1
3m	73	185	K2

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	220 (220 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

Figura 5.4: Confronto tra il rilievo tradizionale e tramite Rockscan, esempio del settore A1\_b.

Si nota che il piano di "Strato", con il quale si indica il piano di stratificazione, trova corrispondenza con il rilievo da Rockscan discostandosi, di 6° dal rilievo tradizionale. La famiglia K1 presenta una direzione di immersione che si discosta di 44°, mentre presenta un'inclinazione quasi coincidente a quella del rilievo tradizionale che differisce di 6°.

famiglia K2, pseudoverticale, ha dip direction variabile basta poco infatti perché immerga dal lato opposto.

Per quanto riguarda i dati di spaziatura, sono stati estratti per ogni settore un numero di valori pari a quello riportato in Tabella 5.2 .

*Tabella 5.2: Numero di valori di spaziatura per ogni settore (Legenda: N.P.: set “Non Presente”; N.I.: “Non Individuato”).*

Settore	N. di spaziature				
	STRATO	K1	K2	K3	K4
B1	108	N.I.	N.I.	N.I.	N.P.
B2	47	N.I.	N.I.	N.P.	N.P.
B3	84	N.I.	N.I.	N.P.	N.P.
B4	17	N.I.	51	N.P.	N.P.
B5	43	N.I.	46	N.P.	N.P.
B6	63	N.I.	N.I.	N.P.	N.P.
B7	79	N.I.	N.I.	N.P.	N.P.
B8	80	N.I.	N.I.	N.P.	N.P.
FRANA	126	N.I.	N.P.	N.P.	N.P.
A1_a	87	N.I.	69	N.I.	98
A1_b	185	152	85	N.P.	N.P.
A2_a	23	31	N.I.	27	N.P.
A2_b	61	47	40	N.P.	N.P.
A2_c	30	75	72	N.I.	N.P.
A3_a	53	36	43	N.I.	N.P.
A3_b	31	N.I.	N.I.	N.I.	N.P.
A4_a	56	N.I.	N.I.	N.P.	N.P.
A4_b	86	N.I.	N.I.	N.I.	N.I.
A5	48	29.	N.I.	N.P.	N.P.
A6	62	33	N.I.	N.P.	N.P.

I dati di spaziatura sono stati analizzati, famiglia per famiglia, attraverso una distribuzione di frequenza. Le spaziature sono state organizzate per classi indicate dal ISRM e, considerando che in ciascuna classe ricadono i valori compresi tra quella precedente e la

successiva, è stato ricavato il valore di frequenza corrispondente. Sempre come esempio, si riportano le distribuzioni insieme con i valori minimi, medi e massimi e il valore modale per ogni set (Tabella 5.3), per il settore A1\_b.

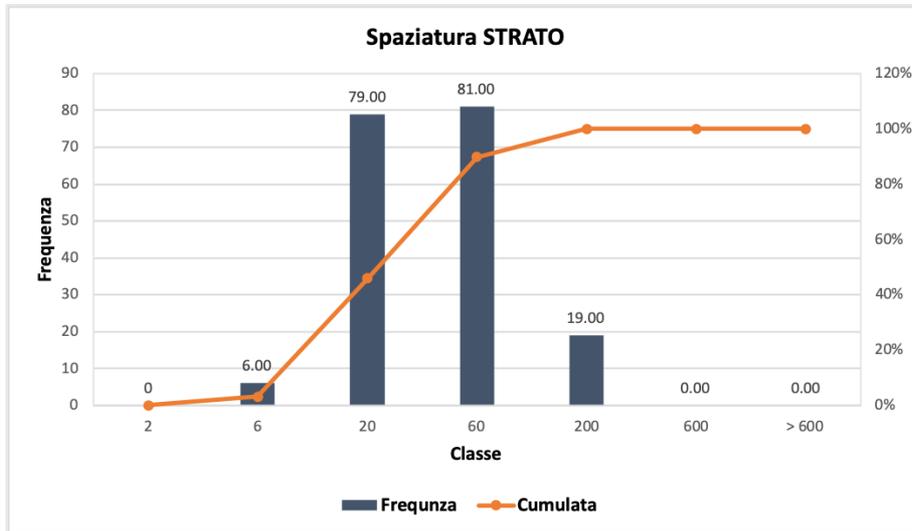


Figura 5.5: Analisi di frequenza per la valutazione della spaziatura per il piano di strato, esempio del settore A1\_b.

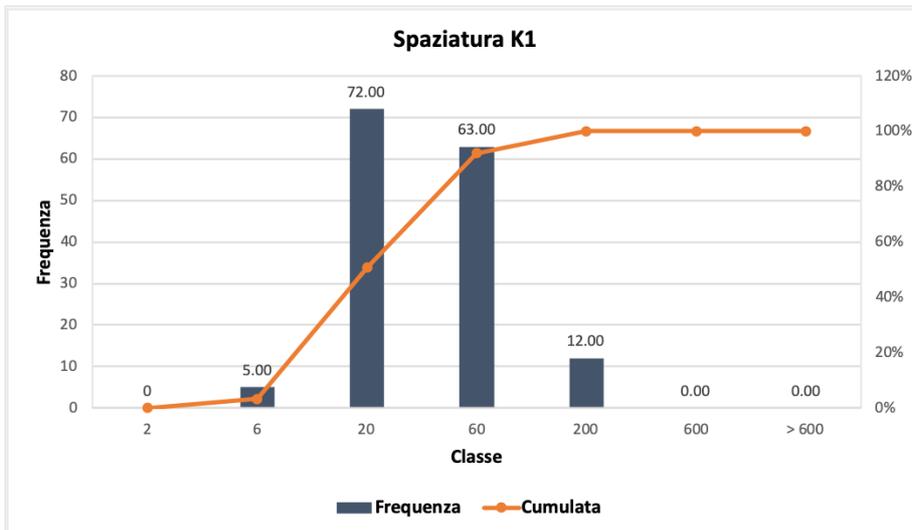


Figura 5.6: Analisi di frequenza per la valutazione della spaziatura per il set di discontinuità K1, esempio del settore A1\_b.

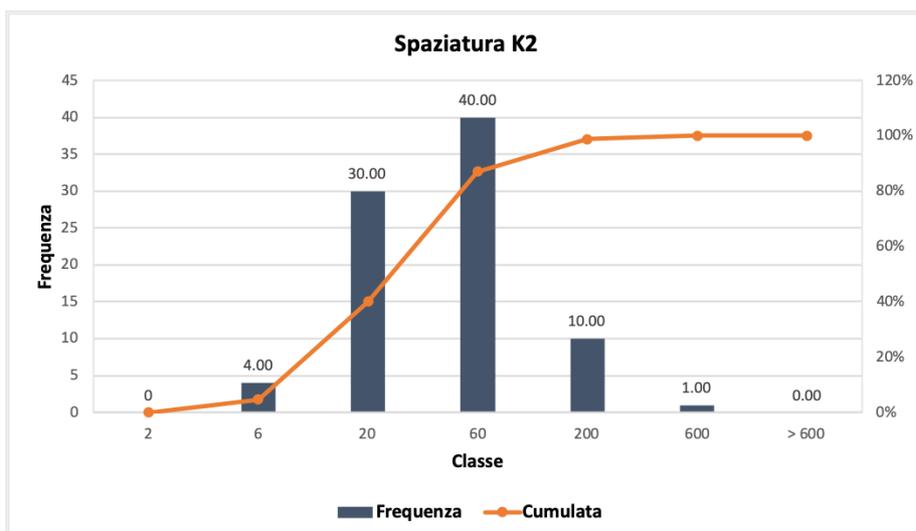


Figura 5.7: Analisi di frequenza per la valutazione della spaziatura per il set di discontinuità K2, esempio del settore A1\_b.

Tabella 5.3: Valori di minimo, massimo, media e moda per le spaziature del settore A1\_b.

	STRATO	K1	K2
Media [cm]	29.15	27.42	35.61
Massimo [cm]	156.97	142.51	309.10
Minimo [cm]	3.60	3.10	3.39
Moda [cm]	60	20	60

## 5.5. RISULTATI OTTENUTI

---

Dall'analisi dei risultati ottenuti si può concludere che in generale in tutti i settori analizzati sono stati rilevati tre sistemi di discontinuità: quello del piano di strato, che risulta essere il più persistente, e almeno altri due sistemi, tra loro coniugati, individuati tra i piani di stratificazione, che possono andare a formare blocchi di diversa forma e dimensione.

Qui di seguito si faranno alcune considerazioni generali sull'inclinazione e la spaziatura del piano di strato.

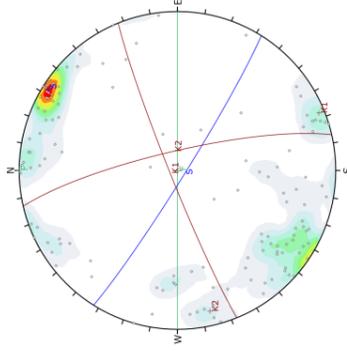
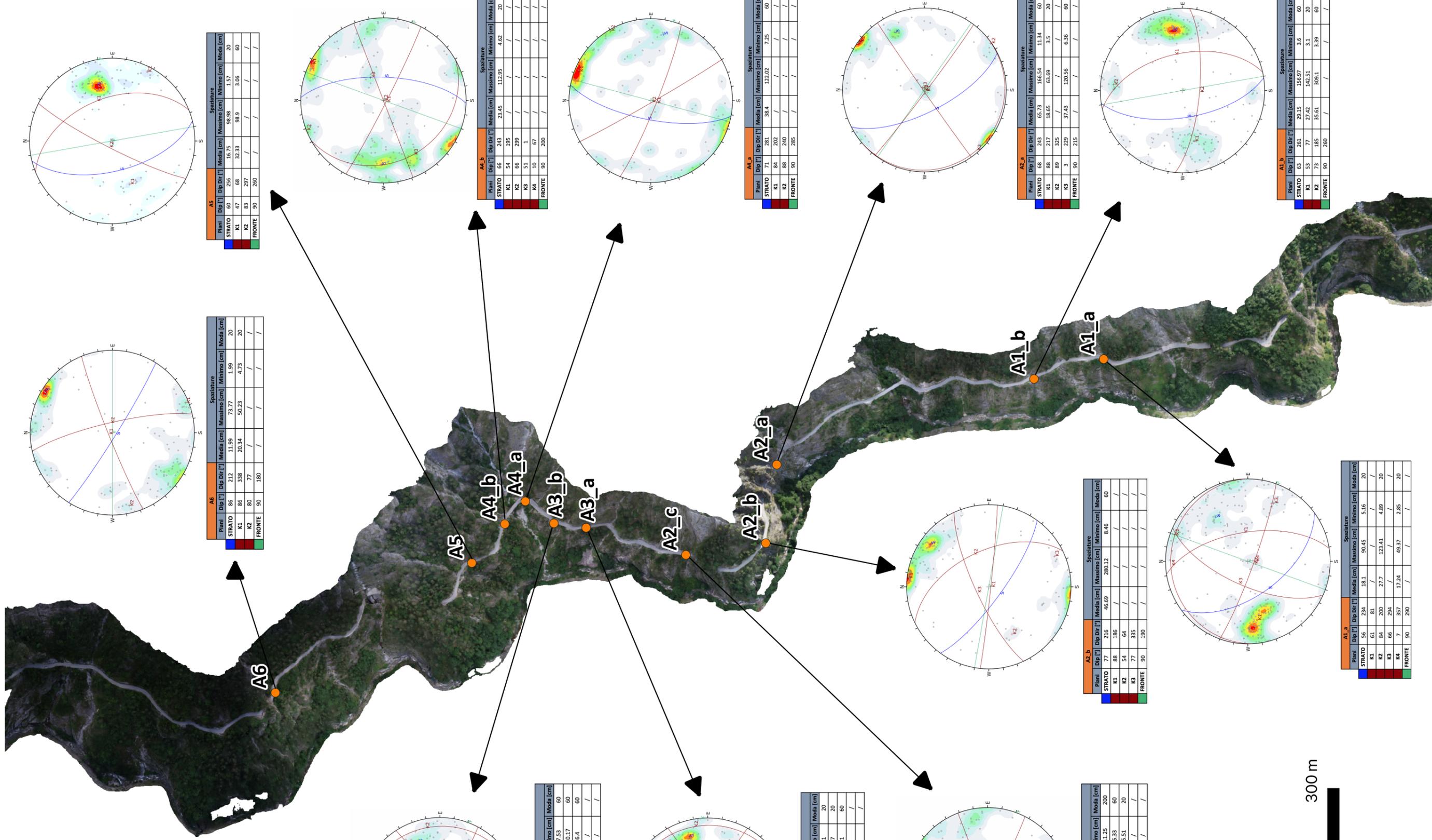
Nella parte bassa della strada il piano di strato risulta essere prevalentemente pseudo orizzontale. Infatti, tranne che per il primo tratto di strada, in cui il piano è inclinato di 70°, questo piano ha un angolo di inclinazione che varia tra i 19° e 35°.

Man mano che si percorre il vallone verso nord il piano inizia a verticalizzarsi. Questo è ben visibile nel tratto che va dal settore B8 alla Frana, in cui il piano di strato assume un'inclinazione tra i 45° e 50°.

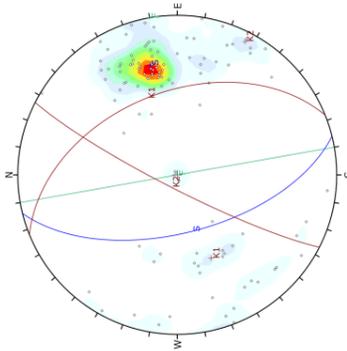
Proseguendo verso nord, questa verticalizzazione si riscontra anche nei primi tratti della parte di strada alta. Infatti, si parte con un'inclinazione di 56° e si arriva ad una di 86°.

Analizzando i dati di spaziatura si può notare che: nella parte bassa della strada, almeno per il primo tratto, la spaziatura media del piano di strato è compresa tra gli 80 e i 115 cm, formando banchi di roccia di spessore abbastanza consistente. Questo spessore diminuisce nella parte più a nord della strada bassa, raggiungendo una spaziatura media compresa tra i 20 e 50 cm. Così come è ben visibile nel settore della frana, in questa zona si formano lastre di dimensioni e forma variabili.

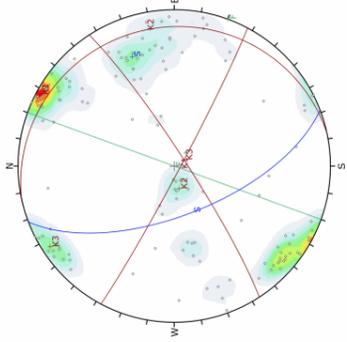
Per chiarezza si riportano qui di seguito in A3, gli ortofoto con indicazione degli stereogrammi e delle misure trovate in ciascun punto, sia per la parte bassa che per la parte alta della strada.



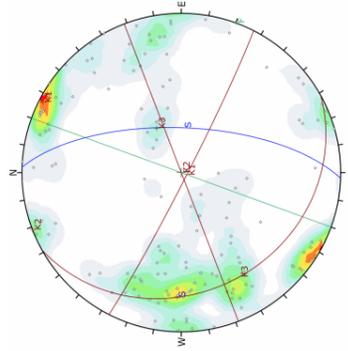
A6		Spaziature				
Piani	Dip [°]	Dip Dir [°]	Media [cm]	Massimo [cm]	Minimo [cm]	Moda [cm]
STRATO	86	212	11.99	73.77	1.99	20
K1	86	338	20.34	50.23	4.73	20
K2	80	77	/	/	/	/
FRONTE	90	180	/	/	/	/



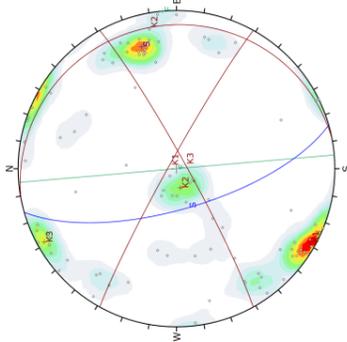
A5		Spaziature				
Piani	Dip [°]	Dip Dir [°]	Media [cm]	Massimo [cm]	Minimo [cm]	Moda [cm]
STRATO	60	256	16.75	98.98	1.57	20
K1	47	68	32.33	98.9	3.06	60
K2	83	297	/	/	/	/
FRONTE	90	260	/	/	/	/



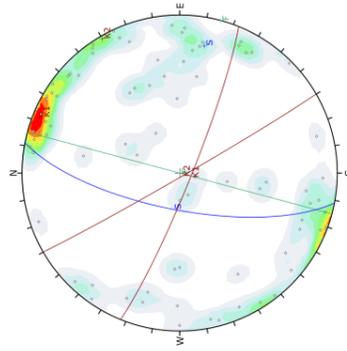
A3_b		Spaziature				
Piani	Dip [°]	Dip Dir [°]	Media [cm]	Massimo [cm]	Minimo [cm]	Moda [cm]
STRATO	64	249	38.27	132.13	7.53	60
K1	87	208	46.49	169.08	10.17	60
K2	12	78	41.11	132.35	6.4	60
K3	84	147	/	/	/	/
FRONTE	90	290	/	/	/	/



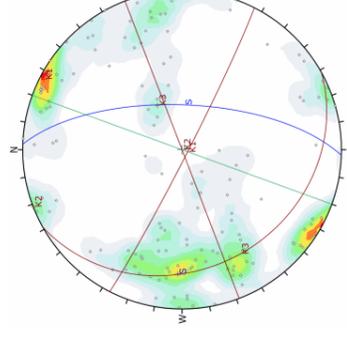
A4_b		Spaziature				
Piani	Dip [°]	Dip Dir [°]	Media [cm]	Massimo [cm]	Minimo [cm]	Moda [cm]
STRATO	66	243	23.45	112.95	4.62	20
K1	54	105	/	/	/	/
K2	66	299	/	/	/	/
K3	51	1	/	/	/	/
K4	10	67	/	/	/	/
FRONTE	90	200	/	/	/	/



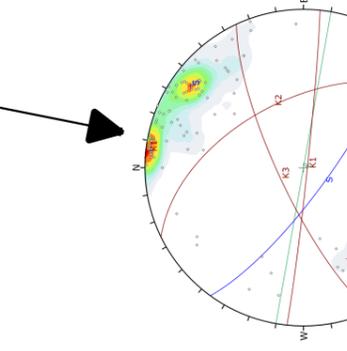
A3_a		Spaziature				
Piani	Dip [°]	Dip Dir [°]	Media [cm]	Massimo [cm]	Minimo [cm]	Moda [cm]
STRATO	69	254	23.01	179.44	3.41	20
K1	86	29	23.8	143.72	3.27	20
K2	10	79	39.61	178.12	4.81	60
K3	85	151	/	/	/	/
FRONTE	90	265	/	/	/	/



A2_b		Spaziature				
Piani	Dip [°]	Dip Dir [°]	Media [cm]	Massimo [cm]	Minimo [cm]	Moda [cm]
STRATO	71	281	38.4	122.02	7.25	60
K1	84	202	/	/	/	/
K2	88	240	/	/	/	/
FRONTE	90	285	/	/	/	/



A2_c		Spaziature				
Piani	Dip [°]	Dip Dir [°]	Media [cm]	Massimo [cm]	Minimo [cm]	Moda [cm]
STRATO	67	92	61.58	144.27	11.25	200
K1	87	207	53.47	259.56	6.33	60
K2	90	159	68.13	505.23	5.51	20
K3	26	241	/	/	/	/
FRONTE	90	290	/	/	/	/



A2_a		Spaziature				
Piani	Dip [°]	Dip Dir [°]	Media [cm]	Massimo [cm]	Minimo [cm]	Moda [cm]
STRATO	77	216	46.69	280.12	8.46	60
K1	88	186	/	/	/	/
K2	54	64	/	/	/	/
K3	77	335	/	/	/	/
FRONTE	90	190	/	/	/	/

A2\_a

A2\_b

A2\_c

A3\_a

A3\_b

A4\_a

A4\_b

A5

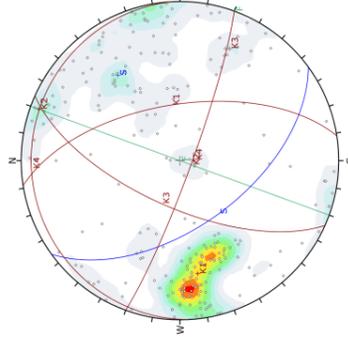
A6

A1_b		Spaziature				
Piani	Dip [°]	Dip Dir [°]	Media [cm]	Massimo [cm]	Minimo [cm]	Moda [cm]
STRATO	68	243	65.73	166.54	11.34	60
K1	88	217	18.65	63.69	3.5	20
K2	89	325	/	/	/	/
K3	3	229	37.43	120.56	6.36	60
FRONTE	90	215	/	/	/	/

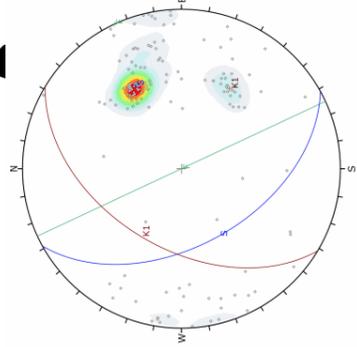
A1\_b

A1_a		Spaziature				
Piani	Dip [°]	Dip Dir [°]	Media [cm]	Massimo [cm]	Minimo [cm]	Moda [cm]
STRATO	63	261	29.15	156.97	3.6	60
K1	53	77	27.42	142.51	3.1	20
K2	73	185	35.61	309.1	3.39	60
FRONTE	90	260	/	/	/	/

A1\_a

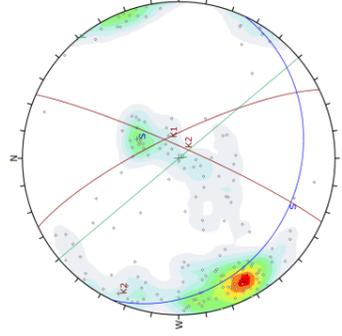


A1_a		Spaziature				
Piani	Dip [°]	Dip Dir [°]	Media [cm]	Massimo [cm]	Minimo [cm]	Moda [cm]
STRATO	56	234	18.1	90.45	5.16	20
K1	61	81	/	/	/	/
K2	84	200	27.7	123.41	4.89	20
K3	66	294	/	/	/	/
K4	7	357	17.24	49.37	2.85	20
FRONTE	90	290	/	/	/	/

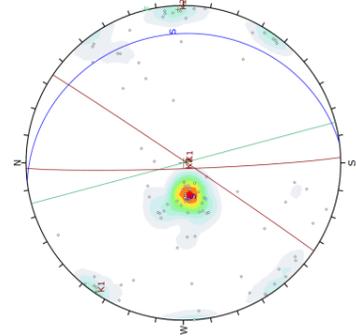


FRANA						
Piani	Dip [°]	Dip Dir [°]	Media [cm]	Massimo [cm]	Minimo [cm]	Moda [cm]
STRATO	50	241	50.57	258.96	2.51	60
K1	49	301	/	/	/	/
FRONTE	90	245	/	/	/	/

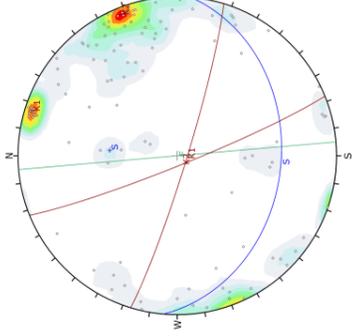
B8						
Piani	Dip [°]	Dip Dir [°]	Media [cm]	Massimo [cm]	Minimo [cm]	Moda [cm]
STRATO	43	212	22.36	64.95	6.07	20
K1	54	330	/	/	/	/
K2	68	82	/	/	/	/
FRONTE	90	230	/	/	/	/



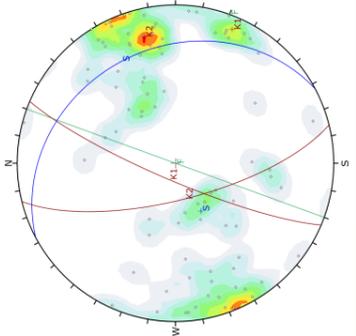
B7						
Piani	Dip [°]	Dip Dir [°]	Media [cm]	Massimo [cm]	Minimo [cm]	Moda [cm]
STRATO	24	205	50.56	269.18	7.35	60
K1	78	64	/	/	/	/
K2	84	114	/	/	/	/
FRONTE	90	230	/	/	/	/



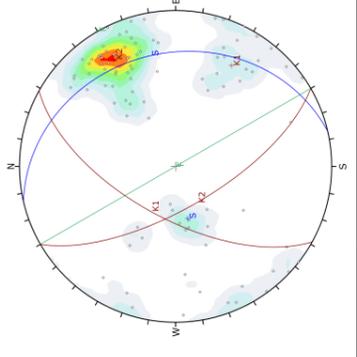
B5						
Piani	Dip [°]	Dip Dir [°]	Media [cm]	Massimo [cm]	Minimo [cm]	Moda [cm]
STRATO	19	83	108.41	315.43	23.05	200
K1	89	124	77	371.35	8.56	60
K2	87	268	/	/	/	/
FRONTE	90	255	/	/	/	/



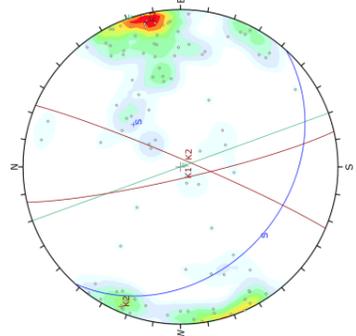
B6						
Piani	Dip [°]	Dip Dir [°]	Media [cm]	Massimo [cm]	Minimo [cm]	Moda [cm]
STRATO	35	185	115.15	278.03	14.96	200
K1	85	197	/	/	/	/
K2	85	248	/	/	/	/
FRONTE	90	265	/	/	/	/



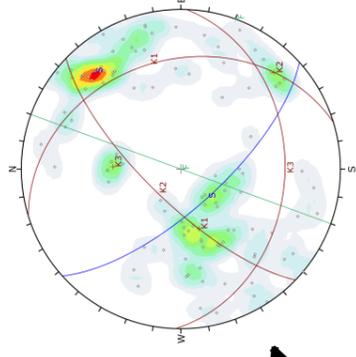
B3						
Piani	Dip [°]	Dip Dir [°]	Media [cm]	Massimo [cm]	Minimo [cm]	Moda [cm]
STRATO	28	62	78.89	225.9	7.32	200
K1	81	293	/	/	/	/
K2	71	256	/	/	/	/
FRONTE	90	290	/	/	/	/



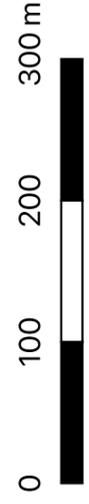
B4						
Piani	Dip [°]	Dip Dir [°]	Media [cm]	Massimo [cm]	Minimo [cm]	Moda [cm]
STRATO	28	77	105.25	160.13	26.06	200
K1	63	299	33.62	117.07	8.2	20
K2	68	240	/	/	/	/
FRONTE	90	240	/	/	/	/



B2						
Piani	Dip [°]	Dip Dir [°]	Media [cm]	Massimo [cm]	Minimo [cm]	Moda [cm]
STRATO	33	222	71.47	301.84	14.06	200
K1	84	257	/	/	/	/
K2	86	113	/	/	/	/
FRONTE	90	250	/	/	/	/



B1						
Piani	Dip [°]	Dip Dir [°]	Media [cm]	Massimo [cm]	Minimo [cm]	Moda [cm]
STRATO	70	228	137.9	110.27	2.74	20
K1	32	73	/	/	/	/
K2	73	314	/	/	/	/
K3	35	182	/	/	/	/
FRONTE	90	290	/	/	/	/



## ***6. ANALISI DEI CINEMATISMI***

---

In questo capitolo vengono analizzati i cinematismi potenzialmente attivabili nei settori, individuati negli ortofoto in Figura 4.7 e Figura 4.8, di cui è stato eseguito precedentemente il rilievo geomeccanico, i cui risultati sono riportati in Allegato 1. Lo studio è stato condotto al fine di poter indentificare i possibili cinematismi che possono innescarsi nel versante a causa della presenza e dell'interazione dei sistemi discontinuità.

L'analisi è stata eseguita attraverso l'utilizzo del software "*Dips7.0, RocScience Inc.*", considerando quindi la stabilità dei vari settori solo rispetto alle condizioni geometriche, escludendo quelli che possono essere i parametri di resistenza delle discontinuità o le forze esterne agenti, come per esempio la spinta idrostatica, l'azione pseudo-statica di un sisma, o eventuali sistemi di rinforzo e/o stabilizzazione.

L'individuazione dei cinematismi che si possono verificare, partendo dai dati di giacitura dei sistemi di discontinuità, è possibile grazie all'applicazione del test di Markland (*Markland, 1972*). Questo permette di identificare il tipo, o i tipi, di instabilità esaminando contemporaneamente sia la giacitura dei sistemi di discontinuità presenti nell'ammasso che l'orientazione del versante. Questa analisi viene eseguita considerando quelle che sono le condizioni strutturali, per i diversi meccanismi di instabilità, individuate nel paragrafo 2.4.

In generale, per il caso in esame, il cinematismo prevalente è quello di scivolamento planare, ma, come si vedrà nei paragrafi successivi, in alcuni casi i sistemi di discontinuità possono formare dei blocchi che possono instabilizzarsi per crollo o ribaltamento. In questi casi, e dove è stato possibile secondo le misure di spaziatura, è stata definita una distribuzione del volume dei blocchi.

Un altro aspetto interessante, che però non riguarderà lo studio del presente lavoro di tesi, è quello dell'identificazione di blocchi critici che, in mancanza di un adeguato contrasto, liberano altri blocchi ed innescano il collasso della struttura rocciosa. Questo è il concetto che sta alla base della "*Key- Block theory*" o "*Teoria del Blocco Chiave*" (*Goodman & Shi, 1985*) che trova applicazione nell'analisi preventiva della stabilità di pareti rocciose. In particolare, questo tipo di approccio risulterebbe utile proprio in alcuni dei settori individuati, dove, a causa dello scalzamento al piede della parete, si sono formati delle

porzioni di ammasso aggettanti e delle nicchie instabili, causando così il crollo progressivo di porzioni di roccia.

## 6.1. SCIVOLAMENTO PLANARE

Il punto di partenza dell'analisi sono le proiezioni stereografiche dei piani di discontinuità, ottenute con il software *Dips7.0*. Queste si riferiscono alle misure dei piani ottenute dal rilievo geomeccanico da non contatto, riportate in Allegato 1.

Il medesimo programma permette di valutare che tipo di scivolamento possa innescarsi in relazione ai piani individuati. L'analisi cinematica viene effettuata selezionando il comando "Analysis - Kinematic Analysis".

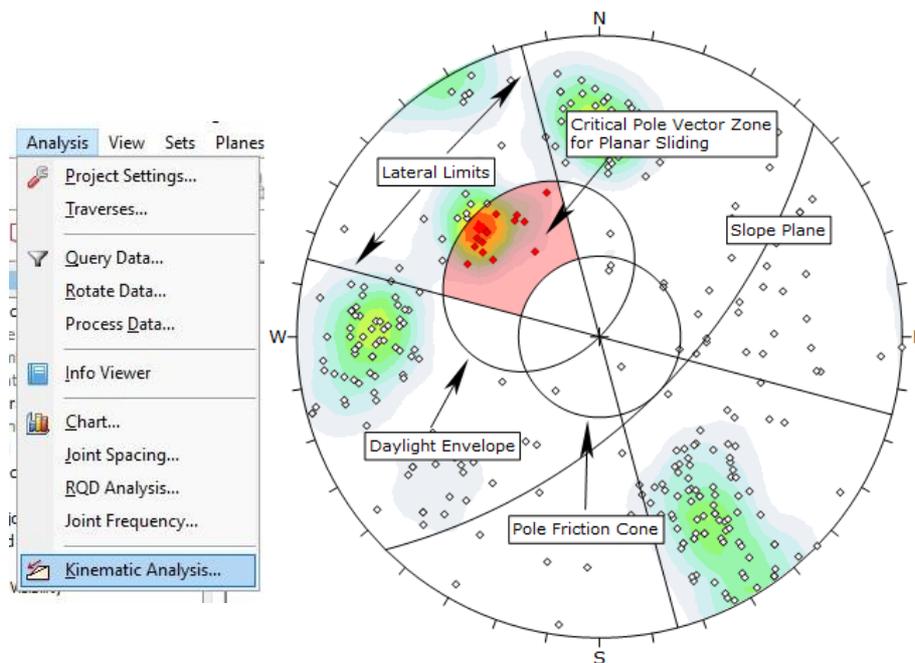


Figura 6.1: (a sinistra) Comando per l'analisi cinematica in Dips; (a destra) indicazione sullo Stereonet dei parametri del piano di scivolamento.

A questo punto si aprirà una schermata in cui è possibile scegliere il tipo di cinematisimo che si vuole analizzare e inserire i valori caratteristici del piano di scivolamento:

- *Slope Dip e Dip Direction*: l'orientazione e del piano di scivolamento, pari a quelle del fronte di riferimento in ciascun caso;

- *Friction angle*: l'angolo d'attrito che definisce il cono d'attrito: i piani con un angolo d'inclinazione inferiore a tale valore non possono instabilizzarsi. In questo caso è stato posto cautelativamente sempre pari a 30° poiché non si possiedono misure di tale parametro;
- *Limite laterale per lo scivolamento*: definisce un limite laterale per la direzione di immersione dei piani di scivolamento rispetto a quella del fronte, in tutti i casi è stato posto un limite di 20°.

Tutti gli stereogrammi dei vari settori saranno riportati in Allegato 2, ma qui di seguito si commenteranno alcuni risultati ottenuti.

Si prenda come esempio il settore "A1\_b" di cui si riporta di seguito lo Steronet dopo aver inserito l'analisi cinematica.

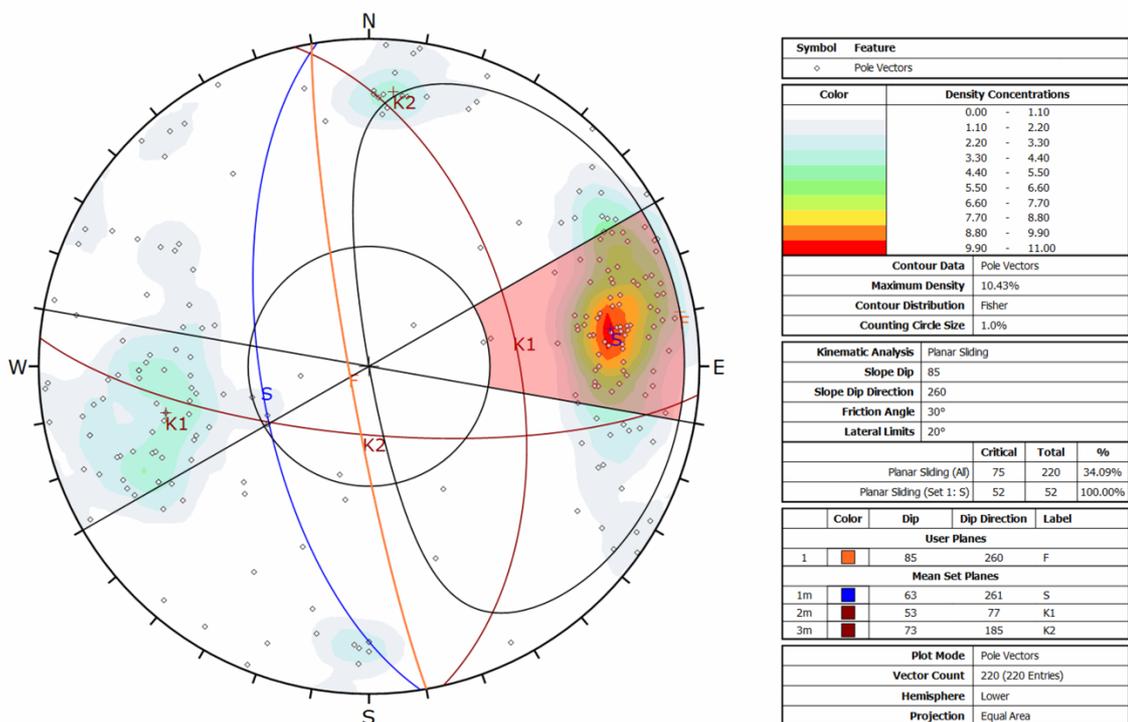


Figura 6.2: Analisi cinematica software Dips, esempio del settore A1\_b.

Si può notare che il software individua il numero e la percentuale dei piani che sono a rischio di scivolamento planare. In questo caso, i poli corrispondenti ai piani critici per il piano di strato sono 52 su un totale di 52, quindi il 100% dei piani può essere soggetto a

uno scivolamento planare. Rispetto al totale di 220 poli presenti sullo Stereonet sono 75 quelli instabili, per un valore percentuale del 34.09%.

In questo caso quindi la famiglia di discontinuità interessata dallo scivolamento planare è quella del piano di strato. Essa infatti ha una direzione di immersione praticamente uguale a quella del fronte e dip pari a  $63^\circ$ . I piani della famiglia K1 possono svincolare blocchi dalla parte retrostante, mentre la famiglia K2 li può liberare lateralmente. Infatti, questo rappresenta uno dei casi in cui si possono formare blocchi che possono subire uno scivolamento. Nel paragrafo 6.2 è riportata un'analisi statistica dei volumi dei blocchi effettuata sulla base delle misure di spaziatura.



*Figura 6.3: Foto del settore A1\_b con indicazione dei piani che possono andare svincolare blocchi.*

Prevalentemente nella parte della strada definita come “Strada Bassa” si riscontrano cinematismi di tipo tridimensionale nei quali, a causa dello scalzamento al piede della parete, si sono formati aggetti e portali, causando così il crollo progressivo di porzioni di roccia. Attraverso la “Key- Block theory” è possibile andare ad individuare blocchi critici che, in mancanza di un adeguato contrasto, liberano altri blocchi ed innescano il collasso della struttura rocciosa.

Come esempio si prende in considerazione il settore “B2”, posto nella parte bassa della strada, nel quale si è verificato l'ultimo evento il 2 giugno 2018. Si riporta di seguito lo Steronet con l'analisi cinematica.

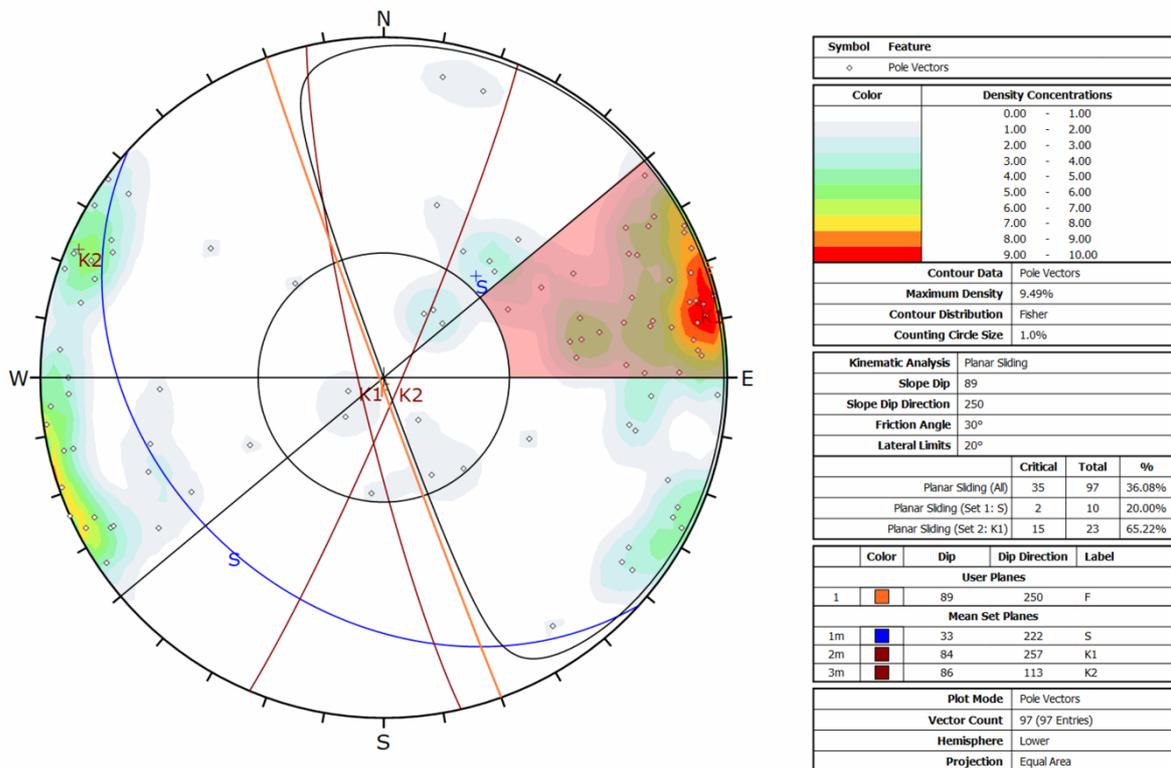


Figura 6.4: Analisi cinematica software Dips, esempio del settore B2.

I poli corrispondenti ai piani critici per il set K1 sono 15 su un totale di 23 con una percentuale di 65.22% di piani che possono subire uno scivolamento planare.

Analizzando la struttura si nota come il piano di strato formi con il set di discontinuità K1 dei blocchi lastriformi, simili a travi, ove è possibile ipotizzare un crollo dovuto proprio a una rottura flessionale. Il superamento della resistenza a trazione lungo il piano di strato fa sì che si possa avere un crollo di roccia dall'alto. Inoltre, i blocchi sono svicolati lateralmente dal set di discontinuità K2. Di seguito in Figura 6.5 si riporta un'immagine e lo schema del possibile cinematismo ipotizzato.

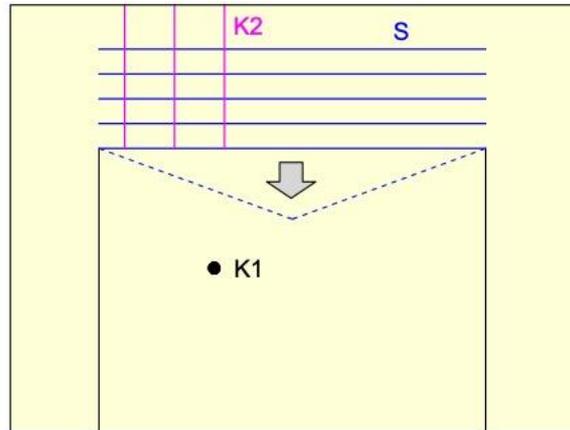
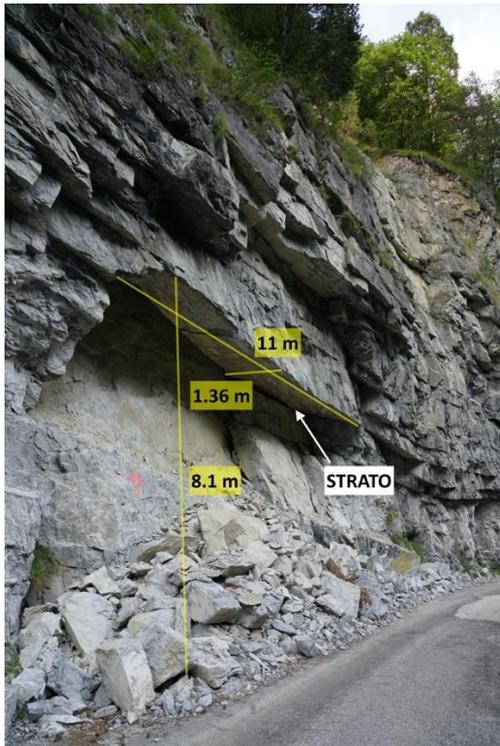


Figura 6.5: Cinematismo tridimensionale ipotizzato nel settore B2.

In Allegato 2, sono riportate le schede per l'analisi di stabilità, nei confronti del cinematismo di scivolamento planare, per tutti i settori considerati. Inoltre, sono stati inseriti alcuni commenti su quelli che possono essere i possibili cinematismi e le successive analisi.

## 6.2. VOLUME DEI BLOCCHI

---

Come si è visto in alcuni casi i sistemi di discontinuità individuano blocchi di volume variabile che possono andare a mobilitarsi lungo il fronte. La determinazione del volume dei blocchi risulta essere uno dei più importanti parametri necessari per la costruzione di molti di indici per la classificazione dell'ammasso.

La reale geometria del versante è riproducibile utilizzando le tecniche tradizionali di rilievo geomeccanico in campo, come quelle proposte dall'ISRM (International Society for Rock Mechanics) nel 1978. Lavorando con metodi discreti è possibile valutare la dimensione ed il volume dei singoli blocchi.

Nel presente lavoro di tesi, per un'analisi più speditiva, si è pensato di fornire una stima indicativa del volume dei blocchi coinvolti in ciascun cinematismo, andando a valutare la frequenza dei volumi sulla base delle misure di spaziatura dei sistemi di discontinuità presenti. Infatti, non è stata eseguita una vera e propria analisi statistica ma è stata considerata la variabilità dei dati di spaziatura al fine di determinare quella dei volumi.

In particolare, in questo caso sulla base dei valori di massimo, minimo, media e moda di spaziatura, ottenuti nei vari settori, come indicato nel paragrafo 5.4, è stato possibile ottenere combinazioni di tali valori, in modo da stimare i volumi dei blocchi.

Non in tutti i settori è stato possibile ottenere un adeguato numero di misure di spaziatura da poter ricavare di conseguenza il volume dei blocchi. Infatti, non sempre le dimensioni della finestra di rilievo permettono di ricavare tutte le spaziature di un sistema di discontinuità: misure di spaziatura fitte sono più facilmente individuabili rispetto a spaziature larghe.

Per la determinazione dei volumi si fa riferimento alla formulazione proposta da *Palmstrom* (1995). In presenza di tre famiglie di discontinuità il volume è determinato dallo schema delle discontinuità e dalla spaziatura di ogni famiglia e nello specifico uguale a:

$$V_b = \frac{S_1 \cdot S_2 \cdot S_3}{sen\gamma_1 \cdot sen\gamma_2 \cdot sen\gamma_3}$$

dove, come rappresentato in Figura 6.6,  $S_1, S_2, S_3$  rappresentano le spaziatore dei relativi sistemi di discontinuità e  $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$  gli angoli tra compresi tra i sistemi.

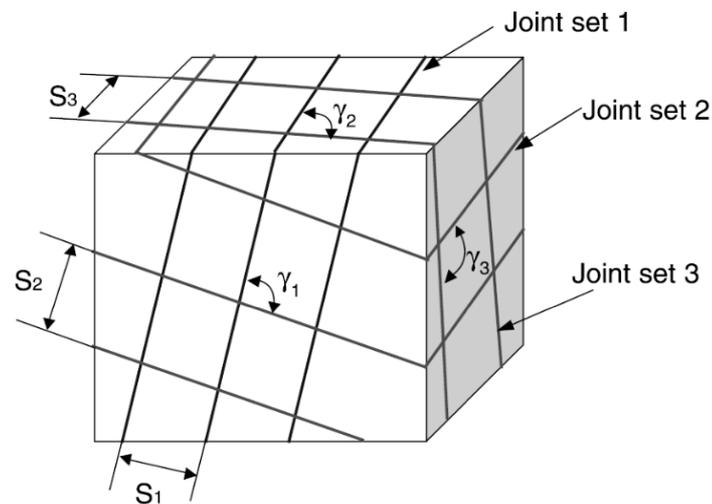


Figura 6.6: Rappresentazione dei parametri di spaziatura e di angolo tra le discontinuità (Kim et al., 2006).

I valori di  $V_b$  ottenuti possono essere classificati come suggerito da Palmstrom, 1996 e riportato in Tabella 6.1.

Tabella 6.1: Classi di volumi e corrispondenti valori (Palmstrom, 2005).

Classi di volume	Valore di $V_b$
Very small	10 – 200 cm <sup>3</sup>
Small	0.2 – 10 dm <sup>3</sup>
Moderate	10 – 200 dm <sup>3</sup>
Large	0.2 – 10 m <sup>3</sup>
Very large	≥ 10 m <sup>3</sup>

Si considera l'esempio del settore "A1\_b". Si sono andati a combinare i valori di massimo, minimo, media e moda di spaziatura del piano di strato, del set K1 e del set K2 riportati nella Tabella 6.2 nella pagina seguente.

Tabella 6.2: Valori di minimo, massimo, media e moda per le spazature del settore A1\_b.

	STRATO	K1	K2
Media [cm]	29.15	27.42	35.61
Massimo [cm]	156.97	142.51	309.10
Minimo [cm]	3.60	3.10	3.39
Moda [cm]	60	20	60

Combinando tutti i valori considerati ed applicando la formula sopra riportata sono stati ottenuti 60 valori di volume. Successivamente è stata eseguita l'analisi di frequenza e valutata la frequenza relativa.

Nella Figura 6.7 successiva, si riporta la distribuzione ottenuta con indicazione dei valori minimi, medi e massimi e il valore modale (Tabella 6.3).

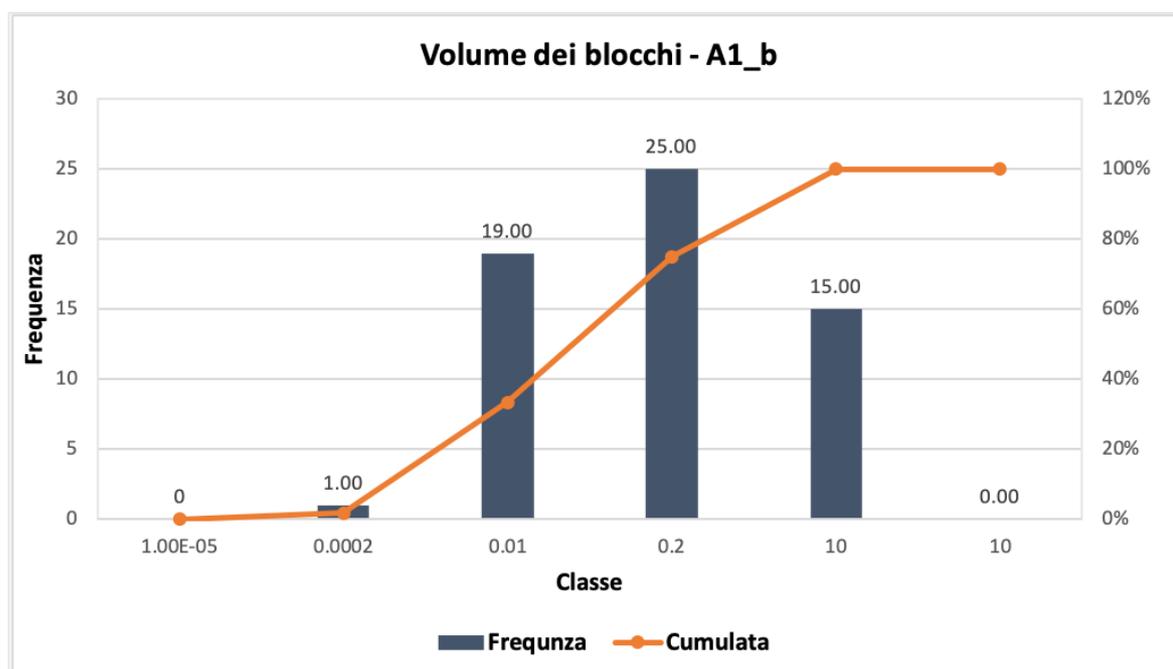


Figura 6.7: Analisi di frequenza per la valutazione del volume dei blocchi, esempio del settore A1\_b.

Tabella 6.3: Valori di minimo, massimo, media e moda per il volume dei blocchi nel settore A1\_b.

<b>Media [m<sup>3</sup>]</b>	0.374837
<b>Massimo [m<sup>3</sup>]</b>	8.184316
<b>Minimo [m<sup>3</sup>]</b>	0.000045
<b>Moda [m<sup>3</sup>]</b>	0.2

La stima del volume dei blocchi è stata effettuata allo stesso modo anche per i settori A1\_a, A2\_a, A2\_c, A3\_a e A3\_b e i risultati ottenuti sono riportati in Allegato 2.

### 6.3. CONCLUSIONI SULL'ANALISI

---

In generale l'ammasso roccioso risulta soggetto prevalentemente al cinematismo di scivolamento planare.

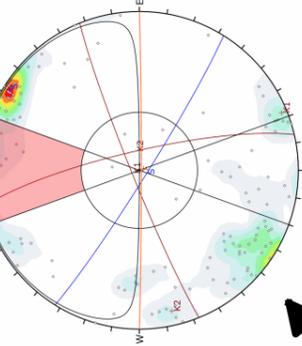
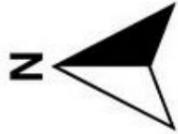
Nella parte bassa della strada il piano di strato è pseudo orizzontale per cui non si riscontra questo cinematismo. In questa zona si riscontra la presenza di due set coniugati pseudo verticali che formano con il piano di strato lastre orizzontali. Queste lastre possono subire una rottura per flessione con crollo di blocchi dall'alto, e questo è ben evidente nell'esempio del settore B2 descritto precedentemente (Figura 6.5).

In questa parte di strada lo scalzamento al piede dell'ammasso può produrre crolli di blocchi dall'alto, la cui mobilitazione è attribuibile a una rottura per taglio dei giunti, causata da carichi eccessivi, o addirittura all'interno della matrice rocciosa. In alcuni tratti infatti, sono ben visibili blocchi instabili che possono mobilitarsi per aumento del carico sulla parete, per agenti atmosferici o azioni antropiche.

Man mano che si percorre il vallone verso nord il piano di strato inizia a verticalizzarsi. Questo fa sì che in alcuni settori, come nel settore B8 o in quello della Frana, in cui il piano di strato assume un'inclinazione tra i 45° e 50°, possa innescarsi un cinematismo di scivolamento planare lungo questo piano. Inoltre, la presenza di altri sistemi di discontinuità fa sì che porzioni di roccia di forma e dimensione variabile (da piccoli blocchi a lastre di grande estensione), possano scivolare lungo il piano di strato.

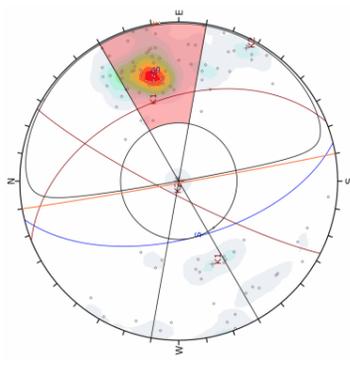
Anche nella parte della strada il cinematismo di scivolamento planare può innescarsi lungo il piano di strato. In questa zona l'ammasso risulta più basso rispetto a quello nella parte bassa, ma anche qui in molti settori, i sistemi di discontinuità formano blocchi di piccole e grandi dimensioni che possono scivolare lungo il piano di stratificazione.

Per chiarezza si riportano qui di seguito in A3, gli ortofoto con indicazione degli stereogrammi dei cinematismi trovati in ciascun punto, sia per la parte bassa che per la parte alta della strada.



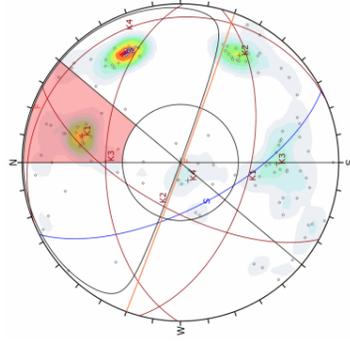
Scivolamento planare		
Piani	Dip [°]	Dip Dir [°]
STRATO	86	212
K1	86	338
K2	80	77
FRONTE	89	180

F (180,89): PRESENZA di scivolamento planare, piano di strato.  
 Altri cinematici: presenza di una faglia.  
 Analisi successive: galleria, (Key-Block theory).



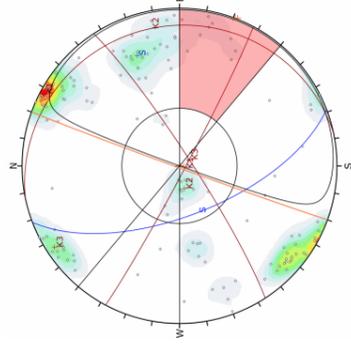
Scivolamento planare		
Piani	Dip [°]	Dip Dir [°]
STRATO	60	256
K1	47	68
K2	83	297
FRONTE	89	260

F (260,89): PRESENZA di scivolamento planare, piano di strato.  
 Altri cinematici: crollo di blocchi, K1 e K2.



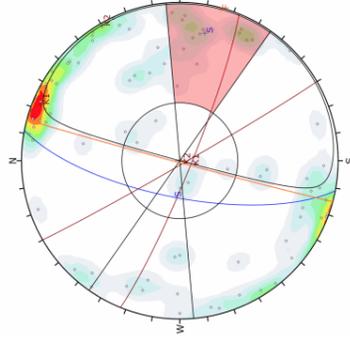
Scivolamento planare		
Piani	Dip [°]	Dip Dir [°]
STRATO	66	243
K1	54	195
K2	66	299
K3	51	1
K4	10	67
FRONTE	89	200

F (200,89): PRESENZA di scivolamento planare, piano K1.  
 Altri cinematici: crollo di blocchi, K1 e K2.



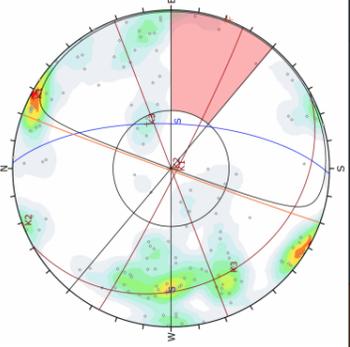
Scivolamento planare		
Piani	Dip [°]	Dip Dir [°]
STRATO	64	249
K1	87	208
K2	12	78
K3	84	147
FRONTE	89	290

F (290,89): PRESENZA di scivolamento planare, piano di strato.  
 Altri cinematici: crollo di blocchi, K1 e K2.



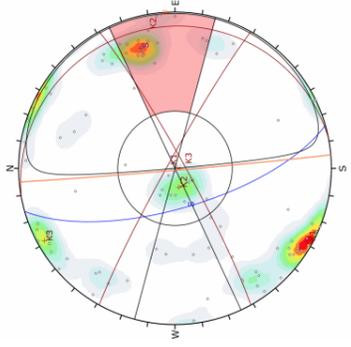
Scivolamento planare		
Piani	Dip [°]	Dip Dir [°]
STRATO	71	281
K1	84	202
K2	88	240
FRONTE	89	285

F (190,89): PRESENZA di scivolamento planare, piano di strato.  
 Altri cinematici: crollo di blocchi, K1 e K2.



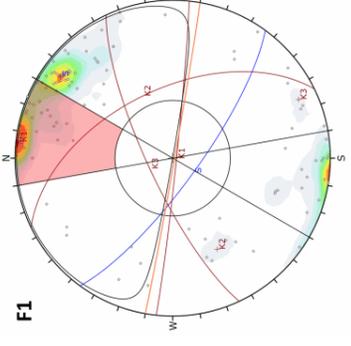
Scivolamento planare		
Piani	Dip [°]	Dip Dir [°]
STRATO	67	92
K1	87	207
K2	90	159
K3	26	241
FRONTE	89	290

F (290,89)/ASSENZA di scivolamento planare.  
 Altri cinematici: crollo di blocchi, K1 e K2.



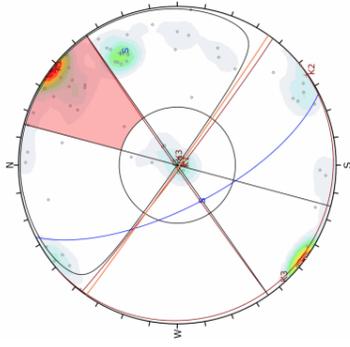
Scivolamento planare		
Piani	Dip [°]	Dip Dir [°]
STRATO	69	254
K1	86	29
K2	10	79
K3	85	151
FRONTE	89	265

F (265,89): PRESENZA di scivolamento planare, piano di strato.  
 Altri cinematici: crollo di blocchi, K1 e K2.



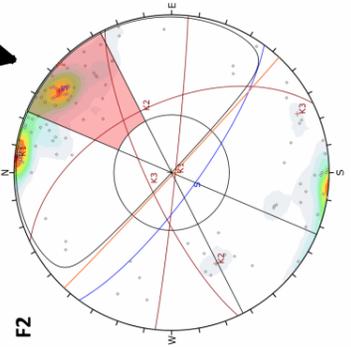
Scivolamento planare		
Piani	Dip [°]	Dip Dir [°]
STRATO	77	216
K1	88	186
K2	54	64
K3	77	335
FRONTE	89	190/223

F1 (190,89): ASSENZA di scivolamento planare.  
 F2 (223,89): PRESENZA di scivolamento planare, piano di strato.  
 Altri cinematici: scalfamento al piede, crollo o ribaltamento di blocchi.



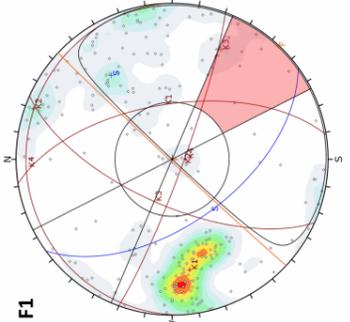
Scivolamento planare		
Piani	Dip [°]	Dip Dir [°]
STRATO	68	243
K1	88	217
K2	89	325
K3	3	229
FRONTE	89	215

F (215,89): PRESENZA di scivolamento planare, piano di strato.  
 Altri cinematici: crollo di blocchi, K1 e K2.  
 Analisi successive: galleria, (Key-Block theory).



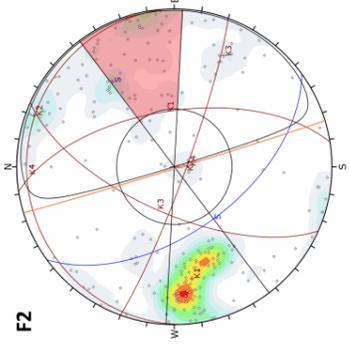
Scivolamento planare		
Piani	Dip [°]	Dip Dir [°]
STRATO	56	234
K1	61	81
K2	84	200
K3	66	294
K4	7	357
FRONTE	89	313/253

F1 (313,89): ASSENZA di scivolamento planare.  
 F2 (253,89): Altri cinematici: crollo di blocchi, K1 e K2. Presenza di due FAGLIE.  
 Altri cinematici: crollo di blocchi, K1 e K2.



Scivolamento planare		
Piani	Dip [°]	Dip Dir [°]
STRATO	63	261
K1	53	77
K2	73	185
FRONTE	85	260

F (260,89): PRESENZA di scivolamento planare, piano di strato.  
 Altri cinematici: crollo di blocchi, K1 e K2.



Scivolamento planare		
Piani	Dip [°]	Dip Dir [°]
STRATO	63	261
K1	53	77
K2	73	185
FRONTE	85	260

F (260,89): PRESENZA di scivolamento planare, piano di strato.  
 Altri cinematici: crollo di blocchi, K1 e K2.

