

POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria Civile, Ambientale e Territoriale - Milano

Corso di Laurea in Ingegneria per l' Ambiente e il Territorio



CARATTERIZZAZIONE E MONITORAGGIO SPERIMENTALE  
DI DIGHE A GRAVITÀ

Relatore: Chiar.mo Prof. Livio Pinto

Tesi di Laurea di:  
Riccardo Monaci  
Matricola 750743

Anno Accademico 2010-2011



# INDICE

INDICE DELLE FIGURE .....	IV
INDICE DELLE TABELLE .....	XIII
RINGRAZIAMENTI.....	XVI
SOMMARIO.....	XVII
<b>1 IL MONITORAGGIO DELLE GRANDI STRUTTURE.....</b>	<b>23</b>
1.1 STRUMENTI PER LA MISURA DI PICCOLI SPOSTAMENTI.....	24
1.1.1 <i>Collimatori</i> .....	26
1.1.2 <i>Pendoli</i> .....	28
1.1.3 <i>Estensimetri</i> .....	31
1.1.4 <i>Stazioni totali</i> .....	32
1.1.5 <i>GNSS</i> .....	35
Errori di misura.....	36
Struttura del sistema GNSS.....	37
Metodi di misura e precisioni conseguibili.....	38
La Dilution Of Precision (DOP).....	39
Tipologie di costellazioni e applicazioni pratiche.....	40
1.2 LE SERIE TEMPORALI DEI DATI DI SPOSTAMENTO E LA LORO MODELLIZZAZIONE.....	42
1.2.1 <i>I modelli predittivi</i> .....	46
1.2.2 <i>I modelli deterministici</i> .....	48
1.2.3 <i>I modelli ibridi</i> .....	51
<b>2 ANALISI DI SERIE TEMPORALI IN UN CASO REALE.....</b>	<b>53</b>
2.1 LA DIGA SUL RIO CIXERRI.....	53
2.2 STRUMENTI PER IL MONITORAGGIO.....	57
2.3 MODELLIZZAZIONE DEI PENDOLI E RISULTATI OTTENUTI.....	61
2.3.1 <i>Modello De Sortis - Paoliani</i> .....	66

Concio 5 .....	68
Concio 43/9.....	69
2.3.2 <i>Modello Carosio - Dupraz</i> .....	70
Concio 5 .....	71
Concio 43/9.....	72
2.3.3 <i>Modello PoliMi</i> .....	73
Concio 5 .....	75
Concio 43/9.....	76
2.3.4 <i>Modello deterministico</i> .....	77
Concio 5 .....	78
Concio 43/9.....	79
2.3.5 <i>Confronto tra i risultati e considerazioni sui dati dei pendoli</i> .....	80
Test T sul concio 5 in direzione X .....	84
Test T sul concio 5 in direzione Y .....	84
Test T sul concio 43/9 in direzione X.....	85
Test T sul concio 43/9 in direzione Y.....	85
Modellazione a 3 intervalli sul concio 5 .....	87
Modellazione a 3 intervalli sul concio 43/9 .....	88
2.3.6 <i>Correlazione statistica tra variabili</i> .....	89
2.4   MONITORAGGIO PREDITTIVO MEDIANTE GNSS.....	91
<b>3 MONITORAGGIO DELLA DIGA CANTONIERA.....</b>	<b>97</b>
3.1   LA DIGA CANTONIERA .....	97
3.2   STRUMENTI PER IL MONITORAGGIO .....	102
3.3   MODELLIZZAZIONE DEI PENDOLI E RISULTATI OTTENUTI.....	103
3.3.1 <i>Modello PoliMi</i> .....	105
Concio 7 .....	105
Concio 13 .....	106
Concio 19 .....	107
Concio 31 .....	108
Altri conci .....	109
3.3.2 <i>Modello Deterministico</i> .....	110
Concio 7 .....	110
Concio 13 .....	111
Concio 19 .....	112
Concio 31 .....	113
3.3.3 <i>Confronto tra i risultati e considerazioni sui dati dei pendoli</i> .....	114
3.3.4 <i>Correlazione statistica tra variabili</i> .....	119
3.3.5 <i>Modellazione dello spostamento del coronamento</i> .....	121
<b>4 CONCLUSIONI E PROSPETTIVE FUTURE.....</b>	<b>126</b>
4.1   CONCLUSIONI .....	126
4.2   PROSPETTIVE FUTURE .....	135
<b>APPENDICE A .....</b>	<b>144</b>
MAPPA DELLA SARDEGNA CON LA POSIZIONE DELLE DUE DIGHE ANALIZZATE .....	144
<b>APPENDICE B .....</b>	<b>146</b>
DISEGNI DI PROGETTO DELLA DIGA GENNA IS ABIS .....	146

**APPENDICE C .....156**

DISEGNI DI PROGETTO DELLA DIGA CANTONIERA .....156

**APPENDICE D .....161**

GRAFICI DEL MODELLO POLIMI PER GLI ALTRI CONCI DELLA DIGA CANTONIERA ..... 161

Concio 9 ..... 162

Concio 11 ..... 163

Concio 15 ..... 164

Concio 17 ..... 165

Concio 18 ..... 166

Concio 20 ..... 167

Concio 22 ..... 168

Concio 24 ..... 169

Concio 27 ..... 170

Concio 29 ..... 171

**BIBLIOGRAFIA.....172**

*Da libri:* .....172

*Da riviste:* .....173

*Da dispense:* .....173

*Da tesi:* .....174

*Da siti internet:* .....174

# INDICE DELLE FIGURE

FIGURA 1. 1	
SISTEMI DI COLLIMAZIONE APPLICATI A UNA DIGA A GRAVITÀ (A SINISTRA) E A UNA DIGA AD ARCO (A DESTRA). .....	26
FIGURA 1. 2	
CANNOCCHIALI COLLIMATORI. ....	27
FIGURA 1. 3	
MIRE PER COLLIMAZIONE. LO STRUMENTO A DESTRA È IN GRADO DI MISURARE GLI SPOSTAMENTI VERTICALI DELLA STRUTTURA.....	27
FIGURA 1. 4	
RETE DI MONITORAGGIO DI UNA DIGA AD ARCO MEDIANTE COLLIMATORI. ....	28
FIGURA 1. 5	
IL PENDOLO DIRITTO. ....	29
FIGURA 1. 6	
IL PENDOLO ROVESCIO. ....	29
FIGURA 1. 7	
CAMERA DEI PENDOLI DELLA DIGA DI BEAUREGARD (AO). ....	30
FIGURA 1. 8	
UN MODERNO ESTENSIMETRO ELETTRICO A RESISTENZA. ....	31
FIGURA 1. 9	
L'ANGOLO ZENITALE. ....	32
FIGURA 1. 10	
RAPPRESENTAZIONE GRAFICA DELL'ANGOLO AZIMUTALE. ....	32
FIGURA 1. 11	
LA STAZIONE TOTALE LEICA FLEXLINE TS09. ....	33

FIGURA 1. 12	
RETE DI MONITORAGGIO DI UNA DIGA MEDIANTE STAZIONE TOTALE. I TRIANGOLI IN VERDE RAPPRESENTANO I CAPISALDI MENTRE I PALLINI ROSA SONO I PUNTI DA CONTROLLARE.....	34
FIGURA 1. 13	
CONFIGURAZIONE SATELLITARE AD OMBRELLO APERTO.....	40
FIGURA 1. 14	
CONFIGURAZIONE SATELLITARE AD OMBRELLO CHIUSO. ....	40
FIGURA 1. 15	
ANTENNA E RICEVITORE GPS DURANTE UN RILIEVO.....	41
FIGURA 1. 16	
ANDAMENTO MONOTONO CRESCENTE DEGLI SPOSTAMENTI NEL TEMPO. ....	43
FIGURA 1. 17	
CASO DI ASSESTAMENTO E STABILIZZAZIONE DELLA STRUTTURA.....	43
FIGURA 1. 18	
ANDAMENTO PERIODICO UNITO AD UN TREND LINEARE DI CRESCITA.....	43
FIGURA 1. 19	
APPLICAZIONE DEL MODELLO POLiMi AL CONCIO 5 DELLA DIGA SUL RIO CIXERRI. ....	48
FIGURA 1. 20	
APPLICAZIONE DEL MODELLO DETERMINISTICO AL CONCIO 19 DELLA DIGA SUL FIUME TIRSO.....	50
FIGURA 1. 21	
IL MODELLO CAROSIO-DUPRAZ APPLICATO AL CONCIO 5 DELLA DIGA SUL RIO CIXERRI. ....	51
FIGURA 1. 22	
APPLICAZIONE DEL MODELLO DE SORTIS-PAOLIANI AL CONCIO 5 DELLA DIGA SUL RIO CIXERRI. ....	52
FIGURA 2. 1	
LA DIGA GENNA IS ABIS SUL RIO CIXERRI. ....	56
FIGURA 2. 2	
LA GENNA IS ABIS VISTA DA MONTE. È BEN VISIBILE IL GRANDE SFIORATORE DI SUPERFICIE. ....	56
FIGURA 2. 3	
IL LAGO ARTIFICIALE DEL CIXERRI VISTO DA SATELLITE.....	57
FIGURA 2. 4	
LA STAZIONE ROVER INSTALLATA PRESSO IL PUNTO C. A FIANCO SI PUÒ NOTARE L'ANTENNA WIRELESS PER LA TRASMISSIONE DATI E LA CENTRALINA DI CONTROLLO.....	60
FIGURA 2. 5	
MAPPA DELLE STAZIONI GPS MASTER E ROVER INSTALLATE PER LA GENNA IS ABIS. ....	61

FIGURA 2. 6	
CONFRONTO DEGLI SPOSTAMENTI REGISTRATI AL CONCIO 5 IN DIREZIONE X TRA PENDOLI ROVESCII OTTICI E AUTOMATICI. ....	64
FIGURA 2. 7	
CONFRONTO DEGLI SPOSTAMENTI REGISTRATI AL CONCIO 5 IN DIREZIONE Y TRA PENDOLI ROVESCII OTTICI E AUTOMATICI. ....	64
FIGURA 2. 8	
CONFRONTO DEGLI SPOSTAMENTI REGISTRATI AL CONCIO 43/9 IN DIREZIONE X TRA PENDOLI ROVESCII OTTICI E AUTOMATICI. ....	65
FIGURA 2. 9	
CONFRONTO DEGLI SPOSTAMENTI REGISTRATI AL CONCIO 43/9 IN DIREZIONE Y TRA PENDOLI ROVESCII OTTICI E AUTOMATICI. ....	65
FIGURA 2. 10	
SPOSTAMENTI IN DIREZIONE X DEL CONCIO 5 – MODELLO DE SORTIS - PAOLIANI. ....	68
FIGURA 2. 11	
SPOSTAMENTI IN DIREZIONE Y DEL CONCIO 5 – MODELLO DE SORTIS - PAOLIANI. ....	68
FIGURA 2. 12	
SPOSTAMENTI IN DIREZIONE X DEL CONCIO 43/9 – MODELLO DE SORTIS - PAOLIANI.....	69
FIGURA 2. 13	
SPOSTAMENTI IN DIREZIONE Y DEL CONCIO 43/9 – MODELLO DE SORTIS - PAOLIANI.....	69
FIGURA 2. 14	
SPOSTAMENTI IN DIREZIONE X DEL CONCIO 5 – MODELLO CAROSIO - DUPRAZ.....	71
FIGURA 2. 15	
SPOSTAMENTI IN DIREZIONE Y DEL CONCIO 5 – MODELLO CAROSIO - DUPRAZ.....	71
FIGURA 2. 16	
SPOSTAMENTI IN DIREZIONE X DEL CONCIO 43/9 – MODELLO CAROSIO - DUPRAZ. ....	72
FIGURA 2. 17	
SPOSTAMENTI IN DIREZIONE Y DEL CONCIO 43/9 – MODELLO CAROSIO - DUPRAZ. ....	72
FIGURA 2. 18	
LO SPETTRO DI FOURIER DELLA SERIE STORICA DI SPOSTAMENTO IN DIREZIONE X DEL CONCIO 5. ....	74
FIGURA 2. 19	
SPOSTAMENTI IN DIREZIONE X DEL CONCIO 5 – MODELLO POLIMI.....	75
FIGURA 2. 20	
SPOSTAMENTI IN DIREZIONE Y DEL CONCIO 5 – MODELLO POLIMI.....	75
FIGURA 2. 21	
SPOSTAMENTI IN DIREZIONE X DEL CONCIO 43/9 – MODELLO POLIMI.....	76



FIGURA 2. 22	
SPOSTAMENTI IN DIREZIONE Y DEL CONCIO 43/9 – MODELLO POLiMi.....	76
FIGURA 2. 23	
SPOSTAMENTI IN DIREZIONE X DEL CONCIO 5 – MODELLO DETERMINISTICO.....	78
FIGURA 2. 24	
SPOSTAMENTI IN DIREZIONE Y DEL CONCIO 5 – MODELLO DETERMINISTICO.....	78
FIGURA 2. 25	
SPOSTAMENTI IN DIREZIONE X DEL CONCIO 43/9 – MODELLO DETERMINISTICO.....	79
FIGURA 2. 26	
SPOSTAMENTI IN DIREZIONE Y DEL CONCIO 43/9 – MODELLO DETERMINISTICO.....	79
FIGURA 2. 27	
SERIE STORICA DI SPOSTAMENTO IN DIREZIONE X DEL CONCIO 5. IN NERO È DISEGNATA LA LINEA DI TENDENZA. ....	81
FIGURA 2. 28	
SERIE STORICA DI SPOSTAMENTO IN DIREZIONE X DEL CONCIO 43/9.....	81
FIGURA 2. 29	
SERIE STORICA DI SPOSTAMENTO IN DIREZIONE Y DEL CONCIO 5.....	82
FIGURA 2. 30	
SERIE STORICA DI SPOSTAMENTO IN DIREZIONE Y DEL CONCIO 43/9.....	82
FIGURA 2. 31	
MODELLAZIONE POLiMi A TRE INTERVALLI SULLA DIREZIONE X DEL CONCIO 5. ....	87
FIGURA 2. 32	
MODELLAZIONE POLiMi A TRE INTERVALLI SULLA DIREZIONE Y DEL CONCIO 5. ....	87
FIGURA 2. 33	
MODELLAZIONE POLiMi A TRE INTERVALLI SULLA DIREZIONE X DEL CONCIO 43/9.....	88
FIGURA 2. 34	
MODELLAZIONE POLiMi A TRE INTERVALLI SULLA DIREZIONE Y DEL CONCIO 43/9.....	88
FIGURA 2. 35	
CONCIO 5 DIREZIONE X – CONFRONTO TRA LA SERIE STORICA GPS CALIBRATA, IL MODELLO POLiMi E LE MISURE DEI PENDOLI. ....	93
FIGURA 2. 36	
CONCIO 43/9 DIREZIONE X – CONFRONTO TRA LA SERIE STORICA GPS CALIBRATA, IL MODELLO POLiMi E LE MISURE DEI PENDOLI. ....	94
FIGURA 2. 37	
CONCIO 5 DIREZIONE Y – CONFRONTO TRA LA SERIE STORICA GPS CALIBRATA, IL MODELLO POLiMi E LE MISURE DEI PENDOLI. ....	94

FIGURA 2. 38	
CONCIO 43/9 DIREZIONE Y – CONFRONTO TRA LA SERIE STORICA GPS CALBRATA, IL MODELLO POLiMi E LE MISURE DEI PENDOLI. ....	95
FIGURA 3. 1	
LA VECCHIA DIGA DI SANTA CHIARA VISTA DA MONTE.....	98
FIGURA 3. 2	
IL PARAMENTO DI VALLE DELLA DIGA DI SANTA CHIARA DOPO LA CREAZIONE DELLE GALLERIE DI BYPASS. ....	98
FIGURA 3. 3	
LA DIGA CANTONIERA ELEONORA D'ARBOREA.....	101
FIGURA 3. 4	
IMMAGINE SATELLITARE DEL LAGO OMODEO. NEL RIQUADRO A DESTRA, UN INGRANDIMENTO DELLA DIGA CANTONIERA. ....	101
FIGURA 3. 5	
SPOSTAMENTI IN DIREZIONE MV DEL CONCIO 7 – MODELLO POLiMi. ....	105
FIGURA 3. 6	
SPOSTAMENTI IN DIREZIONE DS DEL CONCIO 7 – MODELLO POLiMi. ....	105
FIGURA 3. 7	
SPOSTAMENTI IN DIREZIONE MV DEL CONCIO 13 – MODELLO POLiMi. ....	106
FIGURA 3. 8	
SPOSTAMENTI IN DIREZIONE DS DEL CONCIO 13 – MODELLO POLiMi.....	106
FIGURA 3. 9	
SPOSTAMENTI IN DIREZIONE MV DEL CONCIO 19 – MODELLO POLiMi. ....	107
FIGURA 3. 10	
SPOSTAMENTI IN DIREZIONE DS DEL CONCIO 19 – MODELLO POLiMi.....	107
FIGURA 3. 11	
SPOSTAMENTI IN DIREZIONE MV DEL CONCIO 31 – MODELLO POLiMi. ....	108
FIGURA 3. 12	
SPOSTAMENTI IN DIREZIONE DS DEL CONCIO 31 – MODELLO POLiMi.....	108
FIGURA 3. 13	
SPOSTAMENTI IN DIREZIONE MV DEL CONCIO 7 – MODELLO DETERMINISTICO. ....	110
FIGURA 3. 14	
SPOSTAMENTI IN DIREZIONE DS DEL CONCIO 7 – MODELLO DETERMINISTICO.....	110
FIGURA 3. 15	
SPOSTAMENTI IN DIREZIONE MV DEL CONCIO 13 – MODELLO DETERMINISTICO. ....	111

FIGURA 3. 16	
	SPOSTAMENTI IN DIREZIONE DS DEL CONCIO 13 – MODELLO DETERMINISTICO.....111
FIGURA 3. 17	
	SPOSTAMENTI IN DIREZIONE MV DEL CONCIO 19 – MODELLO DETERMINISTICO. ....112
FIGURA 3. 18	
	SPOSTAMENTI IN DIREZIONE DS DEL CONCIO 19 – MODELLO DETERMINISTICO.....112
FIGURA 3. 19	
	SPOSTAMENTI IN DIREZIONE MV DEL CONCIO 31 – MODELLO DETERMINISTICO. ....113
FIGURA 3. 20	
	SPOSTAMENTI IN DIREZIONE DS DEL CONCIO 31 – MODELLO DETERMINISTICO.....113
FIGURA 3. 21	
	SERIE STORICA DI SPOSTAMENTO IN DIREZIONE MV DEL CONCIO 7. IN NERO È DISEGNATA LA LINEA DI TENDENZA. ....115
FIGURA 3. 22	
	SERIE STORICA DI SPOSTAMENTO IN DIREZIONE MV DEL CONCIO 13. ....115
FIGURA 3. 23	
	SERIE STORICA DI SPOSTAMENTO IN DIREZIONE MV DEL CONCIO 19. ....116
FIGURA 3. 24	
	SERIE STORICA DI SPOSTAMENTO IN DIREZIONE MV DEL CONCIO 31. ....116
FIGURA 3. 25	
	SERIE STORICA DI SPOSTAMENTO IN DIREZIONE DS DEL CONCIO 7. IN NERO È DISEGNATA LA LINEA DI TENDENZA. ....117
FIGURA 3. 26	
	SERIE STORICA DI SPOSTAMENTO IN DIREZIONE DS DEL CONCIO 13.....117
FIGURA 3. 27	
	SERIE STORICA DI SPOSTAMENTO IN DIREZIONE DS DEL CONCIO 19.....118
FIGURA 3. 28	
	SERIE STORICA DI SPOSTAMENTO IN DIREZIONE DS DEL CONCIO 31.....118
FIGURA 3. 29	
	LE BARRE CHIARE MOSTRANO LE MISURE DI SPOSTAMENTO REGISTRATE DAI PENDOLI PER IL GIORNO 13/02/2008. I DATI SONO STATI DEPURATI DALL'IPOTETICO ZERO STRUMENTALE. LE BARRE SCURE A FIANCO RAPPRESENTANO LA STIMA DEL MODELLO PARABOLICO APPLICATO ALL'INTERO CORONAMENTO. ....122
FIGURA 3. 30	
	DATI DEPURATI DI SPOSTAMENTO AI PENDOLI PER IL GIORNO 13/02/2008 MESSI A CONFRONTO CON LA STIMA DEL MODELLO PARABOLICO. QUEST'ULTIMO È APPLICATO SOLO ALLA PARTE RETTILINEA PIÙ LUNGA DEL CORONAMENTO. ....123

FIGURA 3. 31	
	STIMA DEL PARAMETRO A CON IL MODELLO PARABOLICO PER IL TRATTO RETTILINEO CORTO DELLA DIGA. 124
FIGURA 3. 32	
	STIMA DEL PARAMETRO A CON IL MODELLO PARABOLICO PER IL TRATTO RETTILINEO LUNGO DELLA DIGA. 124
FIGURA 4. 1	
	I TRE AFFIORAMENTI IDENTIFICATI DURANTE L'ANALISI DELL'IMMAGINE SATELLITARE.....140
FIGURA 4. 2	
	L'AFFIORAMENTO 1 A SUD SUD-OVEST DELLA DIGA. ....140
FIGURA 4. 3	
	L'AFFIORAMENTO NUMERO 2. ....141
FIGURA 4. 4	
	L'AFFIORAMENTO 3, IN CORRISPONDENZA DELLA CAVA DI BASALTO DI TANCA SANTA MARRA. ....141
FIGURA 4. 5	
	LA RETE DI MONITORAGGIO GNSS IPOTIZZATA PER LA DIGA CANTONIERA. ....142
FIGURA A. 1	
	CARTA DELLA SARDEGNA CON LA POSIZIONE DELLA DIGA GENNA IS ABIS E DELLA CANTONIERA ELEONORA D'ARBOREA. ....145
FIGURA B. 1	
	SEZIONE DI MONTE DELLA DIGA GENNA IS ABIS SUL CIXERRI. LE SCALE SPECIFICATE NEL DISEGNO NON CORRISPONDONO ALLA REALTÀ. LA DIMENSIONE IN ALTEZZA DELL'OPERA È INGRANDITA DI 5 VOLTE RISPETTO ALLO SVILUPPO ORIZZONTALE. ....147
FIGURA B. 2	
	POSIZIONE DEI PENDOLI DIRITTI E ROVESCII NELLA GENNA IS ABIS. LE SCALE SPECIFICATE NEL DISEGNO NON CORRISPONDONO ALLA REALTÀ. LA DIMENSIONE IN ALTEZZA DELL'OPERA È INGRANDITA DI 5 VOLTE RISPETTO ALLO SVILUPPO ORIZZONTALE. ....148
FIGURA B. 3	
	IL SISTEMA DI COLLIMAZIONE DELLA GENNA IS ABIS. SONO INDICATE LE MIRE FISSE, QUELLE MOBILI E LE STAZIONI. LE SCALE SPECIFICATE NEL DISEGNO NON CORRISPONDONO ALLA REALTÀ. LA DIMENSIONE IN ALTEZZA DELL'OPERA È INGRANDITA DI 5 VOLTE RISPETTO ALLO SVILUPPO ORIZZONTALE. ....149
FIGURA B. 4	
	IL SISTEMA DI ESTENSIMETRI AMOVIBILI DELLA GENNA IS ABIS. LE SCALE SPECIFICATE NEL DISEGNO NON CORRISPONDONO ALLA REALTÀ. LA DIMENSIONE IN ALTEZZA DELL'OPERA È INGRANDITA DI 5 VOLTE RISPETTO ALLO SVILUPPO ORIZZONTALE. ....150

FIGURA B. 5	
IL SISTEMA DI ESTENSIMETRI A LUNGA CORSA DELLA GENNA IS ABIS. LE SCALE SPECIFICATE NEL DISEGNO NON CORRISPONDONO ALLA REALTÀ. LA DIMENSIONE IN ALTEZZA DELL'OPERA È INGRANDITA DI 5 VOLTE RISPETTO ALLO SVILUPPO ORIZZONTALE. ....	151
FIGURA B. 6	
PLANIMETRIA DELLA DIGA SECONDARIA N°2 E POSIZIONE DELLA STRUMENTAZIONE DI CONTROLLO. ....	152
FIGURA B. 7	
SEZIONE MAESTRA DELLA DIGA SECONDARIA N°2. LA SCALA INDICATA NELLA FIGURA NON CORRISPONDE ALLA REALTÀ. ....	153
FIGURA B. 8	
PLANIMETRIA DELLA DIGA SECONDARIA N°3 E POSIZIONE DELLA STRUMENTAZIONE DI CONTROLLO ....	154
FIGURA B. 9	
SEZIONE MAESTRA DELLA DIGA SECONDARIA N°3. LA SCALA INDICATA NELLA FIGURA NON CORRISPONDE ALLA REALTÀ. ....	15
FIGURA C. 1	
PROFILO DEI CUNICOLI DELLA DIGA CANTONIERA ELEONORA D'ARBOREA VISTA DA VALLE. ....	157
FIGURA C. 2	
PROFILO DEI CUNICOLI DELLA CANTONIERA VISTO DA VALLE – INGRANDIMENTO DELLA PARTE DESTRA DELLO SBARRAMENTO.....	158
FIGURA C. 3	
PROFILO DEI CUNICOLI DELLA CANTONIERA VISTO DA VALLE – INGRANDIMENTO DELLA PARTE SINISTRA DELLO SBARRAMENTO. ....	159
FIGURA C. 4	
SEZIONE IN PIANTA DELLA DIGA CANTONIERA. LA SCALA RIPORTATA NELLA FIGURA NON CORRISPONDE ALLA REALTÀ. ....	160
FIGURA D. 1	
SPOSTAMENTI IN DIREZIONE MV DEL CONCIO 9 – MODELLO POLIMI. ....	162
FIGURA D. 2	
SPOSTAMENTI IN DIREZIONE DS DEL CONCIO 9 – MODELLO POLIMI. ....	162
FIGURA D. 3	
SPOSTAMENTI IN DIREZIONE MV DEL CONCIO 11 – MODELLO POLIMI. ....	163
FIGURA D. 4	
SPOSTAMENTI IN DIREZIONE MV DEL CONCIO 11 – MODELLO POLIMI. ....	163
FIGURA D. 5	
SPOSTAMENTI IN DIREZIONE MV DEL CONCIO 15 – MODELLO POLIMI. ....	164

FIGURA D. 6	
SPOSTAMENTI IN DIREZIONE DS DEL CONCIO 15 – MODELLO POLiMi.....	164
FIGURA D. 7	
SPOSTAMENTI IN DIREZIONE MV DEL CONCIO 17 – MODELLO POLiMi. ....	165
FIGURA D. 8	
SPOSTAMENTI IN DIREZIONE DS DEL CONCIO 17 – MODELLO POLiMi.....	165
FIGURA D. 9	
SPOSTAMENTI IN DIREZIONE MV DEL CONCIO 18 – MODELLO POLiMi. ....	166
FIGURA D. 10	
SPOSTAMENTI IN DIREZIONE DS DEL CONCIO 18 – MODELLO POLiMi.....	166
FIGURA D. 11	
SPOSTAMENTI IN DIREZIONE MV DEL CONCIO 20 – MODELLO POLiMi. ....	167
FIGURA D. 12	
SPOSTAMENTI IN DIREZIONE DS DEL CONCIO 20 – MODELLO POLiMi.....	167
FIGURA D. 13	
SPOSTAMENTI IN DIREZIONE MV DEL CONCIO 22 – MODELLO POLiMi. ....	168
FIGURA D. 14	
SPOSTAMENTI IN DIREZIONE DS DEL CONCIO 22 – MODELLO POLiMi.....	168
FIGURA D. 15	
SPOSTAMENTI IN DIREZIONE MV DEL CONCIO 24 – MODELLO POLiMi. ....	169
FIGURA D. 16	
SPOSTAMENTI IN DIREZIONE DS DEL CONCIO 24 – MODELLO POLiMi.....	169
FIGURA D. 17	
SPOSTAMENTI IN DIREZIONE MV DEL CONCIO 27 – MODELLO POLiMi. ....	170
FIGURA D. 18	
SPOSTAMENTI IN DIREZIONE DS DEL CONCIO 27 – MODELLO POLiMi.....	170
FIGURA D. 19	
SPOSTAMENTI IN DIREZIONE MV DEL CONCIO 29 – MODELLO POLiMi. ....	171
FIGURA D. 20	
SPOSTAMENTI IN DIREZIONE DS DEL CONCIO 29 – MODELLO POLiMi.....	171

# INDICE DELLE TABELLE

TABELLA 2. 1	
STATISTICHE DEGLI SCARTI PER IL CONCIO 5 – MODELLO DE SORTIS - PAOLIANI. ....	68
TABELLA 2. 2	
STATISTICHE DEGLI SCARTI PER IL CONCIO 43/9 – MODELLO DE SORTIS - PAOLIANI. ....	69
TABELLA 2. 3	
STATISTICHE DEGLI SCARTI PER IL CONCIO 5 – MODELLO CAROSIO - DUPRAZ. ....	71
TABELLA 2. 4	
STATISTICHE DEGLI SCARTI PER IL CONCIO 43/9 - MODELLO CAROSIO - DUPRAZ. ....	72
TABELLA 2. 5	
STATISTICHE DEGLI SCARTI PER IL CONCIO 5 – MODELLO POLiMi. ....	75
TABELLA 2. 6	
STATISTICHE DEGLI SCARTI PER IL CONCIO 43/9 – MODELLO POLiMi. ....	76
TABELLA 2. 7	
STATISTICHE DEGLI SCARTI PER IL CONCIO 5 – MODELLO DETERMINISTICO. ....	78
TABELLA 2. 8	
STATISTICHE DEGLI SCARTI PER IL CONCIO 43/9 – MODELLO DETERMINISTICO. ....	79
TABELLA 2. 9	
RISULTATI DEL TEST T IN DIREZIONE X SUL CONCIO 5. ....	84
TABELLA 2. 10	
RISULTATI DEL TEST T IN DIREZIONE Y SUL CONCIO 5. ....	84
TABELLA 2. 11	
RISULTATI DEL TEST T IN DIREZIONE X SUL CONCIO 43/9. ....	85
TABELLA 2. 12	
RISULTATI DEL TEST T IN DIREZIONE Y SUL CONCIO 43/9. ....	85

TABELLA 2. 13	
STATISTICHE DEGLI SCARTI PER IL CONCIO 5 – MODELLO POLiMi A TRE INTERVALLI.....	87
TABELLA 2. 14	
STATISTICHE DEGLI SCARTI PER IL CONCIO 43/9 – MODELLO POLiMi A TRE INTERVALLI.....	88
TABELLA 2. 15	
COEFFICIENTI DI CORRELAZIONE TRA LE VARIABILI CONSIDERATE E GLI SPOSTAMENTI REGISTRATI DAI PENDOLI.....	90
TABELLA 2. 16	
STATISTICHE DEGLI SCARTI TRA LA SERIE STORICA GPS CALBRATA E IL MODELLO POLiMi.....	95
TABELLA 3. 1	
STATISTICHE DEGLI SCARTI PER IL CONCIO 7 – MODELLO POLiMi.....	105
TABELLA 3. 2	
STATISTICHE DEGLI SCARTI PER IL CONCIO 13 – MODELLO POLiMi.....	106
TABELLA 3. 3	
STATISTICHE DEGLI SCARTI PER IL CONCIO 19 – MODELLO POLiMi.....	107
TABELLA 3. 4	
STATISTICHE DEGLI SCARTI PER IL CONCIO 31 – MODELLO POLiMi.....	108
TABELLA 3. 5	
STATISTICHE DEGLI SCARTI IN DIREZIONE MV PER GLI ALTRI CONCI – MODELLO POLiMi.....	109
TABELLA 3. 6	
STATISTICHE DEGLI SCARTI IN DIREZIONE DS PER GLI ALTRI CONCI – MODELLO POLiMi.....	109
TABELLA 3. 7	
STATISTICHE DEGLI SCARTI PER IL CONCIO 7 – MODELLO DETERMINISTICO.....	110
TABELLA 3. 8	
STATISTICHE DEGLI SCARTI PER IL CONCIO 13 – MODELLO DETERMINISTICO.....	111
TABELLA 3. 9	
STATISTICHE DEGLI SCARTI PER IL CONCIO 19 – MODELLO DETERMINISTICO.....	112
TABELLA 3. 10	
STATISTICHE DEGLI SCARTI PER IL CONCIO 31 – MODELLO DETERMINISTICO.....	113
TABELLA 3. 11	
COEFFICIENTI DI CORRELAZIONE PER I CONCI 7 E 13 TRA LE VARIABILI CONSIDERATE E GLI SPOSTAMENTI REGISTRATI DAI PENDOLI.....	120



TABELLA 3. 12

COEFFICIENTI DI CORRELAZIONE PER I CONCI 19 E 31 TRA LE VARIABILI CONSIDERATE E GLI SPOSTAMENTI  
REGISTRATI DAI PENDOLI.....120

# RINGRAZIAMENTI

Durante la stesura di questo elaborato sono state molte le persone che mi sono state vicine e mi hanno assistito.

Fra tutte vorrei ringraziare il Professor Livio Pinto, il quale mi ha seguito, aiutato e guidato pazientemente durante tutto lo svolgimento del lavoro, con estrema professionalità, competenza e cortesia.

Rivolgo poi un grazie particolare ai miei genitori e ai miei nonni, che mi hanno sostenuto nel corso di questi anni e hanno sempre creduto in me.

Infine un pensiero di riconoscenza è dedicato anche a compagni di corso ed amici che, con la loro presenza e compagnia, hanno reso più piacevole il periodo di questi studi universitari.

# SOMMARIO

Le infrastrutture sono una componente fondamentale e strategica per lo sviluppo e il progresso di un paese. È infatti estremamente importante per una nazione dotarsi di grandi vie di comunicazione per movimentare velocemente merci e passeggeri. Da qui nasce l'esigenza di costruire terminali portuali e aeroporti, nonché strade e ferrovie con tracciati in grado di superare ostacoli naturali quali fiumi e catene montuose grazie alla realizzazione di ponti, gallerie e trafori. L'altro aspetto nevralgico riguarda poi l'energia, senza la quale le industrie non potrebbero funzionare e la popolazione non potrebbe usufruire di molti servizi fondamentali, corrente elettrica in primis.

In base alle disponibilità e alle richieste sono quindi sorte diverse tipologie di centrali per la generazione di potenza, che vanno dalle termoelettriche alle nucleari, passando per i campi eolici, i pannelli fotovoltaici e gli impianti idroelettrici.

L'ingegneria, in tutte le sue forme, si occupa appunto della progettazione di queste opere, ma, contrariamente a quanto si potrebbe pensare, le sue competenze non si fermano lì. Una struttura infatti è paragonabile a un qualsiasi oggetto d'uso quotidiano il quale, durante il normale esercizio, è soggetto a una progressiva usura dei suoi componenti. Ogni automobile per esempio, percorso un certo numero di chilometri deve sostituire le pastiglie dei freni, piuttosto che gli pneumatici o l'olio del motore.

La stessa cosa avviene con gli edifici e le costruzioni in genere, le quali necessitano di controlli periodici e manutenzione al fine di mantenere nel tempo il livello prestazionale richiesto dal progettista.

È quindi essenziale che le grandi opere di interesse strategico siano tenute sotto osservazione mediante una rete di monitoraggio; essa infatti ha il compito di individuare per

tempo eventuali criticità del sistema in modo che si possano adottare le misure correttive del caso prima che sia troppo tardi. Molte volte questo aspetto viene tralasciato, per cercare di risparmiare sui costi di gestione, ma andrebbe considerato come un vero e proprio investimento sul lungo termine. Un danno modesto infatti con il tempo si può aggravare e la spesa per la riparazione, seppure in principio abbastanza contenuta, può subire incrementi incontrollati, al punto che può essere più conveniente demolire l'opera e provvedere alla sua ricostruzione. A tutto ciò va inoltre aggiunto l'aspetto della sicurezza: una costruzione trascurata si degrada più facilmente e può diventare pericolosa per gli occupanti.

Naturalmente il discorso assume una connotazione particolare per gli edifici storici, specialmente in un paese come l'Italia dove il vasto patrimonio culturale assume una importantissima valenza storica, oltre che turistica.

Sono proprio questi i manufatti più esposti al fenomeno della degradazione e per tale motivo meritano una attenzione particolare.

Nella presente tesi di laurea viene affrontata la tematica del monitoraggio applicata alle grandi strutture. L'argomento viene analizzato dapprima in termini generali e successivamente indirizzato al caso studio delle dighe di ritenuta, tenendo ben presente che i concetti, gli approcci e le metodologie di indagine possono essere adattate con semplicità anche ad altri tipi di opere dell'ingegneria civile.

Il lavoro consiste nel trattare i dati provenienti dalle reti di controllo di due dighe e analizzare successivamente le serie storiche di misura di spostamento del coronamento della diga, per cercare di capire come si sta comportando lo sbarramento. Quest'ultimo infatti interrompe il corso del fiume creando un lago artificiale e deve sostenere la spinta idrostatica esercitata dal volume d'acqua invasato. Siccome il calcestruzzo, come qualsiasi altro materiale, non è dotato di rigidità infinita, quando viene sottoposto a uno sforzo tende a deformarsi. È quindi comprensibile che il coronamento della diga subisca un certo spostamento rispetto alla fondazione, sulla base di quanto accade ad una trave a incastro sollecitata da una azione di taglio.

Quello che però va verificato è che questi movimenti non siano eccessivi; in caso contrario occorrerebbe approfondire lo studio e risalire in tempi rapidi alle cause del fenomeno. Potrebbe infatti essere a rischio la stabilità statica della diga, con tutte le gravi conseguenze che un evento del genere può comportare.

Durante l'analisi un contributo molto prezioso viene fornito dalla modellistica, con espressioni matematiche in grado di ricostruire più o meno fedelmente le serie storiche

registrate dagli strumenti di controllo. L'operazione torna utile sia per individuare eventuali anomalie nel campione, dovute a guasti o staratura degli strumenti, sia per raffronti con i dati futuri. Quest'ultima eventualità suscita particolare interesse nell'ambito del monitoraggio poiché porta prontamente alla luce le variazioni di tendenza nell'andamento della serie storica. Basta infatti calibrare il modello sui dati attuali e vedere se esso si adatta altrettanto bene alle registrazioni successive.

Il secondo obiettivo che questo lavoro di tesi si propone rappresenta anche la parte più innovativa del lavoro e consiste nel valutare l'applicazione di strumenti GNSS alle reti di monitoraggio delle grandi dighe. Vi sono infatti delle perplessità riguardo l'utilizzo del posizionamento satellitare, a causa principalmente delle precisioni conseguibili: millimetro nel migliore dei casi esse sono di tipo subcentimetrico mentre uno sbarramento artificiale subisce spostamenti giornalieri inferiori di circa tre ordini di grandezza.

Il GNSS è una tecnologia molto interessante nel mondo della topografia poiché consente di rilevare dati in continuo e senza la presenza costante dell'operatore. Una campagna di livellazione invece, o un rilievo con stazione totale, necessitano di tempo e di manodopera specializzata.

La presente tesi di laurea specialistica si articola in 4 capitoli principali, corredati successivamente da 4 appendici.

Il primo capitolo si occupa del monitoraggio in termini generici, illustrando l'utilità di una rete di controllo, i benefici che può fornire e le necessità cui deve rispondere. Sono menzionati anche alcuni esempi pratici allo scopo di rendere più chiaro e comprensibile il discorso. Vengono poi presentati alcuni strumenti di largo impiego nel monitoraggio delle strutture, quali stazioni totali, collimatori, estensimetri e pendoli, illustrandone in termini generali i principi di funzionamento e le componenti principali; un sottoparagrafo è inoltre dedicato alla tecnica del posizionamento topografico satellitare mediante ricevitori GNSS.

Infine il discorso si orienta sulle serie storiche delle misure registrate dagli strumenti, ponendo l'attenzione sugli aspetti progettuali e di gestione della rete di controllo (scelta degli strumenti, frequenza temporale delle misure ecc.), e si conclude con il tema della modellistica (vantaggi, peculiarità e caratteristiche di una buona modellazione, classificazione dei modelli in predittivi, deterministici e ibridi, con alcuni esempi applicativi reali).

Nel secondo capitolo ci si addentra maggiormente nella parte sperimentale del lavoro, con la presentazione della diga Genna Is Abis sul Rio Cixerri in Sardegna e la descrizione della rete di monitoraggio allestita per la struttura. Le serie storiche di spostamento dei pendoli sono studiate dal punto di vista modellistico, mediante l'applicazione di varie espressioni (De Sortis – Paoliani, Carosio – Dupraz, PoliMi e deterministico), e i risultati analizzati con l'aiuto della statistica descrittiva (analisi degli scarti, test T e coefficienti di correlazione). Una parte del capitolo si occupa anche di osservare le serie storiche per capire la tendenza evolutiva della struttura nel tempo.

Successivamente le registrazioni effettuate dai pendoli vengono raffrontate, col supporto del modello PoliMi, con il campione rilevato dalla strumentazione GNSS. Anche in questo caso la qualità del risultato viene definita mediante parametri statistici.

Il terzo capitolo riguarda il secondo caso applicativo presentato nell'elaborato di laurea, ovvero la diga Cantoniera Eleonora D'Arborea sul Fiume Tirso, il principale corso d'acqua della Sardegna. L'argomento è articolato come per la Genna Is Abis, partendo da una descrizione dell'opera di ritenuta e del sistema di controllo, per poi illustrare i risultati dei modelli applicati, che in questo caso sono solamente due, il PoliMi e il deterministico. È sempre presente una interpretazione oggettiva delle serie storiche della diga e un calcolo dei coefficienti di correlazione tra le variabili misurate e i dati rilevati dai pendoli.

Vista inoltre la numerosità dei conci monitorati si è scelto di analizzare nel complesso gli spostamenti di tutto il coronamento, per capire quali parti della struttura sono maggiormente soggette a movimento.

La quarta e ultima parte riassume sinteticamente i risultati ottenuti nei due casi-studio e li completa con l'inserimento di commenti e considerazioni finali.

Il capitolo si conclude esponendo le prospettive future sull'argomento: viene presentata una applicazione innovativa del GNSS nell'ambito della sismologia e si propone un progetto di larga massima di una rete GPS da installare sulla diga Cantoniera sul Tirso.

L'appendice A contiene una carta geografica della Sardegna, con la localizzazione dei due sbarramenti analizzati.

Nell'appendice B vengono riportati i disegni di progetto per la diga Genna Is Abis e per gli sbarramenti secondari in materiale sciolto. Le figure rappresentano anche l'ubicazione, sul corpo diga, dei vari strumenti di controllo.

L'appendice C presenta il progetto della diga Cantoniera e un disegno col profilo dei cunicoli e la posizione delle camere dei pendoli.

Infine l'appendice D riporta i grafici della modellazione PoliMi sui conci non presentati nel dettaglio nel capitolo 3.





# IL MONITORAGGIO DELLE GRANDI STRUTTURE

La realizzazione di una grande opera, quale ad esempio un ponte o una diga, è una operazione estremamente complessa, che richiede una progettazione accurata e una altrettanto precisa rispondenza nell'esecuzione dei lavori.

Infatti, commettere errori anche piccoli in una di queste due fasi può portare, a lungo andare, a imprevisti di non facile risoluzione tecnica e pratica, con notevoli aumenti nei costi complessivi dell'opera e uno slittamento della data di consegna.

Per evitare problemi di questo tipo, o quantomeno per individuarli abbastanza in anticipo da poter intervenire entro tempi e costi ragionevoli, risulta di fondamentale importanza la tecnica del monitoraggio.

Quest'ultimo permette infatti di individuare, durante le fasi più significative della costruzione, eventuali criticità dovute, oltre che all'errore umano, a imprevisti di vario genere, non scongiurabili nemmeno dopo una accurata pianificazione. Basti pensare al caso delle gallerie stradali o ferroviarie di una certa lunghezza, le quali necessitano, prima dello scavo vero e proprio, della realizzazione di un tunnel di servizio, anche detto cunicolo esplorativo. Esso serve appunto per avere una visione del sottosuolo in grado di evidenziare aspetti non visibili con la normale indagine geologica (ad esempio venute d'acqua, lenti di materiale argilloso ecc...) e, se necessario, apportare modifiche al progetto originario prima dell'inizio dei lavori veri e propri.

Inoltre, nel caso servissero interventi correttivi il monitoraggio permetterebbe di accertarne la buona riuscita e la rispondenza alle aspettative. Sarebbe stato impensabile infatti operare

la messa in sicurezza della Torre di Pisa senza l'appoggio di una rete di controllo, poiché sarebbe mancato un riscontro certo dell'efficacia dell'intervento.

Questo semplice esempio mostra inoltre come il monitoraggio rivesta un ruolo molto importante non solo nella realizzazione di un'opera, ma anche nella sua fase di collaudo e di esercizio, nonché nella conservazione e nel restauro degli edifici storici.

Nell'ambito di questa tesi si parlerà del controllo di grandi opere durante il loro tempo di vita utile, dove l'obiettivo principale delle misure è definire lo stato di salute della struttura e quindi il grado di sicurezza che essa è in grado di fornire. Questo è un aspetto delicato e fondamentale per opere strategiche e sensibili come le dighe poiché un crollo o un cedimento porterebbe conseguenze catastrofiche inimmaginabili, come è accaduto nella tristemente famosa tragedia del Vajont nel 1963.

## **1.1 Strumenti per la misura di piccoli spostamenti**

Il buono stato di un'opera si quantifica generalmente determinando le deformazioni o gli spostamenti cui essa è sottoposta, vedendo poi se essi sono compatibili con le capacità strutturali di progetto.

Di conseguenza un monitoraggio di questo tipo si basa sulla misura di piccoli spostamenti, talvolta inferiori al millimetro, che necessitano di una strumentazione topografica di alta precisione.

Va specificato che gli spostamenti possono essere distinti in due categorie fondamentali, gli assoluti e i relativi. Questa distinzione va tenuta presente quando si elaborano i dati ottenuti, per cercare di interpretarli al meglio.

Lo spostamento assoluto di un generico punto A rappresenta la variazione della distanza di A nel tempo rispetto a un punto B che garantisce di non subire spostamenti reali dello stesso ordine di grandezza e della stessa natura di A. B prende pertanto il nome di caposaldo e in genere non appartiene alla struttura da monitorare. Nel caso di una diga il caposaldo può essere ad esempio fissato su un pilastro di cemento ancorato su roccia affiorante, la cui stabilità è stata comprovata nel tempo, ad esempio mediante rilievi topografici ad hoc.

Lo spostamento relativo invece quantifica la variazione di posizione nel tempo del punto A rispetto a un punto B che può non essere fermo.

L'ambiguità di questo tipo di misure è evidente: il valore che viene misurato può essere dovuto al solo spostamento di A, o di B, oppure di entrambi, ma con i dati in possesso del topografo risulta impossibile capire in quale situazione delle tre ci si trova.

Ciò è però compensato dalla più semplice pianificazione del rilievo rispetto al caso assoluto: definire un caposaldo che sia effettivamente tale non è per niente facile e si rischia di scoprire, a campagna di misura iniziata, che il punto B non è realmente fisso. Per questo motivo le misure assolute sono in genere eseguite adottando un numero ridondante di "presunti" capisaldi.

A livello generale comunque le misure assolute si utilizzano per definire gli spostamenti della struttura, mentre quelle relative vengono impiegate nella determinazione delle deformazioni. Non a caso, per gli spostamenti relativi, i punti A e B spesso appartengono al medesimo edificio.

Gli strumenti topografici non sono i soli a poter essere impiegati, ma sono di certo da preferire in quanto molto precisi e in grado di garantire una invarianza nel tempo del metodo di misura. Adottando infatti delle centraline elettroniche si corre il rischio di dover sostituire in toto la strumentazione in caso di guasto, qualora non fossero più reperibili dei pezzi di ricambio. Questo implica talvolta un cambiamento nella modalità di misura, il quale interrompe la serie storica precedente vanificando un possibile confronto nel tempo. Lo strumento topografico invece, pur aggiornandosi nel tempo mantiene una propria metodologia di misura costante nel tempo e quindi non presenta problemi di sorta.

La scelta dello strumento topografico dipende dal tipo di misura che si vuole realizzare: per le variazioni di quota si utilizzano i livelli ottici o digitali di alta precisione mentre per gli spostamenti trasversali rispetto ad una direzione di riferimento si impiegano collimatori, fili a piombo, pendoli e livelli nadirali. Molto versatile risulta inoltre la stazione totale, che è in grado di assolvere a entrambe le funzioni e riesce a misurare anche le distanze, in genere determinate con il distanziometro.

Qualora interessasse determinare le deformazioni invece si possono utilizzare i deformometri e gli estensimetri; per le rotazioni è molto utile il clinometro.

Oltre agli strumenti topografici classici appena elencati esistono anche metodologie moderne di misura, quali il posizionamento satellitare mediante ricevitori GNSS e il rilievo con il laser scanner.

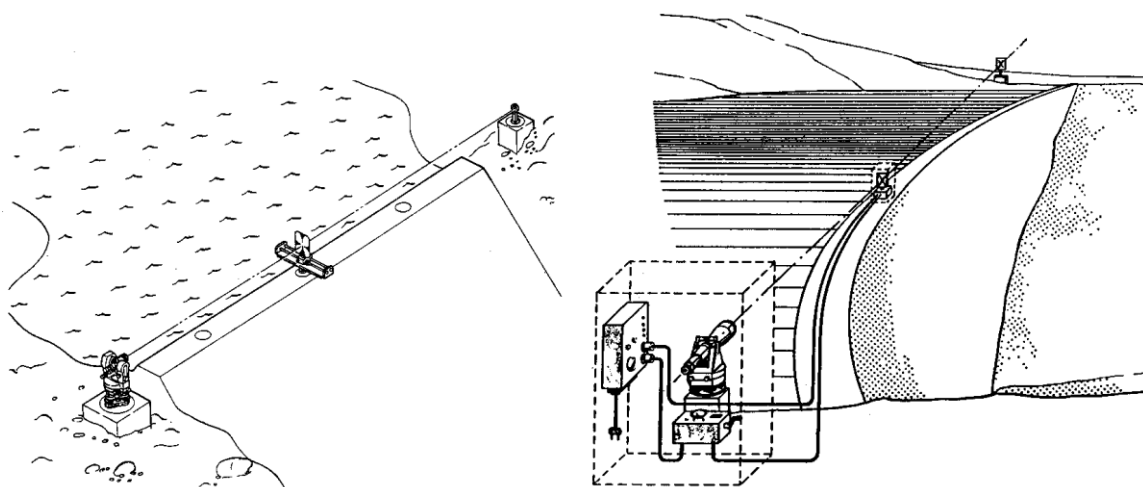
Di seguito verranno descritti più nel dettaglio solo gli strumenti di interesse per il presente lavoro di tesi, ovvero collimatori, pendoli, estensimetri, stazioni totali e GNSS.

Sono infatti questi i dispositivi maggiormente impiegati nel controllo delle grandi dighe, ad eccezione dell'ultimo che è in via di sperimentazione per applicazioni di questo genere.

