POLITECNICO DI TORINO

I FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea Magistrale in

Ingegneria Civile

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

Effetto scala sulla misura della rugosità di discontinuità naturali misurata con tecniche di non contatto

RELATORI:

Prof. Claudio Scavia

Prof.ssa Maria Rita Migliazza

Dott.ssa Gessica Umili

CANDIDATA:

VERONICA TAURINO

Matr. 208548

Anno Accademico 2018-2019

Sommario

1. Introduzione 1

2. Meccanismi di instabilità in ammassi rocciosi 7

2.1. Parametri geometrici 11

2.2. Parametri meccanici e criteri di resistenza 12

2.2.1. JRC - Joint Roughness Coefficient 18

2.2.2. JCS - Joint Compressive Strength 22

2.3. Effetto scala: panoramica di studi precedenti 23

2.3.1. Effetto scala secondo Barton e Bandis 24

3. Parametri di misura della rugosità 28

3.1. Parametri direzionali di scabrezza 29

3.1.1. Angolo di rugosità $\Theta^*_{max/}[C+1]_{2D}$ e $\Theta^*_{max/}[C+1]_{3D}$ 29

3.2. Parametri non direzionali di scabrezza 30

3.2.1. Coefficienti di rugosità lineare e superficiale: R_P e R_S 31

3.2.2. Z_2 32

3.2.3. Funzione di struttura: SF 34

3.2.1. Dimensione frattale D e parametro di ampiezza A 35

3.3. Anisotropia della scabrezza 38

4. Tecniche fotogrammetriche per il rilievo delle superfici di discontinuità 39

4.1. Il rilievo fotogrammetrico 40

4.2. Post-processing dei dati 41

4.3. Fotogrammetria per la stima della scabrezza 43
4.4. Trattazione dei dati alle diverse scale 43
4.4.1. Preparazione dei DSM 47
4.4.2. Rotazione della nuvola 49
4.4.3. Estrazione profili regolari con Surfer 50
4.4.4. Campionamento dei profili 52
4.4.5. Valutazione parametri di scabrezza: Z_2, Rp, Rs 57
4.4.6. Stima di JRC con formulazioni da letteratura 58
4.4.7. Anisotropia 58
5. Caso di studio: crollo versante in roccia, Sinigo Merano (BZ) 61
5.1. Caso di studio: rilievo geostrutturale e geomeccanico 63
5.2. Caso di studio: rilievo fotogrammetrico 69
5.3. Scala dei blocchi 75
5.3.1. Preparazione dei DSM 75
5.3.2. Rotazione della nuvola 76
5.3.3. Estrazione profili regolari con Surfer 77
5.3.4. Campionamento dei profili 79
5.3.5. Valutazione parametri di scabrezza: Z2, Rp, Rs 83
5.3.6. Stima di JRC con formulazioni da letteratura 90
5.3.7. Anisotropia 91
5.4. Scala di laboratorio – provini 92

5.4.1. Preparazione dei DSM 92
5.4.2. Rotazione della nuvola 95
5.4.3. Estrazione profili regolari con Surfer 96
5.4.4. Campionamento dei profili 96
5.4.5. Valutazione parametri di scabrezza: Z2, Rp, Rs 100
5.4.6. Stima di JRC con formulazioni da letteratura 110
5.4.7. Anisotropia 112
5.5. Scala del sito - versante 114
5.5.1. Preparazione dei DSM 114
5.5.1. Rotazione della nuvola 115
5.5.2. Estrazione profili regolari con Surfer 116
5.5.3. Campionamento dei profili 116
5.5.4. Valutazione parametri di scabrezza: Z2, Rp, Rs 119
5.5.5. Stima di JRC con formulazioni da letteratura 130
5.5.6. Osservazioni sulle superfici di versante: influenza dell'ondulosità 131
5.5.7. Anisotropia 142
6. Confronto con i risultati di laboratorio 144
7. Conclusioni 147
8. Bibliografia 151
9. Appendice 158
9.1. Schede elementi 158

9.1.1. Scheda provino GS1 top/bottom 158

9.1.2. Scheda provino GS2 top/bottom 163

9.1.3. Scheda provino GS3 top/bottom 168

9.1.4. Scheda – blocco 1 – 1m x 1m 173

9.1.5. Scheda – blocco 2 – 1m x 1m 176

9.1.6. Scheda – blocco 3 - 0,85 x 0,85 m 179

9.1.7. Scheda – parete 1 – 3x3m 182

9.1.8. Scheda – parete 1 ridotta– 1m x 1m 185

9.1.9. Scheda – parete 2 – 5x5m 188

9.1.10. Scheda – parete 2 ridotta – 2x2m 191

9.1.11. Scheda – parete 3 – 7x7m 194

9.1.12. Scheda – parete 3 ridotta– 1.5m x 1.5m 197

9.1.13. Scheda – parete 4 – 4x4m 200

9.1.14. Scheda – parete 4 ridotta – 2x2m 203

9.1.15. Scheda – parete 5 – 2x2m 206

9.1.16. Scheda - parete 5 ridotta– 1m x 1m 209

9.2. Codici matlab 212

9.2.1. rotazione_punti_piano_medio 212

9.2.2. z2_rp_ricampionamento 215

9.2.3. ricampionamento_profili 216

9.2.4. analisti_statistica_z2 218

9.2.5. distribuzione_frequenza_z2 224

9.2.6. analisti_statistica_jrc 227

9.2.7. ruota_su_360 232

9.2.8. z2_polar_plot 234

9.2.9. Calcola_z2_colonna 236

9.2.10. distribuzione_frequenza_jrc 236

9.2.11. ondulosita + delta_ond_z2 (uso congiunto) 239

9.3. Codici Basic 248

9.3.1. Anisotropia_surfer 248

Indice delle figure

Figura 1.1 a) Eventi franosi principali nel 2016; b) Eventi franosi principali nel 2017 (ISPRA, 2018). .. 2

Figura 1.2 Bolzano, gennaio 2014: diversi massi di centinaia di metri cubi abbattono parte di un casolare, fermandosi ad un paio di metri dalla zona abitata (copyright foto: reppubblica.it)..... 3

Figura 2.1 Meccanismo di instabilità planare dei versanti in roccia (Hoek & Bray, 1981). 7

Figura 2.2 Meccanismo di instabilità a cuneo dei versanti in roccia (Hoek & Bray, 1981)..... 8

Figura 2.3 Meccanismo di instabilità per ribaltamento dei versanti in roccia (Hoek & Bray, 1981). ... 9

Figura 2.4 Schema della scatola di taglio di Hoek..... 12

Figura 2.5 Curve ottenibili a seguito di prove a taglio diretto su giunti scabri: a) curva tensione tangenziale- spostamento tangenziale, ; b) curva spostamento assiale - spostamento tangenziale, si osserva il fenomeno della dilatanza, cioè la presenza di spostamenti ortogonali alla superficie del giunto. 13

Figura 2.6 Comportamento a taglio di una discontinuità liscia, esempio di tre prove di taglio con relativo σ_n: a) Curva resistenze al taglio - σ_n a cui è eseguita la prova, dalla pendenza della retta si stima l'angolo di attrito in condizioni residue del giunto; b) curva tensioni tangenziali -spostamenti tangenziali: l'andamento asintotico della curva evidenzia il raggiungimento della resistenza al taglio. 14

Figura 2.7 Comportamento a taglio di una discontinuità scabra, esempio di tre prove di taglio con relativo σn: a) Curva resistenze al taglio - σn a cui è eseguita la prova, si evidenzia un andamento non lineare; b) curva tensioni tangenziali -spostamenti tangenziali: si evidenzia il raggiungimento di una prima condizione di picco, seguita da una condizione residua di resistenza. 15

Figura 2.8 a) Rappresentazione schematica di una prova di taglio su discontinuità a denti di sega; b) bilatera di Patton □-□□relativo ad una prova di taglio effettuata su discontinuità scabra. 16

Figura 2.9 confronto tra l'inviluppo di resistenza di Barton e quello di Mohr-Coulomb (MC). 17

Figura 2.10 profilatore o Pettine di Barton 18

Figura 2.11 I 10 profili di rugosità standard della superficie delle discontinuità e relativi valori di JRC compresi tra 0 e 20 (Barton e Choubey 1977). 18

Figura 2.12 Schema del tilt test con □ tilt angle. 19

Figura 2.13 a) nomogramma di Barton (Barton & Bandis, 1982); b) schematizzazione d'esempio sul metodo del regolo. 21

Figura 2.14 Diagramma per il calcolo del JCS (Deere & Miller, 1966). 23

Figura 3.1 Lunghezza normalizzata del profilo in funzione dell'angolo di soglia di rugosità, (Tatone & Grasselli, 2012). 30

Figura 3.2 Il coefficiente di rugositò superficiale Rs è il rapporto tra la superficie reale, At, l'area della superficie nominale, An (El-Soudani, 1978) 32

Figura 3.3 Profilo i-esimo sul quale è calcolato il parametro Z2. 33

Figura 3.4 andamento qualitativo del valore di Z2 con la variazione del passo di analisi Dx. 34

Figura 3.5 Schema di calcolo dei residui delle altezze della superficie per il metodo RLM, Fardin et all 2001. 36

Figura 3.6 Nello studio del comportamento anisotropo della scabrezza, si considerano profili orientati in maniera diversa. 38

Figura 4.1 Esempio di griglia regolare generata da Surfer. 42

Figura 4.2 Flowchart della metodologia implementata (pagina 44, 45). 47

Figura 4.3 DSM caricato su Surfer del campione GS2 Top a C1, nessuna elaborzione della nuvola. . 48

Figura 4.4 Esempio di ritaglio quadrato del DSM del campione GS2 Top a C1. 48

Figura 4.5 Blocco 1, dopo la rotazione del suo piano medio sull'orizzontale. 50

Figura 4.6 A partire da una nuvola di punti sparsi (di colore nero), il software Surfer genera una griglia regolare di punti e l'interpolazione restituisce le altezze in tutti i nodi della griglia (di colore rosso). 51

Figura 4.7 Uso del profilometro o Pettine di Barton, i profili vengono rilevati con un intervallo di campionamento di solito compreso nel range 0.5-1 mm. (Tatone & Grasselli, 2010)..... 52

Figura 4.8 Generico DSM grigliato su Surfer con indicati il sistema di riferimeto XY in rosso, ed in azzurro l'i-esimo profilo verticale, per un certo valore di x = cost..... 53

Figura 4.9 Esempio di generazione di profili in diverse risoluzioni. 54

Figura 4.10 Z_{2x} stimato per il blocco1, per i diversi intervalli di campionamento. 57

Figura 4.11 DSM del blocco 1 tagliato affinché la nuvola per lo studio dell'anisotropia sia circolare. 60

Figura 5.1 Stato della parete rocciosa in questione subito dopo l'evento del 05/02/2014 (Ferrero & Montepara, 2015).. 61

Figura 5.2 Materiale roccioso depositatosi ai piedi della parete a causa dell'evento del 05/02/2014 (Ferrero & Montepara, 2015). 61

Figura 5.3 Parete rocciosa in questione e materiale franato così come si presentavano subito dopo l'evento del 24 febbraio 2014 (Ferrero & Montepara, 2015). 62

Figura 5.4 Prova taglio diretto su campione GS1, grafico tensione tangenziale-spostamento di taglio. 66

Figura 5.5 Prova taglio diretto su campione GS2, grafico tensione tangenziale-spostamento di taglio. 66

Figura 5.6 Prova taglio diretto su campione GS3, grafico tensione tangenziale-spostamento di taglio. 67

Figura 5.7 Inviluppo di Barton ottenuto in back analysis in azzurro; sono evidenziate le tre coppie di punti (σ_n, τ_{picco}) ottenuti dalle prove di taglio al primo ciclo. 69
Figura 5.8 DSM di parte del versante interessato dal crollo. 70
Figura 5.9 Porzioni del versante prese in considerazione nel presente studio. 71
Figura 5.10 DTM dei tre blocci: a) blocco 1, 2'005'359 punti; b) blocco 2, 2'646'807 punti;c) blocco 3, 1'738'491 punti. 72
Figura 5.11 Campione GS1 BOTTOM in fase di digitalizzazione: in nero i marker sulla mascherina, in verde i marker riposizionati digitalmente. 72
Figura 5.12 DSM, visualizzato su CloudCompare, ricostruito per il campione GS2 Top a C1. 73
Figura 5.13 DSM provino GS1, C0, TOP e BOTTOM. 74
Figura 5.14 DSM provino GS2, C0, TOP e BOTTOM. 74
Figura 5.15 DSM provino GS3, C0, TOP e BOTTOM. 75
Figura 5.16 DSM dei tre blocci: a) blocco 1, 955'238 punti; b) blocco 2, 972'317 punti; c) blocco 3, 1'0320'774 punti. 76
Figura 5.17 DSM dei tre blocchi ruotate in modo che il loro piano medio si trovi sul piano orizzontale. 77
Figura 5.18 Blocco1: Griglia 2000x2000 da Surfer con evidenziato il primo profilo verticale su cui si è validato il codice Matlab. 78
Figura 5.19 Blocco 1, profilo generico: intervalli di campionamento usati nella valutazione di Z2 ed Rp. 79
Figura 5.20 Z2y ed Rpy relativo al singolo profilo ricampionato in Figura 5.19. 79
Figura 5.21 Blocco 2, profilo generico: intervalli di campionamento usati nella valutazione di Z_2 ed R_p. 80
Figura 5.22 Blocco 2: Z2Y ed RpY relativo al singolo profilo ricampionato in Figura 5.21. 80

Figura 5.23 Blocco 3, profilo generico: intervalli di campionamento usati nella valutazione di Z_2 ed R_p. 81

Figura 5.24 Blocco 2: Z_{2y} ed R_{py} relativo al singolo profilo ricampionato in Figura 5.23. 81

Figura 5.25 Blocco 1: Z2x (profili y=cost) ed Z2y (profili x = cost). 83

Figura 5.26 Blocco 1: Rpx (profili y=cost) ed Rpy (profili x = cost). 83

Figura 5.27 Blocco1: distribuzione di frequenza per i parametri Z2x e Z2y. 84

Figura 5.28 Blocco1: frequenza cumulata per i parametri Z2x e Z2y. 84

Figura 5.29 Blocco 2: Z2x (profili y=cost) ed Z2y (profili x = cost). 85

Figura 5.30 Blocco 2: Rpx (profili y=cost) ed Rpy (profili x = cost). 85

Figura 5.31 Blocco2: distribuzione di frequenza per i parametri Z_{2x} e Z_{2y}. 86

Figura 5.32 Blocco2: frequenza cumulata per i parametri Z_{2x} e Z_{2y}. 86

Figura 5.33 Blocco 3: Z2x (profili y=cost) ed Z2y (profili x = cost). 87

Figura 5.34 Blocco 3: Rpx (profili y=cost) ed Rpy (profili x = cost). 87

Figura 5.35 Blocco3: Distribuzione di frequenza per i parametri Z2x e Z2y. 88

Figura 5.36 Blocco3: frequenza cumulata per i parametri Z2x e Z2y. 88

Figura 5.37 Blocchi: calcolo del parametro di scabrezza Rs al variare del passo di campionamento superficiale. 90

Figura 5.38 Blocco 1: JRC lungo x ed y. 90

Figura 5.39 Blocco 2: JRC lungo x ed y. 90

Figura 5.40 Blocco 3: JRC lungo x ed y. 91

Figura 5.41 Polar Plot di Z_2 per il blocco 1, blocco 2 e blocco 3. 91

Figura 5.42 G1 TOP C0: DSM e ritaglio 50 mm x 50 mm. 93

Figura 5.43 G1 BOTTOM C0: DSM e ritaglio 50 mm x 50 mm. 93

Figura 5.44 G2 TOP C0: DSM e ritaglio 50 mm x 50 mm. 93

Figura 5.45 G2 BOTTOM C0: DSM e ritaglio 50 mm x 50 mm. 94

Figura 5.46 G3 TOP C0: DSM e ritaglio 50 mm x 50 mm. 94

Figura 5.47 G3 BOTTOM C0: DSM e ritaglio 50 mm x 50 mm. 94

Figura 5.48 GS1 TOP e BOTTOM: DSM dopo la rotazione sul piano orizzontale del piano che approssima la superficie 95

Figura 5.49 GS2 TOP e BOTTOM: DSM dopo la rotazione sul piano orizzontale del piano che approssima la superficie. 95

Figura 5.50 GS3 TOP e BOTTOM: DSM dopo la rotazione sul piano orizzontale del piano che approssima la superficie. 95

Figura 5.51 GS1 TOP, profilo generico: intervalli di campionamento usati nella valutazione di Z_2 ed R_p. 96

Figura 5.52 GS1 BOTTOM, profilo generico: intervalli di campionamento usati nella valutazione di Z_2 ed R_p. 97

Figura 5.53 GS2 TOP, profilo generico: intervalli di campionamento usati nella valutazione di Z_2 ed R_p. 97

Figura 5.54 GS2 BOTTOM, profilo generico: intervalli di campionamento usati nella valutazione di Z_2 ed R_p. 98

Figura 5.55 GS3 TOP, profilo generico: intervalli di campionamento usati nella valutazione di Z_2 ed R_p. 98

Figura 5.56 GS3 BOTTOM, profilo generico: intervalli di campionamento usati nella valutazione di Z_2 ed R_p. 99

Figura 5.57 Provino G1 TOP e BOTTOM: Z2x (profili y=cost) ed Z2y (profili x = cost). 100

Figura 5.58 Provino G1 TOP e BOTTOM: Rpx (profili y=cost) ed Rpy (profili x = cost). 100

Figura 5.59 Provino G1-TOP: distribuzione di frequenza per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 10mm/m. 101
Figura 5.60 Provino G1-BOT: distribuzione di frequenza per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 10mm/m. 102
Figura 5.61 Provino G1-TOP: frequenza cumulata per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 10mm/m. 102
Figura 5.62 Provino G1-BOT: frequenza cumulata per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 10mm/m. 102
Figura 5.63 Provino G2 TOP e BOTTOM: Z_{2x} (profili y=cost) ed Z_{2y} (profili x = cost). 103
Figura 5.64 Provino G2 TOP e BOTTOM: Rpx (profili y=cost) ed Rpy (profili x = cost). 103
Figura 5.65 Provino G2-TOP: distribuzione di frequenza per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 10mm/m. 104
Figura 5.66 Provino G2-BOT: distribuzione di frequenza per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 10mm/m. 105
Figura 5.67 Provino G2-TOP: frequenza cumulata per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 10mm/m. 105
Figura 5.68 Provino G2-BOT: frequenza cumulata per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 10mm/m. 105
Figura 5.69 Provino G3 TOP e BOTTOM: Z_{2x} (profili y=cost) ed Z_{2y} (profili x = cost). 106
Figura 5.70 Provino G3 TOP e BOTTOM: Rpx (profili y=cost) ed Rpy (profili x = cost). 106
Figura 5.71 Provino G3-TOP: distribuzione di frequenza per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 10mm/m. 107
Figura 5.72 Provino G3-BOT: distribuzione di frequenza per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 10mm/m. 108

Figura 5.73 Provino G3-TOP: frequenza cumulata per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 10mm/m. 108
Figura 5.74 Provino G3-BOT: frequenza cumulata per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 10mm/m. 108
Figura 5.75 Provino GS1 - TOP/ BOTTOM: variazione del parametro di scabrezza Rs al variare del passo di campionmento superficiale. 109
Figura 5.76 Provino GS2 - TOP/ BOTTOM: variazione del parametro di scabrezza Rs al variare del passo di campionmento superficiale. 109
Figura 5.77 Provino GS3 - TOP/ BOTTOM: variazione del parametro di scabrezza Rs al variare del passo di campionmento superficiale. 109
Figura 5.78 Polar Plot di Z2 per il provino GS1 TOP e GS1 BOTTOM per un passo di campionamento di 10mm/m. 112
Figura 5.79 Polar Plot di Z2 per il provino GS2 TOP e GS1 BOTTOM per un passo di campionamento di 10mm/m. 112
Figura 5.80 Polar Plot di Z2 per il provino GS3 TOP e GS1 BOTTOM per un passo di campionamento di 10mm/m. 113
Figura 5.81 DSM delle cinque porzioni di versante ruotate in modo che il loro piano medio si trovi sul piano orizzontale. 115
Figura 5.82 Parete 1, profilo generico: intervalli di campionamento usati nella valutazione di Z_2 ed R_p. 116
Figura 5.83 Parete 2, profilo generico: intervalli di campionamento usati nella valutazione di Z_2 ed R_p. 117
Figura 5.84 Parete 3, profilo generico: intervalli di campionamento usati nella valutazione di Z_2 ed R_p. 117

Figura 5.85 Parete 4, profilo generico: intervalli di campionamento usati nella valutazione di Z_2 ed R_p. 118

Figura 5.86 Parete 5, profilo generico: intervalli di campionamento usati nella valutazione di Z_2 ed R_p. 118

Figura 5.87 Parete 1: Z_{2x} (profili y=cost) ed Z_{2y} (profili x = cost). 119

Figura 5.88 Parete 1: Rpx (profili y=cost) ed Rpy (profili x = cost). 119

Figura 5.89 Parete1: distribuzione di frequenza per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 11mm/m. 120

Figura 5.90 Parete1: frequenza cumulata per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 11mm/m. 120

Figura 5.91 Parete 2: Z_{2x} (profili y=cost) ed Z_{2y} (profili x = cost). 121

Figura 5.92 Parete 2: Rpx (profili y=cost) ed Rpy (profili x = cost). 121

Figura 5.93 Parete2: distribuzione di frequenza per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 7mm/m. 122

Figura 5.94 Parete2: frequenza cumulata per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 7mm/m. 122

Figura 5.95 Parete 3: Z_{2x} (profili y=cost) ed Z_{2y} (profili x = cost). 123

Figura 5.96 Parete 3: Rpx (profili y=cost) ed Rpy (profili x = cost). 123

Figura 5.97 Parete3: distribuzione di frequenza per i parametri Z2x e Z2y per un passo di campionamento di 5mm/m. 124

Figura 5.98 Parete3: frequenza cumulata per i parametri Z2x e Z2y per un passo di campionamento di 5mm/m. 124

Figura 5.99 Parete 4: Z_{2x} (profili y=cost) ed Z_{2y} (profili x = cost). 125

Figura 5.100 Parete 4: Rpx (profili y=cost) ed Rpy (profili x = cost). 125

Figura 5.101 Parete4: distribuzione di frequenza per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 6mm/m. 126
Figura 5.102 Parete4: frequenza cumulata per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 6mm/m. 126
Figura 5.103 Parete 5: Z_{2x} (profili y=cost) ed Z_{2y} (profili x = cost). 127
Figura 5.104 Parete 5: Rpx (profili y=cost) ed Rpy (profili x = cost). 127
Figura 5.105 Parete5: distribuzione di frequenza per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 14mm/m. 128
Figura 5.106 Parete5: frequenza cumulata per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 14mm/m. 128
Figura 5.107 Pareti di versante: calcolo del parametro di scabrezza Rs al variare del passo di campionamento superficiale. 129
Figura 5.108 JRC Parete 1, 3m x 3m, lungo le direzioni x e y. 130
Figura 5.109 JRC Parete 2, 5m x 5m, lungo le direzioni x e y. 130
Figura 5.110 JRC Parete 3, 7m x 7m, lungo le direzioni x e y. 130
Figura 5.111 JRC Parete 4, 4m x 4m, lungo le direzioni x e y. 131
Figura 5.112 JRC Parete 5, 2m x 2m, lungo le direzioni x e y. 131
Figura 5.113 Parete 4: i due riquadri evidenziano i DSM usati nelle elaborazioni (superfici 4m x 4m e 2m x 2m). 132
Figura 5.114 Parete 4: 3D della superficie iniziale 4m x 4m e della superficie 2m x2m. 133
Figura 5.115 Parete 4-ridotta (2m x 2m), analisi della superficie dell'elemento: estrazione di quattro profili orizzontali. 133
Figura 5.116 Parete 4-ridotta: Z_{2x} (profili y=cost) ed Z_{2y} (profili x = cost). 133
Figura 5.117 Parete 4: Rpx (profili y=cost) ed Rpy (profili x = cost). 134

Figura 5.118 Parete4-ridotta:distribuzione di frequenza per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 13mm/m. 135
Figura 5.119 Parete4-ridotta: frequenza cumulata per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 13mm/m. 136
Figura 5.120 JRC Parete 1, 1m x 1m, lungo le direzioni x e y. 136
Figura 5.121 JRC Parete 2, 2m x 2m, lungo le direzioni x e y. 137
Figura 5.122 JRC Parete 3, 1.5m x 1.5m, lungo le direzioni x e y. 137
Figura 5.123 JRC Parete 4, 2m x 2m, lungo le direzioni x e y. 137
Figura 5.124 JRC Parete 5, 1m x 1m, lungo le direzioni x e y. 138
Figura 5.125 JRC Parete 4 nella direzione x: passando dalla sezione 4m x 4m a quella 2m x 2m, i valori di JRC si abbassano. 138
Figura 5.126 JRC Parete 4 nella direzione Y: passando dalla sezione 4m x 4m a quella 2m x 2m, i valori di JRC si abbassano. 139
Figura 5.127 Parete 4, 4mx 4m: 12 profili estratti su cui sono valutati i parametri di scabrezza per valutare l'influenza dell'ondulosità alla macroscala. 139
Figura 5.128 Profilo verticale 1, parete 4; estensione dell’asperità minima (in verde) e massima (in rosso). 140
Figura 5.129 Profilo 1, parete 4: sono stati identificati tre tratti a ondulosità macroscopica. 140
Figura 5.130 Profilo 1 verticale, sottoprofili individuati con ondulosità evidente. 141
Figura 5.131 Z2 per i 12 sottoprofili estratti dalla parete 4. 142
Figura 5.132 Polar Plot di Z_2 per le pareti di versante. 143
Figura 6.1 GI TOP: funzione di frequenza di JRCx e JRCy, confrontati con JRC stimato in laboratorio 144

Figura 6.2 G1 BOTTOM: funzione di frequenza di JRCx e JRCy, confrontati con JRC stimato in laboratorio. 144

Figura 6.3 G2 TOP: funzione di frequenza di JRCx e JRCy, confrontati con JRC stimato in laboratorio. 145

Figura 6.4 G2 BOTTOM: funzione di frequenza di JRCx e JRCy, confrontati con JRC stimato in laboratorio 145

Figura 6.5 G3 TOP: funzione di frequenza di JRCx e JRCy, confrontati con JRC stimato in laboratorio 145

Figura 6.6 G3 BOTTOM: funzione di frequenza di JRCx e JRCy, confrontati con JRC stimato in laboratorio. 146

Figura 9.1 GS1 TOP C0: DSM e ritaglio 50 mm x 50 mm. 158

Figura 9.2 GS1 BOTTOM C0: DSM e ritaglio 50 mm x 50 mm. 158

Figura 9.3 GS1 Top/Bottom: DSM dopo la rotazione sul piano orizzontale del piano che approssima la superficie. 158

Figura 9.4 GS1 Top/Bottom, analisi della superficie dell'elemento: estrazione di quattro profili orizzontali. 159

Figura 9.5 Provino G1 TOP e BOTTOM: Z_{2x} (profili y=cost) ed Z_{2y} (profili x = cost). 159

Figura 9.6 Provino G1 TOP e BOTTOM: Rpx (profili y=cost) ed Rpy (profili x = cost). 160

Figura 9.7 Provino G1 TOP: JRC stimato sui profili estratti lungo x ed y. 160

Figura 9.8 Provino G1-TOP: distribuzione di frequenza per i parametri Z_{2x} e Z_{2y}. 161

Figura 9.9 Provino G1-TOP: frequenza cumulata per i parametri Z_{2x} e Z_{2y}. 161

Figura 9.10 Provino G1 BOTTOM: JRC stimato sui profili estratti lungo x ed y. 162

Figura 9.11 Provino G1-BOTTOM: distribuzione di frequenza per i parametri Z_{2x} e Z_{2y}. 162

Figura 9.12 Provino G1-BOTTOM: frequenza cumulata per i parametri Z_{2x} e Z_{2y}. 162

Figura 9.13 G2 TOP C0: DSM e ritaglio 50 mm x 50 mm. 163

Figura 9.14 G2 BOTTOM C0: DSM e ritaglio 50 mm x 50 mm. 163

Figura 9.15 GS2 Top/Bottom: DSM dopo la rotazione del piano che approssima la superficie sul piano orizzontale. 163

Figura 9.16 GS2 Top/Bottom, analisi della superficie dell'elemento: estrazione di quattro profili orizzontali..... 164

Figura 9.17 Provino G2 TOP e BOTTOM: Z_{2x} (profili y=cost) ed Z_{2y} (profili x = cost). 164

Figura 9.18 Provino G2 TOP e BOTTOM: Rpx (profili y=cost) ed Rpy (profili x = cost). 165

Figura 9.19 Provino G2 TOP: JRC stimato sui profili estratti lungo x ed y. 165

Figura 9.20 Provino G2-TOP: distribuzione di frequenza per i parametri Z_{2x} e Z_{2y}. 166

Figura 9.21 Provino G2-TOP: frequenza cumulata per i parametri Z_{2x} e Z_{2y}. 166

Figura 9.22 Provino G2 BOTTOM: JRC stimato sui profili estratti lungo x ed y. 167

Figura 9.23 Provino G2-BOTTOM: distribuzione di frequenza per i parametri Z_{2x} e Z_{2y}. 167

Figura 9.24 Provino G2-BOTTOM: frequenza cumulata per i parametri Z_{2x} e Z_{2y}. 167

Figura 9.25 G3 TOP C0: DSM e ritaglio 50 mm x 50 mm. 168

Figura 9.26 G3 BOTTOM C0: DSM e ritaglio 50 mm x 50 mm. 168

Figura 9.27 GS3 Top/Bottom: DSM dopo la rotazione del piano che approssima la superficie sul piano orizzontale. 168

Figura 9.28 GS3 Top/Bottom, analisi della superficie dell'elemento: estrazione di quattro profili orizzontali..... 169

Figura 9.29 Provino G3 TOP e BOTTOM: Z_{2x} (profili y=cost) ed Z_{2y} (profili x = cost). 169

Figura 9.30 Provino G3 TOP e BOTTOM: Rpx (profili y=cost) ed Rpy (profili x = cost). 170

Figura 9.31 Provino G3 TOP: JRC stimato sui profili estratti lungo x ed y. 170

Figura 9.32 Provino G3-TOP: distribuzione di frequenza per i parametri Z_{2x} e Z_{2y}. 171

Figura 9.33 Provino G3-TOP: frequenza cumulata per i parametri Z_{2x} e Z_{2y}. 171

Figura 9.34 Provino G3 BOTTOM: JRC stimato sui profili estratti lungo x ed y. 172

Figura 9.35 Provino G3-BOTTOM: distribuzione di frequenza per i parametri Z_{2x} e Z_{2y}. 172

Figura 9.36 Provino G3-BOTTOM: frequenza cumulata per i parametri Z_{2x} e Z_{2y}. 172

Figura 9.37 Blocco1: DSM dopo la rotazione del piano che approssima la superficie sul piano orizzontale. 173

Figura 9.38 Blocco1, analisi della superficie dell'elemento: estrazione di quattro profili orizzontali. 173

Figura 9.39 Blocco 1: Z_{2x} (profili y=cost) ed Z_{2y} (profili x = cost). 174

Figura 9.40 Blocco 1: Rpx (profili y=cost) ed Rpy (profili x = cost). 174

Figura 9.41 Figura 5.40 Blocco 1: JRC lungo x ed y. 175

Figura 9.42 Blocco1: distribuzione di frequenza per i parametri Z_{2x} e Z_{2y}. 175

Figura 9.43 Blocco1: frequenza cumulata per i parametri Z_{2x} e Z_{2y}. 175

Figura 9.44 Blocco2: DSM dopo la rotazione del piano che approssima la superficie sul piano orizzontale. 176

Figura 9.45 45 Blocco2, analisi della superficie dell'elemento: estrazione di quattro profili orizzontali. 176

Figura 9.46 Blocco 2: Z_{2x} (profili y=cost) ed Z_{2y} (profili x = cost). 177

Figura 9.47 Blocco 2: R_{px} (profili y=cost) ed R_{py} (profili x = cost). 177

Figura 9.48 Blocco 2: JRC lungo x ed y. 178

Figura 9.49 Blocco2: distribuzione di frequenza per i parametri Z_{2x} e Z_{2y}. 178

Figura 9.50 Blocco2: frequenza cumulata per i parametri Z_{2x} e Z_{2y}. 178

Figura 9.51 Blocco3: DSM dopo la rotazione del piano che approssima la superficie sul piano orizzontale. 179

Figura 9.52 Blocco3, analisi della superficie dell'elemento: estrazione di quattro profili orizzontali. 179

Figura 9.53 Blocco 3: Z_{2x} (profili y=cost) ed Z_{2y} (profili x = cost). 180

Figura 9.54 Blocco 3: Rpx (profili y=cost) ed Rpy (profili x = cost). 180

Figura 9.55 Blocco 3: JRC lungo x ed y. 181

Figura 9.56 Blocco3: Distribuzione di frequenza per i parametri Z_{2x} e Z_{2y}. 181

Figura 9.57 Blocco3: frequenza cumulata per i parametri Z_{2x} e Z_{2y}. 181

Figura 9.58 Versante: DSM nella sua interezza e le cinque porzioni usate nel presente lavoro di tesi. Nel cerchio rosso è evidenziata la parete 1. 182

Figura 9.59 Parete1: DSM dopo la rotazione del piano che approssima la superficie sul piano orizzontale. 182

Figura 9.60 Parete1, analisi della superficie dell'elemento: estrazione di quattro profili orizzontali. 182

Figura 9.61 Parete 1: Z_{2x} (profili y=cost) ed Z_{2y} (profili x = cost). 183

Figura 9.62 Parete 1: Rpx (profili y=cost) ed Rpy (profili x = cost). 183

Figura 9.63 JRC Parete 1, 3m x 3m, lungo le direzioni x e y. 184

Figura 9.64 Parete1: Distribuzione di frequenza per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 11mm/m. 184

Figura 9.65 Parete1: Frequenza cumulata per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 11mm/m. 184

Figura 9.66 Parete1-ridotta: nuvola di punti sparsi, superficie orginale 3m x 3m e superficie ridotta 1m x 1m. 185

Figura 9.67 Parete1-ridotta: DSM dopo la rotazione del piano che approssima la superficie sul piano orizzontale. 185

Figura 9.68 Parete1-ridotta, analisi della superficie dell'elemento: estrazione di quattro profili orizzontali..... 185

Figura 9.69 Parete 1-ridotta: Z_{2x} (profili y=cost) ed Z_{2y} (profili x = cost)..... 186

Figura 9.70 Parete 1-ridotta: Rpx (profili y=cost) ed Rpy (profili x = cost). 186

Figura 9.71 JRC Parete 1-ridotta, 1m x 1m, lungo le direzioni x e y. 187

Figura 9.72 Parete1-ridotta: Distribuzione di frequenza per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 34mm/m. 187

Figura 9.73 Parete1-ridotta: Frequenza cumulata per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 34mm/m. 187

Figura 9.75 Versante: DSM nella sua interezza e le cinque porzioni usate nel presente lavoro di tesi. Nel cerchio rosso è evidenziata la parete 2. 188

Figura 9.76 Parete2: DSM dopo la rotazione del piano che approssima la superficie sul piano orizzontale. 188

Figura 9.77 Parete2, analisi della superficie dell'elemento: estrazione di quattro profili orizzontali. 188

Figura 9.77 Parete 2: Z_{2x} (profili y=cost) ed Z_{2y} (profili x = cost). 189

Figura 9.78 Parete 2: Rpx (profili y=cost) ed Rpy (profili x = cost). 189

Figura 9.79 JRC Parete 2, 5m x 5m, lungo le direzioni x e y. 190

Figura 9.80 Parete 2: distribuzione di frequenza per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 7mm/m,. 190

Figura 9.81 Parete2: frequenza cumulata per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 7mm/m. 190

Figura 9.83 Parete2-ridotta: nuvola di punti sparsi, superficie orginale 5m x m e superficie ridotta 2m x 2m. 191

Figura 9.84 Parete2-ridotta: DSM dopo la rotazione del piano che approssima la superficie sul piano orizzontale. 191

Figura 9.85 Parete2-ridotta, analisi della superficie dell'elemento: estrazione di quattro profili orizzontali..... 191

Figura 9.85 Parete 2-ridotta: Z_{2x} (profili y=cost) ed Z_{2y} (profili x = cost)..... 192

Figura 9.86 Parete 2-ridotta: Rpx (profili y=cost) ed Rpy (profili x = cost). 192

Figura 9.87 JRC Parete 2-ridotta, 2m x 2m, lungo le direzioni x e y. 193

Figura 9.88 Parete2-ridotta: distribuzione di frequenza per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 21mm/m. 193

Figura 9.89 Parete2-ridotta: frequenza cumulata per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 21mm/m. 193

Figura 9.90 Versante: DSM nella sua interezza e le cinque porzioni usate nel presente lavoro di tesi. Nel cerchio rosso è evidenziata la parete 3. 194

Figura 9.91 Parete3: DSM dopo la rotazione del piano che approssima la superficie sul piano orizzontale. 194

Figura 9.92 Parete3, analisi della superficie dell'elemento: estrazione di quattro profili orizzontali. 194

Figura 9.93 Parete 3: Z_{2x} (profili y=cost) ed Z_{2y} (profili x = cost). 195

Figura 9.94 Parete 3: Rpx (profili y=cost) ed Rpy (profili x = cost). 195

Figura 9.95 JRC Parete 3, 7m x 7m, lungo le direzioni x e y. 196

Figura 9.96 Parete3: distribuzione di frequenza per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 5mm/m. 196

Figura 9.97 Parete3: frequenza cumulata per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 5mm/m. 196

Figura 9.98 Parete3-ridotta: nuvola di punti sparsi, superficie orginale 7m x 7m e superficie ridotta 1.5m x 1.5m. 197

Figura 9.99 Parete3-ridotta: DSM dopo la rotazione del piano che approssima la superficie sul piano orizzontale. 197

Figura 9.100 Parete3-ridotta, analisi della superficie dell'elemento: estrazione di quattro profili orizzontali. 197

Figura 9.101 Parete 3-ridotta: Z_{2x} (profili y=cost) ed Z_{2y} (profili x = cost). 198

Figura 9.102 Parete 3-ridotta: Rpx (profili y=cost) ed Rpy (profili x = cost). 198

Figura 9.103 JRC Parete 3-ridotta, 1,5m x 1,5m, lungo le direzioni x e y. 199

Figura 9.104 Parete3-ridotta: distribuzione di frequenza per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 26mm/m. 199

Figura 9.105 Parete3-ridotta: frequenza cumulata per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 26mm/m. 199

Figura 9.106 Versante: DSM nella sua interezza e le cinque porzioni usate nel presente lavoro di tesi. Nel cerchio rosso è evidenziata la parete 4. 200

Figura 9.107 Parete4: DSM dopo la rotazione del piano che approssima la superficie sul piano orizzontale. 200

Figura 9.108 Parete4, analisi della superficie dell'elemento: estrazione di quattro profili orizzontali. 200

Figura 9.109 Parete 4: Z_{2x} (profili y=cost) ed Z_{2y} (profili x = cost). 201

Figura 9.110 Parete 4: Rpx (profili y=cost) ed Rpy (profili x = cost). 201

Figura 9.111 JRC Parete 4, 4m x 4m, lungo le direzioni x e y. 202

Figura 9.112 Parete4: distribuzione di frequenza per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 6mm/m 202

Figura 9.113 Parete4: frequenza cumulata per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 6mm/m. 202

Figura 9.114 Parete4-ridotta: nuvola di punti sparsi, superficie orginale 4m x 4m e superficie ridotta 2m x 2m. 203

Figura 9.115 Parete4-ridotta: DSM dopo la rotazione del piano che approssima la superficie sul piano orizzontale. 203

Figura 9.116 Parete4-ridotta, analisi della superficie dell'elemento: estrazione di quattro profili orizzontali. 203

Figura 9.117 Parete 4-ridotta: Z_{2x} (profili y=cost) ed Z_{2y} (profili x = cost). 204

Figura 9.118 Parete 4-ridotta: Rpx (profili y=cost) ed Rpy (profili x = cost). 204

Figura 9.119 JRC Parete 4-ridotta, 2m x 2m, lungo le direzioni x e y. 205

Figura 9.120 Parete4-ridotta:distribuzione di frequenza per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 13mm/m. 205

Figura 9.121 Parete4-ridotta: frequenza cumulata per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 13mm/m. 205

Figura 9.122 Versante: DSM nella sua interezza e le cinque porzioni usate nel presente lavoro di tesi. Nel cerchio rosso è evidenziata la parete 5. 206

Figura 9.123 Parete5: DSM dopo la rotazione del piano che approssima la superficie sul piano orizzontale. 206

Figura 9.124 Parete5, analisi della superficie dell'elemento: estrazione di quattro profili orizzontali. 206

Figura 9.125 Parete 5: Z_{2x} (profili y=cost) ed Z_{2y} (profili x = cost). 207

Figura 9.126 Parete 5: Rpx (profili y=cost) ed Rpy (profili x = cost). 207

Figura 9.127 JRC Parete 5, 2m x 2m, lungo le direzioni x e y. 208

Figura 9.128 Parete5: distribuzione di frequenza per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 14mm/m. 208
Figura 9.129 Parete5: frequenza cumulata per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 14mm/m. 208
Figura 9.130 Parete5-ridotta: nuvola di punti sparsi, superficie orginale 2m x 2m e superficie ridotta 1m x 1m. 209
Figura 9.131 Parete5-ridotta: DSM dopo la rotazione del piano che approssima la superficie sul piano orizzontale. 209
Figura 9.132 Parete5-ridotta, analisi della superficie dell'elemento: estrazione di quattro profili orizzontali. 209
Figura 9.133 Parete 5-ridotta: Z_{2x} (profili y=cost) ed Z_{2y} (profili x = cost). 210
Figura 9.134 Parete 5-ridotta: Rpx (profili y=cost) ed Rpy (profili x = cost). 210
Figura 9.135 JRC Parete 5-ridotta, 1m x 1m, lungo le direzioni x e y. 211
Figura 9.136 Parete5-ridotta: distribuzione di frequenza per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 29mm/m. 211
Figura 9.137 Parete5-ridotta: frequenza cumulata per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 29mm/m. 211

Indice delle tabelle

Tabella 2.1 Panoramica dello stato dell'arte sugli studi che analizzano l'effetto scala della scabrezza dei giunti attraverso la misura e l'analisi della superficie della discontinuità 26
Tabella 3.1 Formule di letteratura, correlanti JRC con R_p. 31
Tabella 3.2 Formule di letteratura, correlanti JRC con Z_2. 34

Tabella 3.3 Formule di letteratura, correlanti JRC con SF. 35

Tabella 3.4 Equazioni di letteratura per il calcolo di JRC a partire da D. Note - R: coefficiente di correlazione; SI: intervallo di campionamento; JRC0: valore stimato per una superficie piana; D range: range applicabile del parametro indipendente; Profili st.: i 10 profili standard. 37

Tabella 4.1 Campionamento effettuato sui tre blocchi per valutare l'influenza della risoluzione sulla scabrezza. 56

Tabella 4.2 Campionamento effettuato sui tre campioni per valutare l'influenza della risoluzione sulla scabrezza. 56

Tabella 4.3 Campionamento effettuato sulle porzioni di versante per valutare l'influenza della risoluzione sulla scabrezza. 56

Tabella 5.1 Valutazione del tempo di ritorno per l'altezza di pioggia registrata per il periodo Dicembre 2013-Febbraio 2014. 63

Tabella 5.2 JCS ottenuti mediante sclerometro sui 3 blocchi, con indicazione delle direzioni di prova (Ferrero & Montepara, 2015). 64

Tabella 5.3 Riepilogo delle misurazioni e dei valori di resistenza ottenuti tramite Point Load Test (Ferrero & Montepara, 2015). 64

Tabella 5.4 Intervalli di qualità usati per la classificazione delle rocce (ISRM, 1978). Sottolineati in grassetto gli intervalli e le relative classi in cui può essere inserita la roccia (Ferrero & Montepara, 2015). 65

Tabella 5.5 GS1, GS2, GS3: resistenza di picco e residuo stimata in seguito alle prove di taglio diretto. 67

Tabella 5.6 Valori di resistenza residua (τresiduo) relativi al quinto ciclo. 68

Tabella 5.7 Valori di resistenza residua (τresiduo) e di picco (τpicco) relativi al primo ciclo. 68

Tabella 5.8 Valori di resistenza di picco ottenuti 69

Tabella 5.9 Numero e spaziatura dei profili estratti con SURFER per i tre blocchi. 77

Tabella 5.10 Valori di Z2 e Rp valutati per il primo profilo verticale nei tre blocchi, alle diverse risoluzioni. 82

Tabella 5.11 Blocco 1: riepilogo dello studio statistico dei parametri di scabrezza Z_2 ed Rp per i diversi intervalli di campionamento. 83

Tabella 5.12 Blocco 2: riepilogo dello studio statistico dei parametri di scabrezza Z_2 ed Rp per i diversi intervalli di campionamento. 85

Tabella 5.13 Blocco 3: riepilogo dello studio statistico dei parametri di scabrezza Z2 ed Rp per i diversi intervalli di campionamento. 87

Tabella 5.14 Valori di Z2 e Rp valutati per i tre blocchi, per i diversi intervalli di campionamento. 89

Tabella 5.15 Blocchi, rapporto di anisotropia. 92

Tabella 5.16 Numero e spaziatura dei profili estratti con SURFER per i provini. 96

Tabella 5.17 Provino G1 TOP: riepilogo dello studio statistico dei parametri di scabrezza Z2 ed Rp per i diversi intervalli di campionamento. 100

Tabella 5.18 Provino G1 BOTTOM: riepilogo dello studio statistico dei parametri di scabrezza Z_2 ed R_p per i diversi intervalli di campionamento. 101

Tabella 5.19 Provino G2 TOP: riepilogo dello studio statistico dei parametri di scabrezza Z_2 ed Rp per i diversi intervalli di campionamento. 103

Tabella 5.20 Provino G2 BOTTOM: riepilogo dello studio statistico dei parametri di scabrezza Z_2 ed Rp per i diversi intervalli di campionamento. 104

Tabella 5.21 Provino G3 TOP: riepilogo dello studio statistico dei parametri di scabrezza Z_2 ed Rp per i diversi intervalli di campionamento. 106

Tabella 5.22 Provino G3 BOTTOM: riepilogo dello studio statistico dei parametri di scabrezza Z_2 ed Rp per i diversi intervalli di campionamento. 107

Tabella 5.23 Provino G1 TOP: JRC stimato sui profili estratti lungo x ed y..... 110

Tabella 5.24 Provino G1 BOTTOM: JRC stimato sui profili estratti lungo x ed y. 110

Tabella 5.25 Provino G2 TOP: JRC stimato sui profili estratti lungo x ed y..... 110

Tabella 5.26 Provino G2 BOTTOM: JRC stimato sui profili estratti lungo x ed y. 111

Tabella 5.27 Provino G3 TOP: JRC stimato sui profili estratti lungo x ed y..... 111

Tabella 5.28 Provino G3 BOTTOM: JRC stimato sui profili estratti lungo x ed y. 111

Tabella 5.29 Provini, rapporto di anisotropia. 113

Tabella 5.30 Identificativo dei versanti e spaziatura dei profili estratti con SURFER per la parete. . 116

Tabella 5.31 Parete 1: riepilogo dello studio statistico dei parametri di scabrezza Z_2 ed R_p per i diversi intervalli di campionamento. 119

Tabella 5.32 Parete 2: riepilogo dello studio statistico dei parametri di scabrezza Z_2 ed Rp per i diversi intervalli di campionamento 121

Tabella 5.33 Parete 3 riepilogo dello studio statistico dei parametri di scabrezza Z_2 ed Rp per i diversi intervalli di campionamento. 123

Tabella 5.34 Parete 4: riepilogo dello studio statistico dei parametri di scabrezza Z_2 ed R_p per i diversi intervalli di campionamento. 125

Tabella 5.35 Parete 5: riepilogo dello studio statistico dei parametri di scabrezza Z_2 ed Rp per i diversi intervalli di campionamento. 127

Tabella 5.36 Parete 4 ridotta (2m x 2m): riepilogo dello studio statistico dei parametri di scabrezza Z_2 ed Rp per i diversi intervalli di campionamento. 134

Tabella 5.37 Errore percentuale che si commette considerando l'intervallo di campionamento immediatamente superiore a quello minimo, per tutte le pareti di versante. 135

Tabella 5.38 Sezioni di versante, rapporto di anisotropia. 143

Tabella 7.1 Riepilogo dei risultati ottenuti su tutti gli elementi oggetto di studio. 1

Tabella 9.1 Provino G1 TOP: riepilogo dello studio statistico dei parametri di scabrezza Z_2 ed Rp per i diversi intervalli di campionamento. 160
Tabella 9.2 Provino G1 BOTTOM: riepilogo dello studio statistico dei parametri di scabrezza Z_2 ed Rp per i diversi intervalli di campionamento. 161
Tabella 9.3 Provino G2 TOP: riepilogo dello studio statistico dei parametri di scabrezza Z_2 ed Rp per i diversi intervalli di campionamento. 165
Tabella 9.4 Provino G2 BOTTOM: riepilogo dello studio statistico dei parametri di scabrezza Z_2 ed Rp per i diversi intervalli di campionamento. 166
Tabella 9.5 Provino G3 TOP: riepilogo dello studio statistico dei parametri di scabrezza Z_2 ed Rp per i diversi intervalli di campionamento. 170
Tabella 9.6 Provino G3 BOTTOM: riepilogo dello studio statistico dei parametri di scabrezza Z_2 ed Rp per i diversi intervalli di campionamento. 171
Tabella 9.7 Blocco 1: riepilogo dello studio statistico dei parametri di scabrezza Z_2 ed Rp per i diversi intervalli di campionamento. 174
Tabella 9.8 Blocco 2: riepilogo dello studio statistico dei parametri di scabrezza Z_2 ed Rp per i diversi intervalli di campionamento. 177
Tabella 9.9 Blocco 3: riepilogo dello studio statistico dei parametri di scabrezza Z_2 ed Rp per i diversi intervalli di campionamento. 180
Tabella 9.10 Parete 1: riepilogo dello studio statistico dei parametri di scabrezza Z_2 ed R_p per i diversi intervalli di campionamento. 183
Tabella 9.11 Parete 1-ridotta: riepilogo dello studio statistico dei parametri di scabrezza Z_2 ed Rp per i diversi intervalli di campionamento. 186
Tabella 9.12 Parete 2: riepilogo dello studio statistico dei parametri di scabrezza Z_2 ed Rp per i diversi intervalli di campionamento. 189

Tabella 9.13 Parete 2: riepilogo dello studio statistico dei parametri di scabrezza Z_2 ed Rp per i diversi intervalli di campionamento. 192
Tabella 9.14 Parete 3 riepilogo dello studio statistico dei parametri di scabrezza Z_2 ed Rp per i diversi intervalli di campionamento. 195
Tabella 9.15 Parete 3-ridotta: riepilogo dello studio statistico dei parametri di scabrezza Z_2 ed Rp per i diversi intervalli di campionamento. 198
Tabella 9.16 Parete 4: riepilogo dello studio statistico dei parametri di scabrezza Z_2 ed R_p per i diversi intervalli di campionamento. 201
Tabella 9.17 Parete 4-ridotta: riepilogo dello studio statistico dei parametri di scabrezza Z_2 ed Rp per i diversi intervalli di campionamento. 204
Tabella 9.18 Parete 5: riepilogo dello studio statistico dei parametri di scabrezza Z_2 ed Rp per i diversi intervalli di campionamento. 207
Tabella 9.19 Parete 5: riepilogo dello studio statistico dei parametri di scabrezza Z_2 ed Rp per i diversi intervalli di campionamento. 210

1. Introduzione

Il dissesto idrogeologico è un tema di grande rilievo ed attualità in Italia a causa del forte impatto sulla popolazione, sulle infrastrutture, sui sistemi di comunicazione ed in generale sul sistema economico e produttivo. Dagli anni cinquanta in poi, la nazione è stata al centro di un'importante urbanizzazione in assenza di una vera e propria pianificazione territoriale, causando un consistente aumento dei soggetti esposti a frane ed alluvioni. Da qui, la necessità crescente di enti territoriali e protezione civile di ottenere documenti affidabili sulla valutazione di possibili fenomeni franosi, distacco di blocchi, transito ed invasione di territori di competenza.

L' Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale – ISPRA – ha fornito nel *Rapporto sul dissesto idrogeologico in Italia* (Trigila et al, 2018) i dati dettagliati sul fenomeno di dissesto idrogeologico sul territorio in termini di distribuzione e di pericolosità. In particolare l'edizione 2018 fornisce il quadro di riferimento aggiornato sulla pericolosità da frana, idraulica e sugli indicatori di rischio relativi a popolazione, famiglie, edifici, imprese e beni culturali per l'intero territorio italiano. I principali dati forniti:

- 7.275 comuni (91% del totale) sono a rischio per frane e/o alluvioni;
- il 16,6% del territorio nazionale è classificato a maggiore pericolosità;
- 1,28 milioni di abitanti sono a rischio frane e oltre 6 milioni di abitanti a rischio alluvioni.

Il 75% del territorio nazionale è montano-collinare, questa particolare conformazione topografica rende dunque i fenomeni franosi estremamente diffusi in Italia. Le frane censite nell'Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia (IFFI, Arpa Piemonte, 2004) sono 620.808 e sono relative ad un'area di 23.700 km^2, circa il 7,9% del territorio nazionale.

L'indicatore pubblicato nell'Annuario dei Dati Ambientali ISPRA[1], fornisce informazioni sui danni causati dagli **eventi franosi principali** verificatisi ogni anno sul territorio nazionale. Si definiscono eventi franosi principali (Figura 1.1) quelli che hanno causato morti, feriti, evacuati e danni a edifici, beni culturali e infrastrutture di comunicazione primarie e infrastrutture/reti di servizi.

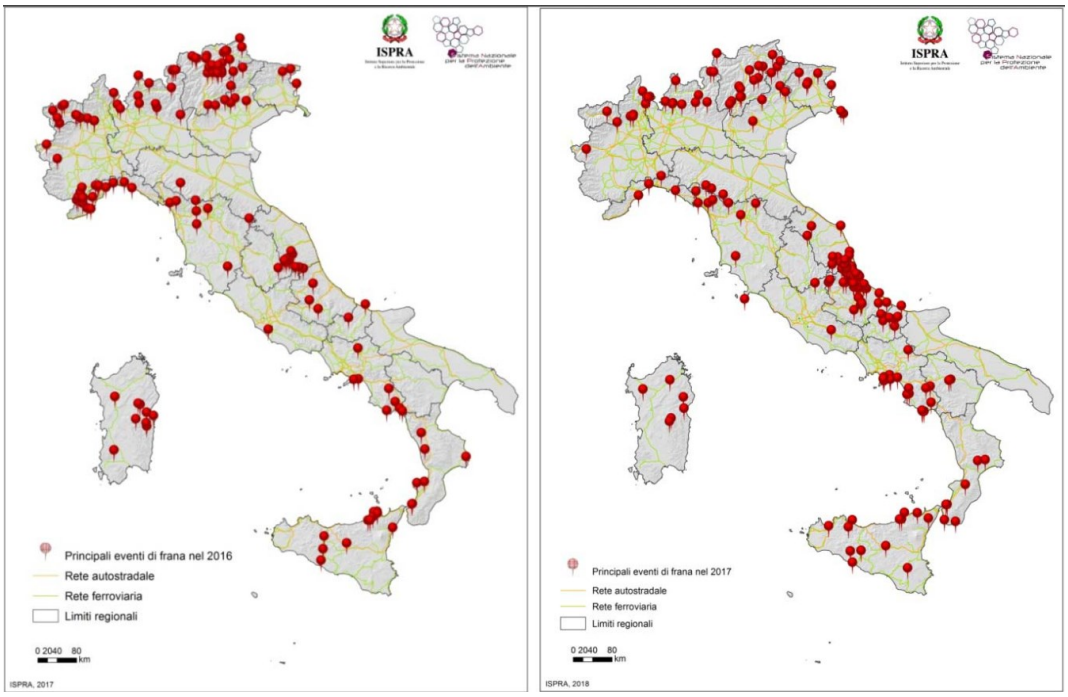


Figura 1.1 a) Eventi franosi principali nel 2016; b) Eventi franosi principali nel 2017 (ISPRA, 2018).

Circa il 28% delle frane italiane sono fenomeni a **cinematismo rapido** (crolli, colate rapide di fango e detrito), cioè caratterizzati da velocità elevate, fino ad alcuni metri al secondo, e da elevata distruttività, frequentemente associati a gravi conseguenze in termini di vite umane. Si evince l'importanza dell'archiviazione delle informazioni relative ai fenomeni franosi: l'Inventario IFFI è uno strumento conoscitivo necessario per la valutazione della pericolosità da

[1] http://annuario.isprambiente.it/

frana dei Piani di Assetto Idrogeologico (PAI), la progettazione preliminare di interventi di difesa del suolo e di reti infrastrutturali e la redazione dei Piani di Emergenza di Protezione Civile.

In particolare in questa tesi si pone l'attenzione sui fenomeni di **crollo da pareti rocciose**, comunemente diffusi in tutte le regioni di montagna e lungo le falesie costiere. Dei circa 34.000 fenomeni franosi censiti in Piemonte all'interno dell'inventario IFFI, il 20,9% risulta essere costituito da crolli singoli o da aree soggette a crolli e ribaltamenti diffusi (Figura 1.2).

Figura 1.2 Bolzano, gennaio 2014: diversi massi di centinaia di metri cubi abbattono parte di un casolare, fermandosi ad un paio di metri dalla zona abitata (copyright foto: reppubblica.it)

I crolli in roccia comportano il distacco di blocchi rocciosi di dimensioni variabili formatisi all'interno dell'ammasso roccioso a causa della presenza di **discontinuità**: le giaciture di queste discontinuità definiscono cioè dei volumi all'interno dell'ammasso roccioso che possono essere soggetti a fenomeni di instabilità all'occorrere di determinate condizioni. I fattori che regolano

l'innesco di questi fenomeni sono molteplici e variegati. Le cause che possono portare all'instabilità di un versante possono essere distinte in:

- *Cause predisponenti*: fattori intrinseci di instabilità legati alle caratteristiche del pendio, quali la geomorfologia, l'idrogeologia, la litologia, la giaciutura degli strati ed il loro stato di alterazione, i volumi di materiale predisposti al movimento franoso e le forme assunte dai blocchi a causa delle famiglie di discontinuità presenti. Inoltre negli ultimi decenni il fattore antropico ha acquisito uno dei ruoli principali tra le cause predisponenti: la realizzazione di strade, scavi, sovraccarichi dovuti ad edifici o rilevati, incrementano la percentuale di rischio;
    - *Cause scatenanti*: innescano di fatto il movimento franoso in seguito alla combinazione di più fattori, quali precipitazioni intense e prolungate, terremoti.

Le superfici di discontinuità che si rilevano in maniera sistematica all'interno di un ammasso roccioso sono classificate in famiglie. Ogni famiglia è identificata oltre che dalla propria giacitura, da caratteristiche relativamente omogenee: esse ne definiscono le proprietà, il comportamento resistente, deformabile ed idraulico. In particolare, per studiare i fenomeni di instabilità dei versanti in roccia è necessario stimare la resistenza al taglio che si mobilita sulle superfici di discontinuità. La resistenza al taglio della discontinuità è funzione a sua volta del parametro di scabrezza o rugosità superficiale.

Poiché la rugosità superficiale del giunto influenza sia il comportamento meccanico che idraulico dell'ammasso roccioso, numerosi ricercatori hanno tentato di stabilire un metodo adeguato ed accurato per caratterizzarla e correlarla alle proprietà idromeccaniche dell'ammasso. Diversi i parametri proposti, tra i quali il più ampiamente utilizzato nella pratica ingegneristica è il JRC – joint roughness coefficient - proposto da Barton & Choubey (1977). Il

suo valore varia nell'intervallo da 20 (giunto scabro) a 0 (giunto liscio) e può essere stimato direttamente con il pettine di Barton o in back analisys. Molti ricercatori hanno anche studiato l'applicabilità di vari parametri statistici convenzionali per il calcolo del JRC. Tse e Cruden (1979) hanno scoperto che due parametri statistici, Z_2 (la pendenza delle asperità) e SF (funzione di struttura) sono fortemente correlati con i valori di JRC. Il primo punto che si vuole evidenziare è come il parametro JRC non sia una misura della geometria del profilo del giunto, ma più propriamente un parametro empirico specificamente funzionale al criterio di resistenza al taglio di Barton e Bandis per i giunti. Pertanto in questa tesi, si sceglie di fare riferimento al valore di Z_2 come misura oggettiva della scabrezza e solo in un secondo momento si stima lo JRC tramite diverse formulazioni di letteratura.

E' inoltre ormai noto che lo JRC varia non solo da frattura a frattura, ma anche con la **scala**. Pertanto, la rugosità superficiale dei giunti in roccia deve essere caratterizzata utilizzando un parametro invariante con essa. Si evidenzia come secondo punto come uno dei problemi più importanti ed irrisolti nella meccanica delle rocce sia la caratterizzazione accurata della rugosità superficiale dei giunti su **scala pertinente**. Le proprietà idromeccaniche degli ammassi rocciosi dipendono infatti sia dalle proprietà meccaniche e idrauliche della discontinuità che dalla scala d'indagine. Pertanto, la descrizione accurata dei parametri morfologici di superficie alla grande scala è un argomento di fondamentale importanza per la corretta caratterizzazione dell'ammasso roccioso.

Si rimarca come la scabrezza sia descritta alla grande ed alla piccola scala da diversi parametri, rispettivamente: **ondulosità** ed **asperità**. Non esiste però una soglia di demarcazione definita tra i due e molti metodi di valutazione sono condotti su piccole aree di discontinuità (aree < 1 m^2), trascurando di fatto il comportamento alla grande scala. Inoltre spesso questi

stessi metodi usano profili 2D piuttosto che superfici 3D, portando ad una valutazione parziale della rugosità. Queste limitazione hanno portato a risultati spesso contraddittori nella descrizione degli effetti di scala. Pertanto si è studiata in questa tesi l'influenza della scala del campione sulla rugosità. Ciò è stato possibile attraverso la digitalizzazione di elementi a diverse scale:

- in sito, di una parete rocciosa da cui si sono avuti distacchi di blocchi;
- in sito, di blocchi di materiale instabilizzati;
- in laboratorio su provini ottenuti dal materiale instabilizzato, valutando l'influenza della risoluzione di misura considerando lo stesso campione a diverse risoluzioni.

E' importante notare che la nota diminuzione della resistenza al taglio con l'aumento della scala del problema (Barton e Bandis e seguenti) non è messa in dubbio; piuttosto si cerca una spiegazione sul ruolo della rugosità in questo fenomeno.

2. Meccanismi di instabilità in ammassi rocciosi

I **crolli in roccia** sono fenomeni franosi che comportano il distacco di blocchi o frammenti rocciosi da pendii, falesie o fronti di scavo, di grandezza variabile da alcuni decimetri a diverse centinaia di metri cubi ed il loro successivo movimento lungo il versante fino all'arresto. Le frane di crollo in roccia rappresentano dei fenomeni di dissesto piuttosto gravosi da un punto di vista tecnico, sia per la loro diffusione in diversi ambiti geografici e geomorfologici (scarpate montane, rilievi collinari, falesie costiere, ecc.) che per la complessità della loro analisi che può riguardare aspetti molto diversi, dalla valutazione dell'equilibrio geostatico dei blocchi alla previsione delle traiettorie di propagazione dei massi.

Negli ammassi rocciosi, i fenomeni di instabilità più frequenti ed estesi sono: gli scivolamenti planari, le rotture a cuneo ed i ribaltamenti.

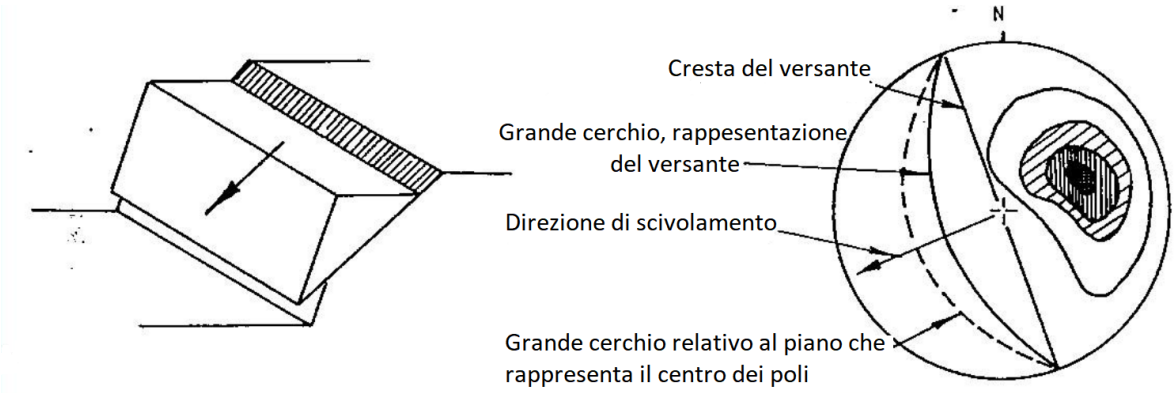


Figura 2.1 Meccanismo di instabilità planare dei versanti in roccia (Hoek & Bray, 1981).

Nello **scivolamento planare** (Figura 2.1) gli spostamenti si manifestano lungo una singola superficie approssimabile ad un piano. Discontinuità laterali aggiuntive possono definire l'ampiezza della frattura planare, ma sono da considerarsi superfici di rilascio, che non contribuiscono alla stabilità dell'ammasso. Le quattro condizioni strutturali necessarie affinché si verifichi questo tipo di instabilità possono essere così riepilogate:

1. la direzione d'immersione della discontinuità planare deve essere inclusa in un intervallo di ± 20° rispetto alla direzione d'immersione del fronte;
2. l'inclinazione della discontinuità planare deve essere minore di quella del fronte;
3. l'inclinazione della discontinuità planare deve essere maggiore dell'angolo di attrito dell'ammasso roccioso;
4. l'estensione laterale della potenziale massa instabile deve essere definita da superfici laterali di rilascio che non influenzano la stabilità della massa.

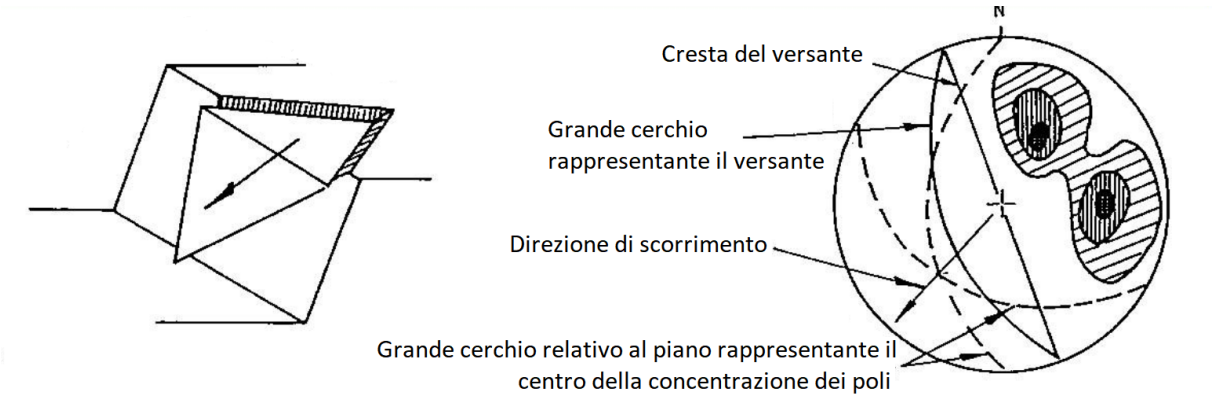


Figura 2.2 Meccanismo di instabilità a cuneo dei versanti in roccia (Hoek & Bray, 1981).

Lo **scivolamento di cunei** (Figura 2.2) si riferisce ad un volume di roccia instabile che scivola lungo due discontinuità intersecanti, entrambe immergenti fuori dal fronte ad un angolo obliquo rispetto allo stesso. Le condizioni strutturali necessarie affinché si verifichi lo scivolamento a cuneo sono le seguenti:

1. la retta d'intersezione deve avere una direzione d'immersione che approssimi quella del fronte;
2. l'inclinazione della retta d'intersezione deve essere minore dell'inclinazione del fronte;
3. l'inclinazione della retta d'intersezione deve essere maggiore dell'angolo di attrito dell'ammasso roccioso.

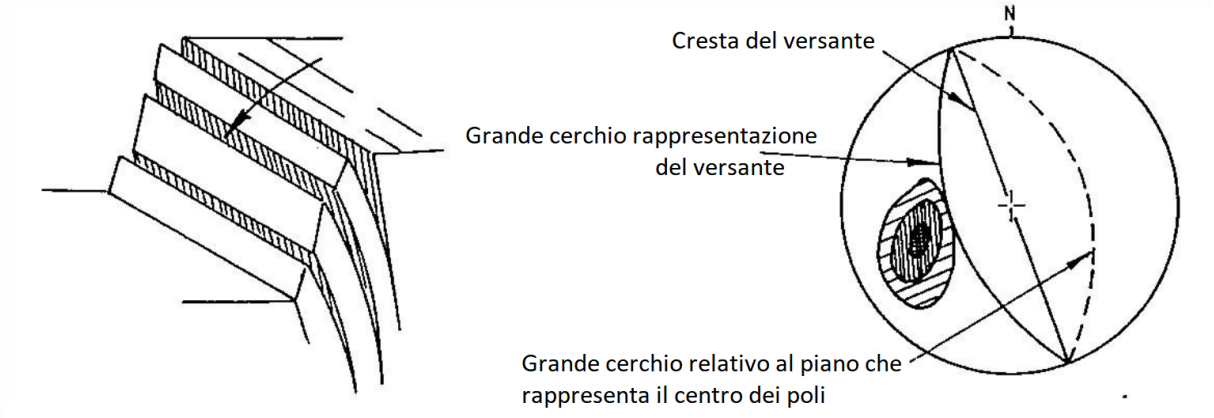


Figura 2.3 Meccanismo di instabilità per ribaltamento dei versanti in roccia (Hoek & Bray, 1981).

Il **ribaltamento** (Figura 2.3) si manifesta in ammassi rocciosi frammentati da famiglie di discontinuità approssimativamente parallele al fronte e che immergono inclinate nel versante stesso. In questo tipo di instabilità, i blocchi o le colonne ruotano sostanzialmente intorno ad un punto fisso ed un eventuale scivolamento tra gli stessi blocchi. Si può infatti distinguere ribaltamento puro e ribaltamento con scivolamento. La differenza tra i due tipi è data dalla presenza, alla base dei blocchi, di piani con inclinazione minore o maggiore dell'angolo di attrito: nel secondo caso si associa al ribaltamento una componente di scivolamento. Affinché il movimento si inneschi, la proiezione verticale del centro di massa del blocco deve cadere all'esterno della sua base d'appoggio. Le condizioni strutturali necessarie per il ribaltamento sono:

1. la direzione d'immersione dei blocchi o colonne deve essere approssimativamente parallela a quella del fronte (orientativamente in un intervallo di ± 20°);
2. i blocchi e le colonne, dati dall'intersezione di due famiglie di discontinuità, devono immergere nel fronte;
3. presenza di famiglie di discontinuità che definiscono la base dei blocchi potenzialmente instabili.

Le condizioni necessarie elencate per i tre meccanismi sono essenzialmente di tipo geometrico. In realtà, un'analisi completa dei possibili cinematismi innescabili su un fronte roccioso, prevede l'analisi di parametri dinamici come la pressione dell'acqua eventualmente presente nei giunti ed in generale l'aspetto idrogeologico, che giocano un ruolo importante nella predisposizione all'instabilità e nell'innesco della stessa. Nondimeno, l'analisi meccanica delle condizioni di stabilità dei pendii in roccia presenta limiti importati, connessi soprattutto al grado di incertezza con cui si possono determinare alcuni parametri fondamentali, quali la resistenza al taglio e le pressioni dell'acqua all'interno dei giunti.

Il distacco dei blocchi è profondamente influenzato dalle condizioni strutturali dell'ammasso (famiglie di discontinuità, persistenza, spaziatura), dalla geometria (giacitura e orientazione delle discontinuità rispetto al versante), dalle caratteristiche meccaniche (resistenza a taglio delle discontinuità, resistenza a trazione di eventuali ponti di roccia) e da eventuali sollecitazioni esterne (già citata la presenza di acqua in pressione, terremoti, ecc.).

Al fine di previsione e prevenzione dei fenomeni di instabilità in roccia, è necessario descrivere accuratamente non solo la struttura intrinseca dell'ammasso roccioso, cioè la matrice rocciosa, ma anche le discontinuità ivi presenti. I rilievi geomeccanici vengono effettuati secondo le indicazioni dell'I.S.M.R., considerate universalmente come linee guida per la caratterizzazione delle discontinuità. Essi prevedono l'acquisizione sistematica di alcuni parametri che si possono dividere in due categorie: geometrici e meccanici. A partire dai dati raccolti con il rilievo geomeccanico, si può classificare l'ammasso roccioso.

2.1. Parametri geometrici

Di seguito vengono riportati i parametri geometrici necessari per la caratterizzazione geomeccanica di un ammasso roccioso secondo le raccomandazioni I.S.R.M. (1978, 1985, 1993):

- Orientazione: cioè la giacitura della discontinuità, è definita dall'inclinazione o *dip* (l'angolo definito tra la retta di massima pendenza del fronte e la sua proiezione sull'orizzontale) e dall'immersione o *dip direction* (l'angolo definito in senso orario tra l'orizzontale proiettata ed il nord);
- Spaziatura: distanza dei giunti dall'inizio dello stendimento, utile nella determinazione delle dimensioni dei blocchi;
- Persistenza dei giunti: rappresenta l'estensione della discontinuità all'interno dell'ammasso roccioso;
- Apertura: distanza tra i lembi affacciati di una discontinuità in cui lo spazio interposto è riempito di aria o acqua;
- Riempimento: materiale che separa le pareti adiacenti di una discontinuità;
- Condizioni di umidità: presenza d'acqua nelle singole discontinuità o nell'ammasso roccioso nel suo insieme;
- Irregolarità delle discontinuità (forma e scabrezza del giunto): la rugosità delle pareti delle discontinuità è una caratteristica necessaria per la valutazione delle resistenze disponibili lungo la discontinuità stessa (Barton and Choubey, 1977). In genere, essa è caratterizzata da *ondulazione* a grande scala, relativamente al piano medio delle discontinuità, e da *rugosità* (o irregolarità della superficie) a piccola scala. L'ondulazione alla grande scala è difficilmente apprezzabile in affioramento (a meno di manifestazioni macroscopiche), le

sue osservazioni sono soprattutto di tipo qualitativo (superfici piane, ondulate, segmentate). La rugosità alla piccola scala può essere valutata qualitativamente come rugosa, liscia o levigata, mentre la sua valutazione quantitativa è legata alla stima del parametro *JRC* Joint Roughness Coefficient.

2.2. Parametri meccanici e criteri di resistenza

Come si è sottolineato, notevole importanza è rivestita dalla conoscenza delle caratteristiche di resistenza al taglio delle discontinuità naturali nei problemi di stabilità degli ammassi rocciosi.

Per caratterizzare in laboratorio il comportamento di una discontinuità in roccia, si effettuano delle prove di taglio diretto nella scatola di Hoek (Figura 2.4): la prova prevede inizialmente l'applicazione di un carico assiale di compressione, in seguito si incrementano gradualmente gli sforzi di taglio fino al raggiungimento delle condizioni residue ed infine si misurano gli spostamenti assiali e tangenziali tra le due parti del campione. La prova si ripete per diversi valori del carico assiale.

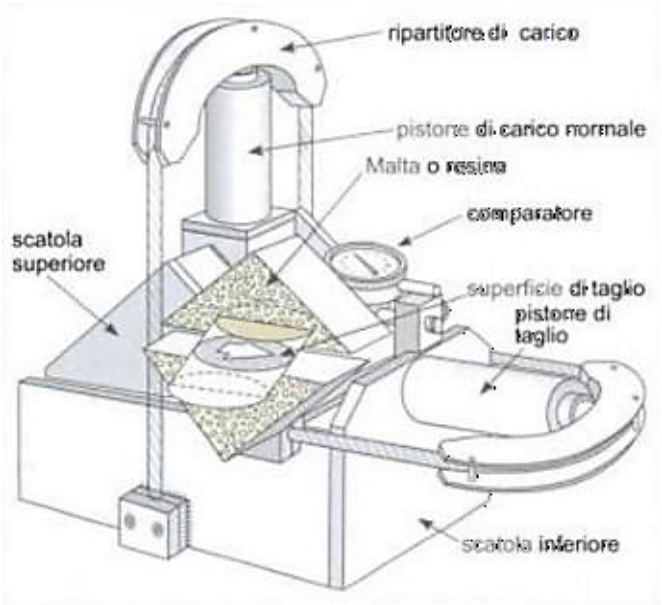


Figura 2.4 Schema della scatola di taglio di Hoek.

La prova restituisce indicazioni sul comportamento alle condizioni di picco e residue del giunto, (Figura 2.5.a). La presenza delle asperità causa inoltre il fenomeno della dilatanza (Figura 2.5.b), ovvero la presenza di uno spostamento verticale, ortogonale alla forza di taglio, provocato dallo scavalcamento delle asperità stesse, che porta ad un'apertura del giunto. Uno sforzo assiale di prova maggiore limita la dilatanza, aumentando la resistenza al taglio fino ad un limite massimo funzione del tipo di materiale, per cui le asperità si rompono.

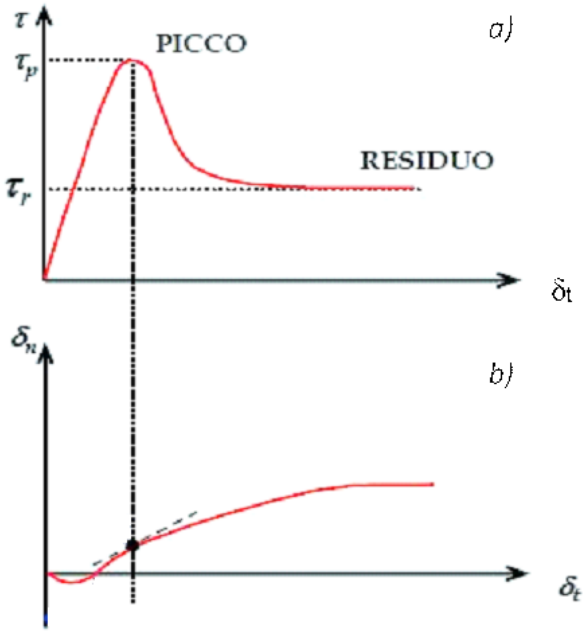


Figura 2.5 Curve ottenibili a seguito di prove a taglio diretto su giunti scabri: a) curva tensione tangenziale- spostamento tangenziale, ; b) curva spostamento assiale - spostamento tangenziale, si osserva il fenomeno della dilatanza, cioè la presenza di spostamenti ortogonali alla superficie del giunto.

I dati sperimentali così ottenuti, sono elaborati tramite i vari criteri di resistenza per le discontinuità in roccia.

I criteri di resistenza sono molteplici. Il più antico è il **criterio di Coulomb (1773)**, basato su discontinuità lisce, e correla linearmente la resistenza al taglio con lo sforzo normale secondo l'equazione:

$$\tau_r = \sigma \cdot tan\Phi_r$$

con:

- τ_r resistenza a taglio;
- σ sforzo normale;
- Φ_r angolo di attrito residuo.

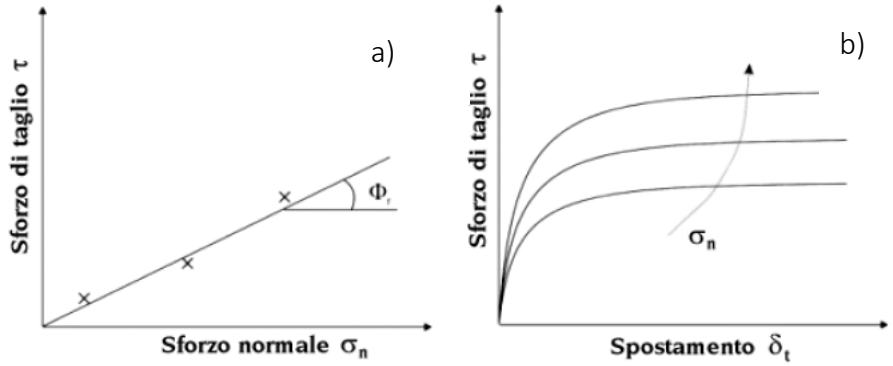


Figura 2.6 Comportamento a taglio di una discontinuità liscia, esempio di tre prove di taglio con relativo σ_n: a) Curva resistenze al taglio - σ_n a cui è eseguita la prova, dalla pendenza della retta si stima l'angolo di attrito in condizioni residue del giunto; b) curva tensioni tangenziali -spostamenti tangenziali: l'andamento asintotico della curva evidenzia il raggiungimento della resistenza al taglio.

Il metodo è limitato alla caratterizzazione delle condizioni lisce/residue del giunto (Figura 2.6), quindi per campioni resi artificialmente lisci in laboratorio o giunti reali estremamente alterati, ad esempio a causa della presenza di acqua.

Le discontinuità reali sono in prevalenza scabre. I risultati ottenuti dalle prove di taglio diretto su giunti scabri, evidenziano una relazione non lineare tra resistenza al taglio e sforzo normale applicato (Figura 2.7). Questo comportamento è chiarito introducendo i concetti di *scabrezza del giunto* e di *resistenza delle asperità*.

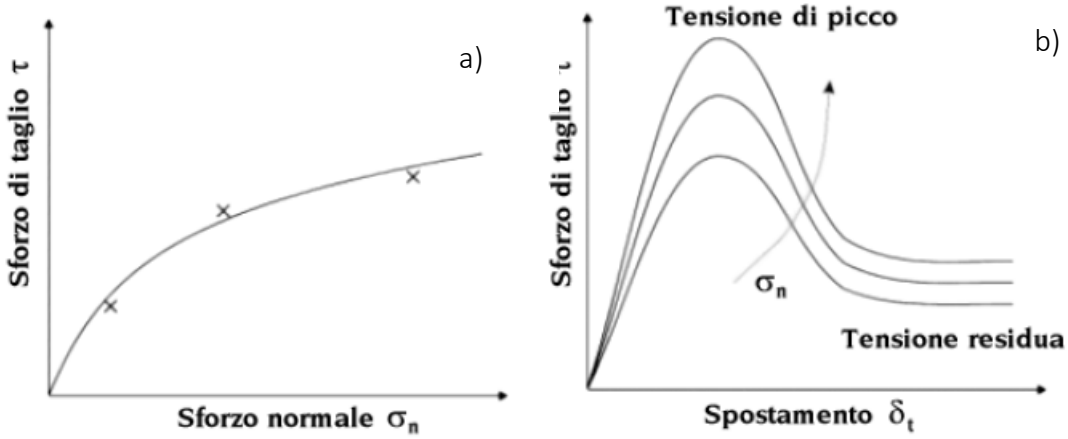


Figura 2.7 Comportamento a taglio di una discontinuità scabra, esempio di tre prove di taglio con relativo σn: a) Curva resistenze al taglio - σn a cui è eseguita la prova, si evidenzia un andamento non lineare; b) curva tensioni tangenziali - spostamenti tangenziali: si evidenzia il raggiungimento di una prima condizione di picco, seguita da una condizione residua di resistenza.

L'andamento in Figura 2.7.b mostra che nel giunto sottoposto alla prova inizialmente le asperità si oppongono al taglio: le tensioni tangenziali aumentano fino a τ_{picco}, valore da cui inizia la rottura delle stesse per il raggiungimento della resistenza al taglio della matrice rocciosa, quindi lo sforzo tangenziale diminuisce fino al valore di resistenza residua $\tau_{residuo}$. Il passaggio a valori residui è dovuto quindi al progressivo danneggiamento delle rugosità superficiali.

Il **criterio di Patton (1966)** considera il parametro di scabrezza introducendo l'inclinazione delle asperità oltre alla resistenza del materiale. Patton idealizza la discontinuità come una superficie le cui asperità sono dei "denti di sega" (Figura 2.8, a) aventi inclinazione uguale tra loro e pari ad *i* e caratteristiche di resistenza analoghe a quelle della roccia intatta. I risultati sperimentali sui giunti rugosi, portarono Patton alla formulazione di un criterio di rottura bilineare (Figura 2.8, b):

$$\tau = \sigma_n \cdot \tan(\Phi_r + i) \text{ se } \sigma_n < \sigma_{tp}$$

$$\tau = c_p + \sigma_n \cdot \tan(\Phi_r) \text{ se } \sigma_n > \sigma_{tp}$$

in cui:

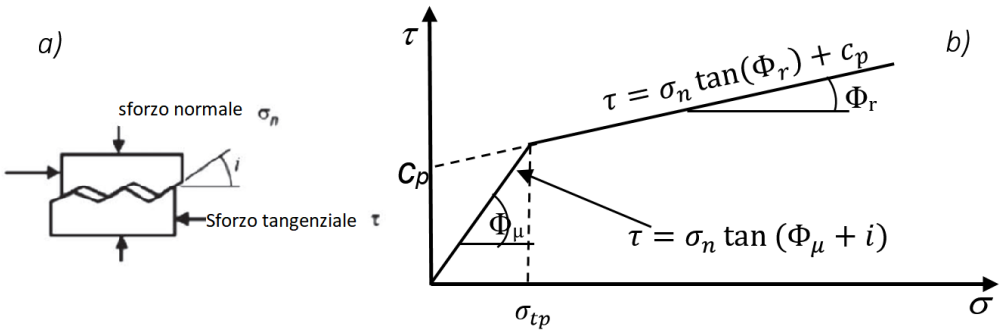


Figura 2.8 a) Rappresentazione schematica di una prova di taglio su discontinuità a denti di sega; b) bilatera di Patton -relativo ad una prova di taglio effettuata su discontinuità scabra.

- τ resistenza a taglio;
- σ_n sforzo normale;
- Φ_r angolo di attrito residuo;
- c_p coesione apparente;
- *i* è inclinazione delle asperità (0°-40°)
- σ_{tp} sforzo normale di transizione tra lo scivolamento delle asperità e la loro rottura a taglio.

Il limite di questo criterio è proprio la definizione corretta dei principali parametri introdotti: l'angolo *i* inclinazione delle asperità e lo sforzo normale che determina la rottura delle asperità. La determinazione dell'angolo *i* sul giunto naturale risulta non banale su una superficie estremamente irregolare, soprattutto alla scala d'osservazione dell'affioramento; inoltre l'incremento dello sforzo normale tende a danneggiare le asperità, riducendo il valore di *i*.

A causa di questa difficoltà, in seguito **Barton (1973)** 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 Strenght), secondo le seguenti relazioni:

$$\tau_{picco} = \sigma_n \tan\left[\Phi_r + i_{eff}\right]$$

$$i_{eff} = JRC \log_{10}\left(\frac{JCS}{\sigma_n}\right) \quad [1]$$

con:

- τ_{picco} resistenza a taglio di picco;
- σ_n sforzo normale;
- Φ_r angolo di attrito residuo;
- i_{eff} angolo di dilatanza;
- JRC (Joint Roughness Coefficient) coefficiente di rugosità ($0 \leq JRC \leq 20$);
- JCS (Joint Compressive Strength) resistenza a compressione della roccia.

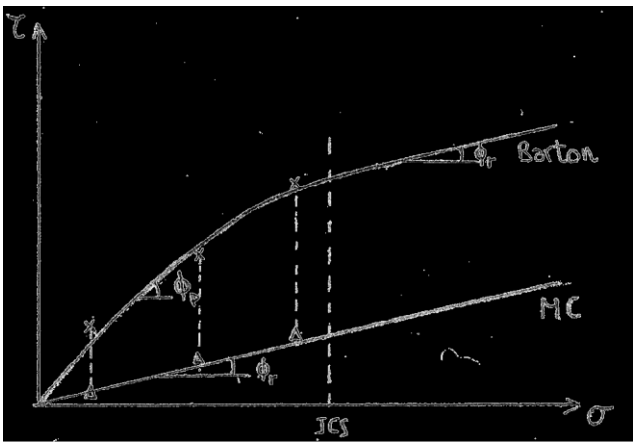


Figura 2.9 confronto tra l'inviluppo di resistenza di Barton e quello di Mohr-Coulomb (MC).

Il criterio di Barton è il più utilizzato per rappresentare l'andamento non lineare della resistenza al taglio disponibile lungo una singola superficie di discontinuità scabra (Barton, 1973, 1976, Barton & Choubey, 1977; Barton & Bandis, 1990). Tuttavia presenta alcune limitazioni: il criterio è valido per i giunti che presentino un contatto diretto roccia-roccia, è necessario pertanto considerare le proprietà del materiale di riempimento dove presente; le tensioni normali devono appartenere all'intervallo $0{,}01 < \sigma_n/JCS < 0{,}3$ (Hoek & Bray, 1981).

2.2.1. JRC - Joint Roughness Coefficient

Il parametro *JRC* stato definito da Barton (1973) all'interno del criterio di rottura. Esso è un indice della rugosità della superficie della discontinuità ed è valutabile in diversi modi.

- Pettine di Barton

Figura 2.10 profilatore o Pettine di Barton

Il metodo proposto da Barton & Choubey (1977) richiede l'uso di un profilometro (Shape Tracer o pettine di Barton Figura 2.10). Lo strumento è in grado di rilevare il profilo della discontinuità su un tratto di 10 cm: viene posto in contatto con la superficie del giunto nella direzione di scivolamento del blocco. Il profilo viene rilevato dal pettine ed è poi confrontato con dieci profili standard (Figura 2.11) di lunghezza di 10 cm ad ognuno dei quali è associato un indice di rugosità da 0 (superficie perfettamente liscia) a 20 (superficie estremamente rugosa).

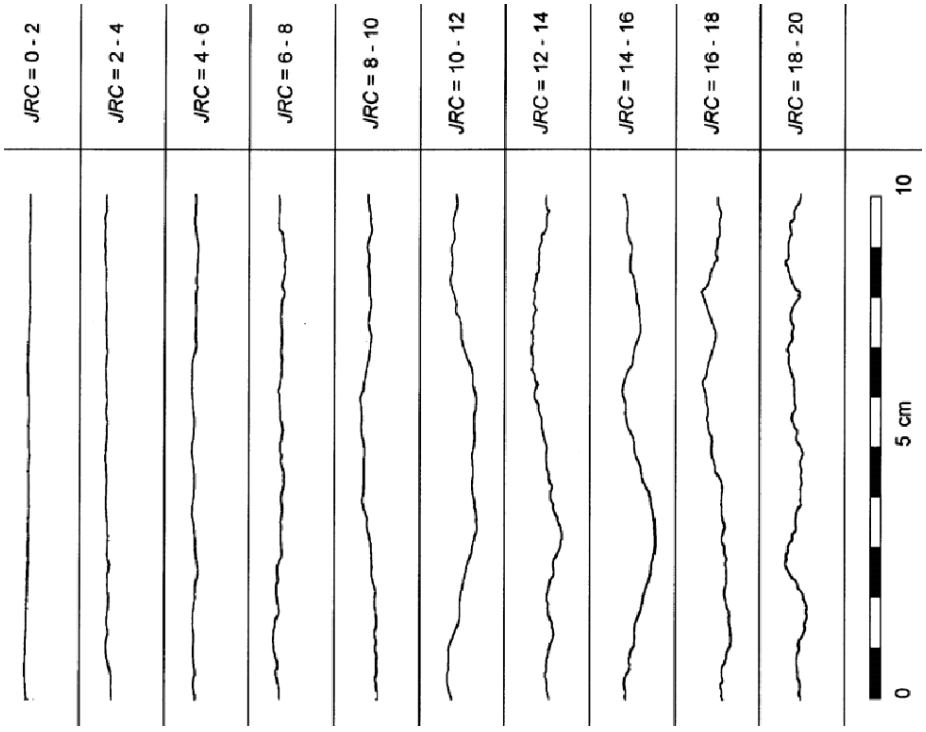


Figura 2.11 I 10 profili di rugosità standard della superficie delle discontinuità e relativi valori di JRC compresi tra 0 e 20 (Barton e Choubey 1977).

- Tilt test

Un altro metodo per ottenere il JRC è il tilt test (Barton & Choubey, 1977). Si identificano due blocchi di roccia che contengono una superficie di discontinuità. I blocchi si pongono su un piano d'appoggio, in seguito si inclina il piano stesso finché il blocco superiore inizia a scivolare. L'angolo α formato con l'orizzontale all'avvio del movimento è chiamato *angolo di inclinazione* (*tilt-angle,* Figura 2.12*)* ed è funzione della relazione tra lo sforzo di taglio τ e lo sforzo normale σ_n che agisce sulla discontinuità:

$$\alpha = arctan(\tau/\sigma_n)$$

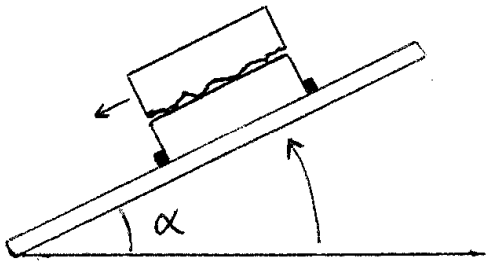


Figura 2.12 Schema del tilt test con tilt angle.

Il procedimento va ripetuto con diversi campioni contenenti la discontinuità. Il valore di JRC si ottiene dalla formula [1]:

$$\alpha = JRC \log_{10}\left(\frac{JCS}{\sigma_n}\right) + \Phi_r \qquad \Longrightarrow \qquad JRC = \frac{\alpha - \Phi_r}{\log_{10}\left(\frac{JCS}{\sigma_{n_0}}\right)}$$

con:

- Φ_r angolo di attrito residuo;
- JCS resistenza a compressione delle pareti;
- σ_{no} sforzo normale al momento dello scorrimento.

Questo test ha alcune limitazioni di carattere pratico. I campioni dei giunti devono essere raccolti in sito e trasportati in laboratorio, tuttavia durante il trasporto sono frequenti rotture dei blocchi. Inoltre, per poter determinare la rugosità del giunto è necessario collezionare un gran numero di campioni ed effettuare un numero adeguato di tilt test, poco agevole nella pratica ingegneristica.

- Metodo di Myers

Il metodo proposto da Myers (1962) prevede la digitalizzazione della superficie del giunto, seguita dall'estrazione di una serie di profili in una direzione arbitraria. Per ogni profilo estratto si calcola il parametro Z_2, la cui trattazione approfondita si rimanda ai capitoli successivi. Il parametro Z_2 è correlato al parametro JRC tramite varie formule suggerite dalla letteratura:

– Tse & Cruden, 1979:

$$JRC = 32.2 + 32.47 \log(Z_2)$$

– Yang, Lo, & Di, 2001:

$$JRC = 32.69 + 32.98 \log(Z_2)$$

– Tatone & Grasselli, 2010:

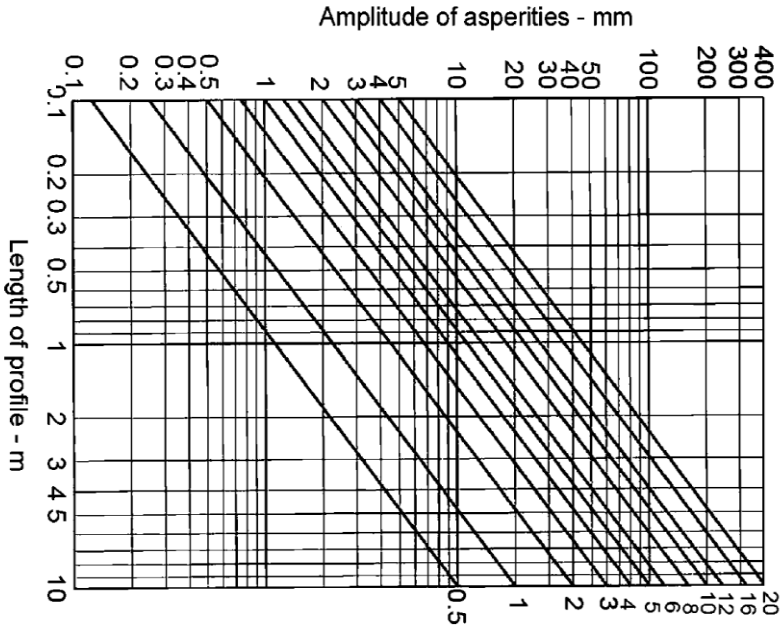
$$JRC = 51.85(Z_2)^{0.60} - 10.37 \quad \text{(per profili con passo ≤0.5 mm)}$$
$$JRC = 55.03(Z_2)^{0.74} - 6.10 \quad \text{(per profili con passo ≥1.0 mm)}$$

- Metodo del regolo

Il regolo viene usato per stimare la scabrezza di blocchi di roccia il cui ordine di grandezza è di almeno un metro. Il regolo viene fissato sulla superficie di cui si vuole una stima della scabrezza (Figura 2.13.b). Successivamente si misura l'entità massima delle asperità tramite

un'asta graduata in millimetri. Dai valori di lunghezza del profilo e delle asperità, mediante l'utilizzo del nomogramma di Barton (Figura 2.13.a), si ricava il valore di JRC.

a)



b)

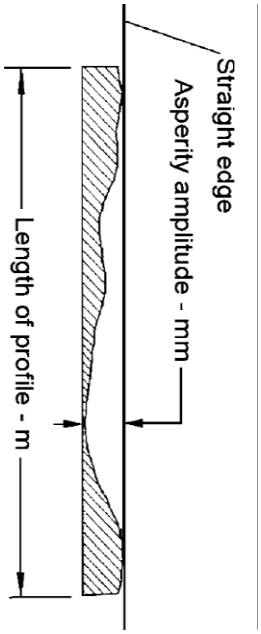


*Figura 2.13 a) nomogramma di Barton (*Barton & Bandis, 1982)*; b) schematizzazione d'esempio sul metodo del regolo.*

- Back-analysis

Il valore di JRC può essere stimato anche con un procedimento in *back-analysis* basato sul criterio di resistenza di Barton. Si effettuano almeno tre prove di taglio a differenti valori di carico normale σ_n. Il valore di JRC viene stimato usando le formulazioni viste in precedenza:

$$JRC = \frac{(arctan(\tau/\sigma_n) - \Phi_r)}{\log_{10}\left(\frac{JCS}{\sigma_{n_0}}\right)}$$

2.2.2. JCS - Joint Compressive Strength

La resistenza a compressione uniassiale delle pareti delle discontinuità (Joint Compressive Strength - *JCS*) è un parametro indispensabile per la stima della resistenza a taglio della discontinuità. Può essere stimata tramite prove sclerometriche da effettuarsi in campagna sugli affioramenti di roccia attraverso l'utilizzo dello sclerometro o Martello di Schmidt. Il Martello di Schmidt è uno strumento di tipo non distruttivo, costituito da un cilindro con punta rientrante che misura l'altezza di rimbalzo di una massa sulle pareti della discontinuità. L'altezza di rimbalzo è definita tramite un indice proporzionale alla resistenza a compressione della roccia. Misurando l'indice di rimbalzo *R* della massa battente, si è in grado di stimare l'assorbimento anelastico della roccia e quindi la sua resistenza all'urto. L'indice di rimbalzo viene letto direttamente su una scala numerica, infine il valore di JCS si stima mediante la relazione (Miller, 1965; Deere & Miller, 1966):

$$\log_{10} JCS = 0.00088 + \gamma \cdot R + 1.01$$

con:

- γ è la densità della roccia (kN/m^3);
- R è il numero dei rimbalzi contati usando il martello in posizione verticale verso il basso.

Il valore di *JCS* si determina anche attraverso il diagramma proposto da Deere e Miller (Deere & Miller, 1966, Figura 2.14), su cui lungo l'asse delle ascisse sono indicati diversi indici di Schmidt per diverse inclinazioni del martello; mentre sull'asse delle ordinate sono indicati i valori di *JCS*.

Il valore ricercato è ottenuto mediante l'uso di una delle rette inclinate opportunamente scelta in base al peso specifico della roccia.

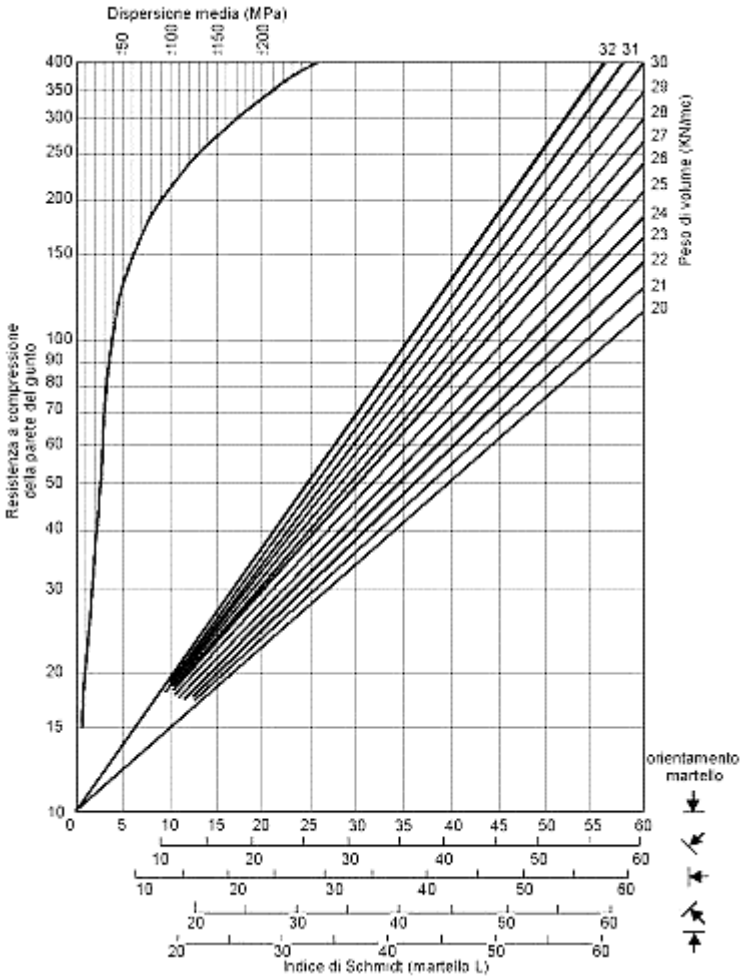


Figura 2.14 Diagramma per il calcolo del JCS (Deere & Miller, 1966).

2.3. Effetto scala: panoramica di studi precedenti

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. Questo fenomeno dipende principalmente dalla scabrezza dei giunti e dalla superficie considerata. 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. Alcuni studi hanno

dimostrato una diminuzione nella resistenza e nella scabrezza con l'aumento della grandezza della discontinuità (effetto scala negativo), similmente a quanto riportato da Bandis (Bandis et al, 1981). Altri studi hanno mostrato l'esistenza di un effetto scala positivo, oppure la combinazione di un effetto scala positivo e negativo, altri ancora ne hanno negato la presenza. Tatone e Grasselli (Tatone & Grasselli, 2013) riportano un breve stralcio dello stato dell'arte, riportato in Tabella 2.1 (Swan & Zongqi, 1985, Maerz et al., 1990,Cravero et al., 1995, Cravero et al. 2001, Leal-Gomes, 2003, Fardin et al., 2001, Fardin et al , 2004, Fardin, 2008) .

2.3.1. Effetto scala secondo Barton e Bandis

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 (N. 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.

Tabella 2.1 Panoramica dello stato dell'arte sugli studi che analizzano l'effetto scala della scabrezza dei giunti attraverso la misura e l'analisi della superficie della discontinuità .

Studio	Descrizione dello studio	Grandezza della discontinuità	Metodologia di misura della D.	Effetto scala osservato
Swan e Zongqi (1985)	Si stima la scabrezza dei profili 2D a partire da due discontinuità. La scabrezza (radice quadrata dell'altezza del profilo) ha una tendenza sia ad aumentare che a diminuire con l'aumentare della lunghezza del profilo, a seconda dalla linea di riferimento usata.	0.9 – 54 cm	Profilometro di contatto (spaziatura dei punti ~ 0.6 mm)	Effetto scala positivo quando si usano linee di riferimento uniche per ogni lunghezza di profilo. Effetto scala negativo quando si una una singola linea di riferimento comune per tutte le lunghezze dei profili.
Maerz e Franklin (1990)	Sono stati misurati due profili di grandi dimensioni da due diverse esposizioni della discontinuità tramite il profilometria dell'ombra. Successivamente, la rugosità dei profili è stata valutata utilizzando diversi parametri di rugosità strutturale e di ampiezza	10 – 500 cm	Profilometria dell'ombra (spaziatura dei punti = 0.4–10 mm)	Effetto scala negativo per i parametri di rugosità strutturale. Effetto scala positivo per i parametri dell'ampiezza dela rugosità.
Cravero et al. (1995)	Per caratterizzare profili di rugosità di lunghezza variabile, sono stati usati parametri statistici comuni e la dimensione frattale. Spaziatura dei punti sia costante (1 cm) che variabile (1 % della lunghezza del profilo)	20 – 1,000 cm	Profilometro meccanico per acquisire profili di 20 cm (spaziatura dei punti = 1 cm) accoppiato con misurazioni manuali dell'altezza (spaziatura punti = 20 cm), ha permesso di ricostruire un profilo di 10 metri con spaziatura di 1 cm	Effetto scala positivo con spaziatura dei punti costante. Effetto scala negativo con spaziatura dei punti variabile.
Cravero et al. (2001)	Discontinuità di scisti naturali sono state misurate sul campo tramite fotogrammetria e in laboratorio con un profilometro. Da profili 2D di lunghezza variabile, sono stati calcolati i valori di Z2, angolo di dilatazione (i) e dimensione frattale (D) per esaminare l'influenza della lunghezza del campione	6 – 500 cm	Digitalizzazione con fotogrammetria e profilometria (rispettivamente con spaziatura = 50 e 3 mm, 0.7 e 0.1 mm)	Effetto scala negativo con tutti gli indici di scabrezza decrescenti all'aumentare della lunghezza del profilo.
Leal - Gomes (2003)	Sono state studiate la resistenza a taglio e la topografia superficiale di repliche di giunti di varie dimensioni. Le repliche sono state riprodotte da una discontinuità artificiale in granito ottenuta per trazione. L'ampiezza media delle asperità della superficie è risultata aumentare con le dimensioni della replica e i pull out test hanno mostrato anche l'aumento della resistenza al taglio	84 – 256 cm^2	Dettagli non forniti	Effetto scala positivo con l'aumento dell'ampiezza media delle asperità insieme alla dimensione del campione.

Fardin et al. (2001)	L'effetto scala della rugosità è stato studiato in laboratorio digitalizzando una replica in silicio di 1 m^2 di una discontinuità di roccia naturale e studiando la scabrezza all'aumento delle finestre di campionamento. La digitalizzazione è stata eseguita con un laser scanner e la rugosità 3D è stata valutata utilizzando la dimensione frattale (D) e un parametro di ampiezza (A)	100 – 1 x 10^4 cm^2	Laser scanner (spaziatura = 0.2 mm)	Effetto scala negativo per i parametri frattali e di ampiezza.
Fardin et al. (2004)	Seguito dello studio precedente, eseguito su un giunto di maggiori dimensioni (4-m^2)	1 x 10^4– 4 x 10^4 cm^2	LIDAR (spaziatura = 5 mm)	Effetto scala negativo per dimensione frattale e parametro d'ampiezza.
Fardin (2008)	La rugosità di aree sempre più grandi di 4 giunti è stata studiata usando lo stesso approccio descritto in Fardin et al. 2001. Tuttavia, i parametri frattali, D e A, sono diminuiti all'ingrandimento dell finestra di campionamento	25–400 cm^2	Laser scanner (spaziatura = 0.2 mm)	Effetto scala positivo per dimensione frattale e parametro d'ampiezza.

3. Parametri di misura della rugosità

JRC non è una misura della geometria del profilo del giunto, ma più propriamente è un parametro empirico specificamente funzionale al criterio di resistenza al taglio di Barton e Bandis per i giunti. Nonostante questo parametro non possa caratterizzare la scabrezza in 3-dimensioni, è ancora il più utilizzato nella quantificazione della rugosità delle discontinuità. Inoltre Beer (Beer et al., 2002) ha dimostrato come la stima di JRC da profilometro (capitolo 2.2.1) risenta molto dell'operatore che la effettua, portando a notevoli errori nella stima della resistenza al taglio del giunto soprattutto in condizioni di bassi sforzi assiali. Per superare gli svantaggi del metodo di confronto visivo con i 10 profili standard e per automatizzare il calcolo di JRC, sono stati presentati numerosi algoritmi che prevedono la digitalizzazione dei suddetti profili (Tse & Cruden, 1979; Maerz et al., 1990; Yu & Vayssade, 1991; Yang et al., 2001; Tatone & Grasselli, 2010; Zhang et al., 2014).

I metodi proposti per parametrizzare la scabrezza delle discontinuità in roccia sono molteplici, alcuni si basano su parametri 2D che considerano il profilo bidimensionale del giunto, altri usano parametri 3D stimati per l'intera superficie della discontinuità. Emergono inoltre alcune differenze nel comportamento di scala della scabrezza a seconda della metodologia usata per stimarla.

In generale, i parametri di scabrezza possono distinguersi in due categorie:

- Parametri direzionali;
- Parametri non direzionali.

3.1. Parametri direzionali di scabrezza

I parametri direzionali catturano le differenze della scabrezza nelle diverse direzioni lungo una superficie. Dato un profilo 2D o una superficie 3D, si possono caratterizzare diversi valori di scabrezza a seconda del verso di percorrenza dell'analisi (in avanti o indietro).

3.1.1. Angolo di rugosità $\Theta^*_{max/[C+1]_{2D}}$ e $\Theta^*_{max/[C+1]_{3D}}$

I parametri $\Theta^*_{max/}[C+1]_{2D}$ e $\Theta^*_{max/}[C+1]_{3D}$ (Tatone & Grasselli, 2013), caratterizzano rispettivamente e l'inclinazione dei segmenti di linea di un profilo 2D e la distribuzione cumulativa dell'inclinazione apparente delle facce triangolari di una superficie TIN. Considerando un profilo 2D composto da segmenti di linea retta o una superficie 3D composta da sfaccettature triangolari 3D, è possibile determinare la frazione della lunghezza del profilo o dell'area più inclinata rispetto a particolari valori di soglia angolari, Θ^*. Questa lunghezza o area frazionaria è normalizzato rispetto alla lunghezza totale del profilo o alla superficie. Si può stabilire una relazione tra la lunghezza normalizzata (L_{Θ^*}) o l'area normalizzata (A_{Θ^*}) (Tatone & Grasselli, 2009):

$$L_{\theta^*} = L_0 \left(\frac{\theta^*_{max} - \theta^*}{\theta^*_{max}}\right)$$

$$A_{\theta^*} = A_0 \left(\frac{\theta^*_{max} - \theta^*}{\theta^*_{max}}\right)$$

in cui:

- L_0 e A_0 sono la lunghezza normalizzata e l'area normalizzata corrispondenti a Θ^*=0;
- Θ^*_{max} è l'inclinazione del segmento/faccia più inclinato;
- C è un parametro di adattamento che descrive la forma della distribuzione cumulata.

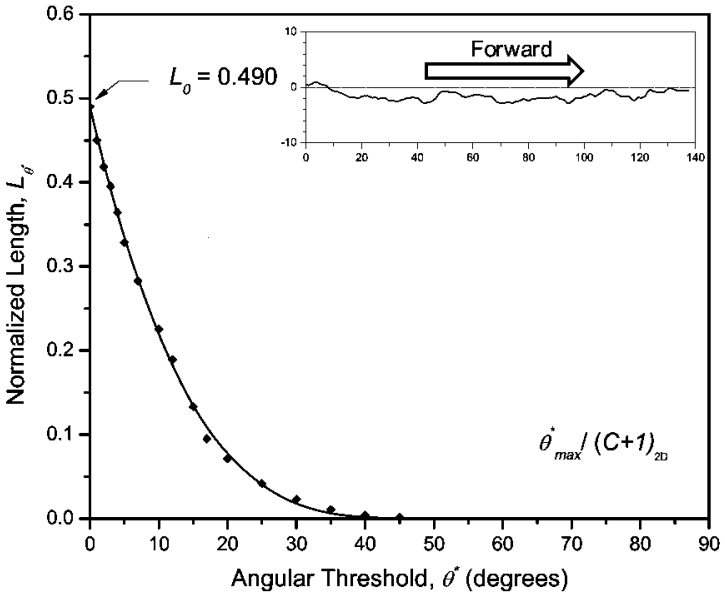


Figura 3.1 Lunghezza normalizzata del profilo in funzione dell'angolo di soglia di rugosità, (Tatone & Grasselli, 2012).

Una proporzione maggiore di segmenti o facce inclinate è indicativa di una superficie più ruvida, di conseguenza l'area sotto la curva in Figura 3.1 è maggiore. Sebbene l'area sotto la curva sia pari a:

$$Area\ curva = 2 \cdot (L_0\ oppure\ A_0) \cdot\ \Theta^*_{max}/[\mathrm{C}+1]$$

L_0 e A_0 sono in genere molto vicini a 0,5. Pertanto, l'indicazione della rugosità è descritta dall'angolo Θ^*_{max} / [C+1].

3.2. Parametri non direzionali di scabrezza

I parametri non direzionali sono indipendenti dalla direzione su cui si valuta la scabrezza. Vengono per questo usati nella caratterizzazione dell'anisotropia della rugosità considerando profili orientati in diverse direzioni, ma non colgono differenze percorrendo tali profili in una direzione o in quella opposta.

3.2.1. Coefficienti di rugosità lineare e superficiale: R_P e R_S

I coefficienti di rugosità R_P (2D) e R_S (3D), sono comunemente utilizzati per descrivere la scabrezza delle discontinuità. Questi parametri forniscono rispettivamente una misura dell'irregolarità dei profili 2D e delle superfici 3D rispetto a una linea o un piano ottimali.

Il coefficiente di rugosità lineare R_P è definito come il rapporto tra la lunghezza del profilo reale L_t, e la lunghezza nominale del profilo L_n (El-Soudani, 1978):

$$R_P = \frac{L_t}{L_n} = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}}{L_n}$$

in cui (x_i, y_i) e (x_{i+1}, y_{i+1}) rappresentano le coordinate dei punti adiacenti di un profilo 2D ed N è il numero totale dei punti che formano il profilo. La lunghezza nominale L_n è la proiezione del profilo 2D sulla linea scelta come ottimale. In Tabella 3.2 sono riportate alcune delle formule di letteratura che correlano il parametro JRC con R_p.

No.	Equazione	R (coeff. di correlazione)	SI (intervallo di campionamento)	JRC^0 (JRC stimato per una superficie liscia)	Rp range	Autore
T1	$JRC = (0.036 + 0.00127/\ln(Rp))^{-1}$	–	0.5	–	1.0013–1.0950	Tatone e Grasselli
T2	$JRC = (0.038 + 0.00107/\ln(Rp))^{-1}$	–	1.0	–	1.0013–1.1116	
T3	$JRC = 558.68\sqrt{Rp} - 557.13$	0.951	0.25	1.55	1–1.0671	Yu e Vayssade
T4	$JRC = 559.73\sqrt{Rp} - 597.46$	0.945	0.5	–37.73	1.1394–1.2169	
T5	$JRC = 702.67\sqrt{Rp} - 599.99$	0.951	1.0	102.68	1–0.7785	

Tabella 3.1 Formule di letteratura, correlanti JRC con R_p.