Scivolamento planare		
Piani	Dip [°]	Dip Dir [°]
STRATO	63	261
K1	53	77
K2	73	185
FRONTE	85	260

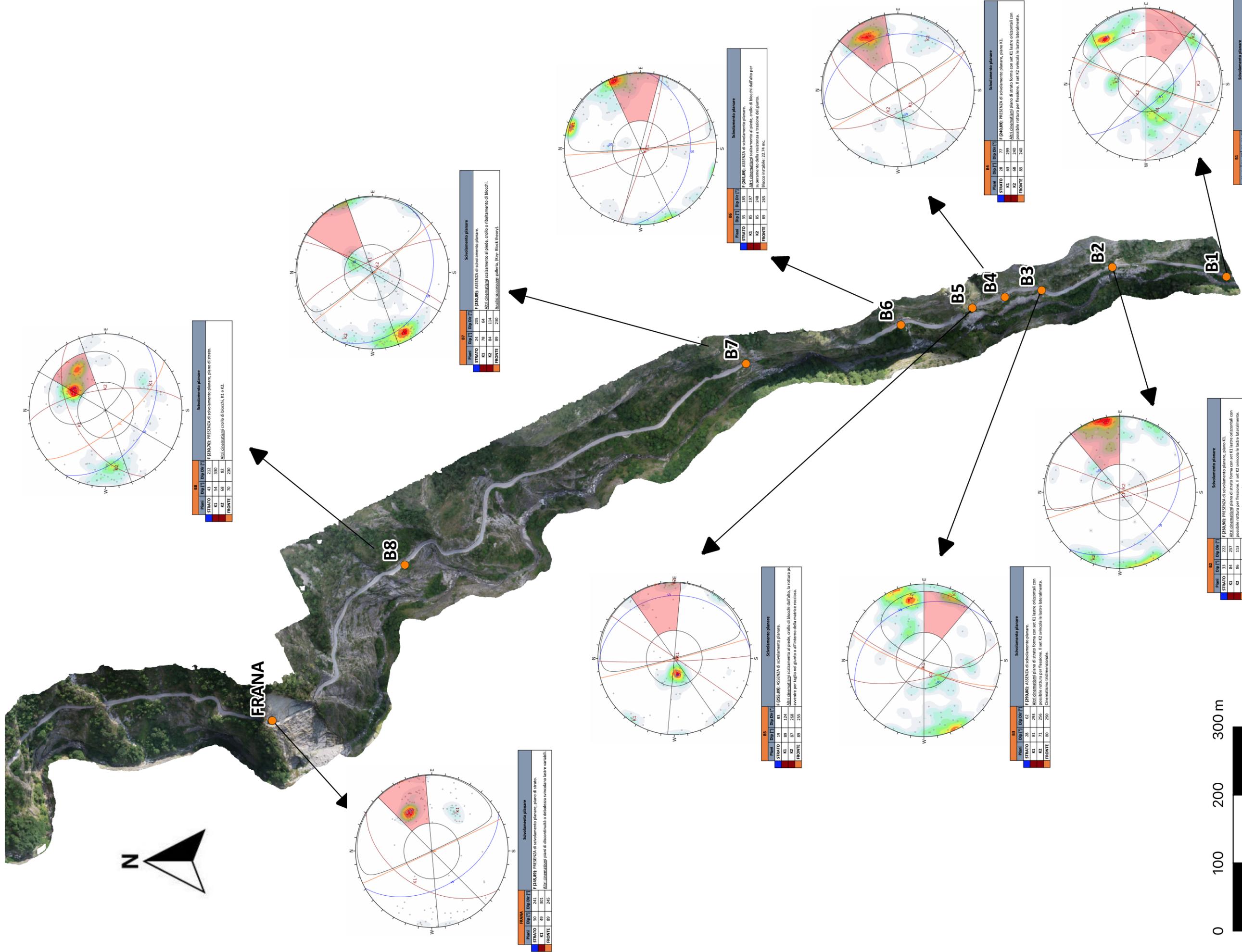
F (260,89): PRESENZA di scivolamento planare, piano di strato.  
 Altri cinematici: crollo di blocchi, K1 e K2.

Volume dei blocchi		
Media [m³]	Massimo [m³]	Minimo [m³]
0.240679	2.653802	0.000045
0.374837	8.184316	0.000045
0.2	0.2	0.2

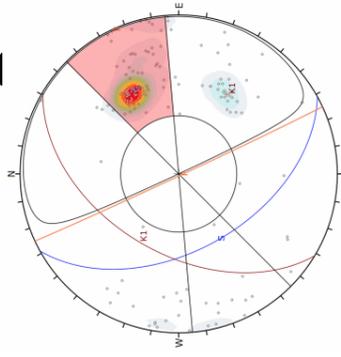
Volume dei blocchi		
Media [m³]	Massimo [m³]	Minimo [m³]
0.059012	0.949277	0.000124
0.059012	0.949277	0.000124
0.2	0.2	0.2

Volume dei blocchi		
Media [m³]	Massimo [m³]	Minimo [m³]
0.374837	8.184316	0.000045
0.374837	8.184316	0.000045
0.2	0.2	0.2





**FRANA**

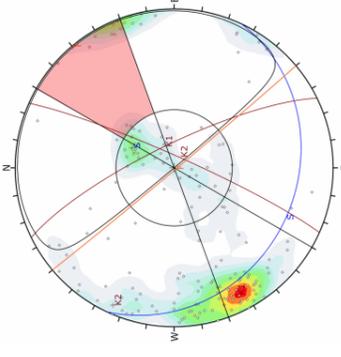


FRANA			
Piani	Dip [°]	Dip Dir [°]	F
STRATO	50	201	F (246.89)
K1	89	301	
K2	89	205	
FRONTE	89	205	

Svolgimento planare  
 F (246.89) PRESENZA di sovrapposizione planare, piano di strato.  
 - All'orientamento scivolamento al piede, crollo di blocchi laterali variabili.  
 - Inverre per taglio nel giunto o all'interno della matrice rocciosa.

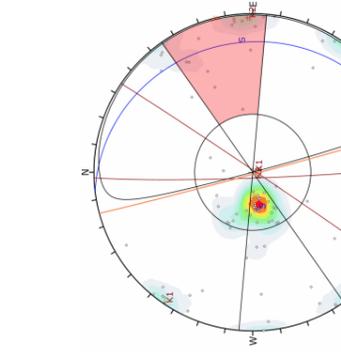
B1			
Piani	Dip [°]	Dip Dir [°]	F
STRATO	43	212	F (240.20)
K1	54	330	
K2	68	82	
FRONTE	70	230	

Svolgimento planare  
 F (240.20) PRESENZA di sovrapposizione planare, piano di strato.  
 - All'orientamento scivolamento al piede, crollo o ribaltamento di blocchi.  
 - All'orientamento scivolamento al piede, crollo o ribaltamento di blocchi.  
 - All'orientamento scivolamento al piede, crollo o ribaltamento di blocchi.  
 - All'orientamento scivolamento al piede, crollo o ribaltamento di blocchi.



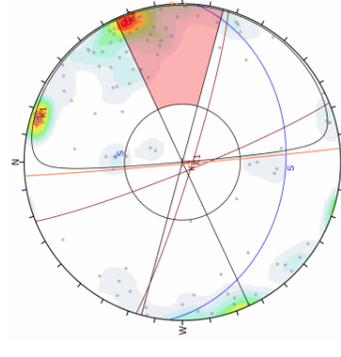
B2			
Piani	Dip [°]	Dip Dir [°]	F
STRATO	24	205	F (230.89)
K1	78	64	
K2	85	114	
FRONTE	89	230	

Svolgimento planare  
 F (230.89) ASSENZA di sovrapposizione planare.  
 - All'orientamento scivolamento al piede, crollo o ribaltamento di blocchi.  
 - All'orientamento scivolamento al piede, crollo o ribaltamento di blocchi.  
 - All'orientamento scivolamento al piede, crollo o ribaltamento di blocchi.  
 - All'orientamento scivolamento al piede, crollo o ribaltamento di blocchi.



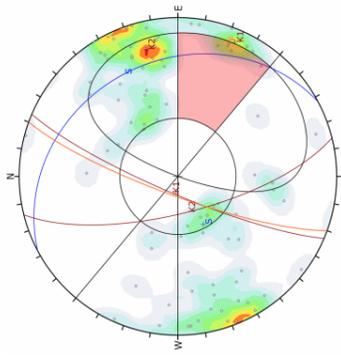
B3			
Piani	Dip [°]	Dip Dir [°]	F
STRATO	89	124	F (255.89)
K1	89	124	
K2	87	268	
FRONTE	89	255	

Svolgimento planare  
 F (255.89) ASSENZA di sovrapposizione planare.  
 - All'orientamento scivolamento al piede, crollo di blocchi dall'alto, la rottura più avvenire per taglio nel giunto o all'interno della matrice rocciosa.



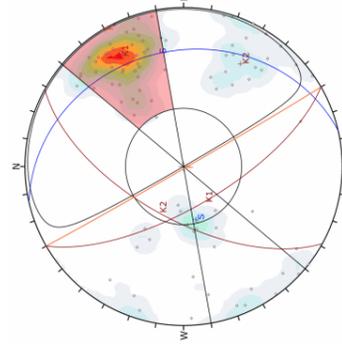
B4			
Piani	Dip [°]	Dip Dir [°]	F
STRATO	35	185	F (266.89)
K1	85	197	
K2	85	248	
FRONTE	89	265	

Svolgimento planare  
 F (266.89) ASSENZA di sovrapposizione planare.  
 - All'orientamento scivolamento al piede, crollo di blocchi dall'alto per sovrapposizione planare.  
 - All'orientamento scivolamento al piede, crollo di blocchi dall'alto per sovrapposizione planare.  
 - All'orientamento scivolamento al piede, crollo di blocchi dall'alto per sovrapposizione planare.  
 - All'orientamento scivolamento al piede, crollo di blocchi dall'alto per sovrapposizione planare.



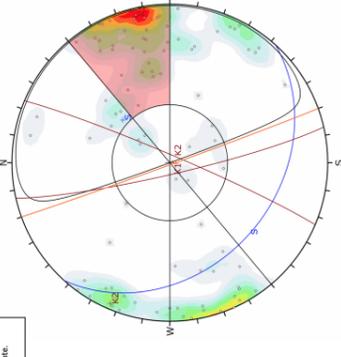
B5			
Piani	Dip [°]	Dip Dir [°]	F
STRATO	28	62	F (240.89)
K1	81	293	
K2	71	296	
FRONTE	89	290	

Svolgimento planare  
 F (240.89) ASSENZA di sovrapposizione planare.  
 - All'orientamento scivolamento al piede, crollo di blocchi dall'alto, la rottura più avvenire per taglio nel giunto o all'interno della matrice rocciosa.  
 - All'orientamento scivolamento al piede, crollo di blocchi dall'alto, la rottura più avvenire per taglio nel giunto o all'interno della matrice rocciosa.



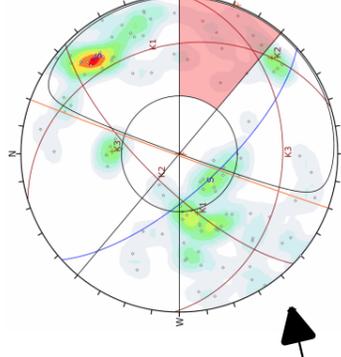
B6			
Piani	Dip [°]	Dip Dir [°]	F
STRATO	63	290	F (240.89)
K1	68	240	
K2	68	240	
FRONTE	89	240	

Svolgimento planare  
 F (240.89) PRESENZA di sovrapposizione planare, piano K1.  
 - All'orientamento scivolamento al piede, crollo di blocchi dall'alto per sovrapposizione planare.  
 - All'orientamento scivolamento al piede, crollo di blocchi dall'alto per sovrapposizione planare.  
 - All'orientamento scivolamento al piede, crollo di blocchi dall'alto per sovrapposizione planare.  
 - All'orientamento scivolamento al piede, crollo di blocchi dall'alto per sovrapposizione planare.



B7			
Piani	Dip [°]	Dip Dir [°]	F
STRATO	24	212	F (240.20)
K1	54	330	
K2	68	82	
FRONTE	70	230	

Svolgimento planare  
 F (240.20) PRESENZA di sovrapposizione planare, piano K1.  
 - All'orientamento scivolamento al piede, crollo di blocchi dall'alto per sovrapposizione planare.  
 - All'orientamento scivolamento al piede, crollo di blocchi dall'alto per sovrapposizione planare.  
 - All'orientamento scivolamento al piede, crollo di blocchi dall'alto per sovrapposizione planare.  
 - All'orientamento scivolamento al piede, crollo di blocchi dall'alto per sovrapposizione planare.



B8			
Piani	Dip [°]	Dip Dir [°]	F
STRATO	70	228	F (240.89)
K1	32	73	
K2	73	314	
K3	73	314	
FRONTE	89	230	

Svolgimento planare  
 F (240.89) ASSENZA di sovrapposizione planare.  
 - All'orientamento scivolamento al piede, crollo di blocchi dall'alto per sovrapposizione planare.  
 - All'orientamento scivolamento al piede, crollo di blocchi dall'alto per sovrapposizione planare.  
 - All'orientamento scivolamento al piede, crollo di blocchi dall'alto per sovrapposizione planare.  
 - All'orientamento scivolamento al piede, crollo di blocchi dall'alto per sovrapposizione planare.

## ***7. MODELLAZIONE NUMERICA DELLA “FRANA”***

---

In questo capitolo si descrivono quelli che sono stati i passaggi per la modellazione numerica dell'ammasso roccioso corrispondente al settore, della Strada del Vallone, denominato come "FRANA".

Nel Capitolo 3 sono stati esposti quelli che sono stati i dissesti principali avvenuti lungo la strada. In particolare, proprio in questo settore, il 28 febbraio 2015 c'è stato un grande crollo che ha portato alla chiusura della strada. Il punto in esame si trova a circa 2.5 chilometri dal bivio con la provinciale dell'alta Valle Maira. Anche solo osservando il banco di roccia, è evidente che si sia instaurato un meccanismo di scivolamento planare di enormi lastre, scalzate al piede dalla strada stessa (Figura 7.1).



*Figura 7.1: Foto scattata da drone dell'intera area in esame.*

La mancanza di informazioni e di un sistema di monitoraggio del settore, fa sì che le cause dell'innescò di questo movimento non siano facilmente riconoscibili. Infatti, non è chiara la reale mobilitazione del materiale franato né tanto meno il suo spessore.

Osservando il banco di roccia si possono fare alcune ipotesi sulle possibili cause di cinematiso. Analizzando da vicino l'ammasso è comunque possibile presupporre che la

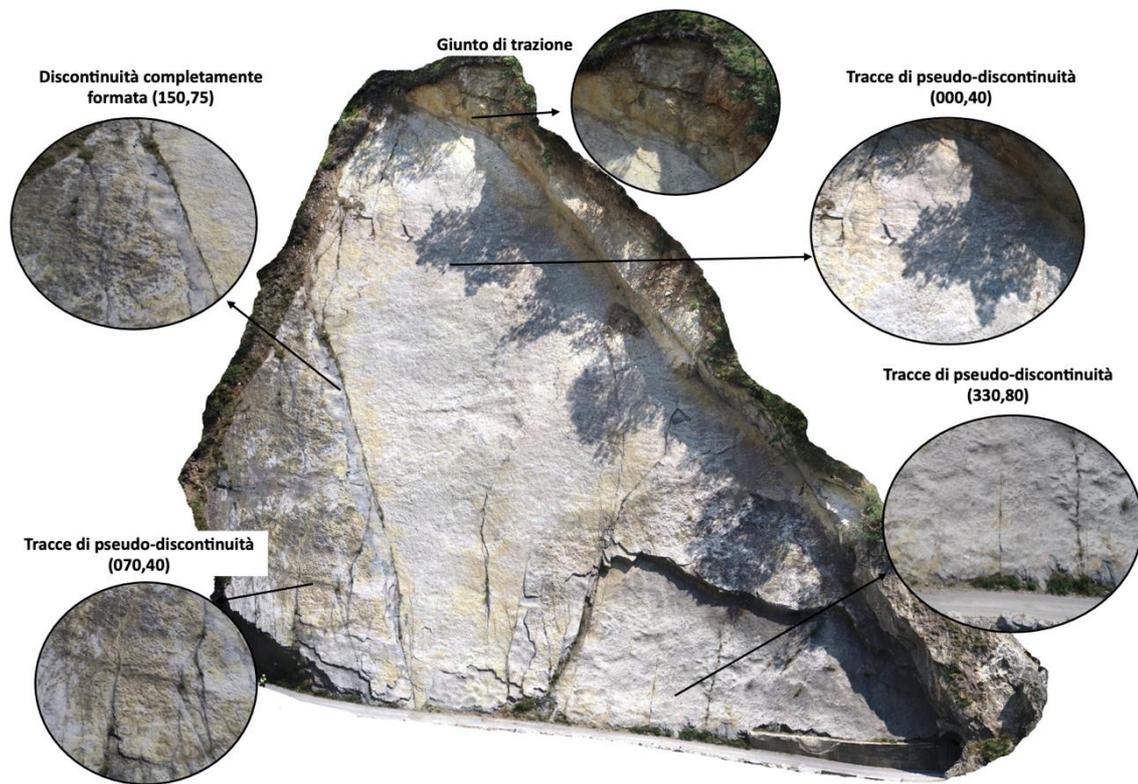
rottura possa avvenire sotto forma di lastre di spessore pressoché costante. Questo è ben visibile nella Figura 7.2 seguente dove si vedono chiaramente gli strati.



*Figura 7.2: Foto che visualizza gli strati di cui è formato l'ammasso.*

Guardando frontalmente e da vicino l'ammasso roccioso si possono individuare una serie di fratture. Alcune di queste sono completamente formate e ben visibili anche da lontano, tanto che è distinguibile all'interno di esse la presenza di riempimento e vegetazione. In altri punti invece, sono presenti tracce di pseudo discontinuità, piani di debolezza, che risultano comunque orientati definendo presumibilmente famiglie di discontinuità. Nella Figura 7.3 nella pagina seguente si possono vedere con chiarezza questi piani.

Inoltre, osservando la parte alta della frana si individua parte di roccia, di colorazione differente, che presumibilmente definisca un giunto di trazione lungo il quale può essere avvenuta la rottura di porzioni di roccia, per superamento della resistenza a trazione del giunto.



*Figura 7.3: Individuazione dei piani di discontinuità e di debolezza.*

Facendo riferimento alla parte di frana in basso a destra, si può notare che in questo punto si è verificato un distacco di una porzione di roccia pari ad almeno 300 mc. Nella Figura 7.4 seguente si può osservare da vicino quello che è lo spessore di questo bancale e anche come la rottura sia avvenuta lungo piani paralleli a quelli di debolezza descritti precedentemente.



*Figura 7.4: Porzione di materiale precedentemente franato.*

Da queste analisi visive, si è giunti alla conclusione che la rottura si è avvenuta e possa avvenire lungo questi piani di discontinuità e di debolezza.

La modellazione successiva non intende rappresentare il reale fenomeno, in quanto non si è a disposizione di adeguate informazioni (non si hanno dati precisi sui volumi coinvolti, sull'estensione areale né sullo spessore di ammasso coinvolto), ma di investigare sulle possibili cause che l'hanno provocato. Quindi l'obiettivo è quello di andare a simulare l'influenza di alcune caratteristiche dei giunti, come ad esempio la percentuale di ponti di roccia, o la presenza di alcuni agenti esterni, come le pressioni idrostatiche.

Si intendono simulare ed analizzare le condizioni di una singola lastra considerando l'influenza sulla stabilità dei ponti di roccia o sulla possibile resistenza a trazione di quelle discontinuità o pseudo-discontinuità indicate in Figura 7.3.

Inoltre, si analizza l'influenza delle pressioni dell'acqua lungo il piano di scivolamento simulando differenti distribuzioni di superficie.

La modellazione è stata realizzata attraverso il metodo agli elementi discreti implementato nel codice di calcolo "3DEC", *Three-Dimension Distinct Element Code*. Verranno illustrati nel dettaglio i comandi principali e i principi base che riguardano: la modellazione, le proprietà dei materiali e dei giunti, la definizione delle condizioni al contorno, il monitoraggio dello stato del modello e il processo di calcolo.

Successivamente, si andranno ad analizzare i risultati ottenuti in modo da poter trarre alcune conclusioni su quelle che possono essere state le cause del cinematismo.

## 7.1. DISCRETE ELEMENT METHOD - DEM

---

Il Discrete Element Method (DEM), metodo agli elementi discreti, fu introdotto da Cundall nel 1971. È un metodo del discontinuo molto spesso utilizzato nei problemi di meccanica delle rocce, meccanica dei suoli, nelle analisi strutturali, nella lavorazione dei materiali, nella fluido dinamica, etc.

Il DEM è un metodo relativamente nuovo se paragonato con FDM, FEM e BEM e è principalmente utilizzato nel campo della frattura o in caso di particolari condizioni geologiche. Attraverso questo metodo il dominio fratturato è rappresentato come un insieme di blocchi separati da fratture. I blocchi possono essere rigidi o deformabili con l'utilizzo di una discretizzazione interna FDM o FEM.

Nel metodo DEM i blocchi possono essere soggetti a grandi rotazioni e spostamenti che tengono conto dei movimenti relativi degli altri blocchi. Infatti, gli spostamenti causati dal moto rigido dei blocchi, che include la rotazione, l'apertura delle fratture ed il completo distacco degli stessi, sono irrealizzabili con i metodi FDM, FEM o BEM, mentre risultano molto semplici da simulare con il metodo DEM.

Le radici teoriche di questo metodo si basano sulla formulazione e la soluzione di equazioni del moto di un corpo rigido e/o deformabile usando una formulazione implicita (basata sulla discretizzazione FEM) ed esplicita (usando una discretizzazione FDM/FVM). Il concetto chiave del DEM è che il dominio d'interesse è trattato come un insieme di blocchi (particles, bodies) rigidi o deformabili e la loro interazione è continuamente identificata e aggiornata, durante il processo di moto e deformazione, con adeguate leggi costitutive.

L'applicazione del metodo, nei problemi di meccanica delle rocce, necessita l'individuazione e la soluzione di alcuni passaggi:

- La suddivisione dello spazio e identificazione delle diverse tipologie di blocchi;
- La rappresentazione della deformazione dei blocchi, siano essi rigidi o deformabili;
- Lo sviluppo di un algoritmo che rilevi il contatto tra i blocchi;
- L'acquisizione delle equazioni costitutive sia per i blocchi che per le fratture;
- L'integrazione delle equazioni del moto dei blocchi/particelle (relazioni dinamiche).

Di solito nel DEM le equazioni del moto sono risolte con uno schema esplicito FDM con un dato intervallo di tempo  $\Delta t$ . In questo caso la scelta dell'intervallo di tempo è limitata dall'ipotesi che la velocità e l'accelerazione siano assunte costanti tra gli intervalli di tempo. Nel metodo DEM gli intervalli di tempo sono sufficientemente piccoli da garantire che, in un singolo intervallo, la "disturbance" (es. il carico in un blocco) non si propaghi sugli elementi discreti vicini.

I "joints", ovvero i giunti, sono rappresentati come le superfici di contatto tra due blocchi adiacenti e la rigidità, sia in direzione tangenziale che in direzione normale, viene riprodotta attraverso la sovrapposizione dei blocchi "overlap". In questo modo si riesce a tenere in conto della deformabilità dei blocchi in entrambe le direzioni, anche se questa rappresentazione non è pienamente compatibile con la fisica del problema.

I principali vantaggi dell'applicazione del metodo sono così riassumibili:

- il metodo rende possibile analizzare l'evoluzione di un processo deformativo e non solo l'innescio
- è possibile modellare sistemi di blocchi sia stabili sia instabili. Un blocco soggetto ad una forza sbilanciata accelera, muovendosi verso una nuova configurazione. Quando si determina una condizione d'equilibrio (forze sbilanciate nulle) il sistema di blocchi è fermo o in movimento con velocità costante;
- il contatto tra i blocchi determina delle forze (di contatto);
- sono possibili compenetrazioni tra i blocchi;
- la sequenza di calcolo prevede incrementi di tempo successivi molto piccoli con passo variabile fino al raggiungimento di una condizione d'equilibrio;
- i blocchi possono essere rigidi o deformabili.

Il più grande svantaggio di questo metodo è l'elevato costo computazionale e la necessità di determinare i parametri tra i blocchi come la deformabilità e la resistenza dell'area di contatto.

### 7.1.1. SCHEMATIZZAZIONE DELLE DISCONTINUITÀ E DEI BLOCCHI

---

Il metodo degli elementi discreti permette di affrontare lo studio degli ammassi rocciosi fratturati identificando le discontinuità in modo esplicito. Per la loro rappresentazione, si utilizza una schematizzazione in cui le discontinuità sono sostituite da sistemi di molle dissipatrici che determinano le forze normali e di taglio al contatto tra i blocchi.

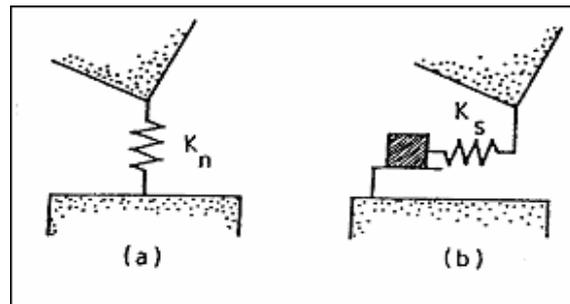


Figura 7.5: Rappresentazione dei contatti tra i blocchi.

Le relazioni forze-spostamento usate sono:

$$\Delta F_n = K_n \cdot \Delta U_n$$

$$\Delta F_s = K_s \cdot \Delta U_s$$

Dove:

- $\Delta F_n$  e  $\Delta F_s$  sono gli incrementi di forze normali e di taglio;
- $\Delta U_n$  e  $\Delta U_s$  sono gli incrementi di spostamento normale e di taglio;
- $K_n$  e  $K_s$  sono le rigidezze normali e di taglio delle discontinuità.

### 7.1.2. RAPPRESENTAZIONE DEI CONTATTI FRA I BLOCCHI

---

In tre dimensioni le possibilità di contatto tra due blocchi sono molteplici. Se un blocco A ha  $v_a$  vertici,  $e_a$  spigoli e  $f_a$  facce ed un blocco B  $v_b$  vertici,  $e_b$  spigoli e  $f_b$  facce, il numero delle combinazioni di contatti distinti può essere ottenuto con la seguente formula:

$$n = (v_a + e_a + f_a) \cdot (v_b + e_b + f_b)$$

Ad esempio, se si hanno due cubi il numero di contatti risulta:

Tabella 7.1: Esempio di calcolo delle combinazioni di contatto tra 2 blocchi.

	<i>v</i>	<i>e</i>	<i>f</i>
Blocco A	8	12	6
Blocco B	8	12	6

I possibili contatti sono quindi  $26 \times 26 = 676$ . È chiaro quindi che più la forma del blocco è complessa maggiore è la difficoltà d'identificazione dei contatti.

I tipi di contatto sono classificati nel modo seguente:

- vertice-vertice;
- vertice-spigolo;
- spigolo-spigolo;
- spigolo-faccia;
- faccia-faccia.

Il primo caso è contemplato quando ci sono tre o più contatti vertice - faccia esistenti in una stessa zona; il secondo caso si verifica quando due contatti vertice - faccia coincidono. Il contatto spigolo-faccia si ha quando tra due blocchi vi sono due contatti spigolo-spigolo; l'ultimo caso è individuato quando vi sono tre o più contatti spigolo- spigolo o vertice-faccia. Quando si è in presenza di una delle quattro situazioni precedentemente descritte, il numero di combinazioni di contatto possibili, si riduce secondo la formula:

$$n = v_a \cdot f_b + v_b \cdot f_a + e_a \cdot f_b + e_b \cdot f_a$$

In tal caso l'esempio dei due cubi in contatto fornisce un numero di contatti possibili pari a 240. È opportuno osservare che non è sempre semplice riconoscere e classificare un contatto per la complessità delle geometrie che si possono avere in tre dimensioni. Orientativamente si può affermare che l'operazione di riconoscimento delle diverse situazioni di contatto dipende quadraticamente dal numero medio di spigoli del blocco (dei vertici o delle facce).

Le difficoltà precedentemente illustrate sono risolte considerando un “piano comune”. Questo può essere pensato come una lastra che divide lo spazio esistente tra due blocchi. Le operazioni di ricerca dei contatti sono in tal modo semplificate perché è possibile studiare separatamente i blocchi utilizzando come riferimento proprio il piano comune. Si riporta il seguente schema esplicativo:

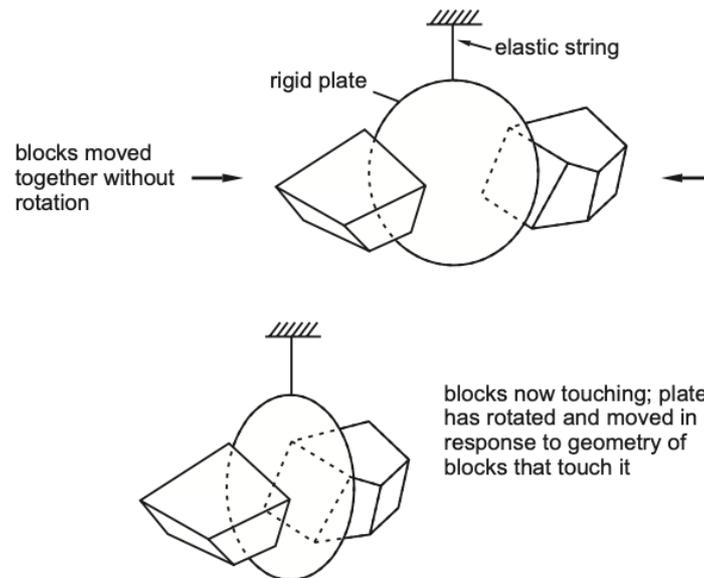


Figura 7.6: Visualizzazione del piano comune come una lastra rigida sostenuta da una corda elastica (3DEC, Online Manual Table of Contents).

Nel primo caso i due blocchi si muovono assieme ma non sono in contatto con il piano comune; nella seconda situazione i blocchi entrando in contatto fanno ruotare la lastra relativamente alla loro geometria. Qualunque sia l’orientamento e la forma dei blocchi (purché siano convessi), la lastra individuerà la posizione del piano di scivolamento. Le situazioni di contatto sono semplificate nel seguente modo:

- i contatti faccia e spigolo sono riconosciuti semplicemente contando il numero di vertici per piano sopra entrambi i blocchi;
- il numero dei tests effettuati sui blocchi dipende linearmente dal numero dei vertici secondo la relazione:

$$n = v_a + v_b$$

tornando all’esempio dei due cubi in questo caso  $n = 16$  (si ricorda che senza il piano comune il risultato era pari a 240);

- se entrambi i blocchi toccano il piano comune allora il vettore unitario normale al contatto è uguale al vettore normale al piano comune;
- se il piano comune è unicamente definito, il problema d'evoluzione discontinua del contatto normale è eliminata. Il piano comune normale potrebbe cambiare rapidamente ma il tipo di contatto non sarà modificato;
- la determinazione dello spazio minimo tra due blocchi non in contatto è data dalla somma delle distanze d'ogni blocco dal piano comune.

Sono diversi i modi in cui il piano comune può essere posizionato ma tutti sono regolati da un opportuno algoritmo. L'algoritmo che è formulato in modo da localizzare e muovere il piano comune è basato solo su considerazioni geometriche ed è applicato ad ogni time step, parallelamente alle altre operazioni di calcolo.

In Figura 7.7 sono evidenziate alcuni esempi di posizionamento del piano comune.

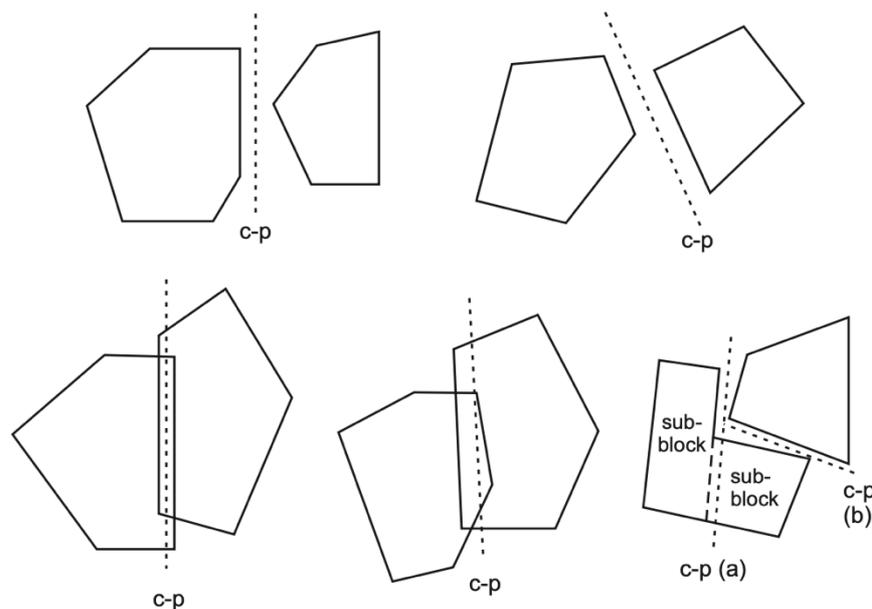


Figura 7.7: Alcune delle posizioni possibili del piano comune (3DEC, Online Manual Table of Contents).

### 7.1.3. CLASSIFICAZIONE DEI CONTATTI TRA I BLOCCHI

Stabilire la natura del contatto tra due blocchi è importante perché da questo dipende la risposta meccanica del contatto stesso. In funzione del numero dei vertici che toccano il piano comune se ne può identificare la tipologia:

Tabella 7.2: Tipologie di contatto tra i blocchi.

Numero di vertici in contatto con il piano comune		Tipo di contatto
Blocco A	Blocco B	
0	0	Nulla
1	1	Vertice – Vertice
1	2	Vertice – Spigolo
1	>2	Vertice – Faccia
2	1	Spigolo – Vertice
2	2	Spigolo – Spigolo
2	>2	Spigolo – Faccia
>2	1	Faccia – Vertice
>2	2	Faccia – Spigolo
>2	>2	Faccia – Faccia

In base agli schemi citati in precedenza si determinano le tensioni al contatto secondo le seguenti relazioni:

$$\sigma_n = \frac{F_n}{l}$$

$$\tau_s = \frac{F_s}{l}$$

Mentre gli incrementi di sollecitazione sono:

$$\Delta\sigma_n = K_n \cdot \Delta U_n$$

$$\Delta\tau_s = K_s \cdot \Delta U_s$$

#### 7.1.4. MOTO DI BLOCCHI RIGIDI

---

Le equazioni di traslazione di un blocco rigido sono espresse nel modo seguente:

$$\ddot{x}_i + \alpha \dot{x}_i = \frac{F_i}{m} + g_i$$

Dove:

- $\ddot{x}_i$  è l'accelerazione del centroide del blocco;
- $\dot{x}_i$  è la velocità del centroide del blocco;
- $\alpha$  è la costante di smorzamento viscoso;
- $F_i$  è la somma delle forze agenti nel blocco;
- $m$  è la massa del blocco;
- $g_i$  è l'accelerazione di gravità.

Le equazioni di moto rotazionale sono quelle d'Eulero, nelle quali il moto è riferito agli assi principali d'inerzia del corpo:

$$I_1 \dot{\omega}_1 + (I_3 - I_2) \omega_3 \omega_2 = M_1$$

$$I_2 \dot{\omega}_2 + (I_1 - I_3) \omega_1 \omega_3 = M_2$$

$$I_3 \dot{\omega}_3 + (I_2 - I_1) \omega_2 \omega_1 = M_3$$

Dove:

- $I_1, I_2, I_3$  sono i momenti principali d'inerzia;
- $\omega_1, \omega_2, \omega_3$  sono le accelerazioni angolari attorno agli assi principali;
- $M_1, M_2, M_3$  sono le coppie applicate al blocco riferite agli assi principali

I momenti d'inerzia sono approssimati considerando la distanza media tra il centroide e i vertici del blocco; le forze d'inerzia sono piccole in rapporto a quelle totali che agiscono sul sistema. Secondo queste considerazioni le equazioni scritte in precedenza possono essere semplificate nel seguente modo:

$$\dot{\omega}_i + \alpha \omega_i = \frac{M_i}{I}$$

Riferendo però le velocità  $\omega_i$  e le coppie totali agli assi globali.

È poi possibile approssimare le equazioni di moto di traslazione e di rotazione con uno schema centrale alle differenze finite:

$$\dot{x}_i(t) = \frac{1}{2} \left[ \dot{x}_i \left[ t - \frac{\Delta t}{2} \right] + \dot{x}_i \left[ t + \frac{\Delta t}{2} \right] \right]$$

$$\omega_i(t) = \frac{1}{2} \left[ \omega_i \left[ t - \frac{\Delta t}{2} \right] + \omega_i \left[ t + \frac{\Delta t}{2} \right] \right]$$

E le accelerazioni sono calcolate:

$$\ddot{x}_i(t) = \frac{1}{\Delta t} \left[ \dot{x}_i \left[ t + \frac{\Delta t}{2} \right] - \dot{x}_i \left[ t - \frac{\Delta t}{2} \right] \right]$$

$$\dot{\omega}_i(t) = \frac{1}{\Delta t} \left[ \omega_i \left[ t + \frac{\Delta t}{2} \right] - \omega_i \left[ t - \frac{\Delta t}{2} \right] \right]$$

Da cui:

$$\dot{x}_i \left[ t + \frac{\Delta t}{2} \right] = \left[ D_i \dot{x}_i \left[ t - \frac{\Delta t}{2} \right] + \left[ \frac{F_i(t)}{m} + g_i \right] \Delta t \right] D_2$$

$$\omega_i \left[ t + \frac{\Delta t}{2} \right] = \left[ D_i \omega_i \left[ t - \frac{\Delta t}{2} \right] + \left[ \frac{M_i(t)}{m} \Delta t \right] \right] D_2$$

Dove:

$$D_i = 1 - \alpha \frac{\Delta t}{2}$$

$$D_2 = \frac{1}{1 + \alpha \frac{\Delta t}{2}}$$

Gli incrementi di traslazione e rotazione sono dati da:

$$\Delta x_i = x_i \left[ t + \frac{\Delta t}{2} \right] \Delta t$$

$$\Delta \theta_i = \omega_i \left[ t + \frac{\Delta t}{2} \right] \Delta t$$

La posizione del centroide del blocco è aggiornata:

$$x_i(t + \Delta t) = x_i(t) + \Delta x_i$$

La nuova posizione dei vertici dei blocchi è quindi data da:

$$x_i^p(t + \Delta t) = x_i^p(t) + \Delta x_i + e_{ijk} \Delta \theta_j [x_k^p(t) - x_k(t)]$$

La forza ed il momento risultante sono ipotizzati uguali a zero alla fine d'ogni ciclo di calcolo dopo che l'aggiornamento della posizione del blocco è stato completata.

#### 7.1.5. AGGIORNAMENTO DELLE FORZE DI SUB-CONATTO

---

Per i blocchi rigidi, la velocità di contatto, definita come la velocità del blocco B rispetto al blocco A nella posizione del sotto-contatto, viene calcolata come:

$$V_i = \dot{x}_i^B + e_{ijk} \omega_j^B (C_k - B_k) - \dot{x}_i^A - e_{ijk} \omega_j^A (C_k - A_k)$$

Dove:

- $A_k$  e  $B_k$  sono i vettori di posizione dei centroidi dei blocchi A e B;
- $\dot{x}_i^A$  e  $\dot{x}_i^B$  sono i vettori di velocità di traslazione dei blocchi A e B;
- $\omega_j^A$  e  $\omega_j^B$  sono i vettori delle corrispondenti velocità angolari;
- $e_{ijk}$  è il tensore di permutazione;
- gli indici i, j, k prendono i valori da 1 a 3 e indicano i componenti di un vettore o tensore nel sistema di coordinate globale.

Le velocità dei sub-contatti associati al contatto del blocco rigido vengono quindi interpolate dalla velocità del contatto.

L'incremento di spostamento relativo nel sub-contatto è dato da:

$$\Delta U_i = V_i \Delta t$$

Questo può essere scomposto in due componenti, una normale e una tangenziale, al piano comune. L'incremento di spostamento normale e quello tangenziale sono dati da:

$$\Delta U^n = \Delta U_i n_i$$

$$\Delta U_i^s = \Delta U_i - \Delta U_j n_i n_j$$

Dove la l'unità normale  $n_i$  sul piano comune, è aggiornata ad ogni timestep. Per tenere conto della rotazione incrementale del piano comune, il vettore che rappresenta la forza di taglio  $F_i^s$  esistente (in coordinate globali) deve essere corretto come:

$$F_i^s := F_i^s - e_{ijk} e_{kmn} F_j^s n_m^{old} n_n$$

Dove  $n_m^{old}$  è la precedente unità normale al piano comune.

Gli incrementi di spostamento sul sub-contatto vengono utilizzati per calcolare gli incrementi della forza elastica. Gli incrementi di forza normale e di taglio, prendendo la forza di compressione come positiva, sono:

$$\Delta F^n = -K_n \cdot \Delta U^n A_c$$

$$\Delta F_i^s = -K_s \cdot \Delta U_i^s A_c$$

Dove  $A_c$  è l'area del sub contatto ottenuta assegnando al punto una regione formata da 1/3 delle aree delle facce triangolari che contengono il sub-contatto e che giace sul piano comune. Viene quindi calcolata l'area dell'intersezione di questa regione con le facce dell'altro blocco che giace sul piano comune.

Per il contatto faccia a faccia,  $A_c$  viene presa come metà di questa area, al fine di tenere conto del fatto che i sub-contatti sono stabiliti per i vertici di entrambi i blocchi, risultando quindi in due serie di "molle" parallele.

I vettori della forza normale totale e della forza di taglio vengono aggiornati per il sub-contatto come:

$$F^n := F^n + \Delta F^n$$

$$F_i^s := F_i^s + \Delta F_i^s$$

Il vettore della forza di sub-contatto, che rappresenta l'azione del blocco A sul blocco B, è dato da:

$$F_i = -(F^n n_i + F_i^s)$$

Per i blocchi rigidi, le forze del sub-contatto vengono quindi aggiunte alle forze e ai momenti che agiscono sui centroidi di entrambi i blocchi. Le sommatorie di forza e momento del blocco A vengono quindi aggiornate come:

$$F_i^A := F_i^A - F_i$$

$$M_i^A := M_i^A - e_{ijk}(c_j - A_j)F_k$$

Dove  $c_j$  è il vettore di posizione del sub-contatto. Allo stesso modo, per il blocco B:

$$F_i^B := F_i^B + F_i$$

$$M_i^B := M_i^B + e_{ijk}(c_j - B_j)F_k$$

#### 7.1.6. COULOMB-SLIP JOINT MODEL

---

Il modello costitutivo utilizzato per i giunti è quello che si basa sulla generalizzazione della legge di attrito di Coulomb. Sono considerati sia il taglio che la rottura, nonché la dilatazione dei giunti.

Per un giunto intatto (ovvero, senza precedente scorrimento o separazione), la forza normale di trazione è limitata a:

$$T_{max} = -TA_c$$

Dove  $T$  è la resistenza a trazione del giunto.

La massima forza di taglio consentita è data da:

$$F_{max}^s = cA_c + F^n \tan \phi$$

Dove  $c$  e  $\phi$  sono rispettivamente, la coesione e l'angolo d'attrito del giunto.

Quando sul sub-contattato si ha l'insorgenza di una rottura, per trazione o taglio, la resistenza a trazione e la coesione diventano uguali a zero.

$$T_{max} = 0$$

$$F_{max}^s = F^n \tan \phi$$

Le nuove forze di contatto sono corrette nel modo seguente:

- *Rottura per trazione*: se  $F^n < T_{max}$ ,  $F^n = 0$  e  $F_i^s = 0$ ;
- *Rottura per taglio*: se  $F^s > F_{max}^s$ ,  $F_i^s = F_i^s \frac{F_{max}^s}{F^s}$

Dove  $F^s$  è data da:

$$F^s = (F_i^s F_i^s)^{1/2}$$

La dilatazione avviene solo quando il giunto è scivolato. L'incremento di spostamento dato dal taglio è dato da:

$$\Delta U^s = (U_i^s U_i^s)^{1/2}$$

Questo spostamento porta ad una dilatazione di:

$$\Delta U^n(dil) = \Delta U^s \tan \psi$$

Dove  $\psi$  è l'angolo di dilatanza.

La forza normale deve essere corretta per tenere conto dell'effetto della dilatazione:

$$F^n := F^n + K_n A_c \Delta U^s \tan \psi$$

La dilatazione è una funzione della direzione del taglio. La dilatazione aumenta se l'incremento di spostamento dovuto al taglio è nella stessa direzione dello spostamento di taglio totale; diminuisce se l'incremento di taglio è nella direzione opposta.

Questo modello articolare è illustrato nella Figura 7.8 nel caso in cui la coesione del giunto sia inizialmente zero.

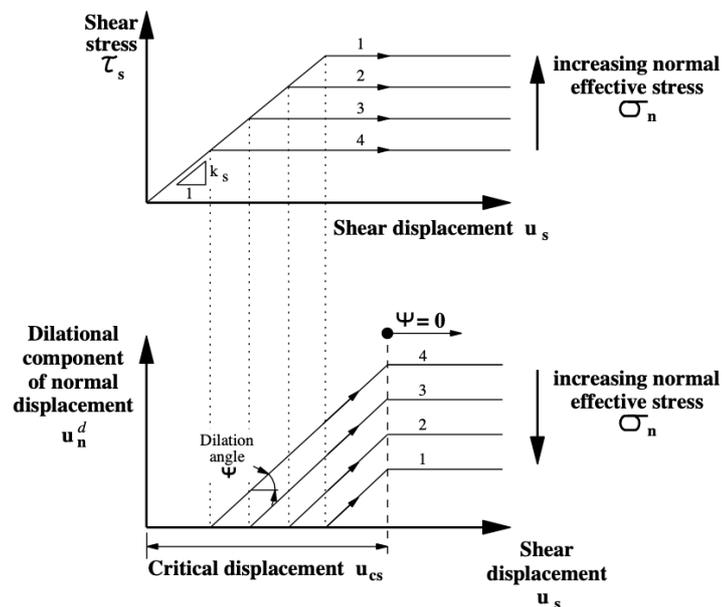


Figura 7.8: Coulomb slip model, per coesione uguale a zero (3DEC, Online Manual Table of Contents).

## 7.2. IL CODICE DI CALCOLO 3DEC

---

3DEC è un programma numerico tridimensionale basato sul metodo degli elementi distinti per la modellazione discontinua. La base di questo programma è la formulazione numerica ampiamente testata utilizzata dalla versione bidimensionale, UDEC (Itasca 2004).

3DEC simula la risposta di supporti discontinui (come una massa rocciosa articolata) sottoposti a carico statico o dinamico. Il mezzo discontinuo è rappresentato come un sistema di blocchi discreti, in cui le discontinuità sono trattate come condizioni al contorno tra i blocchi. Lungo le discontinuità sono consentiti grandi spostamenti e rotazioni di blocchi che possono essere rigidi o deformabili.

3DEC si basa su uno schema di calcolo Lagrangiano adatto per modellare i grandi movimenti e le deformazioni di un sistema a blocchi. Il codice è basato su un algoritmo che risolve le equazioni del moto del sistema a blocchi, tramite un metodo di risoluzione esplicito nel tempo alle differenze finite. Ad ogni time step di calcolo sono applicate la legge del moto e le equazioni costitutive. Per entrambe le schematizzazioni del blocco (rigido o deformabile), sono prescritte le relazioni forze-spostamenti nei sub-contatti. Le relazioni tra forze – spostamenti possono essere lineari o non lineari, sia nella direzione normale che in quella di taglio. Nel software sono implementati diversi modelli di comportamento dei materiali, sia per i blocchi che per le discontinuità, che consentono la simulazione di una risposta rappresentativa dei materiali geologici discontinui o simili. Ad ogni iterazione vengono aggiornate, in base alle leggi del moto, la posizione del blocco e gli incrementi di spostamento (o velocità). La legge forze-spostamenti del sub-contatto è usata per ottenere le nuove forze che sono applicate ai blocchi al time-step successivo.

Riassumendo il ciclo di calcolo si può descrivere nel modo seguente:

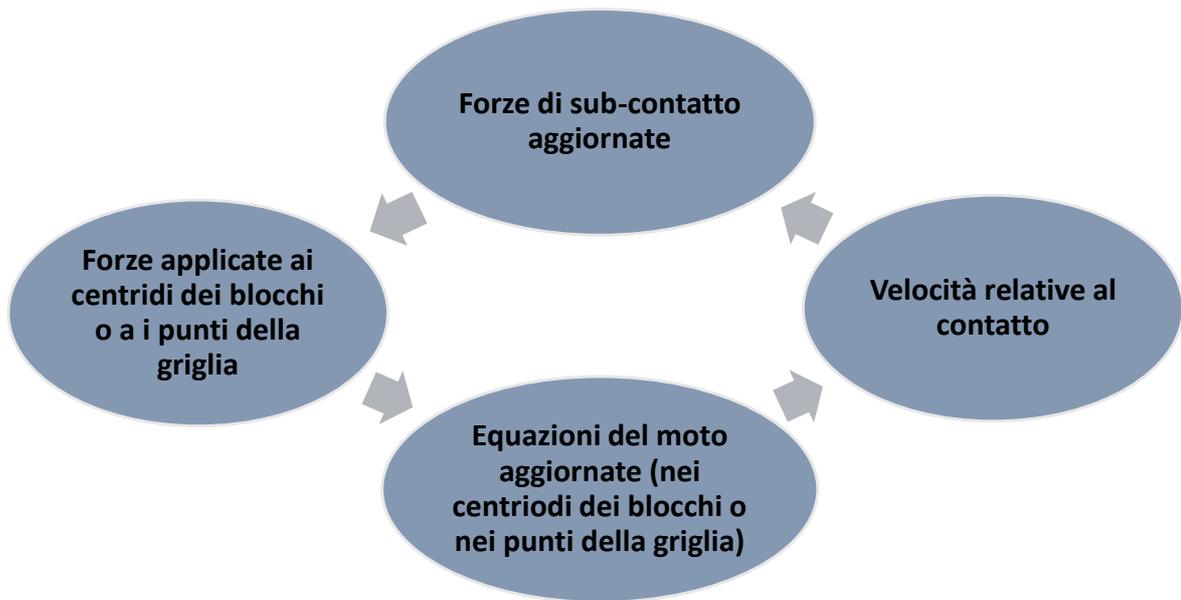


Figura 7.9: Algoritmo implementato nel codice di calcolo 3DEC.

### 7.3. FASI DELLA MODELLAZIONE

In generale, la creazione di un file di input con il codice di calcolo 3DEC segue uno schema logico del tipo:

Tabella 7.3: Passaggi chiave per la modellazione in 3DEC.

<b>Creazione della GEOMETRIA del modello</b>	Definizione dei limiti del modello	<i>Generalmente si comincia col creare un unico blocco iniziale e lo si divide, attraverso dei giunti, fino creare la geometria desiderata.</i>
	Definizione dei sistemi di discontinuità	
	Definizione della geometria	
<b>DISCRETIZZAZIONE</b>	Generazione della maglia alle differenze finite	<i>I blocchi precedentemente creati vengono discretizzati mediante degli elementi alle differenze finite.</i>
<b>Assegnazione delle PROPRIETÀ</b>	Proprietà meccaniche e di resistenza della matrice rocciosa e dei giunti	
	Modelli costitutivi della matrice rocciosa e dei giunti	
<b>Applicazione delle CONDIZIONI INIZIALI e delle CONDIZIONI AL CONTORNO</b>	Condizioni tensionali	
	Condizioni cinematiche	

<b>RISOLUZIONE</b>	Definizione delle history
	Definizione degli step di calcolo
	Ricerca dell'equilibrio del sistema

Quindi, per prima cosa bisogna avere un'idea chiara di quella che è la geometria del sistema in modo da andare a inserire, all'interno del software, i piani corretti e ricavare il modello desiderato.

La fase di discretizzazione riguarda chiaramente soltanto le analisi con blocchi deformabili. Nella configurazione con blocchi rigidi ogni blocco viene rappresentato attraverso un solo punto denominato centroide. Con una schematizzazione a blocchi deformabili invece, i punti, che definiscono il blocco, sono i nodi di una maglia alle differenze finite. L'esecuzione di una modellazione con blocchi rigidi o con blocchi deformabili presenta delle differenze non solo di carattere computazionale (analisi con blocchi deformabili più onerosa), ma anche di approccio concettuale al problema. Se si sceglie un sistema di blocchi rigidi la deformazione del sistema sarà quella che si sviluppa lungo il piano di discontinuità; una struttura di blocchi deformabili si deforma non solo lungo i suddetti piani ma anche nella matrice rocciosa che costituisce il blocco.

Per simulare il comportamento meccanico di un ammasso roccioso, devono essere esplicitate le proprietà meccaniche e di resistenza dei materiali ed i modelli di comportamento in base ai quali impostare la modellazione.

Esistono due metodi per assegnare i modelli costitutivi e le proprietà ai blocchi e i giunti. Il primo metodo consiste nell'utilizzare il comando *"property"* con il quale si vanno a definire i valori delle proprietà dei blocchi o dei giunti. Queste proprietà vengono successivamente assegnate attraverso il comando *"change"* con il quale si può assegnare anche il tipo di legge costitutiva. Il secondo metodo consiste nell'utilizzare modelli costitutivi DLL (Dynamic Link Library) definiti esternamente. Questo metodo necessita di maggiore memoria rispetto al primo, ma permette di definire delle proprietà locali per le zone e per i giunti. Il comando *"zone"* viene utilizzato per assegnare i modelli costitutivi e le proprietà per le zone, mentre

il comando “*jmodel*” viene utilizzato per definire i modelli costitutivi e le proprietà dei giunti.

Per la matrice rocciosa, all’interno del software sono supportati modelli costitutivi elastici o plastici dei blocchi. I modelli elastici sono caratterizzati da deformazioni reversibili, le leggi tensione-deformazione sono lineari e indipendenti dal percorso di carico. Tutti i modelli plastici coinvolgono deformazioni permanenti, correlate al percorso di carico, e dunque delle relazioni tensione-deformazione non lineari. I diversi modelli sono caratterizzati da un criterio di rottura, da un comportamento rammollente/incrudente e da un flusso plastico.

I principali modelli di comportamento della matrice rocciosa implementati nel codice di calcolo sono:

- modello nullo;
- modello elastico isotropo;
- modello elastico anisotropo;
- modello elasto-plastico con criterio di rottura di Mohr-Coulomb;
- modello bilineare.

Il software 3DEC permette di scegliere tra quattro modelli costitutivi per i giunti che sono riassunti nella Tabella 7.4 seguente:

*Tabella 7.4: Modelli costitutivi per i giunti nel software 3DEC.*

<b>jcons 1</b>	<b><i>Joint area contact elastic/plastic model with Coulomb slip failure</i></b>
	Questo modello permette di simulare gli spostamenti dei giunti causati dalla perdita d’attrito coesione e resistenza a trazione all’insorgere della frattura per trazione o scorrimento. Il valore di default di coesione e resistenza a trazione è zero. Se non viene fornito un valore di angolo d’attrito residuo, il valore iniziale viene mantenuto costante.
<b>jcons 2</b>	<b><i>Joint area contact model- Coulomb slip with residual strength</i></b>
	Questo modello è uguale al precedente, ma in aggiunta il valore di coesione viene mantenuto costante, mentre il valore di resistenza a trazione viene ridotta fino al valore al valore residuo. Il valore residuo di default per la resistenza a trazione è zero.

<b>jcons 3</b>	<b><i>Continuously yielding model</i></b>
	È un modello più complesso rispetto ai precedenti, che simula il continuo indebolimento in funzione dello spostamento di taglio plastico. Molto utilizzato per giunti che presentano un danneggiamento progressivo e un comportamento isteretico.
<b>jcons 7</b>	<b><i>Elastic joint model</i></b>
	Non sono permesse rotture per apertura o taglio.

In un modello numerico, le condizioni al contorno sono necessarie per simulare lo stato di tensione naturale, geostatico, presente in sito, tramite una prima fase di ricerca dell'equilibrio iniziale. I contorni possono essere reali o artificiali. I primi esistono nella realtà, nell'oggetto che si desidera modellare. I secondi, invece, non esistono realmente ma sono introdotti nel modello al fine di semplificare il problema (come ad esempio gli assi di simmetria o le linee di troncamento del modello). Inizialmente i contorni del modello sono liberi, senza nessuna tensione applicata o nessun vincolo imposto.

Si possono utilizzare due tipi di condizioni al contorno che riguardano rispettivamente il campo tensionale o il campo degli spostamenti.

Per quanto riguarda il campo tensionale è possibile prescrivere un certo valore di tensione negli elementi che si trovano lungo il contorno del modello. Analogamente è possibile prescrivere un certo valore del carico da applicare.

Per il campo degli spostamenti, invece, si è soliti prescrivere dei valori di spostamento o, analogamente, dei valori di velocità da applicare nei punti al contorno del modello. In Tabella 7.5 vengono riportati i principali comandi per prescrivere le condizioni al contorno in 3DEC.

Tabella 7.5: Comandi per prescrivere le condizioni al contorno di tensione/carico e spostamento/velocità in 3DEC.

Comando		Effetto
<b>BOUNDARY</b>	Stress	Total stress applicato ai blocchi rigidi/deformabili
	Xload	Carico applicato sui blocchi rigidi/deformabili nella direzione X
	Yload	Carico applicato sui blocchi rigidi/deformabili nella direzione Y
	Zload	Carico applicato sui blocchi rigidi/deformabili nella direzione Z
	Xvel	Velocità applicata sui blocchi rigidi/deformabili nella direzione X
	Yvel	Velocità applicata sui blocchi rigidi/deformabili nella direzione Y
	Zvel	Velocità applicata sui blocchi rigidi/deformabili nella direzione Z
<b>FIX</b>		Velocità fissate sui blocchi rigidi/deformabili
<b>FREE</b>		Velocità libere sui blocchi rigidi/deformabili
<b>APPLY</b>	Xvel	Velocità applicata sui blocchi rigidi nella direzione X
	Yvel	Velocità applicata sui blocchi rigidi nella direzione Y
	Zvel	Velocità applicata sui blocchi rigidi nella direzione Z

Il software utilizza le seguenti convenzioni di segno:

- Segno negativo per i valori delle tensioni di compressione.
- Segno negativo per i valori di spostamento/velocità diretti nel verso opposto alla direzione dell'asse cartesiano.

Inoltre, considerando lo stesso contorno, è necessario che l'applicazione delle velocità avvenga dopo l'applicazione delle tensioni. In caso contrario si perderà l'effetto delle tensioni.

È importante andare a monitorare le condizioni del modello durante il processo di risoluzione. Il comando "*history*" permette di andare a monitorare i cambiamenti di alcune variabili durante l'analisi. L'utente ha il compito di stabilire quando le condizioni di rottura vengono raggiunte. Per farlo può monitorare la forza non bilanciata, le velocità e gli spostamenti in determinati punti.

Per l'esecuzione del calcolo di risoluzione del modello si possono utilizzare diverse opzioni, riassunte in Tabella 7.6.

Tabella 7.6: Comandi per la risoluzione del problema.

Comando	Descrizione
<b>CYCLE <i>n</i></b>	Effettua <i>n</i> cicli (time-step)
<b>STEP <i>n</i></b>	Effettua <i>n</i> cicli (time-step)
<b>SOLVE</b>	Effettua dei cicli fino al raggiungimento del limite
<b>SOLVE <i>fos</i></b>	Determina un fattore di sicurezza per il collasso

## 7.4. MODELLAZIONE NUMERICA DEL CASO IN ESAME

L'interfaccia del software è strutturata in due parti: la "Console" dove si possono inserire manualmente i comandi o visualizzare le informazioni; la "Base View" dove viene visualizzato il modello, in particolare è possibile visualizzare i blocchi, i giunti o altri elementi selezionabile dal "Plot Items Menu" nella parte destra dello schermo.

Dalla barra principale, selezionando il comando "File - Call" è possibile caricare un file di testo, con estensione ".DAT", nel quale possono essere scritti tutti i comandi, che vengono letti dal software in ordine, così da realizzare il modello.

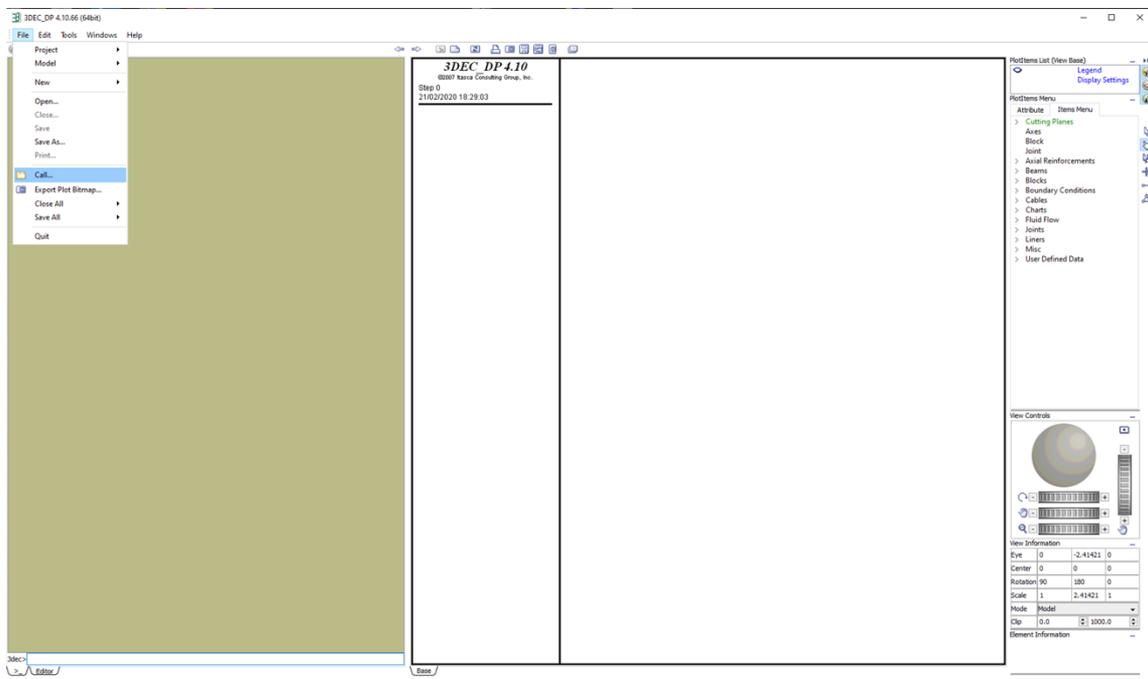


Figura 7.10: Interfaccia del software 3DEC.

Questi file di input sono stati creati per fasi successive, distinguendo i vari processi necessari per la modellazione. In questo modo si conferisce maggior flessibilità all'elaborazione, rendendo più agevole l'eventuale modifica di alcuni parametri e riducendo notevolmente il tempo di modellazione, grazie alla possibilità di riattivare i file salvati nel passaggio da una fase a quella successiva.

La struttura dei file di input (riportati per esteso in Allegato 3) è così organizzata:

1. *GEOMETRIA* → per la descrizione geometrica dell'ammasso roccioso;
2. *SEZIONAMENTO* → per la realizzazione delle sezioni in cui si andranno ad applicare le pressioni idrostatiche;
3. *PROPRIETÀ* → per la caratterizzazione meccanica dell'ammasso e delle discontinuità;
4. *VINCOLI* → per la descrizione delle condizioni tensionali e di vincolo al contorno;
5. *DISTRIBUZIONE DELLA PRESSIONE IDROSTATICA* → per l'applicazione delle pressioni idrostatiche, sono stati realizzati due file di questo tipo per le distribuzioni considerate;
6. *CICLI* → per la fase di calcolo.

#### 7.4.1. GEOMETRIA DEL MODELLO

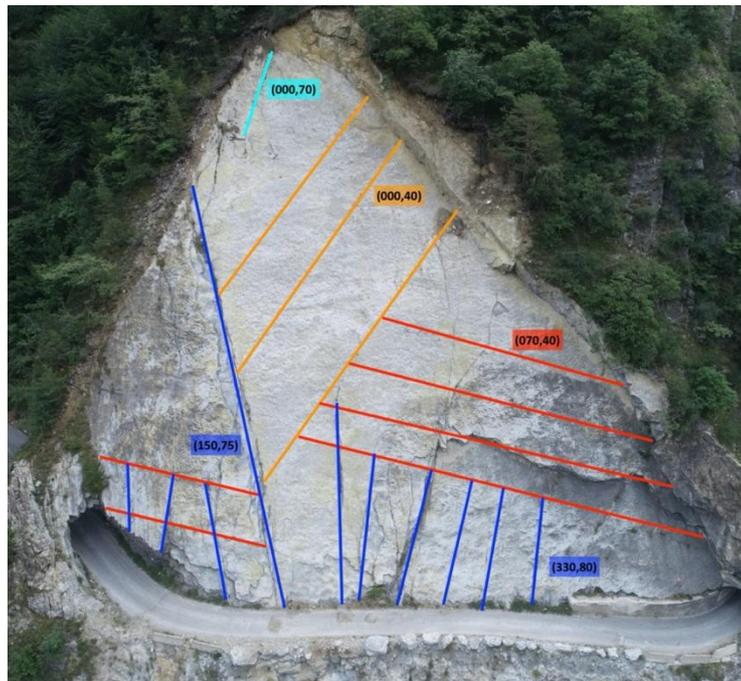
---

Nel caso in esame si è scelto di rappresentare l'ammasso roccioso, costituito da lastre di un metro di spessore, attraverso un insieme dei blocchi rigidi. Dal rilievo geomeccanico, sono stati individuati alcuni sistemi di discontinuità che vanno a identificare delle lastre di varia forma e dimensione.