### 1.1.1 Collimatori

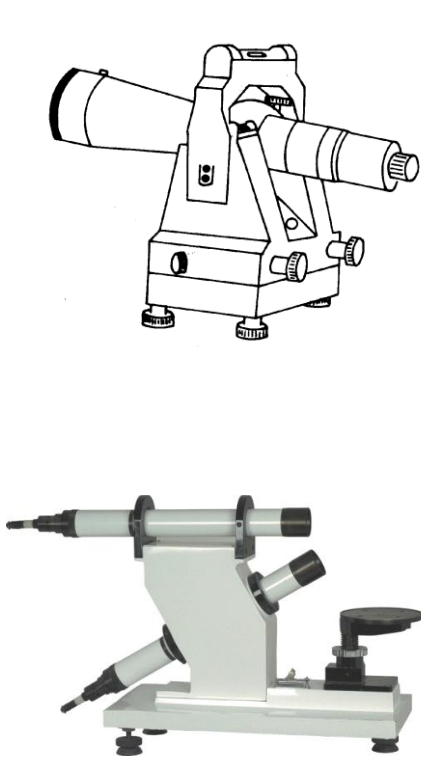
Il collimatore è uno strumento ottico costituito da un cannocchiale dotato di reticolo di mira, analogo a quello montato su un teodolite ma differente da quest'ultimo in quanto fisso. Esso non è infatti in grado di compiere rotazioni e viene collimato con una mira, alla quale viene impedito qualsiasi tipo di movimento.

Sia il cannocchiale che la mira devono essere installati su capisaldi, che nel caso di una diga possono essere le due estremità opposte. Nel punto da monitorare, posizionato lungo il coronamento dell'opera, è invece presente una mira mobile, installata su di una slitta che consente il movimento in direzione trasversale all'asse di collimazione. La misura si esegue allineando la mira mobile all'asse di collimazione del cannocchiale e leggendo lo spostamento sulla slitta, indicato da una apposita graduazione millimetrica. Con il nonio è possibile raggiungere una precisione del decimo di millimetro. Se il punto da controllare modifica la sua posizione, lo spostamento sarà pari alla differenza delle letture ottenute con la collimazione.

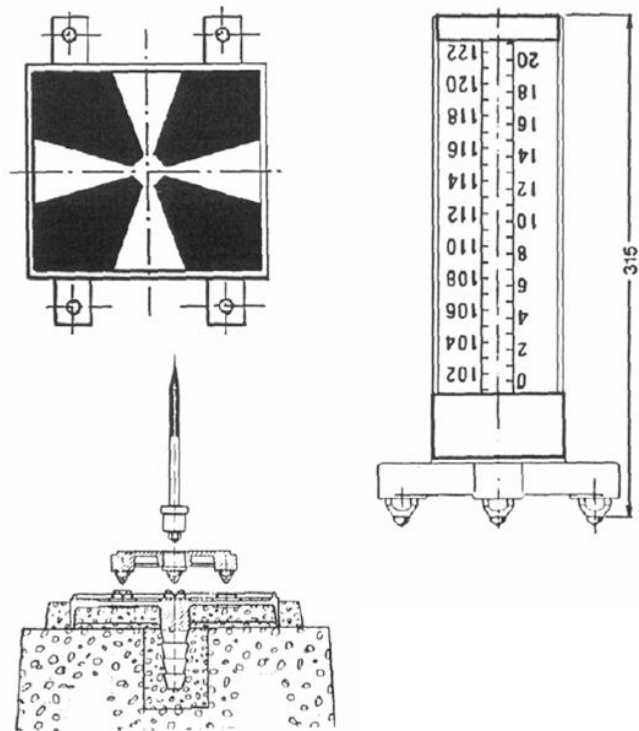


**Figura 1. 1**  
**Sistemi di collimazione applicati a una diga a gravità (a sinistra) e a una diga ad arco (a destra).**

Sono disponibili anche mire, per il punto sul coronamento, in grado di misurare gli spostamenti verticali, come mostrato nella figura 1.3.



**Figura 1.2**  
Cannocchiali collimatori.



**Figura 1.3**  
Mire per collimazione. Lo strumento a destra è in grado di misurare gli spostamenti verticali della struttura.

La collimazione è una tecnica particolarmente adatta alle dighe a gravità in quanto caratterizzate da un prevalente sviluppo rettilineo e una bassa trasmissione del carico alle spalle. La spinta idrostatica viene infatti controbilanciata dal peso proprio dei conci e non si scarica sul terreno ai lati della diga, come invece accade per le dighe ad arco. Questo fenomeno è una condizione favorevole, seppur non sufficiente, per la staticità del cannocchiale e della mira fissa.

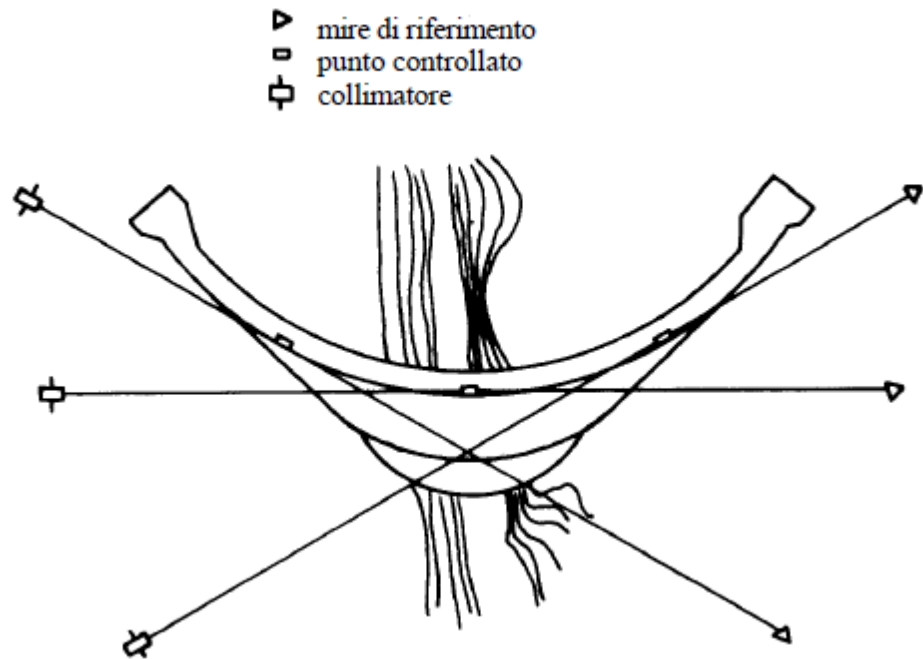
Ciò non vuol dire che il collimatore non possa essere impiegato nelle dighe a volta, ma occorre prestare particolare attenzione a eventuali spostamenti indotti sulle spalle di appoggio.

Un eventuale schema di rilievo per dighe ad arco è riportato nella figura 1.4 ed evidenzia la necessità, rispetto alle dighe rettilinee, di più linee di mira fisse. Questa complicazione

impiantistica può far preferire, per tali strutture di ritenuta, l'impiego di reti con stazioni totali e teodoliti.

Poiché la collimazione presuppone la presenza di capisaldi, la misura che si ottiene è quella di uno spostamento assoluto.

**Figura 1. 4**  
**Rete di monitoraggio**  
**di una diga ad arco**  
**mediante collimatori.**



### 1.1.2 Pendoli

Molti sbarramenti artificiali sono caratterizzati da un notevole sviluppo in altezza. Infatti secondo il Regolamento n.1363 del 1 novembre 1959 modificato e aggiornato dal D.M. del 24 marzo 1982, sono da definirsi dighe di ritenuta le opere di sbarramento che superino i 10 m di altezza o presentino un volume di invaso maggiore di 1'000'000 m<sup>3</sup>.

Di conseguenza il singolo concio della struttura si presenta come una trave verticale a incastro, che sotto la spinta idrostatica dell' acqua può subire notevoli sforzi di taglio e manifestare così delle deformazioni flessionali. Uno strumento prezioso per quantificare lo spostamento relativo del coronamento rispetto alla base è il pendolo, il quale si presenta nella configurazione diritta o rovescia. La prima è costituita da un filo a piombo (o eventualmente un'asta rigida) ancorato superiormente alla struttura e munito, all'estremità opposta, di una zavorra. Quest'ultima è a sua volta annegata in un liquido viscoso (in genere olio siliconico) che funge da smorzatore delle oscillazioni.

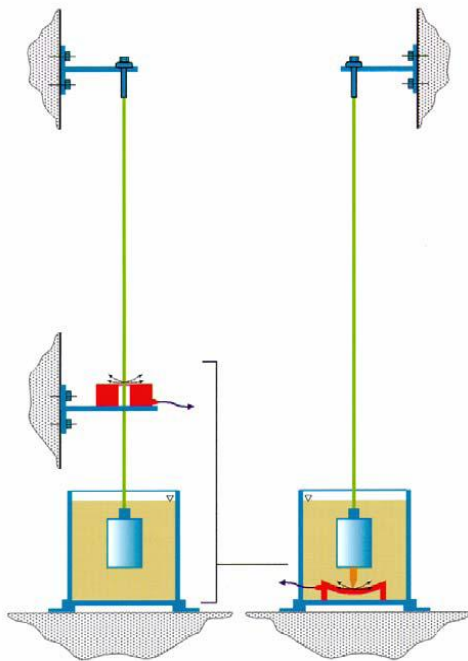
La funzione della zavorra invece è duplice: mantiene in tensione il filo e allo stesso tempo ne garantisce la perfetta verticalità.

In caso di deformazione o rotazione della struttura rispetto alla verticale si verificherebbe uno spostamento orizzontale del cavetto nel tempo, quantificabile mediante la lettura di una apposita dima graduata, anche detta coordinatometro.

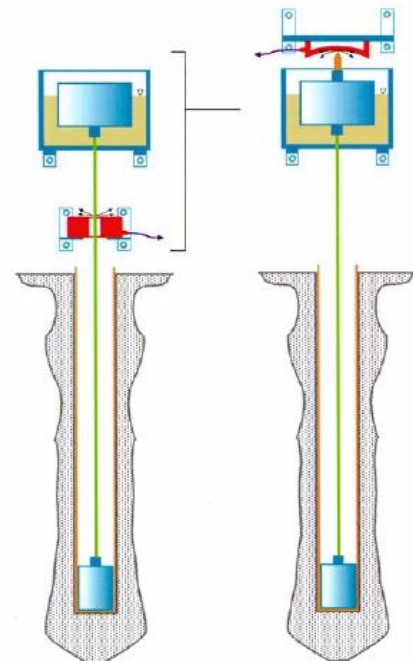
Per evitare deformazioni termiche che potrebbero compromettere la validità della misura si tende a realizzare i fili dei pendoli in invar, uno speciale acciaio al nichel dotato di bassissimo coefficiente di dilatazione termica.

L'altra tipologia di pendolo è quella rovescia, analoga alla diritta ma capovolta. Il filo viene infatti ancorato inferiormente mentre all'altro capo è assicurato un galleggiante, posizionato in un catino che contiene il fluido smorzatore.

Nelle opere di ritenuta, generalmente, si adottano pendoli diritti accoppiati ai rovesci. In particolare il diritto è fissato in prossimità del coronamento e registra gli spostamenti di quest'ultimo rispetto alle fondamenta del concio; lo strumento rovescio viene saldato a una certa profondità nella roccia di fondazione e serve per capire se il concio si sta muovendo rispetto al terreno. Lo spostamento assoluto della parte superiore del concio rispetto alla



**Figura 1. 5**  
**Il pendolo diritto.**



**Figura 1. 6**  
**Il pendolo rovescio.**

roccia si ottiene pertanto sommando i singoli contributi dei due pendoli.

Le precisioni conseguibili con questo tipo di strumentazione sono molto alte, nell'ordine del centesimo di millimetro. Oltre a questo indubbio vantaggio il pendolo risulta molto adatto al monitoraggio delle strutture e degli edifici perché molto più economico dei servo-clinometri. Inoltre non restituisce una misura puntuale dello spostamento bensì una media sull'intera lunghezza del filo, non risentendo così di eventuali fenomeni di deformazione locale. La possibilità inoltre di posizionare più strumenti in serie consente di coprire distanze anche notevoli, come è appunto il caso di dighe, campanili o pile di viadotti. Le possibili vibrazioni indotte dal traffico possono essere smorzate utilizzando il fluido viscoso più appropriato. Infine, molto importante ai fini del controllo è la qualità delle misure. L'installazione all'interno del corpo diga garantisce un appropriato isolamento dall'esterno e quindi l'assenza di errori accidentali dovuti al vento e agli agenti atmosferici. Per i viadotti o i ponti lo stesso risultato si può raggiungere inserendo il pendolo all'interno di un tubazione protettiva.



**Figura 1. 7**  
**Camera dei pendoli della diga di Beauregard (AO).**



### 1.1.3 Estensimetri

Gli estensimetri sono strumenti in grado di misurare le piccole deformazioni di un corpo. Sono composti principalmente da un trasduttore, il quale converte la deformazione tal quale in un segnale analogico eventualmente amplificato da un sistema di leve.

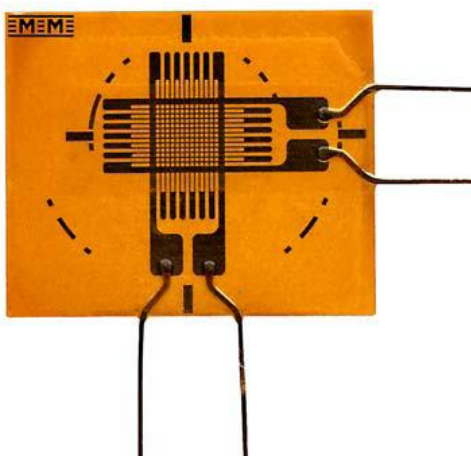
In origine l'estensimetro era uno strumento completamente meccanico che però, rispetto alle precisioni che era in grado di conseguire, presentava ancora costi di produzione eccessivi.

Successivamente si è passati a strumenti ottici, costituiti da un sistema complesso di lenti, prismi e specchi. Pur garantendo precisioni eccezionali rimangono relegati ad attività di ricerca per problemi di ingombro, costo e delicatezza.

Gli estensimetri acustici invece sono costituiti da un filo metallico il quale, secondo il principio della corda vibrante, emette un suono a frequenza diversa in base al grado di tensione cui viene sottoposto.

Tutti questi tipi di strumenti sono stati recentemente soppiantati dai moderni estensimetri elettrici a resistenza, vantaggiosi dal punto di vista economico e in grado di garantire misure accurate. Sono composti da un filo metallico, generalmente in costantana, che varia la propria resistenza elettrica in base alla sezione. Quest'ultima aumenta o diminuisce in funzione dello sforzo assiale applicato al filo stesso.

Gli estensimetri possono essere impiegati per monitorare ad esempio le deformazioni tra due conci adiacenti, in modo da verificare lo stato tensionale dei giunti e delle guaine di tenuta. Dalla legge di Hooke infatti si riesce a risalire al carico agente una volta nota la costante elastica. Diventa a questo punto intuitivo il calcolo dello stato di sforzo nei punti di interesse.



**Figura 1. 8**  
Un moderno estensimetro elettrico a resistenza.

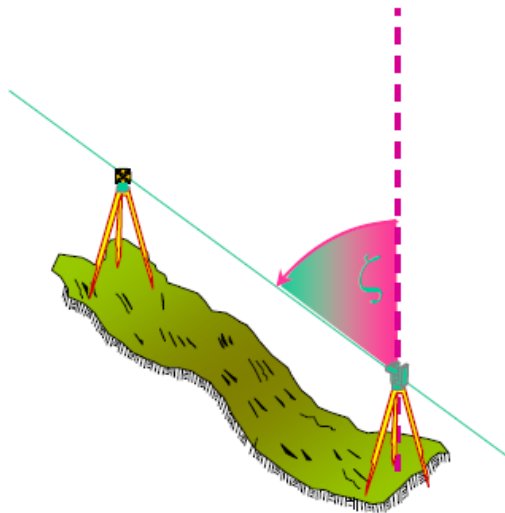
### 1.1.4 Stazioni totali

La stazione totale è un particolare tipo di strumento topografico che unisce nello stesso apparecchio un teodolite per la misura degli angoli, e un distanziometro per la determinazione delle lunghezze.

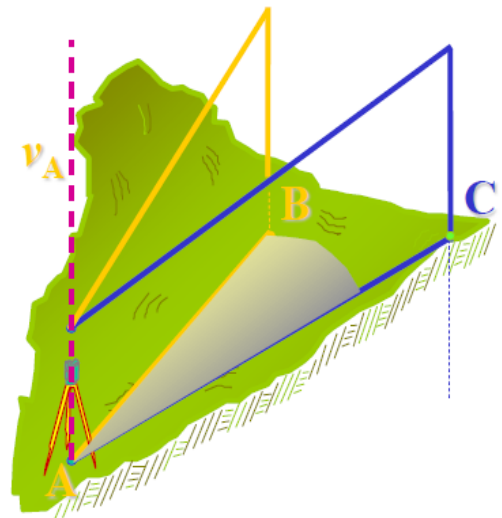
Si ipotizzi a questo punto di materializzare una retta verticale  $v_A$  passante per il punto di stazione **A** dello strumento, e due punti **B** e **C** nello spazio (Figura 1.9).

Tra gli infiniti piani che contengono  $v_A$  si possono identificare con  $\pi_B$  e  $\pi_C$  quelli passanti rispettivamente per **B** e **C** e l'angolo  $\alpha$  compreso tra essi prende il nome di angolo azimutale

Si definisce invece zenitale l'angolo  $\zeta$  formato dalla verticale  $v_A$  con la retta congiungente il punto di stazione al punto collimato (**B** o **C** ad esempio), come mostrato in figura 1.10.



**Figura 1.9**  
L'angolo zenitale.



**Figura 1.10**  
Rappresentazione grafica dell'angolo azimutale.

Dalle definizioni appena elencate emerge molto chiaramente l'importanza del posizionamento dello strumento, al fine di garantire la perfetta verticalità dello strumento e quindi una elevata precisione della misura.

Per questo motivo al treppiede di appoggio del teodolite è agganciata una basetta, regolata da tre viti calanti distanziate tra loro di 120 gradi sessagesimali. Esse, durante la messa in stazione, consentono di rendere il più possibile orizzontale il piano basculante della basetta seguendo le indicazioni fornite da una livella sferica.

Sulla basetta si innesta poi il teodolite vero e proprio, costituito da 3 componenti principali: il basamento, l'alidada e il cannocchiale.

Il basamento costituisce la parte inferiore del teodolite, in cui sono alloggiati i cerchi graduati per la lettura delle misure. È dotato di appositi piedini per l'inserimento nella basetta, nonché di una vite per il bloccaggio. È inoltre presente una livella torica ad alta precisione, che consente di migliorare ulteriormente la verticalità dello strumento.

Sul basamento si inserisce poi una struttura a forma di **U** che prende il nome di alidada. Essa è in grado di ruotare attorno ad un asse perpendicolare al basamento, che prende il nome di asse primario. In condizioni di perfetta messa in stazione l'asse primario coincide con la verticale passante per il punto di stazione, ovvero  $v_A$ .

Tra i bracci dell'alidada si posiziona infine il cannocchiale, ovvero il dispositivo ottico di puntamento del teodolite. Attraverso il centro delle sue lenti passa l'asse di collimazione, che viene indirizzato con precisione sui prismi segnaletici grazie all'ausilio di un reticolo di mira. Al cannocchiale è consentita una rotazione attorno all'asse secondario, perpendicolare sia al primario che a quello del collimatore.

In uno strumento correttamente rettificato l'asse principale deve essere perfettamente verticale, l'asse secondario orizzontale e l'asse di collimazione perpendicolare al secondario. I 3 assi devono intersecarsi precisamente in un punto che rappresenta il centro strumentale del teodolite. La misura degli angoli con uno strumento di questo tipo permette il



**Figura 1. 11**  
**La stazione totale Leica FlexLine**  
**TS09.**

raggiungimento di precisioni estremamente elevate, dell'ordine del decimillesimo di grado centesimale (ovvero  $10^{-4}$  gon). Per questa ragione il teodolite ha trovato largo impiego anche per misurare le distanze. Queste ultime infatti vengono derivate indirettamente da misure angolari ma mantengono comunque una precisione più elevata rispetto a quelle dirette eseguite ad esempio con distanziometri di ultima generazione.

L'introduzione della stazione totale motorizzata ha inoltre facilitato il compito dell'operatore in quanto la lettura del cerchio graduato è eseguita in automatico dal computer integrato nello strumento, riducendo così la probabilità di errori grossolani.

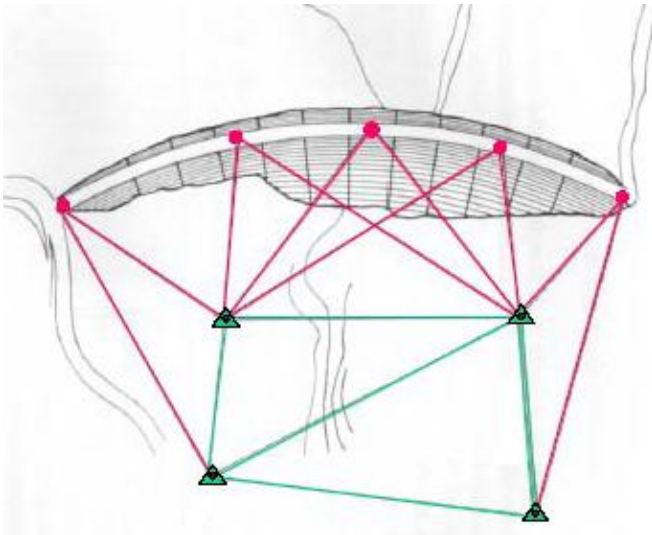
Oltre alla componente teodolite la stazione totale si compone anche di un apparato EOM per la misura diretta delle distanze. Si tratta di un emettitore laser che cronometra il tempo impiegato dall'impulso elettromagnetico per ritornare alla sorgente dopo aver colpito il

bersaglio. Essendo nota la velocità  $c$  dell'onda, la distanza si ricava facilmente moltiplicando  $c$  per il tempo misurato e dividendo il tutto per 2.

La criticità di un sistema di questo tipo consiste nelle precisioni di misura dell'intervallo di tempo. Le grandezze in gioco infatti sono estremamente piccole e quindi non si impiega un cronometro tradizionale, bensì si misura nel tempo la variazione di carica elettrica su di un condensatore. Le precisioni in gioco dipendono da una parte fissa, variabile da 1 a 3 mm circa, cui si somma un contributo proporzionale alla distanza stessa (in genere da 1 a 3 volte il milionesimo della distanza).

La gestione di tutte le operazioni è eseguita elettronicamente da un computer, che si occupa di visualizzare su un display le misure e archivarle su una scheda di memoria.

La stazione totale si è dimostrata molto adatta al monitoraggio delle grandi strutture, tant'è che nelle dighe, soprattutto ad arco, è tuttora una delle tecniche di controllo maggiormente usate. Ci si basa ovviamente sul principio della triangolazione topografica, che richiede la costruzione di una apposita rete di capisaldi e di punti da monitorare, come mostrato nella figura 1.12. La campagna di misura consentirà di ricavare quindi distanze e coordinate dei punti dopo aver effettuato la compensazione della rete stessa.



**Figura 1. 12**  
**Rete di monitoraggio di una diga**  
**mediante stazione totale. I triangoli in**  
**verde rappresentano i capisaldi mentre i**  
**pallini rosa sono i punti da controllare.**

### 1.1.5 GNSS

Gli strumenti di misura analizzati finora si possono con buona ragione ricollegare alla topografia classica, cui fanno capo peraltro anche i livelli di alta precisione.

In questi ultimi anni tuttavia si sono affermate le moderne tecnologie di posizionamento basate sull'impiego dei satelliti, denominate genericamente GNSS, acronimo di Global Navigation Satellite System (sistema satellitare globale di navigazione).

Esse consistono in un complesso sistema di satelliti artificiali mantenuti in orbita intorno alla Terra e che vengono utilizzati per determinare la posizione di un apposito ricevitore. Quest'ultima viene espressa in coordinate X, Y, Z del sistema di riferimento ellissoidico WGS84 e viene correlata alla distanza  $d_R^i$  tra satellite e ricevitore secondo l'equazione:

$$d_R^i = \sqrt{(X^i - X_R)^2 + (Y^i - Y_R)^2 + (Z^i - Z_R)^2}$$

Dove  $i$  indica il satellite  $i$ -esimo e il pedice  $R$  fa riferimento al ricevitore.

Ipotizzando di poter misurare la distanza e di conoscere l'esatta posizione del generico satellite l'espressione appena scritta presenta 3 incognite, che sono appunto le coordinate dell'antenna ricevitrice.

Di conseguenza, per risolvere il problema è necessario disporre di almeno 3 satelliti differenti. In realtà tale vincolo viene aumentato a 4 per l'introduzione di una nuova incognita associata allo sfasamento temporale dell'orologio del ricevitore rispetto a quello del satellite.

Infatti la distanza  $d_R^i$  viene calcolata moltiplicando la velocità di propagazione del segnale per il tempo che esso impiega a raggiungere l'antenna GNSS. Tuttavia l'orologio del ricevitore non è preciso e accurato come l'oscillatore atomico a bordo del satellite e quindi questo offset, o sfasamento, si ripercuote sulla misura della distanza, e va considerato come una ulteriore incognita del problema. L'equazione diventa dunque:

$$P_R^i = \sqrt{(X^i - X_R)^2 + (Y^i - Y_R)^2 + (Z^i - Z_R)^2} + c \cdot \Delta t = d_R^i + c \cdot \Delta t$$

Dove  $P_R^i$  viene chiamata pseudo-range e rappresenta la distanza  $d_R^i$  affetta dall'errore di sincronizzazione degli orologi.  $c$  è la velocità di propagazione del segnale mentre  $\Delta t$  è l'offset temporale incognito.

## **Errori di misura**

In base a quanto detto finora la misura satellitare sembrerebbe estremamente affidabile e semplice. In realtà esistono problematiche diverse, che influiscono sulla precisione e sugli errori che si commettono. Senza entrare troppo nel dettaglio si possono classificare questi errori in 4 categorie principali: errori puramente strumentali, errori sistematici o di modello, errori di osservazione, selective availability.

Nella prima categoria rientrano le imprecisioni nella misura della lunghezza d'onda del segnale, fondamentale per la determinazione della distanza antenna-satellite. In generale questi errori possono essere ridotti, ma non eliminati, impiegando dei ricevitori più sofisticati e precisi, i quali però presentano l'inconveniente del prezzo elevato.

Gli errori di modello invece sono anche detti biases e comprendono l'offset temporale tra gli orologi del satellite e del ricevitore, di cui si è parlato in precedenza, errori d'orbita e atmosferici.

I biases d'orbita sono strettamente legati alla conoscenza più o meno precisa della posizione dei satelliti, mentre quelli atmosferici dipendono dalla propagazione del segnale. L'onda emessa dal satellite infatti attraversa strati dell'atmosfera a densità diversa e subisce quindi rifrazione, è soggetta agli intensi campi elettromagnetici della ionosfera e alla rifrattività e diffusione dovute al vapore acqueo della troposfera. Tutti questi fattori producono dei disturbi al segnale GNSS emesso e contribuiscono all'errore della misura.

Legati invece all'operazione di misura vera e propria sono gli errori di osservazione, distinti in multipath e cycle slips.

Il primo fenomeno accade quando il segnale giunge al ricevitore non per via diretta, bensì dopo varie riflessioni. In questo modo la ricezione appare pesantemente disturbata e la distanza misurata risulta maggiore di quella reale.

È un aspetto da tenere in considerazione qualora l'antenna venga posizionata su superfici particolarmente riflettenti, come coperture metalliche o terreni innevati, in modo da prevedere una adeguata schermatura del ricevitore.

Il Cycle slips, o salto di ciclo, si verifica quando l'acquisizione del segnale viene temporaneamente impedita e il ricevitore perde alcuni cicli dell'onda, a causa ad esempio di ostacoli quali alberi, edifici o rilievi orografici.

Un argomento a parte è rappresentato dalla selective availability, presente in sistemi di posizionamento GNSS di derivazione militare, come ad esempio la costellazione americana Navstar GPS. Essendo infatti progettata e gestita dal Dipartimento della Difesa Statunitense,

rappresenta una tecnologia di notevole importanza strategica. Per questa ragione il Pentagono può, a sua discrezione, introdurre temporaneamente errori nell'orologio dei satelliti, al fine di diminuire la precisione dei ricevitori civili. Va anche precisato che lo stesso segnale GPS, quando non affetto da selective availability, contiene comunque una componente cifrata, decodificabile solo da apparecchiature in dotazione all'esercito. Questo contributo è in grado di far raggiungere precisioni nel posizionamento molto più elevate rispetto a quanto non accada per gli usi civili.

### **Struttura del sistema GNSS**

In un generico sistema di posizionamento satellitare sono sempre distinguibili tre componenti fondamentali: il segmento spaziale, il segmento utente e il segmento di controllo.

- Il segmento spaziale: è costituito dai satelliti in orbita intorno alla Terra e ha il compito di inviare il segnale modulato ai ricevitori, inclusa la precisa informazione temporale. Quest'ultima viene raggiunta mediante oscillatori atomici al cesio e rubidio, installati in numero ridondante su ogni satellite (4 orologi per ciascuno) proprio per garantire l'affidabilità del sistema.

Il satellite comunica inoltre con il segmento di controllo, ed è in grado di eseguire manovre correttive d'orbita impartite da Terra, mediante l'azionamento di piccoli razzi propulsori.

Nel caso del sistema GPS la costellazione è composta da 24 satelliti, più due di backup, disposti su 6 orbite circolari di raggio pari a 26000 km circa. La loro disposizione è tale da garantire una completa copertura del globo e la visione di almeno 4 satelliti in qualsiasi punto della Terra.

- Il segmento utente: comprende tutte le utenze a terra che ricevono il segnale GNSS mediante un'antenna e sono in grado di decodificarlo. L'apparecchio di ricezione si distingue, oltre che per la tecnologia impiegata e le precisioni conseguibili, anche per la capacità di decrittare o meno la portante cifrata (accessibile solo ad utenze militari) e per il numero di canali di cui dispone. L'antenna deve infatti captare l'impulso elettromagnetico di più satelliti contemporaneamente e quindi è

necessario dedicare un canale di ricezione a ciascuno di essi. Se sono disponibili molti canali risulta potenzialmente migliore il posizionamento, a patto comunque che siano visibili i satelliti in numero adeguato.

- Il segmento di controllo: si occupa della gestione dei satelliti e ne verifica il corretto stato di funzionamento. L'attività più importante del segmento di controllo è acquisire la posizione dei satelliti e determinare l'errore di sincronizzazione degli orologi. Nel sistema GPS questa attività è svolta in 4 stazioni localizzate lungo l'equatore (Diego Garcia, Hawaii, Ascension e Kwajalein) le quali trasmettono le informazioni alla stazione master situata a Colorado Springs. Quest'ultima si occupa dell'elaborazione dei dati e della determinazione dei parametri orbitali, o effemeridi, dei vari satelliti. Le effemeridi vengono poi inviate al segmento spaziale e vengono dette "broadcast" in quanto consentono di predire la posizione dell'intera costellazione satellitare per i successivi 15 minuti.

### **Metodi di misura e precisioni conseguibili**

Il posizionamento mediante strumentazione satellitare può essere eseguito in svariati modi, che si differenziano tra loro per le modalità di esecuzione del rilievo, il numero di ricevitori impiegati e le tecniche di elaborazione dei dati.

La campagna di misura infatti può essere svolta in maniera statica o cinematica. Nel primo caso il ricevitore GNSS rimane fermo nel punto di stazione per una durata superiore a qualche minuto, mentre nel secondo l'antenna è in movimento o sosta nel punto di stazione solamente per qualche secondo.

Un esempio di rilievo statico è quello eseguito nelle stazioni permanenti di misura, o nelle installazioni su capisaldi materializzati ad esempio da pilastrini in calcestruzzo.

In questo modo il segmento utente è in grado di ricevere il segnale del satellite per un lungo periodo di tempo, con conseguenti benefici di riduzione degli errori e un ovvio aumento delle precisioni.

Il rilievo cinematico invece si può verificare ad esempio se l'antenna è installata su un veicolo in movimento, per rilevarne istante per istante la posizione. Ciò torna utile soprattutto in applicazioni stradali e di fotogrammetria aerea.



Per quanto riguarda il numero di ricevitori, nel caso di un solo apparecchio si parla di posizionamento assoluto, mentre con due o più strumenti in contemporanea si tratta di posizionamento relativo. Quest'ultimo è assai più preciso dell'altro in quanto riesce a ridurre notevolmente gli errori sistematici ed è in grado di raggiungere precisioni adatte agli scopi topografici.

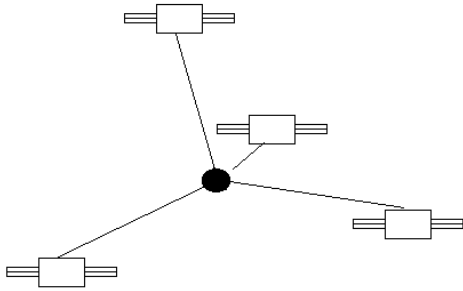
L'elaborazione dei dati poi può essere eseguita in tempo reale, durante l'acquisizione della misura. Si parla in questo caso di processamento real time, contrapposto al post processing che invece analizza le misure acquisite solo successivamente al rilievo stesso. Come è facile immaginare, il post processing migliora notevolmente le precisioni, anche perché le effemeridi corrette dei satelliti non sono disponibili istantaneamente, bensì dopo un lasso di tempo anche di una settimana.

In sintesi dunque il rilievo migliore ai fini topografici risulta quello statico relativo con post processamento dei dati, in grado di raggiungere precisioni anche millimetriche sulla posizione del punto. Quello assoluto invece non riesce a scendere sotto qualche decina di centimetri, così come i rilievi cinematici relativi, che si attestano su precisioni solo submetriche nonostante l'elaborazione in post processing.

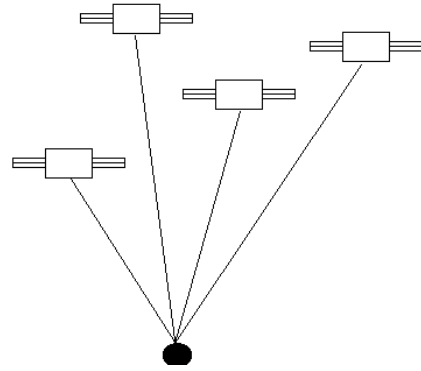
### **La Dilution Of Precision (DOP)**

La condizione necessaria per una corretta localizzazione mediante GNSS è ovviamente la visibilità dei satelliti da parte del ricevitore (si è parlato in particolare di un minimo di 4 affinché si possa eseguire il rilievo dei vari punti). Tuttavia non è importante solo il numero dei satelliti ma anche la loro disposizione nello spazio. Questo aspetto viene tenuto in conto mediante il DOP (Dilution Of Precision), ovvero un parametro proporzionale all'inverso del volume del solido con vertici i satelliti e il punto a terra. Un valore alto del DOP indica una diminuzione della precisione a causa della cattiva configurazione geometrica dei satelliti nello spazio. Pertanto, affinché un rilievo possa considerarsi affidabile è opportuno non superare un valore di DOP pari a 6.

Per meglio chiarire il concetto si riporta nella fig. 1.13 la configurazione denominata ad ombrello aperto, caratterizzata dal DOP più basso possibile. Al contrario la fig. 1.14 rappresenta la configurazione ad ombrello chiuso, da cui deriva una Dilution Of Precision alta e un posizionamento piuttosto scadente.



**Figura 1. 13**  
Configurazione satellitare ad ombrello aperto.



**Figura 1. 14**  
Configurazione satellitare ad ombrello chiuso.

### Tipologie di costellazioni e applicazioni pratiche

La tecnologia GNSS ha visto la sua nascita nel 1960, quando gli Stati Uniti lanciarono in orbita polare una costellazione di satelliti denominata Transit, con lo scopo di determinare la posizione in mare di navi e sottomarini della U.S. Navy.

Oggigiorno questo sistema è piuttosto obsoleto ed è stato sostituito completamente all'inizio degli anni novanta dal moderno Navstar GPS, acronimo di NAVigation Satellite Time And Ranging Global Positioning System, di proprietà del Dipartimento della Difesa statunitense. Pur essendo nato per esigenze militari ne è concesso l'uso anche alle utenze civili, seppure con limitazioni che riducono le precisioni del posizionamento.

Esiste anche una costellazione varata dall'ex Unione Sovietica negli anni ottanta, che prende il nome di Glonass. La sua funzionalità però si è ridotta molto nei due decenni successivi, a causa della forte crisi economica che ha agitato il paese, e solo nel 2010 è stata ripristinata la piena operatività della rete.

La stessa Unione Europea sta realizzando una propria costellazione satellitare che si prevede operativa entro il 2013 con il nome di Galileo e avente finalità sia commerciali-civili che militari.

Il posizionamento GNSS ha visto un forte sviluppo negli ultimi anni e la sua applicazione è si è estesa a svariati settori, anche grazie all'abbattimento dei costi dei ricevitori. Si ricorda a tal proposito il massiccio impiego dei navigatori satellitari per auto, di facile e immediato utilizzo anche per i non addetti ai lavori.

Per quanto riguarda il monitoraggio invece, argomento principale di questa tesi, il sistema GNSS può risultare molto adatto agli scopi, a patto però che gli spostamenti da rilevare siano compatibili con la sensibilità della strumentazione satellitare.

I vantaggi immediati di una rete di controllo di questo tipo rispetto agli strumenti tradizionali sono molteplici. Infatti è possibile avere una misura molto frequente nel tempo, quasi in continuo e non è richiesto l'intervento di lettura dell'operatore sul posto. I dati infatti possono essere trasmessi direttamente alla stazione di controllo via radio, satellite o rete telefonica. Questo aspetto ha notevoli implicazioni pratiche in quanto la rete di monitoraggio può essere gestita in remoto e posizionata anche in punti impervi e di difficile



**Figura 1. 15**  
**Antenna e ricevitore GPS durante un rilievo.**

accessibilità. I dati sono già in formato digitale e non presentano errori grossolani di lettura dallo strumento, o di trascrizione della misura su carta o su supporto informatico. Gli strumenti tradizionali inoltre, come ad esempio i pendoli, sono molto delicati, costosi e necessitano di una accurata taratura. Il ricevitore GPS è invece caratterizzato da un costo più contenuto, cosa che permette di progettare, a parità di investimento iniziale, una rete più fitta e capillare.

Lo svantaggio principale è che il dato GPS necessita di una elaborazione più impegnativa, che deve tenere conto, tra le

altre cose, del passaggio dal sistema di riferimento globale in WGS84, alle coordinate ad esempio locali in cui si vuole georeferenziare gli spostamenti.

A livello pratico comunque i sistemi GPS hanno visto buoni risultati applicativi nel monitoraggio di grandi frane e movimenti di versante. Un esempio è il caso della frana di Berceto, particolarmente importante perché interessa il territorio attraversato dall'autostrada A15 della Cisa e ha provocato nel tempo diversi problemi di stabilità alle pile dei viadotti. Buone prospettive di utilizzo sembrano anche arrivare dal controllo delle grandi dighe, argomento trattato in questa tesi di laurea. Sperimentazioni di questo tipo si sono già avute ad esempio nella diga Pacoima in California. In questo caso non è stato possibile

confrontare i risultati del rilievo GPS con quelli degli strumenti tradizionali installati nella diga, ma l'analisi ha mostrato un andamento complessivo degli spostamenti compatibile con le aspettative teoriche di comportamento per una struttura di questo genere.

## **1.2 Le serie temporali dei dati di spostamento e la loro modellizzazione**

Il monitoraggio in generale si occupa di tenere sotto controllo nel tempo una particolare opera o struttura, sia di tipo antropico che naturale. Ne consegue pertanto che le campagne di rilevamento debbano essere eseguite e ripetute con una certa periodicità, ottenendo così una serie temporale di misure da poter analizzare.

Ciò ha delle implicazioni dirette sulle metodologie da impiegare, le quali devono garantire la ripetibilità e univocità della misura, e devono essere eseguite con una frequenza adeguata al problema in esame.

Del primo aspetto se ne è già parlato nel paragrafo precedente, evidenziando come gli strumenti topografici soddisfino pienamente il requisito.

La risoluzione temporale delle misure invece è una variabile che viene scelta dal soggetto incaricato del controllo a seconda del tipo di fenomeno deformativo in atto.

Se infatti il movimento dipende sostanzialmente dalle deformazioni termiche stagionali, un campionamento su base annuale è troppo approssimativo e non è in grado di cogliere queste variazioni. Al contrario eseguire misure con cadenza oraria sarebbe oltremodo eccessivo in quanto comporterebbe un inutile spreco di denaro e di risorse. Occorre dunque avere ben chiaro i fenomeni che regolano il processo per poter definire correttamente i parametri gestionali della rete stessa. Una utile indicazione di massima può essere fornita classificando i movimenti di tipo ciclico a seconda del periodo (brevissimo, breve e lungo) .

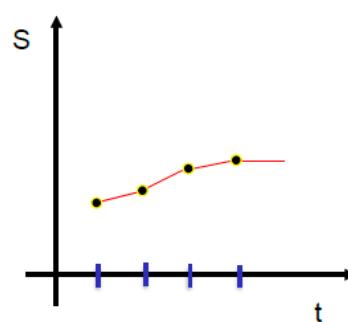
Nel caso del breve o brevissimo periodo si parla di oscillazioni o vibrazioni, come ad esempio quelle indotte da una scossa sismica o dal passaggio di un convoglio ferroviario nelle immediate vicinanze. Di queste situazioni non ci si occuperà nella presente tesi di laurea, poiché richiedono strumenti campionatori di tipo dinamico, non propriamente topografici, che misurino gli spostamenti in continuo.

Ciclici a lungo periodo sono invece i movimenti caratterizzati da una evoluzione temporale più lenta e graduale. Possono ad esempio essere provocati da sbalzi ed escursioni termiche, oscillazioni periodiche del livello di falda o di marea, fenomeni legati alle piogge o alla presenza del ghiaccio e così via. Oltre a ciò non va sottovalutata la presenza di eventuali trend lineari negli spostamenti, che possono essere sintomo di processi irreversibili per la struttura monitorata. Ci si riferisce ad esempio ai fenomeni di cedimento per consolidazione e assestamento del sottosuolo, o alla degradazione delle proprietà meccaniche dei materiali di costruzione nel caso di opere particolarmente antiche, o alla plasticizzazione di elementi strutturali a seguito di sollecitazioni di carico eccessive.

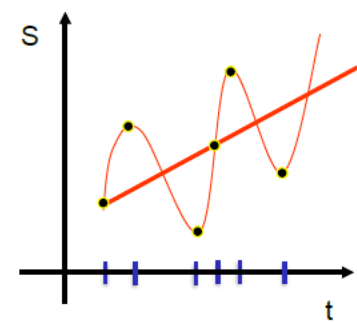
Un tipico esempio di trend lineare del fenomeno è riportata in figura 1.16. Si nota come gli spostamenti  $S$  tendano a crescere progressivamente senza dar segno di una qualche inversione di tendenza. I vari punti possono essere infatti interpolati da una retta con coefficiente angolare positivo.



**Figura 1.16**  
Andamento monotono crescente degli spostamenti nel tempo.



**Figura 1.17**  
Caso di assestamento e stabilizzazione della struttura.



**Figura 1.18**  
Andamento periodico unito ad un trend lineare di crescita.

Diversa è invece la situazione rappresentata nella figura 1.17. La serie temporale mostra una crescita lineare solo nel primo periodo, ma successivamente pare assestarsi su valori costanti, come se fosse avvenuta una qualche consolidazione nel terreno di posa.

Molto significativa risulta poi la terza figura della serie, la 1.18. Essa mostra infatti la presenza di una periodicità nei movimenti e al contempo anche di un trend positivo. In tali situazioni la pianificazione del monitoraggio diventa alquanto delicata in quanto deve essere in grado di cogliere entrambi gli aspetti.

Se infatti la tendenza alla crescita fosse abbastanza ridotta, potrebbe venire camuffata o mascherata da accentuati spostamenti periodici del sistema, assai più evidenti e visibili.

Al contrario, facendo sempre riferimento alla figura 1.18 si immagini di disporre solo del primo e del quarto punto della serie. In tale condizione si noterebbe solo la componente lineare dello spostamento, ma non quella oscillatoria.

Analogamente, nella figura 1.17 disponendo solo del primo e del terzo punto il trend verrebbe sovrastimato, e non si evidenzerebbe la successiva direzione evolutiva verso la stabilità. Per evitare dunque di commettere errori simili, che porterebbero a sovrastimare la gravità della situazione o, a ancora peggio, a sottovalutarne l'entità è necessario procedere ad uno studio specifico dell'evoluzione del sistema.

A riguardo ci si può avvalere di consulenze esterne da parte di esperti del settore. Se ad esempio si deve controllare i movimenti di una frana, un geologo o un geotecnico sono in grado di fornire indicazioni molto utili sui fattori evolutivi del fenomeno mentre nel caso di una diga invece ci si può rivolgere a uno strutturista esperto di sbarramenti. L'inconveniente di queste consultazioni risiede però nel costo, da aggiungere a quello della rete di controllo stessa, e che rappresenta talvolta un deterrente per il gestore della struttura, specialmente in ambito pubblico. Un'alternativa interessante viene fornita dalla letteratura di settore: pubblicazioni su riviste, giornali specialistici, libri di testo e articoli spesso forniscono da soli le risposte di cui si ha bisogno, senza necessità di ulteriori e costosi approfondimenti. Prima di imbarcarsi in studi ed esperienze sperimentali, sarebbe sempre opportuno controllare se, in passato, qualcuno non abbia già affrontato l'argomento. Ciò permetterebbe di risparmiare molto tempo a fronte di un modesto lavoro di ricerca. In seguito, solo se il materiale raccolto risultasse insufficiente, si procederebbe con approfondimenti ulteriori.

A conclusione di questa fase si dovrebbe poi giungere ad un modello parametrizzato, in grado di ripercorrere il più fedelmente possibile gli spostamenti reali, in funzione ovviamente delle variabili che maggiormente sono coinvolte nel processo.

Il modello può essere fisicamente basato, ovvero funzione di soli parametri fisici misurabili, come la temperatura dell'aria, l'insolazione, l'altezza di pioggia caduta ecc. Questi modelli sono anche detti deterministici perché in qualche modo spiegano la realtà mediante rapporti causa-effetto, come per le normali leggi della fisica. Rispetto a queste ultime però si differenziano per un grado di incertezza, che in alcuni casi non è trascurabile.

Sono inoltre contraddistinte da uno spiccato carattere empirico, come spesso accade per alcune formule impiegate in idraulica o in idrologia.

Agli antipodi dei deterministici si trovano i modelli predittivi, i quali si disinteressano delle cause fisiche e stimano lo spostamento ad esempio in funzione del tempo, della distanza da

un'origine fissata e via dicendo. Sono pertanto applicabili anche in assenza di misure specifiche perché è sufficiente conoscere la serie temporale di spostamento per calibrare il modello stesso.

Oltre a queste due categorie antitetiche esistono pure dei modelli ibridi, che si rifanno sia ai deterministici, sia ai predittivi, come ad esempio quello sugli spostamenti delle dighe compilato da De Sortis e Paoliani, di cui si tratterà più approfonditamente nel seguito.

Operare una modellizzazione porta molteplici vantaggi in quanto si cerca di ricostruire il processo deformativo attraverso una funzione matematica più o meno regolare e complessa. Ciò permette di individuare in futuro eventuali anomalie di comportamento, in modo tale da attivare tempestivamente le procedure di allerta adeguate alla situazione.

Naturalmente il discorso vale anche per la verifica della buona riuscita di un provvedimento migliorativo: se ad esempio si decide di intervenire su un corpo di frana in lento scorrimento adottando gallerie drenanti e geotessuti, a lavori terminati si dovrebbe notare un arresto o un rallentamento del processo di scivolamento del versante verso valle. La serie temporale degli spostamenti recenti allora si discosterà dal modello applicato sulle misure pre-intervento e richiederà quindi un nuovo aggiornamento dei parametri. Particolarmente utili in questo senso sono i modelli predittivi, che dipendendo da sole variabili "ausiliarie", come il tempo, e sono in grado di dare previsioni per il futuro; la stessa cosa non vale per i deterministici, che richiedono la conoscenza di grandezze misurate sul campo, difficilmente prevedibili con precisione, specialmente sul lungo periodo.

L'esecuzione inoltre di appositi test statistici e analisi di sensitività può far capire, nel caso di modelli deterministici e ibridi, quali grandezze influiscono di più sul risultato finale. In questo modo se il modello è di provata robustezza e affidabilità può suggerire, in base al peso assegnato, su quali cause intervenire maggiormente in fase correttiva.

### 1.2.1 I modelli predittivi

Come già anticipato, per descrivere gli spostamenti subiti da un punto della struttura i modelli predittivi si servono di variabili ausiliarie, ovvero che non hanno niente a che vedere con la fisica del problema, quantomeno per via diretta.

Possono essere accomunati in un certo senso ai modelli a “black box”, o scatola nera, in cui si conosce l’ingresso e se ne ricava l’output senza per questo spiegare il passaggio intermedio che lo ha generato.

Infatti tutto il meccanismo di risposta del modello è racchiuso nelle variabili ausiliarie, combinate opportunamente per rispondere alle caratteristiche del processo da modellare.

Nel caso specifico degli spostamenti al coronamento di una diga si nota un andamento oscillatorio con periodo annuale, corredato da un eventuale trend pressoché lineare ad indicare una tendenza irreversibile di movimento nel concio della struttura.

Queste semplici ed essenziali informazioni sono più che sufficienti per costruire un modello predittivo, come quello già impiegato nella tesi di dottorato di Maria Elena Gaetani per la ricostruzione degli spostamenti della diga Cixerri in Sardegna.

Esso è infatti caratterizzato da una componente lineare e da una periodica, rappresentata da una funzione sinusoidale di periodo noto. In formule:

$$S = a \cdot t + b + c \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) + d \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right)$$

Dove **T** rappresenta il periodo dell’oscillazione, pari a 365 giorni e **S** lo spostamento del concio alla sommità in direzione parallela o perpendicolare al coronamento.

**a**, **b**, **c** e **d** sono invece i parametri del modello, da stimare sulla base degli spostamenti reali con una procedura di regressione ai minimi quadrati.

La variabile di servizio è in questo caso il tempo **t**, che accorpa tutte le grandezze fisiche responsabili dell’andamento ondulatorio, quali per esempio la temperatura dell’aria, o dell’acqua nell’invaso facendo ricorso ragionevolmente a una funzione sinusoidale di argomento crescente. Per congruenza dimensionale anche **t** va espresso in giorni.