Il coefficiente di rugosità superficiale *Rs* è definito come il rapporto tra la superficie reale A_t, l'area della superficie nominale A_n (Figura 3.2, El-Soudani, 1978):

$$R_S = \frac{A_t}{A_n}$$

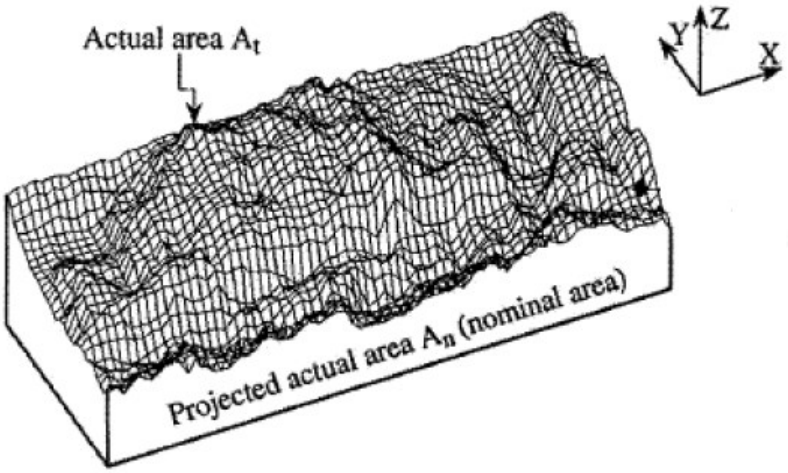


Figura 3.2 Il coefficiente di rugosità superficiale Rs è il rapporto tra la superficie reale, At, l'area della superficie nominale, An (El-Soudani, 1978)

In accordo con questi metodi, una superficie perfettamente piana avrà un valore uguale a 1 e superfici più ruvide visualizzeranno valori fino a 2 per discontinuità di roccia, a causa della maggiore ondulazione e asperità della superficie.

3.2.2. Z_2

Il parametro Z_2 rappresenta la radice quadra della derivata prima delle altezze di un profilo 2D. Per un profilo 2D definito da *N* coppie di coordinate *(x, z)* su una lunghezza *L*, Z_2 è definito da (Myers, 1962):

$$Z_2 = \sqrt{\frac{1}{L}\int_{x=0}^{x=L}\left(\frac{dz}{dx}\right)^2} \approx \sqrt{\frac{1}{L}\sum_{i=1}^{N-1}\frac{(z_{i+1}-z_i)^2}{(x_{i+1}-x_i)}}$$

In cui:

- *L* è la lunghezza totale del profilo;
- *N* è il numero totale dei punti che formano il profilo;
- (x_i, z_i) e (x_{i+1}, z_{i+1}) rappresentano le coordinate dei punti adiacenti del profilo.

E' bene anticipare (capitolo 4) che si lavora su profili digitalizzati ed elaborati in modo che la distanza tra i vari punti del profilo sia sempre la stessa. Di conseguenza, il profilo su cui si indaga è un'approssimazione del profilo reale del giunto, tanto più veritiera quanto più è piccolo l'intervallo di campionamento scelto (Figura 3.3).

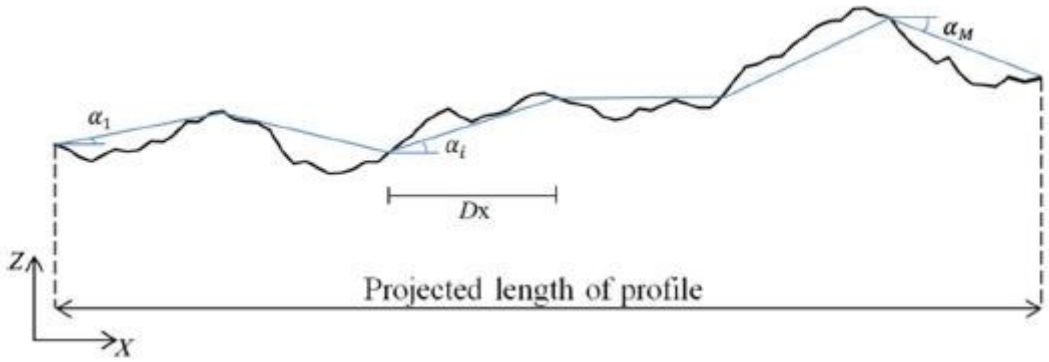


Figura 3.3 Profilo i-esimo sul quale è calcolato il parametro Z2.

Essendo quindi la lunghezza del profilo *L* pari circa al prodotto tra il numero di campionamenti *(N-1)* del profilo lungo *x,* per la loro lunghezza *Dx* (valore costante):

$$L \approx (N-1) \cdot Dx$$

ne deriva:

$$Z_2 = \sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N-1}\frac{(z_{i+1}-z_i)^2}{(x_{i+1}-x_i)^2}} = \sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N-1}(\tan\alpha_i)^2}$$

Il parametro Z_2 dipende quindi da come viene campionato il profilo di indagine. Il grafico in Figura 3.4 mostra l'andamento qualitativo assunto dalla Z_2 al variare del passo di campionamento: ad un passo di analisi ipoteticamente pari alla lunghezza del profilo (L), corrisponde un valore di Z_2 minimo; alla diminuzione del passo, il parametro Z_2 aumenta fino ad arrivare ad un valore pressochè costante in corrispondenza del passo Dx_r. Tale valore

rappresenta il grado di accuratezza massima raggiungibile dal calcolo. In Tabella 3.2 sono riportate alcune delle formule di letteratura che correlano il parametro JRC con Z_2.

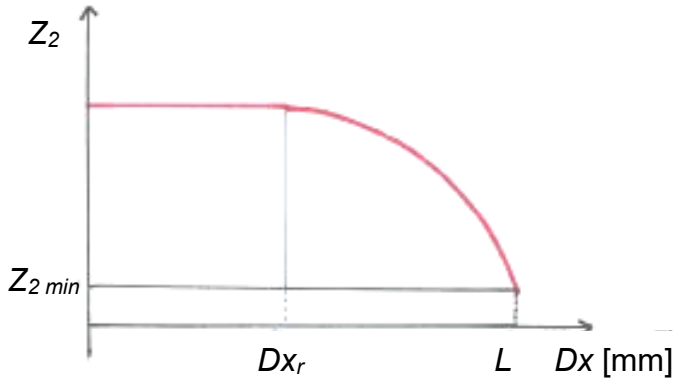


Figura 3.4 andamento qualitativo del valore di Z2 con la variazione del passo di analisi Dx.

No.	Equazione	R (coeff. di correlazione)	SI (intervallo di campionamento)	JRC^0 (JRC stimato per una superficie liscia)	Z_2 range	Autore
T1	JRC = 32.2+32.47 log(Z_2)	0.986	1.27	–	0.1019–0.4210	Tse e Cruden
T2	JRC = -4.41+64.46 Z_2	0.968	1.27	–4.41	0.0684–0.3787	
T3	JRC = -5.05 + 1.20 $\tan^{-1}(Z_2)$	0.973	1.27	–5.05	0.0736–0.3814	
T4	JRC = 32.69 + 32.98 log (Z_2)	0.993	0.5	–	0.1020–0.4123	Yand et al.
T5	JRC = 60.32 Z_2 - 4.51	0.968	0.25	–4.51	0.0748–0.4063	Yu e Vayssade
T6	JRC = 64.28 tan (Z_2) - 5.06	0.969	0.25	–5.06	0.0768–0.317	
T7	JRC = 116.3 $(Z_2)^2$ - 2.30	0.929	0.25	–2.3	0.1460–0.4379	
T8	JRC = 56.15 $\sqrt{Z_2}$ - 16.99	0.967	0.25	–16.99	0.0916–0.4108	
T9	JRC = 28.10 log (Z_2) + 28.43	0.951	0.25	–	0.0973–0.5012	
T10	JRC = 61.79 Z_2 - 3.47	0.973	0.5	–3.47	0.0562–0.3798	
T11	JRC = 65.18 tan(Z_2) - 3.88	0.975	0.5	–3.88	0.0595–0.3512	
T12	JRC = 130.87$(Z_2)^2$ - 2.73	0.934	0.5	–2.73	0.1444–0.4168	
T13	JRC = 54.42 $\sqrt{Z_2}$ - 14.83	0.973	0.5	–14.83	0.0743–0.4096	
T14	JRC = 25.57 log(Z_2) + 28.06	0.954	0.5	–	0.0799–0.4839	
T15	JRC = 64.22 Z_2-2.31	0.983	1.0	–2.31	0.0360–0.3474	
T16	JRC = 66.86 tan(Z_2) - 2.57	0.983	1.0	–2.57	0.0384–0.3256	
T17	JRC = 157$(Z_2)^2$ - 3.00	0.945	1.0	–3	0.1382–0.3827	
T18	JRC = 51.85$(Z_2)^{0.60}$ - 10.37	–	0.5	–10.37	0.0684–0.4100	Tatone e Grasselli
T19	JRC = 55.85$(Z_2)^{0.74}$ - 6.10	–	1.0	–6.1	0.0512–0.3649	

Tabella 3.2 Formule di letteratura, correlanti JRC con Z_2.

3.2.3. Funzione di struttura: SF

Il parametro SF è definito come il quadrato medio della prima derivata del profilo:

$$SF = \frac{1}{L}\int_{x=0}^{x=L}[f(x+dx)-f(x)]^2\,dx = \frac{1}{L}\sum_{i=1}^{N-1}(y_{i+1}-y_i)^2(x_{i+1}-x_i) = (Z_2\cdot\Delta s)^2$$

Esso è usato per quantificare la variazione nella struttura della superficie, in particolare è legato al grado di variazione nell'altezza delle asperità. In Tabella 3.3 sono riportate alcune delle formule di letteratura che correlano il parametro JRC con SF.

No.	Equazione	R (coeff. di correlazione)	SI (intervallo di campionamento)	JRC^0 (JRC stimato per una superficie liscia)	SF range	Autore
T1	JRC = 37.63 + 16.5 log(SF)	0.993	0.5	–	0.0052–0.0854	Yand et al.
T2	JRC = 2.69 + 245.70 SF	0.919	1.27	–2.69	0–0.0705	Tse e Cruden
T3	JRC = 37.28 + 16.58 log(SF)	0.984	1.27	–	0.0056–0.0907	
T4	JRC = 239.27 √SF - 4.51	0.968	0.25	–4.51	0.0004–0.0105	Yu e Vayssade
T5	JRC = 14.05 log(SF) + 45.25	0.951	0.25	–	0.0006–0.0160	
T6	JRC = 121.13 √SF -3.28	0.972	0.5	–3.28	0.0007–0.0369	
T7	JRC = 12.64 log(SF) + 35.42	0.954	0.5	–	0.0016–0.0603	
T8	JRC = 10.66 log(SF) + 26.49	0.950	1.0	–	0.0033–0.2461	

Tabella 3.3 Formule di letteratura, correlanti JRC con SF.

3.2.1. Dimensione frattale D e parametro di ampiezza A

Diversi studi hanno evidenziano la relazione tra i parametri della geometria frattale con i valori di JRC, quindi numerose sono le equazioni empiriche che permettono la stima di JRC usando la dimensione frattale (Lee at al., 1990; Huang et al., 1992; Xu et al., 2013; Jang et al., 2014; Li & Huang, 2015). Lanaro (2000) e Fardin (Fardin et al., 2001) hanno suggerito il *roughness-length method* 3D (RLM) per la stima di D (dimensione frattale) ed A (parametro d'ampiezza). Questi parametri descrivono la geometria frattale auto-affine di una superficie. In particolare D descrive come la scabrezza cambia con la scala ed A specifica la varianza della pendenza di una superficie alla scala di riferimento. Più sono alti i valori di D e A, più la superficie può considerarsi scabra. Il metodo prevede che la superficie da indagare sia suddivisa in una griglia con finestre di campionamento quadrate di lunghezza *w (*Figura 3.5*)*.

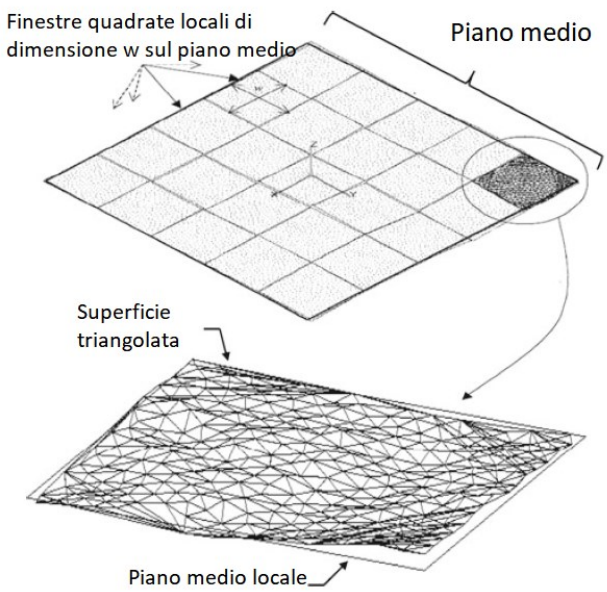


Figura 3.5 Schema di calcolo dei residui delle altezze della superficie per il metodo RLM, Fardin et all 2001.

La relazione tra la deviazione standard delle altezze del profilo S(w) e la lunghezza di campionamento della finestra del profilo w è la seguente:

$$S(w) = A \cdot w^H$$

con A costante di proporzionalità che descrive l'ampiezza della superficie ed H l'esponente di Hurst (Kulatilake & Um, 1999; Fardin et al., 2001). H è legato alla dimensione frattale:

$$H = E - D$$

con E dimensione euclidea (E = 3 per una superficie 3D), e D dimensione frattale, indice dell'autocorrelazione spaziale della coordinata z che definisce la superficie. S(w) si calcola come il valore quadratico medio dei residui dell'altezza del profilo:

$$S(w) = RMS(w) = \frac{1}{n_w} \sum_{i=1}^{n_w} \sqrt{\frac{1}{m_i - 2} \sum_{j \epsilon w} \left(z_j - \bar{z}\right)^2}$$

con n_w il numero totale di finestre di campionamento locale di lunghezza w, m_i è il numero di punti nella finestra w_i, z_j è il residuo delle altezze della superficie per il j-esimo punto di misura nella i-esima finestra, e $\bar{z}$ è altezza della superficie residua media nell'i-esima finestra.

Esistono altri metodi per calcolare le dimensioni frattali, si citano il *Compass-walking method*, il *Box-counting method* e lo *h-L method*. In base alla metologia applicata, numerose equazioni di letteratura correlano D con JRC, di cui una panoramica è riportata in Tabella 3.4.

No	Equazione	Metodo	R	SI	JRC^0	D range	Profili st.	Autore
T1	JRC= -1138.6+1141.6D	C-W*	–	–	3	1.0–1.0149	Si	Turk et al.
T2	JRC= -1022.55+1023.92D	C-W*	0.9800	–	1,3700	1.0–1.0182	Si	Carr e Warriner
T3	JRC=209.7517D-204.1486	C-W	0.9470	0.5	5,6031	1.0–1.0686	No	Qin et al
T4	JRC=172.206D-167.2946	C-W	0.9976	–	4,9114	1.0–1.0876	Si	Zhou e Xiong
T5	$JRC=7811778.928D^3-23723041.6842D^2+$	C-W*	0.9930	0.05	-0,1809	1.0–1.0144	Si	Bae et all
	24014672.3562D-8103409.7809							
T6	JRC=1000(D-1)	C-W*	–	–	0	1.0–1.0200	Si	Carr e Warriner
T7	JRC=1870(D-1)	$C\text{-}W^{MR}$	–	0.684	0	1.0–1.0107	Si	Maerz e Franklin
T8	JRC=1647(D-1)	C-W	0.9600	–	0	1.0–1.0121	No	Liu
T9	JRC=1195.38(D-1)	C-W	–	–	0	1.0–1.0167	Si	Lamas
T10	$JRC=479.396(D-1)^{1.0566}$	C-W	–	–	0	1.0–1.0495	Si	Zhou e Xiong
T11	$JRC=29.35(D-1)^{0.46}$	C-W	0.9045	0.02	0	1.0–1.4343	No	Jia et al
T12	$JRC=150.5335(D-1)^{0.5}$	C-W	–	–	0	1.0–1.0177	Si	Wakabayashi e Fukushige
T13	$JRC=-0.87804+27.7844(D-1)/0.015–16.9304[(D-1)/0.15]^2$	C-W	0.9500	1	-0,8780	1.0005–1.0113	Si	Lee et al.
T14	JRC=28.5-33.18/(1+150(D-1))	C-W	0.9985	0.5	-4,6800	1.0011–1.0194	No	Xu et al.
T15	$JRC=100(D-1)^{0.4}$ (1-1/(exp[300(D-1)]))	C-W	–	0.5	0	1.0–1.0181	No	Xu et al.
T16	$JRC=60(D-1)^{1.2}/(0.06+(D-1))$	C-W	–	0.5	0	1.0–1.0177	No	
T17	$JRC=15179W_d(D-1)^{1.46}$	B-C	–	–	0	–	Si	Chen
T18	$JRC=53.7031(D-1)^{0.3642}$	$h–L^1$	0.9850	–	0	1.0–1.0664	No	Askari e Ahmadi
T19	$JRC=85.2671(D-1)^{0.5679}$	$h–L^2$	–	–	0	1.0–1.0778	Si	Xie e Pariseau

Tabella 3.4 Equazioni di letteratura per il calcolo di JRC a partire da D. Note - R: coefficiente di correlazione; SI: intervallo di campionamento; JRC0: valore stimato per una superficie piana; D range: range applicabile del parametro indipendente; Profili st.: i 10 profili standard.

C-W: Compass walking, $D=-\Delta\log N/\Delta\log r$; $C\text{-}W^{\#}$: Compass walking, $D=-\Delta\log[N+(f/r)]/\Delta\log r$; $C\text{-}W^{MR}$: Compass walking, $D=1-\Delta\log(Nr)/\Delta\log r$; B-C: Box counting, $-\Delta\log G/\Delta\log\varepsilon$; $h–L^1$: $D=\frac{\log 4}{\log[4\cos|\arctan(2h/L)|]}$; $h–L^2$: $D=\frac{\log 4}{\log[2(1+\cos|\arctan(2h/L)|)]}$.

La geometria frattale permette di caratterizzare quelle strutture geometriche aventi proprietà di *autosimiglianza,* cioè l'invarianza di scala delle proprietà geometriche del sistema: se un punto $X = (x_1,\ldots,x_j)$ viene trasformato in un punto $X' = (k\cdot x_1,\ldots, k\cdot x_j)$, la costante di proporzionalità r rimane costante per ogni x_i. Più generale il concetto di *auto-affinità*, cioè

l'invarianza di alcuni raggruppamenti frattali: un punto appartenente a tale set frattale $X_a = (x_1, \ldots., x_j)$ nello spazio tridimensionale viene trasformato in un nuovo punto $X'a = (k_1 \cdot x_1, \ldots, k_j \cdot x_j)$, con $k = (k_1,\ldots, k_n)$ vettore di proporzionalità. Poiché l'auto-affinità frattale non è una caratteristica globale, la dimensione frattale non può essere unicamente definita nonostante a livello locale sia ancora possibile calcolare una dimensione frattale seguendo la procedura standard. Pertanto, essendo difficile ricavare dimensioni frattali distintive per i profili di rugosità con caratteristiche auto-affini, è complesso valutare l'idoneità delle equazioni che stimano JRC usando la dimensione frattale nella pratica ingegneristica.

3.3. Anisotropia della scabrezza

Nelle discontinuità naturali è fondamentale tenere in considerazione l'eterogeneità dell'ammasso roccioso e l'anisotropia nelle diverse direzioni di scivolamento. Il criterio di resistenza dei giunti evidenzia infatti il legame tra resistenza al taglio e scabrezza, per cui se la scabrezza varia con la direzione considerata, la stima della resistenza cambia. La resistenza al taglio è quindi funzione dalla direzione dello scivolamento.

L'anisotropia della scabrezza è evidenziata realizzando i diagrammi polari dei parametri di scabrezza, stimati per profili orientati in direzioni diverse (Figura 3.6).

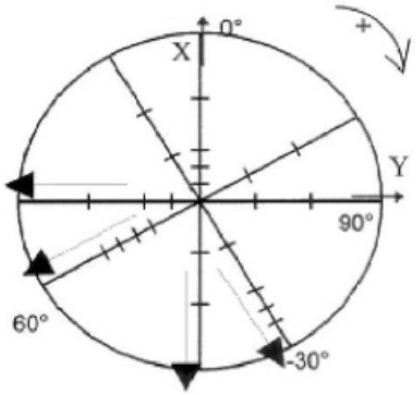


Figura 3.6 Nello studio del comportamento anisotropo della scabrezza, si considerano profili orientati in maniera diversa.

4. Tecniche fotogrammetriche per il rilievo delle superfici di discontinuità

In questi ultimi anni, i nuovi metodi diagnostici basati su tecniche laser hanno trovato un crescente impiego in campo scientifico. In particolare sono comunemente utilizzati per lo studio di frane, di cave a cielo aperto, nel rilievo geomeccanico tradizionale ed in studi sulla caduta massi. Il molteplice vantaggio di tali nuovi metodi diagnostici è dovuto sia alla capacità di acquisire dati da grande distanza che alla possibilità di rilevare superfici complesse e notevolmente estese, mantenendo un elevato livello di risoluzione.

Si è discusso l'impatto significativo della **rugosità delle discontinuità** sulle caratteristiche idrauliche e meccaniche degli ammassi rocciosi, evidenziando come il comportamento meccanico dei giunti scabri possa variare considerevolmente in funzione della **scala del problema**, nonostante la sua estensione sia tuttora soggetto di studio. Sebbene sia generalmente condivisa la distinzione tra ondulosità alla scala del sito e asperità alla scala di laboratorio (ISMR, 1978), le investigazioni tese a studiare l'effetto scala ed il ruolo della rugosità sono spesso condotte su campioni la cui area è inferiore al metro quadro, per cui il comportamento delle discontinuità in sito è raramente preso in considerazione (Fardin et al., 2001). In aggiunta alla scelta inadeguata della scala, molti studi hanno applicato una metodologia di analisi bi-dimensionale ad un problema intrinsecamente tridimensionale. Approccio che può portare ad una rappresentazione parziale della discontinuità (McWilliams et al., 1993; Riss & Gentier, 1989; Rasouli & Harrison, 2004).

Queste limitazioni sono state superate con la diffusione di strumenti la cui misurazione della discontinuità sia in sito che in laboratorio è veloce ed estremamente accurata. In particolare si tratta di:

- Laser scanner;
- Fotogrammetria.

4.1. Il rilievo fotogrammetrico

La fotogrammetria è una tecnica di rilievo di non contatto che permette di ottenere informazioni metriche di un oggetto a partire dall'analisi di immagini fotografiche dello stesso, acquisite da diversi punti di vista. Il modello digitale della superficie di un oggetto è ricostruito a partire da un blocco di immagini opportunamente orientate nello spazio. I software per la ricostruzione tridimensionale sono basati su algoritmi di riconoscimento di punti omologhi su immagini diverse. La visione stereoscopica è ottenuta tramite l'osservazione contemporanea di due fotogrammi dello stesso soggetto rilevati da due differenti punti di osservazione, secondo il principio della visione stereoscopia propria dell'essere umano.

I fotogrammi devono quindi possedere le seguenti caratteristiche:

- ogni fotogramma deve sovrapporsi al successivo per oltre il 50%. La terza dimensione si apprezza infatti in questa zona di sovrapposizione detta "coppia stereoscopica";
- la distanza di presa deve essere uguale, affinché la scala fotografica dei due fotogrammi costituenti la coppia stereoscopica sia la stessa;
- gli assi della camera devono essere paralleli tra loro ed ortogonali al soggetto ripreso, in modo che tutti gli elementi siano sovrapponibili sulle due foto al fine di ottenere una corretta visione stereoscopica.

4.2. Post-processing dei dati

L'acquisizione di immagini, operazione che si definisce rilievo fotogrammetrico, permette di ricreare un modello digitale: un software di fotorestituzione (nel caso studio trattato nel capitolo 5 è stato usato *Agisoft Photoscan Professional)* permette di orientare le immagini nel sistema di riferimento scelto tramite l'identificazione di alcuni punti naturali di coordinate note. La nuvola di punti espressi in coordinate 3D (x,y,z) così ottenuta viene triangolata, al fine di creare una mesh che ricostruisca la superficie dell'oggetto. Tale mesh viene definita DSM (*Digital Surface Model, ossia* Modello Digitale della Superficie).

Per visualizzare ed elaborare i DSM, si è utilizzato il software Open Source ***CloudCompare***. *CloudCompare* è un software di elaborazione 3D di nuvole di punti e mesh, con inclusi molti algoritmi avanzati (registrazione, ricampionamento, gestione di campi di colore/ normali/ scalari, calcolo delle statistiche, gestione dei sensori, segmentazione interattiva o automatica).

Il DSM è costituito da un insieme di punti le cui posizioni sono sparse, non distribuite in modo regolare lungo una griglia nel piano xy. Per poter svolgere elaborazioni precise e coerenti, queste nuvole devono essere regolarizzate in modo che il passo tra i nodi della griglia sia costante. Si usa a questo fine il software ***Surfer***. *Surfer* è un prodotto della Golden Software Inc. e tra i suoi vari usi si presta alla rappresentazione delle discontinuità in esame. Molteplici sono i processi condotti con l'ausilio del software *Surfer*:

- restituzione di valori di elevazione interpolati;
- determinazione di profili topografici;
- analisi di volume;
- analisi della morfologia.

Il programma realizza, a partire da una nuvola di punti sparsi (TIN, triangular irregular network), una griglia regolare di punti (GRID). Il compito più importante è quello di determinare la coordinata z (elevazione) associata ad ogni nodo della griglia tramite un metodo di interpolazione o estrapolazione, a partire dalle coordinate z dei punti appartenenti al TIN. Il software offre dodici algoritmi di generazione. Il metodo più adatto viene scelto in base ai dati XYZ di input, la loro distribuzione, densità e l'estensione dell'area di elaborazione. Il software genera una griglia regolare di valori XYZ (Figura 4.1), quindi il passo della griglia nella direzione dell'asse X (e Y) è sempre costante.

L'intervallo può essere diverso in direzione X e Y a seconda delle impostazioni dell'utente. Nella scelta degli intervalli per la realizzazione delle griglie, si deve considerare che griglie troppo dense aumentano il calcolo computazionale, griglie poco dense restituiscono stime poco attendibili che non riproducono il reale andamento dell'elemento studiato.

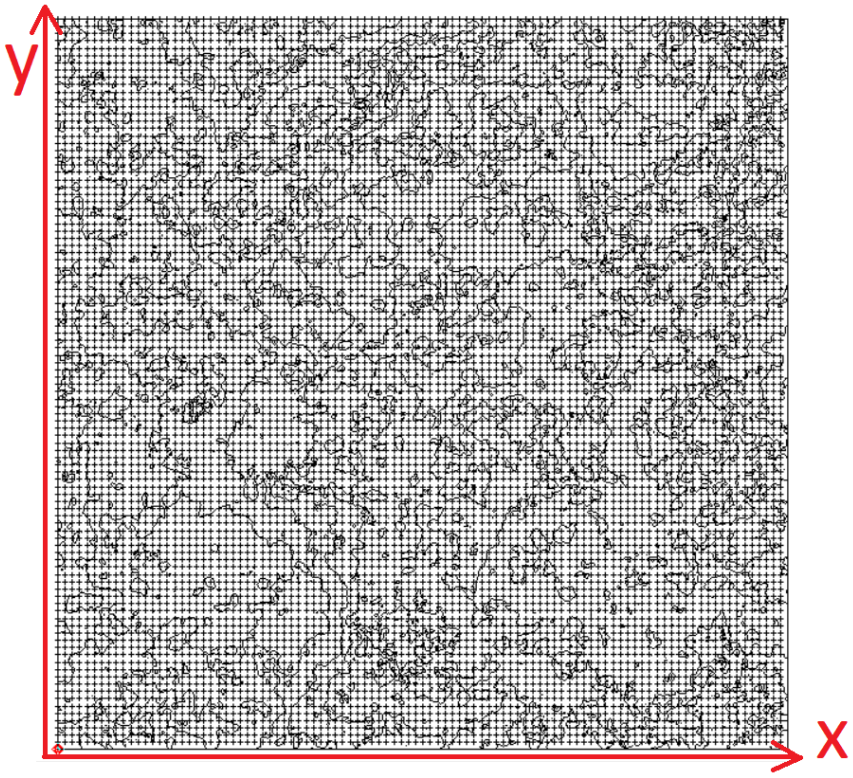


Figura 4.1 Esempio di griglia regolare generata da Surfer.

4.3. Fotogrammetria per la stima della scabrezza

Nonostante la possibilità di poter rapidamente ottenere nuvole di punti 3D ad alta risoluzione ed estremamente accurate sia alla piccola che alla grande scala, pochi sono gli studi relativi alle investigazioni della scabrezza alla scala del sito e l'effetto scala della rugosità (Fardin et al., 2004; Fardin et al., 2004; Haneberg, 2007). Inoltre questi studi non considerano l'influenza della risoluzione della misura e del rumore nella stima della scabrezza, nonostante la sua influenza sia stata notata da molti autori. Di conseguenza, la comprensione della dipendenza della scabrezza dalla scala del problema resta limitata per discontinuità superiori ad un metro quadro. Per questo motivo, nel presente lavoro, al fine di investigare l'effetto di scala, si è scelto di considerare tre diverse scale:

- Provini di laboratorio, della dimensione di 50 x 50 mm;
- Blocchi di circa 1 x 1 metro;
- Porzioni di versante dell'ordine di grandezza di svariati metri.

La generazione dei DSM dei provini alla scala di laboratorio è utile per avere informazioni sulla loro morfologia prima e dopo la prova di taglio: il confronto permette la valutazione del degrado delle superfici a causa dello sfregamento durante la prova, permettendo di analizzare le variazioni morfologiche della rugosità. Alla scala del sito, come si è detto, il vantaggio principale della fotogrammetria è che permette di rilevare superfici molto ampie in maniera molto accurata, azzerando i rischi per gli operatori ove le pareti siano poco accessibili.

4.4. Trattazione dei dati alle diverse scale

La metodologia implementata si basa sull'utilizzo di parametri ricavati sia da rilievi geostrutturali ed analisi di campagna, sia dall'analisi di supporti topografici ed aerofotografici

presentati nel capitolo 5. Le fasi di lavoro postume al rilievo fotogrammetrico, hanno richiesto lo sviluppo di codici *Matlab* appositi e sono sinteticamente schematizzate di seguito:

1. Identificazione delle superfici di interesse: sui singoli elementi in studio, si identificano e ritagliano delle superfici di forma quadrata (passaggio necessario per evitare problemi interpretativi con i risultati elaborati con *Surfer*);
2. Rotazione della nuvola di punti sparsi: si ruotano le nuvole dei punti in modo che il piano che meglio approssima la nuvola diventi orizzontale (codice *Matlab* "*rotazione_punti_piano_medio*" in allegato 9.2.1);
3. Estrazioni dei profili regolari: in funzione della scala dell'elemento, si stabilisce l'intervallo di campionamento minimo $d_{x,min}$ con cui estrarre i profili regolari tramite *Surfer*;
4. Ricampionamento dei profili tramite codice *Matlab* per studiare l'influenza del campionamento nella stima dei parametri di scabrezza (codice *Matlab "z2_r_ricampionamento"* in allegato 9.2.2 e *"ricampionamento_profili"* in allegato 9.2.3);
5. Analisi statistica dei parametri di scabrezza: per tutti i profili estratti e per ogni intervallo di campionamento, si valutano i parametri di scabrezza medi Z_2 ed R_p e la loro deviazione standard (codice *Matlab "analisi_statistica_z2"* in allegato 9.2.4); si individua (se presente) l'intervallo di campionamento di soglia a cui corrisponde la stazionarietà dei parametri di scabrezza ed infine si calcola la funzione densità di frequenza e cumulata corrispondente a tale soglia (codice *Matlab "distribuzione_frequenza_z2"* in allegato 9.2.5);
6. Analisi statistica di JRC: per tutti i profili estratti e per ogni intervallo di campionamento, si stima di *JRC* con formulazioni empiriche proposte in letteratura (codice *Matlab "analisti_statistica_jrc"* in allegato 9.2.6);

7. **Anisotropia**: studio dell'anisotropia dei diversi elementi tramite la stima di Z_2 sui profili radiali delle nuvole di punti opportunamente editate:

   7.1 **Ritaglio circolare**: dalla nuvola quadrata di punti sparsi si ritaglia una superficie circolare;

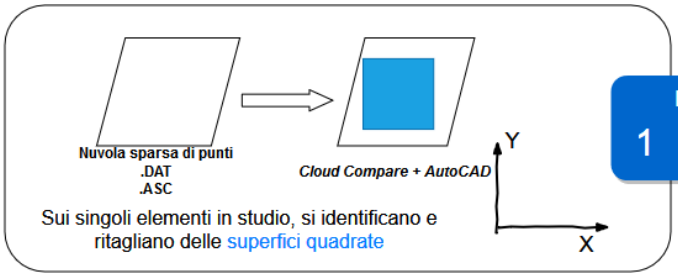
   7.2 **Rotazione della nuvola circolare ogni 5°:** si ottengono 72 nuvole circolari ruotate di 5° le une dalle altre (codice *Matlab* "*ruota_su_360*" in allegato 9.2.7);

   7.3 **Sezione di slice**: si crea con *Surfer* il file .BNL contenente le coordinate della sezione su cui si vuole stimare Z_2;

   7.4 **Estrapolazione dei profili verticali**: si estrapolano i profili verticali dalle 72 nuvole di punti sparsi, li si regolarizzano tramite *Surfer* secondo l'intervallo di campionamento di soglia identificato al passo 5 (codice *Basic* "*anisotropia_surfer*" in allegato 9.3.1);

   7.5 **Diagrammi polari di Z_2**: si stima Z_2 su tutti i profili verticali estratti e se ne realizza il diagramma polare (codice *Matlab "z2_polar_plot"* in allegato 0), evidenziando la presenza o meno di anisotropia tramite un indice che è il rapporto tra il valore minimo e quello massimo stimato:

$$Z_{2,min} / Z_{2,max}$$



Sui singoli elementi in studio, si identificano e ritagliano delle superfici quadrate

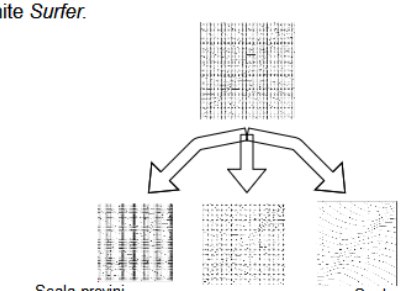
1 Identificazione delle superfici di interesse

Si ruotano le nuvole dei punti in modo che il piano che meglio approssima la nuvola stessa diventi orizzontale

2 Rotazione della nuvola di punti

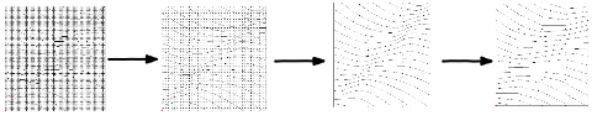
3 Estrazioni dei profili regolari

In funzione della scala dell'elemento, si stabilisce l'intervallo di campionamento minimo $d_{x,min}$ con cui estrarre i profili regolari tramite *Surfer*.



4 Ricampionamento dei profili

Per studiare **l'influenza del campionamento**, fissato il numero dei profili lungo una direzione (x e quindi y) al punto 3, su ognuno di essi si fa variare il passo del campionamento

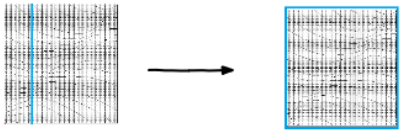


Codici *Matlab* z2_r_ricampionamento + ricampionamento_profili

5 Analisi statistica dei parametri di scabrezza

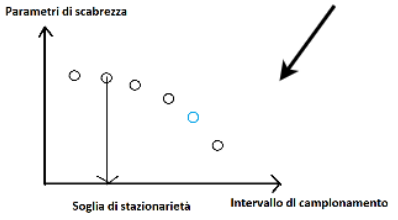
Analisi statistica dei parametri di scabrezza: per tutti i profili estratti e per ogni intervallo di campionamento, si valutano i parametri di scabrezza Z_2 ed R_p e la loro deviazione standard.

Codice *Matlab* analisi_statistica_z2



Dato un intervallo di campionamento, il codice Matlab calcola su ogni singolo profilo Z_2 ed Rp

Al termine dell'elaborazione su tutti i profili (verticali ed orizzontali), per tutti gli intervalli di campionamento si calcola il valore medio dei parametri di scabrezza e la loro deviazione standard



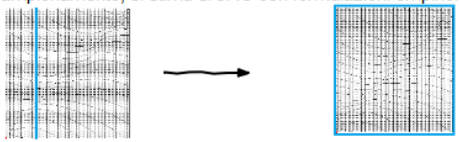
L'analisi statistica sui parametri di scabrezza permette di determinare l'intervallo di campionamento di ***soglia***, intervallo oltre cui i parametri restano circa

Per indagare la variabilità dei parametri di scabrezza sui singoli elementi, si valutano le funzioni di densità di frequenza e la funzione cumulata per l'intervallo di soglia identificato.

Codice *Matlab*
distribuzione_frequenza_z2

6 Analisi statistica di JRC

Analisi statistica di JRC: tramite codice *Matlab*, per tutti i profili estratti e per ogni intervallo di campionamento, si stima di *JRC* con formulazioni empiriche proposte in letteratura



Per ogni intervallo di campionamento, si calcola su ogni singolo profilo JRC

Al termine dell'elaborazione su tutti i profili (verticali ed orizzontali), per tutti gli intervalli di campionamento.si calcola il valore medio JRC e la rispettiva deviazione standard

Codice *Matlab*
analisi_statistica_jrc

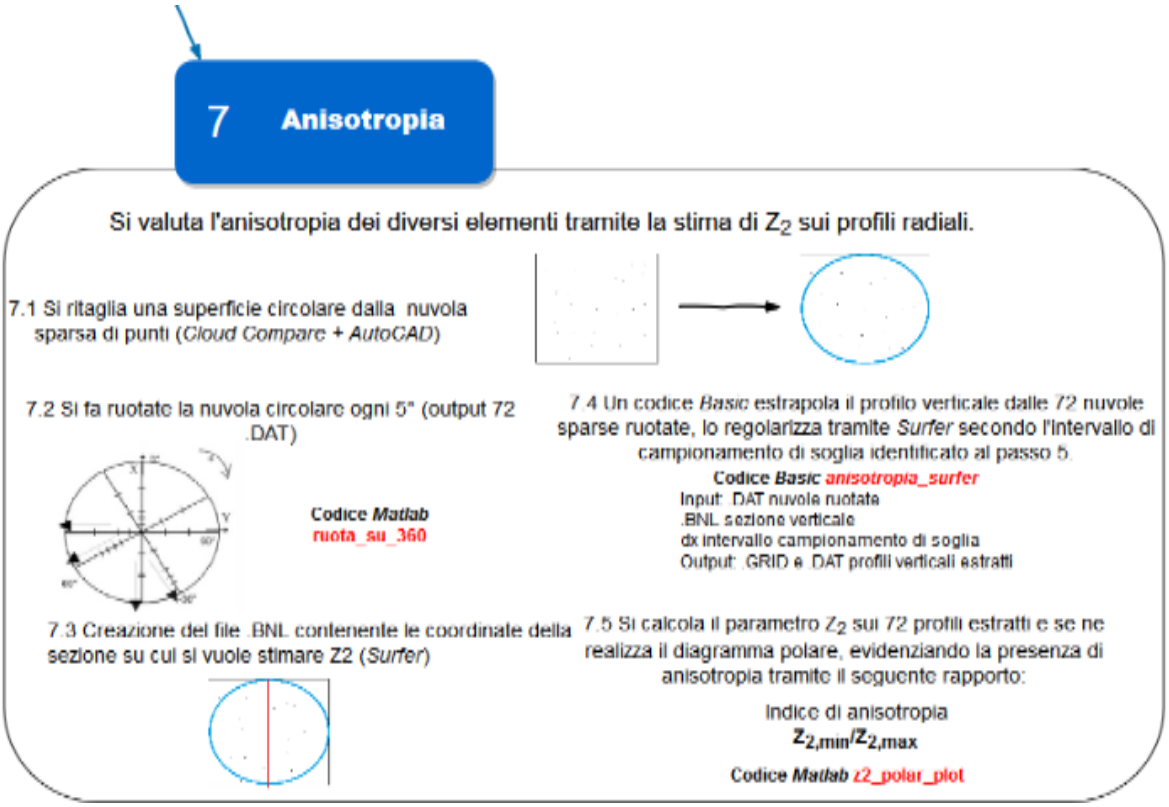


Figura 4.2 Flowchart della metodologia implementata (pagina 44, 45).

L'approfondimento nel dettaglio di ogni passaggio è trattato dal paragrafo 4.4.1 al paragrafo 4.4.7.

4.4.1. Preparazione dei DSM

I DSM sono il punto di partenza per la valutazione della rugosità alle tre scale, devono essere editati per le successive analisi. Il software *Surfer* usato negli step successivi, estrae i profili regolari dai dati di input creando delle griglie quadrangolari sulla nuvola di punti. E' quindi necessario che la nuvola caricata sul software rappresenti effettivamente l'elemento che si vuole studiare. A solo titolo di esempio chiarificatore, si è caricato su *Surfer* il DSM non editato del campione GS2-Top a C1 (Figura 4.3): il file mostra non solo un provino di forma irregolare, ma anche la struttura utilizzata per la ricostruzione fotogrammetrica.

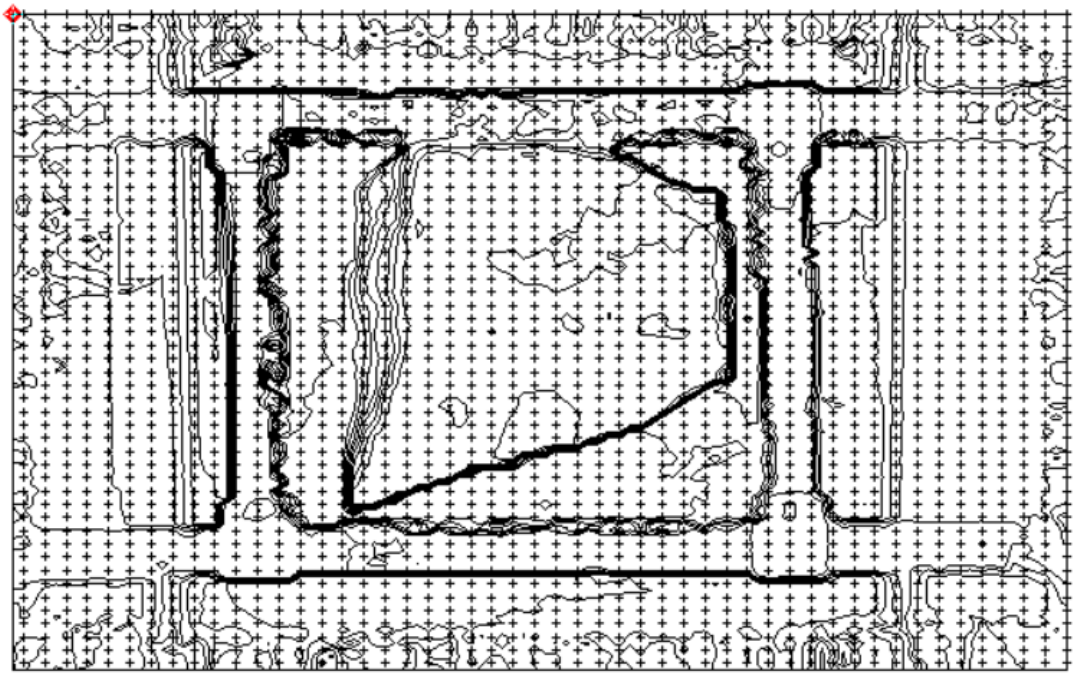


Figura 4.3 DSM caricato su Surfer del campione GS2 Top a C1, nessuna elaborzione della nuvola.

Per evitare errori d'estrapolazione nei profili, le nuvole di punti devono essere ritagliate in modo che il DSM sia composto dai soli punti appartenenti all'elemento oggetto di studio (campione, blocco o parete). I DSM sono quindi modificati tramite il software di elaborazione 3D di nuvole di punti *CloudCompare* da cui sono ritagliati delle superfici quadrate.

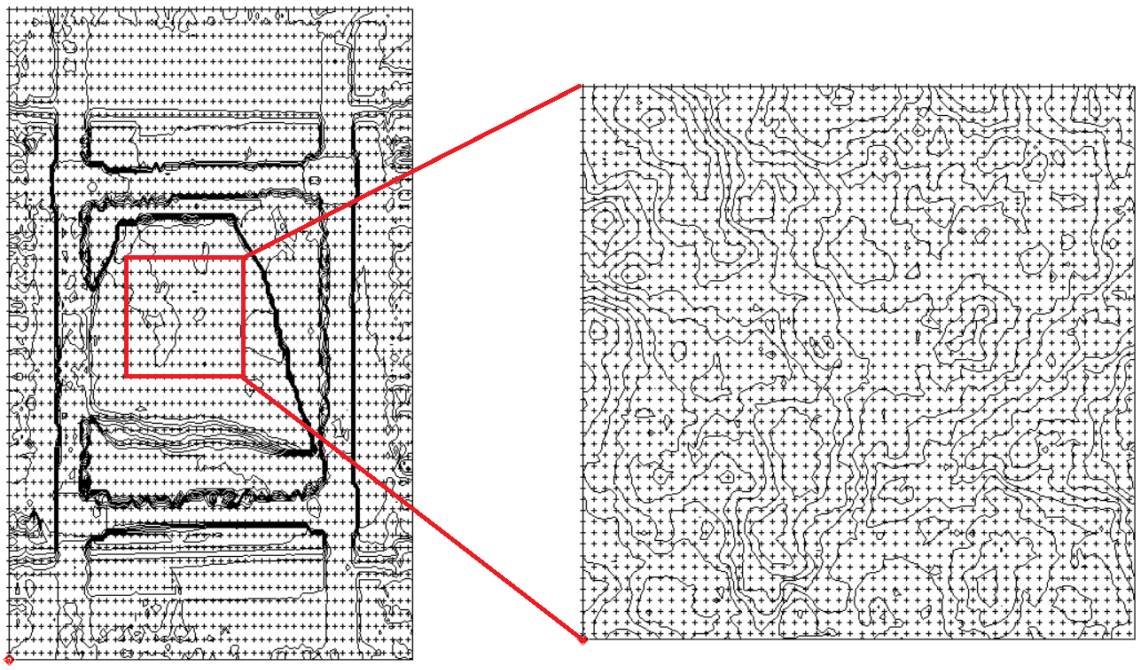


Figura 4.4 Esempio di ritaglio quadrato del DSM del campione GS2 Top a C1.

La polilinea quadrata con cui si ritaglia la superficie viene definita su *AutoCAD*.

I DSM ritagliati hanno dimensioni diverse in base all'elemento studiato, in particolare:

- dai provini sono ritagliate superfici 50 mm x 50 mm;
- dai blocchi sono ritagliate superfici di circa 1 m x 1 m:
    - Blocco 1: 1 m x 1 m;
    - Blocco 2: 1 m x 1 m;
    - Blocco 3: 0,85 m x 0,85 m.
- dalle sezioni del versante sono ritagliate superfici di diversi metri quadri:
    - Parete 1: 3 m x 3 m;
    - Parete 2: 5 m x 5 m;
    - Parete 3: 7 m x 7 m;
    - Parete 4: 4 m x 4 m;
    - Parete 5: 2 m x 2 m.

4.4.2. Rotazione della nuvola

Ad ogni DSM quadrangolare viene associato un piano medio: con un procedimento ai minimi quadrati, viene definito il piano che meglio approssima la superficie di discontinuità. Ogni elemento viene poi fatto ruotare il modo che il suo piano medio ruoti e diventi orizzontale (Figura 4.5). In questo modo, si ottengono delle nuvole di punti di forma quadrata in pianta, i cui piani medi sono orizzontali (codice *Matlab* in allegato *"ruota_punti_piano_medio"* 9.2.1). Questa procedura è necessaria per evitare errori nell'estrapolazione dei profili tramite il software *Surfer*.

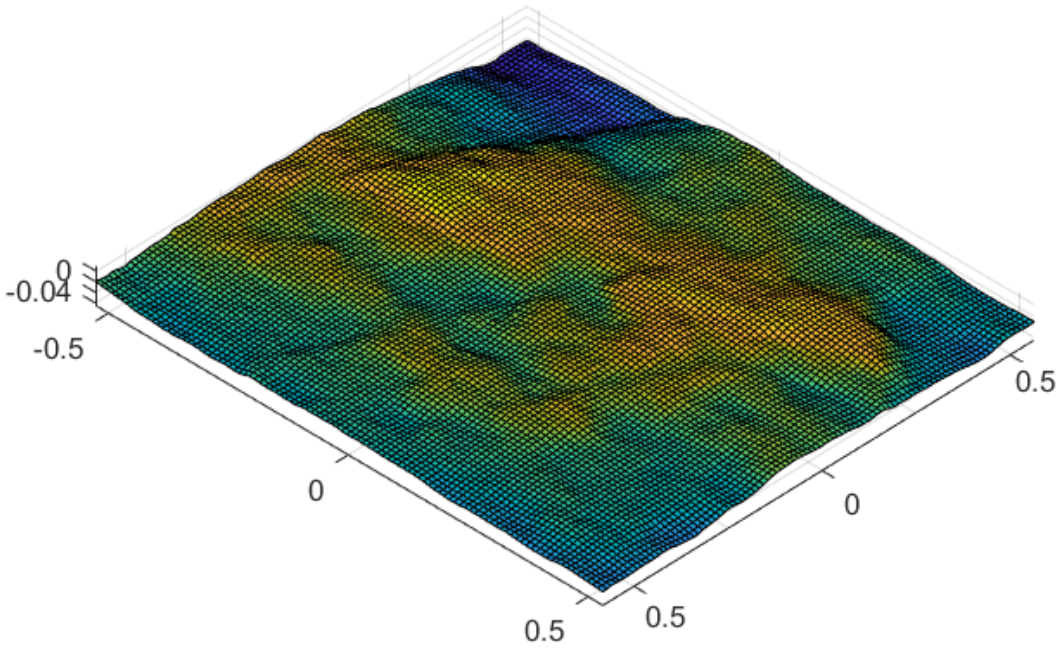


Figura 4.5 Blocco 1, dopo la rotazione del suo piano medio sull'orizzontale.

4.4.3. Estrazione profili regolari con Surfer

La ricostruzione della topografia dell'area di studio sia del versante che dei blocchi e dei campioni del laboratorio, passa per la creazione di una griglia regolare di dati a partire dalla serie di punti sparsi.

Le nuvole dei punti sono costituite da terne di dati (x, y, z) disposte in maniera irregolare. Affinché le elaborazioni forniscano dei risultati omogenei e quindi confrontabili, è necessario che la spaziatura tra i punti sia regolare per tutti gli elementi. Il software *Surfer* elabora la nuvola dei punti come descritto nel capitolo 4.2: partendo da una base di dati disposti in maniera

irregolare, è possibile generare una griglia regolare di punti (matrice delle altezze) ottenuta utilizzando opportuni algoritmi matematici di interpolazione.

Surfer richiede come input il numero di profili che si ha intenzione di estrarre in orizzontale ed in verticale. I profili sovrapposti alla nuvola creano una griglia regolare (Figura 4.6). In ogni posizione ricavata (i nodi della griglia), il software esegue un'interpolazione il cui output è una nuvola di punti nella posizione stabilita dall'utente, in cui ogni punto ha una distanza costante da quelli adiacenti, nelle direzioni x e y. La griglia generata è a maglie quadrate o rettangolare, in base alle impostazioni inziali. L'elevazione z è calcolata con un'interpolazione il cui algoritmo è definito in fase di input. I metodi di interpolazione proposti dal programma per la costruzione della griglia regolare sono molteplici, tra cui: il kriging, la media mobile la regressione polinomiale e la triangolazione con interpolazione lineare. Essendo l'obiettivo finale del lavoro lo studio parametrico dei fattori in gioco nella stima della rugosità della discontinuità, si è ritenuto idonea l'interpolazione lineare.

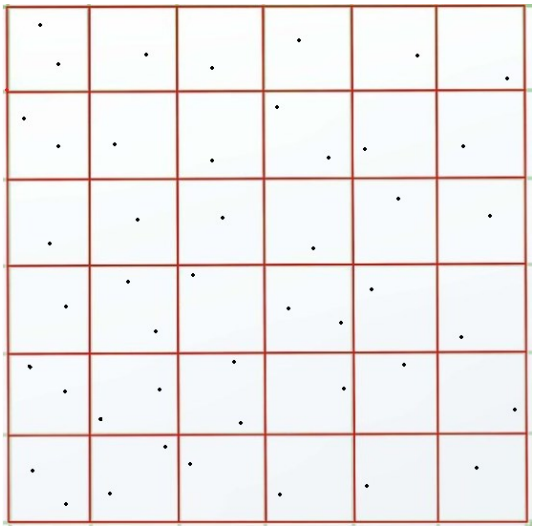


Figura 4.6 A partire da una nuvola di punti sparsi (di colore nero), il software Surfer genera una griglia regolare di punti e l'interpolazione restituisce le altezze in tutti i nodi della griglia (di colore rosso).

La dimensione della griglia, e quindi il numero dei profili regolari da estrarre dalla nuvola di punti sparsi, è funzione della scala dell'elemento e della densità della nuvola stessa. Pertanto in questo lavoro di tesi è stato utilizzato un intervallo di campionamento minimo diverso a seconda della scala studiata e pari a:

- 0,25 mm per i campioni 50 x 50 mm;
- 0,5 mm/m per i blocchi 1 x 1 m;

- Dai 25 mm ai 36 mm per le sezioni del versante.

Stabilito l'intervallo di campionamento minimo per ogni elemento, resta definito il numero di profili orizzontali e verticali estrapolati con *Surfer*.

4.4.4. Campionamento dei profili

Il profilo di rugosità di una discontinuità in roccia naturale è un dato continuo, mentre i dati digitalizzati del profilo di rugosità tramite dispositivi di misurazione sono disponibili solo a un certo intervallo di spaziatura orizzontale e verticale. L'intervallo di campionamento ha un ruolo fondamentale per ottenere delle stime accurate dei parametri di rugosità (Yu & Vayssade, 1991; Yang et al., 2001; Tatone & Grasselli, 2010; Jang et al., 2014; Fathi et al., 2016). Tuttavia, ad oggi non ci sono linee guida generali per determinare la risoluzione più opportuna per la misurazione della scabrezza delle discontinuità (Tatone & Grasselli, 2013). Nella pratica ingegneristica, i profili vengono generalmente misurati con il pettine di Barton che è in grado di ottenere misurazioni orizzontali tra 0,5 e 1 mm (Figura 4.7).

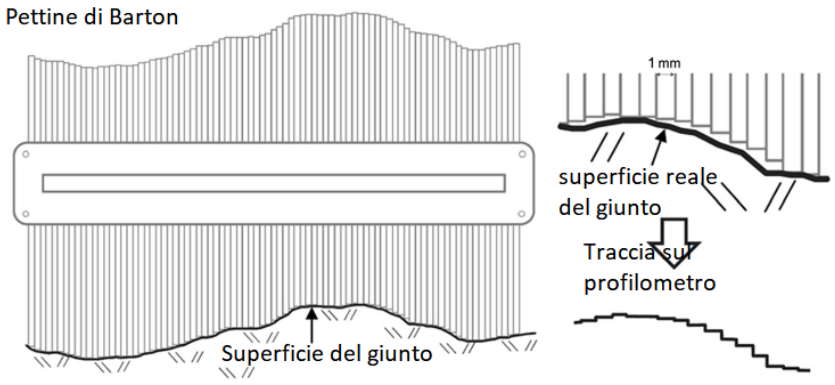


Figura 4.7 Uso del profilometro o Pettine di Barton, i profili vengono rilevati con un intervallo di campionamento di solito compreso nel range 0.5-1 mm. (Tatone & Grasselli, 2010).

L'intervallo di campionamento di 0,5 mm potrebbe indicare più dettagliatamente le irregolarità geometriche delle discontinuità, e le correlazioni tra i parametri statistici e i valori JRC sono stati

studiati nella letteratura precedente utilizzando lo stesso intervallo di campionamento (Yu & Vayssade, 1991; Yang, Di, et al., 2001; Tatone & Grasselli, 2010).

Per valutare l'effetto del campionamento, si è seguito il seguente procedimento: dato una nuvola di punti sparsi, ritagliata in modo che sia quadrangolare e ruotata sull'orizzontale, stabilito il numero dei profili verticali e orizzontali (e quindi il passo minimo, come descritto al paragrafo 4.4.3), si fa variare la distanza tra i punti che li costituiscono.

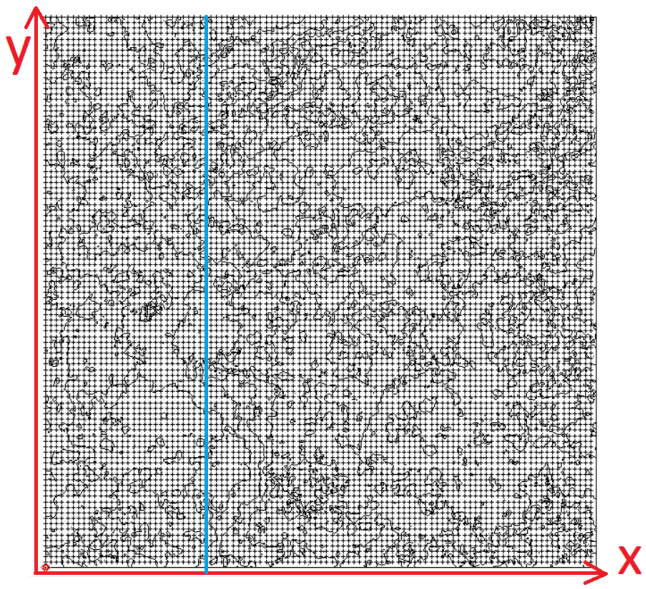


Figura 4.8 Generico DSM grigliato su Surfer con indicati il sistema di riferimeto XY in rosso, ed in azzurro l'i-esimo profilo verticale, per un certo valore di x = cost.

Per ognuno dei profili verticali (in Figura 4.8 è evidenziato l'i-esimo profilo verticale), viene fatto variare il passo di campionamento, cioè vengono assunti dy variabili tra un valore minimo ed un valore massimo stabiliti in base alle dimensioni dell'elemento. La Figura 4.9 mostra un esempio di generazione di profili per diversi intervalli di campionamento: a partire dalla *Base Line*, sono generati tre profili tramite il metodo di spostamento casuale del punto medio. Lo studio sui passi di campionamento è condotto tramite codice *Matlab* (codice Matlab in allegato *"z2_rp_ricampionamento"* 9.2.2 e "*ricampionamento_profili"* 9.2.3).

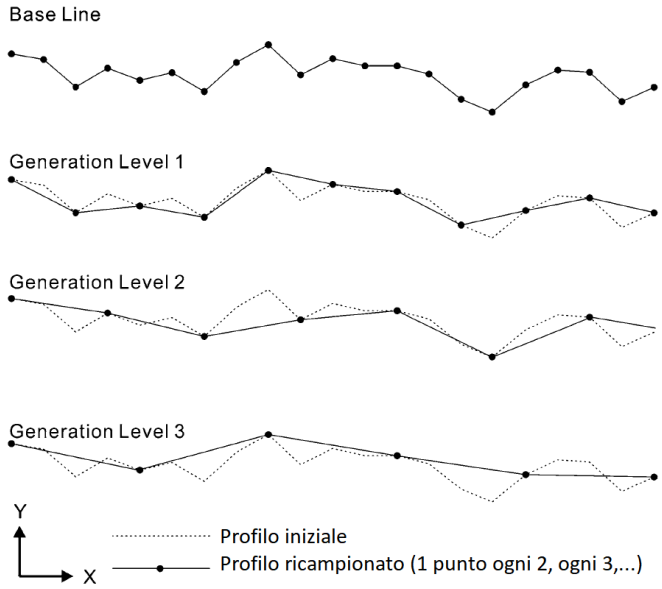


Figura 4.9 Esempio di generazione di profili in diverse risoluzioni.

Il profilo diventa più regolare quando l'intervallo di campionamento è più ampio: le ondulazioni irregolari tra le spaziature orizzontali minori vengono trascurate. Pertanto, i valori Z_2, e quindi JRC, dipendono dall'intervallo di campionamento scelto. I parametri della scabrezza vengono stimati per tutti i profili individuati sull'elemento e per ogni passo di campionamento.

Il procedimento si ripete fissando i profili orizzontali e facendone variare il campionamento lungo x (profili a y costante).

Gli intervalli di campionamento usati nel presente lavoro di tesi variano con il tipo di elemento oggetto di studio. L'inclinazione Θ_i delle asperità è valutata con l'equazione:

$$\theta_i = arctan\left(\sqrt{\left(\frac{z_{i+1} - z_i}{x_{i+1} - x_i}\right)^2}\right)$$

in Θ_i è l'angolo di inclinazione locale apparente dell'asperità e (x_i, z_i) i punti di cui è costituito il profilo. All'aumento dell'intervallo di campionamento, aumenta il numero delle asperità con inclinazione elevata. I profili esaminati a risoluzione 0.5 mm mostrano molte più irregolarità

geometriche; a risoluzione ridotta, l'accuratezza diminuisce. Quindi la digitalizzazione della superficie del giunto con una ridotta risoluzione, porta alla perdita delle caratteristiche iniziali della superficie, un processo noto come "aliasing". La risoluzione influenza sia i parametri statistici che frattalli, in particolare l'aliasing porta alla sottostima dei parametri di scabrezza. L'utilizzo di una risoluzione coerente con l'obiettivo preposto è fondamentale quando si usano criteri di resistenza al taglio che inglobano i parametri di scabrezza. Questi criteri si basano su parametri derivati da misure acquisite a specifiche risoluzioni, quindi un errore nella sua scelta porta ad errori significativi nella stima della resistenza al taglio del giunto.

Resta incerta la questione su quale sia la risoluzione ideale per caratterizzare la scabrezza. Al momento non ci son linee guida per determinare quale sia la risoluzione (spaziatura nominale dei punti) da usare nella stima della scabrezza delle discontinuità. Secondo Reeves (1985), il campionamento dovrebbe rilevare tutte quelle frequenze rilevanti nei riguardi del problema a cui i dati sono applicati.

Pertanto per studiare l'influenza del campionamento, fissato il numero dei profili lungo una direzione (x e quindi y) come descritto al paragrafo 4.4.3, su ognuno di essi si fa variare il passo del campionamento. In particolare:

- Per i blocchi, si è scelto fissare a 2000 il numero massimo dei profili individuati nelle due direzioni ortogonali, cui corrisponde un passo adimensionalizzato rispetto la lunghezza del blocco di 0,50 mm/m. Per studiare la dipendenza dei parametri di rugosità con il campionamento, il passo viene fatto variare su ogni profilo secondo questo andamento:

Tabella 4.1 Campionamento effettuato sui tre blocchi per valutare l'influenza della risoluzione sulla scabrezza.

Blocchi		
Griglia	***Punti per profilo***	***Passo [mm/m]***
2000x2000	2000	0,50
2000x1000	1000	1,00
2000x500	500	2,00
2000x250	250	4,02
2000x200	200	5,03
2000x100	100	10,10
2000x50	50	20,41
2000x25	25	41,7

- Per i campioni 50x50mm^2 si sono fissati 200 profili nelle due direzioni su cui si è fatto variare il passo di campionamento:

Tabella 4.2 Campionamento effettuato sui tre campioni per valutare l'influenza della risoluzione sulla scabrezza.

Provini		
Griglia	***Punti per profilo***	***Passo [mm]***
200x200	200	0,25
200x100	100	0,51
200x50	50	1,02
200x40	40	1,28
200x25	25	2,08
200x20	20	2,63
200x10	10	5,56

- Per le sezioni di versante si è scelto un approccio parzialmente diverso a causa della differenza dimensionale delle porzioni di versante oggetto di studio. Le griglie sono diverse, il passo minimo varia tra 25 mm e 36 mm, il passo massimo tra i 266 mm ed i 385 mm.

Tabella 4.3 Campionamento effettuato sulle porzioni di versante per valutare l'influenza della risoluzione sulla scabrezza.

Versante									
Parete 1		***Parete 2***		***Parete 3***		***Parete 4***		***Parete 5***	
3 m x 3 m	**Passo [mm]**	***5 m x 5 m***	**Passo [mm]**	***7 m x 7 m***	**Passo [mm]**	***4 m x 4 m***	**Passo [mm]**	***2 m x 2 m***	**Passo [mm]**
90 x 90	33,7	140 x 140	36,0	200 x 200	35,2	160 x 160	25,2	72 x 72	28,2
90 x 45	68,2	140 x 70	72,5	200 x 100	70,7	160 x 80	50,6	72 x 36	57,1
90 x 30	103,4	140 x 35	147,1	200 x 50	142,9	160 x 40	102,6	72 x 24	87,0
90 x 18	176,5	140 x 28	185,2	200 x 40	179,5	160 x 32	129,0	72 x 18	117,6
90 x 15	214,3	140 x 20	263,2	200 x 25	291,7	160 x 20	210,5	72 x 12	181,8
90 x 10	333,3	140 x 14	384,6	200 x 20	368,4	160 x16	266,7	72 x 9	250,0
90 x 9	375,0	140 x 10	-	-	-	-	-	72 x 8	285,7

4.4.5. Valutazione parametri di scabrezza: Z_2, Rp, Rs

Per tutti gli elementi considerati alle diverse scale, per ogni intervallo di campionamento definito al paragrafo 4.4.4 e per ogni profilo estratto, si stimano i parametri di scabrezza Z_2, R_p ed R_s con le formulazioni riportate nel capitolo 3.2. Per ogni intervallo di campionamento, si calcolano media e varianza dei suddetti parametri e si plottano i risultati in forma grafica per poterne meglio apprezzare le variazioni (codice *Matlab* in allegato *"analisi_statistica_z2" 9.2.4*).

In questa fase è possibile individuare l'intervallo di campionamento di soglia a cui corrisponde la stazionarietà dei parametri di scabrezza. Con la stima di Z_2 per i diversi intervalli di campionamento, si ottengono dei grafici simili a quello riportato in Figura 4.10: si osserva un limite inferiore del passo oltre cui l'accuratezza nella stima di Z_2 non cambia in maniera apprezzabile. Quel limite inferiore corrisponde alla risoluzione minima con cui deve essere rilevato il profilo e quindi il passo di campionamento minimo per avere delle stime attendibili della scabrezza, limitando i costi in termini di tempo speso per l'elaborazione tramite il calcolatore.

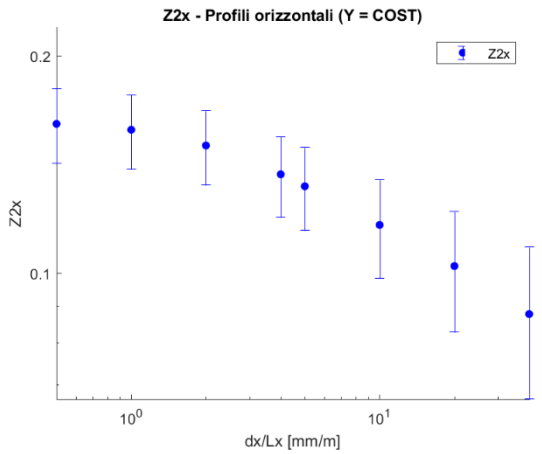


Figura 4.10 Z_{2x} stimato per il blocco1, per i diversi intervalli di campionamento.

Infine, per indagare la variabilità dei parametri di scabrezza sui singoli elementi, si valutano le funzioni di densità di frequenza e la funzione cumulata per l'intervallo di soglia identificato (codice *Matlab* in allegato *"distribuzione_frequenza_z2" 9.2.5*).

4.4.6. Stima di JRC con formulazioni da letteratura

Per tutti i profili estratti e per ogni intervallo di campionamento, si calcola il parametro *JRC* (codice *Matlab* in allegato *"analisi_statistica_jrc" 9.2.6*) tramite le seguenti formule di letteratura:

$JRC = 32.2 + 32.47 \cdot Log_{10}(Z_2)$ Tse and Cruden [1979]

$JRC = 37.28 + 16.58 \cdot Log_{10}(SF)$ Tse and Cruden [1979]

$JRC = 32.69 + 32.98 \cdot Log_{10}(Z_2)$ Yang et al. [2001]

$JRC = 37.63 + 16.5 \cdot Log_{10}(SF)$ Yang et al. [2001]

$JRC = 55.03(Z_2)^{0.74} - 6.10\ (\mathrm{SI}{=}1.0\ \mathrm{mm})$ Tatone and Grasselli [2010]

4.4.7. Anisotropia

Per valutare l'anisotropia di una superficie è necessario considerare profili orientati in diverse direzioni sull'elemento studiato. La seguente procedura è stata eseguita per i blocchi, per i campioni e per le porzioni di versante.

Per ottenere risultati coerenti, il calcolo dei parametri di scabrezza deve essere effettuato su profili della stessa lunghezza, di conseguenza i DSM quadrangolari vengono elaborati con *CloudCompare* e *AutoCad* [2] al fine di ricavare delle nuvole perfettamente circolari

[2] https://www.autodesk.it/

da cui poterli estrarre. Dalla nuvola così ottenuta, si stima Z_2 in tutte le direzioni radiali a distanza 5°.

Il procedimento è eseguito tramite codici di calcolo. La nuvola di punti sparsi viene fatta ruotare di 5° per 71 volte (codice *Matlab* in allegato *"ruota_su_360" 9.2.7*): si ottengono 72 nuvole di punti sparsi ruotate di 5° le une dalle altre in formato ".DAT". Dalle 72 nuvole, si estraggono i profili verticali e li si regolarizzano (codice *Basic* in allegato *"anisotropia_surfer" 9.3.1*) secondo l'intervallo di soglia definito in precedenza; il codice in input richiede oltre alle nuvole ed al passo di campionamento, anche il file .BNL contenente le coordinate del profilo verticale (definito tramite *Surfer*). Infine si stima Z_2 su tutti i profili verticali estratti e se ne realizza il diagramma polare (codice *Matlab* in allegato "*z2_polar_plot" 9.2.8*).

Il passo di campionamento con cui si regolarizza il profilo verticale prima di calcolare Z_2 è stato scelto in base allo studio parametrico condotto sui parametri di scabrezza (Z_2, Rp): il passo scelto è quello a cui corrisponde un andamento pressoché invariato dei parametri di scabrezza:

- Per i blocchi si considera un passo di 1 mm;
- Per i campioni si considera 0,50 mm;
- Per le porzioni di versante non si giunge ad un valore asintotico, probabilmente a causa della bassa risoluzione dei DSM, per cui si usa il passo minimo tra quelli considerati.

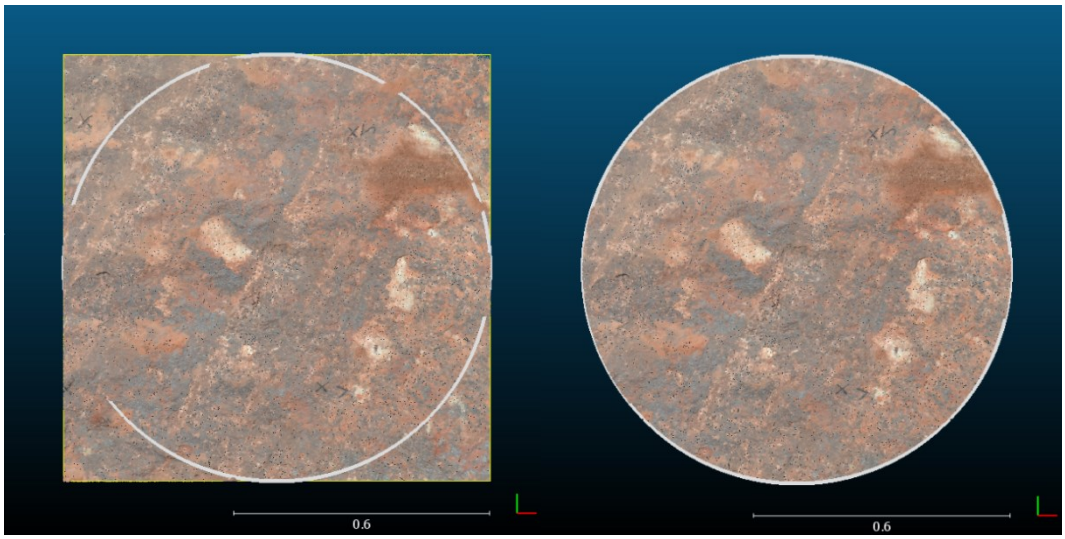


Figura 4.11 DSM del blocco 1 tagliato affinché la nuvola per lo studio dell'anisotropia sia circolare.

Dalla stima radiale di Z_2 si ricava il rapporto $Z_{2,min}/Z_{2,max}$, cioè il rapporto tra il valore minimo e quello massimo stimato. Esso risulta un indice dell'anisotropia dell'elemento oggetto di studio: il rapporto si discosta dall'unità quanto più si evidenzia anisotropia della superficie.

5. Caso di studio: crollo versante in roccia, Sinigo Merano (BZ)

Per lo svolgimento della ricerca, il caso di studio preso a riferimento è il crollo di un versante roccioso verificatosi a Sinigo Merano (BZ): nel febbraio del 2014, si sono verificati diversi crolli in roccia ai danni di diversi capannoni industriali. In particolare, si sono susseguiti due eventi minori, il 3 e 5 febbraio 2014, ed un evento di maggiore entità il 23 febbraio, in cui un volume di circa 7300 m^3 di materiale roccioso si è distaccato da pendio a ridosso della zona produttiva di Sinigo.

Figura 5.1 Stato della parete rocciosa in questione subito dopo l'evento del 05/02/2014 (Ferrero & Montepara, 2015)..

Figura 5.2 Materiale roccioso depositatosi ai piedi della parete a causa dell'evento del 05/02/2014 (Ferrero & Montepara, 2015).

Figura 5.3 Parete rocciosa in questione e materiale franato così come si presentavano subito dopo l'evento del 24 febbraio 2014 (Ferrero & Montepara, 2015).

L'evento ha causato danni stimati per circa quattro milioni di euro. A seguito di perizie tecniche (Ferrero & Montepara, 2015), è stato descritto come parzialmente prevedibile: la zona è infatti classificata come *"zona a rischio geologico ed idrogeologico a rischio controllato"* (art. 1 comma 5 lettera b D.P.G.P. N.5/1998 Piano Urbanistico Comunale), e nelle relazioni geologiche si dichiara che "ad intervalli regolari, principalmente in seguito a prolungate piogge, si ha il distacco di singoli cunei di roccia". Tuttavia la causa scatenante del crollo è stata attribuita alle precipitazioni con caratteristiche di eccezionalità (Ferrero & Montepara, 2015). Essendo dunque la magnitudo dell'evento fortemente condizionata anche dall'entità della causa scatenante, non è possibile in fase progettuale stimare con certezza crolli analoghi a quello verificatosi. Di certo, l'eccezionalità dell'evento piovoso (T>100 anni, Tabella 5.1.) incrementa

la saturazione del terreno aumentando le probabilità di un evento di magnitudo maggiore rispetto a quella prevedibile.

Tabella 5.1 Valutazione del tempo di ritorno per l'altezza di pioggia registrata per il periodo Dicembre 2013-Febbraio 2014.

Nome della stazione		**Valore di pioggia Dicembre 2013 - Febbraio 2014**	**Quantile 100-nnale**	**Tempo di ritorno**
		[mm]	[mm]	[anni]
2090	(Plata)	554.6	505.8	100-200
2320	(Merano)	360.6	313.3	100-200
2670	(Pavicolo)	186.0	488.6	<50
7560	(Fiè)	288.9	272.3	100-200
8320	(Bolzano)	380.5	324.5	100-200
8882	(Salorno)	420.3	473.7	50-100

Per quanto riguarda la fase di raccolta dati, è stato predisposto un dettagliato rilievo geostrutturale e geomeccanico, al quale è stato affiancato l'uso di tecnologie innovative per il rilievo di versanti in roccia, quali il rilievo fotogrammetrico. In particolare, i rilievi geostrutturali e la realizzazione dei DSM sono stati effettuati su:

1. Tre campioni di riodacite (ordine di grandezza 10 x 10 cm) prelevati dal materiale franoso. I campioni (GS1, GS2, GS3) provengono dallo stesso blocco e contengono una discontinuità;
2. Tre blocchi (ordine di grandezza 1 x 1 metro) distaccatisi dal versante durante il crollo;
3. Porzioni del versante interessato dalla frana (ordine di grandezza 5 x 5 metri).

5.1. Caso di studio: rilievo geostrutturale e geomeccanico

La campagna di rilievi geostrutturali e geomeccanici eseguiti in studi precedenti (Ferrero & Montepara, 2015). ha fornito tutte le informazioni necessarie per caratterizzare l'ammasso roccioso. Le grandezze sono state misurate secondo le procedure stabilite dalla normativa internazionale (ISMR, 1978), in particolare la resistenza a compressione monoassiale della

roccia intatta è stata stimata mediante Point Load Test, la resistenza a compressione della discontinuità con lo sclerometro. I risultati specifici del rilievo geostrutturale sono riportati nella Tabella 5.2, Tabella 5.3 e

Tabella 5.4.

Utilizzando l'abaco di Figura 2.14 per la correlazione dell'indice di durezza di Schmidt con il parametro JCS, considerando la densità della roccia pari a 26 kN/m^3, si sono ottenuti valori di JCS compresi tra 48 e 70 MPa (Tabella 5.2).

Tabella 5.2 JCS ottenuti mediante sclerometro sui 3 blocchi, con indicazione delle direzioni di prova (Ferrero & Montepara, 2015).

Blocco 1		Blocco 2	Blocco 3
↓	→	↙	↙
54	48	66	60
68	62	66	58
68	66	66	56
58	60	62	58
64	48	68	62
70	52	70	64
58	62	66	62
62	60	70	48
64	60	68	58

Tabella 5.3 Riepilogo delle misurazioni e dei valori di resistenza ottenuti tramite Point Load Test (Ferrero & Montepara, 2015).

Campione	D	P	De²	De	Is	F	Is (50)	Eq. USC strength
	[mm]	[kN]	[mm²]	[mm]	[MPa]	[-]	[MPa]	[MPa]
1	56	9.55	3993	63.2	2.39	1.11	2.66	58.5
2	58	12.44	4283	65.4	2.90	1.13	3.28	72.1
3	72	9.96	6600	81.2	1.51	1.24	1.88	41.3
4	55	6.64	3852	62.1	1.72	1.10	1.90	41.8
5	61	2.5	4738	68.8	0.53	1.15	0.61	13.4
6	30	5.9	1146	33.9	5.15	0.84	4.32	95.0
7	61	3.4	4738	68.8	0.72	1.15	0.83	18.2
8	30	7.5	1146	33.9	6.54	0.84	5.49	120.8
9	42	10.37	2246	47.4	4.62	0.98	4.51	99.2
10	33	5.45	1387	37.2	3.93	0.88	3.44	75.7
11	42	8.6	2246	47.4	3.83	0.98	3.74	82.2
12	54	13.77	3713	60.9	3.71	1.09	4.05	89.2

13	88	7	9860	99.3	0.71	1.36	0.97	21.3
14	52	25.25	3443	58.7	7.33	1.07	7.88	173.4
15	44	15.74	2465	49.6	6.39	1.00	6.37	140.0
16	63	11.05	5053	71.1	2.19	1.17	2.56	56.4
17	65	7.9	5379	73.3	1.47	1.19	1.74	38.4
18	75	18.52	7162	84.6	2.59	1.27	3.28	72.1
19	84	24.76	8984	94.8	2.76	1.33	3.68	80.9
20	95	18.1	11491	107.2	1.58	1.41	2.22	48.8
21	47	20.7	2813	53.0	7.36	1.03	7.56	166.3
22	57	16.2	4137	64.3	3.92	1.12	4.39	96.5
23	66	14.1	5546	74.5	2.54	1.20	3.04	66.9
24	41	18.42	2140	46.3	8.61	0.97	8.31	182.8
25	31	10.43	1224	35.0	8.52	0.85	7.26	159.7
26	53	20.75	3577	59.8	5.80	1.08	6.29	138.3
27	60	20.9	4584	67.7	4.56	1.15	5.23	115.0
28	65	14.7	5379	73.3	2.73	1.19	3.25	71.4
29	43	10.6	2354	48.5	4.50	0.99	4.44	97.7
30	29	1.8	1071	32.7	1.68	0.83	1.39	30.6
31	37	1.3	1743	41.8	0.75	0.92	0.69	15.1
								Valore Medio 83,2 MPa

Tabella 5.4 Intervalli di qualità usati per la classificazione delle rocce (ISRM, 1978). Sottolineati in grassetto gli intervalli e le relative classi in cui può essere inserita la roccia (Ferrero & Montepara, 2015).

UCS Strength [MPa]	***Class***
0.6 - 1	extremely weak
1 - 5	very weak
5 - 25	weak
25 - 50	medium strong
50 - 100	**strong**
100 - 250	**very strong**
> 250	extremely strong

Studi precedenti hanno comportato le rilevazioni sistematiche delle principali proprietà fisico meccaniche caratterizzanti il materiale roccioso: sono state effettuate prove di taglio diretto il laboratorio per la determinazione le caratteristiche meccaniche in condizioni di picco e residue, lo JCS e JRC. Le prove sono state condotte mediante una scatola di taglio di Hoek. Tre campioni di riodacite sono stati prelevati dal materiale franoso e sono sottoposti a prove sperimentali presso il Laboratorio di Geologia Applicata del Dipartimento di Scienze della Terra

"Ardito Desio" di Milano. I campioni (GS1, GS2, GS3) provengono dallo stesso blocco e contengono una discontinuità.

Nel dettaglio, i campioni sono stati sottoposti a prove di taglio diretto suddivise in 5 cicli (Figura 5.4, Figura 5.5 e Figura 5.6).

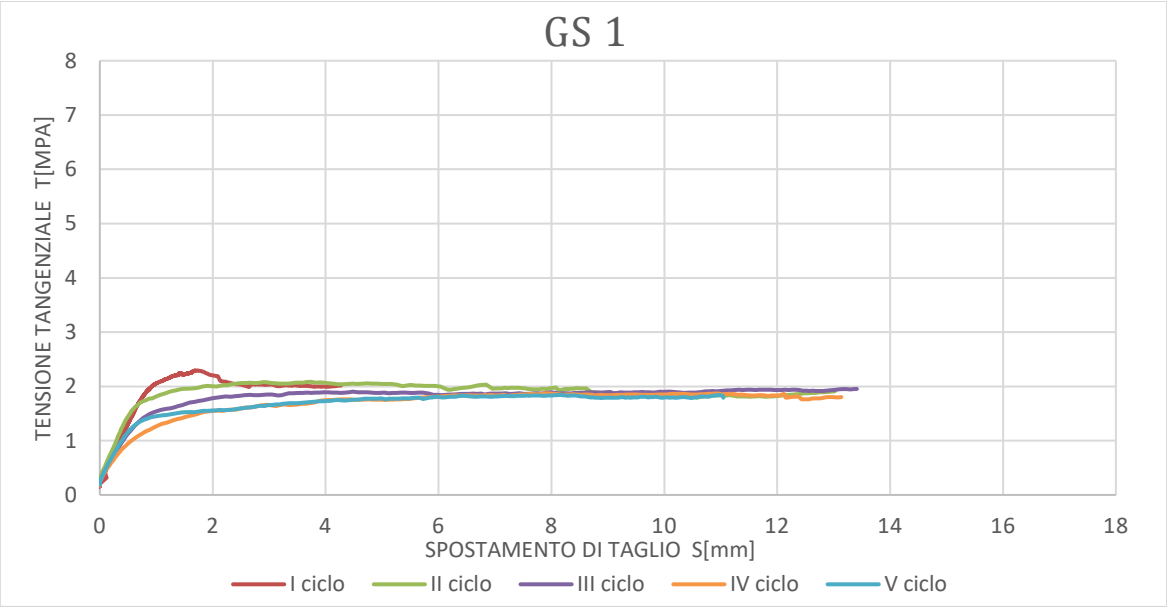


Figura 5.4 Prova taglio diretto su campione GS1, grafico tensione tangenziale-spostamento di taglio.

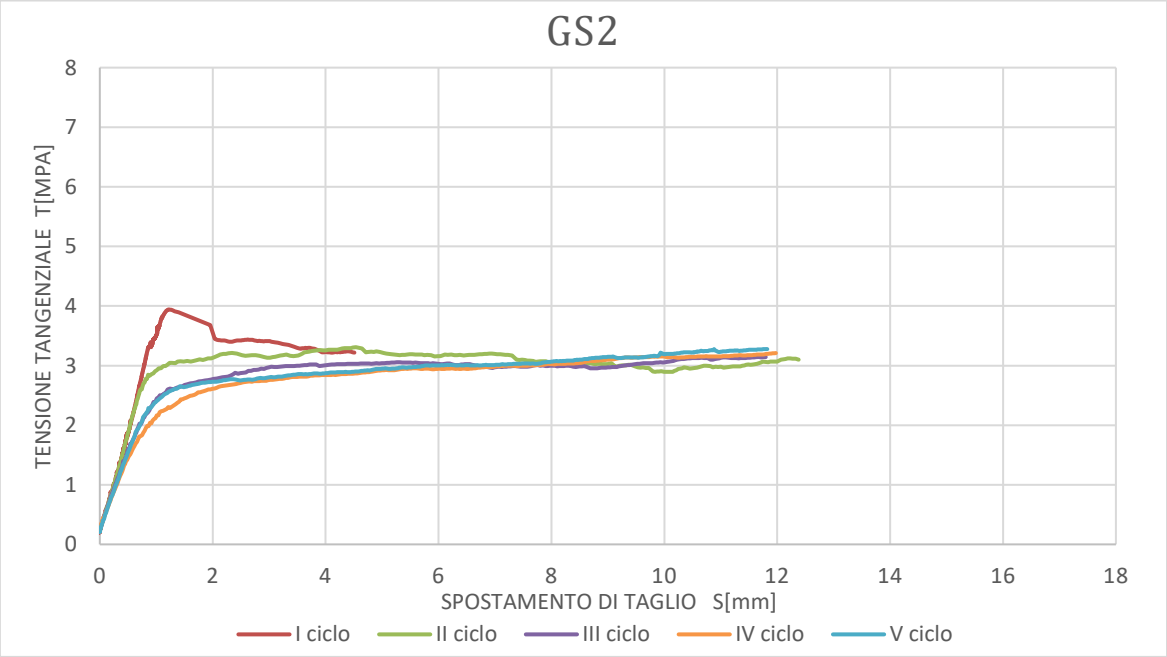


Figura 5.5 Prova taglio diretto su campione GS2, grafico tensione tangenziale-spostamento di taglio.

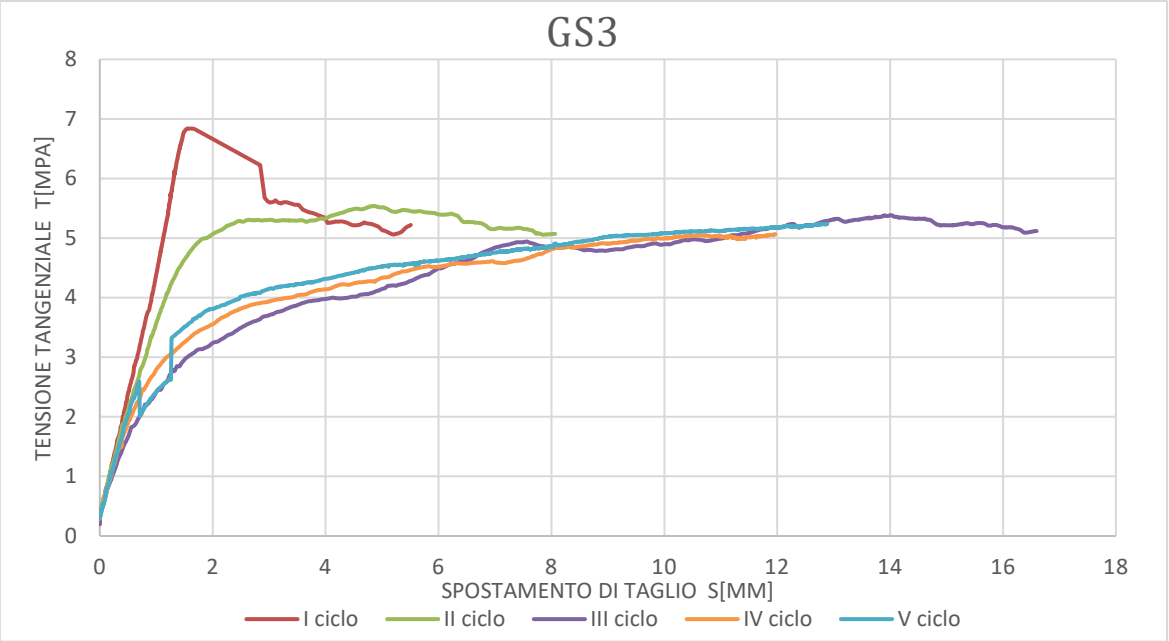


Figura 5.6 Prova taglio diretto su campione GS3, grafico tensione tangenziale-spostamento di taglio.

Tabella 5.5 GS1, GS2, GS3: resistenza di picco e residuo stimata in seguito alle prove di taglio diretto.

Test	σ_n [MPa]	$\tau_{picco/max}$ [MPa]	$\tau_{residuo}$ [MPa]
GS1_1	1.55	2.29	1.94
GS1_2	1.55	2.08	1.80
GS1_3	1.55	1.95	1.95
GS1_4	1.55	1.80	1.80
GS1_5	1.55	1.84	1.80
GS2_1	2.89	3.94	3.22
GS2_2	2.89	3.31	3.10
GS2_3	2.89	3.15	3.10
GS2_4	2.89	3.20	3.20
GS2_5	2.89	3.28	3.28
GS3_1	5.39	6.84	5.06
GS3_2	5.39	5.50	5.07
GS3_3	5.39	5.35	5.12
GS3_4	5.39	5.18	5.18
GS3_5	5.39	5.23	5.23

Il valore di JRC è ottenuto con un procedimento in *back analysis* dal criterio di resistenza di Barton:

$$\tau_{picco} = \sigma_n \tan\left[\Phi_r + JRC \log_{10}\left(\frac{JCS}{\sigma_n}\right)\right]$$

In cui:

- σn tensione assiale a cui sono condotte le tre prove;

- Φr angolo residuo pari a 45,5°, stimato a partire dal criterio di resistenza residuo tramite una regressione lineare sui valori ottenuti al quinto ciclo:

$$\tau = \sigma \cdot tan\Phi_r$$

Tabella 5.6 Valori di resistenza residua (τresiduo) relativi al quinto ciclo.

V CICLO		
	σ_n	$\tau_{residuo}$
	[MPa]	***[MPa]***
GS1	1.55	1.79
GS2	2.89	3.16
GS3	5.39	4.85

- JCS pari a 52,5 MPa valutata con test sclerometrico sul campione GS3;
- JRC parametro di scabrezza, per la cui stima si considerano i dati di picco al primo ciclo delle tre prove di taglio (Tabella 5.7).

Tabella 5.7 Valori di resistenza residua (τresiduo) e di picco (τpicco) relativi al primo ciclo.

I CICLO			
	σ_n	τ_{picco}	$\tau_{residuo}$
	[MPa]	***[MPa]***	***[MPa]***
GS1	1.55	2.29	1.94
GS2	2.89	3.94	3.22
GS3	5.89	6.84	5.06

Operando in *back analysis* sull'inviluppo di picco (Figura 5.7, Tabella 5.8) , si ottiene un valore di JRC pari a 7,4 MPa.

Tabella 5.8 Valori di resistenza di picco ottenuti in back analysis dall'inviluppo di Barton.

Back-analysis		
	σ_n [Mpa]	τ_{picco} [Mpa]
0	0.00	0.00
1	0.50	0.87
2	1.00	1.57
3	1.55	2.29
4	2.00	2.87
5	2.50	3.49
6	2.89	3.96
7	3.00	4.09
8	3.50	4.68
9	4.00	5.25
10	4.50	5.82
11	5.00	6.19
12	5.39	6.82
13	5.50	6.94
14	6.00	7.49
15	6.50	8.03
16	7.00	8.57

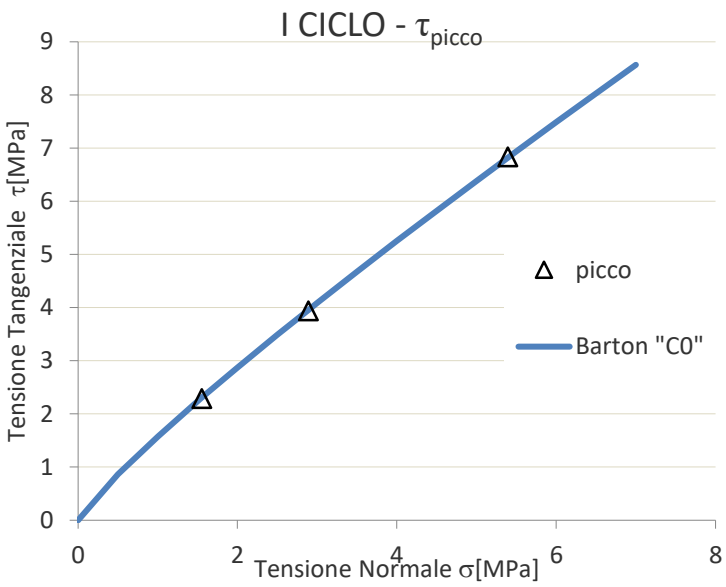


Figura 5.7 Inviluppo di Barton ottenuto in back analysis in azzurro; sono evidenziate le tre coppie di punti (σ_n, τ_{picco}) ottenuti dalle prove di taglio al primo ciclo.

Infine si è stimato JRC anche tramite pettine di Barton, il test ha dato come risultato:

- JRC = 6-8 per il GS3 Top- C0;
- JRC =8-10 per GS3 Bottom a C0.

5.2. Caso di studio: rilievo fotogrammetrico

Si è acquisito quindi il **rilievo fotogrammetrico** dell'intera area di studio di Sinigo Merano (Ferrero & Montepara, 2015). Il notevole vantaggio di tali nuovi metodi diagnostici è dato sia dalla capacità di acquisire dati da grande distanza che dalla possibilità di rilevare superfici caratterizzate da geometrie complesse e notevolmente estese, mantenendo un elevato livello di risoluzione. Sono state scattate diverse serie di immagini della parete rocciosa mediante fotocamera digitale Nikon D7000 (risoluzione 4928x3264, focale 35 mm). I dati così ottenuti sono stati successivamente elaborati mediante software dedicati, descritti nel seguito.

Mediante il software *Agisoft Photoscan Professional* è stato possibile orientare il blocco di immagini nel sistema di riferimento scelto per il rilievo con laser scanner terrestre (TLS), collimando (ossia, identificando e selezionando manualmente) punti naturali di coordinate note sulle immagini. Una volta orientate le immagini, si è ottenuto il modello digitale della parete rocciosa DSM (Figura 5.8), costituito da 820'681 punti espressi in coordinate 3D (x,y,z). In particolare, sono estrapolati diversi elementi su cui si sono eseguite le elaborazioni del capitolo 5.5 (Figura 5.9):

Figura 5.8 DSM di parte del versante interessato dal crollo.

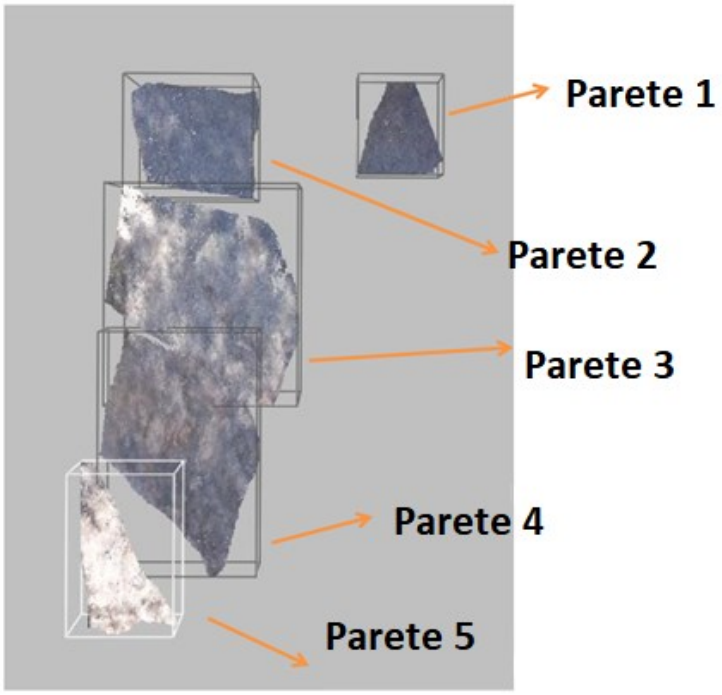
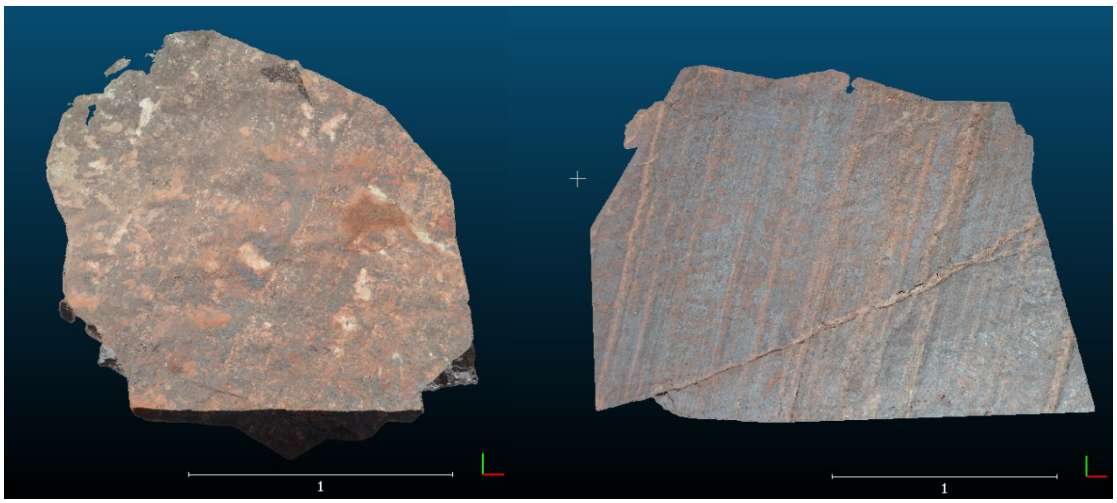


Figura 5.9 Porzioni del versante prese in considerazione nel presente studio.

In maniera simile, sono stati realizzati i DSM dei tre blocchi (Blocco1, Blocco2, Blocco3 Figura 5.10), costituiti da:

- blocco 1: 2'005'359 punti;
- blocco 2: 2'646'807 punti;
- blocco 3: 1'738'491 punti.

Le nuvole dei punti hanno una risoluzione pari a circa 100 punti per cm^2.



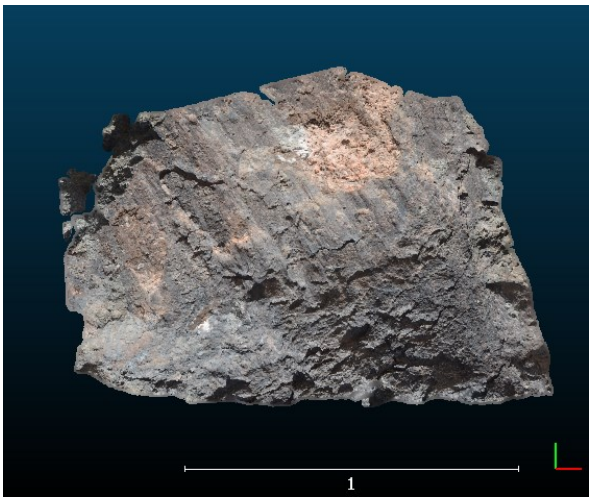


Figura 5.10 DTM dei tre blocci: a) blocco 1, 2'005'359 punti; b) blocco 2, 2'646'807 punti;c) blocco 3, 1'738'491 punti.

Per la ricostruzione dei DSM dei tre campioni GS1, GS2, GS3 (Top e Bottom), le immagini digitali sono acquisite in camera oscura. Il campione viene sistemato su una base d'appoggio, sulla quale è fissata a sua volta una mascherina dotata di marker necessari per la ricostruzione dei DSM (Figura 5.11).

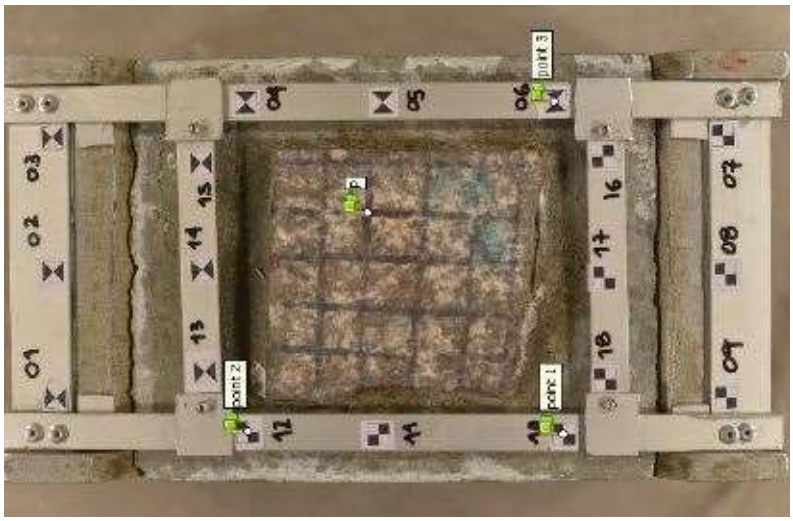


Figura 5.11 Campione GS1 BOTTOM in fase di digitalizzazione: in nero i marker sulla mascherina, in verde i marker riposizionati digitalmente.

I marker sono dei punti a posizione nota e prefissata che risultano ben visibili sulle fotografie digitali, essi sono necessari affinché le successive elaborazioni attribuiscano le corrette coordinate (x, y, z) alla nuvola dei punti. Una volta corretta l'illuminazione sul campione,

vengono scattate otto foto che tramite il software *Photoscan* ricostruiscono il DSM (Figura 5.12). Le foto vengono eseguite per tutti e sei i campioni, in tre fasi:

- C0, campioni grezzi;
- C1, dopo un ciclo di prova di taglio nella scatola di Hoek;
- C5, dopo cinque cicli di prova di taglio nella scatola di Hoek.

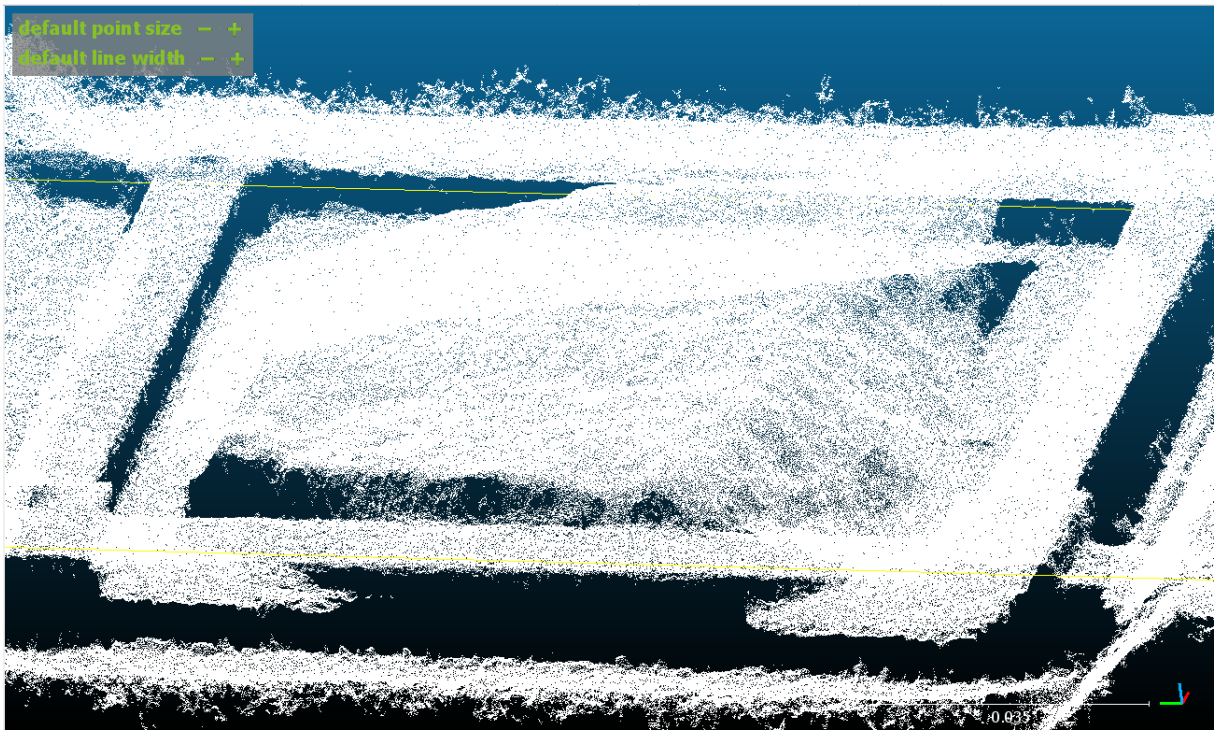


Figura 5.12 DSM, visualizzato su CloudCompare, ricostruito per il campione GS2 Top a C1.

Nel presente lavoro di tesi, lo studio dei parametri di scabrezza ha coinvolto i campioni grezzi al tempo C0 (Figura 5.13, Figura 5.14, Figura 5.15), costituiti da:

- campione GS1-TOP: 124'148 punti;
- campione GS1-BOTTOM: 126'304 punti;
- campione GS2-TOP: 129'399 punti;
- campione GS2-BOTTOM: 140’748 punti;
- campione GS3-TOP: 109’452 punti;

- campione GS3-BOTTOM: 127’331 punti.

Indagini future si concentreranno sullo studio della variazione di tali parametri al tempo C1 e C5.

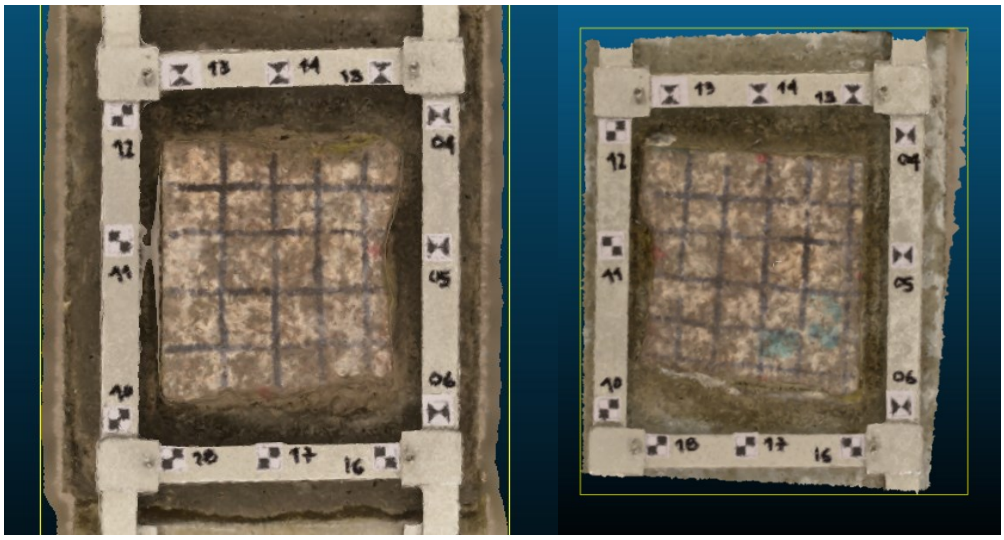


Figura 5.13 DSM provino GS1, C0, TOP e BOTTOM.

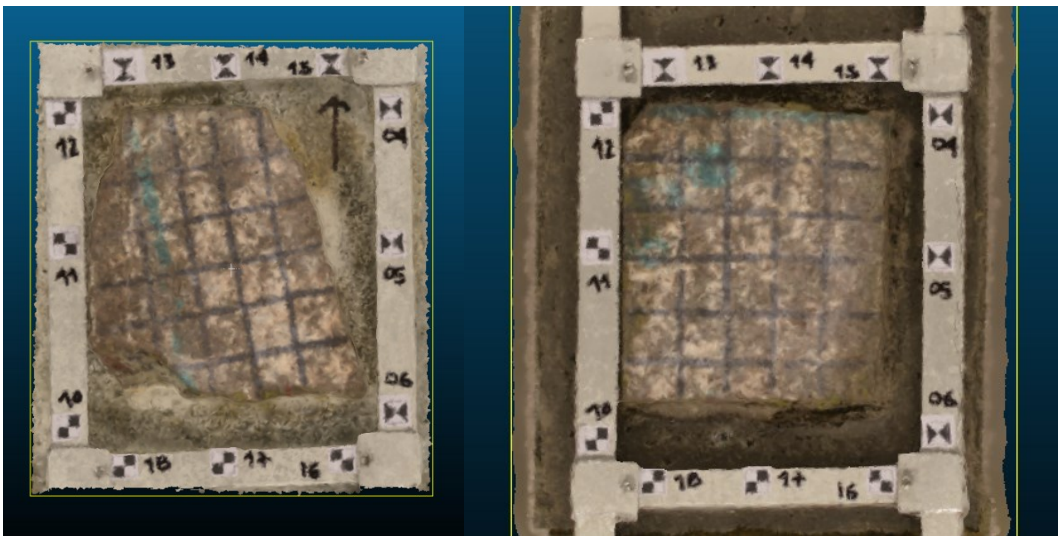


Figura 5.14 DSM provino GS2, C0, TOP e BOTTOM.

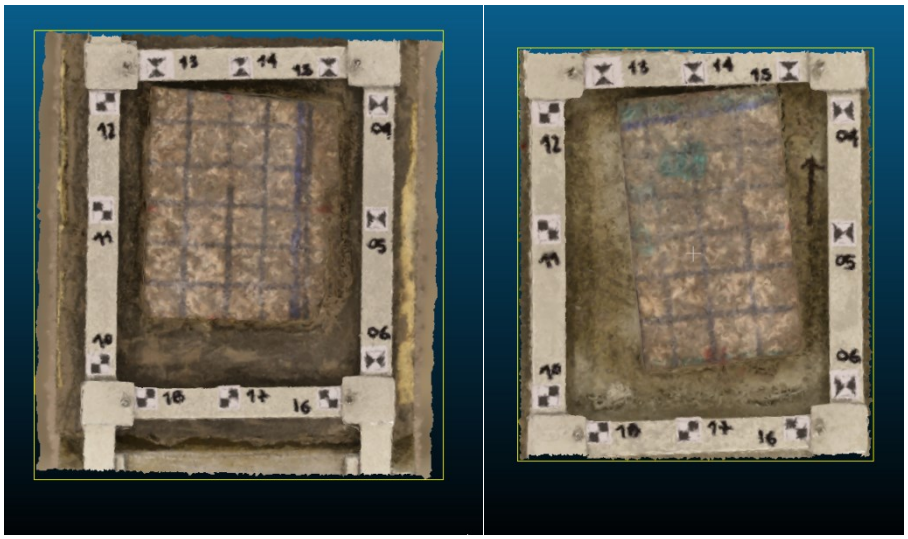


Figura 5.15 DSM provino GS3, C0, TOP e BOTTOM.

5.3. Scala dei blocchi

5.3.1. Preparazione dei DSM

I DSM dei blocchi (Figura 5.10) sono editati e ne sono ritagliati delle nuvole quadrate (Figura 5.16) costituiti da:

- blocco 1: 1 x 1 metro, 955'238 punti, risoluzione 95 punti a cm^2;
- blocco 2: 1 x 1 metro, 972'317 punti, risoluzione 97 punti a cm^2;
- blocco 3: 0,85 x 0,85 metri, 1'0320'774 punti, risoluzione 103 punti a cm^2.

Dal blocco 3 non è stato possibile ritagliare una sezione di 1 x 1 $metro^2$, motivo per cui i diagrammi saranno normalizzati rispetto la grandezza del blocco indagato.

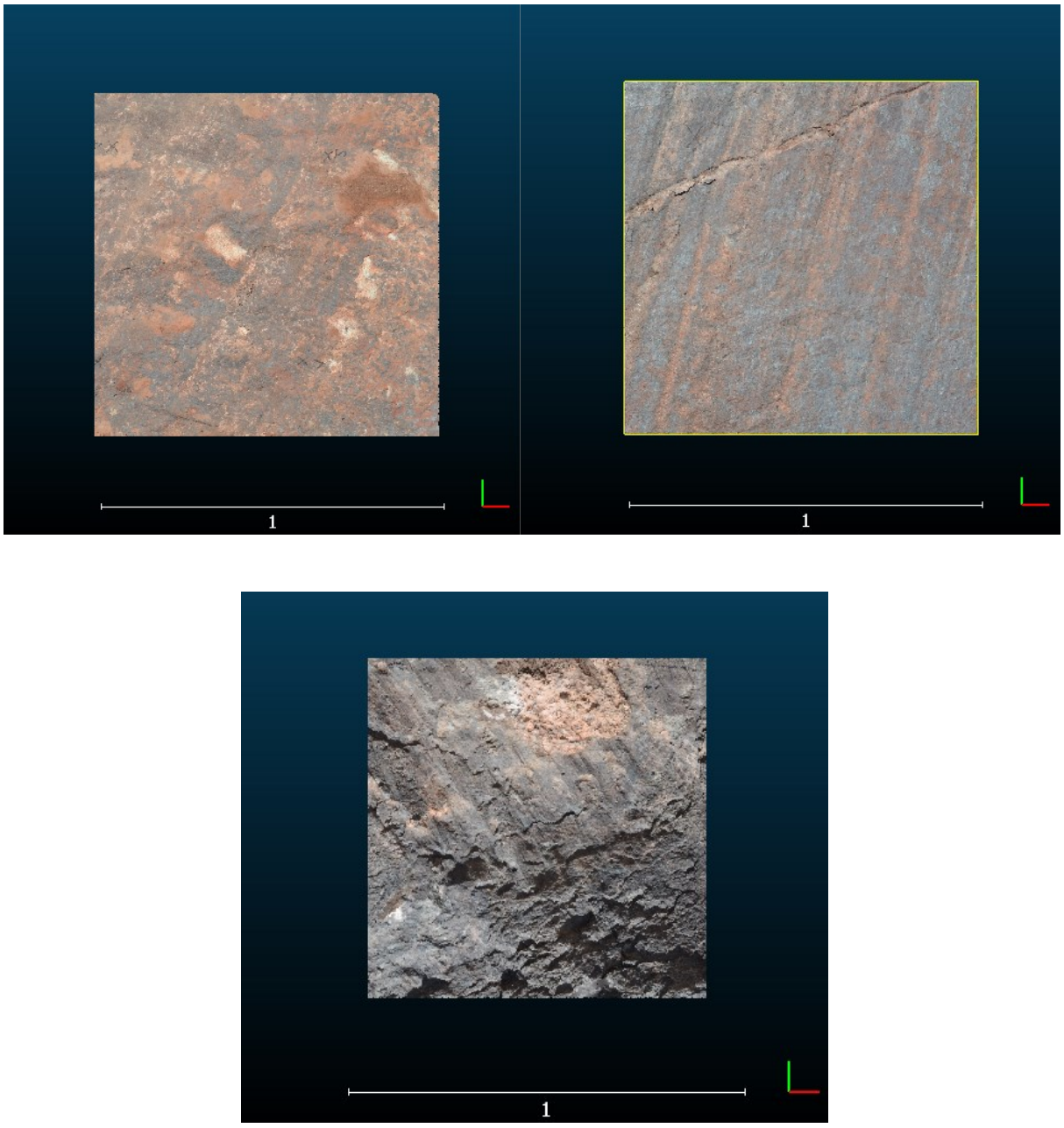


Figura 5.16 DSM dei tre blocci: a) blocco 1, 955'238 punti; b) blocco 2, 972'317 punti; c) blocco 3, 1'0320'774 punti.

5.3.2. Rotazione della nuvola

Per ognuno dei blocchi, si stima il piano medio con una metodologia ai minimi quadrati e lo si fa ruotare in modo che diventi orizzontale.