Come specificato precedentemente, il modello è semplificato e non intende analizzare il fenomeno nel suo complesso (non si hanno dati sufficienti per comprendere i volumi mobilitati e la reale estensione areale e gli spessori del fenomeno) ma intende analizzare le condizioni di stabilità di una singola lastra per comprendere i possibili fattori instabilizzanti.

All'inizio di questo capitolo è stata descritta procedura con la quale si è andati a definire la i piani di discontinuità o di debolezza che delimitano le lastre (Figura 7.3). Nella Figura 7.11, nella pagina seguente, sono indicati quelli che sono i giunti che sono stati inseriti nel software per andare a realizzare il modello.

Il sistema di riferimento de software individua: con l'asse y, il Nord; con l'asse x, l'Est e mentre l'asse z rappresenta la quota. Il punto di partenza per la realizzazione del modello è la definizione di un blocco unico, di dimensioni adeguate, dal quale, mediante l'inserimento di piani è possibile "ritagliare" altri blocchi. Il blocco viene realizzato attraverso il comando "poly brick" con il quale si vanno a definire le dimensioni del parallelepipedo di partenza.



*Figura 7.11: Piani di discontinuità individuati.*

In questo caso il fronte della frana ha una direzione di immersione (Dip direction) di  $240^\circ$ , per cui il blocco di partenza è stato ritagliato in un secondo parallelepipedo con le facce rivolte rispettivamente a  $240^\circ$  e  $150^\circ$  di dip direction (Figura 7.12).

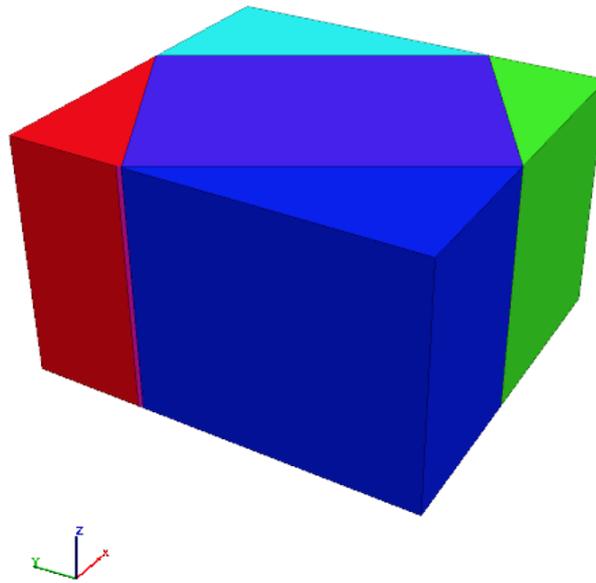


Figura 7.12: Ritaglio del parallelepipedo di partenza.

I piani vengono inseriti nel modello attraverso il comando “jset” strutturato nel modo seguente:

*“jset dip <v> dd <v> or x , y , z”*

Si inseriscono i valori di dip e dip direction del giunto considerato l’origine del piano, attraverso le coordinate x, y e z del punto.

Ogni blocco viene individuato nel software attraverso un numero identificativo, così attraverso il comando “delete” è possibile eliminare i blocchi non necessari.

Si vanno quindi a inserire i successivi piani necessari per la realizzazione del modello. Per prima cosa si inseriscono i piani che vanno a definire i confini della geometria che si vuole realizzare.

Inserendo il piano di scivolamento, che in questo caso avrà dip pari a 50° e dip direction pari a 240°, si realizza il fronte del versante e, aggiungendo lo stesso piano distante un metro dal primo si crea la lastra che rappresenta il piano di stratificazione del quale si vuole analizzare il cinematisimo. Così eliminando ancora una volta i blocchi non necessari, si ottiene il modello di base che rappresenta il pendio in questione, mostrato in Figura 7.13.

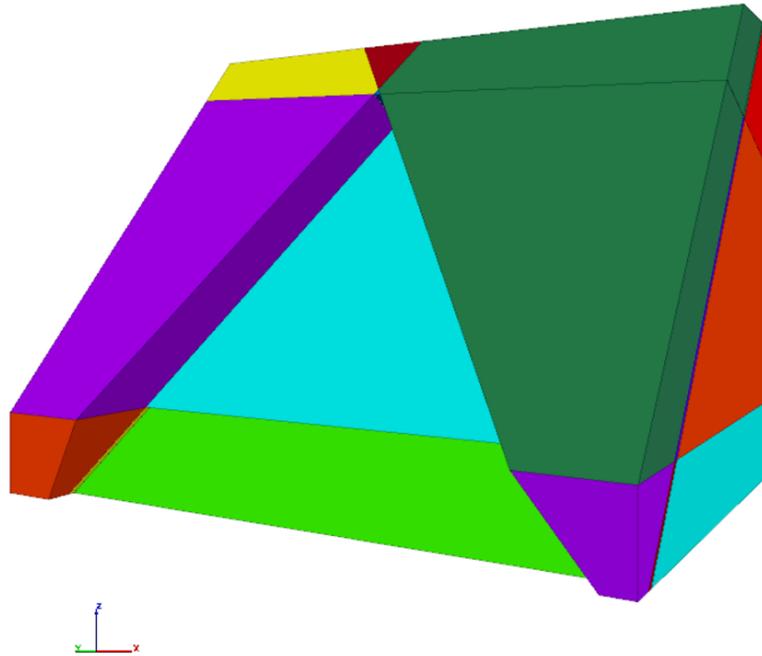
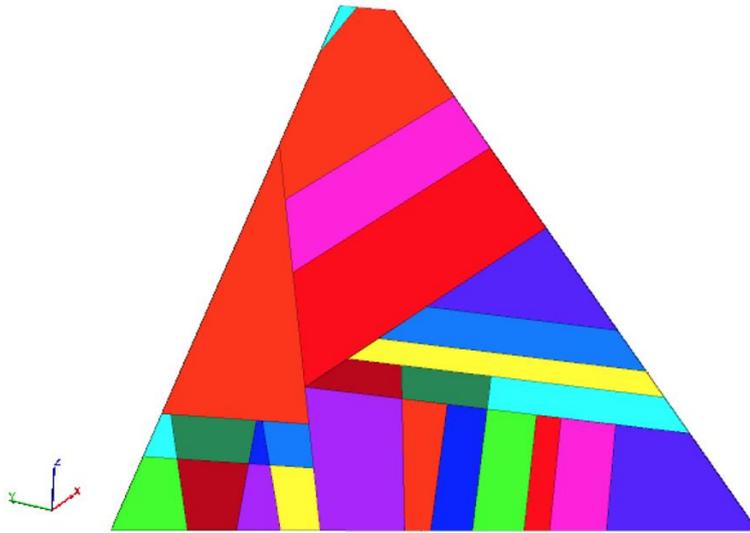


Figura 7.13: Modello di base del pendio.

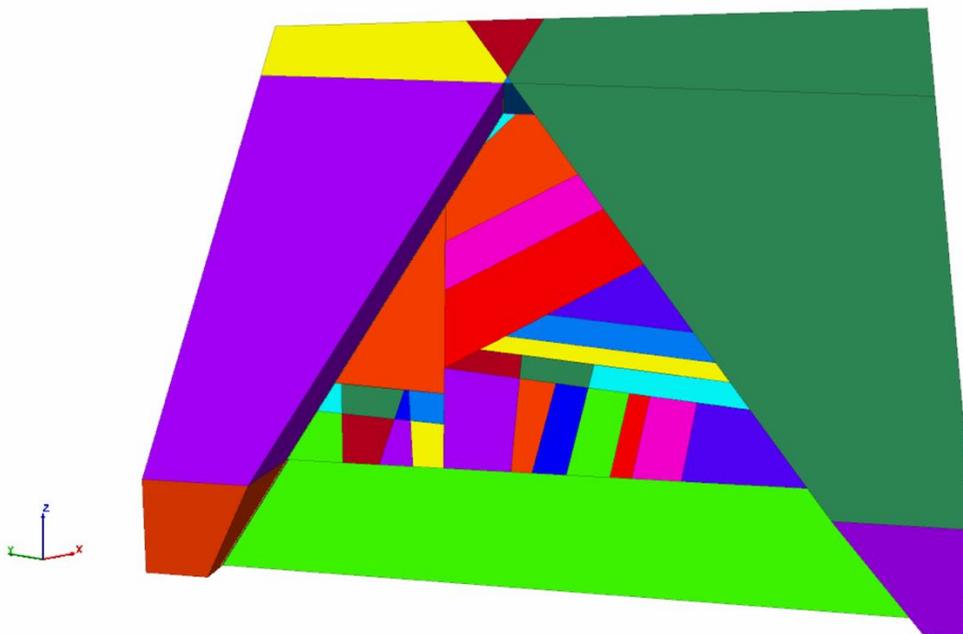
In questa fase di realizzazione del modello, risultano molto utili i comandi *“hide”* e *“show”*. Questi permettono di andare rispettivamente a nascondere o visualizzare singoli blocchi o parti del modello, attraverso il loro codice identificativo. In questo modo si possono inserire i piani di discontinuità solo su porzioni del modello in modo da andare *“ritagliare”* i blocchi nella sezione desiderata.

Si isola quindi la singola lastra si inseriscono i piani individuati in Figura 7.11. Come si può notare alcuni di questi piani non si estendono per tutta la lastra ma sono individuati solo in alcune porzioni. Anche in questo caso si utilizza il comando *“hide”* andando di volta in volta a isolare le porzioni in cui si vogliono inserire i piani. Il risultato di tale processo è la realizzazione di un insieme di blocchi definiti dai sistemi di discontinuità individuati, come mostrato nella Figura 7.14 successiva.



*Figura 7.14: Sezionamento della lastra in blocchi.*

In definitiva, il modello totale sarà costituito dal piano di scivolamento su cui poggia la lastra sezionata da giunti che formano lastre di dimensione e forma variabile. La geometria del modello è così completa e viene riportata nella Figura 7.15 nella pagina seguente.



*Figura 7.15: Geometria del modello totale.*

#### 7.4.2. DIVISIONE IN SEZIONI

---

Questa fase in realtà rientra ancora nella definizione geometrica del modello, o per lo meno in quella che si può definire come una individuazione di condizioni fittizie utili alla simulazione delle condizioni del versante.

Si andrà quindi, a suddividere l'intera lastra in fasce orizzontali e verticali in modo da poter applicare in queste una pressione idrostatica. Al fine di simulare una distribuzione triangolare delle pressioni sul pendio, si è pensato di suddividerlo in sezioni in modo da applicare in ogni regione un valore di pressione costante, ma in ciascuna di esse differente seguendo una distribuzione a gradini.

Le distruzioni sono riportate nella Figura 7.21 e verranno descritte nel paragrafo 7.4.5.

Poiché si vuole che la pressione agisca solo sul contatto fra il piano di scivolamento e la faccia adiacente di ciascun blocco, la pressione verrà applicata solo in alcuni intervalli definiti attraverso il comando "*range*". In questo senso è risultato utile sfruttare questo comando nel modo seguente:

*"range rintersection ireg1 ireg2"*

Il comando "*rintersection*" seleziona i contatti che collegano un blocco con il numero di regione *ireg1* e un secondo blocco con il numero di regione *ireg2*. Ciascun blocchetto è stato quindi definito, attraverso il comando "*mark region*", con un numero identificativo che definisce la regione in cui: il primo numero definisce la zona in cui verrà applicata la pressione costante e il secondo il numero progressivo del blocchetto appartenente a quel determinato settore. Il procedimento è esplicitato nel file di input in Allegato 3, denominato con il nome "*Sezionamento*". Per chiarire si riporta come è stata definita la numerazione nella Figura 7.16 seguente.

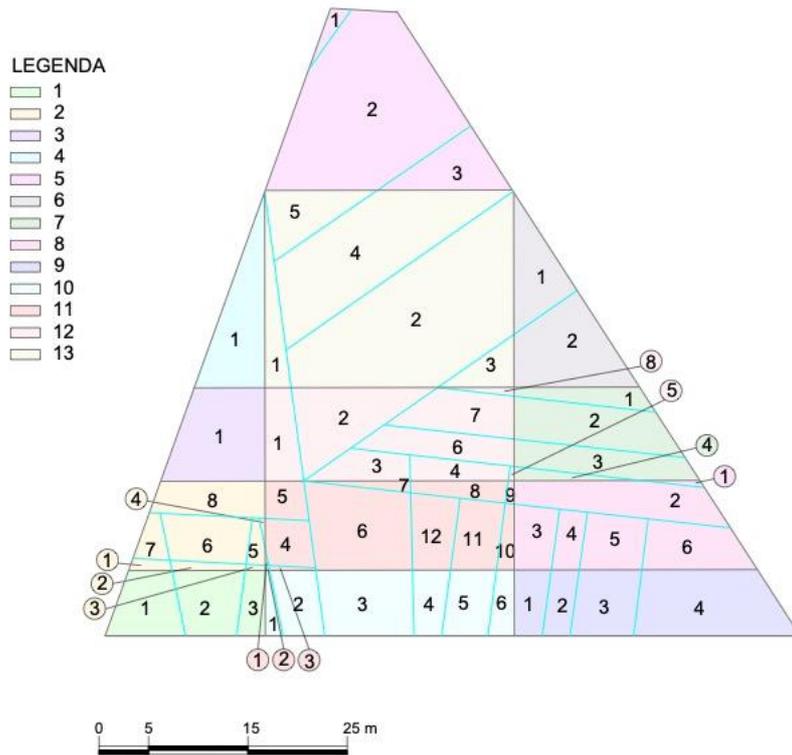


Figura 7.16: Numerazione delle regioni.

Come si può notare dalla Figura 7.17 seguente, inserendo questi giunti verticali e orizzontali i blocchi vengono ancora suddivisi in piccole parti.

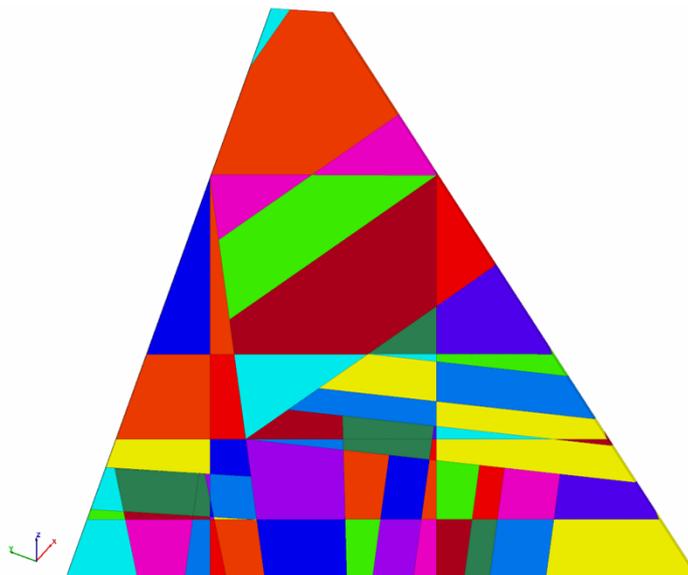


Figura 7.17: Lastra dopo l'inserimento dei giunti verticali e orizzontali per andare ad ottenere le fasce.

Questi giunti non sono reali per cui attraverso il comando “*join on*” tutti i singoli blocchi sono stati riassemblati in modo da ottenere il modello di partenza mostrato in Figura 7.18.

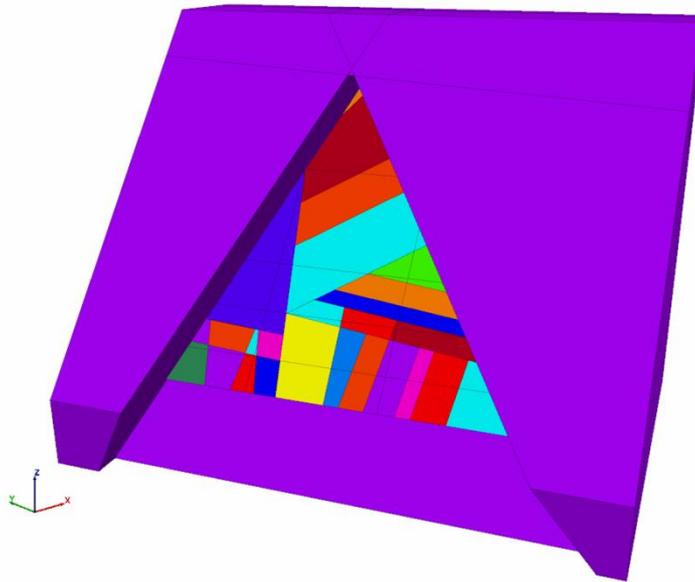


Figura 7.18: Modello definitivo.

#### 7.4.3. DEFINIZIONE DELLE PROPRIETÀ DEI GIUNTI

---

Come precedentemente detto in questo caso per la modellazione sono stati utilizzati blocchi rigidi per cui l'unico parametro da assegnare è la densità del materiale.

Il peso specifico della matrice rocciosa è stato posto pari a:

$$\gamma = 27 \frac{kN}{m^3}$$

Per quanto riguarda i giunti invece il modello costitutivo utilizzato è quello “*Coulomb slip with residual strength*”, individuato con il comando “*jcons 2*” e descritto nel paragrafo 7.3.

Attraverso il comando “*change*” è possibile andare ad assegnare, dopo aver definito i vari materiali, a giunti differenti proprietà differenti.

Nella letteratura geomeccanica i ponti di roccia integra sono convenzionalmente indicati come “rock bridges” (*Jaeger, 1971; Jennings, 1971; Call & Nicholas, 1978; ISRM, 1981; Einstein et alii, 1983; Gehle & Kutter, 2003*) cui corrisponde il termine italiano di “ponti di roccia” (*Martinetti & Ribacchi, 1976; Scavia e Saetta, 2001*). Poiché la dimensione e l’ubicazione dei ponti di roccia sono difficilmente desumibili dall’osservazione esterna del versante, il loro contributo resistente, spesso decisivo per l’equilibrio, viene in genere trascurato nell’analisi di stabilità e nella progettazione dei versanti in roccia (*Lajtai, 1969; Brown, 1970; Martinetti & Ribacchi, 1976; Glynn et alii, 1978*).

In realtà la presenza dei ponti di roccia, nel caso frequente di giunti intermittenti (*Gehle & Kutter, 2003*) determina un importante contributo resistente aggiuntivo del sistema. Secondo il più comune approccio questo contributo viene trattato come un incremento resistente attribuito alla coesione della roccia intatta mobilizzata sulla superficie di potenziale rottura corrispondente al giunto intermittente (*Jaeger, 1971; Jennings, 1971; ISRM, 1978; Einstein et alii, 1983*). Il valore della coesione viene stimato in prima approssimazione, facendo riferimento alla resistenza a trazione della roccia integra (*ISRM, 1978; Einstein et alii, 1983*).

Questa versione del software 3DEC non considera i giunti discontinui e quindi la reale persistenza non può essere simulata. La presenza dei ponti di viene modellata attribuendo valori di resistenza a trazione e di coesione ai giunti. L’assegnazione di questi valori dipende dalle azioni che agiscono lungo la discontinuità: se sono azioni prettamente di taglio il ponte di roccia offre resistenza tramite la coesione, se agiscono sollecitazioni di trazione, ovviamente, con la resistenza a trazione.

Attribuendo una percentuale della resistenza a trazione e della coesione massima ai giunti, che vanno a definire le lastre del modello, è possibile riprodurre la persistenza degli stessi. I valori massimi di resistenza a trazione e della coesione altro non sono che quelli corrispondenti alla roccia intatta. Infatti, attribuendo una resistenza a trazione e una coesione pari a quella della roccia intatta si può simulare una percentuale di ponti di roccia pari proprio al 100%, e cioè è come se il giunto non esistesse. Al contrario ponendo la resistenza a trazione o una coesione pari a zero il giunto può considerarsi completamente persistente.

Nel caso in esame non sono ancora disponibili dati di laboratorio o provenienti da prove in situ, per poter caratterizzare la roccia intatta. Al fine di eseguire l'analisi qui proposta si fa riferimento a dati di letteratura per poter definire e caratterizzare il materiale.

Si ha la necessità di conoscere quindi, la resistenza a trazione e la coesione della roccia intatta, poiché partendo da questi valori si potrà definire la percentuale di ponti di roccia che portano a rottura i giunti.

La modellazione è stata realizzata con blocchi rigidi, per cui non è necessario definire i parametri meccanici di resistenza e deformabilità della matrice rocciosa.

I parametri di resistenza della matrice rocciosa vengono calcolati col criterio di Hoek & Brown, sfruttando il software *RocData*, *Rocscience inc.* Trattandosi di roccia intatta il valore di GSI è preso pari a 100 e il fattore di disturbo è stato assunto pari a 0.

Facendo particolare riferimento al tratto di valle analizzato nel presente studio, in corrispondenza del vallone dell'Elva, si individuano dolomie di colore grigiastro. La dolomia è una roccia sedimentaria carbonatica costituita principalmente dal minerale dolomite, chimicamente un carbonato doppio di calcio e magnesio. In generale, le dolomie presentano una resistenza a compressione monoassiale media compresa tra 60 e 200 MPa, con valore minimo e massimo rispettivamente pari a 50 e 340 MPa (*De Vallejo, 2005*).

Il valore della resistenza a compressione uniassiale della roccia intatta considerato è di 175 MPa, con modulo di elasticità pari a 74375 MPa, e coefficiente  $m_i$  pari a 9, come indicato nella libreria del software *RocData*.

La geometria viene definita in modo tale da poter dare una stima del valore dello stato tensionale in situ e dunque la densità del materiale è settata su 27 kN/m<sup>3</sup> e l'altezza della lastra è pari a 1 metro. Gli involucri ottenuti rappresentano il criterio di Hoek & Brown sul piano  $\sigma - \tau$  e sul piano  $\sigma_1 - \sigma_3$  (Figura 7.19).

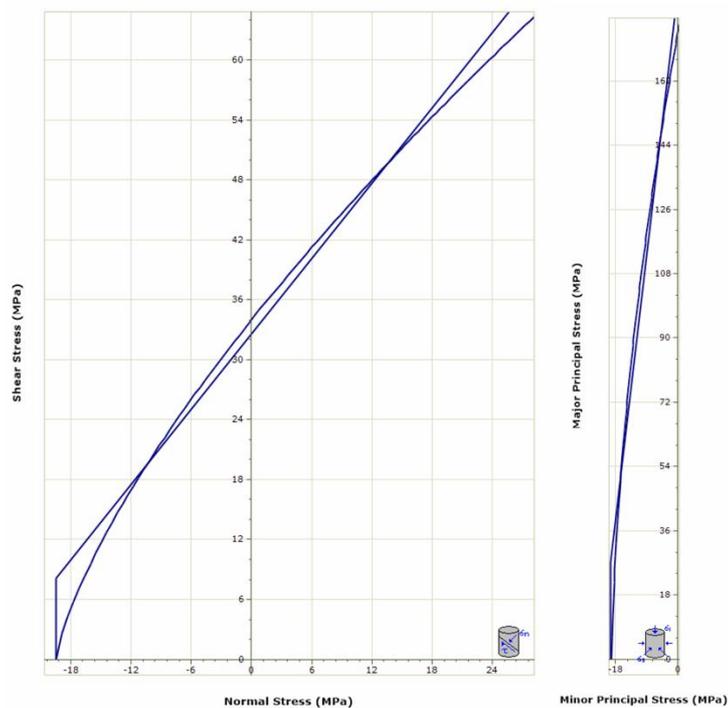


Figura 7.19: (a sinistra) Inviluppo di rottura di Hoek & Brown sul piano  $\sigma$ - $\tau$ ; (a destra) inviluppo di rottura sul piano  $\sigma_1$ - $\sigma_3$ .

I dati di input vengono riassunti in Tabella 7.7.

Tabella 7.7: Parametri per il calcolo dell'inviluppo di rottura

Classificazione di Hoek & Brown				
$\sigma_{ci}$ [MPa]	GSI	$m_i$	D	$E_i$
175	100	9	0	74375
Inviluppo Criterio di rottura				
$\sigma_{3,max}$ [MPa]	Peso per unità di volume [kN/m <sup>3</sup> ]		Altezza [m]	
0.043	27		1	

Il software restituisce un valore di coesione pari a 32.6 MPa.

Per quanto riguarda la resistenza a trazione questa verrà posta pari a 1/10 della resistenza a compressione monoassiale:

$$T_o = \frac{1}{10} C_o = 17.5 \text{ MPa}$$

Per quanto riguarda il piano di scivolamento invece, si è pensato di attribuire solo un valore di angolo d'attrito pari a 40° considerandolo completamente persistente.

I valori dei parametri assegnati ai giunti sono riportati nella Tabella 7.8 seguente.

*Tabella 7.8: Proprietà dei giunti.*

<b>Piani</b>	<b>jmat</b>	<b>K<sub>n</sub> [MPa]</b>	<b>K<sub>s</sub> [MPa]</b>	<b>T<sub>o</sub> [MPa]</b>	<b>Coesione [MPa]</b>	<b>Angolo d'attrito</b>
<b>STRATO</b>	<b>1</b>	1000	1000	0	0	40
<b>GIUNTI</b>	<b>2</b>	1000	1000	17.5	32.6	0

Come si vedrà nel paragrafo 7.5 si simulerà l'influenza dei ponti di roccia, considerando come resistenza a trazione e coesione del giunto, un valore percentuale del valore massimo. Queste simulazioni saranno effettuate considerando tre situazioni: l'assenza di acqua, il giunto completamente saturo o parzialmente saturo.

#### 7.4.4. DEFINIZIONE DELLE CONDIZIONI AL CONTORNO

---

Per questa analisi, il carico applicato è di tipo gravitativo, infatti si vuole simulare lo scivolamento delle lastre dovute proprio alla rottura per trazione dei giunti. La gravità viene applicata al modello attraverso il comando "gravity 0, 0, -9.81".

Ovviamente è necessario andare a vincolare il piano di scivolamento in modo che la gravità influisca solo sui blocchi. Il vincolo viene applicato al modello attraverso il comando "FIX" andando a selezionare le regioni e le facce da vincolare.

#### 7.4.5. DISTRIBUZIONE DELLA PRESSIONE IDROSTATICA

---

Nel presente studio si intendono analizzare esclusivamente condizioni di pressione idrostatica e non di flusso. Si simula la presenza dell'acqua lungo l'intero piano di scivolamento della lastra, considerando il possibile piano di scivolamento come un piano continuo.

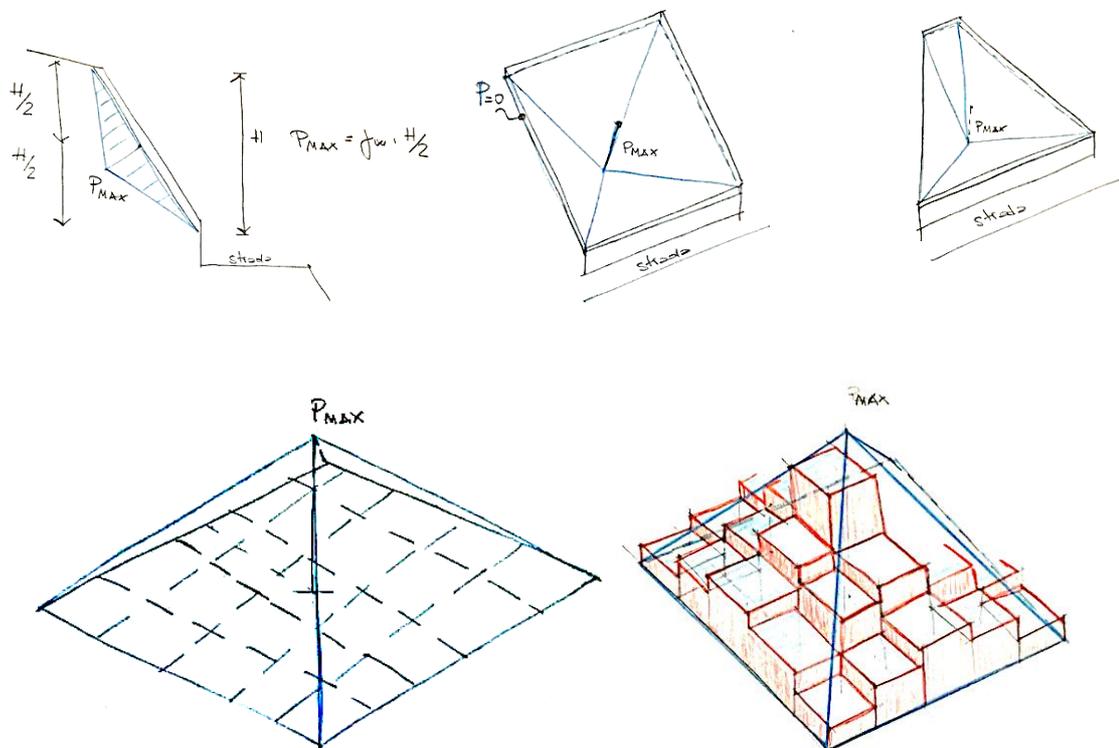


Figura 7.20: Schizzi della schematizzazione delle distribuzioni.

Non riuscendo a simulare la variazione lineare ipotizzata, il piano di scivolamento è stato suddiviso virtualmente in porzioni su ciascuna delle quali è stata applicata una pressione idrostatica costante pari al valore medio agente sulla stessa secondo lo schema ipotizzato (Figura 7.20).

Nel paragrafo 7.4.2 è stata descritta la procedura grazie alla quale si è suddivisa la lastra in fasce alle quali applicare le pressioni idrostatiche. In questa fase sono state definite due differenti distribuzioni delle pressioni. La distribuzione considerata è quella triangolare in quanto le lastre risultano svincolate al piede anche dal punto di vista idraulico. In una prima distribuzione si è considerato il piano di scivolamento completamente saturo, mentre la seconda distribuzione considera che le pressioni idrauliche agiscono solo sulla metà inferiore del piano.

Poiché è possibile applicare pressioni idrostatiche costanti nelle regioni specificate, le distribuzioni di pressione variabili linearmente sono state approssimate attraverso una distribuzione a gradoni.

Le due distribuzioni considerate sono riportate nella Figura 7.21 seguente e i file di input sono riportati in Allegato 3.

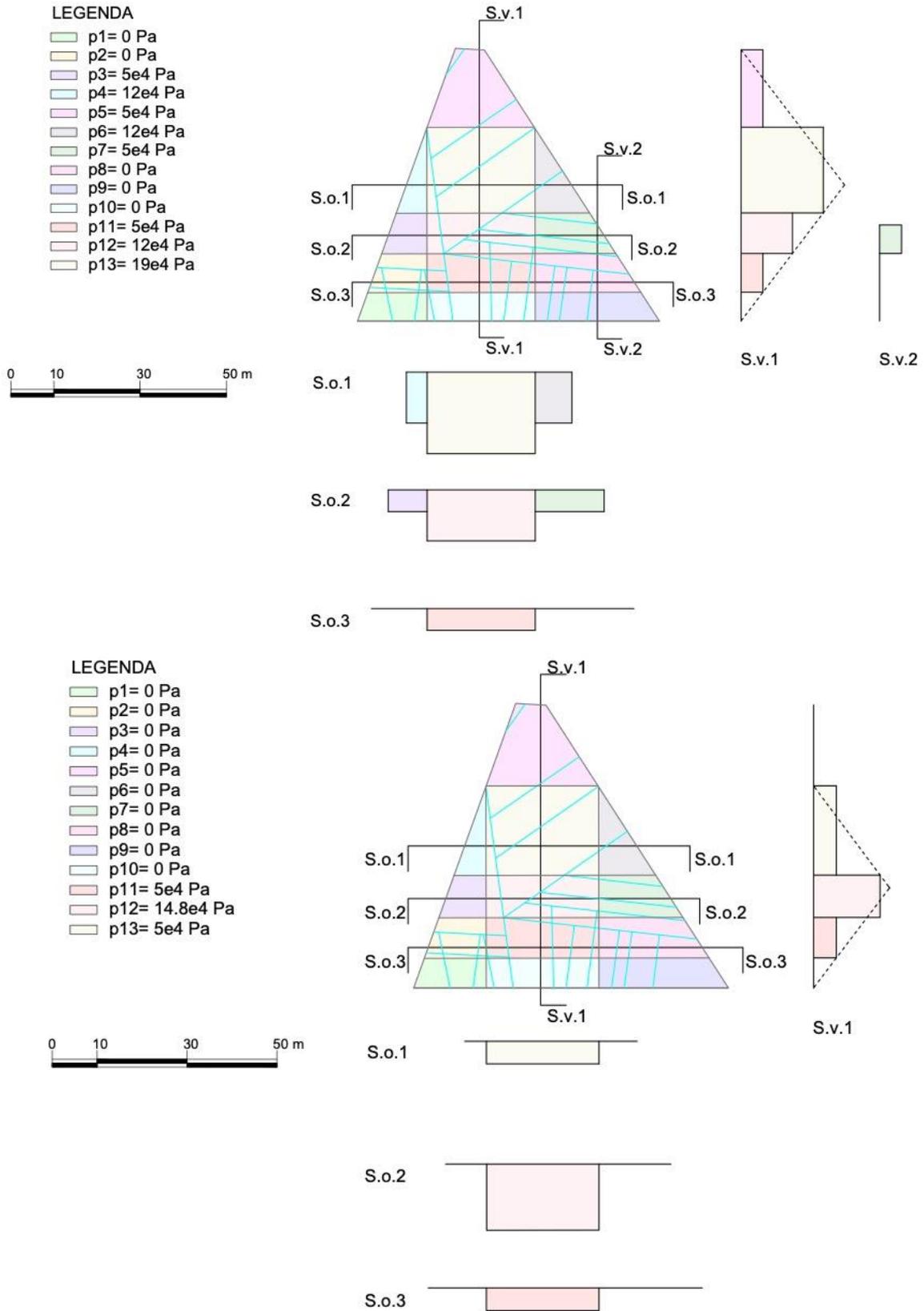


Figura 7.21: (sopra) Distribuzione con pressione agente su tutto il pendio; (sotto) Distribuzione pressione agente solo su metà pendio.

Il comando *"PFIX"* consente di specificare la pressione del fluido nei sub-contatti dei giunti per blocchi rigidi o deformabili. Le pressioni del fluido specificate non cambiano fino a quando non viene eseguito un comando *"PFIX"* diverso o il contatto secondario viene eliminato. Ogni comando *"PFIX"* aggiunge pressione al sub-contatto. Pressioni positive provocano l'espansione del giunto. La pressione del fluido è fissata ai sub-contatti che si trovano all'interno dell'intervallo definito attraverso il comando *"range"*. Come spiegato in precedenza il range è stato definito andando ad attribuire un numero identificativo a ciascuna regione (Figura 7.16).

Il comando con il quale sono stati assegnati i valori di pressione è:

*"pfix <v> range rintersection ireg1 ireg2"*

## 7.5. SIMULAZIONI EFFETTUATE

---

In questo paragrafo si descrivono le simulazioni numeriche effettuate nelle tre condizioni considerate:

- *Assenza di acqua;*
- *Giunto completamente saturo;*
- *Giunto parzialmente saturo.*

Come descritto nel paragrafo 7.4.3 precedente, il modello è semplificato e non intende analizzare il fenomeno nel suo complesso (non si hanno dati sufficienti per comprendere i volumi mobilitati e la reale estensione areale e gli spessori del fenomeno) ma intende analizzare le condizioni di stabilità di una singola lastra per comprendere i possibili fattori instabilizzanti. In questo caso attribuendo una percentuale della resistenza a trazione e della coesione massima ai giunti definenti le lastre del modello, è possibile riprodurre la persistenza degli stessi. Infatti, attribuendo una resistenza a trazione e una coesione pari a quella della roccia intatta si può simulare una percentuale di ponti di roccia pari proprio al 100%, e cioè è come se il giunto non esistesse. Al contrario ponendo la resistenza a trazione e una coesione pari a zero il giunto può considerarsi completamente persistente.

Questa analisi verrà effettuata nelle tre condizioni diminuendo gradualmente i valori di coesione e resistenza a trazione finché non si riscontrano movimenti dei blocchi.

Poiché 3DEC modella un sistema non lineare man mano che si evolve nel tempo, l'interpretazione dei risultati può essere più difficile che con un programma convenzionale ad elementi finiti, che produce una "soluzione" al termine della sua fase di calcolo. Esistono diversi indicatori che possono essere utilizzati per valutare lo stato del modello numerico in analisi statica, e fra questi indicatori si hanno le forze sbilanciate o "*unbalanced forces*".

Le forze vengono accumulate su ciascun centroide di blocchi rigidi e su ciascun punto di griglia di blocchi deformabili. All'equilibrio, la somma algebrica di queste forze è quasi pari a zero (cioè, le forze che agiscono su un lato del centroide del blocco o del punto di griglia bilanciano quelle che agiscono sull'altro). In ogni timestep, viene determinata la massima

forza sbilanciata per l'intero modello. Questa forza può essere salvata e registrata attraverso le “*history*”, e visualizzata in un grafico.

La forza sbilanciata è importante nella valutazione dello stato del modello per l'analisi statica, ma questa deve essere confrontata con le forze interne tipiche che agiscono nel modello. In altre parole, è necessario sapere cosa si intende per "piccola" forza. Indicando R come il rapporto tra la massima forza sbilanciata e la forza interna rappresentativa (espressa in percentuale), il valore di R non sarà mai pari a zero. Tuttavia, un valore dell'1% o 0,1% può essere accettabile come denotazione di equilibrio, a seconda del grado di precisione richiesto (ad es.  $R = 1\%$  può essere abbastanza buono per uno stadio intermedio in una sequenza di operazioni, mentre  $R = 0,1\%$  può essere utilizzato se è richiesta una distribuzione di sollecitazione o spostamento finale). Un valore basso di R indica quindi che le forze si bilanciano su tutti i centroidi o su tutti i punti della griglia.

Nelle seguenti simulazioni si useranno quindi le “*unbalanced forces*” per verificare se, all'interno del modello, ci siano stati degli spostamenti prima di arrivare all'equilibrio. Questo è evidente se si guarda il grafico delle forze sbilanciate: se l'equilibrio viene raggiunto al primo timestep, il grafico delle forze non bilanciate tende rapidamente a zero; se all'interno del modello si generano degli spostamenti, prima di arrivare all'equilibrio, nel grafico si avranno dei picchi (Figura 7.22).

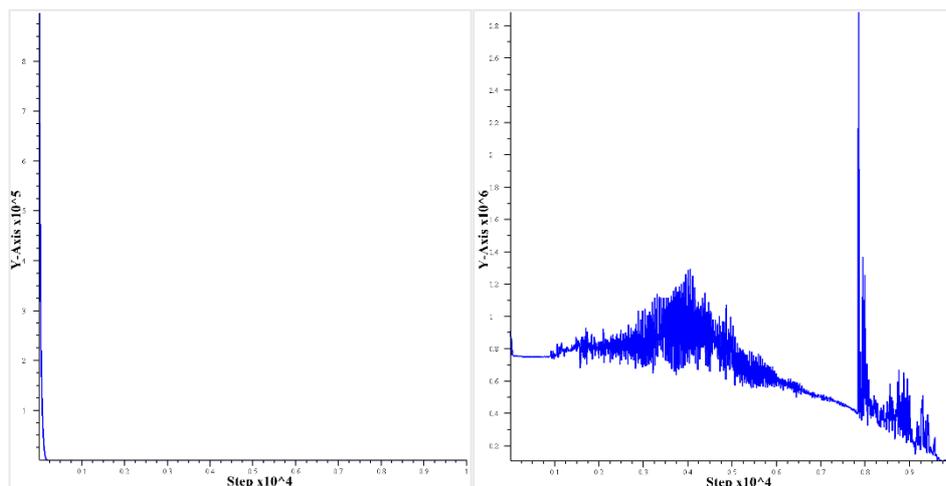


Figura 7.22: Grafici delle unbalanced forces: (a sinistra) l'equilibrio è raggiunto al primo step; (a destra) si generano spostamenti all'interno del modello.

### 7.5.1. ASSENZA DI ACQUA

---

Le prime simulazioni vengono effettuate considerando il pendio completamente asciutto, e quindi soggetto alla sola forza di gravità.

Si parte andando ad attribuire ai giunti i valori massimi di resistenza a trazione ( $T_o$ ) e coesione ( $c$ ). Successivamente si diminuiscono questi valori, considerandone una percentuale, finché, analizzando il grafico delle forze sbilanciate, non si evidenziano dei picchi all'interno di esso, che stanno a significare l'insorgenza di spostamenti nel pendio.

Come spiegato nel paragrafo precedente un valore percentuale di  $T_o$  e  $c$ , corrispondono a una percentuale di ponti di roccia ipotizzati sul giunto. Le simulazioni sono state effettuate per i valori di  $T_o$  e  $c$  riportati nella Tabella 7.9 seguente.

Tabella 7.9: Percentuali di ponti di roccia.

Persistenza del giunto	Ponti di roccia	$T_o$ [MPa]	Coesione [MPa]	Equilibrio
0%	100%	17.5	32.6	SI
50%	50%	8.75	16.3	SI
75%	25%	4.375	8.15	SI
90%	10%	1.75	3.26	SI
95%	5%	0.875	1.63	SI
99%	1%	0.175	0.326	SI
99.5%	0.5%	0.0875	0.163	SI
99.75%	0.25%	0.04375	0.0815	NO

In questo caso è evidente che anche con una percentuale bassissima di ponti di roccia, pari allo 0.5%, non si hanno spostamenti e rottura dei giunti.

Di seguito si riportano, in Figura 7.23, i grafici delle “*unbalanced forces*” corrispondenti alla percentuale di ponti di roccia del 100% e dello 0.25%.

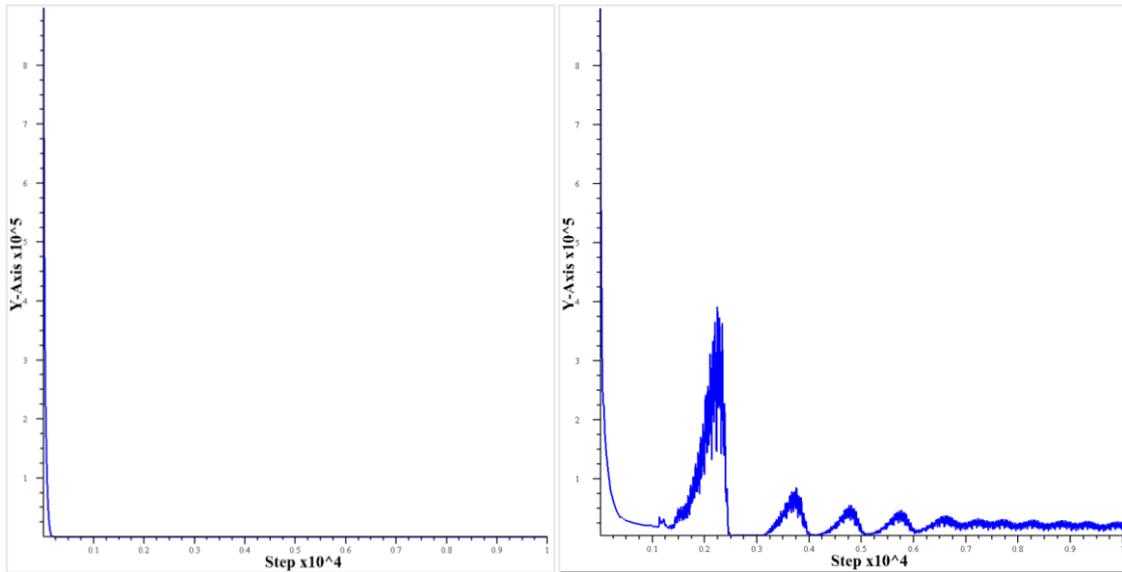


Figura 7.23: Grafici delle unbalanced forces: (a sinistra) 100% di ponti di roccia; (a destra) 0.25% di ponti di roccia.

Osservando il modello in realtà, non si riescono a percepire questi movimenti. Per visualizzare questo distacco basta ridurre la percentuale di ponti di roccia a un valore pari allo 0.1%, e si può vedere il crollo delle lastre. In Figura 7.24 si riportano i modelli nella situazione con percentuale di ponti di roccia pari allo 100% e allo 0.1%.

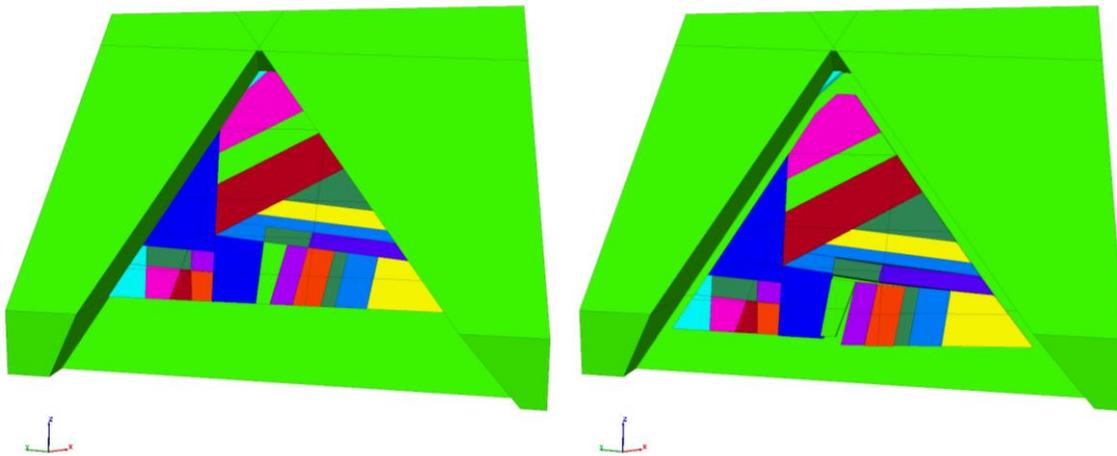


Figura 7.24: Modello numerico dopo 10000 timestep: (a sinistra) 100% di ponti di roccia; (a destra) 0.1% di ponti di roccia.

## 7.5.2. GIUNTO COMPLETAMENTE SATURO

In questo caso si applica al giunto una pressione idrostatica considerando il giunto completamente saturo. La distribuzione scelta e le modalità di applicazione della pressione al modello sono state descritte nel paragrafo 7.4.5 precedente.

Per chiarezza si riporta qui di seguito lo schema della distribuzione considerata.

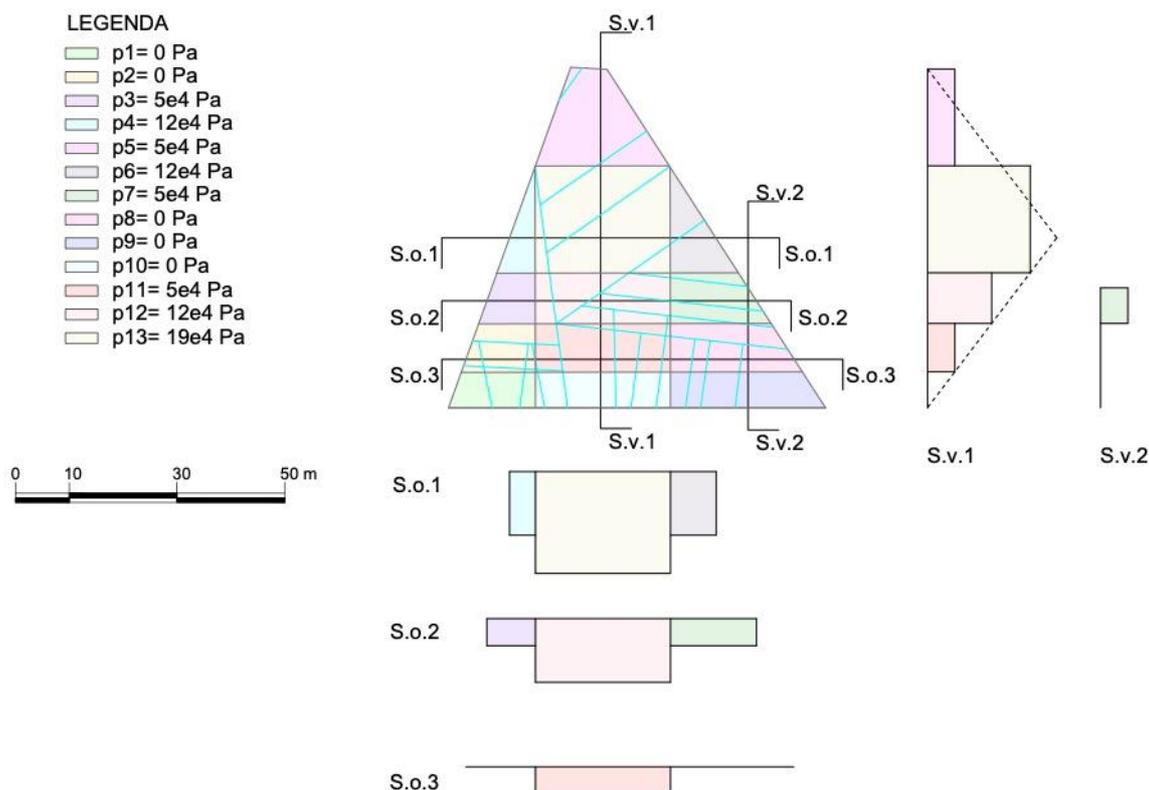


Figura 7.25: Figura 7.26: Distribuzione con pressione agente su tutto il pendio.

Anche in questo caso, si parte andando ad attribuire ai giunti i valori massimi di resistenza a trazione ( $T_o$ ) e coesione ( $c$ ). Successivamente si vanno a diminuire questi valori, considerandone una percentuale, e si analizza il grafico delle forze sbilanciate.

Le simulazioni sono state effettuate per i valori di  $T_o$  e  $c$  riportati nella Tabella 7.10 seguente.

Tabella 7.10: Percentuali di ponti di roccia.

Persistenza del giunto	Ponti di roccia	$T_o$ [MPa]	Coesione [MPa]	Equilibrio
0%	100%	17.5	32.6	SI
50%	50%	8.75	16.3	SI
75%	25%	4.375	8.15	SI
90%	10%	1.75	3.26	NO

Come era prevedibile, in questo caso, la percentuale di ponti roccia necessaria è aumentata al 10%. Questo è dovuto al fatto che la pressione idrostatica esercita sui blocchi una forza instabilizzante che fa sì che, sui giunti si sviluppi una forza tagliente che, se superata, ne crea il distacco.

Di seguito si riportano, Figura 7.27, i grafici delle “unbalanced forces” corrispondenti alla percentuale di ponti di roccia del 100% e dello 10%.

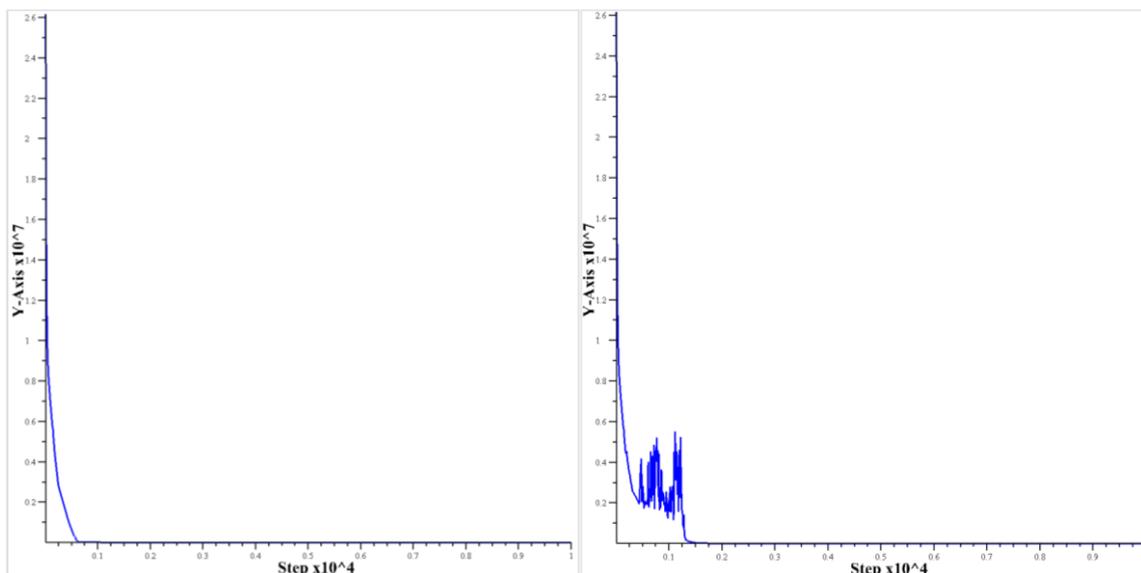
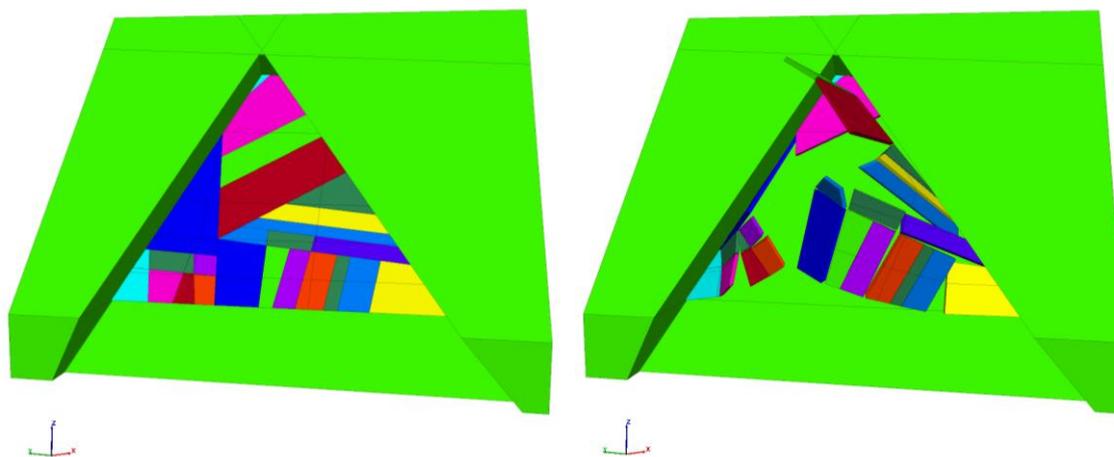


Figura 7.27: Grafici delle unbalanced forces: (a sinistra) 100% di ponti di roccia; (a destra) 10% di ponti di roccia.

Anche in questo caso per visualizzare questo distacco basta ridurre la percentuale di ponti di roccia a un valore pari al 5%, come mostrato in Figura 7.28.



*Figura 7.28: Modello numerico dopo 10000 timestep: (a sinistra) 100% di ponti di roccia; (a destra) 5% di ponti di roccia.*

### 7.5.3. GIUNTO PARZIALMENTE SATURO

L'ultima simulazione viene fatta applicando sempre una pressione idrostatica al giunto, ma considerandolo parzialmente saturato. La distribuzione scelta e le modalità di applicazione della pressione al modello sono state descritte nel paragrafo 7.4.5 precedente.

Per chiarezza si riporta qui di seguito lo schema della distribuzione considerata.

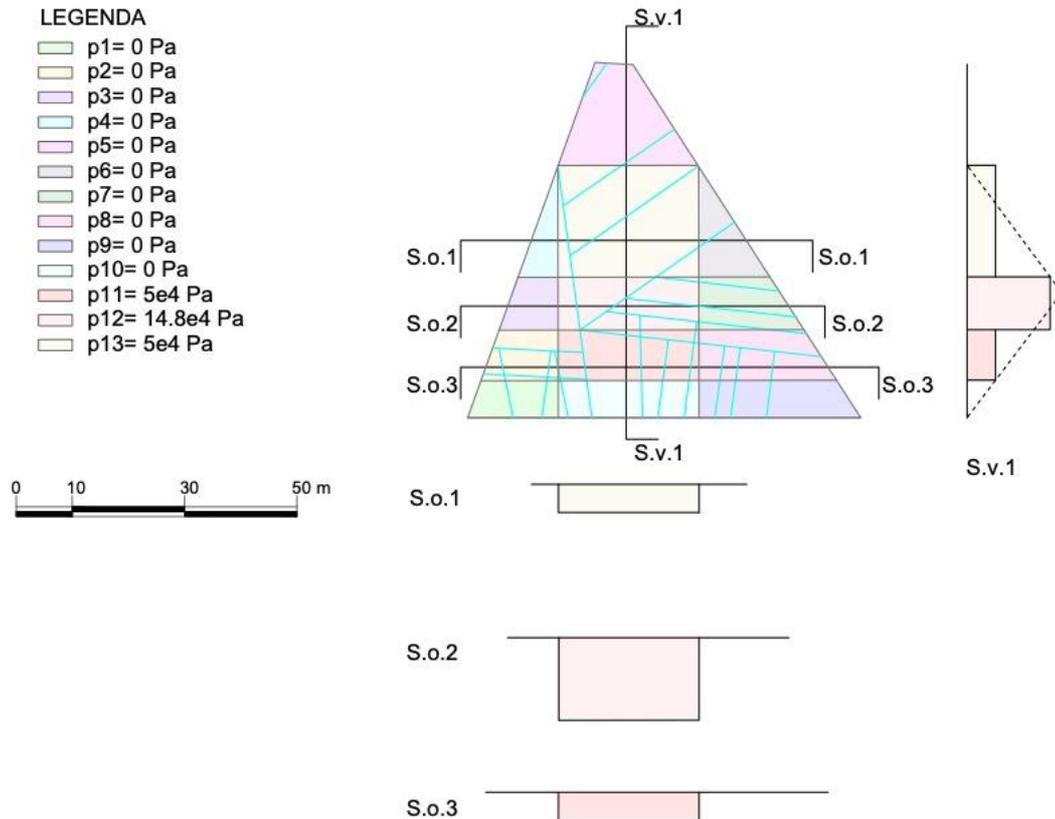


Figura 7.29: Distribuzione pressione agente solo su metà pendio.

In questo caso si è deciso di partire dalla percentuale di ponti di roccia pari al 10% che, nella condizione di giunto completamente saturo, portava a rottura. Infatti, considerando una distribuzione agente solo su metà pendio, è presumibile pensare che le condizioni siano migliorate e non ci si aspetta rottura.

Le simulazioni sono state effettuate per i valori di  $T_o$  e  $c$  riportati nella Tabella 7.11 seguente.

Tabella 7.11: Percentuali di ponti di roccia.

Persistenza del giunto	Ponti di roccia	$T_o$ [MPa]	Coesione [MPa]	Equilibrio
90%	10%	1.75	3.26	SI
95%	5%	0.875	1.63	NO

Quindi, la percentuale di ponti roccia necessaria è diminuita al 5%. Questo è dovuto al fatto che la pressione idrostatica è applicata solo nella parte più bassa del pendio.

Di seguito si riportano, Figura 7.30, i grafici delle “unbalanced forces” corrispondenti alla percentuale di ponti di roccia del 100% e dello 5%.

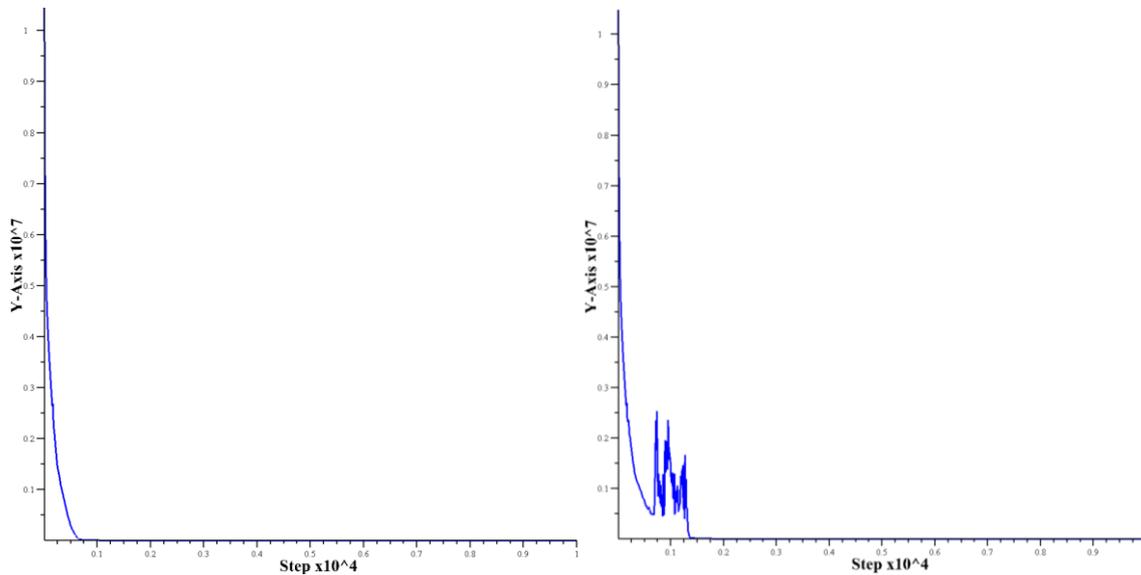


Figura 7.30: Grafici delle unbalanced forces: (a sinistra) 100% di ponti di roccia; (a destra) 5% di ponti di roccia.

Per visualizzare il distacco dei blocchi si riduce la percentuale di ponti di roccia a un valore pari al 3%, come mostrato in Figura 7.31.

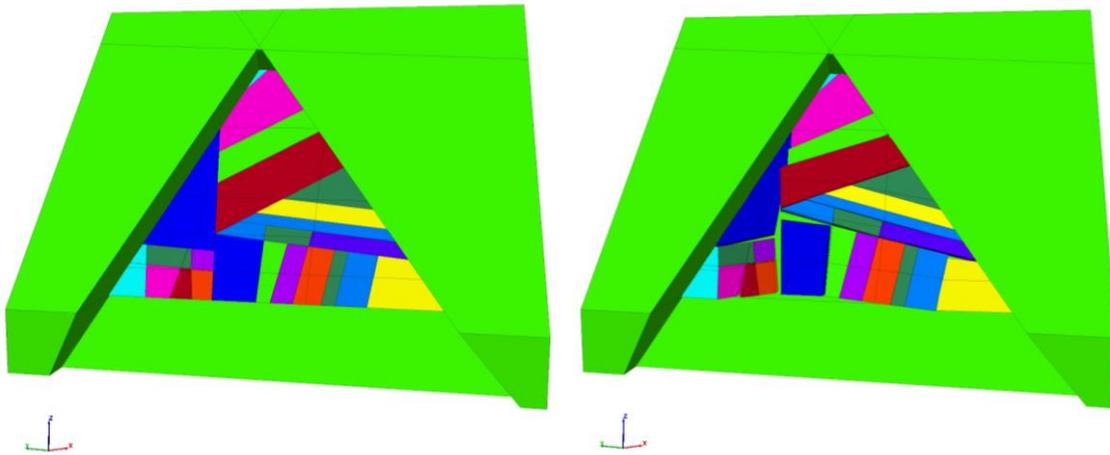


Figura 7.31: Modello numerico dopo 10000 timestep: (a sinistra) 100% di ponti di roccia; (a destra) 3% di ponti di roccia.

#### 7.5.4. VALORI DI COESIONE SUL PIANO DI SCIVOLAMENTO

---

Come ultima analisi si è pensato di andare ad attribuire al piano di scivolamento un valore di resistenza a trazione e coesione tale da andare ad equilibrare, nelle situazioni sbilanciate, le “*unbalanced forces*”. In questo modo non si va più a considerare il piano di scivolamento infinitamente persistente ma si attribuisce al piano una percentuale di ponti di roccia.

Nella prima simulazione, con assenza di acqua, si è visto che la percentuale di ponti di roccia necessaria è estremamente bassa, per cui il valore di coesione attribuito al piano di scivolamento è altrettanto piccolo.

Nelle simulazioni con pressione idrostatica le percentuali di ponti di roccia sono risultate pari al 10% e al 5%, rispettivamente nelle condizioni di giunto completamente o parzialmente saturo.

Per tentativi, si è andati a inserire valori di coesione e resistenza a trazione differenti fino al raggiungimento delle condizioni non sbilanciate.

Nella Tabella 7.12 seguente si riportano i valori individuati per tutte e tre le simulazioni.