Il modello può poi essere adattato e modificato per tenere conto ad esempio di ipotetiche oscillazioni su base semestrale. La complessità cresce, ma teoricamente rende la funzione



più aderente alla realtà. È il caso del cosiddetto Modello PoliMi<sup>1</sup>, espresso mediante la seguente formulazione:

$$S = a \cdot t + b + A \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right) + B \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) + C \cos\left(\frac{4\pi t}{T}\right) + D \sin\left(\frac{4\pi t}{T}\right)$$

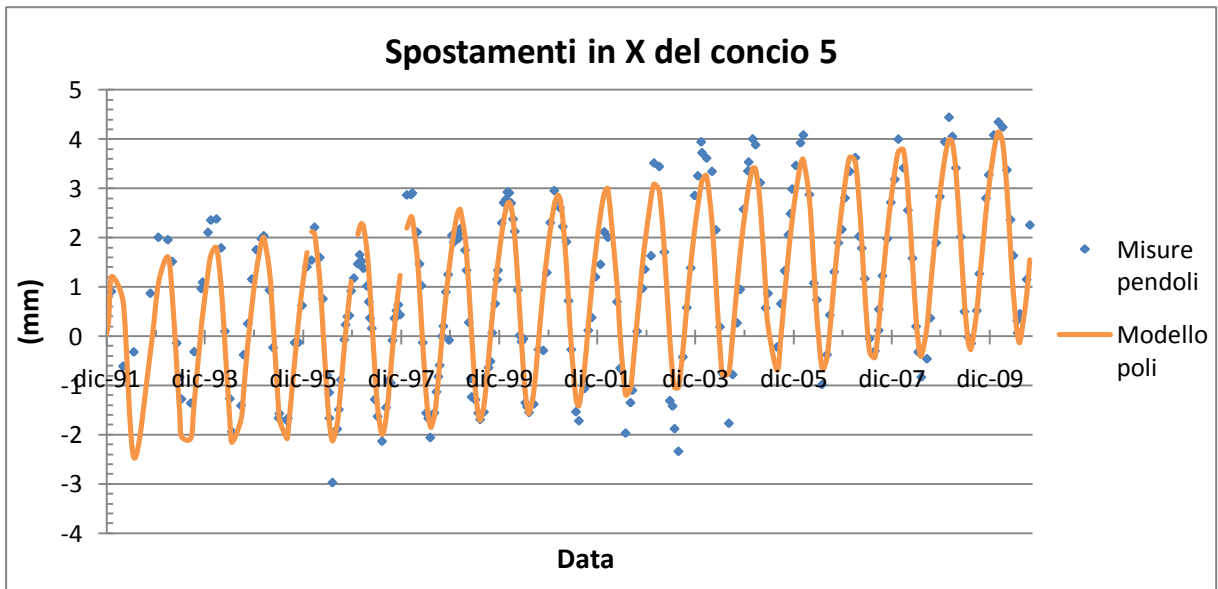
**t** è ancora una volta il tempo espresso in giorni mentre **a**, **b**, **A**, **B**, **C**, **D** sono i parametri del modello.

Nella figura 1.19 è riportata una applicazione reale del Modello PoliMi al caso studio della diga Cixerri in Sardegna. Nello specifico si è modellizzato lo spostamento al coronamento del concio numero 5, monitorato da un sistema di pendoli composto da uno strumento dritto e uno rovescio. Le misure registrate da tali strumenti, indicate con i pallini azzurri, sono servite per la calibrazione del modello (linea arancio) e per la sua validazione. Gli spostamenti, espressi in millimetri, sono riferiti alla direzione perpendicolare al coronamento stesso (direzione X) e sono positivi se diretti verso valle, negativi in caso contrario.

Senza soffermarsi troppo nei dettagli, che verranno trattati più approfonditamente nel capitolo successivo, si può affermare che il Modello PoliMi rispecchia molto fedelmente gli spostamenti reali della struttura, riproducendone sia l'andamento periodico annuale, sia il trend lineare di spostamento, positivo di circa 2,5 mm in 19 anni. La buona rispondenza viene confermata quantitativamente dall'analisi statistica degli scarti tra il modello e la misura reale. Essi infatti vedono una media nulla, come era logico aspettarsi, e una deviazione standard piuttosto bassa, di 0,53 mm.

---

<sup>1</sup> Il Modello PoliMi è stato introdotto per la prima volta in occasione delle attività di monitoraggio della diga Cixerri (CA) nell'ambito di una convenzione di ricerca tra il Politecnico di Milano e la Leica Geosystem spa che ne ha curato il monitoraggio con strumentazione satellitare per circa 2 anni dal giugno 2007 al settembre 2009.



**Figura 1. 19**  
**Applicazione del modello PoliMi al concio 5 della diga sul Rio Cixerri.**

### 1.2.2 I modelli deterministici

Sono basati su sole grandezze fisiche misurabili senza ricorrere ad alcuna variabile ausiliaria. Questo preclude o perlomeno riduce notevolmente qualsiasi capacità predittiva del modello: se esso dipende ad esempio dalla temperatura media giornaliera, non riesce a modellizzare la variabile desiderata prima di possedere la misura termometrica a meno di ricorrere a valori stimati probabilisticamente, e quindi di per sé incerti. È ragionevole infatti pensare che in un certo luogo la temperatura media giornaliera nel mese di luglio sia di 28 °C, ma può anche capitare un periodo più o meno lungo di caldo intenso, oppure una serie di rovesci che mantengono la temperatura al di sotto della media stagionale. Ciò contribuisce nel complesso ad aumentare l'incertezza della stima e a diminuire precisione e accuratezza del modello. Pertanto è preferibile sempre partire con dati il più affidabili e reali possibile, evitando quelli ipotizzati, stimati o previsti.

Ritornando sempre al caso di uno sbarramento artificiale, le deformazioni subite dai conci possono essere dovute alla spinta idrostatica nel bacino di accumulo. In tal caso la variabile fisica che rappresenta il fenomeno può essere il livello idrometrico dell'invaso.

Il materiale dei conci è inoltre soggetto a deformazioni termiche stagionali, dovute alle escursioni di temperatura durante l'anno. Può quindi essere interessante al proposito fare ricorso alla temperatura dell'aria mediata sulle 24 ore oppure misurata sempre a un preciso

orario della giornata. Da non trascurare è inoltre lo sbalzo termico tra l'aria e l'acqua nell'invaso, che può comportare deformazioni differenziali tra il paramento di monte e quello di valle della diga. L'acqua infatti possiede un elevato calore specifico, pari a  $1 \text{ kcal}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ , di molto superiore a quello dell'aria secca, di  $0,24 \text{ kcal}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ . Per questa ragione il volume invasato nel bacino modifica la sua temperatura molto più lentamente rispetto alle variazioni termiche esterne.

Può essere importante anche l'esposizione dello sbarramento stesso, in quanto può influire sull'irraggiamento solare, e quindi indurre delle deformazioni nel concio.

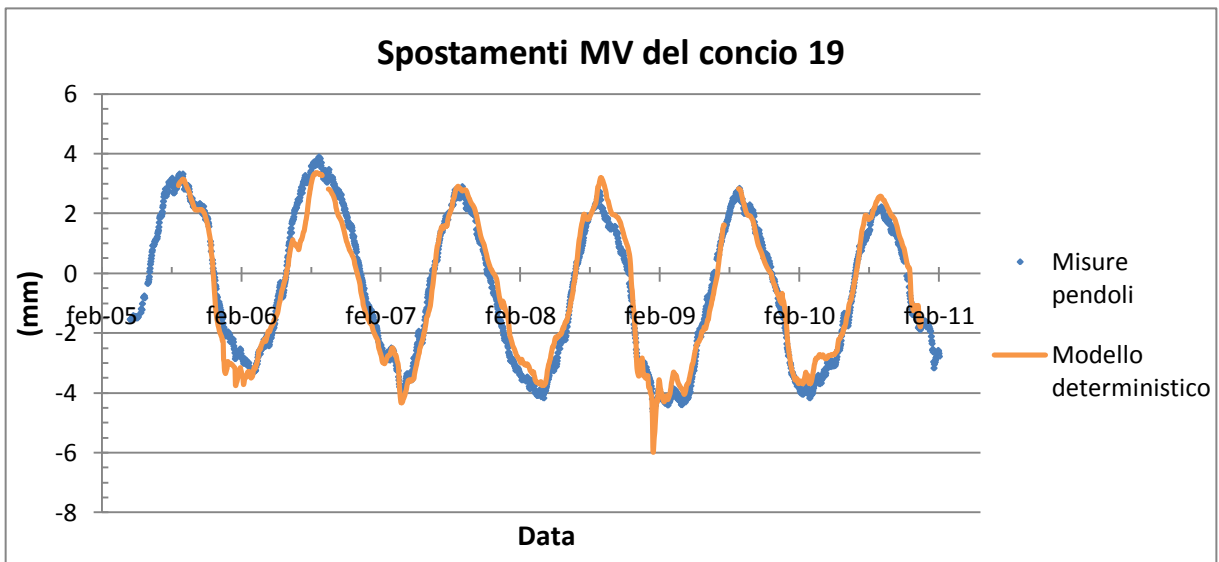
Un modello di tipo deterministico valido per gli spostamenti al coronamento di una diga è allora il seguente:

$$S = a \cdot T_{m \text{ annua aria}} + b \cdot T_{m \text{ acqua}} + c \cdot H + d \cdot H^2 + e$$

Dove  $T_{m \text{ annua aria}}$  è la temperatura media dell'aria su base annua mentre  $T_{m \text{ acqua}}$  è la temperatura dell'acqua mediata sulle misure registrate tra la data attuale e i 14 giorni antecedenti. Con  $H$  è stata indicata la quota dell'invaso in metri sul livello del mare.

La figura 1.20 mostra l'applicazione del sopraindicato modello deterministico per il concio 19 della diga Eleonora D'Arborea sul fiume Tirso in Sardegna.

Anche in questo caso si vede un buon adattamento ai dati reali, con una media nulla degli scarti e una deviazione standard di 0,50 mm. Rispetto al modello predittivo il deterministico è meno regolare, segue con più attenzione i dati reali e quindi pure eventuali misure che si distaccano anche bruscamente da quelle adiacenti, come nel caso del picco negativo in corrispondenza del febbraio 2009.



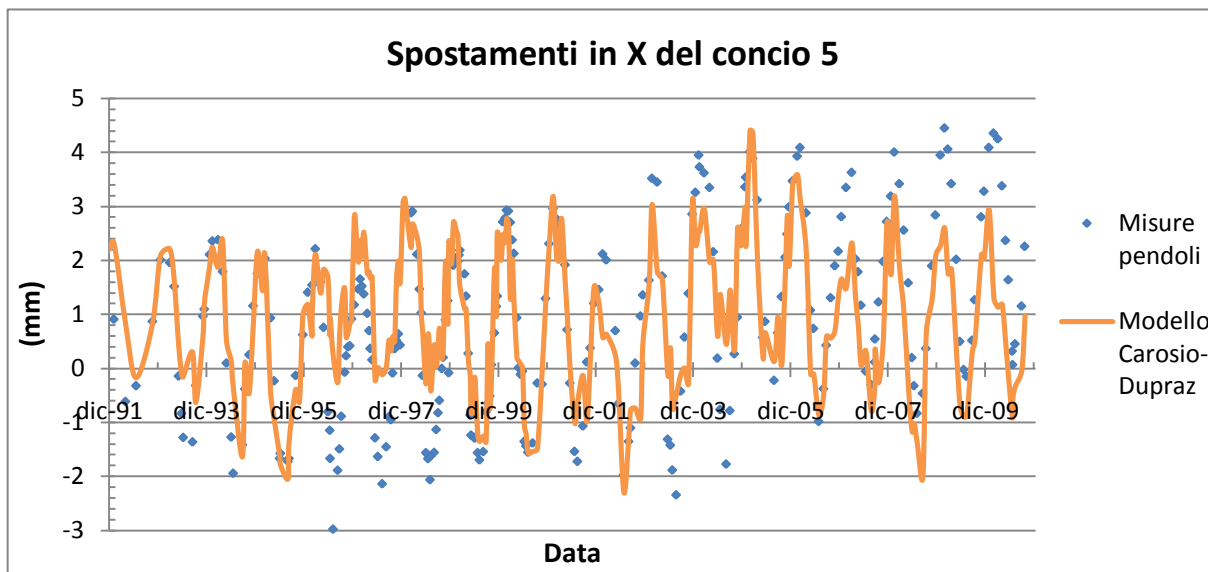
**Figura 1. 20**  
**Applicazione del modello deterministico al concio 19 della diga sul Fiume Tirso.**

Un altro esempio di modello deterministico, già presente in letteratura, è quello creato da Alessandro Carosio [Carosio et al., 1993], Prof. Emerito del Politecnico Federale di Zurigo. Esso è basato sulle osservazioni di alcune dighe ad arco svizzere con lo scopo di studiarne e modellarne il comportamento. Il lavoro sarebbe servito in seguito visto che era in programma la realizzazione del traforo ferroviario del S.Gottardo e si richiedeva, durante l'esecuzione dei lavori, il monitoraggio degli spostamenti delle dighe presenti nella zona. Eventuali fenomeni anomali o inconsueti sarebbero stati direttamente visibili dal confronto tra le misure e il modello, tarato sui dati precedenti l'apertura del cantiere. L'espressione analitica è la seguente:

$$S = a \cdot H^3 + b \cdot T_p + c$$

**H** è sempre la quota dell'invaso e **T<sub>p</sub>** la temperatura dell'aria in corrispondenza della diga. Si è provato ad applicare il modello Carosio al concio 5, direzione X, della diga Cixerri. L'esito della modellazione (figura 1.21) mostra una certa inadeguatezza della curva verde rispetto ai dati misurati dai pendoli e ciò viene confermato dal punto di vista statistico, con una deviazione standard degli scarti che supera il millimetro (1,07 mm). Questo aspetto è da imputare fondamentalmente al mancato rispetto di una ipotesi base del modello: esso è infatti predisposto e calibrato sulle dighe ad arco, mentre la diga Cixerri è una diga a gravità

massiccia, ovvero una tipologia strutturale completamente diversa. È dunque ragionevole aspettarsi una certa discordanza dalle misure reali.



**Figura 1. 21**  
**Il modello Carosio-Dupraz applicato al concio 5 della diga sul Rio Cixerri.**

### 1.2.3 I modelli ibridi

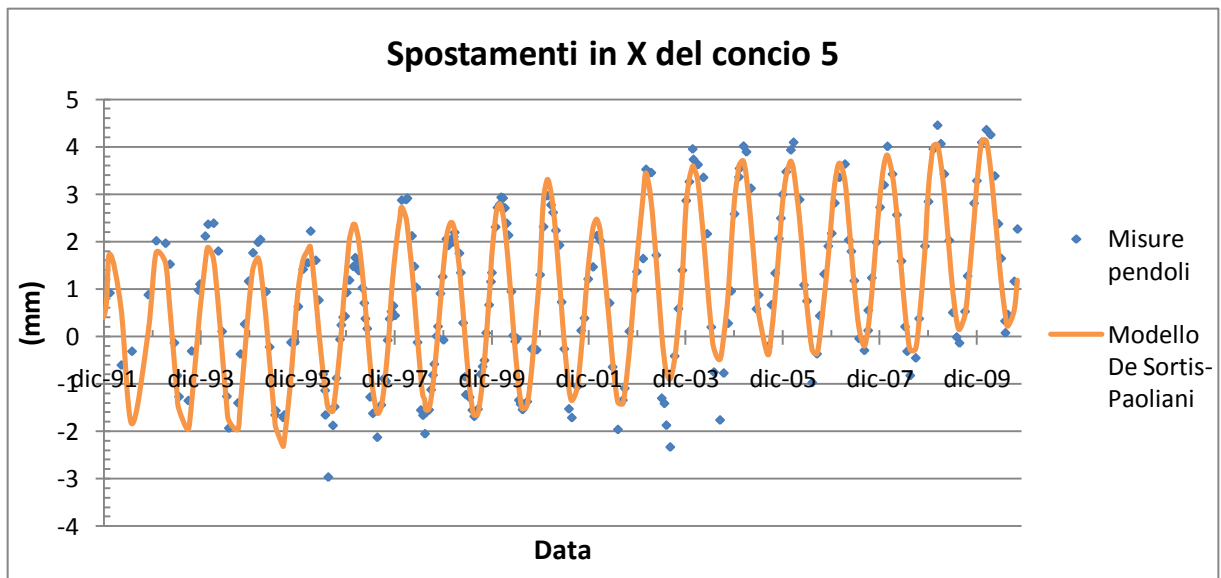
Uniscono le potenzialità e i vantaggi dei modelli deterministici e predittivi in quanto si basano sull'impiego di grandezze fisiche congiuntamente alle variabili ausiliarie già viste. D'altro canto sono soggetti contemporaneamente alle limitazioni di entrambe le categorie: non riescono ad assolvere la funzione previsionale e non possono dirsi puramente fisici. Tali criticità sono però compensate a volte da una migliore aderenza ai dati reali. Inoltre possono essere impiegati in situazioni dove il processo fisico non sia perfettamente chiarito, inglobando tutte le grandezze sconosciute o di incerta partecipazione al fenomeno all'interno delle variabili ausiliarie.

Un esempio di modello ibrido interessante è quello di Adriano De Sortis e Paolo Paoliani [De Sortis et al., 2007], calibrato sui dati di 11 dighe italiane a gravità alleggerita di altezza massima compresa tra 30 e 100 m. Esso vede una componente periodica espressa da funzioni sinusoidali di periodo  $T$  annuale, un trend lineare funzione del tempo  $t$  e una componente funzione della quota d'invaso  $H$  della diga stessa. In formula:

$$S = a \cdot t + b + c \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi t}{T}\right) + d \operatorname{cos}\left(\frac{2\pi t}{T}\right) + e \cdot H + f \cdot H^2$$

**T** vale 365 mentre **t** va espresso in giorni.

Il modello De Sortis-Paoliani è stato applicato con risultati soddisfacenti alla diga Cixerri. Si riportano in figura 1.22 i risultati per il concio 5, sempre in direzione X, ovvero perpendicolarmente allo sviluppo del coronamento. Anche in questo caso la media degli scarti è nulla e la deviazione standard è di 0,52 mm.



**Figura 1. 22**  
**Applicazione del modello De Sortis-Paoliani al concio 5 della diga sul Rio Cixerri.**

# ANALISI DI SERIE TEMPORALI IN UN CASO REALE

## 2.1 La diga sul Rio Cixerri

Il Rio Cixerri è un corso d'acqua di modeste dimensioni che scorre nella Sardegna Sud-Occidentale. Nasce dal Monte Croccoriga a 313 m s.l.m. , in prossimità del comune di Villamassargia (CA) e si estende per circa 40 km di lunghezza, durante i quali riceve le acque del Rio Forresu, del Rio Bauliana e del Rio Su Casteddu.

Originariamente il Rio Cixerri terminava il suo percorso gettandosi nel Fiume Mannu presso Assemini (CA), ma a seguito della costruzione di uno sbarramento artificiale è stato canalizzato e deviato direttamente nello stagno di Cagliari. Quest'ultimo è a sua volta in comunicazione con il Golfo del capoluogo sardo e quindi con il Mar Mediterraneo.

La diga si trova a metà strada tra Siliqua e Assemini, in località Genna Is Abis, da cui prende il nome, e ha contribuito alla formazione del lago del Cixerri, un bacino artificiale impiegato per l'approvvigionamento idrico sia a scopo irriguo che potabile e anche con finalità di laminazione delle piene (vedere carta nell'appendice A). L'invaso, gestito dall'Ente Autonomo del Flumendosa è infatti stato creato allo scopo di risolvere, o quantomeno mitigare, il problema della carenza di acqua in una zona caratterizzata da un clima marcatamente siccitoso e in cui i corsi d'acqua presentano un comportamento prevalentemente torrentizio.

Il sistema di sbarramento<sup>1</sup>, la cui costruzione è iniziata nel 1980 e si è protratta fino al 1992, è composto da una diga in calcestruzzo a gravità ordinaria alta complessivamente 26 metri e lunga 1295 metri. Proprio per la straordinaria estensione del corpo diga si è scelto di escludere l'utilizzo di materiali sciolti, ripiegando così su una struttura in calcestruzzo, di volume complessivo pari a 304000 m<sup>3</sup> e composta da 85 conci di larghezza al coronamento pari a 6 metri e assemblati tra loro per garantire la corretta tenuta idraulica.

L'impiego di una diga a gravità massiccia risultava inoltre ideale per il caso in esame: viste le caratteristiche topografiche e orografiche dell'area si richiedeva uno sbarramento molto lungo ma non eccessivamente alto, non adatto alla costruzione di una diga ad arco, la quale è più conforme a invasi in valli profonde e strette, quali quelle alpine.

La struttura a gravità inoltre presenta vantaggi considerevoli dal punto di vista strutturale: il dimensionamento risulta relativamente semplice rispetto ad altre tipologie costruttive, quali ad esempio le dighe a volta. Infatti le opere a gravità resistono alle spinte cui sono sottoposte solamente grazie al peso proprio. È sufficiente quindi che il concio sia abbastanza pesante da superare la verifica al ribaltamento e allo scivolamento a seguito della spinta idrostatica della colonna d'acqua nell'invaso e alla presenza di eventuali sottospinte. Queste ultime talvolta sono tutt'altro che trascurabili per la stabilità del concio e vanno pertanto abbattute predisponendo opportuni sistemi di drenaggio.

Ovviamente va anche verificata la compatibilità degli sforzi con la resistenza del materiale del concio, la capacità portante del terreno di fondazione e l'assenza di sforzi di trazione all'interfaccia concio-terreno. Tutto sommato comunque si tratta di indagini e calcoli non troppo complessi e onerosi. Diverso è invece il caso delle dighe a volta: queste ultime vanno progettate attentamente, al fine di scaricare le spinte sulle spalle dello sbarramento e da lì sui versanti vallivi. Risulta pertanto necessaria una analisi molto accurata delle forze in gioco, la quale, oltre alle verifiche già viste per le dighe a gravità, deve specialmente accertare la perfetta tenuta delle sponde.

Naturalmente la maggiore complicazione progettuale è ripagata dal minore volume di calcestruzzo impiegato per la realizzazione dell'opera: le dighe a gravità sono tipicamente più tozze e massicce mentre quelle ad arco presentano una struttura più snella e compatta, con una base molto più ristretta rispetto a quella che avrebbe un'opera a gravità della stessa

---

<sup>1</sup> I dati della diga Genna Is Abis sono stati raccolti in parte dall'elenco dighe della Sardegna pubblicato dal RID (Registro Italiano Dighe), in parte sono stati resi disponibili dall'Ente Autonomo del Flumendosa.



altezza. Le caratteristiche di resistenza invece sono ormai ben collaudate per entrambe le tipologie. Basti pensare alla già citata diga del Vajont, all'epoca la più grande struttura ad arco del mondo, la quale resistette pressoché intatta a un'onda di decine di milioni di metri cubi d'acqua provocata dalla gigantesca frana staccatasi dal Monte Toc.

Nel caso della Genna Is Abis il coronamento si trova a 42 m s.l.m. mentre la quota di massimo invaso è fissata in 40,5 m s.l.m. I restanti 1,5 m compongono il cosiddetto franco, ovvero un margine di sicurezza aggiuntivo che deve ovviare a eventuali errori o incertezze di stima durante la fase di progettazione, e deve anche tenere conto della formazione di onde all'interno del bacino.

La quota di massimo invaso costituisce infatti il massimo livello che può raggiungere l'acqua durante l'evento di piena più gravoso (in Italia la normativa stabilisce tempi di ritorno per la piena di progetto di 1000 anni).

A 39 m s.l.m. è situata invece la quota di massima regolazione, cioè il livello massimo oltrepassato il quale si attivano in automatico i dispositivi di sfioro dello sbarramento, costituiti da 5 scarichi di superficie con portata complessiva di 2800 m<sup>3</sup>/s. La diga è inoltre dotata di 2 scarichi di fondo per lo svuotamento del bacino, per un totale di 14,28 m<sup>3</sup>/s, e di un'unica opera di presa, la quale consente la captazione di 3 m<sup>3</sup>/s di acqua dal bacino.

Il volume di massimo invaso è di 32 Mm<sup>3</sup>, di cui 5 Mm<sup>3</sup> destinati alla laminazione delle piene.

Per colmare due depressioni naturali del terreno sulla sponda destra del bacino sono state costruite anche due piccole dighe secondarie in materiale sciolto, con manto di tenuta in PVC e protezione con lastre di calcestruzzo. Esse si differenziano dallo sbarramento principale per le caratteristiche del coronamento, ora quotato a 42,5 m s.l.m. e largo solamente 4,2 m. Inoltre la più piccola delle due dighe (denominata diga n°2) presenta una altezza di 6,5 m al di sopra del piano campagna e un'estensione di 235 m mentre la seconda (diga n°3) è più alta di 2 metri e lunga 327 m.

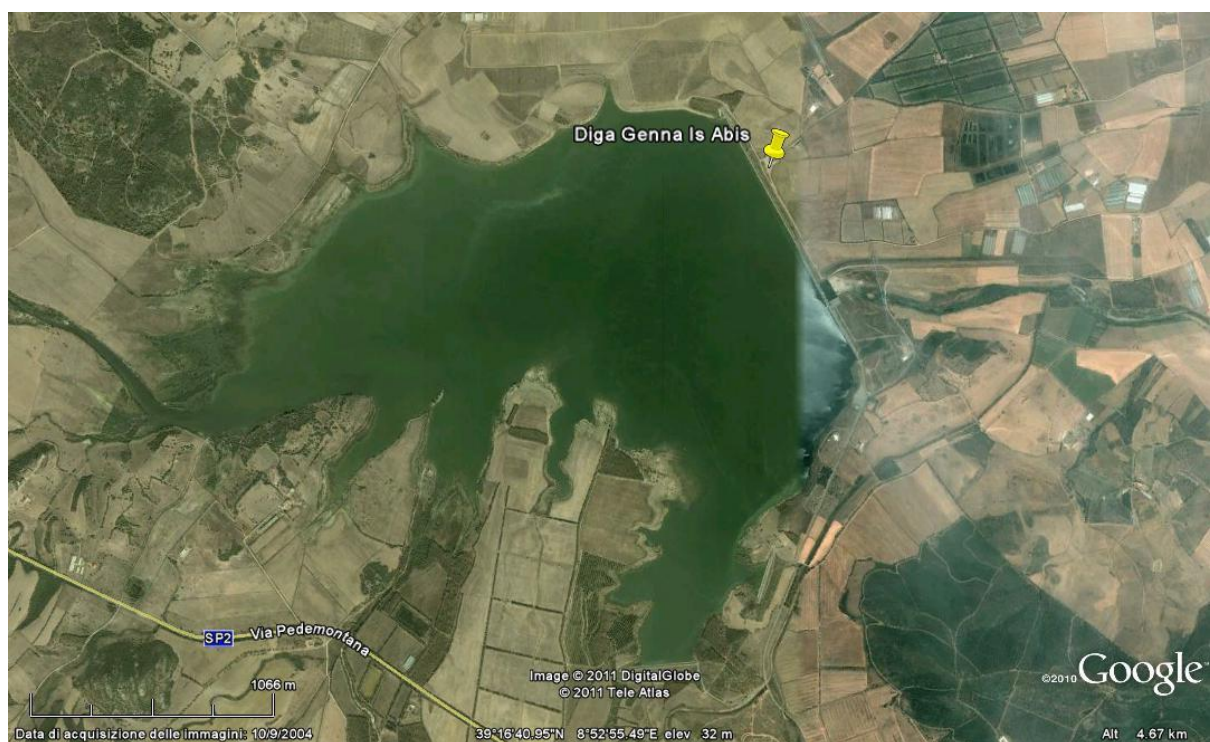
L'intero sistema è stato collaudato in data 02/05/2002.



**Figura 2. 1**  
**La diga Genna Is Abis sul Rio Cixerri.**



**Figura 2. 2**  
**La Genna Is Abis vista da monte. È ben visibile il grande sfioratore di superficie.**



**Figura 2.3**  
Il lago artificiale del Cixerri visto da satellite.

## 2.2 Strumenti per il monitoraggio

Come già accennato nel capitolo precedente, una struttura importante e strategica come una grande diga non può non prevedere una rete di strumenti per il monitoraggio e il controllo degli spostamenti. Qualora infatti vi fossero delle anomalie o dei problemi di stabilità sarebbe di fondamentale importanza conoscerle immediatamente e con tempestività dato che un eventuale cedimento strutturale porterebbe a conseguenze catastrofiche. Adottando le opportune misure cautelative si avrebbe pertanto il tempo di intervenire sull'opera per la messa in sicurezza della stessa e delle aree vulnerabili a valle. Si precisa infatti che lo svasso di un bacino è una operazione molto delicata e non può essere eseguita in tempi rapidi, specialmente se l'invaso contiene volumi d'acqua considerevoli. Lo stesso discorso è valido per la contromisura più estrema, adottata solo in caso di marcata

instabilità strutturale della diga, vale a dire l'evacuazione dei centri abitati potenzialmente interessati dall'eventuale catastrofe.

Nel caso della diga Genna Is Abis sul Rio Cixerri la rete di monitoraggio dello sbarramento principale è composta da vari strumenti, tra cui pendoli, collimatori ottici ed estensimetri. Sono inoltre eseguite periodiche campagne di livellazione (in media 4-5 all'anno) per tenere sotto controllo i cedimenti del terreno di fondazione a seguito del processo di consolidazione.

Per le dighe secondarie invece, oltre che alla livellazione, ci si affida agli assestimetri e alla collimazione ottica, non essendo qui possibile impiegare pendoli o estensimetri.

Inoltre vengono impiegate diverse batterie di piezometri per misurare costantemente il livello piezometrico in prossimità e all'interno del corpo diga.

Infatti queste strutture in terra si comportano grossomodo come degli argini, con l'eccezione di dover funzionare in continuo, e non solamente in caso di piena. Di conseguenza nel paramento di monte il livello piezometrico coincide con la quota del pelo libero dell'invaso mentre nella parte di valle dovrà necessariamente essere al di sotto del piano campagna, pena un impaludamento delle aree circostanti. Questo gradiente piezometrico tra monte e valle, secondo la legge di Darcy, innesca dei moti di filtrazione all'interno della diga i quali possono a loro volta degenerare in un fenomeno di sifonamento, assai pericoloso per la stabilità intrinseca della struttura. Infatti, se il gradiente è troppo elevato, il moto dell'acqua possiede una energia tale da movimentare dei granelli di terreno, creando canali preferenziali di scorrimento, che col tempo si allargano e possono portare al collasso o al cedimento della diga.

I pozzi sono installati proprio per controllare che la linea piezometrica non abbia una cadente troppo elevata e che non sia mai superiore al paramento della diga stessa.

Nel corpo dello sbarramento n°2 sono pertanto presenti 2 piezometri, in posizione simmetrica all'asse dell'opera, 5 sono collocati alla base del paramento di valle e 5 nella zona immediatamente più a valle, per un totale di 12 pozzi. Sono inoltre presenti 3 assestimetri, 3 mire (di cui 2 mobili e una fissa collocata all'estremità sud) e una stazione di collimazione all'estremità nord della struttura.

Per quanto riguarda la diga n°3 si contano complessivamente 15 piezometri, 2 nel corpo diga, 8 alla base del paramento e 5 nell'area adiacente. Gli assestimetri sono 3 mentre la

stazione di collimazione si trova nella parte est dello sbarramento. Anche in questo caso vi è una mira fissa a ovest e 3 mire mobili.

La diga principale, la Genna Is Abis vera e propria, è invece la più monitorata, vista anche l'imponenza della struttura. Sono infatti presenti 2 camere dei pendoli, una all'interno del concio 5 e una nel 43/9. A grandi linee la posizione dei conci coincide rispettivamente con un terzo e con due terzi dello sviluppo complessivo della diga, a partire dall'estremità sud della costruzione. Ciascuna camera contiene 2 pendoli ottici, uno dritto e uno rovescio, più un pendolo automatico rovescio. Gli strumenti ottici installati si contraddistinguono per una precisione di 0,02 mm, con un campo di misura di 30 mm sia in direzione X che Y. Quelli automatici invece, anche detti coordinometri registratori, sono precisi solamente fino al decimo di millimetro ma il loro campo di misura è più esteso: 100 mm in direzione X e 50 mm in Y. Va specificato che con X si intende la direzione monte-valle, trasversale allo sviluppo della diga stessa, mentre Y è la direzione perpendicolare alla X e che completa il sistema di riferimento cartesiano. Gli spostamenti lungo X, per convenzione, vengono assunti positivi se orientati verso valle, quelli lungo Y se diretti verso sinistra osservando la diga da monte (ovvero nel senso nord-ovest dell'asse Y).

La struttura è inoltre munita di 84 estensimetri tipo calibro estensimetrico (precisione di 0,002 mm), uno ad ogni interfaccia tra due conci adiacenti. Sono anche presenti 77 estensimetri a lunga corsa (sensibilità di 0,1 mm) e un complesso sistema di collimazione composto da 15 mire mobili, 3 mire fisse (una al concio 5, una al 43/9 e una all'estremità nord) e 3 stazioni (una all'estremo sud e le altre sui conci dei pendoli). Il posizionamento di due stazioni al di sopra della diga stessa e non su un punto esterno è reso necessario dalla notevole estensione del coronamento. Infatti il cannocchiale del collimatore consente una lettura tanto più precisa se le distanze sono brevi; per tratti di notevole lunghezza si rende pertanto necessario frazionare la misura in più battute, all'analogo di quanto accade nelle campagne di livellazione topografica.

Dal giugno 2007 inoltre è iniziata una convenzione di ricerca tra il Politecnico di Milano e la Leica Geosystem S.p.a. , che ha consentito di installare antenne GNSS per il monitoraggio degli spostamenti della diga sul Rio Cixerri. La rete si compone in totale di 6 ricevitori GPS a doppia frequenza del tipo GPS LEICA GMX902 muniti di antenne esterne modello AX1202GG. 4 di essi sono stati collocati sul coronamento della diga stessa in corrispondenza dei punti A, B, C e D mostrati in figura 2.5. I punti B e C corrispondono rispettivamente alle

posizioni dei pendoli dei conci 5 e 43/9, in modo da poter operare un confronto diretto tra le misure registrate dagli strumenti ottici e da quelli satellitari.

Gli altri 2 ricevitori sono invece installati esternamente alla costruzione, nei punti REF1 e REF2 (figura 2.5), così da poter essere considerati dei capisaldi. In questo modo è possibile



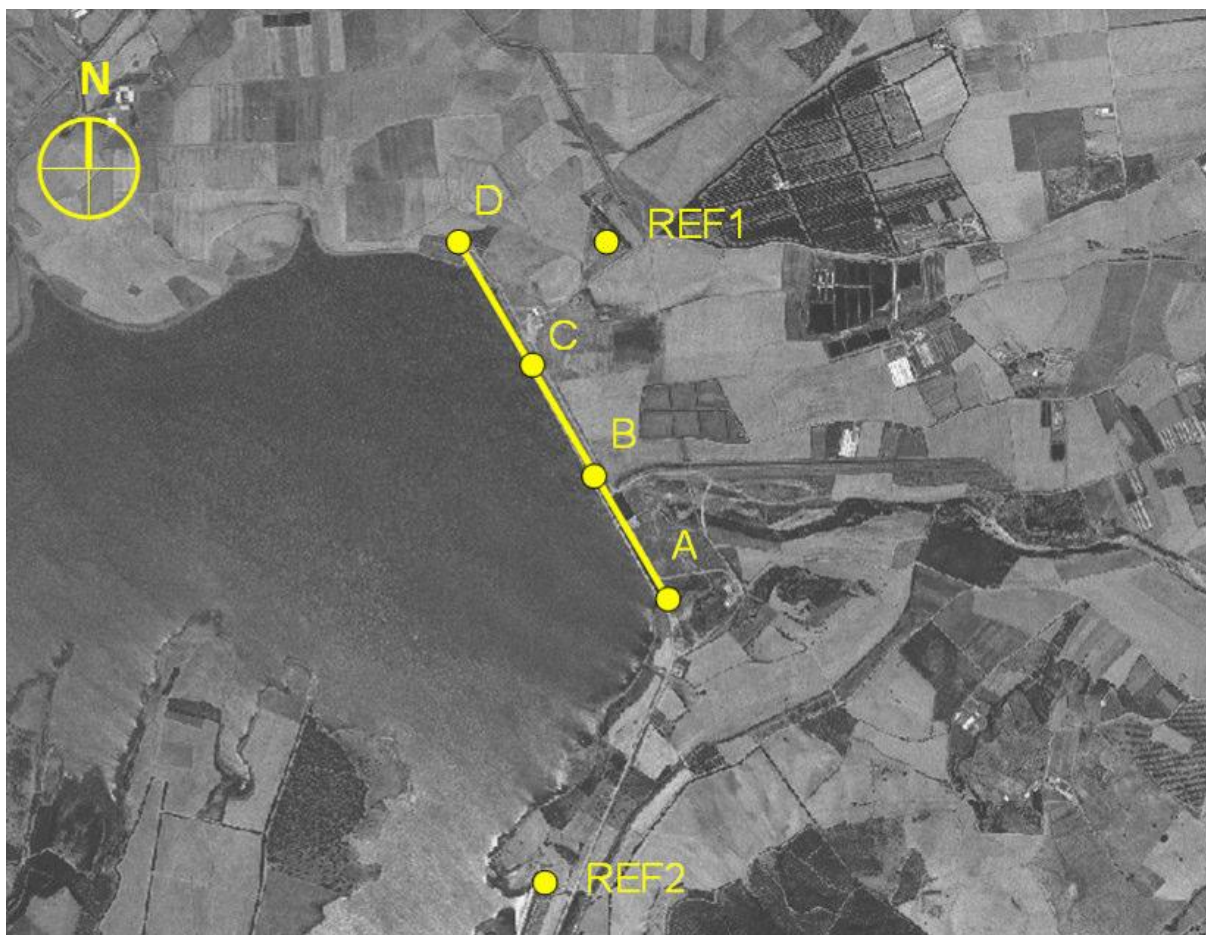
**Figura 2. 4**  
**La stazione rover installata presso il punto C.**  
**A fianco si può notare l'antenna wireless per la**  
**trasmissione dati e la centralina di controllo.**

effettuare un rilievo statico relativo con trattamento dei dati in post-processing e ottenere perciò la migliore precisione conseguibile nell'ambito delle tecnologie satellitari. La stazione reference 2 (REF2) poggia direttamente su roccia affiorante e può a buon motivo essere considerata un caposaldo. L'altra stazione (REF1) si trova su di una struttura in cemento armato appartenente all'Ente Acque della Sardegna (ENAS) e risente pertanto degli eventuali movimenti della struttura.

La materializzazione dei punti di stazione delle antenne sulla diga avviene mediante pali tubolari in acciaio, fissati con apposite zanche a pilastrini in calcestruzzo.

Per REF1 e REF2 i pali sono direttamente ancorati rispettivamente alla struttura esistente e alla roccia.

Tutte le stazioni sono munite di antenna wireless per la trasmissione e il download in remoto dei dati registrati.



**Figura 2.5**  
**Mappa delle stazioni GPS master e rover installate per la Genna Is Abis.**

## 2.3 Modellizzazione dei pendoli e risultati ottenuti

Nel capitolo precedente è stato spiegato come la procedura di modellazione di un fenomeno possa in molti casi risultare di vitale importanza nel campo del monitoraggio delle strutture.

Nell'ambito di questa tesi di laurea specialistica sono stati analizzati i dati di spostamento registrati dai pendoli della diga Genna Is Abis per cercare di chiarire il comportamento dinamico dello sbarramento e valutare l'adattabilità alle misure reali di alcuni modelli specificatamente nati per queste costruzioni dell'ingegneria idraulica.

Per vedere se un modello funziona correttamente o meno, si può in prima analisi costruire un grafico con l'andamento degli spostamenti registrati dai pendoli e confrontarlo con le

previsioni fornite dal modello stesso. Già a questa fase di dettaglio, peraltro piuttosto grossolana, è possibile capire se l'equazione parametrica utilizzata è inadatta al caso in questione. Se infatti si notano, a livello macroscopico, pesanti incongruenze, l'adattabilità al caso reale difficilmente potrà essere soddisfatta. Ciò tuttavia non è sufficiente, a livello ingegneristico, a sciogliere ogni dubbio. Pertanto si rendono necessari dei parametri numerici in grado di fornire un'indicazione quantitativa del grado di fitting del modello. Infatti vi possono essere casi in cui, all'apparenza (ovvero macroscopicamente), le previsioni seguono molto bene le misure, ma in realtà a livello locale sono presenti scostamenti tutt'altro che trascurabili, che fanno scendere la precisione e l'affidabilità della modellizzazione.

Per risolvere il problema ci si può affidare di buon grado a una analisi statistica degli scarti, intesi come differenza, punto per punto, tra il valore stimato dal modello e quello reale registrato dai pendoli. Un parametro molto utile al proposito può essere la media  $\bar{x}$ , calcolata come:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Dove  $x_i$  rappresenta lo scarto  $i$ -esimo e  $n$  la numerosità del campione. Logicamente un buon modello dovrà avere uno scarto medio nullo o molto vicino allo zero.

Un secondo parametro altrettanto importante, già anticipato nel paragrafo sulla modellizzazione nel capitolo 1, è la deviazione standard  $\sigma$  o scarto quadratico medio. Essa definisce, in media, di quanto i dati del campione si discostano dal loro valore medio e si determina secondo la seguente formula:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

Anche in questo caso il modello risulta tanto più aderente alla serie reale se la deviazione standard degli scarti è prossima allo zero. Ciò vuol dire che gli scarti rimangono pressoché costanti nel tempo e subiscono oscillazioni di piccolissima entità.

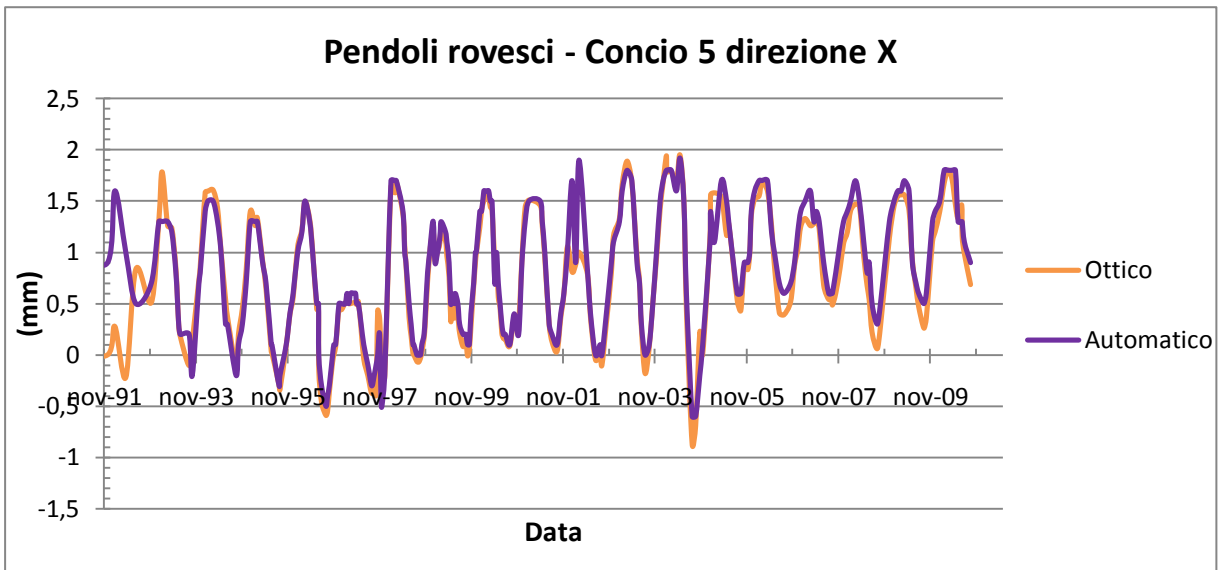


L'indagine può poi essere corredata da tanti altri indicatori statistici ma, in linea di massima, per la valutazione sintetica del modello sono sufficienti i due appena elencati. Eventualmente si può prendere in considerazione il valore massimo e quello minimo assunti dagli scarti per controllare che lo scostamento rimanga sempre entro un certo range di accettabilità.

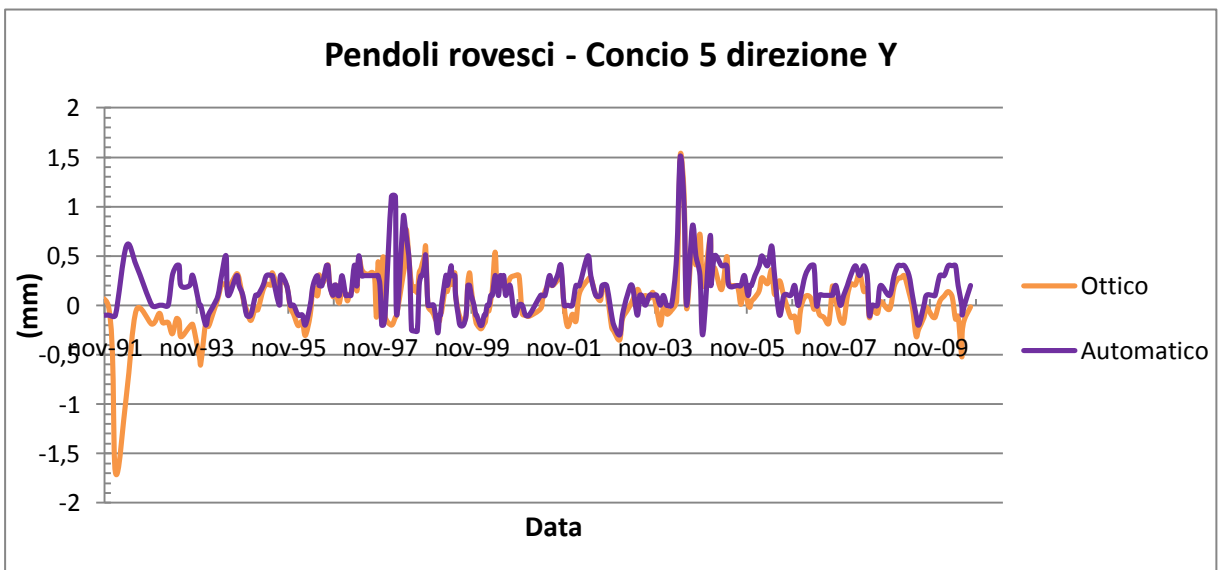
Nel caso della diga sul Cixerri è stato possibile svolgere un buon lavoro dal punto di vista statistico grazie alla grande mole di dati disponibile: le registrazioni dei pendoli coprono infatti un intervallo temporale di oltre vent'anni, dal 19 dicembre 1989 fino al 18 ottobre 2010, con una risoluzione temporale media di una misura al mese (ad eccezione del periodo che arriva fino al 1992, dove le registrazioni sono abbastanza frammentarie e poco regolari). Quanto detto finora si riferisce alle misure effettuate con i soli pendoli ottici. I coordinometri registratori forniscono infatti un campione più grande di valori ma sono stati esclusi dalla modellazione perché contraddistinti da una minore precisione e affidabilità.

Nel concio 5 per esempio le misure in direzione X e Y dei pendoli automatici (figura 2.6 e 2.7) coincidono molto bene in ogni momento dell'intervallo temporale con quelle degli strumenti ottici. Lo stesso non si può però dire per il 43/9, perché in entrambe le direzioni (figura 2.8 e 2.9) il margine di errore è lievemente più grande e in alcuni lassi di tempo la discrepanza si fa accentuata, probabilmente a causa di una staratura dello strumento automatico. È quest'ultimo infatti a presentare un comportamento anomalo, come si può notare ad esempio nel periodo a cavallo del marzo 1996 in direzione X. Qui le registrazioni restituiscono uno spostamento inspiegabilmente costante di -0,4 mm per circa un anno e poi, fino al marzo 1998, continuano a discostarsi dai dati del pendolo ottico di quasi un millimetro. Il fenomeno è ancora più accentuato in direzione Y, specialmente tra il settembre 1996 e il febbraio 2001. Addirittura si arriva a differenze di oltre 2 millimetri tra il 7 agosto 1998 e il 9 ottobre dello stesso anno.

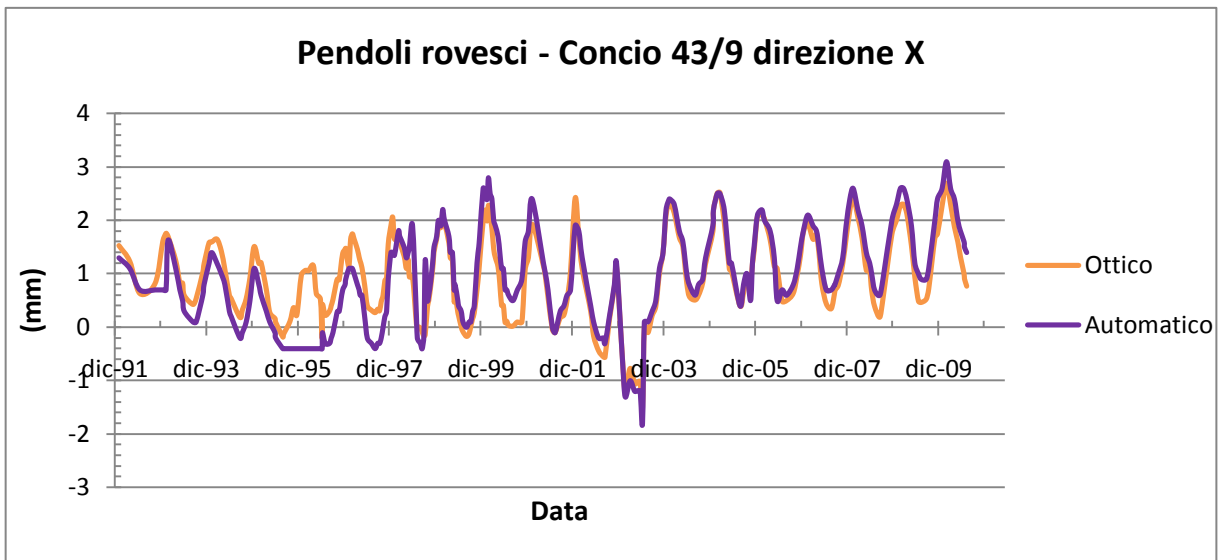
I pendoli automatici non sono stati considerati anche per un altro motivo di primaria importanza: essi sono presenti solo nella versione rovescia mentre quella diritta è assente e il dato andrebbe ricavato in ogni caso dagli strumenti ottici. Siccome lo spostamento totale del coronamento del concio rispetto alla base si determina sommando la componente diritta e quella rovescia, considerare il dato del coordinometro registratore significa aggiungere tra loro misure ottenute da strumenti caratterizzati tra l'altro da precisioni molto diverse, operazione non proprio ortodossa in un ambito topografico di elevata precisione.



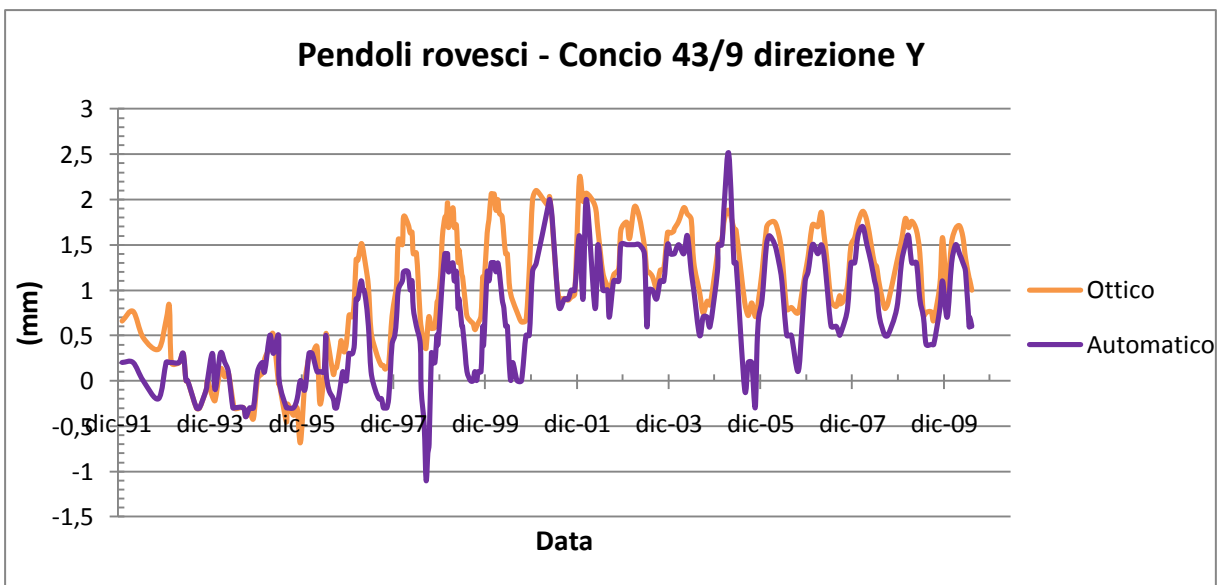
**Figura 2. 6**  
Confronto degli spostamenti registrati al concio 5 in direzione X tra pendoli rovesci ottici e automatici.