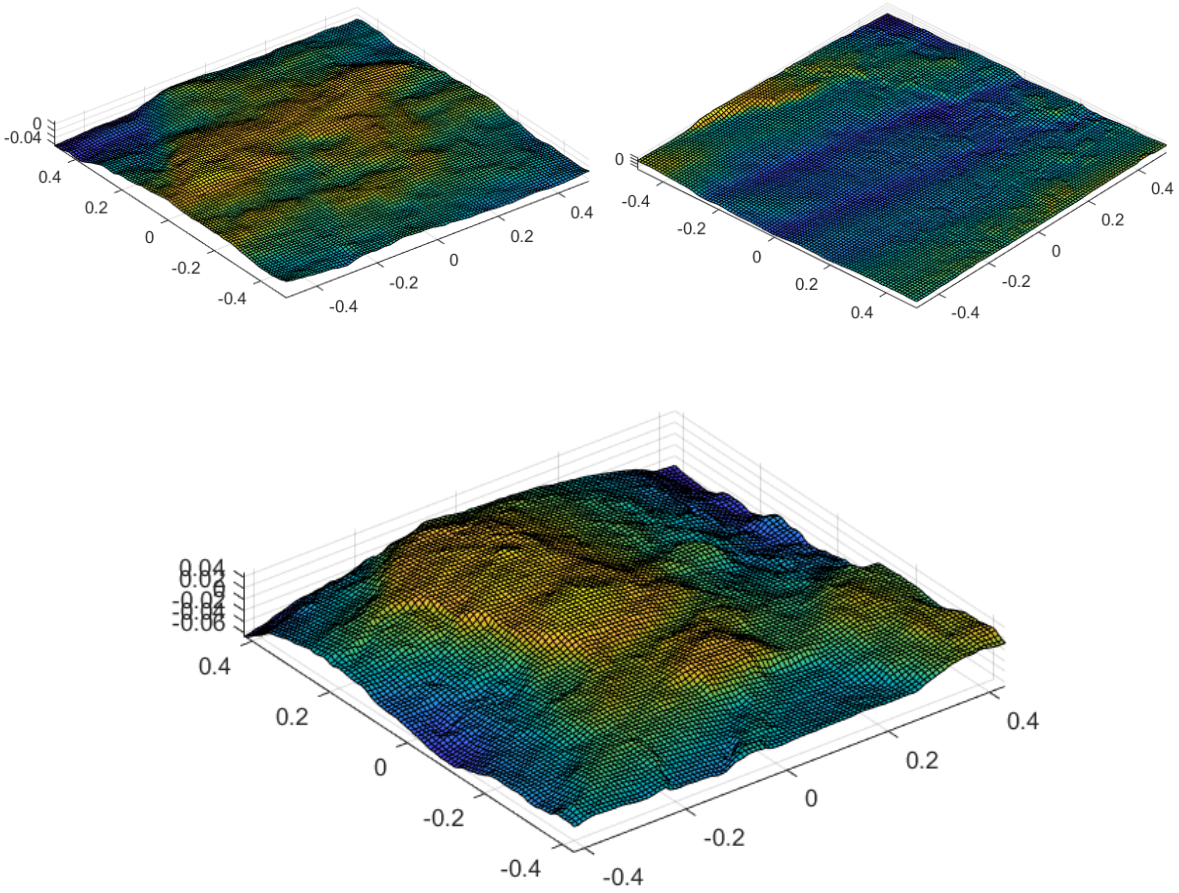


Figura 5.17 DSM dei tre blocchi ruotate in modo che il loro piano medio si trovi sul piano orizzontale.

5.3.3. Estrazione profili regolari con Surfer

I DSM dei tre blocchi sono elaborati tramite SURFER che estrapola il numero di profili definito dall'utente (Tabella 5.9) e ne interpola le elevazioni.

Tabella 5.9 Numero e spaziatura dei profili estratti con SURFER per i tre blocchi.

Blocco	*Profili estratti (direzione x ed y)*	*Lato elemento [m]*	*Distanza tra i profili estratti [mm]*
1	2000	1	0,50
2	2000	1	0,50
3	2000	0,85	0,42

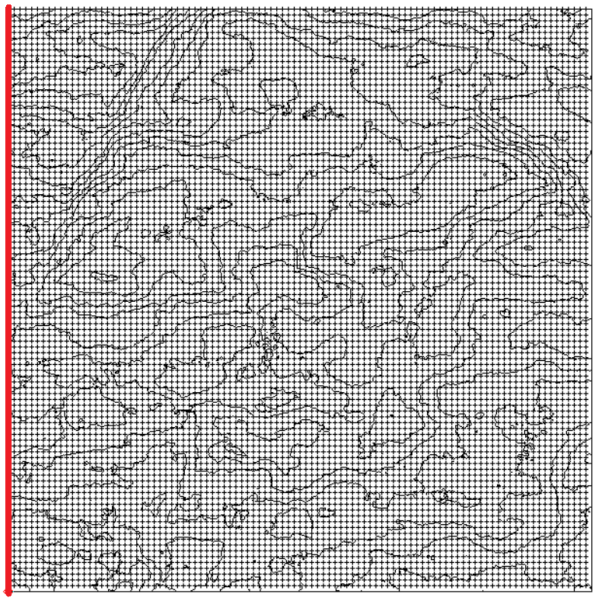


Figura 5.18 Blocco1: Griglia 2000x2000 da Surfer con evidenziato il primo profilo verticale su cui si è validato il codice Matlab.

5.3.4. Campionamento dei profili

- BLOCCO 1

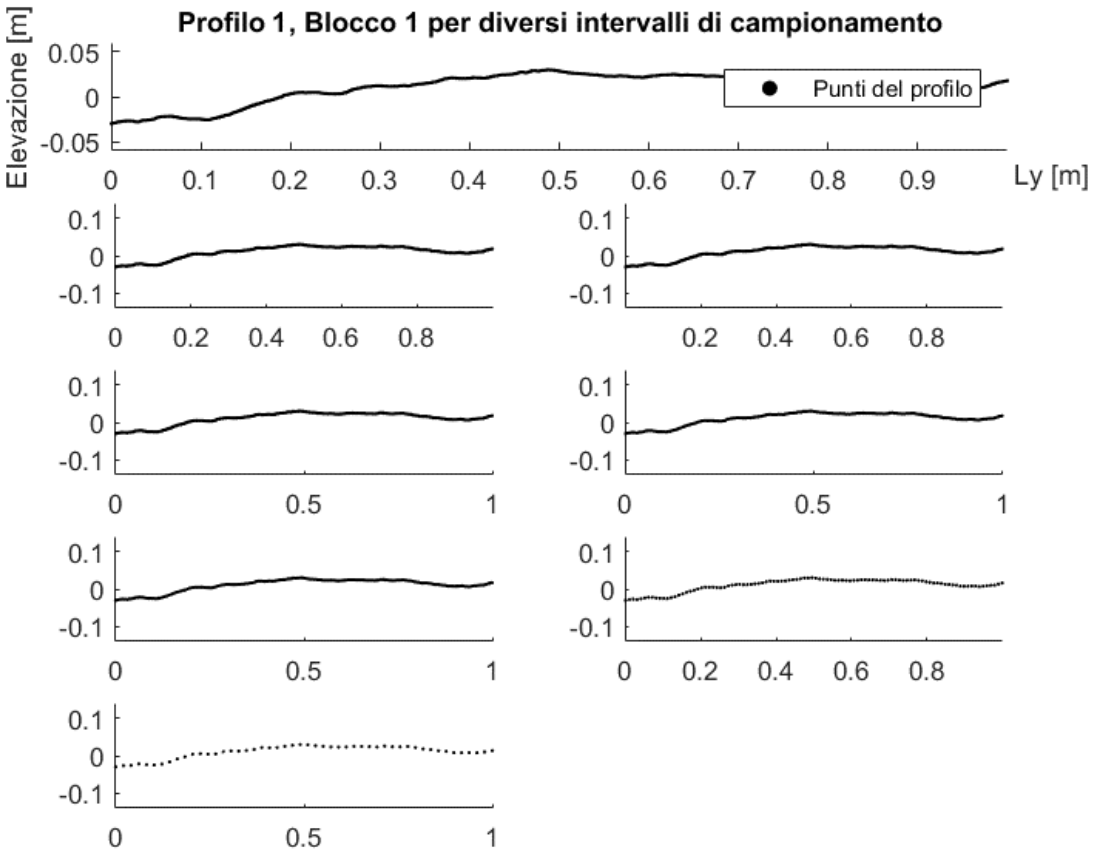


Figura 5.19 Blocco 1, profilo generico: intervalli di campionamento usati nella valutazione di Z2 ed Rp.

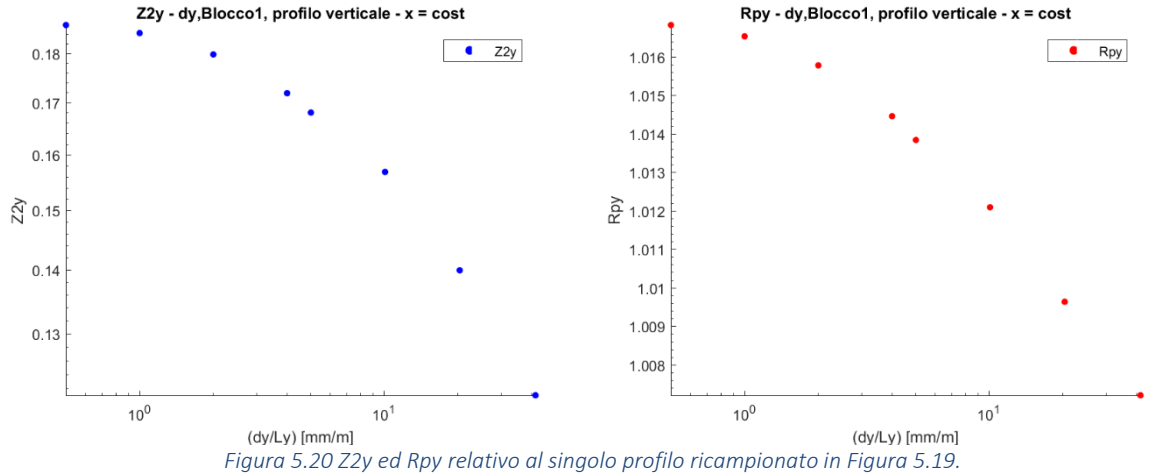


Figura 5.20 Z2y ed Rpy relativo al singolo profilo ricampionato in Figura 5.19.

A solo scopo di validazione del codice Matlab, per i soli blocchi si stimano i parametri di scabrezza Z_2 ed R_p su un singolo profilo ricampionato (Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.).

- BLOCCO 2

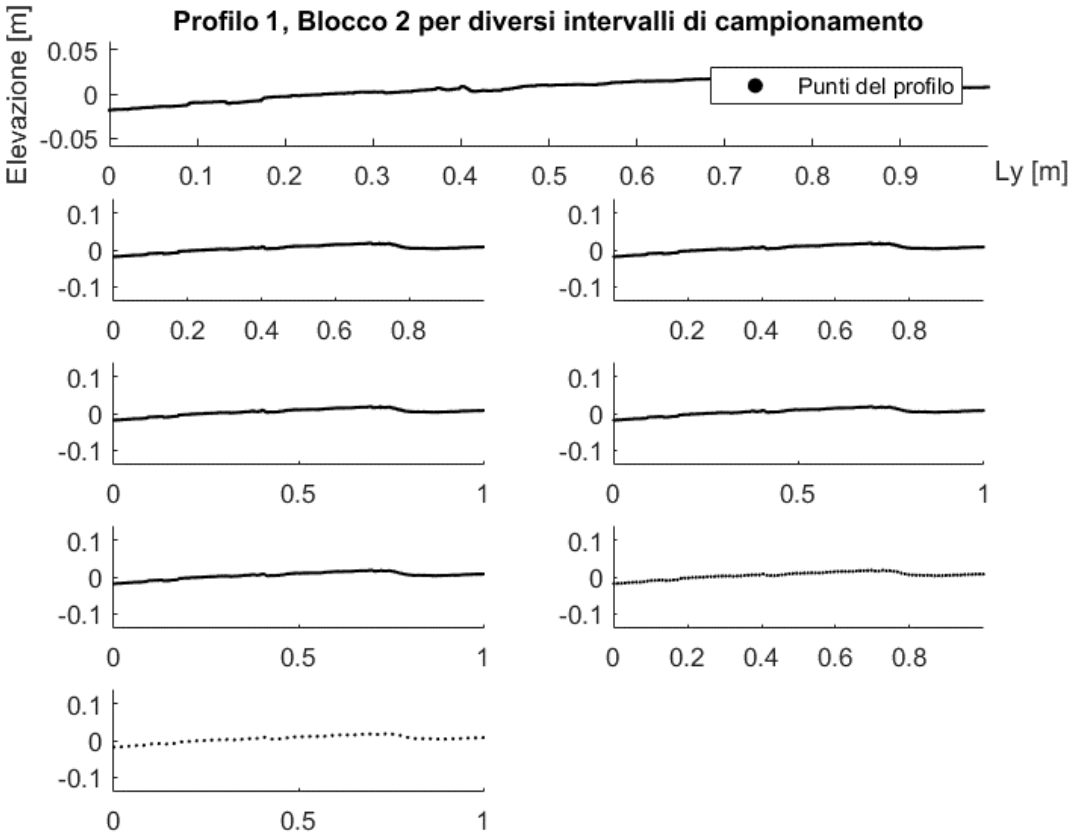


Figura 5.21 Blocco 2, profilo generico: intervalli di campionamento usati nella valutazione di Z_2 ed R_p.

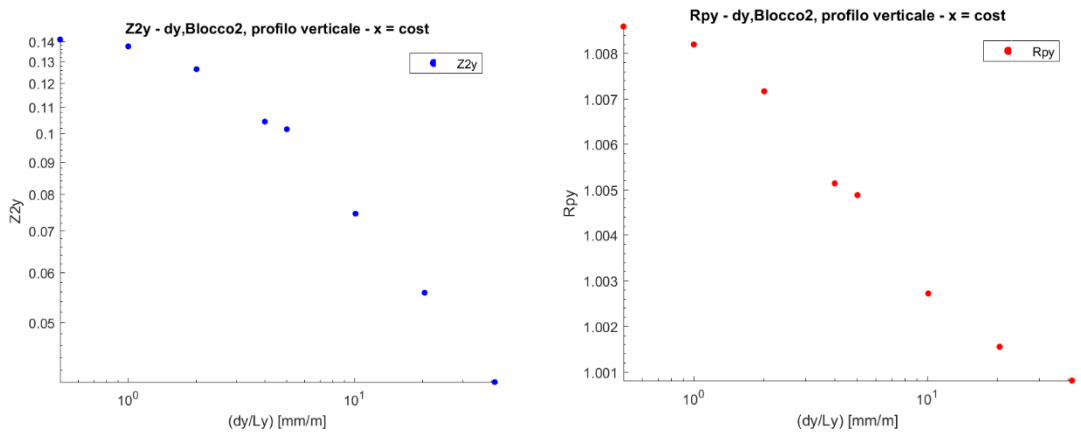


Figura 5.22 Blocco 2: Z2Y ed RpY relativo al singolo profilo ricampionato in Figura 5.21.

- BLOCCO 3

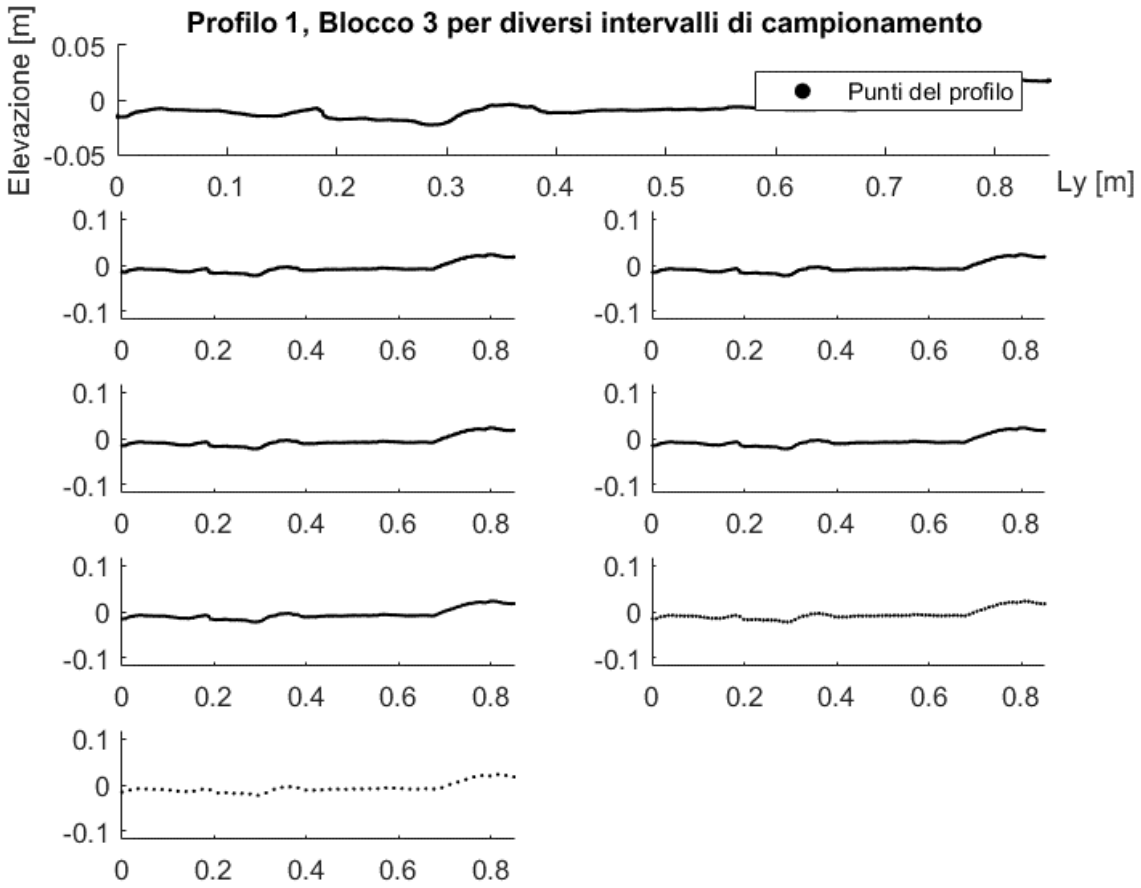


Figura 5.23 Blocco 3, profilo generico: intervalli di campionamento usati nella valutazione di Z_2 ed R_p.

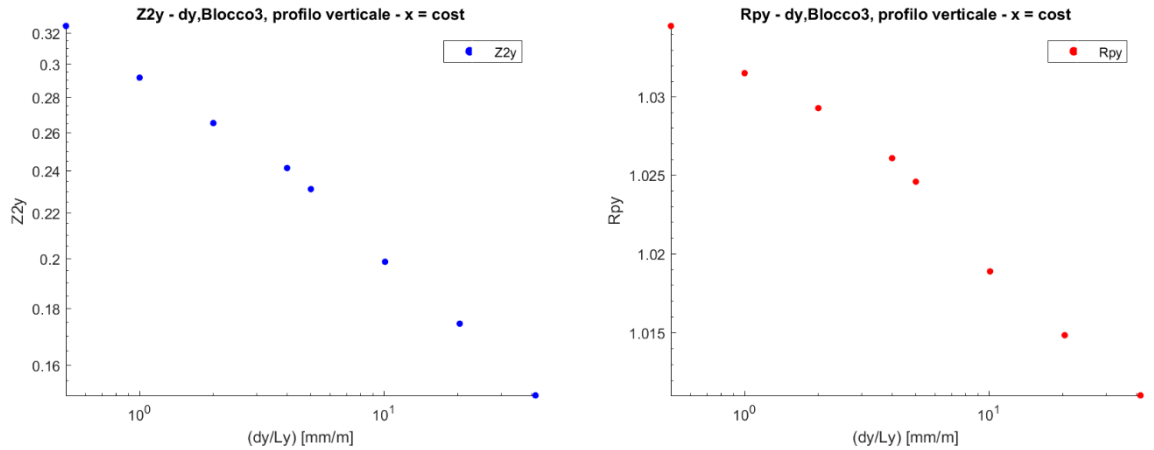


Figura 5.24 Blocco 2: Z_{2y} ed R_{py} relativo al singolo profilo ricampionato in Figura 5.23.

I risultati grafici sono riportati in Tabella 5.10.

Tabella 5.10 Valori di Z2 e Rp valutati per il primo profilo verticale nei tre blocchi, alle diverse risoluzioni.

BLOCCO	**Risoluzione** griglia	**Risoluzione** [mm]	**$Z_{2\,y}$** profili X = cost	**Rpy** profili X = cost
Blocco 1 1x1metro	2000	0,5	0,1860	1,0168
	1000	1,0	0,1844	1,0166
	500	2,0	0,1798	1,0158
	250	4,0	0,1719	1,0145
	200	5,0	0,1680	1,0138
	100	10,1	0,1567	1,0121
	50	20,5	0,1399	1,0096
	25	41,7	0,121	1,007
Blocco 2 1x1metro	2000	0,5	0,2403	1,0198
	1000	1,0	0,2135	1,0178
	500	2,0	0,1710	1,0131
	250	4,0	0,1527	1,0109
	200	5,0	0,1418	1,0096
	100	10,1	0,1190	1,0069
	50	20,5	0,0914	1,0041
	25	41,7	0,0402	1,001
Blocco 3 0.85x0.85metri	2000	0,5	0,3268	1,0346
	1000	1,0	0,2957	1,0317
	500	2,0	0,2675	1,0293
	250	4,0	0,2418	1,0261
	200	5,0	0,2311	1,0245
	100	10,1	0,1993	1,0190
	50	20,5	0,1754	1,0150
	25	41,7	0,1502	1,011

5.3.5. Valutazione parametri di scabrezza: Z2, Rp, Rs

- BLOCCO 1

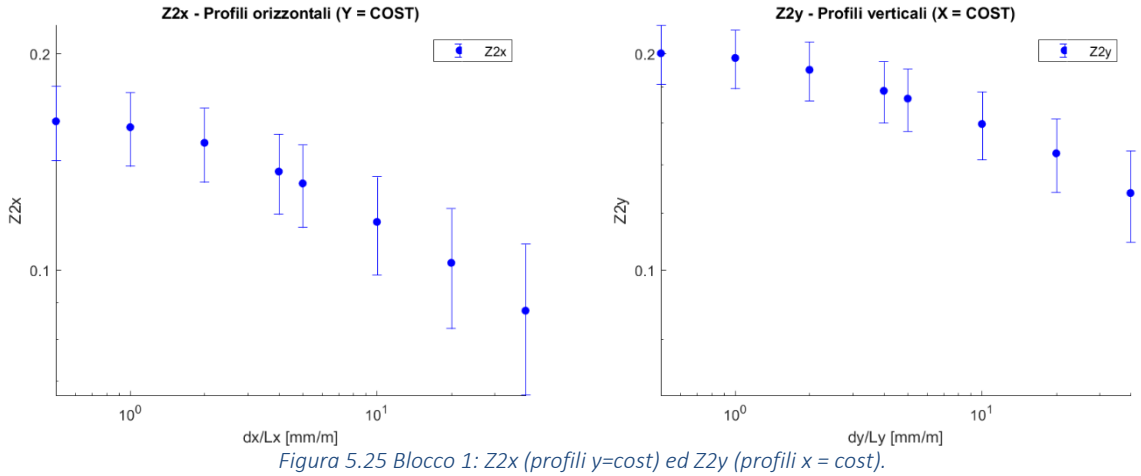


Figura 5.25 Blocco 1: Z2x (profili y=cost) ed Z2y (profili x = cost).

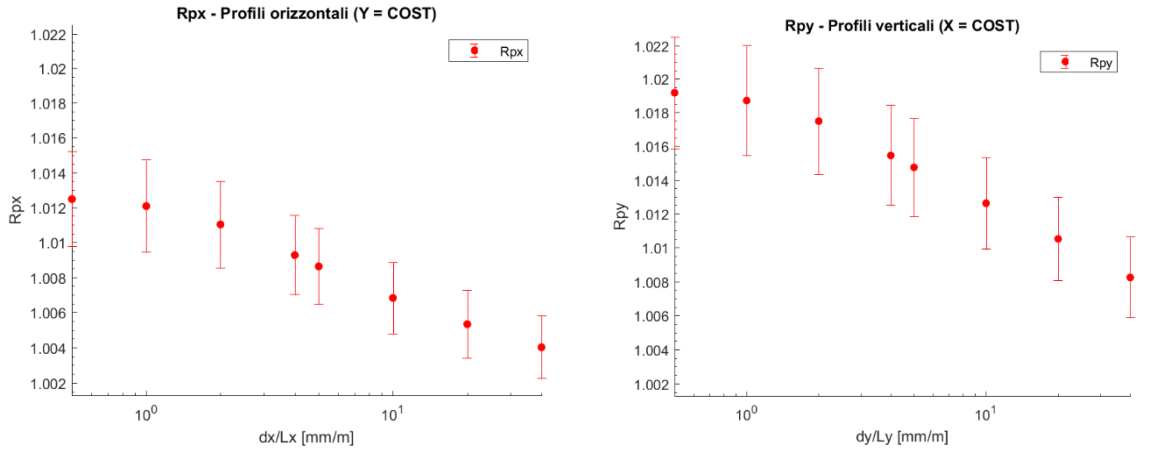


Figura 5.26 Blocco 1: Rpx (profili y=cost) ed Rpy (profili x = cost).

Tabella 5.11 Blocco 1: riepilogo dello studio statistico dei parametri di scabrezza Z_2 ed Rp per i diversi intervalli di campionamento.

Blocco 1								
X_passo_norm [mm/m]	**40**	**20**	**10**	**5**	**4**	**2**	**1**	**0,5**
Z2X mean	0,088	0,102	0,117	0,132	0,137	0,150	0,158	0,161
Z2X min	0,044	0,062	0,076	0,091	0,096	0,111	0,120	0,123
Z2X max	0,131	0,142	0,156	0,172	0,180	0,199	0,211	0,227
Z2X Standard Deviation	0,021	0,019	0,018	0,017	0,018	0,018	0,019	0,019
RPX mean	1,004	1,005	1,007	1,009	1,009	1,011	1,012	1,013
RPX min	1,001	1,002	1,003	1,004	1,005	1,006	1,007	1,007
RPX max	1,008	1,010	1,012	1,014	1,016	1,019	1,020	1,021
RPX Standard Deviation	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,003	0,003
Y_passo_norm [mm/m]	**40**	**20**	**10**	**5**	**4**	**2**	**1**	**0,5**
Z2Y mean	0,128	0,145	0,160	0,173	0,177	0,190	0,197	0,200
Z2Y min	0,093	0,116	0,129	0,143	0,146	0,156	0,163	0,165
Z2Y max	0,172	0,185	0,201	0,218	0,221	0,238	0,253	0,259
Z2Y Standard Deviation	0,019	0,017	0,017	0,017	0,017	0,018	0,019	0,019
RPY mean	1,008	1,011	1,013	1,015	1,015	1,018	1,019	1,019
RPY min	1,004	1,007	1,008	1,010	1,011	1,012	1,013	1,013
RPY max	1,015	1,017	1,020	1,023	1,023	1,026	1,028	1,029
RPY Standard Deviation	0,002	0,002	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003

L'errore commesso considerando un passo di campionamento di soglia pari ad 1 mm è:

- Errore per Z2x = 1,89%;
- Errore per Z2y = 1,52%.

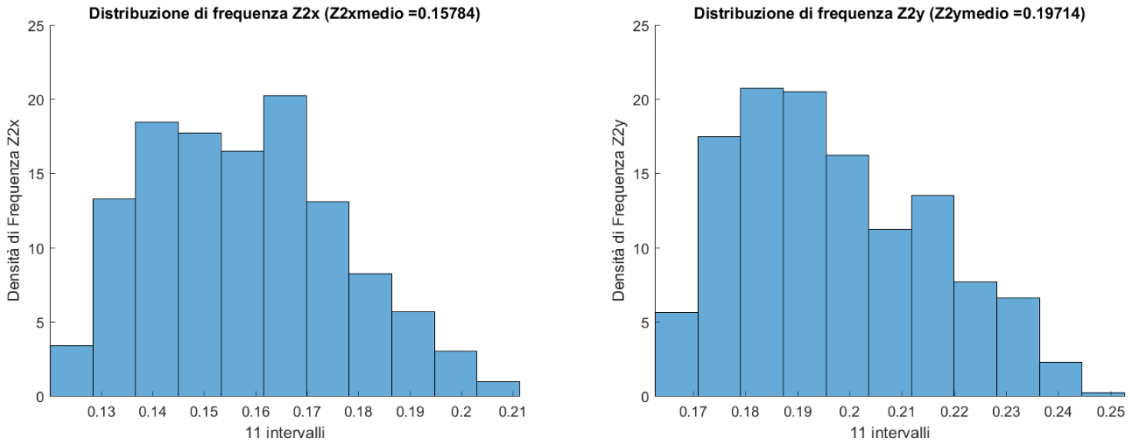


Figura 5.27 Blocco1: distribuzione di frequenza per i parametri Z2x e Z2y.

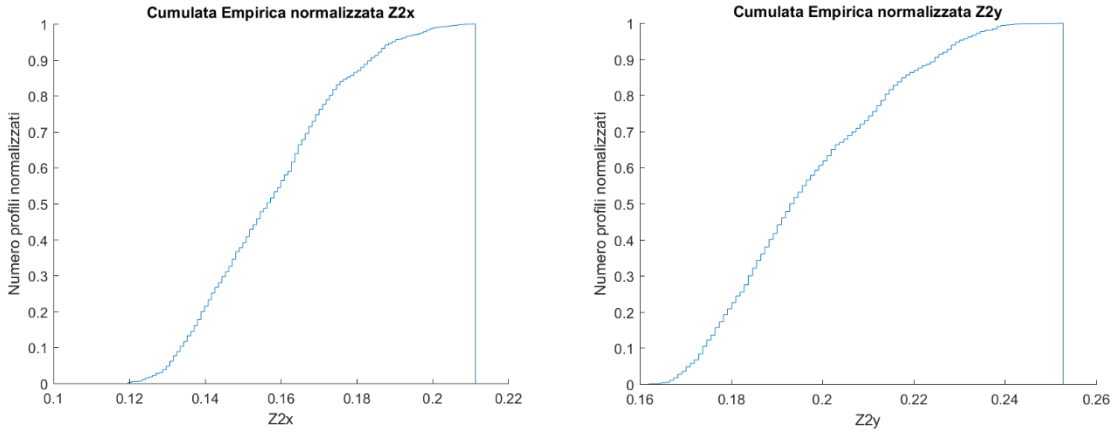


Figura 5.28 Blocco1: frequenza cumulata per i parametri Z2x e Z2y.

- Blocco 2

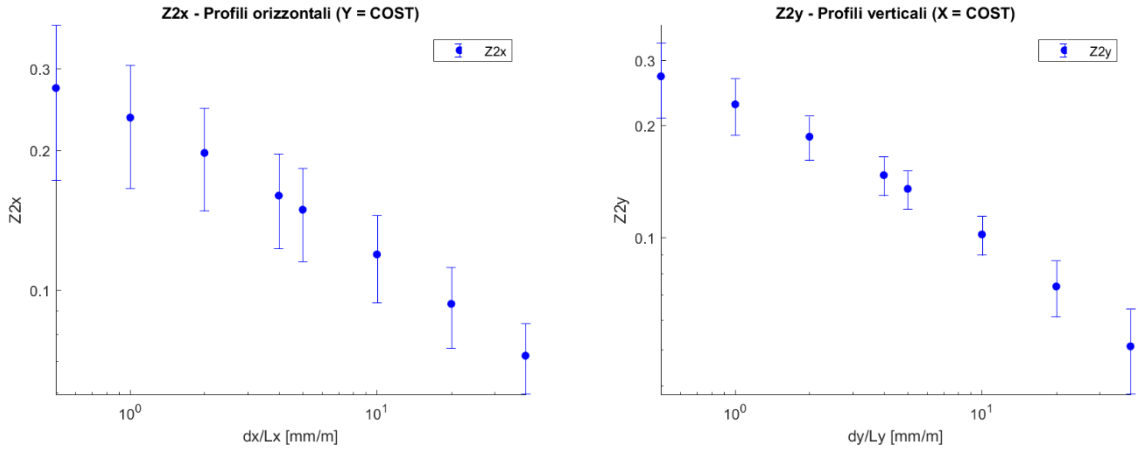


Figura 5.29 Blocco 2: Z2x (profili y=cost) ed Z2y (profili x = cost).

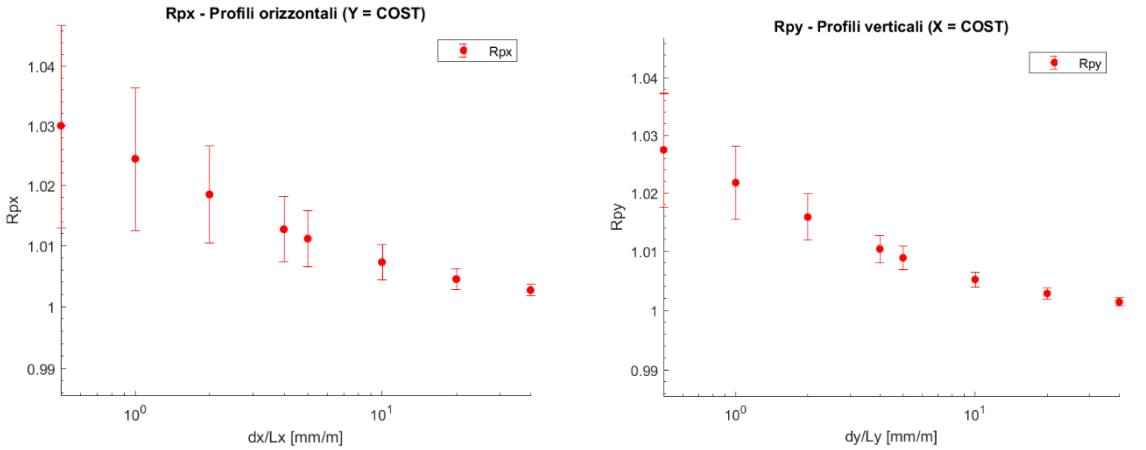


Figura 5.30 Blocco 2: Rpx (profili y=cost) ed Rpy (profili x = cost).

Tabella 5.12 Blocco 2: riepilogo dello studio statistico dei parametri di scabrezza Z_2 ed Rp per i diversi intervalli di campionamento.

Blocco 2								
X_passo_norm [mm/m]	**40**	**20**	**10**	**5**	**4**	**2**	**1**	**0,5**
Z2X mean	0,072	0,093	0,119	0,149	0,160	0,197	0,235	0,272
Z2X min	0,047	0,061	0,073	0,086	0,092	0,106	0,115	0,119
Z2X max	0,121	0,153	0,187	0,256	0,264	0,429	0,523	0,756
Z2X Standard Deviation	0,013	0,018	0,025	0,034	0,037	0,049	0,070	0,100
RPX mean	1,003	1,005	1,007	1,011	1,013	1,018	1,024	1,030
RPX min	1,001	1,002	1,003	1,004	1,004	1,006	1,007	1,007
RPX max	1,007	1,012	1,017	1,028	1,032	1,052	1,069	1,104
RPX Standard Deviation	0,001	0,002	0,003	0,005	0,005	0,008	0,012	0,017
Y_passo_norm [mm/m]	**40**	**20**	**10**	**5**	**4**	**2**	**1**	**0,5**
Z2Y mean	0,051	0,074	0,102	0,135	0,147	0,186	0,228	0,271
Z2Y min	0,027	0,040	0,071	0,100	0,105	0,127	0,137	0,141
Z2Y max	0,083	0,104	0,146	0,211	0,238	0,333	0,450	0,721
Z2Y Standard Deviation	0,013	0,013	0,012	0,016	0,017	0,025	0,039	0,062
RPY mean	1,001	1,003	1,005	1,009	1,010	1,016	1,022	1,027
RPY min	1,000	1,001	1,003	1,005	1,005	1,007	1,008	1,009
RPY max	1,003	1,005	1,010	1,019	1,022	1,037	1,051	1,080
RPY Standard Deviation	0,001	0,001	0,001	0,002	0,002	0,004	0,006	0,010

L'errore commesso considerando un passo di campionamento di soglia pari ad 1 mm è:

- Errore per Z2x = 15,7%;
- Errore per Z2Y = 18%.

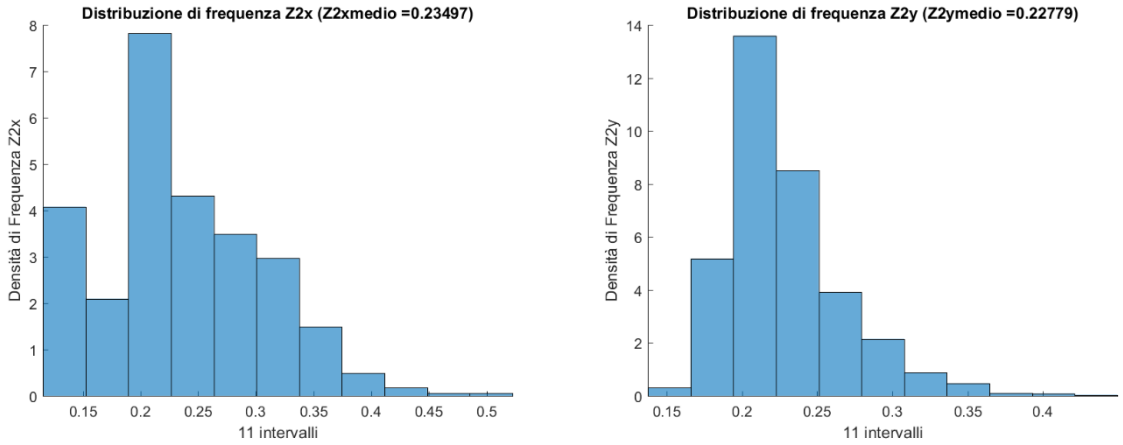


Figura 5.31 Blocco2: distribuzione di frequenza per i parametri Z_{2x} e Z_{2y}.

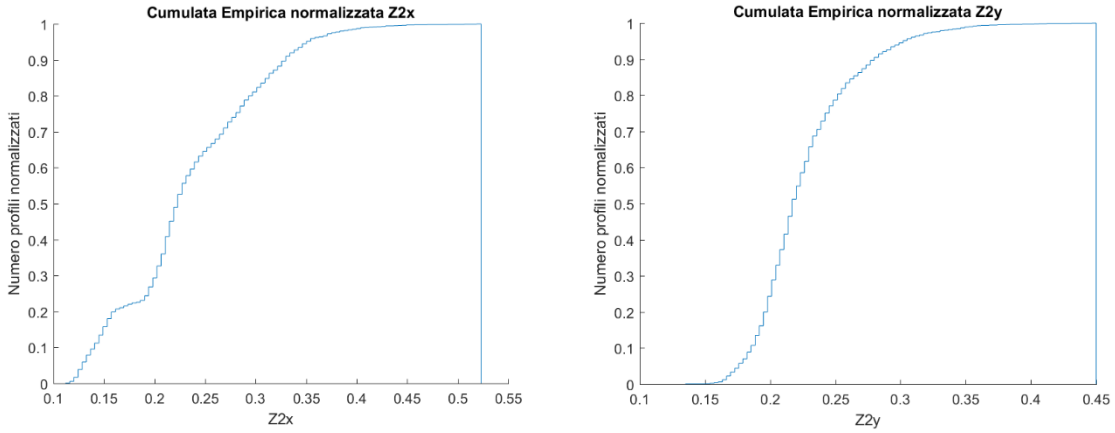


Figura 5.32 Blocco2: frequenza cumulata per i parametri Z_{2x} e Z_{2y}.

- BLOCCO 3

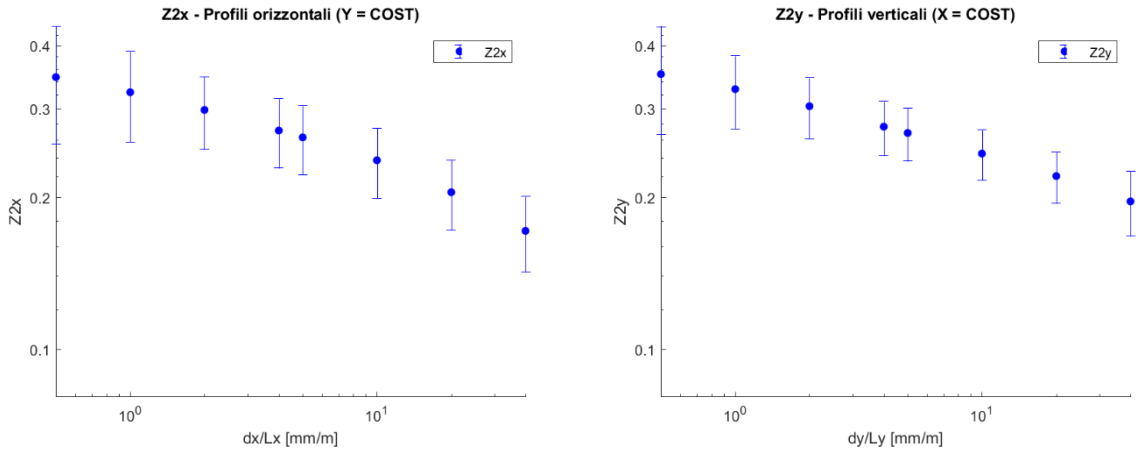


Figura 5.33 Blocco 3: Z2x (profili y=cost) ed Z2y (profili x = cost).

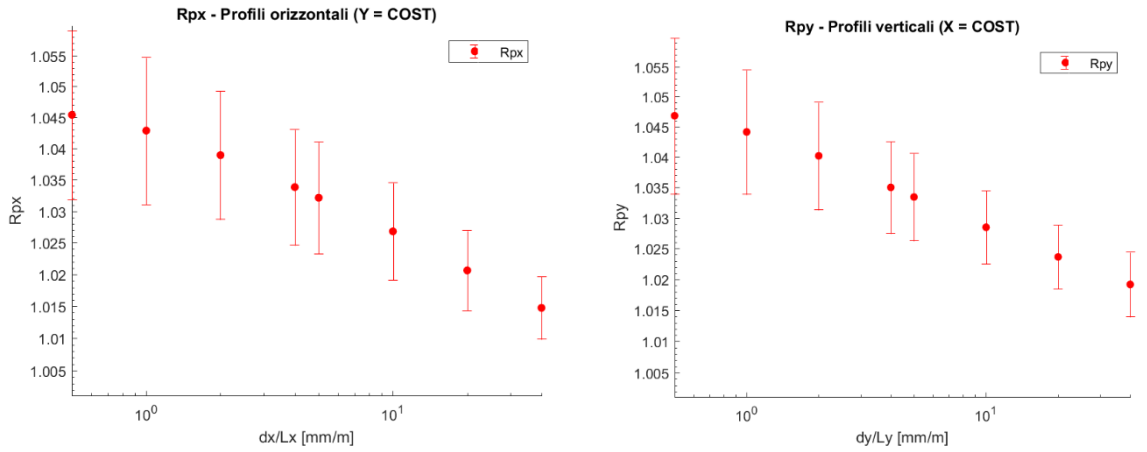


Figura 5.34 Blocco 3: Rpx (profili y=cost) ed Rpy (profili x = cost).

Tabella 5.13 Blocco 3: riepilogo dello studio statistico dei parametri di scabrezza Z2 ed Rp per i diversi intervalli di campionamento.

Blocco 3								
X_passo_norm [mm/m]	**40**	**20**	**10**	**5**	**4**	**2**	**1**	**0,5**
Z2X mean	0,172	0,205	0,237	0,263	0,271	0,298	0,323	0,346
Z2X min	0,116	0,138	0,163	0,186	0,193	0,212	0,223	0,228
Z2X max	0,256	0,299	0,349	0,415	0,442	0,573	0,766	1,007
Z2X Standard Deviation	0,029	0,033	0,038	0,041	0,043	0,049	0,066	0,091
RPX mean	1,015	1,021	1,027	1,032	1,034	1,039	1,043	1,045
RPX min	1,007	1,009	1,013	1,017	1,018	1,021	1,023	1,024
RPX max	1,031	1,041	1,047	1,057	1,059	1,079	1,095	1,115
RPX Standard Deviation	0,005	0,006	0,008	0,009	0,009	0,010	0,012	0,014
Y_passo_norm [mm/m]	**40**	**20**	**10**	**5**	**4**	**2**	**1**	**0,5**
Z2Y mean	0,196	0,221	0,244	0,268	0,276	0,303	0,328	0,351
Z2Y min	0,134	0,163	0,189	0,200	0,206	0,219	0,229	0,233
Z2Y max	0,252	0,284	0,309	0,359	0,388	0,564	0,754	1,333
Z2Y Standard Deviation	0,029	0,026	0,028	0,032	0,034	0,042	0,054	0,085
RPY mean	1,019	1,024	1,029	1,033	1,035	1,040	1,044	1,047
RPY min	1,009	1,013	1,017	1,019	1,020	1,023	1,025	1,025
RPY max	1,030	1,035	1,042	1,049	1,055	1,077	1,099	1,167
RPY Standard Deviation	0,005	0,005	0,006	0,007	0,008	0,009	0,010	0,013

L'errore commesso considerando un passo di campionamento di soglia pari ad 1 mm è:

- Errore per Z2x = 7,1%;
- Errore per Z2Y = 7%.

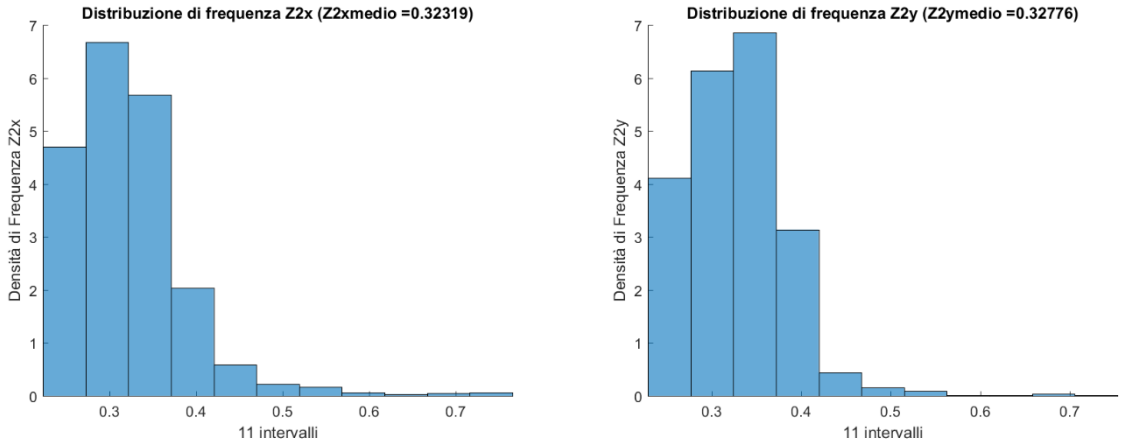


Figura 5.35 Blocco3: Distribuzione di frequenza per i parametri Z2x e Z2y.

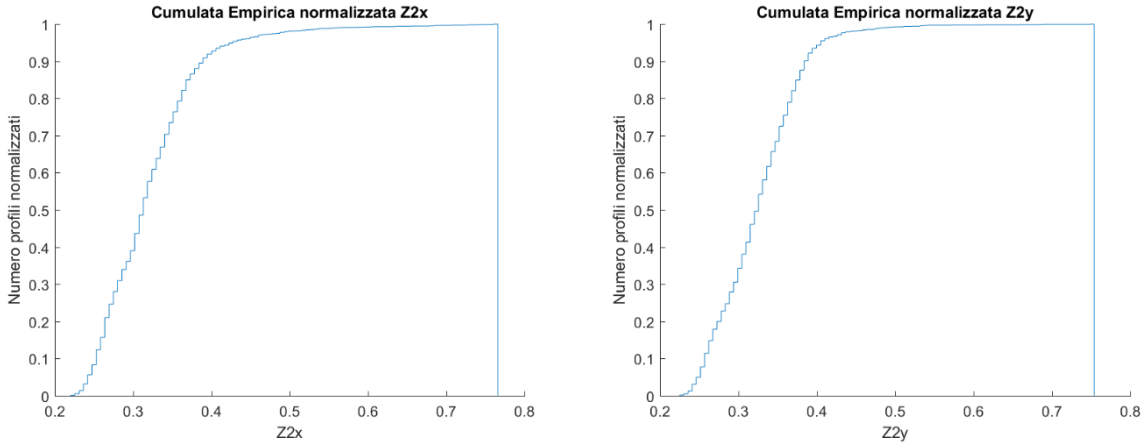


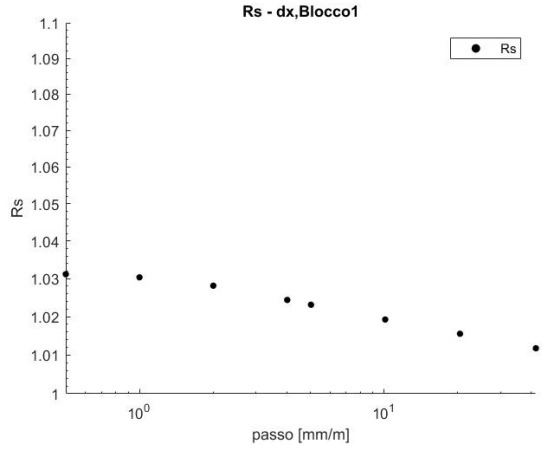
Figura 5.36 Blocco3: frequenza cumulata per i parametri Z2x e Z2y.

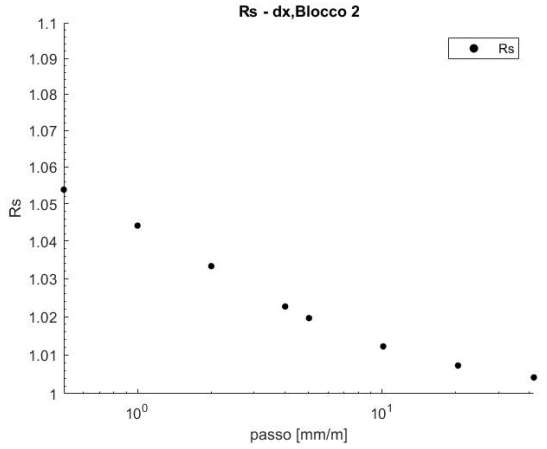
Si riassumono in tabella i risultati ottenuti (Tabella 5.14):

Tabella 5.14 Valori di Z2 e Rp valutati per i tre blocchi, per i diversi intervalli di campionamento.

BLOCCO	Risoluzione	Risoluzione	Z_{2X}	Z_{2Y}	Rpx	Rpy
	griglia	[mm/m]	profili Y = cost	profili X = cost	profili Y = cost	profili X = cost
Blocco 1 1x1metro	2000	0,50	0,161	0,200	1,013	1,019
	1000	1,00	0,158	0,197	1,012	1,019
	500	2,00	0,150	0,190	1,011	1,018
	250	4,00	0,137	0,177	1,009	1,015
	200	5,00	0,132	0,173	1,009	1,015
	100	10,00	0,117	0,160	1,007	1,013
	50	20,01	0,102	0,145	1,005	1,011
	25	41,67	0,088	0,128	1,004	1,008
Blocco 2 1x1metro	2000	0,50	0,272	0,271	1,030	1,027
	1000	1,00	0,235	0,228	1,024	1,022
	500	2,00	0,197	0,186	1,018	1,016
	250	4,00	0,160	0,147	1,013	1,010
	200	5,00	0,149	0,135	1,011	1,009
	100	10,00	0,119	0,102	1,007	1,005
	50	20,01	0,093	0,074	1,005	1,003
	25	41,67	0,072	0,051	1,003	1,001
Blocco 3 0.85x0.85 metri	2000	0,50	0,346	0,351	1,045	1,047
	1000	1,00	0,323	0,328	1,043	1,044
	500	2,00	0,298	0,303	1,039	1,040
	250	4,00	0,271	0,276	1,034	1,035
	200	5,00	0,263	0,268	1,032	1,033
	100	10,00	0,237	0,244	1,027	1,029
	50	20,01	0,205	0,221	1,021	1,024
	25	41,67	0,172	0,196	1,015	1,019

- **Valutazione Rs**





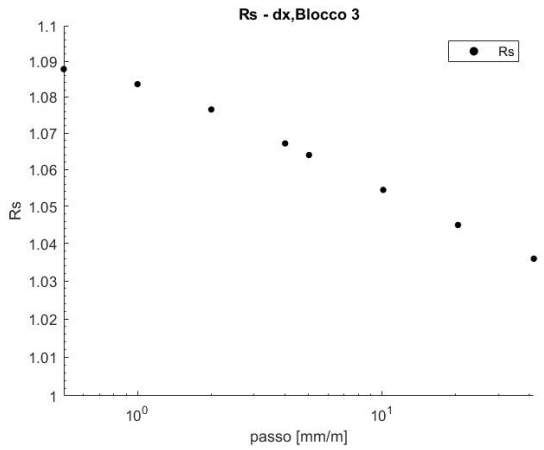


Figura 5.37 Blocchi: calcolo del parametro di scabrezza Rs al variare del passo di campionamento superficiale.

5.3.6. Stima di JRC con formulazioni da letteratura

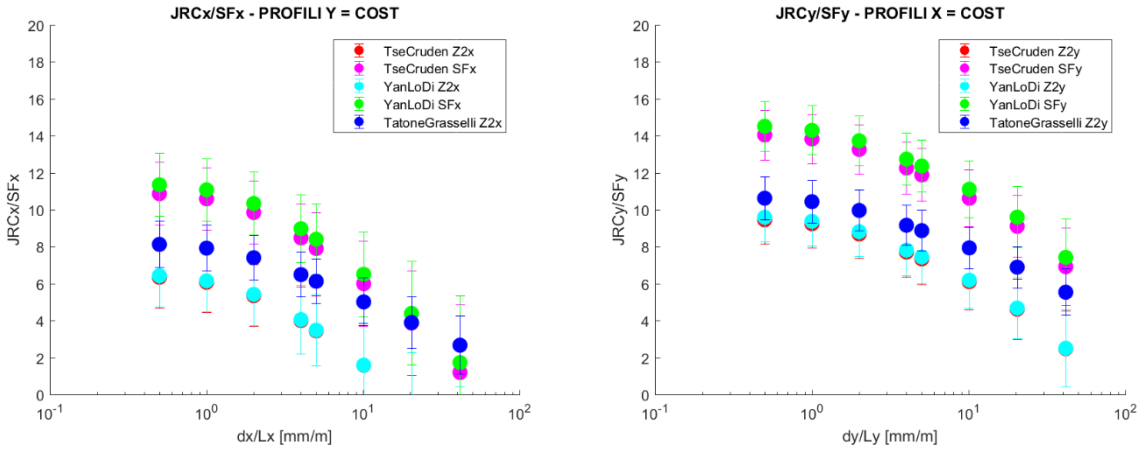


Figura 5.38 Blocco 1: JRC lungo x ed y.

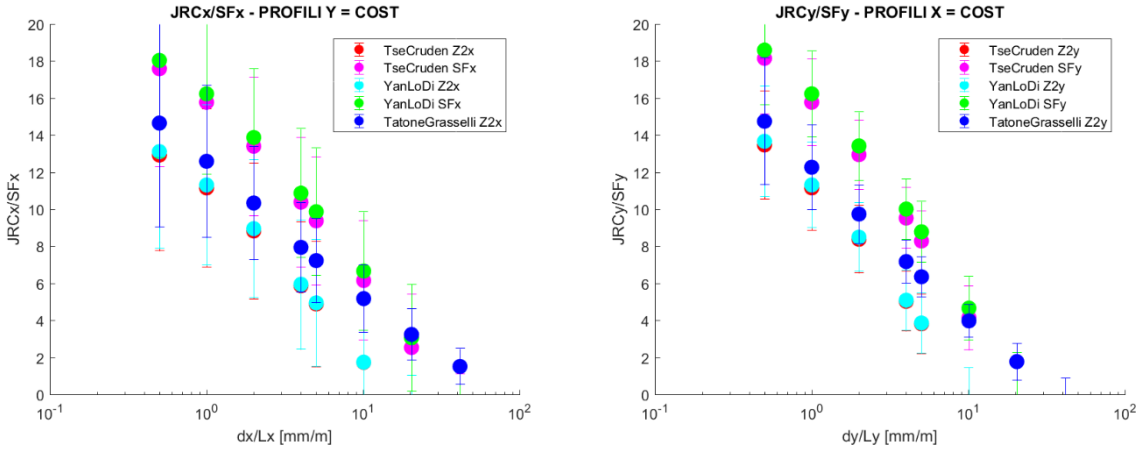


Figura 5.39 Blocco 2: JRC lungo x ed y.

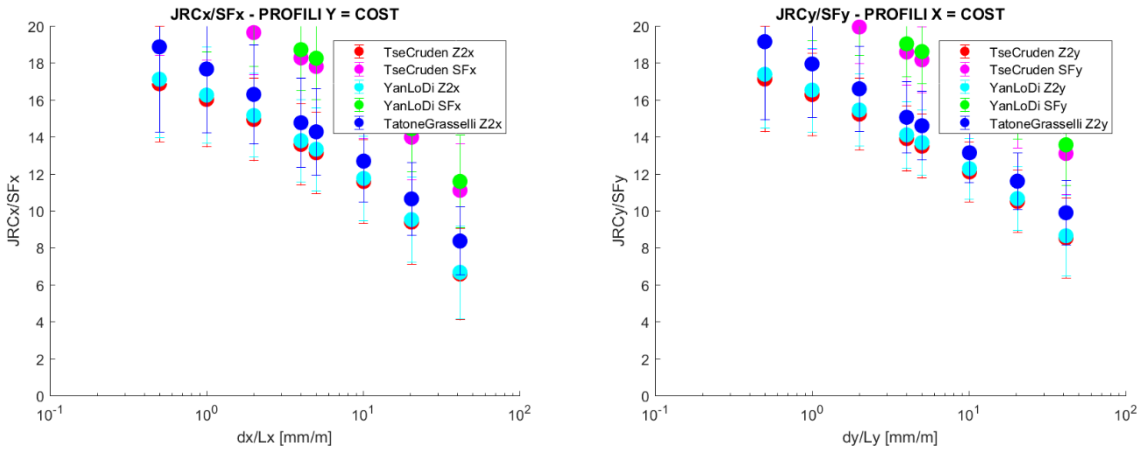


Figura 5.40 Blocco 3: JRC lungo x ed y.

5.3.7. Anisotropia

In seguito, si riportano i Polar Plot di Z_2 per i 72 profili individuati per il 3 blocchi. Il passo di campionamento dei profili è di 10 mm (Figura 5.41).

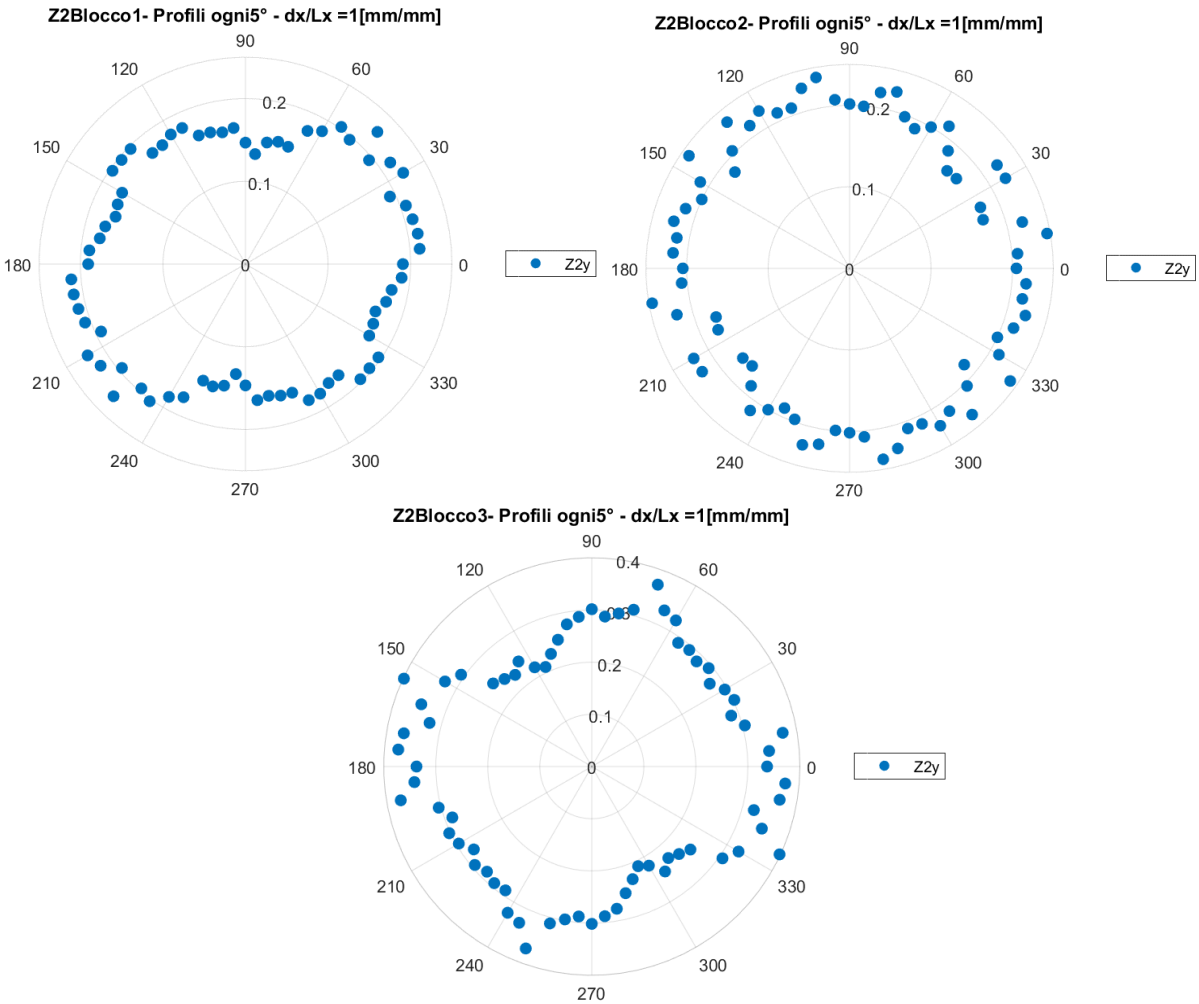


Figura 5.41 Polar Plot di Z_2 per il blocco 1, blocco 2 e blocco 3.

Si riportano in Tabella 5.15 i valori minimo di scabrezza $Z_{2,min}$, il valore massimo $Z_{2,max}$ ed il loro rapporto che fornisce un'indicazione sull'anisotropia dell'elemento. Il blocco 2 evidenzia una maggiore isotropia risultando $Z_{2,min}$/ $Z_{2,max}$ più prossimo all'unità, mentre il blocco1 ed il blocco 3 evidenziano direzioni di anisotropia.

Tabella 5.15 Blocchi, rapporto di anisotropia.

Elemento	Anisotropia		
	Z2min	Z2max	Z2min/Z2max
Blocco 1	0,133	0,237	0,562
Blocco 2	0,169	0,246	0,687
Blocco 3	0,211	0,399	0,528

5.4. Scala di laboratorio – provini

5.4.1. Preparazione dei DSM

I DSM dei provini (Figura 5.13, Figura 5.14 e Figura 5.15) sono editati e ne sono ritagliate delle nuvole quadrate (Figura 5.16) costituiti da:

- campione G1-TOP: 50 mm x 50 mm, 42'651 punti, risoluzione 1706 punti a cm^2;
- campione G1-BOTTOM: 50 mm x 50 mm, 38'350 punti, risoluzione 1534 punti a cm^2;
- campione G2-TOP: 50 mm x 50 mm, 34'210 punti, risoluzione 1368 punti a cm^2;
- campione G2-BOTTOM: 50 mm x 50 mm, 37'421 punti, risoluzione 1497 punti a cm^2;
- campione G3-TOP: 50 mm x 50 mm, 40'449 punti, risoluzione 1618 punti a cm^2;
- campione G3-BOTTOM: 50 mm x 50 mm, 40'449 punti, risoluzione 1618 punti a cm^2.

I diagrammi sono normalizzati rispetto la grandezza del provino indagato.

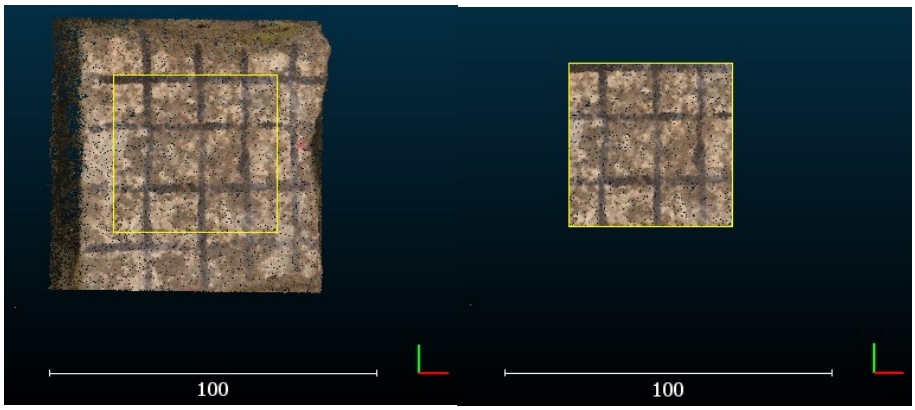


Figura 5.42 G1 TOP C0: DSM e ritaglio 50 mm x 50 mm.

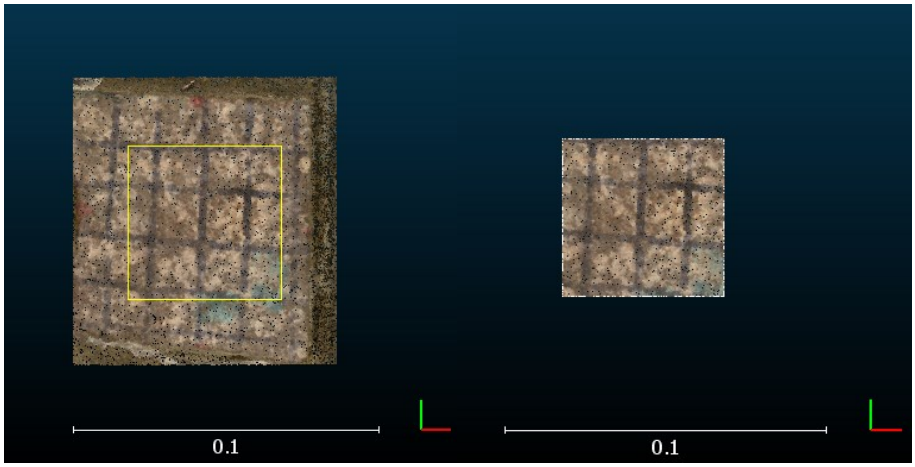


Figura 5.43 G1 BOTTOM C0: DSM e ritaglio 50 mm x 50 mm.

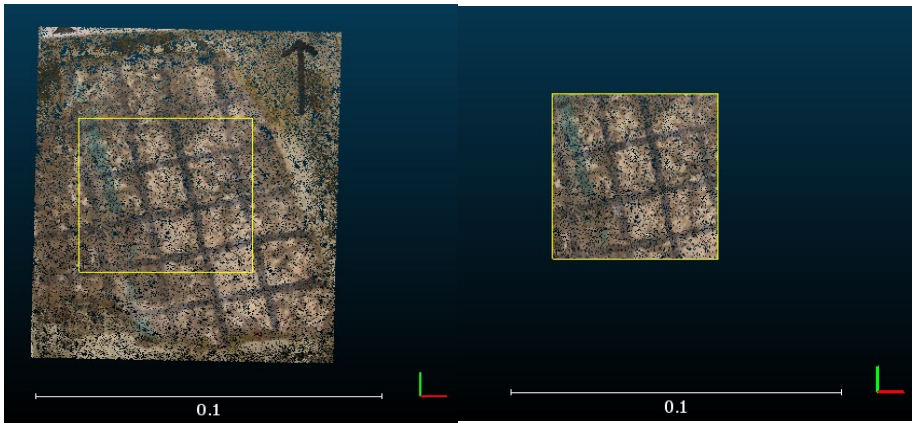


Figura 5.44 G2 TOP C0: DSM e ritaglio 50 mm x 50 mm.

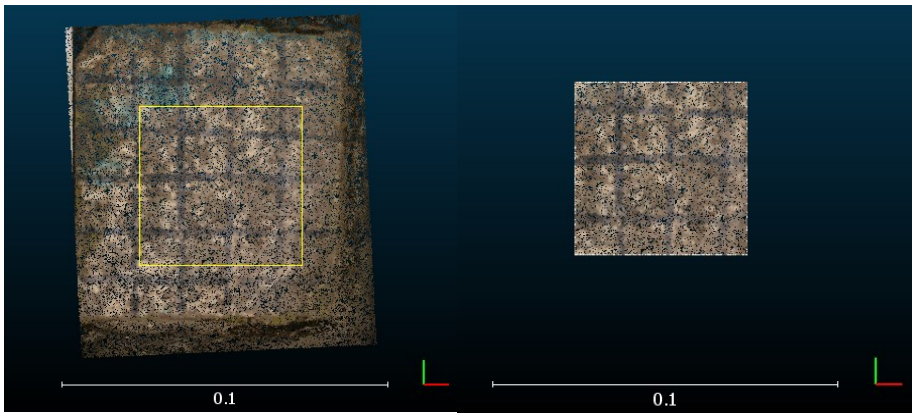


Figura 5.45 G2 BOTTOM C0: DSM e ritaglio 50 mm x 50 mm.

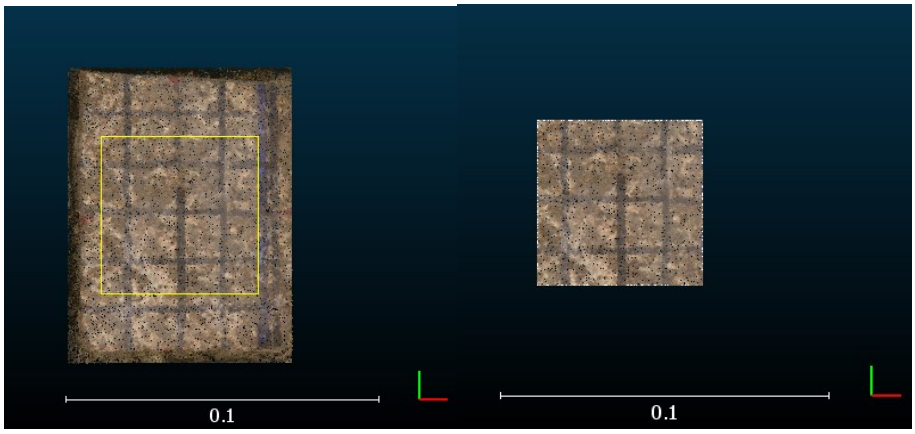


Figura 5.46 G3 TOP C0: DSM e ritaglio 50 mm x 50 mm.

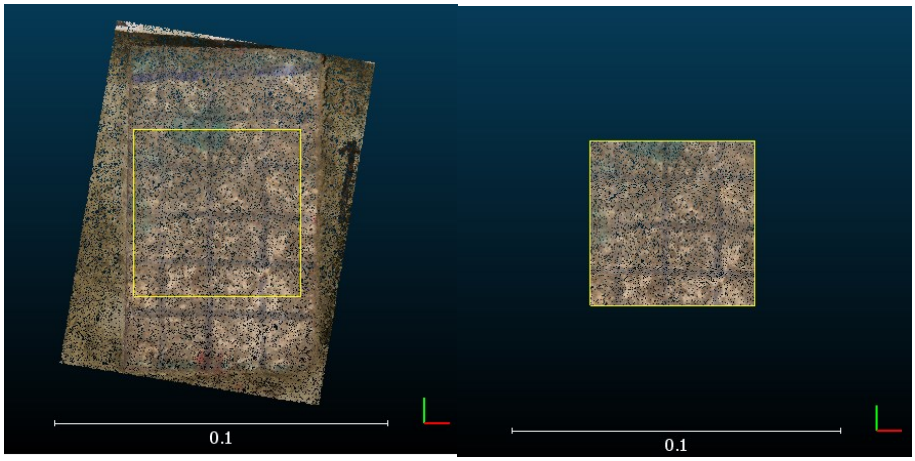


Figura 5.47 G3 BOTTOM C0: DSM e ritaglio 50 mm x 50 mm.

5.4.2. Rotazione della nuvola

Tramite una metodologia a minimi quadrati si valuta la superficie media piana per tutte le superfici ritagliate dai provini al passo 5.4.1

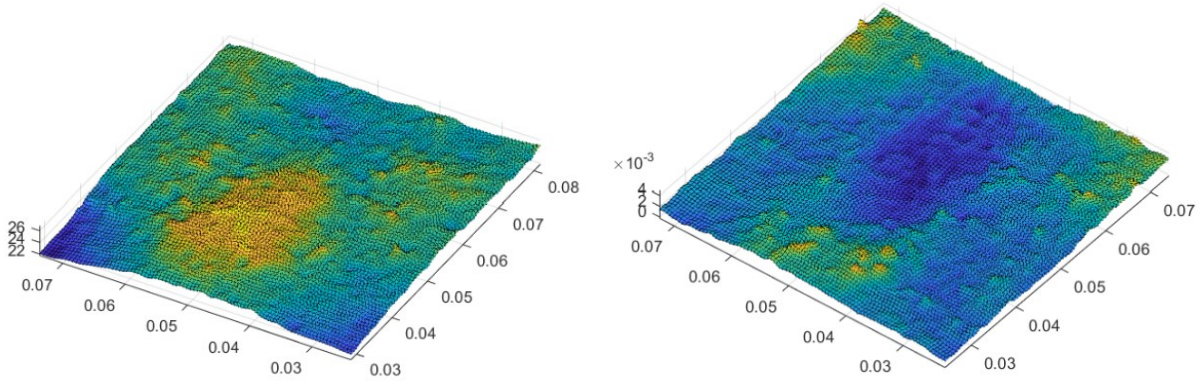


Figura 5.48 GS1 TOP e BOTTOM: DSM dopo la rotazione sul piano orizzontale del piano che approssima la superficie

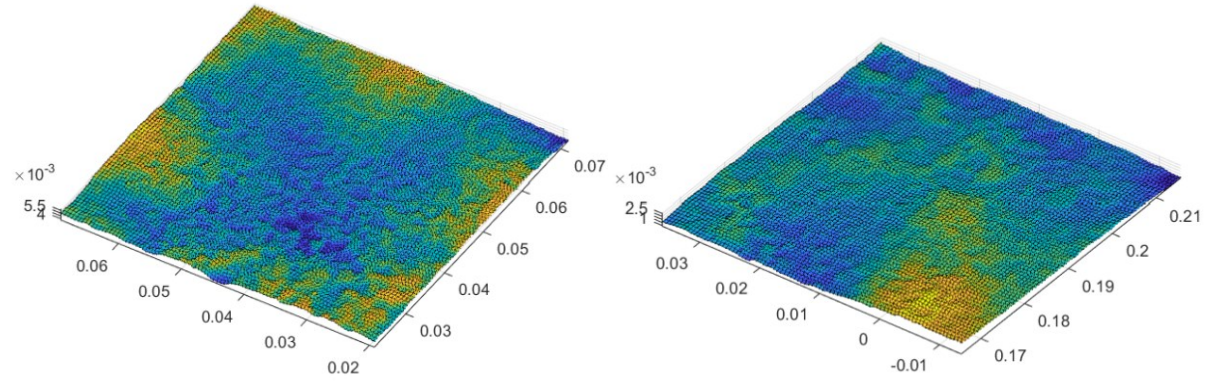


Figura 5.49 GS2 TOP e BOTTOM: DSM dopo la rotazione sul piano orizzontale del piano che approssima la superficie.

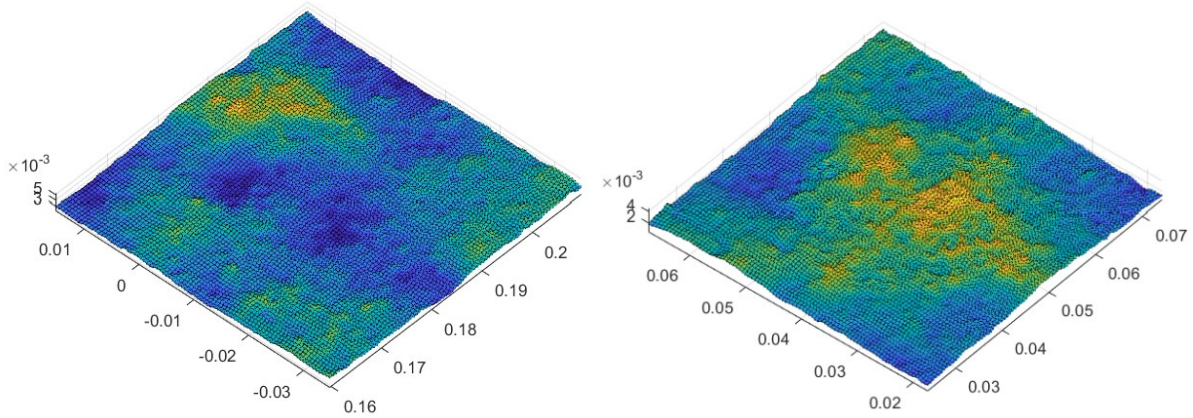


Figura 5.50 GS3 TOP e BOTTOM: DSM dopo la rotazione sul piano orizzontale del piano che approssima la superficie.

5.4.3. Estrazione profili regolari con Surfer

I DSM dei tre provini sono elaborati tramite SURFER che estrapola il numero di profili definito dall'utente (Tabella 5.16) e ne interpola le elevazioni.

Tabella 5.16 Numero e spaziatura dei profili estratti con SURFER per i provini.

Provino	*Profili estratti (direzione x ed y)*	*Lato elemento [m]*	*Distanza tra i profili estratti [mm]*
G1 - T	200	0,05	0,25
G1 - B	200	0,05	0,25
G2 - T	200	0,05	0,25
G2 - B	200	0,05	0,25
G3 - T	200	0,05	0,25
G3 - B	200	0,05	0,25

5.4.4. Campionamento dei profili

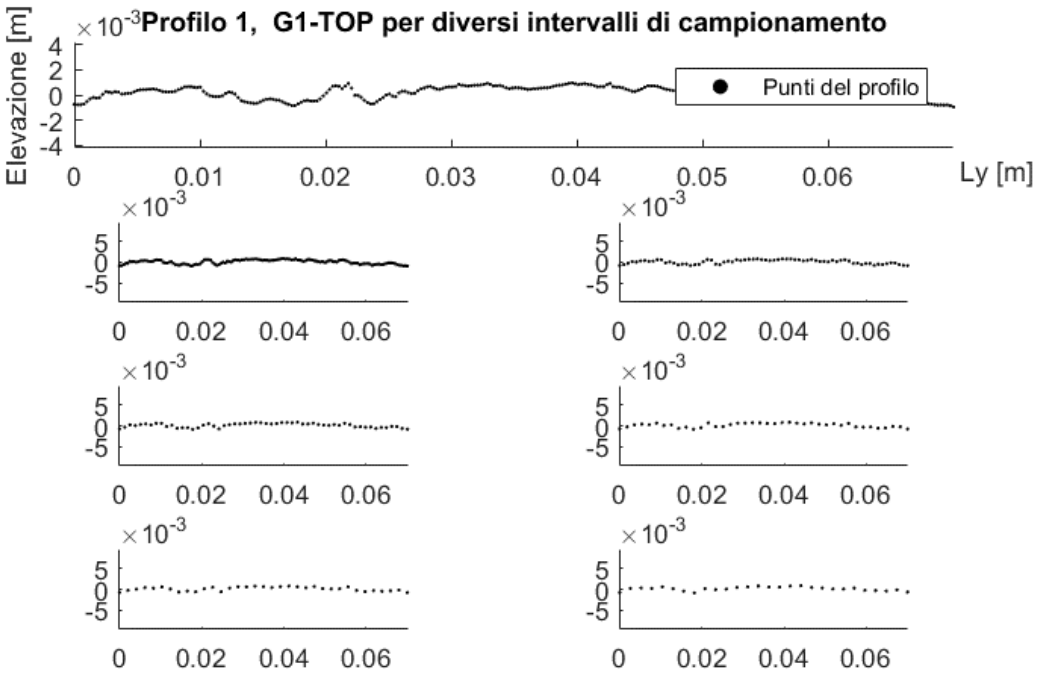


Figura 5.51 GS1 TOP, profilo generico: intervalli di campionamento usati nella valutazione di Z_2 ed R_p.

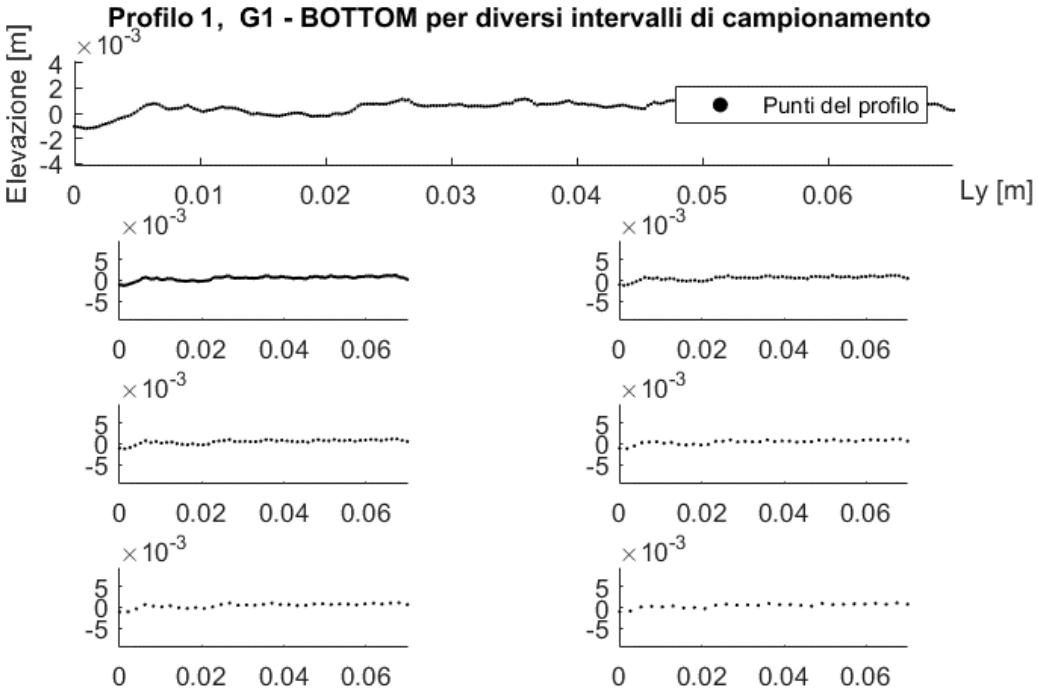


Figura 5.52 GS1 BOTTOM, profilo generico: intervalli di campionamento usati nella valutazione di Z_2 ed R_p.

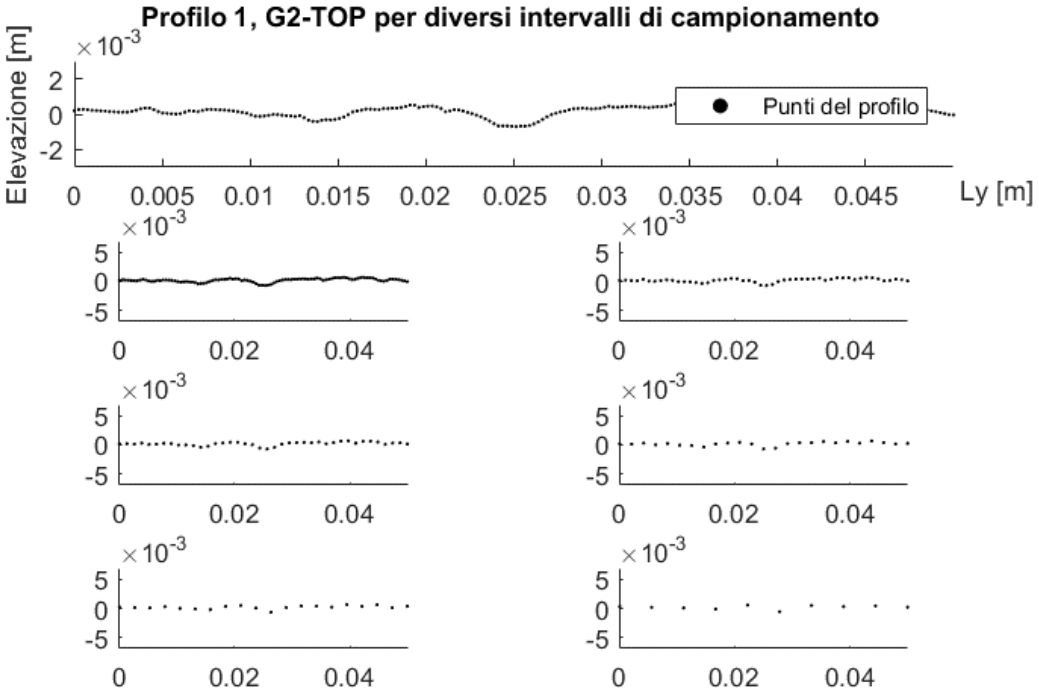


Figura 5.53 GS2 TOP, profilo generico: intervalli di campionamento usati nella valutazione di Z_2 ed R_p.

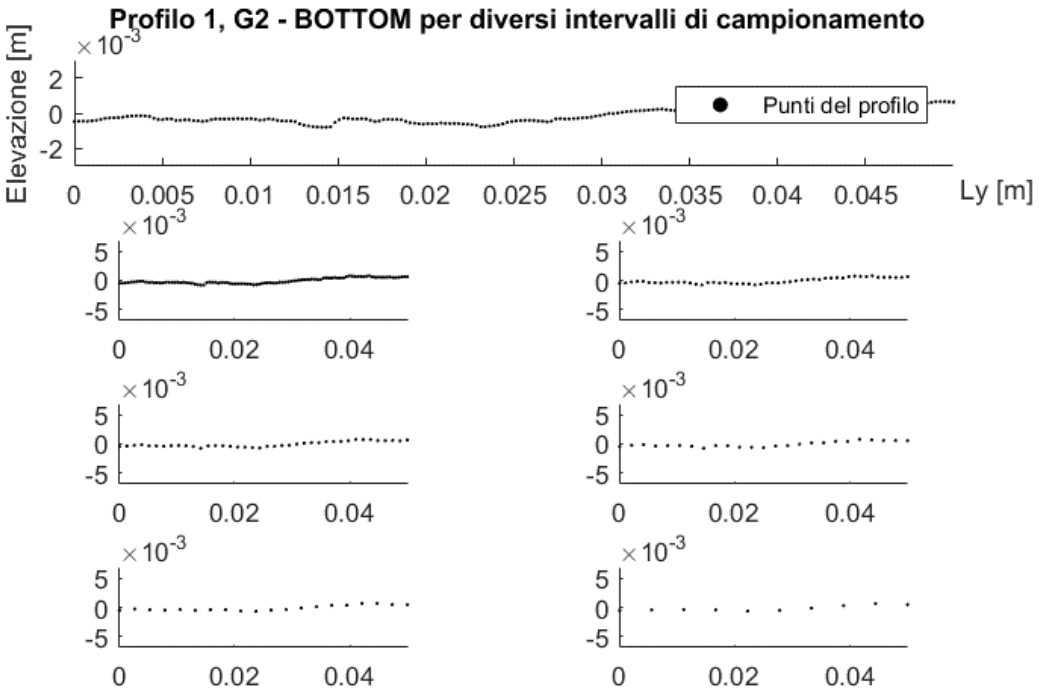


Figura 5.54 GS2 BOTTOM, profilo generico: intervalli di campionamento usati nella valutazione di Z_2 ed R_p.

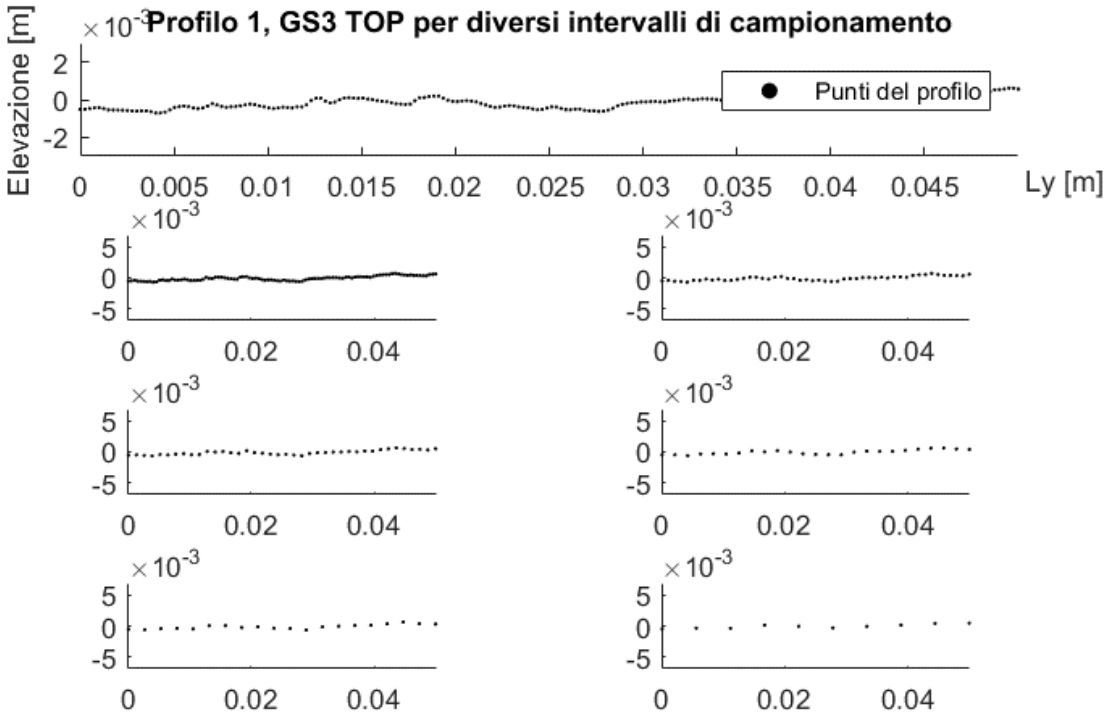


Figura 5.55 GS3 TOP, profilo generico: intervalli di campionamento usati nella valutazione di Z_2 ed R_p.

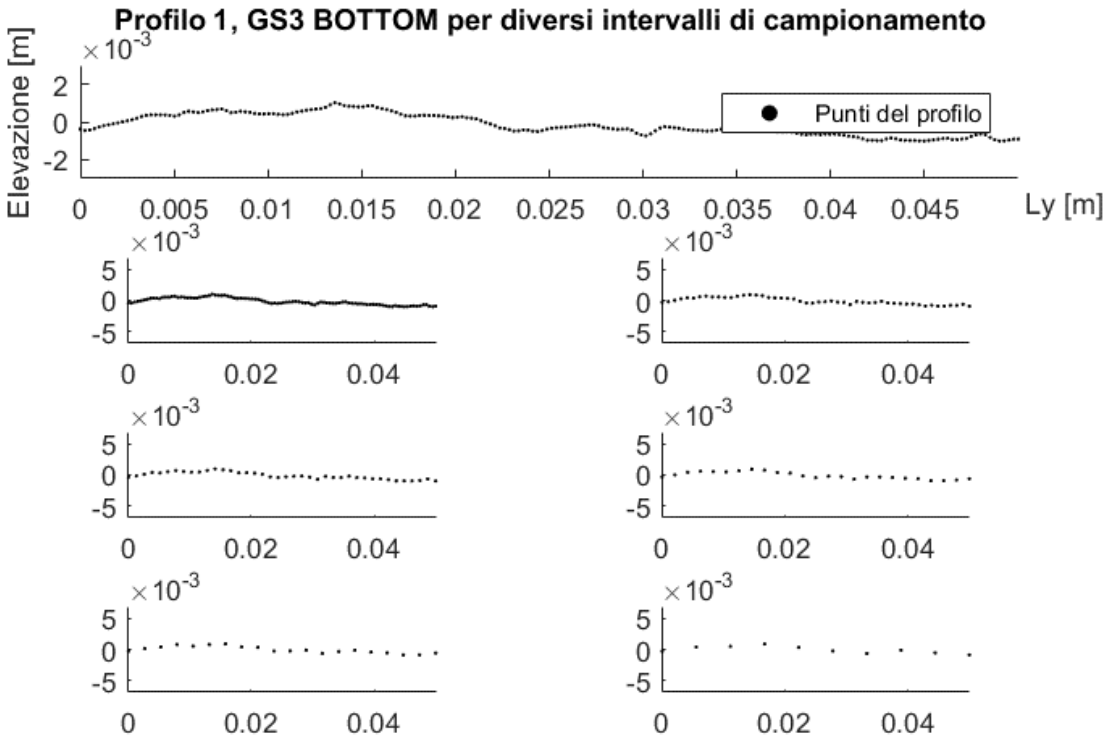


Figura 5.56 GS3 BOTTOM, profilo generico: intervalli di campionamento usati nella valutazione di Z_2 ed R_p.

5.4.5. Valutazione parametri di scabrezza: Z2, Rp, Rs

- Provino G1 TOP e BOTTOM

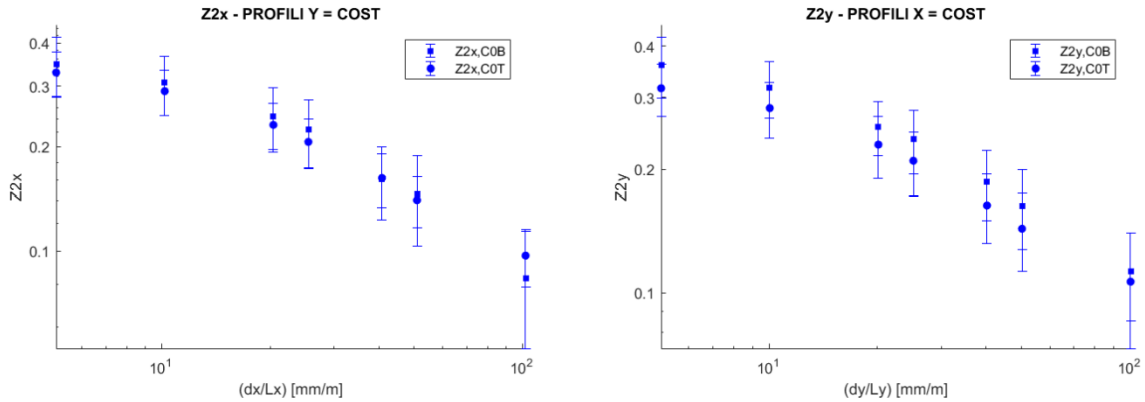


Figura 5.57 Provino G1 TOP e BOTTOM: Z2x (profili y=cost) ed Z2y (profili x = cost).

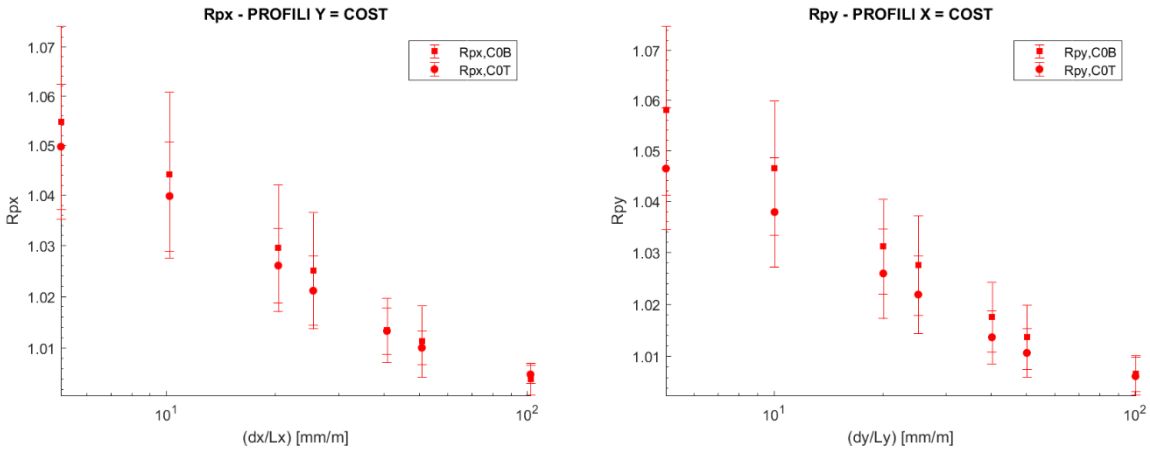


Figura 5.58 Provino G1 TOP e BOTTOM: Rpx (profili y=cost) ed Rpy (profili x = cost).

Tabella 5.17 Provino G1 TOP: riepilogo dello studio statistico dei parametri di scabrezza Z2 ed Rp per i diversi intervalli di campionamento.

PROVINO G1 TOP [0,05 m x 0,05 m]							
X_passo_norm [mm/m]	**101**	**50**	**40**	**25**	**20**	**10**	**5**
Z2X mean	0,097	0,140	0,162	0,206	0,231	0,290	0,328
Z2X min	0,051	0,087	0,109	0,138	0,160	0,201	0,219
Z2X max	0,142	0,211	0,247	0,300	0,328	0,415	0,479
Z2X Standard Deviation	0,019	0,024	0,029	0,034	0,035	0,044	0,048
RPX mean	1,005	1,010	1,013	1,021	1,026	1,040	1,050
RPX min	1,001	1,004	1,006	1,009	1,013	1,020	1,023
RPX max	1,010	1,022	1,028	1,042	1,048	1,073	1,085
RPX Standard Deviation	0,002	0,003	0,005	0,007	0,007	0,011	0,013
Y_passo_norm [mm/m]	**101**	**50**	**40**	**25**	**20**	**10**	**5**
Z2Y mean	0,107	0,144	0,164	0,210	0,230	0,282	0,316
Z2Y min	0,033	0,079	0,095	0,122	0,149	0,166	0,176
Z2Y max	0,218	0,265	0,265	0,374	0,378	0,452	0,507
Z2Y Standard Deviation	0,033	0,031	0,031	0,037	0,040	0,044	0,046
RPY mean	1,006	1,011	1,014	1,022	1,026	1,038	1,046
RPY min	1,001	1,003	1,005	1,007	1,011	1,014	1,015
RPY max	1,023	1,033	1,034	1,060	1,062	1,082	1,100
RPY Standard Deviation	0,004	0,005	0,005	0,007	0,009	0,011	0,012

Tabella 5.18 Provino G1 BOTTOM: riepilogo dello studio statistico dei parametri di scabrezza Z_2 ed R_p per i diversi intervalli di campionamento.

PROVINO G1 BOTTOM [0,05 m x 0,05 m]							
X_passo_norm [mm/m]	**101**	**50**	**40**	**25**	**20**	**10**	**5**
Z2X mean	0,083	0,146	0,161	0,224	0,245	0,306	0,348
Z2X min	0,000	0,069	0,078	0,121	0,131	0,187	0,213
Z2X max	0,189	0,282	0,256	0,407	0,449	0,544	0,590
Z2X Standard Deviation	0,031	0,042	0,038	0,050	0,052	0,060	0,069
RPX mean	1,004	1,011	1,013	1,025	1,030	1,044	1,055
RPX min	1,000	1,002	1,003	1,007	1,008	1,017	1,022
RPX max	1,017	1,038	1,032	1,075	1,086	1,121	1,134
RPX Standard Deviation	0,003	0,007	0,006	0,011	0,013	0,017	0,020
Y_passo_norm [mm/m]	**101**	**50**	**40**	**25**	**20**	**10**	**5**
Z2Y mean	0,113	0,164	0,186	0,237	0,254	0,317	0,360
Z2Y min	0,069	0,103	0,114	0,173	0,194	0,224	0,239
Z2Y max	0,209	0,291	0,279	0,390	0,411	0,546	0,619
Z2Y Standard Deviation	0,027	0,036	0,036	0,042	0,038	0,050	0,062
RPY mean	1,007	1,014	1,018	1,028	1,031	1,047	1,058
RPY min	1,002	1,005	1,007	1,015	1,018	1,024	1,027
RPY max	1,021	1,039	1,037	1,067	1,075	1,118	1,139
RPY Standard Deviation	0,003	0,006	0,007	0,010	0,009	0,013	0,017

L'errore commesso considerando un passo di campionamento di soglia pari ad 10mm/m è:

- Errore per Z_{2x} – GS1 TOP = 13,1%;
- Errore per Z_{2Y} – GS1 TOP = 12%;
- Errore per Z_{2x} – GS1 BOTTOM = 13,7%;
- Errore per Z_{2Y} – GS1 BOTTOM = 13,5%.

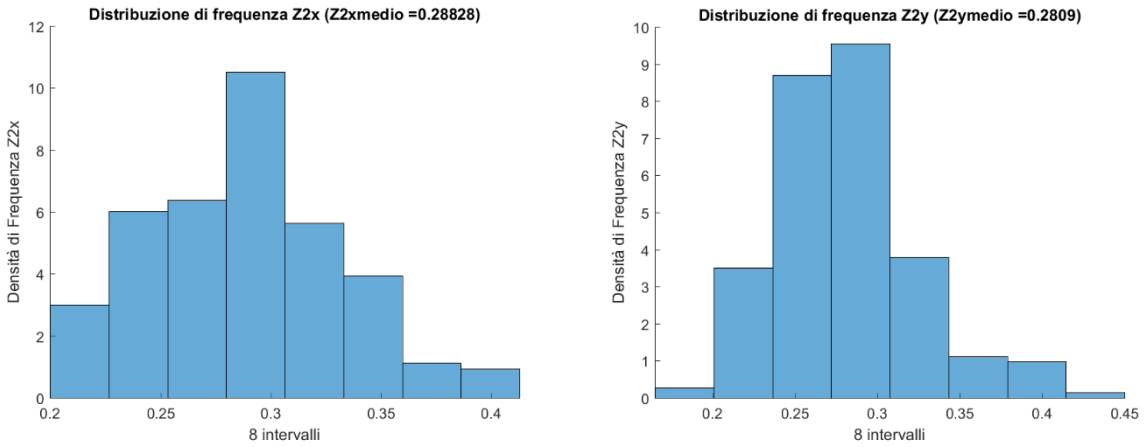


Figura 5.59 Provino G1-TOP: distribuzione di frequenza per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 10mm/m.

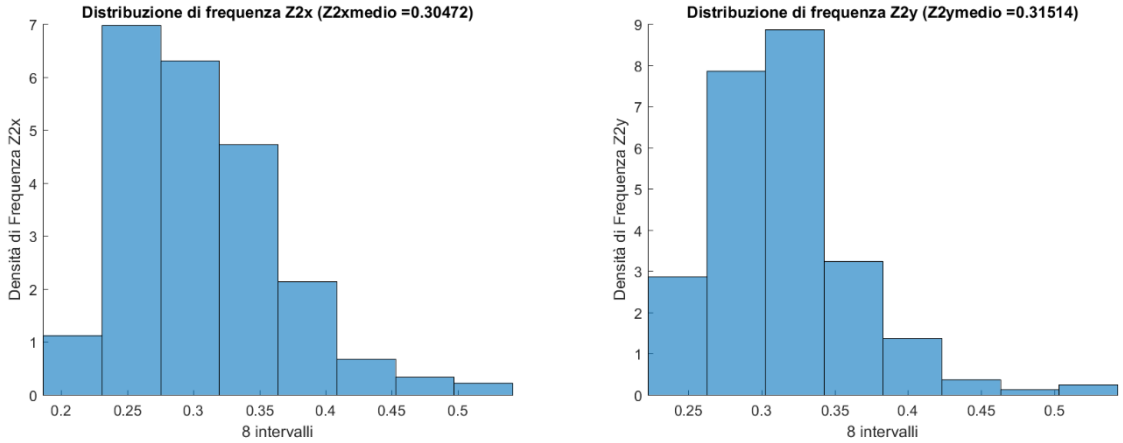


Figura 5.60 Provino G1-BOT: distribuzione di frequenza per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 10mm/m.

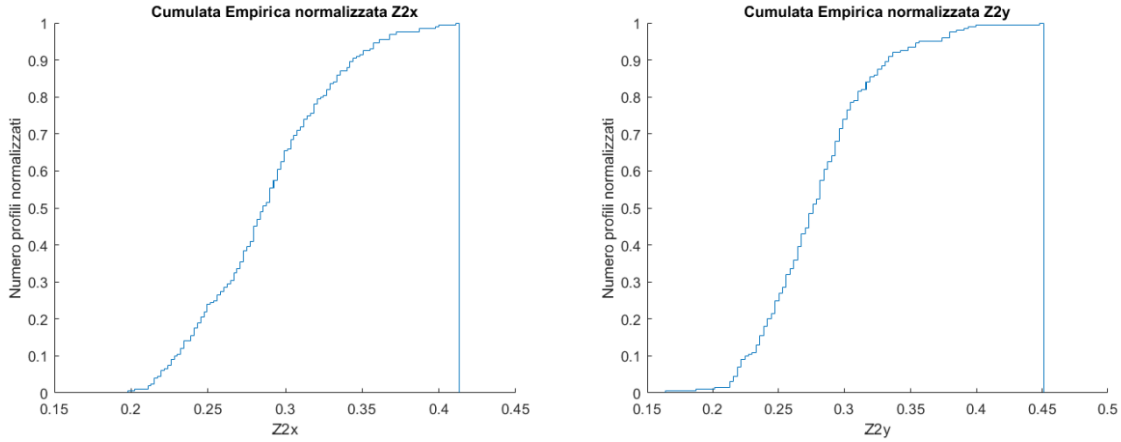


Figura 5.61 Provino G1-TOP: frequenza cumulata per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 10mm/m.

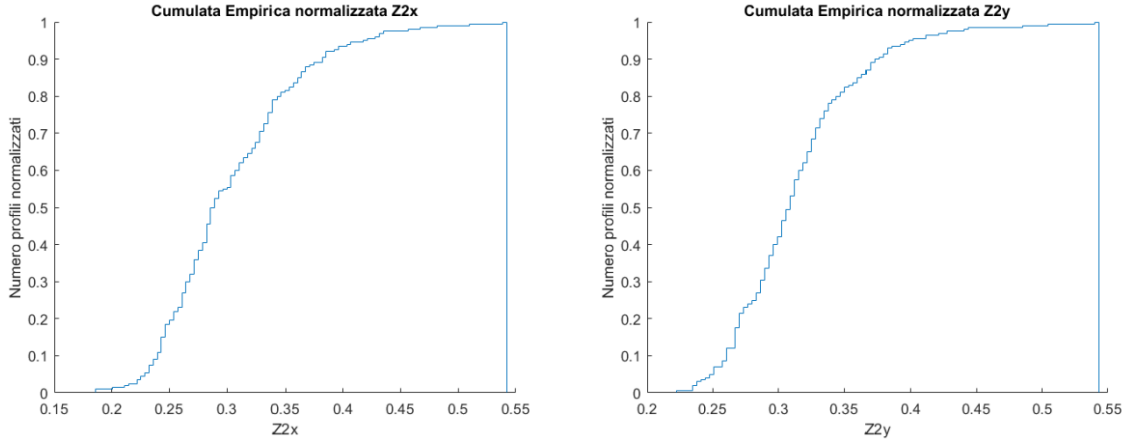


Figura 5.62 Provino G1-BOT: frequenza cumulata per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 10mm/m.

- Provino G2 TOP e BOTTOM

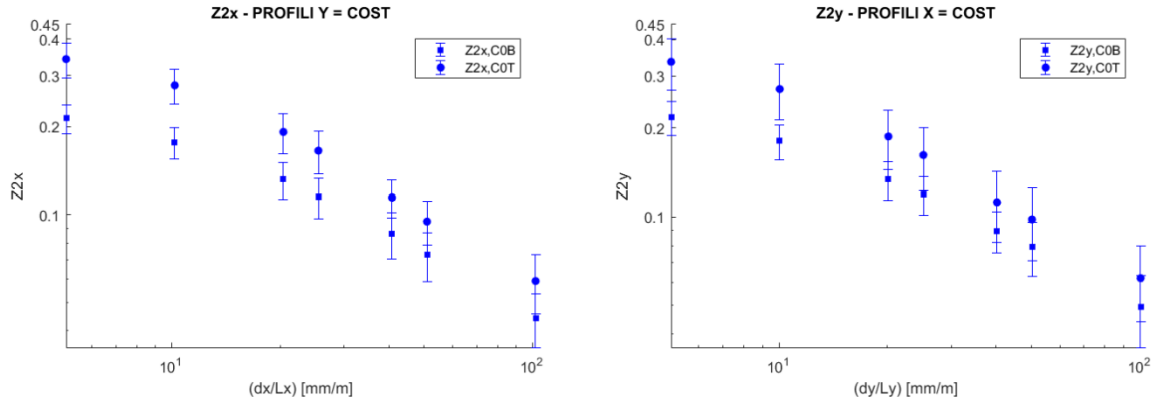


Figura 5.63 Provino G2 TOP e BOTTOM: Z_{2x} (profili y=cost) ed Z_{2y} (profili x = cost).

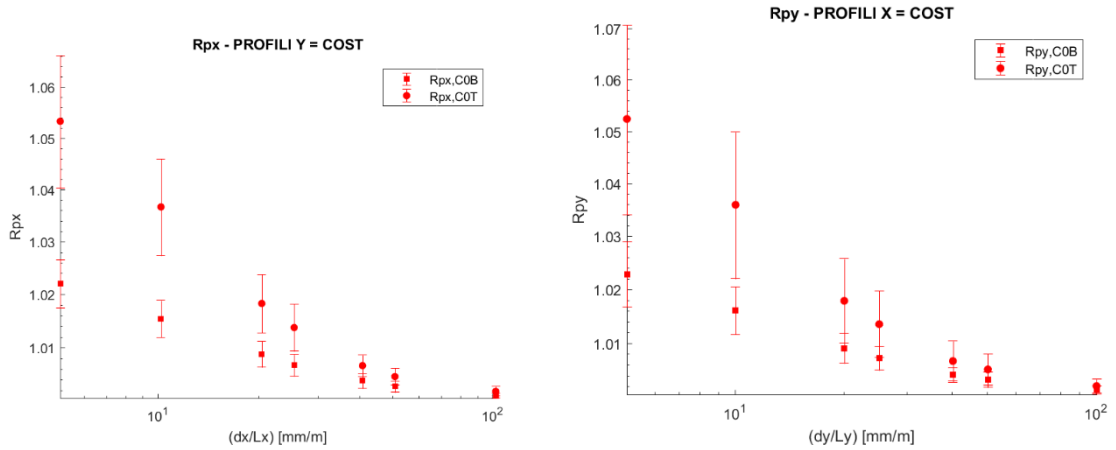


Figura 5.64 Provino G2 TOP e BOTTOM: Rpx (profili y=cost) ed Rpy (profili x = cost).

Tabella 5.19 Provino G2 TOP: riepilogo dello studio statistico dei parametri di scabrezza Z_2 ed Rp per i diversi intervalli di campionamento.

PROVINO G2 TOP [0,05 m x 0,05 m]							
X_passo_norm [mm/m]	**101**	**50**	**40**	**25**	**20**	**10**	**5**
Z2X mean	0,059	0,095	0,115	0,165	0,192	0,278	0,342
Z2X min	0,030	0,056	0,074	0,093	0,113	0,179	0,223
Z2X max	0,116	0,148	0,169	0,237	0,266	0,364	0,441
Z2X Standard Deviation	0,014	0,016	0,017	0,028	0,030	0,038	0,047
RPX mean	1,002	1,005	1,007	1,014	1,018	1,037	1,053
RPX min	1,001	1,002	1,003	1,004	1,006	1,016	1,024
RPX max	1,007	1,011	1,014	1,027	1,034	1,059	1,083
RPX Standard Deviation	0,001	0,002	0,002	0,004	0,006	0,009	0,013
Y_passo_norm [mm/m]	**101**	**50**	**40**	**25**	**20**	**10**	**5**
Z2Y mean	0,062	0,098	0,112	0,162	0,187	0,271	0,336
Z2Y min	0,032	0,048	0,060	0,093	0,107	0,140	0,162
Z2Y max	0,119	0,160	0,216	0,264	0,312	0,399	0,483
Z2Y Standard Deviation	0,018	0,027	0,030	0,039	0,043	0,058	0,067
RPY mean	1,002	1,005	1,007	1,014	1,018	1,036	1,052
RPY min	1,001	1,001	1,002	1,004	1,006	1,010	1,013
RPY max	1,007	1,013	1,023	1,033	1,046	1,071	1,100
RPY Standard Deviation	0,001	0,003	0,004	0,006	0,008	0,014	0,018

Tabella 5.20 Provino G2 BOTTOM: riepilogo dello studio statistico dei parametri di scabrezza Z_2 ed Rp per i diversi intervalli di campionamento.

PROVINO G2 BOTTOM [0,05 m x 0,05 m]							
X_passo_norm [mm/m]	**101**	**50**	**40**	**25**	**20**	**10**	**5**
Z2X mean	0,044	0,073	0,086	0,115	0,132	0,177	0,214
Z2X min	0,015	0,046	0,053	0,072	0,085	0,107	0,123
Z2X max	0,069	0,106	0,130	0,153	0,178	0,230	0,271
Z2X Standard Deviation	0,009	0,014	0,016	0,018	0,019	0,022	0,024
RPX mean	1,001	1,003	1,004	1,007	1,009	1,015	1,022
RPX min	1,000	1,001	1,001	1,003	1,004	1,006	1,007
RPX max	1,002	1,006	1,008	1,011	1,015	1,025	1,034
RPX Standard Deviation	0,000	0,001	0,001	0,002	0,002	0,003	0,005
Y_passo_norm [mm/m]	**101**	**50**	**40**	**25**	**20**	**10**	**5**
Z2Y mean	0,050	0,079	0,090	0,119	0,134	0,180	0,217
Z2Y min	0,028	0,048	0,060	0,085	0,096	0,137	0,162
Z2Y max	0,088	0,137	0,126	0,181	0,189	0,263	0,303
Z2Y Standard Deviation	0,014	0,017	0,014	0,018	0,020	0,024	0,029
RPY mean	1,001	1,003	1,004	1,007	1,009	1,016	1,023
RPY min	1,000	1,001	1,002	1,004	1,005	1,009	1,013
RPY max	1,004	1,009	1,008	1,016	1,018	1,033	1,042
RPY Standard Deviation	0,001	0,001	0,001	0,002	0,003	0,004	0,006

L'errore commesso considerando un passo di campionamento di soglia pari ad 10mm/m è:

- Errore per Z_{2x} – GS2 TOP = 23%;
- Errore per Z_{2Y} – GS2 TOP = 23,9%;
- Errore per Z_{2x} – GS2 BOTTOM = 20,9%;
- Errore per Z_{2Y} – GS2 BOTTOM = 20,5%.

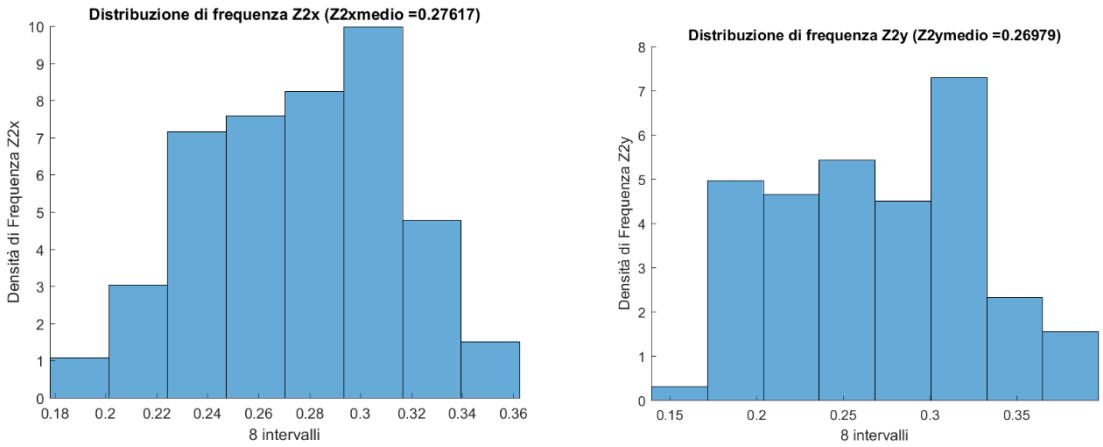


Figura 5.65 Provino G2-TOP: distribuzione di frequenza per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 10mm/m.