Tabella 7.12: Coesione e resistenza a trazione applicate al piano di scivolamento.

Assenza di acqua				
Giunti		Piano di scivolamento		
Persistenza del giunto	Ponti di roccia	$T_o$ [MPa]	Coesione [MPa]	Percentuale
99.75%	0.25%	0.00009	0.00015	0.0005%
Giunto completamente saturo				
90%	10%	0.017	0.032	0.097%
Giunto parzialmente saturo				
95%	5%	0.0045	0.0084	0.026%

## 7.6. CONCLUSIONI SUI RISULTATI OTTENUTI

Dai risultati delle simulazioni effettuate è evidente che in assenza di azioni esterne al pendio (nelle condizioni di assenza di acqua), la rottura avverrebbe solo in presenza di discontinuità quasi completamente formate. Questo però non rappresenta la situazione in esame in quanto, come si è visto all'inizio del capitolo, sul bancale di roccia sono visibili discontinuità e piani di debolezza che comunque non risultano completamente formati. Va detto però che in questa modellazione si sono considerati giunti tutti uguali con caratteristiche uniformi. Applicando una pressione idrostatica al pendio si può notare come la presenza dei ponti di roccia sui giunti acquista maggiore importanza. Nelle simulazioni con pressione idrostatica le percentuali di ponti di roccia sono risultate pari al 10% e al 5%, rispettivamente nelle condizioni di giunto completamente o parzialmente saturo.

Anche in questa situazione semplificata e approssimata è possibile quindi considerare sufficientemente probabile la presenza di azioni esterne che abbiano portato alla rottura dei giunti.

Un altro aspetto interessante sarebbe quello di andare a considerare non solo la presenza di pressioni idrostatiche lungo il piano di scivolamento, ma anche fra i giunti stessi ad esempio per simulare pressioni dovute alla presenza di ghiaccio. Questo porterebbe probabilmente a condizioni di instabilità anche con di ponti di roccia più presenti.

## **8. CONCLUSIONI**

---

L'obiettivo del presente lavoro di tesi è stato quello di acquisire le informazioni preliminari, per una conoscenza approfondita dell'ammasso roccioso, attraverso azioni di rilievo che hanno consentito di studiare la struttura degli ammassi alla scala di versante in modo da individuare e misurare la presenza di discontinuità, la loro orientazione e spaziatura al fine di definire la distribuzione statistica dei volumi dei blocchi che possono distaccarsi.

A questo fine, data la rilevante estensione delle pareti rocciose presenti lungo l'intera strada per circa 9 km e il grado di pericolosità attuale della strada che presenta possibilità di distacco diffuse in tutte le pareti rocciose, si è deciso di applicare tecniche di rilievo di non-contatto. Tali metodologie hanno richiesto il rilievo fotogrammetrico da terra e da aria con droni condotto tramite la ripresa di alcune migliaia di scatti fotografici e la materializzazione di diversi punti di controllo rilevati con rilievo topografico tradizionale. Questo ha consentito la restituzione di un Modello Digitale del Terreno (DTM) lungo come l'intera strada e di una ventina di DTM di dettaglio utili per il rilievo geostrutturale che è stato condotto tramite un software dedicato (*Rockscan*).

Dall'analisi dei risultati ottenuti dal rilievo da non contatto, eseguito con il software *Rockscan* si può concludere che in generale in tutti i settori analizzati sono stati rilevati tre sistemi di discontinuità: quello del piano di strato, che risulta essere il più persistente, e almeno altri due sistemi, tra loro coniugati, individuati tra i piani di stratificazione, che possono andare a formare blocchi di diversa forma e dimensione. Inoltre, il piano di strato presenta inclinazione prevalentemente pseudo orizzontale nella prima parte del versante, ma tende a verticalizzarsi percorrendo il vallone verso nord.

Analizzando i dati di spaziatura si può notare che: nella parte bassa della strada, almeno per il primo tratto, la spaziatura media del piano di strato è compresa tra gli 80 e i 115 cm, formando banchi di roccia di spessore abbastanza consistente. Questo spessore diminuisce nella parte più a nord della strada bassa, raggiungendo una spaziatura media compresa tra i 20 e 50 cm.

Dalla successiva analisi dei cinematismi si può giungere alla conclusione che in generale l'ammasso sia soggetto al prevalentemente al cinematismo di scivolamento planare.

Questo è maggiormente presente nella parte di strada alta, precisamente partendo dal settore denominato B8, passando per la frana, fino ad arrivare alla fine del vallone.

Nella parte bassa, dove il piano di strato è pseudo orizzontale, si riscontra la presenza di due set coniugati pseudo verticali che formano con il piano di strato lastre orizzontali. Queste lastre possono subire una rottura per flessione con crollo di blocchi dall'alto.

Qui di seguito si riportano, in scala minore le tavole in A3, che sono state inserite alla fine del rilievo geomeccanico e dell'analisi dei cinatismi. Queste riassumono tutti quelli che sono stati i dati raccolti, in un ortofoto con indicazione degli stereogrammi delle misure e dei cinatismi trovati in ciascun punto, sia per la parte bassa che per la parte alta della strada.

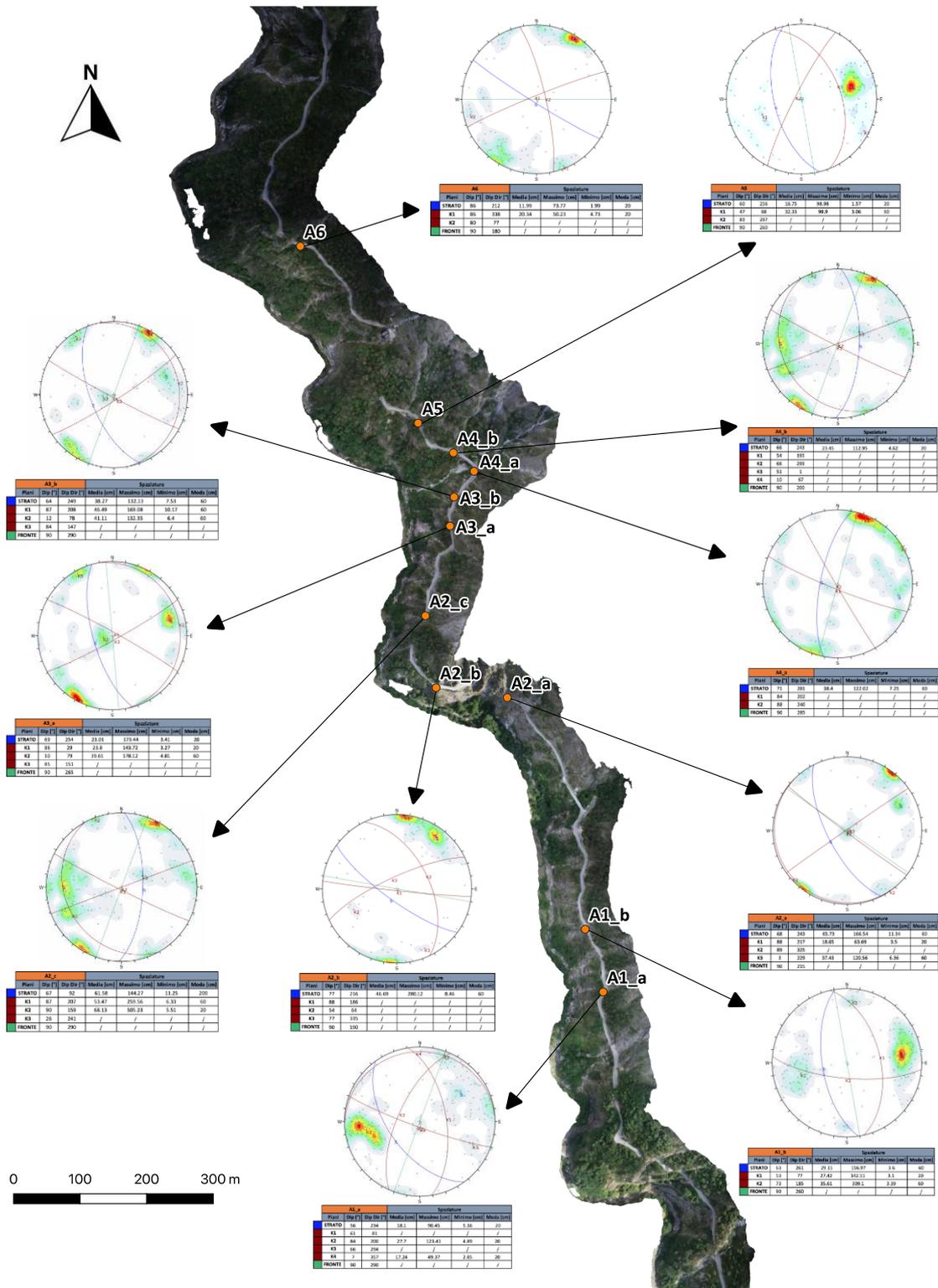


Figura 8.1: Tavole riassuntive sui risultati del rilievo geomeccanico: strada alta.

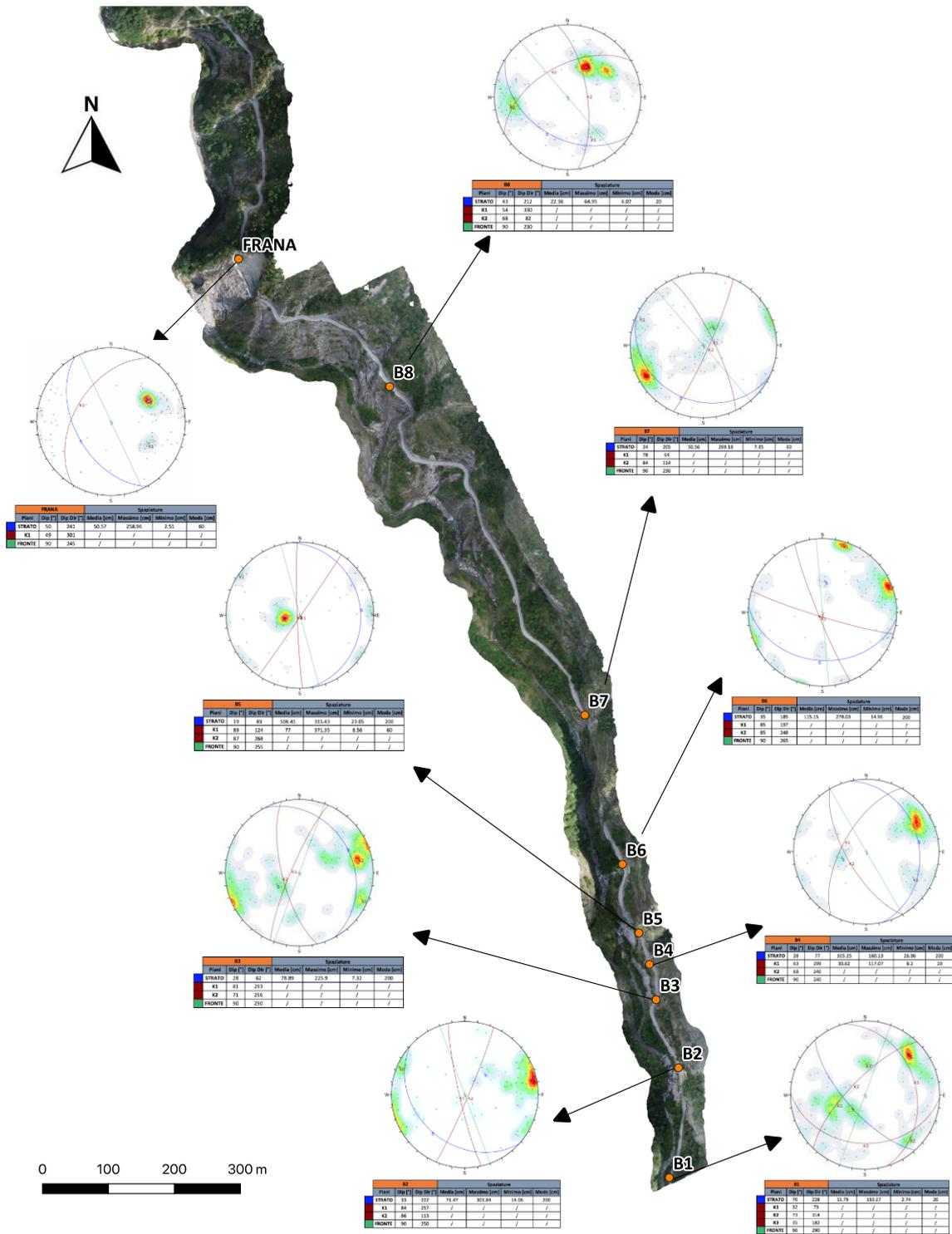


Figura 8.2: Tavole riassuntive sui risultati del rilievo geomeccanico: strada bassa e frana.

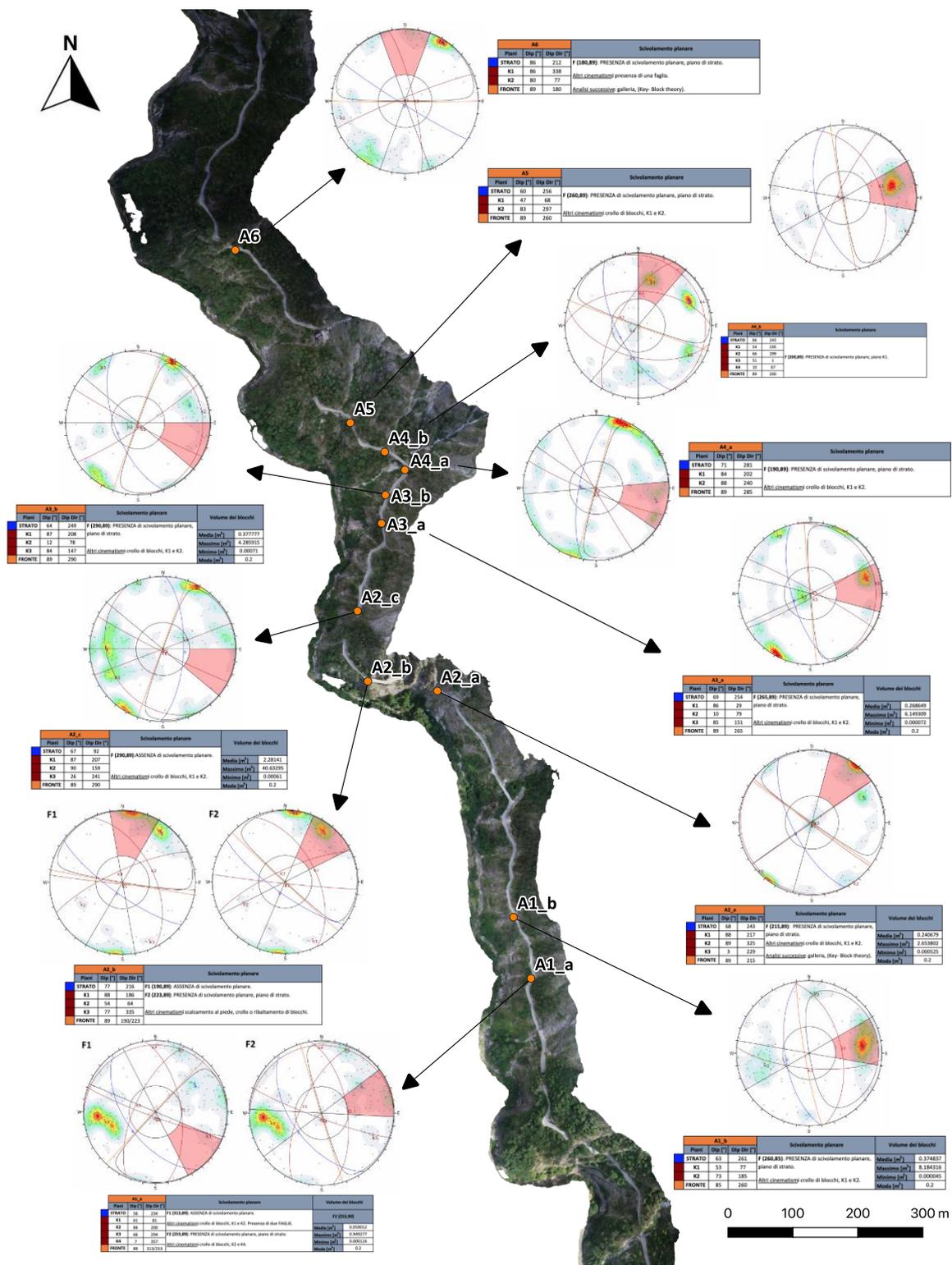


Figura 8.3: Tavole riassuntive sui risultati dell'analisi dei cinematici: strada alta.

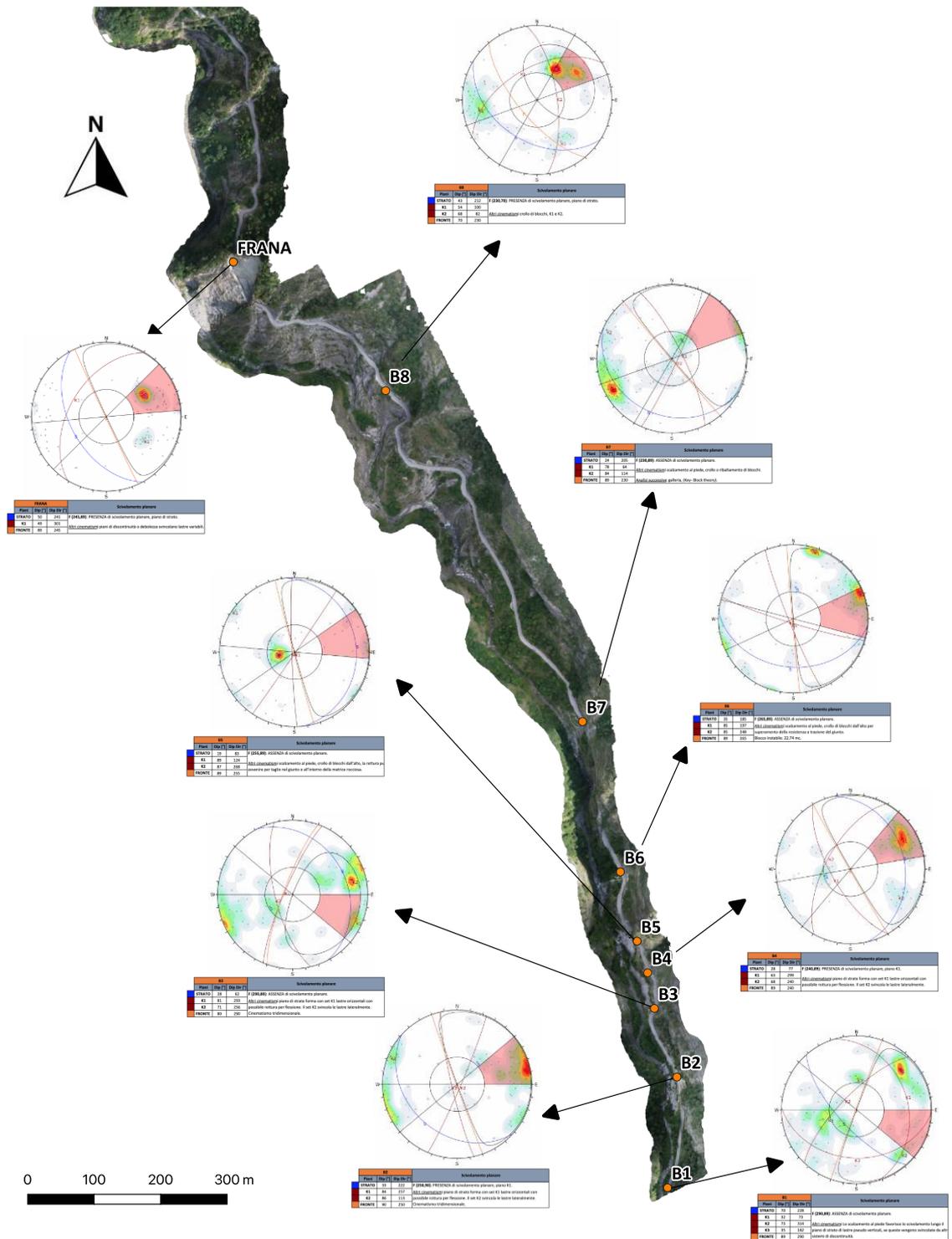


Figura 8.4: Tavole riassuntive sui risultati dell'analisi dei cinatismi: strada bassa e frana.

L'ultimo capitolo del presente lavoro aveva come fine l'analisi di stabilità per l'interpretazione del grosso fenomeno di scivolamento nel settore della frana. Le simulazioni effettuate sul modello sono state utili a capire quale fosse l'influenza dei ponti di roccia nei giunti e la presenza della pressione idrostatica.

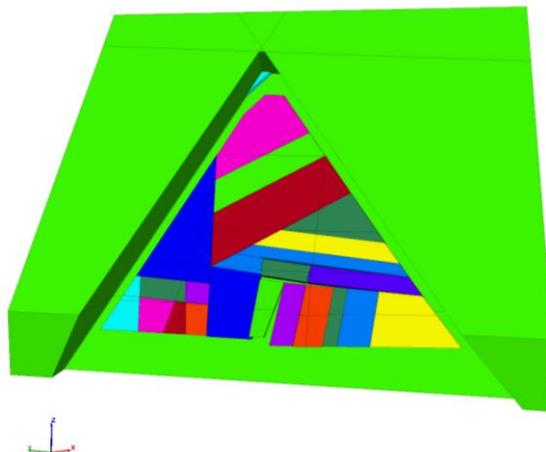
La geometria del modello è stata ricostruita attraverso l'individuazione di piani di debolezza e di discontinuità presenti nel banco di roccia. L'ipotesi alla base di questa modellazione era quella di considerare che la possibile rottura dell'ammasso fosse avvenuta proprio lungo questi piani. L'analisi è stata condotta considerando una singola lastra di 1 metro di spessore, valutando quindi l'influenza sulla stabilità dei ponti di roccia o sulla possibile resistenza a trazione di queste discontinuità o pseudo-discontinuità.

Poiché questa versione del software non dava la possibilità di considerare la reale persistenza dei giunti, questa è stata simulata attribuendo una percentuale della resistenza a trazione e della coesione massima dei giunti, che vanno a definire le lastre del modello.

La prima simulazione è stata eseguita considerando il pendio completamente asciutto. Applicando valori di resistenza a trazione ( $T_o$ ) e coesione ( $c$ ) proporzionali alla percentuale di ponti di roccia considerati sui giunti, si è arrivati a definire la percentuale per cui si ha l'insorgenza di movimenti nel pendio. In questo caso anche una percentuale bassissima di ponti di roccia, pari allo 0.5%, non si hanno spostamenti o rotture.

È evidente che in assenza di azioni esterne agenti sul pendio, nelle condizioni di assenza di acqua, la rottura avverrebbe solo in presenza di discontinuità quasi completamente formate. Questo però non rappresenta la situazione in esame in quanto sul banco di roccia sono visibili discontinuità e piani di debolezza che comunque non risultano completamente formati. Va detto però che in questa modellazione si sono considerati giunti tutti uguali con caratteristiche uniformi.

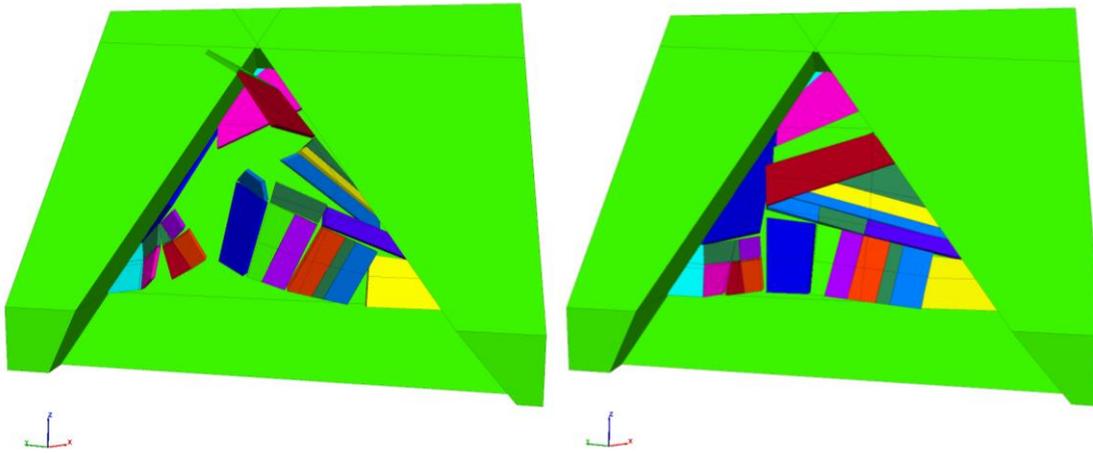
Considerando una percentuale di ponti di roccia più bassa, pari allo 0.1%, si può notare come la rottura avvenga lungo i giunti laterali del pendio, e che i blocchi si comportano come una lastra unica che scivola sul piano (Figura 8.5).



*Figura 8.5: Modello numerico dopo 10000 timestep: 0.1% di ponti di roccia.*

Nelle simulazioni successive si è andati ad applicare una pressione idrostatica al piano di scivolamento considerando due condizioni: di giunto completamente e parzialmente saturo. Nel primo caso la pressione è stata applicata all'intero pendio, mentre nel secondo caso solo alla metà bassa della frana. Anche in questi casi si è andati a determinare la percentuale di ponti di roccia che ha portato all'innescio di movimenti dei blocchi. I risultati per le due simulazioni risultano proporzionali infatti: nel caso di giunto completamente saturo la percentuale di ponti di roccia non sufficiente alla stabilità della lastra è del 10%, mentre per il giunto parzialmente saturo è del 5%.

Guardando il modello instabile si nota come si ha il sollevamento dei blocchi, dovuto proprio all'azione perpendicolare della pressione idrostatica.



*Figura 8.6: Modello numerico dopo 10000 timestep: (a sinistra) 5% di ponti di roccia, giunto completamente saturo; (a destra) 3% di ponti di roccia, giunto parzialmente saturo.*

Al fine di ristabilire l'equilibrio sul pendio, si è pensato di applicare al piano di scivolamento un valore di resistenza a trazione e coesione, considerando quindi la presenza di ponti di roccia sullo stesso.

Dai valori, ottenuti per tentativi, si può concludere che anche una percentuale molto bassa di ponti di roccia sul piano di scivolamento fa sì che si ristabilisca l'equilibrio. Per esempio, per il caso di giunto completamente saturo, che rappresenta la situazione più sfavorevole, con una percentuale bassissima di ponti di roccia, pari allo 0.097%, si riesce a ristabilire l'equilibrio della lastra.

Il lavoro di tesi non intende essere comunque esaustivo per la simulazione di queste caratteristiche infatti, in questa modellazione i giunti sono stati considerati tutti uguali, con caratteristiche uniformi, e inoltre non è stata considerata la presenza di pressioni idrostatiche anche fra i giunti stessi. Questo porterebbe alla necessità di una maggiore percentuale di ponti di roccia.

## **9. BIBLIOGRAFIA**

---

AGISOFT METASHAPE (2019) – User Manual: Professional Edition, Version 1.5.

BANDIS, S., LUMSDEN, A. C., & BARTON, N. R. (1981) – Experimental studies of scale effects on the shear behaviour of rock joints. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences And.*

BARTON, N. & BANDIS, S. (1982) – Effects of block size on the shear behaviour of jointed rock. Keynote Lecture, 23rd US Symp. on Rock Mech., Berkeley, California.

BELTRANDO, M., COMPAGNONI, R., & LOMBARDO, B. (2010) – (Ultra-) High-pressure metamorphism and orogenesis: An alpine perspective. *Gondwana Research*, 18, 147–166. doi: 10.1016/j.gr.2010.01.009.

BERSANI A., BAUDINO F. (2004) – *C'era una volta un vallone... inviolabile*. Collana: Viure lo Paìs, Catalogo n.7, Saluzzo: Coop. Sale e Luce, 75 pp.

BIENIAWSKI Z.T. (1973) – Engineering classification of jointed rock masses. *Trans. S. African Inst. Civ. Engrs.*, Vol.15, no 12, pp.335-344.

BIENIAWSKI Z.T. (1984) – *Rock Mechanics design in mining and Tunnelling*, pp 55-95. Balkema, Rotterdam, Boston.

BIENIAWSKI Z.T. (1989) – *Engineering Rock Mass Classifications* ». Wiley. New York.

BIRCH J.S. (2006) – Using 3DM analyst mine mapping suite for rock face characterization. In: Tonon F, Kottenstette J (eds) *Laser and photogrammetric methods for rock face characterization*. ARMA Golden, Colorado.

BOGGIA PIERA & BOGGIA GIORGIO (1989) – *Le Valli Maira e Grana*, Cuneo: L'arciere, 291 p., 4 c. di tav.: ill., c. geogr.; 17 cm.

BROWN E.T. (1970) – Strength of models of rock with intermittent joints. *J. Soil Mech. Foundation Div.*, ASCE 96, SM6, 1935-1949, USA.

CALL R.D. & NICHOLAS D.E. (1978) – Prediction of step path failure geometry for slope stability analysis. *Proc 19th U.S. Symp. on Rock Mechanics*, Aime, New York, USA.

CANNAROZZO, CUCCHIARINI, MESCHIERI (2012) – Fotogrammetria, estensione del corso Misure, rilievo, progetto, Ed. Zanichelli.

CROSTA G (1997) – Evaluating rock mass geometry from photographic images. *Rock Mech Rock Eng* 30(1), pp 35–58.

DE VALLEJO L. I. G. (2005) – *Geoingegneria*. Pearson, 816 pagine.

DEERE D.U., HENDRON A.J., PATTON F.D. & CORDING E.J. (1967) – Design of surface and near surface construction in rock. In *Failure and breakage of rock*, proc. 8th U.S. symp. rock mech., (ed. C. Fairhurst), 237-302. New York: Soc. Min. Engrs, Am. Inst. Min. Metall. Petrolm Engrs.

DOLAN J.P. (2006) – Rapidly acquiring and analyzing rock mechanic data using laser scanning technology workshop on laser and photogrammetric methods for rock face characterization. ARMA, Golden, Colorado.

EINSTEIN H.H.; VENEZIANO D.; BAECHER G.B. & O'REILLY K.J. (1983) – The effect of discontinuity persistence on rock slope stability. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 20(5), 227-236.

FENG, Q., ROSHOFF, K. (2006) – Semi-automatic mapping of discontinuity orientation at rock exposure by using 3D laser scanning techniques. The 10th IAEG International Congress, Nottingham, UK. Paper number 751.

FERRERO A.M., MIGLIAZZA M. & GIANI G.P. (2004) – Analisi dei parametri geotecnici nella scelta del modello numerico continuo o discontinuo di un ammasso roccioso. *MIR* 2004, 37 pp.

FERRERO, A.M., FORLANI, G.F., RONCELLA, R. & VOYAT, H.I., (2009) – Advanced geostructural survey methods applied to rock mass characterization. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 42 (4), pp. 631–665.

FERRERO A.M., MIGLIAZZA M., RONCELLA R. & SEGALINI A. (2010) – Rock cliffs hazard analysis based on remote geostructural surveys: The Campione del Garda case study (Lake Garda, Northern Italy). Elsevier. *Geomorphology* 125, pp.457–471.

FISCHLER M. & BOLLES R. (1981) – Random sample consensus: a paradigm for model fitting with application to image analysis and automated cartography. *Commun Assoc Comp Mach* 24(6), pp.381–395.

FRANCIOSO R. & SCHIATTARELLA M. (2002) – Un nuovo metodo grafico per la valutazione dei potenziali distacchi in versanti rocciosi – Periodico dell’Ordine dei Geologi della Basilicata.

GAICH A., SCHUBERT W. & POTSCH M. (2004) – Reproducible rock mass description in 3D using the JointMetriX3D system. In: Schubert W. (ed) *Proceedings of EUROCK 2004 and 53rd geomechanics colloquium*. Salzburg, Austria, pp. 61–64.

GAICH A., POTSCH M. & SCHUBERT W. (2006) – Basics, principles and applications of 3D imaging systems with conventional and high-resolution cameras. In: TONON F., KOTTENSTETTE J.(eds) *Laser and photogrammetric methods for rock face characterization*. ARMA Golden, Colorado.

GEHLE C.& KUTTER H.K. (2003) – Breakage and shear behaviour of intermittent rock joints. *Int. J. of Rock Mech. & Min. Sc.*, 40, 687-700, Great Britain.

GIANI G.P. (1988) – *Analisi di stabilità dei pendii, parte I: Classificazione dei fenomeni di instabilità, pendii naturali e fronti di scavo in roccia*. Associazione Mineraria Subalpina, Torino.

GIGLI G. & CASAGLI N. (2011A) – Semi-automatic extraction of rock mass structural data from high resolution LIDAR point clouds. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 48, pp. 187–198.

GIGLI G. & CASAGLI N. (2011B) – Extraction of rock mass structural data from high resolution laser scanning products. *Proc. 2nd World Landslide Forum*, Rome, 3–7 October.

GLYNN E.F., VENEZIANO D. & EINSTEIN H.H. (1978) – The probabilistic model for shearing resistance of jointed rock. Proceedings of the 19th US Symposium on Rock Mechanics, Stateline, 66-76, Nevada, USA.

GOODMAN R.E. & SHI G.H. (1985) – Block theory and its application to rock engineering, 338, Prentice Hall, inc., London.

GRENON M., LEMY F. & HADJIGEORGIOU J. (2004) – Fracture modelling based on input data from line mapping and image analysis. In: Schubert W. (ed) Proceedings of EUROCK 2004 and 53rd geomechanics colloquium. Salzburg, Austria, pp. 445–448.

HADJIGEORGIOU J., LEMY F., COÛTE P. & MALDAGUE X. (2003) – An evaluation of image analysis algorithms for constructing discontinuity trace maps. Rock Mech Rock Eng 36(2), pp. 163–179.

HAGAN T.O. (1980) – A case of terrestrial photogrammetry in deep-mine rock structure studies. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 15, pp.191–198.

HALL B.E. (1985) – Preliminary estimation of slope angles. Symp. on Rock Mass Characteristics. Pp 12-121, South African National Group on Rock Mechanics Johannesburg.

HANEBERG, W.C. (2006) – 3-D rock mass characterization using terrestrial digital photogrammetry. AEG News 49:12–5.

HARRISON J.P. (1993) – Improved analysis of rock mass geometry using mathematical and photogrammetric methods. Ph.D. thesis, Imperial College, London, UK.

HOEK, E. & BROWN, E.T. (1988) – The Hoek-Brown failure criterion - a 1988 update. Proc. 15th Canadian Rock Mech. Symp. (ed. J.C. Curran). Toronto, Dept. Civil Engineering, University of Toronto, pp. 31-38.179

HOEK E., CARRANZA-TORRES C.T. & CORKUM B. (2002) – Hoek-Brown failure criterion – 2002 edition. Proc. North American Rock Mechanics Society meeting in Toronto in July 2002.

ISRM, INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS (1978) – Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses. International Society for Rock Mechanics, Commission on Standardisation of Laboratory and Field Tests, N. Barton ed. Int. J. of Rock Mech. & Min. Sci. & Geomech. Abstr. 15(6), 319-368.

ISRM, INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS (1981) – Rock Characterization, Testing and Monitoring, E.T. Brown ed., Pergamon Press, 211, London, UK.

ISRM (1993) – Metodologie per la descrizione quantitativa delle discontinuità nelle masse rocciose (raccomandazioni ISRM). Rivista Italiana di Geotecnica, 2/93.

ITASCA (2004) – UDEC (Universal Distinct Element Code), Version 4.0. Minneapolis: ICG, Itasca Consulting Group Inc.

ITASCA (2007) – 3DEC (3 dimensional distinct element code) version 4.1 Minneapolis, MN, USA: Itasca Consulting Group Inc.

JAEGER J.C. (1971) – Friction of rocks and stability of rock slopes. Geotechnique, 21, 97-134, London, United Kingdom.

JENNINGS J.E. (1971) – A mathematical theory for the calculation of the stability of slopes in open cast mines. Symp. on "Planning Open Pit Mines". Proceedings of the Symposium on the Theoretical Background to the Plannings of Open Pit Mines with Special Reference to Slope Stability, Johannesburg, 1970. Balkema, 1971, 87-102, Amsterdam, The Netherlands.

KEMENY J. & POST R. (2003) – Estimating three-dimensional rock discontinuity orientation from digital images of fracture traces. Comput. Geosci. 29, pp. 65–77.

KEMENY J., MONTE HANDY J. & THIAM S. (2003) – The use of digital imaging and laser scanning technologies in rock engineering. In: International symposium on the fusion technology of geosystem engineering, Rock engineering and geophysical exploration, Seoul, Korea, 18–19 November.

KEMENY J., TURNER K. & NORTON B. (2006) – LIDAR for rock mass characterization: hardware, software, accuracy and best-practices. In: TONON F. & KOTTENSTETTE J. (eds) Laser and photogrammetric methods for rock face characterization. ARMA Golden, Colorado.

KIM B.H., CAI M., KAISER P.K., YANG H.S. (2007) – Estimation of block sizes for rock masses with non-persistent joint, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, v. 40, n. 2, p.169- 192.

LAJTAI E.Z. (1969) – Strength of discontinuous rocks in shear. *Geotechnique* 19(2), 218-233, London, United Kingdom.

LATO, M. AND VÖGE, M. (2012) – Automated mapping of rock discontinuities in 3D LIDAR models. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 53, pp. 150-158.

LATO, M.J., DIEDERICHS, M.S., HUTCHINSON, D.J., HARRAP, R. (2012) – Evaluating roadside rockmasses for rockfall hazards using LiDAR data: optimizing data collection and processing protocols. *Natural Hazards* 60(3): 831-864.

LAUBSCHER D.H. (1975) – Class Distinction in Rock Masses. *Coal, Gold and Base Minerals of Southern Africa*, pp 37-50. ORR C.M. (1992) “Assessment of Rock Slopes Stability Using the Rock Mass Rating (RMR) System”. *The Aus. IMM. Proc.* 297:2:25-29.

LEMY F. & HADJIGEORGIOU J. (2003) – Discontinuity trace map construction using photographs of rock exposures. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 40, pp. 903–917.

MARKLAND J.T. (1972) – A useful technique for estimating the stability of rock slopes when the rigid wedge sliding type of failure is expected. *Imperial College Rock Mechanics Research Report*, 19 pagine.

MARTINETTI S. & RIBACCHI R. (1976) – Stabilità delle scarpate in roccia. 7° Ciclo di Conferenze sui problemi di Meccanica dei Terreni e Ingegneria delle Fondazioni, Ist. Scienza delle Costruzioni, Politecnico di Torino, novembre 1976. Politecnico di Torino, Atti dell'Istituto di Scienza delle Costruzioni, 310, 72 pp, Torino, Italia.

ORR C.M. (1996) – Use of Rock Mass Rating (RMR) system in assessing the stability of rock slopes. In “Milestones in rock Mechanics”. Balkema. Pp 159-172.

PALMSTRØM A. (1996) – The rock mass index (RMI) applied in rock mechanics and rock engineering. *Journal of Rock Mechanics and Tunnelling Technology*, Vol. 2, Number 1.

PALMSTRØM A. (2005) – Measurements of and correlations between block size and rock quality designation (RQD), *Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research*, 2005, v.20, n. 4, p.362-377.

PIANA F., FIORASO G., IRACE A., MOSCA P., D’ATRI A., BARALE L., FALLETTI P., MONEGATO G., MORELLI M., TALLONE S., VIGNA G.B. (2017) – Geology of Piemonte region (NW Italy, Alps-Appennines junction zone). Pubblicato sul *Journal of Maps*, Francis & Taylor Group Publ., UK.

REID T.R. & HARRISON J.P. (2000) – A semi-automated methodology for discontinuity trace detection in digital images of rock mass exposures. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 37, pp.1073–1089.

ROMANA M, (1985) – New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes. *Int. Symp. on the role of rock mechanics ISRM. Zacatecas*, pp 49-53.

ROMANA M. (1993) – A geomechanics classification for slopes: Slope Mass Rating. (In “Comprehensive Rock Engineering”. Ed. J. Hudson). Pergamon. Vol 3. Pp 575-600.

ROMANA M. (1995) – The geomechanics classification SMR for slope correction. *Proc. 8th Int. ISRM Congress (Fujii ed.)*.

RONCELLA R. & FORLANI G. (2005) – Extraction of planar patches from point clouds to retrieve dip and dip direction of rock discontinuities. *Proceedings of laser scanning 2005*, Enschede, The Netherlands. *Int. Arch. Photogramm. Remote. Sens.* 36(3W19), pp.162–167.

RONCELLA R., FORLANI G. & REMONDINO F. (2005) – Photogrammetry for geological applications: automatic retrieval of discontinuity orientation in rock slopes. In: *Videometrics IX, electronic imaging, IS&T/ SPIE 17th annual symposium*, pp. 17–27.

SCAVIA C. & SAETTA V. (2001) – Metodo meccanico-probabilistico per l'analisi della stabilità dei pendii in roccia. In: CARERE K., RATTO S. & ZANOLINI F. (2001, eds.) - Prevenzione dei fenomeni di instabilità delle pareti rocciose, Programma INTERREG IIC - "Falaises", pp.116-132, Tipografia Valdostana, Aosta, Italia.

SLOB S, HACK HRGK, VAN KNAPEN B, TURNER K, KEMENY J (2005) – A method for automated discontinuity analysis of rock slopes with 3D laser scanning. *Transp Res Rec* 1913(1):187–208.

STEFFEN O.K.H. (1976) – Research and development needs in data collecting for rock engineering. *Proc. Symp. on Exploration for Rock Engineering*, Johannesburg, pp 93-104. Netherlands. Balkema.

STURZENEGGER, M. AND STEAD, D. (2009) – Close-range terrestrial digital photogrammetry and terrestrial laser scanning for discontinuity characterization on rock cuts. *Engineering Geology*. 106, pp. 163-182.

TERZAGHI R.D. (1965) – Sources of error in joint surveys. *Geotechnique* 15, pp. 287–304.

TORR P.H.S. & MURRAY D.W. (1997) – The development and comparison of robust methods for estimating the fundamental matrix. In: *Int J Comput Vis*, Kluwer Academic Publishers, Boston, pp. 1–33.

TRINKS, I., CLEGG, P., MCCAFFREY, K., JONES, R., HOBBS, R., HOLDSWORTH, B. (2005) – Mapping and analyzing virtual outcrops. *Visual Geosciences* 10: 13–19.

TSOUTRELIS C.E., EXADACTYLOS G.E. & KAPENIS A.P. (1990) – Study of the rock mass discontinuity system using photoanalysis. In: ROSSMANITH H.P (ed) *Mechanics of jointed and faulted rock*. Balkema, Rotterdam, pp. 103–112.

USSEGLIO B., FIORASO G & MOSCA P. (2016) – La Montagna racconta. Itinerari storico-geologici nelle Alpi Cozie tra il colle delle Finestre e il Gran Serin. <http://atlante-operefortificate.blogspot.it/p/la-montagna-racconta.html>.

SITOGRAFIA:

[WWW.3DEFFE.COM](http://WWW.3DEFFE.COM) – GSD ground sample distance

[WWW.3DMETRICA.IT](http://WWW.3DMETRICA.IT) – precisione di un rilievo con il drone

[WWW.PROVINCIA.CUNEO.GOV.IT](http://WWW.PROVINCIA.CUNEO.GOV.IT)

[WWW.MINOTARICCOINFORMA.IT](http://WWW.MINOTARICCOINFORMA.IT)

[WWW.NOTIZIE.PROVINCIA.CUNEO.GOV.IT](http://WWW.NOTIZIE.PROVINCIA.CUNEO.GOV.IT)

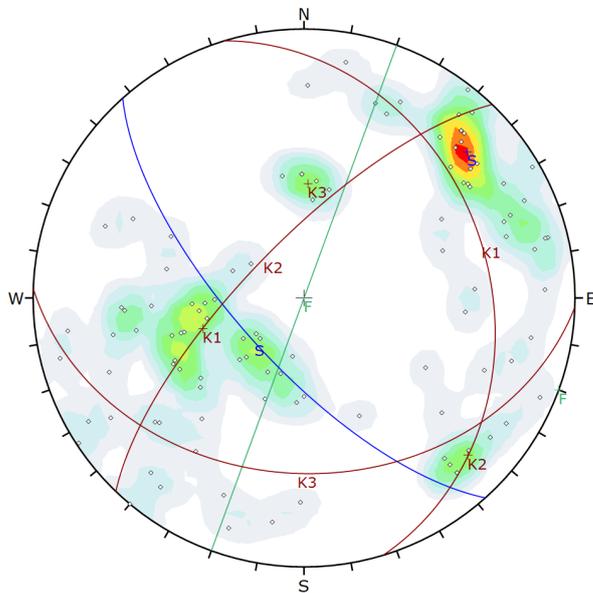
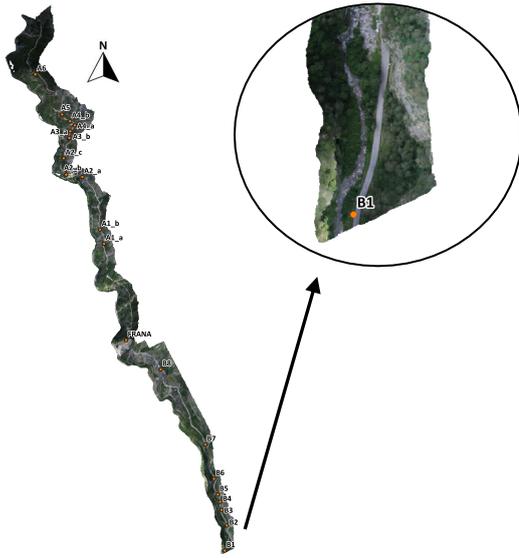
[WWW.ARPA.PIEMONTE.IT](http://WWW.ARPA.PIEMONTE.IT)

[WWW.WEBGIS.ARPA.PIEMONTE.IT](http://WWW.WEBGIS.ARPA.PIEMONTE.IT)

***ALLEGATO 1: SCHEDE DEL RILIEVO GEOMECCANICO***

---

# Strada Bassa B1



Symbol	Feature
◊	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
0.00 - 0.80	
0.80 - 1.60	
1.60 - 2.40	
2.40 - 3.20	
3.20 - 4.00	
4.00 - 4.80	
4.80 - 5.60	
5.60 - 6.40	
6.40 - 7.20	
7.20 - 8.00	

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	7.58%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

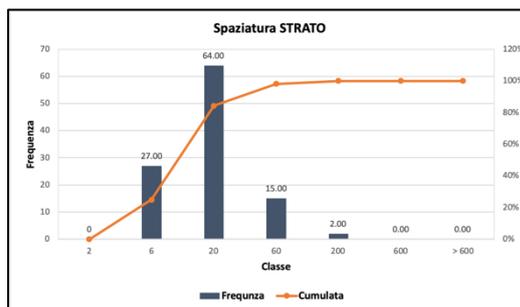
  

Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>User Planes</b>			
1	90	290	F
<b>Mean Set Planes</b>			
1m	70	228	S
2m	32	73	K1
3m	73	314	K2
4m	35	182	K3

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	106 (106 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

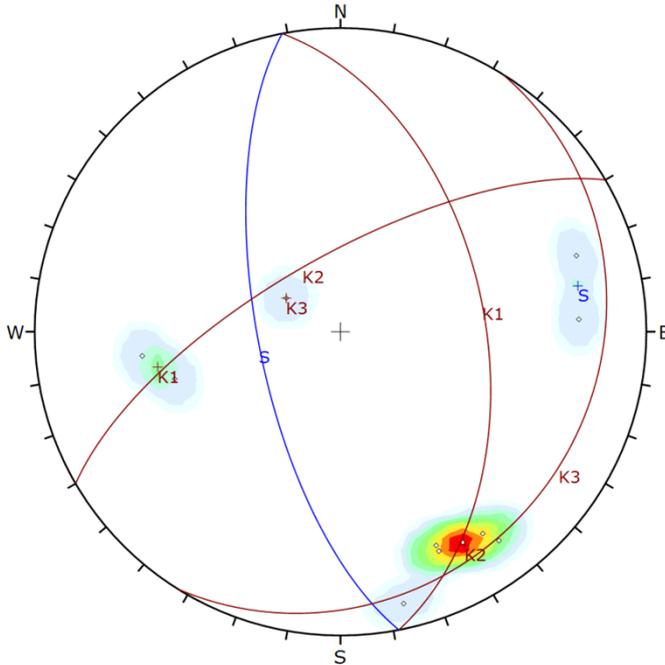
Media [cm]	13.79
Massimo [cm]	110.27
Minimo [cm]	2.74
Moda [cm]	20



**Strada Bassa  
B1**

**Confronto:  
Rilievo tradizionale e tramite Rockscan**

**Rilievo tradizionale**



Symbol	Feature
◊	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
	0.00 - 3.40
	3.40 - 6.80
	6.80 - 10.20
	10.20 - 13.60
	13.60 - 17.00
	17.00 - 20.40
	20.40 - 23.80
	23.80 - 27.20
	27.20 - 30.60
	30.60 - 34.00

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	33.44%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

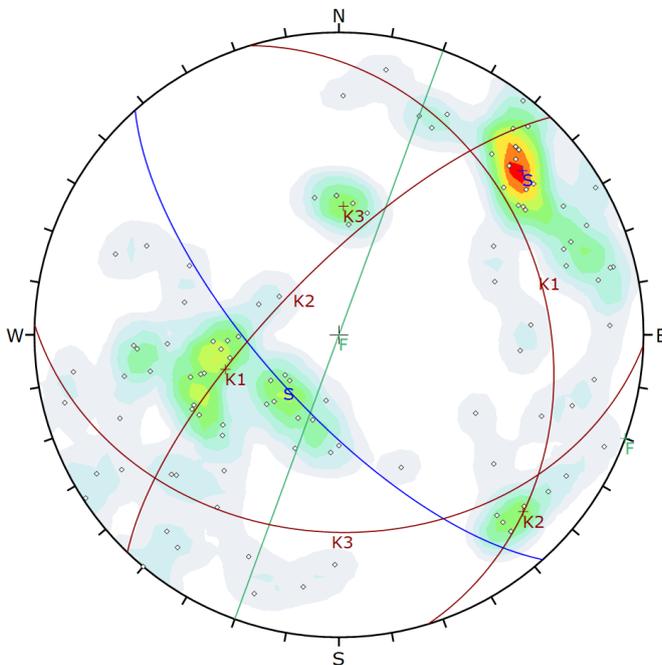
  

	Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>Mean Set Planes</b>				
1m		68	259	S
2m		51	79	K1
3m		70	330	K2
4m		17	122	K3

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	11 (11 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

**Rilievo tramite Rockscan**



Symbol	Feature
◊	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
	0.00 - 0.80
	0.80 - 1.60
	1.60 - 2.40
	2.40 - 3.20
	3.20 - 4.00
	4.00 - 4.80
	4.80 - 5.60
	5.60 - 6.40
	6.40 - 7.20
	7.20 - 8.00

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	7.58%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

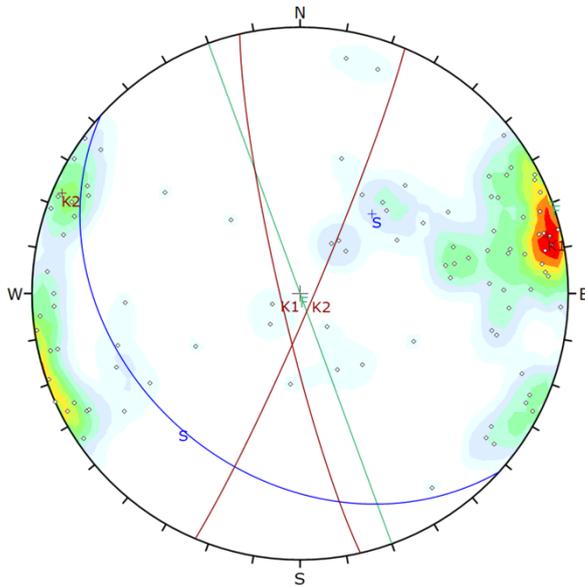
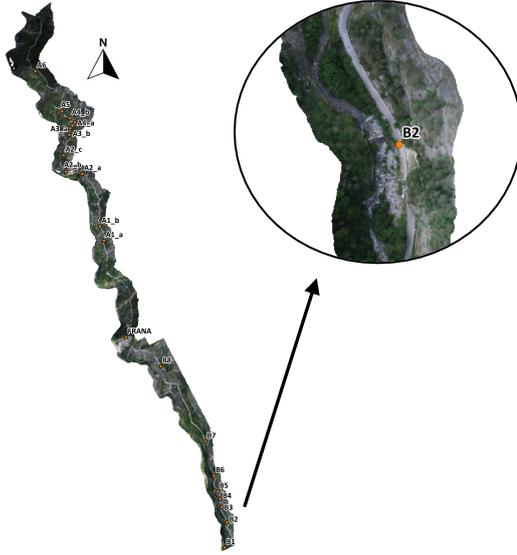
  

	Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>User Planes</b>				
1		90	290	F
<b>Mean Set Planes</b>				
1m		70	228	S
2m		32	73	K1
3m		73	314	K2
4m		35	182	K3

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	106 (106 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

# Strada Bassa B2



Symbol	Feature
o	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
0.00	- 1.00
1.00	- 2.00
2.00	- 3.00
3.00	- 4.00
4.00	- 5.00
5.00	- 6.00
6.00	- 7.00
7.00	- 8.00
8.00	- 9.00
9.00	- 10.00

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	9.49%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

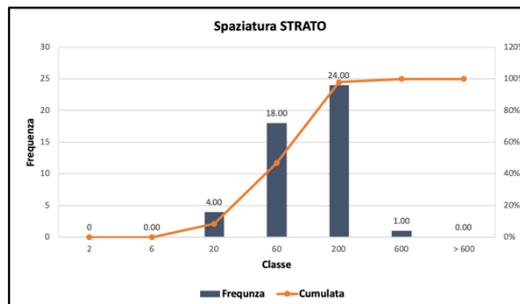
  

Color	Dip	Dip Direction	Label
User Planes			
1	90	250	F
Mean Set Planes			
1m	33	222	S
2m	84	257	K1
3m	86	113	K2

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	97 (97 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

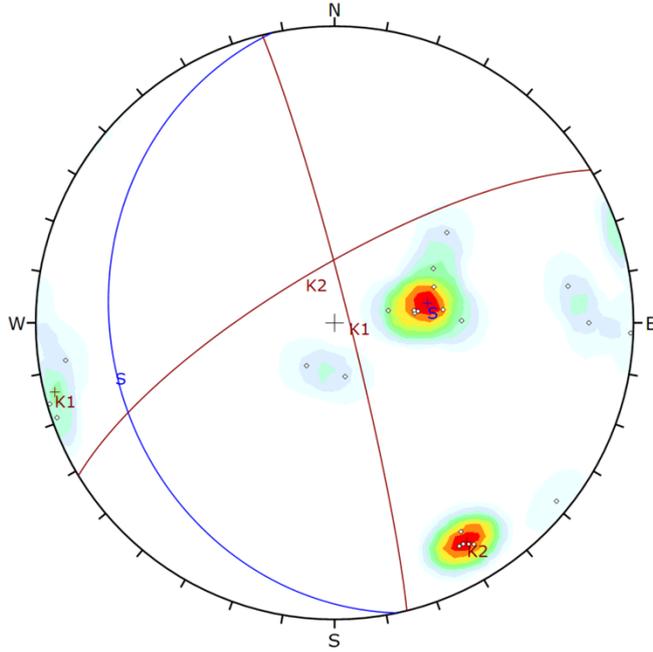
Media [cm]	71.47
Massimo [cm]	301.84
Minimo [cm]	14.06
Moda [cm]	200



**Strada Bassa  
B2**

**Confronto:  
Rilievo tradizionale e tramite Rockscan**

**Rilievo tradizionale**



Symbol	Feature
◊	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
	0.00 - 2.20
	2.20 - 4.40
	4.40 - 6.60
	6.60 - 8.80
	8.80 - 11.00
	11.00 - 13.20
	13.20 - 15.40
	15.40 - 17.60
	17.60 - 19.80
	19.80 - 22.00

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	21.76%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

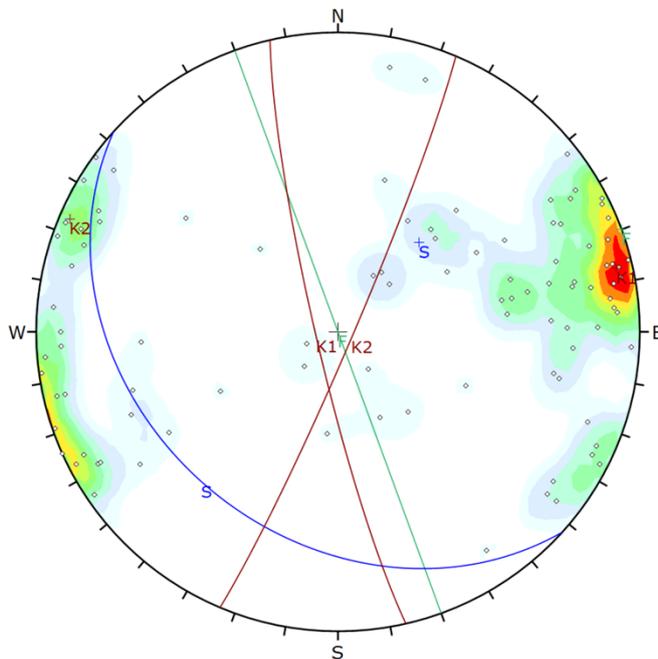
  

	Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>Mean Set Planes</b>				
1m	■	26	258	S
2m	■	86	76	K1
3m	■	75	329	K2

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	23 (23 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

**Rilievo tramite Rockscan**



Symbol	Feature
◊	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
	0.00 - 1.00
	1.00 - 2.00
	2.00 - 3.00
	3.00 - 4.00
	4.00 - 5.00
	5.00 - 6.00
	6.00 - 7.00
	7.00 - 8.00
	8.00 - 9.00
	9.00 - 10.00

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	9.49%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

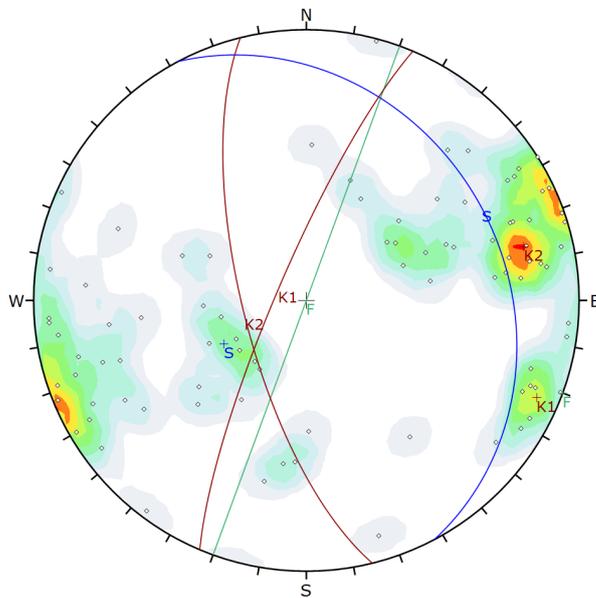
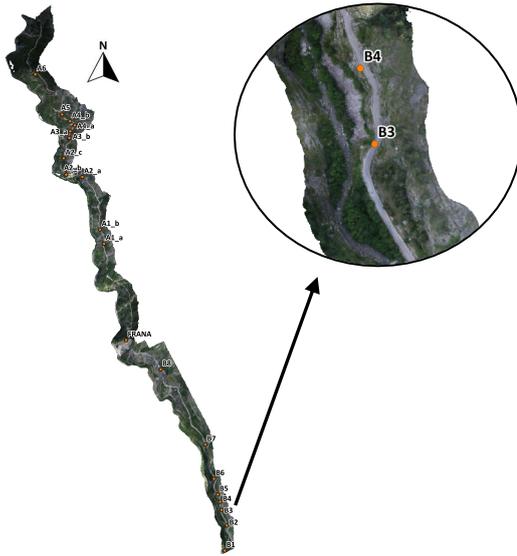
  

	Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>User Planes</b>				
1	■	90	250	F
<b>Mean Set Planes</b>				
1m	■	33	222	S
2m	■	84	257	K1
3m	■	86	113	K2

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	97 (97 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

# Strada Bassa B3



Symbol	Feature
◊	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
0.00	- 0.80
0.80	- 1.60
1.60	- 2.40
2.40	- 3.20
3.20	- 4.00
4.00	- 4.80
4.80	- 5.60
5.60	- 6.40
6.40	- 7.20
7.20	- 8.00

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	7.42%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

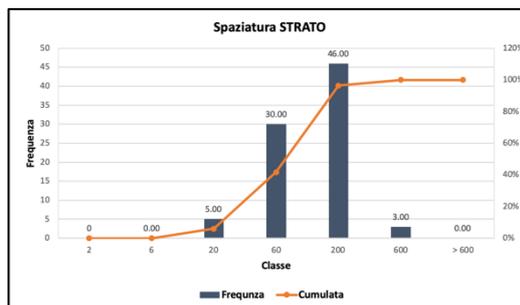
  

Color	Dip	Dip Direction	Label
User Planes			
1	90	290	F
Mean Set Planes			
1m	28	62	S
2m	81	293	K1
3m	71	256	K2

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	87 (87 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

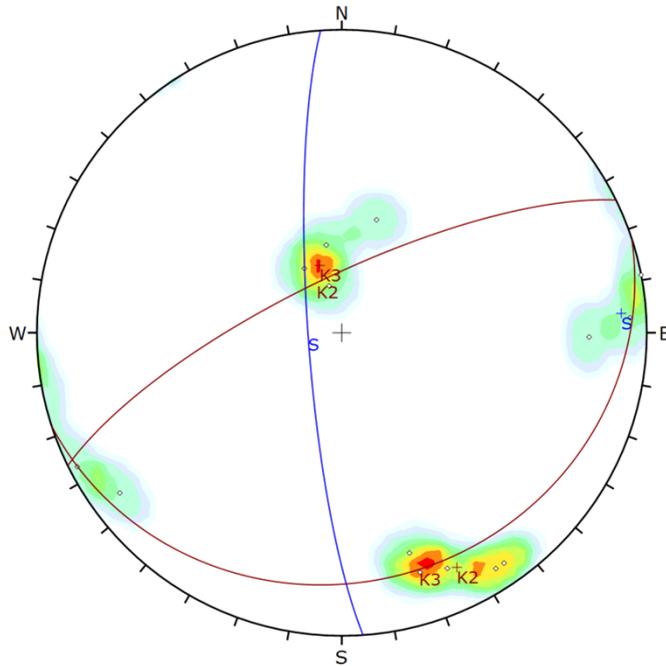
Media [cm]	78.89
Massimo [cm]	225.90
Minimo [cm]	7.32
Moda [cm]	200



**Strada Bassa  
B3**

**Confronto:  
Rilievo tradizionale e tramite Rockscan**

**Rilievo tradizionale**



Symbol	Feature
◊	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
	0.00 - 1.90
	1.90 - 3.80
	3.80 - 5.70
	5.70 - 7.60
	7.60 - 9.50
	9.50 - 11.40
	11.40 - 13.30
	13.30 - 15.20
	15.20 - 17.10
	17.10 - 19.00

<b>Contour Data</b>	Pole Vectors
<b>Maximum Density</b>	18.97%
<b>Contour Distribution</b>	Fisher
<b>Counting Circle Size</b>	1.0%

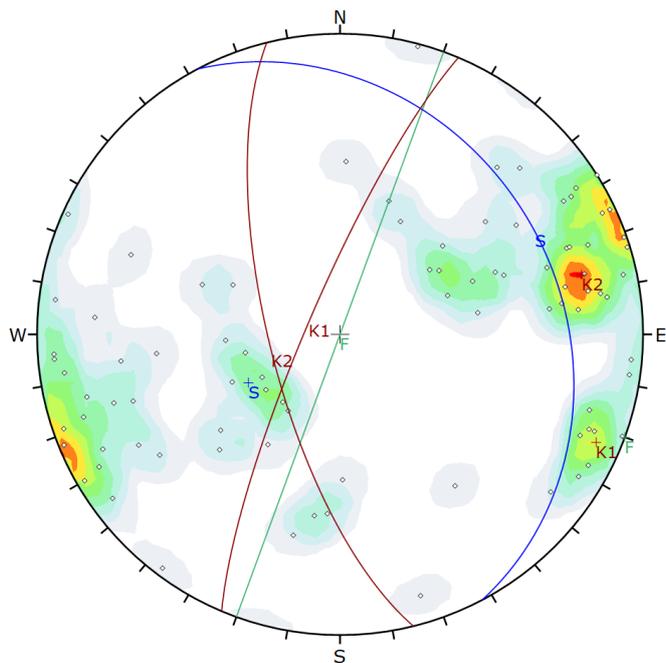
  

	Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>Mean Set Planes</b>				
1m	■	81	266	S
2m	■	75	334	K2
3m	■	19	162	K3