**Figura 2. 7**  
Confronto degli spostamenti registrati al concio 5 in direzione Y tra pendoli rovesci ottici e automatici.



**Figura 2. 8**  
**Confronto degli spostamenti registrati al concio 43/9 in direzione X tra pendoli rovesci ottici e automatici.**



**Figura 2. 9**  
**Confronto degli spostamenti registrati al concio 43/9 in direzione Y tra pendoli rovesci ottici e automatici.**

Gli spostamenti ricavati dai pendoli infine potrebbero essere ragionevolmente confrontati con le misure dei collimatori, allo scopo di validare ulteriormente la bontà dei dati a disposizione. Sfortunatamente, per la Genna Is Abis non è stato possibile completare la verifica in quanto, nei bollettini delle campagne di collimazione, viene specificato che le misure sono state corrette con gli spostamenti rilevati dai pendoli.

Di seguito si riporta l'elenco dei modelli studiati nella presente tesi di laurea per ricostruire gli spostamenti dei conci 5 e 43/9, insieme ai grafici e le tabelle riassuntive del caso.

Al termine della rassegna si procederà ad un confronto dei risultati finali con relativi commenti e considerazioni.

### 2.3.1 Modello De Sortis - Paoliani

Il modello ideato da Adriano De Sortis e Paolo Paoliani<sup>2</sup> [De Sortis et al., 2007] si basa sulla seguente formulazione:

$$S = a \cdot t + b + c \operatorname{sen} \left( \frac{2\pi t}{T} \right) + d \operatorname{cos} \left( \frac{2\pi t}{T} \right) + e \cdot H + f \cdot H^2$$

Dove  $t$  rappresenta il tempo in giorni,  $T$  il periodo della componente sinusoidale (anch'esso espresso in giorni) e  $H$  la quota del pelo libero dell'acqua nell'invaso. Nell'esperienza pratica di modellazione è stato assunto un tempo  $t$  pari a zero per la data in cui si registra la prima osservazione, ossia il 19 dicembre 1989, ed è stata via via aggiornata la variabile in base al numero di giorni passati dall'istante zero.

Il periodo  $T$  si può invece assumere pari a 365 giorni. Infatti, osservando le serie temporali degli spostamenti rilevati dai pendoli, si può notare come le oscillazioni percorrano una intera lunghezza d'onda nell'arco di un anno preciso. Nella pubblicazione<sup>3</sup> redatta dagli autori del modello non si parla nemmeno di una variabile  $T$  relativa al periodo, e si assume quest'ultimo direttamente pari a 365, a conferma della periodicità stagionale dei fenomeni dinamici ciclici inerenti le opere di ritenuta.

Ultima precisazione riguarda la variabile  $H$ , che nel modello originale rappresenta l'altezza dell'acqua nell'invaso rispetto alla fondazione. Nel caso della Genna Is Abis  $H$  è stato considerato pari alla quota del pelo libero, in metri sul livello del mare, per una semplice comodità di calcolo. Ai fini pratici questo piccolo adattamento può essere accettato e considerato ragionevole in quanto non pregiudica la precisione e la capacità previsionale del

<sup>2</sup> Per ulteriori approfondimenti si veda il paragrafo dedicato all'interno del capitolo 1.

<sup>3</sup> De Sortis A. , Paoliani P. (2007) . *Statistical analysis and structural identification in concrete dam monitoring*, Engineering Structures, Vol.29, Issue 1, January 2007, 110 – 120.

modello. Quest'ultimo infatti reagisce di conseguenza modificando i parametri **e** ed **f** e rendendoli ovviamente più piccoli di quelli che si avrebbero nel De Sortis - Paoliani originale. Inoltre, la diga sul Cixerri si trova in una località pianeggiante e pertanto la differenza tra quota del pelo libero e livello idrico rispetto alla fondazione può considerarsi abbastanza bassa.

I parametri **a**, **b**, **c**, **d**, **e**, **f** sono invece stati calibrati sui dati reali dei pendoli tramite una procedura di regressione ai minimi quadrati.

Quest'ultima è stata svolta scartando le registrazioni dei pendoli che non presentassero anche la misura di **H**. Non è infatti infrequente trovare, per uno stesso giorno, il dato del pendolo ma non quello della quota d'invaso, o viceversa.

Si illustrano di seguito i risultati ottenuti dalla modellazione per entrambi i concetti sotto osservazione. Tutti i grafici sono stati tagliati nella parte iniziale a causa della cronica carenza di dati, la quale faceva assumere al modello andamenti inconsueti e anomali.

Concio 5

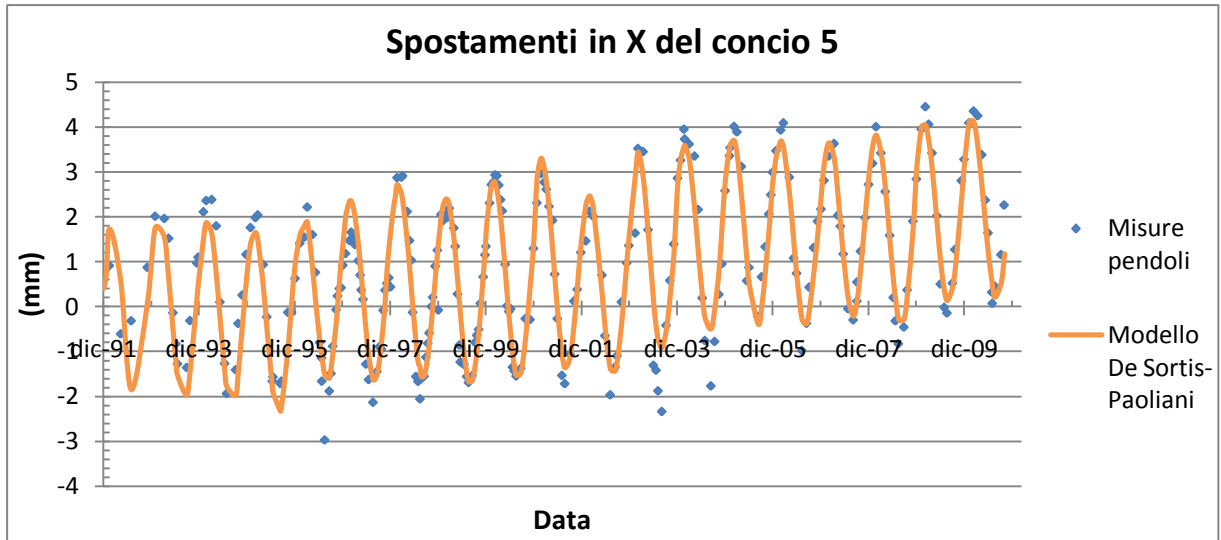


Figura 2. 10  
Spostamenti in direzione X del concio 5 – Modello De Sortis - Paoliani.

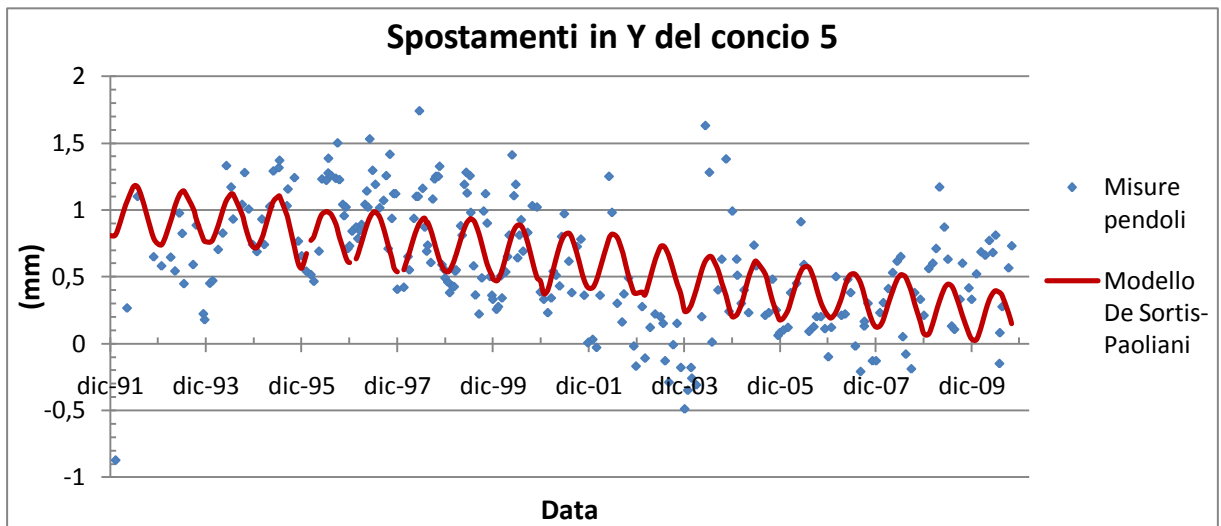


Figura 2. 11  
Spostamenti in direzione Y del concio 5 – Modello De Sortis - Paoliani.

	Statistiche degli scarti (mm)	
	DIREZIONE X	DIREZIONE Y
Media	0	0
Deviaz. standard	0,52	0,38
Valore massimo	1,65	1,69
Valore minimo	-1,52	-1,37
Conteggio <sup>4</sup>	263	263

Tabella 2. 1  
Statistiche degli scarti per il concio 5 – Modello De Sortis - Paoliani.

<sup>4</sup> Indica la numerosità del campione di spostamenti rilevati dai pendoli che è stato possibile sfruttare per calibrare il modello.

Concio 43/9

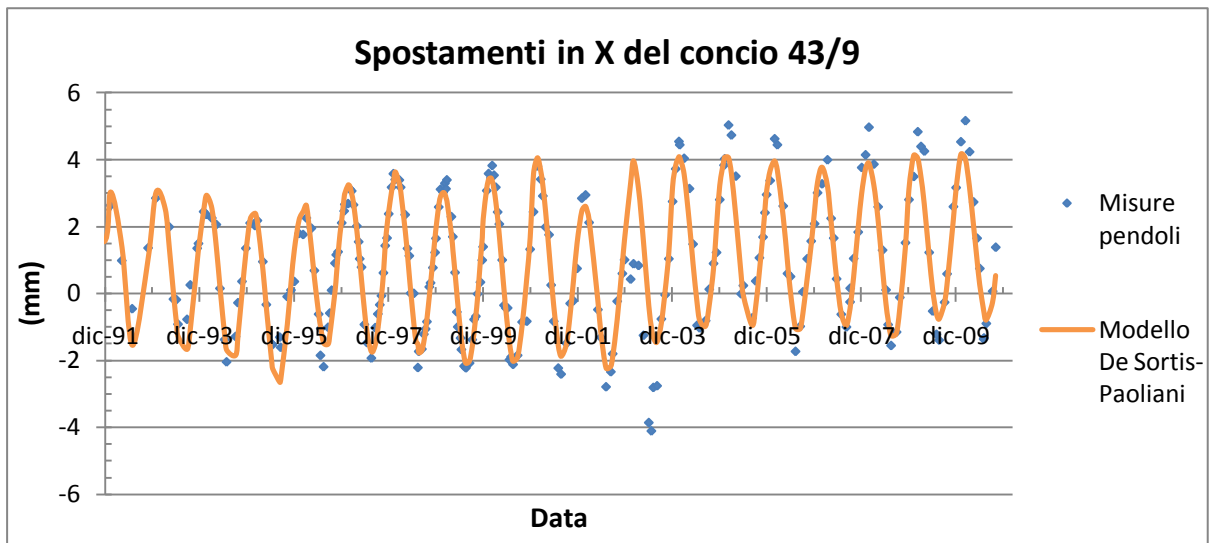


Figura 2. 12  
Spostamenti in direzione X del concio 43/9 – Modello De Sortis - Paoliani.

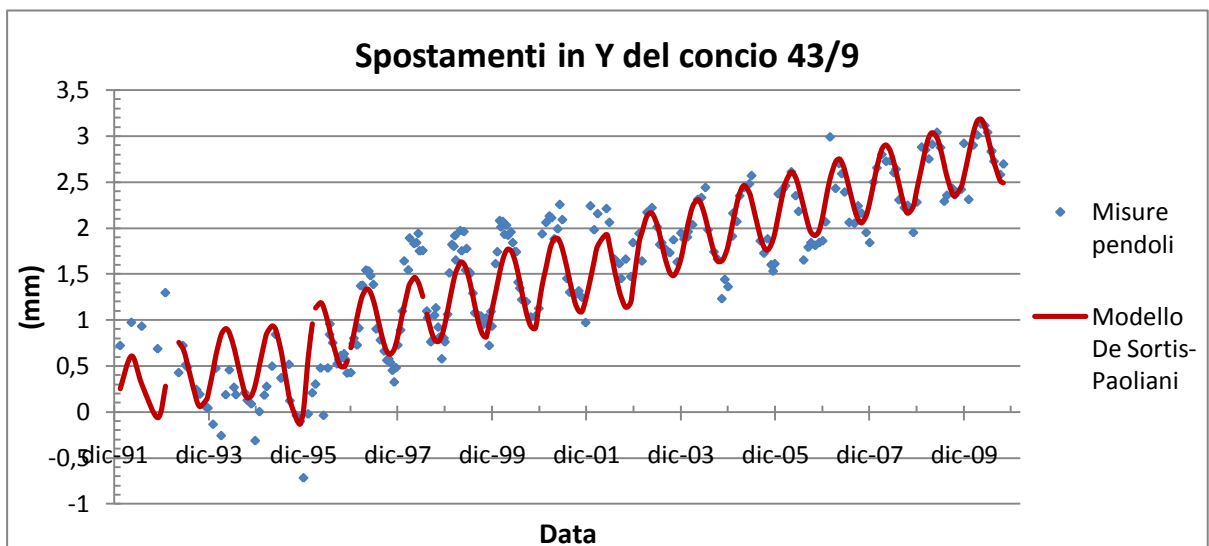


Figura 2. 13  
Spostamenti in direzione Y del concio 43/9 – Modello De Sortis - Paoliani.

	Statistiche degli scarti (mm)	
	DIREZIONE X	DIREZIONE Y
Media	0	0
Deviaz. standard	0,68	0,30
Valore massimo	3,50	1,18
Valore minimo	-1,58	-1,01
Conteggio	259	259

Tabella 2. 2  
Statistiche degli scarti per il concio 43/9 – Modello De Sortis - Paoliani.

### 2.3.2 Modello Carosio - Dupraz

Come già visto in precedenza, un esempio di modello deterministico è il Carosio – Dupraz [Carosio et al., 1993] , che richiede la conoscenza della temperatura  $T_p$  dell'aria in corrispondenza della diga e la quota  $H$  dell'invaso, secondo l'espressione:

$$S = a \cdot H^3 + b \cdot T_p + c$$

Come temperatura dell'aria è stata impiegata la misura effettuata alle ore 8:00.

Si ricorda che la formulazione è nata specificatamente per essere applicata a dighe ad arco. L'utilizzo sulla Genna Is Abis esula pertanto dalle specifiche e dalle ipotesi alla base del modello.

Di conseguenza la seguente analisi è da ritenersi un tentativo sperimentale per verificare l'adattabilità del Carosio – Dupraz a una diga a gravità massiccia.



Concio 5

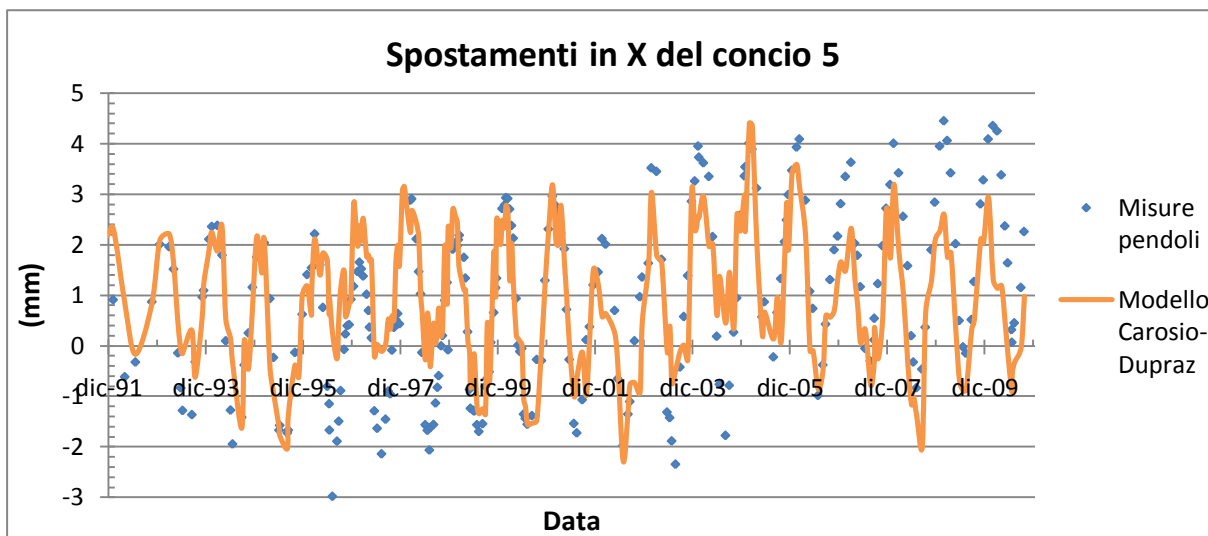


Figura 2. 14  
Spostamenti in direzione X del concio 5 – Modello Carosio - Dupraz.

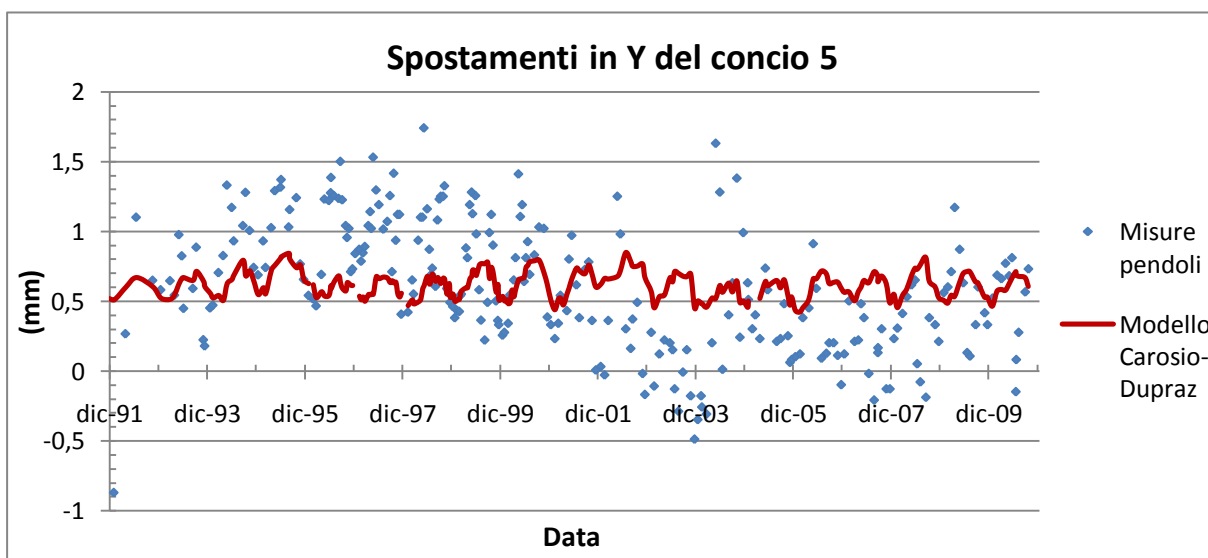


Figura 2. 15  
Spostamenti in direzione Y del concio 5 – Modello Carosio - Dupraz.

	Statistiche degli scarti (mm)	
	DIREZIONE X	DIREZIONE Y
Media	0	0
Deviaz. standard	1,07	0,45
Valore massimo	3,24	1,38
Valore minimo	-3,12	-1,59
Conteggio	263	261

Tabella 2. 3  
Statistiche degli scarti per il concio 5 – Modello Carosio - Dupraz.

Concio 43/9

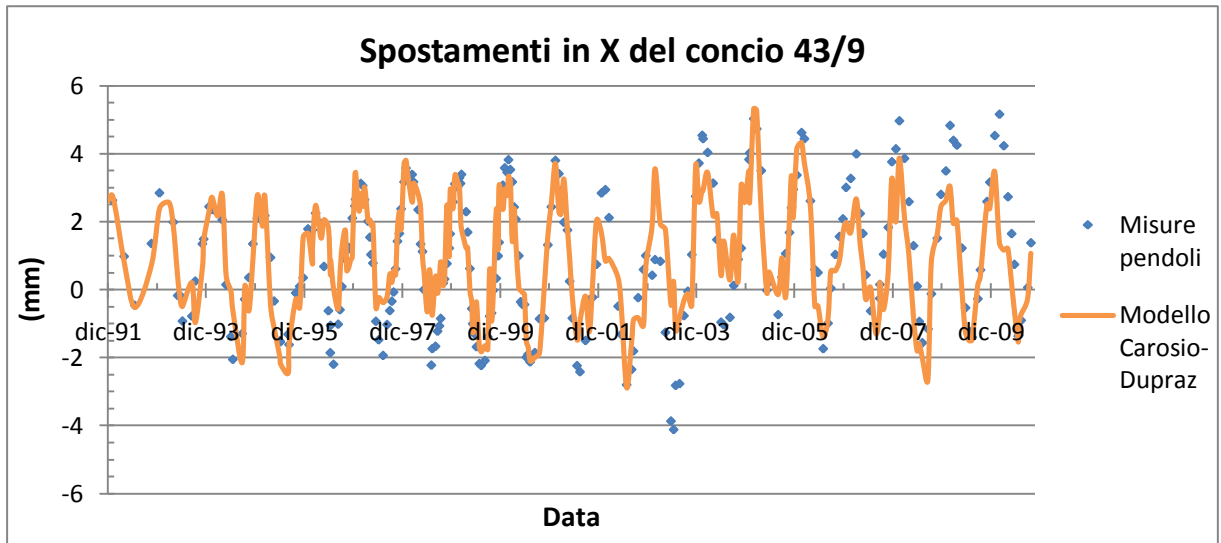


Figura 2. 16  
Spostamenti in direzione X del concio 43/9 – Modello Carosio - Dupraz.

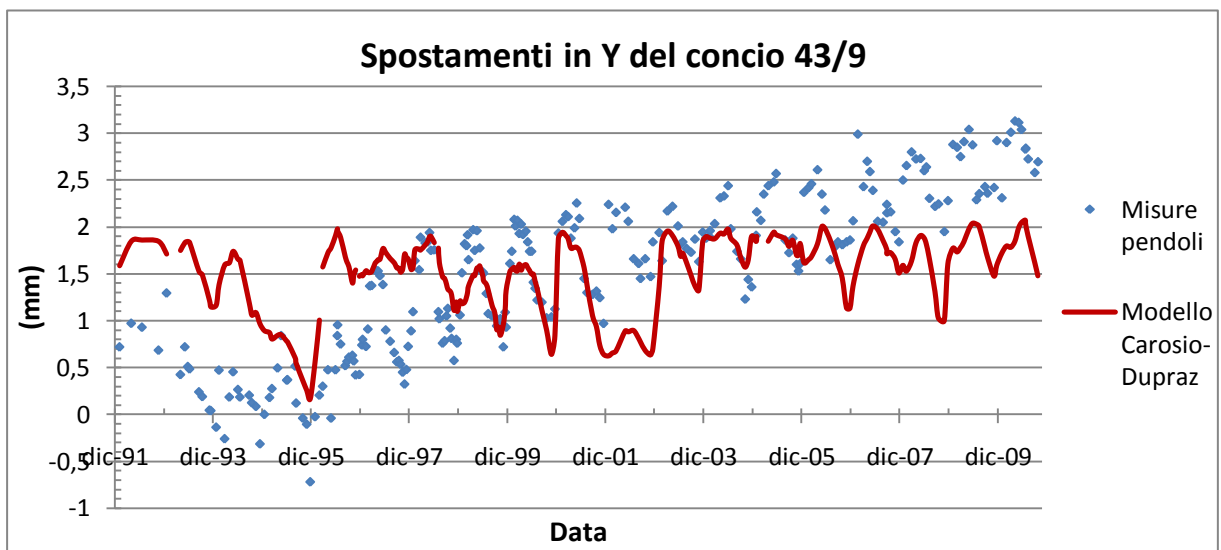


Figura 2. 17  
Spostamenti in direzione Y del concio 43/9 – Modello Carosio - Dupraz.

	Statistiche degli scarti (mm)	
	DIREZIONE X	DIREZIONE Y
Media	0	0
Deviaz. standard	1,10	0,73
Valore massimo	4,35	1,85
Valore minimo	-3,79	-1,62
Conteggio	259	257

Tabella 2. 4  
Statistiche degli scarti per il concio 43/9 - Modello Carosio - Dupraz.

### 2.3.3 Modello PoliMi

Il modello PoliMi appartiene alla categoria di modelli predittivi e segue l'espressione:

$$S = a \cdot t + b + A \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right) + B \sin\left(\frac{2\pi t}{T}\right) + C \cos\left(\frac{4\pi t}{T}\right) + D \sin\left(\frac{4\pi t}{T}\right)$$

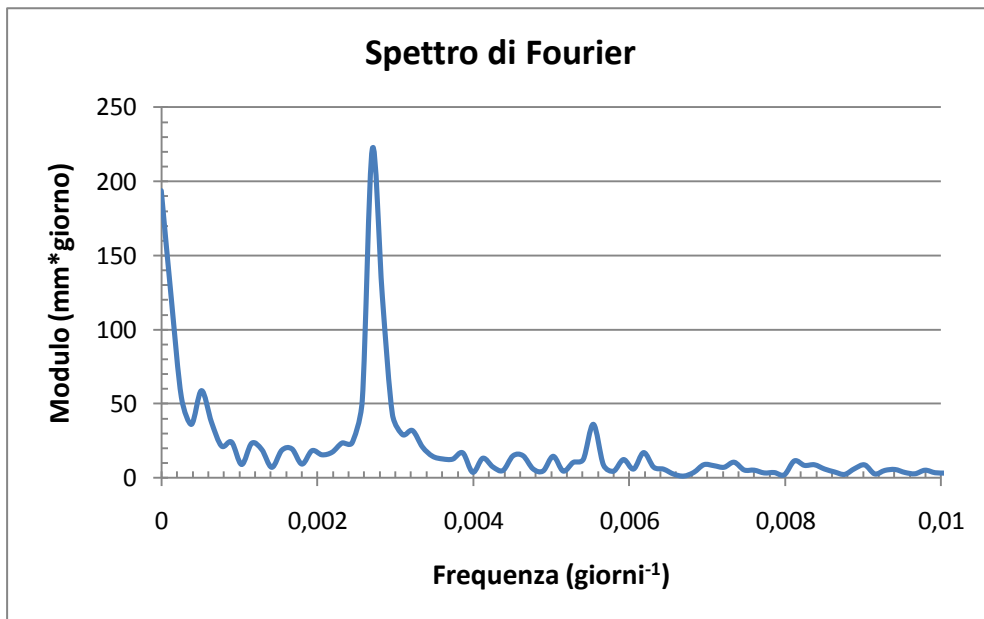
Con  $t$  il tempo espresso in giorni e  $T$  il periodo dell'oscillazione, assunto pari a un anno.

Siccome la scelta del periodo può influenzare l'interpolazione dei dati reali e modificare la precisione della stima, si è deciso di approfondire la questione analizzando le registrazioni dei pendoli con un potente strumento dell'analisi matematica: la trasformata diretta di Fourier. Essa è stata implementata mediante l'algoritmo risolutivo FFT (Fast Fourier Transform) ed è in grado di scomporre una funzione qualsiasi in una serie di armoniche di ampiezza e periodo noto. Nel caso in esame la FFT viene applicata alla serie temporale degli spostamenti registrati dai pendoli al fine di ricavare i due periodi dominanti  $T_1$  e  $T_2$  del campione, ovvero i periodi delle due funzioni sinusoidali di maggiore ampiezza. Quest'ultima infatti indica il peso del contributo della data armonica nel riformare la funzione originaria, all'analogo di quanto accade negli spettri di Fourier ricavati dall'accelerogramma di un evento sismico. Il risultato che si ottiene conferma la bontà dell'ipotesi: per entrambi i conci, in direzione X, lo spettro di Fourier presenta due picchi principali, che corrispondono a periodi di 369 e 180 giorni, cioè rispettivamente un anno e un semestre. Non a caso la funzione del modello PoliMi comprende due sinusoidi di periodo  $T$  e altre due con periodo dimezzato.

Lo stesso test di verifica è stato superato anche in direzione Y, dove lo spettro riporta dei picchi meno marcati, ma pur sempre molto vicini a quelli previsti: si parla ora di 353 e 180 giorni. In figura 2.18 è rappresentato il grafico con il risultato della FFT per la direzione X del concio 5. Sull'asse delle ascisse è riportata la frequenza  $f$ , mentre sulle ordinate il modulo del numero complesso restituito dall'algoritmo. Esso coincide con l'ampiezza dell'armonica, mentre la frequenza è esattamente l'inverso del periodo.

Si noti che il primo picco in assoluto si ha per frequenza nulla. Questo altro non è che la componente lineare dello spostamento, il cosiddetto trend. Esso infatti è esente da qualsiasi periodicità e quindi è assimilabile a una funzione armonica di periodo infinito, cioè  $f$  pari a

zero. Gli altri due picchi dominanti invece fanno riferimento a frequenze di  $0,00271 \text{ giorni}^{-1}$  e  $0,00554 \text{ giorni}^{-1}$ .



**Figura 2. 18**  
**Lo spettro di Fourier della serie storica di spostamento in direzione X del concio 5.**

Nelle pagine successive sono riassunti i risultati della modellazione.

Concio 5

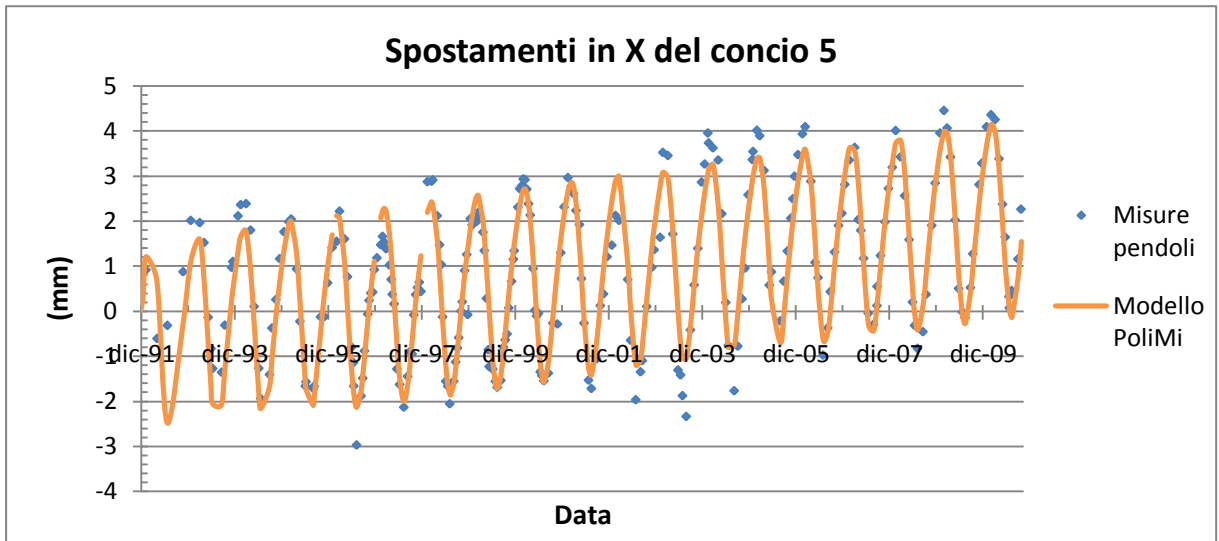


Figura 2. 19  
Spostamenti in direzione X del concio 5 – Modello PoliMi.

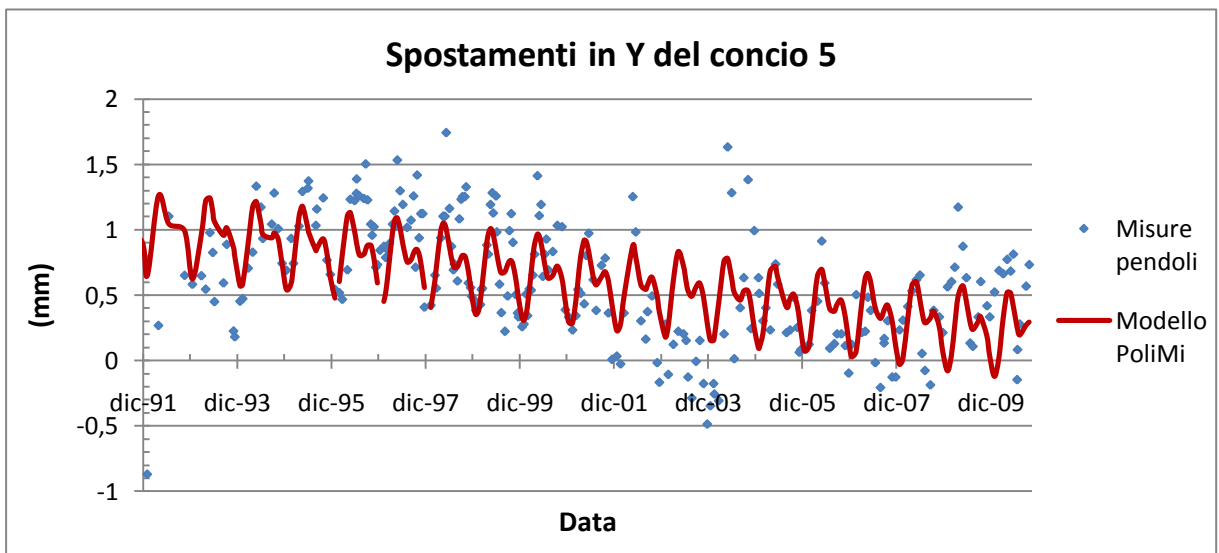
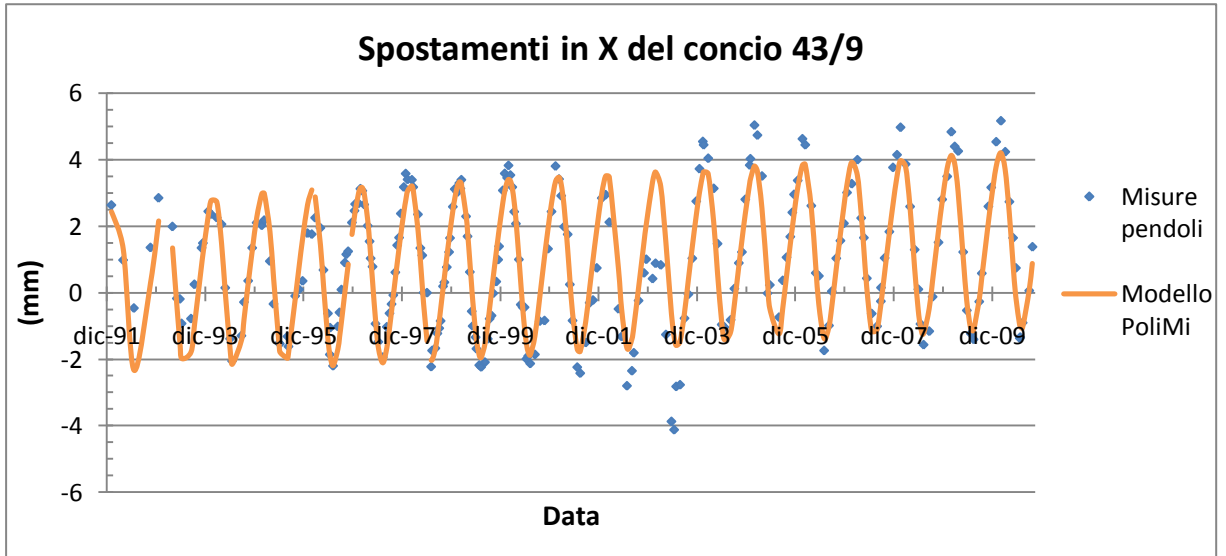


Figura 2. 20  
Spostamenti in direzione Y del concio 5 – Modello PoliMi.

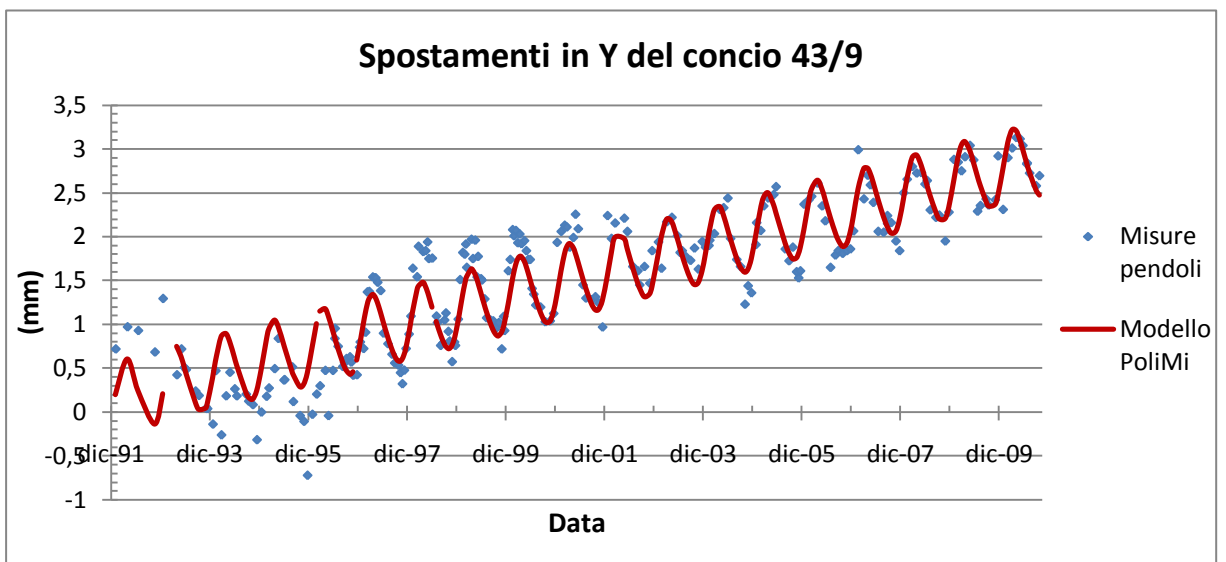
	Statistiche degli scarti (mm)	
	DIREZIONE X	DIREZIONE Y
Media	0	0
Deviaz. standard	0,53	0,36
Valore massimo	1,88	1,52
Valore minimo	-2,15	-1,52
Conteggio	263	263

Tabella 2. 5  
Statistiche degli scarti per il concio 5 – Modello PoliMi.

**Concio 43/9**



**Figura 2. 21**  
Spostamenti in direzione X del concio 43/9 – Modello PoliMi.



**Figura 2. 22**  
Spostamenti in direzione Y del concio 43/9 – Modello PoliMi.

	Statistiche degli scarti (mm)	
	DIREZIONE X	DIREZIONE Y
<b>Media</b>	0	0
<b>Deviaz. standard</b>	0,73	0,31
<b>Valore massimo</b>	3,24	1,16
<b>Valore minimo</b>	-1,87	-1,09
<b>Conteggio</b>	259	259

**Tabella 2. 6**  
Statistiche degli scarti per il concio 43/9 – Modello PoliMi.

### 2.3.4 Modello deterministico

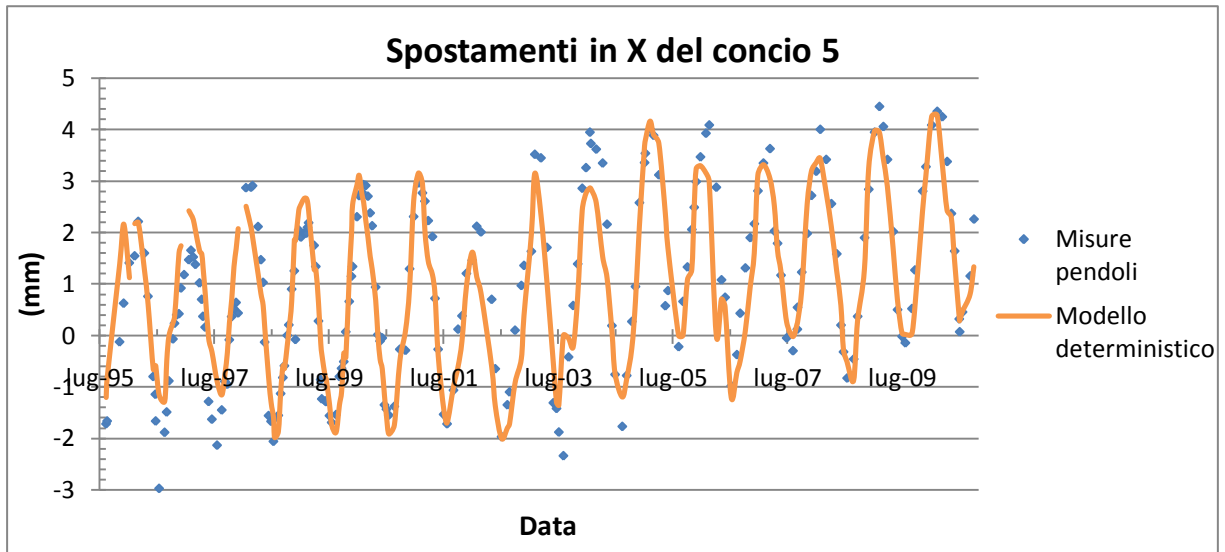
Tra i modelli fisicamente basati applicati alla diga sul Cixerri il Carosio – Dupraz non è stato sicuramente tra i più soddisfacenti. Viene proposto allora anche un altro modello, denominato deterministico, già presentato nel capitolo 1 di questa tesi di laurea specialistica. La sua formulazione è:

$$S = a \cdot T_{m \text{ annua aria}} + b \cdot T_{m \text{ acqua}} + c \cdot H + d \cdot H^2 + e$$

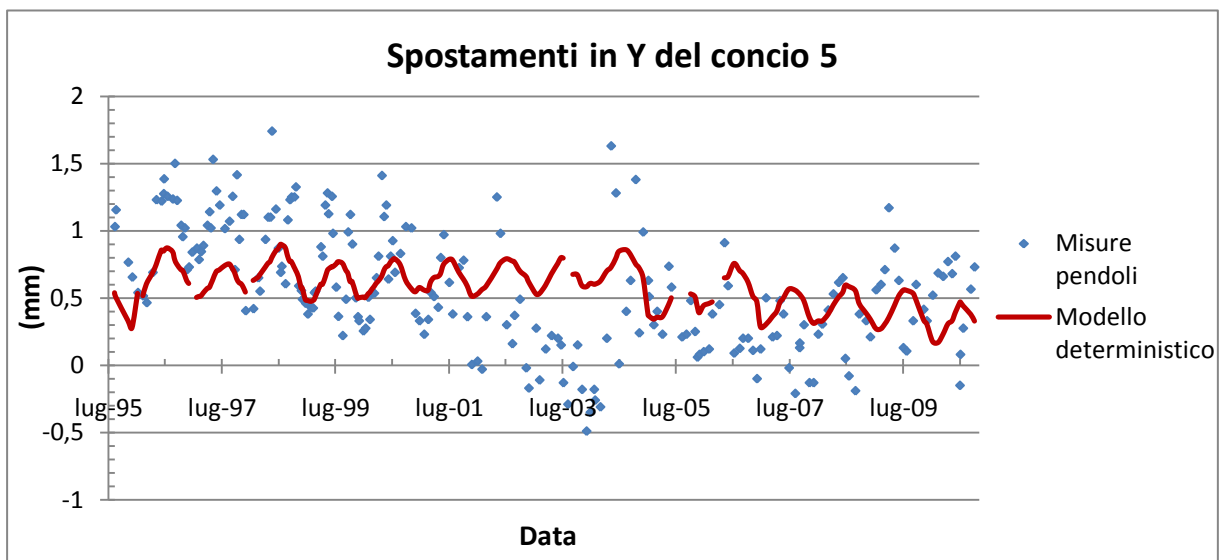
Con  $T_{m \text{ annua aria}}$  la temperatura media dell'aria su base annua e  $T_{m \text{ acqua}}$  la temperatura dell'acqua mediata sulle misure registrate tra la data attuale e i 14 giorni antecedenti. Per aumentare la numerosità del campione, per la  $T_{m \text{ acqua}}$  sono state ritenute valide le medie ricavate da almeno 12 valori giornalieri su 15, anche non consecutivi. Infatti la serie storica delle temperatura dell'acqua è molto più breve rispetto, ad esempio, a quella degli spostamenti dei pendoli: la prima registrazione risale solo al primo agosto 1995 e quindi non consente una calibrazione del modello sulle misure antecedenti quella data.

Le temperature dell'acqua sono state misurate alla profondità di 5 metri.

**Concio 5**



**Figura 2. 23**  
Spostamenti in direzione X del concio 5 – Modello deterministico.



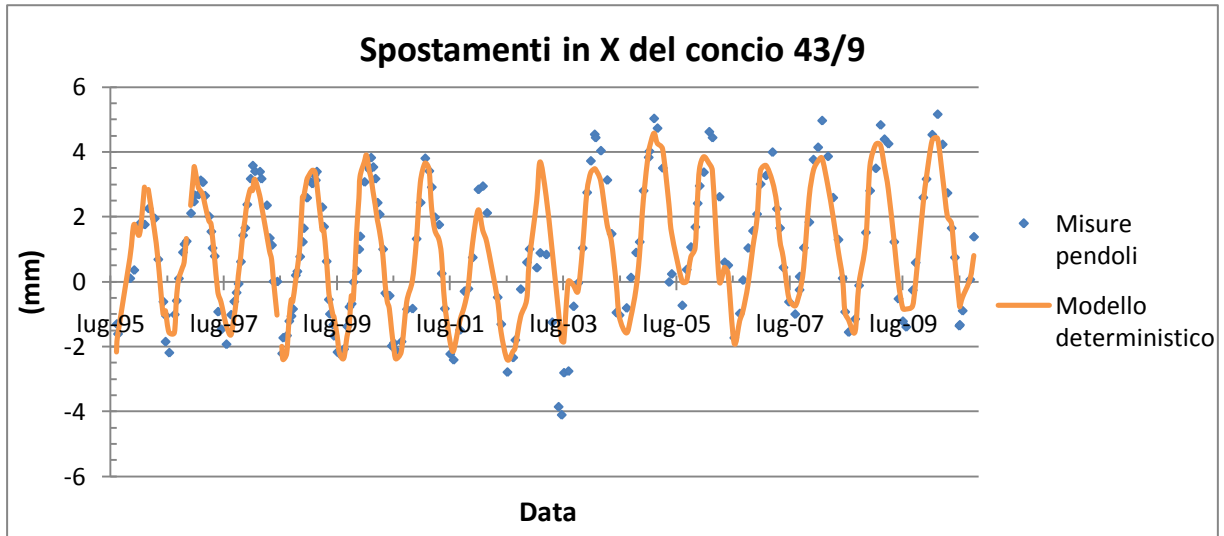
**Figura 2. 24**  
Spostamenti in direzione Y del concio 5 – Modello deterministico.

	Statistiche degli scarti (mm)	
	DIREZIONE X	DIREZIONE Y
Media	0	0
Deviaz. standard	0,66	0,42
Valore massimo	1,92	1,07
Valore minimo	-1,82	-0,94
Conteggio	222	222

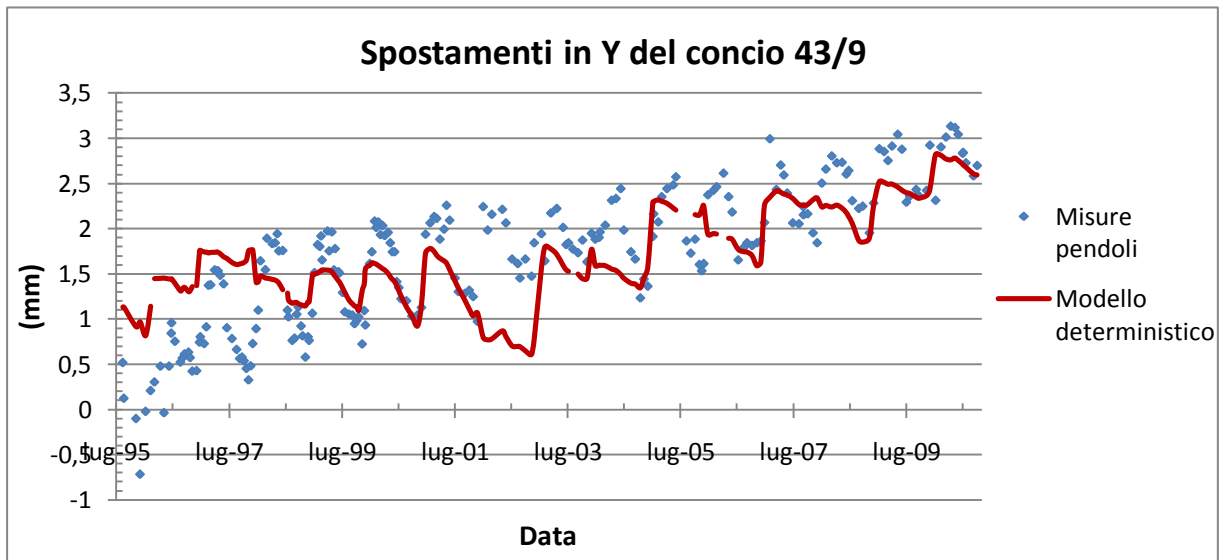
**Tabella 2. 7**  
Statistiche degli scarti per il concio 5 – Modello deterministico.



**Concio 43/9**



**Figura 2. 25**  
Spostamenti in direzione X del concio 43/9 – Modello deterministico.



**Figura 2. 26**  
Spostamenti in direzione Y del concio 43/9 – Modello deterministico.

	Statistiche degli scarti (mm)	
	DIREZIONE X	DIREZIONE Y
Media	0	0
Deviaz. standard	0,73	0,55
Valore massimo	2,98	1,69
Valore minimo	-1,43	-1,45
Conteggio	223	223

**Tabella 2. 8**  
Statistiche degli scarti per il concio 43/9 – Modello deterministico.

### 2.3.5 Confronto tra i risultati e considerazioni sui dati dei pendoli

In base alle varie simulazioni effettuate emerge chiaramente come il modello Carosio – Dupraz risulti inadeguato per ricostruire le serie temporali di spostamento della Genna Is Abis: le deviazioni standard sono abbastanza alte in tutti i casi, l'espressione analitica segue solo parzialmente le misure reali dei pendoli e non rende affatto conto del trend lineare presente nel dato registrato. D'altronde la sua formulazione non è nata per questa tipologia di opere di ritenuta.