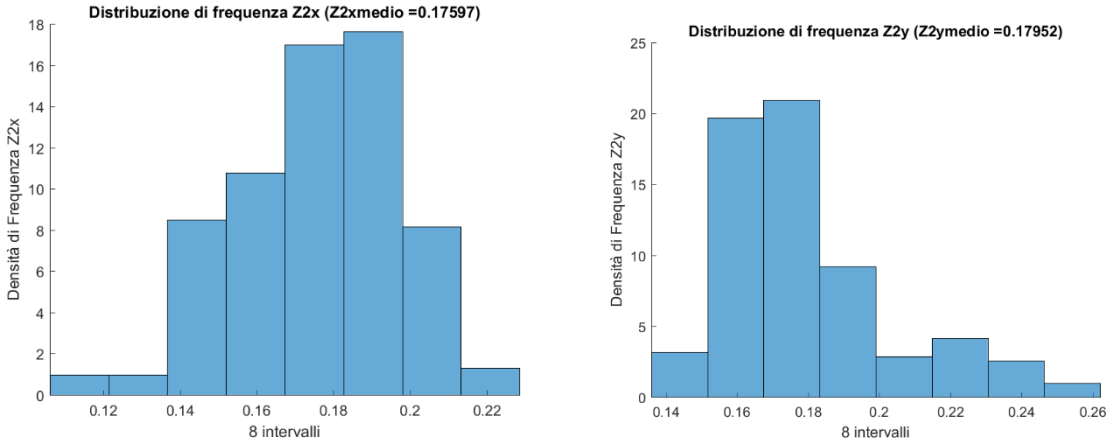


Figura 5.66 Provino G2-BOT: distribuzione di frequenza per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 10mm/m.

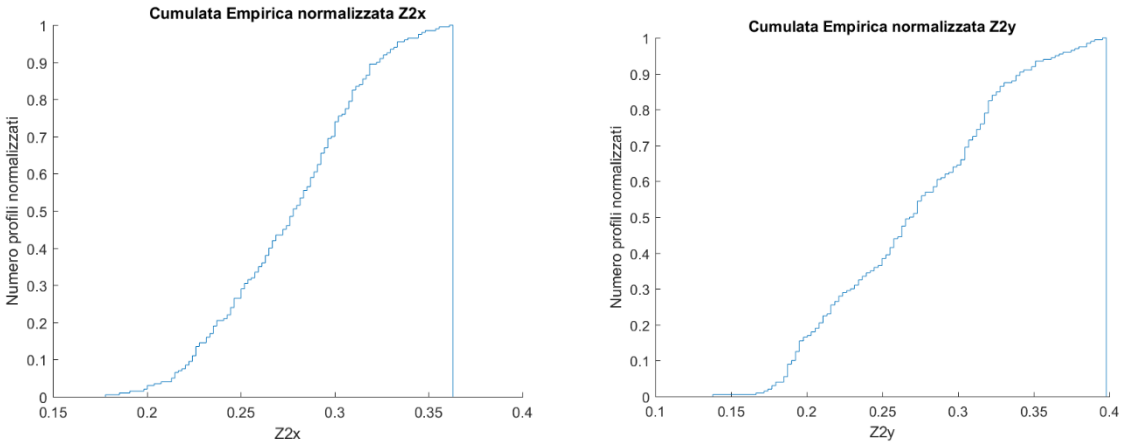


Figura 5.67 Provino G2-TOP: frequenza cumulata per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 10mm/m.

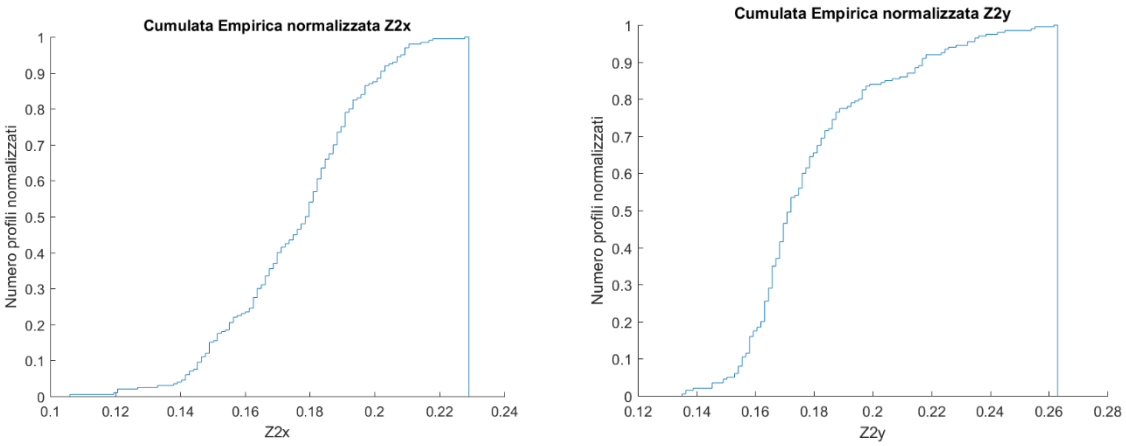


Figura 5.68 Provino G2-BOT: frequenza cumulata per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 10mm/m.

- Provino G3 TOP e BOTTOM

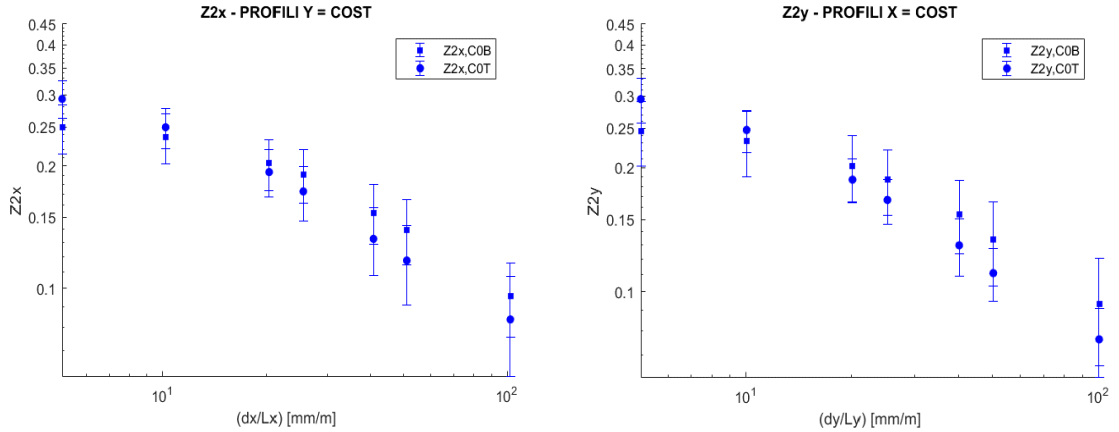


Figura 5.69 Provino G3 TOP e BOTTOM: Z_{2x} (profili y=cost) ed Z_{2y} (profili x = cost).

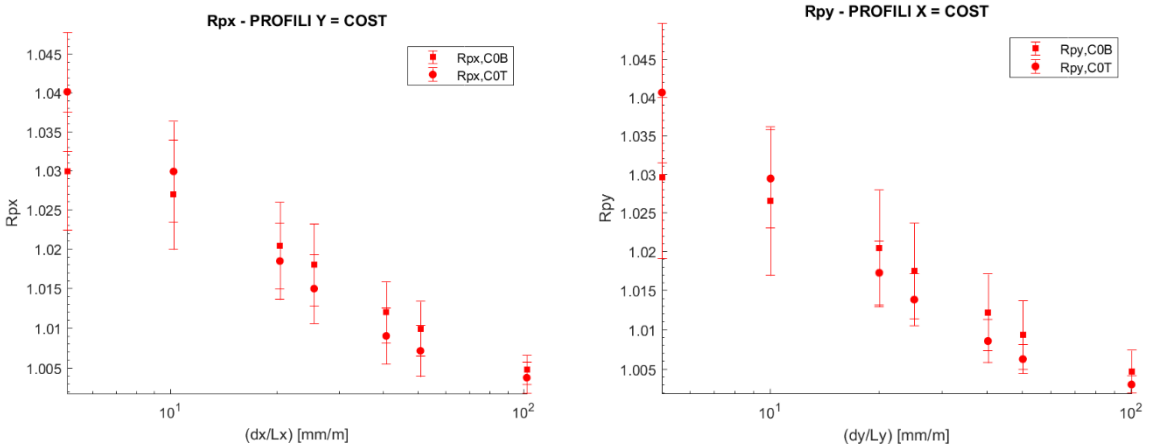


Figura 5.70 Provino G3 TOP e BOTTOM: Rpx (profili y=cost) ed Rpy (profili x = cost).

Tabella 5.21 Provino G3 TOP: riepilogo dello studio statistico dei parametri di scabrezza Z_2 ed Rp per i diversi intervalli di campionamento.

PROVINO G3 TOP [0,05 m x 0,05 m]							
X_passo_norm [mm/m]	**101**	**50**	**40**	**25**	**20**	**10**	**5**
Z2X mean	0,084	0,117	0,133	0,173	0,193	0,250	0,293
Z2X min	0,034	0,054	0,077	0,098	0,126	0,196	0,229
Z2X max	0,137	0,204	0,207	0,250	0,276	0,326	0,390
Z2X Standard Deviation	0,023	0,026	0,025	0,026	0,026	0,028	0,031
RPX mean	1,004	1,007	1,009	1,015	1,018	1,030	1,040
RPX min	1,001	1,002	1,003	1,005	1,008	1,019	1,025
RPX max	1,009	1,020	1,021	1,030	1,035	1,049	1,063
RPX Standard Deviation	0,002	0,003	0,004	0,004	0,005	0,006	0,008
Y_passo_norm [mm/m]	**101**	**50**	**40**	**25**	**20**	**10**	**5**
Z2Y mean	0,076	0,111	0,130	0,167	0,187	0,248	0,295
Z2Y min	0,032	0,076	0,089	0,122	0,140	0,183	0,214
Z2Y max	0,115	0,163	0,195	0,220	0,238	0,400	0,443
Z2Y Standard Deviation	0,015	0,016	0,021	0,021	0,023	0,029	0,037
RPY mean	1,003	1,006	1,009	1,014	1,017	1,029	1,041
RPY min	1,001	1,003	1,004	1,007	1,010	1,016	1,022
RPY max	1,007	1,013	1,019	1,022	1,028	1,060	1,072
RPY Standard Deviation	0,001	0,002	0,003	0,003	0,004	0,006	0,009

Tabella 5.22 Provino G3 BOTTOM: riepilogo dello studio statistico dei parametri di scabrezza Z_2 ed Rp per i diversi intervalli di campionamento.

PROVINO G3 BOTTOM [0,05 m x 0,05 m]							
X_passo_norm [mm/m]	**101**	**50**	**40**	**25**	**20**	**10**	**5**
Z2X mean	0,096	0,139	0,154	0,191	0,203	0,236	0,249
Z2X min	0,047	0,090	0,097	0,110	0,114	0,127	0,131
Z2X max	0,138	0,203	0,214	0,284	0,263	0,310	0,324
Z2X Standard Deviation	0,020	0,025	0,026	0,029	0,030	0,033	0,035
RPX mean	1,005	1,010	1,012	1,018	1,020	1,027	1,030
RPX min	1,001	1,004	1,005	1,006	1,007	1,008	1,009
RPX max	1,009	1,020	1,022	1,037	1,033	1,044	1,048
RPX Standard Deviation	0,002	0,003	0,004	0,005	0,006	0,007	0,008
Y_passo_norm [mm/m]	**101**	**50**	**40**	**25**	**20**	**10**	**5**
Z2Y mean	0,093	0,134	0,155	0,187	0,202	0,232	0,246
Z2Y min	0,046	0,087	0,098	0,115	0,124	0,135	0,139
Z2Y max	0,159	0,215	0,229	0,263	0,341	0,388	0,407
Z2Y Standard Deviation	0,027	0,031	0,031	0,033	0,037	0,043	0,045
RPY mean	1,005	1,009	1,012	1,018	1,020	1,027	1,030
RPY min	1,001	1,004	1,005	1,007	1,008	1,009	1,010
RPY max	1,013	1,022	1,025	1,034	1,053	1,068	1,074
RPY Standard Deviation	0,003	0,004	0,005	0,006	0,008	0,010	0,010

L'errore commesso considerando un passo di campionamento di soglia pari ad 10mm/m è:

- Errore per Z2x – GS3 TOP = 17,2%;
- Errore per Z2Y – GS3 TOP = 18,9%;
- Errore per Z2x – GS3 BOTTOM = 5,5%;
- Errore per Z2Y – GS3 BOTTOM = 6,03%.

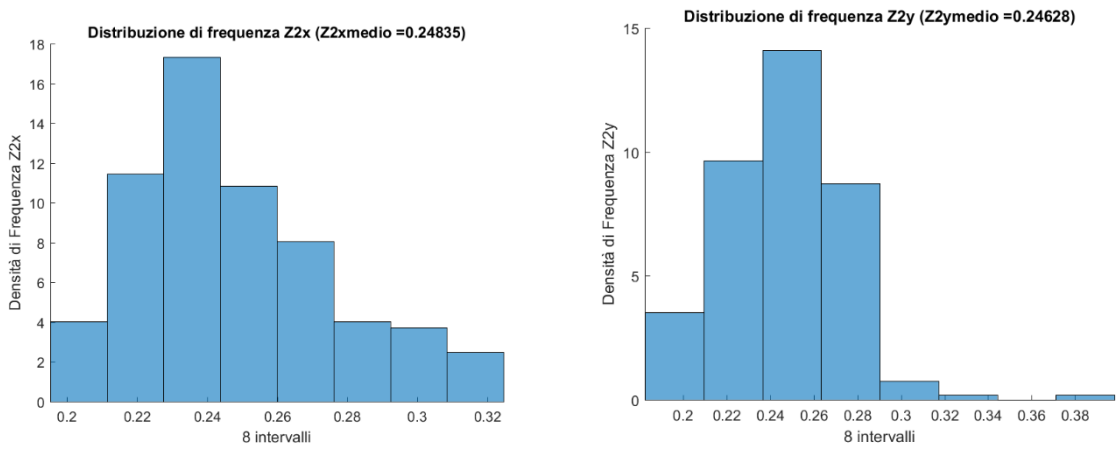


Figura 5.71 Provino G3-TOP: distribuzione di frequenza per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 10mm/m.

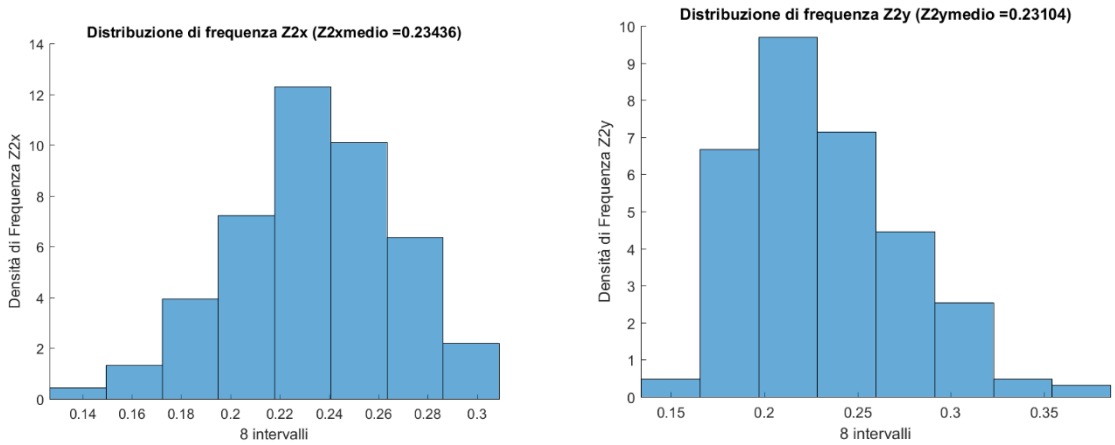


Figura 5.72 Provino G3-BOT: distribuzione di frequenza per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 10mm/m.

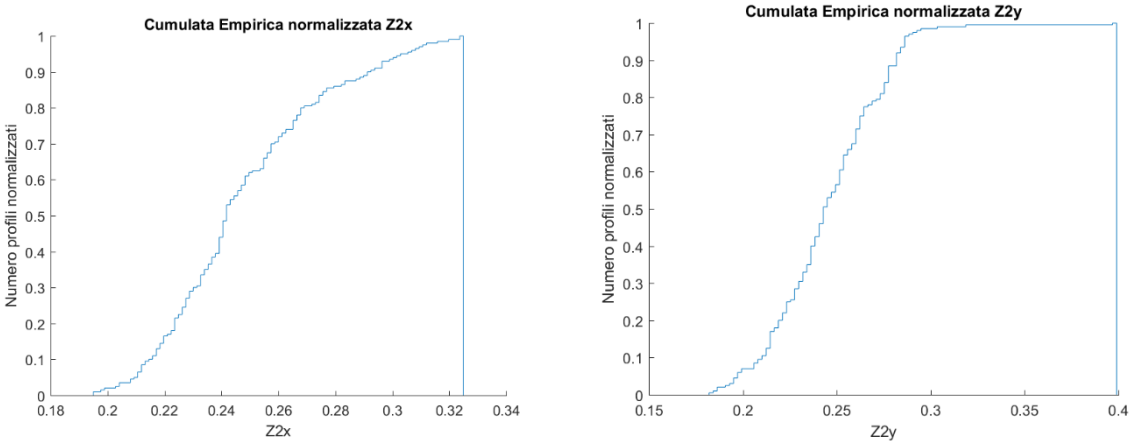


Figura 5.73 Provino G3-TOP: frequenza cumulata per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 10mm/m.

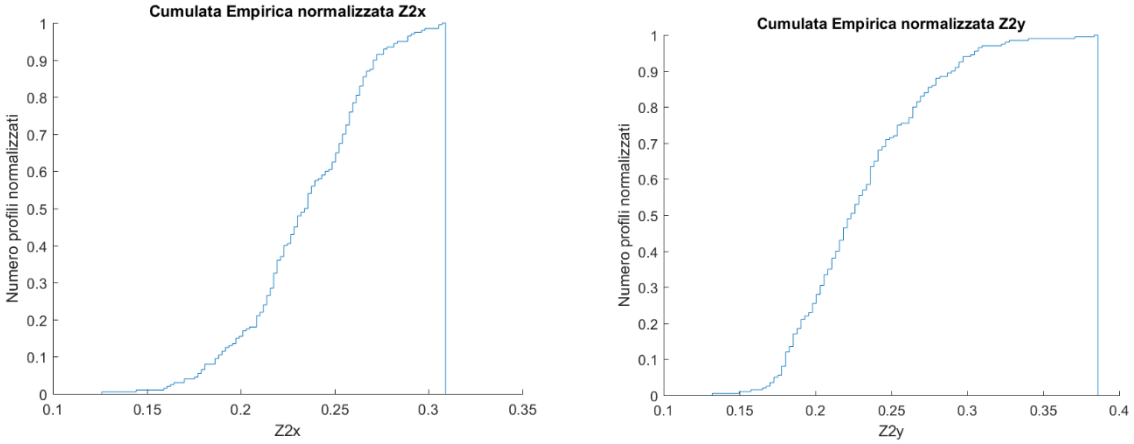


Figura 5.74 Provino G3-BOT: frequenza cumulata per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 10mm/m.

- **Valutazione Rs**

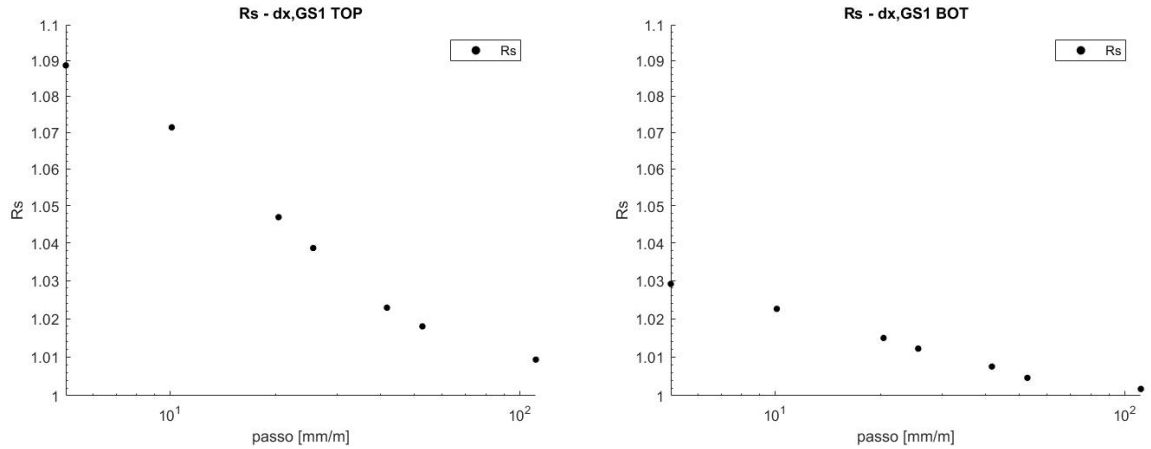


Figura 5.75 Provino GS1 - TOP/ BOTTOM: variazione del parametro di scabrezza Rs al variare del passo di campionamento superficiale.

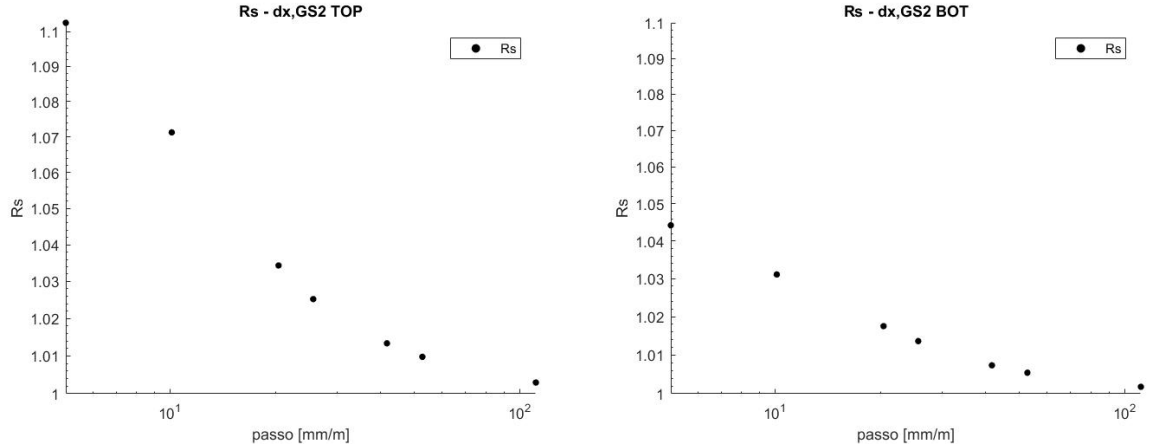


Figura 5.76 Provino GS2 - TOP/ BOTTOM: variazione del parametro di scabrezza Rs al variare del passo di campionamento superficiale.

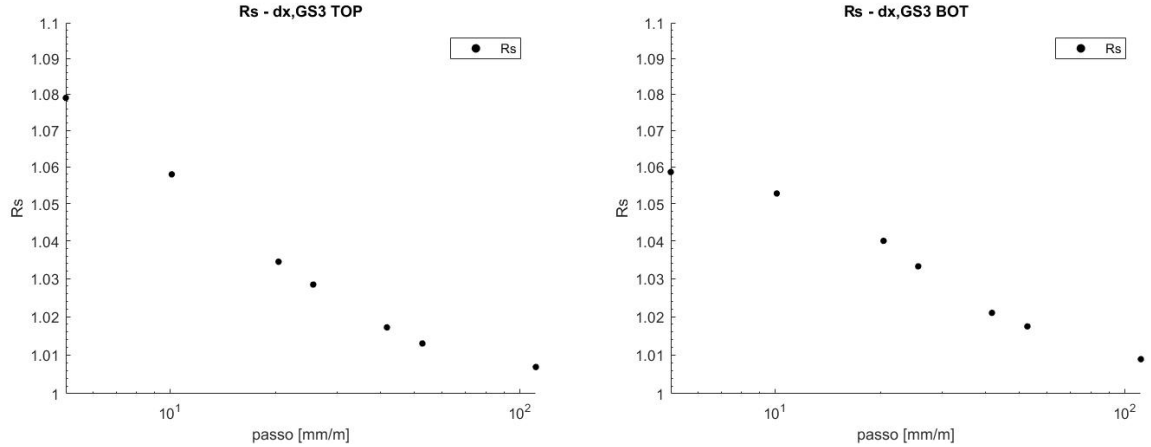


Figura 5.77 Provino GS3 - TOP/ BOTTOM: variazione del parametro di scabrezza Rs al variare del passo di campionamento superficiale.

5.4.6. Stima di JRC con formulazioni da letteratura

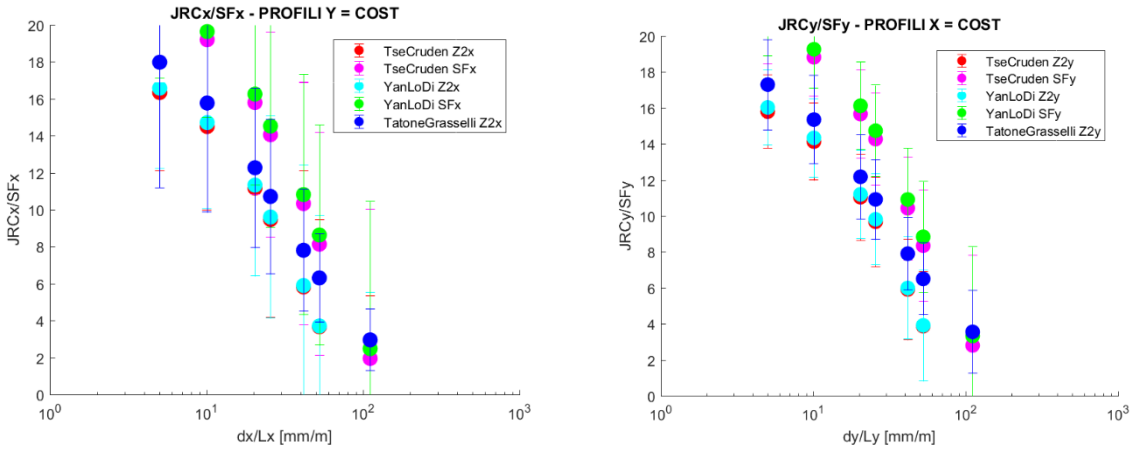


Tabella 5.23 Provino G1 TOP: JRC stimato sui profili estratti lungo x ed y.

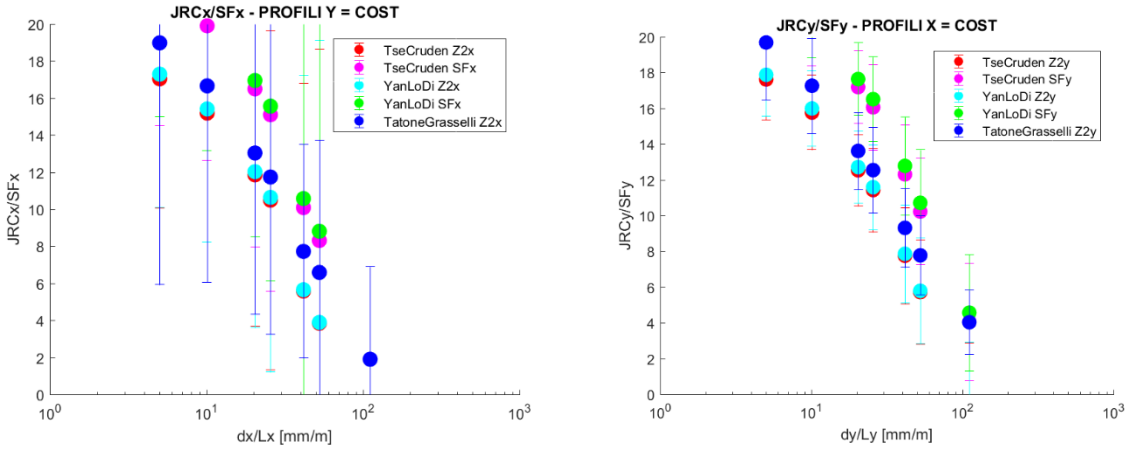


Tabella 5.24 Provino G1 BOTTOM: JRC stimato sui profili estratti lungo x ed y.

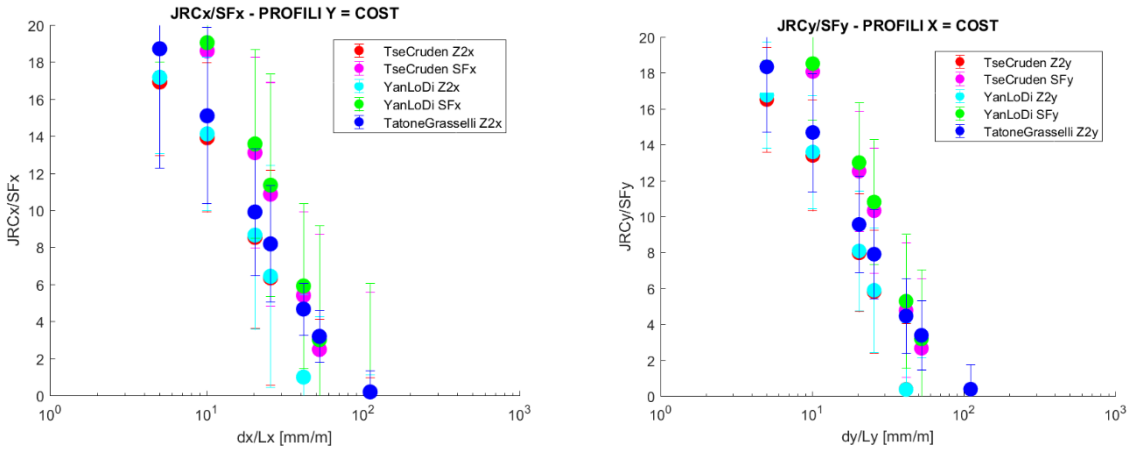


Tabella 5.25 Provino G2 TOP: JRC stimato sui profili estratti lungo x ed y.

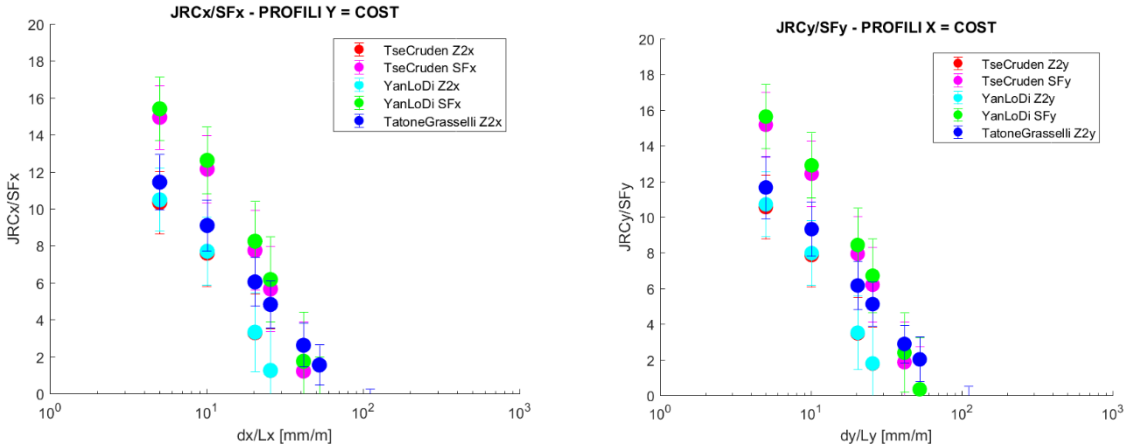


Tabella 5.26 Provino G2 BOTTOM: JRC stimato sui profili estratti lungo x ed y.

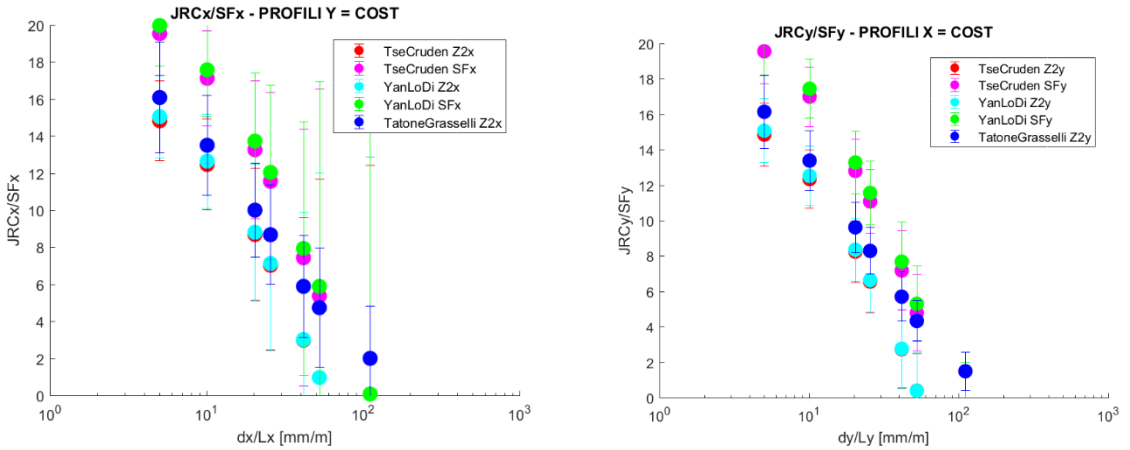


Tabella 5.27 Provino G3 TOP: JRC stimato sui profili estratti lungo x ed y.

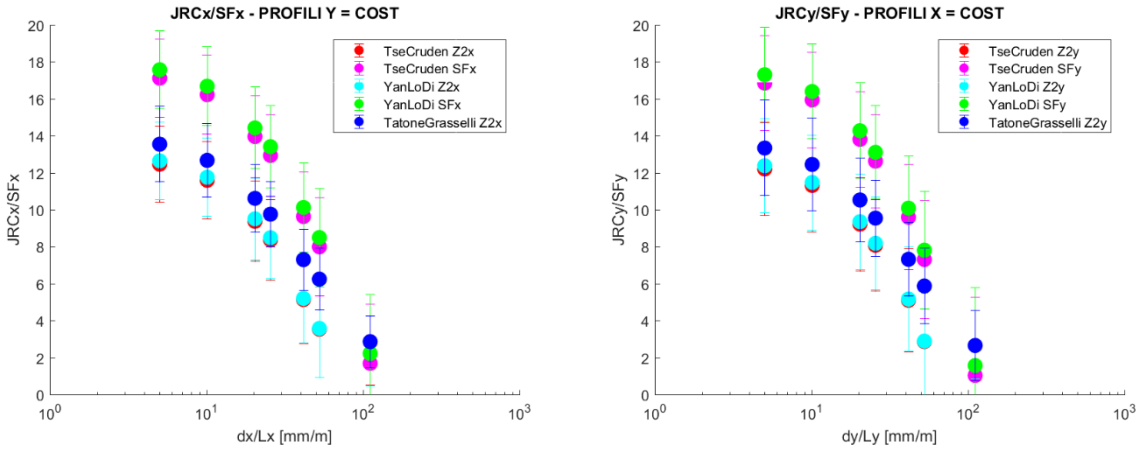


Tabella 5.28 Provino G3 BOTTOM: JRC stimato sui profili estratti lungo x ed y.

5.4.7. Anisotropia

Il comportamento anisotropo per i provini viene valutato con un passo di campionamento di 0,50mm (normalizzando rispetto la lunghezza dei provini, si fa riferimento a 10mm/m).

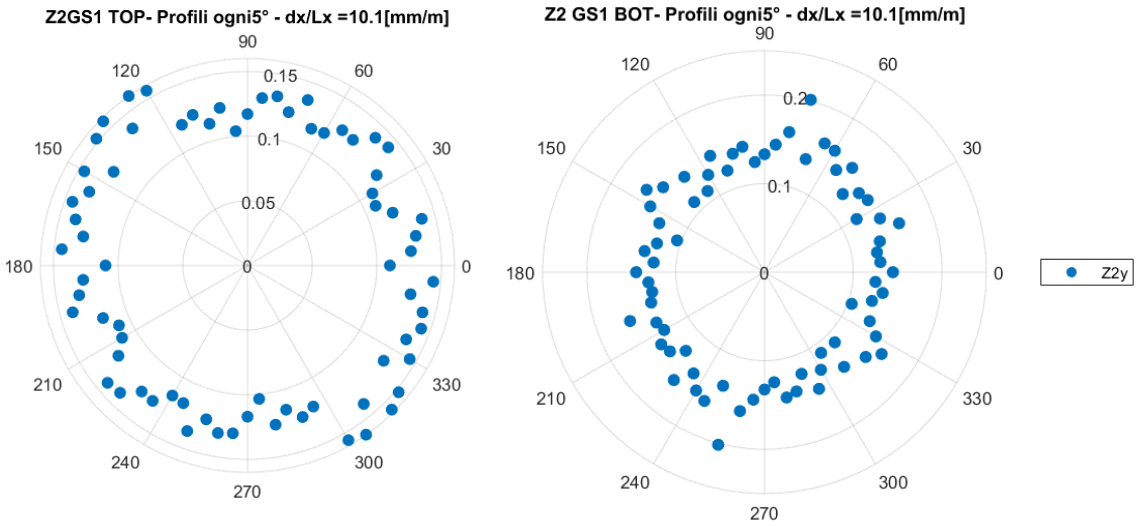


Figura 5.78 Polar Plot di Z2 per il provino GS1 TOP e GS1 BOTTOM per un passo di campionamento di 10mm/m.

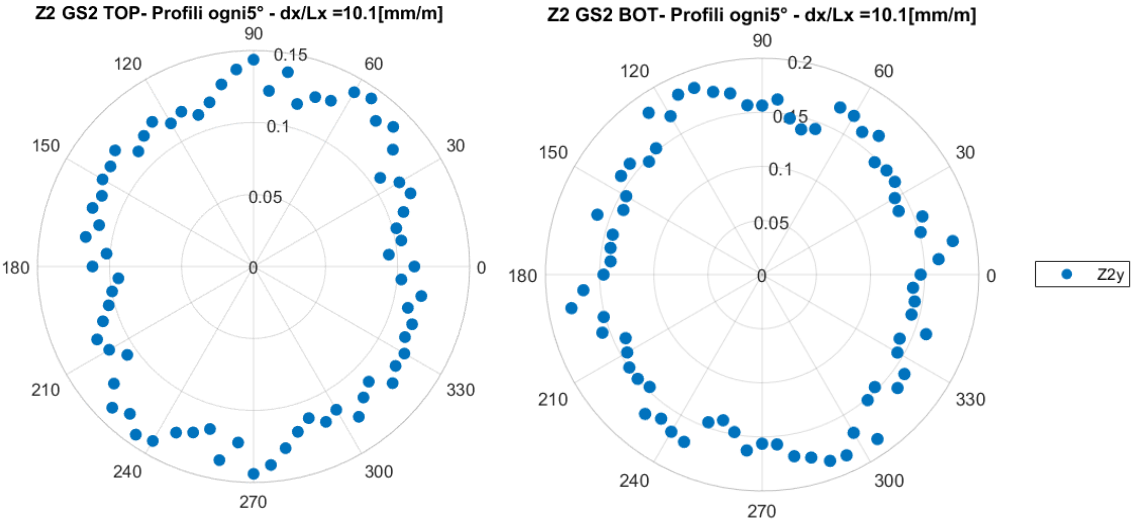


Figura 5.79 Polar Plot di Z2 per il provino GS2 TOP e GS1 BOTTOM per un passo di campionamento di 10mm/m.

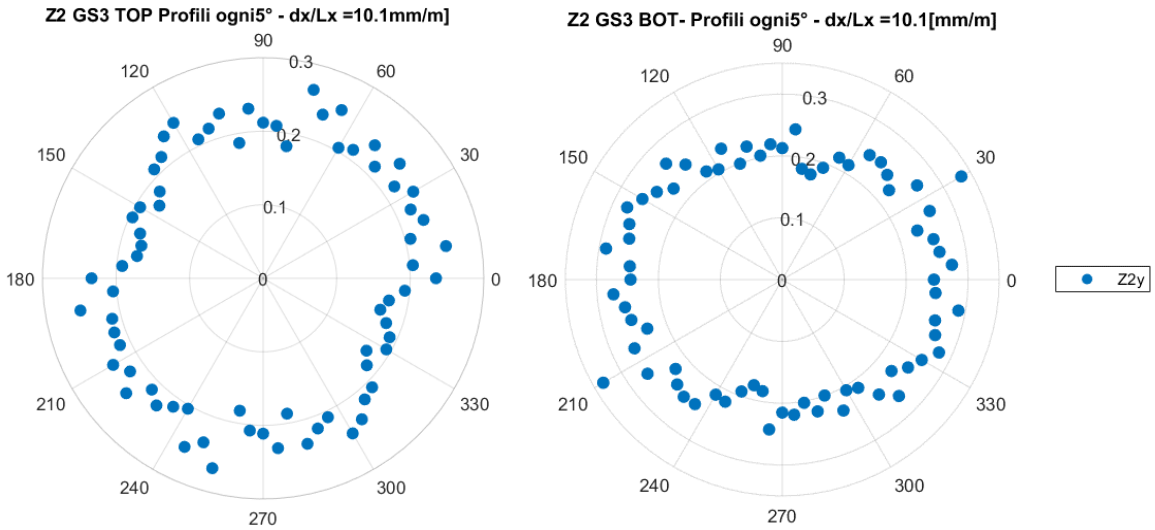


Figura 5.80 Polar Plot di Z2 per il provino GS3 TOP e GS1 BOTTOM per un passo di campionamento di 10mm/m.

Una superficie presenta evidente anisotropia quanto più il rapporto tra la $Z_{2,min}$ e la $Z_{2,max}$ stimate per le diverse angolazioni si scosta dall'unità. In Tabella 5.29 si riportano per ogni provino il valore minimo di Z_2, quello massimo, le direzioni corrispondenti a tali valori sotto forma di angolo ed il rapporto di anisotropia succitato. Si evidenzia che il provino GS2 BOT presenta il maggiore rapporto di anisotropia ($Z_{2,min}$ / $Z_{2,max}$ = 0,747), mentre il provino GS1 BOT quello minore ($Z_{2,min}$ / $Z_{2,max}$ = 0,522).

Tabella 5.29 Provini, rapporto di anisotropia.

Elemento	Anisotropia		
	Z2min	Z2max	Z2min/Z2max
Provino GS1 TOP	0,104 95°	0,160 125°	0,650
Provino GS1 BOT	0,105 160°	0,201 75°	0,522
Provino GS2 TOP	0,094 5°	0,144 90°	0,653
Provino GS2 BOT	0,139 75°	0,186 125°	0,747
Provino GS3 TOP	0,165 75°	0,267 165°	0,618
Provino GS3 BOT	0,176 75°	0,334 30°	0,527

5.5. Scala del sito - versante

5.5.1. Preparazione dei DSM

I DSM ricavati dalla parete del versante (Figura 5.9) sono editati e ne sono ritagliati delle nuvole quadrate (Figura 5.16) costituiti da:

- parete 1: 3 x 3 metr1, 9'563 punti, risoluzione 10,6 punti a dm^2;
- parete 2: 5 x 5 metri, 24'510 punti, risoluzione 9,8 punti a dm^2;
- parete 3: 7 x 7 metri, 39'589 punti, risoluzione 8,07 punti a dm^2;
- parete 4: 4 x 4 metri, 31'119 punti, risoluzione 19,45 punti a dm^2;
- parete 5: 2 x 2 metri, 5'926 punti, risoluzione 14,81 punti a dm^2.

Avendo considerato superfici di diverse dimensioni, i diagrammi delle grandezze stimate sono normalizzati rispetto alla dimensione dell'elemento considerato.

5.5.1. Rotazione della nuvola

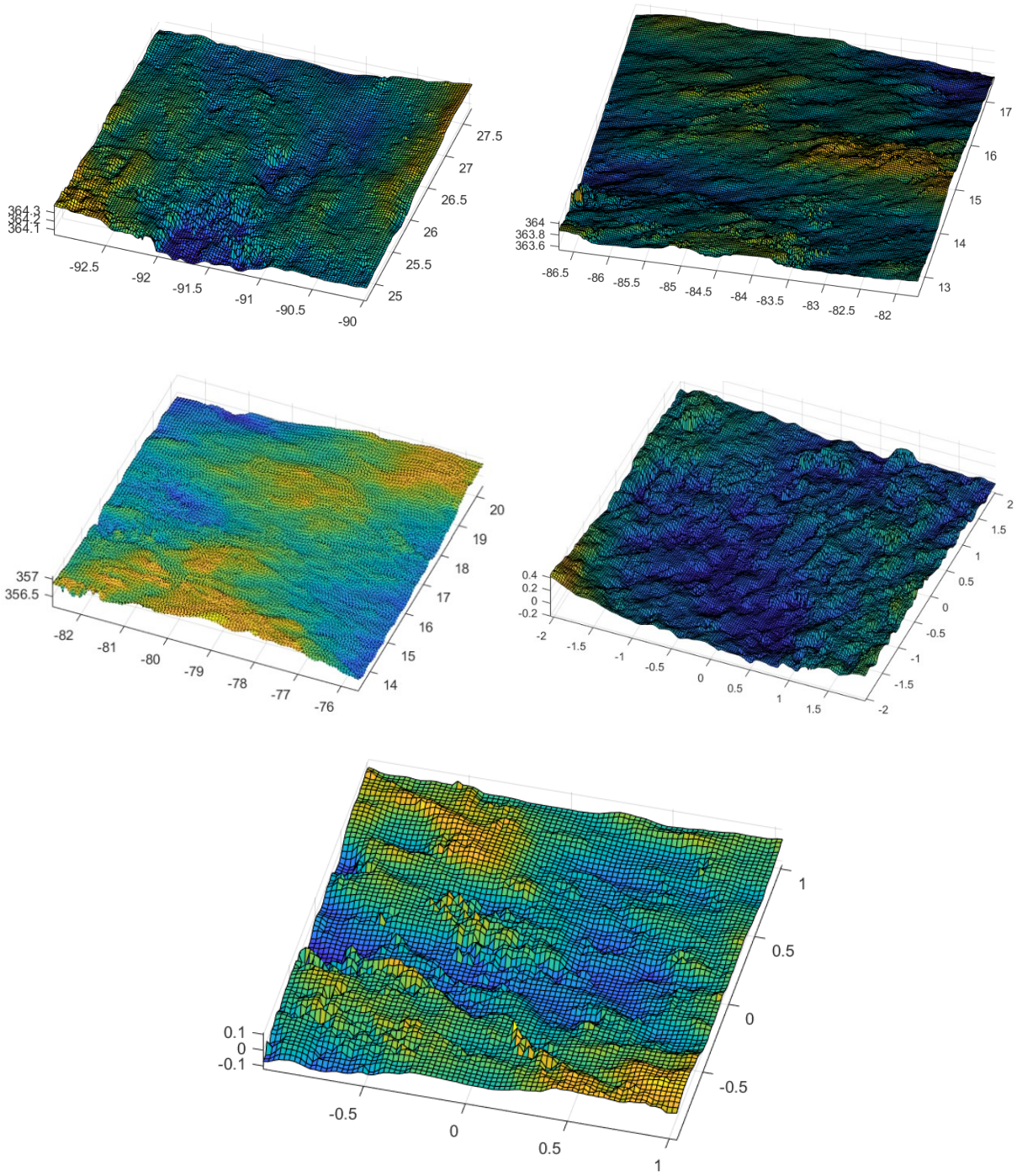


Figura 5.81 DSM delle cinque porzioni di versante ruotate in modo che il loro piano medio si trovi sul piano orizzontale.

5.5.2. Estrazione profili regolari con Surfer

I DSM sono elaborati tramite SURFER che estrapola il numero di profili definito dall'utente (Tabella 5.30) e ne interpola le elevazioni.

Tabella 5.30 Identificativo dei versanti e spaziatura dei profili estratti con SURFER per la parete.

Parete	***Profili estratti (direzione x ed y)***	***Lato elemento [m]***	***Distanza tra i profili estratti [mm]***
1	90	3	34
2	140	5	36
3	200	7	35
4	160	4	25
5	80	2	25

5.5.3. Campionamento dei profili

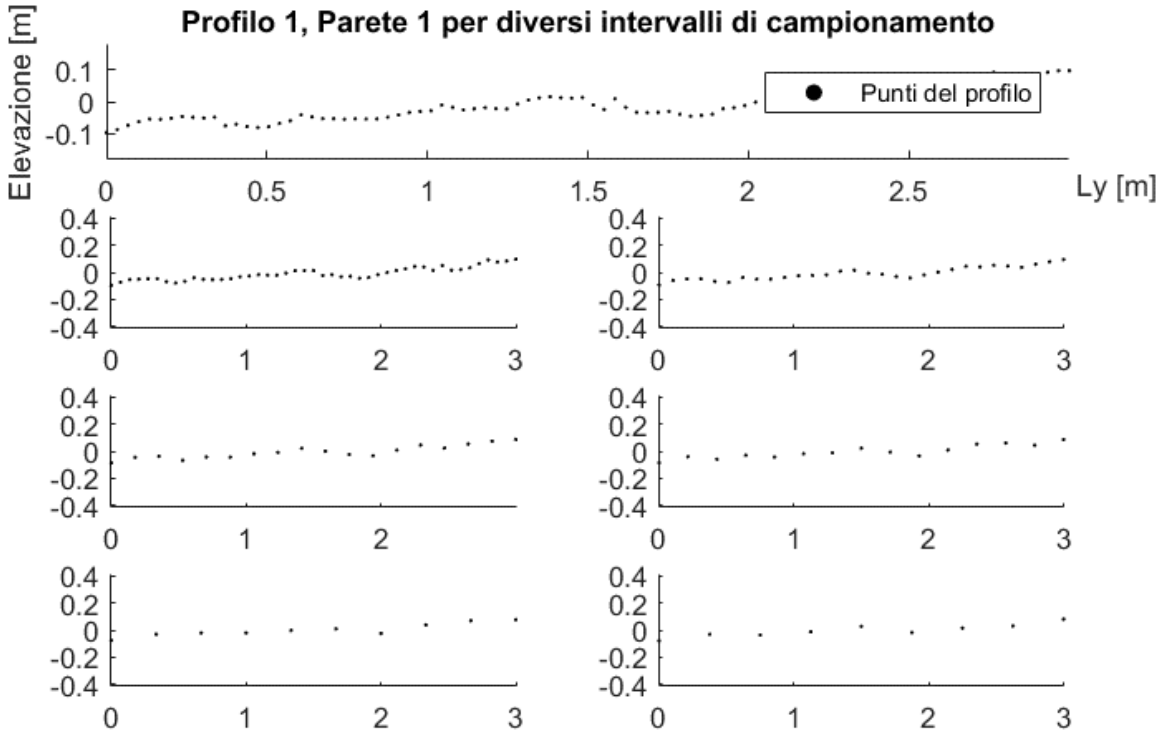


Figura 5.82 Parete 1, profilo generico: intervalli di campionamento usati nella valutazione di Z_2 ed R_p.

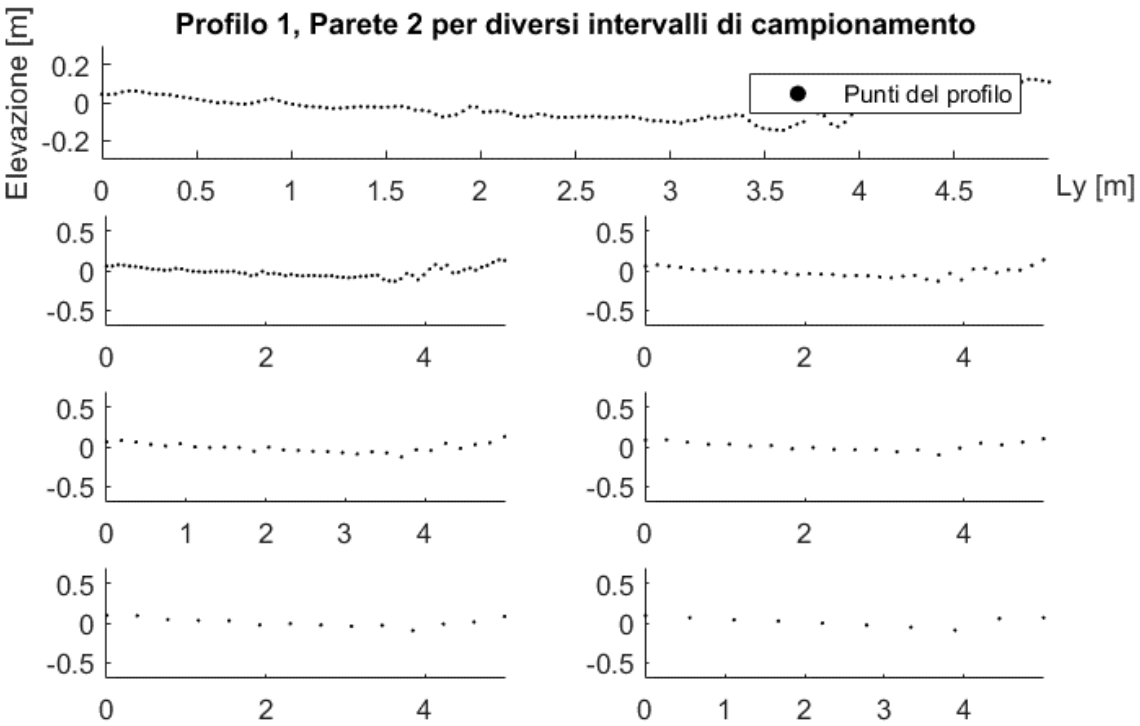


Figura 5.83 Parete 2, profilo generico: intervalli di campionamento usati nella valutazione di Z_2 ed R_p.

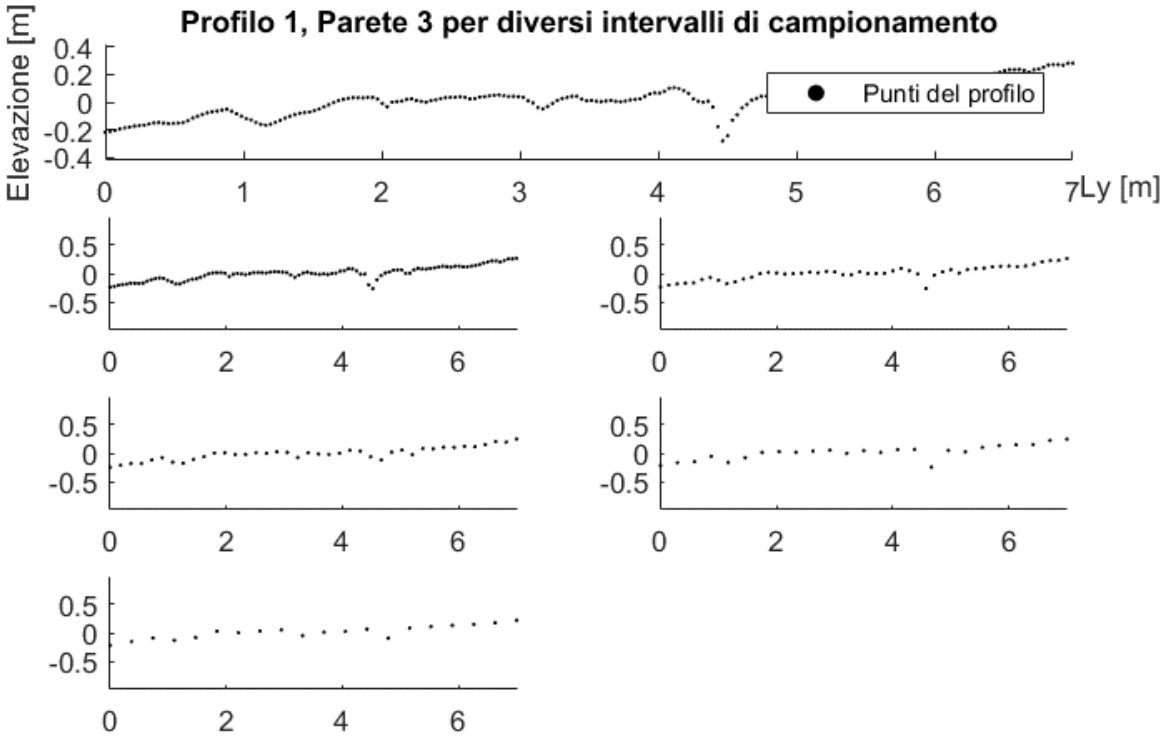


Figura 5.84 Parete 3, profilo generico: intervalli di campionamento usati nella valutazione di Z_2 ed R_p.

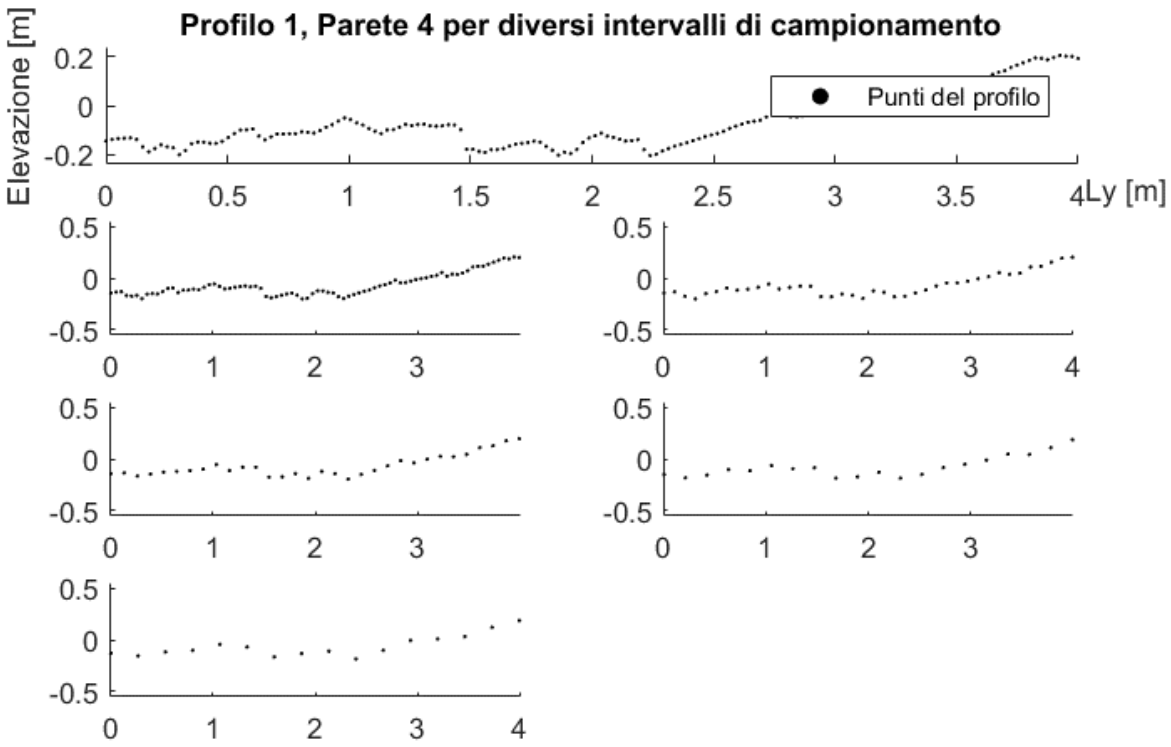


Figura 5.85 Parete 4, profilo generico: intervalli di campionamento usati nella valutazione di Z_2 ed R_p.

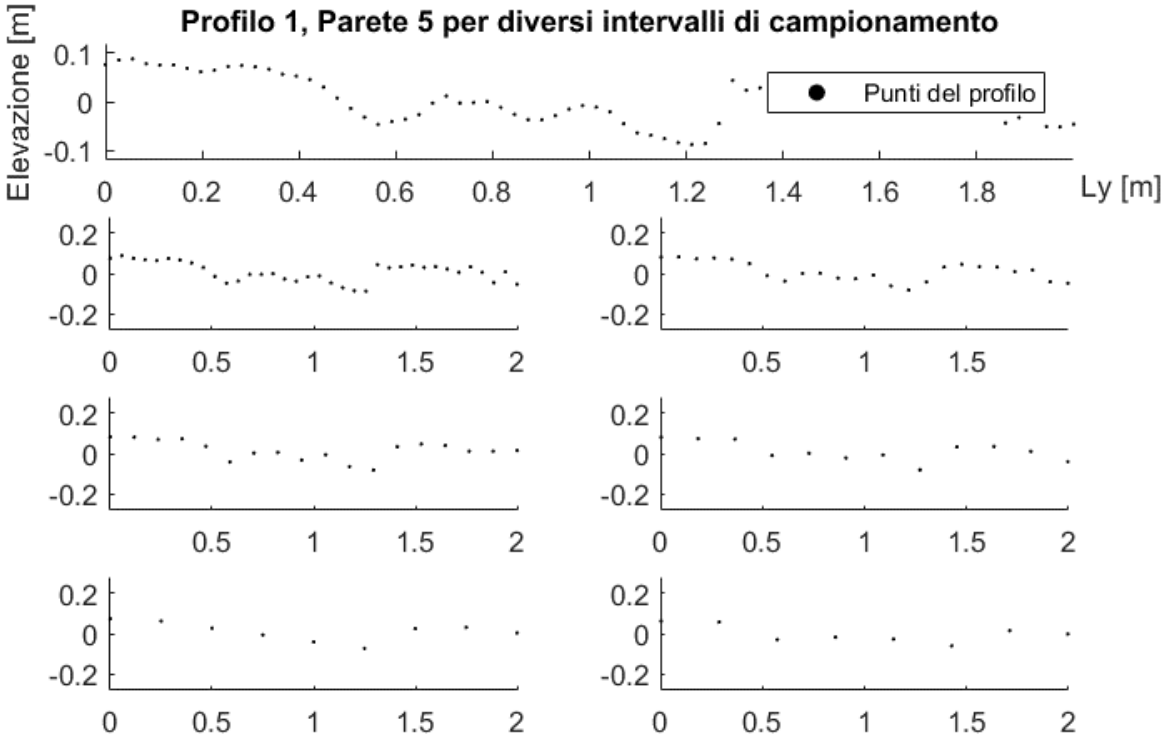


Figura 5.86 Parete 5, profilo generico: intervalli di campionamento usati nella valutazione di Z_2 ed R_p.

5.5.4. Valutazione parametri di scabrezza: Z2, Rp, Rs

PARETE 1

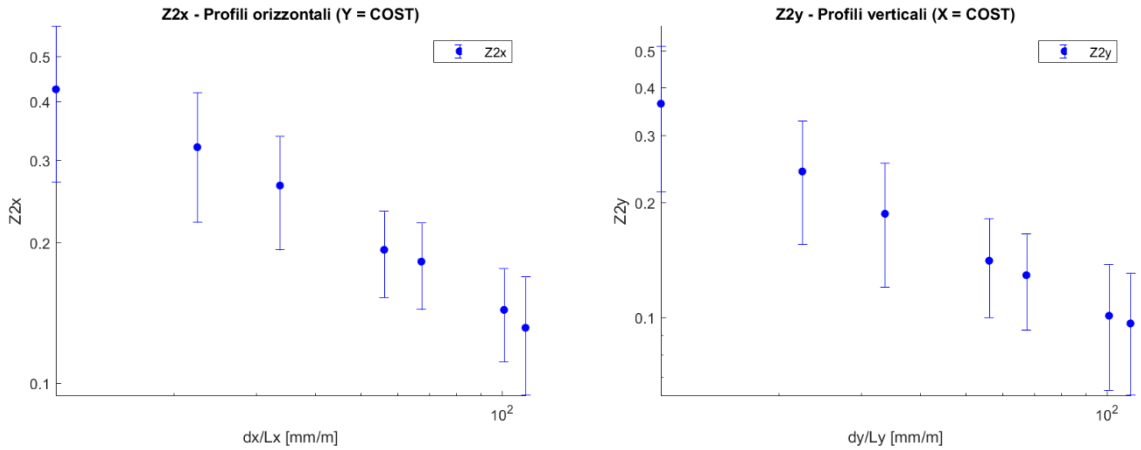


Figura 5.87 Parete 1: Z_{2x} (profili y=cost) ed Z_{2y} (profili x = cost).

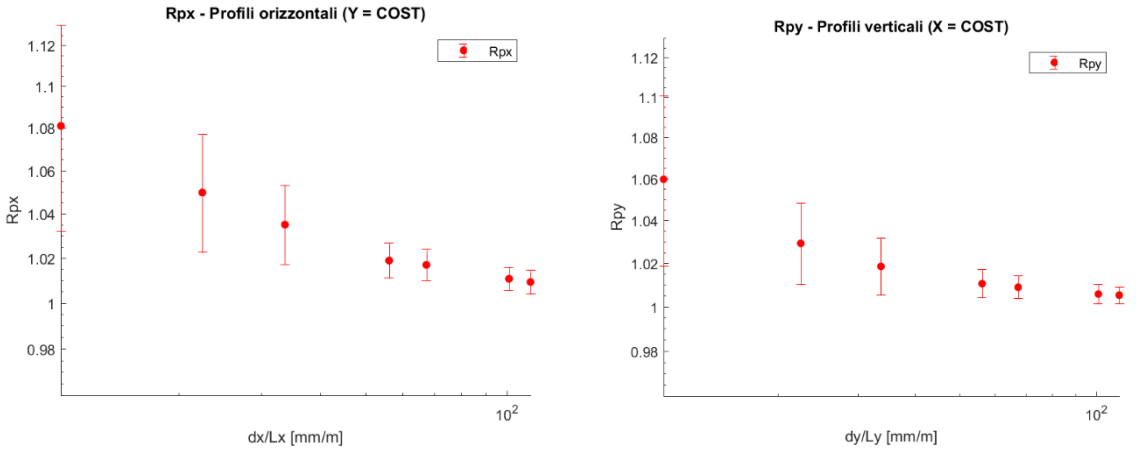


Figura 5.88 Parete 1: Rpx (profili y=cost) ed Rpy (profili x = cost).

Tabella 5.31 Parete 1: riepilogo dello studio statistico dei parametri di scabrezza Z_2 ed R_p per i diversi intervalli di campionamento.

Parete 1 [3m x 3m]							
X_passo_norm [mm/m]	**112**	**101**	**67**	**56**	**34**	**22**	**11**
Z2X mean	0,131	0,144	0,182	0,193	0,265	0,320	0,425
Z2X min	0,076	0,098	0,114	0,123	0,158	0,188	0,201
Z2X max	0,228	0,265	0,267	0,329	0,435	0,529	0,781
Z2X Standard Deviation	0,037	0,032	0,038	0,040	0,072	0,099	0,155
RPX mean	1,009	1,011	1,017	1,019	1,035	1,050	1,081
RPX min	1,003	1,005	1,006	1,008	1,012	1,017	1,020
RPX max	1,025	1,033	1,034	1,049	1,081	1,112	1,197
RPX Standard Deviation	0,005	0,005	0,007	0,008	0,018	0,027	0,049
Y_passo_norm [mm/m]	**112**	**101**	**67**	**56**	**34**	**22**	**11**
Z2Y mean	0,097	0,101	0,129	0,141	0,187	0,241	0,363
Z2Y min	0,048	0,046	0,075	0,075	0,092	0,128	0,153
Z2Y max	0,203	0,241	0,241	0,291	0,377	0,480	0,854
Z2Y Standard Deviation	0,034	0,036	0,036	0,041	0,067	0,086	0,150
RPY mean	1,005	1,006	1,009	1,011	1,018	1,029	1,060
RPY min	1,001	1,001	1,003	1,003	1,004	1,008	1,011
RPY max	1,020	1,028	1,028	1,040	1,060	1,084	1,197
RPY Standard Deviation	0,004	0,005	0,005	0,007	0,013	0,019	0,041

Non si può identificare un passo di campionamento di soglia probabilmente a causa della bassa densità del DSM, l'errore all'ultimo intervallo di campionamento risulta infatti pari a:

- Errore per Z2x = 33 %;
- Errore per Z2y = 50,6 %.

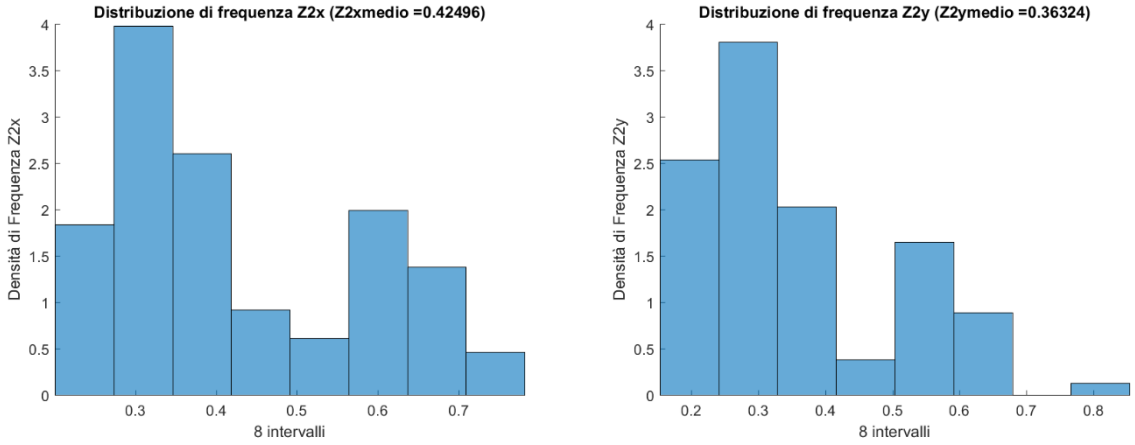


Figura 5.89 Parete1: distribuzione di frequenza per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 11mm/m.

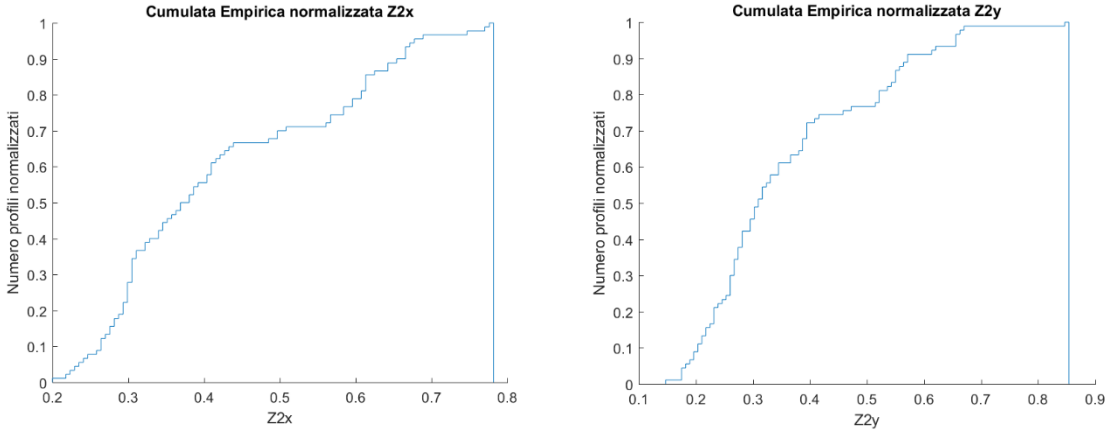


Figura 5.90 Parete1: frequenza cumulata per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 11mm/m.

PARETE 2

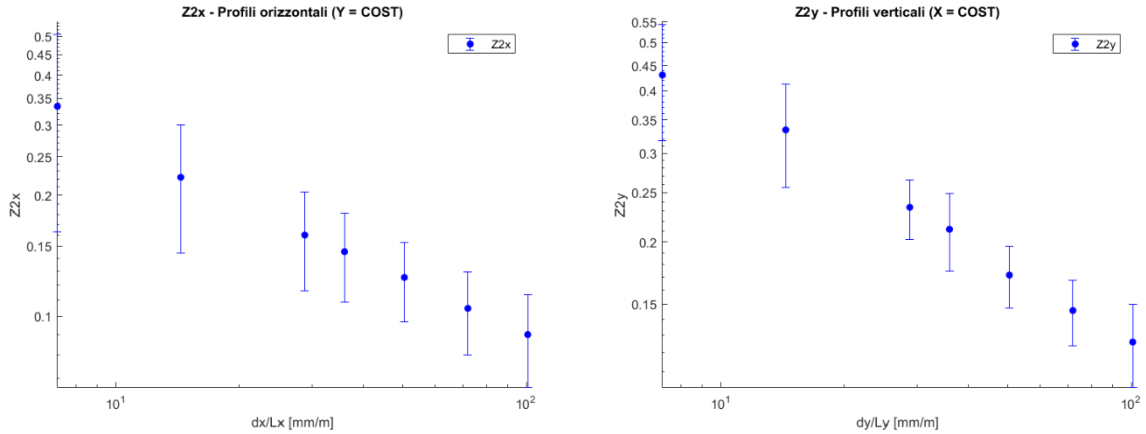


Figura 5.91 Parete 2: Z_{2x} (profili y=cost) ed Z_{2y} (profili x = cost).

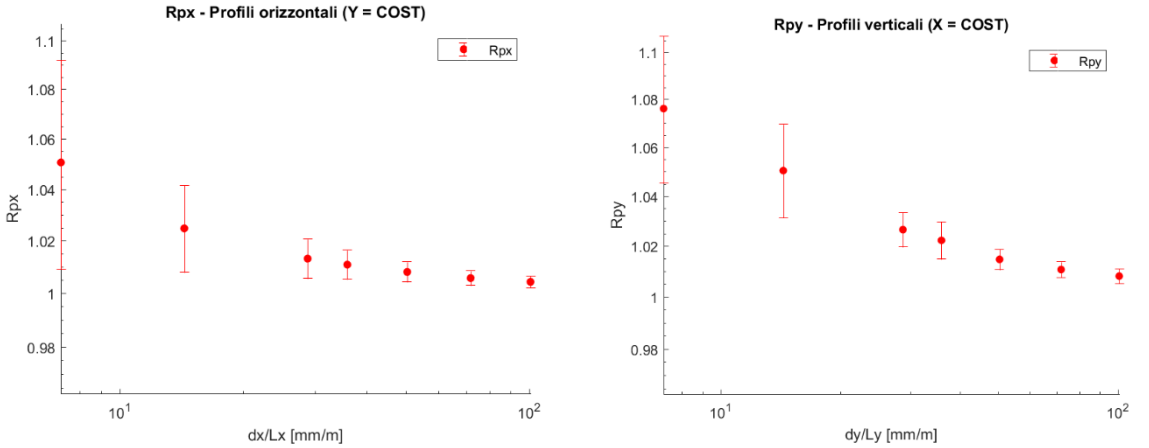


Figura 5.92 Parete 2: Rpx (profili y=cost) ed Rpy (profili x = cost).

Tabella 5.32 Parete 2: riepilogo dello studio statistico dei parametri di scabrezza Z_2 ed Rp per i diversi intervalli di campionamento

Parete 2 [5m x 5m]							
X_passo_norm [mm/m]	**101**	**72**	**50**	**36**	**29**	**14**	**7**
Z2X mean	0,090	0,105	0,125	0,145	0,160	0,222	0,334
Z2X min	0,038	0,057	0,072	0,086	0,084	0,107	0,128
Z2X max	0,152	0,180	0,219	0,265	0,342	0,473	1,381
Z2X Standard Deviation	0,023	0,025	0,028	0,036	0,044	0,078	0,172
RPX mean	1,004	1,006	1,008	1,011	1,013	1,025	1,051
RPX min	1,001	1,002	1,003	1,004	1,004	1,006	1,008
RPX max	1,011	1,016	1,023	1,033	1,054	1,091	1,226
RPX Standard Deviation	0,002	0,003	0,004	0,006	0,008	0,017	0,041
Y_passo_norm [mm/m]	**101**	**72**	**50**	**36**	**29**	**14**	**7**
Z2Y mean	0,126	0,146	0,172	0,212	0,234	0,334	0,430
Z2Y min	0,072	0,104	0,121	0,136	0,166	0,216	0,272
Z2Y max	0,172	0,201	0,234	0,342	0,313	0,976	1,203
Z2Y Standard Deviation	0,024	0,022	0,025	0,037	0,032	0,078	0,113
RPY mean	1,008	1,011	1,015	1,022	1,027	1,050	1,076
RPY min	1,003	1,005	1,007	1,009	1,014	1,022	1,035
RPY max	1,015	1,020	1,027	1,052	1,045	1,193	1,260
RPY Standard Deviation	0,003	0,003	0,004	0,007	0,007	0,019	0,031

Non si può identificare un passo di campionamento di soglia probabilmente a causa della bassa densità del DSM, l'errore all'ultimo intervallo di campionamento risulta infatti pari a:

- Errore per Z_{2x} = 50,4%;
- Errore per Z_{2y} = 29%.

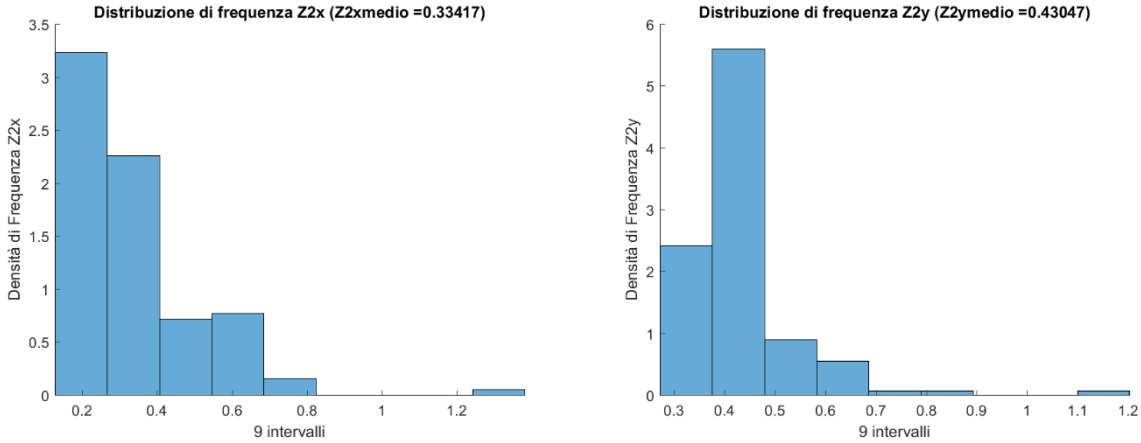


Figura 5.93 Parete2: distribuzione di frequenza per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 7mm/m.

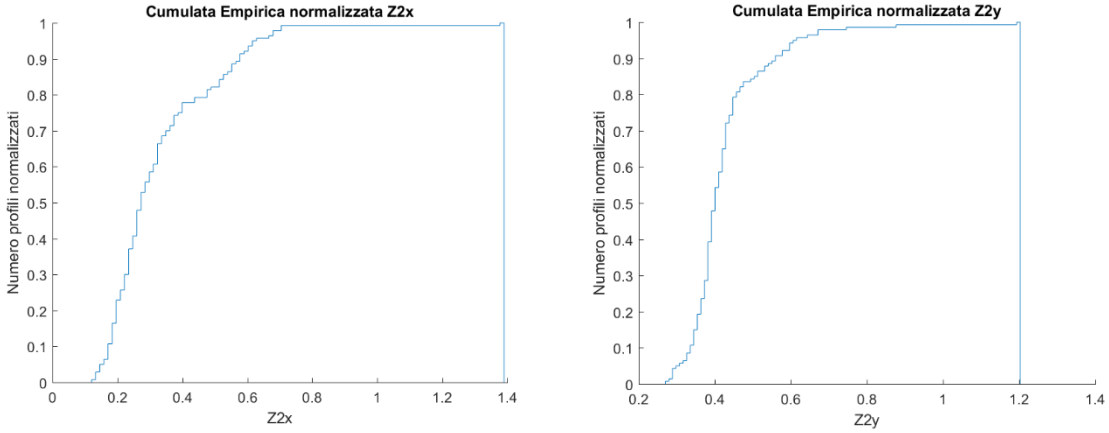


Figura 5.94 Parete2: frequenza cumulata per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 7mm/m.

PARETE 3

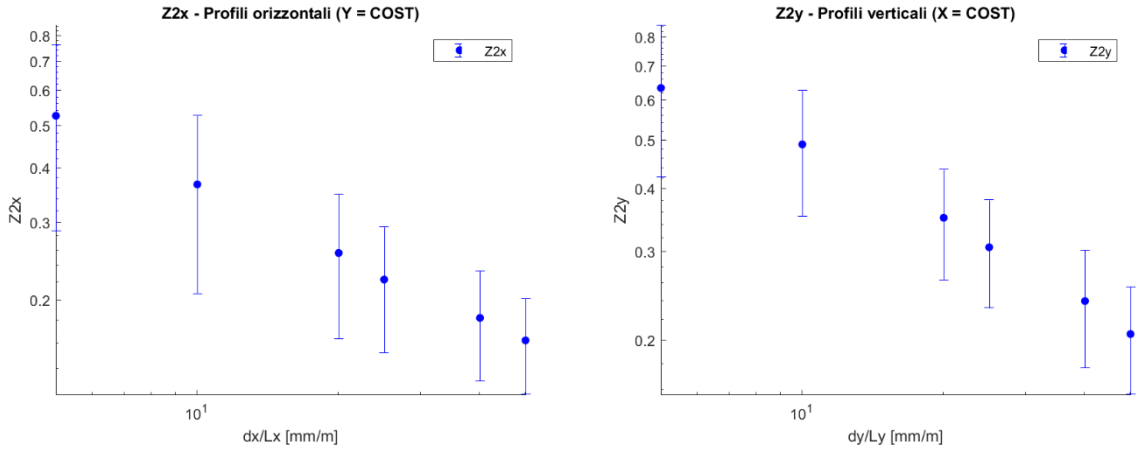


Figura 5.95 Parete 3: Z_{2x} (profili y=cost) ed Z_{2y} (profili x = cost).

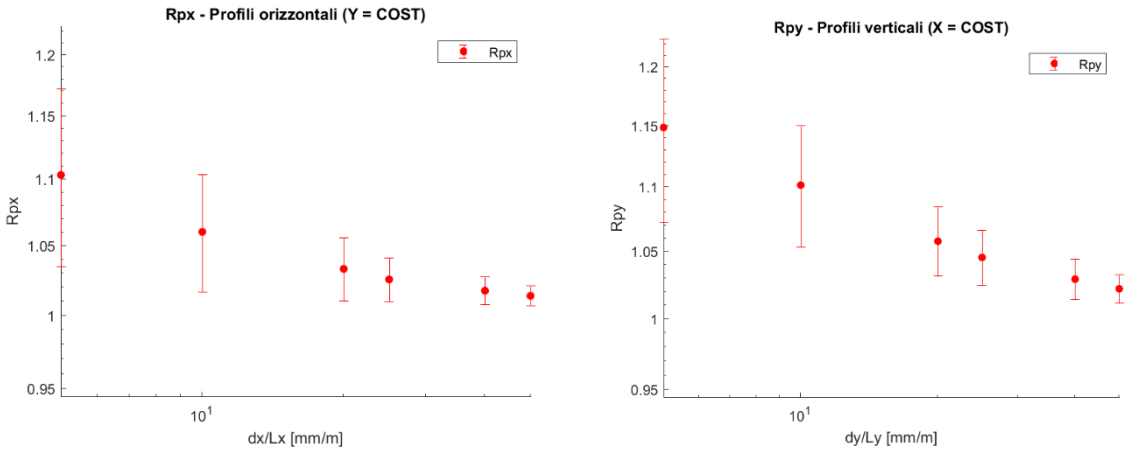


Figura 5.96 Parete 3: Rpx (profili y=cost) ed Rpy (profili x = cost).

Tabella 5.33 Parete 3 riepilogo dello studio statistico dei parametri di scabrezza Z_2 ed Rp per i diversi intervalli di campionamento.

Parete [7m x 7m]						
X_passo_norm [mm/m]	**50**	**40**	**25**	**20**	**10**	**5**
Z2X mean	0,162	0,182	0,222	0,256	0,366	0,525
Z2X min	0,104	0,106	0,120	0,131	0,165	0,203
Z2X max	0,344	0,405	0,481	0,658	1,018	1,369
Z2X Standard Deviation	0,040	0,051	0,071	0,093	0,160	0,238
RPX mean	1,014	1,017	1,025	1,033	1,060	1,103
RPX min	1,005	1,006	1,007	1,009	1,013	1,020
RPX max	1,055	1,071	1,095	1,155	1,253	1,338
RPX Standard Deviation	0,007	0,010	0,016	0,023	0,043	0,069
Y_passo_norm [mm/m]	**50**	**40**	**25**	**20**	**10**	**5**
Z2Y mean	0,206	0,239	0,306	0,350	0,489	0,633
Z2Y min	0,124	0,154	0,194	0,227	0,314	0,374
Z2Y max	0,353	0,486	0,627	0,610	0,942	1,388
Z2Y Standard Deviation	0,050	0,063	0,074	0,086	0,137	0,211
RPY mean	1,022	1,029	1,045	1,057	1,101	1,148
RPY min	1,008	1,012	1,019	1,025	1,046	1,063
RPY max	1,056	1,096	1,130	1,145	1,260	1,388
RPY Standard Deviation	0,010	0,015	0,021	0,026	0,048	0,076

Non si può identificare un passo di campionamento di soglia probabilmente a causa della bassa densità del DSM, l'errore all'ultimo intervallo di campionamento risulta infatti pari a:

- Errore per Z2x = 56%;
- Errore per Z2y = 29%.

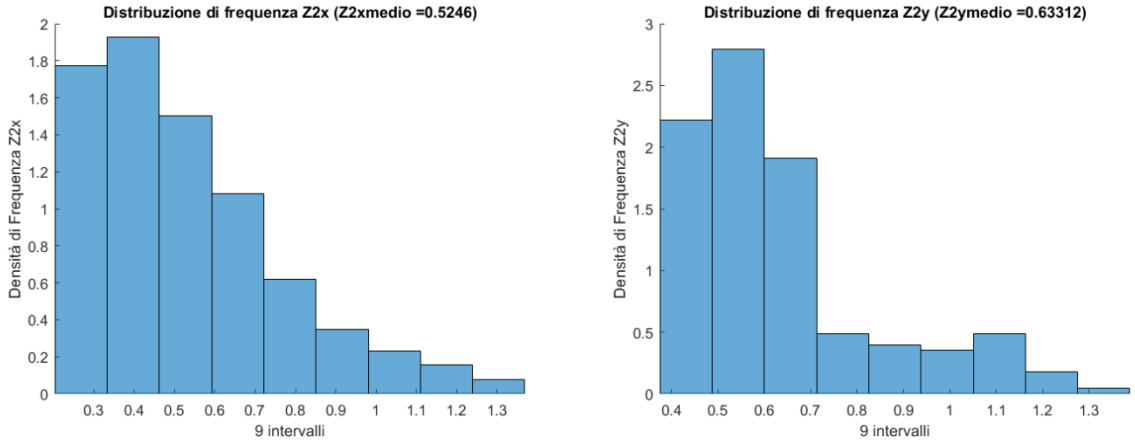


Figura 5.97 Parete3: distribuzione di frequenza per i parametri Z2x e Z2y per un passo di campionamento di 5mm/m.

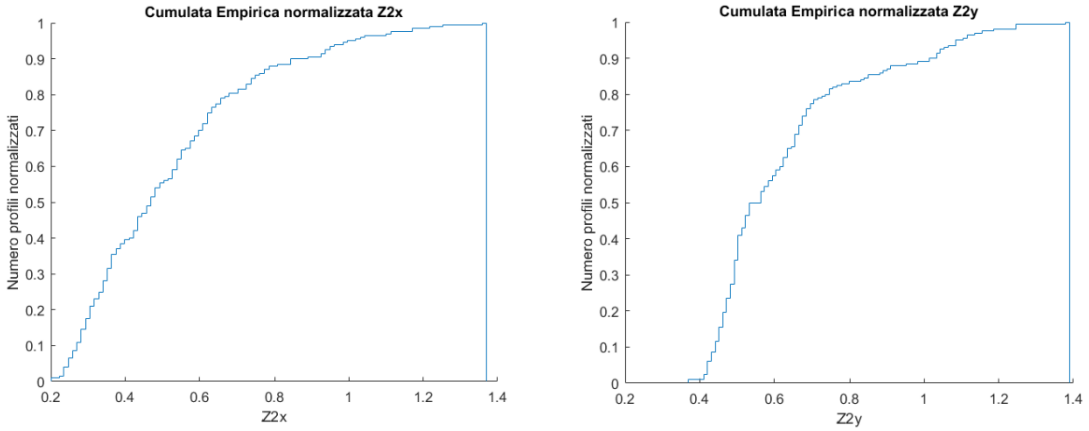


Figura 5.98 Parete3: frequenza cumulata per i parametri Z2x e Z2y per un passo di campionamento di 5mm/m.

PARETE 4

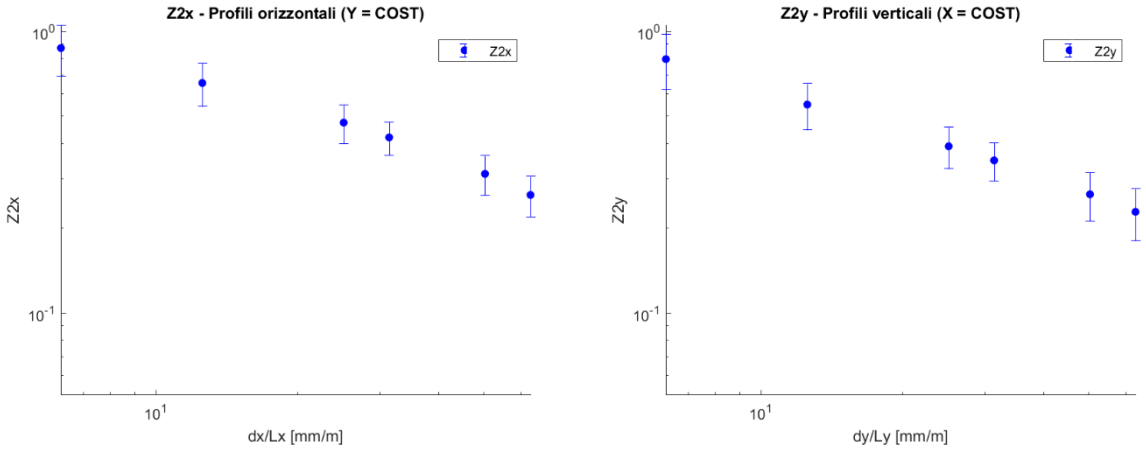


Figura 5.99 Parete 4: Z_{2x} (profili y=cost) ed Z_{2y} (profili x = cost).

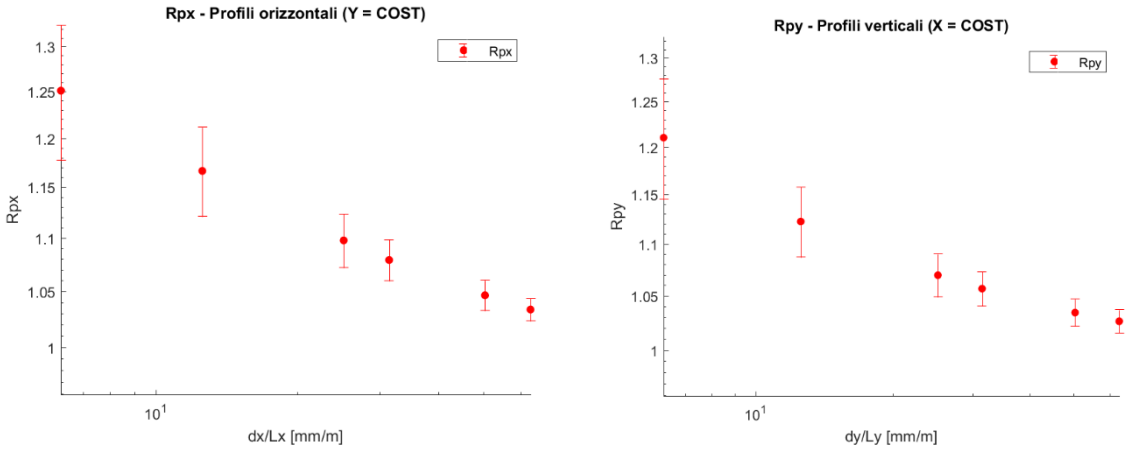


Figura 5.100 Parete 4: Rpx (profili y=cost) ed Rpy (profili x = cost).

Tabella 5.34 Parete 4: riepilogo dello studio statistico dei parametri di scabrezza Z_2 ed R_p per i diversi intervalli di campionamento.

Parete 4 [4 m x 4 x]						
X_passo_norm [mm]	**63**	**50**	**31**	**25**	**13**	**6**
Z2X mean	0,262	0,311	0,419	0,473	0,654	0,870
Z2X min	0,173	0,218	0,321	0,335	0,448	0,500
Z2X max	0,364	0,435	0,584	0,715	0,970	1,501
Z2X Standard Deviation	0,043	0,050	0,057	0,074	0,114	0,181
RPX mean	1,033	1,046	1,079	1,098	1,166	1,251
RPX min	1,015	1,023	1,048	1,053	1,088	1,098
RPX max	1,060	1,083	1,144	1,189	1,297	1,501
RPX Standard Deviation	0,010	0,014	0,019	0,026	0,046	0,074
Y_passo_norm [mm]	**63**	**50**	**31**	**25**	**13**	**6**
Z2Y mean	0,228	0,263	0,347	0,390	0,548	0,795
Z2Y min	0,130	0,137	0,221	0,264	0,367	0,475
Z2Y max	0,370	0,432	0,492	0,655	0,888	1,443
Z2Y Standard Deviation	0,048	0,052	0,053	0,065	0,102	0,177
RPY mean	1,026	1,034	1,057	1,069	1,122	1,210
RPY min	1,008	1,009	1,024	1,034	1,062	1,099
RPY max	1,064	1,080	1,107	1,157	1,239	1,439
RPY Standard Deviation	0,011	0,013	0,016	0,021	0,035	0,065

Non si può identificare un passo di campionamento di soglia probabilmente a causa della bassa densità del DSM, l'errore all'ultimo intervallo di campionamento risulta infatti pari a:

- Errore per Z_{2x} = 33%;
- Errore per Z_{2y} = 45%.

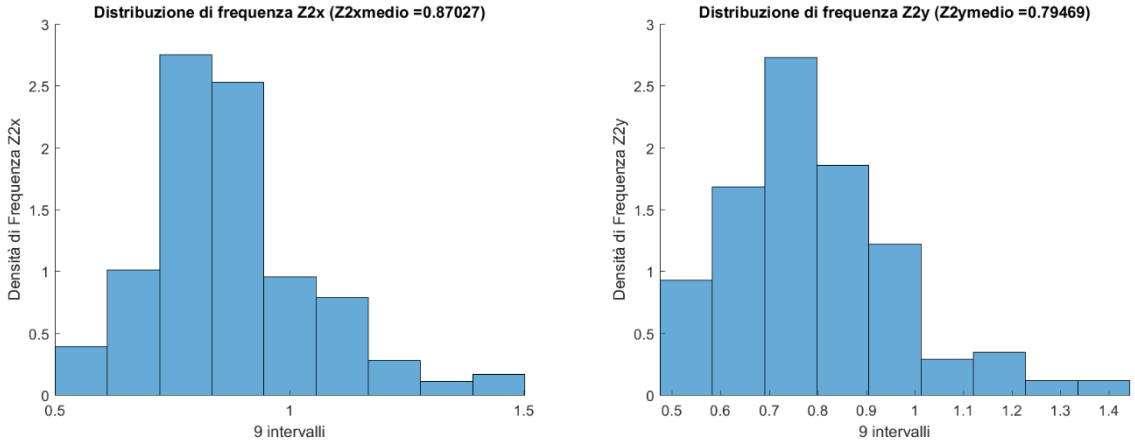


Figura 5.101 Parete4: distribuzione di frequenza per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 6mm/m.

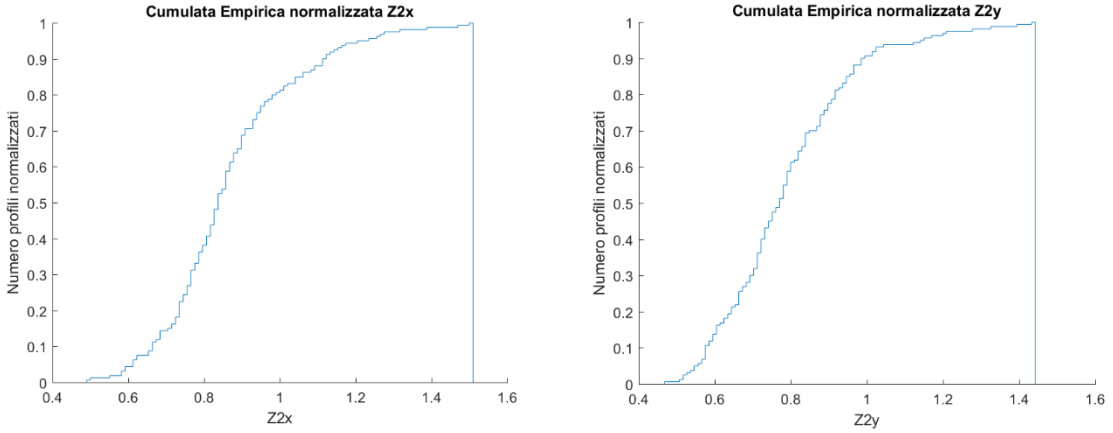


Figura 5.102 Parete4: frequenza cumulata per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 6mm/m.

PARETE 5

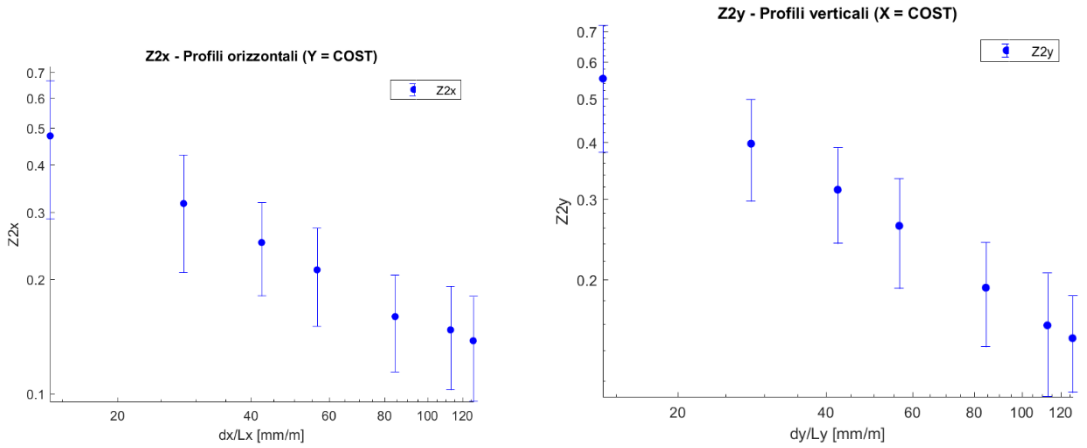


Figura 5.103 Parete 5: Z_{2x} (profili y=cost) ed Z_{2y} (profili x = cost).

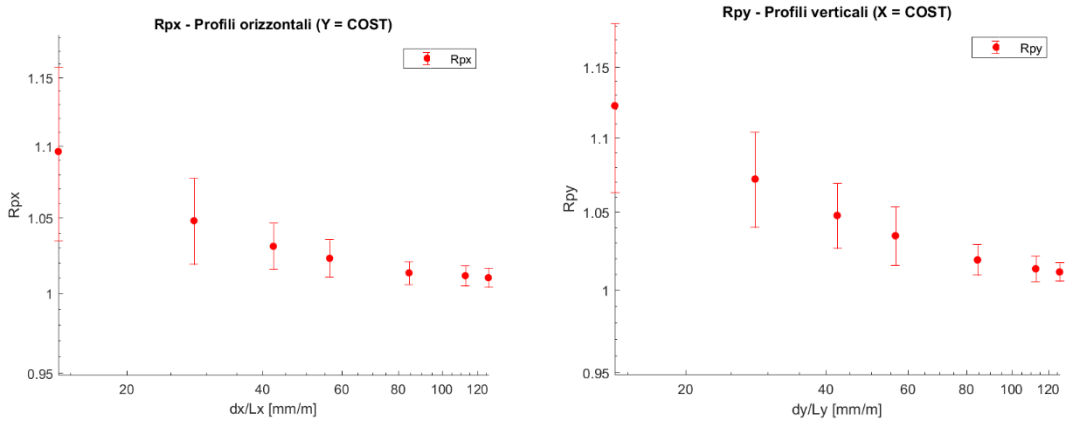


Figura 5.104 Parete 5: Rpx (profili y=cost) ed Rpy (profili x = cost).

Tabella 5.35 Parete 5: riepilogo dello studio statistico dei parametri di scabrezza Z_2 ed Rp per i diversi intervalli di campionamento.

Parete 5 [2m x 2m]							
X_passo_norm [mm/m]	**127**	**113**	**85**	**56**	**42**	**28**	**14**
Z2X mean	0,138	0,147	0,159	0,212	0,250	0,316	0,476
Z2X min	0,050	0,062	0,066	0,089	0,115	0,158	0,179
Z2X max	0,252	0,270	0,314	0,369	0,418	0,650	1,215
Z2X Standard Deviation	0,042	0,045	0,045	0,061	0,069	0,108	0,188
RPX mean	1,010	1,012	1,013	1,023	1,031	1,048	1,096
RPX min	1,001	1,002	1,002	1,004	1,007	1,012	1,015
RPX max	1,031	1,034	1,047	1,058	1,073	1,148	1,343
RPX Standard Deviation	0,006	0,007	0,007	0,012	0,015	0,029	0,062
Y_passo_norm [mm/m]	**127**	**113**	**85**	**56**	**42**	**28**	**14**
Z2Y mean	0,149	0,159	0,192	0,262	0,315	0,397	0,552
Z2Y min	0,095	0,062	0,112	0,143	0,160	0,189	0,215
Z2Y max	0,261	0,292	0,303	0,517	0,550	0,700	1,061
Z2Y Standard Deviation	0,036	0,048	0,049	0,071	0,075	0,100	0,171
RPY mean	1,012	1,014	1,019	1,035	1,048	1,072	1,122
RPY min	1,005	1,002	1,006	1,010	1,013	1,017	1,023
RPY max	1,032	1,041	1,044	1,119	1,121	1,191	1,324
RPY Standard Deviation	0,006	0,008	0,010	0,019	0,021	0,032	0,059

Non si può identificare un passo di campionamento di soglia probabilmente a causa della bassa densità del DSM, l'errore all'ultimo intervallo di campionamento risulta infatti pari a:

- Errore per Z_{2x} = 50,6%;
- Errore per Z_{2y} = 39%.

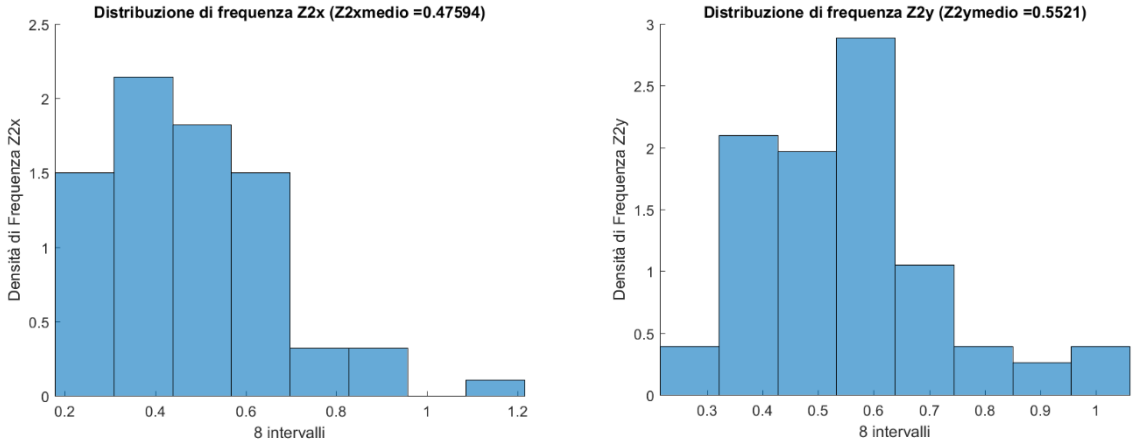


Figura 5.105 Parete5: distribuzione di frequenza per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 14mm/m.

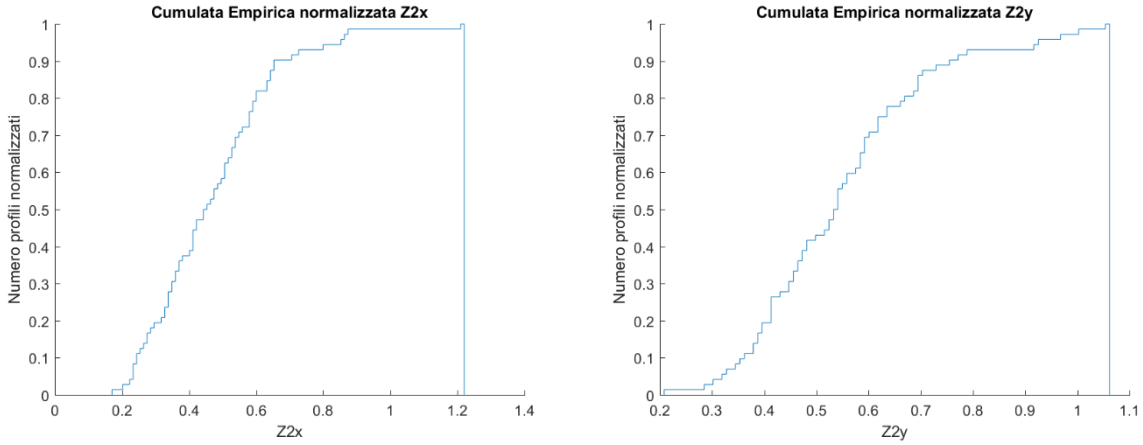


Figura 5.106 Parete5: frequenza cumulata per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 14mm/m.

- **Valutazione Rs**

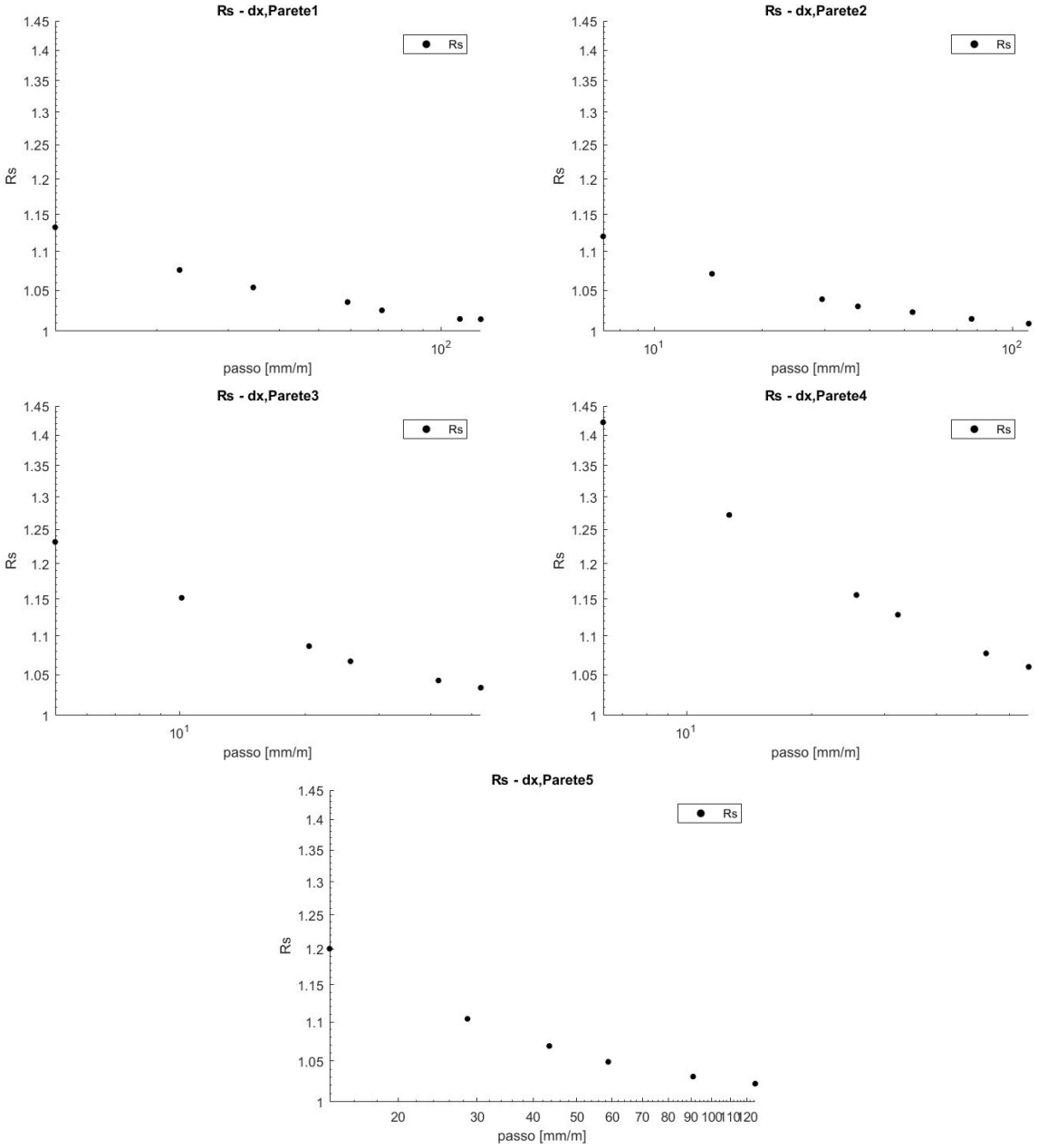


Figura 5.107 Pareti di versante: calcolo del parametro di scabrezza Rs al variare del passo di campionamento superficiale.

5.5.5. Stima di JRC con formulazioni da letteratura

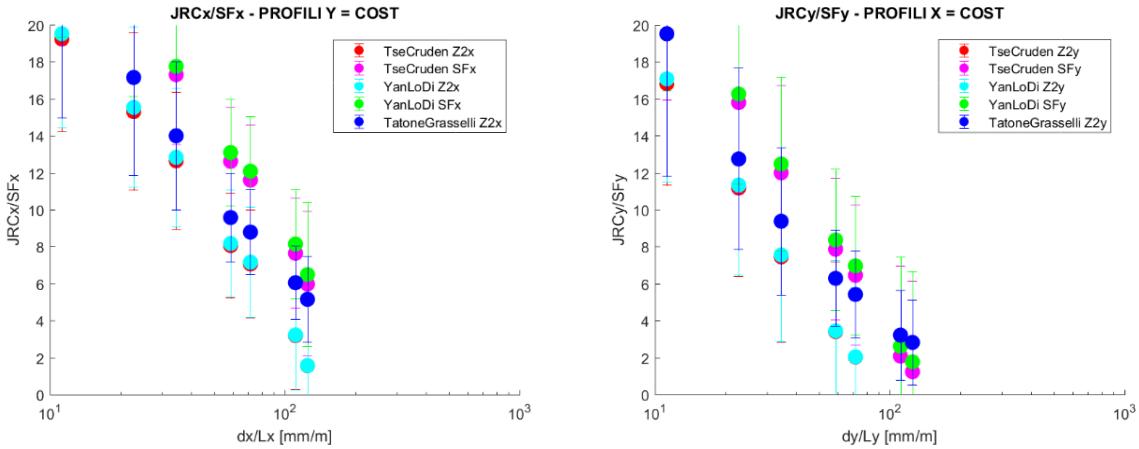


Figura 5.108 JRC Parete 1, 3m x 3m, lungo le direzioni x e y.

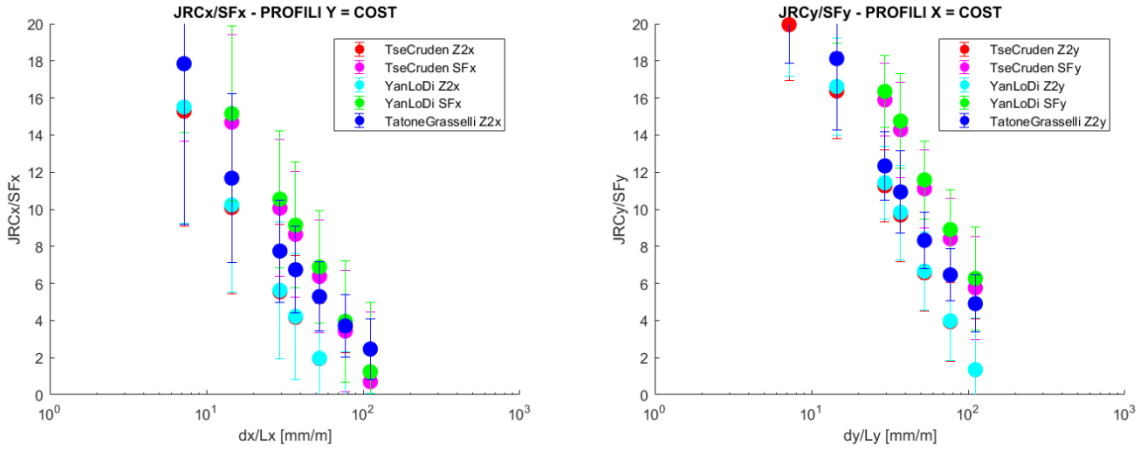


Figura 5.109 JRC Parete 2, 5m x 5m, lungo le direzioni x e y.

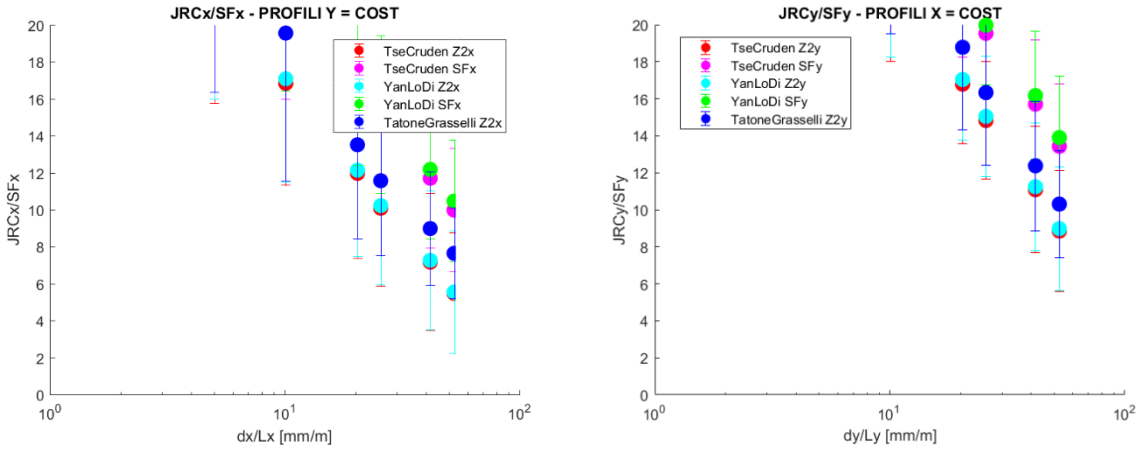


Figura 5.110 JRC Parete 3, 7m x 7m, lungo le direzioni x e y.

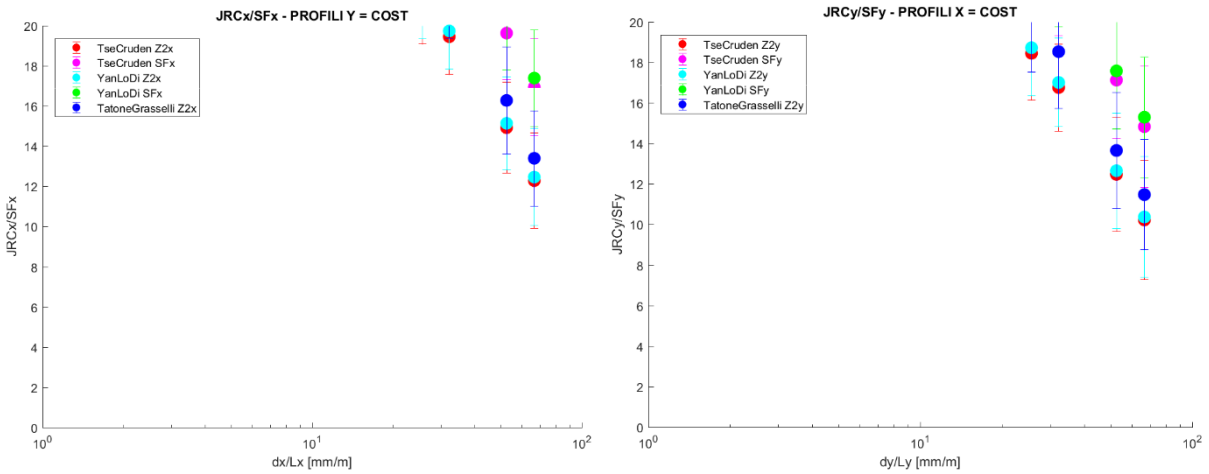


Figura 5.111 JRC Parete 4, 4m x 4m, lungo le direzioni x e y.