<b>Plot Mode</b>	Pole Vectors
<b>Vector Count</b>	14 (14 Entries)
<b>Hemisphere</b>	Lower
<b>Projection</b>	Equal Area

**Rilievo tramite Rockscan**



Symbol	Feature
◊	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
	0.00 - 0.80
	0.80 - 1.60
	1.60 - 2.40
	2.40 - 3.20
	3.20 - 4.00
	4.00 - 4.80
	4.80 - 5.60
	5.60 - 6.40
	6.40 - 7.20
	7.20 - 8.00

<b>Contour Data</b>	Pole Vectors
<b>Maximum Density</b>	7.42%
<b>Contour Distribution</b>	Fisher
<b>Counting Circle Size</b>	1.0%

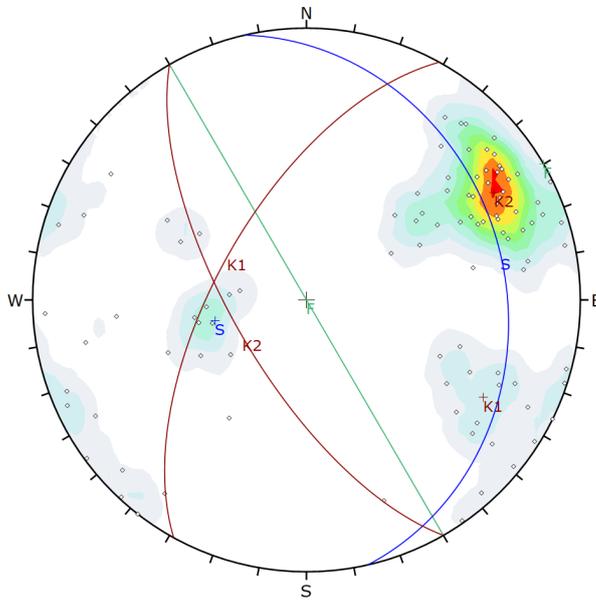
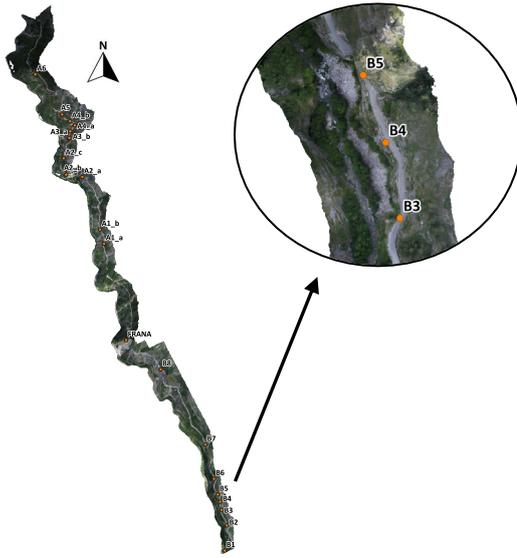
  

	Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>User Planes</b>				
1	■	90	290	F
<b>Mean Set Planes</b>				
1m	■	28	62	S
2m	■	81	293	K1
3m	■	71	256	K2

<b>Plot Mode</b>	Pole Vectors
<b>Vector Count</b>	87 (87 Entries)
<b>Hemisphere</b>	Lower
<b>Projection</b>	Equal Area

# Strada Bassa B4



Symbol	Feature
◊	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
Blue	0.00 - 1.30
Light Blue	1.30 - 2.60
Light Green	2.60 - 3.90
Green	3.90 - 5.20
Yellow-Green	5.20 - 6.50
Yellow	6.50 - 7.80
Orange	7.80 - 9.10
Red-Orange	9.10 - 10.40
Red	10.40 - 11.70
Dark Red	11.70 - 13.00

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	12.01%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

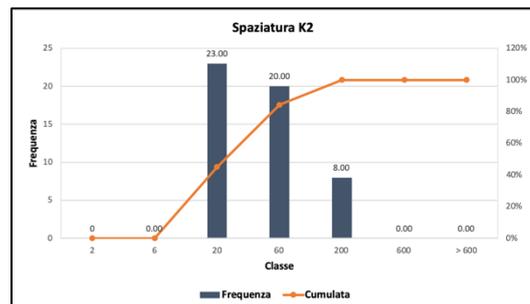
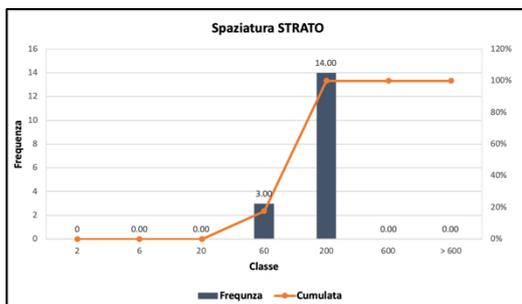
Color	Dip	Dip Direction	Label
User Planes			
1	90	240	F
Mean Set Planes			
1m	28	77	S
2m	63	299	K1
3m	68	240	K2

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	96 (96 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

<b>Media [cm]</b>	105.25	<b>Moda [cm]</b>	200
<b>Massimo [cm]</b>	160.13	<b>Minimo [cm]</b>	26.06

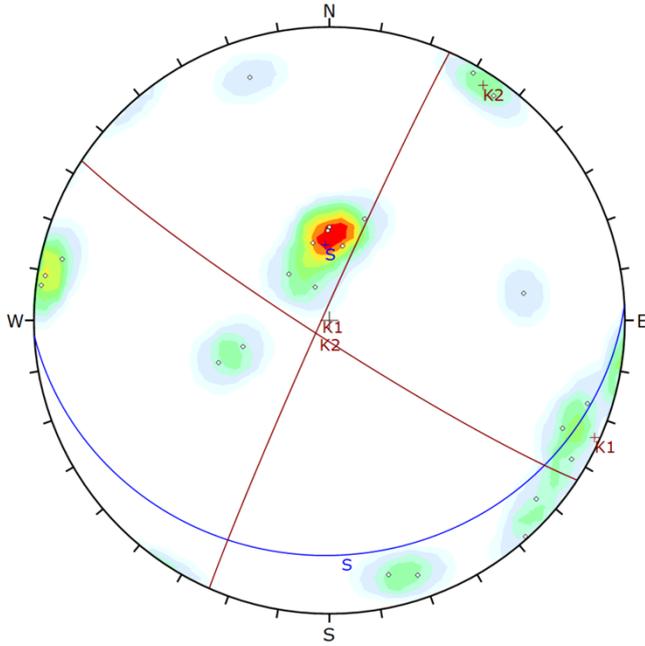
<b>Media [cm]</b>	33.62	<b>Moda [cm]</b>	20
<b>Massimo [cm]</b>	117.07	<b>Minimo [cm]</b>	8.20



**Strada Bassa  
B4**

**Confronto:  
Rilievo tradizionale e tramite Rockscan**

**Rilievo tradizionale**



Symbol	Feature
◊	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
	0.00 - 1.70
	1.70 - 3.40
	3.40 - 5.10
	5.10 - 6.80
	6.80 - 8.50
	8.50 - 10.20
	10.20 - 11.90
	11.90 - 13.60
	13.60 - 15.30
	15.30 - 17.00

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	16.79%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

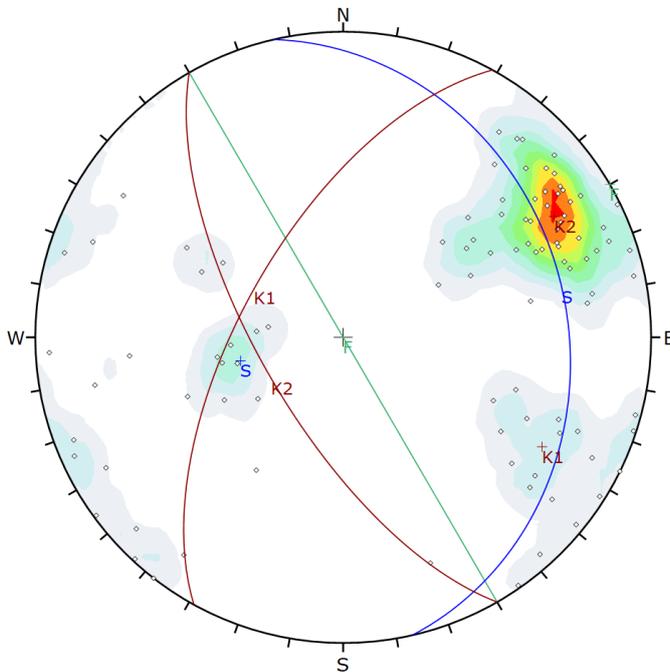
  

Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>Mean Set Planes</b>			
1m	21	177	S
2m	88	294	K1
3m	85	213	K2

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	23 (23 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

**Rilievo tramite Rockscan**



Symbol	Feature
◊	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
	0.00 - 1.30
	1.30 - 2.60
	2.60 - 3.90
	3.90 - 5.20
	5.20 - 6.50
	6.50 - 7.80
	7.80 - 9.10
	9.10 - 10.40
	10.40 - 11.70
	11.70 - 13.00

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	12.01%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

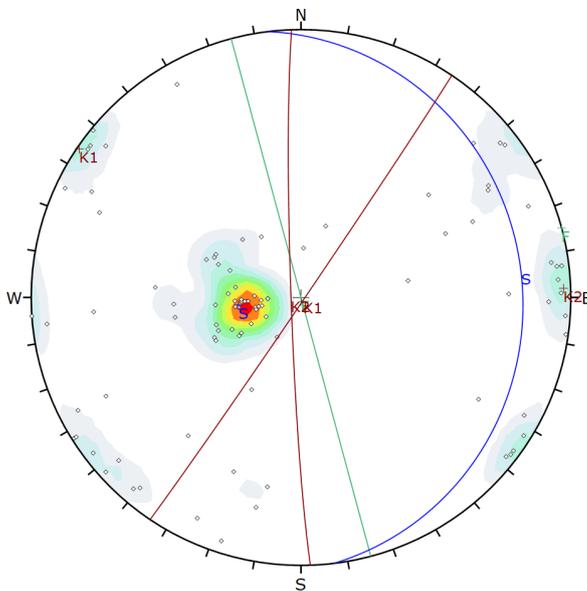
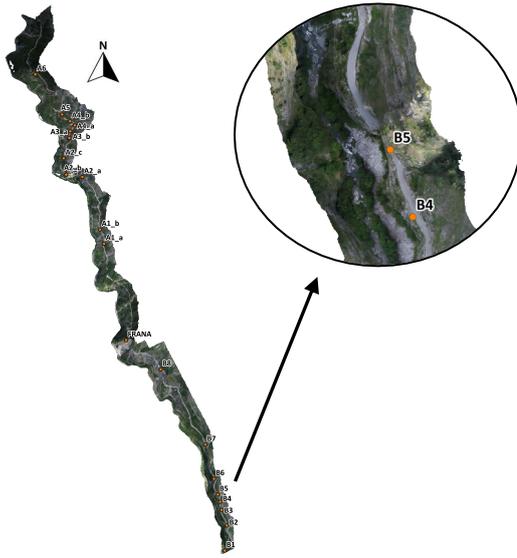
  

Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>User Planes</b>			
1	90	240	F
<b>Mean Set Planes</b>			
1m	28	77	S
2m	63	299	K1
3m	68	240	K2

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	96 (96 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

# Strada Bassa B5



Symbol	Feature
○	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
0.00 - 2.10	
2.10 - 4.20	
4.20 - 6.30	
6.30 - 8.40	
8.40 - 10.50	
10.50 - 12.60	
12.60 - 14.70	
14.70 - 16.80	
16.80 - 18.90	
18.90 - 21.00	

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	20.22%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

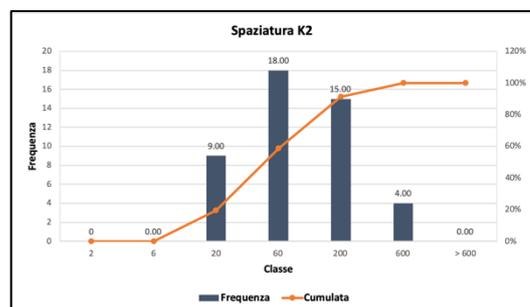
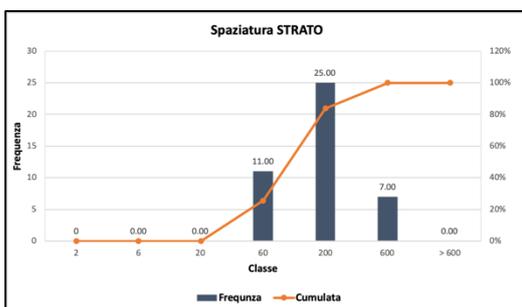
Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>User Planes</b>			
1	90	255	F
<b>Mean Set Planes</b>			
1m	19	83	S
2m	89	124	K1
3m	87	268	K2

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	92 (92 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

<b>Media [cm]</b>	108.41	<b>Moda [cm]</b>	200
<b>Massimo [cm]</b>	315.43	<b>Minimo [cm]</b>	23.05

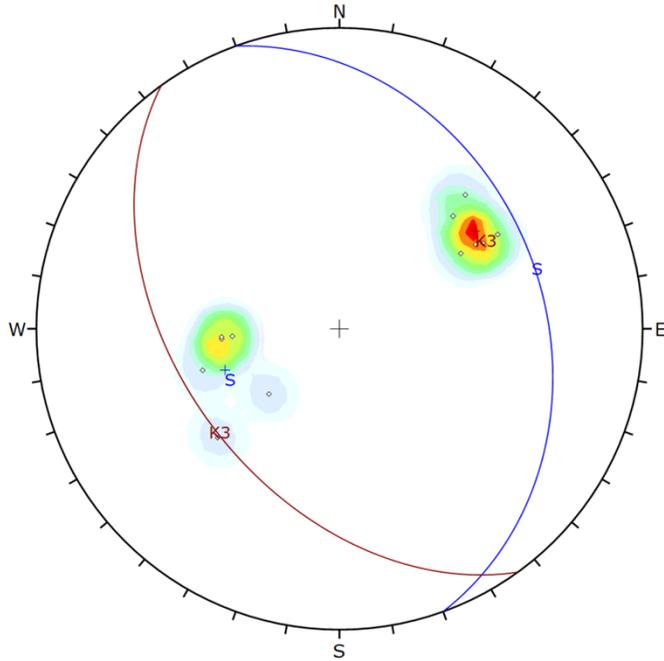
<b>Media [cm]</b>	77.00	<b>Moda [cm]</b>	60
<b>Massimo [cm]</b>	371.35	<b>Minimo [cm]</b>	8.56



**Strada Bassa  
B5**

**Confronto:  
Rilievo tradizionale e tramite Rockscan**

**Rilievo tradizionale**



Symbol	Feature
◇	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
	0.00 - 3.60
	3.60 - 7.20
	7.20 - 10.80
	10.80 - 14.40
	14.40 - 18.00
	18.00 - 21.60
	21.60 - 25.20
	25.20 - 28.80
	28.80 - 32.40
	32.40 - 36.00

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	35.43%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

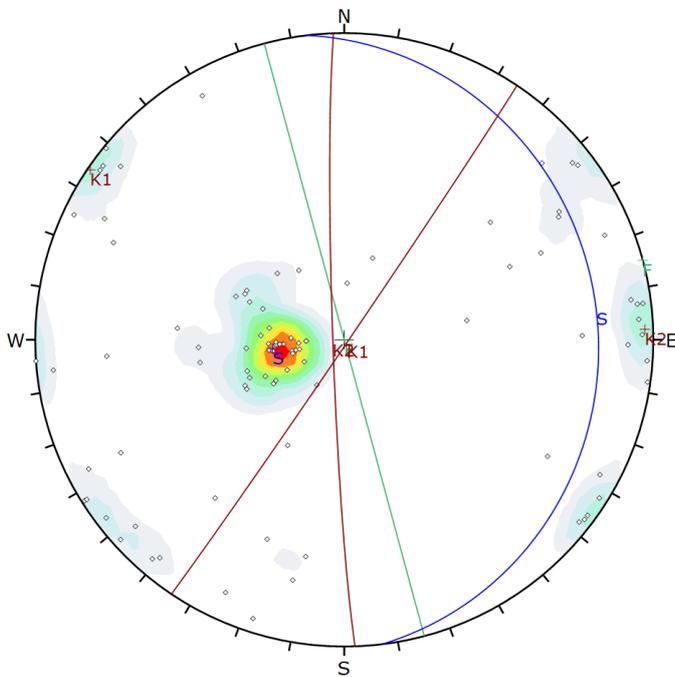
  

	Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>Mean Set Planes</b>				
1m	■	33	70	S
2m	■	46	234	K3

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	12 (12 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

**Rilievo tramite Rockscan**



Symbol	Feature
◇	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
	0.00 - 2.10
	2.10 - 4.20
	4.20 - 6.30
	6.30 - 8.40
	8.40 - 10.50
	10.50 - 12.60
	12.60 - 14.70
	14.70 - 16.80
	16.80 - 18.90
	18.90 - 21.00

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	20.22%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

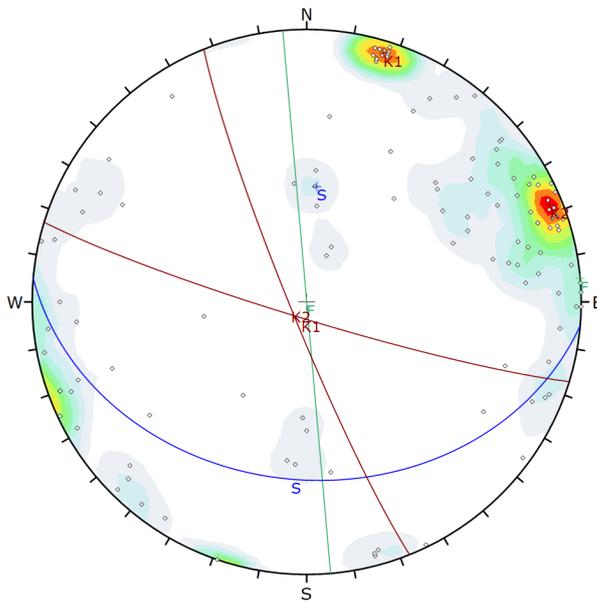
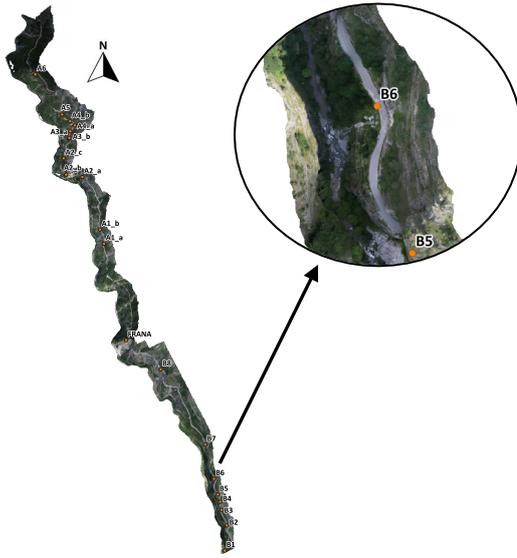
  

	Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>User Planes</b>				
1	■	90	255	F
<b>Mean Set Planes</b>				
1m	■	19	83	S
2m	■	89	124	K1
3m	■	87	268	K2

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	92 (92 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

# Strada Bassa B6



Symbol	Feature
◊	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
	0.00 - 1.30
	1.30 - 2.60
	2.60 - 3.90
	3.90 - 5.20
	5.20 - 6.50
	6.50 - 7.80
	7.80 - 9.10
	9.10 - 10.40
	10.40 - 11.70
	11.70 - 13.00

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	12.96%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

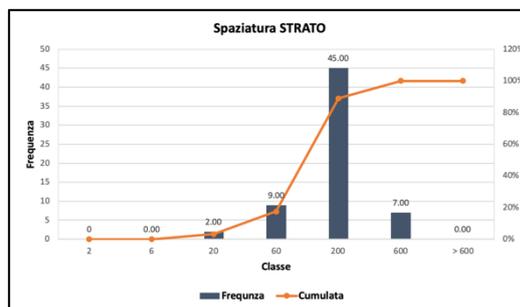
  

	Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>User Planes</b>				
1	■	90	265	F
<b>Mean Set Planes</b>				
1m	■	35	185	S
2m	■	85	197	K1
3m	■	85	248	K2

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	118 (118 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

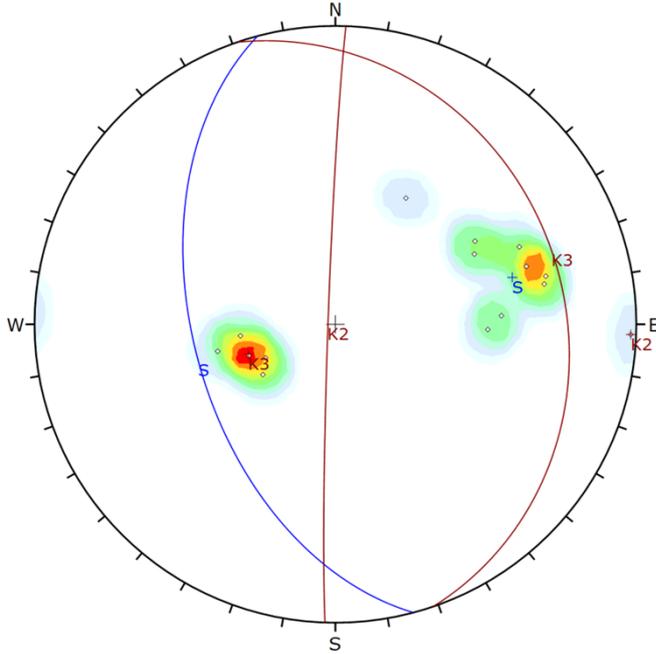
Media [cm]	115.15
Massimo [cm]	278.03
Minimo [cm]	14.96
Moda [cm]	200



**Strada Bassa  
B6**

**Confronto:  
Rilievo tradizionale e tramite Rockscan**

**Rilievo tradizionale**



Symbol	Feature
◊	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
	0.00 - 2.60
	2.60 - 5.20
	5.20 - 7.80
	7.80 - 10.40
	10.40 - 13.00
	13.00 - 15.60
	15.60 - 18.20
	18.20 - 20.80
	20.80 - 23.40
	23.40 - 26.00

<b>Contour Data</b>	Pole Vectors
<b>Maximum Density</b>	25.15%
<b>Contour Distribution</b>	Fisher
<b>Counting Circle Size</b>	1.0%

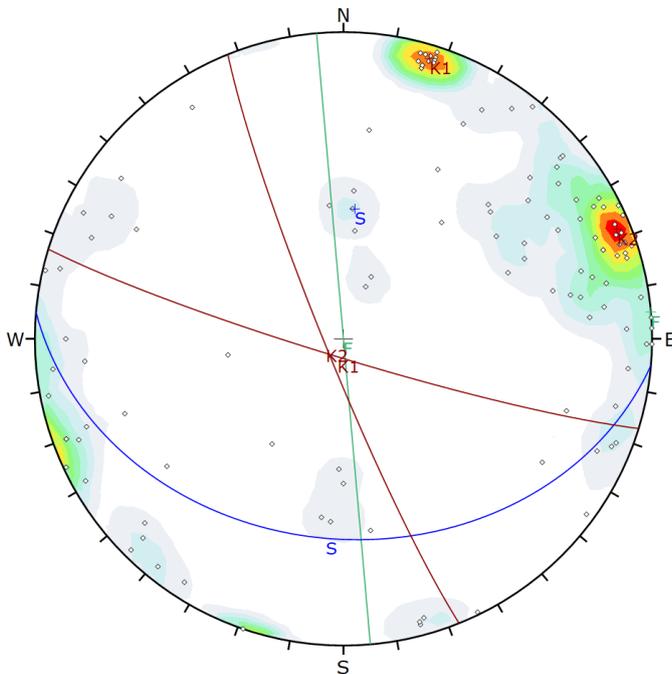
  

	Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>Mean Set Planes</b>				
1m	■	51	255	S
2m	■	88	272	K2
3m	■	25	71	K3

<b>Plot Mode</b>	Pole Vectors
<b>Vector Count</b>	15 (15 Entries)
<b>Hemisphere</b>	Lower
<b>Projection</b>	Equal Area

**Rilievo tramite Rockscan**



Symbol	Feature
◊	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
	0.00 - 1.30
	1.30 - 2.60
	2.60 - 3.90
	3.90 - 5.20
	5.20 - 6.50
	6.50 - 7.80
	7.80 - 9.10
	9.10 - 10.40
	10.40 - 11.70
	11.70 - 13.00

<b>Contour Data</b>	Pole Vectors
<b>Maximum Density</b>	12.96%
<b>Contour Distribution</b>	Fisher
<b>Counting Circle Size</b>	1.0%

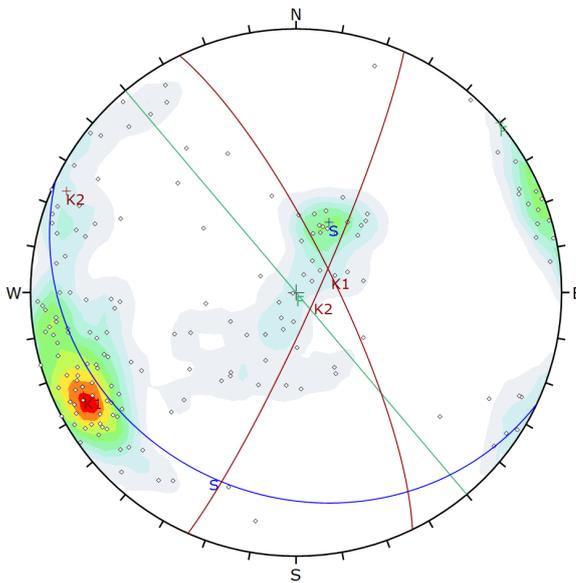
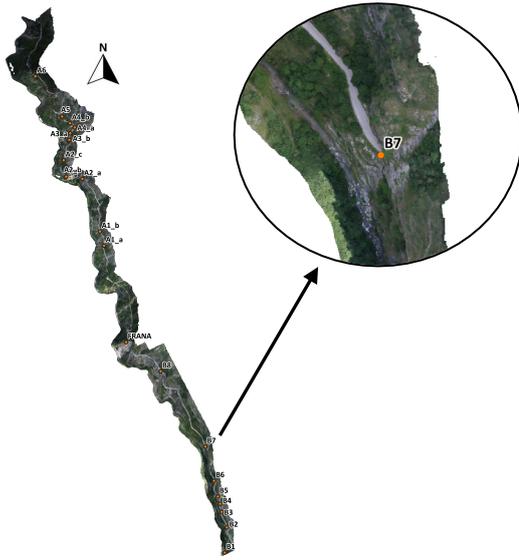
  

	Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>User Planes</b>				
1	■	90	265	F
<b>Mean Set Planes</b>				
1m	■	35	185	S
2m	■	85	197	K1
3m	■	85	248	K2

<b>Plot Mode</b>	Pole Vectors
<b>Vector Count</b>	118 (118 Entries)
<b>Hemisphere</b>	Lower
<b>Projection</b>	Equal Area

# Strada Bassa B7



Symbol	Feature
○	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
0.00 - 1.10	
1.10 - 2.20	
2.20 - 3.30	
3.30 - 4.40	
4.40 - 5.50	
5.50 - 6.60	
6.60 - 7.70	
7.70 - 8.80	
8.80 - 9.90	
9.90 - 11.00	

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	10.54%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

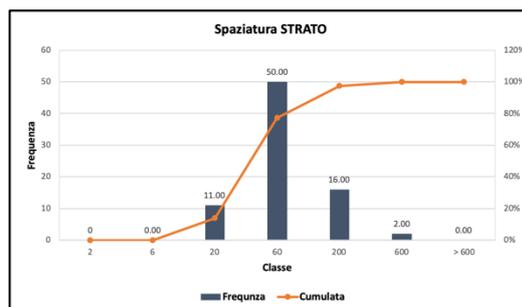
  

Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>User Planes</b>			
1	90	230	F
<b>Mean Set Planes</b>			
1m	24	205	S
2m	78	64	K1
3m	84	114	K2

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	166 (166 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

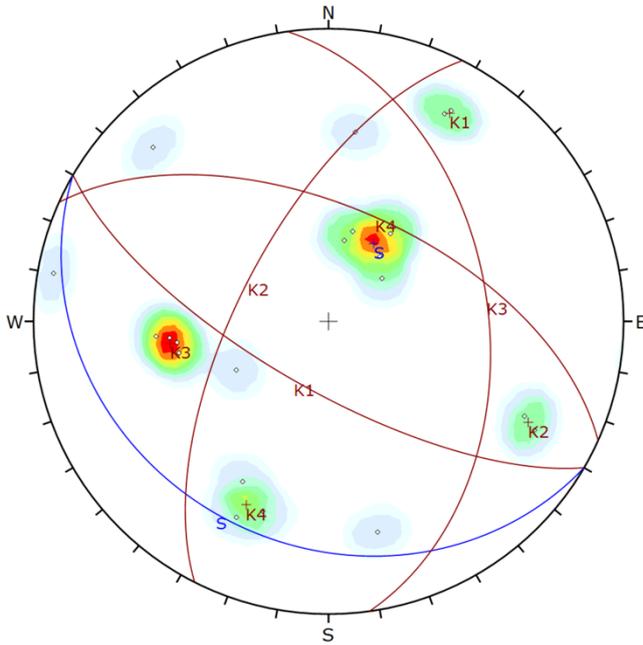
Media [cm]	50.56
Massimo [cm]	269.18
Minimo [cm]	7.35
Moda [cm]	60



**Strada Bassa  
B7**

**Confronto:  
Rilievo tradizionale e tramite Rockscan**

**Rilievo tradizionale**



Symbol	Feature
◊	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
Blue	0.00 - 1.80
Light Blue	1.80 - 3.60
Light Green	3.60 - 5.40
Green	5.40 - 7.20
Yellow-Green	7.20 - 9.00
Yellow	9.00 - 10.80
Orange	10.80 - 12.60
Red-Orange	12.60 - 14.40
Red	14.40 - 16.20
Dark Red	16.20 - 18.00

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	17.29%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

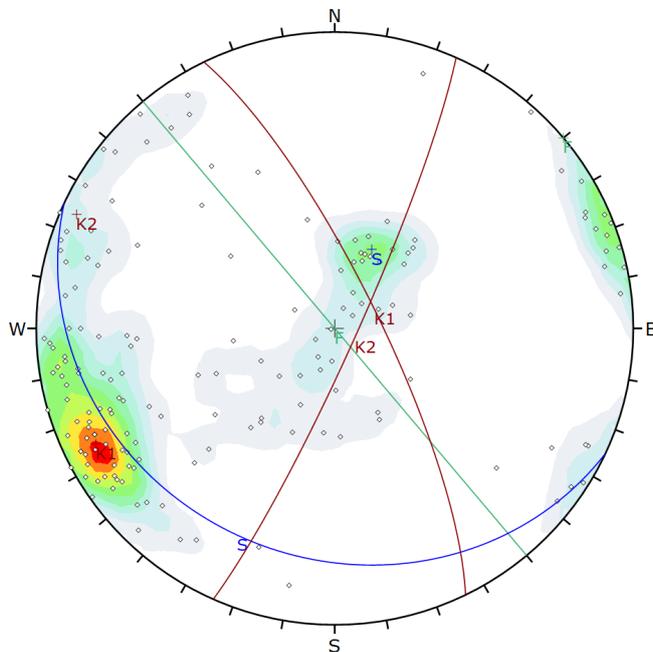
  

Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>Mean Set Planes</b>			
1m	25	210	S
2m	71	210	K1
3m	65	297	K2
4m	45	82	K3
5m	58	24	K4

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	22 (22 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

**Rilievo tramite Rockscan**



Symbol	Feature
◊	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
Blue	0.00 - 1.10
Light Blue	1.10 - 2.20
Light Green	2.20 - 3.30
Green	3.30 - 4.40
Yellow-Green	4.40 - 5.50
Yellow	5.50 - 6.60
Orange	6.60 - 7.70
Red-Orange	7.70 - 8.80
Red	8.80 - 9.90
Dark Red	9.90 - 11.00

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	10.54%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

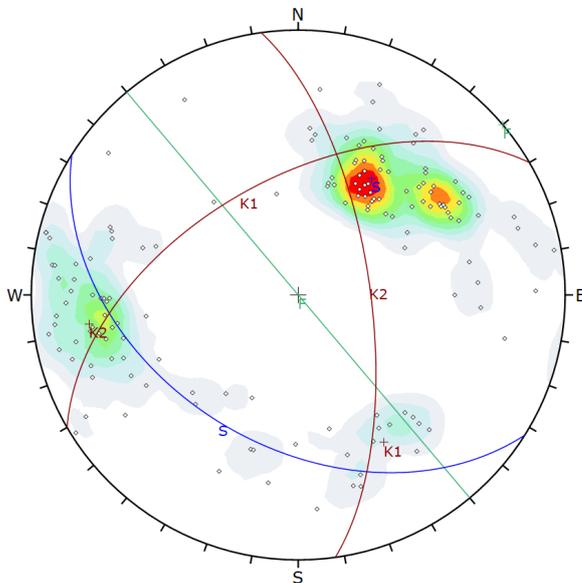
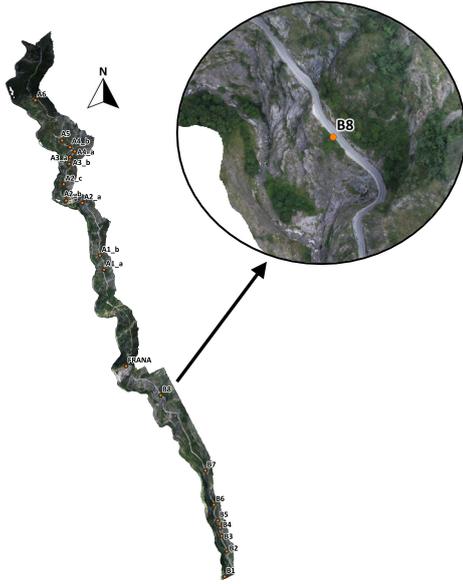
  

Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>User Planes</b>			
1	90	230	F
<b>Mean Set Planes</b>			
1m	24	205	S
2m	78	64	K1
3m	84	114	K2

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	166 (166 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

# Strada Bassa B8



Symbol	Feature
○	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
0.00 - 1.10	
1.10 - 2.20	
2.20 - 3.30	
3.30 - 4.40	
4.40 - 5.50	
5.50 - 6.60	
6.60 - 7.70	
7.70 - 8.80	
8.80 - 9.90	
9.90 - 11.00	

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	10.92%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

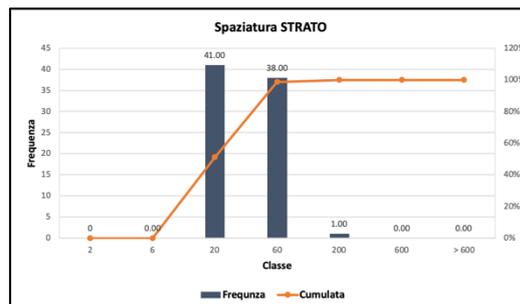
  

Color	Dip	Dip Direction	Label
User Planes			
1	90	230	F
Mean Set Planes			
1m	43	212	S
2m	54	330	K1
3m	68	82	K2

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	150 (150 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

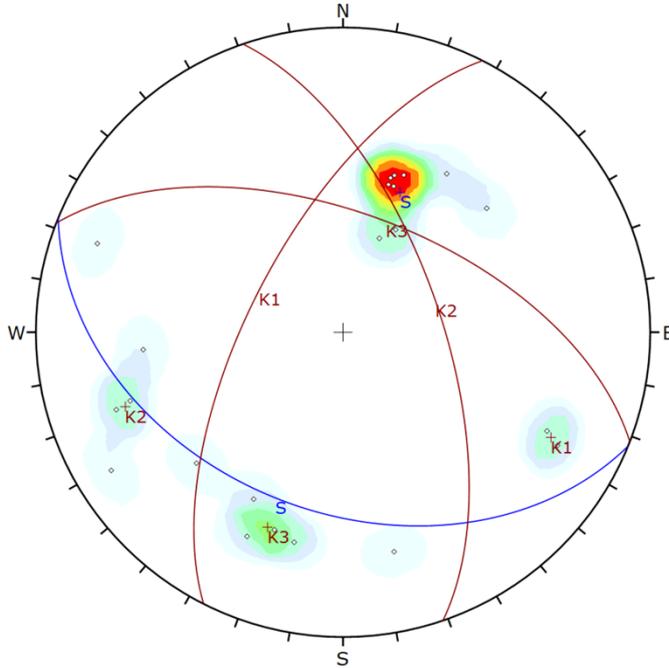
Media [cm]	22.36
Massimo [cm]	64.95
Minimo [cm]	6.07
Moda [cm]	20



**Strada Bassa  
B8**

**Confronto:  
Rilievo tradizionale e tramite Rockscan**

**Rilievo tradizionale**



Symbol	Feature
◊	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
	0.00 - 2.30
	2.30 - 4.60
	4.60 - 6.90
	6.90 - 9.20
	9.20 - 11.50
	11.50 - 13.80
	13.80 - 16.10
	16.10 - 18.40
	18.40 - 20.70
	20.70 - 23.00

Contour Data		Pole Vectors
Maximum Density	22.25%	
Contour Distribution	Fisher	
Counting Circle Size	1.0%	

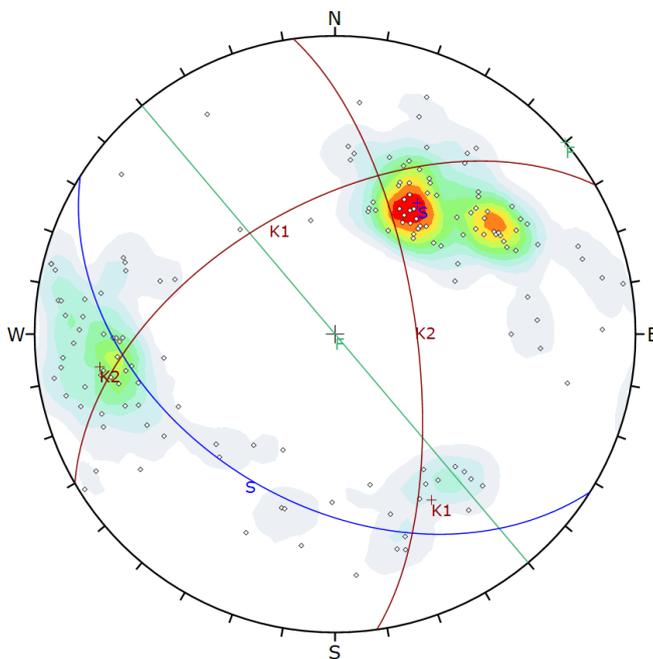
  

Color	Dip	Dip Direction	Label
Mean Set Planes			
1m	41	202	S
2m	65	297	K1
3m	64	71	K2
4m	58	21	K3

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	22 (22 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

**Rilievo tramite Rockscan**



Symbol	Feature
◊	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
	0.00 - 1.10
	1.10 - 2.20
	2.20 - 3.30
	3.30 - 4.40
	4.40 - 5.50
	5.50 - 6.60
	6.60 - 7.70
	7.70 - 8.80
	8.80 - 9.90
	9.90 - 11.00

Contour Data		Pole Vectors
Maximum Density	10.92%	
Contour Distribution	Fisher	
Counting Circle Size	1.0%	

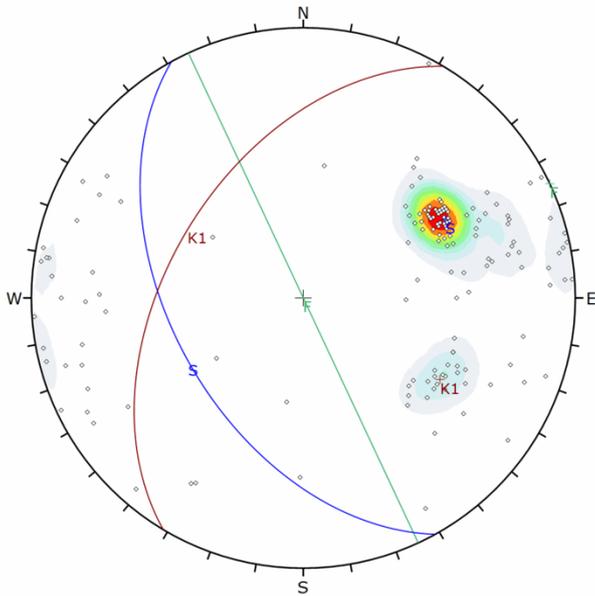
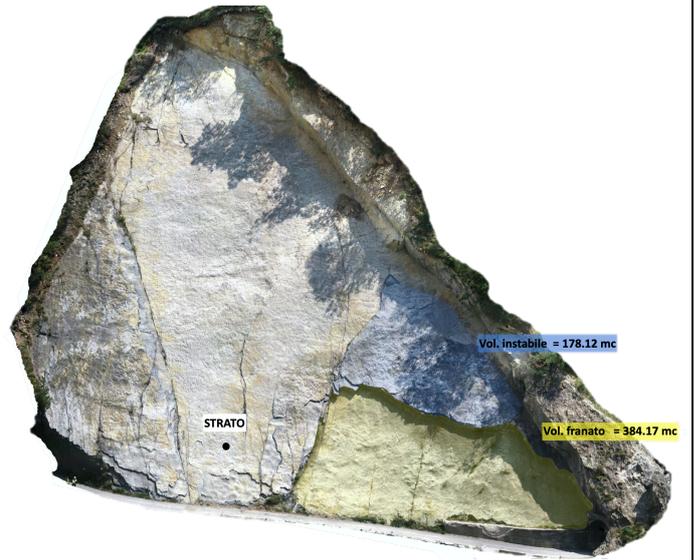
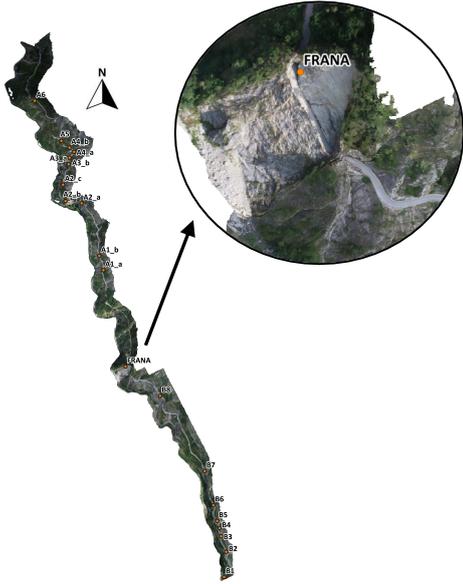
  

Color	Dip	Dip Direction	Label
User Planes			
1	90	230	F
Mean Set Planes			
1m	43	212	S
2m	54	330	K1
3m	68	82	K2

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	150 (150 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

# FRANA



Symbol	Feature
○	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
0.00 - 2.90	
2.90 - 5.80	
5.80 - 8.70	
8.70 - 11.60	
11.60 - 14.50	
14.50 - 17.40	
17.40 - 20.30	
20.30 - 23.20	
23.20 - 26.10	
26.10 - 29.00	

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	28.86%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

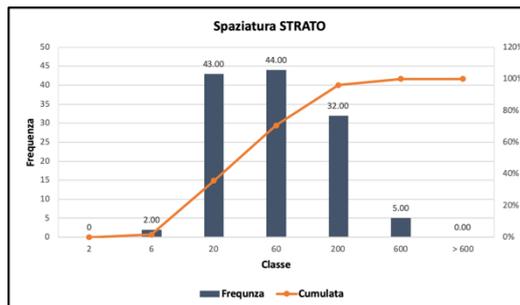
  

Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>User Planes</b>			
1	90	245	F
<b>Mean Set Planes</b>			
1m	50	241	S
2m	49	301	K1

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	157 (157 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

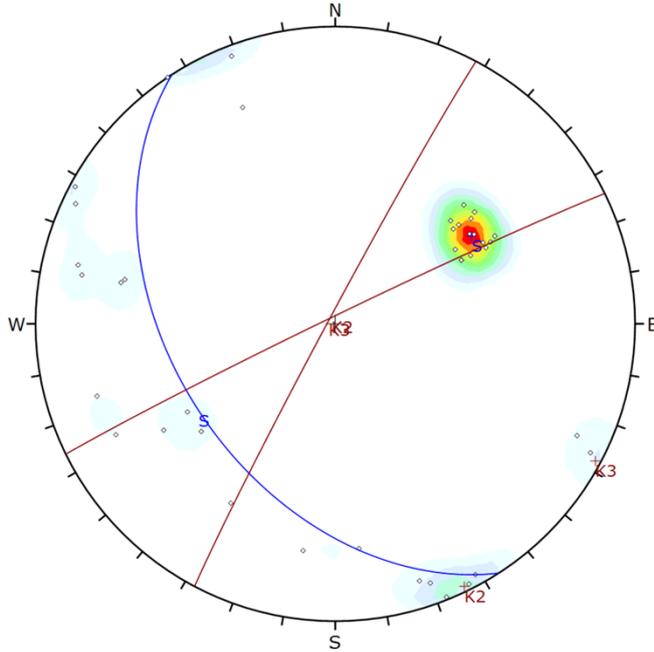
Media [cm]	50.57
Massimo [cm]	258.96
Minimo [cm]	2.51
Moda [cm]	60



**FRANA**

**Confronto:  
Rilievo tradizionale e tramite Rockscan**

**Rilievo tradizionale**



Symbol	Feature
◊	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
	0.00 - 3.20
	3.20 - 6.40
	6.40 - 9.60
	9.60 - 12.80
	12.80 - 16.00
	16.00 - 19.20
	19.20 - 22.40
	22.40 - 25.60
	25.60 - 28.80
	28.80 - 32.00

<b>Contour Data</b>		Pole Vectors
<b>Maximum Density</b>		31.12%
<b>Contour Distribution</b>		Fisher
<b>Counting Circle Size</b>		1.0%

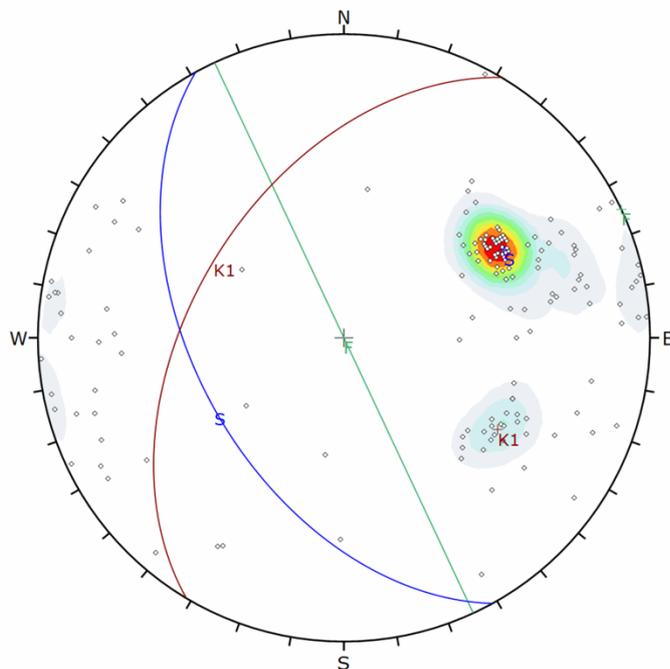
  

	Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>Mean Set Planes</b>				
1m	■	45	237	S
2m	■	88	334	K2
3m	■	88	298	K3

<b>Plot Mode</b>	Pole Vectors
<b>Vector Count</b>	40 (40 Entries)
<b>Hemisphere</b>	Lower
<b>Projection</b>	Equal Area

**Rilievo tramite Rockscan**



Symbol	Feature
◊	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
	0.00 - 2.90
	2.90 - 5.80
	5.80 - 8.70
	8.70 - 11.60
	11.60 - 14.50
	14.50 - 17.40
	17.40 - 20.30
	20.30 - 23.20
	23.20 - 26.10
	26.10 - 29.00

<b>Contour Data</b>		Pole Vectors
<b>Maximum Density</b>		28.86%
<b>Contour Distribution</b>		Fisher
<b>Counting Circle Size</b>		1.0%

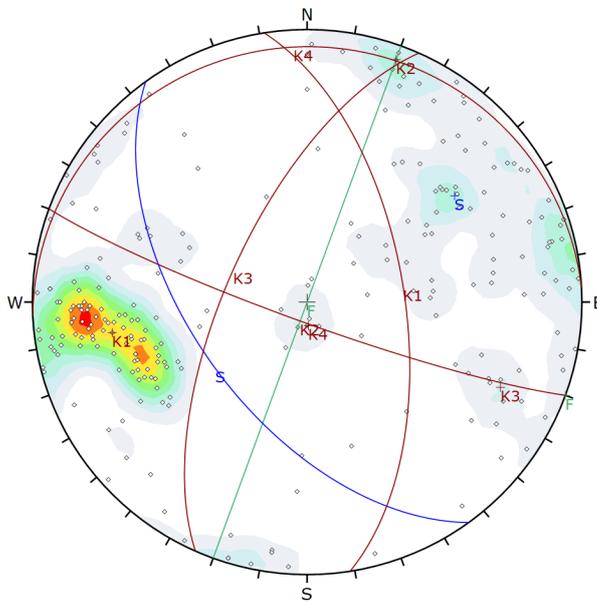
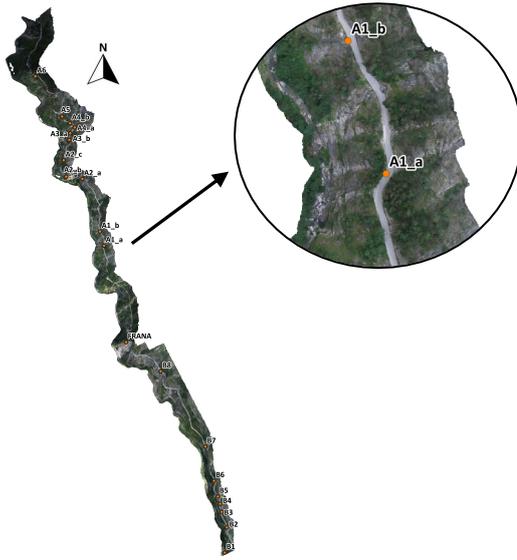
  

	Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>User Planes</b>				
1	■	90	245	F
<b>Mean Set Planes</b>				
1m	■	50	241	S
2m	■	49	301	K1

<b>Plot Mode</b>	Pole Vectors
<b>Vector Count</b>	157 (157 Entries)
<b>Hemisphere</b>	Lower
<b>Projection</b>	Equal Area

# Strada Alta A1\_a



Symbol	Feature
○	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
0.00 - 1.00	
1.00 - 2.00	
2.00 - 3.00	
3.00 - 4.00	
4.00 - 5.00	
5.00 - 6.00	
6.00 - 7.00	
7.00 - 8.00	
8.00 - 9.00	
9.00 - 10.00	

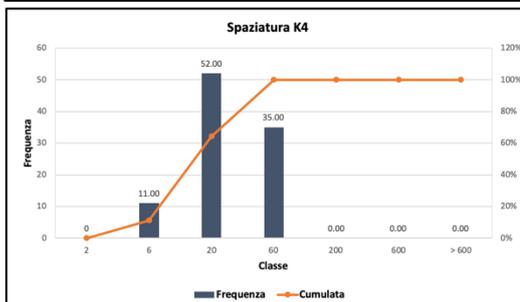
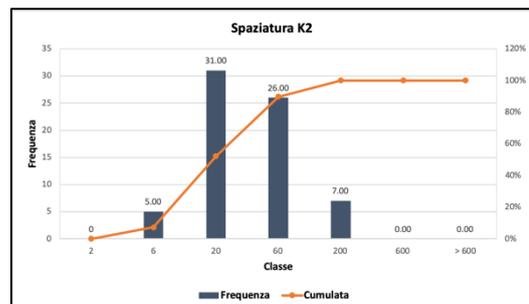
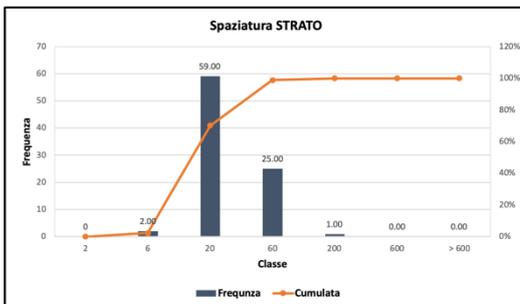
Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	9.32%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

Color	Dip	Dip Direction	Label
User Planes			
1	90	290	F
Mean Set Planes			
1m	56	234	S
2m	61	81	K1
3m	84	200	K2
4m	66	294	K3
5m	7	357	K4

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	241 (241 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

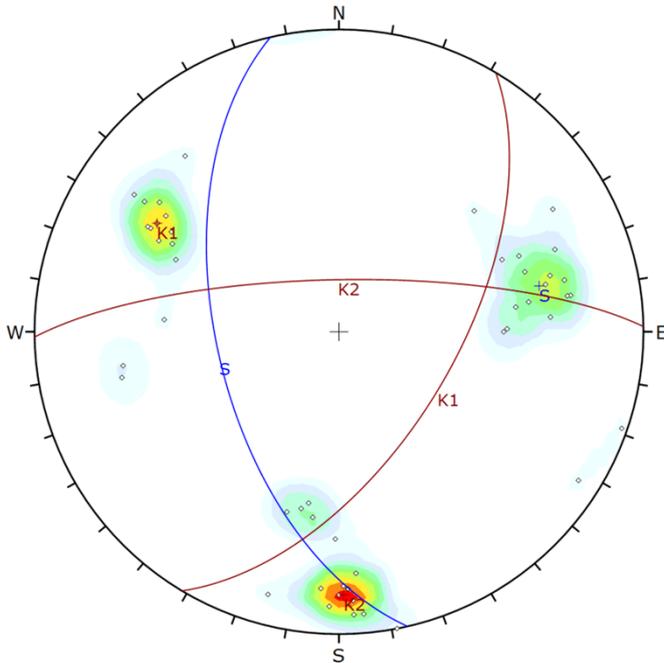


	STRATO	K2	K4
Media [cm]	18.10	27.70	17.24
Massimo [cm]	90.45	123.41	49.37
Minimo [cm]	5.16	4.89	2.85
Moda [cm]	20	20	20

**Strada Alta  
A1\_a**

**Confronto:  
Rilievo tradizionale e tramite Rockscan**

**Rilievo tradizionale**



Symbol	Feature
◊	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
	0.00 - 1.90
	1.90 - 3.80
	3.80 - 5.70
	5.70 - 7.60
	7.60 - 9.50
	9.50 - 11.40
	11.40 - 13.30
	13.30 - 15.20
	15.20 - 17.10
	17.10 - 19.00

<b>Contour Data</b>	Pole Vectors
<b>Maximum Density</b>	18.30%
<b>Contour Distribution</b>	Fisher
<b>Counting Circle Size</b>	1.0%

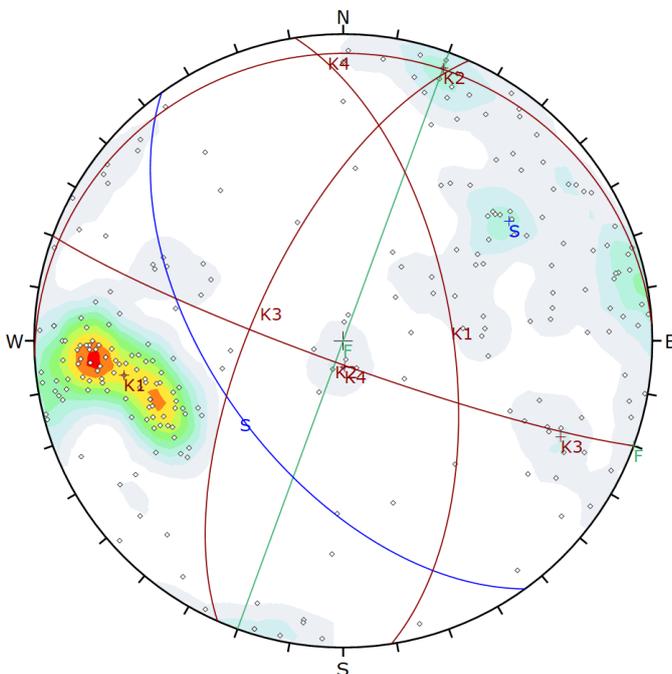
  

Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>Mean Set Planes</b>			
1m	57	257	S
2m	59	121	K1
3m	76	359	K2

<b>Plot Mode</b>	Pole Vectors
<b>Vector Count</b>	51 (51 Entries)
<b>Hemisphere</b>	Lower
<b>Projection</b>	Equal Area

**Rilievo tramite Rockscan**



Symbol	Feature
◊	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
	0.00 - 1.00
	1.00 - 2.00
	2.00 - 3.00
	3.00 - 4.00
	4.00 - 5.00
	5.00 - 6.00
	6.00 - 7.00
	7.00 - 8.00
	8.00 - 9.00
	9.00 - 10.00

<b>Contour Data</b>	Pole Vectors
<b>Maximum Density</b>	9.32%
<b>Contour Distribution</b>	Fisher
<b>Counting Circle Size</b>	1.0%

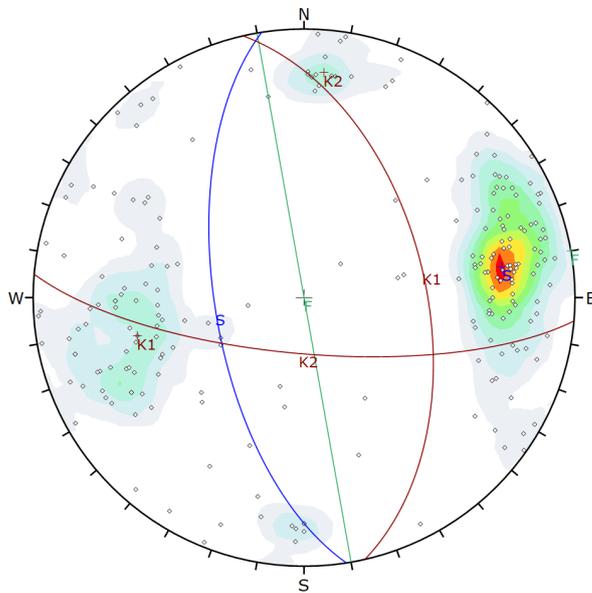
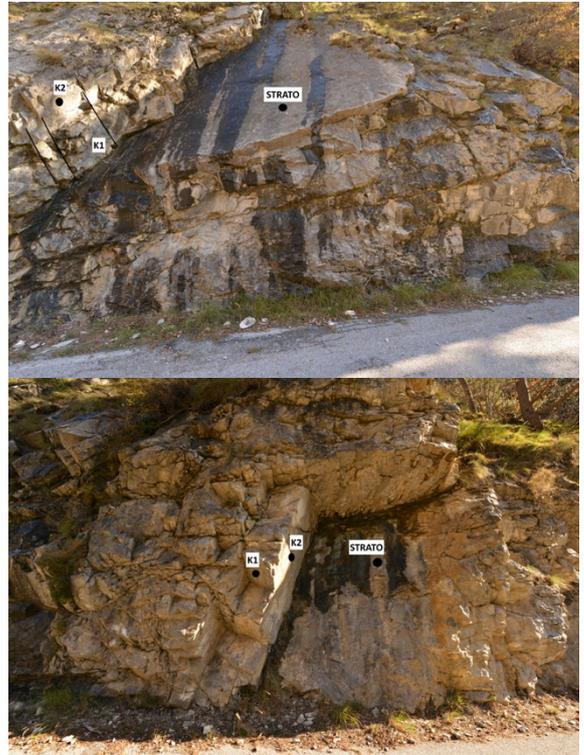
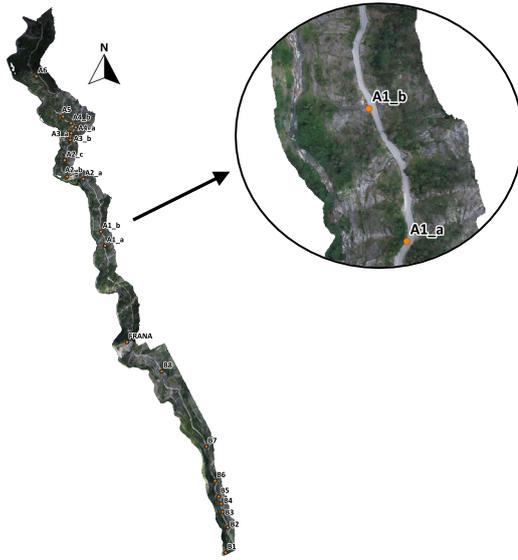
  

Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>User Planes</b>			
1	90	290	F
<b>Mean Set Planes</b>			
1m	56	234	S
2m	61	81	K1
3m	84	200	K2
4m	66	294	K3
5m	7	357	K4

<b>Plot Mode</b>	Pole Vectors
<b>Vector Count</b>	241 (241 Entries)
<b>Hemisphere</b>	Lower
<b>Projection</b>	Equal Area

# Strada Alta A1\_b



Symbol	Feature
○	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
0.00 - 1.10	
1.10 - 2.20	
2.20 - 3.30	
3.30 - 4.40	
4.40 - 5.50	
5.50 - 6.60	
6.60 - 7.70	
7.70 - 8.80	
8.80 - 9.90	
9.90 - 11.00	

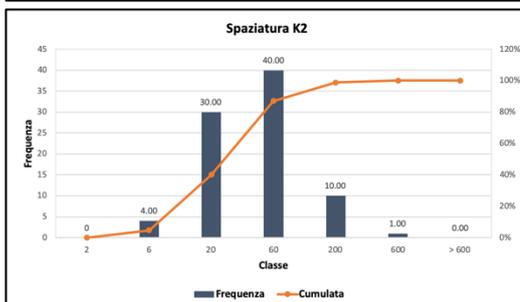
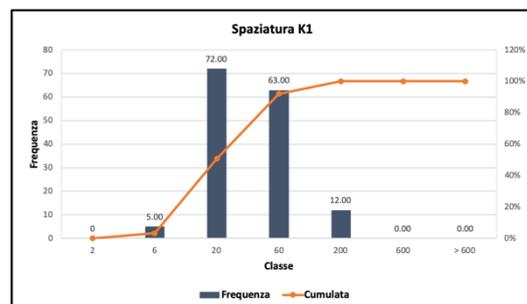
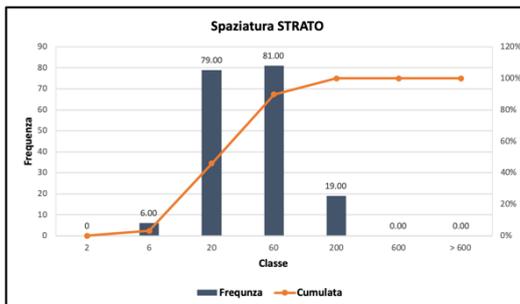
Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	10.43%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

	Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>User Planes</b>				
1	Green	90	260	F
<b>Mean Set Planes</b>				
1m	Blue	63	261	S
2m	Red	53	77	K1
3m	Dark Red	73	185	K2

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	220 (220 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