Il De Sortis – Paoliani invece, pur calibrato per dighe a gravità alleggerita, pare funzionare molto meglio. Le curve in direzione X (figura 2.10 e 2.12) si distaccano di pochissimo, e solo in certi punti, dall'andamento reale, presentando una periodicità abbastanza marcata. La componente lineare è ben rappresentata e la funzione si mostra regolare e priva di sbalzi, salti bruschi o punti angolosi. In direzione Y la situazione è analoga per il concio 43/9 (figura 2.13) mentre per il numero 5 (figura 2.11) si nota una maggiore discordanza dalle misure dei pendoli. La buona adattabilità del modello viene confermata dalle statistiche sugli scarti: in direzione X le deviazioni standard sono nettamente inferiori al millimetro (addirittura si arriva a 0,52 mm nel concio 5) e in Y non superano gli 0,38 mm (vedere tabelle 2.1 e 2.2). Naturalmente nella direzione monte-valle la dispersione è maggiore anche perché i numeri in gioco sono circa il doppio di quelli in Y.

Lo stesso identico comportamento viene mostrato dal modello PoliMi, sia in termini grafici sia numericamente in termini di deviazioni standard.

L'unica differenza lieve si nota nella direzione Y del concio 5 (figura 2.20), dove si può osservare la sovrapposizione di 2 armoniche a periodo differente, caratteristica intrinseca del modello PoliMi.

Il modello deterministico invece si mostra meno regolare nell'andamento e più spigoloso.

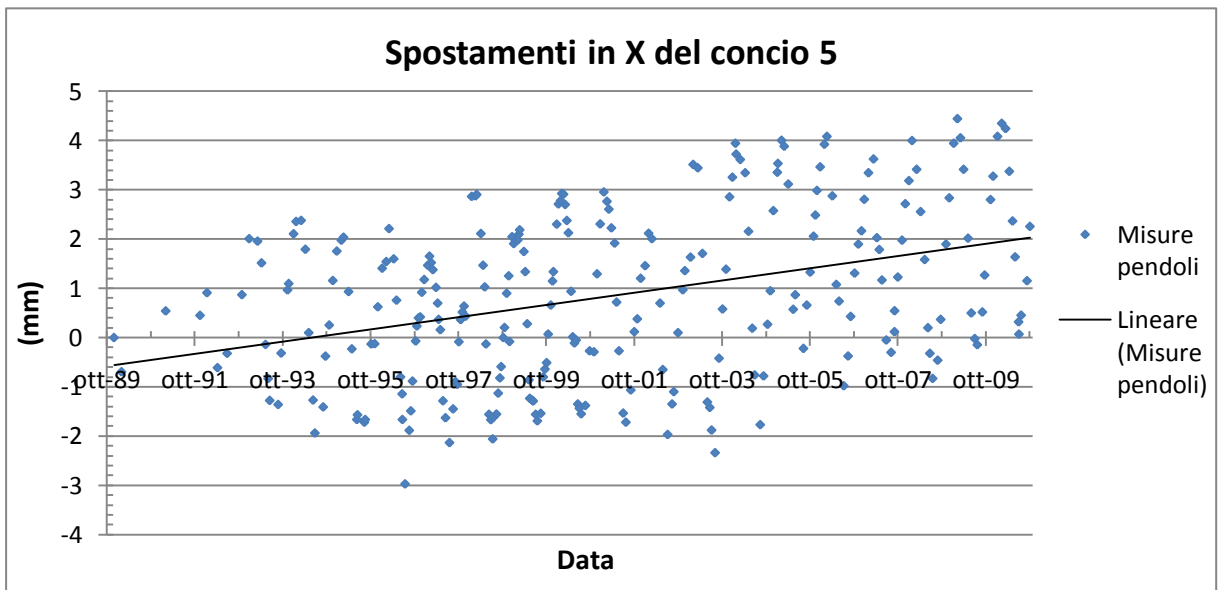
Sono anche presenti diverse interruzioni a causa della mancanza di una o più misure relativamente alla quota d'invaso o alla temperatura media dell'acqua.

Comunque si allinea abbastanza bene alle registrazioni dei pendoli senza allontanarsi troppo se non in sporadiche occasioni.

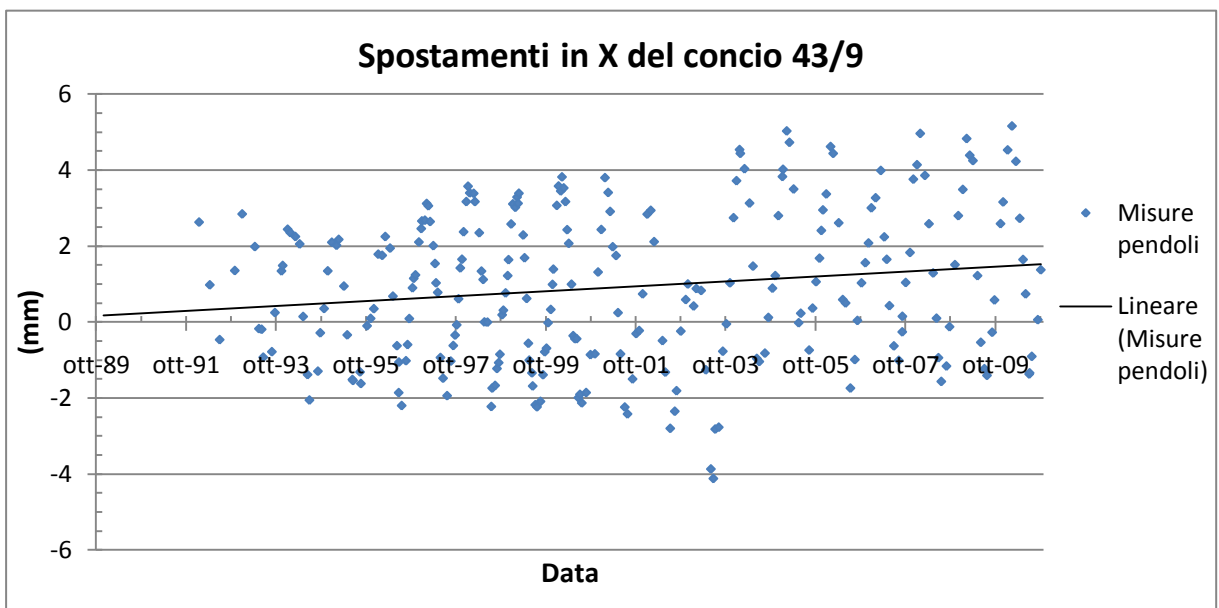
Nel complesso si conferma un buon modello, contraddistinto da deviazioni standard submillimetriche che raggiungono al massimo gli 0,73 mm.

Ciò che invece emerge dalla semplice osservazione delle serie storiche di spostamento è che, in direzione X, il coronamento della diga sembra essersi mosso verso valle di circa 2 mm in

20 anni (figura 2.27 e 2.28). Il movimento è leggermente più accentuato nel concio 5 ma si tratta solamente di qualche decimo di millimetro di differenza, dovuto probabilmente a impercettibili differenze nel comportamento del terreno di fondazione o del calcestruzzo. Il movimento periodico annuale invece, dovuto evidentemente a fenomeni di tipo termico e alla spinta idrostatica, è largamente dominante, con movimenti nell'arco dei 12 mesi che possono toccare i 5-6 mm.



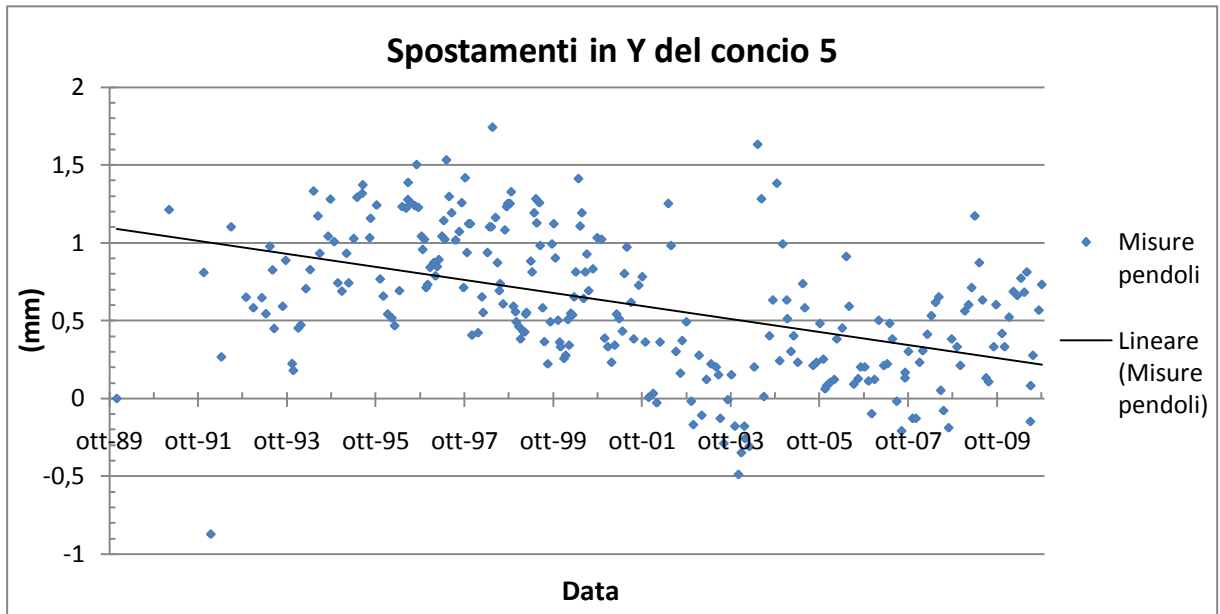
**Figura 2. 27**  
Serie storica di spostamento in direzione X del concio 5. In nero è disegnata la linea di tendenza.



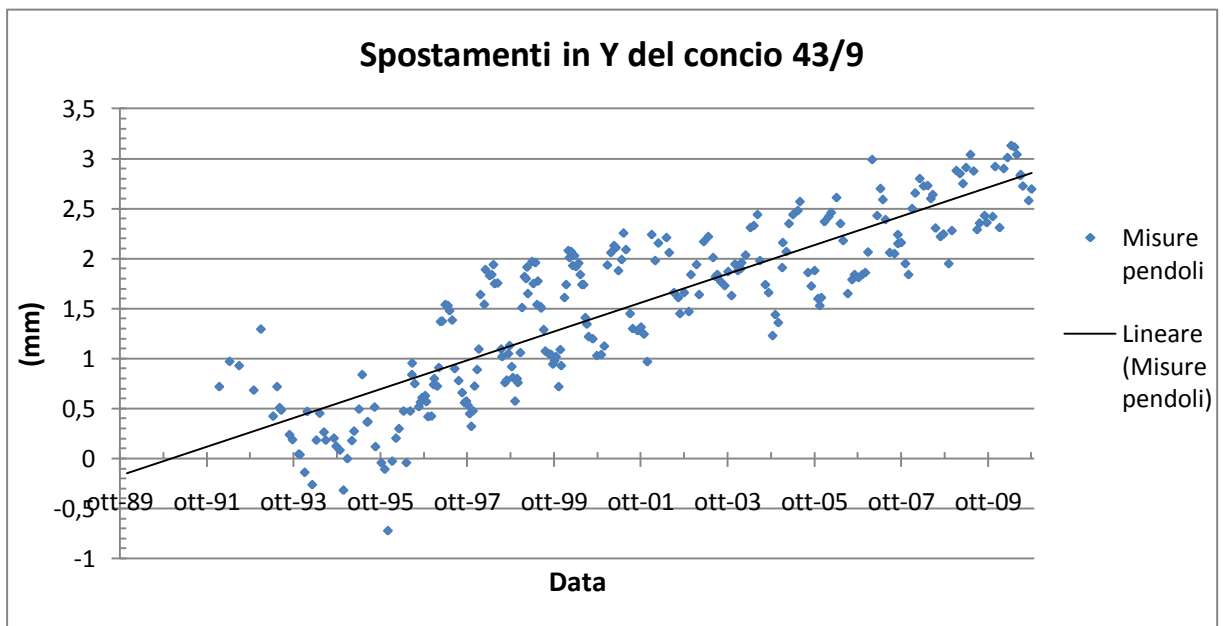
**Figura 2. 28**  
Serie storica di spostamento in direzione X del concio 43/9.

In direzione Y invece si osserva il concio 43/9 in movimento di circa 3 mm ogni 20 anni verso nord-ovest (figura 2.30), mentre il numero 5 mostra un comportamento opposto, con uno spostamento di poco meno di un millimetro verso sud-est (figura 2.29).

In tutti i casi però le grandezze in gioco sono estremamente piccole: spostamenti di questa entità sono prevedibili già in fase di progetto e ampiamente sopportabili dalla struttura.



**Figura 2. 29**  
Serie storica di spostamento in direzione Y del concio 5.



**Figura 2. 30**  
Serie storica di spostamento in direzione Y del concio 43/9.

Durante l'analisi tuttavia, è emerso un nuovo aspetto relativo allo spostamento registrato dai pendoli. Infatti, se si osserva attentamente ciascuno dei 4 campioni (direzioni X e Y di ciascun concio), si possono notare 2 piccole discontinuità che spezzano la serie storica in 3 parti apparentemente slegate tra loro.

Ciò si verifica in corrispondenza della fine di dicembre degli anni 1997 e 2002.

Il fenomeno di per sé è abbastanza strano e porta a pensare a periodici interventi di manutenzione e ritaratura degli strumenti. Poiché il Consorzio di Bonifica del Cixerri finora non ha potuto fornire nessuna informazione a riguardo, è stata svolta una analisi sulle serie temporali dei tre periodi mediante un test T sulle medie a due campioni assumendo varianze diverse.

Esso è un potente strumento della statistica inferenziale che serve a verificare l'accettabilità o meno dell'ipotesi iniziale  $H_0$ , o ipotesi nulla.

Nel caso in esame,  $H_0$  sostiene che la media  $\mu$  del campione 1 sia uguale a quella del campione 2. In formula:

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

Ipotizzando che i campioni abbiano una distribuzione di tipo normale, si definisca la variabile  $t$  come segue:

$$t = \frac{\mu_1 - \mu_2}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}}}$$

Dove  $\sigma$  rappresenta la deviazione standard campionaria e  $n$  la numerosità del campione.

Il test T a due code calcola il valore assoluto della variabile normalizzata  $t$  e la confronta con il quantile  $t_{1-\alpha/2}(y)$  della legge t di Student a  $y$  gradi di libertà e livello di significatività  $\alpha$ .

$\alpha$  specifica il grado di restrittività del test e rappresenta la soglia di probabilità di uguaglianza delle due medie al di sotto della quale l'ipotesi nulla viene rifiutata. In altre parole non si accetta  $H_0$  se le medie dei due campioni presentano una probabilità  $p$  di uguaglianza inferiore ad  $\alpha$ .

In tutti i casi è stato scelto un livello di significatività pari al 5 %.

Il test T rifiuta l'ipotesi  $H_0$  qualora  $|t| > t_{1-\alpha/2}(y)$ .

Per il calcolo di  $y$  ci si affida alla formula:

$$y = \frac{\left(\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2}\right)^2}{\frac{\left(\frac{\sigma_1^2}{n_1}\right)^2}{n_1 - 1} + \frac{\left(\frac{\sigma_2^2}{n_2}\right)^2}{n_2 - 1}}$$

Il risultato viene approssimato all'intero più vicino.

Nel caso studio della Genna Is Abis la creazione dei campioni è stata effettuata suddividendo ciascuna serie storica in 3 parti, ognuna della durata di 5 anni, a partire dal gennaio del 1992 fino ad arrivare al dicembre 2006. I risultati del test T sono riportati di seguito.

#### Test T sul concio 5 in direzione X

	Gen 92 – Dic 96	Gen 97 – Dic 01	Gen 97 – Dic 01	Gen 02 – Dic 06
$\mu$ (mm)	0,20	0,46	0,46	1,34
$\sigma$ (mm <sup>2</sup> )	2,01	2,29	2,29	3,33
n	55	96	96	61
y	119		111	
t	-1,051		-3,129	
$t_{1-\alpha/2}(y)$	1,980		1,982	
p	0,295		0,002	

**Tabella 2. 9**  
Risultati del test T in direzione X  
sul concio 5.

#### Test T sul concio 5 in direzione Y

	Gen 92 – Dic 96	Gen 97 – Dic 01	Gen 97 – Dic 01	Gen 02 – Dic 06
$\mu$ (mm)	0,85	0,79	0,79	0,28
$\sigma$ (mm <sup>2</sup> )	0,17	0,12	0,12	0,18
n	55	96	96	61
y	100		110	
t	0,886		7,774	
$t_{1-\alpha/2}(y)$	1,984		1,982	
p	0,378		0	

**Tabella 2. 10**  
Risultati del test T in direzione Y  
sul concio 5.

**Test T sul concio 43/9 in direzione X**

	Gen 92 – Dic 96	Gen 97 – Dic 01	Gen 97 – Dic 01	Gen 02 – Dic 06
$\mu$ (mm)	0,58	0,79	0,79	1,01
$\sigma$ (mm <sup>2</sup> )	2,19	3,64	3,64	5,27
n	55	98	98	61
y	136		110	
t	-0,759		-0,639	
$t_{1-\alpha/2}(y)$	1,978		1,982	
p	0,449		0,524	

**Tabella 2. 11**  
Risultati del test T in direzione X  
sul concio 43/9.

**Test T sul concio 43/9 in direzione Y**

	Gen 92 – Dic 96	Gen 97 – Dic 01	Gen 97 – Dic 01	Gen 02 – Dic 06
$\mu$ (mm)	0,36	1,35	1,35	1,94
$\sigma$ (mm <sup>2</sup> )	0,13	0,24	0,24	0,10
n	55	98	98	61
y	139		157	
t	-14,039		-9,177	
$t_{1-\alpha/2}(y)$	1,977		1,975	
p	0		0	

**Tabella 2. 12**  
Risultati del test T in direzione Y  
sul concio 43/9.

In base a quanto emerso nell'analisi, per il concio 5 va rifiutata l'ipotesi nulla solo tra i periodi 97-01 e 02-06. Quindi pare che le medie dei due campioni non siano significativamente uguali e perciò potrebbe essere confermata la teoria iniziale della ricalibrazione. La probabilità che  $H_0$  sia vera è infatti molto bassa (0,2% in direzione X e 0% in Y). Tra il 92-96 e il 97-01 invece l'ipotesi nulla viene accettata.

Per quanto riguarda il concio 43/9, il test T rifiuta  $H_0$  in direzione Y per entrambe le coppie di campioni.

Infine si è cercato di applicare il modello PoliMi ai singoli periodi di 5 anni delle registrazioni. I risultati che ne conseguono sono abbastanza migliorativi, con deviazioni standard più basse di oltre due decimi di millimetro rispetto alla modellazione dell'intera serie storica, come mostrato nelle figure 2.31, 2.32, 2.33, 2.34 e nelle tabelle 2.13 e 2.14.



Modellazione a 3 intervalli sul concio 5

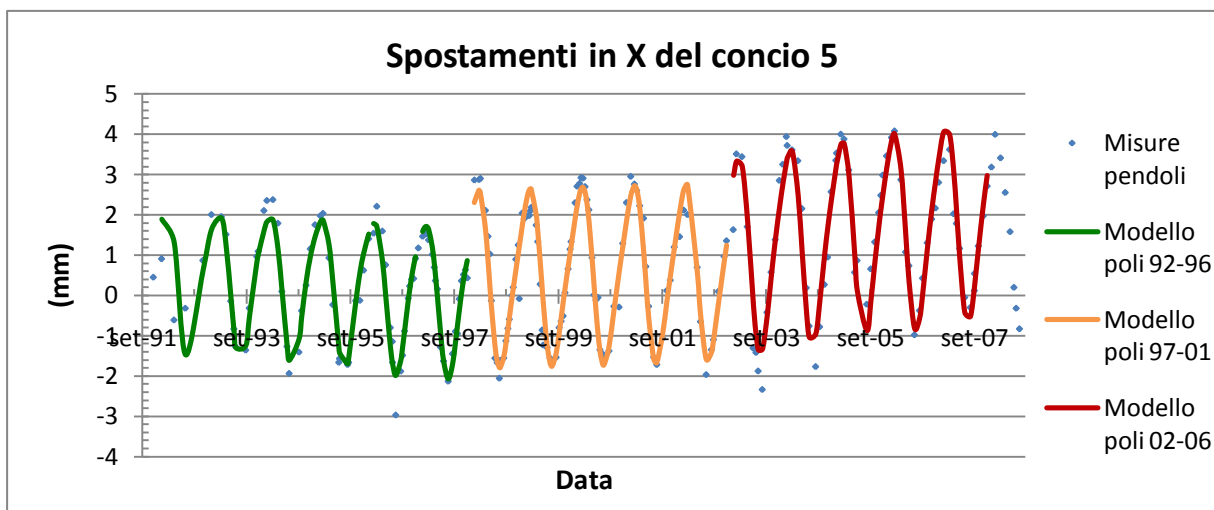


Figura 2. 31  
Modellazione PoliMi a tre intervalli sulla direzione X del concio 5.

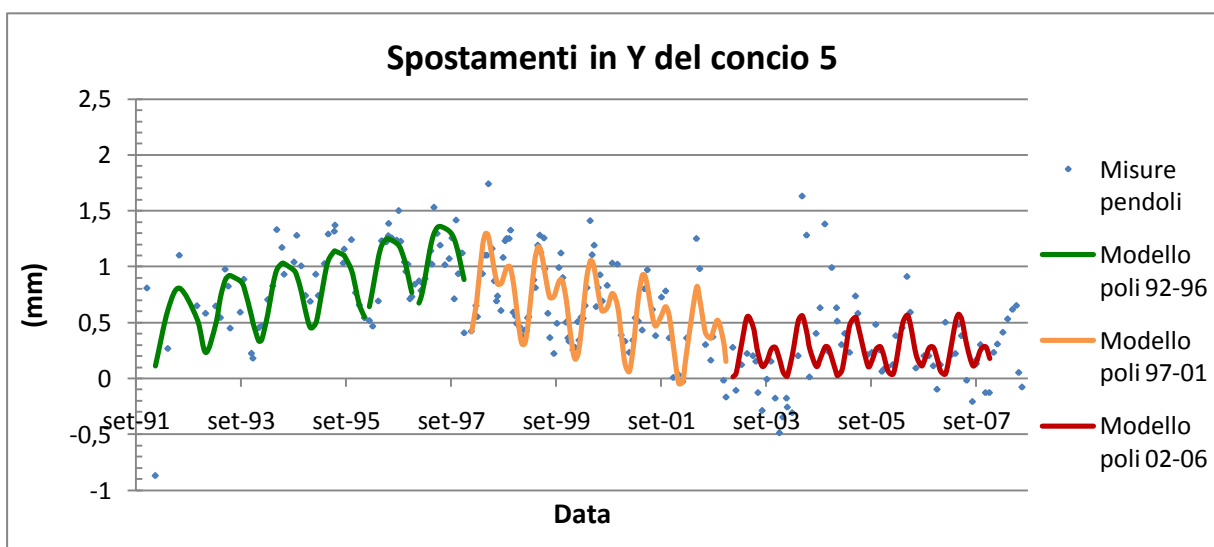


Figura 2. 32  
Modellazione PoliMi a tre intervalli sulla direzione Y del concio 5.

	Statistiche degli scarti (mm)					
	DIREZIONE X			DIREZIONE Y		
	92-96	97-01	02-06	92-96	97-01	02-06
<b>Media</b>	0	0	0	0	0	0
<b>Deviaz. standard</b>	0,43	0,39	0,52	0,46	0,38	0,91
<b>Valore massimo</b>	1,92	1,28	1,35	1,40	1,18	2,27
<b>Valore minimo</b>	-1,16	-0,88	-1,07	-1,05	-1,19	-1,54
<b>Conteggio</b>	74	87	63	73	88	63

Tabella 2. 13  
Statistiche degli scarti per il concio 5 – Modello PoliMi a tre intervalli

Modellazione a 3 intervalli sul concio 43/9

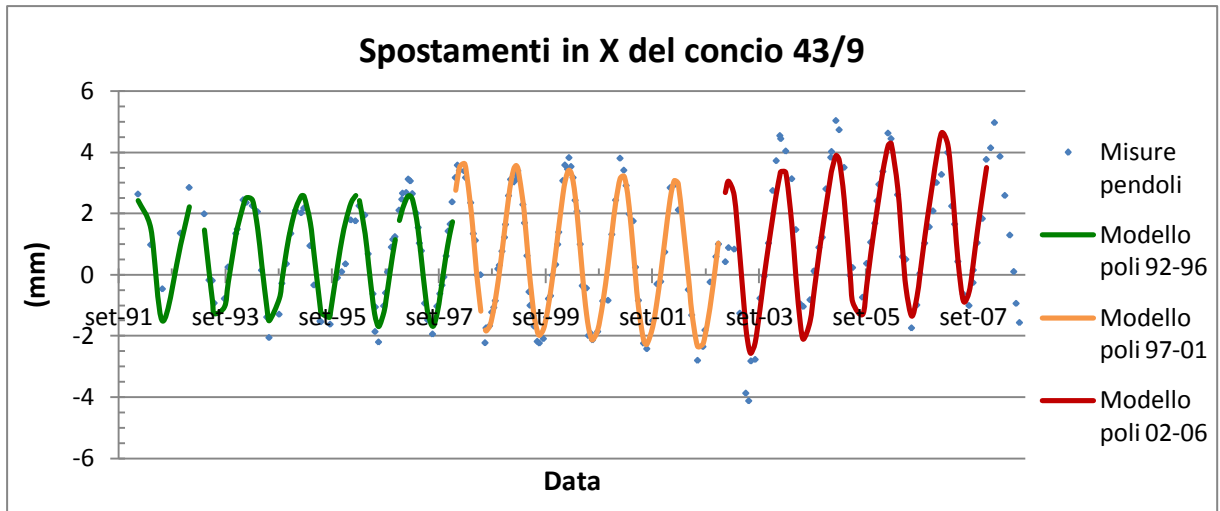


Figura 2. 33  
Modellazione PoliMi a tre intervalli sulla direzione X del concio 43/9.

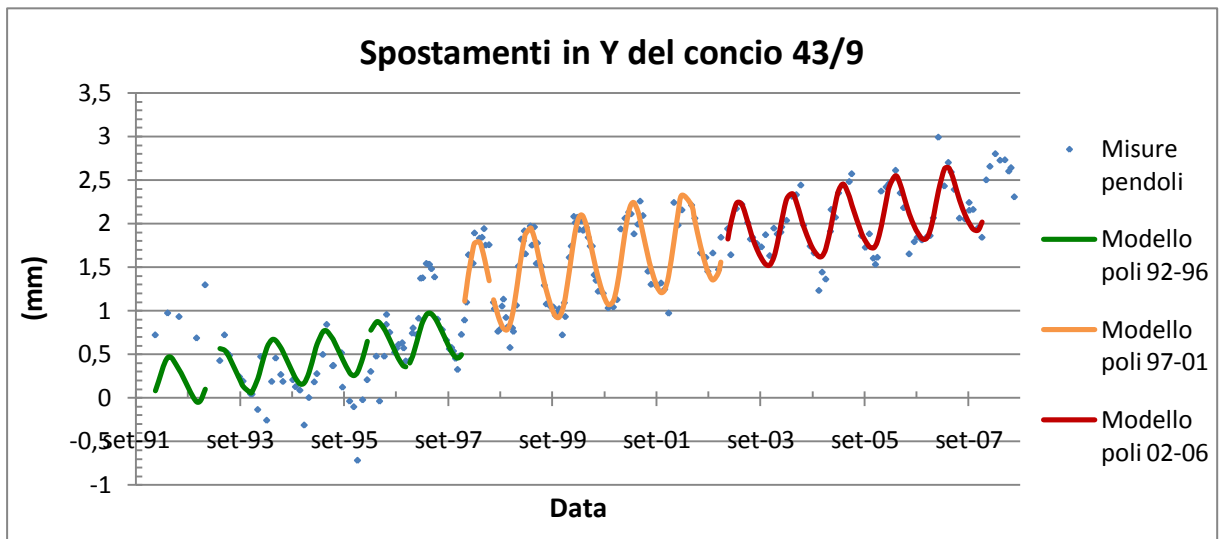


Figura 2. 34  
Modellazione PoliMi a tre intervalli sulla direzione Y del concio 43/9.

	Statistiche degli scarti (mm)					
	DIREZIONE X			DIREZIONE Y		
	92-96	97-01	02-06	92-96	97-01	02-06
<b>Media</b>	0	0	0	0	0	0
<b>Deviaz. standard</b>	0,24	0,21	0,36	0,39	0,18	0,20
<b>Valore massimo</b>	0,98	0,52	0,66	1,01	0,43	0,46
<b>Valore minimo</b>	-0,44	-0,49	-1,10	-1,20	-0,45	-0,62
<b>Conteggio</b>	74	87	63	73	88	63

Tabella 2. 14  
Statistiche degli scarti per il concio 43/9 – Modello PoliMi a tre intervalli.

### 2.3.6 Correlazione statistica tra variabili

Il modello deterministico impiegato nell'analisi contiene delle variabili fisiche che si ritiene, per un qualche motivo, possano influenzare gli spostamenti al coronamento della diga, come ad esempio il livello o la quota dell'invaso, la temperatura media dell'acqua, e così via. La scelta delle grandezze da inserire nella formulazione può benissimo partire da ragionamenti e considerazioni pratiche sul fenomeno da studiare, sfruttando anche la conoscenza delle leggi fisiche e i precedenti studi sull'argomento.

L'inserimento di  $H$  nel modello deterministico, ad esempio, è una decisione presumibilmente corretta in quanto la pressione idrostatica che grava sulla diga è direttamente proporzionale al livello idrico nell'invaso. Inoltre già un altro modello di comprovata affidabilità, il Carosio-Dupraz, includeva  $H$  nella sua espressione.

Ciò tuttavia non certifica al cento per cento che la decisione presa sia anche quella corretta. Serve allora un indicatore in grado di fornire una misura quantitativa della dipendenza, o meglio correlazione, esistente tra le due variabili  $x$  e  $y$  (che nel caso in esame sono lo spostamento ai pendoli e, ad esempio, la quota del pelo libero nell'invaso).

A tal proposito si può ricorrere ancora una volta alla statistica, impiegando il cosiddetto coefficiente di correlazione lineare  $\rho_{xy}$ , definito come il rapporto tra la covarianza  $\sigma_{xy}$  e la media geometrica delle varianze marginali di  $x$  e  $y$  (rispettivamente  $\sigma_x^2$  e  $\sigma_y^2$ ):

$$\rho_{xy} = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} = \frac{\sigma_{xy}}{\sqrt{\sigma_x^2 \sigma_y^2}}$$

La covarianza, a sua volta, è descritta dalla seguente formula:

$$\sigma_{xy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$$

Il pedice  $i$  indica l'osservazione  $i$ -esima, mentre l'accento al di sopra della lettera contrassegna il valore medio del campione, caratterizzato da una numerosità pari a  $n$ .

In base al valore assunto dal coefficiente  $\rho_{xy}$  si riesce a capire se le due variabili sono tra loro correlate linearmente ovvero, in parole più semplici, se nel piano cartesiano  $x$ ,  $y$  le osservazioni sono ben interpolabili da una retta di regressione.

Il coefficiente di correlazione lineare è sempre compreso tra -1 e 1, estremi inclusi, e diventa negativo qualora la covarianza  $\sigma_{xy}$  sia minore di zero. La correlazione tra le due variabili è tanto più accentuata se il valore assoluto di  $\rho_{xy}$  è vicino all'unità; se invece esso è nullo si parla di indipendenza statistica. Il segno assunto dal coefficiente stabilisce il tipo di dipendenza esistente: se positivo, al crescere di  $x$  anche  $y$  assume valori sempre più grandi e le variabili si dicono direttamente correlate. In questo caso il coefficiente angolare della retta di regressione è maggiore di zero. Se  $\rho_{xy}$  è negativo,  $y$  diminuisce all'aumentare di  $x$  e la retta interpolante pende verso il basso. È il caso della correlazione lineare inversa.

Si riportano nella tabella seguente i coefficienti di correlazione, calcolati per la diga sul Rio Cixerri, tra gli spostamenti registrati ai pendoli e le altre variabili considerate. Esse sono nello specifico la quota di invaso  $H$ , la temperatura dell'aria e dell'acqua (rispettivamente  $T_{aria}$  e  $T_{acqua}$ ), la temperatura media dell'acqua  $T_{m\ acqua}$  e l'escursione termica  $\Delta T$  tra  $T_{aria}$  e  $T_{acqua}$ .

	Concio 5 X	Concio 5 Y	Concio 43/9 X	Concio 43/9 Y
Temperatura aria	-0,642	0,146	-0,738	0,137
Temperatura acqua	-0,781	0,211	-0,850	0,020
$\Delta T$ aria-acqua	0,215	-0,150	0,146	0,257
Temperatura media acqua	-0,824	0,209	-0,881	-0,065
Quota invaso	0,325	-0,110	0,299	0,451

**Tabella 2. 15**

**Coefficienti di correlazione tra le variabili considerate e gli spostamenti registrati dai pendoli.**

Come si può osservare dai risultati, lo spostamento del concio al coronamento in direzione X è legato principalmente alla temperatura dell'acqua (sia  $T_{acqua}$  che  $T_{m\ acqua}$ ), con coefficienti  $\rho_{xy}$  che si aggirano intorno a -0,8 e che arrivano persino a -0,881 nel concio 43/9. Dunque la dipendenza è molto evidente ed è, contrariamente alle aspettative, di tipo inverso: se l'acqua nell'invaso si scalda il concio tende a spostarsi verso monte, mentre se è fredda avviene il contrario. Anche per la temperatura dell'aria si nota una marcata correlazione inversa in direzione X e ciò potrebbe essere spiegato ricorrendo all'escursione termica tra invaso e atmosfera: l'acqua è caratterizzata da una maggiore capacità termica rispetto all'aria e pertanto è soggetta a sbalzi termici meno marcati tra giorno e notte ed estate e

inverno. Ad esempio in una giornata estiva molto soleggiata l'aria sarà sicuramente più calda dell'acqua nell'invaso e quindi le fibre del paramento di monte e di valle si deformeranno in maniera diversa, originando così degli spostamenti al coronamento della diga. Questa teoria pare però concordare solo in parte con il coefficiente di correlazione di  $\Delta T$ , che mostra solo una lieve dipendenza diretta dall'escursione termica tra i due fluidi.

Per il livello dell'invaso i risultati sono simili, anche se  $\rho_{xy}$  è ora positivo. La correlazione non è elevata e il coefficiente è di circa 0,3 per entrambi i concetti.

In direzione Y invece pare che non ci siano dipendenze marcate da nessuna delle variabili considerate.

## 2.4 Monitoraggio predittivo mediante GNSS

L'analisi delle serie storiche di spostamento analizzate finora consente di farsi un'idea dell'ordine di grandezza e delle precisioni richieste nelle misure. Si sta parlando infatti di qualche millimetro in 20 anni, ovvero pochissimi decimi di millimetro in 365 giorni. Per questa ragione occorre usare strumenti di misura dotati di elevata precisione, quali i pendoli e i collimatori. Il problema di questi apparecchi però è l'operazione di misura, che risulta di difficile automatizzazione e deve perciò essere eseguita da un operatore qualificato. L'esempio pratico è stato fornito dai coordinometri registratori installati nella Genna Is Abis, caratterizzati da precisioni inferiori rispetto ai pendoli ottici e maggiormente soggetti a starature o malfunzionamenti.

Una possibile soluzione che appare valida e promettente per il futuro proviene dalle tecnologie satellitari. Se il problema è misurare in automatico i movimenti del coronamento di una diga, perché non provare a utilizzare una rete GNSS ad alta precisione, sfruttando magari il posizionamento statico relativo in post-processing?

Effettivamente l'impiego di antenne GPS presenta diversi vantaggi in quanto è in grado di acquisire dati in continuo e autonomamente ed è caratterizzato da una certa economicità, sia di impianto che di esercizio. L'antenna GNSS infatti non è paragonabile, come costi di impianto, a quella di un pendolo, in quanto quest'ultimo rimane pur sempre uno strumento

meccanico estremamente preciso e delicato, che necessita di una manutenzione più accurata e attenta e di costi di impianto (si pensi al cunicolo ove viene inserito il pendolo) considerevoli.

Per la gestione inoltre è sufficiente che un incaricato si rechi presso la centralina di controllo dell'antenna e ne scarichi i dati periodicamente, anche con una cadenza temporale uguale a quella della lettura dei pendoli; l'operazione può essere automatizzata e semplicemente controllata periodicamente. Addirittura, grazie alle moderne tecnologie wireless di trasmissione dei dati, l'acquisizione può avvenire in remoto tramite una semplice connessione a internet. Tutto ciò presenta anche un effetto indotto di riduzione degli errori grossolani, dovuti ad esempio a una lettura sbagliata della dima del pendolo o a sviste e distrazioni nell'operazione di trascrizione delle misure.

Il rilievo GPS però è soggetto anche a diverse problematiche, già esposte nel capitolo 1, quali la visibilità dei satelliti, il rumore ambientale e così via. Occorre poi tenere presente che i ricevitori GPS sono installati all'aperto e pertanto soggetti all'azione degli agenti atmosferici e a eventuali atti vandalici o furti di apparecchiature.

Inoltre la registrazione GPS acquisita non può essere impiegata tal quale ma necessita di un trattamento dati più o meno complicato, che deve essere svolto da personale specializzato, anche con l'ausilio di software di elaborazione dedicati. Nella Genna Is Abis ad esempio, per poter confrontare gli spostamenti GPS con quelli dei pendoli ottici è stato necessario operare un cambio di coordinate, realizzato mediante rototraslazione degli assi cartesiani. Infatti il sistema satellitare esprime la posizione dell'antenna nel sistema di riferimento ellissoidico WGS84 e non nelle coordinate X-Y utilizzate dai pendoli.

Infine la tematica forse più importante e problematica nell'ambito del monitoraggio riguarda le precisioni di misura conseguibili, che nel caso di una rete GNSS ben progettata e gestita si attestano a valori di qualche millimetro.

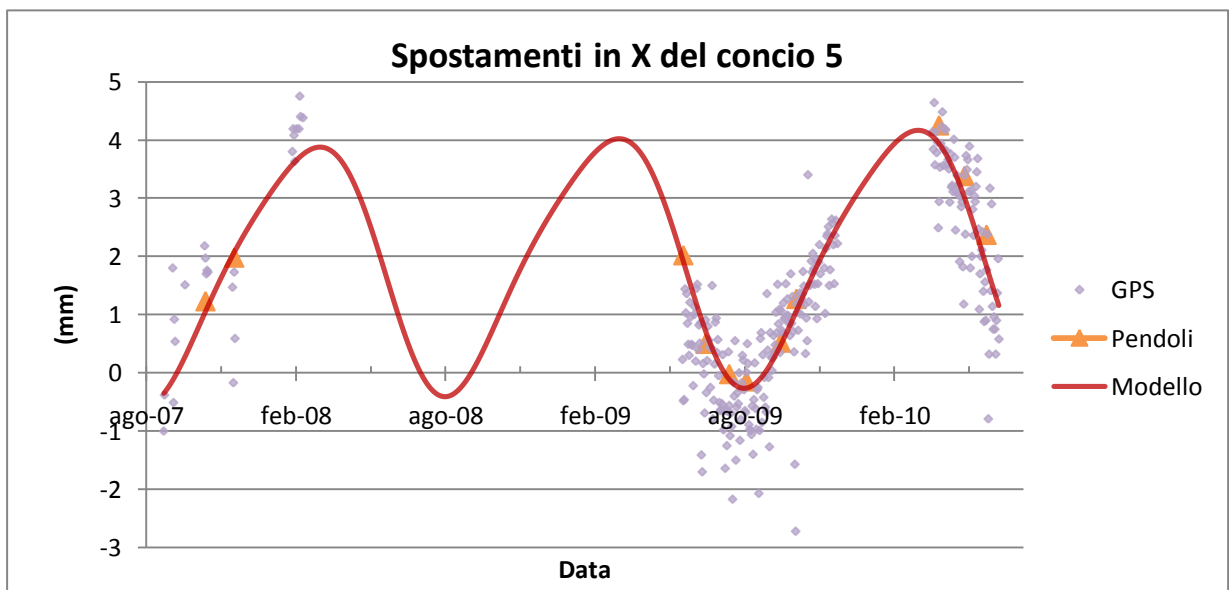
Proprio per cercare di approfondire meglio quest'ultimo argomento sono stati confrontati tra loro i dati misurati dalla rete GPS installata da Leica Geosystem S.p.a. sulla struttura, le misure degli strumenti ottici collocati nel corpo diga e le previsioni del modello PoliMi.

L'impiego del modello risulta obbligato per svolgere un raffronto più completo e approfondito: il GPS infatti registra la posizione dell'antenna tutti i giorni mentre la lettura dei pendoli avviene solo mensilmente; sfruttando però gli strumenti ottici per calibrare il modello si può ottenere una stima di spostamento con cadenza giornaliera (il modello PoliMi

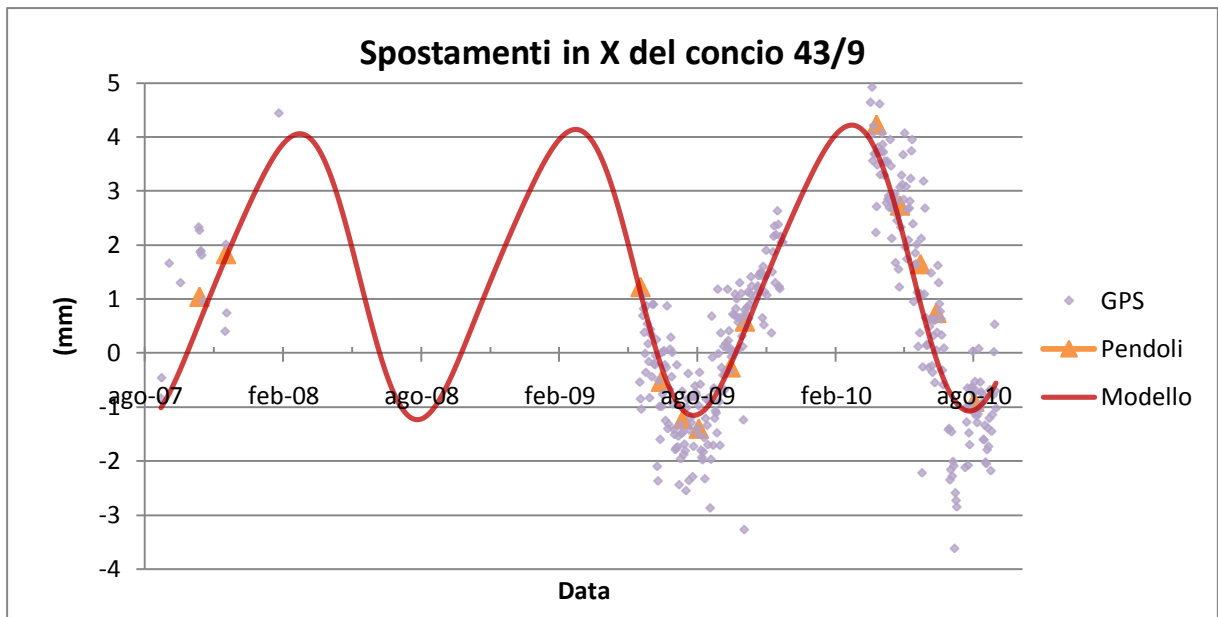
è di tipo predittivo e non necessita di conoscere la temperatura dell'aria o l'altezza dell'invaso). Quel che si osserva dal raffronto è un buon comportamento dei dati GPS, che paiono avere lo stesso andamento della curva delineata dal modello PoliMi, seppure con uno scostamento pressoché costante tra le due serie in direzione X. Nello specifico il GNSS sembra sovrastimare la posizione di una quantità fissa rispetto al dato pendolare. Per ovviare al problema si può ricalibrare la serie storica GPS sottraendo, ad ogni misura, il valor medio degli scarti, rispetto al modello, delle prime 30 registrazioni in ordine cronologico, partendo ovviamente dalla data della prima acquisizione satellitare, ovvero il 27 agosto 2007.

Ora le due curve sono molto più ravvicinate e il dato GPS sembra rispecchiare molto bene la ricostruzione modellistica (figura 2.35 e 2.36).

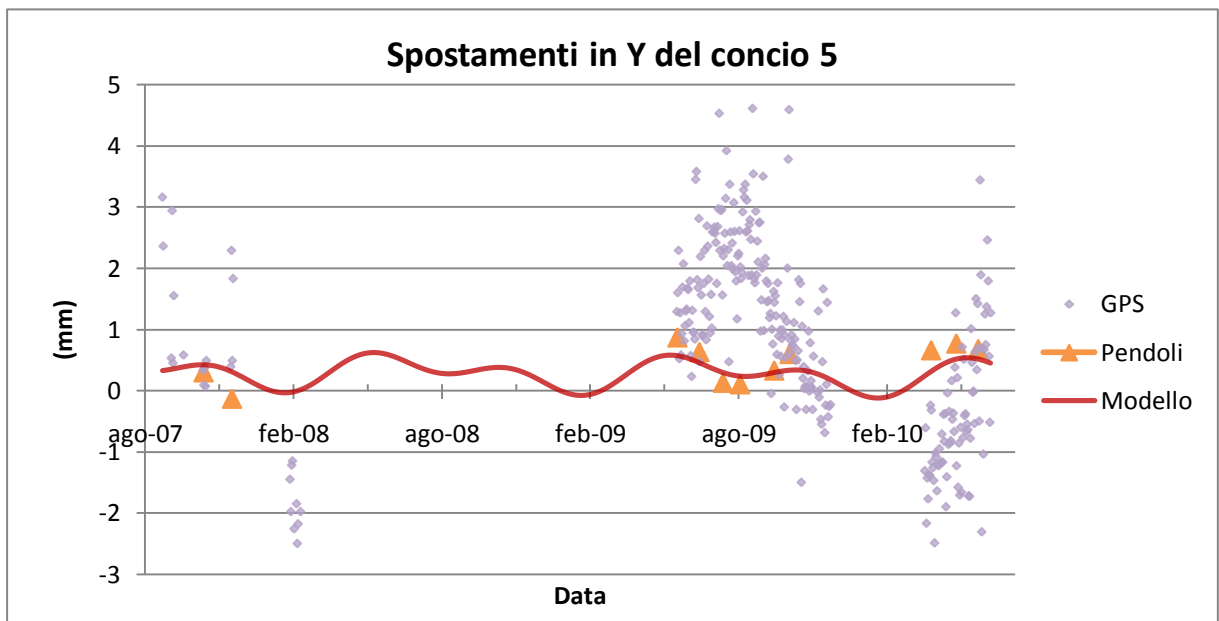
In direzione Y, dove i movimenti sono di entità inferiore, invece il posizionamento satellitare, meno accurato dei pendoli, ricalca con minore precisione l'altra curva (figure 2.37 e 2.38).



**Figura 2. 35**  
**Concio 5 direzione X – Confronto tra la serie storica GPS calibrata, il modello PoliMi e le misure dei pendoli.**

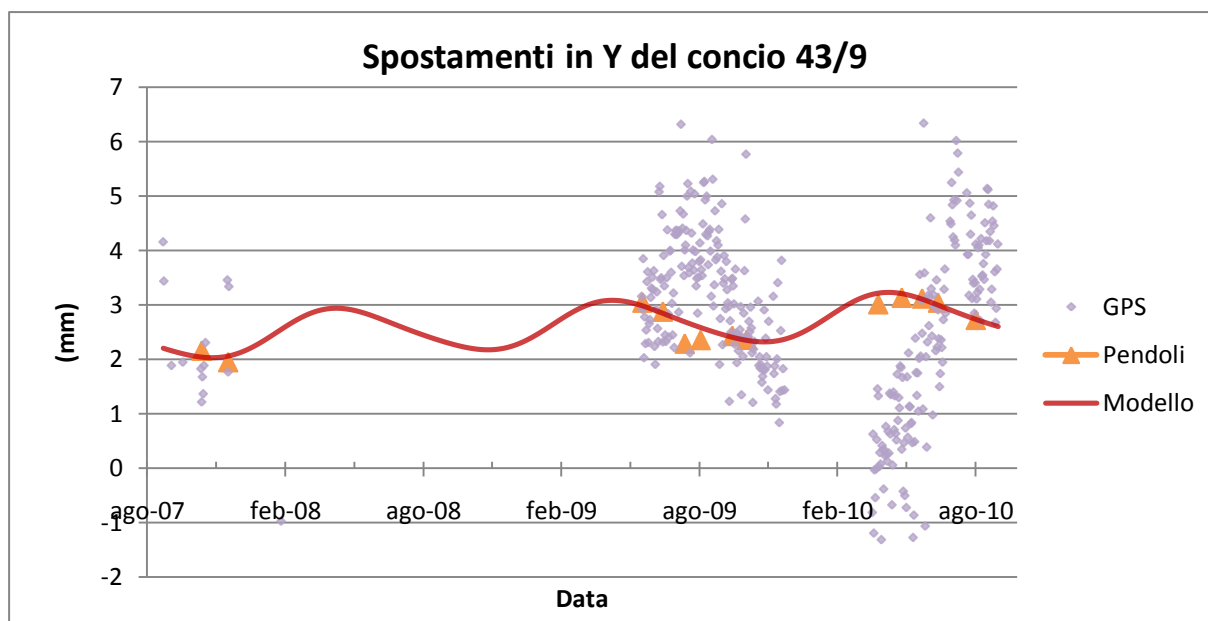


**Figura 2. 36**  
**Concio 43/9 direzione X – Confronto tra la serie storica GPS calibrata, il modello PoliMi e le misure dei pendoli.**



**Figura 2. 37**  
**Concio 5 direzione Y – Confronto tra la serie storica GPS calibrata, il modello PoliMi e le misure dei pendoli.**





**Figura 2. 38**  
**Concio 43/9 direzione Y – Confronto tra la serie storica GPS calibrata, il modello PoliMi e le misure dei pendoli.**

Anche in questo caso, per avere una quantificazione numerica dell'adattabilità al modello delle misure GPS sono stati calcolati gli indicatori statistici di media e deviazione standard sugli scarti tra le due popolazioni (Tabella 2.16). Essi confermano prevalentemente le impressioni iniziali e dimostrano come il dato GPS, in direzione X, sia effettivamente poco scostato dal modello tarato sui pendoli: si tratta di deviazioni standard inferiori al millimetro e medie prossime allo zero, specialmente sul concio 43/9.

	Media (mm)	Deviaz. Standard (mm)
Concio 5 X	-0,19	0,80
Concio 5 Y	0,51	1,49
Concio 43/9 X	-0,01	0,87
Concio 43/9 Y	0,03	1,66

**Tabella 2. 16**  
**Statistiche degli scarti tra la serie storica GPS calibrata e il modello PoliMi.**

Dunque l'impiego di sensori satellitari per l'osservazione della diga sul Cixerri sembra avere buone possibilità di sviluppo future, visti gli ottimi presupposti di precisione messi in evidenza durante la campagna di misura sperimentale iniziata nel 2007. In particolare essi

possono sostituire i problematici coordinometri registratori e, per il controllo degli spostamenti al coronamento, essere abbinati ai pendoli ottici. Questi ultimi sono infatti necessari per calibrare correttamente la serie storica rilevata dal GPS e costituiscono in ogni caso il sistema primario di monitoraggio dell'opera di ritenuta.