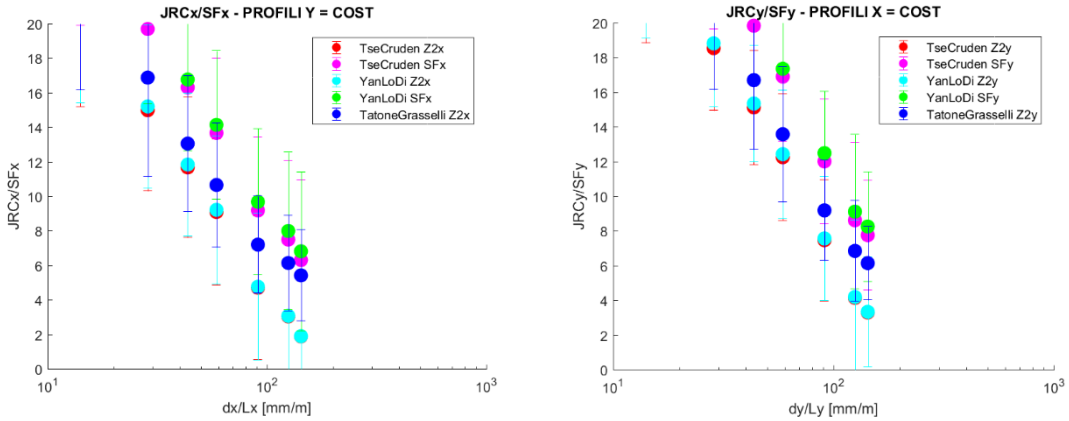


Figura 5.112 JRC Parete 5, 2m x 2m, lungo le direzioni x e y.

5.5.6. Osservazioni sulle superfici di versante: influenza dell'ondulosità

L'andamento del parametro Z_2 ed Rp sulle pareti di versante evidenzia dei valori molto alti, superiori agli ordini di grandezza tipici per questi due parametri. In particolare i valori più alti si riscontrano per la Parete 4 (Figura 5.99 e Figura 5.100) per cui all'intervallo di campionamento più piccolo risulta:

- Z_{2x} = 0,870; Z_{2y} = 0,795;
- Rpx = 1251; Rpy = 1,21.

Non è inoltre individuabile un passo di campionamento ottimale, in quanto la variazione sia di Z_2 che di Rp da un passo all'altro non è trascurabile. Questo andamento può essere spiegato osservando che a causa della grande estensione della superficie considerata (4 metri

x 4 metri) sono presenti zone con ondulosità molto diverse tra loro. Di conseguenza il procedimento di calcolo basato sull'individuazione del piano che approssima la superficie, perde di validità. Si è proceduto quindi individuando una porzione di versante più piccola e ripetendo la procedura, ottenendo ordini di grandezza dei parametri di scabrezza coerenti con quelli attesi da letteratura. Si riportano di seguito i calcoli svolti su una superficie della parete 4 più piccola, ed si allegano in appendice i risultati per le altri pareti-ridotte (in allegato 9.1.8, 9.1.10, 9.1.12,9.1.14, 9.1.16).

PARETE 4-ridotta – 2 m x 2 m

In Figura 5.113 il riquadro maggiore evidenzia la porzione di DSM di 4 metri per 4 metri usata nella prima elaborazione, mentre il riquadro di dimensioni minori evidenzia la porzione di DSM di 2 metri per 2 metri usata nell'elaborazione finale.

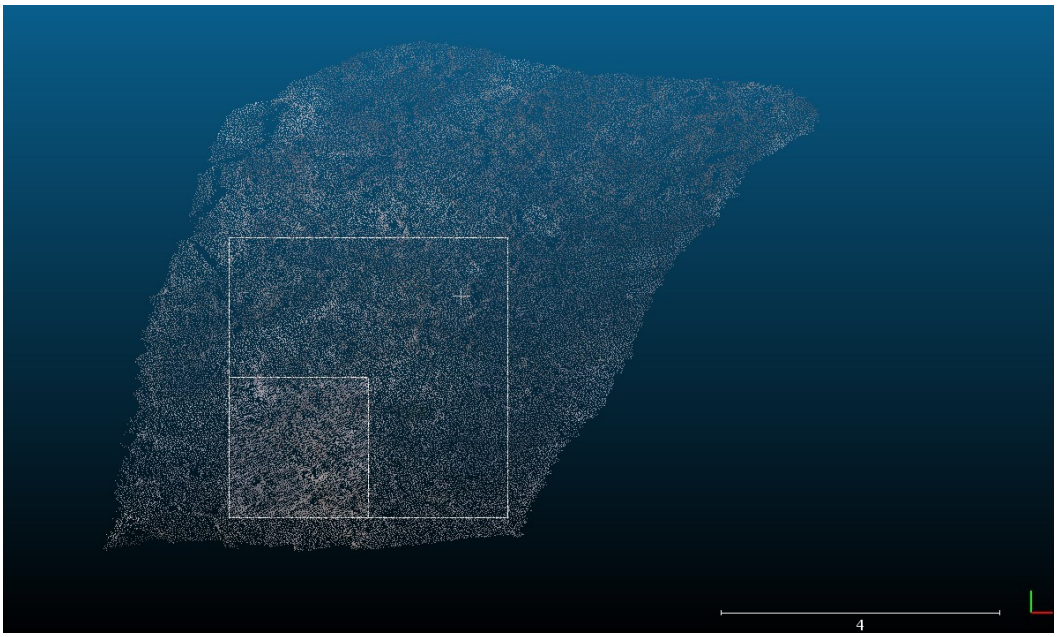


Figura 5.113 Parete 4: i due riquadri evidenziano i DSM usati nelle elaborazioni (superfici 4m x 4m e 2m x 2m).

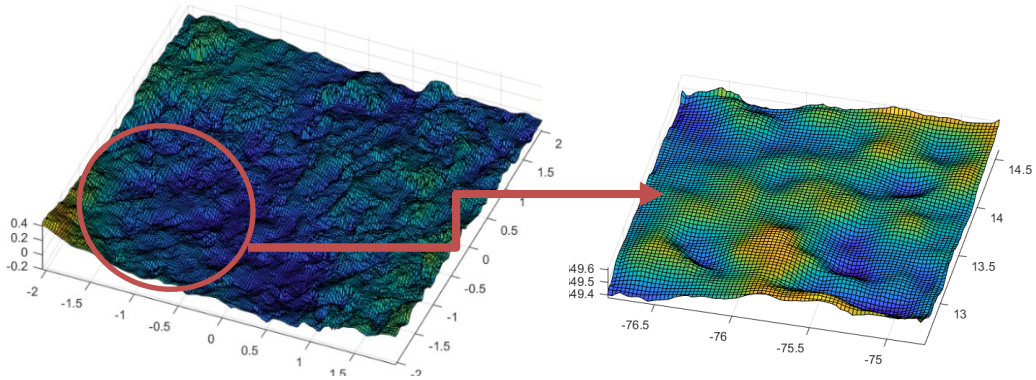


Figura 5.114 Parete 4: 3D della superficie iniziale 4m x 4m e della superficie 2m x2m.

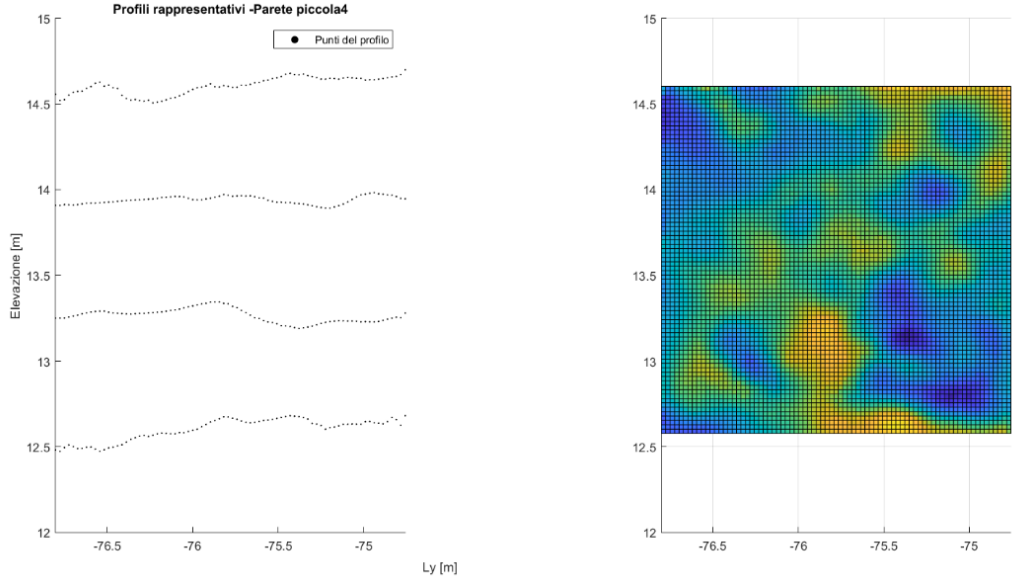


Figura 5.115 Parete 4-ridotta (2m x 2m), analisi della superficie dell'elemento: estrazione di quattro profili orizzontali.

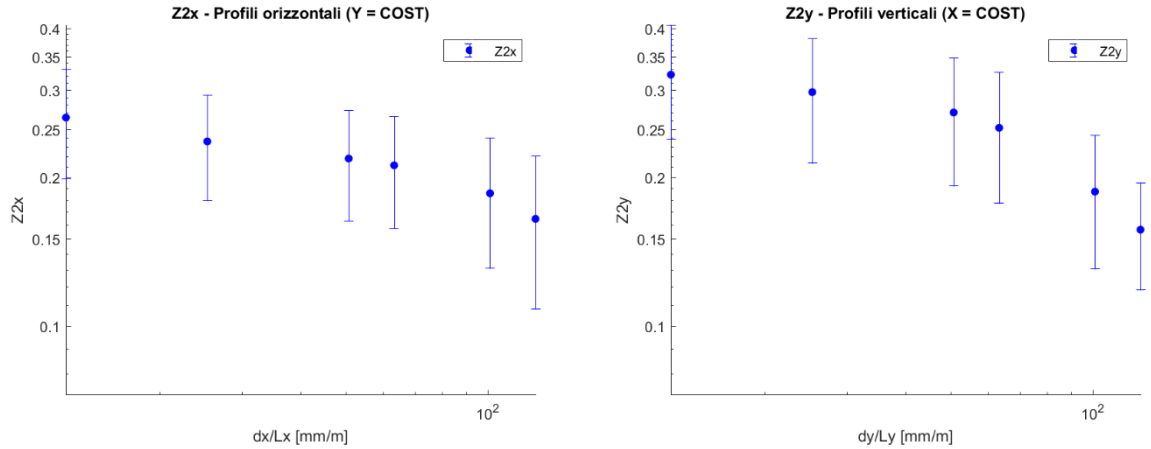


Figura 5.116 Parete 4-ridotta: Z_{2x} (profili y=cost) ed Z_{2y} (profili x = cost).

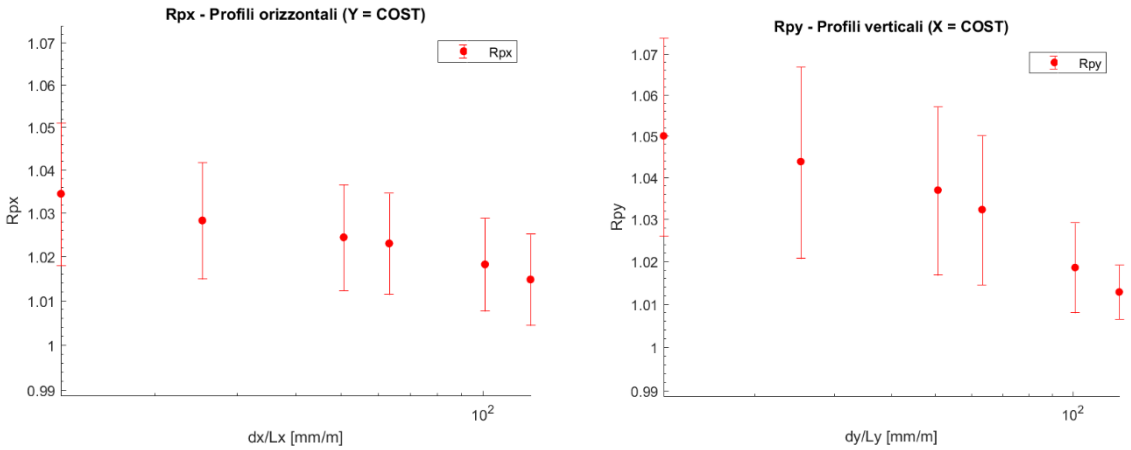


Figura 5.117 Parete 4: Rpx (profili y=cost) ed Rpy (profili x = cost).

Tabella 5.36 Parete 4 ridotta (2m x 2m): riepilogo dello studio statistico dei parametri di scabrezza Z_2 ed Rp per i diversi intervalli di campionamento.

Parete 4 (2 x 2 M)						
X_passo_norm [MM]	**126,58**	**101,27**	**63,29**	**50,63**	**25,32**	**12,66**
Z2X mean	0,165	0,185	0,211	0,218	0,236	0,264
Z2X min	0,065	0,066	0,126	0,123	0,150	0,165
Z2X max	0,313	0,318	0,326	0,339	0,359	0,470
Z2X Standard Deviation	0,056	0,055	0,054	0,055	0,057	0,066
RPX mean	1,015	1,018	1,023	1,024	1,028	1,034
RPX min	1,002	1,002	1,008	1,008	1,011	1,013
RPX max	1,047	1,049	1,050	1,054	1,059	1,089
RPX Standard Deviation	0,010	0,011	0,012	0,012	0,013	0,017
Y_passo_norm [MM]	**126,58**	**101,27**	**63,29**	**50,63**	**25,32**	**12,66**
Z2Y mean	0,157	0,187	0,252	0,270	0,297	0,322
Z2Y min	0,073	0,102	0,135	0,151	0,168	0,192
Z2Y max	0,249	0,305	0,397	0,419	0,453	0,484
Z2Y Standard Deviation	0,038	0,056	0,074	0,078	0,084	0,084
RPY mean	1,013	1,019	1,032	1,037	1,044	1,050
RPY min	1,003	1,005	1,009	1,011	1,014	1,017
RPY max	1,030	1,044	1,069	1,081	1,091	1,100
RPY Standard Deviation	0,006	0,011	0,018	0,020	0,023	0,024

L'errore all'ultimo intervallo di campionamento risulta infatti pari a:

- Errore per Z_{2x} = 11,8%;
- Errore per Z_{2y} = 8,4%.

Mediamente, ripetendo la procedura per superfici più piccole, su tutte le pareti si osservano riduzioni dell'errore percentuale commesso considerando l'intervallo di campionamento immediatamente superiore a quello minimo (Tabella 5.37):

Tabella 5.37 Errore percentuale che si commette considerando l'intervallo di campionamento immediatamente superiore a quello minimo, per tutte le pareti di versante.

Elemento	Dimensioni [m x m]	Errore % su Z2x al passo di campionamento minimo	Errore % su Z2y al passo di campionamento minimo
Parete 1	3 x 3	33	50,6
Parete 1 ridotta	1 x 1	21,3	41,7
Parete 2	5 x 5	50,9	29
Parete 2 ridotta	2 x 2	33,2	22
Parete 3	7 x 7	56	29
Parete 3 ridotta	1,5 x 1,5	31	20
Parete 4	4 x 4	33	45
Parete 4 ridotta	2 x 2	11,4	8,4
Parete 5	2 x 2	50,6	39
Parete 5 ridotta	1 x 1	20	13,1

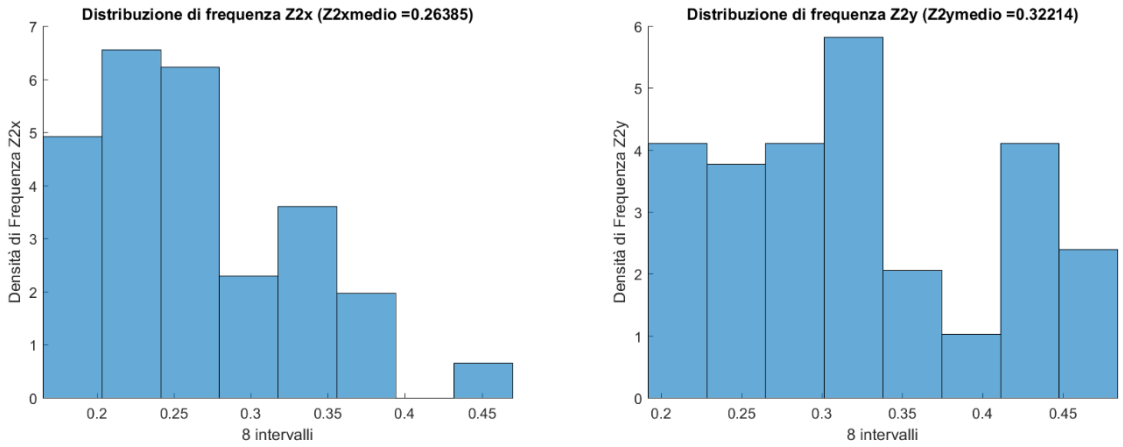


Figura 5.118 Parete4-ridotta:distribuzione di frequenza per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 13mm/m.

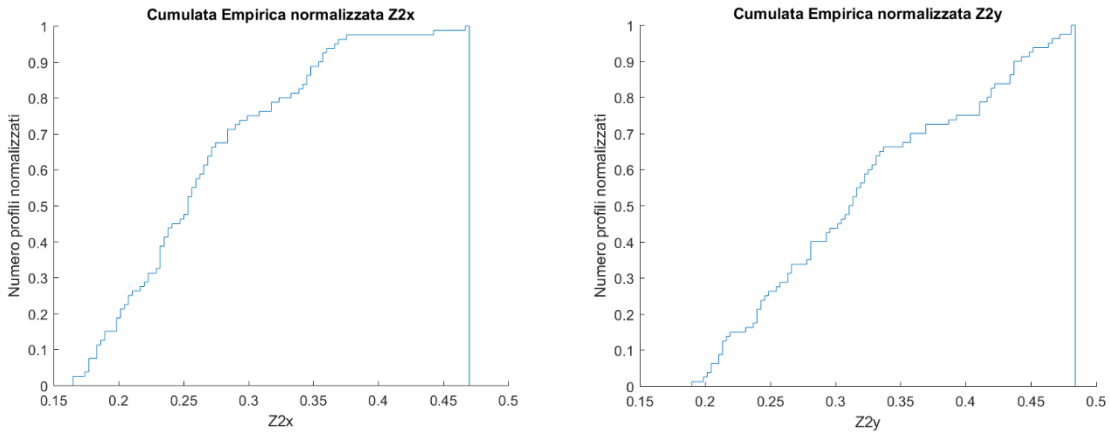


Figura 5.119 Parete4-ridotta: frequenza cumulata per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 13mm/m.

Oltre all'incongruenza dei parametri di scabrezza Z2 ed Rp, il paragrafo 5.5.5 ha evidenziato per le superfici del versante 3 e 4, rispettivamente di 7m x 7m e 4m x 4m, valori di JRC molto superiori a quelli attesi da letteratura (>20). Per tutte le pareti si è ripetuta la procedura di calcolo di JRC sulle superfici ridotte identificate in Tabella 5.37, i risultati sono riportati di seguito (da Figura 5.120 a Figura 5.124).

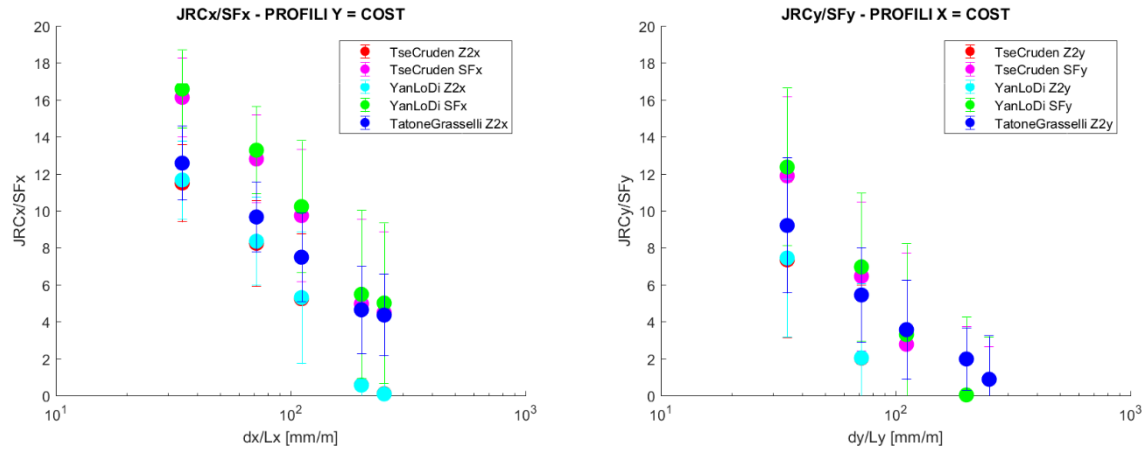


Figura 5.120 JRC Parete 1, 1m x 1m, lungo le direzioni x e y.

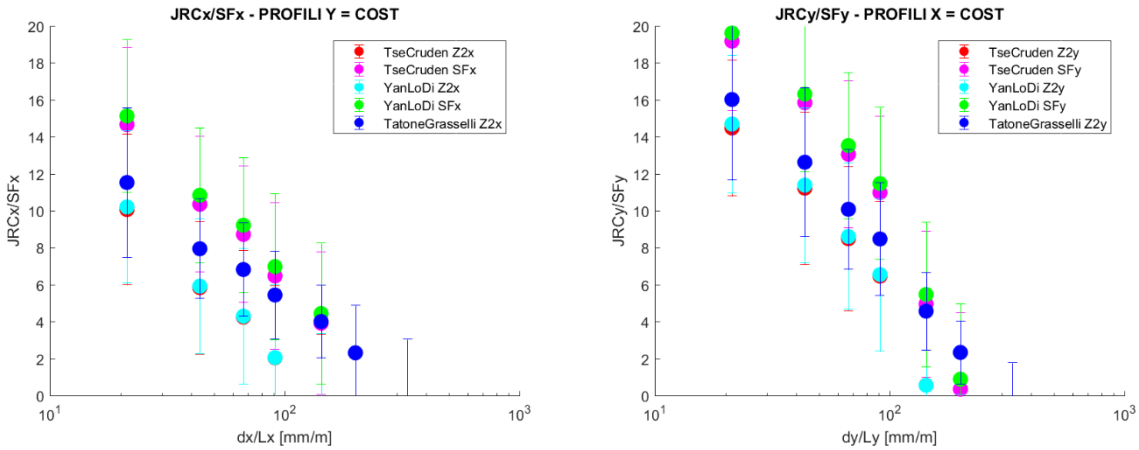


Figura 5.121 JRC Parete 2, 2m x 2m, lungo le direzioni x e y.

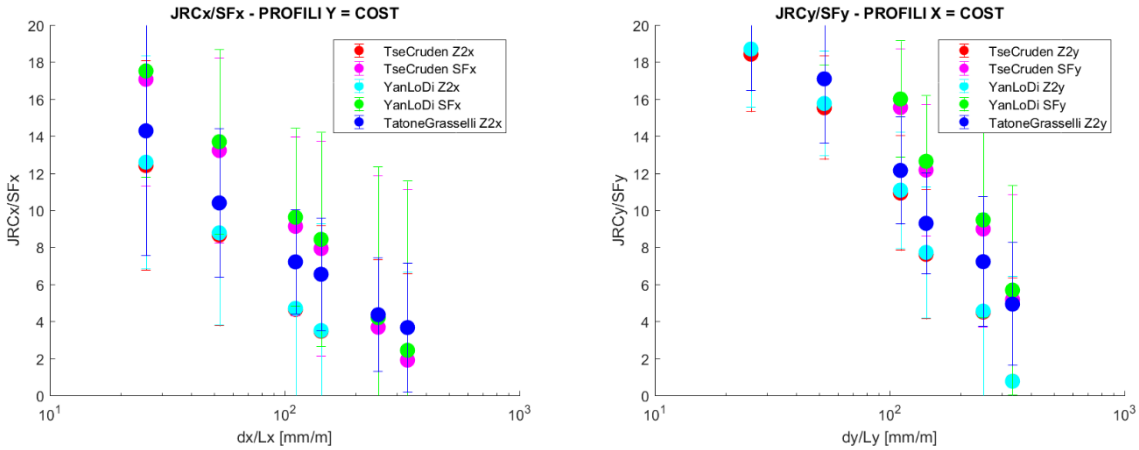


Figura 5.122 JRC Parete 3, 1.5m x 1.5m, lungo le direzioni x e y.

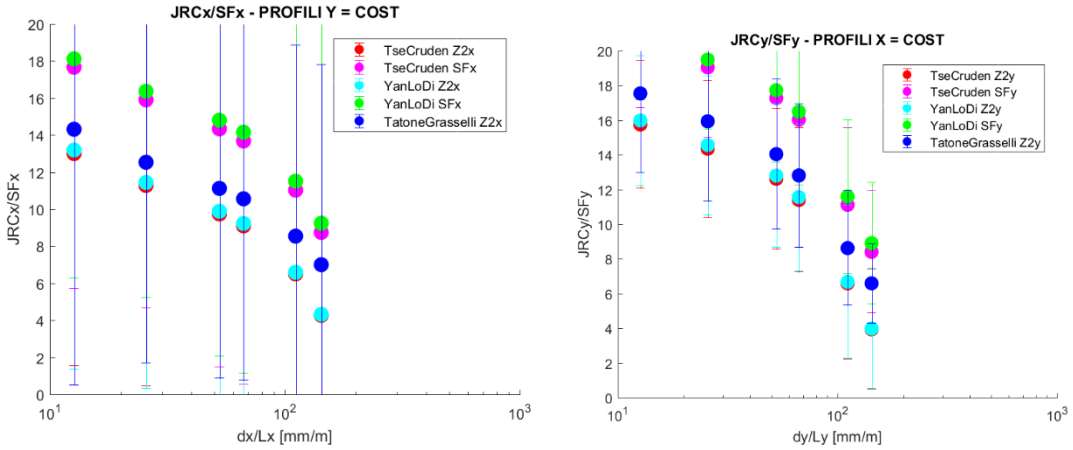


Figura 5.123 JRC Parete 4, 2m x 2m, lungo le direzioni x e y.

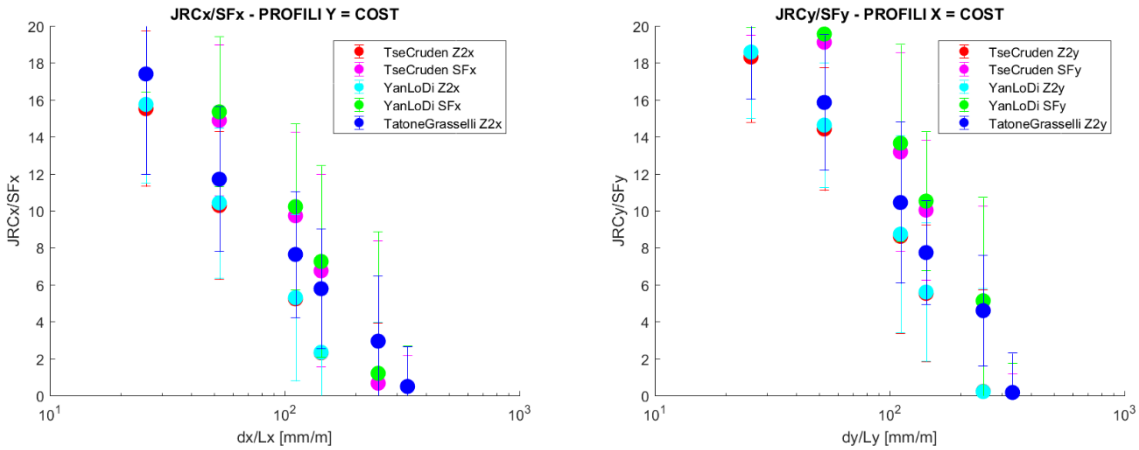


Figura 5.124 JRC Parete 5, 1m x 1m, lungo le direzioni x e y.

Ci si sofferma ora sui risultati della parete 4 (Figura 5.113). Il calcolo ha evidenziato un effetto scala positivo (riduzione di JRC con riduzione della superficie, Figura 5.125 e Figura 5.126), contrariamente a quello atteso descritto da Barton e Bandis. Per valutare la possibile influenza dell'ondulosità alla scala del versante, si è proceduto come segue.

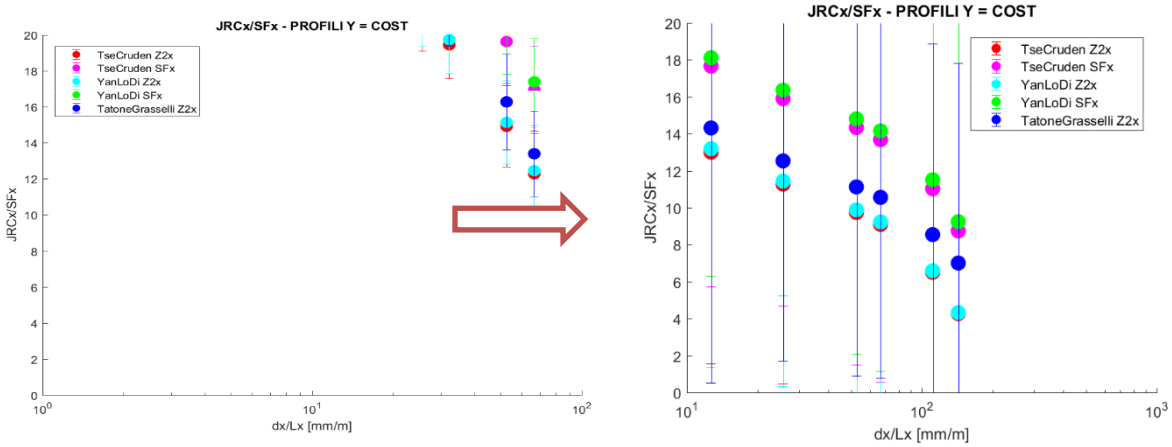


Figura 5.125 JRC Parete 4 nella direzione x: passando dalla sezione 4m x 4m a quella 2m x 2m, i valori di JRC si abbassano.

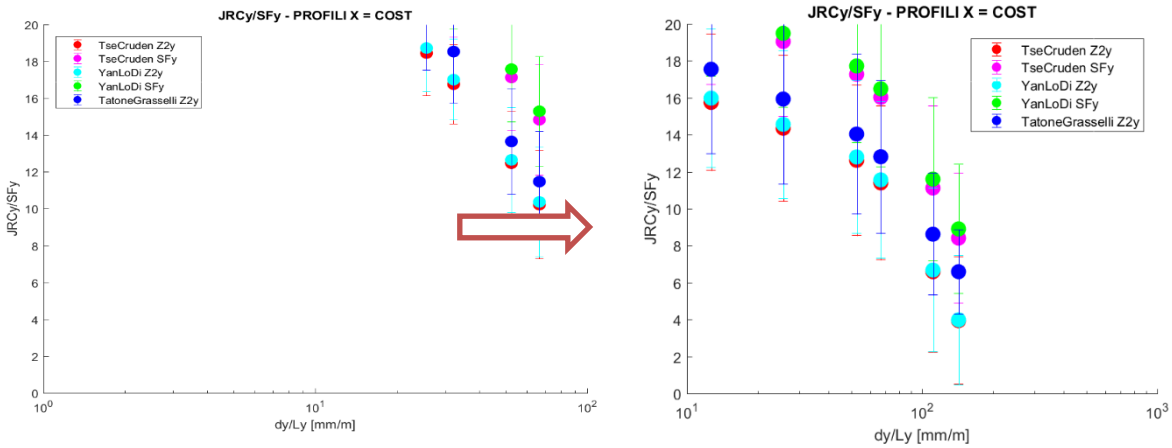


Figura 5.126 JRC Parete 4 nella direzione Y: passando dalla sezione 4m x 4m a quella 2m x 2m, i valori di JRC si abbassano.

Sulla parete 4 di superficie 4m x 4m, sono stati estratti i 12 profili evidenziati in Figura 5.127:

- 5 profili verticali;
- 5 profili orizzontali;
- 2 profili obliqui.

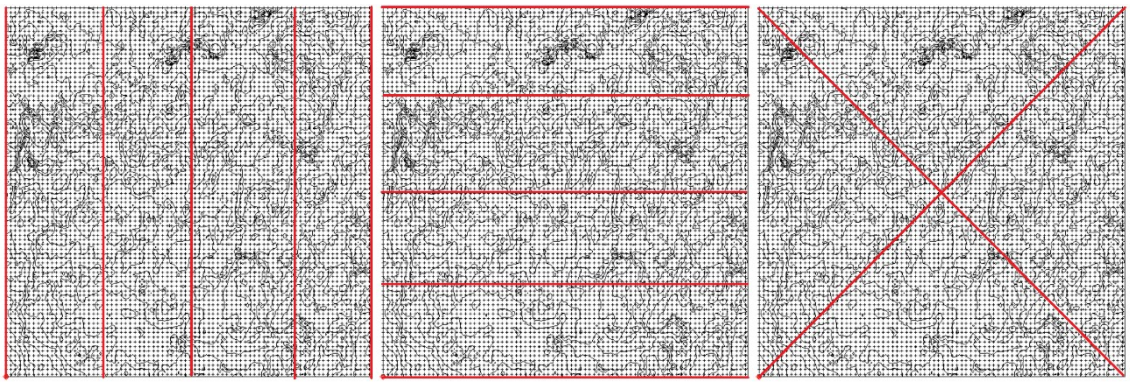


Figura 5.127 Parete 4, 4mx 4m: 12 profili estratti su cui sono valutati i parametri di scabrezza per valutare l'influenza dell'ondulosità alla macroscala.

Su ognuno dei 12 profili è stato stimato il parametro di scabrezza Z_2, l'estensione dell'asperità minima e dell'asperità massima in valore assoluto. In seguito, ognuno dei profili è analizzato singolarmente per evidenziare la presenza di ondulosità macroscopiche, la procedura è condotta tramite *Matlab* (codice *Matlab* in allegato):

- l'utente definisce sul profilo dei sotto-tratti in cui è evidenziabile un'ondulosità costante;

- il software calcola con una procedura ai minimi quadrati la pendenza media dei sotto-tratti e su ognuno stima i parametri di scabrezza, l'asperità minima e massima rispetto alla linea di pendenza individuata;
- infine effettua un confronto tra i valori stimati sul profilo intero e quelli stimati sui sotto-tratti che lo compongono.

A scopo esplicativo si riporta la procedura per il solo profilo 1 – verticale (Figura 5.128): su questo sono evidenziate l'asperità minima e massima in valore assoluto.

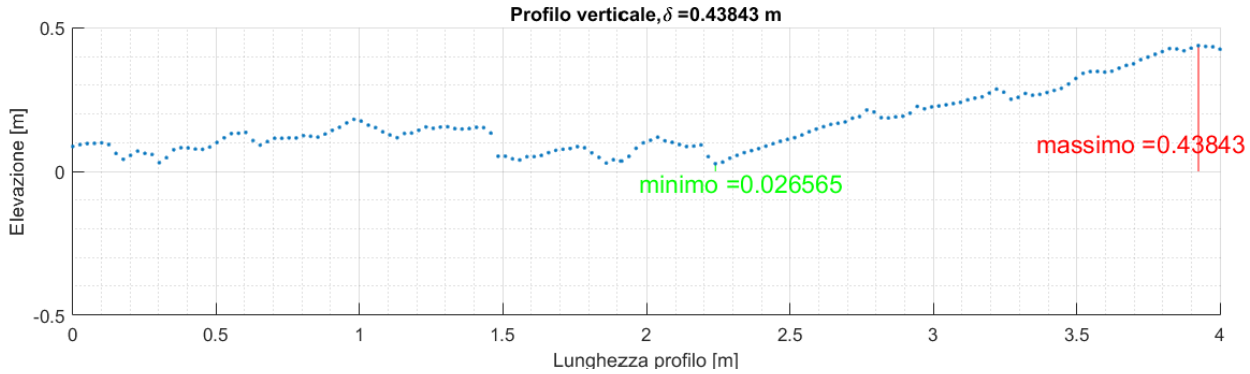


Figura 5.128 Profilo verticale 1, parete 4; estensione dell'asperità minima (in verde) e massima (in rosso).

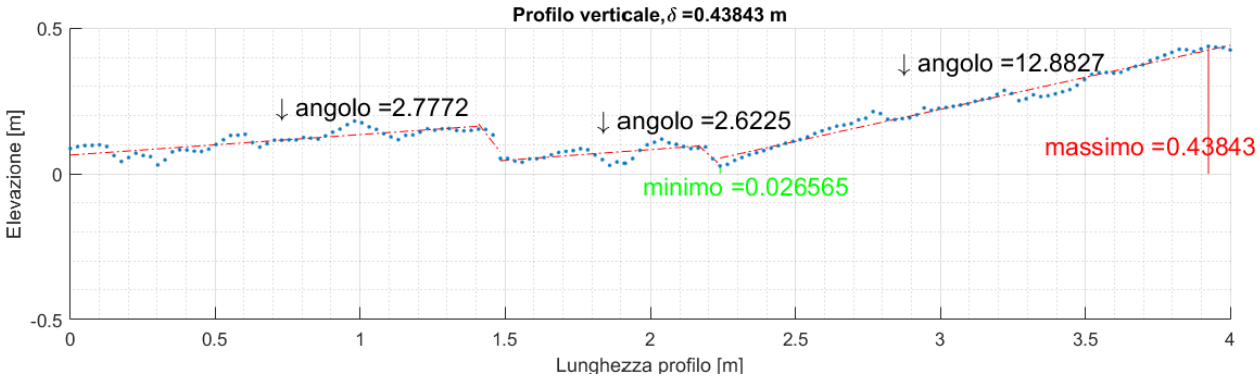


Figura 5.129 Profilo 1, parete 4: sono stati identificati tre tratti a ondulosità macroscopica.

I tratti con ondulosità macroscopica individuati sono tre (Figura 5.129) e le loro pendenze sono pari a:

- Primo tratto: ondulosità 2,77°;
- Secondo tratto: ondulosità 2,62°;
- Terzo tratto: ondulosità 12,89°.

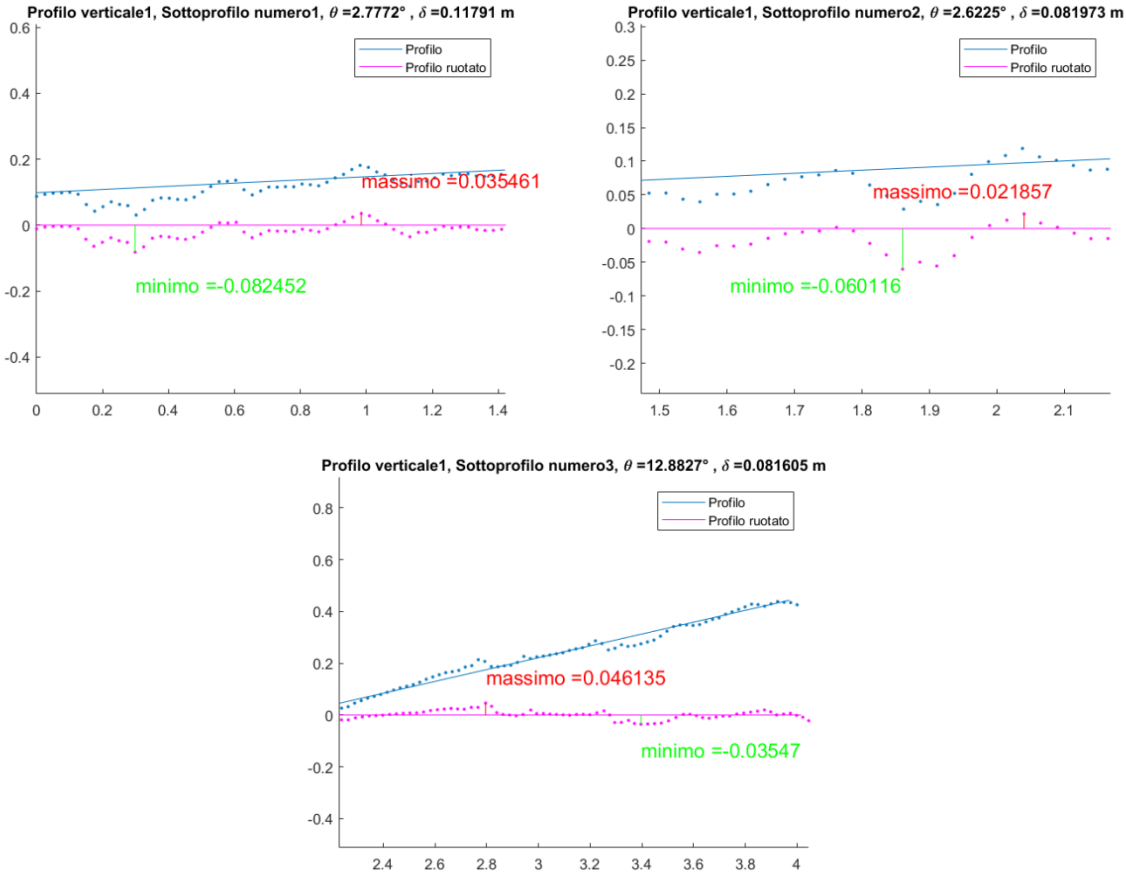


Figura 5.130 Profilo 1 verticale, sottoprofili individuati con ondulosità evidente.

I risultati per tutti i 12 profili estratti sono riportati in Figura 5.131: sui singoli sottoprofili si osserva mediamente che i parametri di scabrezza sono più bassi rispetto a quelli stimati sul profilo intero. La procedura trattata pertanto non può essere applicata a superfici molto ampie a causa dell'influenza dell'ondulosità, influenza che non è stata ancora quantificata e che rende inadatto il calcolo della superficie media piana su cui si basa la procedura di stima dei parametri di scabrezza.

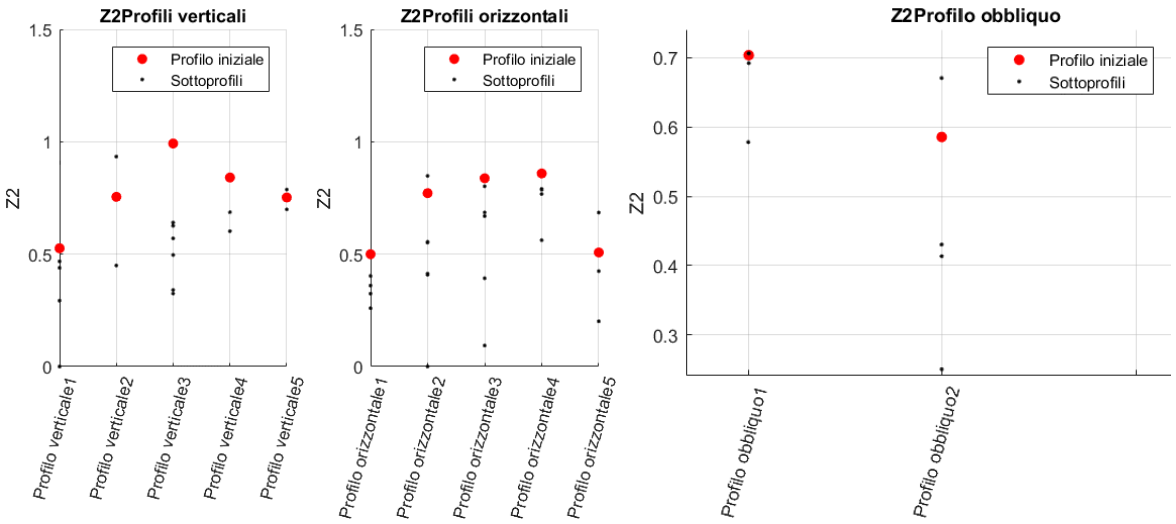
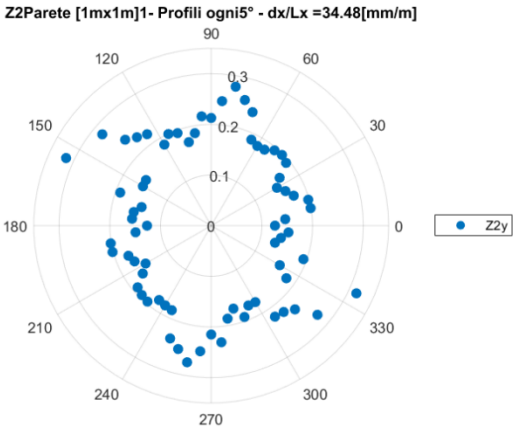


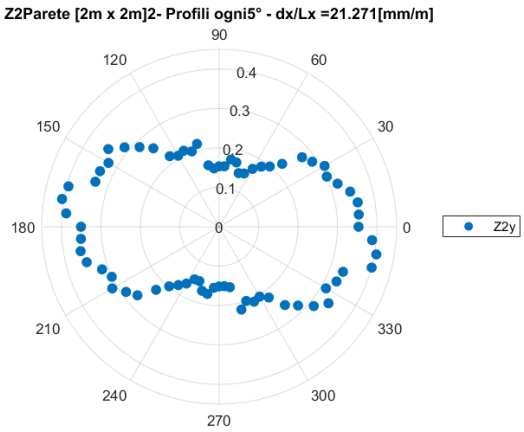
Figura 5.131 Z2 per i 12 sottoprofili estratti dalla parete 4.

5.5.7. Anisotropia

Il comportamento anisotropo viene stimato sulle sezioni ridimensionate, i cui dati sono riportati in dettaglio in Appendice (allegato 9.1.8, 9.1.10, 9.1.12, 9.1.14 e 9.1.16):

- Parete 1: passo 34,5 mm, normalizzato 34,5mm/m;
- Parete 2: passo 42,5 mm, normalizzato 21,3mm/m;
- Parete 3: passo 38,5 mm, normalizzato 25,6mm/m;
- Parete 4: passo 25 mm, normalizzato 12,5mm/m;
- Parete 5: passo 28,5 mm, normalizzato 28,5mm/m;





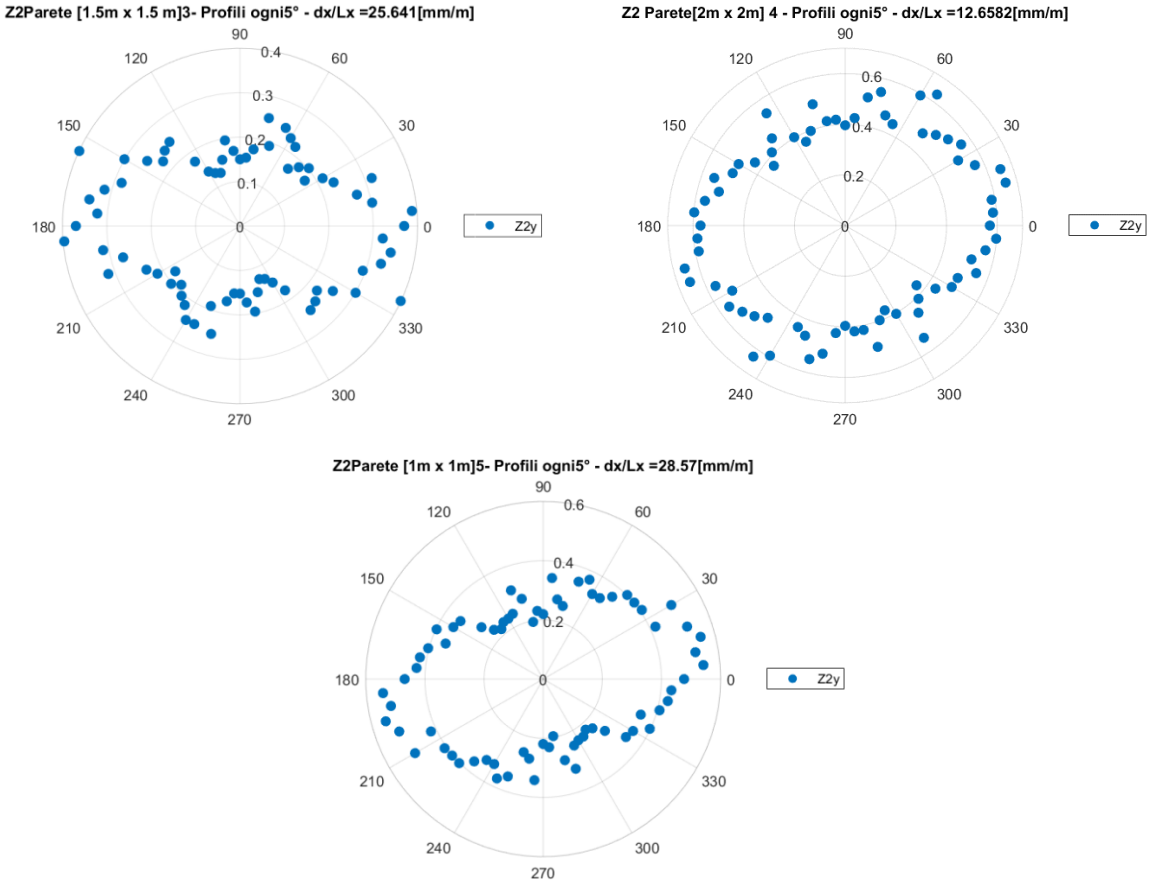


Figura 5.132 Polar Plot di Z_2 per le pareti di versante.

Si evidenzia spiccata anisotropia per tutte le sezioni di versante considerate (Tabella 5.38).

Tabella 5.38 Sezioni di versante, rapporto di anisotropia.

Elemento	Anisotropia		
	Z2min	Z2max	Z2min/Z2max
Parete 1	0,126	0,316	0,399
Parete 2	0,145	0,404	0,359
Parete 3	0,127	0,399	0,318
Parete 4	0,365	0,655	0,557
Parete 5	0,196	0,551	0,356

6. Confronto con i risultati di laboratorio

Si confrontano le stime fin qui ottenute con i risultati di prove sperimentali condotte in studi precedenti (Porcarelli, 2015) . I tre provini GS1, GS2 e GS3 sono stati ottenuti dai blocchi caduti in sito durante la frana (capitolo 5), per cui il valore di JRC stimato in laboratorio è confrontato con le distribuzioni di frequenza di JRC stimato lungo x ed y dei tre blocchi. In allegato 9.2.10 il codice *Matlab* "distribuzione_frequenza_jrc" sviluppato per il calcolo.

G1 TOP

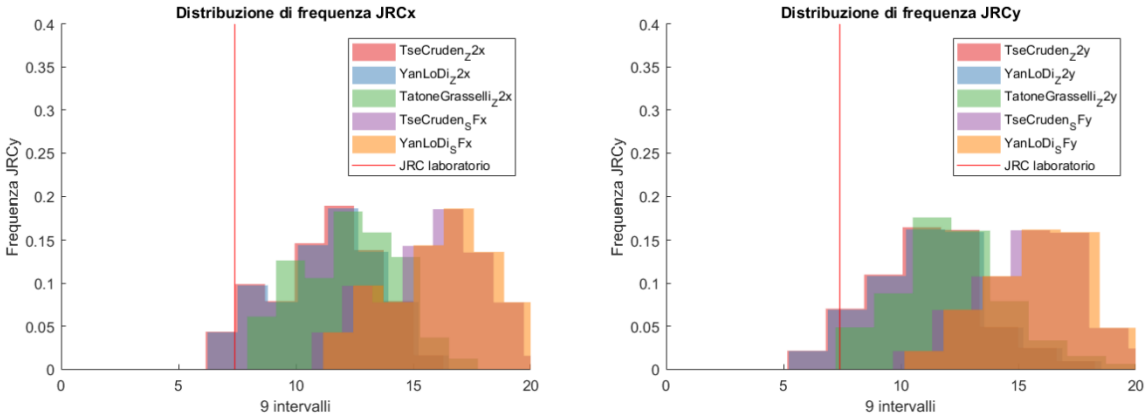


Figura 6.1 GI TOP: funzione di frequenza di JRCx e JRCy, confrontati con JRC stimato in laboratorio

G1 BOTTOM

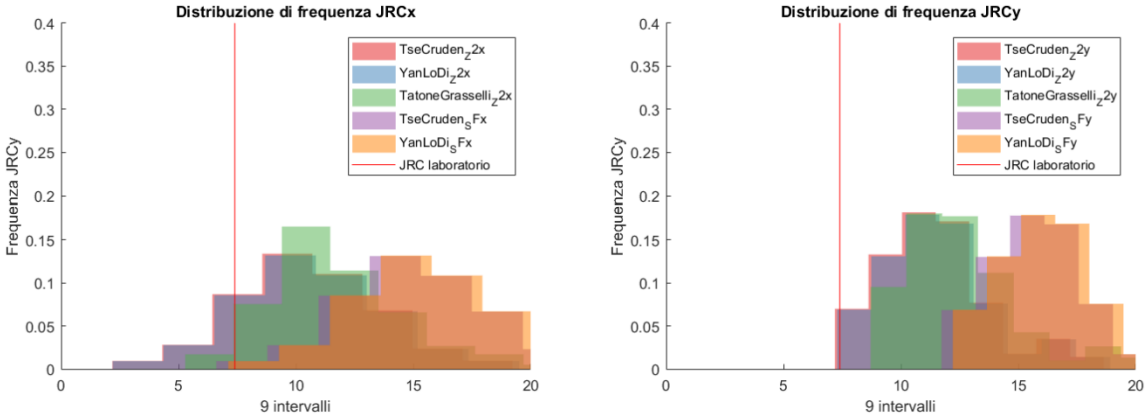


Figura 6.2 G1 BOTTOM: funzione di frequenza di JRCx e JRCy, confrontati con JRC stimato in laboratorio.

G2 TOP

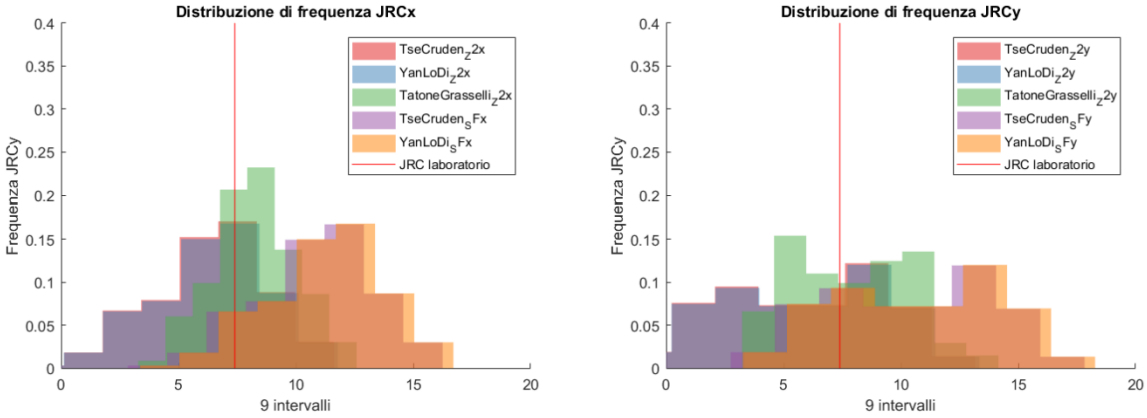


Figura 6.3 G2 TOP: funzione di frequenza di JRCx e JRCy, confrontati con JRC stimato in laboratorio.

G2 BOTTOM

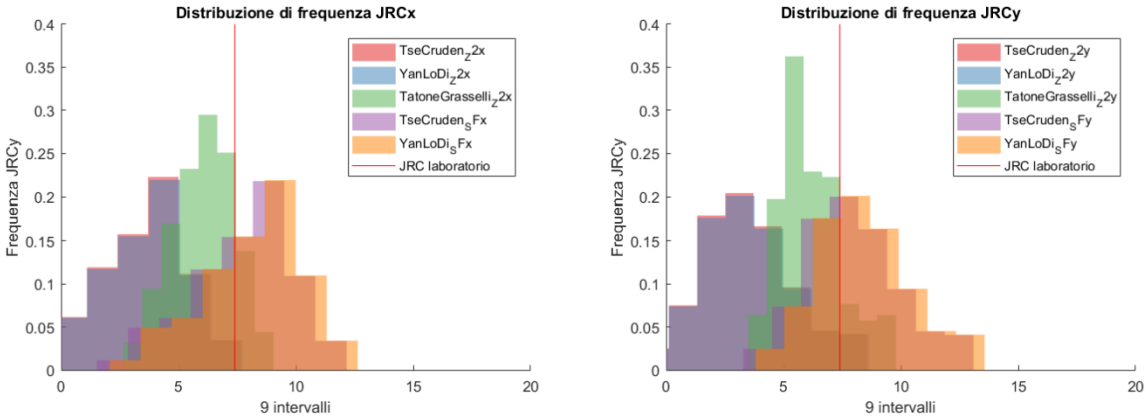


Figura 6.4 G2 BOTTOM: funzione di frequenza di JRCx e JRCy, confrontati con JRC stimato in laboratorio

G3 TOP

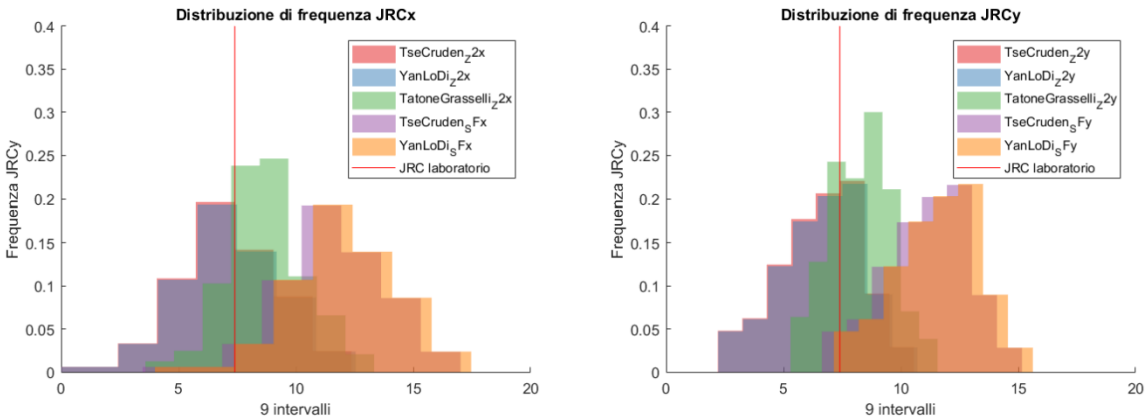


Figura 6.5 G3 TOP: funzione di frequenza di JRCx e JRCy, confrontati con JRC stimato in laboratorio

G3 BOTTOM

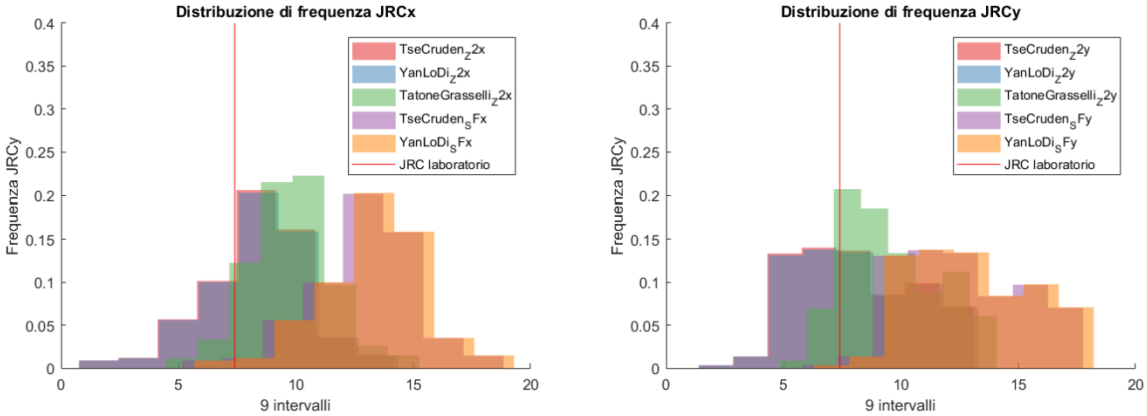


Figura 6.6 G3 BOTTOM: funzione di frequenza di JRCx e JRCy, confrontati con JRC stimato in laboratorio.

7. Conclusioni

La determinazione accurata della rugosità superficiale dei giunti in roccia alla scala del sito è essenziale per una corretta caratterizzazione dell'ammasso roccioso. Tuttavia ad oggi sono pochi gli studi in questo ambito e comunemente la rugosità superficiale delle discontinuità è caratterizzata utilizzando piccoli campioni. Vista la dipendenza dei parametri di rugosità dalla scala del problema, in questa tesi è stata condotta un'indagine sistematica per comprendere l'effetto scala della rugosità per le discontinuità in roccia. L'obiettivo è stato duplice:

- studiare la dipendenza della scabrezza con la scala del campione attraverso la digitalizzazione di elementi a diverse scale:
  - in sito, di una parete rocciosa da cui si sono avuti distacchi di blocchi;
  - in sito, di blocchi di materiale instabilizzati;
  - in laboratorio su provini ottenuti dal materiale instabilizzato.
- investigare l'effetto della risoluzione della misura sulla scabrezza, variando l'intervallo di campionamento delle nuvole di punti e valutando le variazioni nella stima dei parametri di rugosità.

La rugosità superficiale del giunto influenza sia il comportamento meccanico che idraulico dell'ammasso roccioso, per caratterizzarla il parametro più ampiamente utilizzato nella pratica ingegneristica è il JRC – joint roughness coefficient - proposto da Barton. Tuttavia il parametro JRC non è una misura della geometria del profilo del giunto, ma più propriamente un parametro empirico specificamente funzionale al criterio di resistenza al taglio di Barton e Bandis per i giunti. Pertanto in questa tesi, si è fatto riferimento al valore di Z_2 come misura oggettiva della scabrezza e solo in seguito si è stimato lo JRC tramite diverse formulazioni di letteratura.

I risultati delle elaborazioni sui campioni, sui blocchi e sul versante hanno evidenziato in maniera concorde che i parametri di scabrezza (nel dettaglio: Z_2, R_p ed R_s) diminuiscono all'aumentare dell'intervallo del campionamento, per cui la procedura è dipendente dal campionamento considerato. La dipendenza del campionamento ha una soglia di stazionarietà, oltre la quale al diminuire dell'intervallo di campionamento i parametri di scabrezza subiscono variazioni limitate. In questo modo è possibile identificare la risoluzione minima che deve avere la nuvola ricostruita con metodo fotogrammetrico (si è osservato infatti che per DSM a risoluzione troppo bassa, la soglia di stazionarietà non si raggiunge) e quindi l'intervallo di campionamento più appropriato per stimare i parametri limitando i costi ed i tempi d'elaborazione al calcolatore. La soglia di stazionarietà è stata individuata nei blocchi e nei provini:

- blocchi circa 1 mm;
- provini 0,5mm;

Non è stato possibile individuarla nelle porzioni di versante, in quanto la variazione sia di Z_2 che di R_p da un passo all'altro non è trascurabile. Ciò probabilmente è causato sia dalla minore densità delle nuvole di punti che dalla grande estensione delle sezioni considerate, infatti considerando superfici più piccole, si è osservato una maggiore convergenza dei dati verso una soglia di stazionarietà.

Dall'analisi dei risultati ottenuti nel calcolo di JRC, si osserva la presenza di un effetto scala negativo tra blocchi e provini. I versanti invece mostrano un apparente effetto scala positivo, tuttavia questi risultati sono influenzati dalla grandezza delle sezioni oggetto di studio. Infatti l'analisi svolta sulle pareti del versante ha evidenziato degli ordini di grandezza dei parametri Z_2 ed Rp (e quindi JRC) superiori a quelli attesi da letteratura. La stima dei parametri

ha risentito delle dimensioni molto grandi delle porzioni di versante studiate: sono infatti presenti zone con ondulosità molto diverse tra loro, questo rende invalida la procedura di calcolo che si basa sulla determinazione del piano medio della superficie considerata. Si è proceduto quindi considerando porzioni di versante più piccole, ottenendo ordini di grandezza coerenti con quelli attesi. La procedura implementata pertanto non può essere applicata a superfici molto ampie a causa dell'influenza dell'ondulosità, influenza che non è stata ancora quantificata e che rende inadatto il calcolo della superficie media piana su cui si basa la procedura presentata di stima dei parametri di scabrezza.

Infine, si è condotta un'indagine sull'anisotropia delle superfici analizzate: nelle discontinuità naturali è fondamentale tenere in considerazione l'eterogeneità dell'ammasso roccioso e l'anisotropia nelle diverse direzioni di scivolamento. Si è stimato il parametro Z_2 per 72 profili radiali distanti 5° tra loro. L'anisotropia è evidenziata dal rapporto tra La $Z_{2,min}$ e la $Z_{2,max}$: la sezione presenta caratteristiche d'anisotropia quanto maggiormente questo rapporto si discosta dall'unità. Le pareti del versante mostrano i rapporti di anisotropia più bassi.

L'identificazione della sezione a cui corrisponde $Z_{2,min}$ permetterà in futuro l'esecuzione di prove di taglio su provini nella direzione della scabrezza minima, evitando la sovrastima della resistenza al taglio del campione.

Un riepilogo dei risultati ottenuti dallo studio di tutti gli elementi è riportato in Tabella 7.1. Il numero totale di profili estrapolati e studiati è:

- 8548 per il versante;
- 96000 per i blocchi;
- 7800 per i provini.

Tabella 7.1 Riepilogo dei risultati ottenuti su tutti gli elementi oggetto di studio.

Elemento	Dimensione [m]	Dx [mm]	Dx / Lunghezza [mm/m]	Z2x medio		Z2y medio		JRCx (Tatone e Grasselli)		JRCy (Tatone e Grasselli)		Anisotropia			
				min	max	min	max	TseCruden_Z2x	YanLoDi_SFx	TseCruden_Z2y	YanLoDi_SFY	Z2min	Z2max	Z2min/Z2max	JRCx (Tatone e Grasselli)
Parete 1	3 x 3	30	10	0,425		0,363		>20		>20		-	-	-	-
				0,201	0,781	0,153	0,854								
	1 x 1	33,33	33,33	0,233		0,18		12,6		9,2		0,126	0,316	0,399	5,8
				0,172	0,307	0,104	0,37	11,66	16,59	7,43	12,36				
Parete 2	5 x 5	36	7	0,334		0,43		17,9		>20		-	-	-	-
				0,128	1,3	0,272	1,2	15,5	>20						
	2 x 2	42,6	21	0,217		0,294		11,5		16,02		0,145	0,404	0,359	7,1
				0,132	0,406	0,178	0,507	10,2	15,13	14,69	19,62				
Parete 3	7 x 7	35	5	0,525		0,633		>20		>20		-	-	-	-
				0,203	1,4	0,374	1,4								
	1,5 x 1,5	38,5	26	0,267		0,386		14,3		>20		0,127	0,399	0,318	5,9
				0,101	0,726	0,253	0,611	12,59	17,52						
Parete 4	4 x 4	25	6	0,87		0,795		>20		>20		-	-	-	-
				0,5	1,5	0,475	1,443								
	2 x 2	25	13	0,264		0,322		14,32		17,55		0,365	0,655	0,557	20,0
				0,165	0,47	0,192	0,484	13,1	18,12	15,9	>20				
Parete 5	2 x 2	28,5	14	0,476		0,552		>20		>20		-	-	-	-
				0,179	1,2	0,215	1,06								
	1 x 1	28,5	28,5	0,306		0,37		16,62		>20		0,196	0,551	0,356	10,4
				0,165	0,566	0,223	0,514	15,09	19,58						
Blocco 1	1 x 1	1	1	0,158		0,197		7,9		10,4		0,133	0,237	0,562	6,3
				0,120	0,211	0,163	0,254	6,14	11,07	9,37	14,29				
Blocco 2	1 x 1	1	1	0,235		0,228		12,6		12,2		0,169	0,246	0,687	8,7
				0,112	0,566	0,129	0,476	11,3	16,22	11,28	16,21				
Blocco 3	0,85 x 0,85	0,85	0,85	0,323		0,328		17,7		17,9		0,211	0,399	0,528	11,3
				0,223	0,766	0,229	0,724	16,2	>20	16	18,22				
Provino GS1 TOP	0,05 X 0,05	0,5	10	0,291		0,282		15,8		15,4		0,104	0,160	0,650	4,2
				0,201	0,41	0,166	0,452	14,6	19,64	14,13	19,27	95°	125°		
Provino GS1 BOT	0,05 X 0,05	0,5	10	0,306		0,317		16,7		17,3		0,105	0,201	0,522	4,3
				0,187	0,544	0,224	0,546	16,3	19,9	15,6	20	160°	75°		
Provino GS2 TOP	0,05 X 0,05	0,5	10	0,278		0,271		15,1		14,7		0,094	0,144	0,653	3,5
				0,179	0,344	0,145	0,395	13,85	19,05	13,2	18,52	5°	90°		
Provino GS2 BOT	0,05 X 0,05	0,5	10	0,177		0,1804		9,1		9,3		0,139	0,186	0,747	6,7
				0,107	0,23	0,137	0,263	7,7	12,6	8	13	75°	125°		
Provino GS3 TOP	0,05 X 0,05	0,5	10	0,25		0,248		13,5		13,4		0,165	0,267	0,618	8,4
				0,223	0,81	0,229	0,72	12,56	17,48	16	18,22	75°	165°		
Provino GS3 BOT	0,05 X 0,05	0,5	10	0,236		0,232		12,7		12,5		0,176	0,334	0,527	9,1
				0,127	0,31	0,135	0,388	11,59	16,68	11,31	16,4	75°	30°		

8. Bibliografia

Arpa-Piemonte. (2004). *Inventario dei fenomeni franosi in Italia*.

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*. https://doi.org/10.1016/0148-9062(81)90262-X

Barton, N. (1973). Review of a new shear-strength criterion for rock joints. *Engineering Geology*. https://doi.org/10.1016/0013-7952(73)90013-6

Barton, N. (1976). The shear strength of rock and rock joints. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences And*. https://doi.org/10.1016/0148-9062(76)90003-6

Barton, N. (1978). Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. https://doi.org/10.1016/0148-9062(79)91476-1

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*.

Barton, N., & Choubey, V. (1977). The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mechanics Felsmechanik Mécanique Des Roches*. https://doi.org/10.1007/BF01261801

Beer, A., Stead, D., & Coggan, J. S. (2002). Technical Note Estimation of the Joint Roughness Coefficient (JRC) by Visual Comparison. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, *35*(1), 65–74. https://doi.org/10.1007/s006030200009

Cravero, M., Iabichino, G., & Ferrero, A. (2001). Evaluation of joint roughness and dilatancy of schistosity joints. *ISRM Regional Symposium EUROCK 2001*, 217–222. Helsinki (Finland).

Cravero, M., Iabichino, G., & Piovano, V. (1995). Analysis of large joint profiles related to rock slope instabilities. *8th ISRM Congress*, 25–29. Tokyo, Japan: A.A. Balkema, 423– 428.

Deere, D. U., & Miller, R. P. (1966). Engineering classification and index properties for intact rock. In *Air Force Weapons Laboratory*.

El-Soudani, S. M. (1978). Profilometric analysis of fractures. *Metallography*. https://doi.org/10.1016/0026-0800(78)90045-9

Fardin, N. (2008). Influence of structural non-stationarity of surface roughness on morphological characterization and mechanical deformation of rock joints. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. https://doi.org/10.1007/s00603-007-0144-9

Fardin, N., Feng, Q., & Stephansson, O. (2004). Application of a new in situ 3D laser scanner to study the scale effect on the rock joint surface roughness. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. https://doi.org/10.1016/S1365-1609(03)00111-4

Fardin, N., Stephansson, O., & Jing, L. (2001). The scale dependence of rock joint surface roughness. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. https://doi.org/10.1016/S1365-1609(01)00028-4

Fathi, A., Moradian, Z., Rivard, P., Ballivy, G., & Boyd, A. J. (2016). Geometric Effect of Asperities on Shear Mechanism of Rock Joints. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. https://doi.org/10.1007/s00603-015-0799-6

Ferrero, A., & Montepara, A. *PROCEDIMENTO PER ACCERTAMENTO TECNICO PREVENTIVO*. , (2015).

Franklin, J. A. (1985). Suggested method for determining point load strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences And*. https://doi.org/10.1016/0148-

9062(85)92327-7

Golden Software, LLC. 809 14th Street Golden, Colorado 80401 www.goldensoftware.com

Haneberg, W. (2007). Directional roughness profiles from three-dimensional photogrammetric or laser scanner point clouds. In *Rock Mechanics: Meeting Society's Challenges and Demands*. https://doi.org/10.1201/noe0415444019-c13

Hoek, E., & Bray, J. W. (1981). Rock Slope Engineering. *Revised 3rd Edition, The Institution of Mining and Metallurgy*, 341–351. London.

Huang, S. L., Oelfke, S. M., & Speck, R. C. (1992). Applicability of fractal characterization and modelling to rock joint profiles. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences And*. https://doi.org/10.1016/0148-9062(92)92120-2

ISMR. (1978). International society for rock mechanics commission on standardization of laboratory and field tests. Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences And*. https://doi.org/10.1016/0148-9062(78)91472-9

Jang, H. S., Kang, S. S., & Jang, B. A. (2014). Determination of Joint Roughness Coefficients Using Roughness Parameters. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. https://doi.org/10.1007/s00603-013-0535-z

Kulatilake, P. H. S. W., & Um, J. (1999). Requirements for accurate quantification of self-affine roughness using the roughness-length method. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. https://doi.org/10.1016/S0148-9062(98)00170-3

Lanaro, F. (2000). A random field model for surface roughness and aperture of rock fractures. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*.

https://doi.org/10.1016/S1365-1609(00)00052-6

Leal-Gomes, M. J. A. (2003). Some new essential questions about scale effects on the mechanics of rock joints. *10th ISRM Congress, 8-12 September*. https://doi.org/ISRM-10CONGRESS-2003-120

Lee, Y. H., Carr, J. R., Barr, D. J., & Haas, C. J. (1990). The fractal dimension as a measure of the roughness of rock discontinuity profiles. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences And*. https://doi.org/10.1016/0148-9062(90)90998-H

Legland, D. (2019). geom3d (https://www.mathworks.com/matlabcentral/ fileexchange/ 24484 - geom3d), MATLAB Central File Exchange. 2019.

Li, Y., & Huang, R. (2015). Relationship between joint roughness coefficient and fractal dimension of rock fracture surfaces. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2015.01.007

Maerz, N. H., Franklin, J. A., & Bennett, C. P. (1990). Joint roughness measurement using shadow profilometry. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences And*. https://doi.org/10.1016/0148-9062(90)92708-M

MATLAB and Statistics Toolbox Release 2014a The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts, United States.

McWilliams, P. C., Kerkering, J. C., & Miller, S. M. (1993). *Estimation of shear strength using fractals as a measure of rock fracture roughness*. University of Michigan Library.

Miller, R. P. (1965). *Engineering classification and index properties for intact rock*. University

of Illinois.

Myers, N. O. (1962). Characterization of surface roughness. *Wear*, *5*(3), 182–189.

Porcarelli, F. (2015). *Analisi sperimentale della resistenza a taglio di discontinuità in roccia*. Università degli studi di Torino.

Rasouli, V., & Harrison, J. P. (2004). A comparison of linear profiling and an in-plane method for the analysis of rock surface geometry. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2004.03.031

Reeves, M. J. (1985). Rock surface roughness and frictional strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences And*. https://doi.org/10.1016/0148-9062(85)90007-5

Review of predictive capabilities of JRC-JCS model in engineering practice. (2005). *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. https://doi.org/10.1016/0148-9062(91)90682-c

Riss, J., & Gentier, S. (1989). Linear and areal roughness of non planar rock surfaces of fracture. *Acta Stereol.*, *8*, 677–682.

Swan, G., & Zongqi, S. (1985). Prediction of shear behaviour of joints using profiles. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. https://doi.org/10.1007/BF01112506

Tatone, B. S. A., & Grasselli, G. (2009). A method to evaluate the three-dimensional roughness of fracture surfaces in brittle geomaterials. *Review of Scientific Instruments*. https://doi.org/10.1063/1.3266964

Tatone, B. S. A., & Grasselli, G. (2010). A new 2D discontinuity roughness parameter and its

correlation with JRC. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2010.06.006

Tatone, B. S. A., & Grasselli, G. (2012). Quantitative Measurements of Fracture Aperture and Directional Roughness from Rock Cores. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. https://doi.org/10.1007/s00603-011-0219-5

Tatone, B. S. A., & Grasselli, G. (2013). An investigation of discontinuity roughness scale dependency using high-resolution surface measurements. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. https://doi.org/10.1007/s00603-012-0294-2

Trigila, A., Iadanza, C., Bussettini, M., & Lastoria, B. (2018). Dissesto idrogeologico in Italia: pericolosità e indicatori di rischio - Edizione 2018. In *ISPRA, Rapporti 287/2018*.

Tse, R., & Cruden, D. M. (1979). Estimating joint roughness coefficients. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences And*. https://doi.org/10.1016/0148-9062(79)90241-9

Xu, B., Wang, Q. F., Liu, B., Chang, X., & Zhang, X. P. (2013). Application of fractal content-gradient method for delineating geochemical anomalies. *Journal of Anhui Normal University (Natural Science)*, *36*(6), 573–577.

Yang, Z. Y., Di, C. C., & Lo, S. C. (2001). Two-dimensional hurst index of joint surfaces. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. https://doi.org/10.1007/s006030170004

Yang, Z. Y., Lo, S. C., & Di, C. C. (2001). Reassessing the joint roughness coefficient (JRC) estimation using Z2. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. https://doi.org/10.1007/s006030170012

Yu, X., & Vayssade, B. (1991). Joint profiles and their roughness parameters. *International*

Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences And. https://doi.org/10.1016/0148-9062(91)90598-G

Zhang, P., Liu, R., Bao, Y., Wang, J., Yu, W., & Shen, Z. (2014). Uncertainty of SWAT model at different DEM resolutions in a large mountainous watershed. *Water Research*. https://doi.org/10.1016/j.watres.2014.01.018

9. Appendice

9.1. Schede elementi

9.1.1. Scheda provino GS1 top/bottom

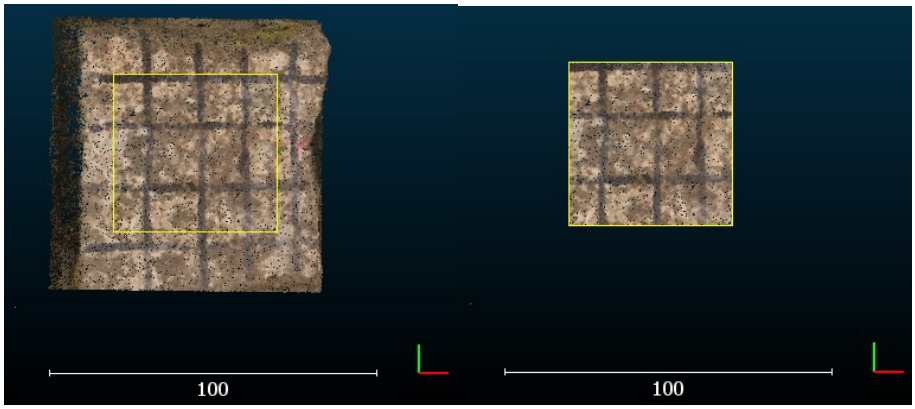


Figura 9.1 GS1 TOP C0: DSM e ritaglio 50 mm x 50 mm.

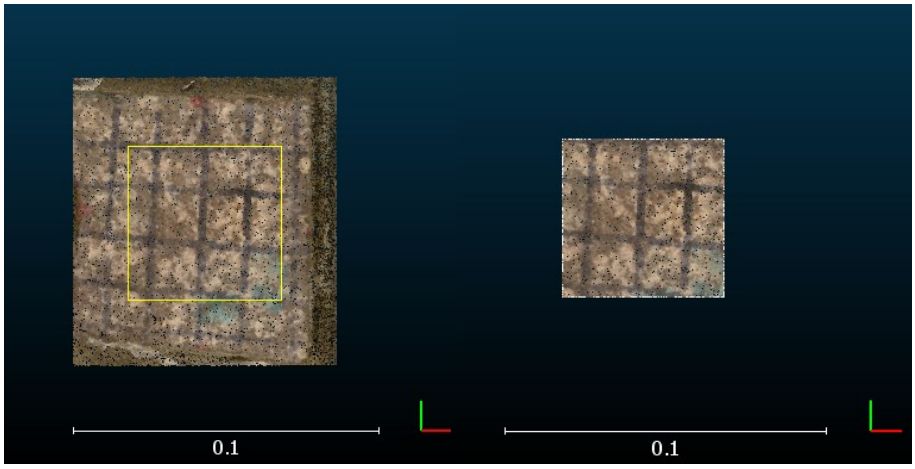


Figura 9.2 GS1 BOTTOM C0: DSM e ritaglio 50 mm x 50 mm.

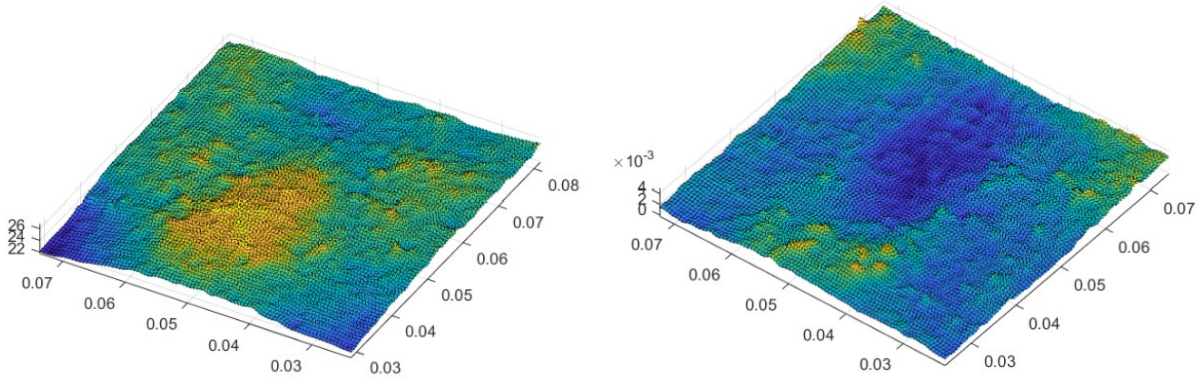


Figura 9.3 GS1 Top/Bottom: DSM dopo la rotazione sul piano orizzontale del piano che approssima la superficie.

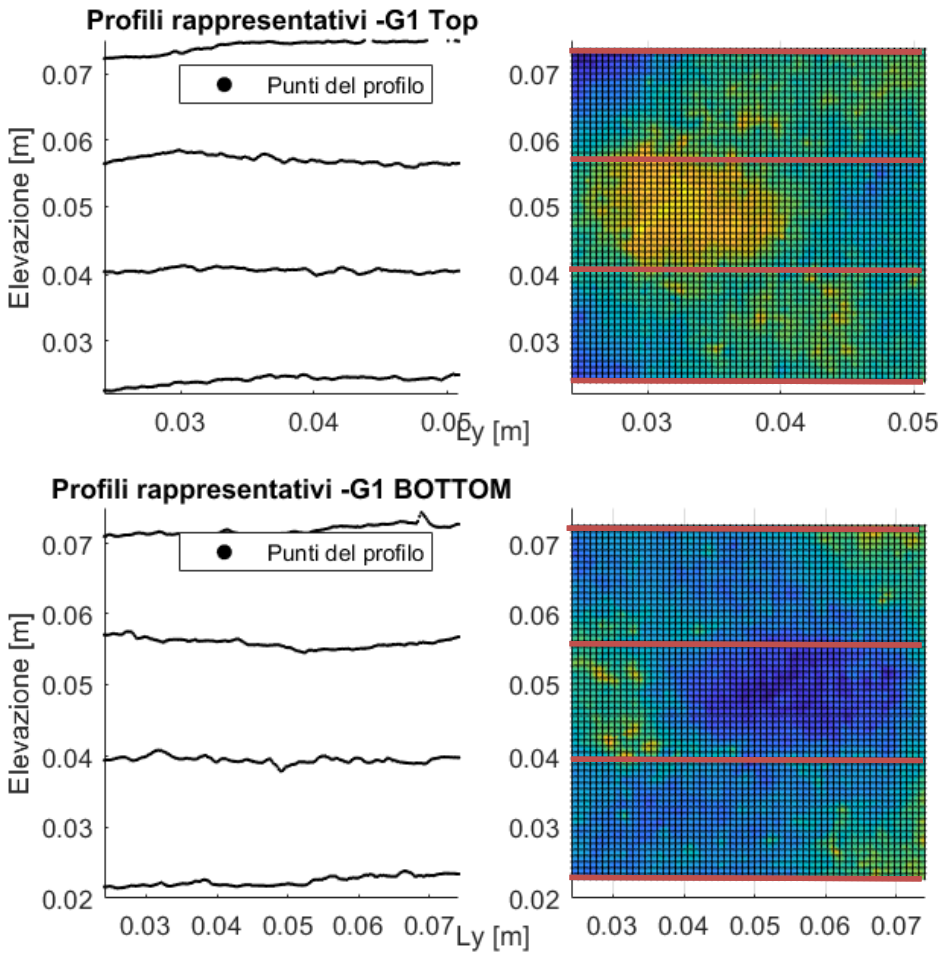


Figura 9.4 GS1 Top/Bottom, analisi della superficie dell'elemento: estrazione di quattro profili orizzontali.

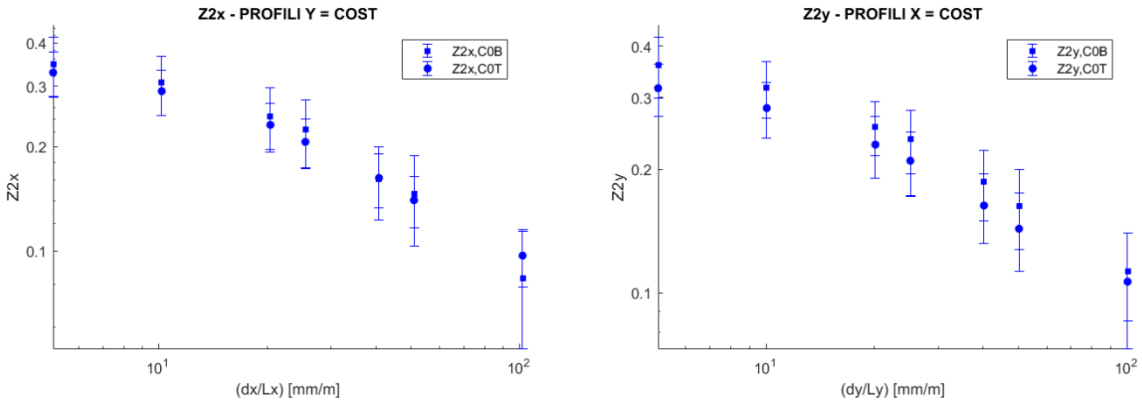


Figura 9.5 Provino G1 TOP e BOTTOM: Z_{2x} (profili y=cost) ed Z_{2y} (profili x = cost).

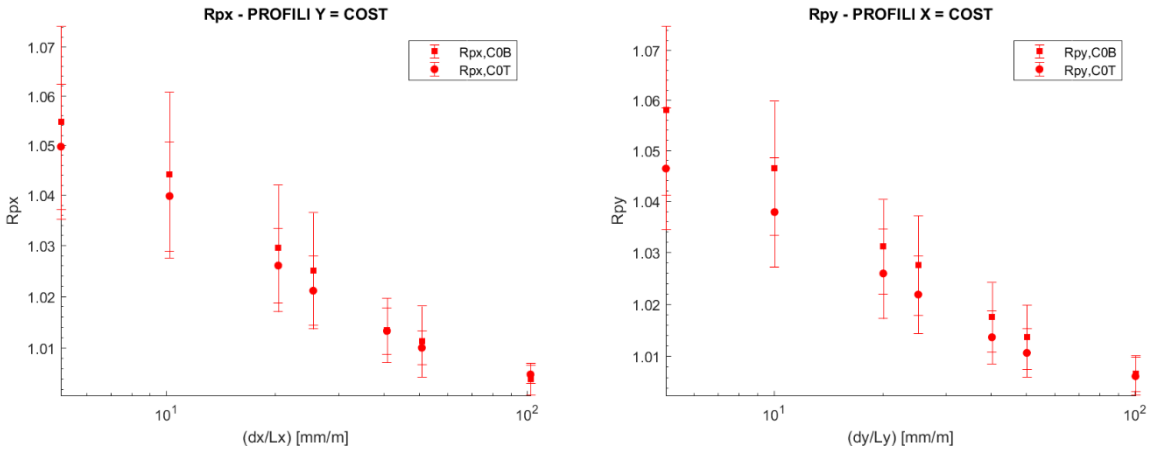


Figura 9.6 Provino G1 TOP e BOTTOM: Rpx (profili y=cost) ed Rpy (profili x = cost).

Tabella 9.1 Provino G1 TOP: riepilogo dello studio statistico dei parametri di scabrezza Z_2 ed Rp per i diversi intervalli di campionamento.

PROVINO G1 TOP [0,05 m x 0,05 m]							
X_passo_norm [mm/m]	**101**	**50**	**40**	**25**	**20**	**10**	**5**
Z2X mean	0,097	0,140	0,162	0,206	0,231	0,290	0,328
Z2X min	0,051	0,087	0,109	0,138	0,160	0,201	0,219
Z2X max	0,142	0,211	0,247	0,300	0,328	0,415	0,479
Z2X Standard Deviation	0,019	0,024	0,029	0,034	0,035	0,044	0,048
RPX mean	1,005	1,010	1,013	1,021	1,026	1,040	1,050
RPX min	1,001	1,004	1,006	1,009	1,013	1,020	1,023
RPX max	1,010	1,022	1,028	1,042	1,048	1,073	1,085
RPX Standard Deviation	0,002	0,003	0,005	0,007	0,007	0,011	0,013
Y_passo_norm [mm/m]	**101**	**50**	**40**	**25**	**20**	**10**	**5**
Z2Y mean	0,107	0,144	0,164	0,210	0,230	0,282	0,316
Z2Y min	0,033	0,079	0,095	0,122	0,149	0,166	0,176
Z2Y max	0,218	0,265	0,265	0,374	0,378	0,452	0,507
Z2Y Standard Deviation	0,033	0,031	0,031	0,037	0,040	0,044	0,046
RPY mean	1,006	1,011	1,014	1,022	1,026	1,038	1,046
RPY min	1,001	1,003	1,005	1,007	1,011	1,014	1,015
RPY max	1,023	1,033	1,034	1,060	1,062	1,082	1,100
RPY Standard Deviation	0,004	0,005	0,005	0,007	0,009	0,011	0,012

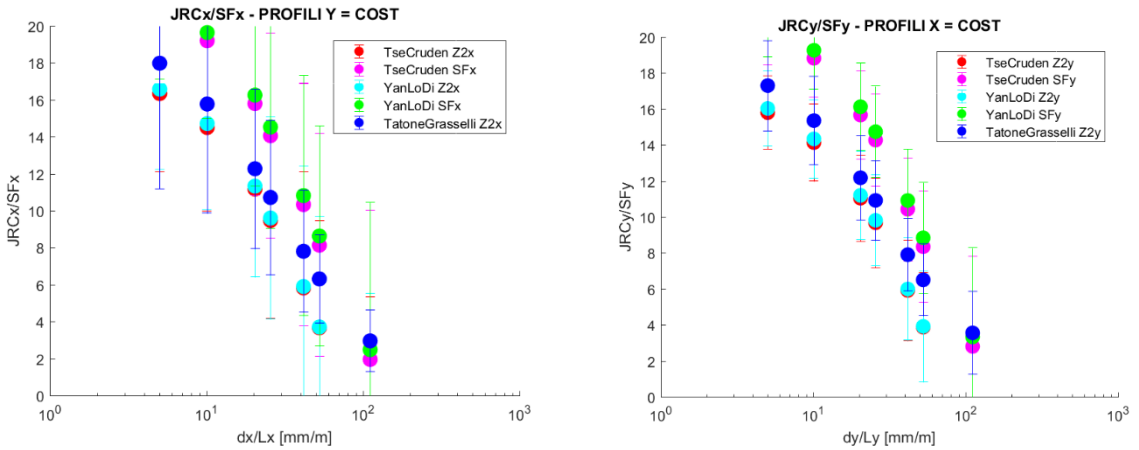


Figura 9.7 Provino G1 TOP: JRC stimato sui profili estratti lungo x ed y.

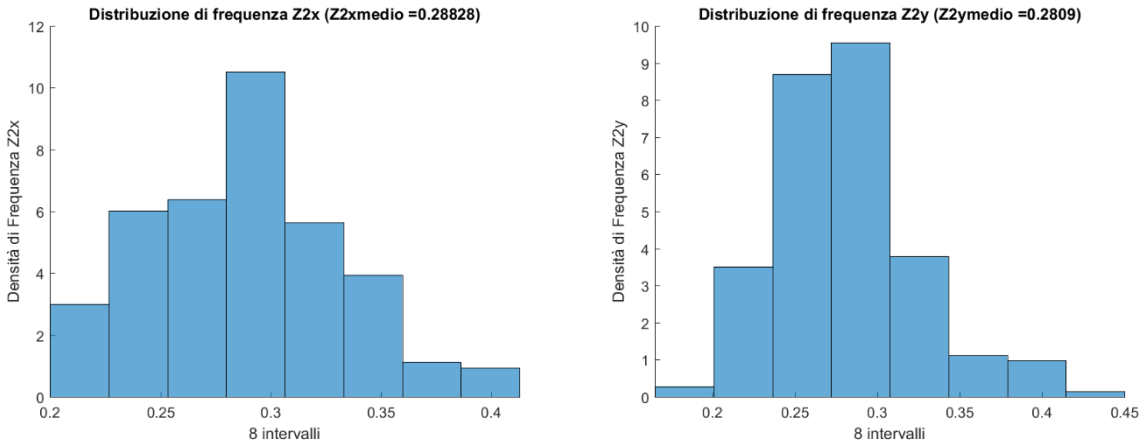


Figura 9.8 Provino G1-TOP: distribuzione di frequenza per i parametri Z_{2x} e Z_{2y}.

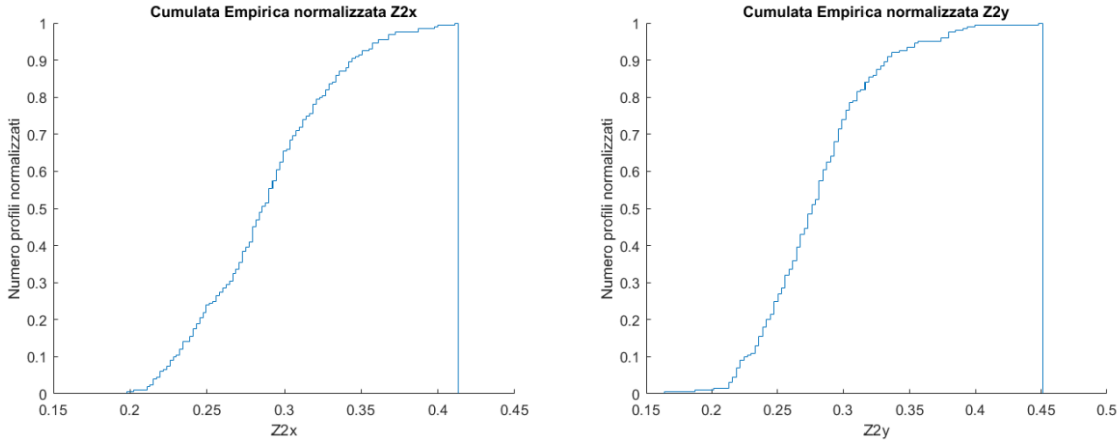


Figura 9.9 Provino G1-TOP: frequenza cumulata per i parametri Z_{2x} e Z_{2y}.

Tabella 9.2 Provino G1 BOTTOM: riepilogo dello studio statistico dei parametri di scabrezza Z_2 ed Rp per i diversi intervalli di campionamento.

PROVINO G1 BOTTOM [0,05 m x 0,05 m]							
X_passo_norm [mm/m]	**101**	**50**	**40**	**25**	**20**	**10**	**5**
Z2X mean	0,083	0,146	0,161	0,224	0,245	0,306	0,348
Z2X min	0,000	0,069	0,078	0,121	0,131	0,187	0,213
Z2X max	0,189	0,282	0,256	0,407	0,449	0,544	0,590
Z2X Standard Deviation	0,031	0,042	0,038	0,050	0,052	0,060	0,069
RPX mean	1,004	1,011	1,013	1,025	1,030	1,044	1,055
RPX min	1,000	1,002	1,003	1,007	1,008	1,017	1,022
RPX max	1,017	1,038	1,032	1,075	1,086	1,121	1,134
RPX Standard Deviation	0,003	0,007	0,006	0,011	0,013	0,017	0,020
Y_passo_norm [mm/m]	**101**	**50**	**40**	**25**	**20**	**10**	**5**
Z2Y mean	0,113	0,164	0,186	0,237	0,254	0,317	0,360
Z2Y min	0,069	0,103	0,114	0,173	0,194	0,224	0,239
Z2Y max	0,209	0,291	0,279	0,390	0,411	0,546	0,619
Z2Y Standard Deviation	0,027	0,036	0,036	0,042	0,038	0,050	0,062
RPY mean	1,007	1,014	1,018	1,028	1,031	1,047	1,058
RPY min	1,002	1,005	1,007	1,015	1,018	1,024	1,027
RPY max	1,021	1,039	1,037	1,067	1,075	1,118	1,139
RPY Standard Deviation	0,003	0,006	0,007	0,010	0,009	0,013	0,017

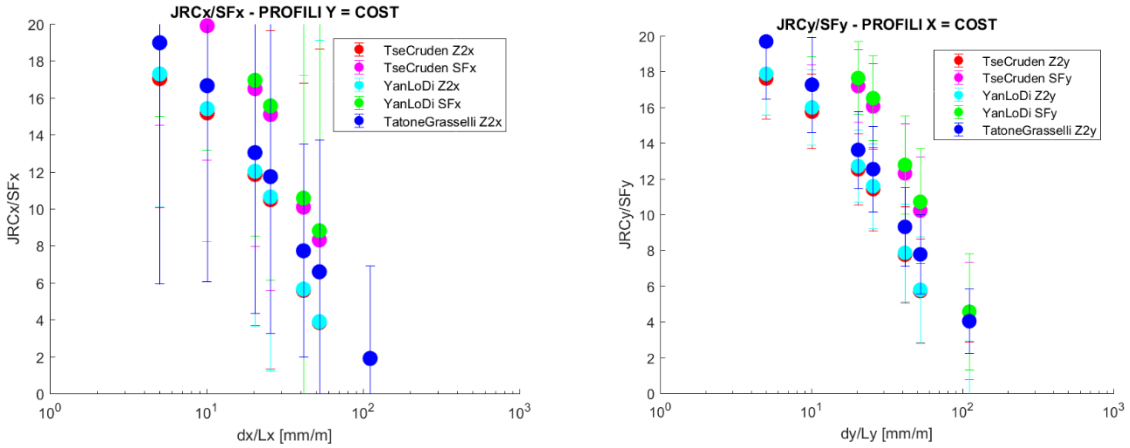


Figura 9.10 Provino G1 BOTTOM: JRC stimato sui profili estratti lungo x ed y.

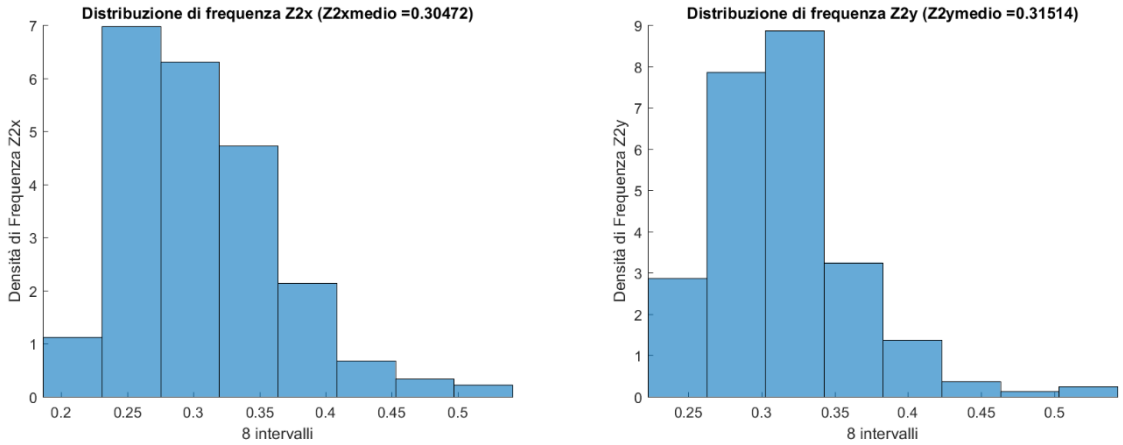


Figura 9.11 Provino G1-BOTTOM: distribuzione di frequenza per i parametri Z_{2x} e Z_{2y}.

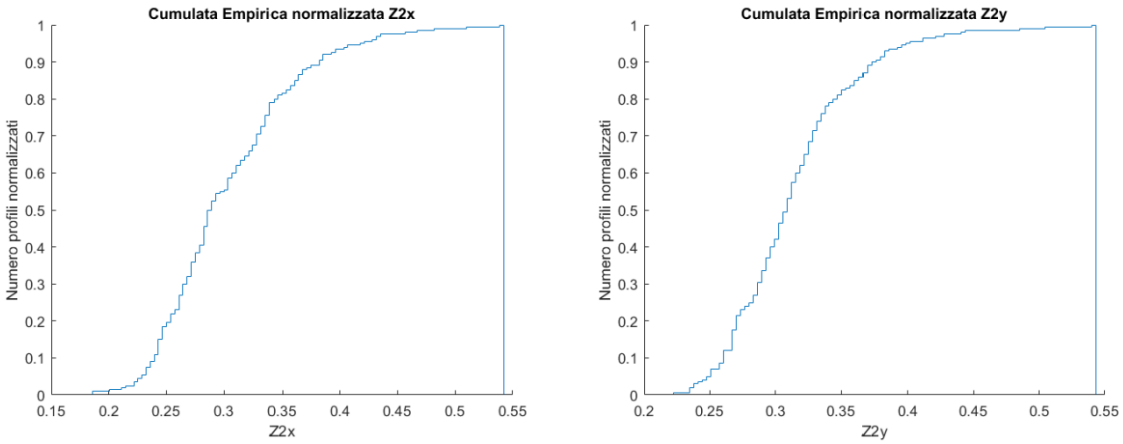


Figura 9.12 Provino G1-BOTTOM: frequenza cumulata per i parametri Z_{2x} e Z_{2y}.

9.1.2. Scheda provino GS2 top/bottom

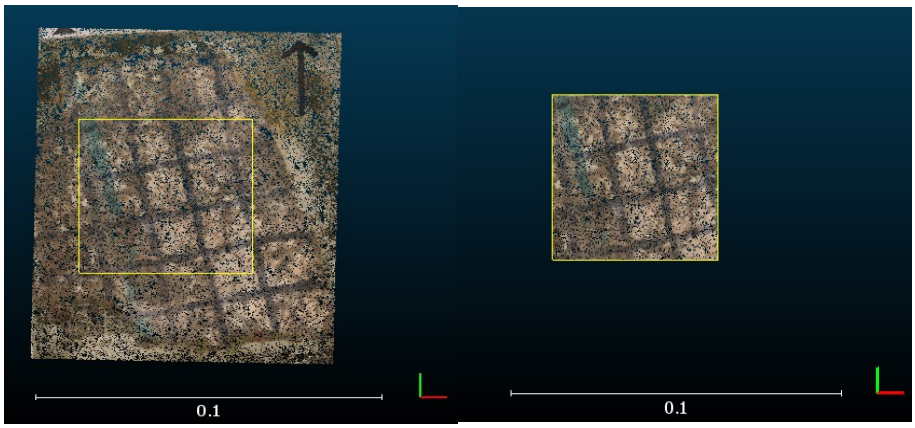


Figura 9.13 G2 TOP C0: DSM e ritaglio 50 mm x 50 mm.

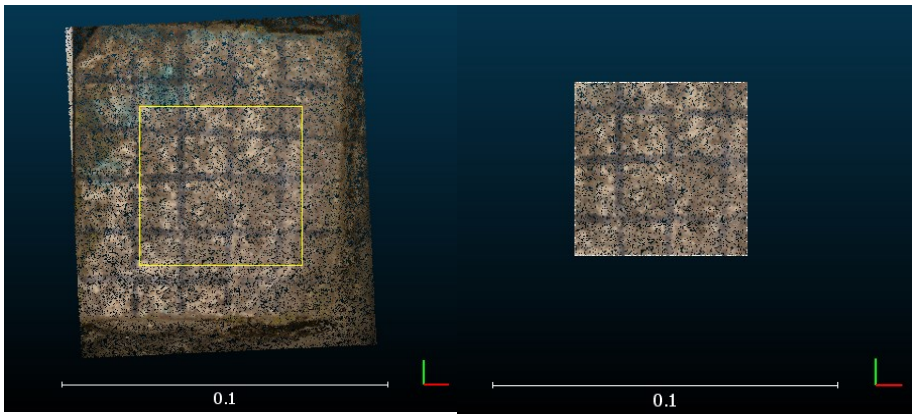


Figura 9.14 G2 BOTTOM C0: DSM e ritaglio 50 mm x 50 mm.

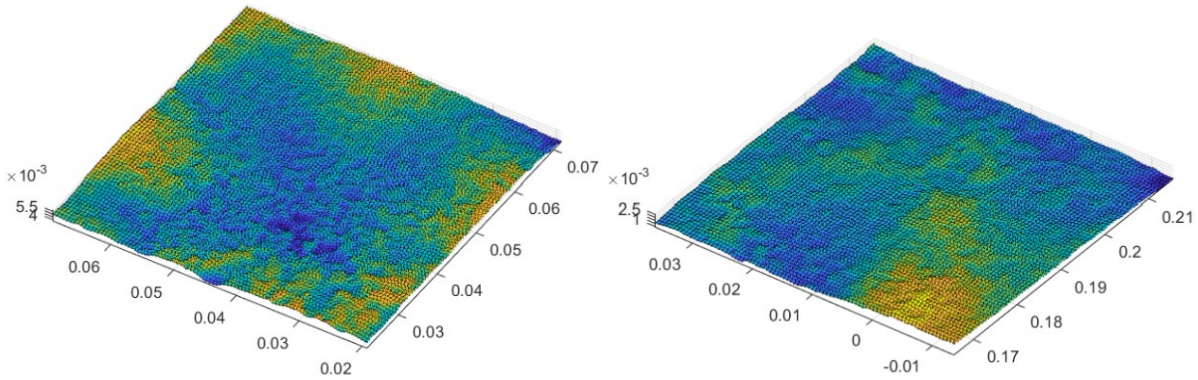


Figura 9.15 GS2 Top/Bottom: DSM dopo la rotazione del piano che approssima la superficie sul piano orizzontale.

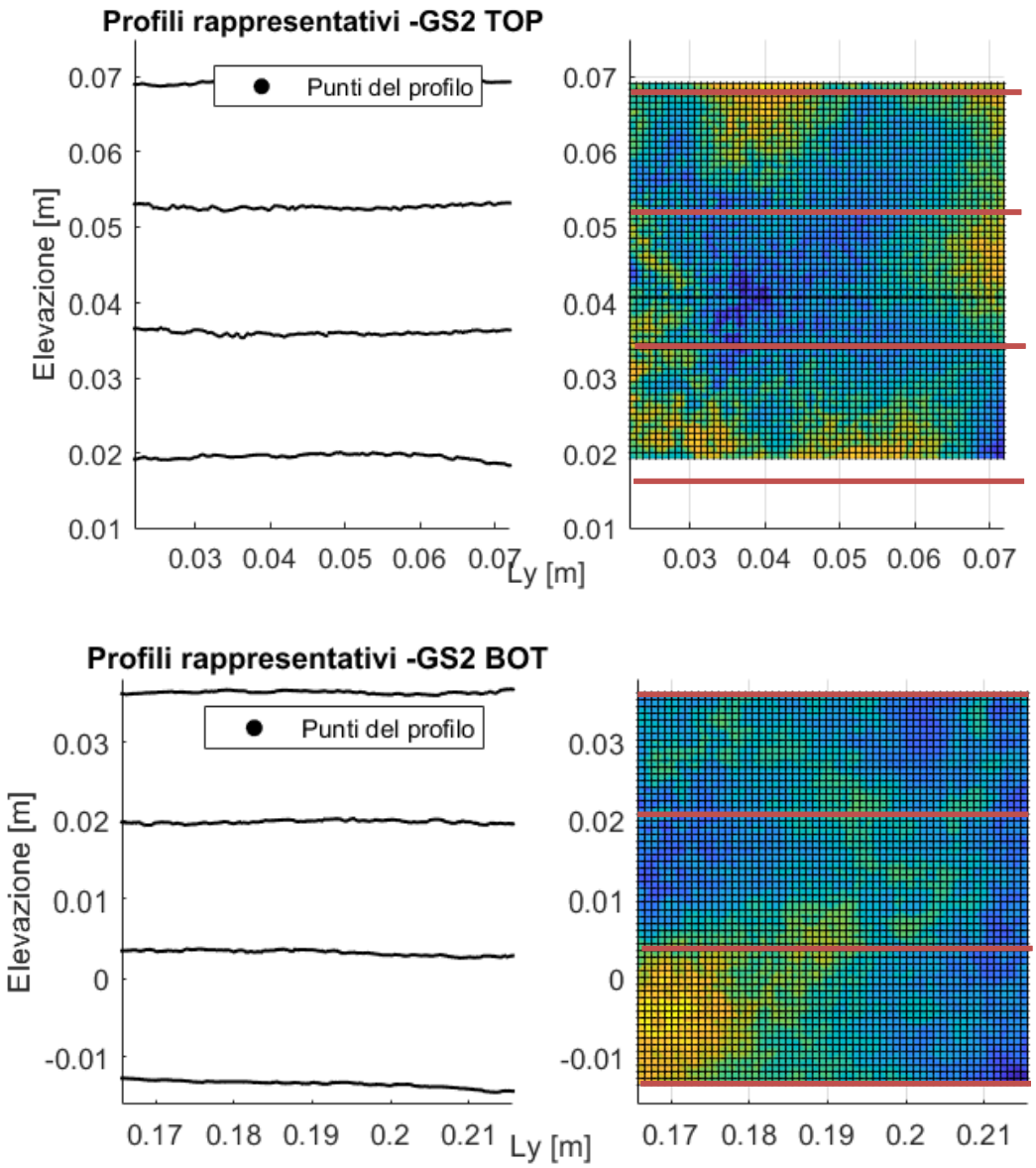


Figura 9.16 GS2 Top/Bottom, analisi della superficie dell'elemento: estrazione di quattro profili orizzontali.

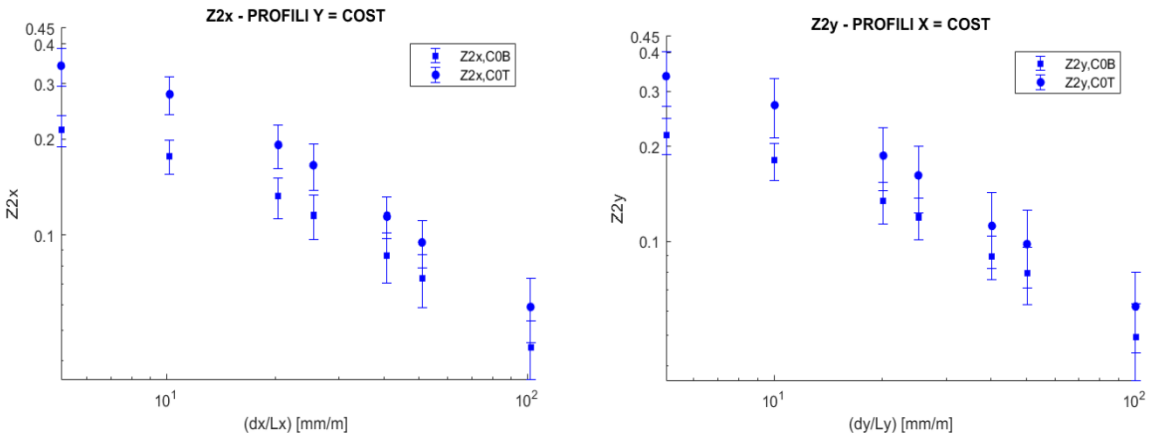


Figura 9.17 Provino G2 TOP e BOTTOM: Z_{2x} (profili y=cost) ed Z_{2y} (profili x = cost).

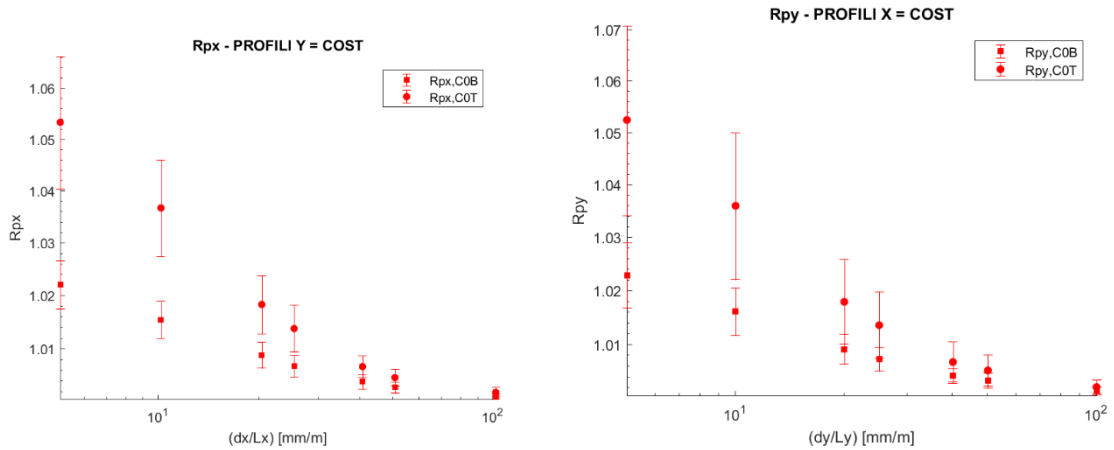


Figura 9.18 Provino G2 TOP e BOTTOM: Rpx (profili y=cost) ed Rpy (profili x = cost).

Tabella 9.3 Provino G2 TOP: riepilogo dello studio statistico dei parametri di scabrezza Z_2 ed Rp per i diversi intervalli di campionamento.