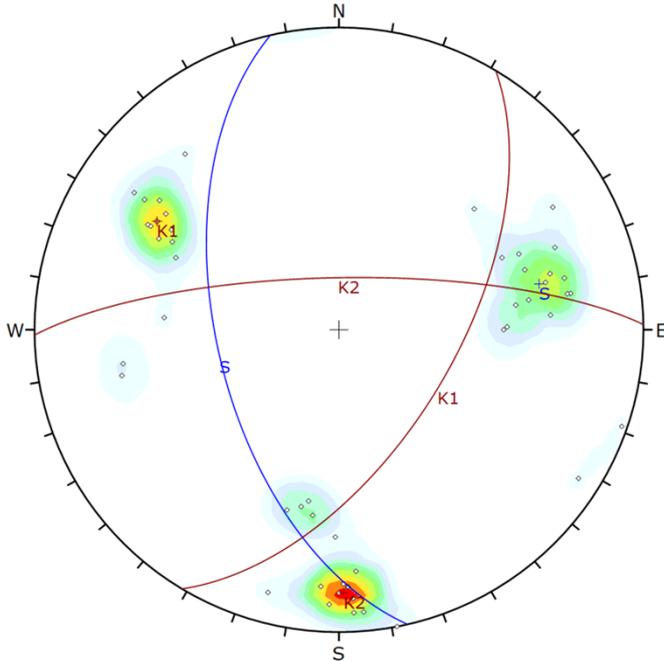


	STRATO	K1	K2
Media [cm]	29.15	27.42	35.61
Massimo [cm]	156.97	142.51	309.10
Minimo [cm]	3.60	3.10	3.39
Moda [cm]	60	20	60

**Strada Alta  
A1\_b**

**Confronto:  
Rilievo tradizionale e tramite Rockscan**

**Rilievo tradizionale**



Symbol	Feature
◊	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
	0.00 - 1.90
	1.90 - 3.80
	3.80 - 5.70
	5.70 - 7.60
	7.60 - 9.50
	9.50 - 11.40
	11.40 - 13.30
	13.30 - 15.20
	15.20 - 17.10
	17.10 - 19.00

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	18.30%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

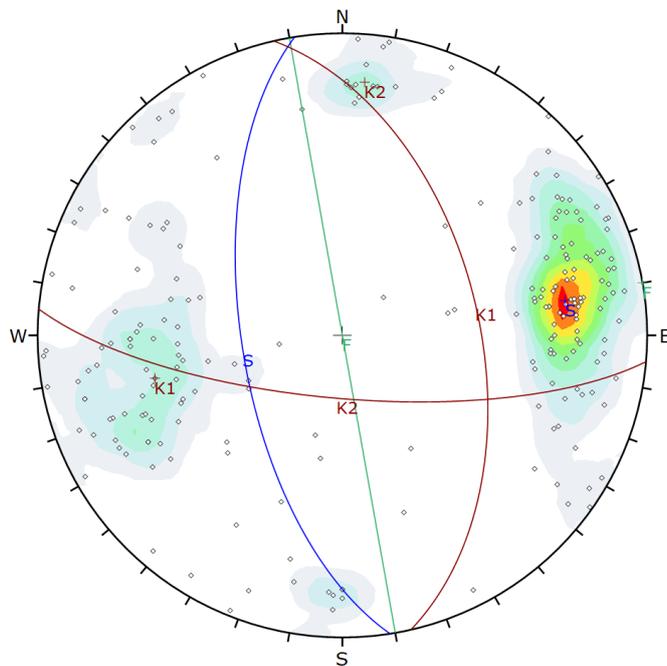
  

Color	Dip	Dip Direction	Label
Mean Set Planes			
1m	57	257	S
2m	59	121	K1
3m	76	359	K2

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	51 (51 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

**Rilievo tramite Rockscan**



Symbol	Feature
◊	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
	0.00 - 1.10
	1.10 - 2.20
	2.20 - 3.30
	3.30 - 4.40
	4.40 - 5.50
	5.50 - 6.60
	6.60 - 7.70
	7.70 - 8.80
	8.80 - 9.90
	9.90 - 11.00

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	10.43%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

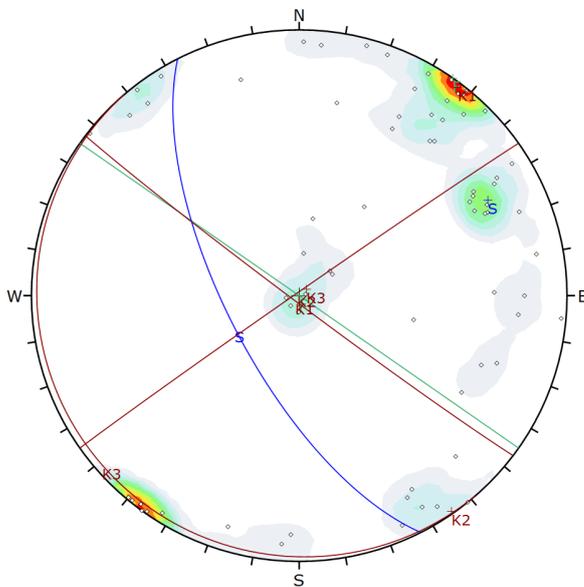
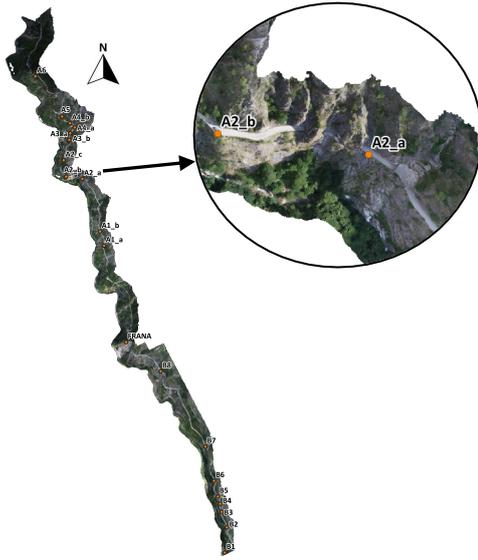
  

Color	Dip	Dip Direction	Label
User Planes			
1	90	260	F
Mean Set Planes			
1m	63	261	S
2m	53	77	K1
3m	73	185	K2

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	220 (220 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

# Strada Alta A2\_a



Symbol	Feature
◊	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
0.00 - 1.80	
1.80 - 3.60	
3.60 - 5.40	
5.40 - 7.20	
7.20 - 9.00	
9.00 - 10.80	
10.80 - 12.60	
12.60 - 14.40	
14.40 - 16.20	
16.20 - 18.00	

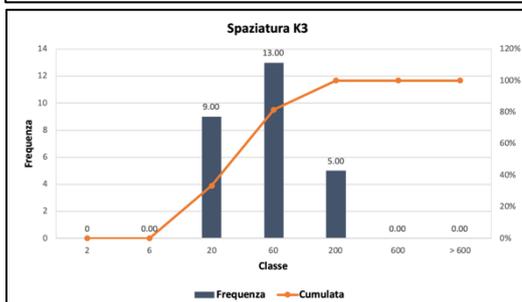
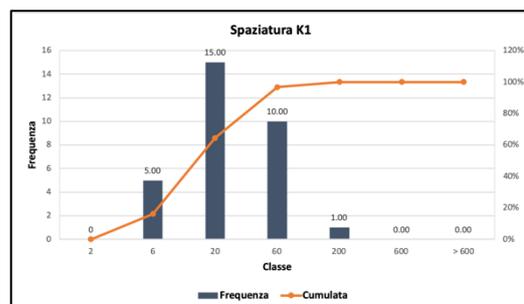
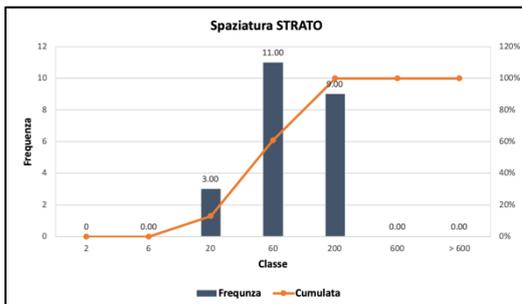
Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	17.42%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>User Planes</b>			
1	90	215	F
<b>Mean Set Planes</b>			
1m	68	243	S
2m	88	217	K1
3m	89	325	K2
4m	3	229	K3

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	74 (74 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

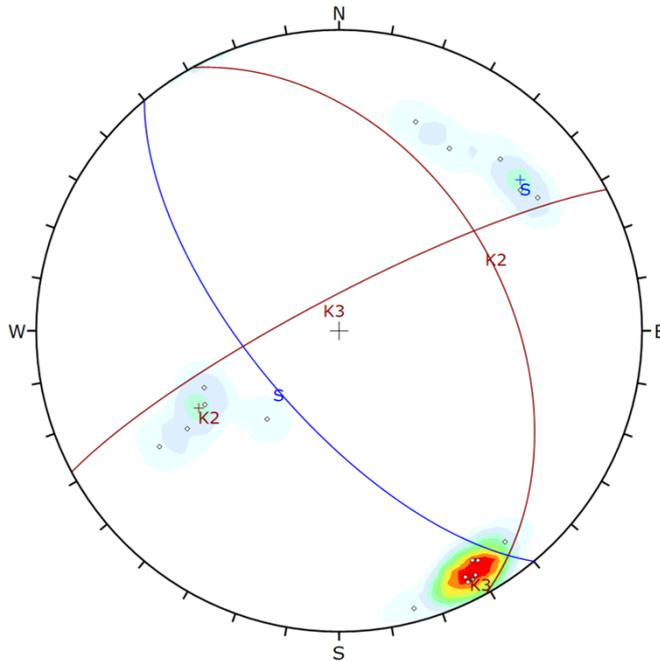


	STRATO	K1	K3
Media [cm]	65.73	18.65	37.43
Massimo [cm]	166.54	63.69	120.56
Minimo [cm]	11.34	3.50	6.36
Moda [cm]	60	20	60

**Strada Alta  
A2\_a**

**Confronto:  
Rilievo tradizionale e tramite Rockscan**

**Rilievo tradizionale**



Symbol	Feature
◊	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
	0.00 - 3.70
	3.70 - 7.40
	7.40 - 11.10
	11.10 - 14.80
	14.80 - 18.50
	18.50 - 22.20
	22.20 - 25.90
	25.90 - 29.60
	29.60 - 33.30
	33.30 - 37.00

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	36.83%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

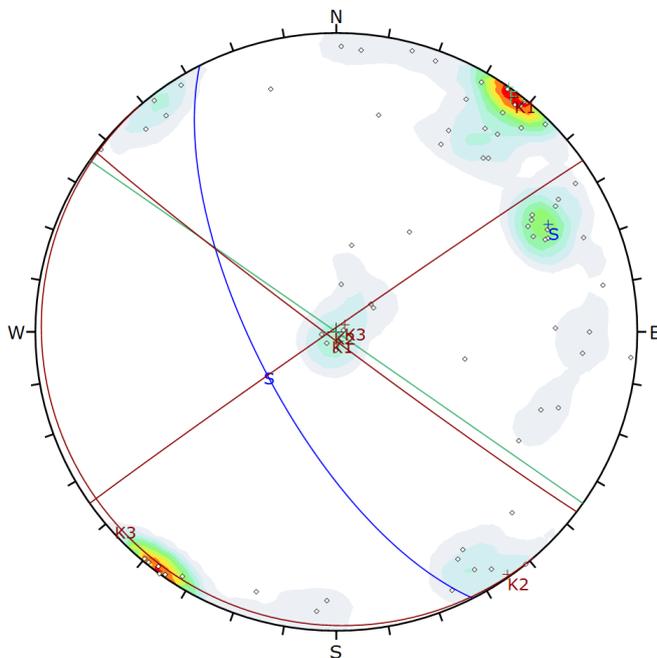
  

	Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>Mean Set Planes</b>				
1m		67	230	S
2m		44	61	K2
3m		81	332	K3

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	19 (19 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

**Rilievo tramite Rockscan**



Symbol	Feature
◊	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
	0.00 - 1.80
	1.80 - 3.60
	3.60 - 5.40
	5.40 - 7.20
	7.20 - 9.00
	9.00 - 10.80
	10.80 - 12.60
	12.60 - 14.40
	14.40 - 16.20
	16.20 - 18.00

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	17.42%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

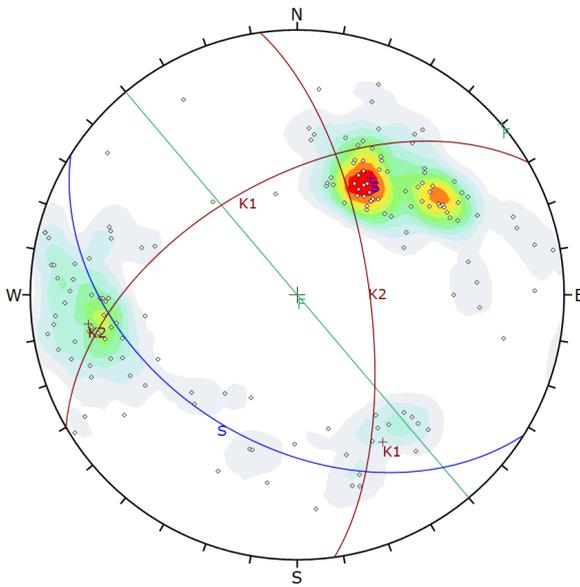
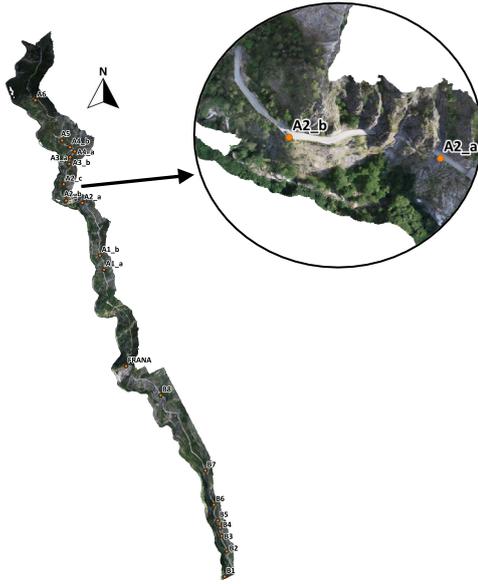
  

	Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>User Planes</b>				
1		90	215	F
<b>Mean Set Planes</b>				
1m		68	243	S
2m		88	217	K1
3m		89	325	K2
4m		3	229	K3

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	74 (74 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

# Strada Alta A2\_b



Symbol	Feature
○	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
Lightest Blue	0,00 - 1,10
Light Blue	1,10 - 2,20
Medium Blue	2,20 - 3,30
Dark Blue	3,30 - 4,40
Very Dark Blue	4,40 - 5,50
Black	5,50 - 6,60
Dark Green	6,60 - 7,70
Green	7,70 - 8,80
Light Green	8,80 - 9,90
Yellow	9,90 - 11,00

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	10,92%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1,0%

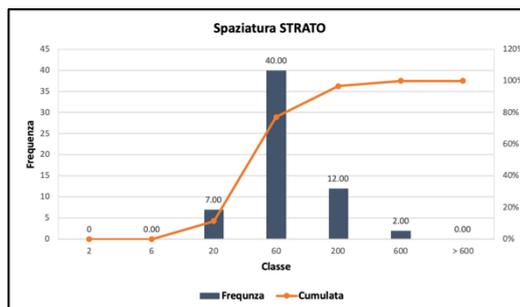
  

Color	Dip	Dip Direction	Label
User Planes			
1	90	230	F
Mean Set Planes			
1m	43	212	S
2m	54	330	K1
3m	68	82	K2

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	150 (150 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

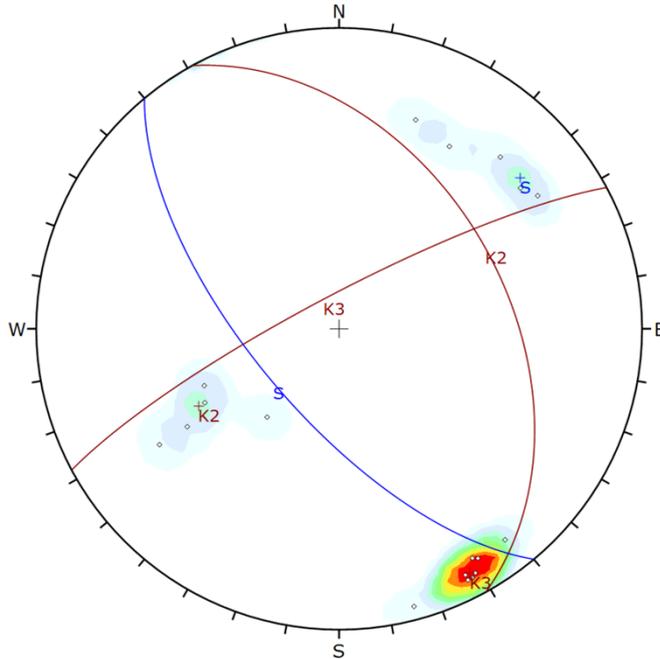
Media [cm]	46.69
Massimo [cm]	280.12
Minimo [cm]	8.46
Moda [cm]	60



**Strada Alta  
A2\_b**

**Confronto:  
Rilievo tradizionale e tramite Rockscan**

**Rilievo tradizionale**



Symbol	Feature
◊	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
	0.00 - 3.70
	3.70 - 7.40
	7.40 - 11.10
	11.10 - 14.80
	14.80 - 18.50
	18.50 - 22.20
	22.20 - 25.90
	25.90 - 29.60
	29.60 - 33.30
	33.30 - 37.00

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	36.83%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

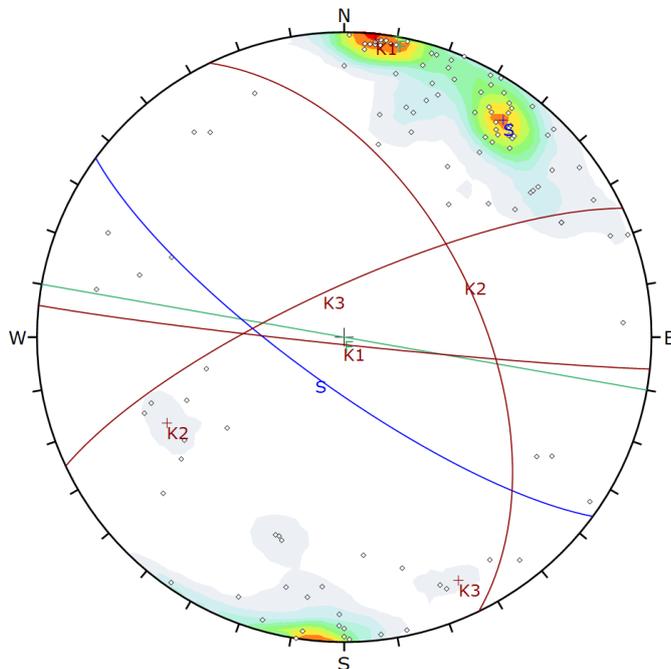
  

	Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>Mean Set Planes</b>				
1m	█	67	230	S
2m	█	44	61	K2
3m	█	81	332	K3

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	19 (19 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

**Rilievo tramite Rockscan**



Symbol	Feature
◊	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
	0.00 - 1.70
	1.70 - 3.40
	3.40 - 5.10
	5.10 - 6.80
	6.80 - 8.50
	8.50 - 10.20
	10.20 - 11.90
	11.90 - 13.60
	13.60 - 15.30
	15.30 - 17.00

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	16.07%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

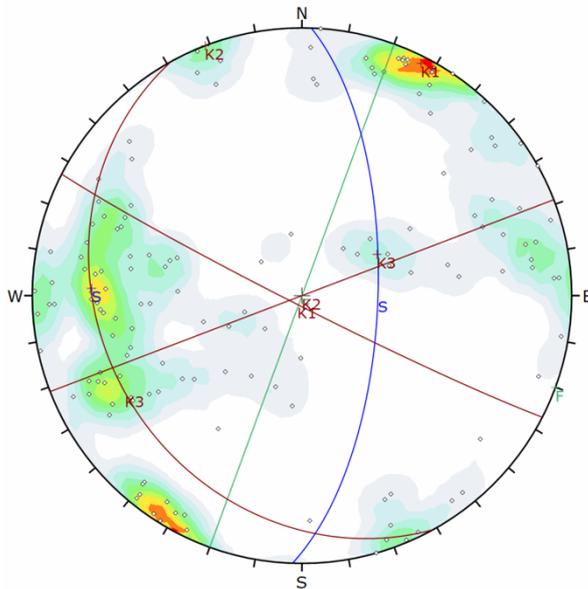
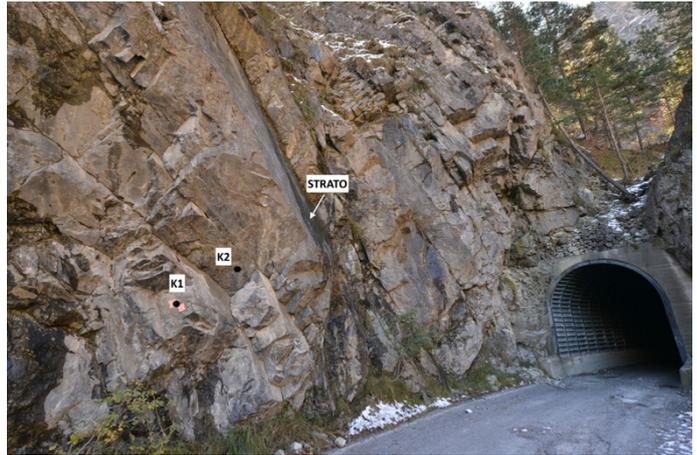
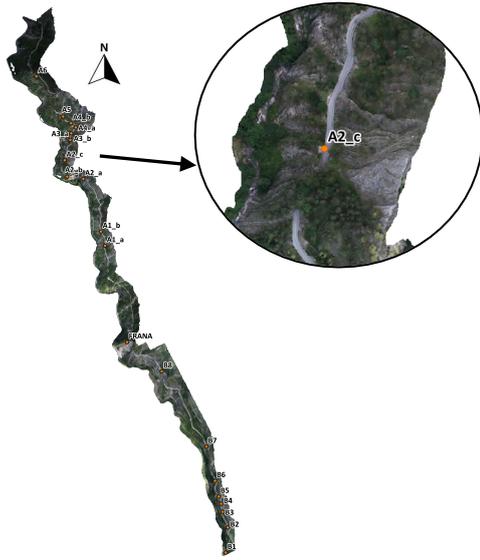
  

	Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>User Planes</b>				
1	█	90	190	F
<b>Mean Set Planes</b>				
1m	█	77	216	S
2m	█	88	186	K1
3m	█	54	64	K2
4m	█	77	335	K3

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	116 (116 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

# Strada Alta A2\_c



Symbol	Feature
○	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
0.00 - 0.75	
0.75 - 1.50	
1.50 - 2.25	
2.25 - 3.00	
3.00 - 3.75	
3.75 - 4.50	
4.50 - 5.25	
5.25 - 6.00	
6.00 - 6.75	
6.75 - 7.50	

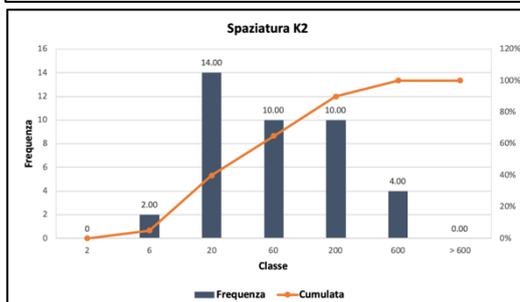
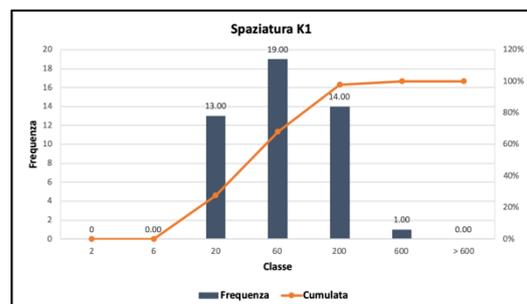
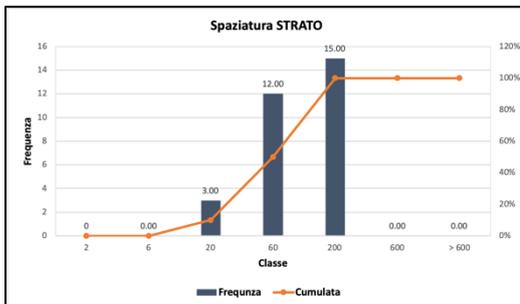
Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	7.09%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>User Planes</b>			
1	90	290	F
<b>Mean Set Planes</b>			
1m	67	92	S
2m	87	207	K1
3m	90	159	K2
4m	26	241	K3

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	145 (145 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

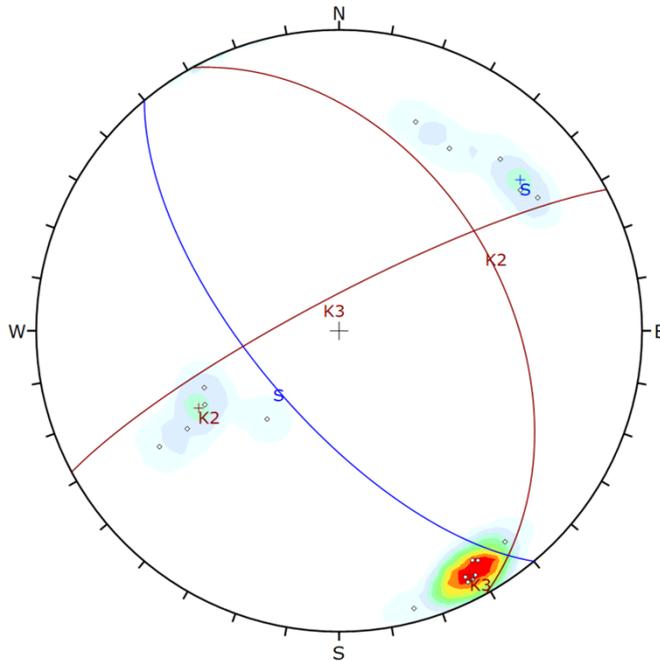


	STRATO	K1	K2
Media [cm]	61.58	53.47	68.13
Massimo [cm]	144.27	259.56	505.23
Minimo [cm]	11.25	6.33	5.51
Moda [cm]	200	60	20

**Strada Alta  
A2\_c**

**Confronto:  
Rilievo tradizionale e tramite Rockscan**

**Rilievo tradizionale**



Symbol	Feature
○	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
	0.00 - 3.70
	3.70 - 7.40
	7.40 - 11.10
	11.10 - 14.80
	14.80 - 18.50
	18.50 - 22.20
	22.20 - 25.90
	25.90 - 29.60
	29.60 - 33.30
	33.30 - 37.00

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	36.83%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

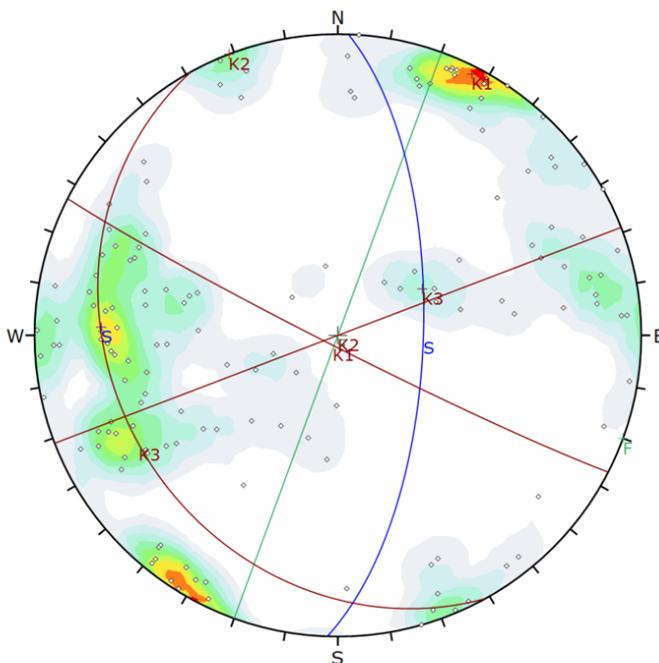
  

	Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>Mean Set Planes</b>				
1m		67	230	S
2m		44	61	K2
3m		81	332	K3

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	19 (19 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

**Rilievo tramite Rockscan**



Symbol	Feature
○	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
	0.00 - 0.75
	0.75 - 1.50
	1.50 - 2.25
	2.25 - 3.00
	3.00 - 3.75
	3.75 - 4.50
	4.50 - 5.25
	5.25 - 6.00
	6.00 - 6.75
	6.75 - 7.50

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	7.09%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

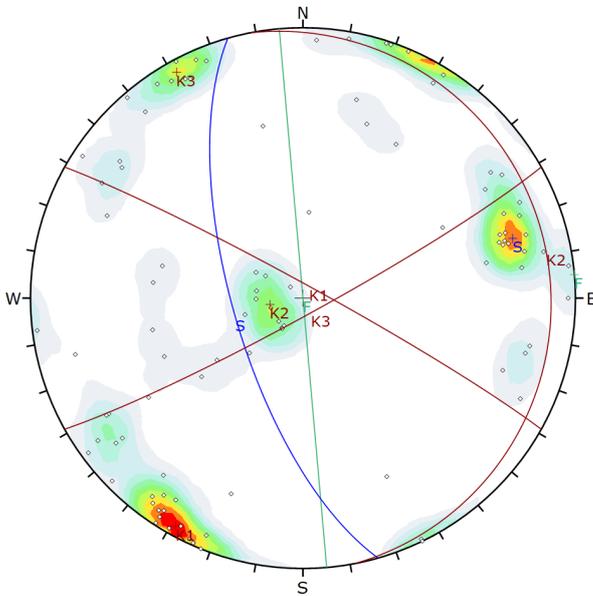
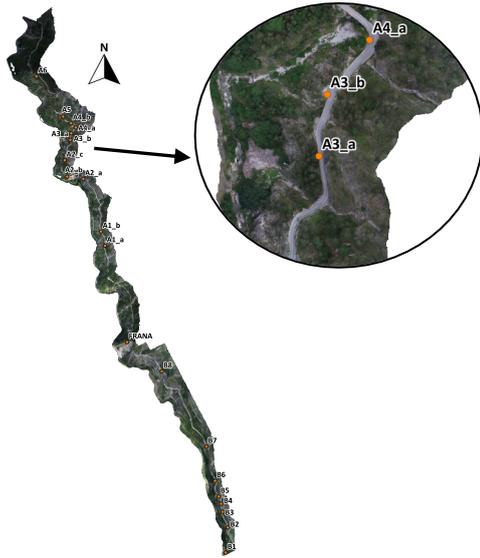
  

	Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>User Planes</b>				
1		90	290	F
<b>Mean Set Planes</b>				
1m		67	92	S
2m		87	207	K1
3m		90	159	K2
4m		26	241	K3

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	145 (145 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

# Strada Alta A3\_a



Symbol	Feature
◊	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
0.00 - 1.10	
1.10 - 2.20	
2.20 - 3.30	
3.30 - 4.40	
4.40 - 5.50	
5.50 - 6.60	
6.60 - 7.70	
7.70 - 8.80	
8.80 - 9.90	
9.90 - 11.00	

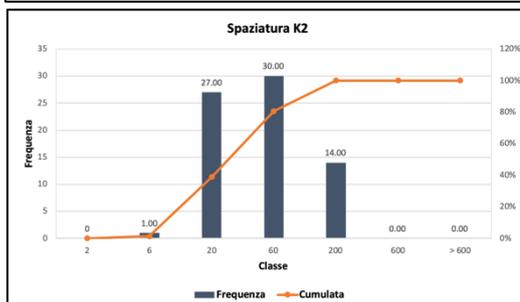
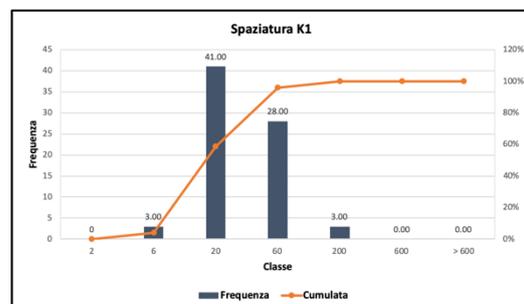
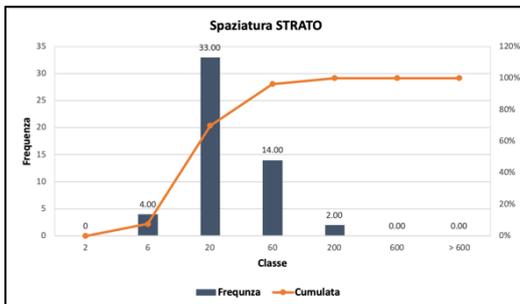
Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	10.92%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>User Planes</b>			
1	90	265	F
<b>Mean Set Planes</b>			
1m	69	254	S
2m	86	29	K1
3m	10	79	K2
4m	85	151	K3

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	97 (97 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

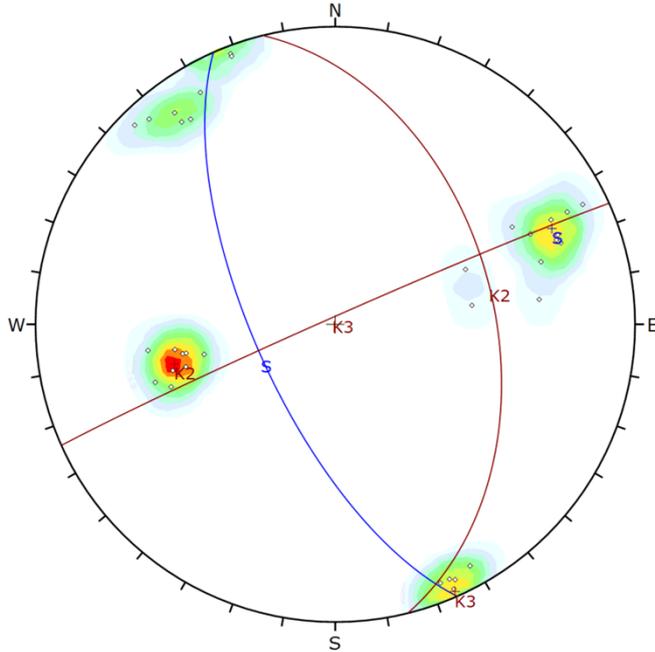


	STRATO	K1	K2
Media [cm]	23.01	23.80	39.61
Massimo [cm]	179.44	143.72	178.12
Minimo [cm]	3.41	3.27	4.81
Moda [cm]	20	20	60

**Strada Alta  
A3\_a**

**Confronto:  
Rilievo tradizionale e tramite Rockscan**

**Rilievo tradizionale**



Symbol	Feature
◊	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
	0.00 - 2.10
	2.10 - 4.20
	4.20 - 6.30
	6.30 - 8.40
	8.40 - 10.50
	10.50 - 12.60
	12.60 - 14.70
	14.70 - 16.80
	16.80 - 18.90
	18.90 - 21.00

<b>Contour Data</b>	Pole Vectors
<b>Maximum Density</b>	20.01%
<b>Contour Distribution</b>	Fisher
<b>Counting Circle Size</b>	1.0%

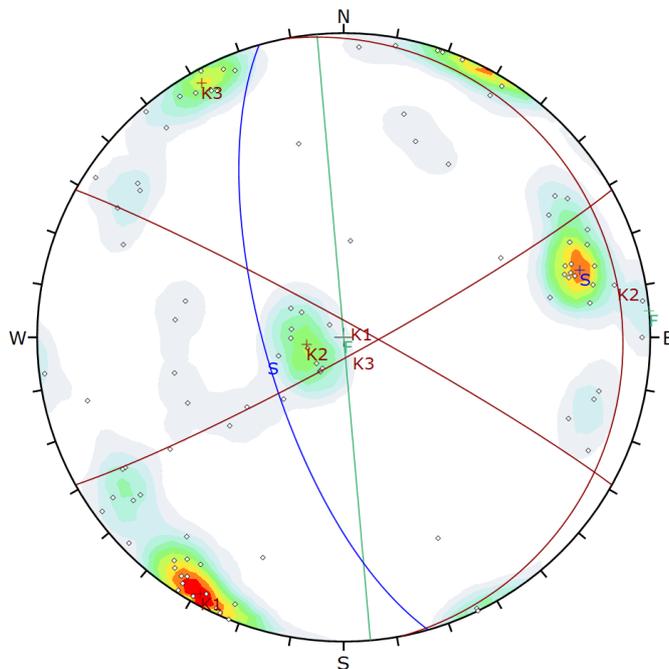
  

Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>Mean Set Planes</b>			
1m	68	246	S
2m	46	76	K2
3m	88	336	K3

<b>Plot Mode</b>	Pole Vectors
<b>Vector Count</b>	34 (34 Entries)
<b>Hemisphere</b>	Lower
<b>Projection</b>	Equal Area

**Rilievo tramite Rockscan**



Symbol	Feature
◊	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
	0.00 - 1.10
	1.10 - 2.20
	2.20 - 3.30
	3.30 - 4.40
	4.40 - 5.50
	5.50 - 6.60
	6.60 - 7.70
	7.70 - 8.80
	8.80 - 9.90
	9.90 - 11.00

<b>Contour Data</b>	Pole Vectors
<b>Maximum Density</b>	10.92%
<b>Contour Distribution</b>	Fisher
<b>Counting Circle Size</b>	1.0%

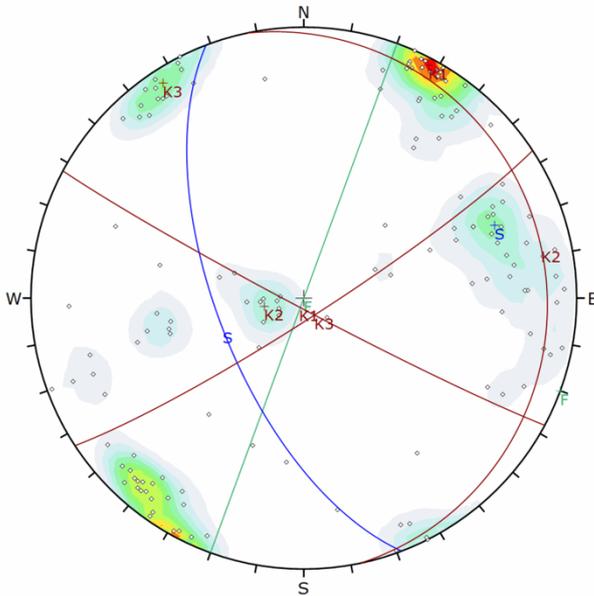
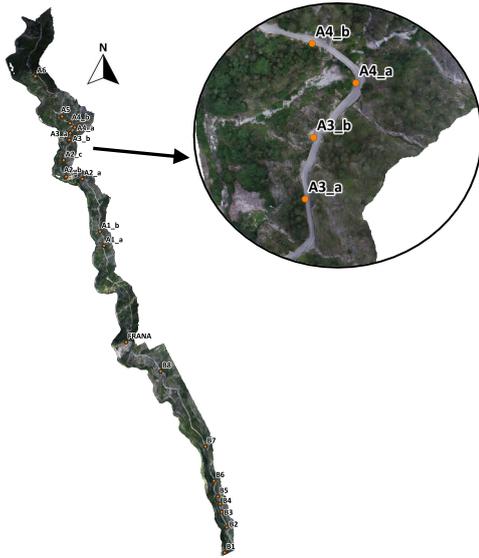
  

Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>User Planes</b>			
1	90	265	F
<b>Mean Set Planes</b>			
1m	69	254	S
2m	86	29	K1
3m	10	79	K2
4m	85	151	K3

<b>Plot Mode</b>	Pole Vectors
<b>Vector Count</b>	97 (97 Entries)
<b>Hemisphere</b>	Lower
<b>Projection</b>	Equal Area

# Strada Alta A3\_b



Symbol	Feature
◊	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
	0.00 - 1.30
	1.30 - 2.60
	2.60 - 3.90
	3.90 - 5.20
	5.20 - 6.50
	6.50 - 7.80
	7.80 - 9.10
	9.10 - 10.40
	10.40 - 11.70
	11.70 - 13.00

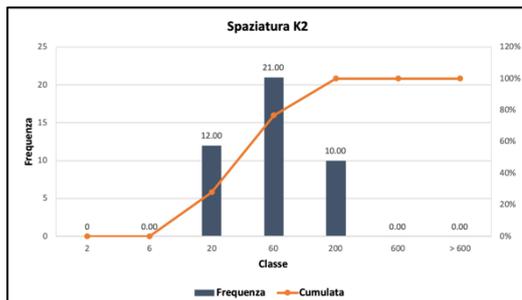
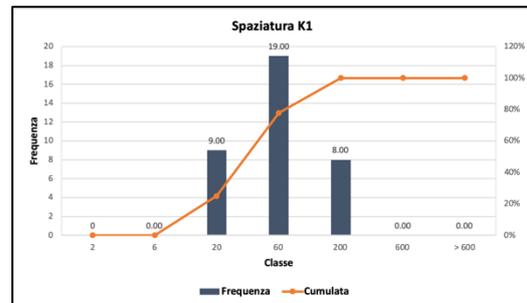
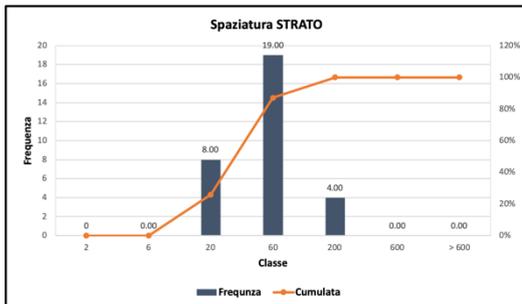
Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	12.34%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>User Planes</b>			
1	90	290	F
<b>Mean Set Planes</b>			
1m	64	249	S
2m	87	208	K1
3m	12	78	K2
4m	84	147	K3

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	142 (142 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

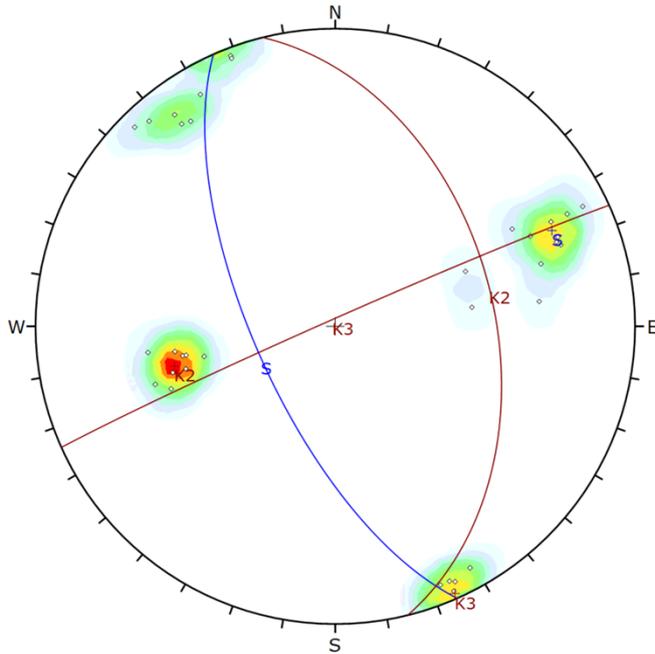


	STRATO	K1	K2
Media [cm]	38.27	46.49	41.11
Massimo [cm]	132.13	169.08	132.35
Minimo [cm]	7.53	10.17	6.40
Moda [cm]	60	60	60

**Strada Alta  
A3\_b**

**Confronto:  
Rilievo tradizionale e tramite Rockscan**

**Rilievo tradizionale**



Symbol	Feature
◊	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
	0.00 - 2.10
	2.10 - 4.20
	4.20 - 6.30
	6.30 - 8.40
	8.40 - 10.50
	10.50 - 12.60
	12.60 - 14.70
	14.70 - 16.80
	16.80 - 18.90
	18.90 - 21.00

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	20.01%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

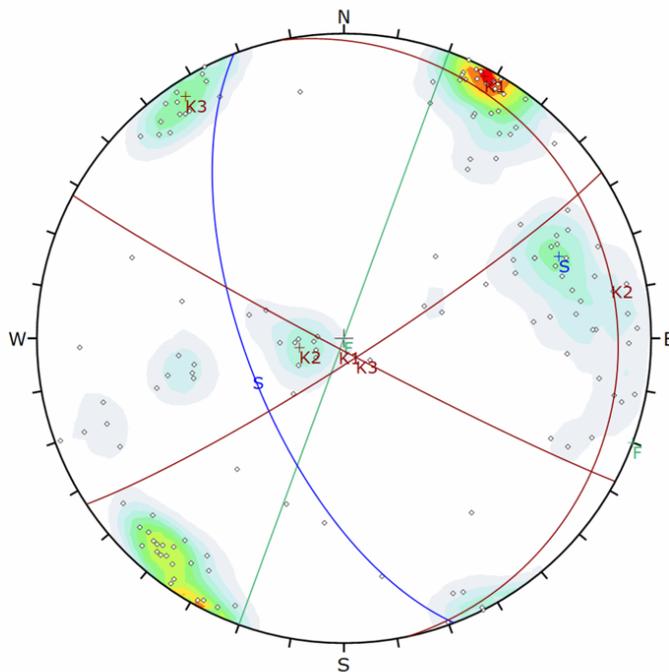
  

Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>Mean Set Planes</b>			
1m	68	246	S
2m	46	76	K2
3m	88	336	K3

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	34 (34 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

**Rilievo tramite Rockscan**



Symbol	Feature
◊	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
	0.00 - 1.30
	1.30 - 2.60
	2.60 - 3.90
	3.90 - 5.20
	5.20 - 6.50
	6.50 - 7.80
	7.80 - 9.10
	9.10 - 10.40
	10.40 - 11.70
	11.70 - 13.00

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	12.34%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

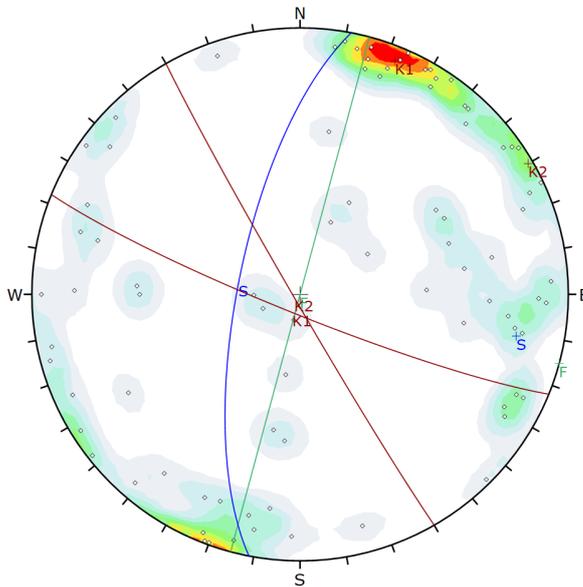
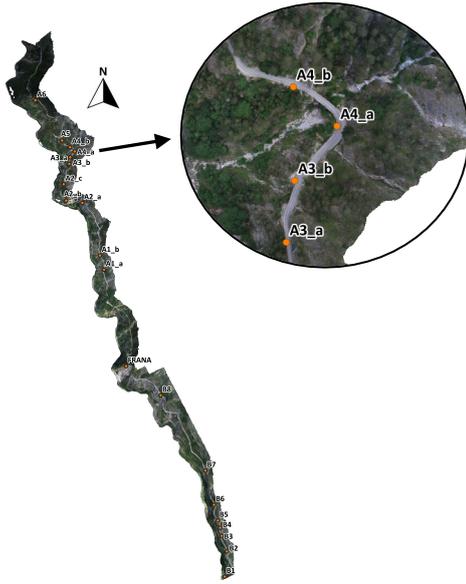
  

Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>User Planes</b>			
1	90	290	F
<b>Mean Set Planes</b>			
1m	64	249	S
2m	87	208	K1
3m	12	78	K2
4m	84	147	K3

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	142 (142 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

# Strada Alta A4\_a



Symbol	Feature
○	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
0.00 - 1.00	
1.00 - 2.00	
2.00 - 3.00	
3.00 - 4.00	
4.00 - 5.00	
5.00 - 6.00	
6.00 - 7.00	
7.00 - 8.00	
8.00 - 9.00	
9.00 - 10.00	

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	9.92%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

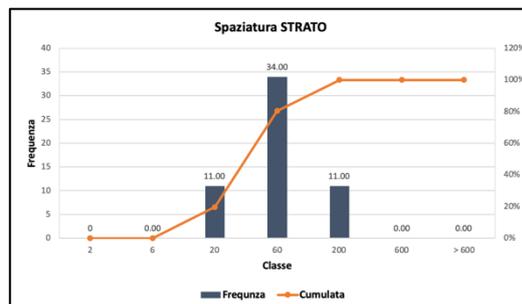
  

Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>User Planes</b>			
1	90	285	F
<b>Mean Set Planes</b>			
1m	71	281	S
2m	84	202	K1
3m	88	240	K2

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	83 (83 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

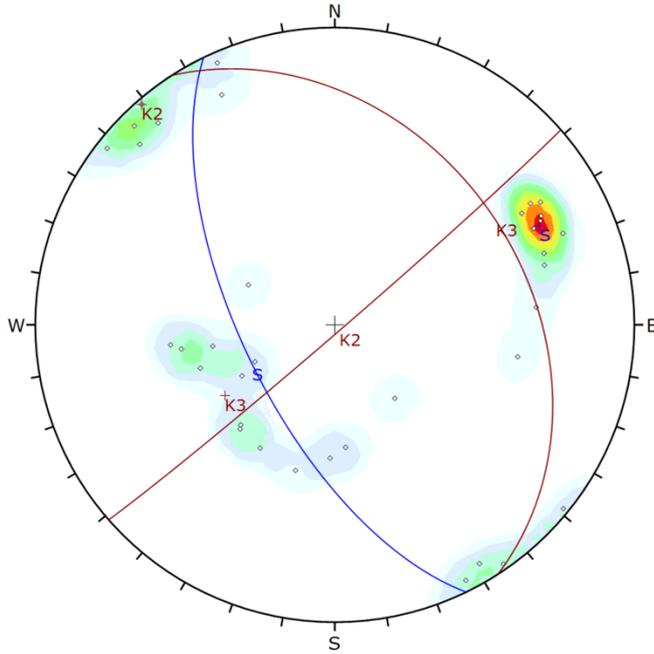
Media [cm]	38.40
Massimo [cm]	122.02
Minimo [cm]	7.25
Moda [cm]	60



**Strada Alta  
A4\_a**

**Confronto:  
Rilievo tradizionale e tramite Rockscan**

**Rilievo tradizionale**



Symbol	Feature
◊	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
	0.00 - 2.00
	2.00 - 4.00
	4.00 - 6.00
	6.00 - 8.00
	8.00 - 10.00
	10.00 - 12.00
	12.00 - 14.00
	14.00 - 16.00
	16.00 - 18.00
	18.00 - 20.00

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	19.42%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

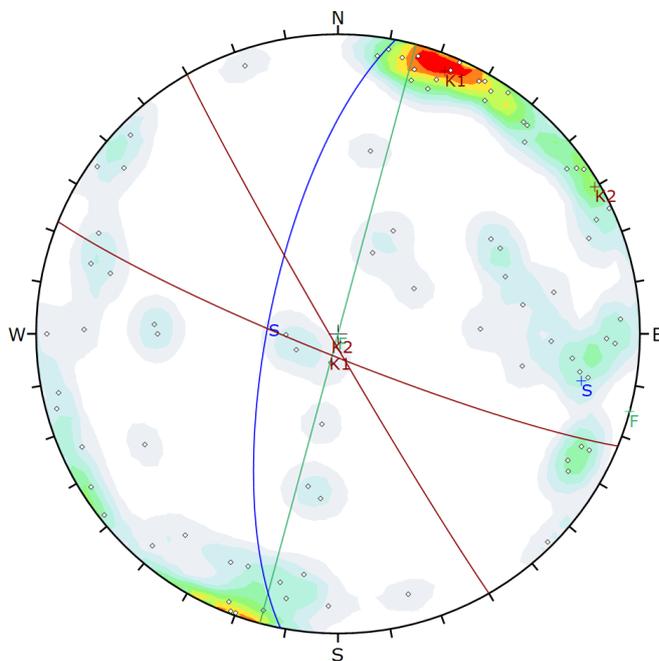
  

Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>Mean Set Planes</b>			
1m	65	244	S
2m	88	139	K2
3m	36	57	K3

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	36 (36 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

**Rilievo tramite Rockscan**



Symbol	Feature
◊	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
	0.00 - 1.00
	1.00 - 2.00
	2.00 - 3.00
	3.00 - 4.00
	4.00 - 5.00
	5.00 - 6.00
	6.00 - 7.00
	7.00 - 8.00
	8.00 - 9.00
	9.00 - 10.00

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	9.92%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

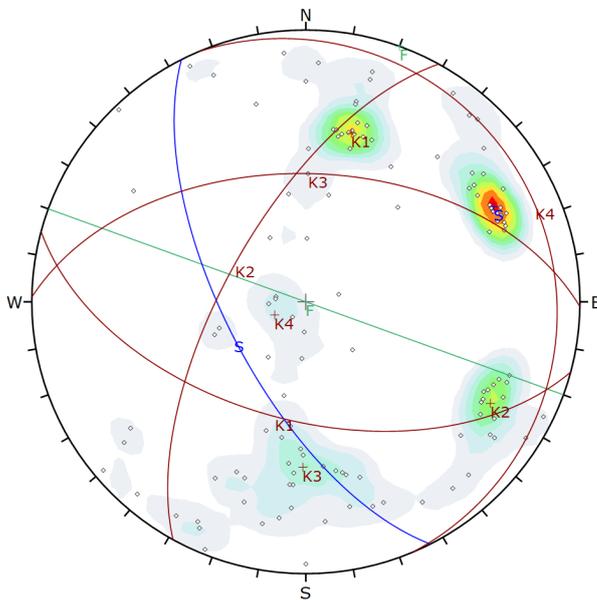
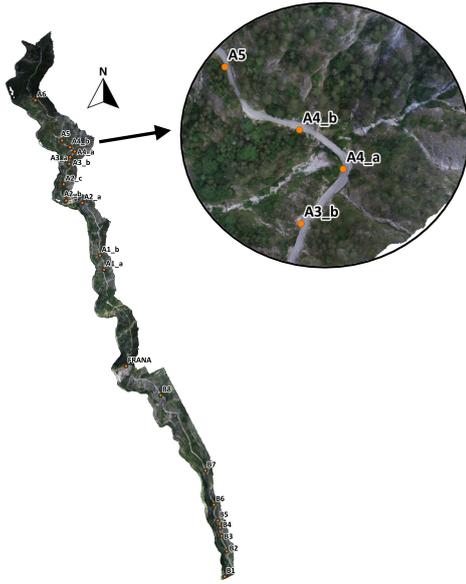
  

Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>User Planes</b>			
1	90	285	F
<b>Mean Set Planes</b>			
1m	71	281	S
2m	84	202	K1
3m	88	240	K2

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	83 (83 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

# Strada Alta A4\_b



Symbol	Feature
◊	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
Lightest Green	0.00 - 1.30
Light Green	1.30 - 2.60
Green	2.60 - 3.90
Yellow-Green	3.90 - 5.20
Yellow	5.20 - 6.50
Orange	6.50 - 7.80
Red-Orange	7.80 - 9.10
Red	9.10 - 10.40
Dark Red	10.40 - 11.70
Black	11.70 - 13.00

Contour Data		Pole Vectors
Maximum Density		12.52%
Contour Distribution		Fisher
Counting Circle Size		1.0%

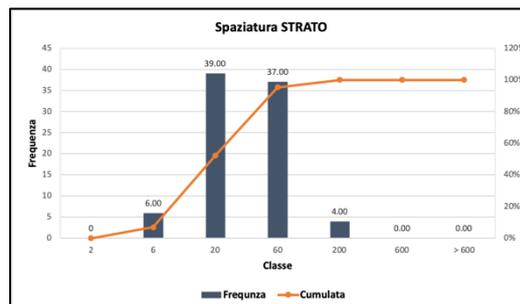
  

Color	Dip	Dip Direction	Label
User Planes			
1	90	200	F
Mean Set Planes			
1m	66	243	S
2m	54	195	K1
3m	66	299	K2
4m	51	1	K3
5m	10	67	K4

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	121 (121 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

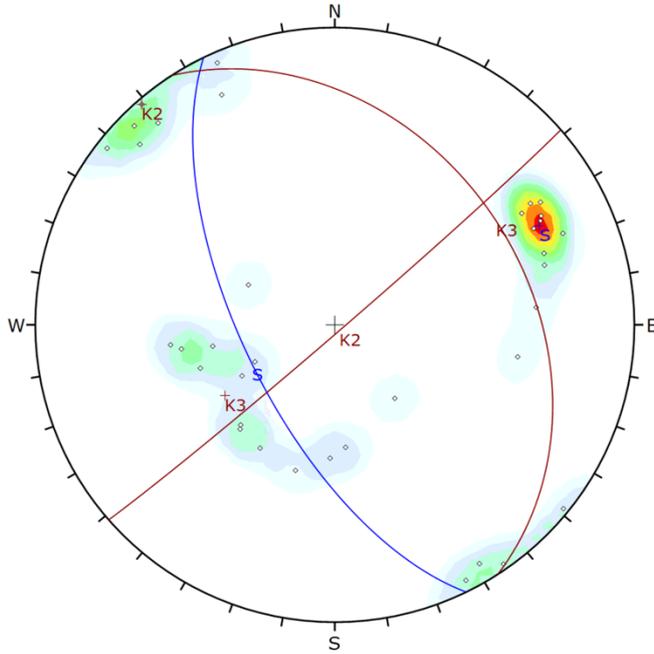
Media [cm]	23.45
Massimo [cm]	112.95
Minimo [cm]	4.62
Moda [cm]	20



**Strada Alta  
A4\_b**

**Confronto:  
Rilievo tradizionale e tramite Rockscan**

**Rilievo tradizionale**



Symbol	Feature
○	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
	0.00 - 2.00
	2.00 - 4.00
	4.00 - 6.00
	6.00 - 8.00
	8.00 - 10.00
	10.00 - 12.00
	12.00 - 14.00
	14.00 - 16.00
	16.00 - 18.00
	18.00 - 20.00

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	19.42%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

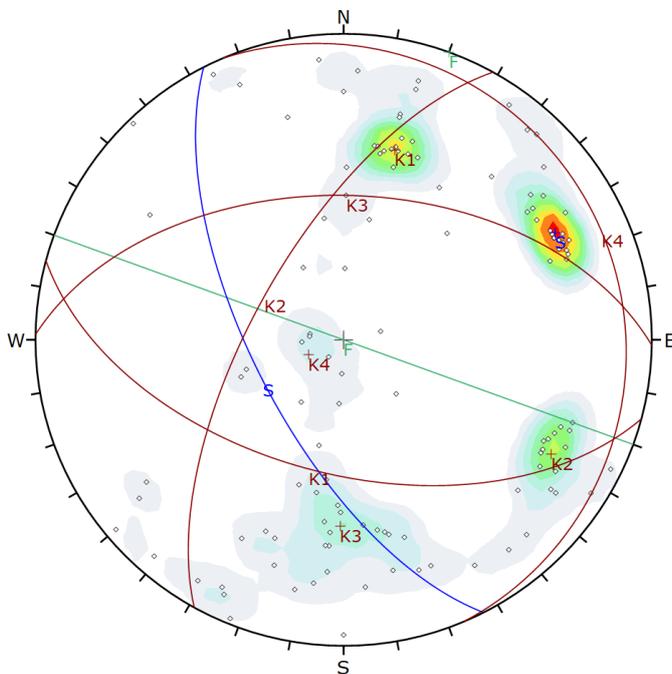
  

Color	Dip	Dip Direction	Label
Mean Set Planes			
1m	65	244	S
2m	88	139	K2
3m	36	57	K3

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	36 (36 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

**Rilievo tramite Rockscan**



Symbol	Feature
○	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
	0.00 - 1.30
	1.30 - 2.60
	2.60 - 3.90
	3.90 - 5.20
	5.20 - 6.50
	6.50 - 7.80
	7.80 - 9.10
	9.10 - 10.40
	10.40 - 11.70
	11.70 - 13.00

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	12.52%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

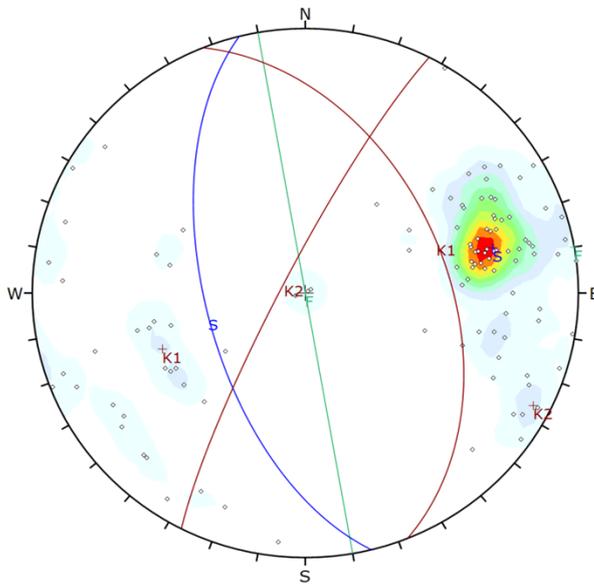
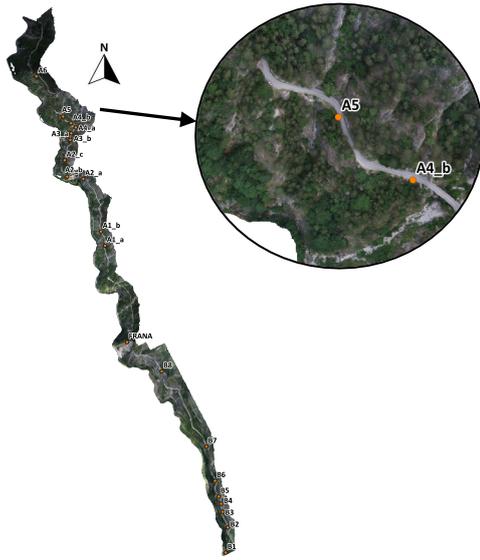
  

Color	Dip	Dip Direction	Label
User Planes			
1	90	200	F
Mean Set Planes			
1m	66	243	S
2m	54	195	K1
3m	66	299	K2
4m	51	1	K3
5m	10	67	K4

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	121 (121 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

# Strada Alta A5



Symbol	Feature
◊	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
0.00 - 1.70	
1.70 - 3.40	
3.40 - 5.10	
5.10 - 6.80	
6.80 - 8.50	
8.50 - 10.20	
10.20 - 11.90	
11.90 - 13.60	
13.60 - 15.30	
15.30 - 17.00	

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	16.38%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

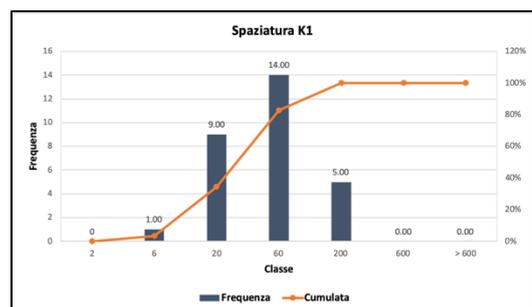
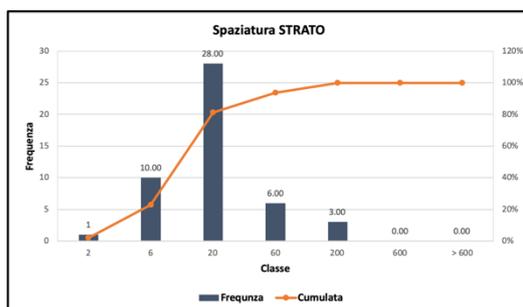
Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>User Planes</b>			
1	90	260	F
<b>Mean Set Planes</b>			
1m	60	256	S
2m	47	68	K1
3m	83	297	K2

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	110 (110 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

<b>Media [cm]</b>	16.75	<b>Moda [cm]</b>	20
<b>Massimo [cm]</b>	98.98	<b>Minimo [cm]</b>	1.57