Di conseguenza, viste le misure estremamente precise, si potrebbe fare riferimento ai pendoli ottici per la misura degli spostamenti sul breve e brevissimo periodo (anche a un solo giorno di distanza) e affidarsi poi anche alle registrazioni GPS per quanto riguarda le variazioni a lungo termine (un mese o più). Il rilievo GNSS infatti non sarebbe affidabile per intervalli temporali troppo brevi visto che il dato è ancora troppo rumoroso e dispersivo. Può però cogliere già abbastanza chiaramente le differenze di posizionamento che si avvicinano al millimetro, cosa che nella struttura oggetto di studio si verifica al trascorrere di poco più di un mese.

# MONITORAGGIO DELLA DIGA CANTONIERA

## 3.1 La diga cantoniera

La diga Cantoniera Eleonora D'Arborea è un'opera di ritenuta che sbarra il corso del fiume Tirso, il corso d'acqua più lungo e con il più esteso bacino idrografico di tutta la Sardegna. Nasce infatti alle pendici della Punta Pianedda, in prossimità dell'abitato di Buddusò (OT), e percorre l'isola in direzione sud-ovest per circa 159 km attraversando tra l'altro le province di Sassari, Nuoro e infine Oristano, prima di gettarsi nel Golfo della città. Il suo bacino idrografico, di oltre 3300 km<sup>2</sup> di estensione, è solcato da numerosi affluenti, tra cui il Rio Liscoi, il Rio Murtazzolu, il Fiume Taloro e il Rio Pitziu.

Tra tutti gli sbarramenti artificiali presenti, di cui uno (la diga Sos Canales) situato a pochi chilometri a valle delle sorgenti, il più rilevante è proprio la diga Cantoniera Eleonora D'Arborea, situata presso Busachi, in provincia di Oristano. Realizzata tra il 1982 e il 1996 l'opera contribuisce all'espansione del Lago Omodeo, un bacino artificiale preesistente e creato artificialmente nel 1924 con la costruzione della diga di Santa Chiara. Quest'ultima si trova più a monte della Cantoniera, nei pressi di Ula Tirso, ed è destinata ad essere sommersa durante gli eventi idrologici più gravosi che comportano un certo grado di riempimento dell'invaso. La struttura infatti, pur risultando insufficiente per le attuali esigenze, è stata semplicemente bypassata con 2 grandi gallerie di traforo realizzate appositamente alla base del corpo diga, proprio per evitare la demolizione e lo smantellamento della stessa. Infatti lo sbarramento di Santa Chiara è considerato come

particolare esempio di architettura industriale della prima metà del novecento e quindi patrimonio culturale tutelato a tutti gli effetti. Si tratta di una diga a volte in calcestruzzo armato, sostenute da contrafforti in muratura di pietrame (diga a speroni). Lunga 200 metri e alta circa 70 era, per l'epoca, un'opera straordinaria, anche perché consentiva la formazione dell'allora più grande lago artificiale d'Europa. La sua dismissione fu decisa negli anni '70 a seguito dell'apertura di alcune fessurazioni che non ne garantivano la completa sicurezza strutturale.



**Figura 3. 1**  
**La vecchia diga di Santa Chiara**  
**vista da monte.**



**Figura 3. 2**  
**Il paramento di valle della diga di Santa Chiara**  
**dopo la creazione delle gallerie di bypass.**

La Cantoniera Eleonora D'Arborea<sup>1</sup> è una diga in muratura alta 100 metri e lunga 582 che si sviluppa secondo un asse mistilineo da nord-ovest verso sud-est.

È infatti costituita da due tratti rettilinei raccordati tra loro mediante un arco di cerchio.

Rispetto alla Genna Is Abis si differenzia per la tipologia costruttiva, che non è più a gravità massiccia bensì a gravità alleggerita, anche detta a contrafforti o a vani interni. Ciò nasce dall'esigenza di sfruttare al meglio le capacità statiche e di resistenza del calcestruzzo. Infatti nella gravità massiccia il concio è caratterizzato da una notevole stabilità ma il materiale è sottoposto a compressione prossima al carico di sicurezza solamente nei pressi del paramento di valle, a causa della spinta idrostatica dell'invaso. Il resto del calcestruzzo invece è caricato in quantità minore e la distribuzione degli sforzi non risulta uniforme. Questo può essere visto in un certo senso come uno spreco di materia prima, cui si può ovviare snellendo e alleggerendo la struttura nella sua parte centrale, cioè dove le sollecitazioni risultano meno gravose.

In questo modo il concio è caratterizzato da due spalle a gravità piena (con paramenti di monte e di valle più o meno inclinati) collegate da un elemento trasversale più slanciato, il quale crea lo spazio per una sorta di vano alloggiato nella mezzeria.

Il nome diga a contrafforti deriva appunto dalle spalle appena citate, che si comportano a tutti gli effetti come le strutture di rinforzo e contropinta adottate largamente nelle maestose cattedrali gotiche del XII secolo.

Il vano creato nel concio dalla parte verso monte può poi essere occupato dall'acqua stessa che, con il proprio peso, fornisce una ulteriore forza stabilizzante all'intero sistema.

Il punto di forza principale per questo tipo di sbarramenti consiste nell'economia di materiale impiegato: rispetto alle dighe massicce quelle alleggerite consentono generalmente un risparmio di calcestruzzo in volume del 30% circa. Inoltre un'opera a vani interni limita la presenza di sottopressioni e, data la struttura più leggera e snella, risente in misura minore degli effetti di ritiro del materiale. Tuttavia il calcolo statico delle spinte diventa sicuramente molto più complesso e soggetto a incertezze di maggiore entità. Inoltre, l'impiego di volumi ridotti di materie prime non sempre si riflette in un diretto ritorno economico. Infatti la sagomatura e la forma dei conci comportano una complicazione dell'iter realizzativo di costruzione e, visti i crescenti costi della manodopera specializzata, il

---

<sup>1</sup> I dati della diga Eleonora D'Arborea sono stati raccolti in parte dall'elenco dighe della Sardegna pubblicato dal RID (Registro Italiano Dighe), in parte dal Consorzio di Bonifica dell'Oristanese ([www.bonificaoristanese.it](http://www.bonificaoristanese.it)).

prezzo finale della struttura può lievitare fino a livelli paragonabili a quelli di una tipologia a gravità piena.

Per la realizzazione della diga Cantoniera sono stati impiegati 1100000 m<sup>3</sup> di calcestruzzo, suddivisi su 38 conci, ciascuno lungo 15 m e largo 4 al coronamento. Quest'ultimo è situato a 120 m s.l.m. mentre la quota di massimo invaso si trova a 118 m s.l.m. . Il franco di sicurezza che ne risulta è quindi pari a 2 m mentre la quota di massima regolazione è fissata in 116,5 m s.l.m. .

La diga Cantoniera è tuttora in fase di collaudo e quindi si trova nella fase di invaso sperimentale, con una quota massima autorizzata di 103,5 m s.l.m. che consente di invasare un volume utile di 430 Mm<sup>3</sup>.

Nella situazione di piena operatività il bacino di accumulo potrà invece contenere fino a 792,84 Mm<sup>3</sup> di acqua (di cui 745 Mm<sup>3</sup> costituiscono il volume di regolazione), corrispondenti a una superficie occupata dal Lago Omodeo di 29,37 km<sup>2</sup>. Quest'ultimo diventa così uno dei bacini artificiali più estesi e col maggiore invaso di tutta Europa.

L'acqua accumulata verrà utilizzata per scopi irrigui, idropotabili e industriali. Per questo motivo è presente un'opera di presa del diametro di 3,1 m per le utilizzazioni agricole e una più piccola, di soli 1,2 m , per l'approvvigionamento di acqua al potabilizzatore di Silì e a un nuovo impianto da costruirsi in prossimità della diga stessa.

A quota 66 m s.l.m. è anche presente una bocca di captazione rettangolare di 4 metri per 5 per la centrale idroelettrica Tirso 1 (la numero 2 è prevista più a valle, vicino allo sbarramento Pranu Antoni), avente una potenza nominale di 20 MW e una producibilità annua stimata in 50 GWh<sup>2</sup>.

Lo scarico di superficie dello sbarramento è stato realizzato rendendo tracimabili sei dei 38 conci della struttura a una quota di 111 m s.l.m. ; con il pelo libero alla quota di massimo invaso la portata sfiorata con le paratoie completamente abbattute è di 2800 m<sup>3</sup>/s.

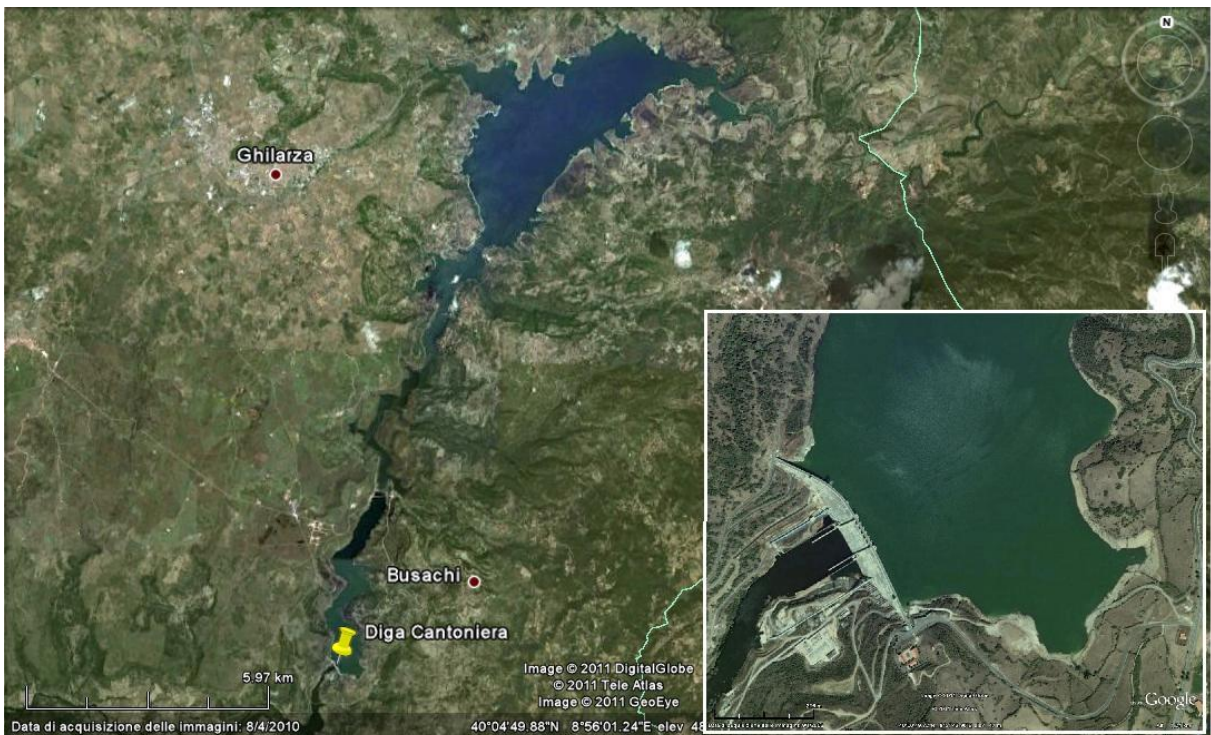
Sono presenti inoltre 2 scarichi di fondo (4,2 m di diametro ciascuno), per una portata massima di 365 m<sup>3</sup>/s indirizzata alla vasca di dissipazione immediatamente a valle della diga, e un unico scarico di esaurimento di 0,8 m di diametro.

---

<sup>2</sup> Fonte: ENEL



**Figura 3.3**  
La diga Cantoniera Eleonora D'Arborea.



**Figura 3.4**  
Immagine satellitare del Lago Omodeo. Nel riquadro a destra, un ingrandimento della diga Cantoniera.

## 3.2 Strumenti per il monitoraggio

La diga Cantoniera Eleonora D'Arborea dispone di una sofisticata e complessa rete di monitoraggio, che comprende tra l'altro piezometri, misuratori del livello nell'invaso, termometri, pendoli ed estensimetri.

Nello specifico sono stati installati 36 estensimetri a base lunga tipo rockmeters, 18 terne di estensimetri tradizionali per calcestruzzo, 122 misuratori di giunti monoassiali e 4 triassiali; i piezometri interni alla struttura sono 80 mentre il livello dell'invaso è tenuto sotto controllo da 3 strumenti misuratori; sono inoltre presenti 209 termometri per calcestruzzo, 20 per l'acqua e 4 per l'aria. A differenza della Genna Is Abis non sono stati utilizzati apparati per la collimazione.

L'impiego di piezometri associati ad una struttura in calcestruzzo ha un motivo ben preciso che consiste nella misura delle sottopressioni. Infatti esiste la possibilità che l'acqua si infiltri sotto il concio, esercitando una pressione che origina una forza instabilizzante diretta dal basso verso l'alto. Per questo motivo vanno predisposti dei dreni per l'abbattimento della piezometria e, per la misura e il controllo di quest'ultima, vengono impiegati gli 80 pozzi appena elencati.

Per quanto riguarda invece i pendoli si contano 14 strumenti dritti e 28 rovesci, per un totale di 14 conci monitorati. Ogni camera contiene infatti un pendolo dritto più 2 rovesci, di cui uno collocato nella parte inferiore del concio e l'altro in quella superiore.

Ciò significa che la rete di monitoraggio stessa prevede una certa ridondanza nelle misure, visto che gli spostamenti della parte più alta del concio vengono registrati sia dai coordinometri dritti che da quelli rovesci superiori.

Tuttavia in alcuni dei pendoli rovesci superiori sono stati riscontrati problemi che hanno provocato la soppressione e la dismissione dello strumento (conci 7, 20 e 24).

Tutti questi apparecchi sono precisi al centesimo di millimetro e sono localizzati tra i conci 7 e 31, con una densità più fitta nella parte centrale della diga (tra il numero 17 e il 20 vi è una camera dei pendoli per ciascuno).

La quota dell'ancora dei pendoli dritti è fissa e sempre uguale e pari a 95,05 m s.l.m. mentre varia la quota del coordinometro registratore e, di conseguenza, la lunghezza del filo, compresa tra 22 e 70 m. Per i rovesci invece non esiste alcuna regolarità ma le lunghezze dei fili sono nettamente inferiori e non superano mai i 35 m (12 m per i superiori).



Anche in questo caso, come per lo sbarramento sul Rio Cixerri, il sistema di riferimento cartesiano è basato su un asse trasversale allo sviluppo della diga, coincidente con la direzione monte-valle (MV), e uno perpendicolare ad esso, in direzione destra-sinistra (DS). Il verso degli assi però è invertito rispetto alla Genna Is Abis: gli spostamenti sono considerati positivi verso monte e verso destra, sempre osservando lo sbarramento da monte.

### 3.3 Modellizzazione dei pendoli e risultati ottenuti

La Cantoniera sul Fiume Tirso è fortemente monitorata, soprattutto dal punto di vista dei pendoli. È quindi stato possibile ripetere la stessa procedura di indagine modellistica già adottata per la diga sul Rio Cixerri, avendo però a disposizione una maggiore quantità di dati. Tuttavia, trattandosi di un'opera molto più recente, le serie storiche di spostamento sono senz'altro più brevi e, nella maggior parte dei casi, iniziano il primo luglio del 1999. Per pochi pendoli le registrazioni si hanno a partire dall'anno 2000 (conci numero 9, 11 e 24) mentre per soli due strumenti il campione è estremamente ridotto visto che la prima misura è datata 31/05/2007.

In tutti i casi la serie termina il 17 febbraio 2011.

Analizzando i dati a disposizione però, si è notata una certa anomalia nel comportamento dei pendoli. Infatti le registrazioni degli spostamenti presentavano il classico andamento ondulatorio già visto nella Genna Is Abis solo a partire dal primo maggio 2005; nel periodo precedente la serie storica appare priva di senso e completamente sconnessa dalla parte cronologicamente successiva, come se i due intervalli di tempo fossero entità indipendenti e a sé stanti. Un altro particolare che sembra dar ragione di questa anomalia è la totale assenza di dati proprio nei mesi che precedono il maggio 2005 ovvero marzo e aprile. Addirittura, per il concio 13 e il 15, non si hanno registrazioni dei pendoli prima del 2007.

Le ragioni di queste irregolarità non sono ancora note ma si potrebbe attribuirle a malfunzionamenti globali della rete di monitoraggio (guasti locali invece nel caso degli strumenti 13 e 15) o a una scorretta procedura di taratura e calibrazione dei pendoli della struttura.

Ad ogni modo, per garantire l'oggettività della procedura di modellazione ed evitare di ottenere risultati falsati dalla cattiva qualità dei dati iniziali, sono stati considerati solo gli spostamenti registrati dai pendoli a partire dal primo maggio 2005. I paragrafi successivi illustreranno quanto emerso dall'indagine, seguendo lo stesso schema espositivo adottato per la Genna Is Abis. Per necessità di sintesi i modelli analizzati saranno solamente due, il deterministico e il PoliMi, e saranno applicati ai conci 7, 13, 19, 31. Questa scelta è stata dettata da ragioni di rappresentatività della struttura: il concio 7 è infatti situato nella porzione rettilinea più corta dello sbarramento, vicina all'estremità nord; il 19 si trova esattamente a metà dello sviluppo della diga, e il 31 in prossimità dell'estremo sud. Il concio 13, a metà strada tra il 7 e il 19, è collocato invece al capo meridionale del raccordo curvilineo. A titolo di completezza si aggiunge anche una tabella con medie e deviazioni standard degli scarti degli altri conci della struttura relativamente al solo modello PoliMi. Per i grafici rispettivi si consulti l'appendice D.

### 3.3.1 Modello PoliMi

#### Concio 7

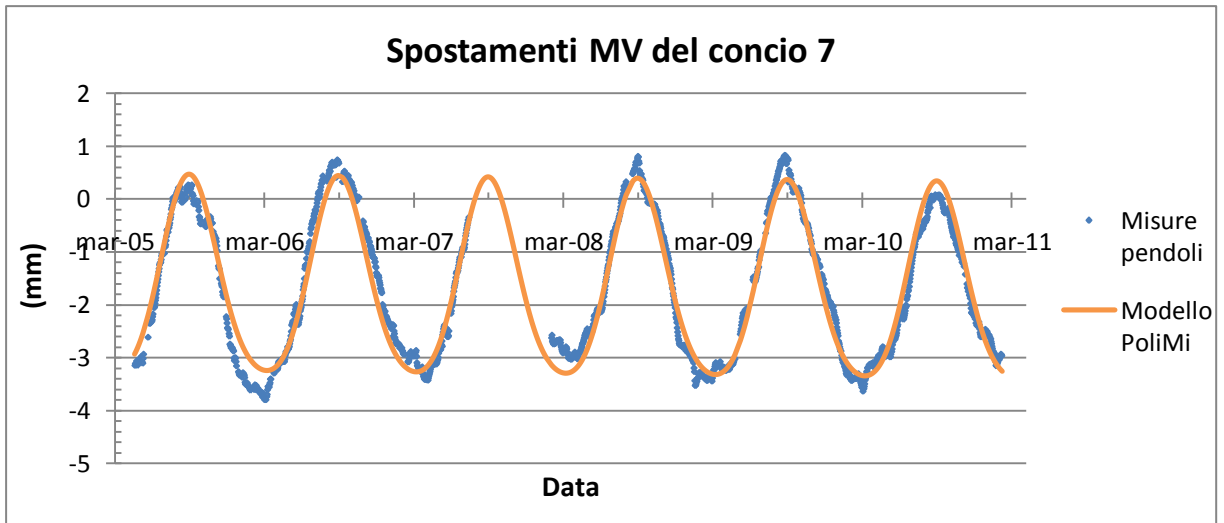


Figura 3.5  
Spostamenti in direzione MV del concio 7 – Modello PoliMi.

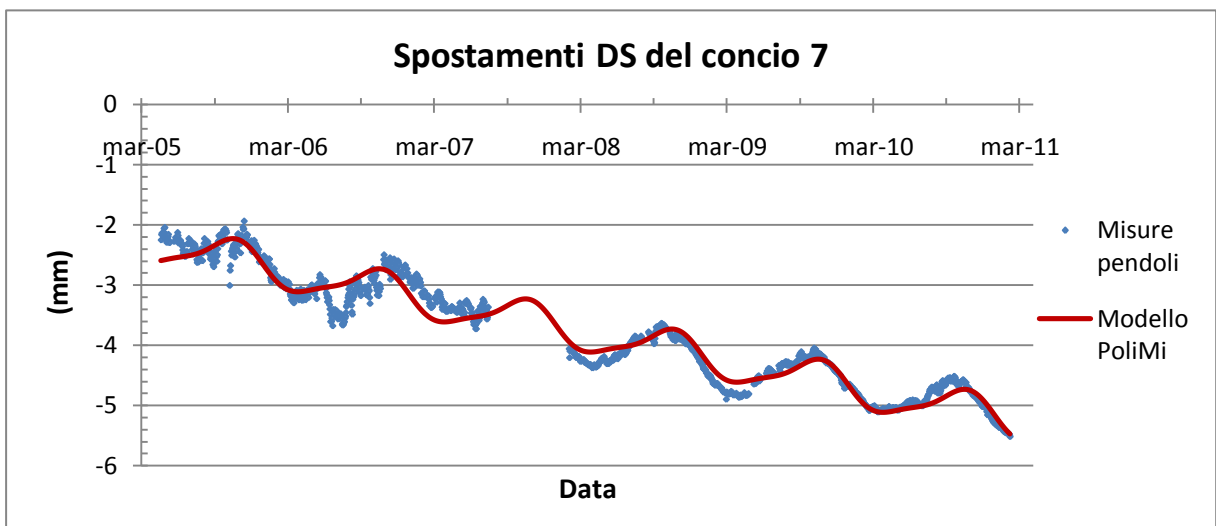
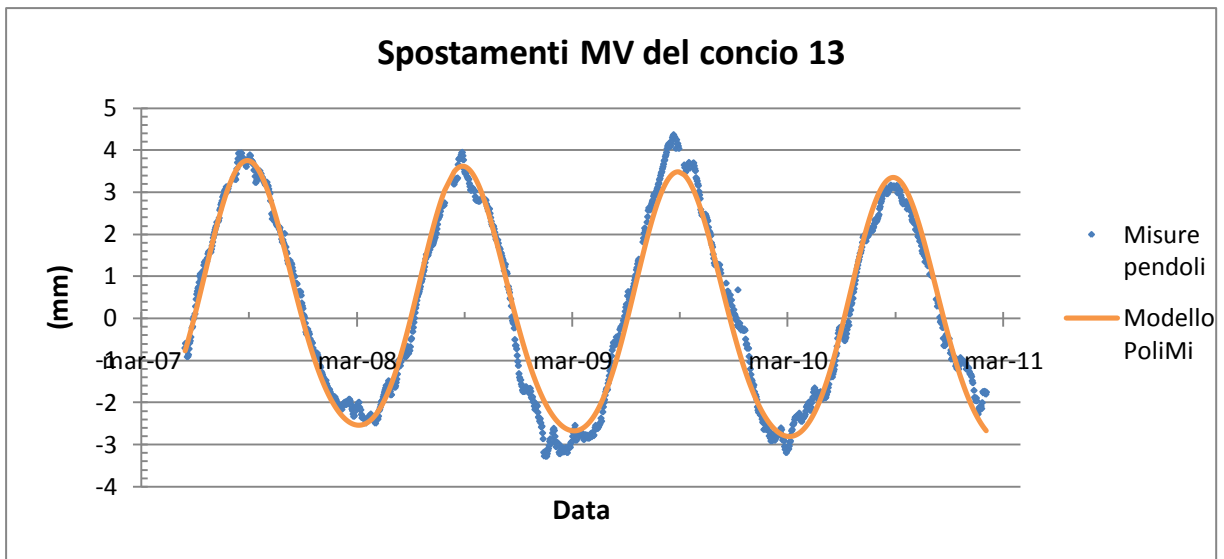


Figura 3.6  
Spostamenti in direzione DS del concio 7 – Modello PoliMi.

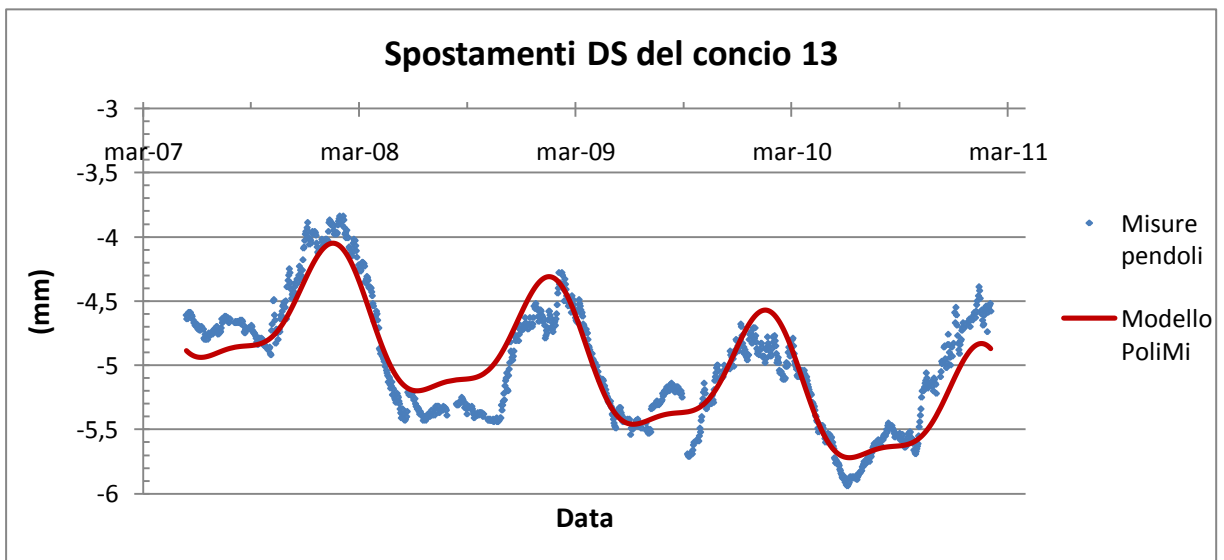
	Statistiche degli scarti (mm)	
	DIREZIONE MV	DIREZIONE DS
Media	0	0
Deviaz. standard	0,29	0,19
Valore massimo	0,71	0,80
Valore minimo	-0,60	-0,53
Conteggio	1704	1706

Tabella 3.1  
Statistiche degli scarti per il concio 7 – Modello PoliMi.

**Concio 13**



**Figura 3.7**  
Spostamenti in direzione MV del concio 13 – Modello PoliMi.

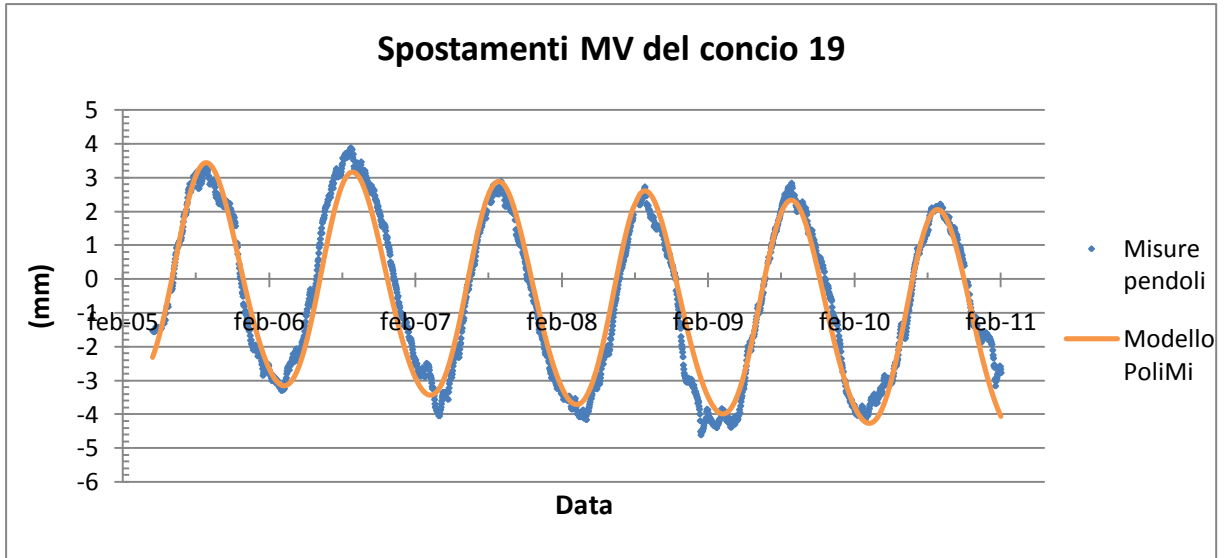


**Figura 3.8**  
Spostamenti in direzione DS del concio 13 – Modello PoliMi.

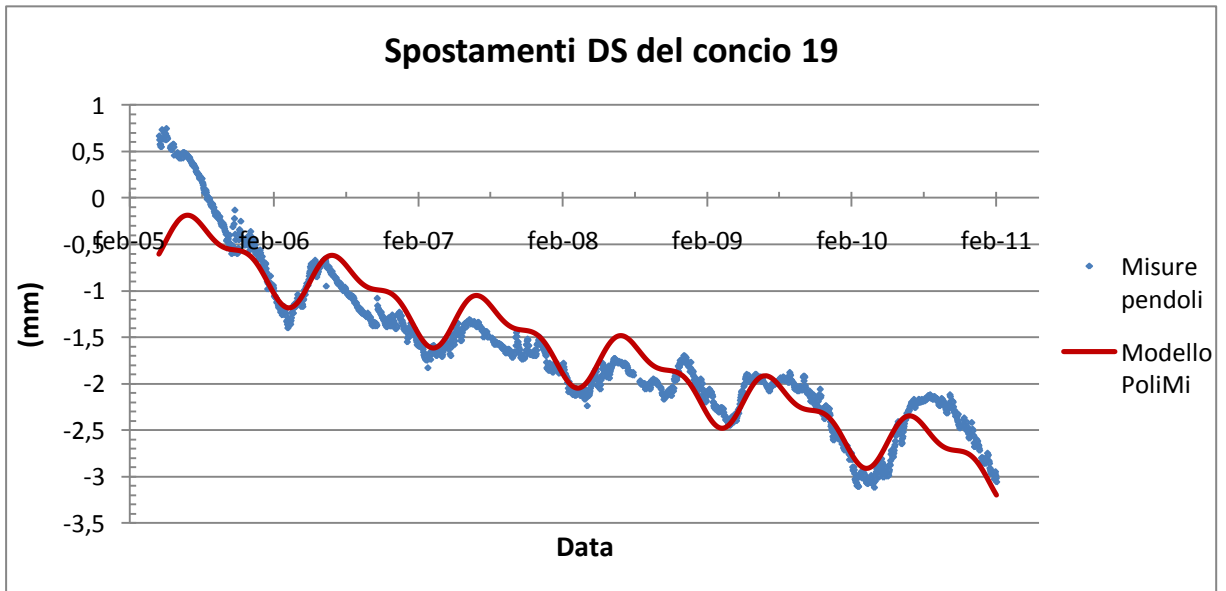
	Statistiche degli scarti (mm)	
	DIREZIONE MV	DIREZIONE DS
<b>Media</b>	0	0
<b>Deviaz. standard</b>	0,38	0,19
<b>Valore massimo</b>	1,29	0,50
<b>Valore minimo</b>	-1,37	-0,53
<b>Conteggio</b>	1263	1264

**Tabella 3.2**  
Statistiche degli scarti per il concio 13 – Modello PoliMi.

**Concio 19**



**Figura 3.9**  
Spostamenti in direzione MV del concio 19 – Modello PoliMi.

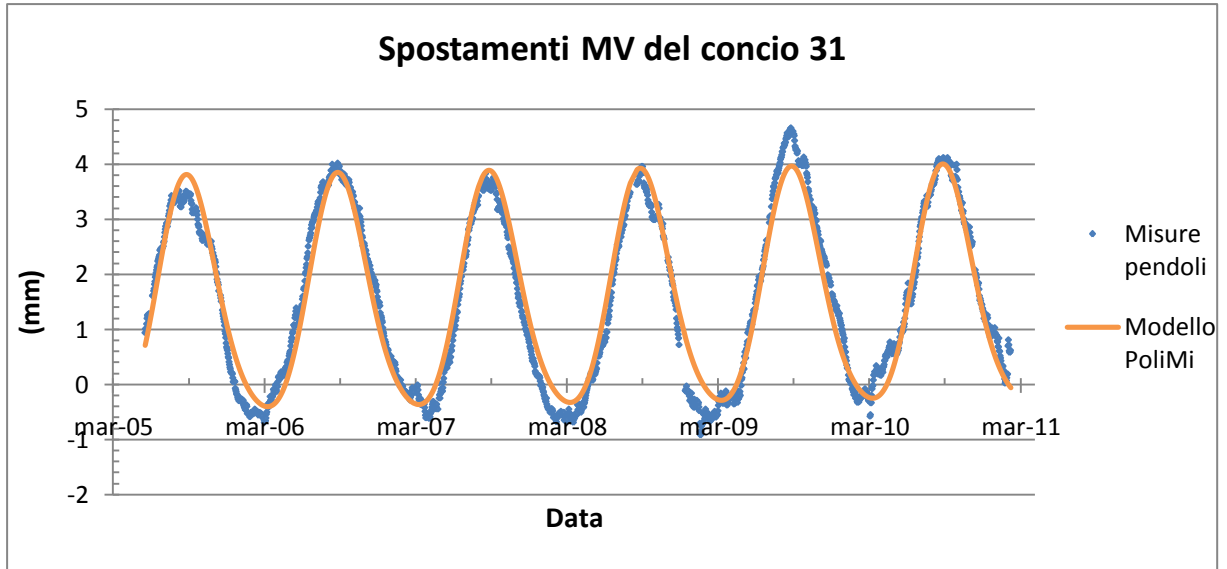


**Figura 3.10**  
Spostamenti in direzione DS del concio 19 – Modello PoliMi.

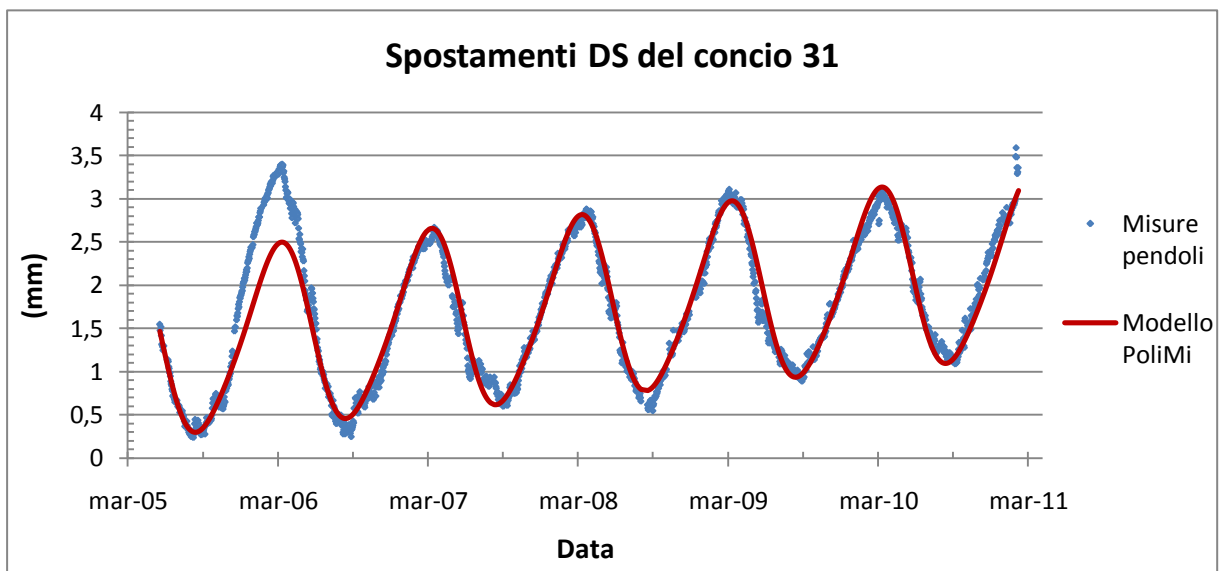
	Statistiche degli scarti (mm)	
	DIREZIONE MV	DIREZIONE DS
Media	0	0
Deviaz. standard	0,54	0,27
Valore massimo	1,74	0,42
Valore minimo	-1,41	-1,29
Conteggio	1989	1990

**Tabella 3.3**  
Statistiche degli scarti per il concio 19 – Modello PoliMi.

**Concio 31**



**Figura 3. 11**  
Spostamenti in direzione MV del concio 31 – Modello PoliMi.



**Figura 3. 12**  
Spostamenti in direzione DS del concio 31 – Modello PoliMi.

	Statistiche degli scarti (mm)	
	DIREZIONE MV	DIREZIONE DS
<b>Media</b>	0	0
<b>Deviaz. standard</b>	0,37	0,27
<b>Valore massimo</b>	1,00	0,97
<b>Valore minimo</b>	-1,25	-0,90
<b>Conteggio</b>	2004	2001

**Tabella 3. 4**  
Statistiche degli scarti per il concio 31 – Modello PoliMi.

**Altri conci**

	Statistiche degli scarti (mm)						DIREZIONE MV			
N° concio	9	11	15	17	18	20	22	24	27	29
Media	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dev. standard	0,38	0,44	0,39	0,52	0,47	0,50	0,43	0,48	0,50	0,44

**Tabella 3. 5**  
**Statistiche degli scarti in direzione MV per gli altri conci – Modello PoliMi.**

	Statistiche degli scarti (mm)						DIREZIONE DS			
N° concio	9	11	15	17	18	20	22	24	27	29
Media	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Dev. standard	0,28	0,25	0,18	0,19	0,33	0,50	0,71	0,40	0,30	0,19

**Tabella 3. 6**  
**Statistiche degli scarti in direzione DS per gli altri conci – Modello PoliMi.**

### 3.3.2 Modello Deterministico

#### Concio 7

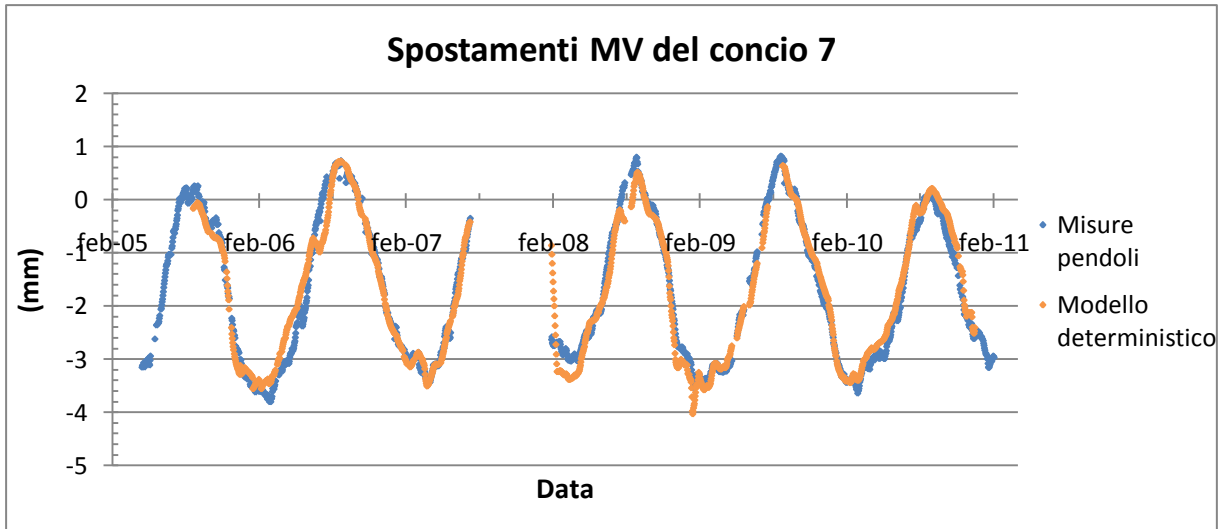


Figura 3. 13  
Spostamenti in direzione MV del concio 7 – Modello deterministico.

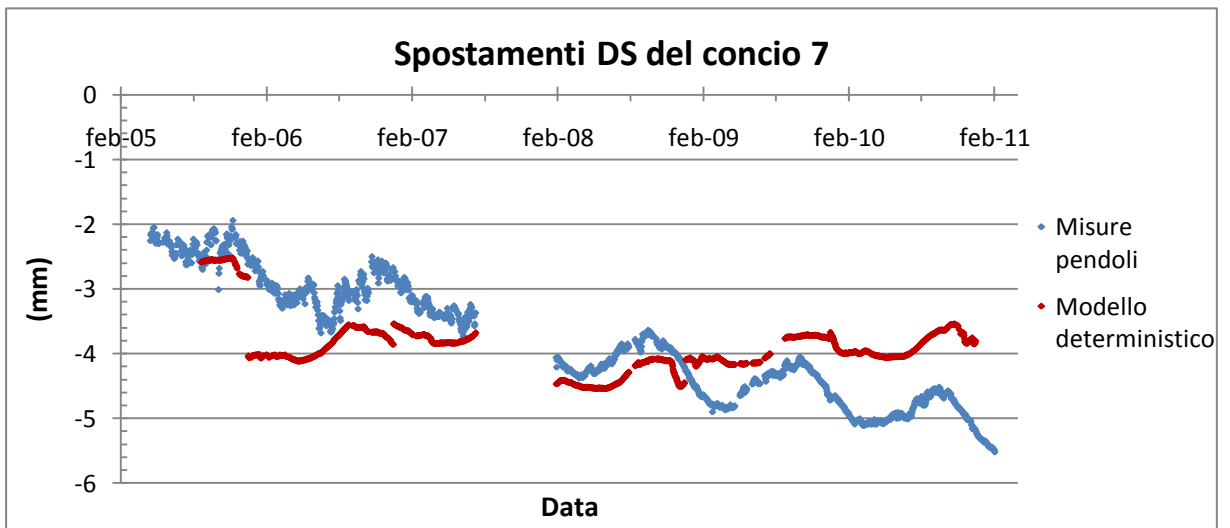


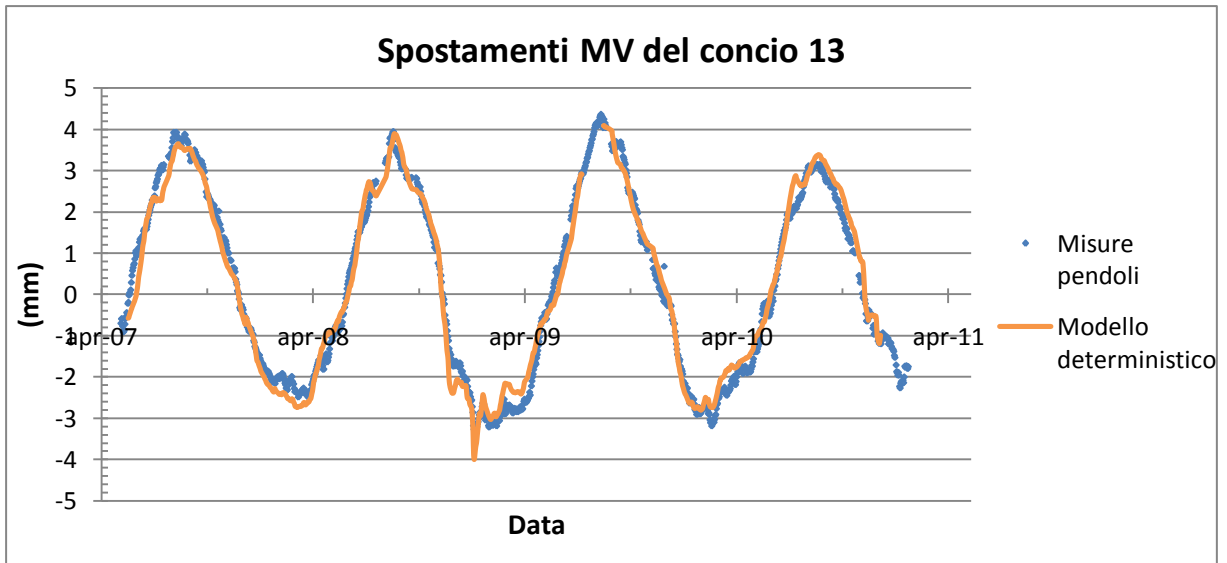
Figura 3. 14  
Spostamenti in direzione DS del concio 7 – Modello deterministico.

	Statistiche degli scarti (mm)	
	DIREZIONE MV	DIREZIONE DS
Media	0	0
Deviaz. standard	0,27	0,72
Valore massimo	1,77	1,40
Valore minimo	-0,93	-1,52
Conteggio	1518	1521

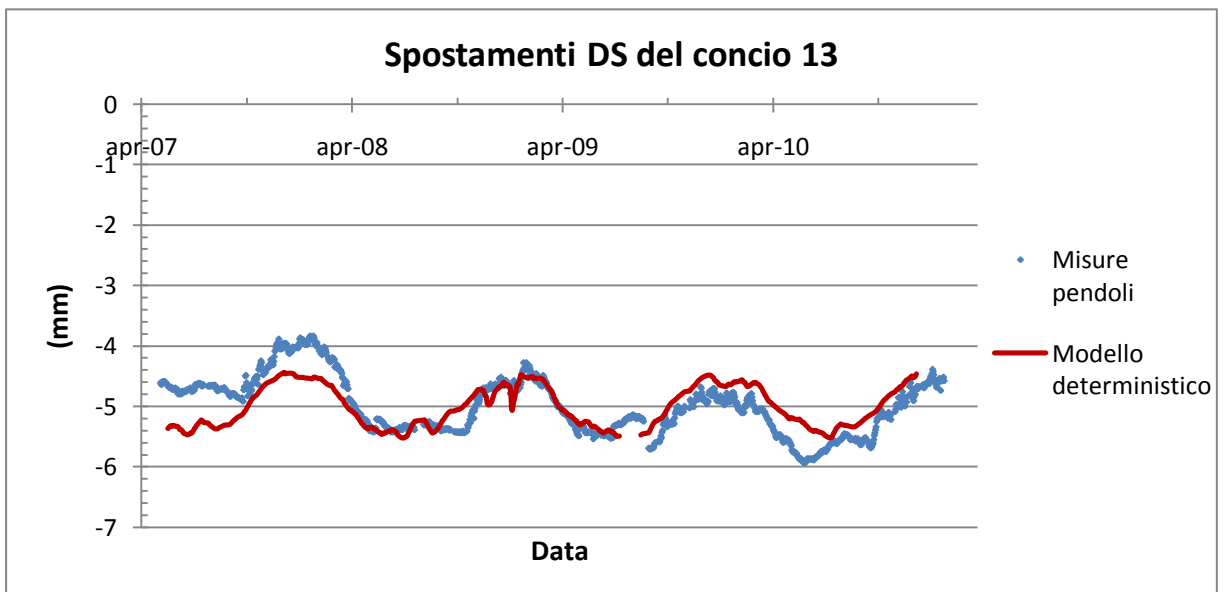
Tabella 3. 7  
Statistiche degli scarti per il concio 7 – Modello deterministico.