PROVINO G2 TOP [0,05 m x 0,05 m]							
X_passo_norm [mm/m]	**101**	**50**	**40**	**25**	**20**	**10**	**5**
Z2X mean	0,059	0,095	0,115	0,165	0,192	0,278	0,342
Z2X min	0,030	0,056	0,074	0,093	0,113	0,179	0,223
Z2X max	0,116	0,148	0,169	0,237	0,266	0,364	0,441
Z2X Standard Deviation	0,014	0,016	0,017	0,028	0,030	0,038	0,047
RPX mean	1,002	1,005	1,007	1,014	1,018	1,037	1,053
RPX min	1,001	1,002	1,003	1,004	1,006	1,016	1,024
RPX max	1,007	1,011	1,014	1,027	1,034	1,059	1,083
RPX Standard Deviation	0,001	0,002	0,002	0,004	0,006	0,009	0,013
Y_passo_norm [mm/m]	**101**	**50**	**40**	**25**	**20**	**10**	**5**
Z2Y mean	0,062	0,098	0,112	0,162	0,187	0,271	0,336
Z2Y min	0,032	0,048	0,060	0,093	0,107	0,140	0,162
Z2Y max	0,119	0,160	0,216	0,264	0,312	0,399	0,483
Z2Y Standard Deviation	0,018	0,027	0,030	0,039	0,043	0,058	0,067
RPY mean	1,002	1,005	1,007	1,014	1,018	1,036	1,052
RPY min	1,001	1,001	1,002	1,004	1,006	1,010	1,013
RPY max	1,007	1,013	1,023	1,033	1,046	1,071	1,100
RPY Standard Deviation	0,001	0,003	0,004	0,006	0,008	0,014	0,018

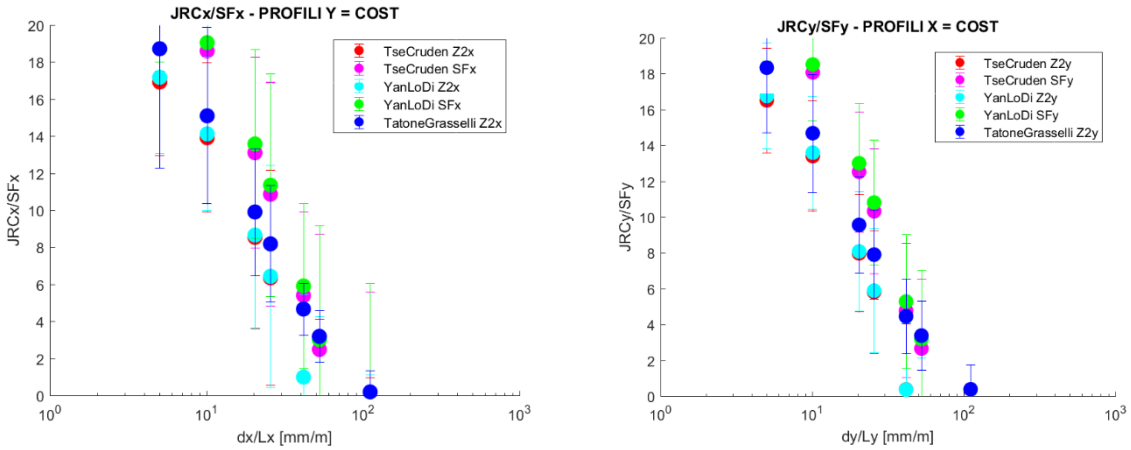


Figura 9.19 Provino G2 TOP: JRC stimato sui profili estratti lungo x ed y.

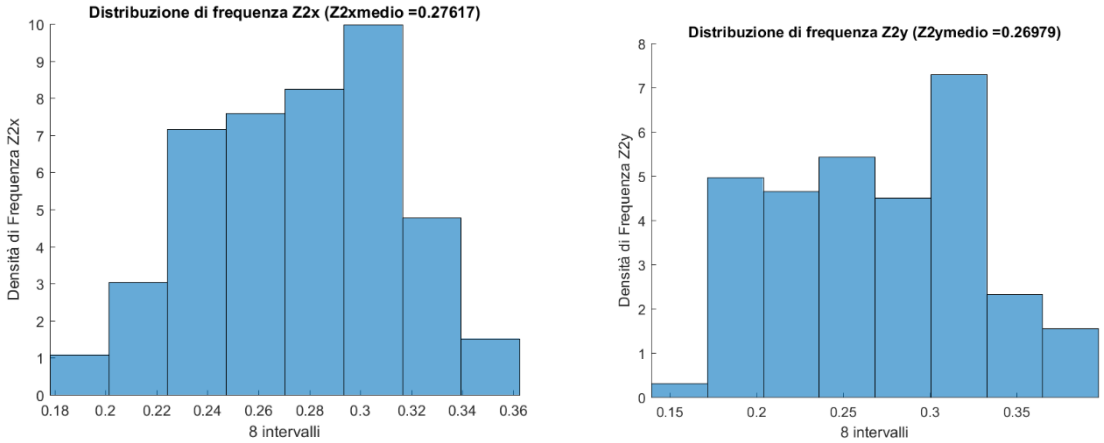


Figura 9.20 Provino G2-TOP: distribuzione di frequenza per i parametri Z_{2x} e Z_{2y}.

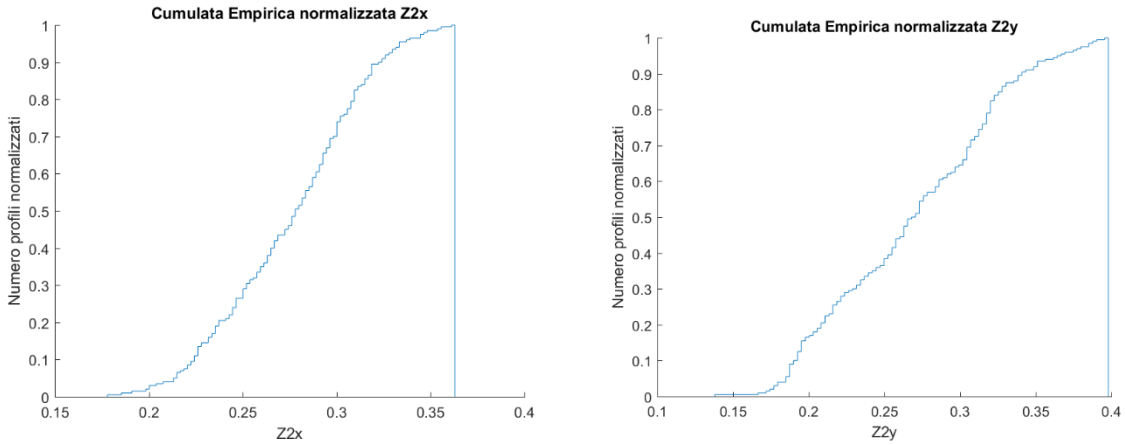


Figura 9.21 Provino G2-TOP: frequenza cumulata per i parametri Z_{2x} e Z_{2y}.

Tabella 9.4 Provino G2 BOTTOM: riepilogo dello studio statistico dei parametri di scabrezza Z_2 ed Rp per i diversi intervalli di campionamento.

PROVINO G2 BOTTOM [0,05 m x 0,05 m]							
X_passo_norm [mm/m]	**101**	**50**	**40**	**25**	**20**	**10**	**5**
Z2X mean	0,044	0,073	0,086	0,115	0,132	0,177	0,214
Z2X min	0,015	0,046	0,053	0,072	0,085	0,107	0,123
Z2X max	0,069	0,106	0,130	0,153	0,178	0,230	0,271
Z2X Standard Deviation	0,009	0,014	0,016	0,018	0,019	0,022	0,024
RPX mean	1,001	1,003	1,004	1,007	1,009	1,015	1,022
RPX min	1,000	1,001	1,001	1,003	1,004	1,006	1,007
RPX max	1,002	1,006	1,008	1,011	1,015	1,025	1,034
RPX Standard Deviation	0,000	0,001	0,001	0,002	0,002	0,003	0,005
Y_passo_norm [mm/m]	**101**	**50**	**40**	**25**	**20**	**10**	**5**
Z2Y mean	0,050	0,079	0,090	0,119	0,134	0,180	0,217
Z2Y min	0,028	0,048	0,060	0,085	0,096	0,137	0,162
Z2Y max	0,088	0,137	0,126	0,181	0,189	0,263	0,303
Z2Y Standard Deviation	0,014	0,017	0,014	0,018	0,020	0,024	0,029
RPY mean	1,001	1,003	1,004	1,007	1,009	1,016	1,023
RPY min	1,000	1,001	1,002	1,004	1,005	1,009	1,013
RPY max	1,004	1,009	1,008	1,016	1,018	1,033	1,042
RPY Standard Deviation	0,001	0,001	0,001	0,002	0,003	0,004	0,006

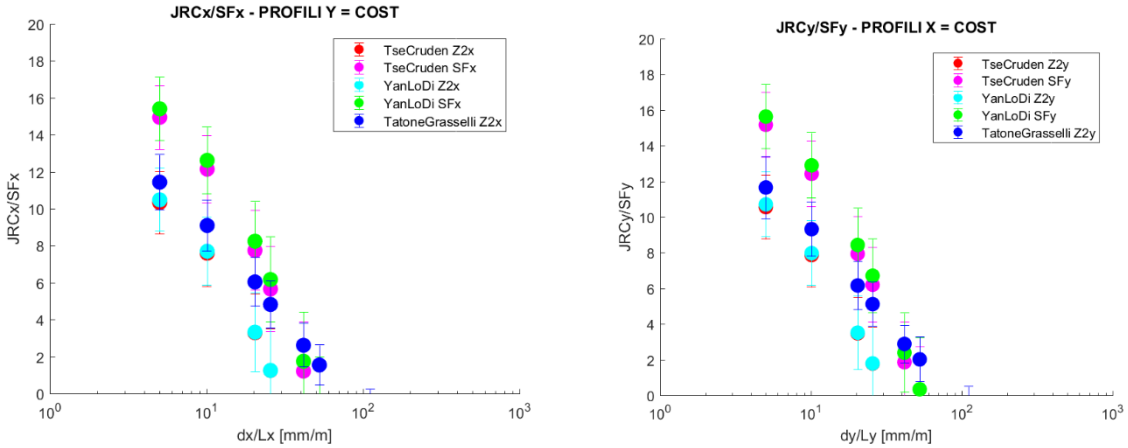


Figura 9.22 Provino G2 BOTTOM: JRC stimato sui profili estratti lungo x ed y.

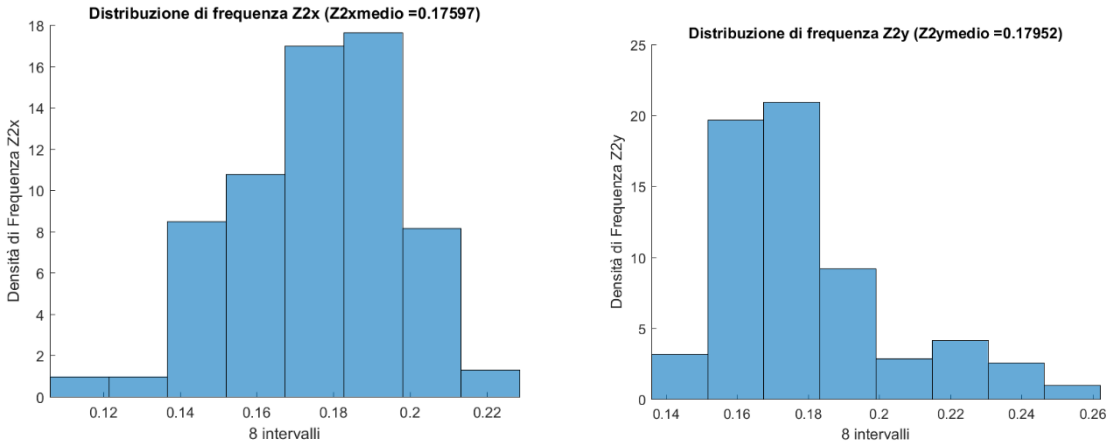


Figura 9.23 Provino G2-BOTTOM: distribuzione di frequenza per i parametri Z_{2x} e Z_{2y}.

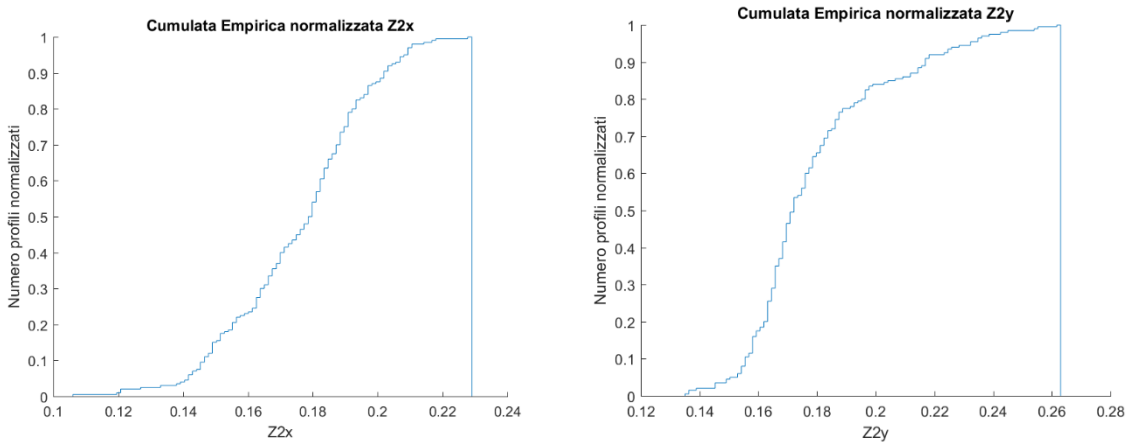


Figura 9.24 Provino G2-BOTTOM: frequenza cumulata per i parametri Z_{2x} e Z_{2y}.

9.1.3. Scheda provino GS3 top/bottom

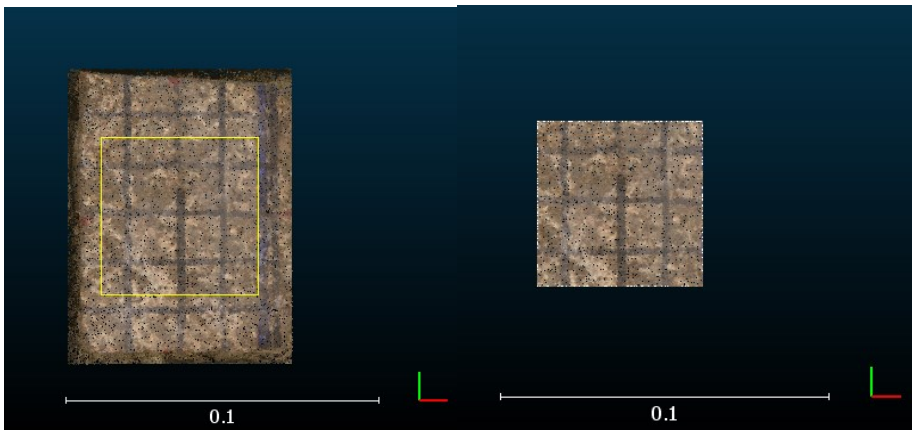


Figura 9.25 G3 TOP C0: DSM e ritaglio 50 mm x 50 mm.

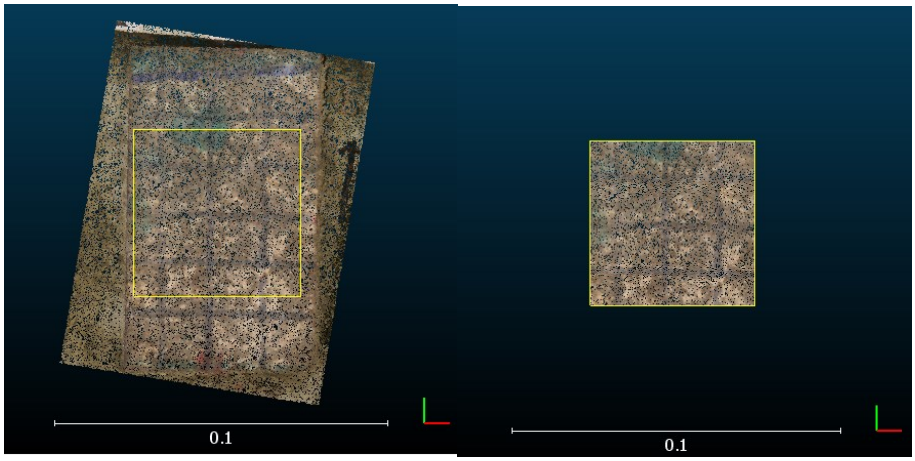


Figura 9.26 G3 BOTTOM C0: DSM e ritaglio 50 mm x 50 mm.

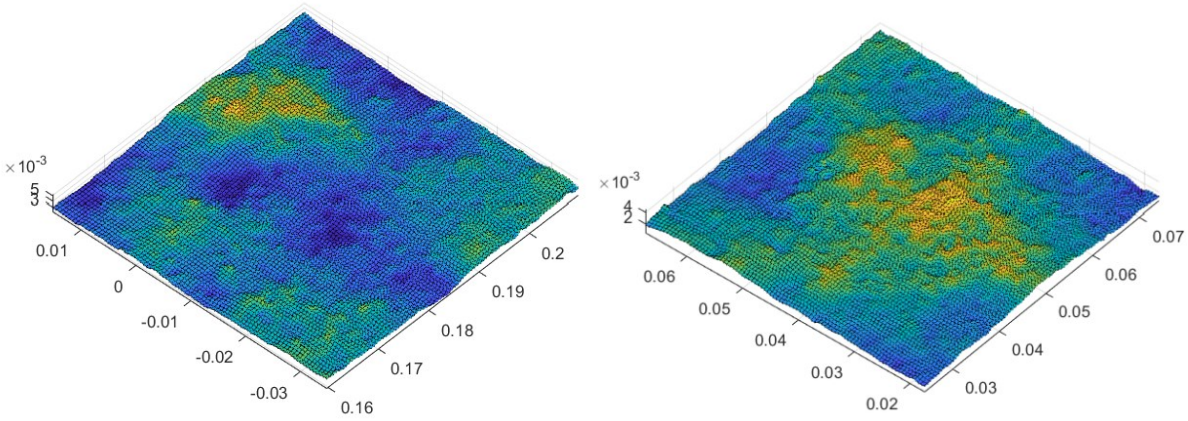


Figura 9.27 GS3 Top/Bottom: DSM dopo la rotazione del piano che approssima la superficie sul piano orizzontale.

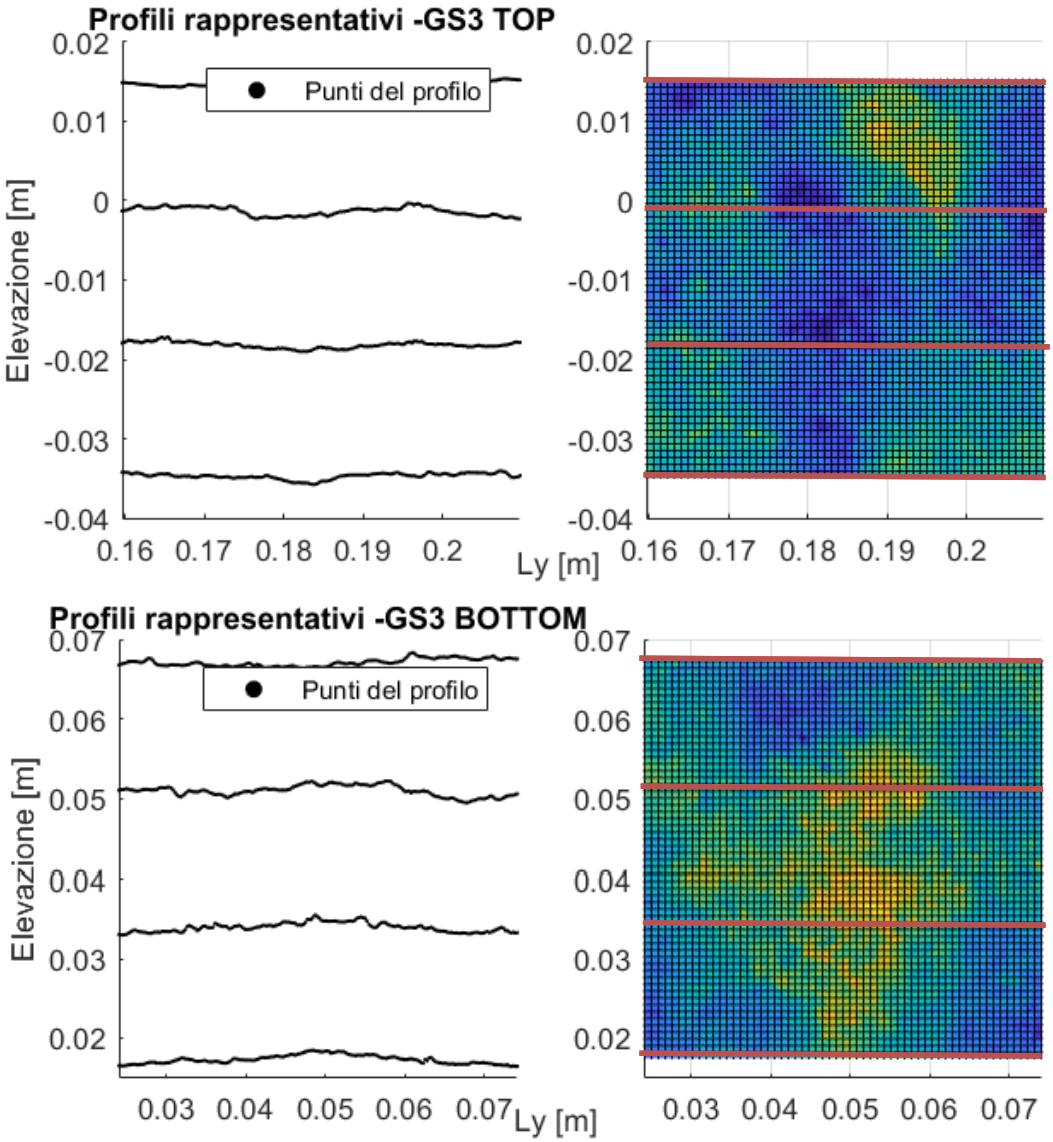


Figura 9.28 GS3 Top/Bottom, analisi della superficie dell'elemento: estrazione di quattro profili orizzontali.

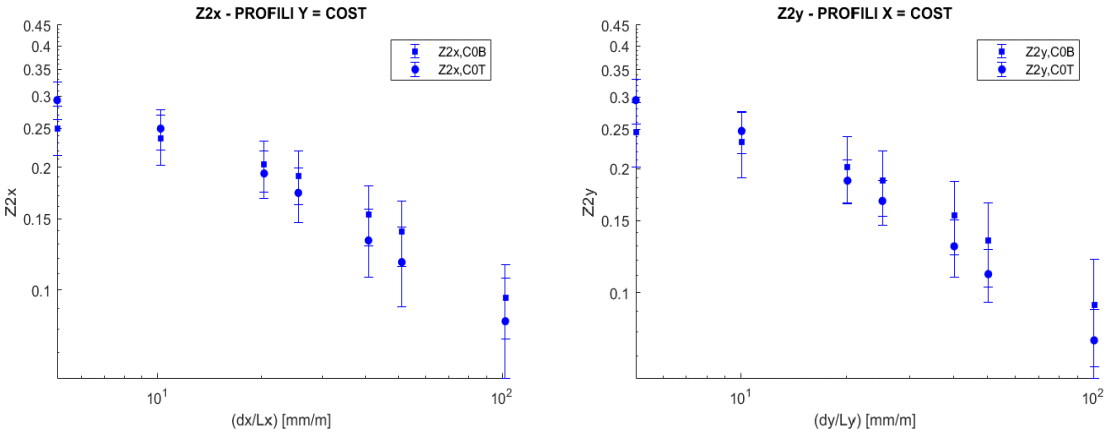


Figura 9.29 Provino G3 TOP e BOTTOM: Z_{2x} (profili y=cost) ed Z_{2y} (profili x = cost).

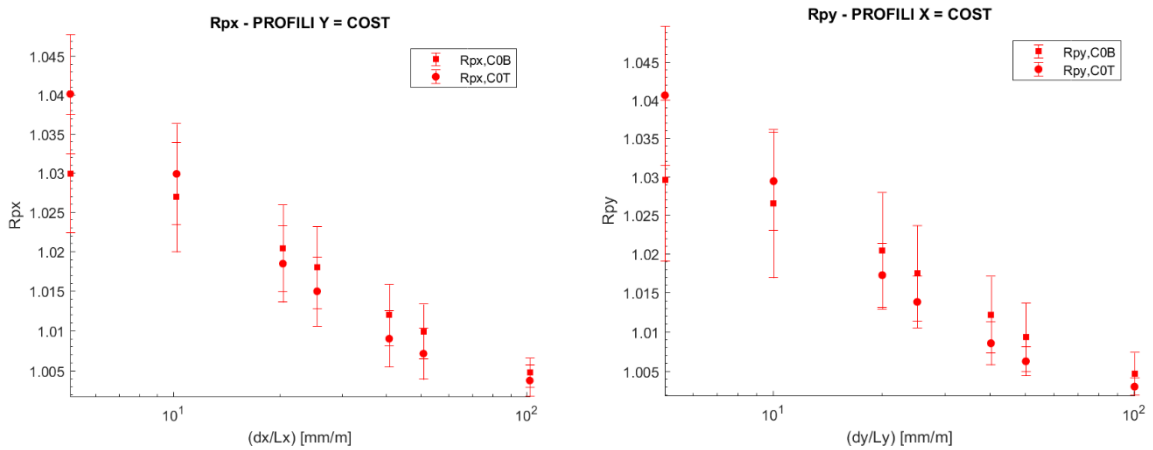


Figura 9.30 Provino G3 TOP e BOTTOM: Rpx (profili y=cost) ed Rpy (profili x = cost).

Tabella 9.5 Provino G3 TOP: riepilogo dello studio statistico dei parametri di scabrezza Z_2 ed Rp per i diversi intervalli di campionamento.

PROVINO G3 TOP [0,05 m x 0,05 m]							
X_passo_norm [mm/m]	**101**	**50**	**40**	**25**	**20**	**10**	**5**
Z2X mean	0,084	0,117	0,133	0,173	0,193	0,250	0,293
Z2X min	0,034	0,054	0,077	0,098	0,126	0,196	0,229
Z2X max	0,137	0,204	0,207	0,250	0,276	0,326	0,390
Z2X Standard Deviation	0,023	0,026	0,025	0,026	0,026	0,028	0,031
RPX mean	1,004	1,007	1,009	1,015	1,018	1,030	1,040
RPX min	1,001	1,002	1,003	1,005	1,008	1,019	1,025
RPX max	1,009	1,020	1,021	1,030	1,035	1,049	1,063
RPX Standard Deviation	0,002	0,003	0,004	0,004	0,005	0,006	0,008
Y_passo_norm [mm/m]	**101**	**50**	**40**	**25**	**20**	**10**	**5**
Z2Y mean	0,076	0,111	0,130	0,167	0,187	0,248	0,295
Z2Y min	0,032	0,076	0,089	0,122	0,140	0,183	0,214
Z2Y max	0,115	0,163	0,195	0,220	0,238	0,400	0,443
Z2Y Standard Deviation	0,015	0,016	0,021	0,021	0,023	0,029	0,037
RPY mean	1,003	1,006	1,009	1,014	1,017	1,029	1,041
RPY min	1,001	1,003	1,004	1,007	1,010	1,016	1,022
RPY max	1,007	1,013	1,019	1,022	1,028	1,060	1,072
RPY Standard Deviation	0,001	0,002	0,003	0,003	0,004	0,006	0,009

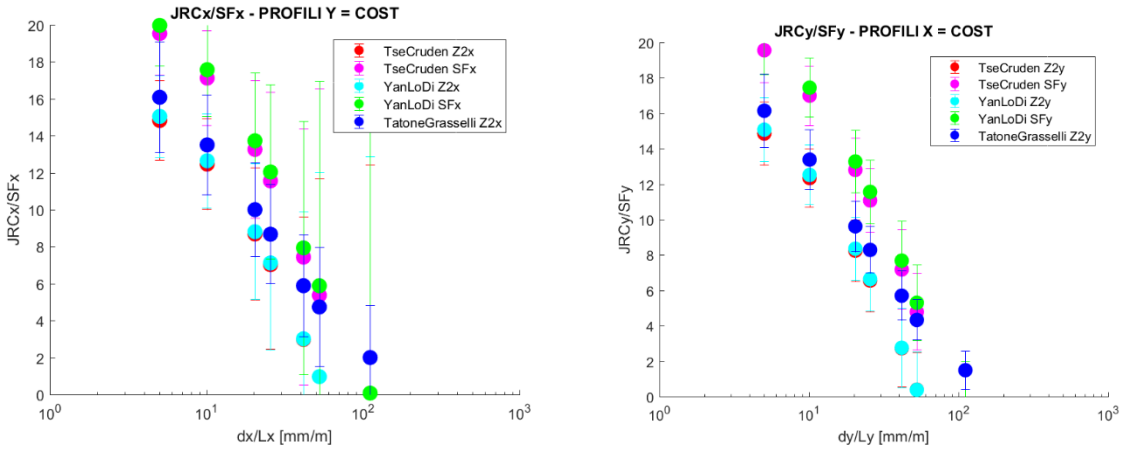


Figura 9.31 Provino G3 TOP: JRC stimato sui profili estratti lungo x ed y.

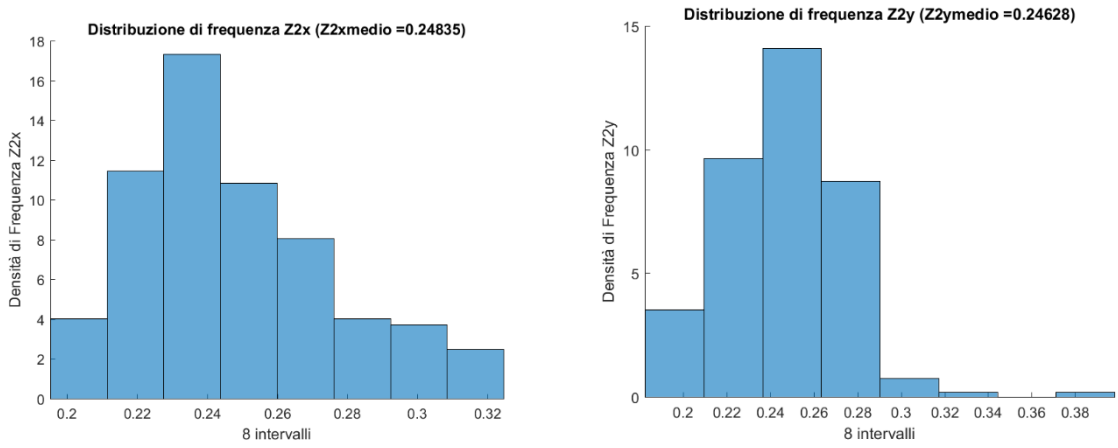


Figura 9.32 Provino G3-TOP: distribuzione di frequenza per i parametri Z_{2x} e Z_{2y}.

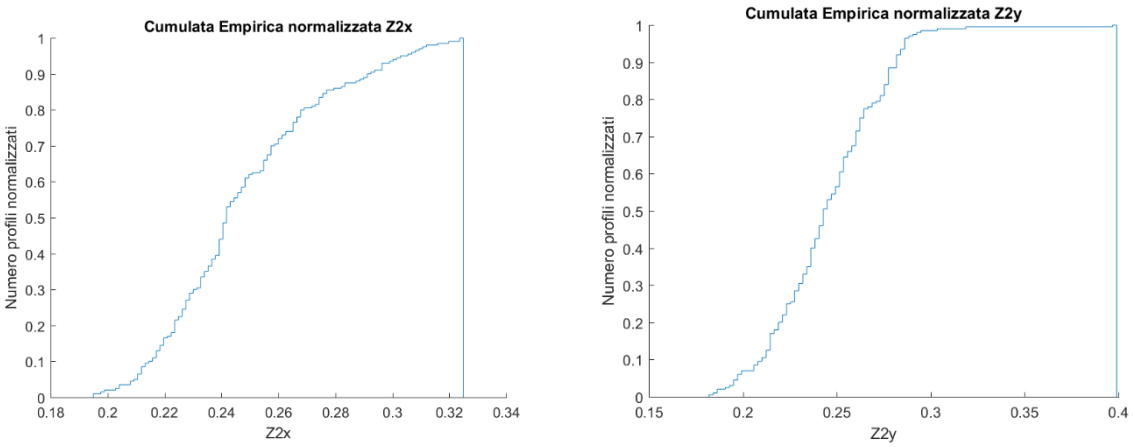


Figura 9.33 Provino G3-TOP: frequenza cumulata per i parametri Z_{2x} e Z_{2y}.

Tabella 9.6 Provino G3 BOTTOM: riepilogo dello studio statistico dei parametri di scabrezza Z_2 ed Rp per i diversi intervalli di campionamento.

PROVINO G3 BOTTOM [0,05 m x 0,05 m]							
X_passo_norm [mm/m]	**101**	**50**	**40**	**25**	**20**	**10**	**5**
Z2X mean	0,096	0,139	0,154	0,191	0,203	0,236	0,249
Z2X min	0,047	0,090	0,097	0,110	0,114	0,127	0,131
Z2X max	0,138	0,203	0,214	0,284	0,263	0,310	0,324
Z2X Standard Deviation	0,020	0,025	0,026	0,029	0,030	0,033	0,035
RPX mean	1,005	1,010	1,012	1,018	1,020	1,027	1,030
RPX min	1,001	1,004	1,005	1,006	1,007	1,008	1,009
RPX max	1,009	1,020	1,022	1,037	1,033	1,044	1,048
RPX Standard Deviation	0,002	0,003	0,004	0,005	0,006	0,007	0,008
Y_passo_norm [mm/m]	**101**	**50**	**40**	**25**	**20**	**10**	**5**
Z2Y mean	0,093	0,134	0,155	0,187	0,202	0,232	0,246
Z2Y min	0,046	0,087	0,098	0,115	0,124	0,135	0,139
Z2Y max	0,159	0,215	0,229	0,263	0,341	0,388	0,407
Z2Y Standard Deviation	0,027	0,031	0,031	0,033	0,037	0,043	0,045
RPY mean	1,005	1,009	1,012	1,018	1,020	1,027	1,030
RPY min	1,001	1,004	1,005	1,007	1,008	1,009	1,010
RPY max	1,013	1,022	1,025	1,034	1,053	1,068	1,074
RPY Standard Deviation	0,003	0,004	0,005	0,006	0,008	0,010	0,010

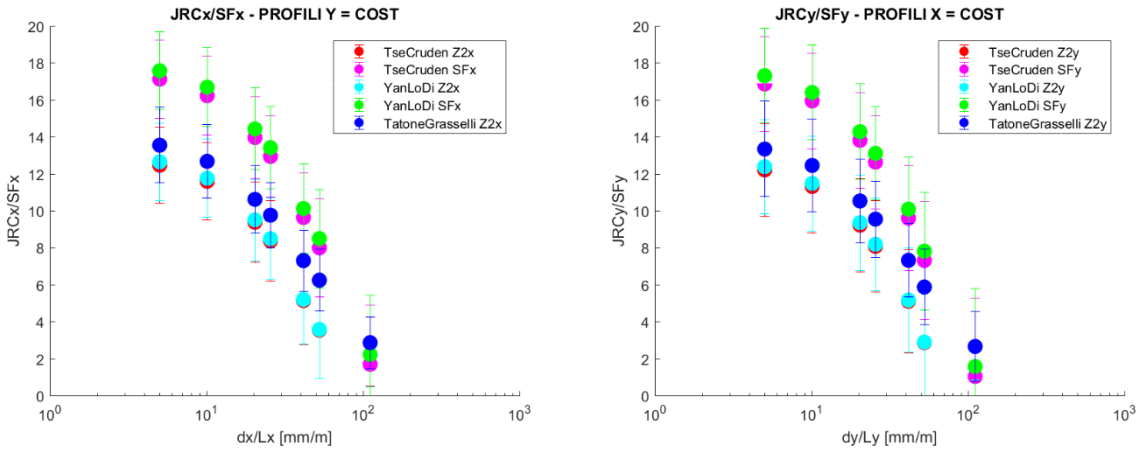


Figura 9.34 Provino G3 BOTTOM: JRC stimato sui profili estratti lungo x ed y.

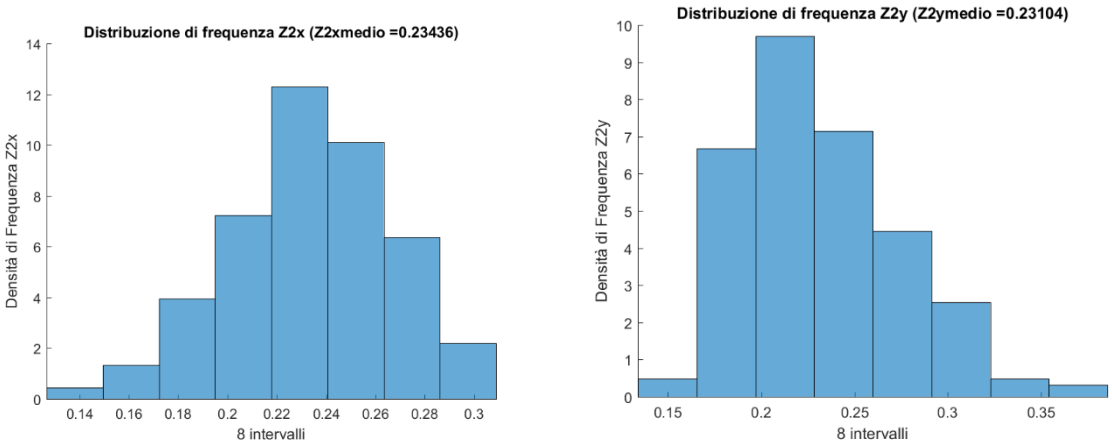


Figura 9.35 Provino G3-BOTTOM: distribuzione di frequenza per i parametri Z_{2x} e Z_{2y}.

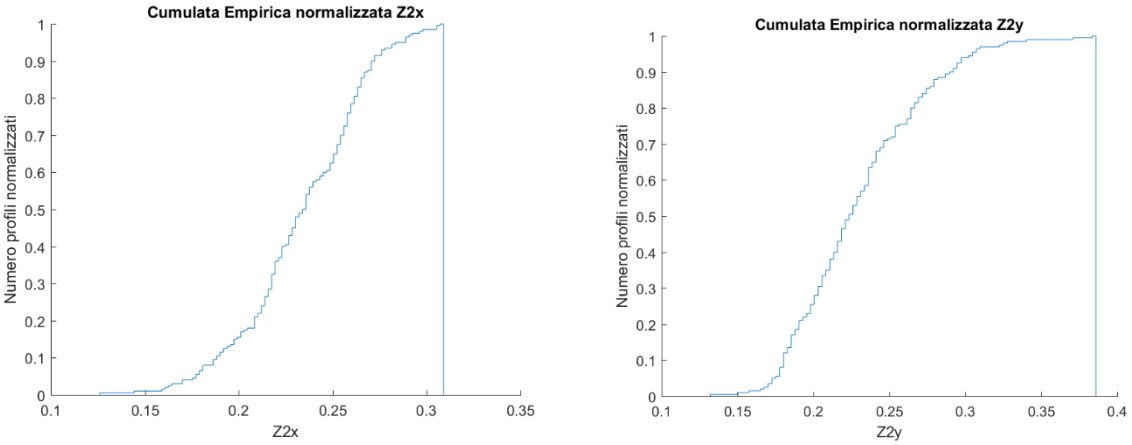
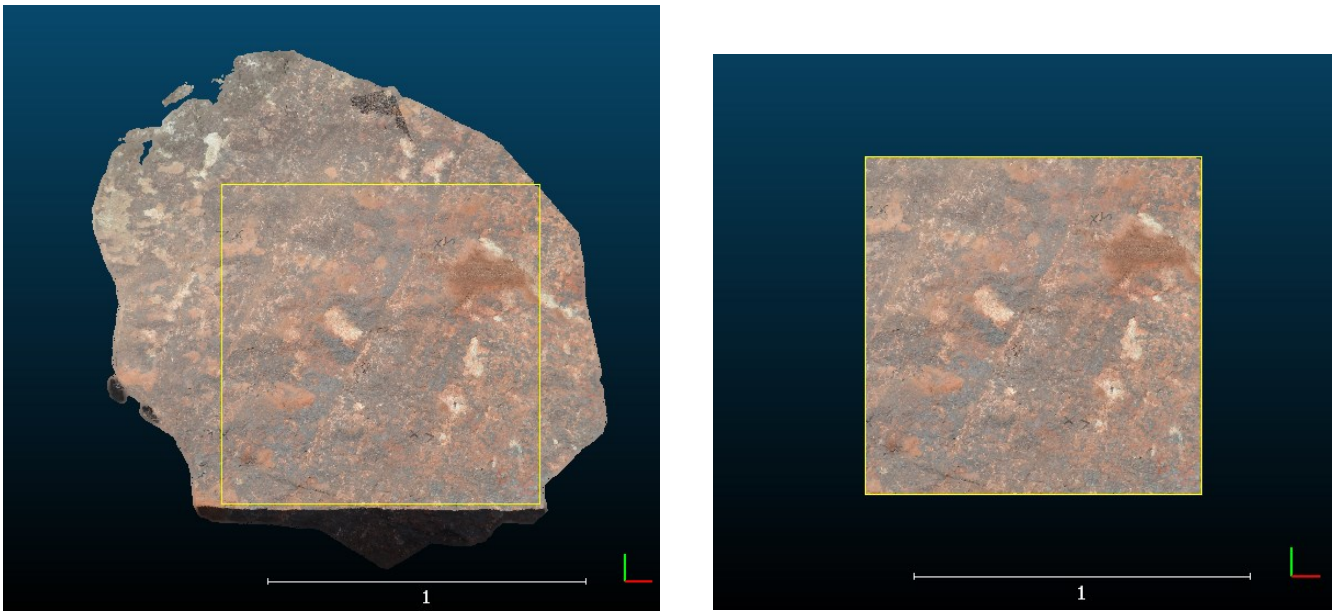


Figura 9.36 Provino G3-BOTTOM: frequenza cumulata per i parametri Z_{2x} e Z_{2y}.

9.1.4. Scheda – blocco 1 – 1m x 1m



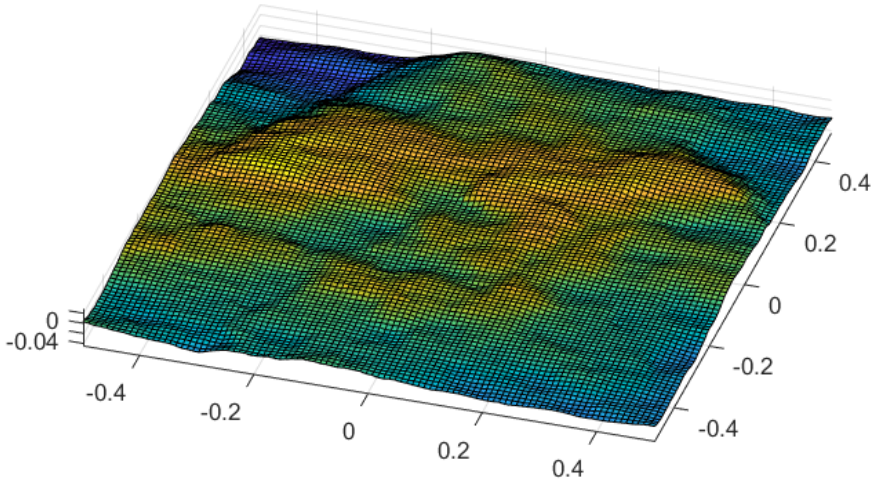


Figura 9.37 Blocco1: DSM dopo la rotazione del piano che approssima la superficie sul piano orizzontale.

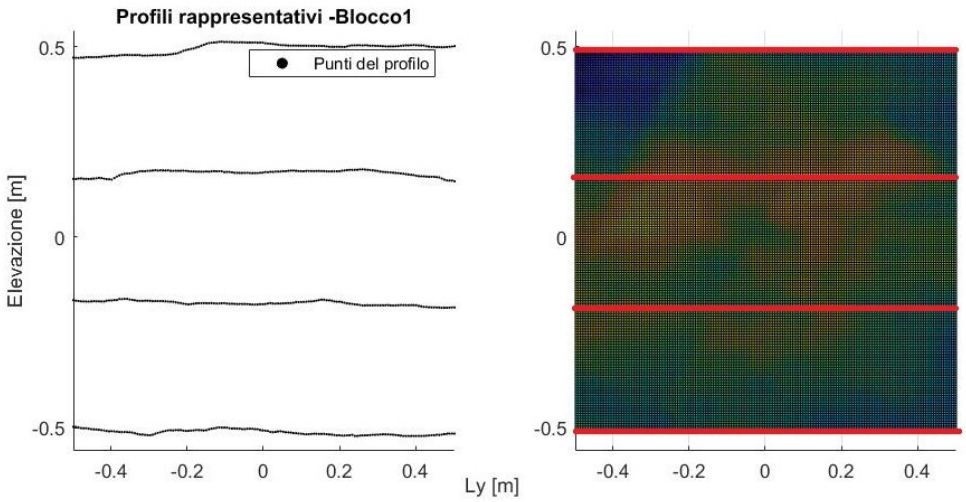


Figura 9.38 Blocco1, analisi della superficie dell'elemento: estrazione di quattro profili orizzontali.

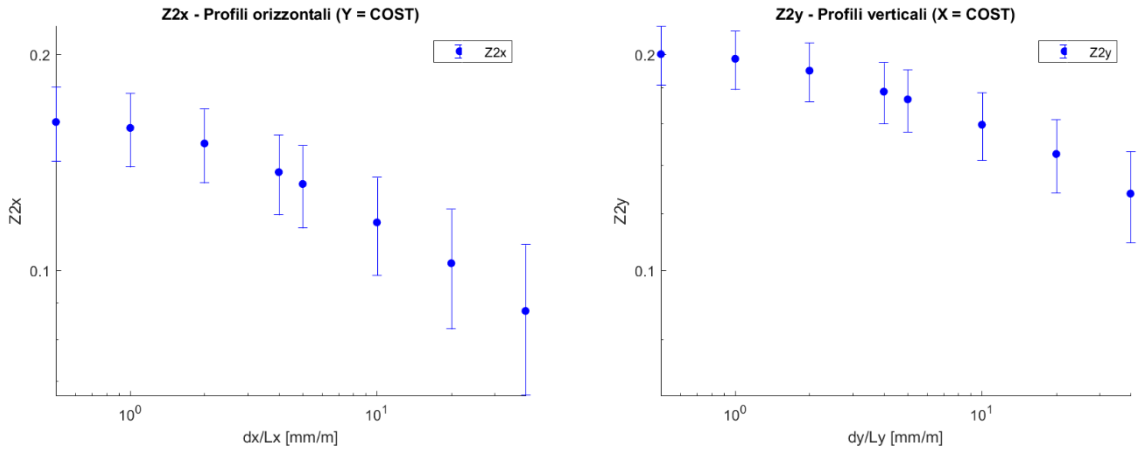


Figura 9.39 Blocco 1: Z_{2x} (profili y=cost) ed Z_{2y} (profili x = cost).

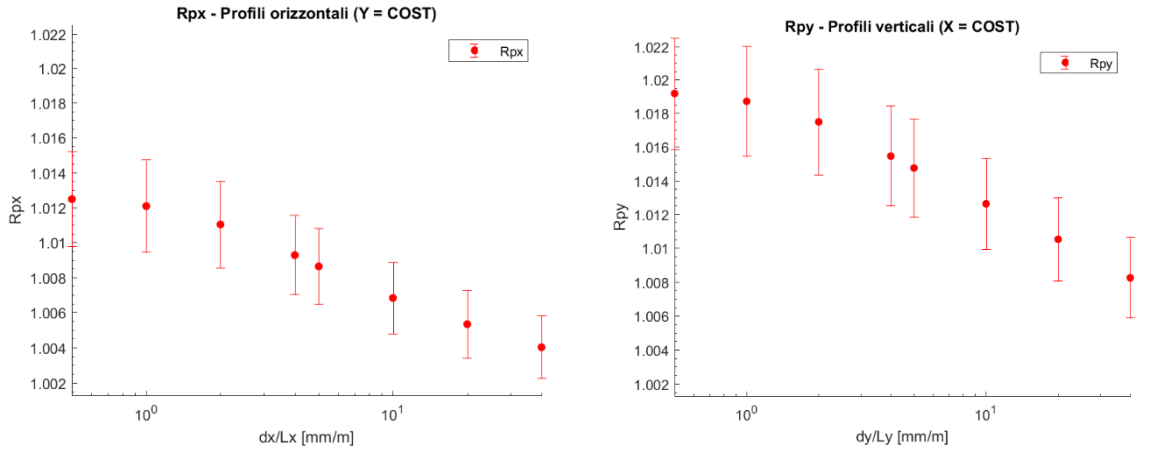


Figura 9.40 Blocco 1: Rpx (profili y=cost) ed Rpy (profili x = cost).

Tabella 9.7 Blocco 1: riepilogo dello studio statistico dei parametri di scabrezza Z_2 ed Rp per i diversi intervalli di campionamento.

Blocco 1								
X_passo_norm [mm/m]	**40**	**20**	**10**	**5**	**4**	**2**	**1**	**0,5**
Z2X mean	0,088	0,102	0,117	0,132	0,137	0,150	0,158	0,161
Z2X min	0,044	0,062	0,076	0,091	0,096	0,111	0,120	0,123
Z2X max	0,131	0,142	0,156	0,172	0,180	0,199	0,211	0,227
Z2X Standard Deviation	0,021	0,019	0,018	0,017	0,018	0,018	0,019	0,019
RPX mean	1,004	1,005	1,007	1,009	1,009	1,011	1,012	1,013
RPX min	1,001	1,002	1,003	1,004	1,005	1,006	1,007	1,007
RPX max	1,008	1,010	1,012	1,014	1,016	1,019	1,020	1,021
RPX Standard Deviation	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,003	0,003
Y_passo_norm [mm/m]	**40**	**20**	**10**	**5**	**4**	**2**	**1**	**0,5**
Z2Y mean	0,128	0,145	0,160	0,173	0,177	0,190	0,197	0,200
Z2Y min	0,093	0,116	0,129	0,143	0,146	0,156	0,163	0,165
Z2Y max	0,172	0,185	0,201	0,218	0,221	0,238	0,253	0,259
Z2Y Standard Deviation	0,019	0,017	0,017	0,017	0,017	0,018	0,019	0,019
RPY mean	1,008	1,011	1,013	1,015	1,015	1,018	1,019	1,019
RPY min	1,004	1,007	1,008	1,010	1,011	1,012	1,013	1,013
RPY max	1,015	1,017	1,020	1,023	1,023	1,026	1,028	1,029
RPY Standard Deviation	0,002	0,002	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003

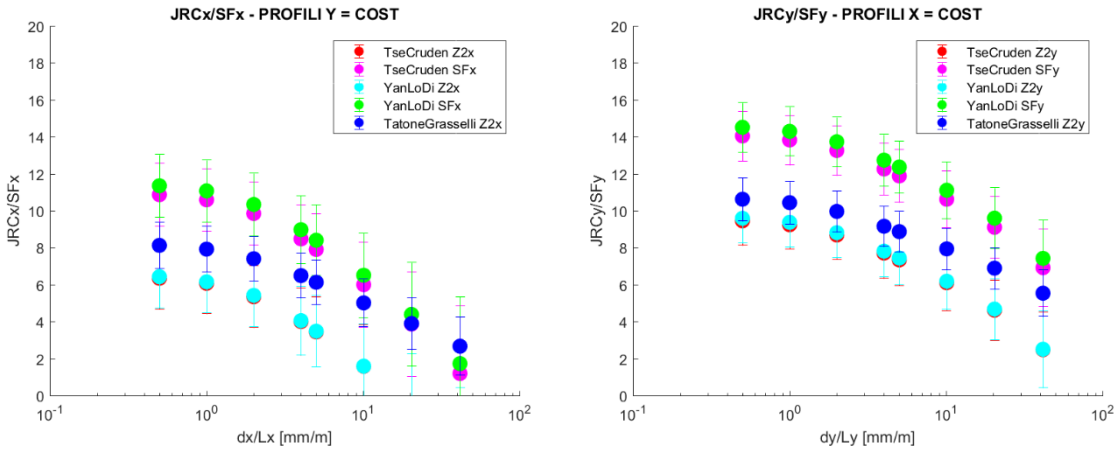


Figura 9.41 Figura 5.40 Blocco 1: JRC lungo x ed y.

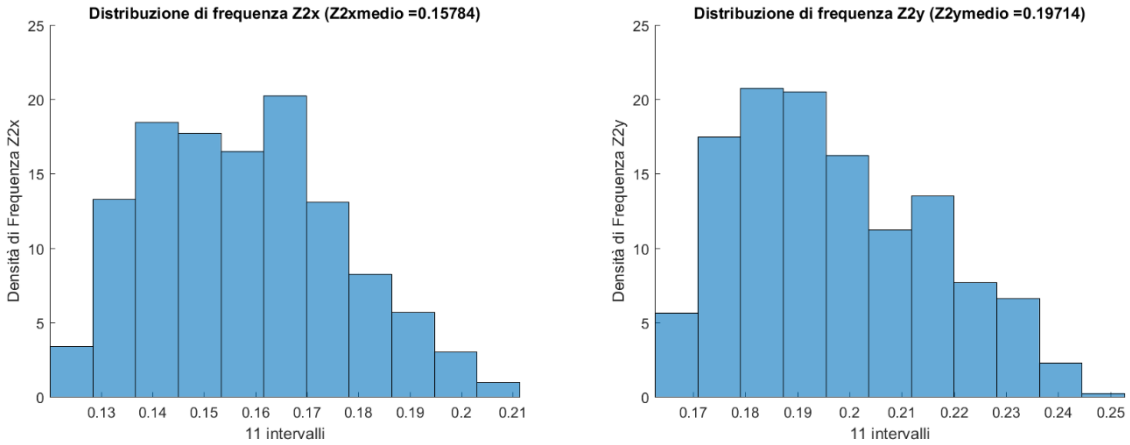


Figura 9.42 Blocco1: distribuzione di frequenza per i parametri Z_{2x} e Z_{2y}.

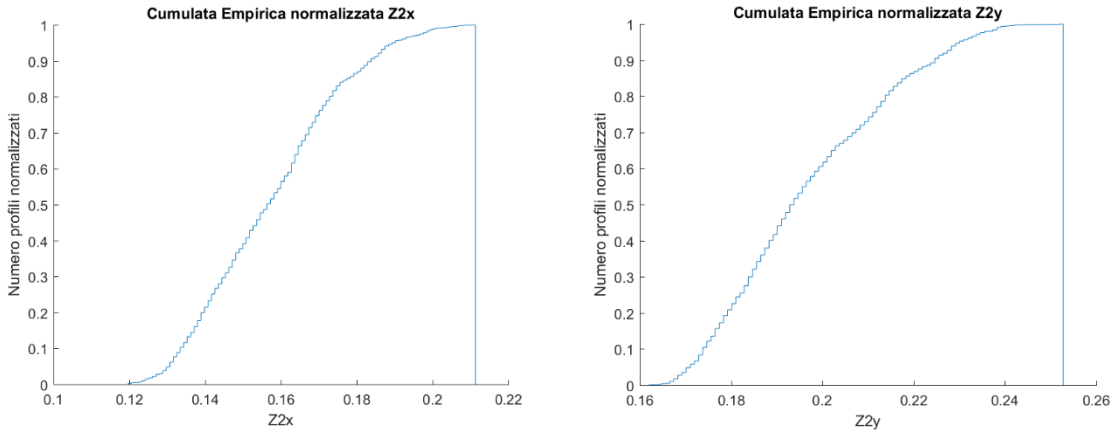


Figura 9.43 Blocco1: frequenza cumulata per i parametri Z_{2x} e Z_{2y}.

9.1.5. Scheda – blocco 2 – 1m x 1m

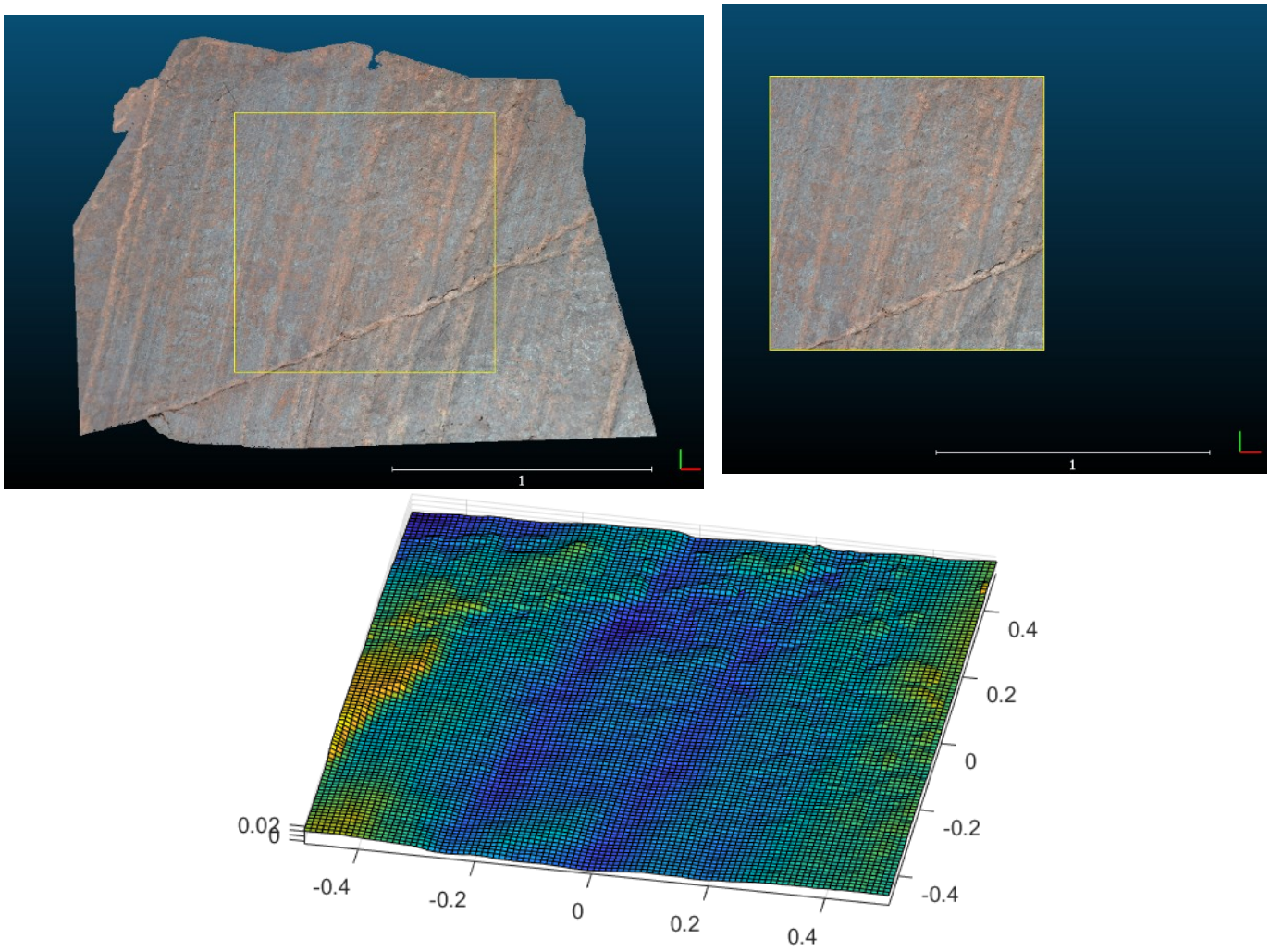


Figura 9.44 Blocco2: DSM dopo la rotazione del piano che approssima la superficie sul piano orizzontale.

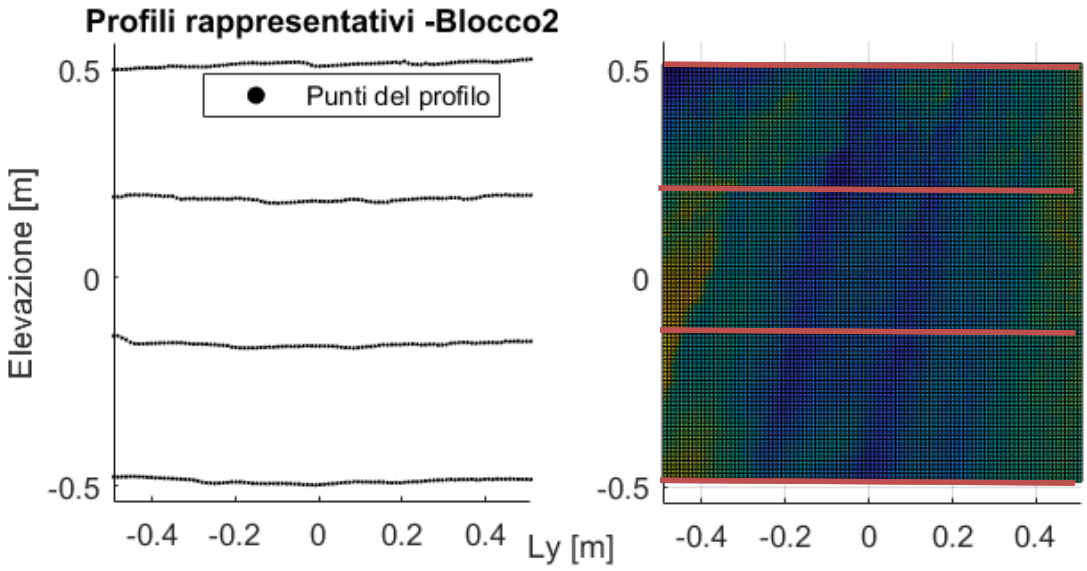


Figura 9.45 45 Blocco2, analisi della superficie dell'elemento: estrazione di quattro profili orizzontali.

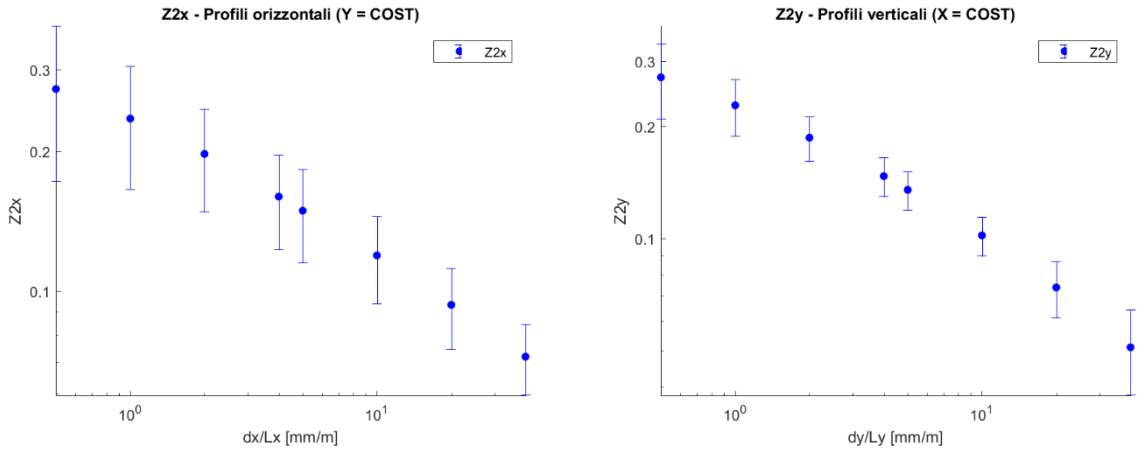


Figura 9.46 Blocco 2: Z_{2x} (profili y=cost) ed Z_{2y} (profili x = cost).

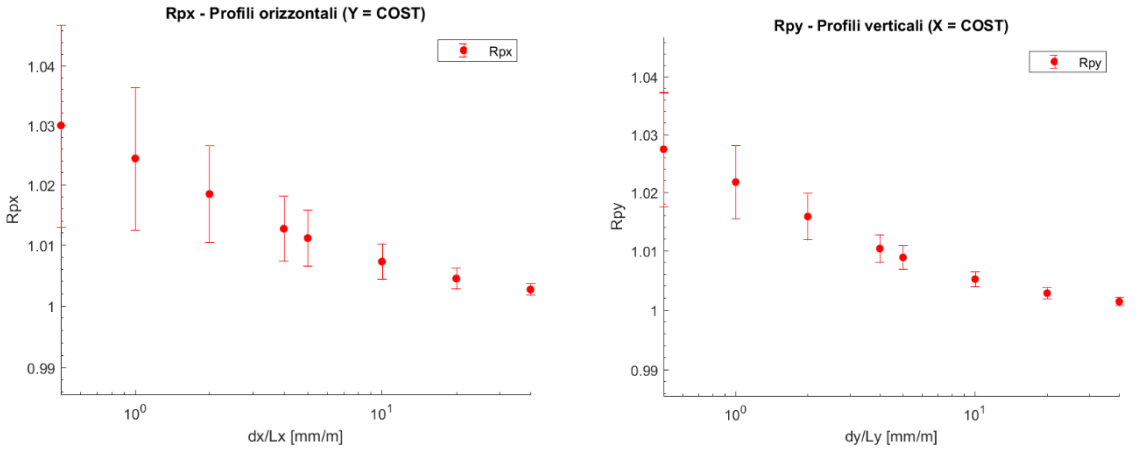


Figura 9.47 Blocco 2: R_{px} (profili y=cost) ed R_{py} (profili x = cost).

Tabella 9.8 Blocco 2: riepilogo dello studio statistico dei parametri di scabrezza Z_2 ed Rp per i diversi intervalli di campionamento.

Blocco 2								
X_passo_norm [mm/m]	**40**	**20**	**10**	**5**	**4**	**2**	**1**	**0,5**
Z2X mean	0,072	0,093	0,119	0,149	0,160	0,197	0,235	0,272
Z2X min	0,047	0,061	0,073	0,086	0,092	0,106	0,115	0,119
Z2X max	0,121	0,153	0,187	0,256	0,264	0,429	0,523	0,756
Z2X Standard Deviation	0,013	0,018	0,025	0,034	0,037	0,049	0,070	0,100
RPX mean	1,003	1,005	1,007	1,011	1,013	1,018	1,024	1,030
RPX min	1,001	1,002	1,003	1,004	1,004	1,006	1,007	1,007
RPX max	1,007	1,012	1,017	1,028	1,032	1,052	1,069	1,104
RPX Standard Deviation	0,001	0,002	0,003	0,005	0,005	0,008	0,012	0,017
Y_passo_norm [mm/m]	**40**	**20**	**10**	**5**	**4**	**2**	**1**	**0,5**
Z2Y mean	0,051	0,074	0,102	0,135	0,147	0,186	0,228	0,271
Z2Y min	0,027	0,040	0,071	0,100	0,105	0,127	0,137	0,141
Z2Y max	0,083	0,104	0,146	0,211	0,238	0,333	0,450	0,721
Z2Y Standard Deviation	0,013	0,013	0,012	0,016	0,017	0,025	0,039	0,062
RPY mean	1,001	1,003	1,005	1,009	1,010	1,016	1,022	1,027
RPY min	1,000	1,001	1,003	1,005	1,005	1,007	1,008	1,009
RPY max	1,003	1,005	1,010	1,019	1,022	1,037	1,051	1,080
RPY Standard Deviation	0,001	0,001	0,001	0,002	0,002	0,004	0,006	0,010

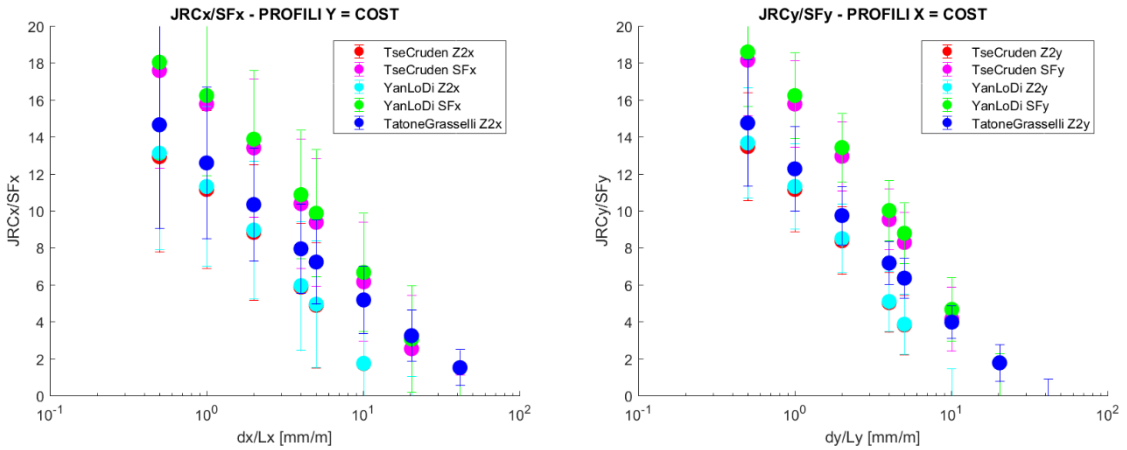


Figura 9.48 Blocco 2: JRC lungo x ed y.

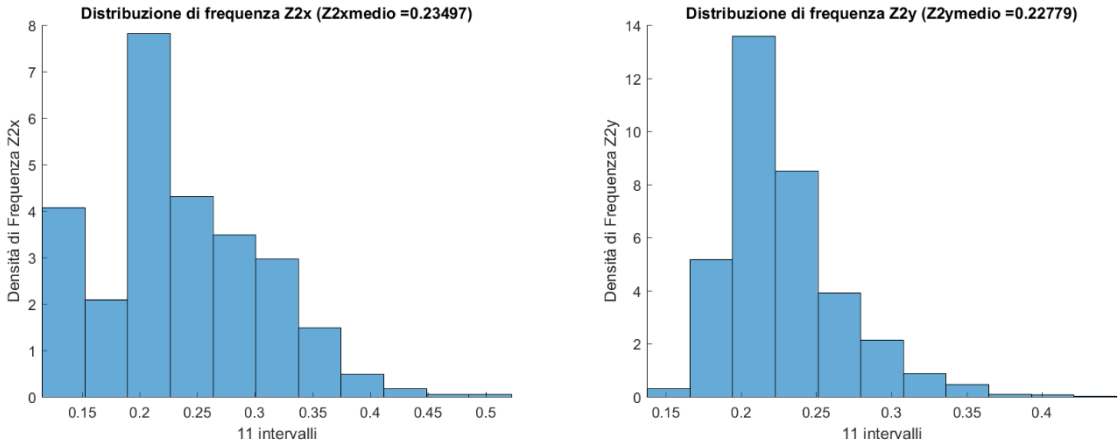


Figura 9.49 Blocco2: distribuzione di frequenza per i parametri Z_{2x} e Z_{2y}.

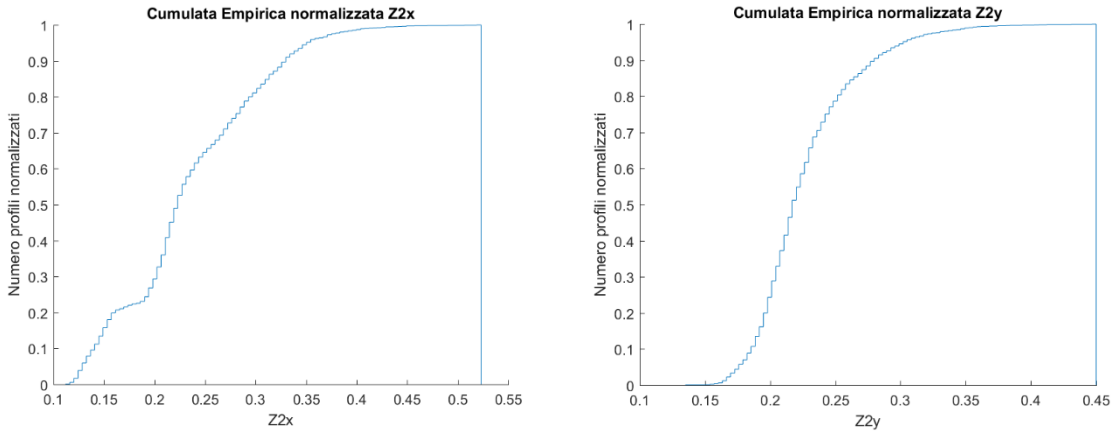


Figura 9.50 Blocco2: frequenza cumulata per i parametri Z_{2x} e Z_{2y}.

9.1.6. Scheda – blocco 3 - 0,85 x 0,85 m

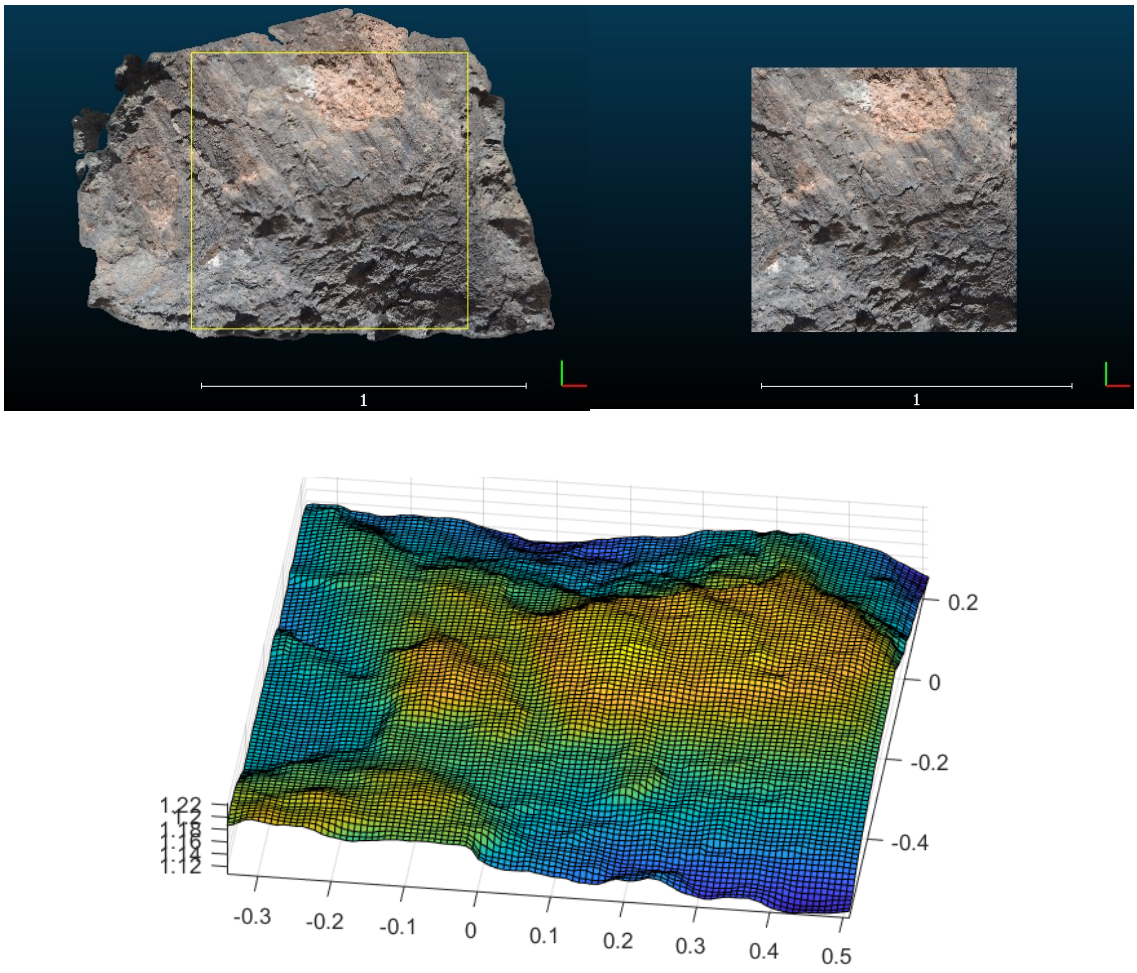


Figura 9.51 Blocco3: DSM dopo la rotazione del piano che approssima la superficie sul piano orizzontale.

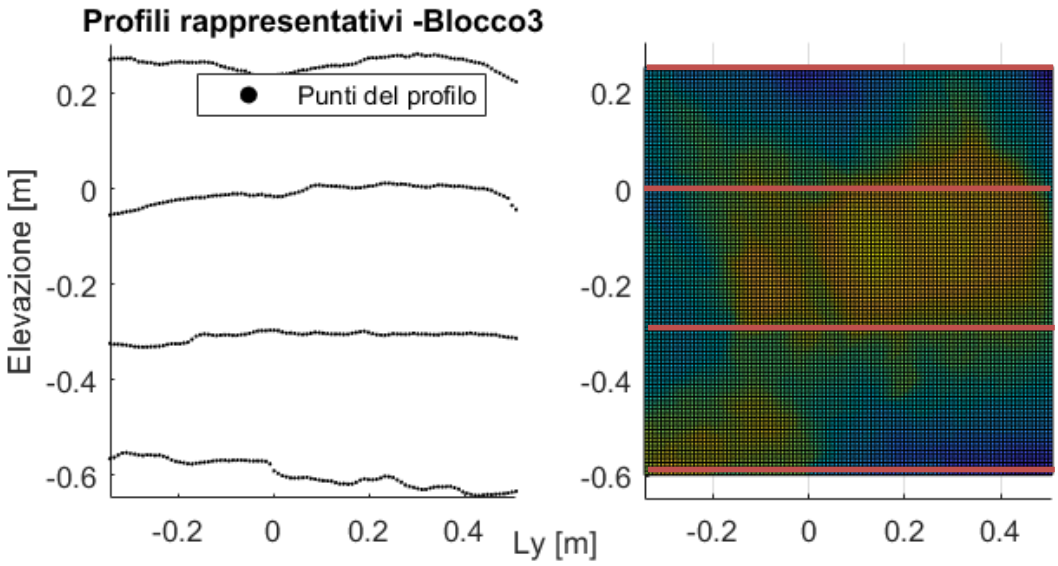


Figura 9.52 Blocco3, analisi della superficie dell'elemento: estrazione di quattro profili orizzontali.

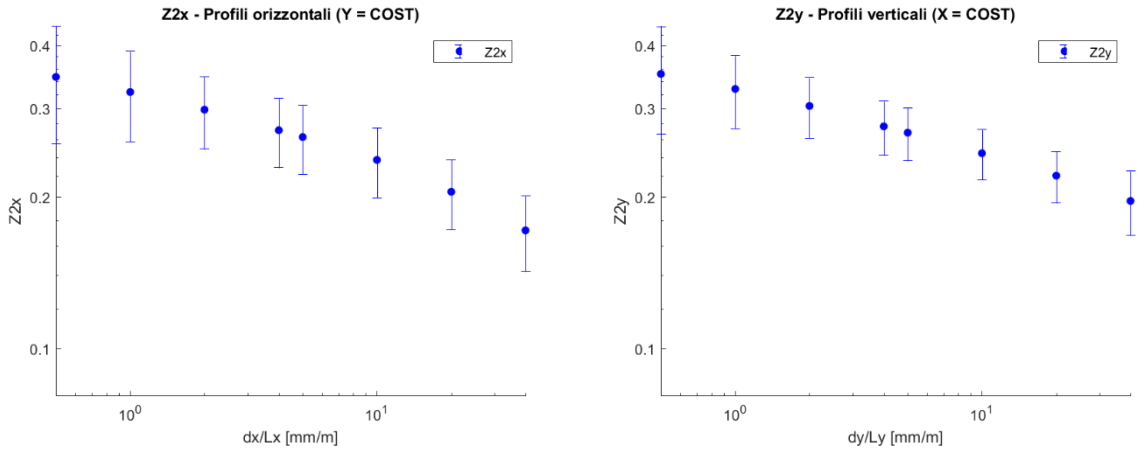


Figura 9.53 Blocco 3: Z_{2x} (profili y=cost) ed Z_{2y} (profili x = cost).

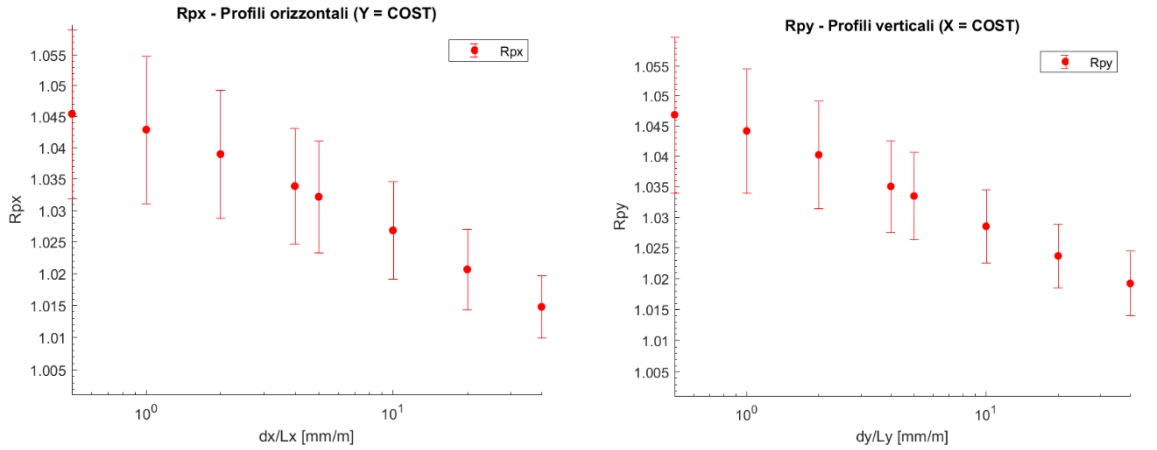


Figura 9.54 Blocco 3: Rpx (profili y=cost) ed Rpy (profili x = cost).

Tabella 9.9 Blocco 3: riepilogo dello studio statistico dei parametri di scabrezza Z_2 ed Rp per i diversi intervalli di campionamento.

Blocco 3								
X_passo_norm [mm/m]	**40**	**20**	**10**	**5**	**4**	**2**	**1**	**0,5**
Z2X mean	0,172	0,205	0,237	0,263	0,271	0,298	0,323	0,346
Z2X min	0,116	0,138	0,163	0,186	0,193	0,212	0,223	0,228
Z2X max	0,256	0,299	0,349	0,415	0,442	0,573	0,766	1,007
Z2X Standard Deviation	0,029	0,033	0,038	0,041	0,043	0,049	0,066	0,091
RPX mean	1,015	1,021	1,027	1,032	1,034	1,039	1,043	1,045
RPX min	1,007	1,009	1,013	1,017	1,018	1,021	1,023	1,024
RPX max	1,031	1,041	1,047	1,057	1,059	1,079	1,095	1,115
RPX Standard Deviation	0,005	0,006	0,008	0,009	0,009	0,010	0,012	0,014
Y_passo_norm [mm/m]	**40**	**20**	**10**	**5**	**4**	**2**	**1**	**0,5**
Z2Y mean	0,196	0,221	0,244	0,268	0,276	0,303	0,328	0,351
Z2Y min	0,134	0,163	0,189	0,200	0,206	0,219	0,229	0,233
Z2Y max	0,252	0,284	0,309	0,359	0,388	0,564	0,754	1,333
Z2Y Standard Deviation	0,029	0,026	0,028	0,032	0,034	0,042	0,054	0,085
RPY mean	1,019	1,024	1,029	1,033	1,035	1,040	1,044	1,047
RPY min	1,009	1,013	1,017	1,019	1,020	1,023	1,025	1,025
RPY max	1,030	1,035	1,042	1,049	1,055	1,077	1,099	1,167
RPY Standard Deviation	0,005	0,005	0,006	0,007	0,008	0,009	0,010	0,013

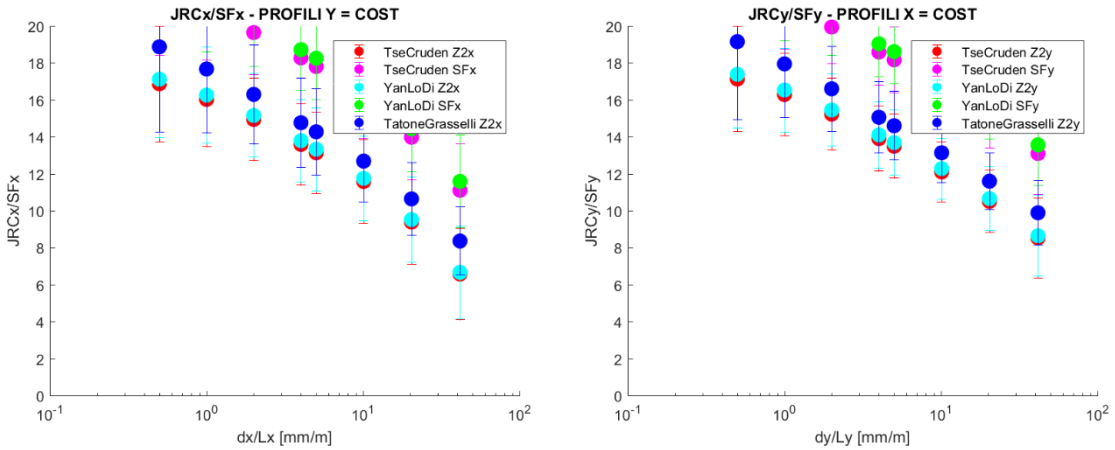


Figura 9.55 Blocco 3: JRC lungo x ed y.

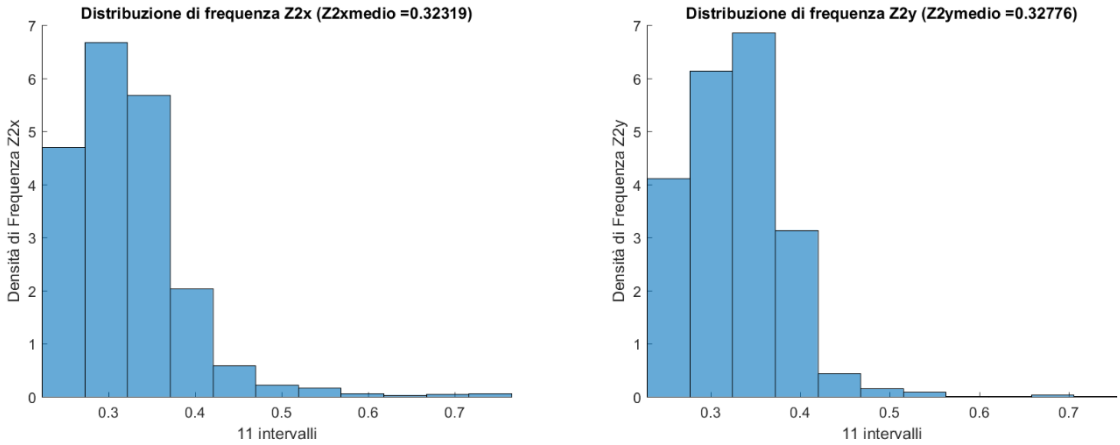


Figura 9.56 Blocco3: Distribuzione di frequenza per i parametri Z_{2x} e Z_{2y}.

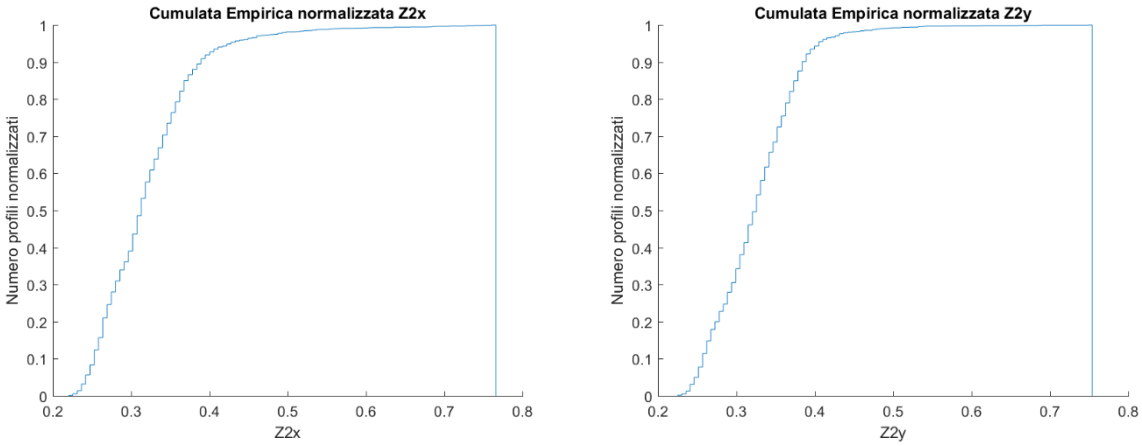


Figura 9.57 Blocco3: frequenza cumulata per i parametri Z_{2x} e Z_{2y}.

9.1.7. Scheda – parete 1 – 3x3m

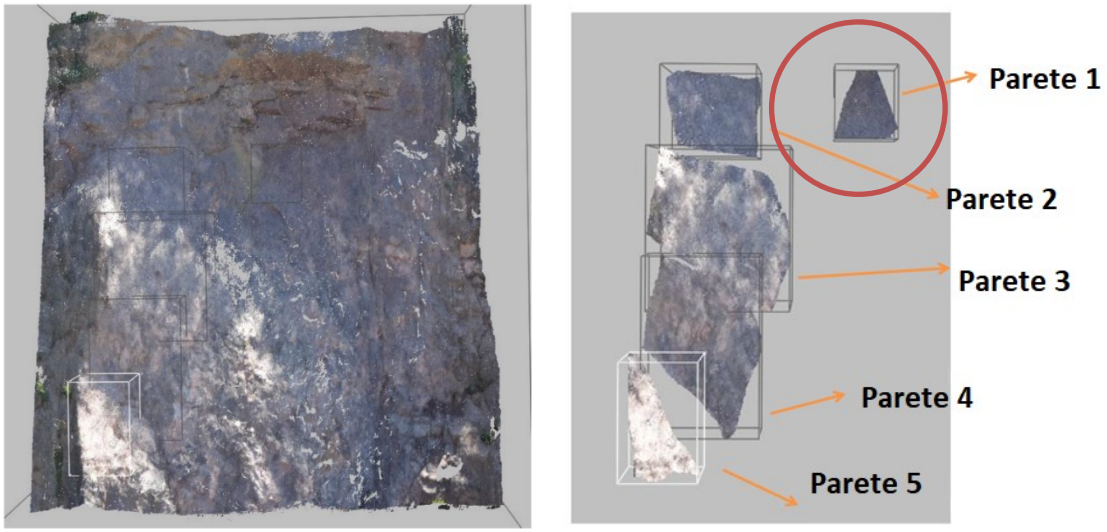


Figura 9.58 Versante: DSM nella sua interezza e le cinque porzioni usate nel presente lavoro di tesi. Nel cerchio rosso è evidenziata la parete 1.

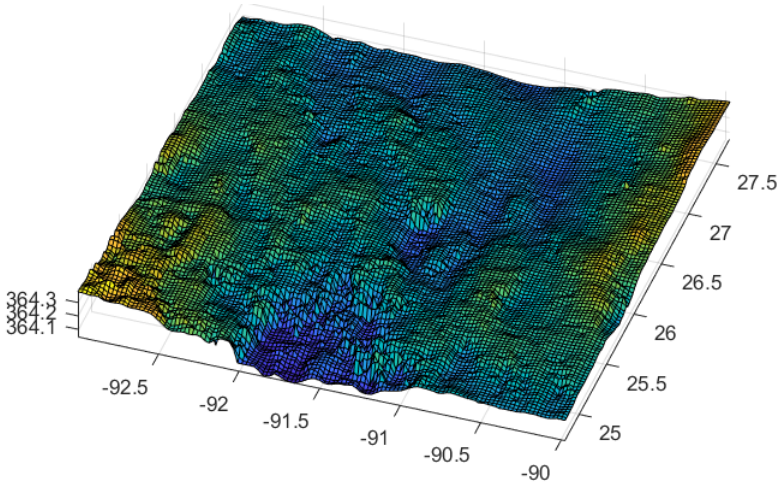


Figura 9.59 Parete1: DSM dopo la rotazione del piano che approssima la superficie sul piano orizzontale.

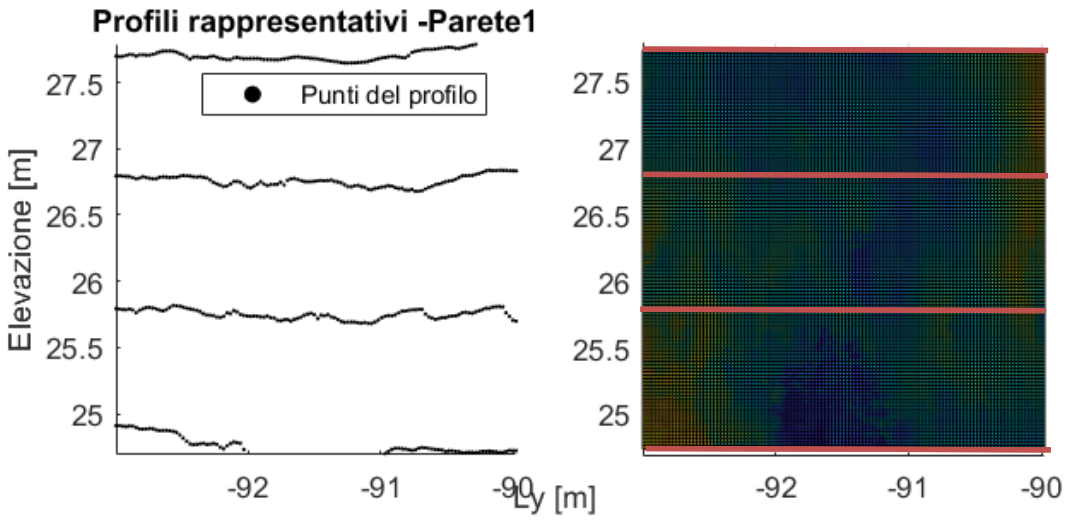


Figura 9.60 Parete1, analisi della superficie dell'elemento: estrazione di quattro profili orizzontali.

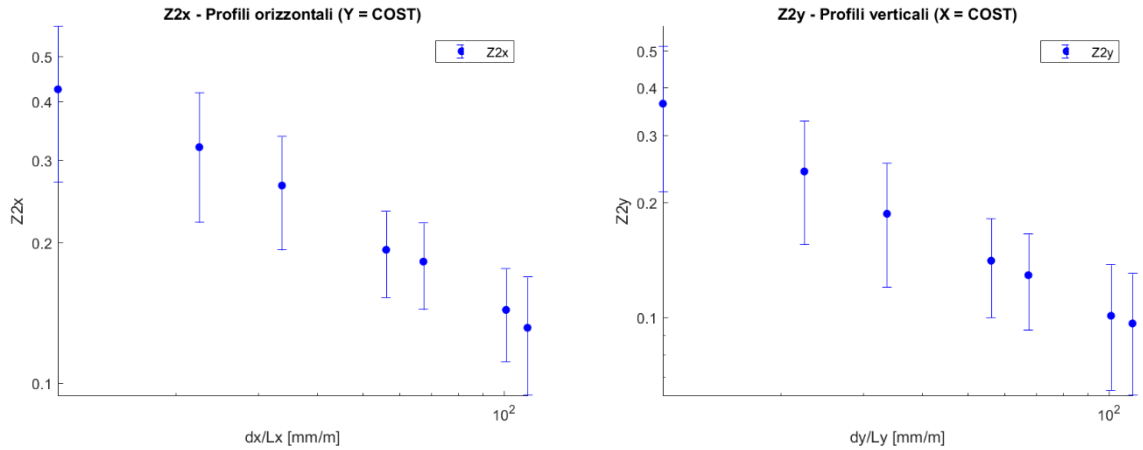


Figura 9.61 Parete 1: Z_{2x} (profili y=cost) ed Z_{2y} (profili x = cost).

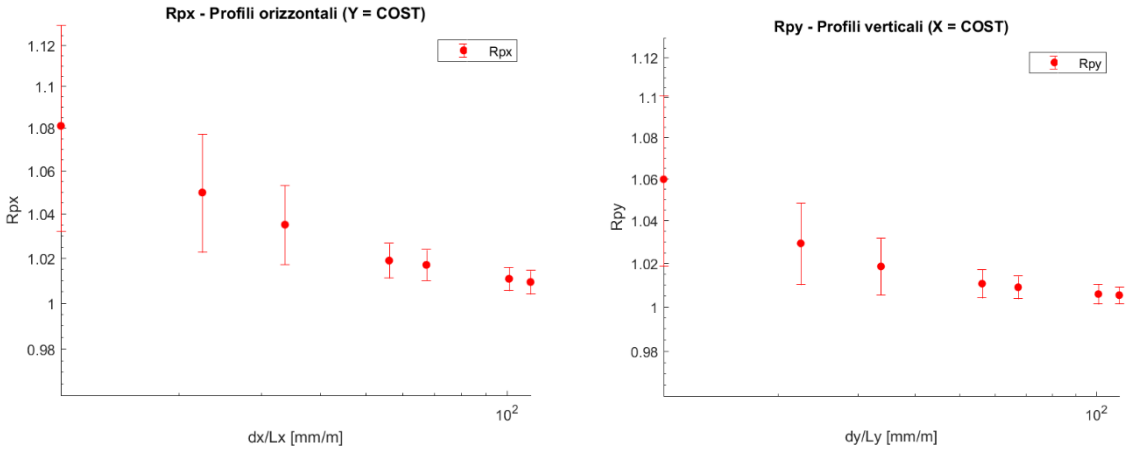


Figura 9.62 Parete 1: Rpx (profili y=cost) ed Rpy (profili x = cost).

Tabella 9.10 Parete 1: riepilogo dello studio statistico dei parametri di scabrezza Z_2 ed R_p per i diversi intervalli di campionamento.

Parete 1 [3m x 3m]							
X_passo_norm [mm/m]	**112**	**101**	**67**	**56**	**34**	**22**	**11**
Z2X mean	0,131	0,144	0,182	0,193	0,265	0,320	0,425
Z2X min	0,076	0,098	0,114	0,123	0,158	0,188	0,201
Z2X max	0,228	0,265	0,267	0,329	0,435	0,529	0,781
Z2X Standard Deviation	0,037	0,032	0,038	0,040	0,072	0,099	0,155
RPX mean	1,009	1,011	1,017	1,019	1,035	1,050	1,081
RPX min	1,003	1,005	1,006	1,008	1,012	1,017	1,020
RPX max	1,025	1,033	1,034	1,049	1,081	1,112	1,197
RPX Standard Deviation	0,005	0,005	0,007	0,008	0,018	0,027	0,049
Y_passo_norm [mm/m]	**112**	**101**	**67**	**56**	**34**	**22**	**11**
Z2Y mean	0,097	0,101	0,129	0,141	0,187	0,241	0,363
Z2Y min	0,048	0,046	0,075	0,075	0,092	0,128	0,153
Z2Y max	0,203	0,241	0,241	0,291	0,377	0,480	0,854
Z2Y Standard Deviation	0,034	0,036	0,036	0,041	0,067	0,086	0,150
RPY mean	1,005	1,006	1,009	1,011	1,018	1,029	1,060
RPY min	1,001	1,001	1,003	1,003	1,004	1,008	1,011
RPY max	1,020	1,028	1,028	1,040	1,060	1,084	1,197
RPY Standard Deviation	0,004	0,005	0,005	0,007	0,013	0,019	0,041

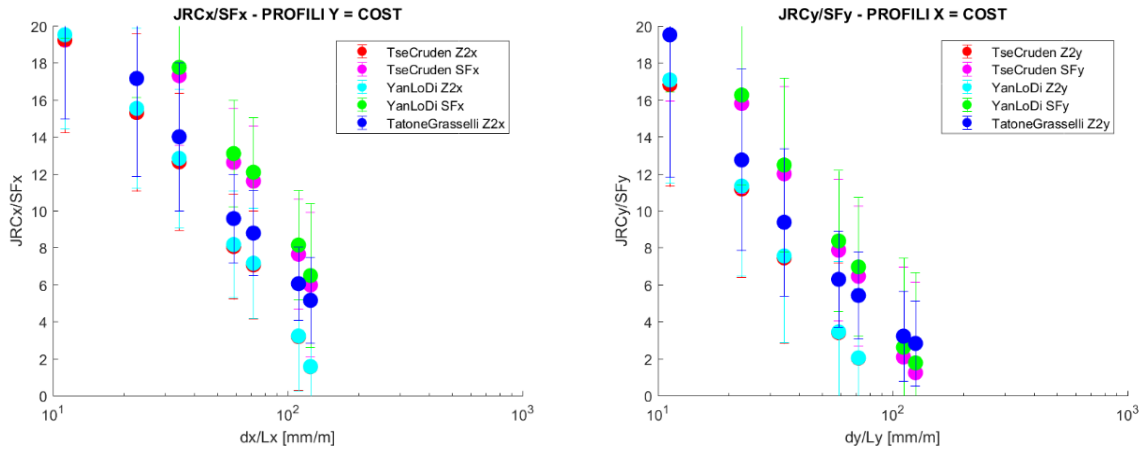


Figura 9.63 JRC Parete 1, 3m x 3m, lungo le direzioni x e y.

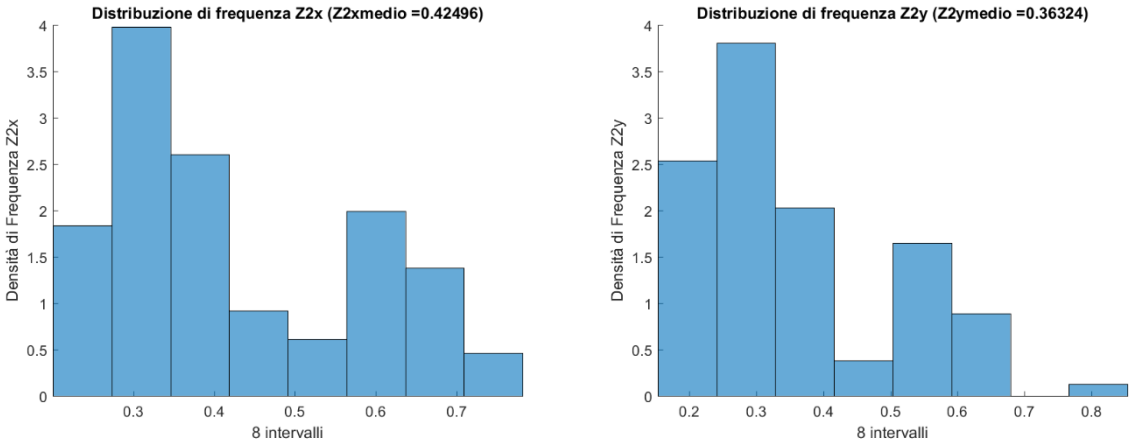


Figura 9.64 Parete1: Distribuzione di frequenza per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 11mm/m.

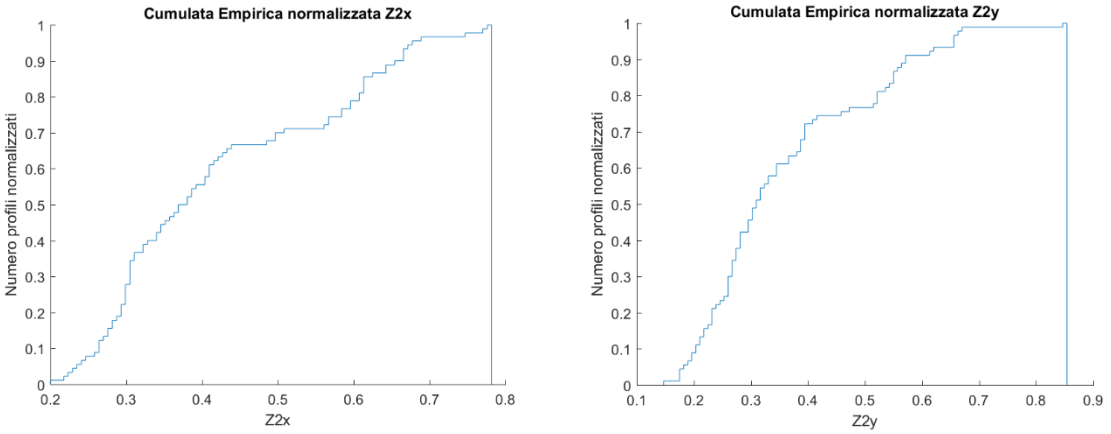


Figura 9.65 Parete1: Frequenza cumulata per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 11mm/m.

9.1.8. Scheda – parete 1 ridotta– 1m x 1m

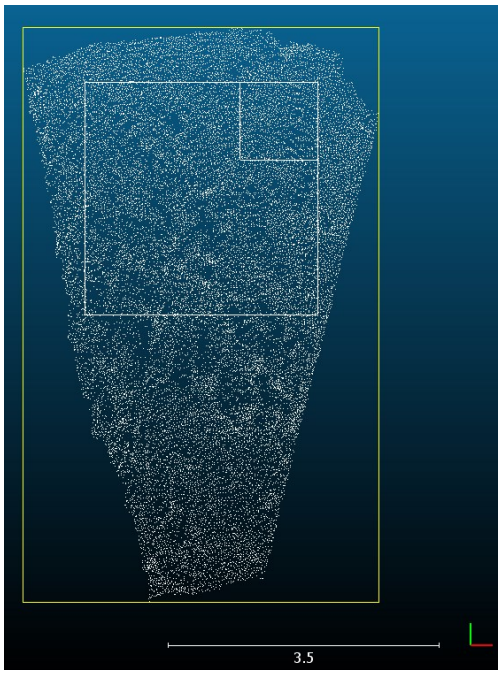


Figura 9.66 Parete1-ridotta: nuvola di punti sparsi, superficie orginale 3m x 3m e superficie ridotta 1m x 1m.

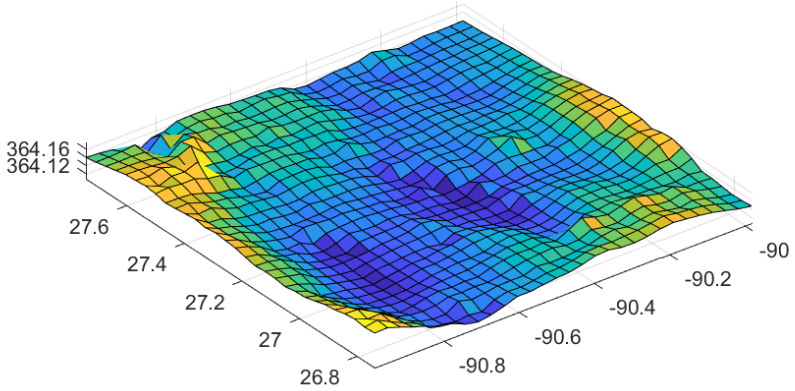


Figura 9.67 Parete1-ridotta: DSM dopo la rotazione del piano che approssima la superficie sul piano orizzontale.

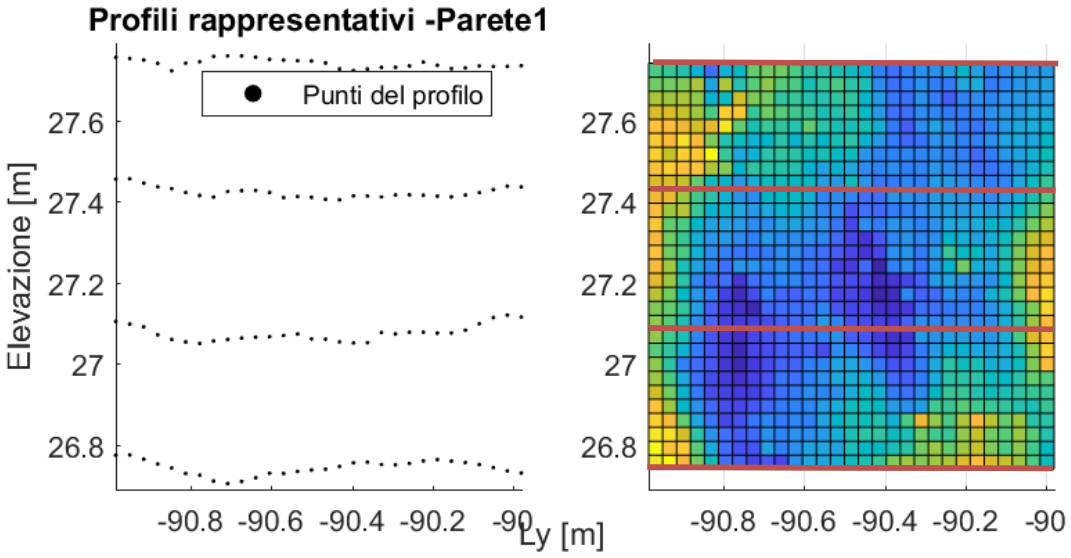


Figura 9.68 Parete1-ridotta, analisi della superficie dell'elemento: estrazione di quattro profili orizzontali.

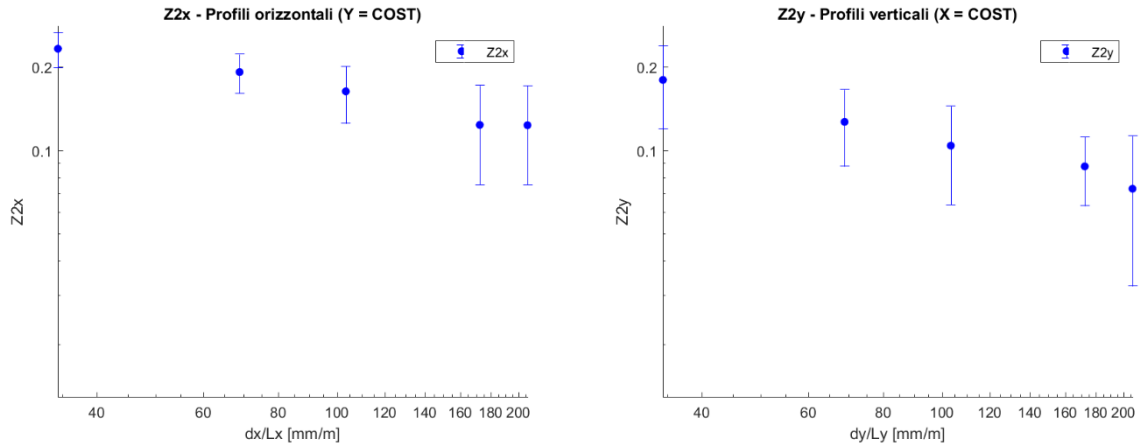


Figura 9.69 Parete 1-ridotta: Z_{2x} (profili y=cost) ed Z_{2y} (profili x = cost).

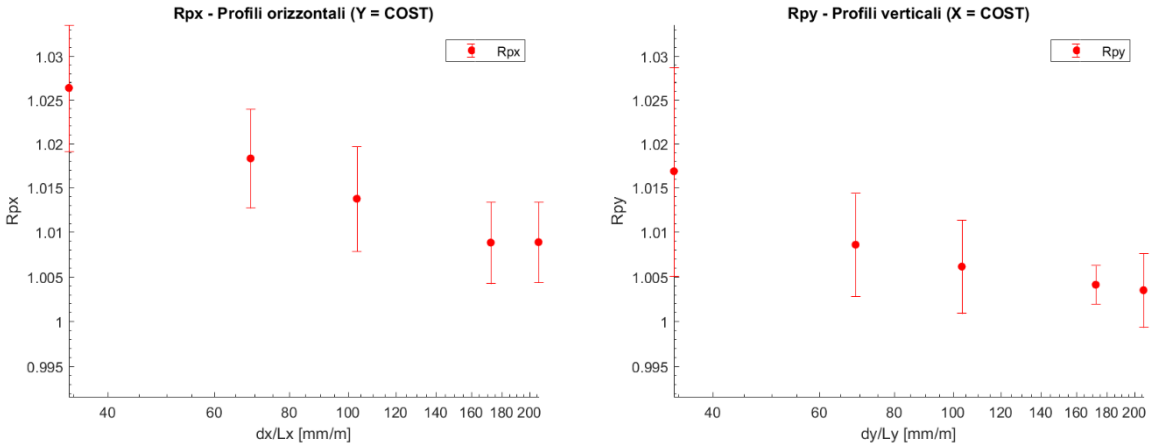


Figura 9.70 Parete 1-ridotta: Rpx (profili y=cost) ed Rpy (profili x = cost).

Tabella 9.11 Parete 1-ridotta: riepilogo dello studio statistico dei parametri di scabrezza Z_2 ed Rp per i diversi intervalli di campionamento.

Parete 1 [1m x 1m]					
X_passo_norm [mm/m]	**207**	**172**	**103**	**69**	**34**
Z2X mean	0,123	0,124	0,163	0,192	0,233
Z2X min	0,000	0,000	0,099	0,138	0,172
Z2X max	0,189	0,189	0,235	0,252	0,307
Z2X Standard Deviation	0,048	0,048	0,038	0,031	0,034
RPX mean	1,009	1,009	1,014	1,018	1,026
RPX min	1,002	1,002	1,005	1,009	1,014
RPX max	1,017	1,017	1,027	1,031	1,045
RPX Standard Deviation	0,005	0,005	0,006	0,006	0,007
Y_passo_norm [mm/m]	**207**	**172**	**103**	**69**	**34**
Z2Y mean	0,073	0,088	0,104	0,127	0,180
Z2Y min	0,000	0,042	0,056	0,070	0,104
Z2Y max	0,218	0,128	0,221	0,249	0,370
Z2Y Standard Deviation	0,040	0,024	0,040	0,039	0,060
RPY mean	1,004	1,004	1,006	1,009	1,017
RPY min	1,000	1,001	1,002	1,002	1,005
RPY max	1,023	1,008	1,024	1,029	1,060
RPY Standard Deviation	0,004	0,002	0,005	0,006	0,012

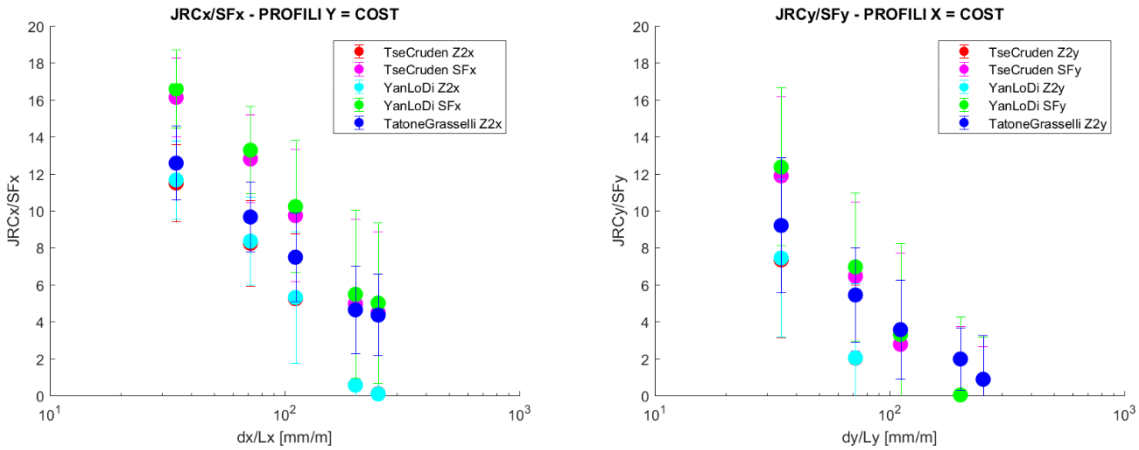


Figura 9.71 JRC Parete 1-ridotta, 1m x 1m, lungo le direzioni x e y.

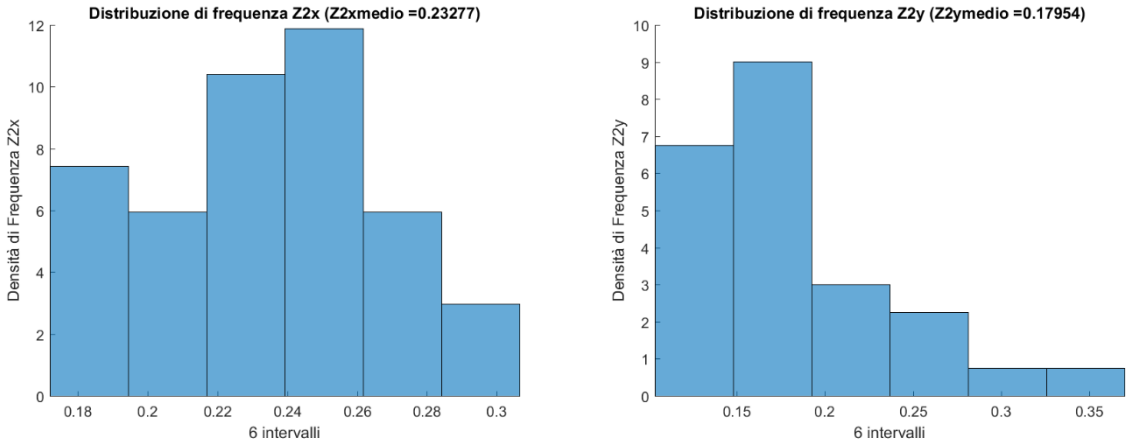


Figura 9.72 Parete1-ridotta: Distribuzione di frequenza per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 34mm/m.

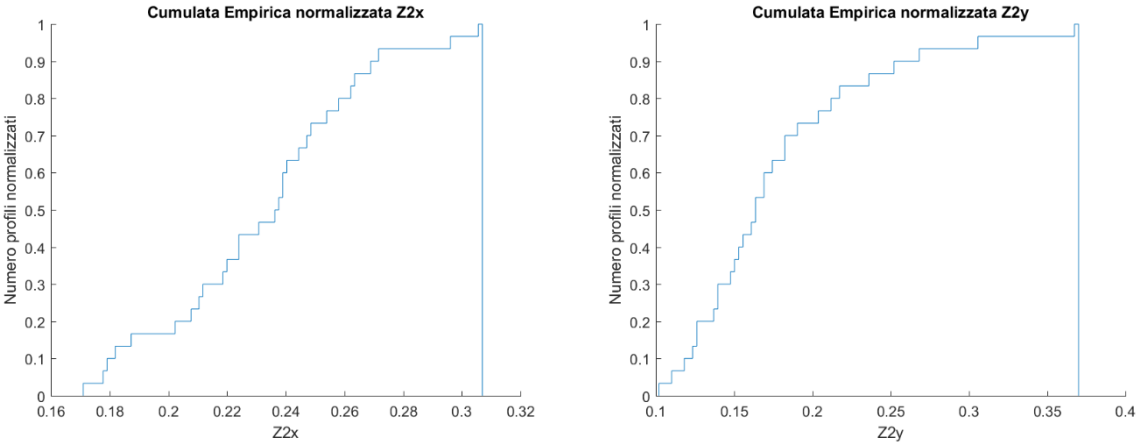


Figura 9.73 Parete1-ridotta: Frequenza cumulata per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 34mm/m.