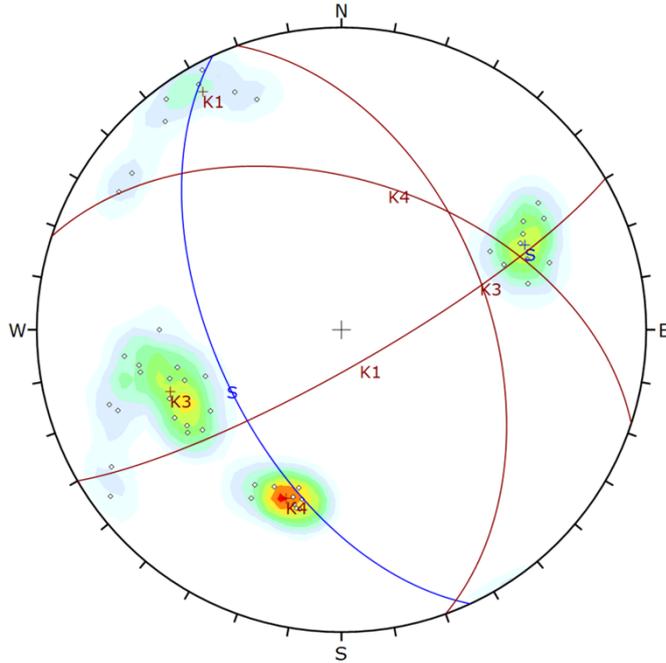
<b>Media [cm]</b>	32.33	<b>Moda [cm]</b>	60
<b>Massimo [cm]</b>	98.90	<b>Minimo [cm]</b>	3.06



**Strada Alta  
A5**

**Confronto:  
Rilievo tradizionale e tramite Rockscan**

**Rilievo tradizionale**



Symbol	Feature
◊	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
	0.00 - 1.80
	1.80 - 3.60
	3.60 - 5.40
	5.40 - 7.20
	7.20 - 9.00
	9.00 - 10.80
	10.80 - 12.60
	12.60 - 14.40
	14.40 - 16.20
	16.20 - 18.00

Contour Data		Pole Vectors
Maximum Density		17.00%
Contour Distribution		Fisher
Counting Circle Size		1.0%

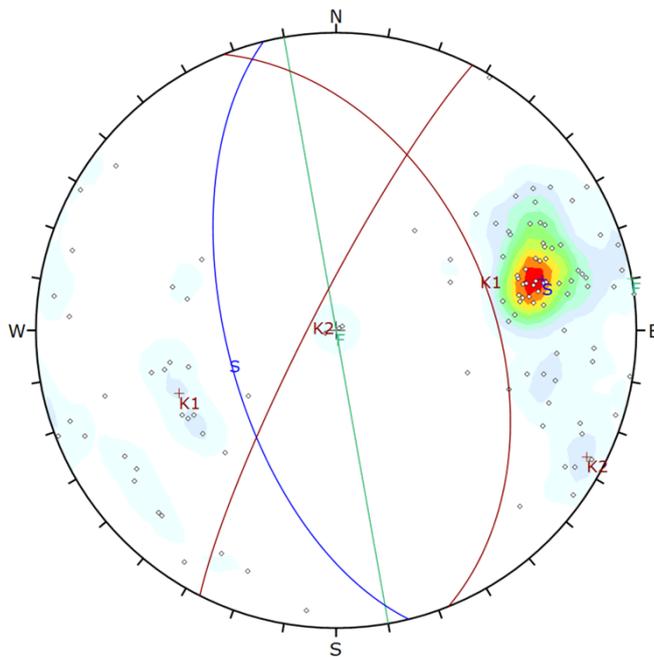
  

	Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>Mean Set Planes</b>				
1m	■	56	245	S
2m	■	80	150	K1
3m	■	50	70	K3
4m	■	49	18	K4

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	45 (45 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

**Rilievo tramite Rockscan**



Symbol	Feature
◊	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
	0.00 - 1.70
	1.70 - 3.40
	3.40 - 5.10
	5.10 - 6.80
	6.80 - 8.50
	8.50 - 10.20
	10.20 - 11.90
	11.90 - 13.60
	13.60 - 15.30
	15.30 - 17.00

Contour Data		Pole Vectors
Maximum Density		16.38%
Contour Distribution		Fisher
Counting Circle Size		1.0%

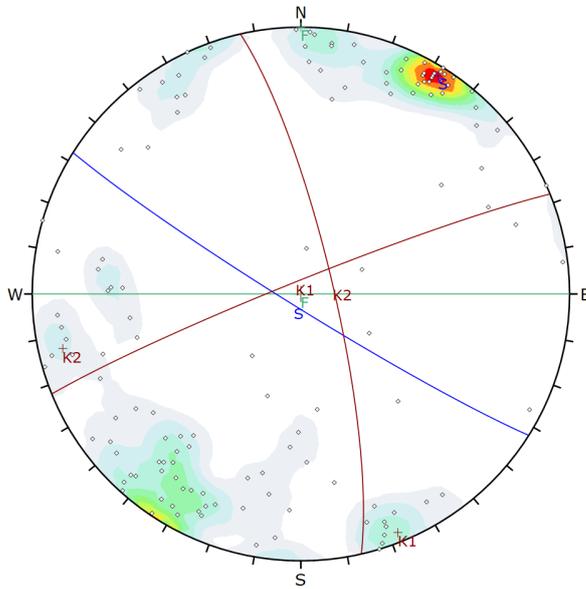
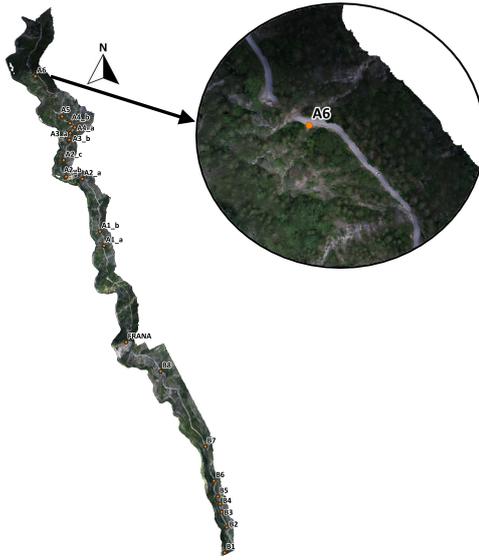
  

	Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>User Planes</b>				
1	■	90	260	F
<b>Mean Set Planes</b>				
1m	■	60	256	S
2m	■	47	68	K1
3m	■	83	297	K2

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	110 (110 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

# Strada Alta A6



Symbol	Feature
○	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
0.00 - 1.40	
1.40 - 2.80	
2.80 - 4.20	
4.20 - 5.60	
5.60 - 7.00	
7.00 - 8.40	
8.40 - 9.80	
9.80 - 11.20	
11.20 - 12.60	
12.60 - 14.00	

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	13.17%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

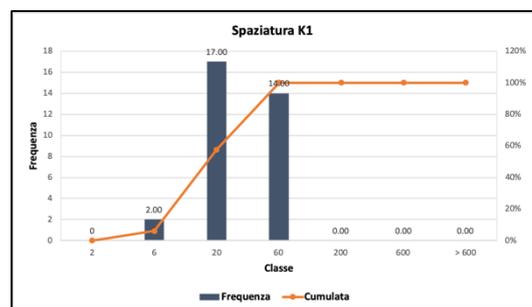
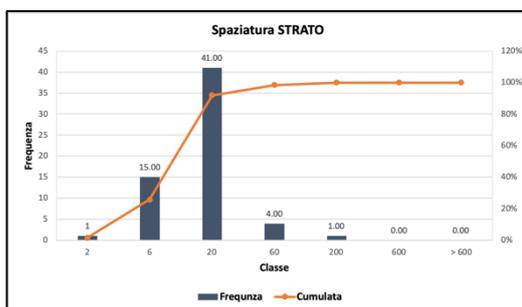
Color	Dip	Dip Direction	Label
User Planes			
1	90	180	F
Mean Set Planes			
1m	86	212	S
2m	86	338	K1
3m	80	77	K2

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	133 (133 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

<b>Media [cm]</b>	11.99	<b>Moda [cm]</b>	20
<b>Massimo [cm]</b>	73.77	<b>Minimo [cm]</b>	1.99

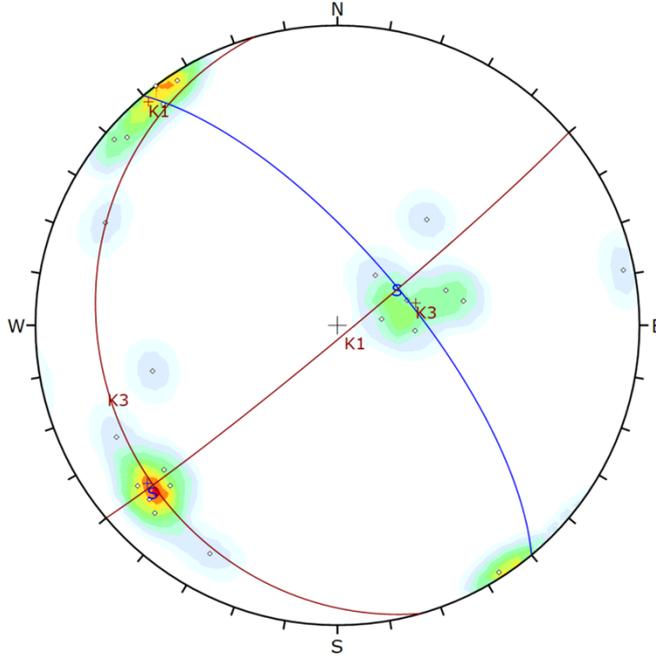
<b>Media [cm]</b>	20.34	<b>Moda [cm]</b>	20
<b>Massimo [cm]</b>	50.23	<b>Minimo [cm]</b>	4.73



**Strada Alta  
A6**

**Confronto:  
Rilievo tradizionale e tramite Rockscan**

**Rilievo tradizionale**



Symbol	Feature
◊	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
	0.00 - 1.90
	1.90 - 3.80
	3.80 - 5.70
	5.70 - 7.60
	7.60 - 9.50
	9.50 - 11.40
	11.40 - 13.30
	13.30 - 15.20
	15.20 - 17.10
	17.10 - 19.00

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	18.19%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

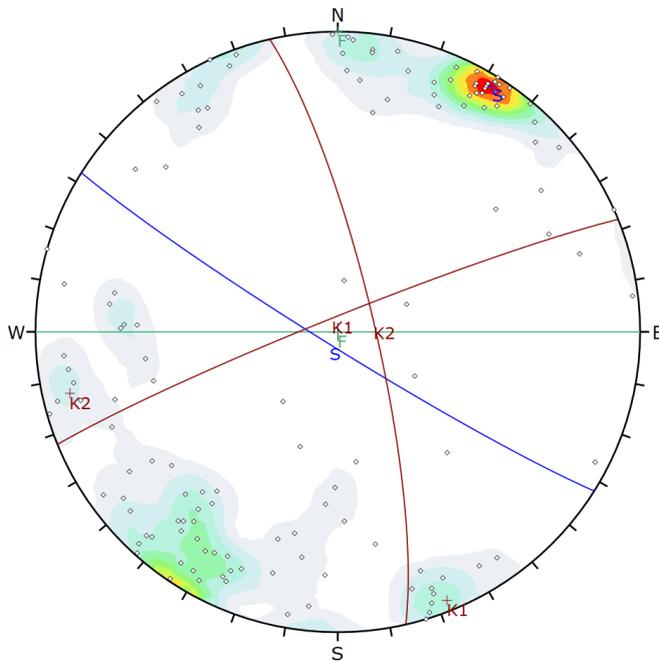
  

	Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>Mean Set Planes</b>				
1m		71	50	S
2m		87	140	K1
3m		22	254	K3

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	23 (23 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

**Rilievo tramite Rockscan**



Symbol	Feature
◊	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
	0.00 - 1.40
	1.40 - 2.80
	2.80 - 4.20
	4.20 - 5.60
	5.60 - 7.00
	7.00 - 8.40
	8.40 - 9.80
	9.80 - 11.20
	11.20 - 12.60
	12.60 - 14.00

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	13.17%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

	Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>User Planes</b>				
1		90	180	F
<b>Mean Set Planes</b>				
1m		86	212	S
2m		86	338	K1
3m		80	77	K2

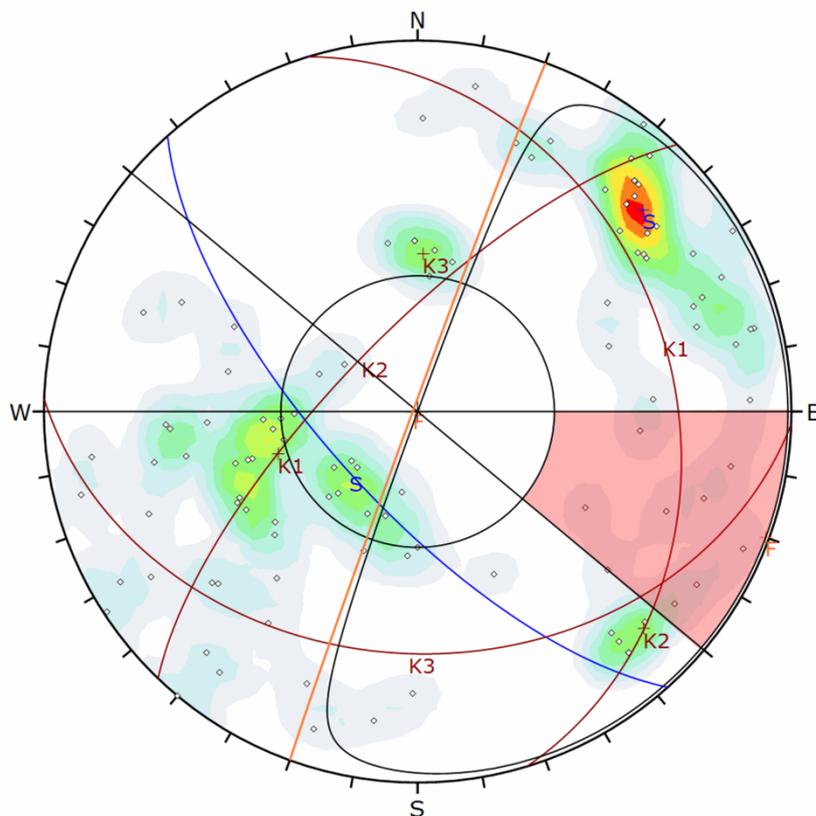
Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	133 (133 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area

***ALLEGATO 2: ANALISI DEI CINEMATISMI***

---

## Strada Bassa B1

## Analisi dei cinematicismi: Scivolamento planare



Symbol	Feature
◊	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
	0.00 - 0.80
	0.80 - 1.60
	1.60 - 2.40
	2.40 - 3.20
	3.20 - 4.00
	4.00 - 4.80
	4.80 - 5.60
	5.60 - 6.40
	6.40 - 7.20
	7.20 - 8.00

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	7.58%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

Kinematic Analysis	Planar Sliding
Slope Dip	89
Slope Dip Direction	290
Friction Angle	30°
Lateral Limits	20°

	Critical	Total	%
Planar Sliding (All)	9	106	8.49%
Planar Sliding (Set 3: K2)	2	7	28.57%

	Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>User Planes</b>				
1		89	290	F
<b>Mean Set Planes</b>				
1m		70	228	S
2m		32	73	K1
3m		73	314	K2
4m		35	182	K3

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	106 (106 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area



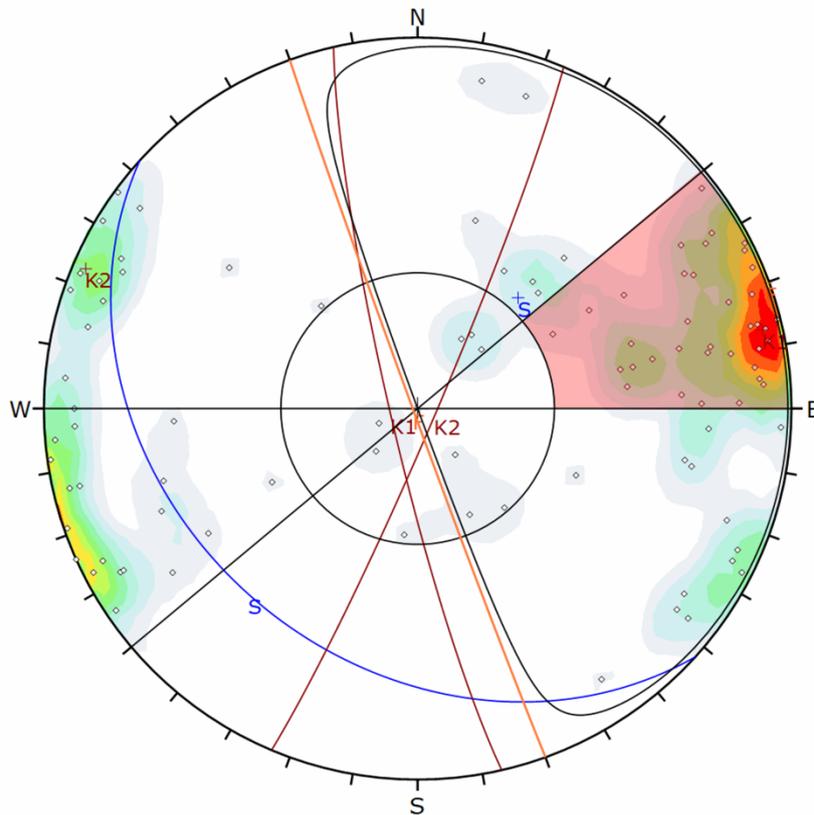
**ASSENZA** di scivolamento planare.

### Altri cinematicismi:

Lo scalzamento al piede favorisce lo scivolamento lungo il piano di strato di lastre pseudo verticali, se queste vengono svincolate da altri sistemi di discontinuità.

## Strada Bassa B2

## Analisi dei cinematicismi: Scivolamento planare



Symbol	Feature
◊	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
	0.00 - 1.00
	1.00 - 2.00
	2.00 - 3.00
	3.00 - 4.00
	4.00 - 5.00
	5.00 - 6.00
	6.00 - 7.00
	7.00 - 8.00
	8.00 - 9.00
	9.00 - 10.00

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	9.49%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

Kinematic Analysis	Planar Sliding
Slope Dip	89
Slope Dip Direction	250
Friction Angle	30°
Lateral Limits	20°

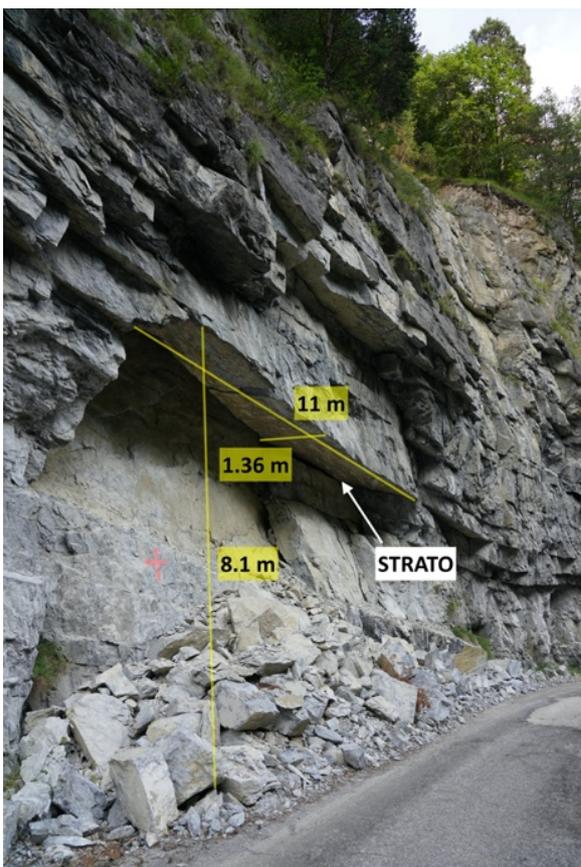
	Critical	Total	%
Planar Sliding (All)	35	97	36.08%
Planar Sliding (Set 1: S)	2	10	20.00%
Planar Sliding (Set 2: K1)	15	23	65.22%

	Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>User Planes</b>				
1		89	250	F
<b>Mean Set Planes</b>				
1m		33	222	S
2m		84	257	K1
3m		86	113	K2

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	97 (97 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area



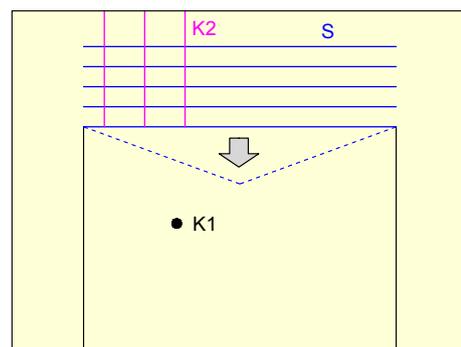
**PRESENZA** di scivolamento planare.  
Lo scivolamento avviene lungo il set K1.

### Altri cinematicismi:

Il piano di STRATO forma con set K1 lastre orizzontali con possibile rottura per FLESSIONE.  
Il set K2 svincola le lastre lateralmente.  
Cinematismo TRIDIMENSIONALE.

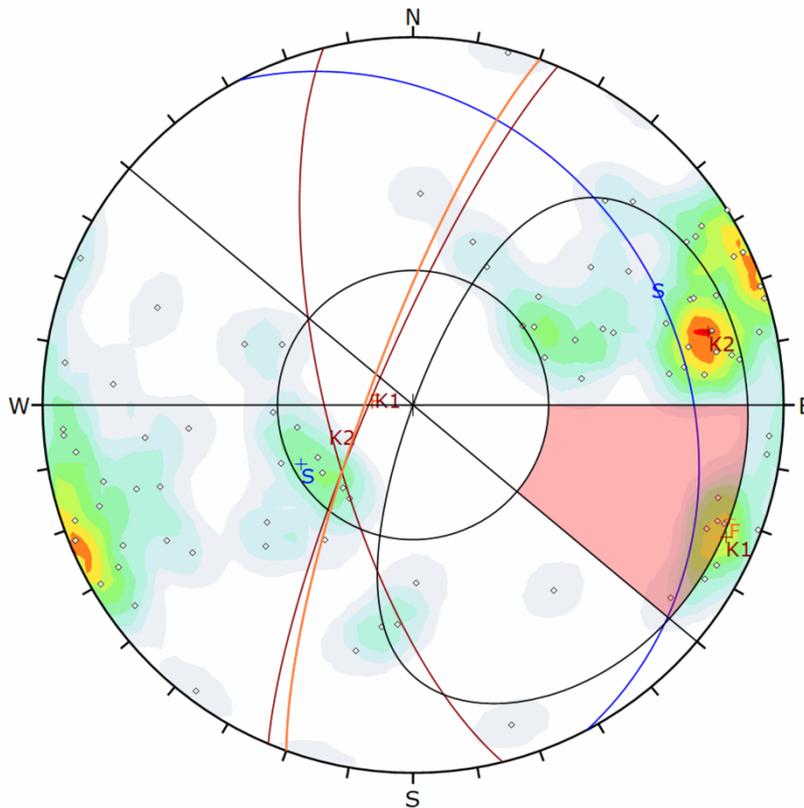
### Analisi successive:

Analisi riconducibile con *Key-Block theory*.



## Strada Bassa B3

## Analisi dei cinematicismi: Scivolamento planare



Symbol	Feature
○	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
	0.00 - 0.80
	0.80 - 1.60
	1.60 - 2.40
	2.40 - 3.20
	3.20 - 4.00
	4.00 - 4.80
	4.80 - 5.60
	5.60 - 6.40
	6.40 - 7.20
	7.20 - 8.00

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	7.42%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

Kinematic Analysis	Planar Sliding
Slope Dip	80
Slope Dip Direction	290
Friction Angle	30°
Lateral Limits	20°

	Critical	Total	%
Planar Sliding (All)	5	87	5.75%
Planar Sliding (Set 2: K1)	4	8	50.00%

	Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>User Planes</b>				
1		80	290	F
<b>Mean Set Planes</b>				
1m		28	62	S
2m		81	293	K1
3m		71	256	K2

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	87 (87 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area



**ASSENZA** di scivolamento planare.

### Altri cinematicismi:

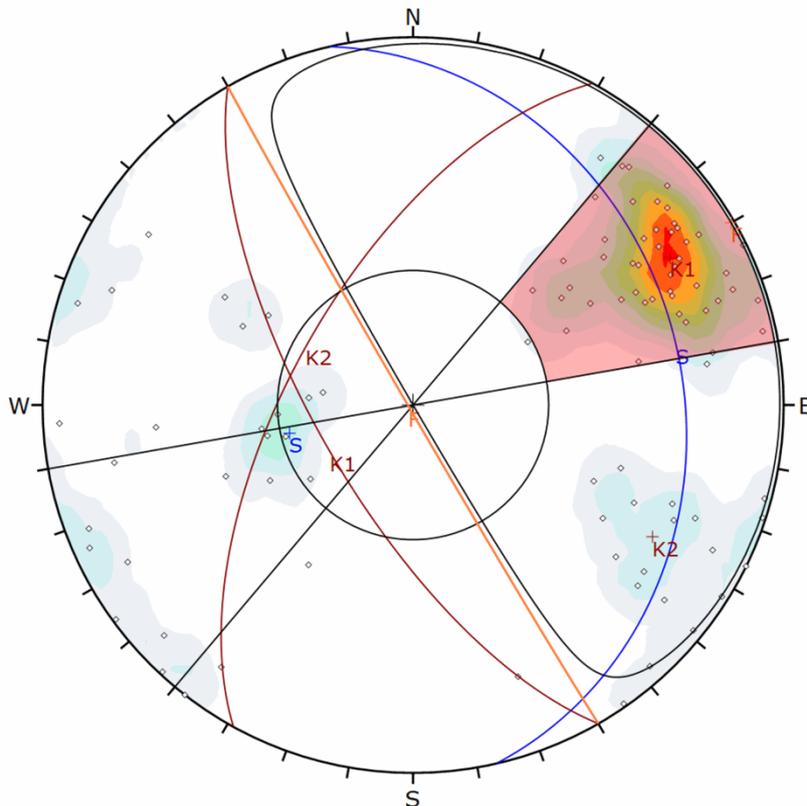
Il piano di STRATO forma con set K1 lastre orizzontali con possibile rottura per FLESSIONE. Il set K2 svincola le lastre lateralmente. Cinematismo TRIDIMENSIONALE.

### Analisi successive:

Analisi riconducibile con *Key-Block theory*.

## Strada Bassa B4

## Analisi dei cinematismi: Scivolamento planare



Symbol	Feature
◊	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
	0.00 - 1.30
	1.30 - 2.60
	2.60 - 3.90
	3.90 - 5.20
	5.20 - 6.50
	6.50 - 7.80
	7.80 - 9.10
	9.10 - 10.40
	10.40 - 11.70
	11.70 - 13.00

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	12.01%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

Kinematic Analysis	Planar Sliding
Slope Dip	89
Slope Dip Direction	240
Friction Angle	30°
Lateral Limits	20°

	Critical	Total	%
Planar Sliding (All)	45	96	46.88%
Planar Sliding (Set 2: K1)	41	43	95.35%

	Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>User Planes</b>				
1		89	240	F
<b>Mean Set Planes</b>				
1m		28	77	S
2m		69	240	K1
3m		63	299	K2

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	96 (96 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area



**PRESENZA** di scivolamento planare.  
Lo scivolamento avviene lungo il set K1.

### Altri cinematismi:

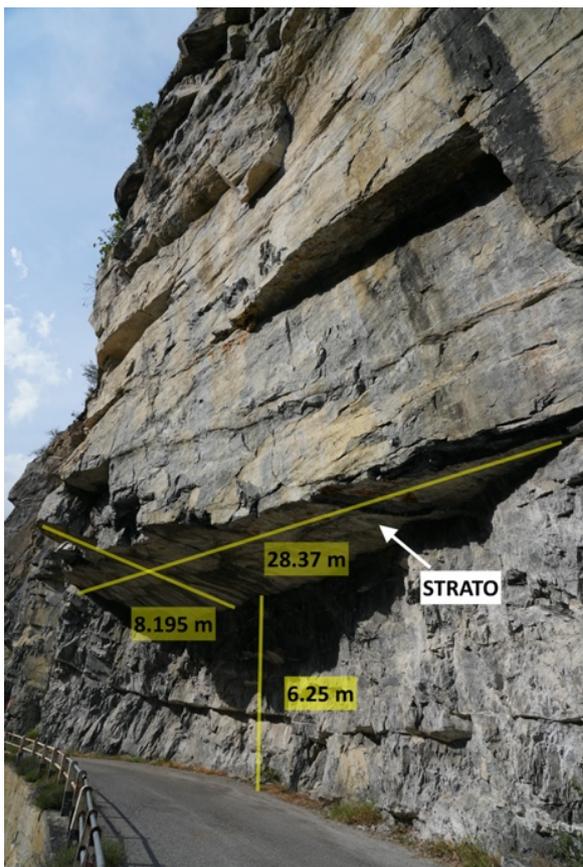
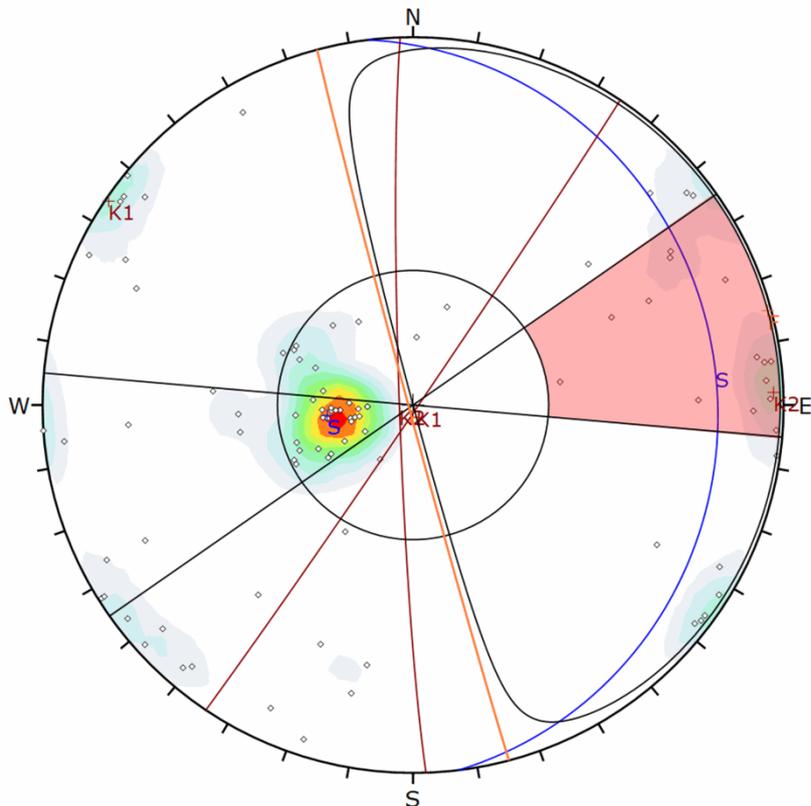
Il piano di STRATO forma con set K1 lastre orizzontali con possibile rottura per FLESSIONE.  
Il set K2 svincola le lastre lateralmente.

### Analisi successive:

Analisi riconducibile con *Key-Block theory*.

## Strada Bassa B5

## Analisi dei cinematismi: Scivolamento planare



**ASSENZA** di scivolamento planare.

Altri cinematismi:

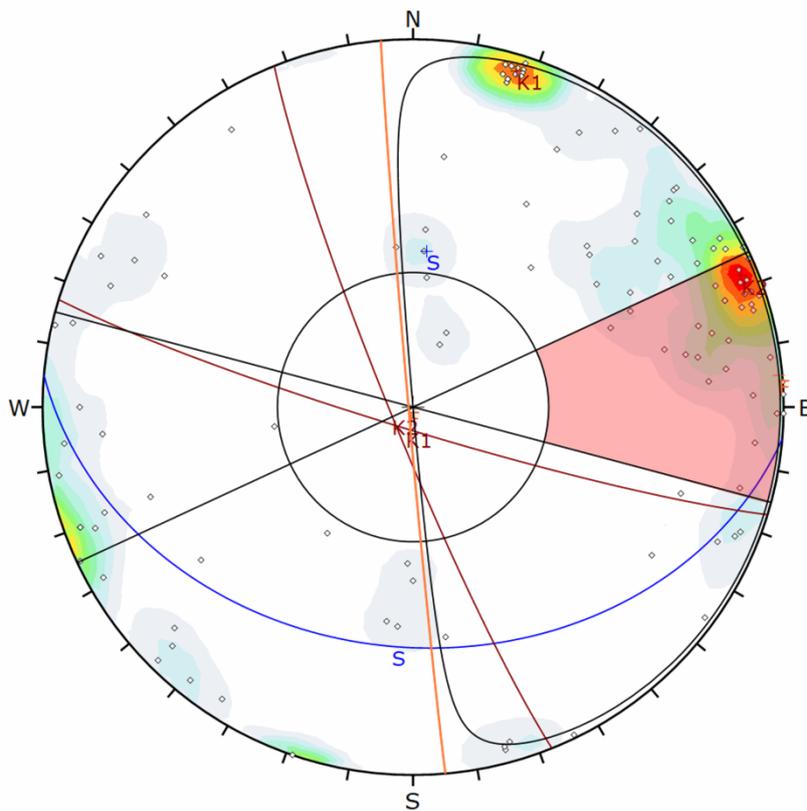
Lo scalzamento al piede dell'ammasso può produrre CROLLO DI BLOCCHI dall'alto. La rottura può avvenire per TAGLIO nel giunto o all'interno della MATRICE ROCCIOSA.

Analisi successive:

Analisi riconducibile con *Key-Block theory*.

## Strada Bassa B6

## Analisi dei cinematismi: Scivolamento planare



Symbol	Feature
◊	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
	0.00 - 1.30
	1.30 - 2.60
	2.60 - 3.90
	3.90 - 5.20
	5.20 - 6.50
	6.50 - 7.80
	7.80 - 9.10
	9.10 - 10.40
	10.40 - 11.70
	11.70 - 13.00

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	12.96%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

Kinematic Analysis	Planar Sliding
Slope Dip	89
Slope Dip Direction	265
Friction Angle	30°
Lateral Limits	20°

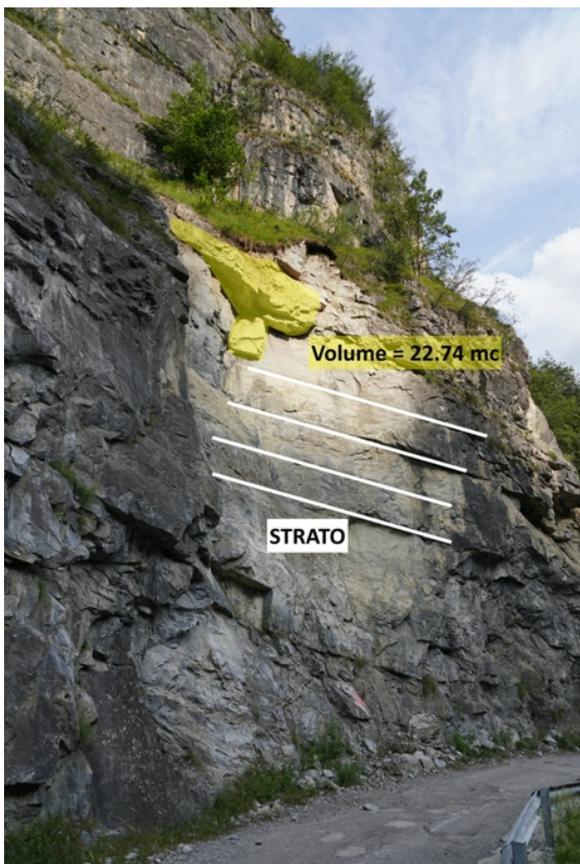
	Critical	Total	%
Planar Sliding (All)	27	118	22.88%
Planar Sliding (Set 3: K2)	13	24	54.17%

	Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>User Planes</b>				
1		89	265	F
<b>Mean Set Planes</b>				
1m		35	185	S
2m		85	197	K1
3m		85	248	K2

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	118 (118 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area



**ASSENZA** di scivolamento planare.

Altri cinematismi:

Lo scalzamento al piede dell'ammasso può produrre CROLLO DI BLOCCHI dall'alto per superamento della resistenza a TRAZIONE del giunto.

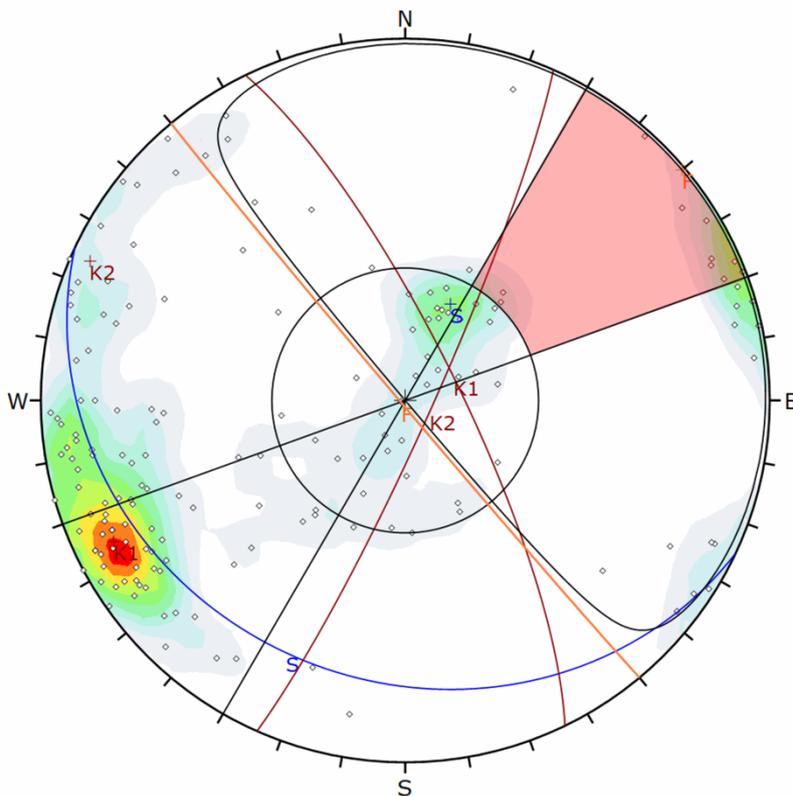
In figura, BLOCCO INSTABILE di VOLUME pari a  $22.74 \text{ m}^3$ .

Analisi successive:

Analisi riconducibile con *Key-Block theory*.

## Strada Bassa B7

## Analisi dei cinematismi: Scivolamento planare



Symbol	Feature
◊	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
	0.00 - 1.10
	1.10 - 2.20
	2.20 - 3.30
	3.30 - 4.40
	4.40 - 5.50
	5.50 - 6.60
	6.60 - 7.70
	7.70 - 8.80
	8.80 - 9.90
	9.90 - 11.00

Contour Data		Pole Vectors
Maximum Density	10.54%	
Contour Distribution	Fisher	
Counting Circle Size	1.0%	

Kinematic Analysis		Planar Sliding
Slope Dip	89	
Slope Dip Direction	230	
Friction Angle	30°	
Lateral Limits	20°	

	Critical	Total	%
Planar Sliding (All)	9	166	5.42%
Planar Sliding (Set 1: S)	2	17	11.76%
Planar Sliding (Set 2: K1)	1	42	2.38%

Color	Dip	Dip Direction	Label
User Planes			
1	89	230	F
Mean Set Planes			
1m	24	205	S
2m	78	64	K1
3m	84	114	K2

Plot Mode		Pole Vectors
Vector Count	166	(166 Entries)
Hemisphere	Lower	
Projection	Equal Area	



**PRESENZA** di scivolamento planare.

Lo scivolamento avviene lungo il piano di STRATO.

Altri cinematismi:

Lo scalzamento al piede dell'ammasso può produrre CROLLO o RIBALTIMENTO DI BLOCCHI.

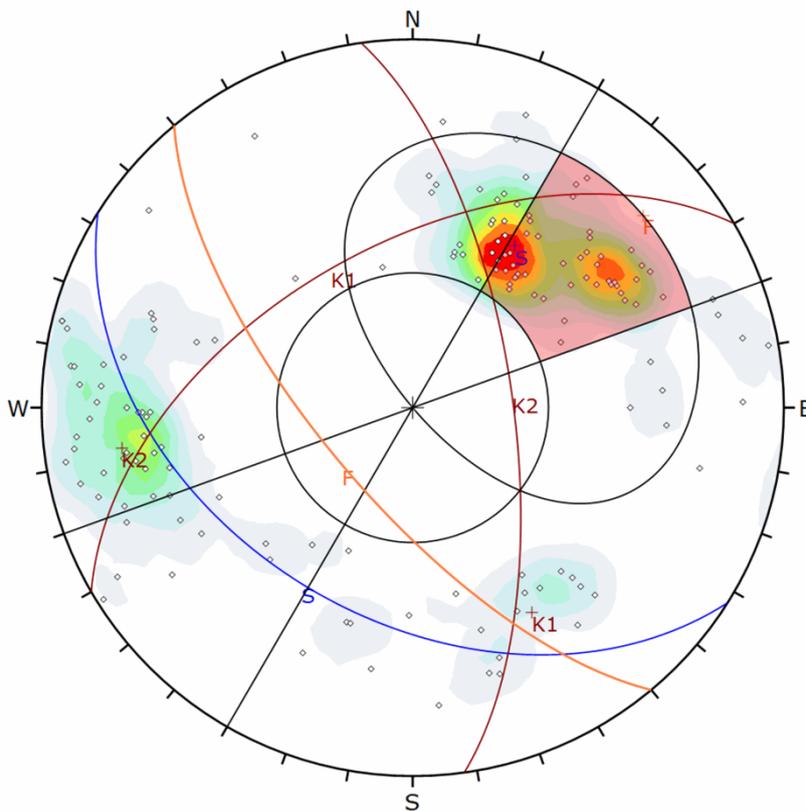
Analisi successive:

Analisi della GALLERIA IN ROCCIA.

Analisi riconducibile con *Key-Block theory*.

# Strada Bassa B8

# Analisi dei cinematismi: Scivolamento planare



Symbol	Feature
◊	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
	0.00 - 1.10
	1.10 - 2.20
	2.20 - 3.30
	3.30 - 4.40
	4.40 - 5.50
	5.50 - 6.60
	6.60 - 7.70
	7.70 - 8.80
	8.80 - 9.90
	9.90 - 11.00

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	10.92%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

Kinematic Analysis	Planar Sliding
Slope Dip	70
Slope Dip Direction	230
Friction Angle	30°
Lateral Limits	20°

	Critical	Total	%
Planar Sliding (All)	44	150	29.33%
Planar Sliding (Set 1: S)	26	44	59.09%

	Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>User Planes</b>				
1		70	230	F
<b>Mean Set Planes</b>				
1m		43	212	S
2m		54	330	K1
3m		68	82	K2

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	150 (150 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area



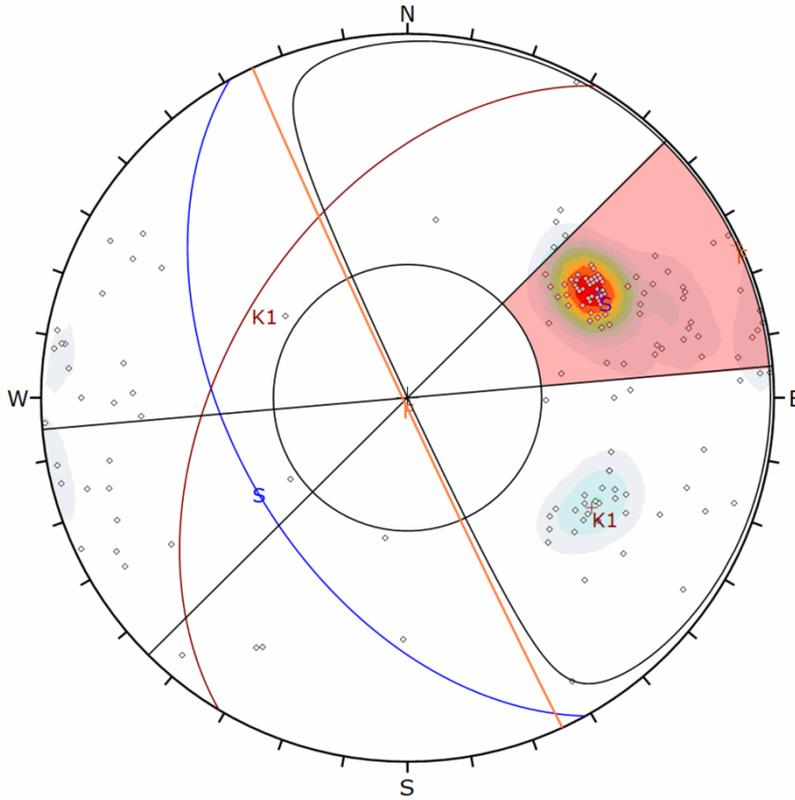
**PRESENZA** di scivolamento planare. Lo scivolamento avviene lungo il piano di STRATO.

Altri cinematismi:

I set K1 e K2 svincolano blocchi di volume variabile.

# FRANA

## Analisi dei cinematismi: Scivolamento planare



Symbol	Feature
◊	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
0.00 - 2.90	
2.90 - 5.80	
5.80 - 8.70	
8.70 - 11.60	
11.60 - 14.50	
14.50 - 17.40	
17.40 - 20.30	
20.30 - 23.20	
23.20 - 26.10	
26.10 - 29.00	

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	28.86%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

Kinematic Analysis	Planar Sliding
Slope Dip	89
Slope Dip Direction	245
Friction Angle	30°
Lateral Limits	20°

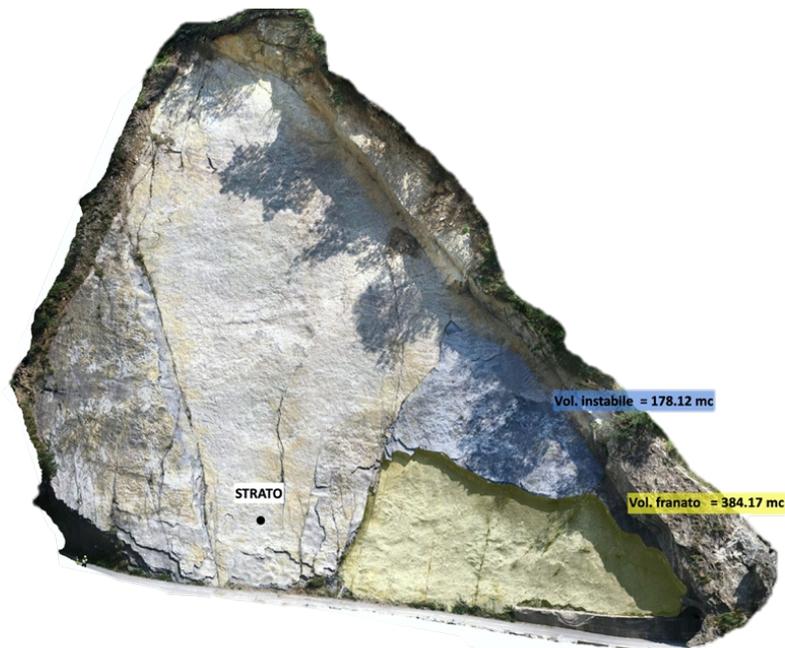
	Critical	Total	%
Planar Sliding (All)	80	157	50.96%
Planar Sliding (Set 1: S)	64	68	94.12%

Color	Dip	Dip Direction	Label
User Planes			
1	89	245	F
Mean Set Planes			
1m	50	241	S
2m	49	301	K1

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	157 (157 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area



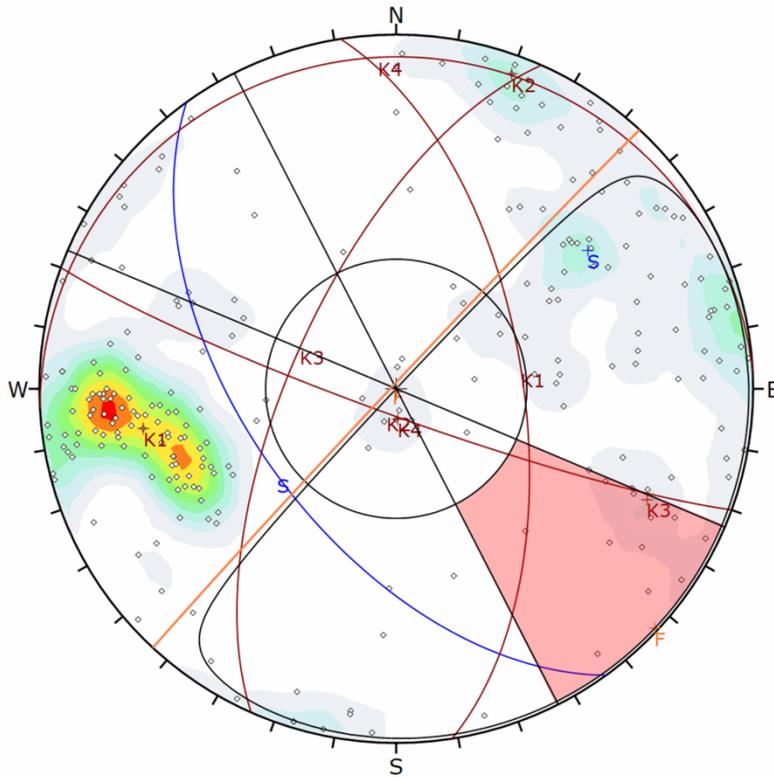
**PRESENZA** di scivolamento planare. Lo scivolamento avviene lungo il piano di STRATO.

### Altri cinematismi:

Alcuni piani discontinuità svincolano lastre di forma e dimensione variabile (*Modellazione numerica, capitolo 7*).

**Strada Alta  
A1\_a fronte 1**

**Analisi dei cinematismi:  
Scivolamento planare**



Symbol	Feature
◊	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
Light Blue	0.00 - 1.00
Light Green	1.00 - 2.00
Green	2.00 - 3.00
Yellow-Green	3.00 - 4.00
Yellow	4.00 - 5.00
Orange	5.00 - 6.00
Red-Orange	6.00 - 7.00
Red	7.00 - 8.00
Dark Red	8.00 - 9.00
Dark Red	9.00 - 10.00

Contour Data		Pole Vectors	
Maximum Density	9.32%		
Contour Distribution	Fisher		
Counting Circle Size	1.0%		

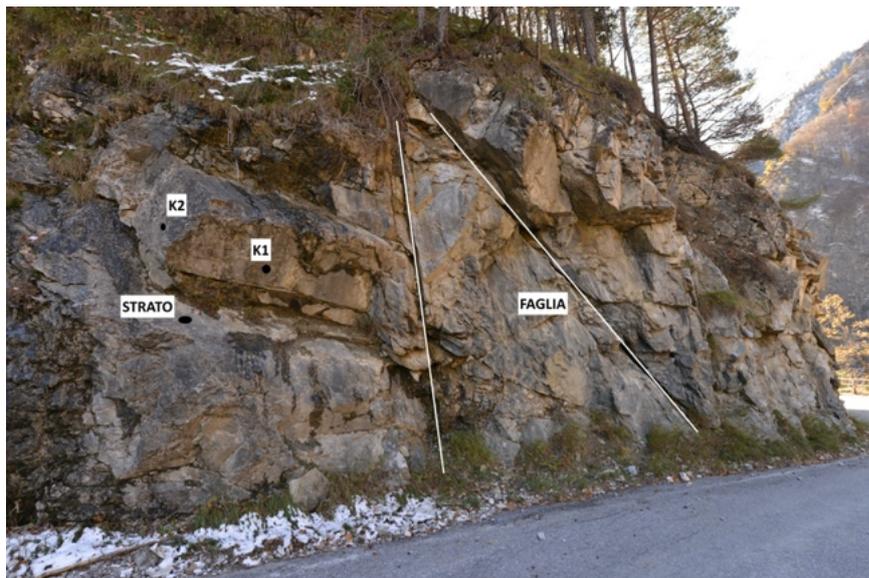
Kinematic Analysis		Planar Sliding		
Slope Dip	89			
Slope Dip Direction	313			
Friction Angle	30°			
Lateral Limits	20°			
		Critical	Total	%
Planar Sliding (All)	13	241	5.39%	
Planar Sliding (Set 4: K3)	7	11	63.64%	

Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>User Planes</b>			
1	89	313	F
<b>Mean Set Planes</b>			
1m	56	234	S
2m	61	81	K1
3m	84	200	K2
4m	66	294	K3
5m	7	357	K4

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	241 (241 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area



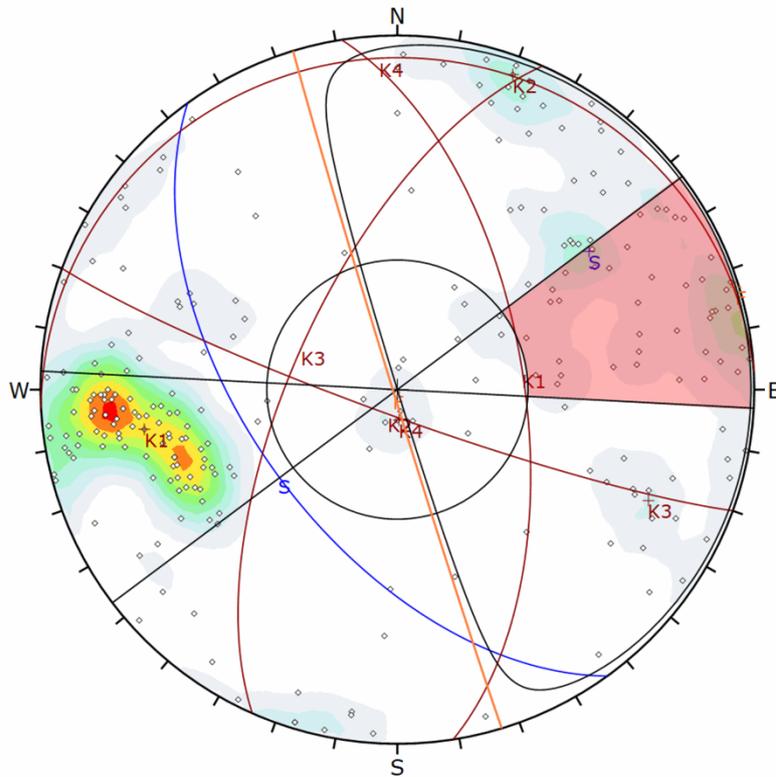
**ASSENZA** di scivolamento planare.

Altri cinematismi:

I set K1 e K2 svincolano blocchi di volume variabile. Presenza di due FAGLIE.

# Strada Alta A1\_a fronte 2

# Analisi dei cinematismi: Scivolamento planare



Symbol	Feature
◊	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
Light Blue	0.00 - 1.00
Light Green	1.00 - 2.00
Green	2.00 - 3.00
Yellow-Green	3.00 - 4.00
Yellow	4.00 - 5.00
Orange	5.00 - 6.00
Red-Orange	6.00 - 7.00
Red	7.00 - 8.00
Dark Red	8.00 - 9.00
Black	9.00 - 10.00

Contour Data		Pole Vectors
Maximum Density	9.32%	
Contour Distribution	Fisher	
Counting Circle Size	1.0%	

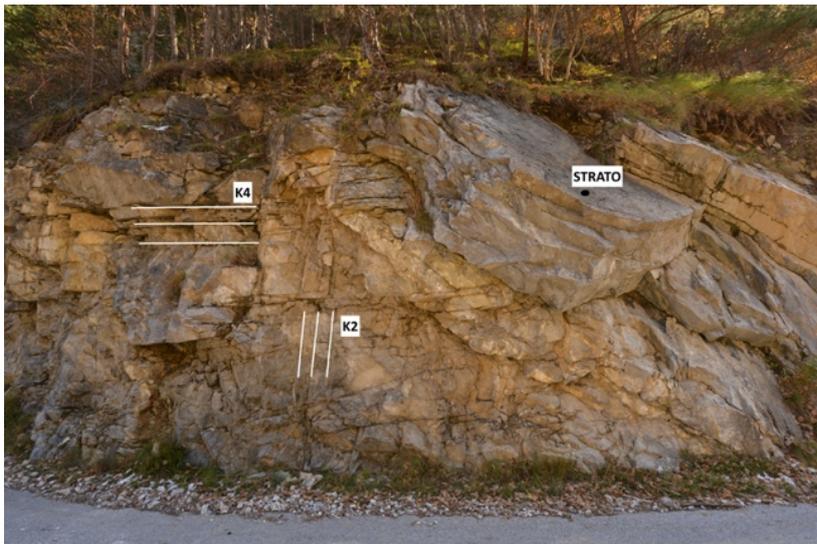
Kinematic Analysis		Planar Sliding
Slope Dip	89	
Slope Dip Direction	253	
Friction Angle	30°	
Lateral Limits	20°	
		<b>Critical</b> <b>Total</b> <b>%</b>
Planar Sliding (All)	40	241 16.60%
Planar Sliding (Set 1: S)	10	18 55.56%

Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>User Planes</b>			
1	89	253	F
<b>Mean Set Planes</b>			
1m	56	234	S
2m	61	81	K1
3m	84	200	K2
4m	66	294	K3
5m	7	357	K4

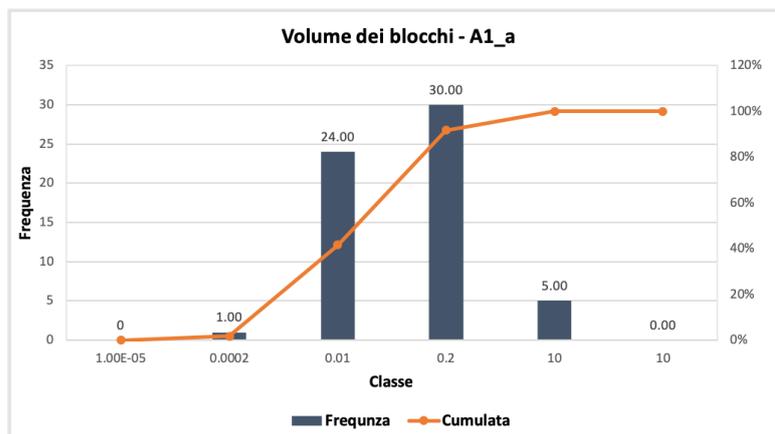
  

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	241 (241 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area



**PRESENZA** di scivolamento planare. Lo scivolamento avviene lungo il piano di STRATO.

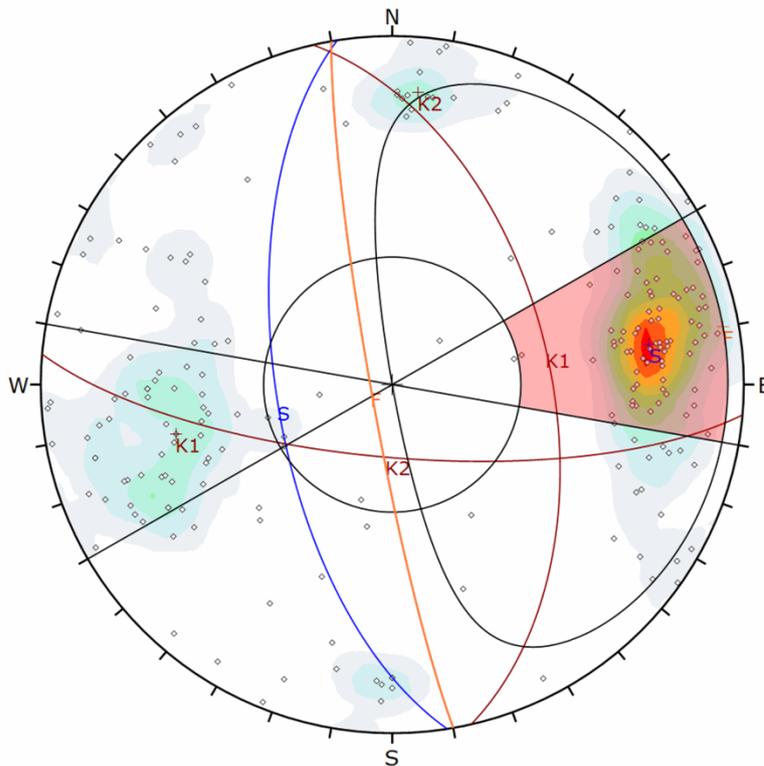
Altri cinematismi:  
I set K2 e K4 svincolano blocchi di volume variabile.



Media [m³]	0.059012
Massimo [m³]	0.949277
Minimo [m³]	0.000124
Moda [m³]	0.2

# Strada Alta A1\_b

# Analisi dei cinematismi: Scivolamento planare



Symbol	Feature
◊	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
	0.00 - 1.10
	1.10 - 2.20
	2.20 - 3.30
	3.30 - 4.40
	4.40 - 5.50
	5.50 - 6.60
	6.60 - 7.70
	7.70 - 8.80
	8.80 - 9.90
	9.90 - 11.00

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	10.43%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

Kinematic Analysis	Planar Sliding
Slope Dip	85
Slope Dip Direction	260
Friction Angle	30°
Lateral Limits	20°

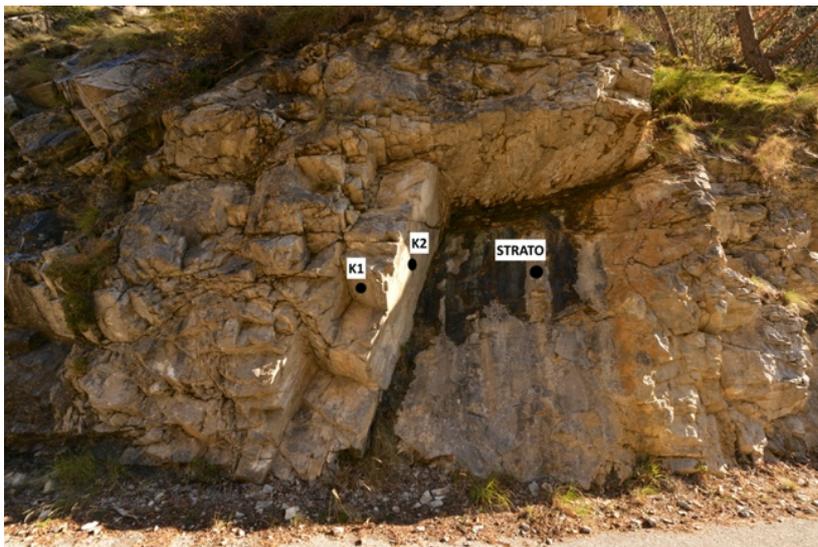
	Critical	Total	%
Planar Sliding (All)	75	220	34.09%
Planar Sliding (Set 1: S)	52	52	100.00%

	Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>User Planes</b>				
1		85	260	F
<b>Mean Set Planes</b>				
1m		63	261	S
2m		53	77	K1
3m		73	185	K2

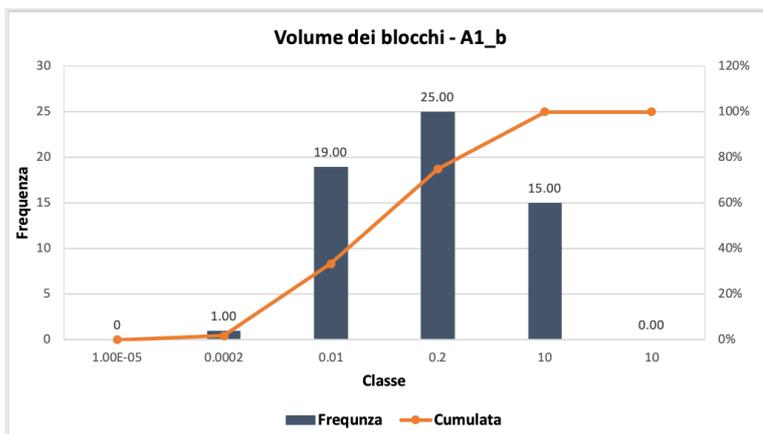
  

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	220 (220 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area



**PRESENZA** di scivolamento planare. Lo scivolamento avviene lungo il piano di STRATO.

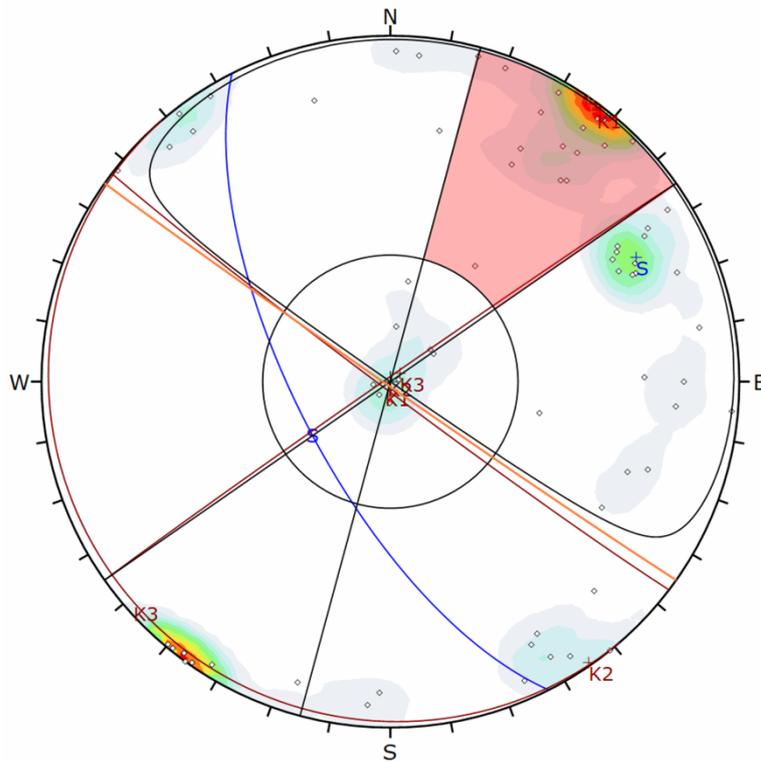
Altri cinematismi:  
I set K1 e K2 svincolano blocchi di volume variabile.