**Concio 13**



**Figura 3. 15**  
Spostamenti in direzione MV del concio 13 – Modello deterministico.

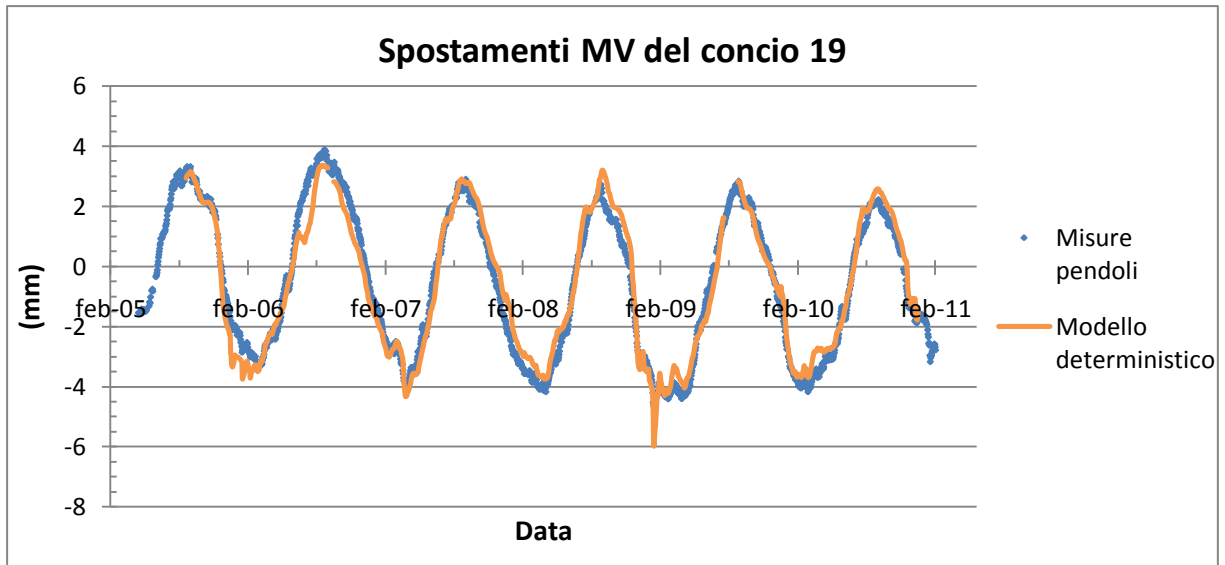


**Figura 3. 16**  
Spostamenti in direzione DS del concio 13 – Modello deterministico.

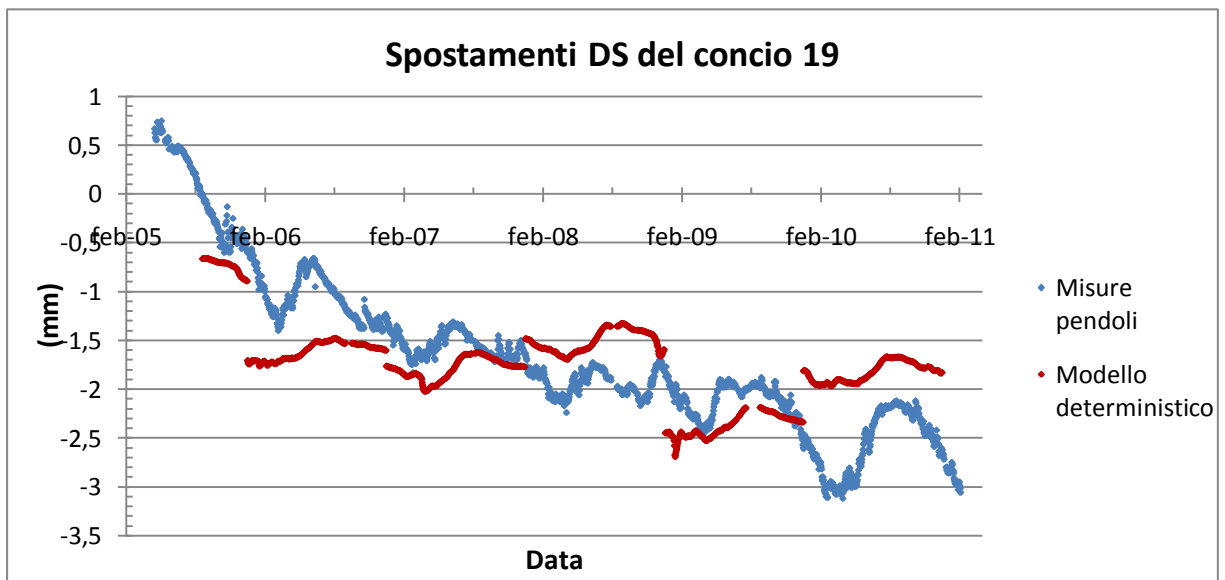
	Statistiche degli scarti (mm)	
	DIREZIONE MV	DIREZIONE DS
<b>Media</b>	0	0
<b>Deviaz. standard</b>	0,33	0,35
<b>Valore massimo</b>	0,79	0,67
<b>Valore minimo</b>	-1,08	-0,75
<b>Conteggio</b>	1173	1174

**Tabella 3. 8**  
Statistiche degli scarti per il concio 13 – Modello deterministico.

**Concio 19**



**Figura 3. 17**  
Spostamenti in direzione MV del concio 19 – Modello deterministico.

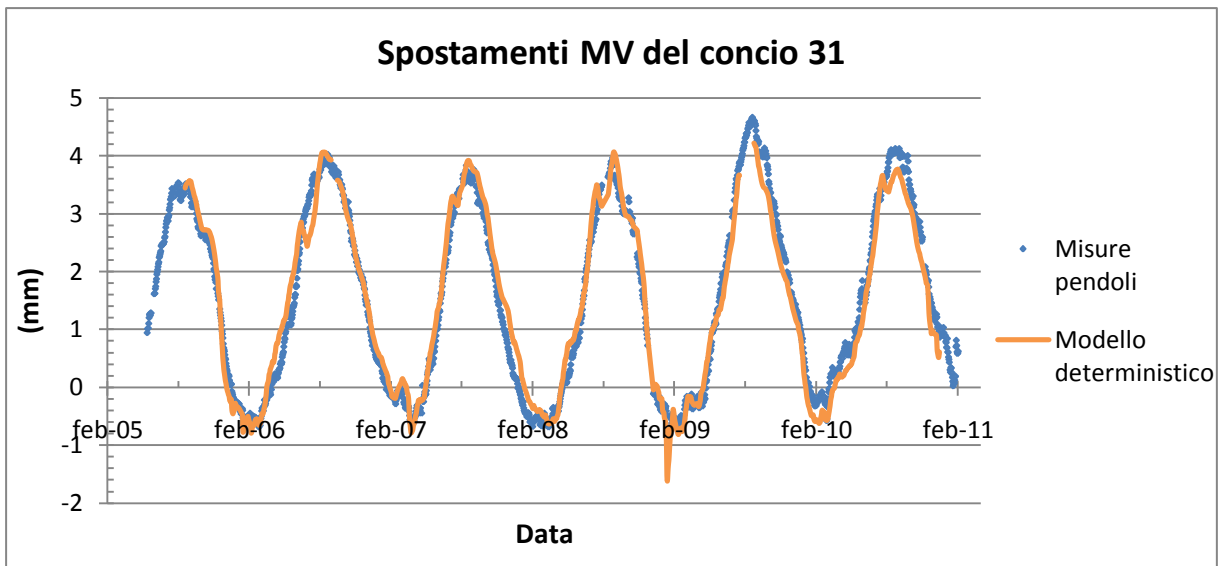


**Figura 3. 18**  
Spostamenti in direzione DS del concio 19 – Modello deterministico.

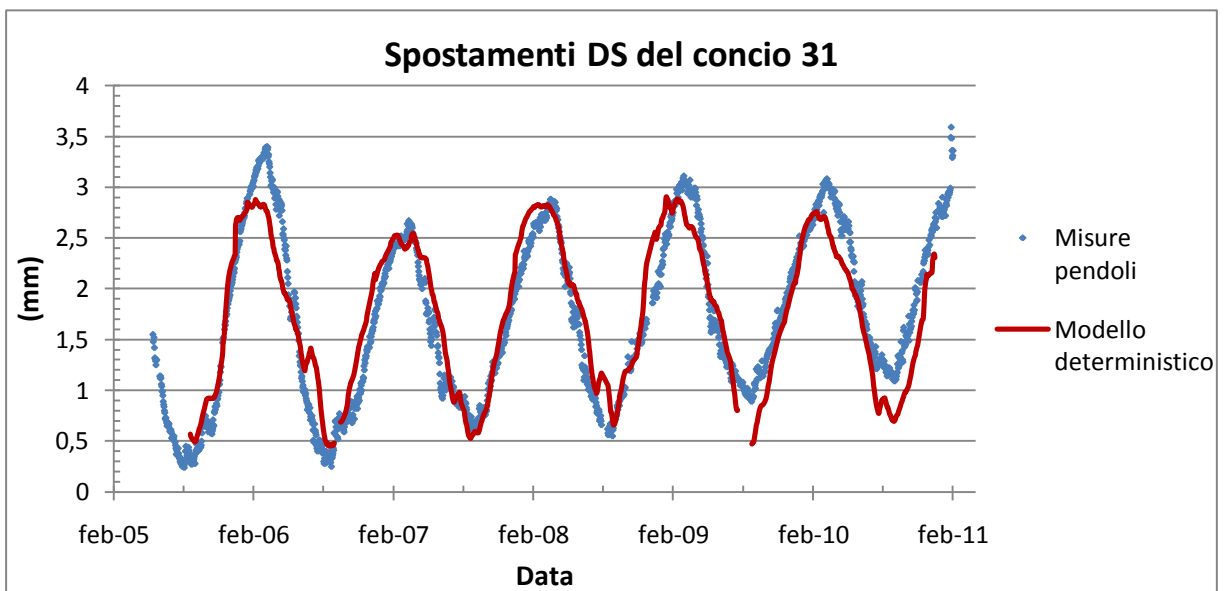
	Statistiche degli scarti (mm)	
	DIREZIONE MV	DIREZIONE DS
<b>Media</b>	0,02	0
<b>Deviaz. standard</b>	0,50	0,52
<b>Valore massimo</b>	1,08	1,20
<b>Valore minimo</b>	-1,75	-1,16
<b>Conteggio</b>	1788	1789

**Tabella 3. 9**  
Statistiche degli scarti per il concio 19 – Modello deterministico.

**Concio 31**



**Figura 3. 19**  
Spostamenti in direzione MV del concio 31 – Modello deterministico.



**Figura 3. 20**  
Spostamenti in direzione DS del concio 31 – Modello deterministico.

	Statistiche degli scarti (mm)	
	DIREZIONE MV	DIREZIONE DS
Media	0	0
Deviaz. standard	0,30	0,31
Valore massimo	0,71	0,83
Valore minimo	-0,82	-0,76
Conteggio	1753	1750

**Tabella 3. 10**  
Statistiche degli scarti per il concio 31 – Modello deterministico.

### 3.3.3 Confronto tra i risultati e considerazioni sui dati dei pendoli

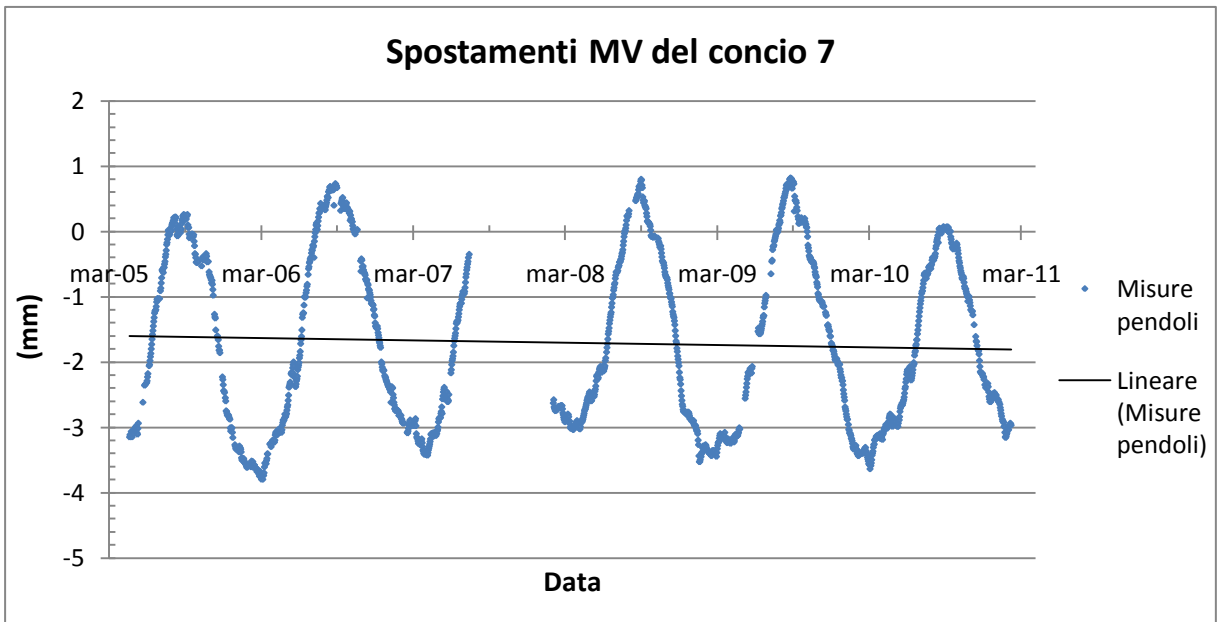
L'applicazione dei due modelli, PoliMi e deterministico, ha restituito nel complesso dei risultati soddisfacenti: le deviazioni standard molto basse, sempre inferiori al millimetro. Come per la Genna Is Abis il modello PoliMi sembra essere quello che meglio si adatta ai dati, con un andamento molto regolare e privo di punti angolosi. I risultati quantitativi sono molto simili ma in questa diga gli scarti quadratici medi della direzione monte-valle (analoga alla X dell'altra diga) sono addirittura dimezzati (tabelle dalla 3.1 alla 3.5). Il deterministico invece si presenta più irregolare e frastagliato del modello PoliMi, e risente soprattutto dei vuoti nelle serie storiche della temperatura media dell'acqua. Un esempio si ha nel concio 13, direzione MV, dove tra il primo agosto 2009 e il 28 dello stesso mese mancano le temperature medie dell'acqua (figura 3.15). Il livello dell'invaso invece è misurato con costanza e regolarità durante tutto il periodo di tempo considerato e non crea quindi problemi nell'esecuzione del modello. Osservando inoltre la direzione DS dei conci 7 e 19 si notano delle evidenti discontinuità esattamente in corrispondenza del passaggio da un anno all'altro (figura 3.14 e 3.18). Questa è un piccolo baco del modello stesso, dovuto al termine della temperatura media annua dell'aria, la quale può far sentire notevolmente la sua influenza sullo spostamento stimato.

Nel complesso, dalle serie storiche registrate dai pendoli, pare che il coronamento della diga si stia spostando lievemente verso valle. Questa tendenza è molto poco evidente nel concio 7, dove il trend, se realmente presente, è di pochi decimi di millimetro in 6 anni (figura 3.21). Ciò può essere dovuto alla particolare posizione del concio stesso, molto vicino alla spalla nord dello sbarramento e quindi teoricamente meglio vincolato al versante dell'invaso.

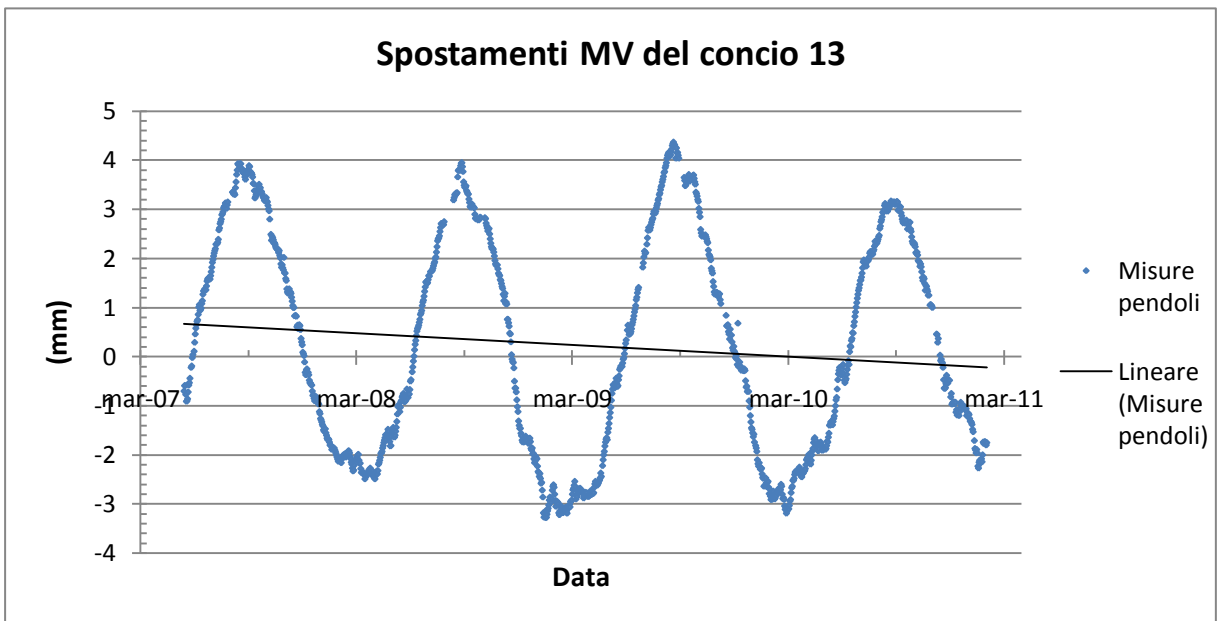
Nel numero 13 invece l'evoluzione è già più rapida e arriva a toccare il millimetro in 4 anni (figura 3.22), ma il valore massimo di spostamento lineare si osserva, come prevedibile, nel 19 (figura 3.23). Esso infatti è al centro della struttura e risente molto meno dell'effetto di ammorsamento dei pendii, con un movimento di 2 mm in 6 anni.

Per il concio 31 invece, praticamente fermo, vale lo stesso discorso fatto per il 7 (vedere figura 3.24).

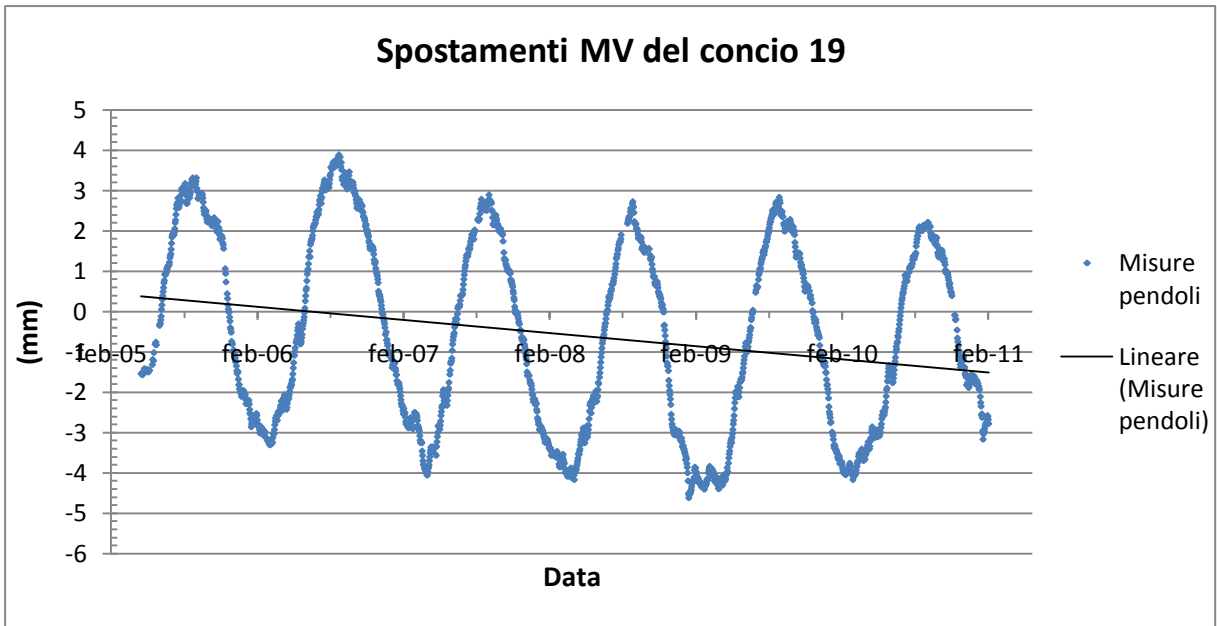
Anche la componente periodica dello spostamento pare segua questa teoria, con una ampiezza di 3-4 mm nei conci periferici (7 e 31), fino a crescere ai 6-7 mm di quelli centrali.



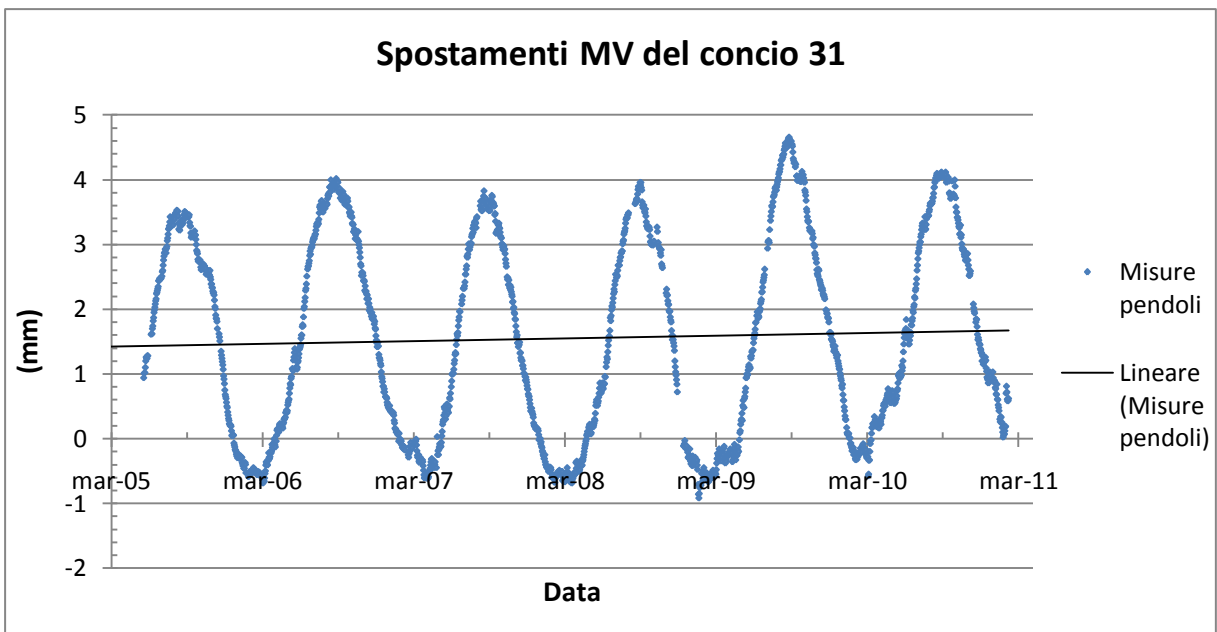
**Figura 3. 21**  
Serie storica di spostamento in direzione MV del concio 7. In nero è disegnata la linea di tendenza.



**Figura 3. 22**  
Serie storica di spostamento in direzione MV del concio 13.

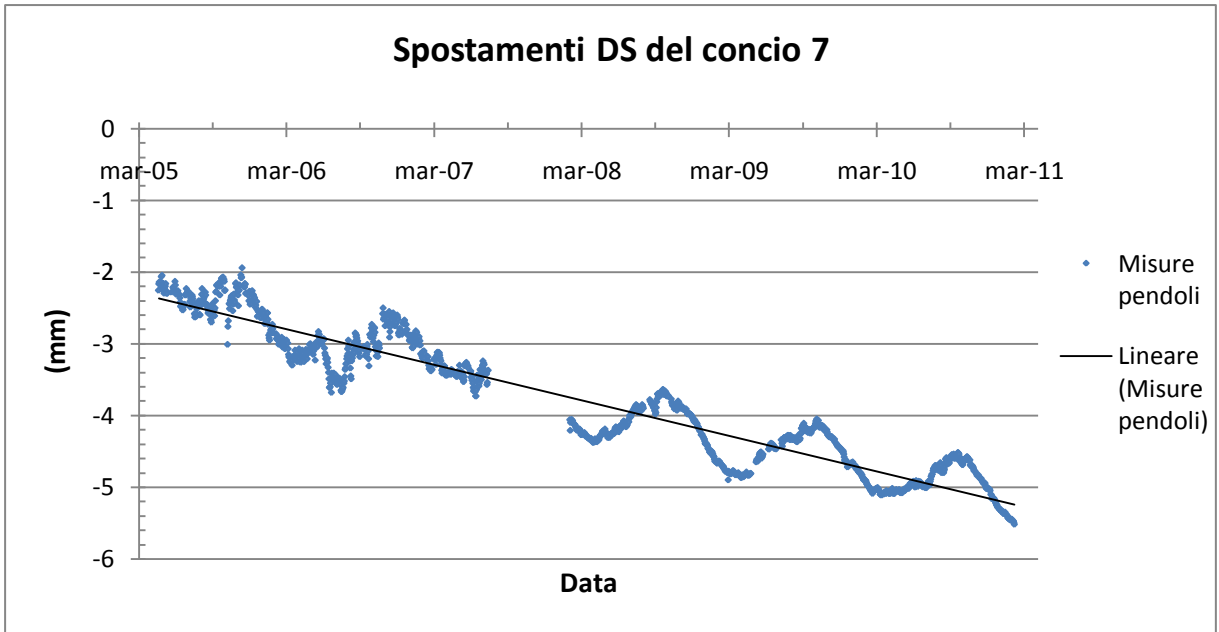


**Figura 3. 23**  
Serie storica di spostamento in direzione MV del concio 19.

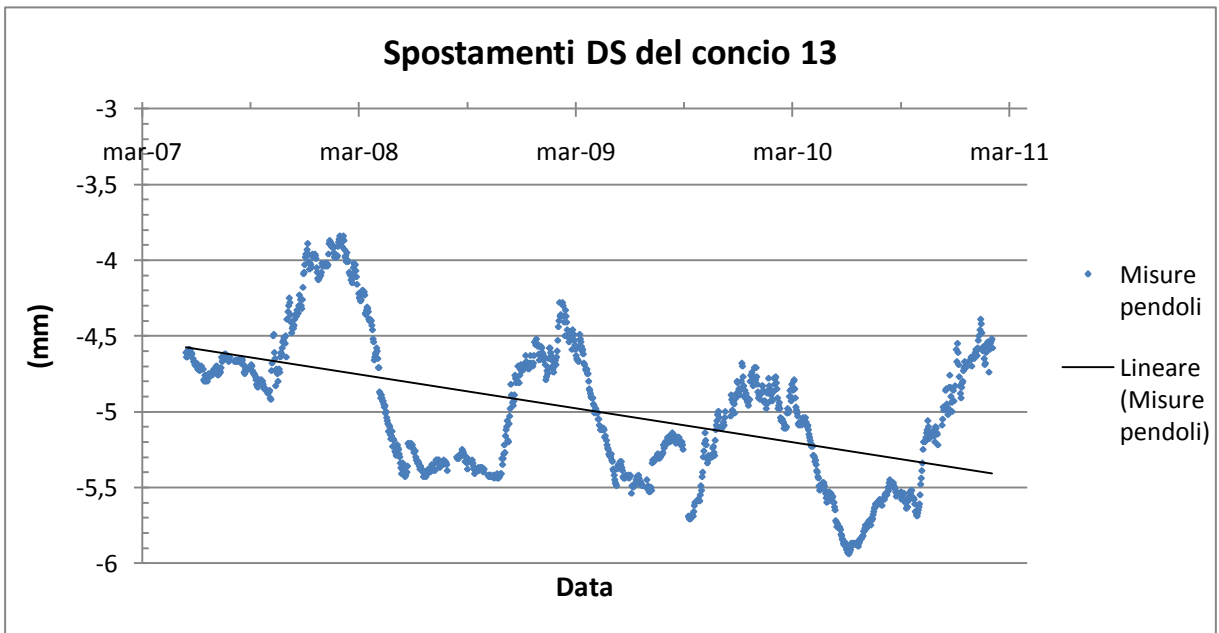


**Figura 3. 24**  
Serie storica di spostamento in direzione MV del concio 31.

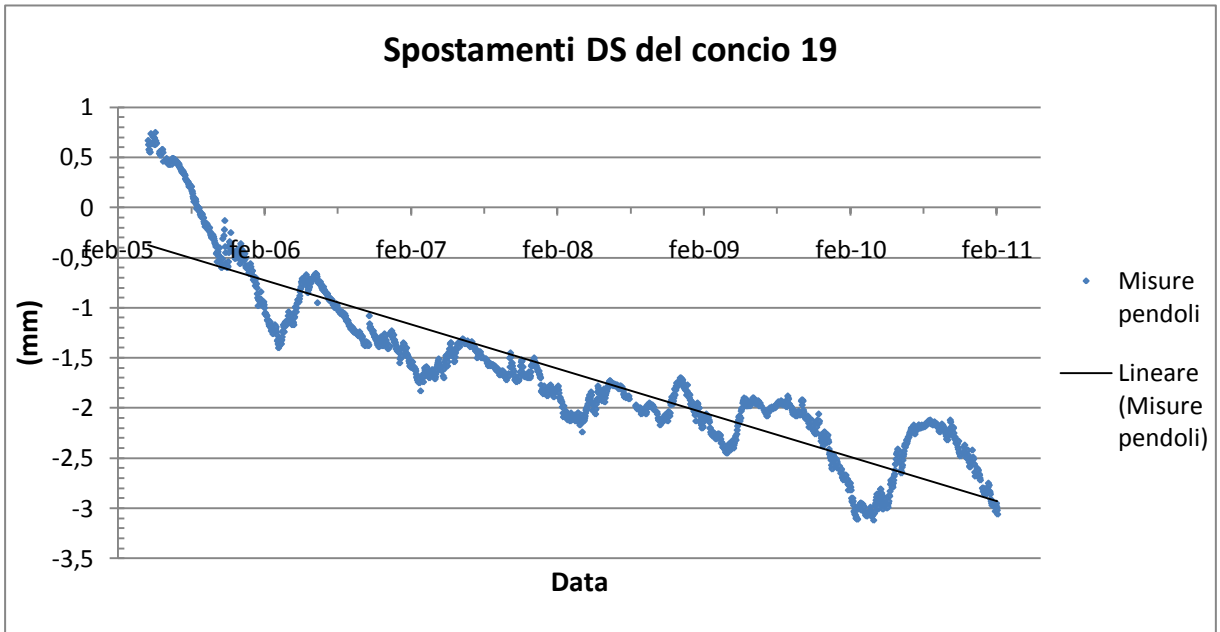
Nella direzione DS invece la situazione è meno chiara: il 7, il 13 e il 19 si muovono verso sinistra, ovvero nord-ovest, mentre il 31 in direzione opposta. Inoltre il concio con il trend più pronunciato è il 7 (3 mm in 6 anni), seguito dal 19 (2,5 mm in 6 anni) e poi dal 13 e 31 con un solo millimetro rispettivamente in 4 e 6 anni. La parte oscillatoria invece ha un'entità di circa un millimetro in tutti i conci, eccetto per il 31, dove assume valori anche di 3 mm.



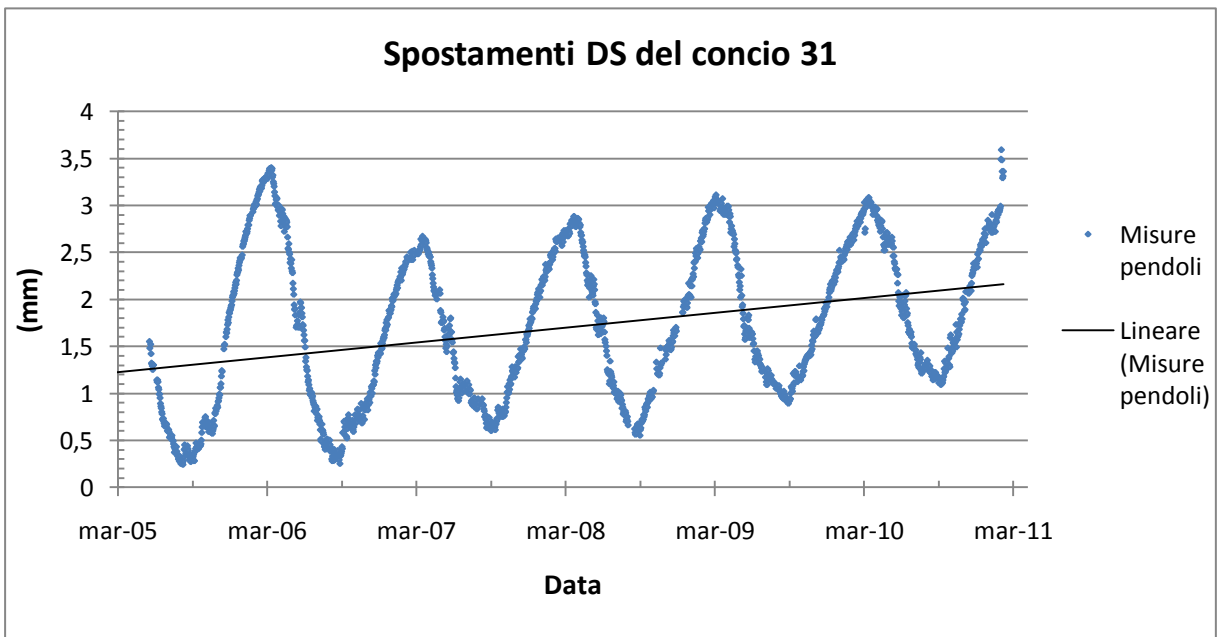
**Figura 3. 25**  
Serie storica di spostamento in direzione DS del concio 7. In nero è disegnata la linea di tendenza.



**Figura 3. 26**  
Serie storica di spostamento in direzione DS del concio 13.



**Figura 3. 27**  
Serie storica di spostamento in direzione DS del concio 19.



**Figura 3. 28**  
Serie storica di spostamento in direzione DS del concio 31.



La Cantoniera è dunque soggetta a spostamenti più rilevanti della Genna Is Abis (in quel caso si parlava di un paio di millimetri in 20 anni), come è logico che sia: la diga alleggerita è infatti meno massiccia di quella a gravità piena e tende a deformarsi di più. In ogni caso comunque si parla di movimenti limitati e tali da non destare preoccupazione.

### 3.3.4 Correlazione statistica tra variabili

Visto che la correttezza e la precisione della modellazione dipendono anche dalla scelta delle variabili adottate, si è deciso di eseguire anche per la Cantoniera l'analisi dei coefficienti di correlazione degli spostamenti al coronamento, sulla falsa riga di quanto visto nella diga sul Rio Cixerri. I risultati, contenuti nelle tabelle 3.11 e 3.12, sono pienamente concordanti con quelli ottenuti nella Genna Is Abis: in direzione X si nota una forte dipendenza dalla temperatura dell'acqua (soprattutto la  $T_{m\text{ acqua}}$ ), con coefficienti prossimi, o addirittura superiori, a 0,9. Anche la temperatura dell'aria si dimostra un fattore abbastanza influente, con coefficienti di circa 0,5 - 0,6, mentre l'escursione termica tra i due fluidi pare non essere di grande importanza nel condizionare i movimenti del concio.

Rispetto alla Genna Is Abis però assume notevole importanza la quota dell'invaso, il cui coefficiente di correlazione risulta molto prossimo a -0,8. Ciò è abbastanza prevedibile se si pensa che la diga Eleonora D'Arborea è a gravità alleggerita, e risente della spinta idrostatica dell'invaso più di quanto possa accadere in una struttura a conci pieni. Va fatta infine un'ultima precisazione riguardo il segno dei coefficienti di correlazione: esso, per la direzione X, è sempre contrario rispetto ai corrispondenti risultati della Genna Is Abis. Questo perché, nei due sistemi di riferimento adottati, gli assi longitudinali allo sviluppo degli sbarramenti sono rivolti in senso opposto, rendendo stavolta positivi gli spostamenti verso monte. Di conseguenza entrambi i casi studio concordano sulla tipologia di dipendenza (diretta piuttosto che inversa) esistente tra le variabili.

	Concio 7 MV	Concio 7 DS	Concio 13 MV	Concio 13 DS
Temperatura aria	0,587	0,250	0,526	-0,697
Temperatura acqua	0,838	0,112	0,815	-0,638
$\Delta T$ aria-acqua	-0,313	-0,189	-0,315	-0,070
Temperatura media acqua	0,891	0,139	0,880	-0,631
Quota invaso	-0,773	-0,170	-0,753	0,014

**Tabella 3. 11**  
Coefficienti di correlazione per i concii 7 e 13 tra le variabili considerate e gli spostamenti registrati dai pendoli.

	Concio 19 MV	Concio 19 DS	Concio 31 MV	Concio 31 DS
Temperatura aria	0,480	0,180	0,595	-0,608
Temperatura acqua	0,767	0,209	0,861	-0,824
$\Delta T$ aria-acqua	-0,343	-0,141	-0,272	0,212
Temperatura media acqua	0,832	0,216	0,911	-0,872
Quota invaso	-0,807	-0,095	-0,727	0,617

**Tabella 3. 12**  
Coefficienti di correlazione per i concii 19 e 31 tra le variabili considerate e gli spostamenti registrati dai pendoli.

Nella direzione Y invece le correlazioni sono tutte piuttosto deboli, tranne che per i concii 13 e 31, che invece risentono delle temperature dell'acqua e di quella dell'aria. L'altezza dell'invaso è rilevante solo per il concio 31.

### 3.3.5 Modellazione dello spostamento del coronamento

Tutte le indagini svolte fino a questo momento hanno analizzato gli spostamenti della diga servendosi delle serie storiche dei pendoli, considerando ogni concio come una unità a sé stante e indipendente: dato il campione di misure si applicava il modello indipendentemente e separatamente dal comportamento seguito dagli altri conci. Il passo successivo che si vuole intraprendere è invece valutare come si comporta il coronamento, ovvero l'insieme di tutti i conci della struttura. La procedura più intuitiva e forse più semplice è quella di scegliere casualmente diverse date comprese nel periodo di osservazione della struttura analizzando gli spostamenti di tutti i conci. Visto che dall'analisi dei pendoli sono emersi dei movimenti a periodo annuale si potrebbe optare per un campionamento ogni 2-3 mesi o più. A questo punto, ad ogni data prefissata, si associa un vettore con le misure registrate dai pendoli per tutti i conci e si cerca di individuare un modello di comportamento degli spostamenti al coronamento che sia indipendente dal tempo, ovvero che possa andare bene anche per i vettori ricavati in altre date.

Ci si può ragionevolmente attendere che i conci periferici, più vicini e quindi meglio ancorati al versante, subiscano uno spostamento minore di quelli centrali; ciò potrebbe ad esempio essere modellizzato con una semplice funzione parabolica di equazione:

$$y = ax^2 + bx + c$$

Dove  $y$  rappresenta lo spostamento e  $x$  il parametro che identifica il concio cui la  $y$  si riferisce. Può ad esempio corrispondere al numero del concio, se questi sono (come in effetti sono) stati numerati con sequenzialità da una estremità all'altra, oppure coincidere con la sua posizione secondo una coordinata curvilinea che segue lo sviluppo della diga.

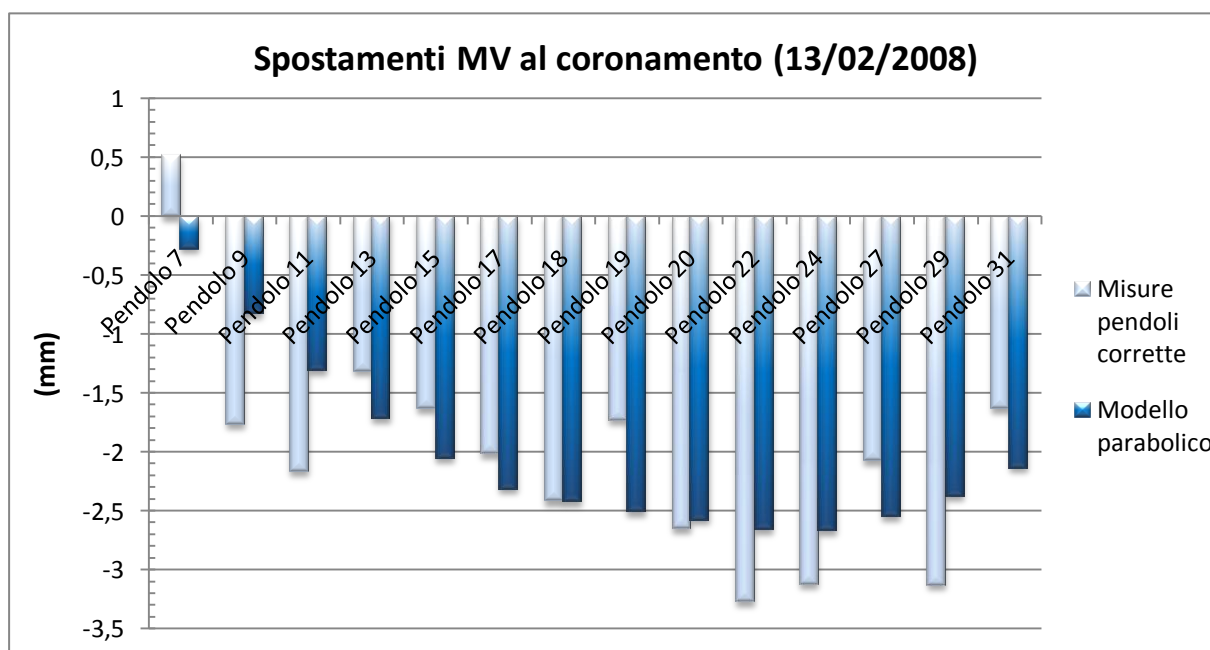
Una procedura simile è ben applicabile allo sbarramento sul Tirso in quanto si dispone delle misure di moltissimi conci; la stessa cosa non si può dire per la Genna Is Abis, dove sono presenti solo due serie storiche, corrispondenti a quelle dei due pendoli installati.

Il problema della Cantoniera però è che gli spostamenti di due conci diversi non sono tra loro confrontabili in quanto è sconosciuto lo zero dello strumento, ovvero il valore che esso indicherebbe in totale assenza di spostamento. Esso potrebbe teoricamente coincidere con la prima misura in assoluto della serie storica, ma già in questo capitolo era emersa la completa inaffidabilità dei dati precedenti al maggio 2005. Si può provare allora ad utilizzare,

come zero, il primo dato disponibile a partire da quella data e sottrarlo alle misure reali dei pendoli. Alla nuova serie normalizzata si applica successivamente il modello parabolico, calibrandolo mediante regressione ai minimi quadrati. Al parametro  $x$  corrisponde il numero del concio.

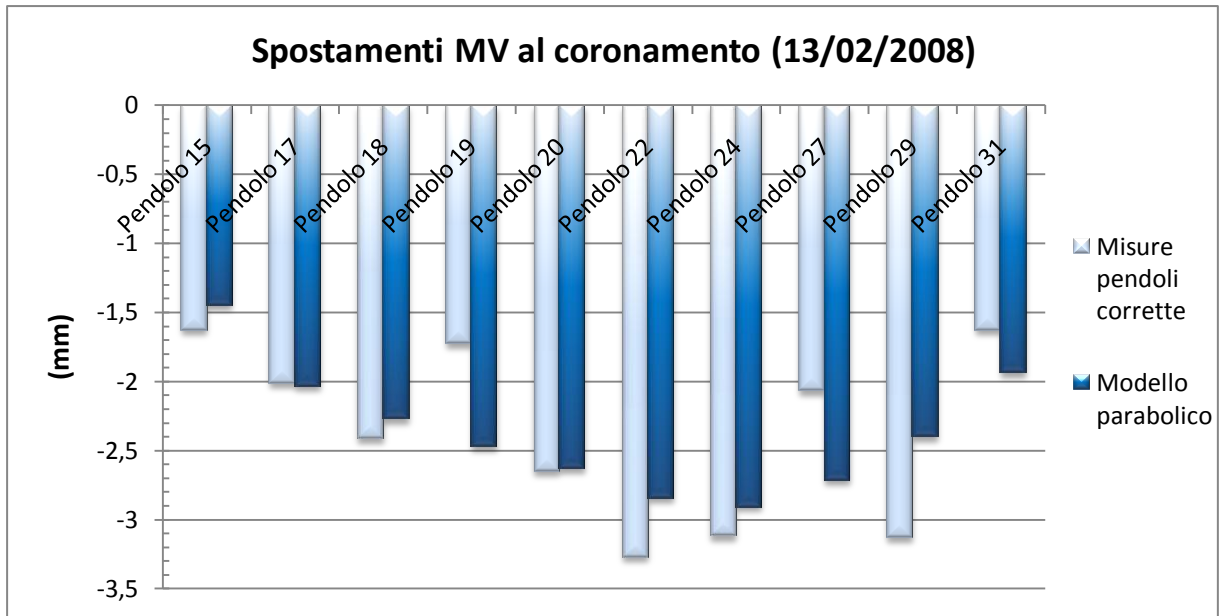
Si riportano di seguito i risultati ottenuti per il 13 febbraio 2008. Per entrambi la modellazione è stata eseguita, oltre che per l'intero coronamento, anche per la sola parte di sbarramento compresa tra i conci 15 e 31, ovvero il tratto rettilineo più lungo della diga. Nel primo caso la deviazione standard degli scarti rispetto alle misure reali è stata di 0,61 mm mentre nell'altro di 0,46 mm. La stessa procedura è stata ripetuta sui dati del 2 giugno 2008 fornendo uno scarto quadratico medio di 0,72 mm per il modello con tutti i conci, e di 0,61 mm per l'altro.

Tutto sommato il modello si dimostra quindi abbastanza valido per la descrizione del fenomeno e mostra anche una semplicità di applicazione e calcolo non indifferente.



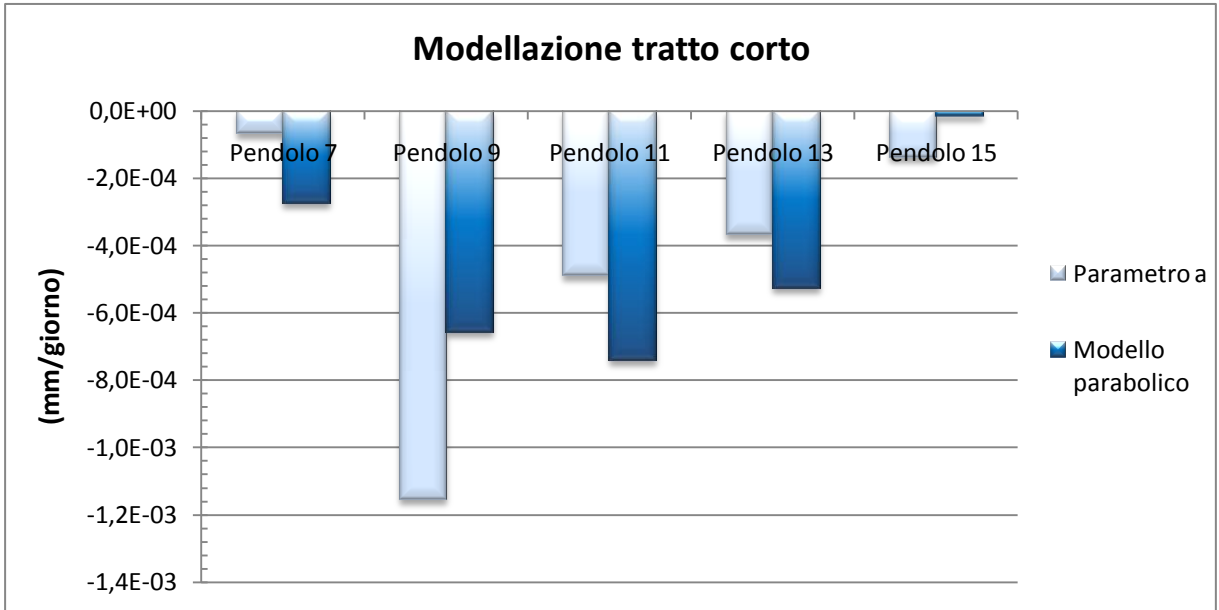
**Figura 3. 29**

**Le barre chiare mostrano le misure di spostamento registrate dai pendoli per il giorno 13/02/2008. I dati sono stati depurati dall'ipotetico zero strumentale. Le barre scure a fianco rappresentano la stima del modello parabolico applicato all'intero coronamento.**

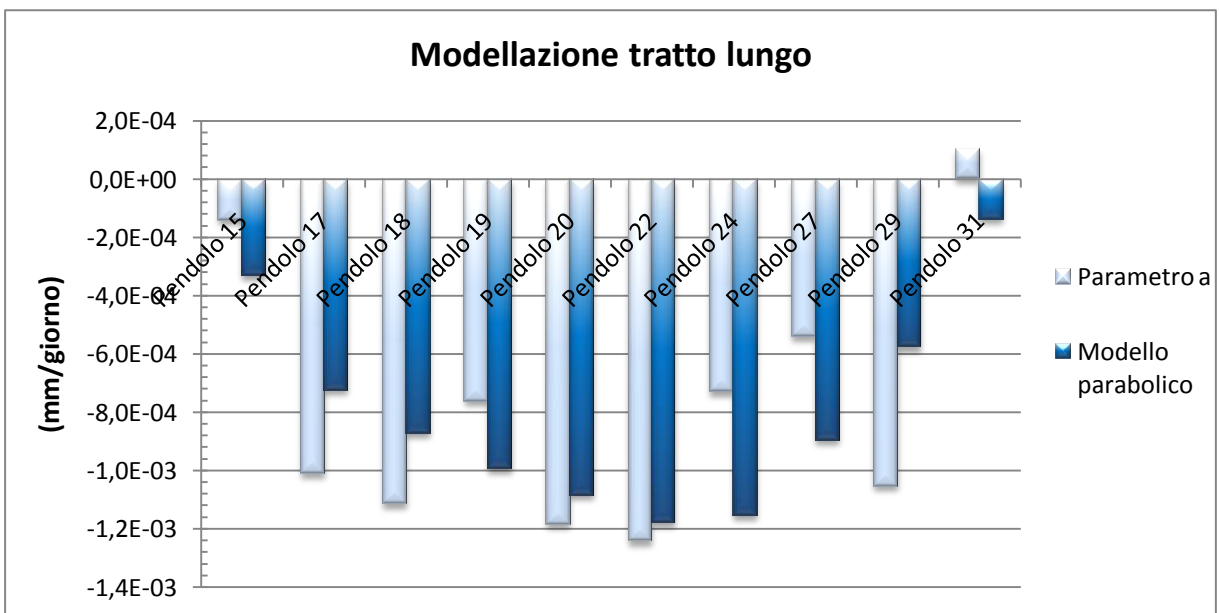


**Figura 3. 30**  
**Dati depurati di spostamento ai pendoli per il giorno 13/02/2008 messi a confronto con la stima del modello parabolico. Quest'ultimo è applicato solo alla parte rettilinea più lunga del coronamento.**

Successivamente si è pensato di studiare, dal punto di vista modellistico, la sola componente irreversibile di spostamento, ovvero quella identificata dall'evoluzione lineare di movimento verso valle. Per tale scopo è stato necessario rifarsi ai risultati del modello PoliMi, prendendone in considerazione il parametro **a**, ovvero il coefficiente angolare della retta che esprime il trend lineare. In questo caso si dispone di un solo dato per ogni concio dal momento che **a** è sempre costante durante tutta la serie storica e quindi è indipendente dal tempo. Si procede quindi alla modellizzazione del parametro sempre secondo l'espressione parabolica, tenendo ben presente che ora non si ha più **a** che fare con una lunghezza ma con una velocità di spostamento. I due tratti rettilinei della diga (dal concio 7 al 15 e dal 15 al 31) sono stati analizzati separatamente poiché sembra che **a** si comporti in maniera diversa nelle due situazioni.



**Figura 3. 31**  
Stima del parametro  $a$  con il modello parabolico per il tratto rettilineo corto della diga.



**Figura 3. 32**  
Stima del parametro  $a$  con il modello parabolico per il tratto rettilineo lungo della diga.

Ora la deviazione standard degli scarti vale 0,000314 mm/giorno per il tratto corto e 0,000373 mm/giorno per quello lungo, ovvero rispettivamente 0,115 mm/anno e 0,136 mm/anno.

L'esito del lavoro è ancora una volta abbastanza confortante.

I grafici inoltre sono in grado di fornire alcune utili informazioni sul comportamento delle varie parti della diga. In effetti, se si osserva il concio 29 si nota come il modello parabolico

tenda a sottostimare in maniera abbastanza accentuata sia la misura del pendolo corretta, sia soprattutto il parametro  $a$ . Nel tratto rettilineo corto la stessa cosa pare accadere al concio 9. Visti i buoni risultati generali del modello è abbastanza improbabile che queste discrepanze locali siano un sintomo della cattiva adattabilità dell'espressione parabolica. È quindi più facile che, in corrispondenza dei conci segnalati, vi siano delle situazioni particolari che possono accentuare il movimento della struttura verso valle.

Infatti il modello parabolico descrive abbastanza bene, seppure con delle semplificazioni, la deformata di una trave a doppio incastro soggetta ad uno sforzo di taglio distribuito e uniforme.

La situazione appena descritta tuttavia è da considerarsi ideale, e ipotizza pertanto che gli incastri siano perfetti, cioè non soggetti ad alcun fenomeno di cedevolezza.

Nelle strutture reali questa ipotesi non è sempre verificata, soprattutto se le forze che l'opera deve contrastare sono ingenti, come accade per le dighe di ritenuta. Inoltre la suddivisione in conci fa sì che l'ipotetica trave ideale sia in realtà strutturata in più parti unite tra loro con incastri, introducendo così ulteriori vincoli suscettibili di cedimento (sia rotazionale che traslazionale). È quindi possibile che i conci 9 e 29 subiscano un movimento più accentuato a causa di una deformazione maggiore dei giunti di tenuta, magari per una diminuzione di rigidità nel materiale di riempimento. È altresì ragionevole pensare a fenomeni localizzati di maturazione, assestamento o ritiro del calcestruzzo.

Infine, per i vari conci, va anche considerato, oltre che lo sviluppo in pianta, anche quello in altezza. Ciò li rende simili a travi incastrate alla base e soggette, ancora una volta, a taglio. Anche in questo caso il vincolo non è ideale e quindi il rilevato può traslare e ruotare rispetto alla fondazione, magari per fenomeni di consolidazione del terreno o per presenza di lenti di materiale più deformabile.

L'insieme di tutti i fenomeni elencati può quindi servire a spiegare il comportamento anomalo dei conci 9 e 29, e in generale di tutti quelli che si discostano abbastanza dal modello parabolico.

# CONCLUSIONI E PROSPETTIVE FUTURE

## 4.1 Conclusioni

Nei capitoli precedenti sono state presentate le serie temporali di spostamento registrate dai pendoli della diga Genna Is Abis sul Rio Cixerri e della Cantoniera Eleonora D'Arborea sul Fiume Tirso.

Tali misure sono poi state analizzate dal punto di vista qualitativo, al fine di individuare eventuali lacune o incongruenze dovute presumibilmente a guasti o starature degli strumenti, e successivamente l'indagine è proseguita in una direzione più strettamente modellistica. L'individuazione di una valida espressione analitica che consenta di ripercorrere i movimenti dei vari conci ha inoltre aperto la strada ad approfondimenti specifici e mirati al caso in esame, come ad esempio il test T sulle medie o lo studio degli spostamenti dell'intero coronamento.