9.1.9. Scheda – parete 2 – 5x5m

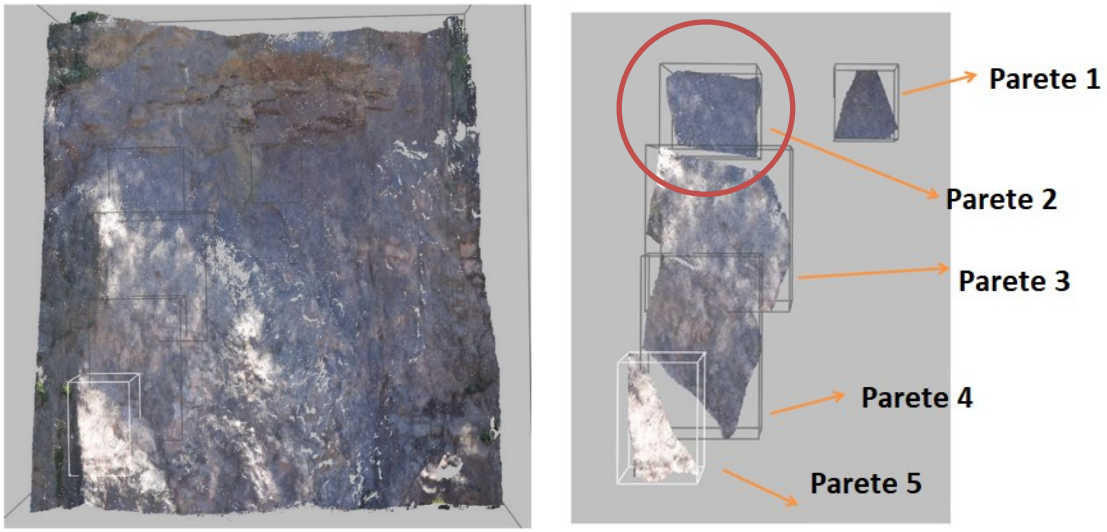


Figura 9.74 Versante: DSM nella sua interezza e le cinque porzioni usate nel presente lavoro di tesi. Nel cerchio rosso è evidenziata la parete 2.

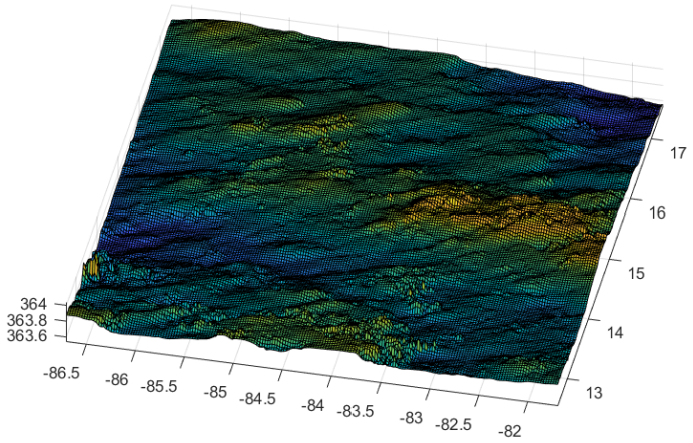


Figura 9.75 Parete2: DSM dopo la rotazione del piano che approssima la superficie sul piano orizzontale.

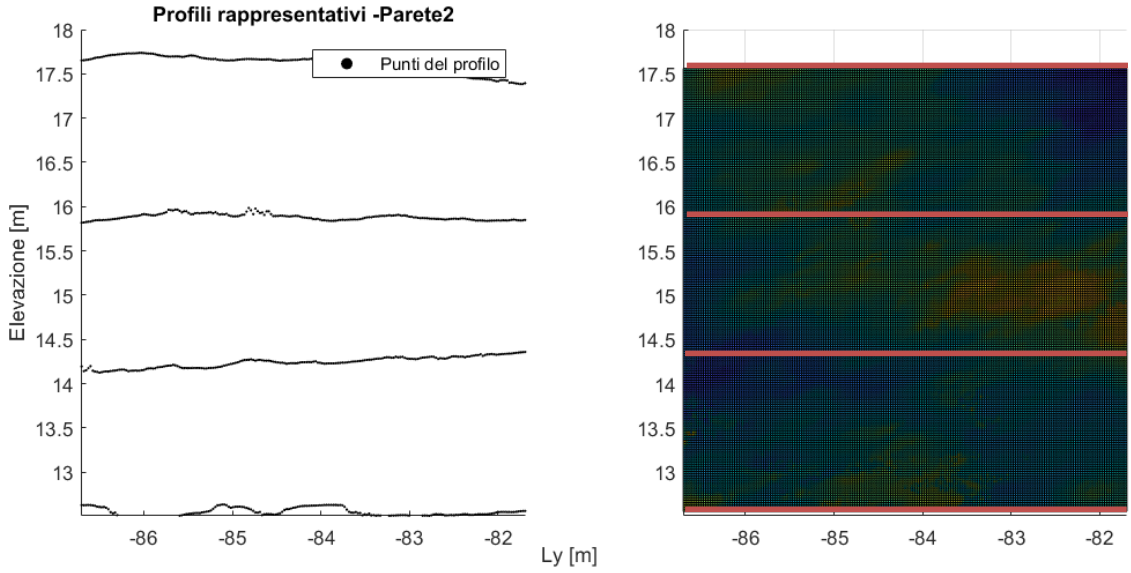


Figura 9.76 Parete2, analisi della superficie dell'elemento: estrazione di quattro profili orizzontali.

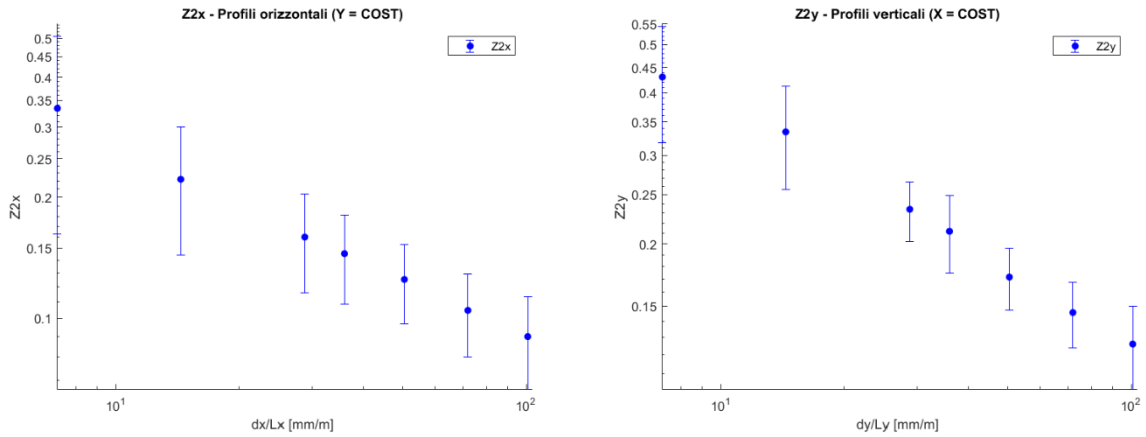


Figura 9.77 Parete 2: Z_{2x} (profili y=cost) ed Z_{2y} (profili x = cost).

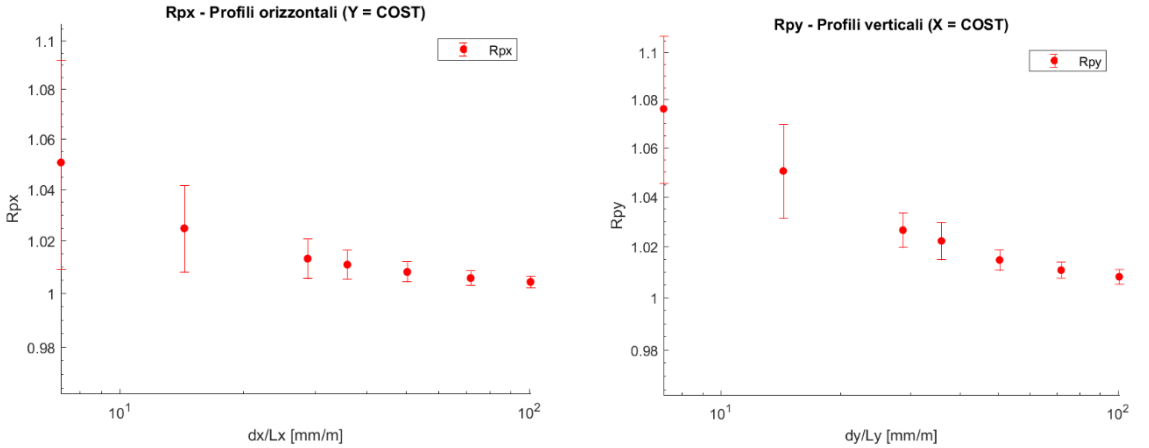


Figura 9.78 Parete 2: Rpx (profili y=cost) ed Rpy (profili x = cost).

Tabella 9.12 Parete 2: riepilogo dello studio statistico dei parametri di scabrezza Z_2 ed Rp per i diversi intervalli di campionamento.

Parete 2 [5m x 5m]							
X_passo_norm [mm/m]	**101**	**72**	**50**	**36**	**29**	**14**	**7**
Z2X mean	0,090	0,105	0,125	0,145	0,160	0,222	0,334
Z2X min	0,038	0,057	0,072	0,086	0,084	0,107	0,128
Z2X max	0,152	0,180	0,219	0,265	0,342	0,473	1,381
Z2X Standard Deviation	0,023	0,025	0,028	0,036	0,044	0,078	0,172
RPX mean	1,004	1,006	1,008	1,011	1,013	1,025	1,051
RPX min	1,001	1,002	1,003	1,004	1,004	1,006	1,008
RPX max	1,011	1,016	1,023	1,033	1,054	1,091	1,226
RPX Standard Deviation	0,002	0,003	0,004	0,006	0,008	0,017	0,041
Y_passo_norm [mm/m]	**101**	**72**	**50**	**36**	**29**	**14**	**7**
Z2Y mean	0,126	0,146	0,172	0,212	0,234	0,334	0,430
Z2Y min	0,072	0,104	0,121	0,136	0,166	0,216	0,272
Z2Y max	0,172	0,201	0,234	0,342	0,313	0,976	1,203
Z2Y Standard Deviation	0,024	0,022	0,025	0,037	0,032	0,078	0,113
RPY mean	1,008	1,011	1,015	1,022	1,027	1,050	1,076
RPY min	1,003	1,005	1,007	1,009	1,014	1,022	1,035
RPY max	1,015	1,020	1,027	1,052	1,045	1,193	1,260
RPY Standard Deviation	0,003	0,003	0,004	0,007	0,007	0,019	0,031

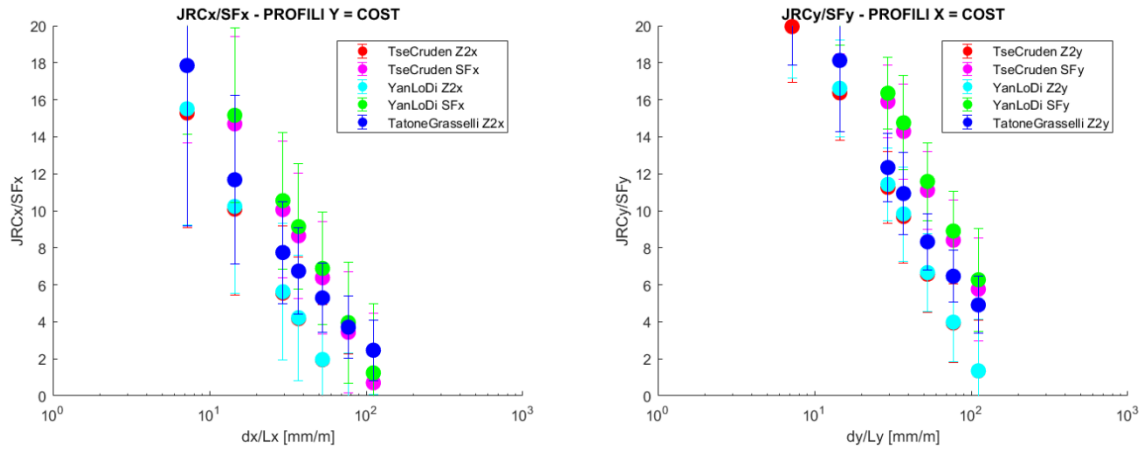


Figura 9.79 JRC Parete 2, 5m x 5m, lungo le direzioni x e y.

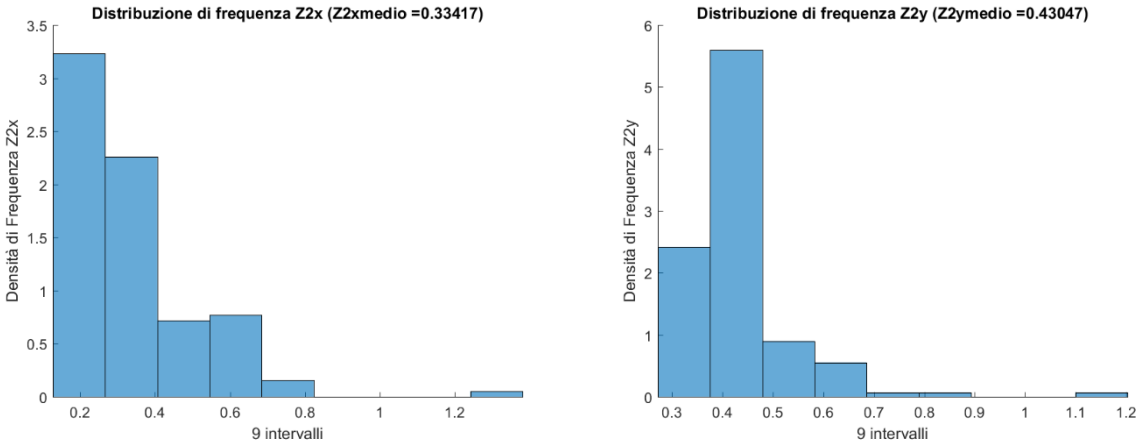


Figura 9.80 Parete 2: distribuzione di frequenza per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 7mm/m,.

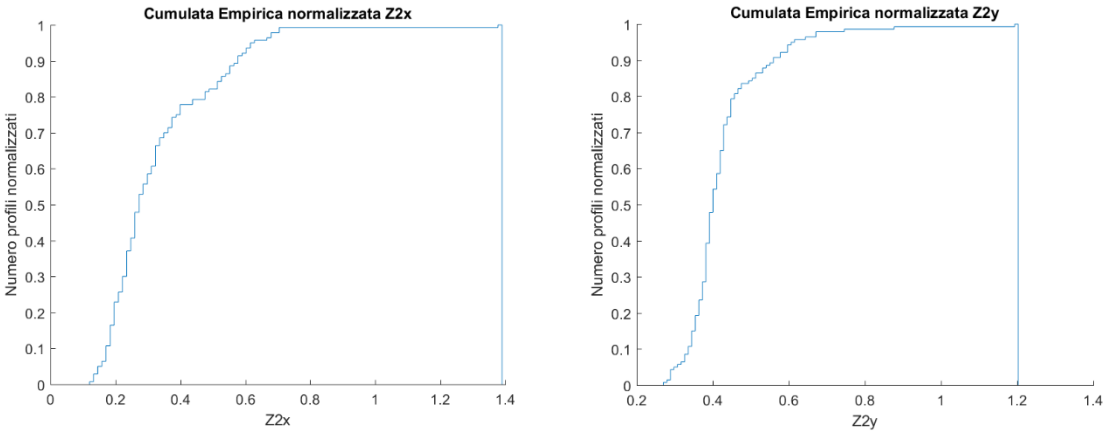


Figura 9.81 Parete2: frequenza cumulata per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 7mm/m.

9.1.10. Scheda – parete 2 ridotta – 2x2m

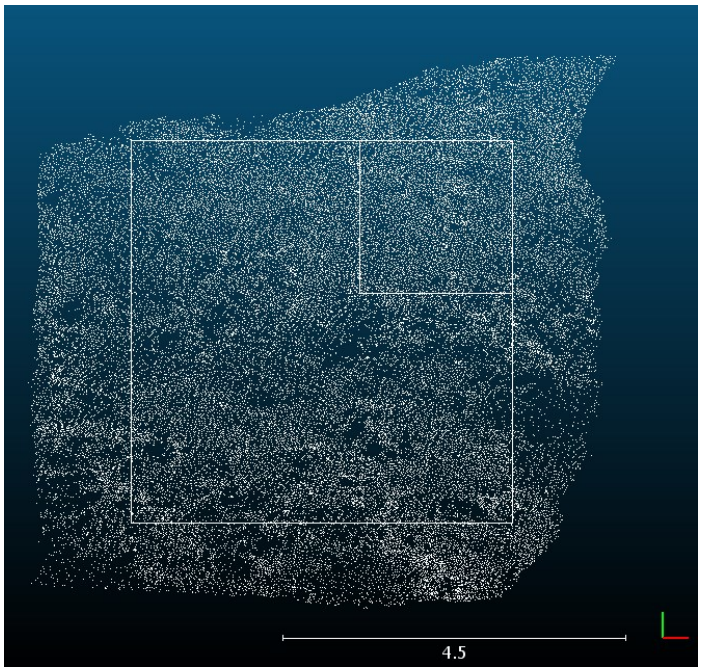


Figura 9.82 Parete2-ridotta: nuvola di punti sparsi, superficie orginale 5m x m e superficie ridotta 2m x 2m.

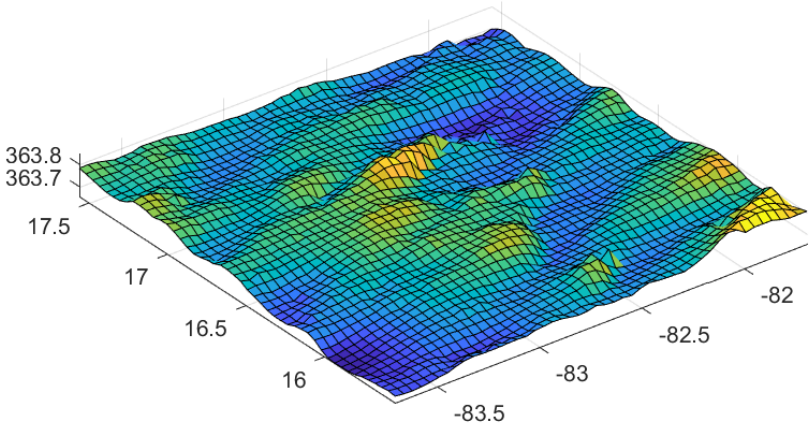


Figura 9.83 Parete2-ridotta: DSM dopo la rotazione del piano che approssima la superficie sul piano orizzontale.

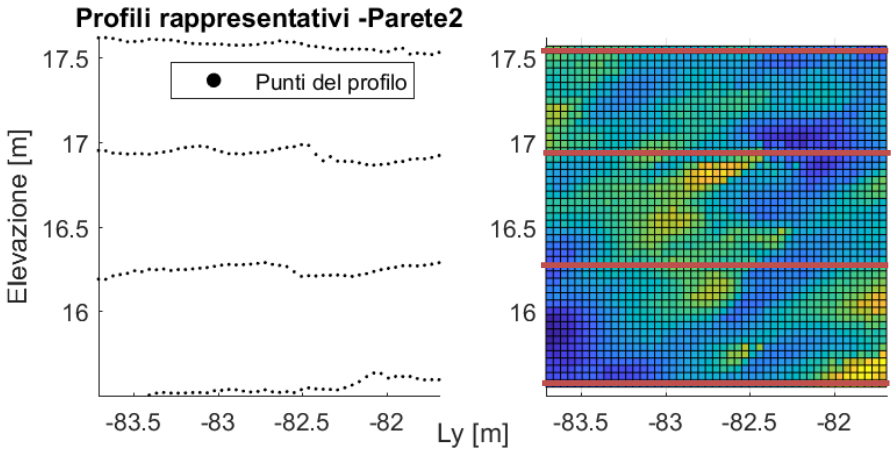


Figura 9.84 Parete2-ridotta, analisi della superficie dell'elemento: estrazione di quattro profili orizzontali.

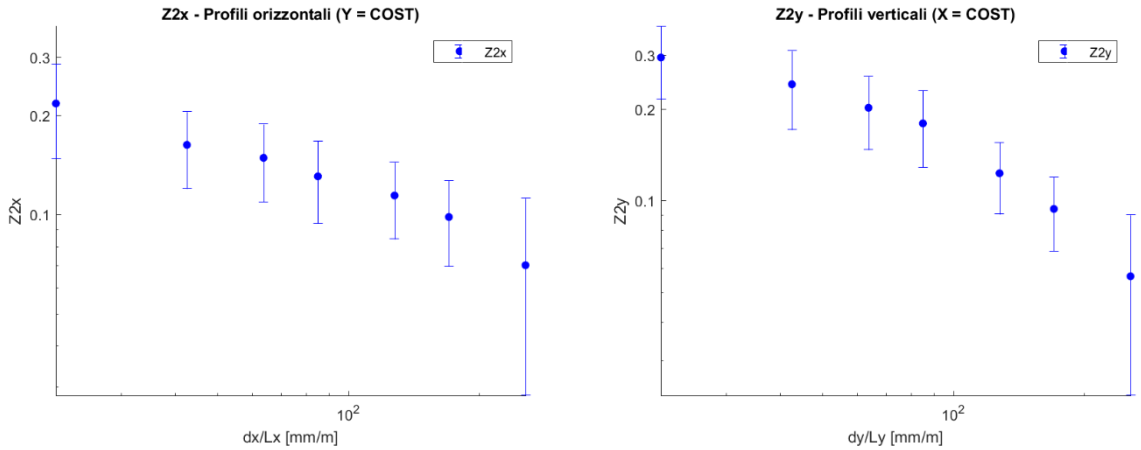


Figura 9.85 Parete 2-ridotta: Z_{2x} (profili y=cost) ed Z_{2y} (profili x = cost).

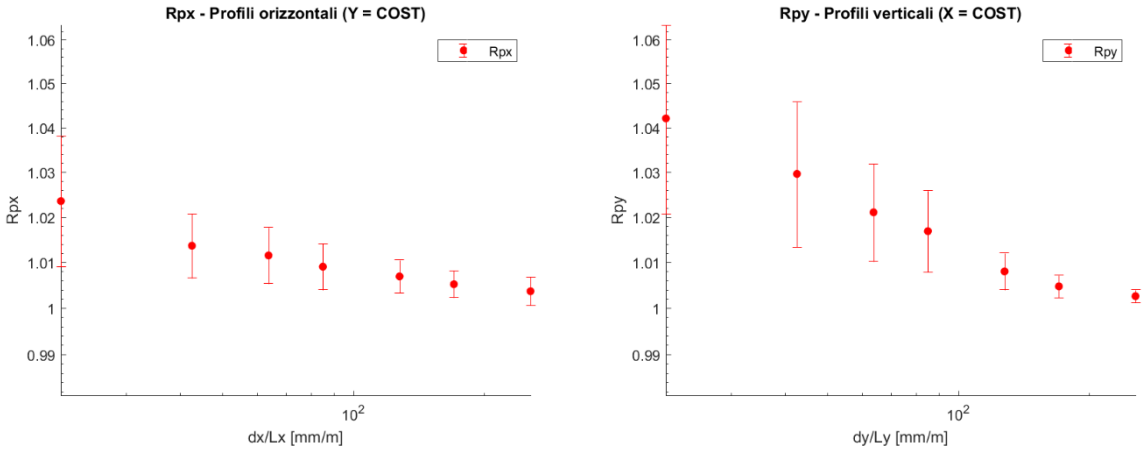


Figura 9.86 Parete 2-ridotta: Rpx (profili y=cost) ed Rpy (profili x = cost).

Tabella 9.13 Parete 2: riepilogo dello studio statistico dei parametri di scabrezza Z_2 ed Rp per i diversi intervalli di campionamento.

Parete 2 [2m x 2m]							
X_passo_norm [mm/m]	**255**	**170**	**128**	**85**	**64**	**43**	**21**
Z2X mean	0,070	0,098	0,114	0,131	0,149	0,163	0,217
Z2X min	0,000	0,035	0,058	0,067	0,085	0,095	0,132
Z2X max	0,191	0,171	0,191	0,232	0,268	0,271	0,406
Z2X Standard Deviation	0,042	0,029	0,030	0,037	0,039	0,043	0,069
RPX mean	1,004	1,005	1,007	1,009	1,012	1,014	1,024
RPX min	1,001	1,001	1,002	1,002	1,004	1,005	1,009
RPX max	1,018	1,014	1,018	1,026	1,034	1,034	1,072
RPX Standard Deviation	0,003	0,003	0,004	0,005	0,006	0,007	0,014
Y_passo_norm [mm/m]	**255**	**170**	**128**	**85**	**64**	**43**	**21**
Z2Y mean	0,056	0,094	0,123	0,179	0,202	0,241	0,294
Z2Y min	0,000	0,040	0,063	0,099	0,118	0,136	0,178
Z2Y max	0,103	0,147	0,183	0,280	0,330	0,404	0,507
Z2Y Standard Deviation	0,033	0,025	0,032	0,050	0,054	0,070	0,079
RPY mean	1,003	1,005	1,008	1,017	1,021	1,030	1,042
RPY min	1,000	1,001	1,002	1,005	1,007	1,009	1,016
RPY max	1,005	1,011	1,016	1,037	1,050	1,074	1,107
RPY Standard Deviation	0,001	0,002	0,004	0,009	0,011	0,016	0,021

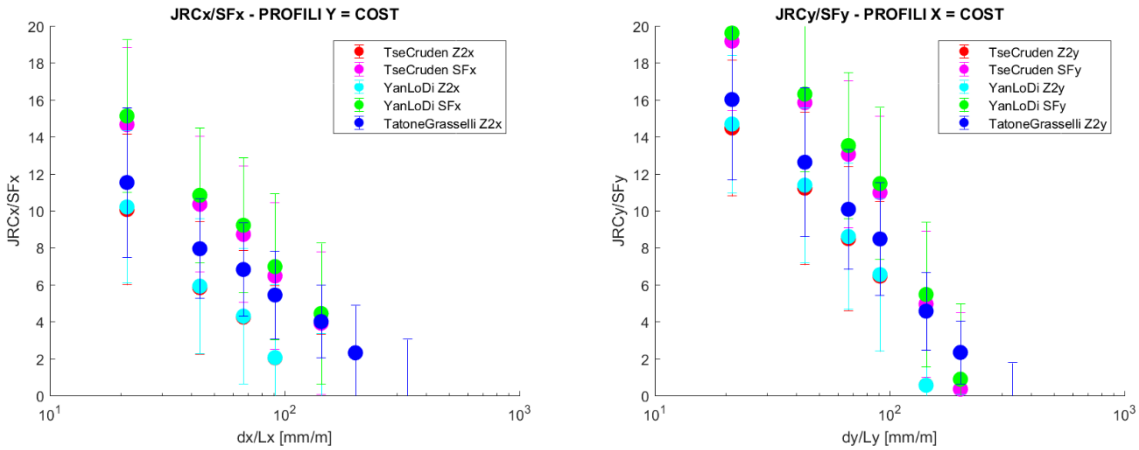


Figura 9.87 JRC Parete 2-ridotta, 2m x 2m, lungo le direzioni x e y.

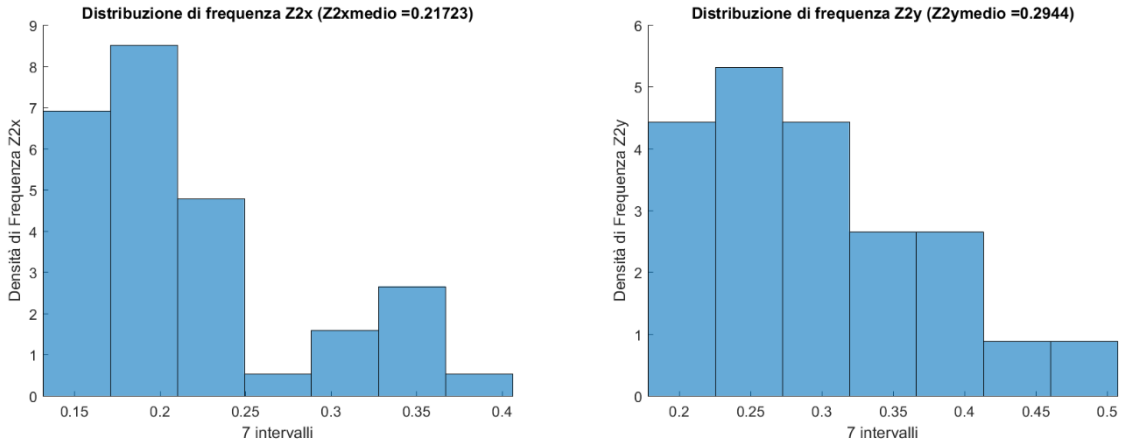


Figura 9.88 Parete2-ridotta: distribuzione di frequenza per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 21mm/m.

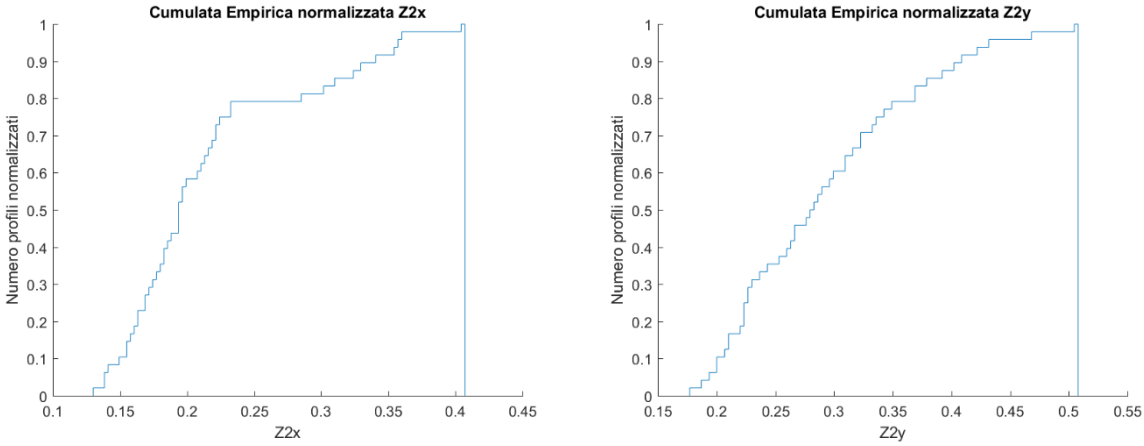


Figura 9.89 Parete2-ridotta: frequenza cumulata per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 21mm/m.

9.1.11. Scheda – parete 3 – 7x7m

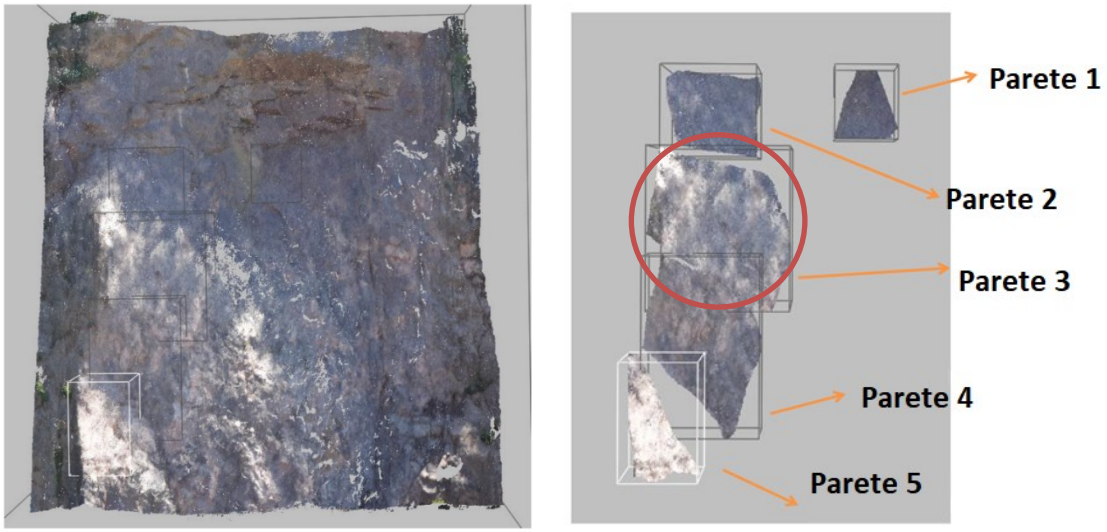


Figura 9.90 Versante: DSM nella sua interezza e le cinque porzioni usate nel presente lavoro di tesi. Nel cerchio rosso è evidenziata la parete 3.

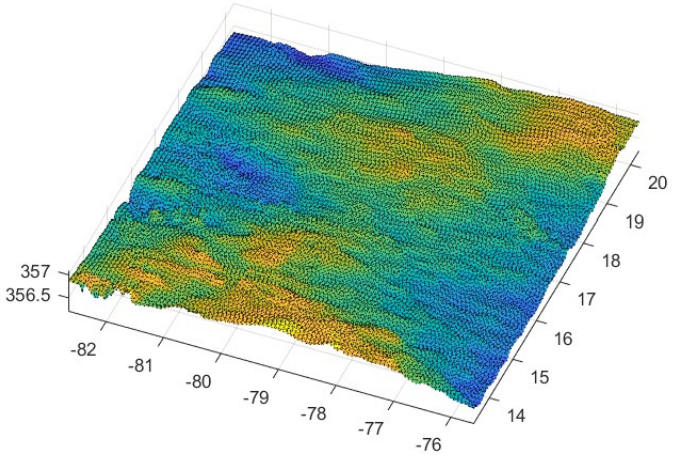


Figura 9.91 Parete3: DSM dopo la rotazione del piano che approssima la superficie sul piano orizzontale.

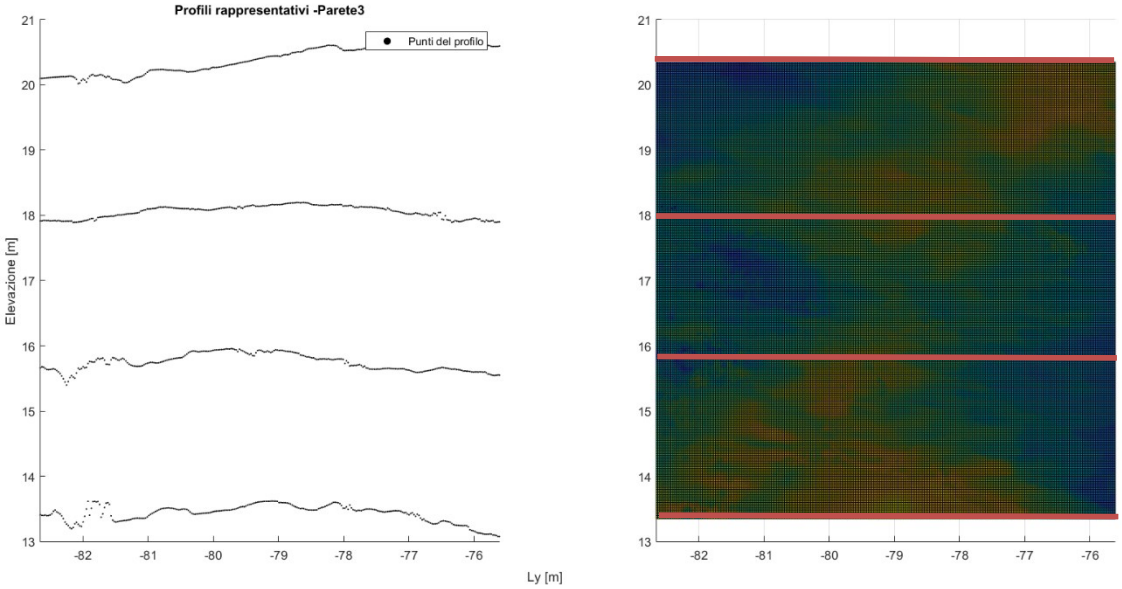


Figura 9.92 Parete3, analisi della superficie dell'elemento: estrazione di quattro profili orizzontali.

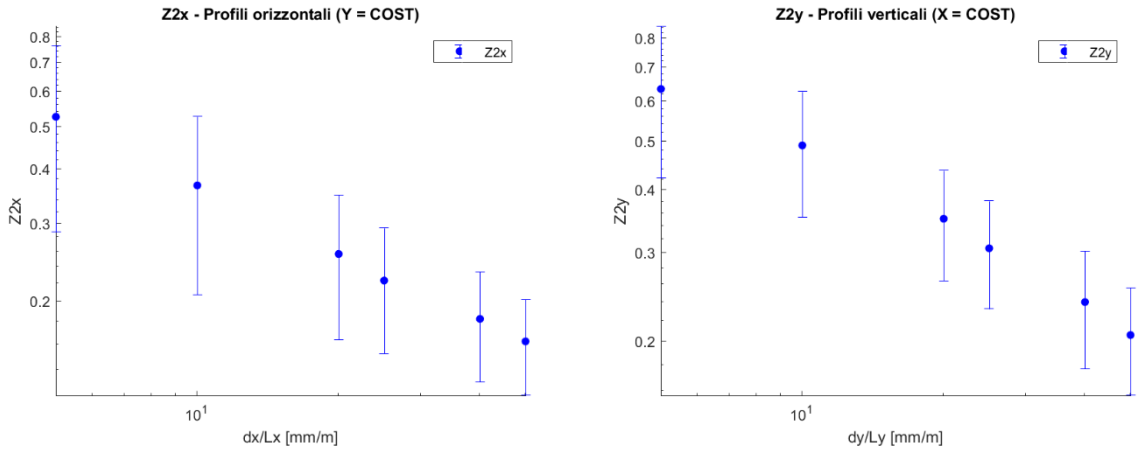


Figura 9.93 Parete 3: Z_{2x} (profili y=cost) ed Z_{2y} (profili x = cost).

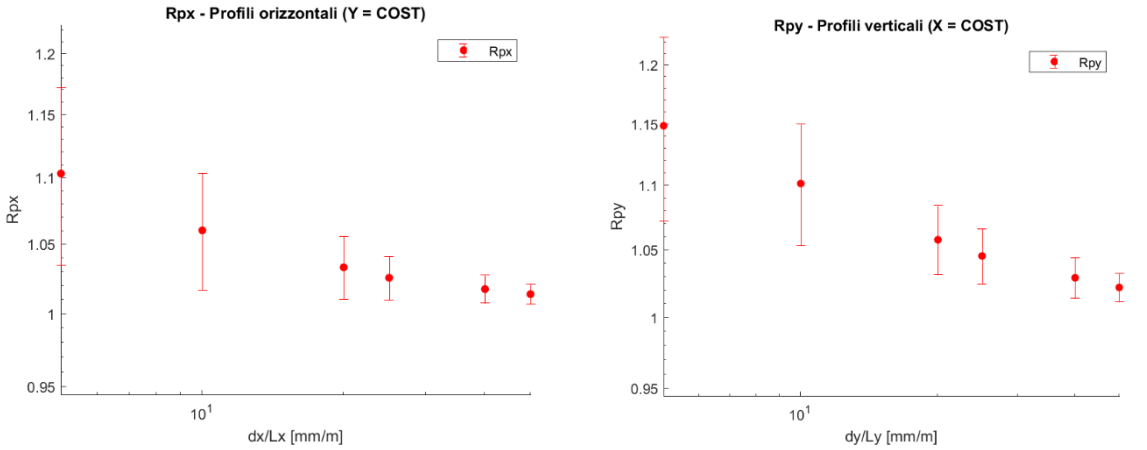


Figura 9.94 Parete 3: Rpx (profili y=cost) ed Rpy (profili x = cost).

Tabella 9.14 Parete 3 riepilogo dello studio statistico dei parametri di scabrezza Z_2 ed Rp per i diversi intervalli di campionamento.

Parete 3 [7m x 7m]						
X_passo_norm [mm/m]	**50**	**40**	**25**	**20**	**10**	**5**
Z2X mean	0,162	0,182	0,222	0,256	0,366	0,525
Z2X min	0,104	0,106	0,120	0,131	0,165	0,203
Z2X max	0,344	0,405	0,481	0,658	1,018	1,369
Z2X Standard Deviation	0,040	0,051	0,071	0,093	0,160	0,238
RPX mean	1,014	1,017	1,025	1,033	1,060	1,103
RPX min	1,005	1,006	1,007	1,009	1,013	1,020
RPX max	1,055	1,071	1,095	1,155	1,253	1,338
RPX Standard Deviation	0,007	0,010	0,016	0,023	0,043	0,069
Y_passo_norm [mm/m]	**50**	**40**	**25**	**20**	**10**	**5**
Z2Y mean	0,206	0,239	0,306	0,350	0,489	0,633
Z2Y min	0,124	0,154	0,194	0,227	0,314	0,374
Z2Y max	0,353	0,486	0,627	0,610	0,942	1,388
Z2Y Standard Deviation	0,050	0,063	0,074	0,086	0,137	0,211
RPY mean	1,022	1,029	1,045	1,057	1,101	1,148
RPY min	1,008	1,012	1,019	1,025	1,046	1,063
RPY max	1,056	1,096	1,130	1,145	1,260	1,388
RPY Standard Deviation	0,010	0,015	0,021	0,026	0,048	0,076

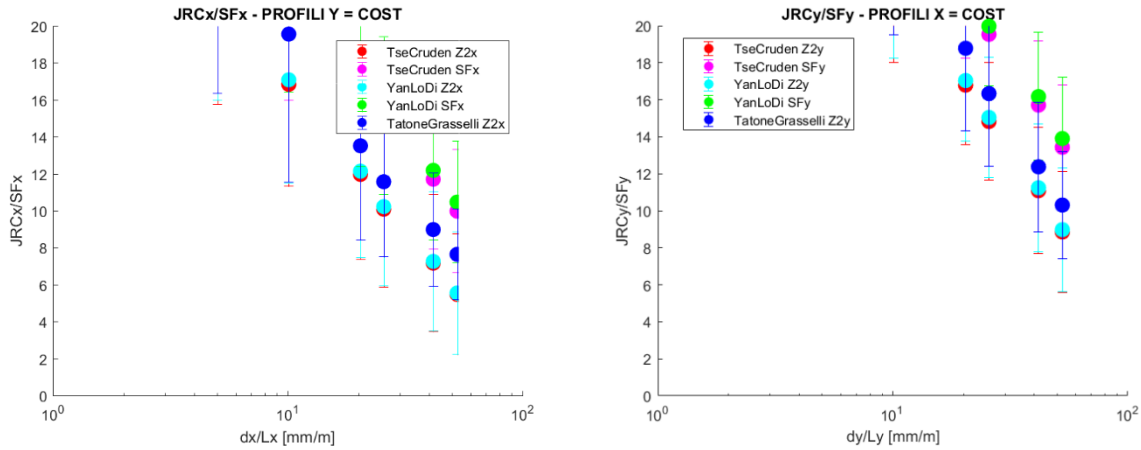


Figura 9.95 JRC Parete 3, 7m x 7m, lungo le direzioni x e y.

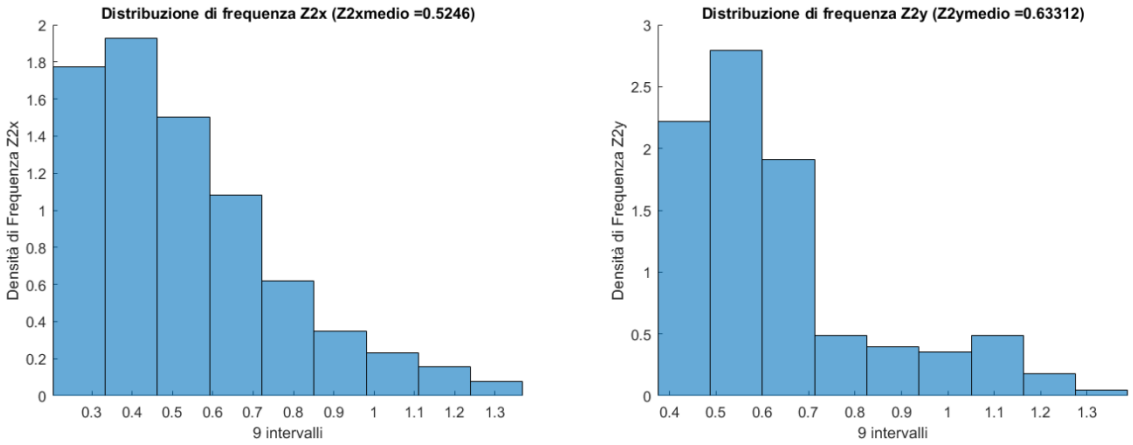


Figura 9.96 Parete3: distribuzione di frequenza per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 5mm/m.

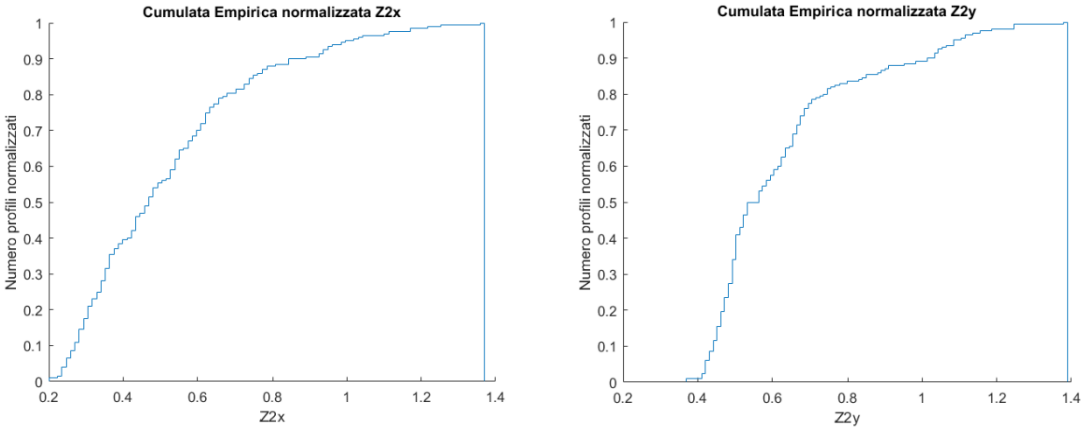


Figura 9.97 Parete3: frequenza cumulata per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 5mm/m.

9.1.12. Scheda – parete 3 ridotta– 1.5m x 1.5m

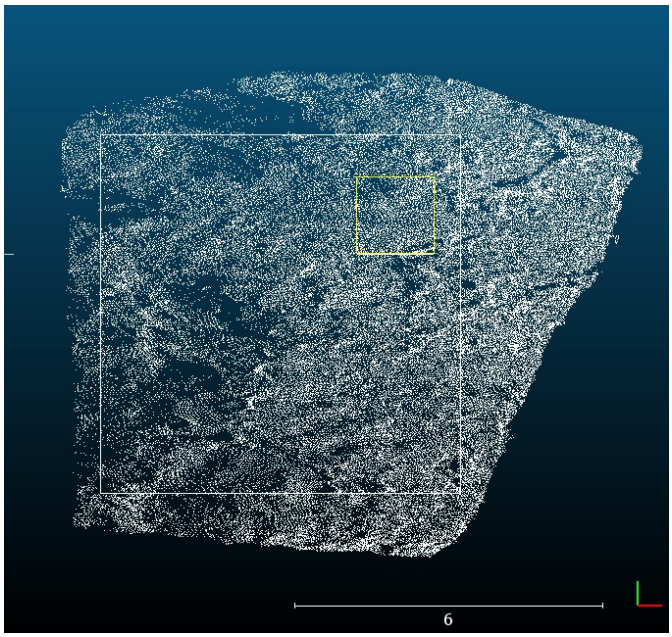


Figura 9.98 Parete3-ridotta: nuvola di punti sparsi, superficie orginale 7m x 7m e superficie ridotta 1.5m x 1.5m.

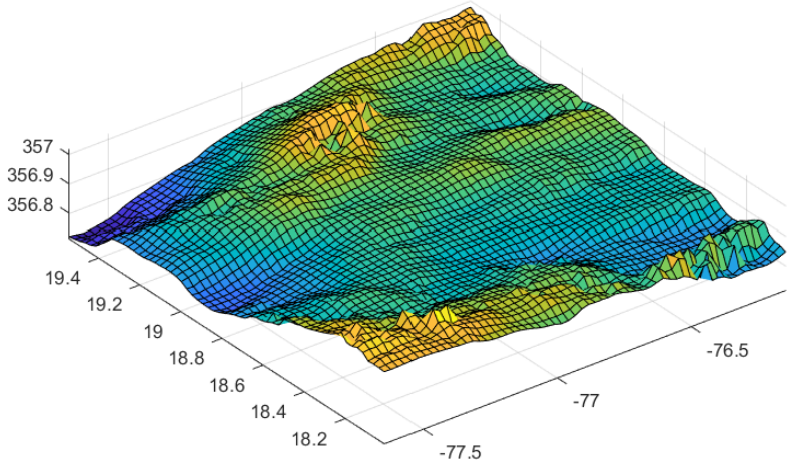


Figura 9.99 Parete3-ridotta: DSM dopo la rotazione del piano che approssima la superficie sul piano orizzontale.

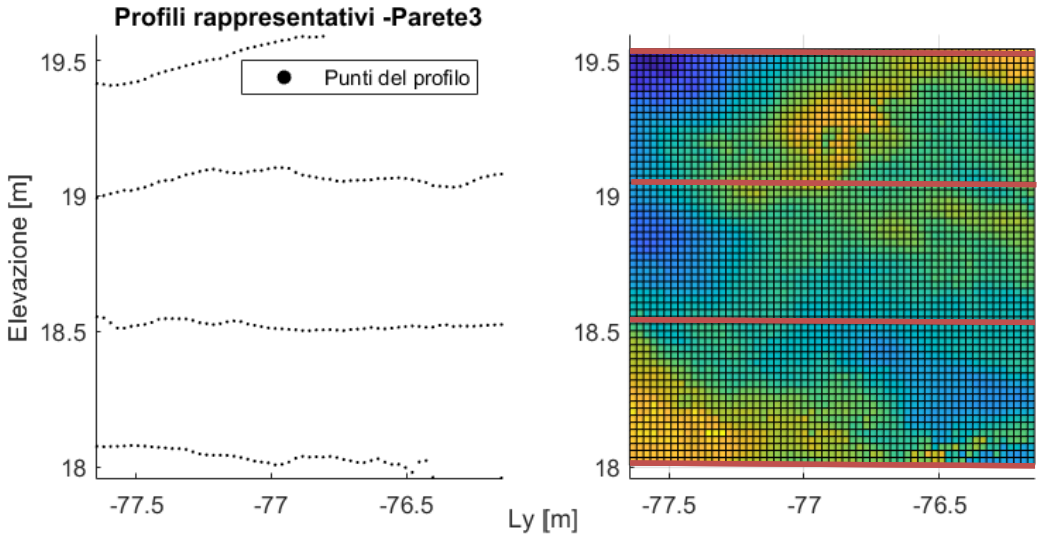


Figura 9.100 Parete3-ridotta, analisi della superficie dell'elemento: estrazione di quattro profili orizzontali.

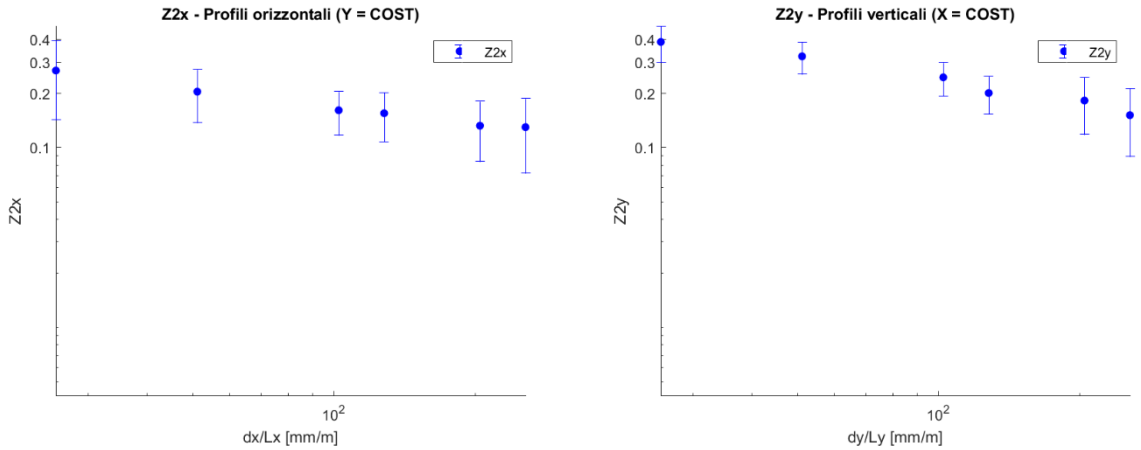


Figura 9.101 Parete 3-ridotta: Z_{2x} (profili y=cost) ed Z_{2y} (profili x = cost).

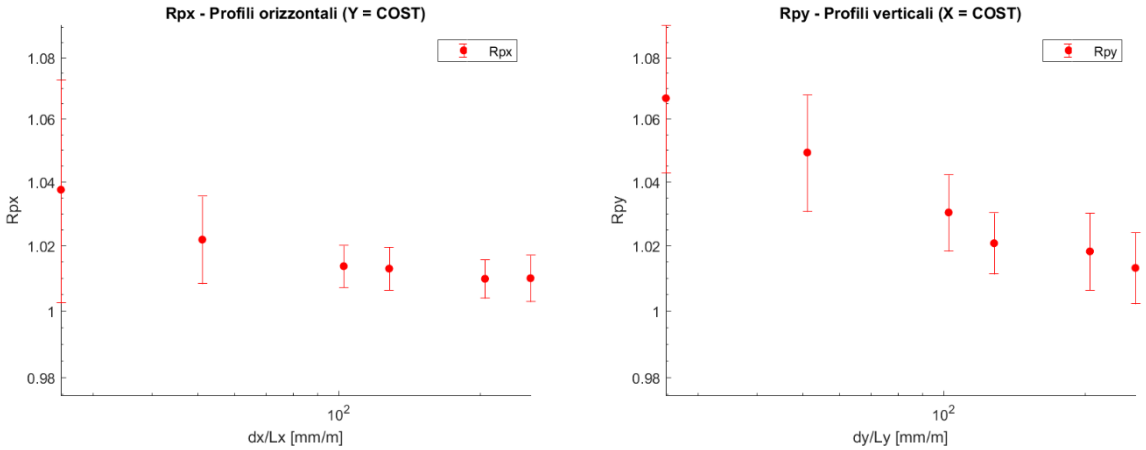


Figura 9.102 Parete 3-ridotta: Rpx (profili y=cost) ed Rpy (profili x = cost).

Tabella 9.15 Parete 3-ridotta: riepilogo dello studio statistico dei parametri di scabrezza Z_2 ed Rp per i diversi intervalli di campionamento.

Parete 3 [1.5m x 1.5 m]						
X_passo_norm [mm/m]	**256**	**205**	**128**	**103**	**51**	**26**
Z2X mean	0,130	0,132	0,155	0,161	0,204	0,267
Z2X min	0,013	0,011	0,037	0,046	0,066	0,101
Z2X max	0,223	0,215	0,228	0,225	0,420	0,726
Z2X Standard Deviation	0,058	0,048	0,047	0,044	0,067	0,125
RPX mean	1,010	1,010	1,013	1,014	1,022	1,037
RPX min	1,000	1,000	1,001	1,001	1,002	1,005
RPX max	1,025	1,023	1,025	1,025	1,074	1,184
RPX Standard Deviation	0,007	0,006	0,007	0,006	0,014	0,035
Y_passo_norm [mm/m]	**256**	**205**	**128**	**103**	**51**	**26**
Z2Y mean	0,151	0,182	0,201	0,245	0,321	0,386
Z2Y min	0,059	0,090	0,099	0,146	0,223	0,253
Z2Y max	0,290	0,306	0,292	0,343	0,486	0,611
Z2Y Standard Deviation	0,062	0,064	0,047	0,052	0,065	0,088
RPY mean	1,013	1,018	1,021	1,030	1,049	1,067
RPY min	1,002	1,004	1,005	1,011	1,024	1,031
RPY max	1,041	1,045	1,042	1,055	1,101	1,123
RPY Standard Deviation	0,011	0,012	0,009	0,012	0,019	0,024

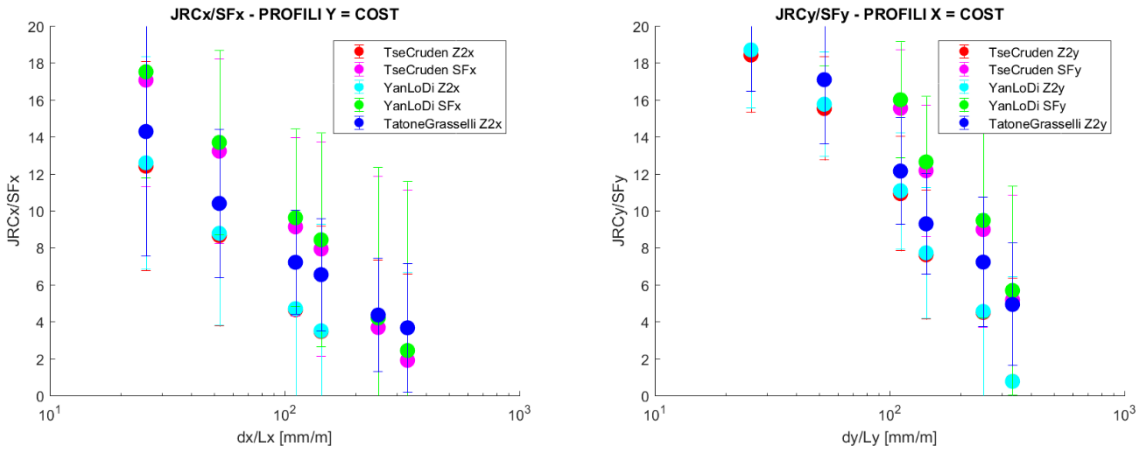


Figura 9.103 JRC Parete 3-ridotta, 1,5m x 1,5m, lungo le direzioni x e y.

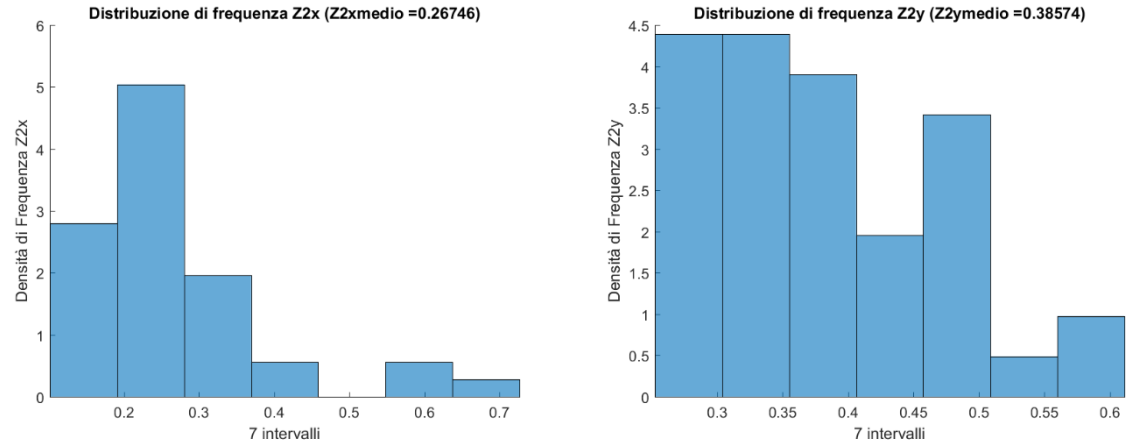


Figura 9.104 Parete3-ridotta: distribuzione di frequenza per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 26mm/m.

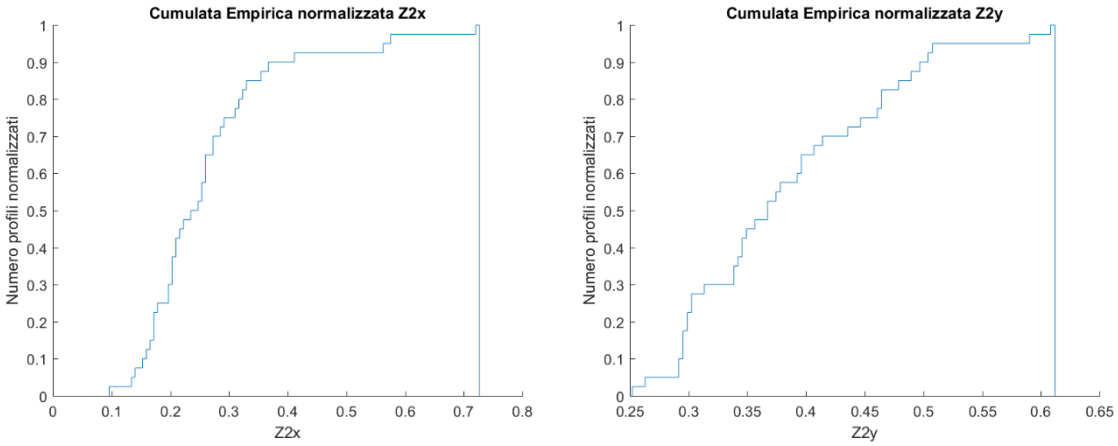


Figura 9.105 Parete3-ridotta: frequenza cumulata per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 26mm/m.

9.1.13. Scheda – parete 4 – 4x4m

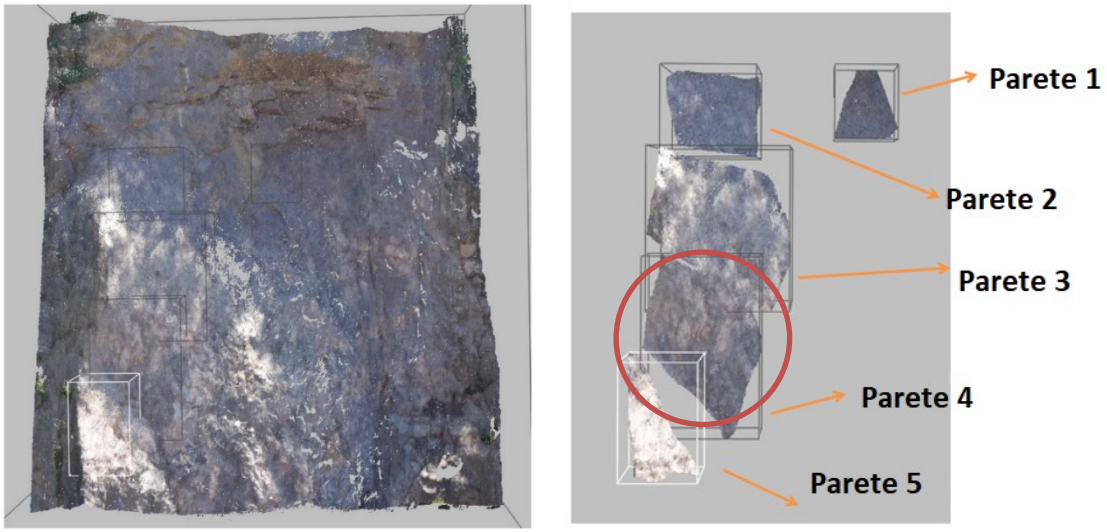


Figura 9.106 Versante: DSM nella sua interezza e le cinque porzioni usate nel presente lavoro di tesi. Nel cerchio rosso è evidenziata la parete 4.

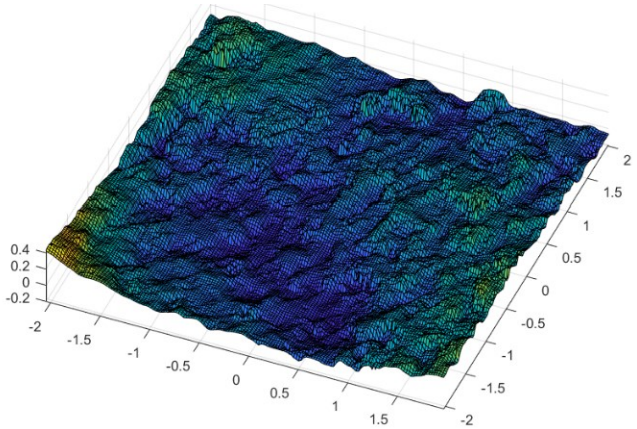


Figura 9.107 Parete4: DSM dopo la rotazione del piano che approssima la superficie sul piano orizzontale.

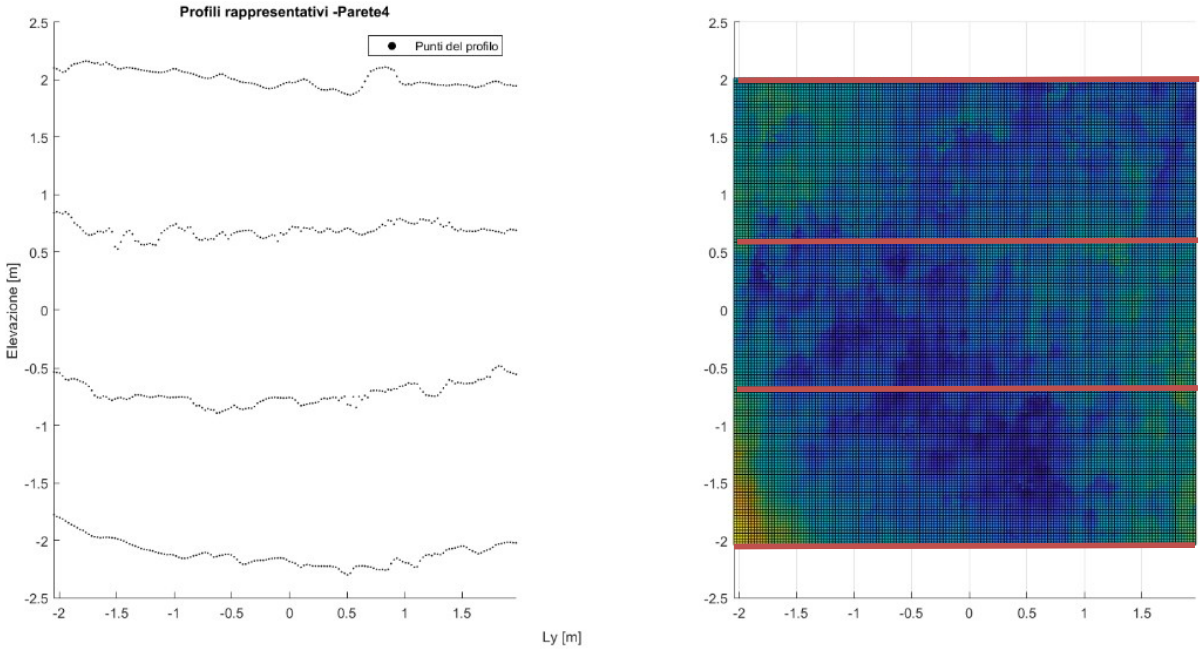


Figura 9.108 Parete4, analisi della superficie dell'elemento: estrazione di quattro profili orizzontali.

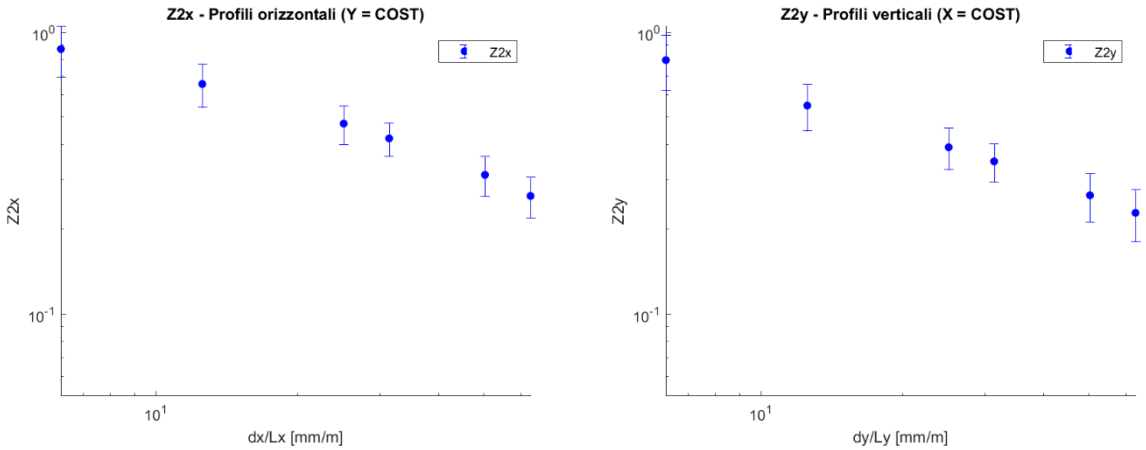


Figura 9.109 Parete 4: Z_{2x} (profili y=cost) ed Z_{2y} (profili x = cost).

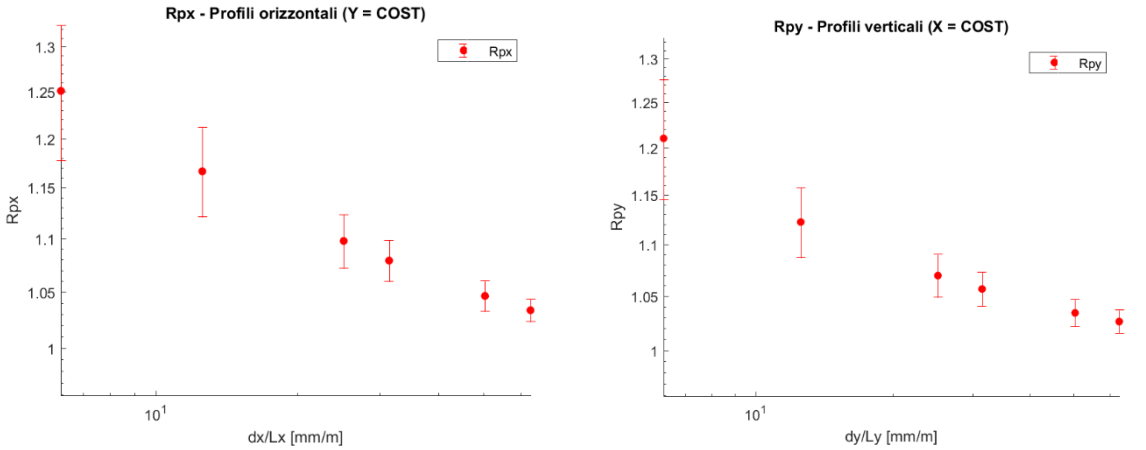


Figura 9.110 Parete 4: Rpx (profili y=cost) ed Rpy (profili x = cost).

Tabella 9.16 Parete 4: riepilogo dello studio statistico dei parametri di scabrezza Z_2 ed R_p per i diversi intervalli di campionamento.

Parete 4 [4 m x 4 x]						
X_passo_norm [mm]	**63**	**50**	**32**	**25**	**13**	**6**
Z2X mean	0,262	0,311	0,419	0,473	0,654	0,870
Z2X min	0,173	0,218	0,321	0,335	0,448	0,500
Z2X max	0,364	0,435	0,584	0,715	0,970	1,501
Z2X Standard Deviation	0,043	0,050	0,057	0,074	0,114	0,181
RPX mean	1,033	1,046	1,079	1,098	1,166	1,251
RPX min	1,015	1,023	1,048	1,053	1,088	1,098
RPX max	1,060	1,083	1,144	1,189	1,297	1,501
RPX Standard Deviation	0,010	0,014	0,019	0,026	0,046	0,074
Y_passo_norm [mm]	**63**	**50**	**32**	**25**	**13**	**6**
Z2Y mean	0,228	0,263	0,347	0,390	0,548	0,795
Z2Y min	0,130	0,137	0,221	0,264	0,367	0,475
Z2Y max	0,370	0,432	0,492	0,655	0,888	1,443
Z2Y Standard Deviation	0,048	0,052	0,053	0,065	0,102	0,177
RPY mean	1,026	1,034	1,057	1,069	1,122	1,210
RPY min	1,008	1,009	1,024	1,034	1,062	1,099
RPY max	1,064	1,080	1,107	1,157	1,239	1,439
RPY Standard Deviation	0,011	0,013	0,016	0,021	0,035	0,065

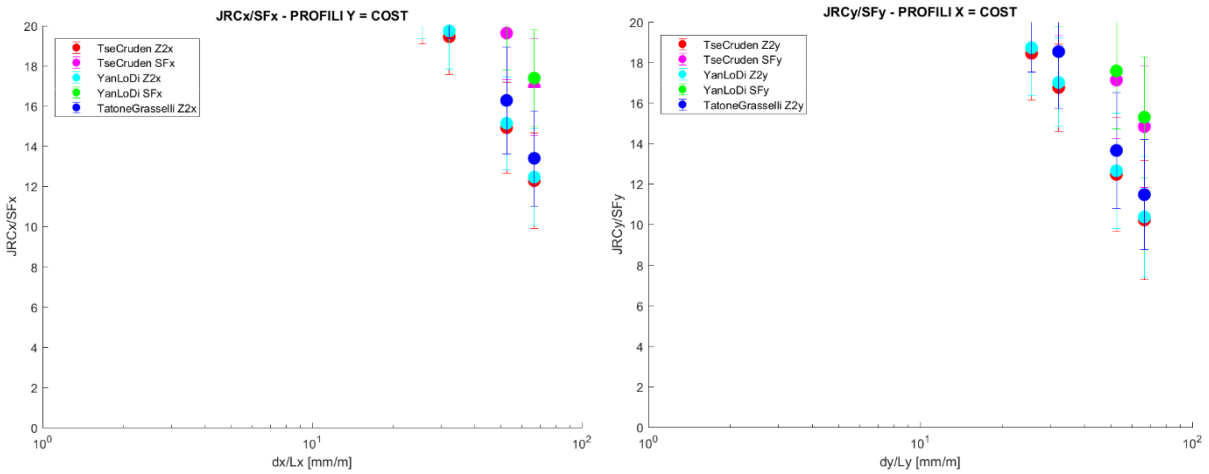


Figura 9.111 JRC Parete 4, 4m x 4m, lungo le direzioni x e y.

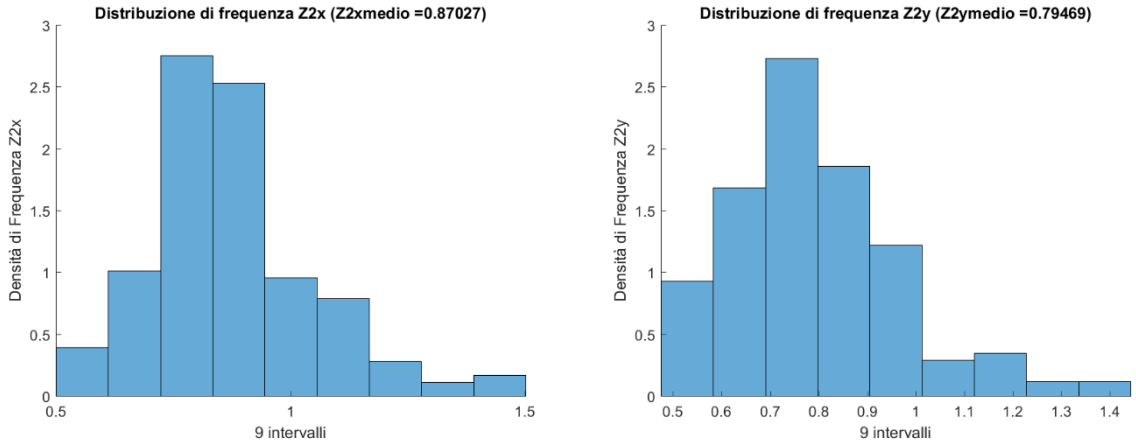


Figura 9.112 Parete4: distribuzione di frequenza per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 6mm/m .

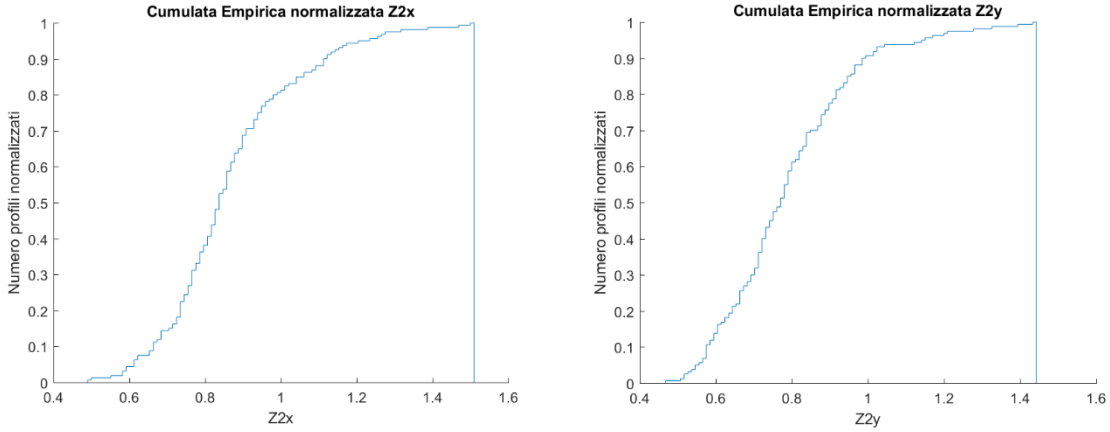


Figura 9.113 Parete4: frequenza cumulata per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 6mm/m.

9.1.14. Scheda – parete 4 ridotta – 2x2m

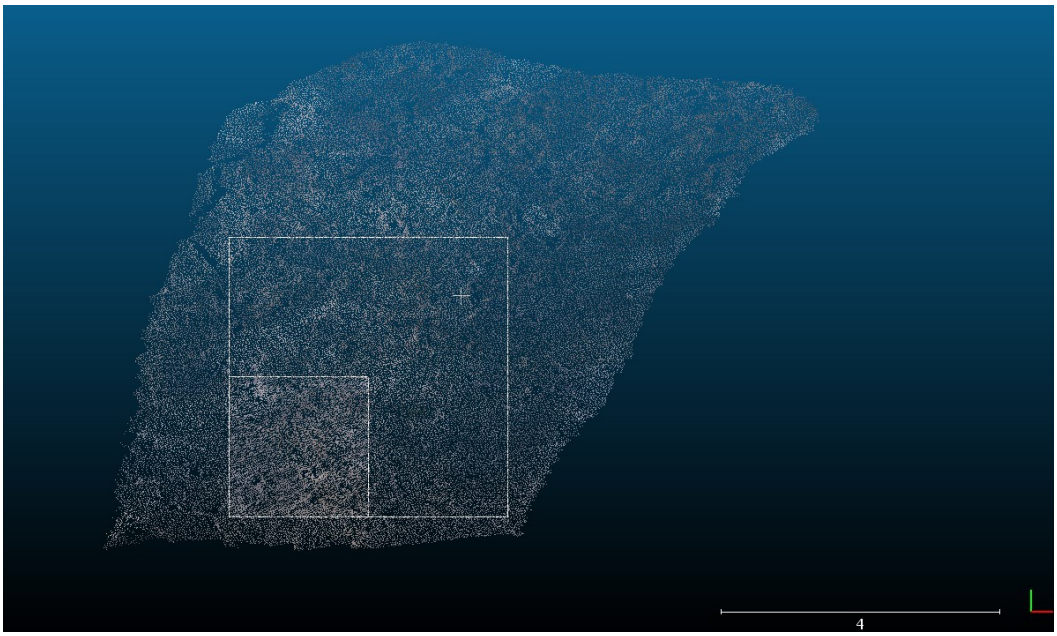


Figura 9.114 Parete4-ridotta: nuvola di punti sparsi, superficie orginale 4m x 4m e superficie ridotta 2m x 2m.

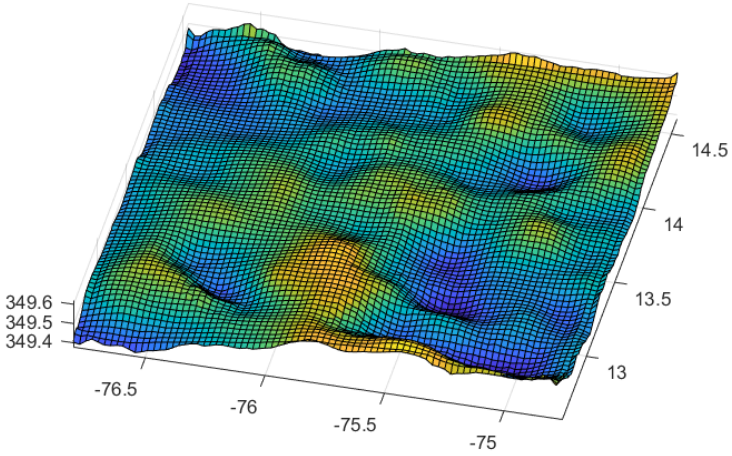


Figura 9.115 Parete4-ridotta: DSM dopo la rotazione del piano che approssima la superficie sul piano orizzontale.

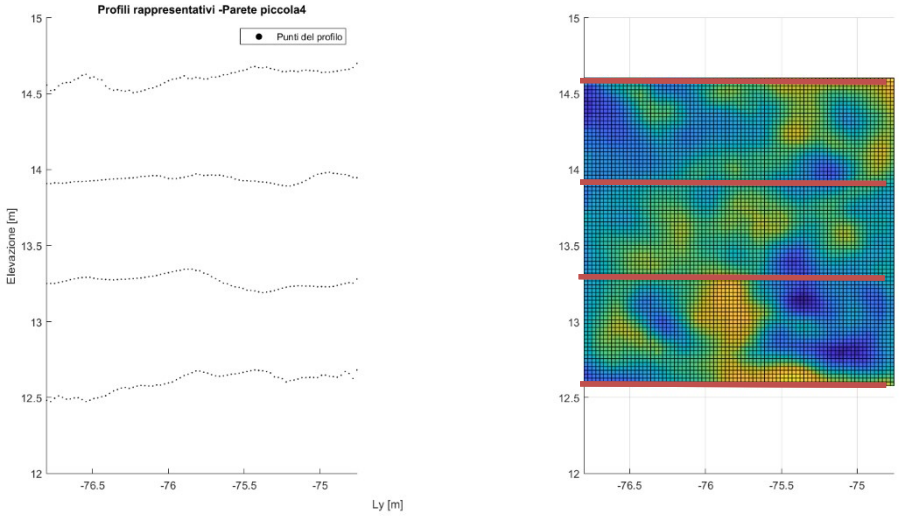


Figura 9.116 Parete4-ridotta, analisi della superficie dell'elemento: estrazione di quattro profili orizzontali.

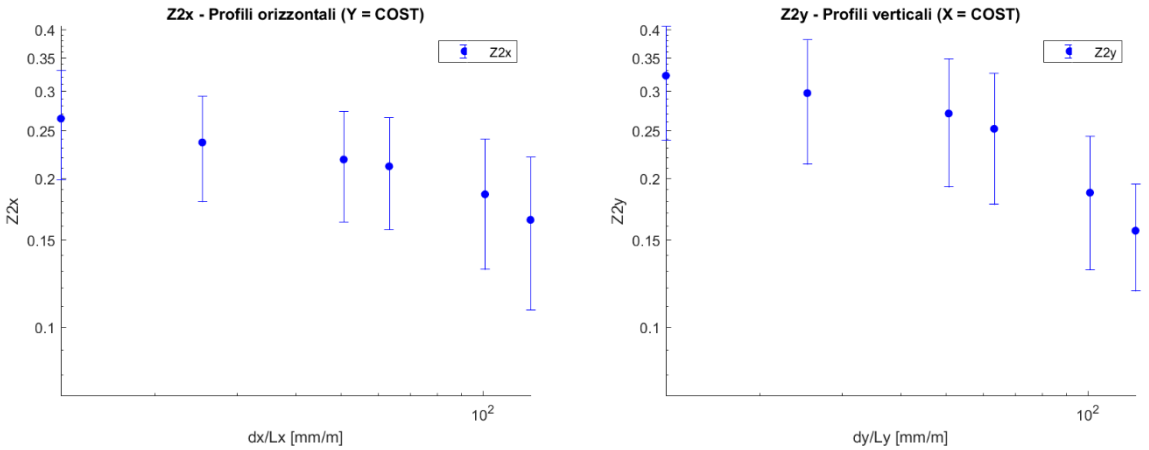


Figura 9.117 Parete 4-ridotta: Z_{2x} (profili y=cost) ed Z_{2y} (profili x = cost).

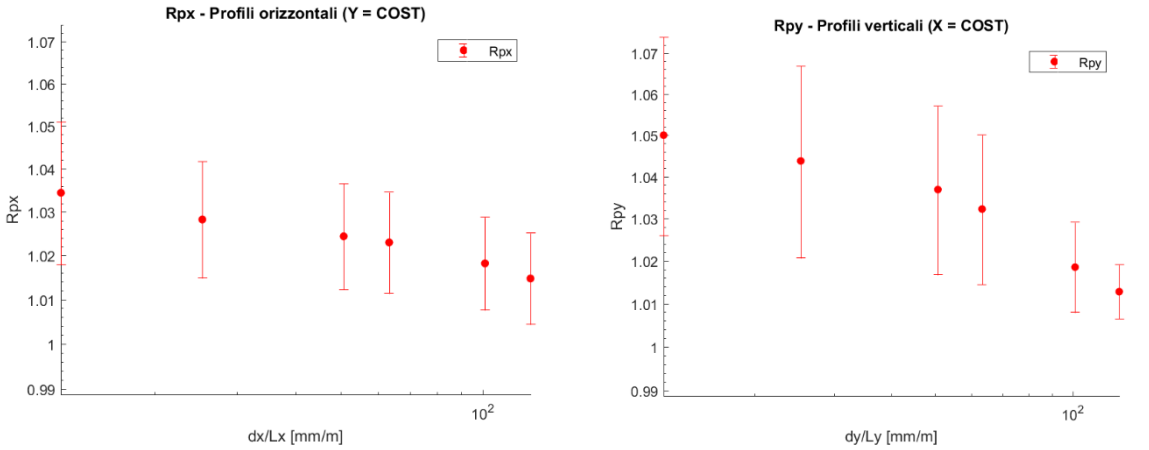


Figura 9.118 Parete 4-ridotta: Rpx (profili y=cost) ed Rpy (profili x = cost).

Tabella 9.17 Parete 4-ridotta: riepilogo dello studio statistico dei parametri di scabrezza Z_2 ed Rp per i diversi intervalli di campionamento.

Parete 4 (2 x 2 m)						
X_passo_norm [mm]	**127**	**101**	**63**	**51**	**25**	**13**
Z2X mean	0,165	0,185	0,211	0,218	0,236	0,264
Z2X min	0,065	0,066	0,126	0,123	0,150	0,165
Z2X max	0,313	0,318	0,326	0,339	0,359	0,470
Z2X Standard Deviation	0,056	0,055	0,054	0,055	0,057	0,066
RPX mean	1,015	1,018	1,023	1,024	1,028	1,034
RPX min	1,002	1,002	1,008	1,008	1,011	1,013
RPX max	1,047	1,049	1,050	1,054	1,059	1,089
RPX Standard Deviation	0,010	0,011	0,012	0,012	0,013	0,017
Y_passo_norm [mm]	**127**	**101**	**63**	**51**	**25**	**13**
Z2Y mean	0,157	0,187	0,252	0,270	0,297	0,322
Z2Y min	0,073	0,102	0,135	0,151	0,168	0,192
Z2Y max	0,249	0,305	0,397	0,419	0,453	0,484
Z2Y Standard Deviation	0,038	0,056	0,074	0,078	0,084	0,084
RPY mean	1,013	1,019	1,032	1,037	1,044	1,050
RPY min	1,003	1,005	1,009	1,011	1,014	1,017
RPY max	1,030	1,044	1,069	1,081	1,091	1,100
RPY Standard Deviation	0,006	0,011	0,018	0,020	0,023	0,024

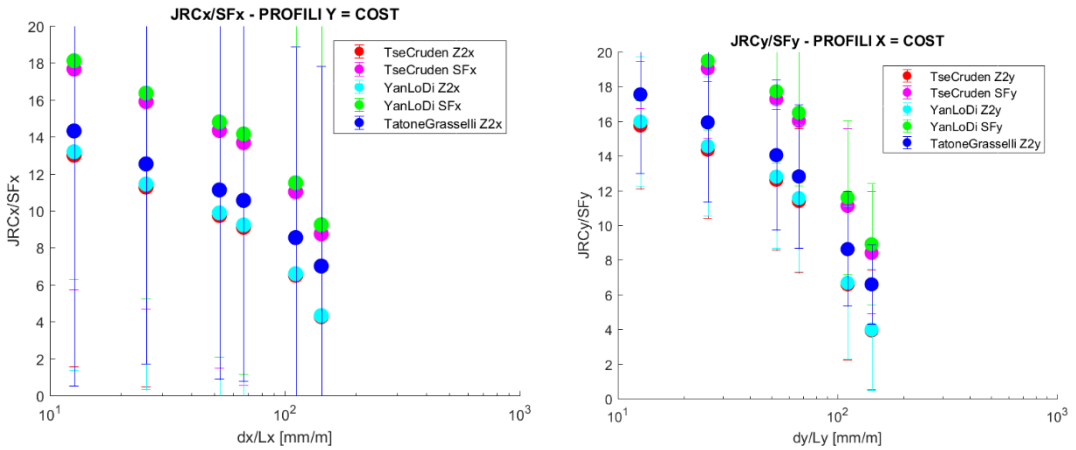


Figura 9.119 JRC Parete 4-ridotta, 2m x 2m, lungo le direzioni x e y.

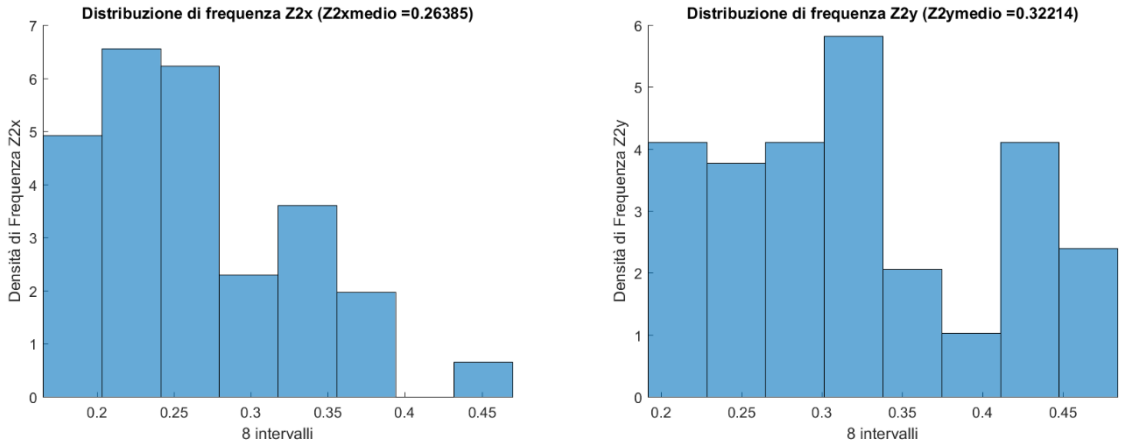


Figura 9.120 Parete4-ridotta:distribuzione di frequenza per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 13mm/m.

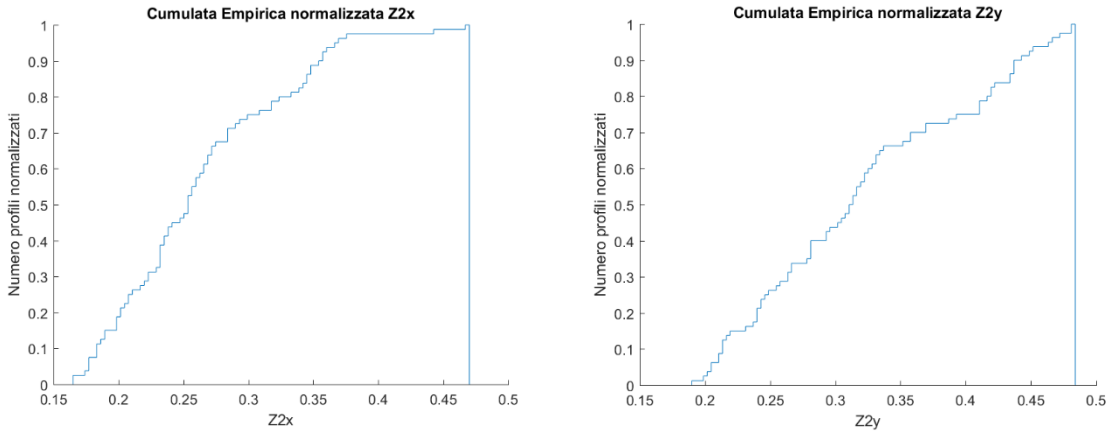


Figura 9.121 Parete4-ridotta: frequenza cumulata per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 13mm/m.

9.1.15. Scheda – parete 5 – 2x2m

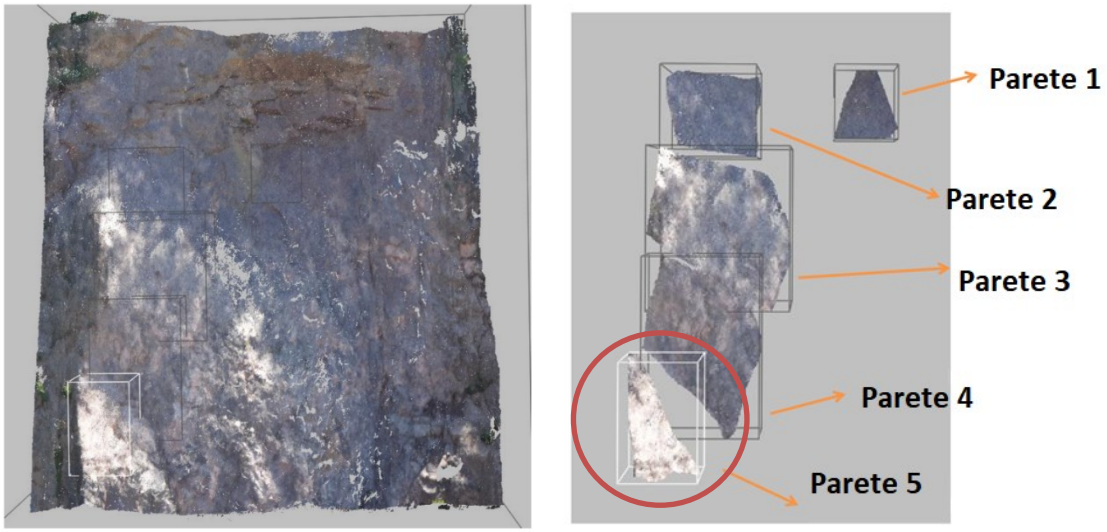


Figura 9.122 Versante: DSM nella sua interezza e le cinque porzioni usate nel presente lavoro di tesi. Nel cerchio rosso è evidenziata la parete 5.

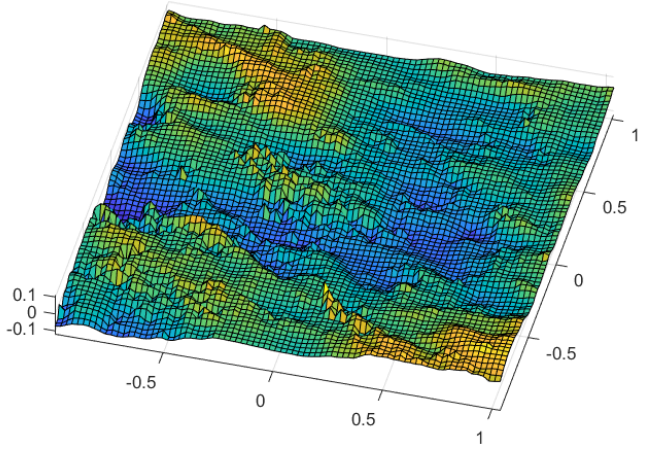


Figura 9.123 Parete5: DSM dopo la rotazione del piano che approssima la superficie sul piano orizzontale.

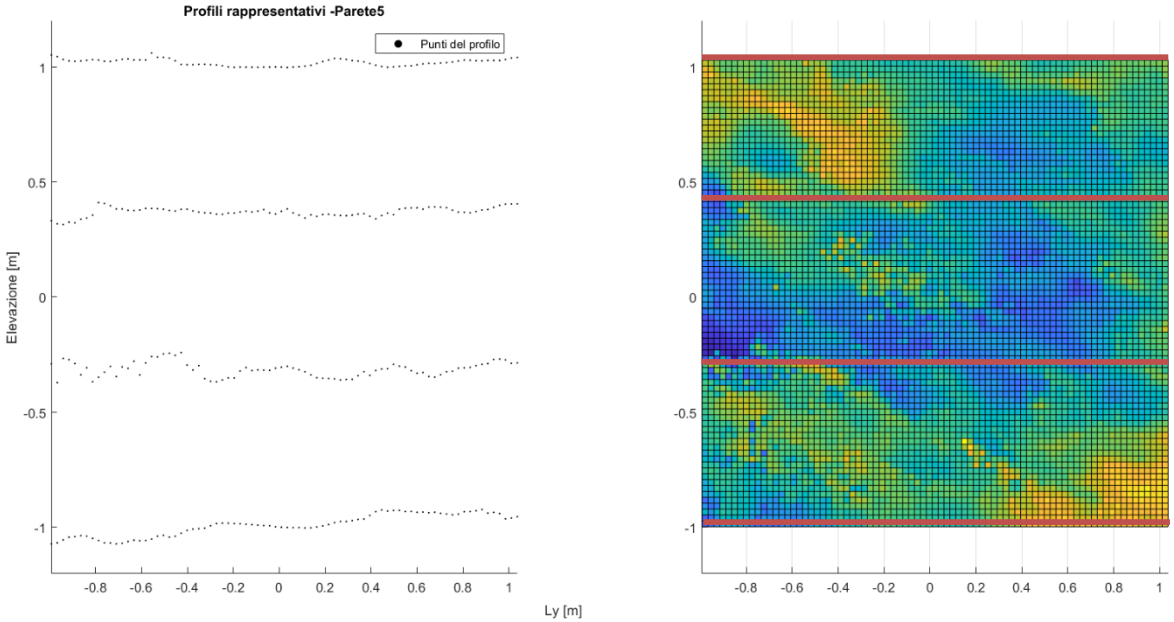


Figura 9.124 Parete5, analisi della superficie dell'elemento: estrazione di quattro profili orizzontali.

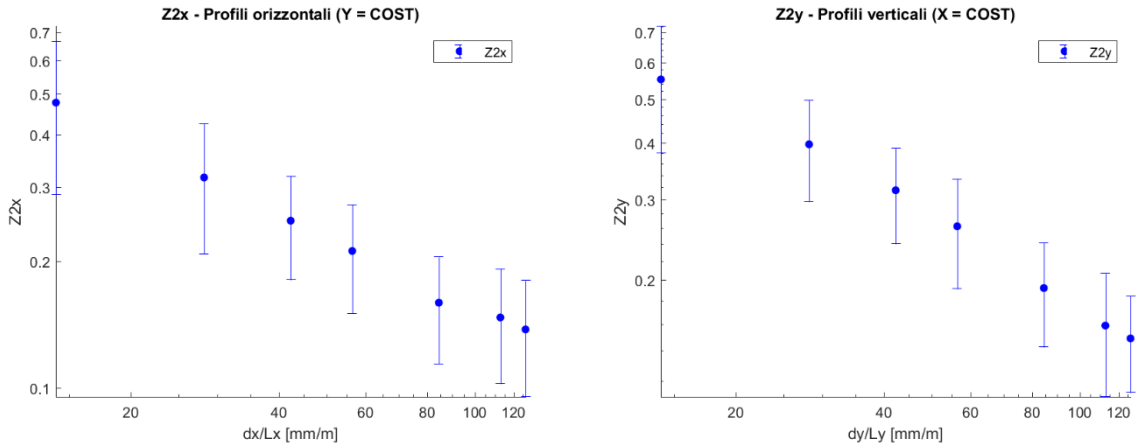


Figura 9.125 Parete 5: Z_{2x} (profili y=cost) ed Z_{2y} (profili x = cost).

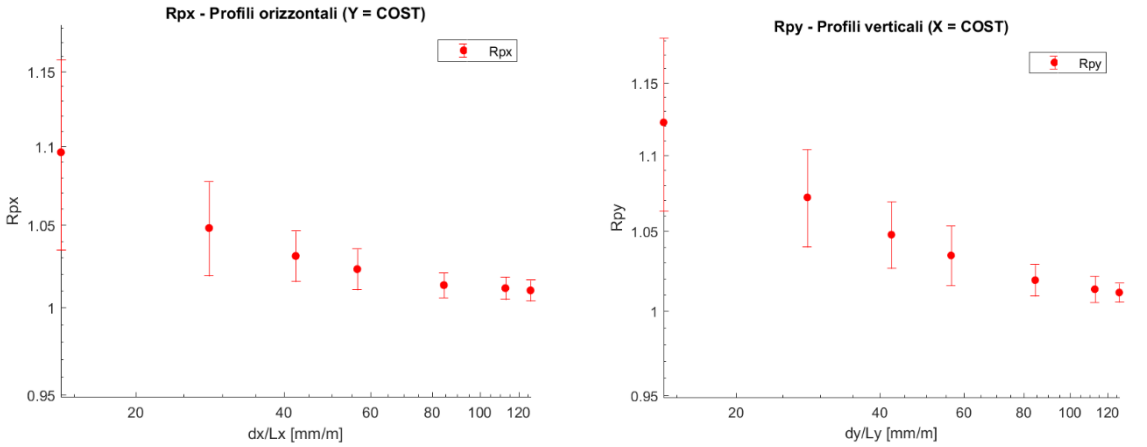


Figura 9.126 Parete 5: Rpx (profili y=cost) ed Rpy (profili x = cost).

Tabella 9.18 Parete 5: riepilogo dello studio statistico dei parametri di scabrezza Z_2 ed Rp per i diversi intervalli di campionamento.

Parete 5 [2m x 2m]							
X_passo_norm [mm/m]	**127**	**113**	**85**	**56**	**42**	**28**	**14**
Z2X mean	0,138	0,147	0,159	0,212	0,250	0,316	0,476
Z2X min	0,050	0,062	0,066	0,089	0,115	0,158	0,179
Z2X max	0,252	0,270	0,314	0,369	0,418	0,650	1,215
Z2X Standard Deviation	0,042	0,045	0,045	0,061	0,069	0,108	0,188
RPX mean	1,010	1,012	1,013	1,023	1,031	1,048	1,096
RPX min	1,001	1,002	1,002	1,004	1,007	1,012	1,015
RPX max	1,031	1,034	1,047	1,058	1,073	1,148	1,343
RPX Standard Deviation	0,006	0,007	0,007	0,012	0,015	0,029	0,062
Y_passo_norm [mm/m]	**127**	**113**	**85**	**56**	**42**	**28**	**14**
Z2Y mean	0,149	0,159	0,192	0,262	0,315	0,397	0,552
Z2Y min	0,095	0,062	0,112	0,143	0,160	0,189	0,215
Z2Y max	0,261	0,292	0,303	0,517	0,550	0,700	1,061
Z2Y Standard Deviation	0,036	0,048	0,049	0,071	0,075	0,100	0,171
RPY mean	1,012	1,014	1,019	1,035	1,048	1,072	1,122
RPY min	1,005	1,002	1,006	1,010	1,013	1,017	1,023
RPY max	1,032	1,041	1,044	1,119	1,121	1,191	1,324
RPY Standard Deviation	0,006	0,008	0,010	0,019	0,021	0,032	0,059

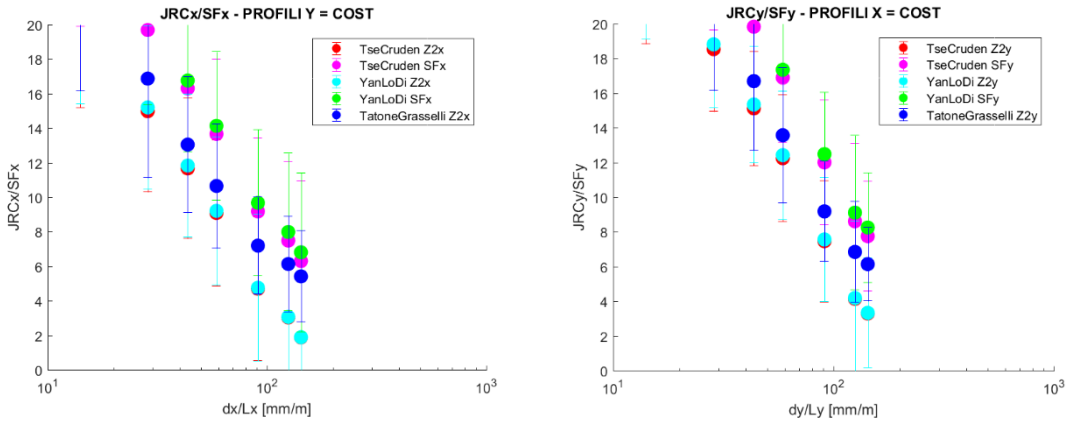


Figura 9.127 JRC Parete 5, 2m x 2m, lungo le direzioni x e y.

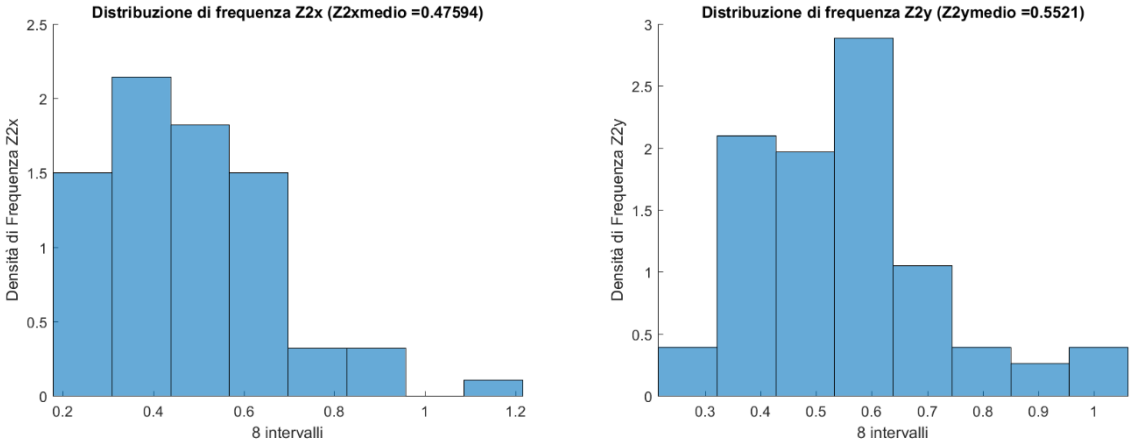


Figura 9.128 Parete5: distribuzione di frequenza per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 14mm/m.

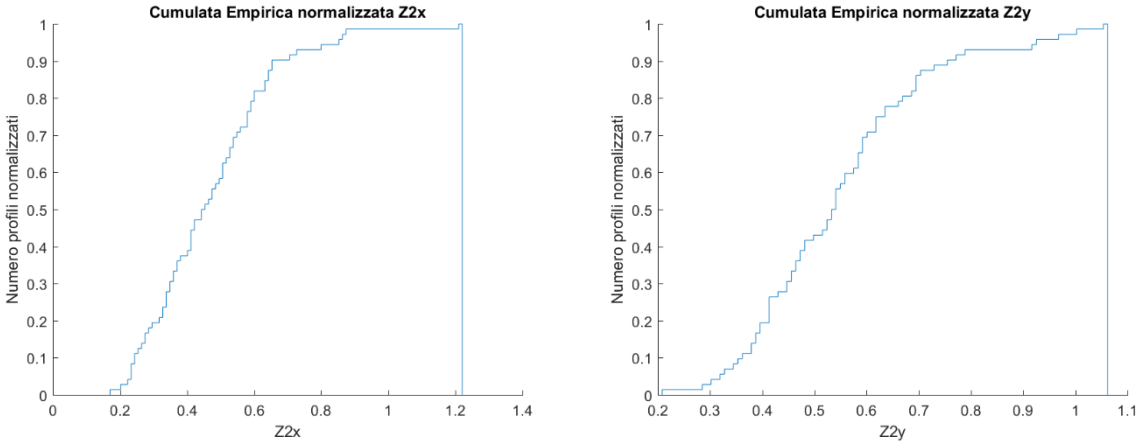


Figura 9.129 Parete5: frequenza cumulata per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 14mm/m.

9.1.16. Scheda - parete 5 ridotta– 1m x 1m

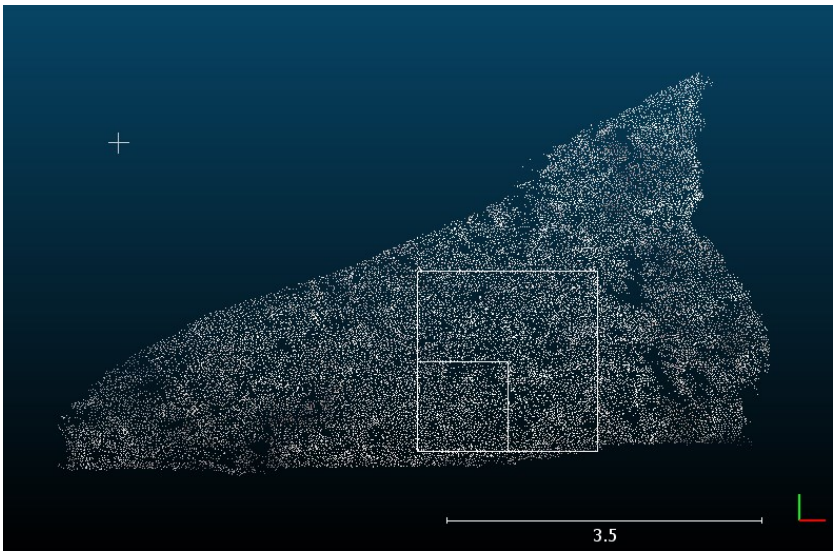


Figura 9.130 Parete5-ridotta: nuvola di punti sparsi, superficie orginale 2m x 2m e superficie ridotta 1m x 1m.

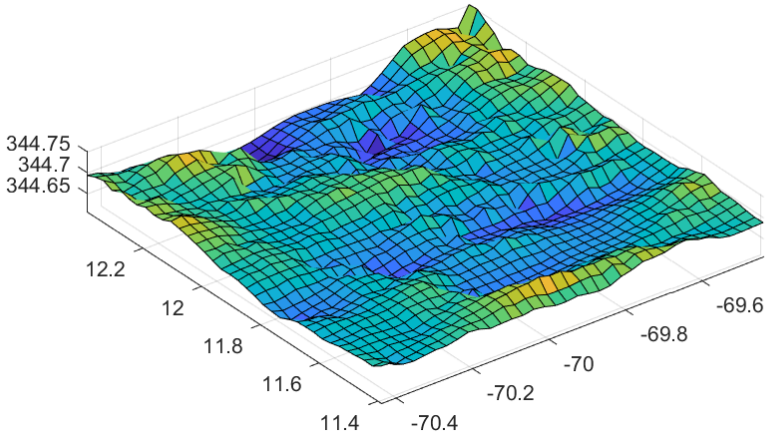


Figura 9.131 Parete5-ridotta: DSM dopo la rotazione del piano che approssima la superficie sul piano orizzontale.

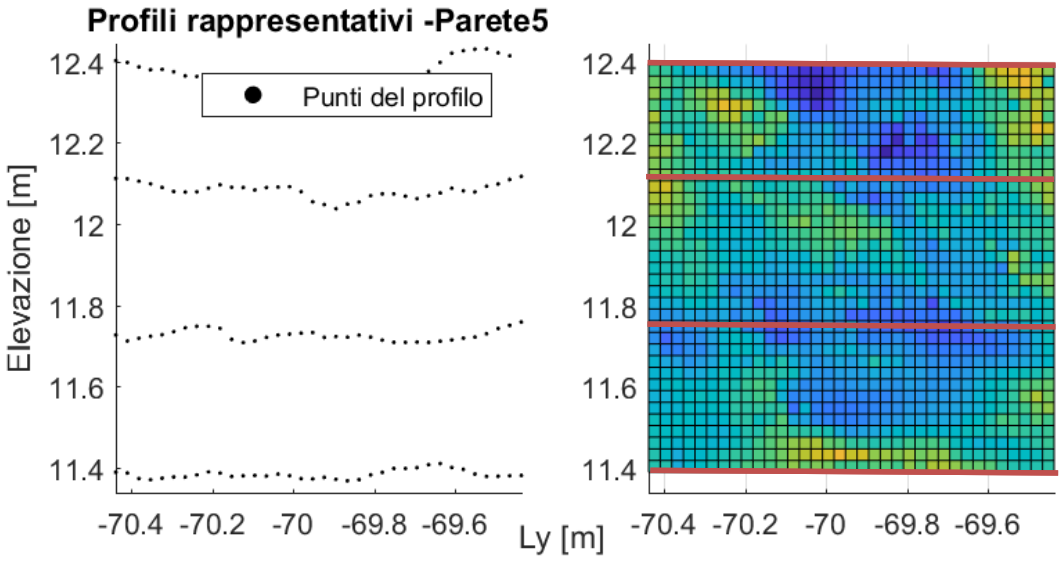


Figura 9.132 Parete5-ridotta, analisi della superficie dell'elemento: estrazione di quattro profili orizzontali.

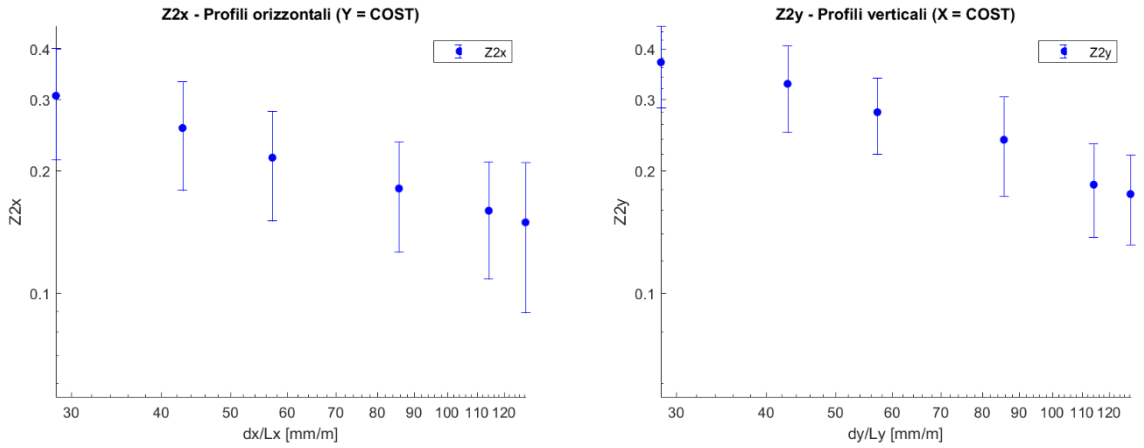


Figura 9.133 Parete 5-ridotta: Z_{2x} (profili y=cost) ed Z_{2y} (profili x = cost).