Media [m³]	0.374837
Massimo [m³]	8.184316
Minimo [m³]	0.000045
Moda [m³]	0.2

# Strada Alta A2\_a

# Analisi dei cinematismi: Scivolamento planare



Symbol	Feature
o	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
	0.00 - 1.80
	1.80 - 3.60
	3.60 - 5.40
	5.40 - 7.20
	7.20 - 9.00
	9.00 - 10.80
	10.80 - 12.60
	12.60 - 14.40
	14.40 - 16.20
	16.20 - 18.00

Contour Data		Pole Vectors
Maximum Density	17.42%	
Contour Distribution	Fisher	
Counting Circle Size	1.0%	

Kinematic Analysis		Planar Sliding
Slope Dip	89	
Slope Dip Direction	215	
Friction Angle	30°	
Lateral Limits	20°	

	Critical	Total	%
Planar Sliding (All)	17	74	22.97%
Planar Sliding (Set 2: K1)	8	17	47.06%

Color	Dip	Dip Direction	Label
User Planes			
1	89	215	F
Mean Set Planes			
1m	68	243	S
2m	88	217	K1
3m	89	325	K2
4m	3	229	K3

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	74 (74 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area



**PRESENZA** di scivolamento planare. Lo scivolamento avviene lungo il piano di STRATO.

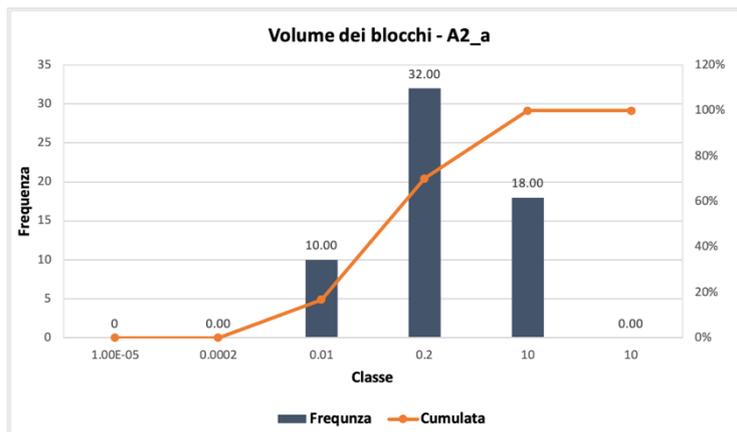
### Altri cinematismi:

I set K1 e K2 svincolano blocchi di volume variabile.

### Analisi successive:

Analisi della GALLERIA IN ROCCIA.

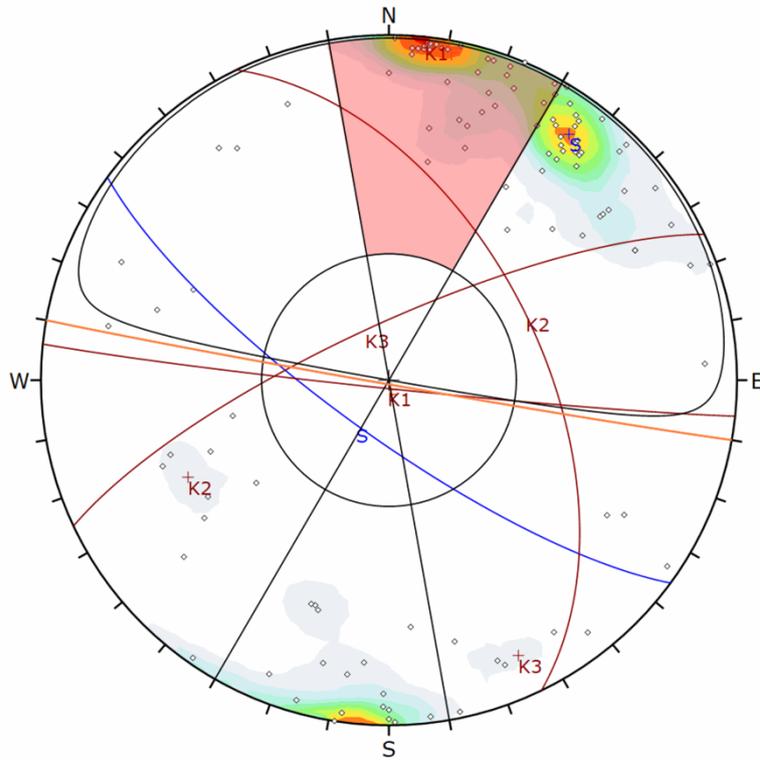
Analisi riconducibile con *Key-Block theory*.



Media [m³]	0.240679
Massimo [m³]	2.653802
Minimo [m³]	0.000525
Moda [m³]	0.2

**Strada Alta  
A2\_b fronte 1**

**Analisi dei cinematicismi:  
Scivolamento planare**



Symbol	Feature
○	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
	0.00 - 1.70
	1.70 - 3.40
	3.40 - 5.10
	5.10 - 6.80
	6.80 - 8.50
	8.50 - 10.20
	10.20 - 11.90
	11.90 - 13.60
	13.60 - 15.30
	15.30 - 17.00

<b>Contour Data</b>	Pole Vectors
<b>Maximum Density</b>	16.07%
<b>Contour Distribution</b>	Fisher
<b>Counting Circle Size</b>	1.0%

<b>Kinematic Analysis</b>	Planar Sliding
<b>Slope Dip</b>	89
<b>Slope Dip Direction</b>	190
<b>Friction Angle</b>	30°
<b>Lateral Limits</b>	20°

	Critical	Total	%
Planar Sliding (All)	33	116	28.45%
Planar Sliding (Set 1: S)	3	22	13.64%
Planar Sliding (Set 2: K1)	17	26	65.38%

Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>User Planes</b>			
1	89	190	F
<b>Mean Set Planes</b>			
1m	77	216	S
2m	88	186	K1
3m	54	64	K2
4m	77	335	K3

<b>Plot Mode</b>	Pole Vectors
<b>Vector Count</b>	116 (116 Entries)
<b>Hemisphere</b>	Lower
<b>Projection</b>	Equal Area

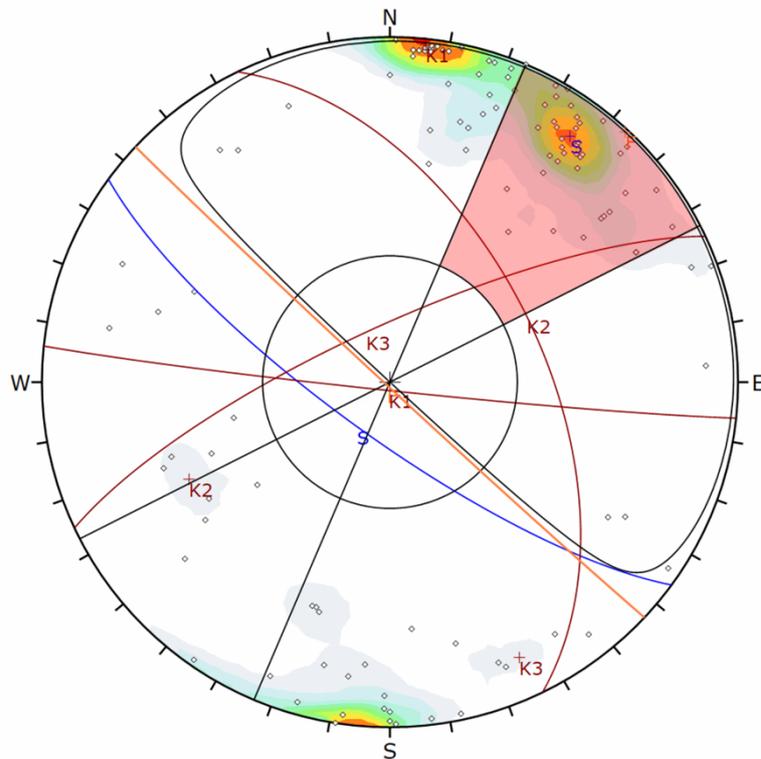


**ASSENZA** di scivolamento planare.

Lo scivolamento avviene principalmente lungo il set K1 ma anche lungo il piano di STRATO.

**Strada Alta  
A2\_b fronte 2**

**Analisi dei cinematismi:  
Scivolamento planare**



Symbol	Feature
○	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
	0.00 - 1.70
	1.70 - 3.40
	3.40 - 5.10
	5.10 - 6.80
	6.80 - 8.50
	8.50 - 10.20
	10.20 - 11.90
	11.90 - 13.60
	13.60 - 15.30
	15.30 - 17.00

Contour Data		Pole Vectors
Maximum Density	16.07%	
Contour Distribution	Fisher	
Counting Circle Size	1.0%	

Kinematic Analysis		Planar Sliding
Slope Dip	89	
Slope Dip Direction	223	
Friction Angle	30°	
Lateral Limits	20°	

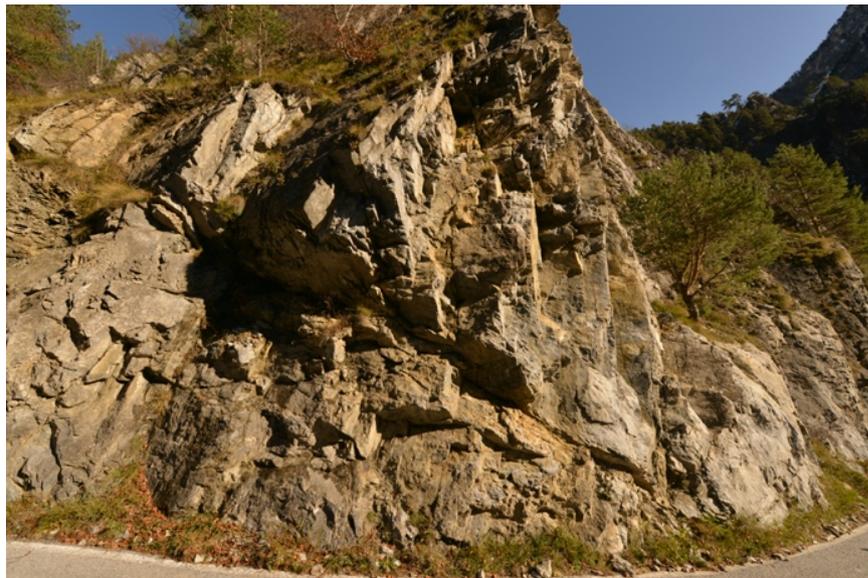
	Critical	Total	%
Planar Sliding (All)	39	116	33.62%
Planar Sliding (Set 1: S)	22	22	100.00%

Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>User Planes</b>			
1	89	223	F
<b>Mean Set Planes</b>			
1m	77	216	S
2m	88	186	K1
3m	54	64	K2
4m	77	335	K3

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	116 (116 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area



**PRESENZA** di scivolamento planare. Lo scivolamento avviene lungo il piano di STRATO.

Altri cinematismi:

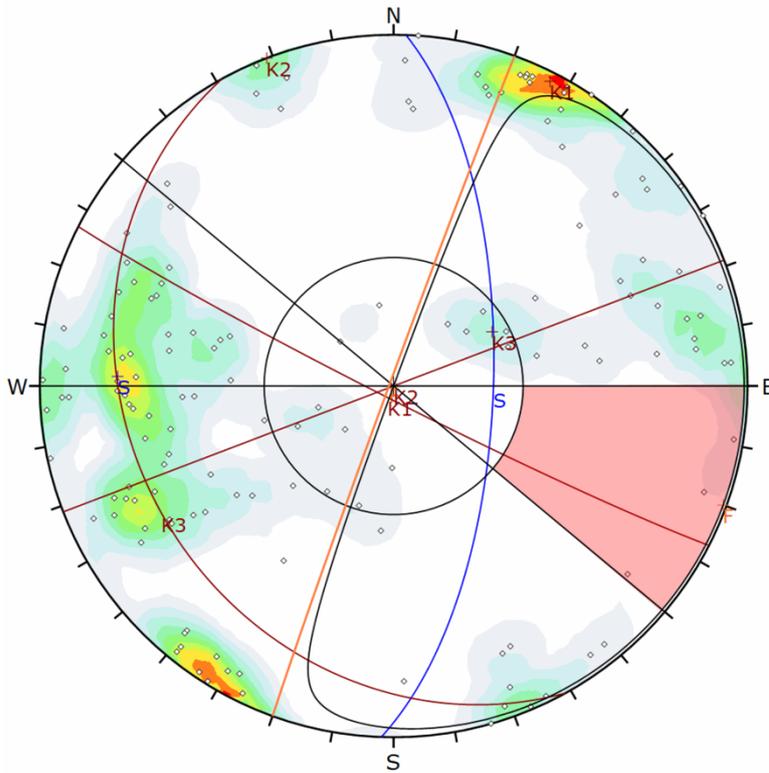
Lo scalzamento al piede dell'ammasso può produrre CROLLO o RIBALTIMENTO DI BLOCCHI.

Analisi successive:

Analisi riconducibile con *Key-Block theory*.

# Strada Alta A2\_c

# Analisi dei cinematismi: Scivolamento planare



Symbol	Feature
◊	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
	0.00 - 0.75
	0.75 - 1.50
	1.50 - 2.25
	2.25 - 3.00
	3.00 - 3.75
	3.75 - 4.50
	4.50 - 5.25
	5.25 - 6.00
	6.00 - 6.75
	6.75 - 7.50

Contour Data		Pole Vectors
Maximum Density	7.09%	
Contour Distribution	Fisher	
Counting Circle Size	1.0%	

Kinematic Analysis		Planar Sliding
Slope Dip	89	
Slope Dip Direction	290	
Friction Angle	30°	
Lateral Limits	20°	

	Critical	Total	%
Planar Sliding (All)	3	145	2.07%

	Color	Dip	Dip Direction	Label
User Planes				
1		89	290	F
Mean Set Planes				
1m		67	92	S
2m		87	207	K1
3m		90	159	K2
4m		26	241	K3

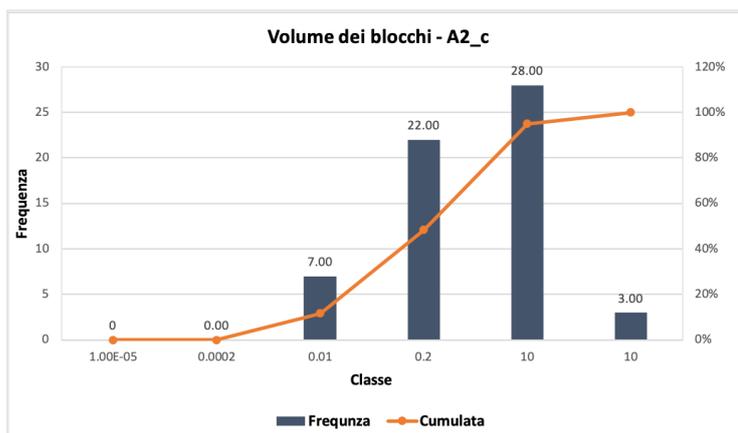
  

Plot Mode		Pole Vectors
Vector Count	145	(145 Entries)
Hemisphere	Lower	
Projection	Equal Area	



**ASSENZA** di scivolamento planare.

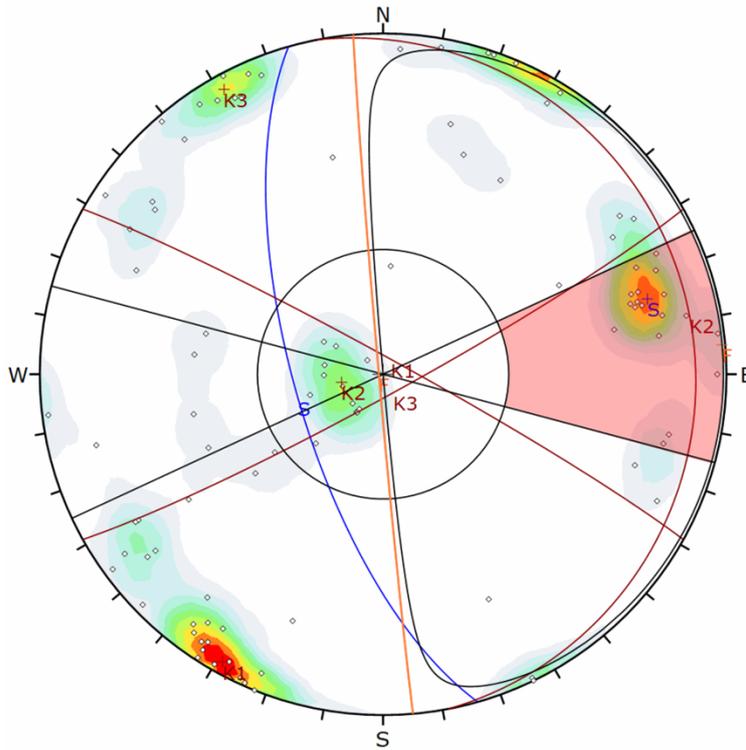
Altri cinematismi:  
I set K1 e K2 svincolano blocchi di volume variabile.



Media [m³]	2.28141
Massimo [m³]	40.63295
Minimo [m³]	0.00061
Moda [m³]	0.2

# Strada Alta A3\_a

# Analisi dei cinematismi: Scivolamento planare



Symbol	Feature
◊	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
	0.00 - 1.10
	1.10 - 2.20
	2.20 - 3.30
	3.30 - 4.40
	4.40 - 5.50
	5.50 - 6.60
	6.60 - 7.70
	7.70 - 8.80
	8.80 - 9.90
	9.90 - 11.00

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	10.92%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

Kinematic Analysis	Planar Sliding
Slope Dip	89
Slope Dip Direction	265
Friction Angle	30°
Lateral Limits	20°

	Critical	Total	%
Planar Sliding (All)	18	97	18.56%
Planar Sliding (Set 1: S)	14	14	100.00%

Color	Dip	Dip Direction	Label
User Planes			
1	89	265	F
Mean Set Planes			
1m	69	254	S
2m	86	29	K1
3m	10	79	K2
4m	85	151	K3

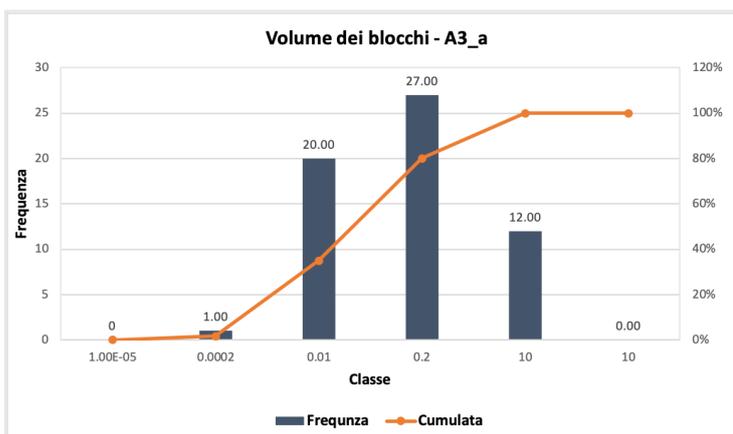
  

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	97 (97 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area



**PRESENZA** di scivolamento planare. Lo scivolamento avviene lungo il piano di STRATO.

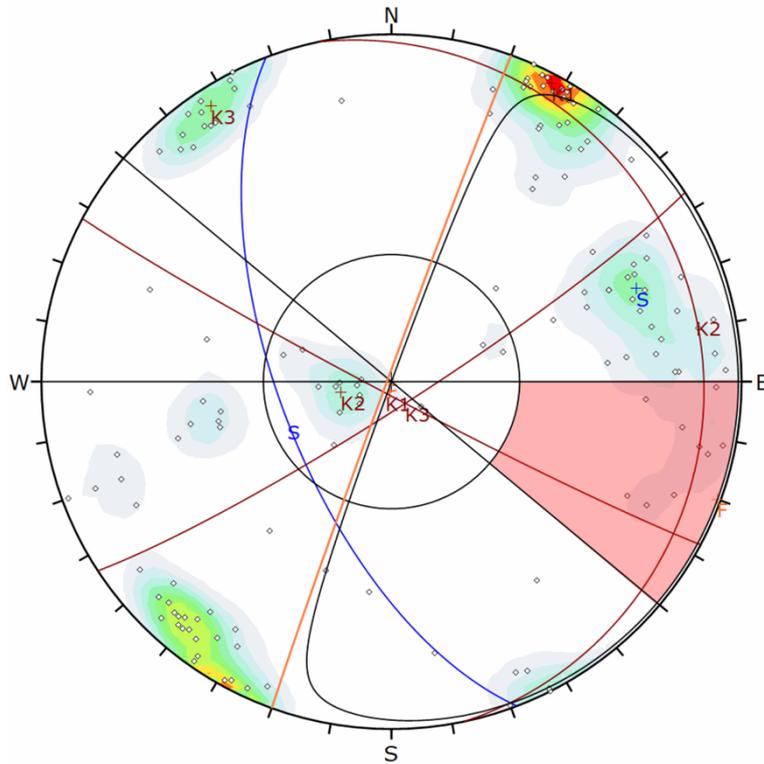
Altri cinematismi:  
I set K1 e K2 svincolano blocchi di dimensione e forma variabile.



Media [m³]	0.268649
Massimo [m³]	6.149309
Minimo [m³]	0.000072
Moda [m³]	0.2

# Strada Alta A3\_b

# Analisi dei cinematismi: Scivolamento planare



Symbol	Feature
o	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
	0.00 - 1.30
	1.30 - 2.60
	2.60 - 3.90
	3.90 - 5.20
	5.20 - 6.50
	6.50 - 7.80
	7.80 - 9.10
	9.10 - 10.40
	10.40 - 11.70
	11.70 - 13.00

Contour Data		Pole Vectors
Maximum Density	12.34%	
Contour Distribution	Fisher	
Counting Circle Size	1.0%	

Kinematic Analysis		Planar Sliding
Slope Dip	89	
Slope Dip Direction	290	
Friction Angle	30°	
Lateral Limits	20°	

	Critical	Total	%
Planar Sliding (A)	9	142	6.34%

Color	Dip	Dip Direction	Label
User Planes			
1	89	290	F
Mean Set Planes			
1m	64	249	S
2m	87	208	K1
3m	12	78	K2
4m	84	147	K3

Plot Mode		Pole Vectors
Vector Count	142 (142 Entries)	
Hemisphere	Lower	
Projection	Equal Area	



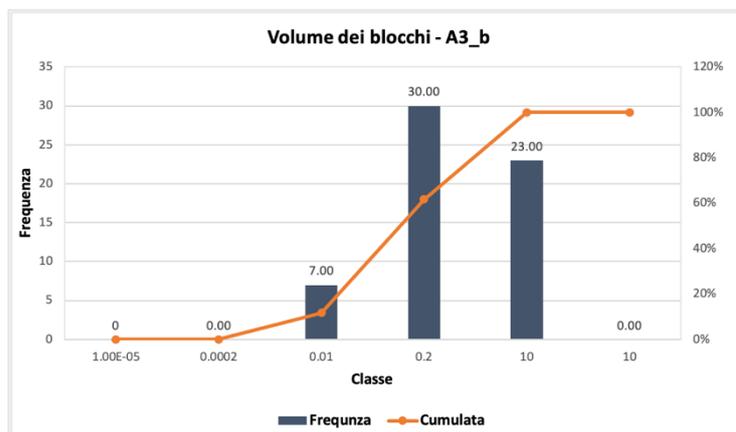
**ASSENZA** di scivolamento planare.

### Altri cinematismi:

I set K1 e K2 svincolano blocchi di dimensione e forma variabile.

### Analisi successive:

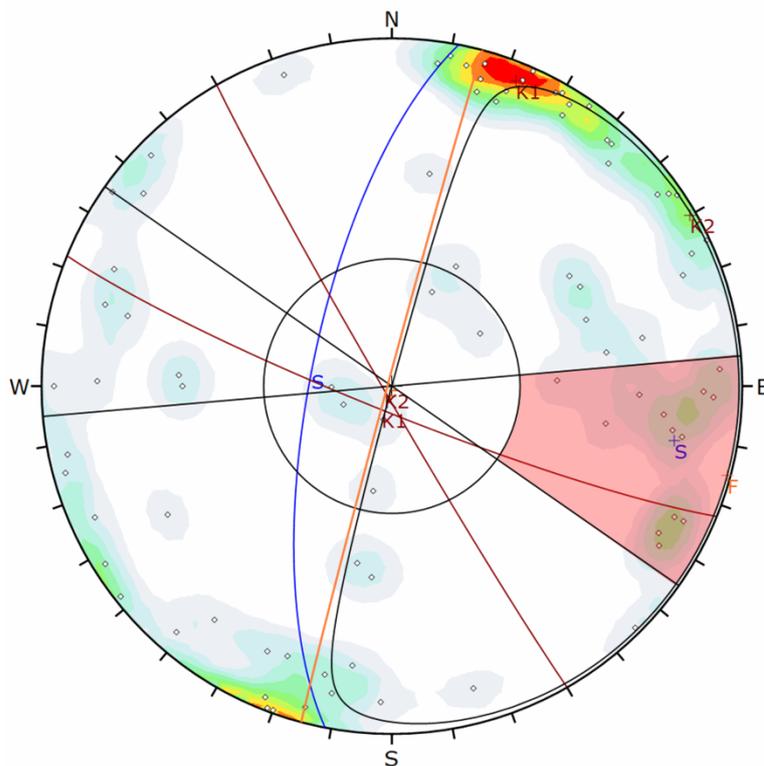
Analisi riconducibile con *Key-Block theory*.



Media [m <sup>3</sup> ]	0.377777
Massimo [m <sup>3</sup> ]	4.285915
Minimo [m <sup>3</sup> ]	0.000710
Moda [m <sup>3</sup> ]	0.2

# Strada Alta A4\_a

# Analisi dei cinematismi: Scivolamento planare



Symbol	Feature
o	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
0.00 - 1.00	
1.00 - 2.00	
2.00 - 3.00	
3.00 - 4.00	
4.00 - 5.00	
5.00 - 6.00	
6.00 - 7.00	
7.00 - 8.00	
8.00 - 9.00	
9.00 - 10.00	

Contour Data	
Maximum Density	9.92%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

Kinematic Analysis	
Planar Sliding	
Slope Dip	89
Slope Dip Direction	285
Friction Angle	30°
Lateral Limits	20°

	Critical	Total	%
Planar Sliding (All)	13	83	15.66%
Planar Sliding (Set 1: S)	12	13	92.31%

Color	Dip	Dip Direction	Label
User Planes			
1	89	285	F
Mean Set Planes			
1m	71	281	S
2m	84	202	K1
3m	88	240	K2

Plot Mode	
Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	83 (83 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area



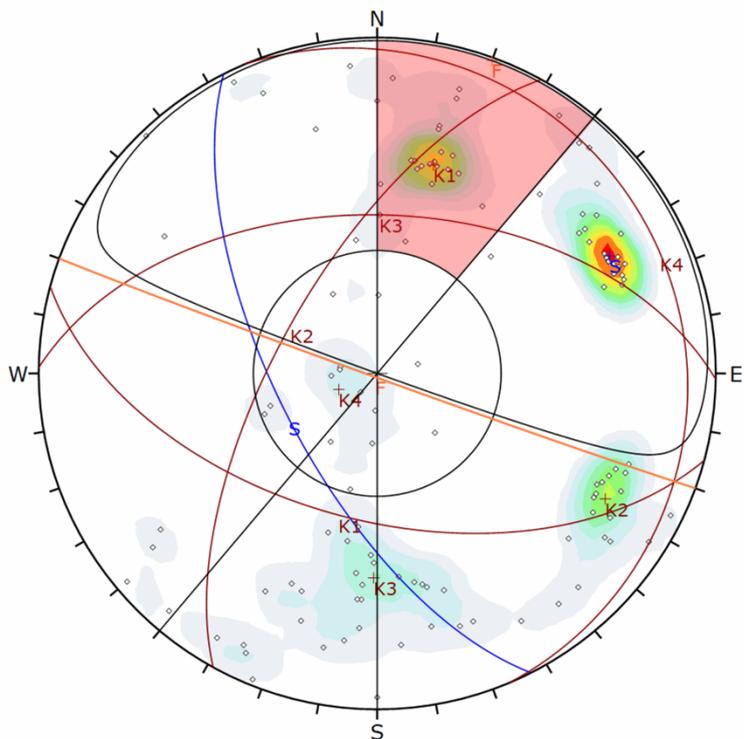
**PRESENZA** di scivolamento planare. Lo scivolamento avviene lungo il piano di STRATO.

Altri cinematismi:

I set K1 e K2 svincolano blocchi di dimensione e forma variabile.

# Strada Alta A4\_b

# Analisi dei cinematismi: Scivolamento planare



Symbol	Feature
o	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
	0.00 - 1.30
	1.30 - 2.60
	2.60 - 3.90
	3.90 - 5.20
	5.20 - 6.50
	6.50 - 7.80
	7.80 - 9.10
	9.10 - 10.40
	10.40 - 11.70
	11.70 - 13.00

Contour Data		Pole Vectors
Maximum Density	12.52%	
Contour Distribution	Fisher	
Counting Circle Size	1.0%	

Kinematic Analysis		Planar Sliding
Slope Dip	89	
Slope Dip Direction	200	
Friction Angle	30°	
Lateral Limits	20°	

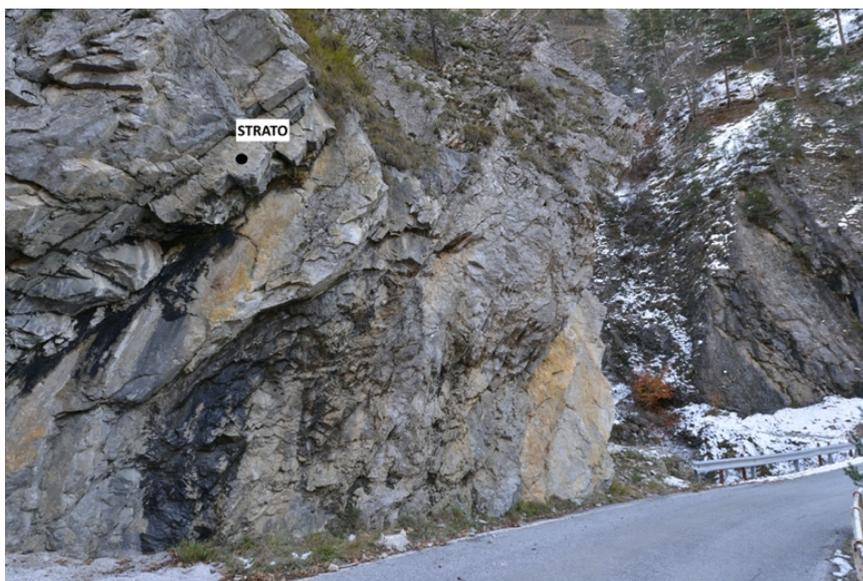
	Critical	Total	%
Planar Sliding (All)	23	121	19.01%
Planar Sliding (Set 2: K1)	16	16	100.00%

Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>User Planes</b>			
1	89	200	F
<b>Mean Set Planes</b>			
1m	66	243	S
2m	54	195	K1
3m	66	299	K2
4m	51	1	K3
5m	10	67	K4

Plot Mode		Pole Vectors
Vector Count	121 (121 Entries)	
Hemisphere	Lower	
Projection	Equal Area	

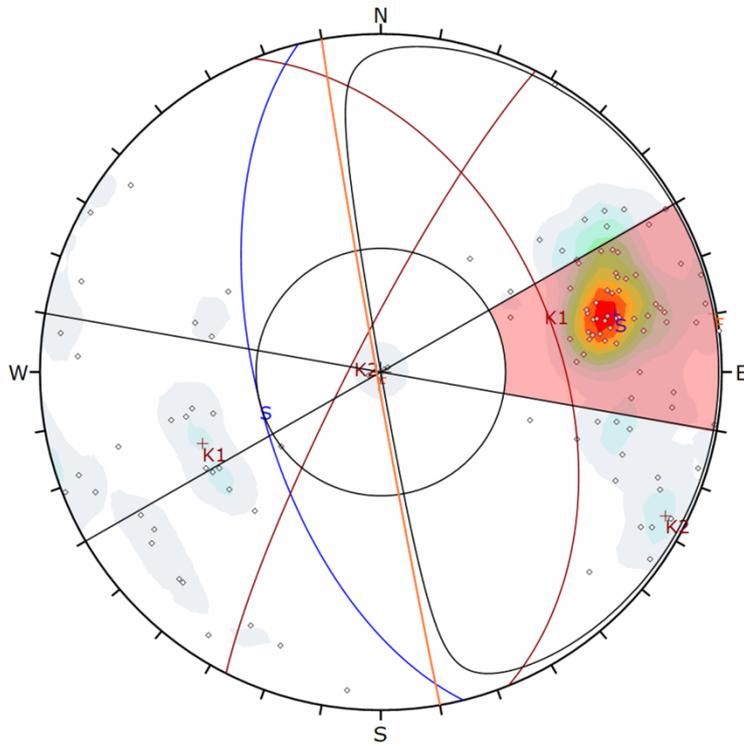


**PRESENZA** di scivolamento planare.

Lo scivolamento avviene principalmente lungo il set K1.

# Strada Alta A5

# Analisi dei cinematismi: Scivolamento planare



Symbol	Feature
◊	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
	0.00 - 1.70
	1.70 - 3.40
	3.40 - 5.10
	5.10 - 6.80
	6.80 - 8.50
	8.50 - 10.20
	10.20 - 11.90
	11.90 - 13.60
	13.60 - 15.30
	15.30 - 17.00

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	16.38%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

Kinematic Analysis		Planar Sliding
Slope Dip		89
Slope Dip Direction		260
Friction Angle		30°
Lateral Limits		20°

	Critical	Total	%
Planar Sliding (All)	50	110	45.45%
Planar Sliding (Set 1: S)	36	36	100.00%

Color	Dip	Dip Direction	Label
User Planes			
1	89	260	F
Mean Set Planes			
1m	60	256	S
2m	47	68	K1
3m	83	297	K2

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	110 (110 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area



**PRESENZA** di scivolamento planare.

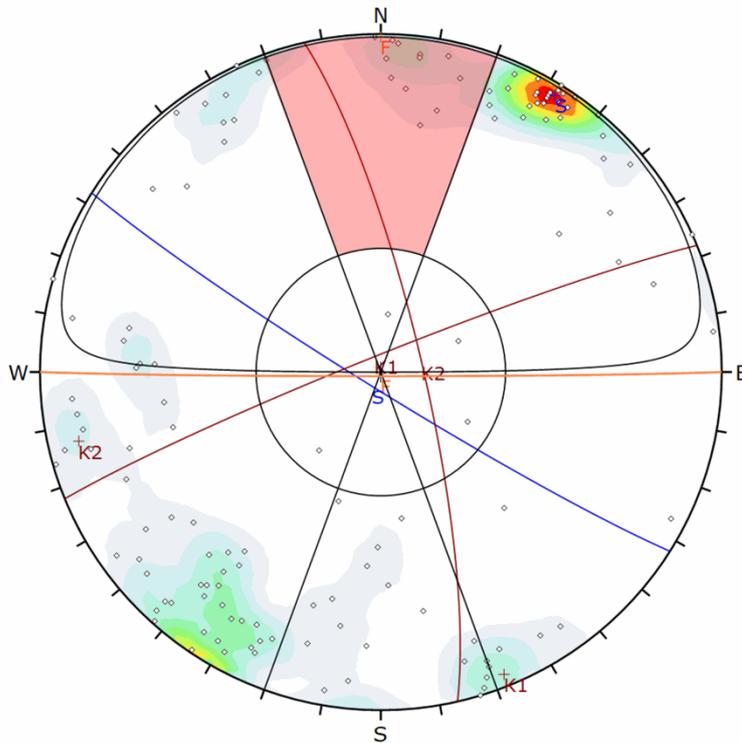
Lo scivolamento avviene principalmente lungo il piano di STRATO.

Altri cinematismi:

I set K1 e K2 svincolano blocchi di dimensione e forma variabile.

## Strada Alta A6

## Analisi dei cinematismi: Scivolamento planare



Symbol	Feature
○	Pole Vectors

Color	Density Concentrations
	0.00 - 1.40
	1.40 - 2.80
	2.80 - 4.20
	4.20 - 5.60
	5.60 - 7.00
	7.00 - 8.40
	8.40 - 9.80
	9.80 - 11.20
	11.20 - 12.60
	12.60 - 14.00

Contour Data	Pole Vectors
Maximum Density	13.17%
Contour Distribution	Fisher
Counting Circle Size	1.0%

Kinematic Analysis		Planar Sliding
Slope Dip	89	
Slope Dip Direction	180	
Friction Angle	30°	
Lateral Limits	20°	

	Critical	Total	%
Planar Sliding (All)	12	133	9.02%
Planar Sliding (Set 2: K1)	1	14	7.14%

Color	Dip	Dip Direction	Label
<b>User Planes</b>			
1	89	180	F
<b>Mean Set Planes</b>			
1m	86	212	S
2m	86	338	K1
3m	80	77	K2

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	133 (133 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Area



**ASSENZA** di scivolamento planare.

Altri cinematismi:

Presenza di una FAGLIA.

Analisi successive:

Analisi della GALLERIA IN ROCCIA.

L'analisi riconducibile con *Key-Block theory*.

***ALLEGATO 3: FILE DI INPUT 3DEC***

---

```

;-----
; GEOMETRIA
;-----
new
;
poly brick 0,112.5 0,121.25 0,75
plot block
jset dip 90 dd 240 or 50 , 0 , 0
jset dip 90 dd 240 or 112.5 , 36.25 , 0
jset dip 90 dd 150 or 62.78684177 , 121.25 , 0
jset dip 90 dd 150 or 50 , 0 , 0
;
delete block 217
delete block 3007
delete block 1206
delete block 2197
delete block 3771
;
jset dip 0 dd 240 or 0 , 0 , 12.5
jset dip 50 dd 240 or 55 , 20 , 12.5
;
jset dip 65 dd 330 or 20 , 80 , 12.5
jset dip 50 dd 150 or 55 , 20 , 12.5
;
jset dip 50 dd 240 or 50 , 0 , 12.5
jset dip 50 dd 240 or 56.25 , 20 , 12.5
jset dip 20 dd 70 or 31.25 , 61.25 , 75.5
;
delete block 8227
delete block 8953
delete block 29379
delete block 24833
delete block 30145
delete block 26519
delete block 6537
delete block 11547
delete block 32261
delete block 4313
delete block 7421
hide block 28359
mark region 1
hide region 1
show block 28359
;
jset dip 80 dd 150 or 31.25 , 61.25 , 12.5
;
hide block 28359

```

```
jset dip 20 dd 70 or 31.25 , 61.25 , 19.03
jset dip 20 dd 70 or 31.25 , 61.25 , 23.754
hide block 7421
;
jset dip 75 dd 150 or 29.375 , 65 , 12.5
jset dip 80 dd 330 or 28.75 , 70 , 12.5
jset dip 75 dd 150 or 25 , 73.75 , 12.5
show block 7421
mark region 3
hide region 3
show block 28359
jset dip 40 dd 0 or 31.25 , 61.25 , 45.1
jset dip 40 dd 0 or 31.25 , 61.25 , 55.1
jset dip 40 dd 0 or 31.25 , 61.25 , 30.1
;
hide block 28359
hide block 8227
hide block 8953
;
jset dip 40 dd 70 or 31.25 , 61.25 , 32.3
jset dip 40 dd 70 or 31.25 , 61.25 , 40.77
jset dip 40 dd 70 or 31.25 , 61.25 , 46.49
jset dip 40 dd 70 or 31.25 , 61.25 , 37.21
;
hide block 33293
hide block 34920
hide block 34354
jset dip 88 dd 150 or 36.25 , 53.75 , 12.5
hide block 35420
hide block 36070
jset dip 80 dd 330 or 37.5 , 51.25 , 12.5
show block 35420
jset dip 80 dd 330 or 40 , 47.5 , 12.5
hide block 38832
jset dip 80 dd 330 or 42.5 , 42.5 , 12.5
jset dip 80 dd 330 or 43.75 , 40 , 12.5
jset dip 80 dd 330 or 47.5 , 35 , 12.5
seek
hide region 1
hide region 3
jset dip 70 dd 0 or 25 , 73.75 , 75.5
seek
hide region 2
show region 2
hide region 1
mark region 4
seek
```

hide region 4  
hide region 1  
show block 25643  
show block 13229  
show block 24117  
show block 27423  
show block 31291  
show block 9813  
mark region 5  
seek

```
;-----  
; SEZIONAMENTO  
;-----  
hide region 1  
hide region 5  
jset dip 0 dd 240 or 3.44e+001 , 6.41e+001 , 1.76e+001  
jset dip 0 dd 240 or 3.88e+001 6.80e+001 2.44e+001  
jset dip 0 dd 240 or 5.08e+001 5.94e+001 3.16e+001  
jset dip 0 dd 240 or 6.55e+001 5.93e+001 4.68e+001  
jset dip 90 dd 150 or 52.9237 80.6901 46.5209  
jset dip 90 dd 150 or 65.5226 59.2708 46.7608  
seek  
hide region 1  
hide region 5  
hide region 4  
show block 22459  
mark region 6  
hide region 6  
;  
show block 48822  
mark region 11  
hide region 11  
show block 50300  
mark region 12  
hide region 12  
show block 62279  
mark region 13  
hide region 13  
;  
show block 24833  
mark region 21  
hide region 21  
show block 6537  
mark region 22  
hide region 22  
show block 64119  
mark region 23  
hide region 23  
show block 65037  
mark region 24  
hide region 24  
show block 63281  
mark region 25  
hide region 25  
show block 11547  
mark region 26  
hide region 26
```

show block 29379  
mark region 27  
hide region 27  
show block 61521  
mark region 28  
hide region 28  
;  
show block 60831  
mark region 31  
hide region 31  
;  
show block 65837  
mark region 41  
hide region 41  
;  
show block 28359  
mark region 51  
hide region 51  
show block 41866  
mark region 52  
hide region 52  
show block 8227  
mark region 53  
hide region 53  
show block 60094  
mark region 54  
hide region 54  
;  
show block 8953  
mark region 61  
hide region 61  
show block 33293  
mark region 62  
hide region 62  
show block 60094  
mark region 63  
hide region 63  
;  
show block 56839  
mark region 71  
hide region 71  
show block 34920  
mark region 72  
hide region 72  
show block 34354  
mark region 73  
hide region 73

show block 38832  
mark region 74  
hide region 74  
;  
show block 54648  
mark region 81  
hide region 81  
show block 52405  
mark region 82  
hide region 82  
show block 38136  
mark region 83  
hide region 83  
show block 39506  
mark region 84  
hide region 84  
show block 40202  
mark region 85  
hide region 85  
show block 41034  
mark region 86  
hide region 86  
;  
show block 45258  
mark region 91  
hide region 91  
show block 44348  
mark region 92  
hide region 92  
show block 43450  
mark region 93  
hide region 93  
show block 42680  
mark region 94  
hide region 94  
;  
show block 49584  
mark region 101  
hide region 101  
show block 51763  
mark region 102  
hide region 102  
show block 47034  
mark region 103  
hide region 103  
show block 47912  
mark region 104

hide region 104  
show block 46124  
mark region 105  
hide region 105  
show block 68913  
mark region 106  
hide region 106  
show block 51155  
mark region 107  
hide region 107  
;  
show block 26519  
mark region 111  
hide region 111  
show block 30145  
mark region 112  
hide region 112  
show block 4313  
mark region 113  
hide region 113  
show block 32261  
mark region 114  
hide region 114  
show block 55987  
mark region 115  
hide region 115  
show block 36744  
mark region 116  
hide region 116  
show block 53127  
mark region 117  
hide region 117  
show block 53912  
mark region 118  
hide region 118  
show block 67973  
mark region 119  
hide region 119  
show block 70301  
mark region 1110  
hide region 1110  
show block 37430  
mark region 1111  
hide region 1111  
show block 33805  
mark region 1112  
hide region 1112

show block 55398  
mark region 1113  
hide region 1113  
;  
show block 58458  
mark region 121  
hide region 121  
show block 57626  
mark region 122  
hide region 122  
show block 36070  
mark region 123  
hide region 123  
show block 35420  
mark region 124  
hide region 124  
show block 69583  
mark region 125  
hide region 125  
show block 71967  
mark region 126  
hide region 126  
show block 71339  
mark region 127  
hide region 127  
show block 67161  
mark region 128  
hide region 128  
;  
show block 7421  
mark region 131  
hide region 131  
show block 73583  
mark region 132  
hide region 132  
show block 72801  
mark region 133  
hide region 133  
show block 66513  
mark region 134  
hide region 134  
show block 59176  
mark region 135  
hide region 135  
;  
show region 11  
show region 21

join on  
hide region 11  
hide region 21  
;  
show region 12  
show region 22  
join on  
hide region 12  
hide region 22  
;  
show region 13  
show region 23  
show region 101  
show region 111  
join on  
hide region 13  
hide region 23  
hide region 101  
hide region 111  
;  
show region 102  
show region 113  
show region 107  
join on  
hide region 107  
hide region 102  
hide region 113  
;  
show region 25  
show region 112  
join on  
hide region 25  
hide region 112  
;  
show region 24  
show region 114  
join on  
hide region 24  
hide region 114  
;  
show region 28  
show region 115  
show region 31  
show region 121  
show region 41  
show region 131  
join on

hide region 28  
hide region 115  
hide region 31  
hide region 121  
hide region 41  
hide region 131  
;  
show region 52  
show region 135  
join on  
hide region 52  
hide region 135  
;  
show region 53  
show region 63  
show region 134  
join on  
hide region 53  
hide region 63  
hide region 134  
;  
show region 61  
show region 132  
show region 122  
show region 1113  
join on  
hide region 61  
hide region 132  
hide region 122  
hide region 1113  
;  
show region 62  
show region 71  
show region 128  
show region 133  
join on  
hide region 62  
hide region 71  
hide region 128  
hide region 133  
;  
show region 127  
show region 72  
join on  
hide region 127  
hide region 72  
;

show region 81  
show region 73  
show region 126  
join on  
hide region 81  
hide region 73  
hide region 126  
;  
show region 82  
show region 74  
show region 125  
show region 119  
join on  
hide region 82  
hide region 74  
hide region 125  
hide region 119  
;  
show region 124  
show region 118  
join on  
hide region 124  
hide region 118  
;  
show region 123  
show region 117  
join on  
hide region 123  
hide region 117  
;  
show region 116  
show region 103  
join on  
hide region 116  
hide region 103  
;  
show region 1112  
show region 104  
join on  
hide region 1112  
hide region 104  
;  
show region 1111  
show region 105  
join on  
hide region 1111  
hide region 105

```
;
show region 1110
show region 106
show region 91
show region 83
join on
hide region 1110
hide region 106
hide region 91
hide region 83
;
show region 84
show region 92
join on
hide region 84
hide region 92
;
show region 85
show region 93
join on
hide region 85
hide region 93
;
show region 86
show region 94
join on
hide region 86
hide region 94
;
show region 1
show region 5
show region 6
join on
seek
```

```
;-----  
; VINCOLI  
;-----  
hide region 4  
fix region 1  
fix region 5  
gravity 0 0 -9.81  
;-----  
; PROPRIETA'  
;-----  
seek  
prop mat=1 dens=2753.19  
prop jmat=1 kn=1e9 ks=1e9 f=40  
prop jmat=2 kn=1e9 ks=1e9 jte=17.5e6 res_te=17.5e6 coh=32.6e6  
change jmat=1 jcons=2 range joint 11  
change jmat=2 jcons=2 range joint 6  
change jmat=2 jcons=2 range joint 7  
change jmat=2 jcons=2 range joint 8  
change jmat=2 jcons=2 range joint 9  
change jmat=2 jcons=2 range joint 12  
change jmat=2 jcons=2 range joint 13  
change jmat=2 jcons=2 range joint 14  
change jmat=2 jcons=2 range joint 15  
change jmat=2 jcons=2 range joint 16  
change jmat=2 jcons=2 range joint 17  
change jmat=2 jcons=2 range joint 18  
change jmat=2 jcons=2 range joint 19  
change jmat=2 jcons=2 range joint 20  
change jmat=2 jcons=2 range joint 21  
change jmat=2 jcons=2 range joint 22  
change jmat=2 jcons=2 range joint 23  
change jmat=2 jcons=2 range joint 24  
change jmat=2 jcons=2 range joint 25  
change jmat=2 jcons=2 range joint 26  
change jmat=2 jcons=2 range joint 27  
change jmat=2 jcons=2 range joint 28  
change jmat=2 jcons=2 range joint 29  
change jmat=2 jcons=2 range joint 30  
change jmat=2 jcons=2 range joint 31  
change jmat=2 jcons=2 range joint 32  
change jmat=2 jcons=2 range joint 32  
change jmat=2 jcons=2 range joint 33  
change jmat=2 jcons=2 range joint 34  
change jmat=2 jcons=2 range joint 35  
change jmat=2 jcons=2 range joint 36  
change jmat=2 jcons=2 range joint 37  
change jmat=2 jcons=2 range joint 38
```

```

;-----
; DISTRIBUZIONE DELLA PERSSIONE IDROSTATICA - 1
;-----
seek
;-----
;p1=0 Pa
;-----
pfix p 0 range rintersection 6 11
pfix p 0 range rintersection 6 12
pfix p 0 range rintersection 6 13
;-----
;p2=0 Pa
;-----
pfix p 0 range rintersection 6 21
pfix p 0 range rintersection 6 22
pfix p 0 range rintersection 6 23
pfix p 0 range rintersection 6 24
pfix p 0 range rintersection 6 25
pfix p 0 range rintersection 6 26
pfix p 0 range rintersection 6 27
pfix p 0 range rintersection 6 28
;-----
;p3=5e4 Pa
;-----
pfix p 5e4 range rintersection 6 31
;-----
;p4=12e4 Pa
;-----
pfix p 12e4 range rintersection 6 41
;-----
;p5=5e4 Pa
;-----
pfix p 5e4 range rintersection 6 51
pfix p 5e4 range rintersection 6 52
pfix p 5e4 range rintersection 6 53
;-----
;p6=12e4 Pa
;-----
pfix p 12e4 range rintersection 6 61
pfix p 12e4 range rintersection 6 62
pfix p 12e4 range rintersection 6 63
;-----
;p7=5e4 Pa
;-----
pfix p 5e4 range rintersection 6 71
pfix p 5e4 range rintersection 6 72
pfix p 5e4 range rintersection 6 73

```

```
prefix p 5e4 range rintersection 6 74
;-----
;p8=0 Pa
;-----
prefix p 0 range rintersection 6 81
prefix p 0 range rintersection 6 82
prefix p 0 range rintersection 6 83
prefix p 0 range rintersection 6 84
prefix p 0 range rintersection 6 85
prefix p 0 range rintersection 6 86
;-----
;p9=0 Pa
;-----
prefix p 0 range rintersection 6 91
prefix p 0 range rintersection 6 92
prefix p 0 range rintersection 6 93
prefix p 0 range rintersection 6 94
;-----
;p10=0 Pa
;-----
prefix p 0 range rintersection 6 101
prefix p 0 range rintersection 6 102
prefix p 0 range rintersection 6 103
prefix p 0 range rintersection 6 104
prefix p 0 range rintersection 6 105
prefix p 0 range rintersection 6 106
prefix p 0 range rintersection 6 107
;-----
;p11=5e4 Pa
;-----
prefix p 5e4 range rintersection 6 111
prefix p 5e4 range rintersection 6 112
prefix p 5e4 range rintersection 6 113
prefix p 5e4 range rintersection 6 114
prefix p 5e4 range rintersection 6 115
prefix p 5e4 range rintersection 6 116
prefix p 5e4 range rintersection 6 117
prefix p 5e4 range rintersection 6 118
prefix p 5e4 range rintersection 6 119
prefix p 5e4 range rintersection 6 1110
prefix p 5e4 range rintersection 6 1111
prefix p 5e4 range rintersection 6 1112
prefix p 5e4 range rintersection 6 1113
;-----
;p12=12e4 Pa
;-----
prefix p 12e4 range rintersection 6 121
```

prefix p 12e4 range rintersection 6 122  
prefix p 12e4 range rintersection 6 123  
prefix p 12e4 range rintersection 6 124  
prefix p 12e4 range rintersection 6 125  
prefix p 12e4 range rintersection 6 126  
prefix p 12e4 range rintersection 6 127  
prefix p 12e4 range rintersection 6 128

-----

;p13=19e4 Pa

-----

prefix p 19e4 range rintersection 6 131  
prefix p 19e4 range rintersection 6 132  
prefix p 19e4 range rintersection 6 133  
prefix p 19e4 range rintersection 6 134  
prefix p 19e4 range rintersection 6 135

```

;-----
; DISTRIBUZIONE DELLA PERSSIONE IDROSTATICA - 2
;-----
seek
;-----
;p1=0 Pa
;-----
pfix p 0 range rintersection 6 11
pfix p 0 range rintersection 6 12
pfix p 0 range rintersection 6 13
;-----
;p2=0 Pa
;-----
pfix p 0 range rintersection 6 21
pfix p 0 range rintersection 6 22
pfix p 0 range rintersection 6 23
pfix p 0 range rintersection 6 24
pfix p 0 range rintersection 6 25
pfix p 0 range rintersection 6 26
pfix p 0 range rintersection 6 27
pfix p 0 range rintersection 6 28
;-----
;p3=0 Pa
;-----
pfix p 0 range rintersection 6 31
;-----
;p4=0 Pa
;-----
pfix p 0 range rintersection 6 41
;-----
;p5=0 Pa
;-----
pfix p 0 range rintersection 6 51
pfix p 0 range rintersection 6 52
pfix p 0 range rintersection 6 53
;-----
;p6=0 Pa
;-----
pfix p 0 range rintersection 6 61
pfix p 0 range rintersection 6 62
pfix p 0 range rintersection 6 63
;-----
;p7=0 Pa
;-----
pfix p 0 range rintersection 6 71
pfix p 0 range rintersection 6 72
pfix p 0 range rintersection 6 73

```

```

pfix p 0 range rintersection 6 74
;-----
;p8=0 Pa
;-----
pfix p 0 range rintersection 6 81
pfix p 0 range rintersection 6 82
pfix p 0 range rintersection 6 83
pfix p 0 range rintersection 6 84
pfix p 0 range rintersection 6 85
pfix p 0 range rintersection 6 86
;-----
;p9=0 Pa
;-----
pfix p 0 range rintersection 6 91
pfix p 0 range rintersection 6 92
pfix p 0 range rintersection 6 93
pfix p 0 range rintersection 6 94
;-----
;p10=0 Pa
;-----
pfix p 0 range rintersection 6 101
pfix p 0 range rintersection 6 102
pfix p 0 range rintersection 6 103
pfix p 0 range rintersection 6 104
pfix p 0 range rintersection 6 105
pfix p 0 range rintersection 6 106
pfix p 0 range rintersection 6 107
;-----
;p11=5e4 Pa
;-----
pfix p 5e4 range rintersection 6 111
pfix p 5e4 range rintersection 6 112
pfix p 5e4 range rintersection 6 113
pfix p 5e4 range rintersection 6 114
pfix p 5e4 range rintersection 6 115
pfix p 5e4 range rintersection 6 116
pfix p 5e4 range rintersection 6 117
pfix p 5e4 range rintersection 6 118
pfix p 5e4 range rintersection 6 119
pfix p 5e4 range rintersection 6 1110
pfix p 5e4 range rintersection 6 1111
pfix p 5e4 range rintersection 6 1112
pfix p 5e4 range rintersection 6 1113
;-----
;p12=14.8e4 Pa
;-----
pfix p 14.8e4 range rintersection 6 121

```

prefix p 14.8e4 range rintersection 6 122  
prefix p 14.8e4 range rintersection 6 123  
prefix p 14.8e4 range rintersection 6 124  
prefix p 14.8e4 range rintersection 6 125  
prefix p 14.8e4 range rintersection 6 126  
prefix p 14.8e4 range rintersection 6 127  
prefix p 14.8e4 range rintersection 6 128

-----  
;

;p13=5e4 Pa

-----  
;

prefix p 5e4 range rintersection 6 131

prefix p 5e4 range rintersection 6 132

prefix p 5e4 range rintersection 6 133

prefix p 5e4 range rintersection 6 134

prefix p 5e4 range rintersection 6 135

-----  
;

;CICLI

-----  
;

hist unbal type 1;

cycle 10000

## ***RINGRAZIAMENTI***

---

Probabilmente questi non saranno i soliti ringraziamenti, quelli che mi aspettavo di fare. Purtroppo, le cose sono un po' diverse oggi e nulla è come l'avevo previsto.

Questo giorno me lo immaginavo felice, immaginavo di dividerlo con le persone che amo, con la mia famiglia e i miei amici. È quello che tutti si aspettano dal giorno della propria laurea, di ridere, sorridere e festeggiare.

Vi racconto un po' la storia, per chi di voi sta leggendo questa lettera dal futuro. Siamo nel mese di marzo, anno 2020. Qualche settimana fa un virus ha colpito l'Italia, il Coronavirus. All'inizio nessuno (o quasi) aveva dato troppo peso alla cosa, la vita di tutti andava avanti come sempre. Se ne parlava sui giornali, alcuni paesi della regione Lombardia erano stati colpiti duramente, e tutti gli abitanti sono stati costretti a rimanere in casa, mantenere le distanze. Io che mi trovo a Torino, ero un po' preoccupata, ma la cosa mi sembrava ancora abbastanza lontana. Ma il virus è più veloce, veloce quanto le persone, e nel giro di pochi giorni sono state chiuse scuole, università, attività commerciali, bar, ristoranti e negozi. È partita dalla Lombardia la zona rossa, così la chiamiamo, ma l'11 marzo lo diventò tutta l'Italia. Siamo tutti (o quasi) chiusi in casa ormai da settimane, tutti gli italiani sono uniti nella lotta contro il virus. La quarantena è la nostra arma, non possiamo avvicinarci, non possiamo stare insieme, abbracciarci, siamo uniti da lontano. Facciamo questo piccolo sacrificio per i nostri medici, come il mio papà, per tutti gli infermieri, gli operatori sanitari e per tutti coloro che lavorano negli ospedali e assistono i malati. Perché i malati aumentano ogni giorno e gli ospedali non ce la fanno, coloro che necessitano di terapia intensiva sono troppi rispetto ai posti disponibili e le morti non si fermano.

Mi piace pensare che siamo tutti un po' degli eroi in questo momento: noi che siamo a casa, con la famiglia lontana chilometri, tutti coloro che lavorano ogni giorno nei supermercati, nei negozi di alimentari, i corrieri, tutti coloro che si occupano di pulire gli ambienti, le forze dell'ordine, gli operai, tutte le persone che mantengono il nostro paese ancora in vita, che escono ogni giorno di casa con la paura del contagio. In questi giorni si sentono canzoni dalla finestra, la gente esce sui balconi e canta in coro l'inno nazionale, ci facciamo tutti compagnia così e ci strappiamo qualche sorriso a vicenda. Per quanto io non sia mai stata una grande fan dei social network, le nuove tecnologie aiutano moltissimo, possiamo chiamarci e vederci comunque, a chilometri di distanza, e condividere con gli altri

i nostri sentimenti e le nostre emozioni. La solidarietà e il senso di appartenenza ripagano (almeno per me) per tutta questa solitudine. La malinconia e la nostalgia si fanno sentire ma con loro anche il sogno di quando potremo riabbracciarci, di quando potrò tornare nella mia amata Puglia, di quando potrò guardare il mare, festeggiare al tramonto e condividere la gioia con tutti i miei amici. Tutte quelle cose che davamo per scontate non lo saranno mai più, daremo importanza alle piccole cose: ai sorrisi e ai baci della mamma, ai momenti passati con i nipoti, ai baci dei nostri compagni e a un pasto condiviso con i nostri cari. È vero, non sappiamo per quanto dovremo aspettare, ma torneremo ad amarci da vicino, torneremo a viaggiare, torneremo a condividere, a non aver paura dell'altro. Torneranno le serate con gli amici nei posti del cuore, torneranno le avventure, tutto tornerà come prima ma noi non saremo più gli stessi. Il tempo insegna tante cose e mi auguro che questo tempo ci abbia insegnato che tutti insieme siamo più forti, che ognuno può fare la differenza, davvero!

Oggi è il mio giorno speciale, quello che avrei passato che le persone più care. Per raggiungere questo traguardo ci ho messo tanto impegno e sacrificio, e questo era il momento di rendere orgogliosi i miei genitori, di scattare foto ricordo con le amiche, di baciare il mio fidanzato, che da anni condivide con me ogni piccolo passo verso questo traguardo. Oggi non è come me lo immaginavo, ma di una cosa sono certa: non sono sola, anzi probabilmente oggi lo sono meno che mai. Sento di far parte di qualcosa di buono, sto facendo la cosa giusta, sento il calore di un'intera nazione, tutti gli italiani. Ci sarà tempo per festeggiare, per stare insieme, e sarà tutto ancora più bello.

Sono tante le persone che desidero ringraziare per avermi fornito competenze, aiuto e supporto durante tutto il mio percorso di studi.

Vorrei ringraziare la mia professoressa Maria Rita Migliazza per avermi guidato in questo lavoro, per avermi fornito preziosi aiuti e consigli e per la sua pazienza e disponibilità che, anche in questo particolare momento, mi saranno d'esempio per il resto della mia carriera.

Un doveroso ringraziamento va anche al Prof. Claudio Scavia per i suoi insegnamenti e per avermi permesso di svolgere questo lavoro, avvicinandomi al mondo della meccanica delle rocce.

Vorrei ringraziare i miei genitori per la possibilità che mi hanno dato, di poter studiare e inseguire i miei sogni. Ringrazio tutta la mia famiglia mia madre, mio padre, Roberto, mia sorella, mio fratello, mia zia, mia nonna e tutti le miei parenti per il calore e l'amore che mi trasmettono ogni giorno.

Vorrei ringraziare anche il mio fidanzato, i suoi genitori e tutti i suoi parenti che ormai sono la mia seconda famiglia, parte della mia vita da anni, e che mai mi hanno fatto mancare il loro affetto e amore incondizionato. Ringrazio le mie bellissime nipotine che mi regalano sorrisi e che, ogni giorno, mi fanno sentire una persona speciale.

Ringrazio le mie amiche più strette che ormai, non solo per la situazione attuale, non vedo più così spesso. Siamo tutte lontane fisicamente, ma i nostri cuori sono sempre stati vicini. Siete come sorelle per me.

Ringrazio tutti i miei amici, con cui ho condiviso le esperienze più belle. Siete tutti importanti per me e presto torneremo a divertirci tutti insieme (a partire dalla festa che organizzerò dopo che tutto questo sarà passato).

Un grande ringraziamento va a una amica e collega che da quando sono qui condivide con me gioie, sacrifici, notti di studio, pianti, esami, progetti, allenamenti... penso che non ci sia una fine alla lista delle cose che viviamo insieme ogni giorno, dandoci forza a vicenda.

In fine vorrei ringraziare il mio compagno di vita. Non basterebbe questo foglio per esprimere la mia gratitudine, sei e sarai sempre la mia forza. Grazie per supportarmi (e sopportarmi) sempre in tutto, per avermi spronato a mettercela tutta. Il merito di tutto questo è anche tuo.

Nell'attesa di potervi riabbracciare tutti e di festeggiare con tutti voi, vi auguro di stare bene, fatevi forza e non mollate.

Sono felice, grazie.