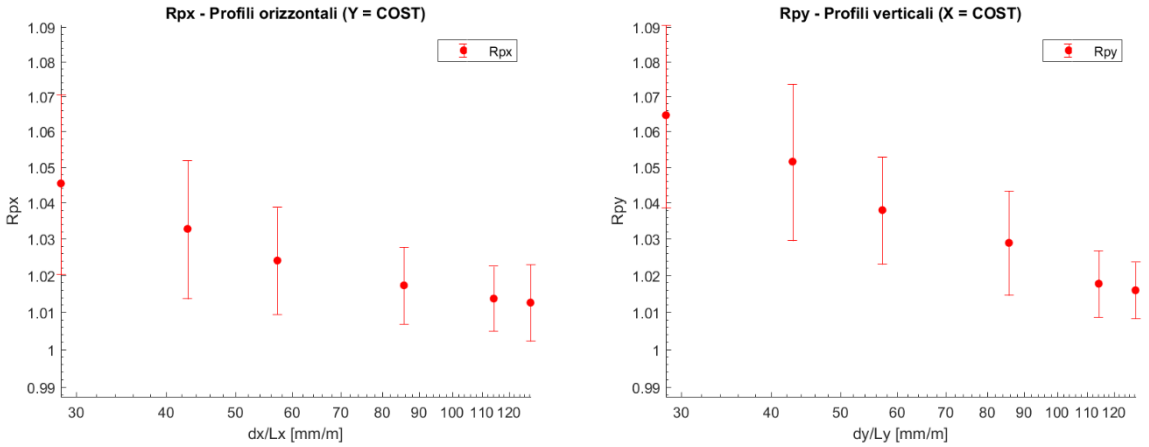


Figura 9.134 Parete 5-ridotta: Rpx (profili y=cost) ed Rpy (profili x = cost).

Tabella 9.19 Parete 5: riepilogo dello studio statistico dei parametri di scabrezza Z_2 ed Rp per i diversi intervalli di campionamento.

Parete 5 [1m x 1m]						
X_passo_norm [mm/m]	**129**	**114**	**86**	**57**	**43**	**29**
Z2X mean	0,149	0,159	0,180	0,215	0,255	0,306
Z2X min	0,072	0,071	0,101	0,118	0,162	0,165
Z2X max	0,306	0,289	0,310	0,387	0,433	0,567
Z2X Standard Deviation	0,059	0,051	0,054	0,065	0,076	0,094
RPX mean	1,012	1,014	1,0173	1,024	1,033	1,045
RPX min	1,003	1,003	1,005	1,007	1,013	1,013
RPX max	1,044	1,040	1,046	1,068	1,081	1,115
RPX Standard Deviation	0,0104	0,009	0,010	0,014	0,019	0,025
Y_passo_norm [mm/m]	**129**	**114**	**86**	**57**	**43**	**29**
Z2Y mean	0,175	0,184	0,238	0,278	0,327	0,370
Z2Y min	0,101	0,113	0,113	0,154	0,170	0,220
Z2Y max	0,262	0,301	0,341	0,411	0,459	0,514
Z2Y Standard Deviation	0,043	0,047	0,065	0,059	0,078	0,084
RPY mean	1,015	1,017	1,028	1,037	1,051	1,064
RPY min	1,005	1,006	1,006	1,011	1,014	1,023
RPY max	1,033	1,043	1,055	1,072	1,094	1,114
RPY Standard Deviation	0,008	0,009	0,014	0,015	0,022	0,026

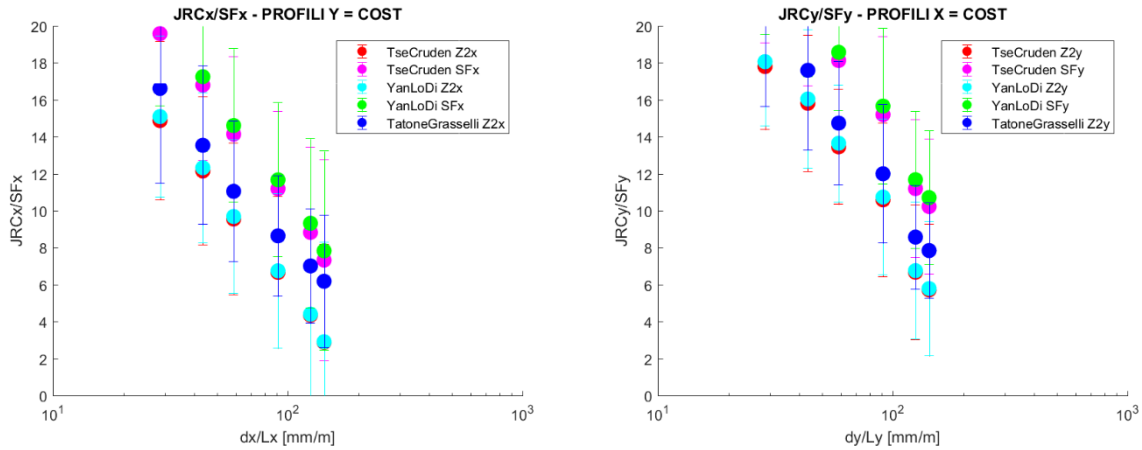


Figura 9.135 JRC Parete 5-ridotta, 1m x 1m, lungo le direzioni x e y.

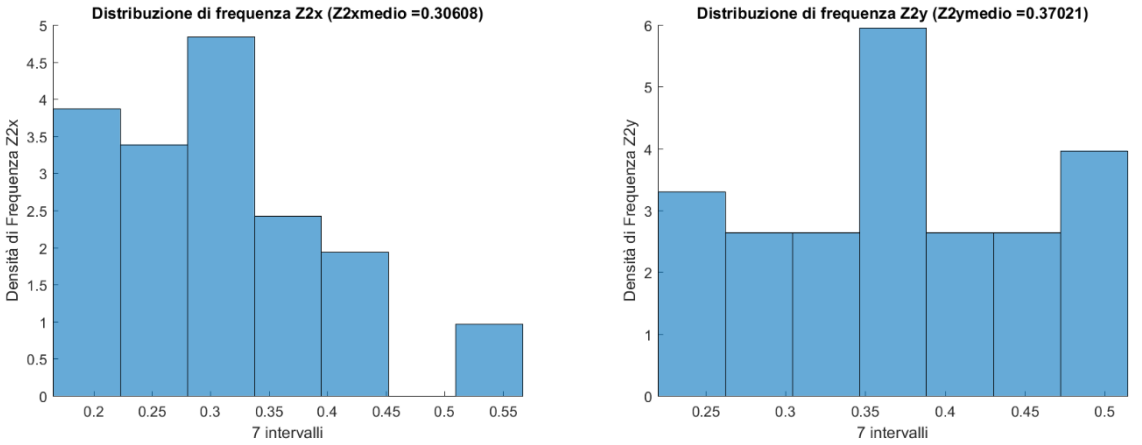


Figura 9.136 Parete5-ridotta: distribuzione di frequenza per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 29mm/m.

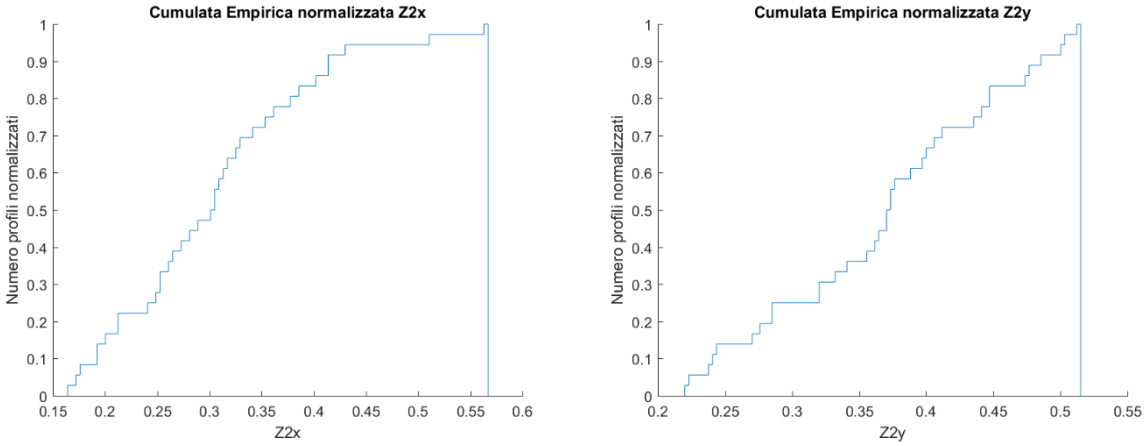


Figura 9.137 Parete5-ridotta: frequenza cumulata per i parametri Z_{2x} e Z_{2y} per un passo di campionamento di 29mm/m.

9.2. Codici matlab

9.2.1. rotazione_punti_piano_medio

```
%% Carico comi input il file .ASC della nuvola quadrata
 close all
 clear
[nome_file, directory] = uigetfile('*.*','Selezionare il file da aprire');
path=strcat(directory, nome_file);
files=dir(path);

for file=files'
     filePath = [file.folder '\'];
     fileName = file.name;
     [folder, baseFileName, extension]=fileparts(fileName);

    if(fileName ~= 0) %se il file esiste proseguo, altrimenti esco
     fileDeiPunti=[ filePath fileName];
     fprintf("Caricamento file di dati\n");
     datiDelFile=load(fileDeiPunti,'-ascii'); %colonne 1, 2 ,3 = dati;
colonne 4, 5 ,6 = colori
     punti=datiDelFile(:,1:3);
     fprintf("Dati caricati - Inizio elaborazione\n");

     %Dati i punti di ingresso, interpolo un piano medio con la funzione
fitPlane
     pianoInterpolato = fitPlane(punti); %piano interpolato = [x y z u1 u2
u3 v1 v2 v3]
     A2=pianoInterpolato(1:3);           % [x y z] = punto generico
appartenente al piano interpolato
     u=pianoInterpolato(4:6);            % [u1 u2 u3]
     v=pianoInterpolato(7:9);            % [v1 v2 v3] = due vettori
paralleli al piano e tra loro perpendicolari,
                                         % con origine nel punto [x y z]

     %normale al piano medio, calcolata come prodotto vettoriale dei due
precedenti vettori
     v_norm=cross(u,v);
     N2= v_norm; %lo rinomino
     N2n = normalizeVector3d(N2);
%% Disegno i punti, il piano interpolato ed i suoi vettori
figure('NumberTitle', 'off', 'Name', 'Dati di input')
hold on;
%terna del piano interpolato
drawVector3d(A2, u,'b','LineWidth',3)
drawVector3d(A2, v,'b','LineWidth',3)
drawVector3d(A2, v_norm,'b','LineWidth',3)
%punti di input
% drawPoint3d(punti,'ob');
%piano interpolato
drawPlane3d(pianoInterpolato, 'c') %piano interpolante i punti

%% Cerco il piano orizzontale che interseca il piano interpolato e passa
per il punto A2 definito in precedenza
%Un piano è rappresentato dal suo vettore perpendicolare;
N1n=[0 0 1]; %versore del piano orizzontale (è perpendicolare al piano
orizz.)
A1=A2; %sto per imporre che i due piani passino per lo stesso punto
[P,N,check]=plane_intersect(N1n,A1,N2,A2); %Intersezione tra il piano medio
ed il piano orizzontale passante per il punto comune A1
```

```
                                                %P punto appartenente
all'intersezione
                                                %N vettore che indica la
direzione dell'intersezione - segue le regole del prodotto vettoriale:
rotazione antioraria di N1 su N2
%% Terna normalizzata del piano orizzontale
NpianoH=cross(N1n,N); %vettore perpendicolare all'intersezione ed
appartenente al piano orizzontale
NpianoHn = normalizeVector3d(NpianoH); %versore

Nn = normalizeVector3d(N); %versore

figure('NumberTitle', 'off', 'Name', 'terna NORMALIZZATA piano orizzontale
alla quota piano medio')
hold on
%terna piano orizzontale
 drawVector3d(A1, N1n,'r','LineWidth',5)
 drawVector3d(A1, Nn,'r','LineWidth',5)
 drawVector3d(A1, NpianoHn,'r','LineWidth',5)
%piano orizzontale
 coo_pianoH=[A1 Nn NpianoHn]; %Piano orizzontale: A1= punto del piano;
                              %Nn e NpianoHn= vettori paralleli al piano ed
appartenenti ad esso
 drawPlane3d(coo_pianoH, 'm')
%% retta massima pendenza piano interpolato
retta_max_pend=cross(v_norm,Nn);
retta_max_pendn = normalizeVector3d(retta_max_pend);
drawVector3d(A1, retta_max_pendn,'-k','LineWidth',5);

%% Ruoto il piano medio su quello orizzontale
%% Identifico la linea di intersezione: intorno a questa avverrà la
rotazione:
PUNTO2=A1+Nn;
Linea_rotazione = createLine3d(A1, PUNTO2);
             %A1 = origine della linea
             %PUNTO2 = indiviuo la direzione della linea, a partire da A1
%% Calcolo l'angolo tra il piano orizzontale e quello interpolato: angolo
di rotazione
%angolo tra Nmaxpendenza ed NpianoH
cos_ang=dot(NpianoHn, retta_max_pendn);
angle_tn=acosd((cos_ang/(norm(retta_max_pendn)*norm(NpianoHn))));
angleInRadians = degtorad(angle_tn);

%CONDIZIONE PER FARLO RUOTATE DELL'ANGOLO GIUSTO%
if angleInRadians>(pi/2) %se l'angolo è maggiore di 90 grandi, cambialo e
prendi quello acuto
    angleInRadians=(pi-angleInRadians);
end

angolo_rot=angleInRadians*-1; %ruota dell'angolo opposto a quello
identificato

%% Matrice di rotazione nello spazio (4x4)- rotazione intorno all'asse
generico -> retta intersezione
rot = createRotation3dLineAngle(Linea_rotazione, angolo_rot); %definisce la
Matrice di rotazione nello spazio
prova_rotazioneOK = transformPoint3d(punti, rot); %calcola le coordinate
dei punti ruotati

%% Verifiche grafiche
figure('NumberTitle', 'off', 'Name', 'verifica piano nero coincida con
fucsia')
hold on
```

```
%drawPoint3d(prova_rotazioneOK,'oR'); %punti ruotati
drawPoint3d(punti,'ob') %punti originali
drawPlane3d(coo_pianoH, 'm') %piano orizzontale esatto
drawPlane3d(pianoInterpolato, 'c') %piano originale

%piano di verifica NERO -orizzontale ottenuto dai punti ruotati (fitto i
punti ruotati e vedo se il piano di verifica che nasce coincide con quello
orizzontale)
piano_verifica = fitPlane(prova_rotazioneOK);
drawPlane3d(piano_verifica, 'k');
drawVector3d(A1, retta_max_pendn,'k','LineWidth',5);
alpha 0.5
drawPlane3d(coo_pianoH, 'm')
axis equal
xlabel('x')
ylabel('y')
zlabel('z')

figure
hold on
drawLine3d(Linea_rotazione)
drawVector3d(A2, u,'b','LineWidth',3)
drawVector3d(A2, v,'b','LineWidth',3)
drawVector3d(A2, v_norm,'b','LineWidth',3)
%drawPlane3d(pianoInterpolato, 'c')

drawVector3d(A1, N1n,'r','LineWidth',5)
drawVector3d(A1, Nn,'r','LineWidth',5)
drawVector3d(A1, NpianoHn,'r','LineWidth',5)
drawVector3d(A1, retta_max_pendn,'y','LineWidth',5);

% drawPoint3d(P,'K');
drawPoint3d(A1,'oK'); drawPoint3d(PUNTO2,'oK')
drawPlane3d(coo_pianoH, 'm') %piano orizz.
drawPlane3d(pianoInterpolato, 'c')
drawPlane3d(piano_verifica, 'k');
axis equal
alpha 0.5
xlabel('x')
ylabel('y')
zlabel('z')
%% se il file manca delle colonne sui colori, salta la prossima istruzione
if size(datiDelFile,2)>3
   prova_rotazioneOK=[prova_rotazioneOK'; datiDelFile(:,4:6)'];
else
   prova_rotazioneOK=prova_rotazioneOK';
end
fprintf("Elaborazione ultimata\n");

%% SALVATAGGIO
%% se il file ha i colori:
if size(datiDelFile,2)>3
 %% Salvo come .asc
 nomeFileUscita=strcat(nome_file(1:end-4), ' ruotato.asc');
 fileUscita=[directory nomeFileUscita];
 fid=fopen(fileUscita,'w');
 fprintf("Salvataggio file in corso\n");
 fprintf(fid,'%15f %15f %15f %5d %5d %5d\n',prova_rotazioneOK);
 fclose(fid);
 fprintf("File ASC salvato\n");
 %% Salvo come .dat nella stessa cartella del .asc
 new_nomeFileUscita = strrep(nomeFileUscita,'asc','dat') ;
```

```
 fileUscita=[directory new_nomeFileUscita];
 fid=fopen(fileUscita,'w');
 fprintf("Salvataggio file in corso\n");
 fprintf(fid,'%15f %15f %15f %5d %5d %5d\n',prova_rotazioneOK);
 fclose(fid);
 fprintf("File DAT salvato\n");

%% se il file NON ha i colori:
else
    nomeFileUscita=strcat(nome_file(1:end-4), ' ruotato.asc');
    fileUscita=[directory nomeFileUscita];
    fid=fopen(fileUscita,'w');
    fprintf("Salvataggio file in corso\n");
    fprintf(fid,'%15f %15f %15f\n',prova_rotazioneOK);
    fclose(fid);
    fprintf("File ASC salvato\n");
    %% Salvo come .dat nella stessa cartella del .asc
    new_nomeFileUscita = strrep(nomeFileUscita,'asc','dat') ;
    fileUscita=[directory new_nomeFileUscita];
    fid=fopen(fileUscita,'w');
    fprintf("Salvataggio file in corso\n");
    fprintf(fid,'%15f %15f %15f\n',prova_rotazioneOK);
    fclose(fid);
    fprintf("File DAT salvato\n");
end
%%
    else
        fprintf("Errore nella lettura del file dati\n");
    end
end
```

9.2.2. z2_rp_ricampionamento

```
%% APRO IL FILE .DAT PIù GRANDE E CREO LE MATRICI RICAMPIONATE
%% Creo i file .dat ricampionati a partire da quello più grande
%% Ricampiona solo se gli intervalli scelti sono divisori di quello
assegnato
%% ES: la mia griglia massima è 2000, gli altri devono essere divisori
   close all
   clear
%% Specifiche dell'elemento in studio
prompt = {'Che elemento stai studiando? (Provino, Blocco,
Versante)','numero identificativo','Lunghezza Lx [metri]?','Lunghezza Ly
[metri]?','unità di misura [mm,m]'};
Finestra = 'Input';
definput = {'Blocco','2','1','1','m'};
LL = inputdlg(prompt,Finestra,[1 40;1 20;1 20;1 20; 1 20],definput,'on');

Elemento=LL{1};
Identificativo=str2num(LL{2});
Elemento_nome=strcat(Elemento, num2str(Identificativo));
Lx = str2num(LL{3});
Ly = str2num(LL{4});
unita_misura=LL{5};
%% Inizializzazione variabili
Rp_profilox1array2=[];
size_profilo=[]; size_profilo_dx=[]; size_profilo_dy=[]; DATA_MOD=[];
Rp_y=[]; Z2_y=[];
profiloy=[]; profiloy_resampled=[];
%% INPUT
[nome_file, directory] = uigetfile('*.*','Selezionare il file .DAT da
aprire');
```

```
path=strcat(directory, nome_file);
files=dir(path);

provino=101;
lettera='x'; %le prime analisi sono per i profili verticali x = cost, i
file salvati saranno *x.dat
ricampionamento_profili

lettera='y'; %le seconde analisi sono per i profili y = cost, i file
salvati saranno *y.dat
ricampionamento_profili
```

9.2.3. ricampionamento_profili

```
%% Interpolazione per il ricampionamento, per ogni griglia considerata
%% Carico il file - grigllia max ottenuto da Surfer
if lettera=='x' %carico il file GRANDE una sola volta, poi lo traspongo per
le y
    fprintf("Caricamento file di dati\n");
    datiDelFile=load(path,'-ascii');
         [pathstr,name,ext] = fileparts(nome_file);

    [LON,LAT,DATA] =
xyz2grid(datiDelFile(:,1),datiDelFile(:,2),datiDelFile(:,3));

    if strcmp(unita_misura,'mm')==1
        DATA=DATA/1000; %converto in metri
    end

    size_DATA=size(DATA,1);
    fprintf("File Caricato\n");
end
if lettera=='y'
    DATA=DATA'; %per estrapolare i profili nella direzione orizzontale,
traspongo la matrice iniziale ed eseguo lo stesso procedimento di nuovo
end

%% File di ricampionamento: i valori devono essere dividendi della griglia
più grande
valori = [size_DATA 1000 500 250 200 100 50 25]; %INPUT DA CAMBIARE

%% Voglio creare es 2000 profili verticali [X=cost](2000 è il numero max
che ho calcolato con Surfer) a campionamento variabile.

  dim_valori=size(valori,2);
  dy=Ly./(valori-1);
  dx=Lx./(valori-1);

 if lettera=='x'
  prova_cell=cell(dim_valori,2); %inizializzo
 end

for ii=1:dim_valori

    dim_DATA_MOD=valori(ii);
    indice=size_DATA/dim_DATA_MOD;  %cambia quando cambia griglia, quindi
con l'indice ii, lo uso sotto nel calcolo di profili resampled
        if dim_DATA_MOD==size_DATA
             DATA_MOD=DATA;%se è la griglia più grande, lasciala così
        else
            DATA_MOD= DATA(1:indice:end,:); % es. matrice N x 2000 blocchi
        end
```

```
    if lettera== 'x' %sono i file in 'x' - allineamenti x = cost;
%% Plotta il primo profilo ricampionato
    y_progressiva=cumsum([0; zeros(dim_DATA_MOD-1,1)+Ly/(dim_DATA_MOD-1)]);
%vettore colonna
    prova_cell(ii,:)={y_progressiva, DATA_MOD(:,1)};

    if ii==1 %il file 2000 lo disegno in alto
        figure(provino)
        hold on
        subplot(5,2,[1 2]);
        profilo_plot=DATA_MOD(:,1)-
(min(DATA_MOD(:,1))+max(DATA_MOD(:,1)))/2; %in modo che nel plot sia più
facilmente identificabile l'altezza dell'elemento
        scatter(y_progressiva(:,1),profilo_plot(:,1),2,'k','fill')
        stringa_titolo=strcat('Profilo 1 ',Elemento_nome, ' a diverse
risoluzioni' );
        title(stringa_titolo);
       legend('Punti del profilo');
       xlabelL=xlabel('Ly [m]')
       set(xlabelL, 'Units', 'Normalized', 'Position', [1.05, -0.05, 0]);
       ylabel('Elevazione [m]')
       axis equal
    else
        figure(provino)
        subplot(5,2,ii+1);
         profilo_plot=DATA_MOD(:,1)-
(min(DATA_MOD(:,1))+max(DATA_MOD(:,1)))/2; %in modo che nel plot sia più
facilmente identificabile l'altezza dell'elemento
        scatter(y_progressiva(:,1),profilo_plot(:,1),2,'k','fill')
        axis equal
    end
    %% Calcolo Rp per il solo profilo iniziale
    Rpy(ii)=Calcola_Rp_colonna(DATA_MOD(:,1),Ly/(valori(ii)-1));
    %% Calcolo Z2 sul primo profilo di ogni griglia
    Z2y(ii)=Calcola_Z2_colonna(DATA_MOD(:,1),Ly/(valori(ii)-1));
    %% salvo i .DAT:
       if ii==1 %crea la cartella solo una volta
            crea_nome_percorso=strcat(directory, '\.DAT ricampionati\');
            mkdir(crea_nome_percorso);
       end
    filepath=strcat(crea_nome_percorso, Elemento_nome,'-',
num2str(dim_DATA_MOD(end)),lettera,'.dat');
    save(filepath,'DATA_MOD','-ascii');

       else %sono i file in 'y'
        filepath=strcat(crea_nome_percorso, Elemento_nome,'-',
num2str(dim_DATA_MOD(end)),lettera,'.dat');
        DATA_MOD=DATA_MOD';
        save(filepath,'DATA_MOD','-ascii');
       end
end
%% Attenzione: per riutilizzare il codice che elaborava i profili verticali
%  per fare i calcoli anche sui profili orizzontali basta ruotare la
%  matrice di input, in questo modo quelle che erano le righe diventano le
%  colonne e viceversa. Per plottare i risultati dell'elaborazione però
%  bisogna cambiare SOLO le etichette ai grafici, i nomi delle variabili
%  DEVONO RIMANERE UGUALI.
%  Se il valore della variabile lettera è "x"
%  plotto i grafici ad X costante;
%  Se il valore della variabile lettera è "y"
%  plotto i grafici ad Y costante;
```

```
 if (strcmp(lettera,'x'))
%% Grafici Rpy, X = cost per il primo profilo
%% PLOT PASSO IN mm
dy_adim=dy*1000/Ly; %mm/m

figure('NumberTitle', 'off', 'Name', 'Rpy - dy, PROFILO X = COST')
hold on
axis([min(dy_adim) max(dy_adim) min(Rpy) max(Rpy)])
scatter(dy_adim,Rpy,20,'r', 'filled');
set(gca,'XScale','log','YScale','log' );

titolo=strcat('Rpy - dy,', Elemento_nome, ', profilo verticale - x =
cost');
title(titolo);

legend('Rpy');
xlabel('(dy/Ly) [mm/m]')
ylabel('Rpy')
%%  Grafici Z2y, X = cost per il primo profilo
%% PLOT PASSO IN mm
figure('NumberTitle', 'off', 'Name', 'Z2y - dy, PROFILO X = COST')
hold on
axis([min(dy_adim) max(dy_adim) min(Z2y) max(Z2y)])
scatter(dy_adim,Z2y,20,'b', 'filled');
set(gca,'XScale','log','YScale','log' );

titolo=strcat('Z2y - dy,', Elemento_nome, ', profilo verticale - x =
cost');
title(titolo);
legend('Z2y');
xlabel('(dy/Ly) [mm/m]')
ylabel('Z2y')
 end
%% Salvo le immagini
FolderName =  crea_nome_percorso;
FigList = findobj(allchild(0), 'flat', 'Type', 'figure');
for iFig = 1:length(FigList)
  FigHandle = FigList(iFig);
  FigName   = get(FigHandle, 'Name');
  if isempty(FigName)==1
    FigName   = 'Profilo 1 - verticale';
    set(FigHandle, 'Position',  [100, 100, 600, 500])
    savefig(FigHandle, fullfile(FolderName, [FigName '.fig']));
    saveas(FigHandle, fullfile(FolderName, [FigName '.bmp']));
  else
     savefig(FigHandle, fullfile(FolderName, [FigName '.fig']));
     saveas(FigHandle, fullfile(FolderName, [FigName '.bmp']));
  end
end
```

9.2.4. analisti_statistica_z2

```
%% ANALISI STATISTICA z2
% calcola media e deviazione standard di Z2 e Rp per tutte le griglie
ricampionate
% Si apre un pop-up per selezionare la cartella con i file ricampionati
close all
clear
 %% Elemento studiato
prompt = {'Che elemento stai studiando? (Provino, Blocco,
Versante)','numero identificativo','Lunghezza Lx [metri]?','Lunghezza Ly
[metri]?'};
```

```
Finestra = 'Input';
definput = {'Blocco','2','1','1'};
LL = inputdlg(prompt,Finestra,[1 40;1 20;1 20;1 20],definput,'on');

Elemento=LL{1};
Identificativo=str2num(LL{2});
Elemento_nome=strcat(Elemento, num2str(Identificativo));
Lx_esatta = str2num(LL{3});
Ly_esatta = str2num(LL{4});
%% Inizializzo variabili
var_Z2x=[]; mean_Z2x=[]; min_Z2x=[]; max_Z2x=[]; x = []; x2=[]; var_Rpx=[];
mean_Rpx=[];  min_Rpx=[]; max_Rpx=[];
var_Z2y=[]; mean_Z2y=[]; min_Z2y=[]; max_Z2y=[];y = [];         var_Rpy=[];
mean_Rpy=[];  min_Rpy=[]; max_Rpy=[];
size_profilo=[]; size_profilo_dx=[];
eseguix=[];  eseguiy=[];
CCX=[]; CCY=[]; T_Bx=[]; T_By=[];

DX=[];
%% PARETE
 [files, directory] = uigetfile('*.*','Selezionare il file da aprire');
 directory_all=strcat(directory, '*.dat');
 fileBloccoDisegno=dir(directory_all);
 %% Definisci il Passo: lo calcola in base alla griglia più grande che gli
passo
 prompt = {'Inserisci la grandezza massima dei .DAT'};
 Finestra = 'Input';
 definput = {'2000'};
 LN = inputdlg(prompt,Finestra,[1 40],definput,'on');
 Numero_max_punti = str2double(LN{1});

 dy_min=Ly_esatta/(Numero_max_punti-1); %metri
 dx_min=Lx_esatta/(Numero_max_punti-1); %metri

for file=fileBloccoDisegno'

     filePath = [file.folder '\'];
     fileName = file.name;
     [pathstr,name,ext] = fileparts(fileName);
     LastLetter = name(max(regexp(name, '[A-Za-z]'))); % x, y = per
distinguere su quali profili ho ricampionato
     %%%% Per fargli fare i plot corretti nel caso di input ricampionati
     if LastLetter =='x'  %profili a x=cost
         eseguix=1; eseguiy=0;
     end

     if LastLetter =='y' %profili a y=cost
         eseguix=0; eseguiy=1;
     end

     if LastLetter ~='x' && LastLetter ~='y' %nel caso in cui gli dia
griglie intere di surfer e no solo profili
         eseguix=1; eseguiy=1;
     end

     fileDeiPunti=[filePath fileName];
     datiDelFile=load(fileDeiPunti,'-ascii');

     %%%%%%% RICAMPIONAMENTO
     % il primo file da cui faccio il potrebbe avere solo 3 colonne, gli
altri sono ricampionati e sono già matrici quadrate
     %(es: il dat originale è un 4000000x3, qui voglio 2000x2000)
    if size(datiDelFile,2) == 3
```

```
        [LON,LAT,grid] =
xyz2grid(datiDelFile(:,1),datiDelFile(:,2),datiDelFile(:,3));
        mzy=grid;
    else
        mzy=datiDelFile;
    end

%  Misure caratteristiche della griglia analizzata:
    profilix = (size(mzy,2));  %il numero dei profili estratti lungo x - in
direzione x estratto profilix profili(esempio ho la griglia 50x50 significa
che ho 50 dati -> punti)
    dnx= profilix - 1   ;      % il numero degli intervalli  (esempio se ho
50 punti, ho 49 tratti tra i punti, quindi avrò 49 pendenze - theta)
    profiliy = (size(mzy,1));  %il numero dei profili estratti lungo y
    dny = profiliy - 1  ;

indice_dx=double(Numero_max_punti/profilix);
indice_dy=double(Numero_max_punti/profiliy);
dx=indice_dx*dx_min; %metri
dy=indice_dy*dy_min;  %metri
Lx=dx*dnx; %metri
Ly=dy*dny;  %metri

     %% elaborazione allineamenti lungo x = cost
         if eseguix==1 %se ho i file con x =cost, continui, se no fai gli
altri, a y= cost
             Z2y = [];
             for i = 1:profilix %estraggo la riga profiliy-esima (profili
a x=cost)
               %% Profili verticali
               profilo1 = [[1:1:profiliy]',mzy(:,i)];
               %% Calcolo Z2 sul primo profilo di ogni griglia
               Z2y(i)=Calcola_Z2_colonna(profilo1(:,2),dy);
               %% Calcolo Rp per il solo profilo iniziale
               Rpy(i)=Calcola_Rp_colonna(profilo1(:,2),dy);
             end

 %% Allineamenti lungo x = cost
               y = [y dy*1000]; % x1000 per avere mm

               min_Z2y=[min_Z2y min(Z2y)];
               max_Z2y=[max_Z2y max(Z2y)];
               var_Z2y=[var_Z2y std(Z2y)];
               mean_Z2y=[mean_Z2y mean(Z2y)];

               min_Rpy=[min_Rpy min(Rpy)];
               max_Rpy=[max_Rpy max(Rpy)];
               var_Rpy=[var_Rpy std(Rpy)];
               mean_Rpy=[mean_Rpy mean(Rpy)];
         end
        %% elaborazione allineamenti lungo y = cost
            if eseguiy==1
            Z2x = [];
                for i = 1:profiliy %estraggo la riga profiliy-esima
(profili a y=cost)
                    %% Profili orizzontali
                    profilo2 = [[1:1:profilix]',mzy(i,:)'];
                    %% Calcolo Z2 sul primo profilo di ogni griglia
                    Z2x(i)=Calcola_Z2_colonna(profilo2(:,2),dx);
                    %% Calcolo Rp per il solo profilo iniziale
                    Rpx(i)=Calcola_Rp_colonna(profilo2(:,2),dx);
                end
%  Allineamenti lungo Y = cost
```

```
                x = [x dx*1000]; % x1000 per avere mm

                min_Z2x=[min_Z2x min(Z2x)];
                max_Z2x=[max_Z2x max(Z2x)];
                var_Z2x=[var_Z2x std(Z2x)];
                mean_Z2x=[mean_Z2x mean(Z2x)];

                min_Rpx=[min_Rpx min(Rpx)];
                max_Rpx=[max_Rpx max(Rpx)];
                var_Rpx=[var_Rpx std(Rpx)];
                mean_Rpx=[mean_Rpx mean(Rpx)];
            end
end
yZ2y = y/(Ly_esatta); yRpy = y/(Ly_esatta); xZ2x = x/Lx_esatta; xRpx =
x/Lx_esatta;

%Limiti grafici Z2
yz2_inf=min([(min(mean_Z2y)-max(var_Z2y)), (min(mean_Z2x)- max(var_Z2x))
]);
yz2_sup=max([(max(mean_Z2y)+ max(var_Z2y)),(max(mean_Z2x)+ max(var_Z2x))
]);
xz2_inf=min([min(yZ2y), min(xZ2x)  ]);
xz2_sup=min([max(yZ2y), max(xZ2x)  ]);

%Limiti grafici Rp
yrp_inf=min([(min(mean_Rpy)-max(var_Rpy)), (min(mean_Rpx)- max(var_Rpx))
]);
yrp_sup=max([(max(mean_Rpy)+ max(var_Rpy)),(max(mean_Rpx)+ max(var_Rpx))
]);
xrp_inf=min([min(yRpy), min(xRpx)  ]);
xrp_sup=min([max(yRpy), max(xRpx)  ]);
%% Z2y - grafico varianza Y   (PROFILI X = COST)- lo plotto solo se il
campionamento è sui profili X=cost, altrimenti lo salto
yZ2y = y/(Ly_esatta); %normalizzo rispetto la lunghezza dell'elemento
figure('NumberTitle', 'off', 'Name', 'Z2y - Profili verticali (X = COST)'),
hold on
H=errorbar(yZ2y,mean_Z2y,var_Z2y,'ob','MarkerSize',5,'MarkerEdgeColor','blu
e','MarkerFaceColor','blue');
set(gca,'XScale','log','YScale','log' );
title('Z2y - Profili verticali (X = COST)');
xlabel('dy/Ly [mm/m]') % x-axis label
ylabel('Z2y') % y-axis label
legend('Z2y');
xlim([xz2_inf xz2_sup])
ylim([yz2_inf yz2_sup])
yticks(0:0.1:2);
%%  Rpy - grafico varianza Y   (PROFILI X = COST)
yRpy = y/(Ly_esatta);
figure('NumberTitle', 'off', 'Name', 'Rpy - Profili verticali (X = COST)'),
hold on
errorbar(yRpy,mean_Rpy,var_Rpy,'or','MarkerSize',5,'MarkerEdgeColor','red',
'MarkerFaceColor','red');
set(gca,'XScale','log','YScale','log' );
title('Rpy - Profili verticali (X = COST)');
xlabel('dy/Ly [mm/m]') % x-axis label
ylabel('Rpy') % y-axis label
legend('Rpy');
xlim([xrp_inf xrp_sup])
ylim([yrp_inf yrp_sup])
%% Z2x - grafico varianza X (PROFILI Y = COST) - lo plotto solo se il
campionamento è sui profili Y=cost
xZ2x = x/Lx_esatta;
```

```
figure('NumberTitle', 'off', 'Name', 'Z2x - Profili orizzontali (Y =
COST)'),
hold on
errorbar(xZ2x,mean_Z2x,var_Z2x,'ob','MarkerSize',5,'MarkerEdgeColor','blue'
,'MarkerFaceColor','blue');
set(gca,'XScale','log','YScale','log' );
title('Z2x - Profili orizzontali (Y = COST)');
xlabel('dx/Lx [mm/m]') % x-axis label
ylabel('Z2x') % y-axis label
legend('Z2x');
xlim([xz2_inf xz2_sup])
ylim([yz2_inf yz2_sup])
yticks(0:0.1:2);
%%  Rpx - grafico varianza X   (PROFILI Y = COST)
xRpx = x/Lx_esatta;
figure('NumberTitle', 'off', 'Name', 'Rpx - Profili orizzontali (Y =
COST)'),
hold on
errorbar(xRpx,mean_Rpx,var_Rpx,'or','MarkerSize',5,'MarkerEdgeColor','red',
'MarkerFaceColor','red');
set(gca,'XScale','log','YScale','log' );
title('Rpx - Profili orizzontali (Y = COST)');
xlabel('dx/Lx [mm/m]') % x-axis label
ylabel('Rpx') % y-axis label
legend('Rpx');
xlim([xrp_inf xrp_sup])
ylim([yrp_inf yrp_sup])
%% Salvo le variabili Z2media, deviazione standard, Rpmedio, deviazione
standard
nome_variabili=["X_passo_norm"; "Z2X";"RPX";"Y_passo_norm";"Z2Y";"RPY"];
Matrice_dati=zeros(6,size(x,2));
Matrice_dati(1,:)=xZ2x;
Matrice_dati(2,:)=mean_Z2x;
Matrice_dati(3,:)=mean_Rpx;
Matrice_dati(4,:)=yZ2y;
Matrice_dati(5,:)=mean_Z2y;
Matrice_dati(6,:)=mean_Rpy;

[~,idx] = sort(Matrice_dati(1,:),'descend'); % sort just the first column
Matrice_dati_ordinata = Matrice_dati(:,idx); % sort the whole matrix using
the sort indices

 Matrice_dati_cell = [nome_variabili num2cell(Matrice_dati_ordinata)];
 titolo=strcat(Elemento_nome,'.mat');
 save(titolo,'Matrice_dati_cell');

%% Salvo le variabili MIN e MAX, Z2media, varianza, Rpmedio, varianza, per
usarle nei confronti di tutti gli elementi
nome_variabili=["X_passo_norm [mm/m]";
                "Z2X mean"; "Z2X min"; "Z2X max"; "Z2X Standard Deviation";
                "RPX mean"; "RPX min"; "RPX max"; "RPX Standard Deviation"
                "Y_passo_norm [mm/m]";
                "Z2Y mean";"Z2Y min"; "Z2Y max"; "Z2Y Standard Deviation"
                "RPY mean"; "RPY min"; "RPY max"; "RPY Standard Deviation"
];
Matrice_dati2=zeros(18,size(x,2));

Matrice_dati2(1,:)=xZ2x;
Matrice_dati2(2,:)=mean_Z2x;
Matrice_dati2(3,:)=min_Z2x;
Matrice_dati2(4,:)=max_Z2x;
Matrice_dati2(5,:)=var_Z2x;
Matrice_dati2(6,:)=mean_Rpx;
```

```
Matrice_dati2(7,:)=min_Rpx;
Matrice_dati2(8,:)=max_Rpx;
Matrice_dati2(9,:)=var_Rpx;
Matrice_dati2(10,:)=yZ2y;
Matrice_dati2(11,:)=mean_Z2y;
Matrice_dati2(12,:)=min_Z2y;
Matrice_dati2(13,:)=max_Z2y;
Matrice_dati2(14,:)=var_Z2y;
Matrice_dati2(15,:)=mean_Rpy;
Matrice_dati2(16,:)=min_Rpy;
Matrice_dati2(17,:)=max_Rpy;
Matrice_dati2(18,:)=var_Rpy;

[~,idx] = sort(Matrice_dati2(1,:),'descend'); % sort just the first column
Matrice_dati_ordinata = Matrice_dati2(:,idx); % sort the whole matrix using
the sort indices

 Matrice_dati_gennaio2019 = [nome_variabili
num2cell(Matrice_dati_ordinata)];
 titolo=strcat(Elemento_nome,'gennaio','.mat');
 save(titolo,'Matrice_dati_2019');
%% Salvo tutte le figure scegliendo la cartella
FolderName =  uigetdir('*.*','Selezionare la cartella in cui vuoi salvare
le immagini');   % Your destination folder
FigList = findobj(allchild(0), 'flat', 'Type', 'figure');
for iFig = 1:length(FigList)
  FigHandle = FigList(iFig);
  FigName   = get(FigHandle, 'Name');
  savefig(FigHandle, fullfile(FolderName, [FigName '.fig']));
  saveas(FigHandle, fullfile(FolderName, [FigName '.bmp']));
end
%% Creo fogli excel JRC - calcolato sullo Zmedio
SFx_med = mean_Z2x.^2;
TseCruden_Z2x_med = 32.2+32.47*log10(mean_Z2x);
TseCruden_SFx_med = 37.28+16.5847*log10(SFx_med);
YanLoDi_Z2x_med = 32.69+32.98*log10(mean_Z2x);
YanLoDi_SFx_med = 37.63+16.5*log10(SFx_med);
TatoneGrasselli_Z2x_med = 55.03*(mean_Z2x).^0.74-6.10;% intervalli di 1mm

SFy_med = mean_Z2y.^2;
TseCruden_Z2y_med = 32.2+32.47*log10(mean_Z2y);
TseCruden_SFy_med = 37.28+16.5847*log10(SFy_med);
YanLoDi_Z2y_med = 32.69+32.98*log10(mean_Z2y);
YanLoDi_SFy_med = 37.63+16.5*log10(SFy_med);
TatoneGrasselli_Z2y_med = 55.03*(mean_Z2y).^0.74-6.10;

%% CREO LE TABELLE EXCEL dei JRC
%excel_label = 'JRC_PARETE';
excel_label = Elemento_nome;

fileout = [filePath excel_label 'MediaZ2'];
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
fid3 = fopen(fileout,'wt');

sheety = 'allineamenti lungo y=cost';
sheetx = 'allineamenti lungo x=cost';
%% Salvo la matriceX (y=cost) dei risultati
xlswrite(fileout, {'Dx/Lx [mm/m]'}, sheety, 'B3')
xlswrite(fileout, xZ2x , sheety, 'C3:J3')
xlswrite(fileout, {'Z2x medio'}, sheety, 'B4')
xlswrite(fileout, mean_Z2x, sheety, 'C4')
xlswrite(fileout, {'Formule JRC'}, sheety, 'A4')
xlswrite(fileout, {'TseCruden_Z2'}, sheety, 'A5')
```

```
xlswrite(fileout, {'TseCruden_SF'}, sheety, 'A6')
xlswrite(fileout, {'YanLoDi_Z2'}, sheety, 'A7')
xlswrite(fileout, {'YanLoDi_SF'}, sheety, 'A8')
xlswrite(fileout, {'TatoneGrasselli_Z2'}, sheety, 'A9')
xlswrite(fileout, {'Media'}, sheety, 'B7')
xlswrite(fileout, TseCruden_Z2x_med, sheety, 'C5')
xlswrite(fileout, TseCruden_SFx_med, sheety, 'C6')
xlswrite(fileout, YanLoDi_Z2x_med, sheety, 'C7')
xlswrite(fileout, YanLoDi_SFx_med, sheety, 'C8')
xlswrite(fileout, TatoneGrasselli_Z2x_med, sheety, 'C9')
%% Salvo la matriceY (x=cost) dei risultati
xlswrite(fileout, {'Dy/Ly [mm/m]'}, sheetx, 'B3')
xlswrite(fileout, yZ2y , sheetx, 'C3:J3')
xlswrite(fileout, {'Z2y medio'}, sheetx, 'B4')
xlswrite(fileout, mean_Z2y, sheetx, 'C4')
xlswrite(fileout, {'Formule JRC'}, sheetx, 'A4')
xlswrite(fileout, {'TseCruden_Z2'}, sheetx, 'A5')
xlswrite(fileout, {'TseCruden_SF'}, sheetx, 'A6')
xlswrite(fileout, {'YanLoDi_Z2'}, sheetx, 'A7')
xlswrite(fileout, {'YanLoDi_SF'}, sheetx, 'A8')
xlswrite(fileout, {'TatoneGrasselli_Z2'}, sheetx, 'A9')
xlswrite(fileout, {'Media'}, sheetx, 'B7')
xlswrite(fileout, TseCruden_Z2y_med, sheetx, 'C5')
xlswrite(fileout, TseCruden_SFy_med, sheetx, 'C6')
xlswrite(fileout, YanLoDi_Z2y_med, sheetx, 'C7')
xlswrite(fileout, YanLoDi_SFy_med, sheetx, 'C8')
xlswrite(fileout, TatoneGrasselli_Z2y_med, sheetx, 'C9')
```

9.2.5. distribuzione_frequenza_z2

```
%% distrubuzione_frequenza_z2
%Input: gli passo il file ricampionato il cui intervallo di campionamento è
%considerato di soglia
close all
clear
%% Specifiche dell'elemento in studio
prompt = {'Che elemento stai studiando? (Provino, Blocco,
Versante)','numero identificativo','Lunghezza Lx [metri]?','Lunghezza Ly
[metri]?','punti del profilo?'};
Finestra = 'Input';
definput = {'Blocco','2','1','1','1000'};
LL = inputdlg(prompt,Finestra,[1 40;1 20;1 20;1 20;1 40],definput,'on');

Elemento=LL{1};
Identificativo=str2num(LL{2});
Elemento_nome=strcat(Elemento, num2str(Identificativo));
Lx = str2num(LL{3});
Ly = str2num(LL{4});  Oss = str2num(LL{5});
%% Inizializzo variabili
var_Z2x=[]; mean_Z2x=[]; x = []; x2=[];
var_Z2y=[]; mean_Z2y=[]; y = [];
var_Rpx=[]; mean_Rpx=[];
var_Rpy=[]; mean_Rpy=[];
size_profilo=[];
size_profilo_dx=[];
eseguix=[];  eseguiy=[];

nbins=ceil(10/3*log10(Oss)+1); %numero bins per l'istogramma

[nome_file, directory] = uigetfile('*.*','Selezionare i due files .DAT
ricampionati da aprire','MultiSelect','on');
path=strcat(directory, nome_file);
```

```
for ii=1:size(path,2)

     [pathstr,name,ext] = fileparts(path{ii});
     LastLetter = name(max(regexp(name, '[A-Za-z]')));

     %%%% Per fargli fare i plot corretti nel caso di input ricampionati
     if LastLetter =='x'  %profili a verticali x=cost
         eseguix=1; eseguiy=0;
     end
     if LastLetter =='y' %profili a orizzontali y=cost
         eseguix=0; eseguiy=1;
     end
     if LastLetter ~='x' && LastLetter ~='y' %nel caso in cui gli dia
griglie intere di surfer e no solo profili
         eseguix=1; eseguiy=1;
     end

     fileDeiPunti=strcat(pathstr,'\', name,ext);
     datiDelFile=load(fileDeiPunti,'-ascii');
%  Misure caratteristiche della griglia analizzata:
    profilix = (size(grdatiDelFileid,2));  %il numero dei profili estratti
lungo x - in direzione x estratto profilix profili(esempio ho la griglia
50x50 significa che ho 50 dati -> punti)
    dnx= profilix - 1   ;      % il numero degli intervalli  (esempio se ho
50 punti, ho 49 tratti tra i punti, quindi avrò 49 pendenze - theta)
    profiliy = (size(datiDelFile,1));  %il numero dei profili estratti
lungo y
    dny = profiliy - 1;
    dx=double(Lx/dnx);
    dy=double(Ly/dny);
    Lxx = (dnx)*dx;
    Lyy = (dny)*dy;

    if size(datiDelFile,2) == 3
         [LON,LAT,grid] =
xyz2grid(datiDelFile(:,1),datiDelFile(:,2),datiDelFile(:,3));
         mzy=grid;
    else
         mzy=datiDelFile;
    end
     %% elaborazione ROFILI VERTICALI allineamenti lungo x = cost
     if eseguix==1 %se ho i file con PROFILI VERTICALI x =cost, continui,
se no fai gli altri, a y= cost
         Z2y = [];
         for i = 1:profilix %estraggo la riga profiliy-esima (profili a
x=cost)
             profilo1 = [[1:1:profiliy]',mzy(:,i)];
             Z2y(i)=Calcola_Z2_colonna(profilo1(:,2),dy);
         end
         %% Allineamenti lungo x = cost
         y = [y ((Ly/(dny)))*1000]; % x1000 per avere mm
         var_Z2y=[var_Z2y var(Z2y)];
         mean_Z2y=[mean_Z2y mean(Z2y)];
         %% ISTOGRAMMA
         figure('NumberTitle', 'off', 'Name', 'Distribuzione di frequenza
Z2y');
         hold on
         Intervallo_bin=max(Z2y)-min(Z2y);
         edge_y=linspace(min(Z2y), max(Z2y),(nbins+1));
         histogram(Z2y,edge_y,'Normalization' ,'pdf')
         meanZ2y=mean(Z2y); media=num2str(meanZ2y);
```

```
        titolo=strcat('Distribuzione di frequenza Z2y (Z2ymedio = ',
media, ')');
        title(titolo);
        xlim([min(Z2y) max(Z2y)])
        x_label=strcat(num2str(nbins),' intervalli' );
        xlabel(x_label) % x-axis label
        ylabel('Densità di Frequenza Z2y');
        %% CUMULATA normalizzata (asse x = numero profili normalizzati;
asse y =z2 normalizzato)
        figure('NumberTitle', 'off', 'Name', 'Cumulata Empirica
normalizzata Z2y');
        hold on

        histogram(Z2y,100,'Normalization','cdf', 'DisplayStyle','stairs')
        title('Cumulata Empirica normalizzata Z2y');
        ylim([0 1])
        xlabel('Z2y') % x-axis label
        ylabel('Numero profili normalizzati');
    end
    %% elaborazione PROFILI ORIZZONTALI allineamenti lungo y = cost
    if eseguiy==1
        Z2x = [];
        for i = 1:profiliy
            profilo2 = [[1:1:profilix]',mzy(i,:)'];
            Z2x(i)=Calcola_Z2_colonna(profilo2(:,2),dx);
        end
        %%  Allineamenti lungo Y = cost
        x = [x ((Lx/dnx)*1000)]; % x1000 per avere mm
        var_Z2x=[var_Z2x var(Z2x)];
        mean_Z2x=[mean_Z2x mean(Z2x)];
        %% ISTOGRAMMA
        figure('NumberTitle', 'off', 'Name', 'Distribuzione di frequenza
Z2x');
        hold on
        Intervallo_bin=max(Z2x)-min(Z2x);
        edge_x=linspace(min(Z2x), max(Z2x),(nbins+1));
        histogram(Z2x,edge_x,'Normalization' ,'pdf')
        meanZ2x=mean(Z2x); media=num2str(meanZ2x);
        titolo=strcat('Distribuzione di frequenza Z2x (Z2xmedio = ',
media, ')');
        title(titolo);
        xlim([min(Z2x) max(Z2x)])
        x_label=strcat(num2str(nbins),' intervalli' );
        xlabel(x_label) % x-axis label
        ylabel('Densità di Frequenza Z2x') % y-axis label
        %% CUMULATA normalizzata (asse x = numero profili normalizzati;
asse y =z2 normalizzato)
        figure('NumberTitle', 'off', 'Name', 'Cumulata Empirica
normalizzata Z2x');
        hold on
        histogram(Z2x,100,'Normalization','cdf', 'DisplayStyle','stairs')
        title('Cumulata Empirica normalizzata Z2x');
        ylim([0 1])
        xlabel('Z2x') % x-axis label
        ylabel('Numero profili normalizzati');
    end
end
%% Salvo tutte le immagini
 crea_nome_percorso=strcat(directory, '\Distribuzione frequenza e
Cumulata\');
           mkdir(crea_nome_percorso);
FolderName =  crea_nome_percorso;
FigList = findobj(allchild(0), 'flat', 'Type', 'figure');
```

```
for iFig = 1:length(FigList)
  FigHandle = FigList(iFig);
  FigName   = get(FigHandle, 'Name');
  savefig(FigHandle, fullfile(FolderName, [FigName '.fig']));
  saveas(FigHandle, fullfile(FolderName, [FigName '.bmp']));
end
```

9.2.6. analisti_statistica_jrc

```
%% Analisti_statistica_JRC
% Input - file .DAT ricampionati (in metri)
clc
clear all
close all
 %% Elemento studiato
prompt = {'Che elemento stai studiando? (Provino, Blocco,
Versante)','numero identificativo','Lunghezza Lx [metri]?','Lunghezza Ly
[metri]?'};
Finestra = 'Input';
definput = {'Blocco','2','1','1'};
LL = inputdlg(prompt,Finestra,[1 40;1 20;1 20;1 20],definput,'on');

Elemento=LL{1};
Identificativo=str2num(LL{2});
Elemento_nome=strcat(Elemento, num2str(Identificativo));
Lx = str2num(LL{3});
Ly = str2num(LL{4});
%% Inizializzazione variabili

var_TseCruden_Z2x=[]; mean_TseCruden_Z2x=[];
var_TseCruden_SFx=[]; mean_TseCruden_SFx=[];
var_YanLoDi_Z2x=[]; mean_YanLoDi_Z2x=[];
var_YanLoDi_SFx=[]; mean_YanLoDi_SFx=[];
var_TatoneGrasselli_Z2x=[]; mean_TatoneGrasselli_Z2x=[];
var_TatoneGrasselli_thetax=[]; mean_TatoneGrasselli_thetax=[];
x = []; var_Z2x=[]; mean_Z2x=[];

var_TseCruden_Z2y=[]; mean_TseCruden_Z2y=[];
var_TseCruden_SFy=[]; mean_TseCruden_SFy=[];
var_YanLoDi_Z2y=[]; mean_YanLoDi_Z2y=[];
var_YanLoDi_SFy=[]; mean_YanLoDi_SFy=[];
var_TatoneGrasselli_Z2y=[]; mean_TatoneGrasselli_Z2y=[];
var_TatoneGrasselli_thetay=[]; mean_TatoneGrasselli_thetay=[];
y = []; var_Z2y=[]; mean_Z2y=[];

eseguix=[];  eseguiy=[];
CCX=[]; CCY=[]; T_Bx=[]; T_By=[];
%% Apro il file - legge da una sola cartella specificata, tutti i file
*.DAT (dopo essere stati grigliati su surfer)
[files, directory] = uigetfile('*.*','Selezionare il file da aprire');
directory_all=strcat(directory, '*.dat');
fileBloccoDisegno=dir(directory_all);
for file=fileBloccoDisegno'
    filePath = [file.folder '\'];
    fileName = file.name;
     [pathstr,name,ext] = fileparts(fileName);
           LastLetter = name(max(regexp(name, '[A-Za-z]'))); % x, y = per
distinguere su quali profili ho ricampionato
           %%%% Per fargli fare i plot corretti nel caso di input
ricampionati
           if LastLetter =='x'  %profili a x=cost
```

```
                eseguix=1; eseguiy=0;
            end

             if LastLetter =='y' %profili a y=cost
                eseguix=0; eseguiy=1;
             end

             if LastLetter ~='x' && LastLetter ~='y' %nel caso in cui gli
dia griglie intere di surfer e no solo profili
                eseguix=1; eseguiy=1;
             end
    fileDeiPunti=[filePath fileName];
    fprintf("Caricamento file di dati\n");
    datiDelFile=load(fileDeiPunti,'-ascii');
    grid=datiDelFile;

     %%%%%%% RICAMPIONAMENTO
   if size(datiDelFile,2) == 3
         [LON,LAT,grid] =
xyz2grid(datiDelFile(:,1),datiDelFile(:,2),datiDelFile(:,3));
         mzy=grid;
    else
         mzy=datiDelFile;
    end

    profilix = (size(grid,2));  %il numero dei profili estratti lungo x -
in direzione x estratto profilix profili
    dnx= profilix - 1;          % il numero degli intervalli
    profiliy = (size(grid,1));  %il numero dei profili estratti lungo y
    dny = profiliy - 1;
    dx=double(Lx/dnx);
    dy=double(Ly/dny);
     %% elaborazione allineamenti lungo x = cost
     SFy = []; TseCruden_Z2y = []; TseCruden_SFy = []; YanLoDi_Z2y = [];
YanLoDi_SFy = []; TatoneGrasselli_Z2y = [];% intervalli di 1mm
     TatoneGrasselli_thetay=[];
     if eseguix==1
         for i = 1:profilix %per ogni profilo calcolo la Z2
                profilo1 = [[1:1:profiliy]',mzy(:,i)];
                [Z2y(i)]=Calcola_Z2_colonna(profilo1(:,2),dy);
                var_Z2y=[var_Z2y std(Z2y)];
                mean_Z2y=[mean_Z2y mean(Z2y)];

                SFy(i) = Z2y(i)^2;
                TseCruden_Z2y(i) = 32.2+32.47*log10(Z2y(i));
                TseCruden_SFy(i) = 37.28+16.5847*log10(SFy(i));
                YanLoDi_Z2y(i) = 32.69+32.98*log10(Z2y(i));
                YanLoDi_SFy(i) = 37.63+16.5*log10(SFy(i));
                TatoneGrasselli_Z2y(i) = 55.03*(Z2y(i))^0.74-6.10;%
intervalli di 1mm
         end
        %% Allineamenti lungo x = cost
        y = [y ((Ly/(dny)))*1000]; % x1000 per avere mm
        var_TseCruden_Z2y=[var_TseCruden_Z2y std(TseCruden_Z2y)];
        mean_TseCruden_Z2y=[mean_TseCruden_Z2y mean(TseCruden_Z2y)];

        var_TseCruden_SFy=[var_TseCruden_SFy std(TseCruden_SFy)];
        mean_TseCruden_SFy=[mean_TseCruden_SFy mean(TseCruden_SFy)];

        var_YanLoDi_Z2y=[var_YanLoDi_Z2y std(YanLoDi_Z2y)];
        mean_YanLoDi_Z2y=[mean_YanLoDi_Z2y mean(YanLoDi_Z2y)];

        var_YanLoDi_SFy=[var_YanLoDi_SFy std(YanLoDi_SFy)];
```

```
        mean_YanLoDi_SFy=[mean_YanLoDi_SFy mean(YanLoDi_SFy)];

        var_TatoneGrasselli_Z2y=[var_TatoneGrasselli_Z2y
std(TatoneGrasselli_Z2y)];
        mean_TatoneGrasselli_Z2y=[mean_TatoneGrasselli_Z2y
mean(TatoneGrasselli_Z2y)];
     end
     %% elaborazione allineamenti lungo Y = cost
     SFx = []; TseCruden_Z2x = []; TseCruden_SFx = []; YanLoDi_Z2x = [];
YanLoDi_SFx = []; TatoneGrasselli_Z2x = [];% intervalli di 1mm
     TatoneGrasselli_thetax=[];
     if eseguiy==1
        for i = 1:profiliy
            profilo2 = [[1:1:profilix]',mzy(i,:)'];
             [Z2x(i)]=Calcola_Z2_colonna(profilo2(:,2),dx);
             var_Z2x=[var_Z2x std(Z2x)];
             mean_Z2x=[mean_Z2x mean(Z2x)];

            SFx(i) = Z2x(i)^2;
            TseCruden_Z2x(i) = 32.2+32.47*log10(Z2x(i));
            TseCruden_SFx(i) = 37.28+16.5847*log10(SFx(i));
            YanLoDi_Z2x(i) = 32.69+32.98*log10(Z2x(i));
            YanLoDi_SFx(i) = 37.63+16.5*log10(SFx(i));
            TatoneGrasselli_Z2x(i) = 55.03*(Z2x(i))^0.74-6.10;% intervalli
di 1mm
        end
        %%  Allineamenti lungo Y = cost
         x = [x ((Lx/dnx)*1000)]; % x1000 per avere mm
        var_TseCruden_Z2x=[var_TseCruden_Z2x std(TseCruden_Z2x)];
        mean_TseCruden_Z2x=[mean_TseCruden_Z2x mean(TseCruden_Z2x)];

        var_TseCruden_SFx=[var_TseCruden_SFx std(TseCruden_SFx)];
        mean_TseCruden_SFx=[mean_TseCruden_SFx mean(TseCruden_SFx)];

        var_YanLoDi_Z2x=[var_YanLoDi_Z2x std(YanLoDi_Z2x)];
        mean_YanLoDi_Z2x=[mean_YanLoDi_Z2x mean(YanLoDi_Z2x)];

        var_YanLoDi_SFx=[var_YanLoDi_SFx std(YanLoDi_SFx)];
        mean_YanLoDi_SFx=[mean_YanLoDi_SFx mean(YanLoDi_SFx)];

        var_TatoneGrasselli_Z2x=[var_TatoneGrasselli_Z2x
std(TatoneGrasselli_Z2x)];
        mean_TatoneGrasselli_Z2x=[mean_TatoneGrasselli_Z2x
mean(TatoneGrasselli_Z2x)];
     end
end
%% Plot mean and variance JRC
%% grafico varianza X (PROFILI Y = COST) - lo plotto solo se il
campionamento è sui profili Y=cost
%x = x;
xJRCX = x/Lx;

y_TseCruden_Z2x = mean_TseCruden_Z2x;
e_TseCruden_Z2x = var_TseCruden_Z2x;

y_TseCruden_SFx = mean_TseCruden_SFx;
e_TseCruden_SFx = var_TseCruden_SFx;

y_YanLoDi_Z2x = mean_YanLoDi_Z2x;
e_YanLoDi_Z2x = var_YanLoDi_Z2x;

y_YanLoDi_SFx = mean_YanLoDi_SFx;
e_YanLoDi_SFx = var_YanLoDi_SFx;
```

```
y_TatoneGrasselli_Z2x = mean_TatoneGrasselli_Z2x;
e_TatoneGrasselli_Z2x = var_TatoneGrasselli_Z2x;

Matrice_appoggiox=zeros(12, length(x));
Matrice_appoggiox(1,:)=y_TseCruden_Z2x;
Matrice_appoggiox(2,:)=y_TseCruden_SFx;
Matrice_appoggiox(3,:)=y_YanLoDi_Z2x;
Matrice_appoggiox(4,:)=y_YanLoDi_SFx;
Matrice_appoggiox(5,:)=y_TatoneGrasselli_Z2x;

Matrice_appoggiox(7,:)=e_TseCruden_Z2x;
Matrice_appoggiox(8,:)=e_TseCruden_SFx;
Matrice_appoggiox(9,:)=e_YanLoDi_Z2x;
Matrice_appoggiox(10,:)=e_YanLoDi_SFx;
Matrice_appoggiox(11,:)=e_TatoneGrasselli_Z2x;

figure('NumberTitle', 'off', 'Name', 'JRCx - PROFILI Y = COST'),
hold on

 errorbar(xJRCX,y_TseCruden_Z2x,e_TseCruden_Z2x,'or','MarkerSize',10,...
        'MarkerEdgeColor','red','MarkerFaceColor','red');

errorbar(xJRCX,y_TseCruden_SFx,e_TseCruden_SFx,'om','MarkerSize',10,...
        'MarkerEdgeColor','m','MarkerFaceColor','m');

errorbar(xJRCX,y_YanLoDi_Z2x,e_YanLoDi_Z2x,'oc','MarkerSize',10,...
        'MarkerEdgeColor','c','MarkerFaceColor','c');
        errorbar(xJRCX,y_YanLoDi_SFx,e_YanLoDi_SFx,'og','MarkerSize',10,...
        'MarkerEdgeColor','g','MarkerFaceColor','g');

errorbar(xJRCX,y_TatoneGrasselli_Z2x,e_TatoneGrasselli_Z2x,'ob','MarkerSize
',10,...
        'MarkerEdgeColor','b','MarkerFaceColor','b');

set(gca,'XScale','log'); ylim([0 20]);
title('JRCx/SFx - PROFILI Y = COST');
xlabel('dx/Lx [mm/m]') % x-axis label
ylabel('JRCx/SFx') % y-axis label
legenda=["TseCruden Z2x","TseCruden SFx","YanLoDi Z2x","YanLoDi
SFx","TatoneGrasselli Z2x"];
legend(legenda)
%% grafico varianza Y (PROFILI X = COST) - lo plotto solo se il
campionamento è sui profili X=cost

yJRCY = y/Ly;
x_TseCruden_Z2y = mean_TseCruden_Z2y;
e_TseCruden_Z2y = var_TseCruden_Z2y;

x_TseCruden_SFy = mean_TseCruden_SFy;
e_TseCruden_SFy = var_TseCruden_SFy;

x_YanLoDi_Z2y = mean_YanLoDi_Z2y;
e_YanLoDi_Z2y = var_YanLoDi_Z2y;

x_YanLoDi_SFy = mean_YanLoDi_SFy;
e_YanLoDi_SFy = var_YanLoDi_SFy;

x_TatoneGrasselli_Z2y = mean_TatoneGrasselli_Z2y;
e_TatoneGrasselli_Z2y = var_TatoneGrasselli_Z2y;

Matrice_appoggioy=zeros(12, length(y));
Matrice_appoggioy(1,:)=x_TseCruden_Z2y;
```

```
Matrice_appoggioy(2,:)=x_TseCruden_SFy;
Matrice_appoggioy(3,:)=x_YanLoDi_Z2y;
Matrice_appoggioy(4,:)=x_YanLoDi_SFy;
Matrice_appoggioy(5,:)=x_TatoneGrasselli_Z2y;

Matrice_appoggioy(7,:)=e_TseCruden_Z2y;
Matrice_appoggioy(8,:)=e_TseCruden_SFy;
Matrice_appoggioy(9,:)=e_YanLoDi_Z2y;
Matrice_appoggioy(10,:)=e_YanLoDi_SFy;
Matrice_appoggioy(11,:)=e_TatoneGrasselli_Z2y;

figure('NumberTitle', 'off', 'Name', 'JRCy - PROFILI X = COST'),
hold on

 errorbar(yJRCY,x_TseCruden_Z2y,e_TseCruden_Z2y,'or','MarkerSize',10,...
        'MarkerEdgeColor','red','MarkerFaceColor','red');

errorbar(yJRCY,x_TseCruden_SFy,e_TseCruden_SFy,'om','MarkerSize',10,...
        'MarkerEdgeColor','m','MarkerFaceColor','m');

errorbar(yJRCY,x_YanLoDi_Z2y,e_YanLoDi_Z2y,'oc','MarkerSize',10,...
        'MarkerEdgeColor','c','MarkerFaceColor','c');
        errorbar(yJRCY,x_YanLoDi_SFy,e_YanLoDi_SFy,'og','MarkerSize',10,...
        'MarkerEdgeColor','g','MarkerFaceColor','g');

errorbar(yJRCY,x_TatoneGrasselli_Z2y,e_TatoneGrasselli_Z2y,'ob','MarkerSize
',10,...
        'MarkerEdgeColor','b','MarkerFaceColor','b');

set(gca,'XScale','log');
ylim([0 20])
title('JRCy/SFy - PROFILI X = COST');
xlabel('dy/Ly [mm/m]') % x-axis label
ylabel('JRCy/SFy') % y-axis label
legenda=["TseCruden Z2y","TseCruden SFy","YanLoDi Z2y","YanLoDi
SFy","TatoneGrasselli Z2y"];
legend(legenda)
%% Salvo tutte le figure scegliendo la cartella
FolderName =  uigetdir('*.*','Selezionare il file da aprire');
FigList = findobj(allchild(0), 'flat', 'Type', 'figure');
for iFig = 1:length(FigList)
  FigHandle = FigList(iFig);
  FigName   = get(FigHandle, 'Name');
  savefig(FigHandle, fullfile(FolderName, [FigName '.fig']));
  saveas(FigHandle, fullfile(FolderName, [FigName '.bmp']));
end
%% CREO LE TABELLE EXCEL dei JRC
excel_label = strcat('JRC_CALCOLO_', Elemento_nome);
fileout = [filePath excel_label];
fid3 = fopen(fileout,'wt');

sheety = 'allineamenti lungo y=cost';
sheetx = 'allineamenti lungo x=cost';

%% Salvo la matriceX (y=cost) dei risultati
xlswrite(fileout, {'Dx/Lx [mm/m]'}, sheety, 'B3')
xlswrite(fileout, xJRCX , sheety, 'C3:J3')

xlswrite(fileout, {'Formule JRC'}, sheety, 'A4')
xlswrite(fileout, {'TseCruden_Z2'}, sheety, 'A5')
xlswrite(fileout, {'TseCruden_SF'}, sheety, 'A6')
xlswrite(fileout, {'YanLoDi_Z2'}, sheety, 'A7')
xlswrite(fileout, {'YanLoDi_SF'}, sheety, 'A8')
```

```
xlswrite(fileout, {'TatoneGrasselli_Z2'}, sheety, 'A9')

xlswrite(fileout, {'TseCruden_Z2'}, sheety, 'A11')
xlswrite(fileout, {'TseCruden_SF'}, sheety, 'A12')
xlswrite(fileout, {'YanLoDi_Z2'}, sheety, 'A13')
xlswrite(fileout, {'YanLoDi_SF'}, sheety, 'A14')
xlswrite(fileout, {'TatoneGrasselli_Z2'}, sheety, 'A15')

xlswrite(fileout, y_TseCruden_Z2x, sheety, 'C5')
xlswrite(fileout, y_TseCruden_SFx, sheety, 'C6')
xlswrite(fileout, y_YanLoDi_Z2x, sheety, 'C7')
xlswrite(fileout, y_YanLoDi_SFx, sheety, 'C8')
xlswrite(fileout, y_TatoneGrasselli_Z2x, sheety, 'C9')

xlswrite(fileout, e_TseCruden_Z2x, sheety, 'C11')
xlswrite(fileout, e_TseCruden_SFx, sheety, 'C12')
xlswrite(fileout, e_YanLoDi_Z2x, sheety, 'C13')
xlswrite(fileout, e_YanLoDi_SFx, sheety, 'C14')
xlswrite(fileout, e_TatoneGrasselli_Z2x, sheety, 'C15')

%% Salvo la matriceY (x=cost) dei risultati
xlswrite(fileout, {'Dy/Ly [mm/m]'}, sheetx, 'B3')
xlswrite(fileout, yJRCY , sheetx, 'C3:J3')

xlswrite(fileout, {'Formule JRC'}, sheetx, 'A4')
xlswrite(fileout, {'TseCruden_Z2'}, sheetx, 'A5')
xlswrite(fileout, {'TseCruden_SF'}, sheetx, 'A6')
xlswrite(fileout, {'YanLoDi_Z2'}, sheetx, 'A7')
xlswrite(fileout, {'YanLoDi_SF'}, sheetx, 'A8')
xlswrite(fileout, {'TatoneGrasselli_Z2'}, sheetx, 'A9')

xlswrite(fileout, {'TseCruden_Z2'}, sheetx, 'A11')
xlswrite(fileout, {'TseCruden_SF'}, sheetx, 'A12')
xlswrite(fileout, {'YanLoDi_Z2'}, sheetx, 'A13')
xlswrite(fileout, {'YanLoDi_SF'}, sheetx, 'A14')
xlswrite(fileout, {'TatoneGrasselli_Z2'}, sheetx, 'A15')

xlswrite(fileout, {'Media'}, sheetx, 'B7')
xlswrite(fileout, {'Varianza'}, sheetx, 'B12')

xlswrite(fileout, x_TseCruden_Z2y, sheetx, 'C5')
xlswrite(fileout, x_TseCruden_SFy, sheetx, 'C6')
xlswrite(fileout, x_YanLoDi_Z2y, sheetx, 'C7')
xlswrite(fileout, x_YanLoDi_SFy, sheetx, 'C8')
xlswrite(fileout, x_TatoneGrasselli_Z2y, sheetx, 'C9')

xlswrite(fileout, e_TseCruden_Z2y, sheetx, 'C11')
xlswrite(fileout, e_TseCruden_SFy, sheetx, 'C12')
xlswrite(fileout, e_YanLoDi_Z2y, sheetx, 'C13')
xlswrite(fileout, e_YanLoDi_SFy, sheetx, 'C14')
xlswrite(fileout, e_TatoneGrasselli_Z2y, sheetx, 'C15')
```

9.2.7. ruota_su_360

```
%% ruotaSuZ360(angolo)
%%
%ruota punti intorno all'asse Z
%   Input parameters:
%       nuvolaPunti= punti che devono essere ruotati
%           Si suppone che i punti siano organizzati con asse X su prima
%           colonna, asse Y seconda colonna ed asse Z terza colonna.
%       angolo= angolo di rotazione in gradi - esempio se scelto 1°, farò
```

```
%       360 rotazioni di un grado, per ottenere i profili richiesti per
%       studiare l'anisotropia
%% esempi di rotazioni
% Around X-axis:
% X = x;
% Y = y*cos(theta) - z*sin(theta);
% Z = y*sin(theta) + z*cos(theta);
%
% Around Y-axis:
% X = x*cos(theta) + z*sin(theta);
% Y = y;
% Z = z*cos(theta) - x*sin(theta);
%
%Around Z-axis:
% X = x*cos(theta) - y*sin(theta);
% Y = x*sin(theta) + y*cos(theta);
% Z = z;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% Lettura del file dati ed inserimento nella matrice
close all
clear

[fileName,filePath] = uigetfile('*.*','Selezionare il file da aprire');
fileDeiPunti=[filePath fileName];
fprintf("Caricamento file di dati\n");
datiDelFile=load(fileDeiPunti,'-ascii');
%Nel file di input sono presenti anche i colori, per la nostra elaborazione
%non servono quindi li scarto prendendo solo le prime 3 colonne
punti=datiDelFile(:,1:3);
fprintf("File caricato\n");

%% Specifiche dell'elemento in studio
prompt = {'X (metri - ascissa centro di rotazione)','Y (metri - ordinata
centro di rotazione)','angolo rotazione (gradi)'};
% centro della nuvola circolare (da ottenere con CloudCompare)
Finestra = 'Input';
definput = {'0.00333','-0.0442','5'};
LL = inputdlg(prompt,Finestra,[1 40;1 40;1 40],definput,'on');

x_cerchio=str2num(LL{1});
y_cerchio=str2num(LL{2});
angolo=str2num(LL{3});
%% Traslo il cerchio in (0,0,0)
fprintf("Traslo il cerchio\n");
numeroPunti=size(punti,1);
punti_traslati=zeros(size(punti,1),3);

punti_traslati(:,1)=punti(:,1)-x_cerchio;
punti_traslati(:,2)=punti(:,2)-y_cerchio;
punti_traslati(:,3)=punti(:,3);

directoryFileOutput=filePath;
file_name=strcat('punti_traslati','.dat');
save([directoryFileOutput file_name], 'punti_traslati','-ascii');
%%  Ruoto le nuvole - rotazione antioraria
fprintf("Ruoto le nuvole\n");
numero_rotazioni = 360/angolo; %quante volte devo effettuare la rotazione
del blocco per avere un giro completo ed analizzare tutte le sezioni su
360°

jj=1;
angolo(jj)=angolo;
angolo_rad(jj)=0;
```

```
crea_nome_percorso=strcat(filePath, '\.DAT nuvola ruotata\');
mkdir(crea_nome_percorso);   %create the directory to save files
    for jj=1:numero_rotazioni
        puntiRuotati=zeros(size(punti,1),3);  %Per velocizzare
        angolo_rad(jj)=deg2rad(angolo(jj));
        numeroPunti=size(punti,1);

        %ruoto i punti intorno all'asse z
        puntiRuotati(:,1)=punti_traslati(:,1)*cos(angolo_rad(jj)) -
punti_traslati(:,2)*sin(angolo_rad(jj));
        puntiRuotati(:,2)=punti_traslati(:,1)*sin(angolo_rad(jj)) +
punti_traslati(:,2)*cos(angolo_rad(jj));
        puntiRuotati(:,3)=punti(:,3);

        %creo il nome e salvo la nuvola ruotata
        angolo(jj+1)= (angolo(jj)+angolo(1));
        filename=strcat(num2str(angolo(jj)), '°');
        save([crea_nome_percorso filename '.dat'], 'puntiRuotati', '-
ascii','-double','-append');
    end
fprintf("Fine elaborazione\n");
```

9.2.8. z2_polar_plot

```
%% z2_polarplot
% Input: profili verticali (estratti con il codice Basic) su cui calcolare
anisotropia
close all
clear

var_ZZ2y=[]; mean_ZZ2y=[];
var_Rppy=[]; mean_Rppy=[];
kk=0;

%% INPUT
[files, directory] = uigetfile('*.*','Selezionare il file da aprire');
directory_all=strcat(directory, '*.dat');
fileBloccoDisegno=dir(directory_all);

sezioni_anisotropia=size(fileBloccoDisegno,1);
ZZ2y=zeros(sezioni_anisotropia, 1)';

prompt = {'Che elemento stai studiando? (Provino, Blocco,
Versante)','numero identificativo','Lunghezza Lx [metri]?','Lunghezza Ly
[metri]?'};
Finestra = 'Input';
definput = {'Blocco','2','1','1'};
LL = inputdlg(prompt,Finestra,[1 40;1 20;1 20;1 20],definput,'on');

Elemento=LL{1};
Identificativo=str2num(LL{2});
Elemento_nome=strcat(Elemento, num2str(Identificativo));
Lx = str2num(LL{3});
Ly = str2num(LL{4});

for file=fileBloccoDisegno'

    kk= kk+1;
    filePath = [file.folder '\'];
    fileName = file.name;
    fileDeiPunti=[filePath fileName];
```

```
    datiDelFile=load(fileDeiPunti,'-ascii');

    [LON,LAT,grid] =
xyz2grid(datiDelFile(:,1),datiDelFile(:,2),datiDelFile(:,3)); %mi serve per
il calcolo della condizione per l'anisotropia (profilix=1, allora calcola
anisotropia)
    %%  Misure caratteristiche della griglia analizzata:
    profiliy = (size(grid,1));
    dny = profiliy - 1;
    dy=double(Ly/dny);
%% elaborazione lungo gli slice verticali
%% ANISOTROPIA
profilo1 = [[1:1:profiliy]',grid(:,1)];

%leggo il numero nel titolo del file DAT così quando calcolo Z2 lo
inserisco nella posizione corretta
nome_posizione={fileName};
out=regexp(nome_posizione,'\d+','match');
posizione=str2double(cat(1,out{:}));
ZZ2y(posizione)=Calcola_Z2_colonna(profilo1(:,2),dy);
end
%% Disegna gli scatter plot di ZZ2 - ANISOTROPIA
figure('NumberTitle', 'off', 'Name', 'Y=cost');
hold on
axis([0 sezioni_anisotropia 0 1])

ZZ2y = ZZ2y(ZZ2y~=0);

scatter([1:1:sezioni_anisotropia],ZZ2y,1,'r');
title(['PROFILI per diversi angoli di rotazione']);
legend('ZZ2y');
xlabel('PROFILI per diversi angoli di rotazione') % x-axis label
ylabel('Z2') % y-axis label
%% Polar plot
%creo il vettore degli angoli per il polar plot
intervallo_vettore=360/length(ZZ2y);
alfa=zeros(length(ZZ2y),1);

for jj=1:(length(ZZ2y)-1)
    alfa(1)=intervallo_vettore;
    alfa(jj+1)= alfa(jj)+intervallo_vettore;
end
alfa=deg2rad(alfa);

%Polar plot
theta = alfa;
rho = ZZ2y';

figure('NumberTitle', 'off', 'Name', 'Z2y - Polar plot'),
polarscatter(theta, rho,50,'filled');
profiliynum=profiliy+1;
titolo=strcat('Z2 ', Elemento_nome, '- Profili ogni',
num2str(360/length(ZZ2y)) ,'° - dx/Lx =', num2str(1000/dny), '[mm/m]');
title(titolo);
legend('Z2y');

%% Salvo tutte le figure scegliendo la cartella
crea_nome_percorso=strcat(directory, 'figure matlab\');
mkdir(crea_nome_percorso);   %create the directory to save files
SS = crea_nome_percorso(1:end-1);
FigList = findobj(allchild(0), 'flat', 'Type', 'figure');
for iFig = 1:length(FigList)
  FigHandle = FigList(iFig);
```

```
  FigName   = get(FigHandle, 'Name');
  savefig(FigHandle, fullfile(SS, [FigName '.fig']));
  saveas(FigHandle, fullfile(SS, [FigName '.bmp']));
end
```

9.2.9. Calcola_z2_colonna

```
function [ Z2_verticale, thetamax, c ] = Calcola_Z2_colonna(
profilo_verticale, passo )
%Calcola_Z2_colonna - ATTENZIONE profilo_verticale e  size_profilo devono
%essere entrambi espressi o in metri o in mm (stessa unità di misura)

%   profilo_verticale  - gli passo solo la colonna con le elevazioni
%   passo - passo di campionamento verticale
            %% Calcolo Z2 sul profilo verticale dato
            Ltheta = ones((size(profilo_verticale,1)-1),1).*passo;
            theta = (atan((profilo_verticale(2:end)-
profilo_verticale(1:end-1))./passo))*180/pi;
            thetamax = max(theta);

             if thetamax<1
                thetamax=1;
             end

                Lunghezza = (size(profilo_verticale,1)-1);
                L0 = sum( Ltheta(theta>=0) )/Lunghezza;
                c = calcola_Ltheta_ast(theta,Ltheta,thetamax,L0,1); %
codice dott. Umili
                dz2_x = [profilo_verticale(2:end)-profilo_verticale(1:end-
1)].^2;
                rapporto=dz2_x/passo^2;
                Z2_verticale = sqrt((1/(Lunghezza))*(sum(rapporto)));
end
```

9.2.10. distribuzione_frequenza_jrc

```
%% Frequency distribution for JRC
close all
clear
%% Specifiche dell'elemento in studio
prompt = {'Che elemento stai studiando? (Provino, Blocco,
Versante)','numero identificativo','Lunghezza Lx [metri]?','Lunghezza Ly
[metri]?','punti del profilo?'};
Finestra = 'Input';
definput = {'Blocco','2','0.05','0.05','100'};
LL = inputdlg(prompt,Finestra,[1 40;1 20;1 20;1 20;1 40],definput,'on');

Elemento=LL{1};
Identificativo=str2num(LL{2});
Elemento_nome=strcat(Elemento, num2str(Identificativo));
Lx = str2num(LL{3});
Ly = str2num(LL{4});
Oss = str2num(LL{5});

%% Inizializzo variabili
var_Z2x=[]; mean_Z2x=[]; x = []; x2=[];
var_Z2y=[]; mean_Z2y=[]; y = [];
var_Rpx=[]; mean_Rpx=[];
var_Rpy=[]; mean_Rpy=[];
size_profilo=[];
size_profilo_dx=[];
eseguix=[];  eseguiy=[];
```

```
 nbins=ceil(10/3*log10(Oss)+1); %per l'istogramma

[nome_file, directory] = uigetfile('*.*','Selezionare i due files .DAT
ricampionati da aprire','MultiSelect','on');
path=strcat(directory, nome_file);

for ii=1:size(path,2)
     [pathstr,name,ext] = fileparts(path{ii});
     LastLetter = name(max(regexp(name, '[A-Za-z]')));

     %%%% Per fargli fare i plot corretti nel caso di input ricampionati
     if LastLetter =='x'  %profili a verticali x=cost
         eseguix=1; eseguiy=0;
     end
     if LastLetter =='y' %profili a orizzontali y=cost
         eseguix=0; eseguiy=1;
     end
     if LastLetter ~='x' && LastLetter ~='y' %nel caso in cui gli dia
griglie intere di surfer e no solo profili
         eseguix=1; eseguiy=1;
     end

      fileDeiPunti=strcat(pathstr,'\', name,ext);
     datiDelFile=load(fileDeiPunti,'-ascii');

     %%%%%%% affinchè funzioni con il RICAMPIONAMENTO
     if size(datiDelFile,2) == 3
         [LON,LAT,grid] =
xyz2grid(datiDelFile(:,1),datiDelFile(:,2),datiDelFile(:,3));
         mzy=grid;
     else
         mzy=datiDelFile;
     end
%  Misure caratteristiche della griglia analizzata:
    profilix = (size(grid,2));  %il numero dei profili estratti lungo x
    dnx= profilix - 1   ;      % il numero degli intervalli
    profiliy = (size(grid,1));  %il numero dei profili estratti lungo y
    dny = profiliy - 1;
    dx=double(Lx/dnx);
    dy=double(Ly/dny);
    Lxx = (dnx)*dx;
    Lyy = (dny)*dy;
     %% elaborazione ROFILI VERTICALI allineamenti lungo x = cost
          if eseguix==1 %se ho i file con PROFILI VERTICALI x =cost,
continui, se no fai gli altri, a y= cost
              Z2y = [];
              for i = 1:profilix %estraggo la riga nally-esima (profili a
x=cost)
                %% Profili verticali
                profilo1 = [[1:1:profiliy]',mzy(:,i)];
                %% Calcolo Z2 sul primo profilo di ogni griglia
                Z2y(i)=Calcola_Z2_colonna(profilo1(:,2),dy);
                %% Calcolo JRC
                SFy(i) = Z2y(i)^2;
                TseCruden_SFy(i) = 37.28+16.5847*log10(SFy(i));
                YanLoDi_SFy(i) = 37.63+16.5*log10(SFy(i));
                TseCruden_Z2y(i) = 32.2+32.47*log10(Z2y(i));
                YanLoDi_Z2y(i) = 32.69+32.98*log10(Z2y(i));
                TatoneGrasselli_Z2y(i) = 55.03*(Z2y(i))^0.74-6.10;%
intervalli di 1mm
              end
 %% Allineamenti lungo x = cost
```

```
                y = [y ((Ly/(dny)))*1000]; % x1000 per avere mm
                var_Z2y=[var_Z2y var(Z2y)];
                mean_Z2y=[mean_Z2y mean(Z2y)];
                %% Istogramma JRCy
                figure('NumberTitle', 'off', 'Name', 'Distribuzione di
frequenza JRCy');
                hold on
                map = brewermap(5,'Set1');
                edge_TseCruden_Z2y=linspace(min(TseCruden_Z2y),
max(TseCruden_Z2y),nbins);

histogram(TseCruden_Z2y,edge_TseCruden_Z2y,'facecolor',map(1,:),
'facealpha',.5,'edgecolor','none')
                 edge_YanLoDi_Z2y=linspace(min(YanLoDi_Z2y),
max(YanLoDi_Z2y),nbins);

histogram(YanLoDi_Z2y,edge_YanLoDi_Z2y,'facecolor',map(2,:),
'facealpha',.5,'edgecolor','none')

edge_TatoneGrasselli_Z2y=linspace(min(TatoneGrasselli_Z2y),
max(TatoneGrasselli_Z2y),nbins);
                histogram(TatoneGrasselli_Z2y,edge_TatoneGrasselli_Z2y,
'facecolor',map(3,:),'facealpha',.5,'edgecolor','none')
                edge_TseCruden_SFy=linspace(min(TseCruden_SFy),
max(TseCruden_SFy),nbins);
                histogram(TseCruden_SFy,edge_TseCruden_SFy,
'facecolor',map(4,:),'facealpha',.5,'edgecolor','none')
                 edge_YanLoDi_SFy=linspace(min(YanLoDi_SFy),
max(YanLoDi_SFy),nbins);
                histogram(YanLoDi_SFy,edge_YanLoDi_SFy,
'facecolor',map(5,:),'facealpha',.5,'edgecolor','none')

                titolo=strcat('Distribuzione di frequenza JRCy');
                title(titolo);
                xlim([0 25])
                x_label=strcat(num2str(nbins),' intervalli' );
                xlabel(x_label)
                ylabel('Frequenza JRCy');
                x_JRC=[7.4, 7.4];
                Y_JRC=[0, 80];
                plot(x_JRC, Y_JRC,'r')

legend('TseCruden_Z2y','YanLoDi_Z2y','TatoneGrasselli_Z2y','TseCruden_SFy',
'YanLoDi_SFy','JRC laboratorio')
            end
        %% elaborazione PROFILI ORIZZONTALI allineamenti lungo y = cost
            if eseguiy==1
            Z2x = [];
                for i = 1:profiliy %estraggo la riga nally-esima (profili a
y=cost)
                    %% Profili orizzontali
                    profilo2 = [[1:1:profilix]',mzy(i,:)'];
                    %% Calcolo Z2 sul primo profilo di ogni griglia
                    Z2x(i)=Calcola_Z2_colonna(profilo2(:,2),dx);
                    %% JRCx
                     SFx(i) = Z2x(i)^2;
                    TseCruden_Z2x(i) = 32.2+32.47*log10(Z2x(i));
                    TseCruden_SFx(i) = 37.28+16.5847*log10(SFx(i));
                    YanLoDi_Z2x(i) = 32.69+32.98*log10(Z2x(i));
                    YanLoDi_SFx(i) = 37.63+16.5*log10(SFx(i));
                    TatoneGrasselli_Z2x(i) = 55.03*(Z2x(i))^0.74-6.10;
                end
%%  Allineamenti lungo Y = cost
```

```
                x = [x ((Lx/dnx)*1000)] % x1000 per avere mm
                var_Z2x=[var_Z2x var(Z2x)];
                mean_Z2x=[mean_Z2x mean(Z2x)];
                %% Istogramma JRCx

                figure('NumberTitle', 'off', 'Name', 'Distribuzione di
frequenza JRCx');
                hold on
                map = brewermap(5,'Set1');
                edge_TseCruden_Z2x=linspace(min(TseCruden_Z2x),
max(TseCruden_Z2x),nbins);

histogram(TseCruden_Z2x,edge_TseCruden_Z2x,'facecolor',map(1,:),
'facealpha',.5,'edgecolor','none')
                 edge_YanLoDi_Z2x=linspace(min(YanLoDi_Z2x),
max(YanLoDi_Z2x),nbins);

histogram(YanLoDi_Z2x,edge_YanLoDi_Z2x,'facecolor',map(2,:),
'facealpha',.5,'edgecolor','none')

edge_TatoneGrasselli_Z2x=linspace(min(TatoneGrasselli_Z2x),
max(TatoneGrasselli_Z2x),nbins);
                histogram(TatoneGrasselli_Z2x,edge_TatoneGrasselli_Z2x,
'facecolor',map(3,:),'facealpha',.5,'edgecolor','none')
                edge_TseCruden_SFx=linspace(min(TseCruden_SFx),
max(TseCruden_SFx),nbins);
                histogram(TseCruden_SFx,edge_TseCruden_SFx,
'facecolor',map(4,:),'facealpha',.5,'edgecolor','none')
                 edge_YanLoDi_SFx=linspace(min(YanLoDi_SFx),
max(YanLoDi_SFx),nbins);
                histogram(YanLoDi_SFx,edge_YanLoDi_SFx,
'facecolor',map(5,:),'facealpha',.5,'edgecolor','none')

                titolo=strcat('Distribuzione di frequenza JRCx');
                title(titolo);
                xlim([0 25])
                x_label=strcat(num2str(nbins),' intervalli' );
                xlabel(x_label) % x-axis label
                ylabel('Frequenza JRCy');
                x_JRC=[7.4, 7.4];
                Y_JRC=[0, 80];
                plot(x_JRC, Y_JRC,'r')

legend('TseCruden_Z2x','YanLoDi_Z2x','TatoneGrasselli_Z2x','TseCruden_SFx',
'YanLoDi_SFx','JRC laboratorio')
            end
end
%% Salvo tutte le immagini
FolderName =  uigetdir('*.*','Selezionare il file da aprire');   % Your
destination folder
FigList = findobj(allchild(0), 'flat', 'Type', 'figure');
for iFig = 1:length(FigList)
  FigHandle = FigList(iFig);
  FigName   = get(FigHandle, 'Name');
  savefig(FigHandle, fullfile(FolderName, [FigName '.fig']));
  saveas(FigHandle, fullfile(FolderName, [FigName '.bmp']));
end
```

9.2.11. ondulosita + delta_ond_z2 (uso congiunto)

ondulosita

```
%% ondulosita
%% Carica dati da cui devi estrarre i profili e valuta asperità e Z2
close all
clear
clear all
%% Specifiche dell'elemento in studio
prompt = {'Che elemento stai studiando? (Provino, Blocco,
Versante)','numero identificativo','Lunghezza Lx [metri]?','Lunghezza Ly
[metri]?'};
Finestra = 'Input';
definput = {'Blocco','2','1','1'};
LL = inputdlg(prompt,Finestra,[1 40;1 20;1 20;1 20],definput,'on');

Elemento=LL{1};
Identificativo=str2num(LL{2});
Elemento_nome=strcat(Elemento, num2str(Identificativo));
Lx_esatta = str2num(LL{3});
Ly_esatta = str2num(LL{4});

[nome_file, directory] = uigetfile('*.*','Selezionare i due files .DAT
ricampionati da aprire','MultiSelect','on');
path=strcat(directory, nome_file);
 %% Definisci il Passo: lo calcola in base alla griglia più grande che gli
passo
 prompt = {'Inserisci la grandezza massima dei .DAT'};
 Finestra = 'Input';
 definput = {'2000'};
 LN = inputdlg(prompt,Finestra,[1 40],definput,'on');
 Numero_max_punti = str2double(LN{1});
 dy_min=Ly_esatta/(Numero_max_punti-1); %metri
 dx_min=Lx_esatta/(Numero_max_punti-1); %metri

 delta_ond_z2 %SCRIPT
```

delta_ond_z2

```
%% Delta_ond_z2

%% Inizializzo variabili
eseguix=[];  eseguiy=[];

% definizione colore plot
colore_ondulosita= 'm';
colore_fitting='r';

for f=1:size(path,2) %i file caricati (sono i dat massimi ricampionati)
[pathstr,name,ext] = fileparts(path{f});
fileDeiPunti=strcat(pathstr,'\', name,ext);

LastLetter = name(max(regexp(name, '[A-Za-z]')));
if LastLetter =='x'  %profili a x=cost
   eseguix=1; eseguiy=0;
   profilo= 'Profilo verticale';
   profili= 'Profili verticali';
    datiDelFile=load(fileDeiPunti,'-ascii');
    profilix = (size(datiDelFile,2));  %il numero dei profili estratti
lungo x - in direzione x estratto profilix profili(esempio ho la griglia
50x50 significa che ho 50 dati -> punti)
    dnx= profilix - 1   ;      % il numero degli intervalli  (esempio se ho
50 punti, ho 49 tratti tra i punti, quindi avrò 49 pendenze - theta)
    profiliy = (size(datiDelFile,1)) ; %il numero dei profili estratti
lungo y
    dny = profiliy - 1   ;
```

```
end

if LastLetter =='y' %profili a y=cost
   eseguix=0; eseguiy=1;

   datiDelFile=datiDelFile';
   profilo= 'Profilo orizzontale';
   profili= 'Profili orizzontali';
end

indice_dx=double(Numero_max_punti/profilix);
indice_dy=double(Numero_max_punti/profiliy);
dx=indice_dx*dx_min; %metri
dy=indice_dy*dy_min ; %metri
Lx=dx*dnx; %metri
Ly=dy*dny ; %metri

%% Profili verticali
         DELTAY = []; DELTAY1=[];  DELTAY2=[];
         DELTAY_L = []; DELTAY_1L=[]; DELTAY_2L=[];
         xx_appoggio=[]; yy_appoggio=[];
         Z2x_ver=[];
         indice_spezzata_verticali = [];
         DELTAY_L2=[];   DELTAY_L22=[];
         Z2x2=[]; Z2x_verticali=[];

         profili_estratti=[1 profiliy/4 profiliy/2 3*profiliy/4 profiliy];
%identifico 5 profili verticali/orizzontali
         xx=zeros(6,size(profili_estratti,2));
yy=zeros(6,size(profili_estratti,2)); %matrice in cui salvo i punti
cliccati  % att!!!!!!! ho ipotizzato di fare massimo cinque click

        for ii = 1:size(profili_estratti,2) %ii=numero profili verticali
estratto, estraggo la riga profiliy-esima (profili a x=cost)
             profiloy= datiDelFile(:,profili_estratti(ii));
             Z2x_verticali(ii)=Calcola_Z2_colonna(profiloy,dy_min);
             Z2x_ver=[Z2x_ver Z2x_verticali(end)];
             %% ONDULOSITà
             % plot dei profili di input
             figH = fullfig;
             nome_figura=strcat('Vettore Progressive',num2str(ii));
             set(figH,'Name',nome_figura,'NumberTitle','off')
             hold on;
             vettoreProgressive=[0:dx:dx*dnx];
             punti_profilo=plot(vettoreProgressive, profiloy,'.');
             colore = get(punti_profilo,'Color');
             axis equal

             % salvo punti su cui calcolo ondulosità sul tratto i-esimo
             [xx_appoggio,yy_appoggio] = getpts; %mi permette di
selezionare manualmente i punti

             %Calcolo ondulosità: stima l'angolo tra la linea identificata
dai click e l'orizzontale
             [ondulosita]=calcola_ondulosita2(xx_appoggio',yy_appoggio');

             % plotto i tratti identificativi ondulosità ed aggiunto il
testo sopra il plot dell'ondulosità
             %plot(xx_appoggio,yy_appoggio,colore_ondulosita);
             for uu=1:size(xx_appoggio,1)-1 %uu = uu-esimo tratto estratto
dal profilo
                 posizione_x=(xx_appoggio(uu+1)+xx_appoggio(uu))/2;
                 posizione_y=(yy_appoggio(uu+1)+yy_appoggio(uu))/2+0.1;
```

```
                angolo_plot=num2str(ondulosita(uu));
                testo1='\downarrow angolo =';
                testo=strcat(testo1, angolo_plot);
                text(posizione_x,posizione_y,testo,'FontSize',14 )
            end
            %% sistemo i plot
            axis equal
            xlim([0 Lx])
            ylim([-0.5 0.5])
            ylabel('Elevazione [m]')
            xlabel('Lunghezza profilo [m]')
            grid on
            grid minor
          %% CALCOLO DELTA/L sul profilo intero
          % disegno sul profilo il minimo ed il massimo
          [matrix_min, matrix_max, posizione_minplot, posizione_maxplot,
DELTA  ] = minimo_massimo_delta( vettoreProgressive, profiloy );


plot(matrix_min(1,:),matrix_min(2,:),'g',matrix_max(1,:),matrix_max(2,:),'r
')
          testomin=strcat('minimo =', num2str(min(profiloy)));

text(posizione_minplot(1),posizione_minplot(2),testomin,'Color','g','FontSi
ze',14 )
          testomax=strcat('massimo =', num2str(max(profiloy)));

text(posizione_maxplot(1),posizione_maxplot(2),testomax,'Color','r','FontSi
ze',14 )

          DELTAY=[DELTAY DELTA];
          DELTAY_L=[DELTAY_L DELTAY(end)/Ly ];

          legend(profilo, 'Stima ondulosità','Minimo','Massimo')
          stringa_titolo=strcat(profilo,', ', '\delta =
',num2str(DELTAY(end)), ' m, ', '\delta/Ltot = ',num2str(DELTAY_L(end)), '
m/m, ', 'Z2 = ',num2str(Z2x_ver(end)));
          title(stringa_titolo);
          %% RICALCOLO  DELTA/L sul profilo spezzato - sono ancora dentro
ii, cioè nel singolo profilo
          % 1. identifico i profili spezzati da singolo profilo
          % 2. cerco profilo lineare medio
          % 3. ruoto il profilo intorno a quello lineare
          % 4. calcolo z2, JRC e DELTA/L
          %% 1. Identifico i diversi tratti di ogni profilo (devo
spezzare il profilo): ogni click
          % probabilmente non ricadrà su un punto reale, quindi io cerco
il punto PIU VICINO ad ogni click
          V = xx_appoggio; %i miei click
          N = vettoreProgressive'; %le x del mio profilo

          A = repmat(N,[1 length(V)]);
          [minValue,closestIndex] = min(abs(A-V')); %mi da l'indice con
cui posso cercare nel profilo i miei punti
          closestValue = N(closestIndex); %valori più vicini ai miei
click

          closestIndex(1)=1;
          closestIndex(end)=size(profiloy,1);
          indici=closestIndex;
          %% 2. cerco profilo lineare medio
          var_Z2x_spezzata=[]; mean_Z2x_spezzata=[];
```

```
            DELTAY_spezzata=[];   DELTAY_L_spezzata=[];
            DELTAY2=[];  Z2x=[];
            DELTAY22=[];
            dy_spezzata=[]; dy_spezzata2=[];

            for tt=1:size(xx_appoggio,1)-1 %tt=numero sottoprofili per ogni
profilo
                vet_indici_parziali = indici(tt):indici(tt+1);
                profiloy_tagliato = profiloy(vet_indici_parziali);

vettoreProgressive_tagliato=vettoreProgressive(vet_indici_parziali);
                %% 3 ruoto il profilo sull'orizzontale in base all'angolo
indentificato dalla linea di fitting
                %Si parte dal presupposto che in questo caso i miei click
identificano
                %l'intervallo in cui voglio fare il calcolo della linea di
fitting:
                %1. calcolo il piano medio per ogni tratto
                %2. calcolo di quanto è inclinato
                %3. plotto
%%
                %Cerco la retta che fitta il tratto tt-esimo (sono inclusi
idati ruotati)
                [ retta_x, retta_y, angolo_alfa] = fit_lineare(
vettoreProgressive_tagliato, profiloy_tagliato );

                %ruoto punti e retta
                [ punti_x_ruot, punti_y_ruot ] = ruota_punti_centroRot(
vettoreProgressive_tagliato, profiloy_tagliato',
vettoreProgressive_tagliato(1), profiloy_tagliato(1)', angolo_alfa );
                [ retta_x_ruot, retta_y_ruot ] = ruota_punti_centroRot(
retta_x, retta_y,  retta_x(1), retta_y(1), angolo_alfa );

                % Plot profilo e profilo ruotato
                figure('Name', 'Metodo piano medio','NumberTitle','off');
                set(gcf, 'Position',  [100, 100, 700, 500])
                punti_y_ruottraslati=punti_y_ruot-retta_y(1); %sposto la
linea orizzontale sull'asse x e rifaccio i calcoli dei parametri
                plot(vettoreProgressive_tagliato,
profiloy_tagliato','.','Color', colore);
                hold on
                plot(punti_x_ruot, punti_y_ruottraslati, '.',
'Color',colore_fitting);

                % Plot retta e retta ruotata
                hold on
                retta_y_traslata=retta_y-retta_y(1);
                retta_y_ruottraslata=retta_y_ruot-retta_y_ruot(1);
                plot(retta_x, retta_y', 'Color',colore); hold on
                plot(retta_x_ruot, retta_y_ruottraslata,
'Color',colore_fitting);
                axis equal
                grid on

                %disegno min e max del profilo ruotato, aggiungo il testo
al plot
                [matrix_min2, matrix_max2, posizione_minplot2,
posizione_maxplot2, DELTA22  ] = minimo_massimo_delta( punti_x_ruot,
punti_y_ruottraslati );
                hold on

plot(matrix_min2(1,:),matrix_min2(2,:),'g',matrix_max2(1,:),matrix_max2(2,:
),'r')
```

```
                testomin2=strcat('minimo =',
num2str(min(punti_y_ruottraslati)));

text(posizione_minplot2(1),posizione_minplot2(2),testomin2,'Color','g','Fon
tSize',14 )
                testomax2=strcat('massimo =',
num2str(max(punti_y_ruottraslati)));

text(posizione_maxplot2(1),posizione_maxplot2(2),testomax2,'Color','r','Fon
tSize',14 )
                % calcolo delta
                DELTAY22=[DELTAY22 DELTA22];
                Ly_spezzata2=punti_x_ruot(end)-punti_x_ruot(1);
                dy_spezzata2(tt)=punti_x_ruot(2)-punti_x_ruot(1);
                DELTAY_L22=[DELTAY_L22 DELTAY22(end)/Ly_spezzata2 ];
                %% 4. calcolo z2, JRC e DELTA/L
                Ly_spezzata=punti_x_ruot(end)-punti_x_ruot(1);

Z2x(tt)=Calcola_Z2_colonna(punti_y_ruottraslati',dy_spezzata2(tt));

Z2x_nontraslati(tt)=Calcola_Z2_colonna(punti_y_ruot',dy_spezzata2(tt));

                Z2x2=[Z2x2 Z2x(end)];

                var_Z2x_spezzata=[var_Z2x_spezzata var(Z2x)];
                mean_Z2x_spezzata=[mean_Z2x_spezzata mean(Z2x)];

                SFx(tt) = Z2x(tt)^2;
                TseCruden_Z2x(tt) = 32.2+32.47*log10(Z2x(tt));
                TseCruden_SFx(tt) = 37.28+16.5847*log10(SFx(tt));
                YanLoDi_Z2x(tt) = 32.69+32.98*log10(Z2x(tt));
                YanLoDi_SFx(tt) = 37.63+16.5*log10(SFx(tt));
                TatoneGrasselli_Z2x(tt) = 55.03*(Z2x(tt))^0.74-6.10;
                %% aggiunto dettagli al plot
                hold on
                legend('Profilo', 'Profilo ruotato')
                stringa_titolo=strcat(profilo,num2str(ii), ', Sottoprofilo
numero ',num2str(tt),', \theta =',num2str(angolo_alfa), '° , \delta =
',num2str(DELTAY22(end)), ' m,', '\delta/L* = ',num2str(DELTAY_L22(end)),
'm/m, Z2  =',num2str(Z2x2(end)));
                title(stringa_titolo);
                axis equal
                grid on

                %% Linee medie sui singoli tratti (modifico la figura
iniziale del profilo totale)
                figure(figH);
                hold on;
                aggiunta(tt)=plot(retta_x, retta_y', '-.', 'Color',
colore_fitting,'LineWidth',0.5);
            end

            %per il plot devo creare un vettore di indici lungo tt, di
numero ii
            indice_spezzata_verticali = [indice_spezzata_verticali;
zeros(tt,1) + ii];
            %% DISEGNO DELTA SOLO VERTICALI
            figure(100)
            hold on
            vettore_delta_l= [DELTAY_L]; %valore sui profili interi
            x=[1:size(vettore_delta_l,2)];

            if LastLetter =='x' %profili verticali
```

```
                subplot(1,2,1)
                plot(indice_spezzata_verticali,DELTAY_L22,'k.')
                scatter (x,vettore_delta_l, 'filled','r');
                xticks([1:5])
                xticklabels({strcat(profilo, '1'), strcat(profilo, '2'),
strcat(profilo, '3'), strcat(profilo, '4'), strcat(profilo, '5')});
            elseif LastLetter =='y'
                subplot(1,2,2)
                plot(indice_spezzata_verticali,DELTAY_L22,'k.')
                scatter (x,vettore_delta_l, 'filled','r');
                xticks([1:5])
                xticklabels({strcat(profilo, '1'), strcat(profilo, '2'),
strcat(profilo, '3'), strcat(profilo, '4'), strcat(profilo, '5')});
            end

            xtickangle(75)
            ylabel('\delta /L [m/m]')
            legend('Profilo iniziale', 'Sottoprofili')
            grid on
            %Elemento_nome=strcat(Elemento, num2str(Identificativo));
            titolo=strcat('Asperità/Lunghezza profili verticali ');
            title(titolo);
            %% DISEGNO Z2 SOLO VERTICALI
            figure(101)
            hold on
            vettore_delta_l= [Z2x_ver];
            xZ2=[1:size(Z2x_ver,2)];

            if LastLetter =='x' %profili verticali
                subplot(1,2,1)

                plot(indice_spezzata_verticali,Z2x2,'k.')
                scatter (xZ2,Z2x_ver, 'filled','r');
                xticks([1:5])
                xticklabels({strcat(profilo, '1'), strcat(profilo, '2'),
strcat(profilo, '3'), strcat(profilo, '4'), strcat(profilo, '5')});
            elseif LastLetter =='y'
                subplot(1,2,2)

                plot(indice_spezzata_verticali,Z2x2,'k.')
                scatter (xZ2,Z2x_ver, 'filled','r');
                xticks([1:5])
                xticklabels({strcat(profilo, '1'), strcat(profilo, '2'),
strcat(profilo, '3'), strcat(profilo, '4'), strcat(profilo, '5')});
            end

            xtickangle(75)
            ylabel('Z2')
            legend('Profilo iniziale', 'Sottoprofili')
            grid on
            titolo=strcat('Z2', profili);
            title(titolo);

             %% Profili obbliqui
            if f==1  && ii==size(profili_estratti,2)
              profilo_obbliquo1=[]  ;
              profilo_obbliquo2=[]  ;
                 DELTA1 = []; DELTA1_L = [];
                 DELTAX11=[]; DELTAX_1L1=[]; DELTAX12=[]; DELTAX_1L2=[];
                 DELTA2 = []; DELTA2_L = [];
                 DELTAX21=[]; DELTAX_2L1=[]; DELTAX22=[]; DELTAX_2L2=[];
                 Lunghezza_obbliqua=sqrt(Lx^2+Ly^2);
```

```
            for kk=1:size(datiDelFile,1) %%ricorda, le mie matrici sono
quadrate, perciò uso un solo indice
                profilo_obbliquo1=[profilo_obbliquo1 datiDelFile(kk,kk)]
;   %VETTORE RIGA
                profilo_obbliquo2=[profilo_obbliquo2
datiDelFile(kk,size(datiDelFile,1)-kk+1)] ; %VETTORE RIGA
            end
              dy_obbliqua= Lunghezza_obbliqua/(length(profilo_obbliquo1)-
1);
              profili_obbliqui=[profilo_obbliquo1' profilo_obbliquo2'];
              esamina_profilo(profili_obbliqui, Lunghezza_obbliqua,
'Profilo obbliquo')
          end
      end
  end



function [ x_ruotati, y_ruotati ] = ruota_punti_centroRot( x_progressive,
y_profilo, x_centro, y_centro, angolo )
%Rotazione antioraria di una nuvola di punti
%   x_progressive = vettore delle ascisse [m] vettore riga
%   y_profilo = vettore altezze [m]           vettore riga
%   x_centro, y_centro = coordinate centro di rotazione
%   angolo = radianti

% create a matrix of these points, which will be useful in future
calculations
v = [x_progressive;y_profilo];

% create a matrix which will be used later in calculations
center = repmat([x_centro; y_centro], 1, length(x_progressive));
%% ruoto il profilo intorno a quello lineare
% define a counter-clockwise rotation matrix
theta = deg2rad(angolo);       % radians
if theta<1
    theta =theta*-1;
end
                        R = [cos(theta) -sin(theta); sin(theta)
cos(theta)];
                        % do the rotation...
                        s = v - center;     % shift points in the plane so
that the center of rotation is at the origin
                        so = R*s;           % apply the rotation about the
origin
                        vo = so + center;   % shift again so the origin
goes back to the desired center of rotation
                        % this can be done in one line as:
                        % vo = R*(v - center) + center
                        % pick out the vectors of rotated x- and y-data
                        x_ruotati = vo(1,:);
                        y_ruotati = vo(2,:);

end


function [ retta_x, retta_y, angolo_alfa ] = fit_lineare( progressive_x,
profiloy )
%progressive_x = vettore ascisse
%profiloy = vettore ordinate

%angolo_alfa= angolo di inclinazione tra la retta interpolata e
l'orizzontale
```

```
%retta_x, retta_y i punti inziali e finali della retta interpolata

profiloy=profiloy';
coefficients = polyfit(progressive_x, profiloy, 1);
xFit = linspace(min(progressive_x), max(progressive_x), 1000);
yFit = polyval(coefficients , xFit);

retta_x=[xFit(1) xFit(end)];
retta_y=[yFit(1) yFit(end)];

[angolo_alfa]=calcola_ondulosita2(retta_x,retta_y);
end



function [ matrix_min, matrix_max, posizione_minplot, posizione_maxplot,
DELTA  ] = minimo_massimo_delta( vettoreProgressive, profiloy )
%ascisse = vettore riga [m]
% altezze = vettore riga [m]

%matrix_min = mi restitusce il vettore che poi posso plottare per
%evidenziare il minimo sul grafico

%posizione_xplot, posizione_yplot = VETTORE delle coordinate per aggiungere
un testo
%sopra min e massimo

%delta=asperità max [m]

[miny_H, index_miny]= min(profiloy);
[maxy_H, index_maxy]=max(profiloy);
vary_H=std(profiloy);

x_miny_H = vettoreProgressive(index_miny(1));
x_maxy_H = vettoreProgressive(index_maxy(1));

minimo_x=[x_miny_H, x_miny_H];
minimo_y=[0, miny_H];
massimo_x=[x_maxy_H, x_maxy_H ];
massimo_y=[0, maxy_H];

matrix_min=[minimo_x; minimo_y];
matrix_max=[massimo_x; massimo_y];

% scrivo sopra il minimo e max
posizione_xmin=x_miny_H;
    if miny_H>0
        posizione_ymin=miny_H+0.1;
    else
        posizione_ymin=miny_H-0.1;
    end
posizione_minplot=[posizione_xmin, posizione_ymin];

posizione_xmax=x_maxy_H;
    if maxy_H>0
        posizione_ymax=maxy_H+0.1;
    else
        posizione_ymax=maxy_H-0.1;
    end
posizione_maxplot=[posizione_xmax, posizione_ymax ];

% delta
    if min(profiloy)<0
```

```
        DELTA=abs(max(profiloy))+abs(min(profiloy));
    else
        DELTA= abs(max(profiloy));
    end
end



function [ondulosita]=calcola_ondulosita2(progressive_x,profilo_y)

    for ii=1:length(progressive_x)-1
        %calcolo il segmento che unisce due punti consecutivi di profilo2
        puntoInizioSegmento=[progressive_x(ii)  profilo_y(ii) 0];
        puntoFineSegmento=[progressive_x(ii+1) profilo_y(ii+1) 0];
        segmento=puntoFineSegmento - puntoInizioSegmento;

        %calcolo segmento orizzontale
        pInizioSegOriz=[progressive_x(ii) profilo_y(ii) 0];
        pFineSegOriz=[progressive_x(ii+1) profilo_y(ii) 0];
        segmentoOrizz=pFineSegOriz-pInizioSegOriz;

        %Calcolo angolo compreso tra i due segmenti
        angolo =
atan2d(norm(cross(segmento,segmentoOrizz)),dot(segmento,segmentoOrizz));

        %calcolo del segno dell'angolo se puntoInizioSegmento è più alto di
        %puntoFineSegmento allora l'angolo è negativo
        if(puntoInizioSegmento(2)>puntoFineSegmento(2))
            angolo = angolo * -1;
        end
        ondulosita(ii)=angolo;
    end
end
```

9.3. Codici Basic

9.3.1. Anisotropia_surfer

```
' GridAll.bas grids all of the specified type of data file in the specified
directory.
' You must specify the file extension and file directory below in the
script.
' Grid files are saved in the same directory.
'
' If you run the script and nothing appears to happen, make sure the
file_directory is valid.
' See bottom of script for common errors

Sub Main
Debug.Clear
'''''''''''''' User Variables '''''''''''''''''''
'Variabili modificate

file_extension  = "dat"
'directory file dat input
file_directory  = "C:\...\"
'directory file grigliati output
```

```
grid_directory ="C:\...\"
'directory file di slice di output
slice_directory = "C:\...\"

'file BLN per slice decommentare quello utile
bln_file="C:\...\digit.bln"

'Valori di griglia, da modificare in fase di input
dx=100
dy=100

''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''

    'Grid

    Set surf = CreateObject("surfer.application")
    surf.Visible = True 'Progress for each file can be seen in the status
bar of the application.

    'Make sure the file extension has no extra . and the data directory has
a trailing \
    file_extension  = LCase(Right(file_extension,(Len(file_extension) -
InStrRev(file_extension,"."))))
    If  Len(file_directory)-InStrRev(file_directory,"\") <> 0 Then
file_directory = file_directory + "\"

    data_file = Dir( file_directory  + "*." + file_extension)

    On Error GoTo FileError
    While data_file <> ""
        Debug.Print "Debug: " + data_file

        'Define output grid file directory & name
        grid_file= grid_directory + Left(data_file, Len(data_file)-
(Len(data_file)-InStrRev(data_file,".")+1) ) + ".grd"
        Debug.Print "Debug: " + grid_file
        'Grid the data file with the current Surfer defaults (but do not
fill the screen with grid reports)
        surf.GridData(DataFile:= file_directory + data_file,
ShowReport:=False, NumCols:=dy, NumRows:=dx ,OutGrid:=grid_file)

        'File slice di uscita
        slice_file=slice_directory + Left(data_file, Len(data_file)-
(Len(data_file)-InStrRev(data_file,".")+1) ) + ".dat"
        Debug.Print "Debug: " + slice_file
        'Faccio lo Slice del file appena grigliato
        surf.GridSlice(InGrid:=grid_file, BlankFile:=bln_file,
OutDataFile:= slice_file)

        data_file = Dir() 'get next file
    Wend

    surf.Quit
    Exit Sub

    'Print a meaningful error message for each file that did not grid
correctly
    FileError:
    Debug.Print  "Error:    " + data_file + "    " + Err.Description
    surf.Quit
    Exit Sub

End Sub
```