In generale le registrazioni di spostamento della diga sul Cixerri sono risultate di buona qualità complessiva, con una serie storica abbastanza completa ed estesa nel tempo. Se si escludono infatti le misure precedenti al 1992, piuttosto frammentarie e sporadiche, si arriva a disporre di un campione di dati a cadenza mensile che si estende fino all'ottobre 2010, con una precisione soddisfacente che raggiunge i due centesimi di millimetro. Queste caratteristiche si riferiscono ai pendoli di tipo ottico, poiché i coordinometri automatici si sono rivelati più imprecisi e poco affidabili.



Per quanto riguarda il monitoraggio delle altre grandezze, quota dell'invaso e temperatura dell'aria sono pressoché assenti per i primi anni, ma dopo il 1993 sono stati registrati quasi tutti i giorni. Una spiegazione logica di tale lacuna è che la diga venne completata solo nel 1992; l'invaso non poteva quindi essere riempito fino a quella data.

Discorso diverso va fatto invece per le temperature dell'acqua, disponibili solo dal 1996 in poi.

Quel che emerge dalle serie storiche dei pendoli evidenzia uno spostamento irreversibile della diga verso valle, leggermente più accentuato nel concio 5 rispetto al 43/9. In entrambi i casi comunque si parla di valori compresi tra 1,8 e 2,5 mm in 20 anni di osservazione. La componente oscillatoria invece determina spostamenti della struttura di ampiezza pari a circa 5 mm per il concio 5 e 6-7 mm per l'altro.

In direzione Y i valori sono molto più contenuti, e mostrano una tendenza al movimento verso nord-ovest per il concio 43/9, in direzione opposta per l'altro. Nel primo caso la velocità di spostamento è pari a 3 mm in 20 anni, mentre nel secondo vale 1 mm. L'ampiezza delle oscillazioni periodiche invece si attesta sempre sul millimetro.

In entrambe le direzioni gli spostamenti risultano largamente ammissibili e tollerabili dalla struttura.

Nella parte modellistica sono poi stati proposti vari modelli, per cercare di capire quale fosse il migliore: per la classe dei predittivi si è scelto di impiegare il modello PoliMi, per gli ibridi il De Sortis - Paoliani e per i fisicamente basati il Carosio – Dupraz e quello denominato deterministico.

Dal confronto tra i grafici e dalle statistiche sugli scarti si può di buon grado scartare il Carosio – Dupraz: il modello segue malamente le registrazioni dei pendoli e, in corrispondenza dei massimi e dei minimi relativi, presenta inaspettate e frequenti inversioni di tendenza, che generano indesiderati punti angolosi. Come ulteriore difetto di questa formulazione va inoltre considerata l'assenza di un trend lineare. La curva infatti presenta sempre un andamento oscillatorio su base annua ma non tiene conto degli spostamenti irreversibili sul lungo periodo. Quanto appena sostenuto viene confermato quantitativamente dalle deviazioni standard degli scarti, mai inferiori al millimetro in direzione X e superiori di almeno 0,1 mm in Y rispetto alle altre stime. Ciò accade perché il Carosio – Dupraz nasce specificatamente per essere applicato su dighe ad arco. L'impiego sulla Genna Is Abis, che presenta una struttura a gravità massiccia, è una forzatura che esula dalle sue capacità e non ne rispetta le ipotesi base.

Il De Sortis – Paoliani e il PoliMi invece si dimostrano modelli affidabili e robusti: la componente oscillante è ben ricostruita ed anche la crescita lineare viene tracciata con precisione. Il grafico è molto regolare, privo di sbavature o salti, e segue accuratamente il campione di misure dei pendoli. Le deviazioni standard sono sempre molto contenute e si aggirano intorno al mezzo millimetro nella direzione X del concio 5, mentre nel 43/9 si avvicinano a 0,7 mm, situazione leggermente peggiore ma comunque promettente.

In direzione Y lo scarto quadratico medio è ancora più basso, anche perché gli spostamenti sono di gran lunga più contenuti.

Dovendo adottare un solo modello, il criterio discriminante nella scelta tra i due è puramente pratico e tende a favorire il PoliMi, in quanto non richiede le misure della quota d'invaso e dispone di una certa capacità di previsione.

Il deterministico è anch'esso contraddistinto da una buona adattabilità ai dati reali, ma risente notevolmente delle lacune nelle serie storiche della quota d'invaso e presenta una curva più frastagliata, con diversi punti angolosi. Ha tuttavia il vantaggio di essere basato su sole grandezze fisiche misurabili, scelte sulla base della logica causa-effetto. Proprio l'esame dei coefficienti di correlazione tra le diverse variabili e lo spostamento indotto sul concio conferma la correttezza e la fondatezza dei ragionamenti iniziali, che hanno portato a inserire nell'espressione del modello la quota d'invaso  $H$ , la temperatura media dell'acqua  $T_{m\text{ acqua}}$ , e la temperatura media annua dell'aria  $T_{m\text{ annua aria}}$ . Delle 3 grandezze quella che influisce maggiormente sui movimenti del coronamento in direzione X è la seconda, seguita a sua volta dalla temperatura dell'aria. I coefficienti di correlazione valgono infatti rispettivamente -0,781 e -0,642 per il concio 5, e -0,738 e -0,850 per il 43/9. Si parla di temperatura giornaliera dell'aria  $T_{aria}$ , anche se nel modello è stata usata la media annua. Questa scelta si è resa necessaria per motivi di stabilità e robustezza del modello in quanto la  $T_{m\text{ annua aria}}$  riesce a smussare i marcati e fitti punti angolosi che si avrebbero usando invece il valore istantaneo di temperatura.

Ciò che però colpisce in questi risultati è il segno dei coefficienti, che sta ad indicare una dipendenza inversa tra le due variabili e lo spostamento dei pendoli. Il fenomeno si spiega nella diversa capacità termica tra acqua e aria, che rende l'invaso simile a un gigantesco volano termico: a fronte di variazioni climatiche stagionali ed escursioni termiche giornaliere il bacino varia molto lentamente la sua temperatura e può presentare anche diversi gradi centigradi di differenza rispetto all'aria circostante.

Per meglio chiarire la situazione si ipotizzi che acqua e aria siano alla stessa temperatura. Se a seguito dell'irraggiamento solare  $T_{\text{aria}}$  aumenta, l'acqua impiega del tempo a raggiungere l'equilibrio termico e appare più fredda. Le fibre del concio rivolte verso valle si allungheranno quindi di più, in quanto sono a contatto con l'atmosfera. Quelle di monte invece non si muoveranno e il coronamento tenderà a spostarsi nella direzione negativa delle X. Analogamente, se soffiasse un vento di tramontana, la temperatura dell'aria subirebbe un brusco calo e risulterebbe più fredda dell'acqua. In tal caso sarebbe il paramento di monte ad allungarsi, dando origine a un movimento del concio verso valle.

Il coefficiente di correlazione relativo a  $\Delta T$  (escursione termica tra aria e acqua) rimane abbastanza contenuto (vale circa 0,3) e pare smentire il ragionamento del capoverso precedente. In realtà occorre tenere presente che la Genna Is Abis è una struttura massiccia e voluminosa, dotata anch'essa di una inerzia termica propria. Di conseguenza impiegherà del tempo a dilatarsi o ad accorciarsi per effetto del calore.

Al termine della parte strettamente modellistica è inoltre stato eseguito il test T sulle medie, visto che le serie storiche di spostamento registrate dai pendoli mostravano piccole discontinuità che potrebbero far pensare a interruzioni per operazioni di ricalibrazione o riparazione dello strumento.

Per il concio 5 il test T afferma che le medie non sono significativamente uguali tra i periodi 97-01 e 02-06 in entrambe le direzioni, mentre per il 43/9 l'ipotesi nulla viene rifiutata sia tra 92-96 e 97-01 che tra 97-01 e 02-06, ma solo in direzione Y. Pare quindi che il sospetto iniziale sia confermato: probabilmente tra il 1996 e il 1997 è successo qualcosa a entrambi i pendoli del concio 5 e a quello Y del 43/9. Tra il 2001 e il 2002 sembra invece che solo il pendolo Y del 43/9 abbia subito un qualche intervento di manutenzione. Il condizionale è d'obbligo in quanto il test non garantisce una certezza assoluta e non si è riusciti ad avere informazioni a riguardo dal Consorzio di Bonifica del Cixerri.

La successiva applicazione del modello PoliMi a ciascuno dei 3 periodi della serie storica ha inoltre avuto un esito molto positivo, con deviazioni standard degli scarti a cavallo degli 0,2 – 0,3 mm. Ciò non conferma necessariamente quanto sostenuto dal test T: discretizzando il campione in periodi più piccoli, si scompone quella che prima era un'unica curva in una sequenza di funzioni, e pertanto localmente si riesce a seguire meglio l'andamento dei pendoli, con chiari miglioramenti complessivi nella stima. Ad ogni modo gli scarti quadratici medi si discostano solo di pochi decimi di millimetro rispetto al modello

unico, confermando che l'adozione di quest'ultimo comporta un peggioramento abbastanza trascurabile in termini di precisione.

Il monitoraggio degli spostamenti dei conci sulla Genna Is Abis non è affidato solamente a strumenti tradizionali, quali i pendoli o i collimatori, ma anche a una rete che sfrutta la tecnologia satellitare mediante antenne e ricevitori GPS. Le perplessità iniziali relative a strumenti di questo genere erano fondamentalmente dovute alla precisione raggiungibile, la quale non riesce per ora a scendere al di sotto del millimetro. Il GPS non arriva alle precisioni dei pendoli ma, utilizzando dati di posizione a media giornaliera unitamente ad un accurato pretrattamento gli scarti tra le due strumentazioni scendono a quantità sub-millimetriche rendendo possibile l'impiego di un sistema GNSS nell'ambito del controllo delle grandi opere di ritenuta congiuntamente ad un uso più limitato dei pendoli. In questa direzione sono stati svolti test e raccolti dati sperimentali durante una campagna di indagine intrapresa da Leica Geosystem in collaborazione con il Politecnico di Milano: i risultati sembrano aprire nuovi orizzonti in questo settore, con prospettive future abbastanza promettenti.

Infatti le misure GPS, pur necessitando di una elaborazione preliminare di rototraslazione del sistema di riferimento iniziale, seguono piuttosto bene l'andamento del modello PoliMi. Si rende comunque indispensabile effettuare una successiva calibrazione dei dati per perfezionare l'allineamento con le coordinate X – Y della diga.

Durante queste operazioni si parla appunto di modello e non di misure dei pendoli. Infatti la serie storica GNSS ha una durata abbastanza breve e una frequenza di misura pressoché giornaliera. Confrontare questa mole di dati con le misure mensili dei pendoli avrebbe ridotto notevolmente la numerosità del campione degli scarti e quindi anche la significatività degli indicatori statistici. Per questo si è optato per il modello PoliMi, calibrato ovviamente sui dati reali dei pendoli.

I risultati che si ottengono mostrano come il GPS sia effettivamente in grado di ricostruire la curva del modello con una precisione sufficiente: in direzione X su entrambi i conci le deviazioni standard rimangono inferiori al millimetro. Dunque sembra che la sperimentazione abbia avuto successo, confermando la fattibilità dell'impiego di sensori satellitari nel monitoraggio degli sbarramenti.

La situazione in direzione Y è invece meno rosea in quanto gli scarti quadratici medi si attestano intorno al millimetro e mezzo. Questo è abbastanza comprensibile se si pensa all'ordine di grandezza dei movimenti da cogliere. In X infatti i movimenti dei conci sono

molto più consistenti, circa 4 – 5 volte maggiori, rispetto all'altra direzione. In Y l'ampiezza massima del modello raggiunge a malapena il millimetro mentre in X è di 5 mm.

È quindi normale che il GNSS riesca a misurare con maggiore precisione nella direzione trasversale al coronamento piuttosto che in quella longitudinale.

Il GPS allora si dimostra un sistema di monitoraggio valido ed efficace, a patto però che venga impiegato correttamente: non si può pensare che esso arrivi a sostituire completamente i pendoli ottici poiché non possiede ancora una sensibilità e una precisione adeguata allo scopo. Inoltre la serie storica satellitare ha bisogno di essere calibrata sul modello, il quale si appoggia a sua volta ai dati pendolari. Di conseguenza gli strumenti tradizionali rimangono insostituibili e il ricevitore GNSS non può assolutamente prescindere da essi. Tuttavia può presentarsi come valida alternativa ai coordinometri automatici, da sempre affetti da grossi problemi di gestione e manutenzione (si veda il caso della Genna Is Abis e della Cantoniera). Il GPS infatti registra autonomamente il dato senza la presenza costante di un operatore ed è in grado di trasmetterlo in remoto mediante una semplice connessione internet.

In base a quanto detto in precedenza però, la tecnologia satellitare non si può impiegare per cogliere lo spostamento del coronamento della diga a distanza di un solo giorno, visto che le variazioni sarebbero troppo piccole. Risulta tuttavia molto utile sul medio - lungo periodo, dove iniziano a manifestarsi sia il trend lineare che la componente oscillatoria.

Infine una rete GNSS, se paragonata ad un equivalente sistema composto da coordinometri automatici, presenta un certo risparmio economico sulla spesa dell'impianto: una stazione master GPS nuova e di buona qualità complessiva viene a costare approssimativamente intorno ai 20000 €, mentre la rover si aggira sui 10000 €, comprensivi del sistema di trasmissione dei dati ad esempio mediante una antenna per la connessione wireless. Per i pendoli invece il discorso è senz'altro più delicato e complesso. Per un telecoordinometro automatico abbastanza preciso (come quelli installati sulla Genna Is Abis o sulla Cantoniera) si arriva a spendere senza problemi una decina di migliaia di Euro nella versione rovescia, e circa la metà per la diritta. I prezzi si riferiscono allo strumento comprensivo di posa in opera. Il problema principale però è rappresentato dalle opere accessorie che precedono l'installazione. Ad esempio per i pendoli rovesci inferiori è necessario che il cordino sia ancorato nella roccia di fondazione della diga. Ciò richiede lo scavo di un pozzo largo qualche decina di centimetri, molto profondo (nella Cantoniera si arriva a 30 metri per alcuni conci) e perfettamente verticale, per poter garantire una eccellente precisione di misura.

L'operazione è pertanto estremamente difficoltosa e, di conseguenza, anche molto dispendiosa. Il costo naturalmente varia a seconda dei casi, in base alla profondità del foro, il tipo di roccia o di terreno attraversato e gli imprevisti vari incontrati durante la perforazione. Basandosi sul prezzario delle opere pubbliche della regione Lombardia<sup>1</sup>, si può prendere a riferimento la voce *perforazione ad andamento verticale, a distruzione di nucleo, in terreni a granulometria media e grossolana, eseguita a rotazione o rotopercolazione. Diametro mm 100 – 145, in terreni ghiaiosi o in rocce dure. È compreso l'esame del "cutting". È inoltre compreso quanto altro occorre per dare la perforazione completa.*

Il documento fornisce un prezzo, per metro lineare di perforazione, pari a 74,12 € fino alla profondità di 30,00 m, e 103,09 € da 30,01 a 60,00 m.

Va però tenuto presente che il foro deve essere perfettamente verticale, di diametro molto più grande rispetto a 145 mm (si parla di 300 mm circa) e, il più delle volte, si ha a che fare con della roccia resistente, e non con terreno a granulometria media e grossolana. Tutti questi aspetti contribuiscono a far lievitare notevolmente il prezzo della perforazione, ben oltre i 100 € per metro lineare. Per avere una idea di massima si può considerare il costo di perforazione per una prova in sito di caratterizzazione sismica tipo down – hole. Essa appare abbastanza appropriata in quanto necessita di un pozzo perfettamente verticale entro cui collocare un geofono, e di larghezza paragonabile ai 30 cm richiesti per il cordino del pendolo. Per un foro di 30 m di profondità in roccia il prezzo si attesta intorno ai 15000 €.

A tutto ciò va inoltre aggiunto il costo della costruzione della camera dei pendoli (peraltro necessario per l'installazione dei pendoli ottici), della perforazione nel corpo diga per installare il cordino del pendolo diritto, e del sistema di trasmissione dei dati, di solito mediante fibra ottica. Le registrazioni vengono poi immagazzinate e coordinate da un sofisticato apparecchio di gestione dati, il cui costo è di diverse decine di migliaia di Euro.

Se quindi si considera il caso della Genna Is Abis, il costo della rete GNSS, composta da 4 stazioni rover e 2 master è quantificabile in circa 80000 €, più 5000 € per cementare e recintare l'area della REF 2. Un sistema di controllo con 4 camere dei pendoli, ciascuna dotata di un coordinometro automatico diritto e uno rovescio, costerebbe 60000 € per i soli strumenti, e altri 60000 € per i fori nella roccia di fondazione. Aggiungendo poi le perforazioni nel corpo diga e il sistema di cablaggio e immagazzinamento dati si arriva a una cifra complessiva maggiore degli 85000 € richiesti per il GPS.

---

<sup>1</sup> Prezzario delle opere pubbliche 2009 della Regione Lombardia, disponibile sul sito <http://www.trasporti.regione.lombardia.it/>

Prendendo in considerazione ora la diga Cantoniera, dalle serie storiche di spostamento dei pendoli sono emersi diversi problemi: per prima cosa tutti i dati antecedenti al maggio 2005 sembrano affetti da un qualche tipo di errore, anche piuttosto grave, che falsifica il campione e la successiva procedura di modellazione. Infatti la curva ha inizialmente un andamento anomalo, privo di periodicità, salvo poi cambiare improvvisamente e assumere l'aspetto caratteristico già visto nella diga sul Cixerri, ovvero un trend lineare unito a delle oscillazioni periodiche. Inoltre, per due dei pendoli della diga, le registrazioni cominciano solamente nel 2007. Problemi minori si registrano per le temperature dell'acqua, dove si notano brevi periodi in cui la misura è assente. Diversa è invece la situazione della quota d'invaso, misurata regolarmente a partire dal marzo del 2000.

Ad ogni modo, in base ai 4 conci considerati, si segnala uno spostamento della Cantoniera verso valle, con una tendenza più accentuata verso la mezzeria della struttura: il concio più centrale (il numero 19) si muove alla velocità di 2 mm in 6 anni mentre il 13, leggermente più periferico, vede un dislocamento di un millimetro in 4 anni di osservazione. L'ampiezza del contributo periodico raggiunge i 6-7 mm.

Le spalle invece risultano praticamente ferme sul lungo periodo, molto probabilmente per effetto dell'ammorsamento con il versante, e presentano oscillazioni annuali di circa 3-4 mm.

Una fotografia della situazione dell'intero coronamento in direzione X viene fornita con discreta approssimazione da un modello di tipo parabolico, secondo cui la diga dovrebbe muoversi principalmente al centro e restare vincolata alle due estremità, sulla falsa riga di quanto accade alla deformata di una trave a doppio incastro sollecitata con un carico distribuito costante.

Considerando infatti un giorno casuale all'interno del periodo di registrazione dei pendoli, le deviazioni standard degli scarti tra lo spostamento reale e quello ipotizzato dal modello sono sempre submillimetriche e oscillano intorno a 0,6 mm. I valori più bassi si verificano dividendo il coronamento nei suoi due tratti rettilinei e applicando il modello separatamente su ciascuno.

Per far diminuire lo scarto quadratico medio nulla vieta di ricercare espressioni più accurate rispetto alla parabola (per esempio una curva gaussiana), ma occorre tenere conto dell'inevitabile, e forse anche inutile, complicazione e complessità di calcolo aggiuntiva.

L'applicazione del modello parabolico risulta anche interessante per analizzare la sola componente irreversibile di spostamento in X, determinata dal parametro  $a$  del modello PoliMi.

Anche in questo caso il lavoro ha avuto un esito abbastanza positivo, con una deviazione standard sugli scarti pari a circa 0,1 mm/anno.

Per quanto riguarda la direzione perpendicolare al coronamento, la DS, tutti i conci considerati registrano un movimento verso sinistra tranne il numero 31, che si sposta nel verso opposto. Le velocità rimangono comprese tra 1 e 3 mm in 6 anni, con oscillazioni annue di 1 mm. La struttura dunque non desta preoccupazione dal punto di vista della stabilità strutturale.

Per la modellazione si è scelto di affidarsi solamente a due delle formulazioni viste nel capitolo 1, ovvero il modello PoliMi e il deterministico. I risultati ottenuti sono analoghi a quelli della Genna Is Abis e danno una ulteriore prova della validità di entrambi i modelli. Nel PoliMi le deviazioni standard in direzione monte-valle si mantengono molto basse (circa la metà di quelle della diga sul Cixerri), con valori medi di 0,4 mm e picchi che non superano gli 0,54 mm.

Nella destra-sinistra si aggirano intorno a 0,3 mm ma è presente un unico picco di 0,71 mm nel concio 22, dovuto forse a una anomalia nei dati originari tra l'aprile e l'agosto del 2005 (Si veda la figura D.14 dell'appendice D).

Nel modello deterministico la situazione è pressoché identica, anche dal punto di vista delle statistiche. L'unica differenza sta nella direzione MV che presenta ora scarti quadratici mediamente più bassi di un decimo di millimetro rispetto al PoliMi.

Infine anche per la Cantoniera Eleonora D'Arborea si è scelto di calcolare i coefficienti di correlazione già visti in precedenza per la Genna Is Abis. I risultati emersi rafforzano ulteriormente le considerazioni effettuate sulla diga del cagliaritano, con una forte dipendenza degli spostamenti MV al coronamento dalla temperatura dell'aria e da quella media dell'acqua. I coefficienti vanno rispettivamente da 0,480 a 0,595 per la  $T_{aria}$  e da 0,832 a 0,911 per  $T_{m\ acqua}$ . Stavolta però si sente maggiormente l'influenza della quota d'invaso, a causa della struttura più leggera, snella e flessibile che caratterizza lo sbarramento sul Fiume Tirso.



## 4.2 Prospettive future

La tecnologia GNSS, col passare degli anni, ha subito una forte crescita applicativa in diversi settori dell'ingegneria e non solo. Quello che era nato in origine come un sistema di posizionamento a scopo militare è ora utilizzato per i più svariati scopi nel settore civile: si possono citare ad esempio i navigatori satellitari installati sui veicoli al fine di guidare a destinazione l'automobilista, oppure i ricevitori GPS contenuti all'interno dei cellulari di ultima generazione, o ancora i sistemi montati sulle vetture per la localizzazione delle stesse in caso di furto. Nei capitoli precedenti inoltre si è parlato a lungo dell'utilizzo di antenne GNSS per il monitoraggio delle strutture e delle instabilità geologiche, quali frane o scivolamenti. In quest'ultimo campo la sperimentazione è abbastanza consolidata, e può avvalersi di numerosissime applicazioni pratiche in tutto il mondo, mentre nel controllo delle grandi opere sta gradualmente prendendo piede, specialmente per le grandi dighe di ritenuta. Un impiego senz'altro inusuale ma straordinariamente innovativo per la tecnologia GNSS è quello proposto dal Prof. Mattia Crespi dell'Università La Sapienza di Roma, insieme al suo team di ricerca composto da Mara Branzanti, Gabriele Colosimo, Augusto Mazzoni e Thomas Dautermann.

Il lavoro in questione è stato denominato VADASE, acronimo di Variometric Approach for Displacements Analysis Standalone Engine, e ha come oggetto di studio l'applicazione della tecnologia GNSS alla sismologia.

Esperienze di questo tipo non sono del tutto nuove agli addetti ai lavori in quanto, negli ultimi dieci anni, sono state svolte numerose sperimentazioni sull'impiego del posizionamento satellitare al fine di stimare gli spostamenti cosismici e le forme d'onda superficiali generate da un terremoto. I risultati di questi studi sono apparsi da subito promettenti, facendo emergere accurately di misura variabili tra alcuni millimetri e pochi centimetri. Le tecniche di analisi sfruttate per l'elaborazione dei dati erano fondamentalmente due: il single precise point positioning e il differential kinematic positioning. Il primo è basato su osservazioni a doppia frequenza acquisite da un unico ricevitore, e fornisce il posizionamento dell'antenna sfruttando le informazioni principali trasmesse dal satellite stesso (effemeridi, parametri di orientamento terrestre, indicazioni dell'orologio atomico di bordo e così via). Questi dati vengono poi rielaborati dal segmento di controllo, il quale li rende disponibili gratuitamente alle utenze civili solamente dopo una

settimana. Esistono anche delle stime pubblicate in tempi più brevi, ma risentono di una minore precisione, che si ripercuote poi sul posizionamento dell'antenna. Di conseguenza una tecnica di rilievo di questo genere non può essere effettuata in tempo reale, ma solo in post-processing. Il differential kinematic positioning invece richiede una rete GPS permanente sufficientemente fitta (interdistanza massima tra le stazioni non superiore a qualche decina di chilometri), più un centro di analisi dedicato all'elaborazione dei dati registrati. Questo approccio consente un posizionamento in tempo reale con precisioni piuttosto elevate, dell'ordine di un centimetro, ma presenta l'inconveniente della complessità infrastrutturale della rete di monitoraggio. Inoltre è in grado di fornire solo una misura dello spostamento relativo delle varie antenne rispetto a una stazione permanente di riferimento, la quale può non rimanere necessariamente ferma durante l'evento. Ciò può accadere qualora essa si trovi in prossimità dell'epicentro, oppure a una certa distanza ma durante un sisma particolarmente violento. La magnitudo di un terremoto infatti è proporzionale alla dimensione della faglia che lo ha originato: nel grande sisma di magnitudo 9,1 del 26 dicembre 2004 a largo dell'isola indonesiana di Sumatra ad esempio si stima che il piano di rottura sia grande quanto l'intero stato della California<sup>2</sup> (circa 410000 km<sup>2</sup>); dunque la stazione di riferimento, per non risentire dello spostamento, dovrebbe essere a centinaia di chilometri di distanza, ma ciò è in contraddizione con la necessità di una piccola distanza tra le varie antenne, cosa che implicherebbe una grande quantità di strumenti per un'unica rete e quindi alti costi di impianto.

Il progetto VADASE cerca di unire le potenzialità e i vantaggi di entrambi gli approcci, cercando però di risolverne le problematiche. Esso infatti riceve sempre le informazioni sull'orbita e l'orologio dei satelliti, proprio come nel single precise point positioning, ma è in grado di fornire un posizionamento preciso al centimetro in tempo reale, grazie all'impiego di un unico ricevitore ad alta frequenza di campionamento (minimo 1 Hz fino ad arrivare anche a 100 Hz con gli strumenti di ultima generazione), che sfrutta le osservazioni di fase del segnale portante. In questo modo non è necessario attendere una settimana per disporre delle effemeridi satellitari corrette ed è possibile mettere a punto un sistema che, in tempo reale, restituisca gli spostamenti cosismici e le forme d'onda superficiali generate dal terremoto. Il trattamento del segnale inoltre può essere effettuato dal ricevitore stesso, mediante l'implementazione di un semplice algoritmo ad hoc. Infatti il sistema VADASE funziona con un singolo ricevitore e quindi non serve conoscere le misure di altri strumenti

---

<sup>2</sup> Fonte: U.S. Geological Survey

GNSS, come accade invece per il posizionamento relativo. Ciascuna antenna in pratica costituisce una rete di monitoraggio a sé stante; ecco la ragione delle ultime tre lettere della sigla, ovvero Analysis Standalone Engine.

Tutti gli aspetti appena elencati rendono questa tecnica particolarmente adatta al controllo in tempo reale, per poter stimare con tempestività i principali parametri sismici del terremoto, tra cui si può citare il momento sismico  $M_0$ . Esso è infatti direttamente proporzionale allo scorrimento cosismico e permette di determinare la magnitudo momento  $M_W$  del terremoto, molto importante per quantificare la severità del fenomeno. La magnitudo infatti, unita ad altre informazioni basilari (posizione e profondità dell'ipocentro, ecc...), consente di costruire le cosiddette shake maps, o mappe di scuotimento, per il sito in esame. Esse vengono sintetizzate in brevissimo tempo dopo il verificarsi della scossa e danno una stima di massima delle accelerazioni sismiche indotte nell'area epicentrale, in maniera tale da individuare tempestivamente i centri abitati presumibilmente più colpiti dal sisma e indirizzare con maggiore efficienza i mezzi di ricognizione e soccorso. Inoltre, al di sopra di una certa soglia di magnitudo, verranno controllate pure le aree maggiormente suscettibili di instabilità geologica, quali la liquefazione e le frane.

Un altro vantaggio tangibile del monitoraggio sismico in tempo reale riguarda inoltre gli tsunami. Il tristemente noto sisma di Sumatra del 26/12/2004 e quello giapponese del 11/03/2011 di magnitudo rispettivamente 9,1 e 9,0 sono stati infatti seguiti da sconvolgenti onde di maremoto che hanno messo in luce l'impotenza, da parte dell'uomo, di poter fronteggiare attivamente tali immense forze della natura. E siccome in questi eventi proprio gli tsunami hanno provocato la maggior parte delle vittime, non rimane che pensare a efficaci apparati di difesa passiva quali sistemi di allarme e piani di evacuazione della popolazione potenzialmente esposta.

Infatti in molti casi l'epicentro è localizzato a centinaia di chilometri a largo delle coste e l'onda di tsunami può impiegare anche delle ore a raggiungere le aree litoranee più vicine, come accaduto nel caso di Sumatra. Durante questo lasso di tempo si potrebbe dunque allontanare le persone verso l'entroterra e procedere alla messa in sicurezza dei beni e delle infrastrutture vitali, chiudendo ad esempio il flusso di gas metano all'interno delle condutture, arrestando le reazioni di fissione all'interno dei reattori delle centrali nucleari e mettendo in sicurezza veicoli e natanti che possono essere trasportati dalla corrente e provocare danni ad abitazioni e ponti più di quanto non riesca a fare l'onda.

Sistemi del genere sono già stati installati in varie parti del mondo, come ad esempio in Giappone, ma si sono rivelati inefficaci nel caso del recente sisma che ha colpito l'isola di Honshu semplicemente per l'estrema vicinanza dell'epicentro alla costa.

Essi si basano fondamentalmente su sensori di pressione installati sul fondo marino, in grado di rilevare, a seguito di una scossa sismica registrata dalla rete accelerometrica, incrementi anomali del normale moto ondoso. Le informazioni vengono trasmesse con un cavo a una boa galleggiante situata in superficie, e inviate successivamente a terra via satellite, dove un centro di analisi deciderà se diramare o meno l'allarme tsunami.

In un contesto del genere può inserirsi efficacemente il sistema VADASE: con pochi ricevitori installati in prossimità della costa si riesce a individuare con tempestività un eventuale sisma e, se la sua magnitudo supera un certo valore soglia, i dati vengono incrociati con le trasmissioni dei trasduttori di pressione sottomarini.

Finora il progetto VADASE è stato testato in modalità post-processing ma si prevede, come futuro obiettivo di ricerca, l'installazione del software di elaborazione dati direttamente nel ricevitore stesso, in modo da consentire un monitoraggio dei movimenti in tempo reale. Gli autori del progetto inoltre non escludono un eventuale impiego del VADASE nel controllo delle grandi strutture quali ponti, grattacieli e torri. A tal proposito sono previste diverse attività sperimentali che però, allo stato attuale delle cose, sono ancora in fase di progettazione.

Per le dighe di ritenuta invece il VADASE sembra ancora inappropriato poiché non è in grado di raggiungere precisioni sufficienti a monitorare gli spostamenti submillimetrici della struttura; quindi è necessario affidarsi ancora a rilievi GNSS statici relativi in post-processamento. Tra l'altro, visti i buoni risultati ottenuti con la Genna Is Abis sul Rio Cixerri, si può pensare di installare un analogo sistema satellitare di controllo anche sulla diga Cantoniera Eleonora D'Arborea, per vedere se anche in quel caso il posizionamento satellitare restituisce un esito positivo.

La prima cosa da fare è pertanto scegliere i conci su cui posizionare le stazioni rover di monitoraggio della struttura.

Una scelta ragionevole può essere quella di tenere sotto controllo le spalle della diga, per verificare che non subiscano spostamenti eccessivi. Ciò infatti indicherebbe problemi di mancato ammorsamento alle sponde del bacino e quindi un potenziale pericolo di instabilità dello sbarramento che andrebbe immediatamente individuato e segnalato dalla rete di controllo. Si propone pertanto di posizionare una stazione rover sul concio 7 e una sul 31.

Essi non sono esattamente i conci più periferici, ma sono quelli più distanti dal centro e dotati di una camera dei pendoli. In assenza infatti della strumentazione tradizionale non si potrebbe effettuare la calibrazione della serie storica GPS e sarebbe impossibile verificare la bontà e la precisione del dato satellitare, mancando appunto il campione degli scarti.

Inoltre, in base a quanto emerso nel capitolo 3, si potrebbe di buon grado installare dei ricevitori nelle zone soggette a maggiore movimento, che sono tra l'altro quelle più distanti dalle estremità. Una scelta appropriata fa optare per i conci numero 19 e 24. Il primo è infatti esattamente nella mezzeria della diga, mentre l'altro è quasi al centro della parte rettilinea più lunga dello sbarramento; entrambi, come mostrato nel paragrafo 3.3.5, sono tra i conci che subiscono lo spostamento maggiore su tutto il coronamento.

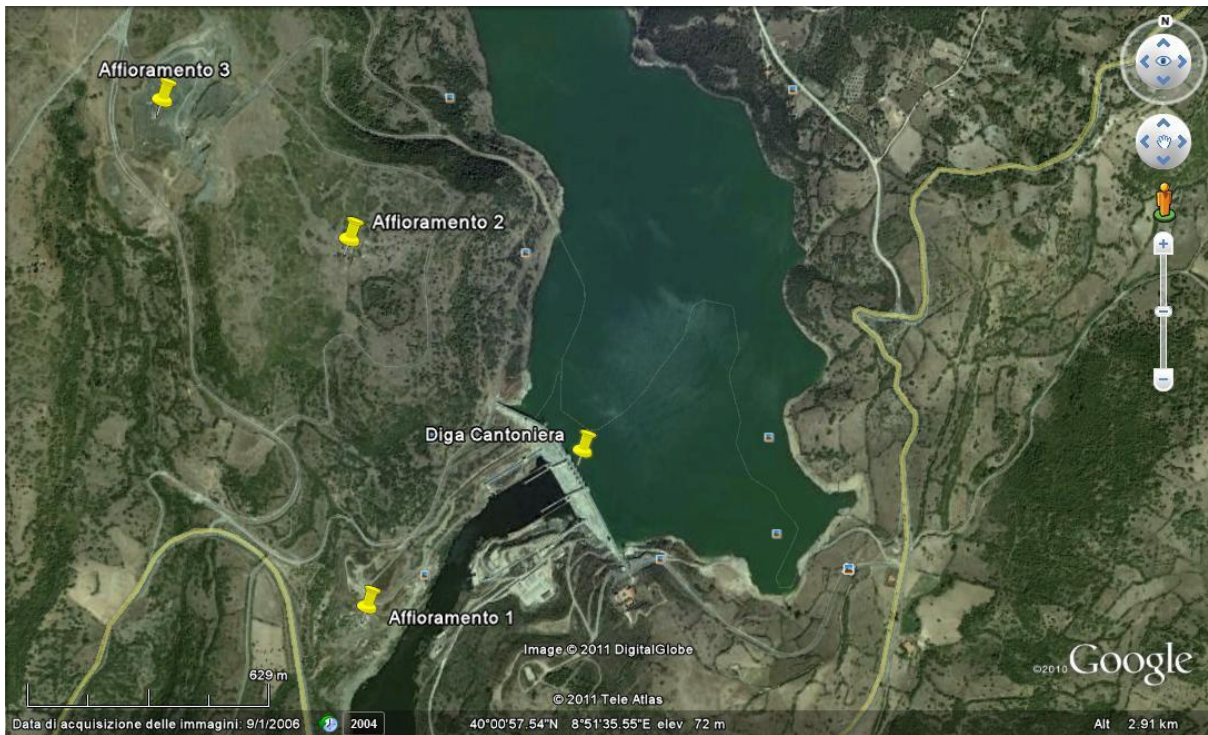
Visto inoltre il particolare tracciato mistilineo dell'opera potrebbe essere appropriato controllare gli spostamenti in corrispondenza del raccordo tra i due tratti rettilinei.

Ciò, in sostanza, equivale a collocare un'antenna GNSS nel concio 13. Il numero 11 infatti sarebbe stato troppo vicino al 7, rischiando un inutile infittimento locale della rete a scapito di una scarsa copertura della porzione successiva.

Per quanto riguarda invece la parte master del sistema, ovvero le antenne fisse utilizzate come riferimento per il posizionamento relativo, occorre prevedere l'impiego di due stazioni, a puro titolo precauzionale. Infatti, oltre all'eventualità di malfunzionamenti, va considerato l'aspetto prettamente topografico legato alla rete: la stazione master non deve assolutamente muoversi e pertanto va collocata in corrispondenza di un caposaldo. Se si dovesse scoprire in seguito che tale requisito non è rispettato si potrebbe ricorrere senza problemi all'altra stazione, evitando così di vanificare periodi di tempo anche lunghi di rilievo. Nel caso della Genna Is Abis, ad esempio, la stazione master REF1 era considerata in principio come caposaldo, ma successivamente è risultata soggetta a movimenti. Grazie però alla presenza della REF2 è stato comunque possibile disporre di una serie storica di misure valida e affidabile.

Per la scelta corretta dei capisaldi un suggerimento molto utile e prezioso è quello di individuare aree con della roccia affiorante. In genere infatti sono soggetti a traslazioni e scivolamenti superficiali i depositi di materiale alluvionale o morenico; la roccia sana e poco fratturata rimane stabile e ferma, quindi presenta tutte le condizioni ideali per la materializzazione di un caposaldo.

Grazie alle immagini satellitari ottenute con Google Earth, nei dintorni della Cantoniera sono stati identificati due possibili punti in cui pare esserci della roccia affiorante, uno a nord dello sbarramento e l'altro a est. Nella figura 4.1 sono denominati Affioramento 1 e Affioramento 2. È inoltre presente anche una terza area di interesse (Affioramento 3), sempre verso est: si tratta della cava Tanca Santa Marra, in località Busachi, sfruttata per l'estrazione di basalto<sup>3</sup>.



**Figura 4.1**  
I tre affioramenti identificati durante l'analisi dell'immagine satellitare.



**Figura 4.2**  
L'affioramento 1 a sud sud-ovest della diga.

<sup>3</sup> Le informazioni sulla cava sono pubblicate nel Piano Regionale delle Attività Estrattive della Regione Sardegna



**Figura 4. 3**  
L'affioramento numero 2.



**Figura 4. 4**  
L'affioramento 3, in corrispondenza della cava di basalto di Tanca Santa Marra.

Avendo a che fare con una roccia dura e resistente la zona sarebbe ideale per il posizionamento della stazione master GPS. Il problema è che la cava è tuttora attiva e pertanto le operazioni estrattive potrebbero interferire in qualche modo con l'antenna del ricevitore. La presenza e il passaggio di mezzi pesanti creano infatti vibrazioni nel suolo e possono produrre, nelle misure GNSS, un rumore di fondo non trascurabile. Il fenomeno sarebbe ancora più accentuato se nella cava venisse impiegato anche dell'esplosivo.

Per questo motivo, in assenza di ulteriori informazioni, è consigliabile posizionare le stazioni master in corrispondenza degli affioramenti 1 e 2. Il numero 3 è forse più adatto dal punto di vista geologico ma richiede indagini approfondite sulla cava e sulle attività estrattive che vi si svolgono.

Nella figura 4.5 si riporta il quadro di insieme della rete di monitoraggio GNSS ipotizzata per la diga Eleonora D'Arborea. I punti rossi rappresentano le stazioni rover, contrassegnate dal numero del concio, mentre in giallo sono evidenziate le master, identificate dalla sigla REF.



**Figura 4.5**  
**La rete di monitoraggio GNSS ipotizzata per la diga Cantoniera.**





# **APPENDICE A**

**Mappa della Sardegna con la posizione  
delle due dighe analizzate**

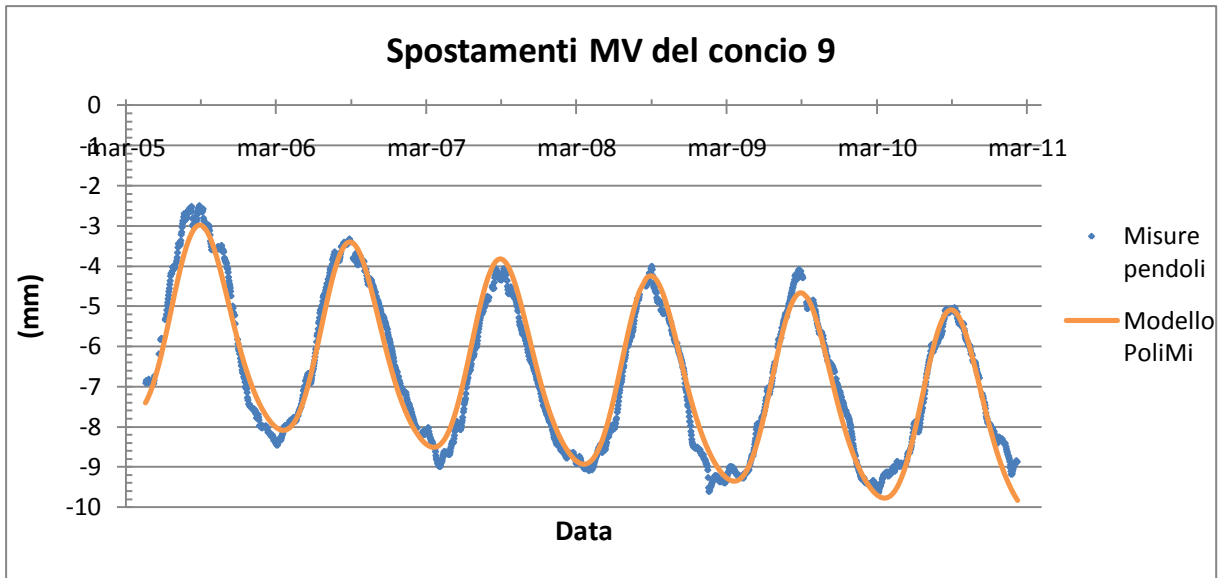


Figura A. 1  
Carta della Sardegna con la posizione della diga Genna Is Abis e della Cantoniera Eleonora D'Arborea.

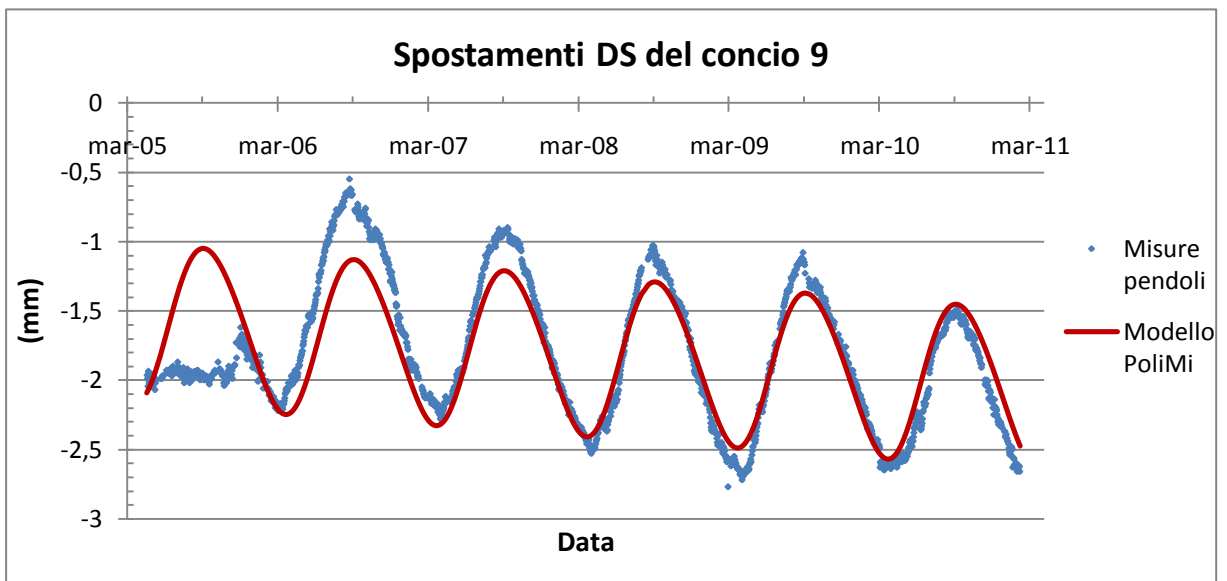
# **APPENDICE D**

## **Grafici del modello PoliMi per gli altri conci della diga Cantoniera**

**Concio 9**

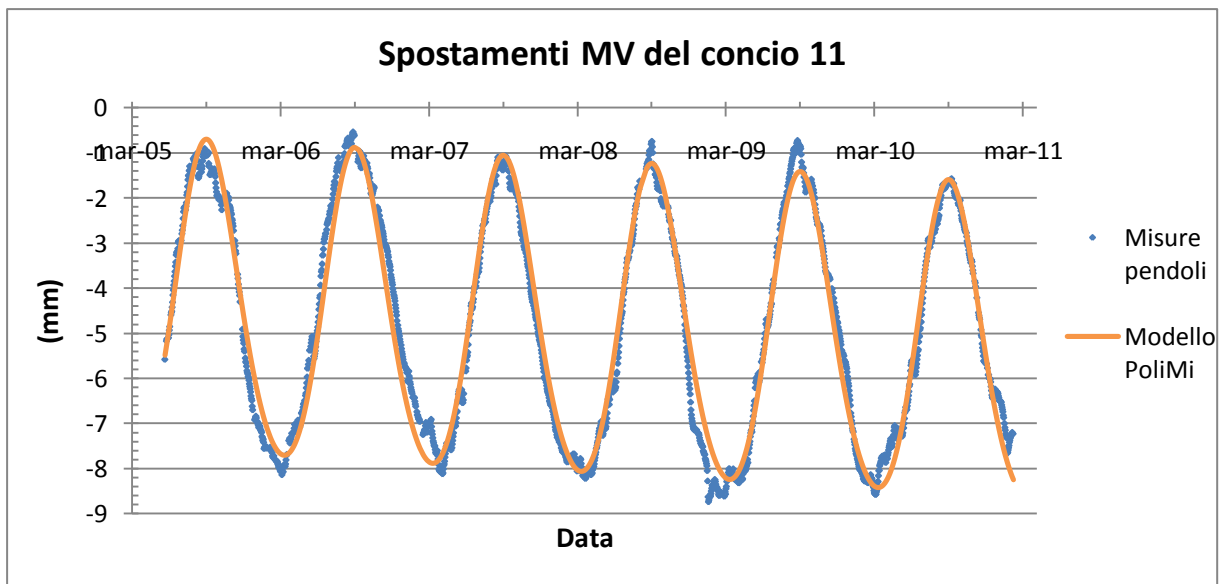


**Figura D. 1**  
Spostamenti in direzione MV del concio 9 – Modello PoliMi.

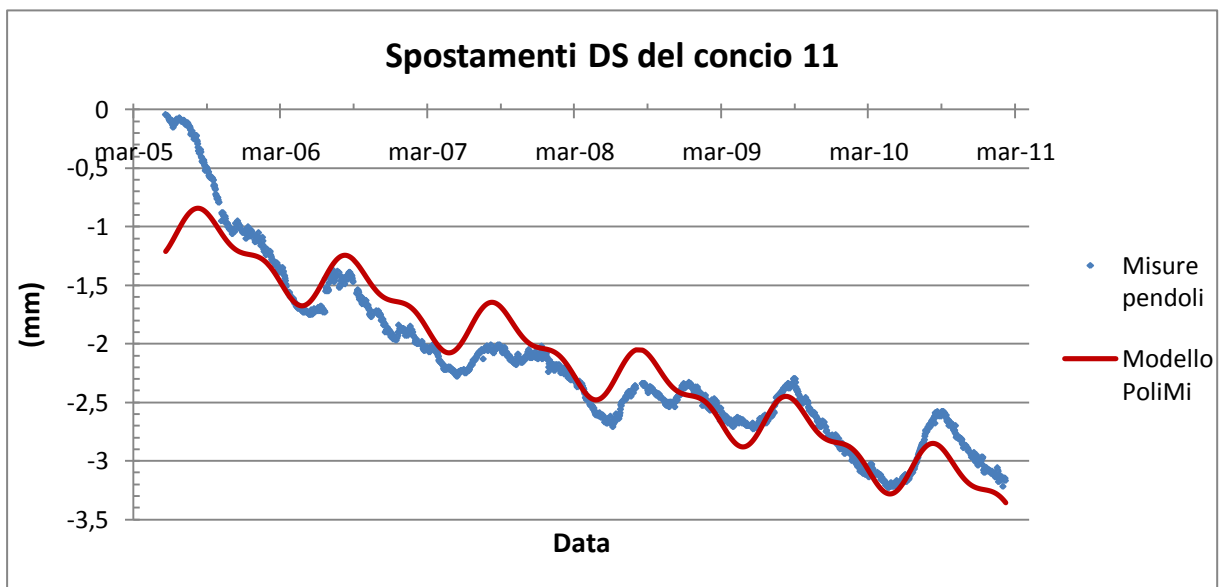


**Figura D. 2**  
Spostamenti in direzione DS del concio 9 – Modello PoliMi.

**Concio 11**

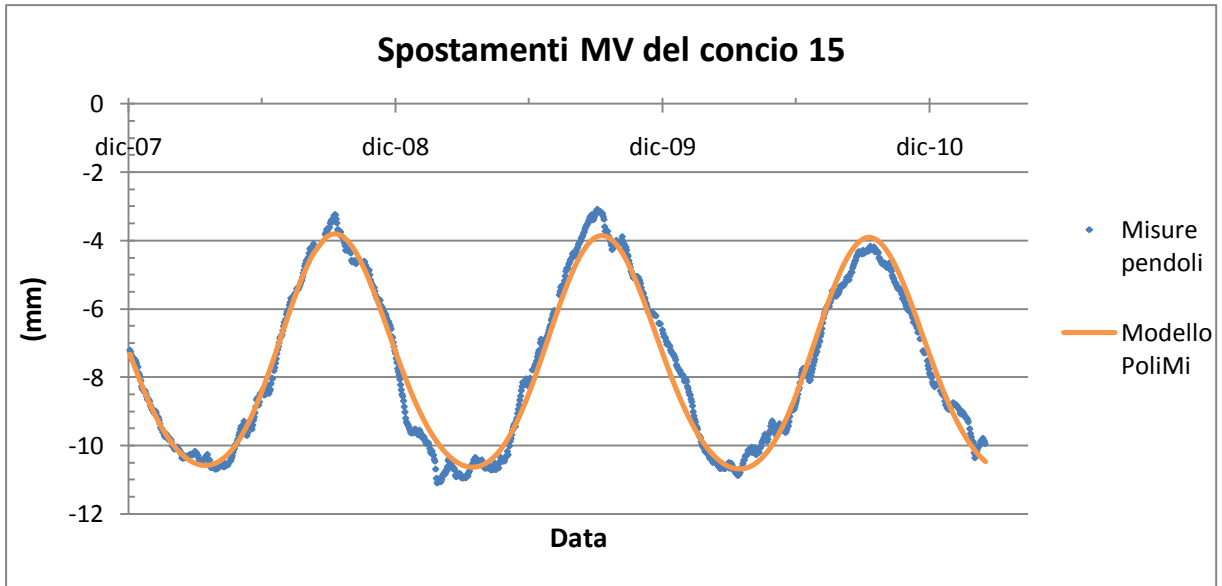


**Figura D. 3**  
Spostamenti in direzione MV del concio 11 – Modello PoliMi.

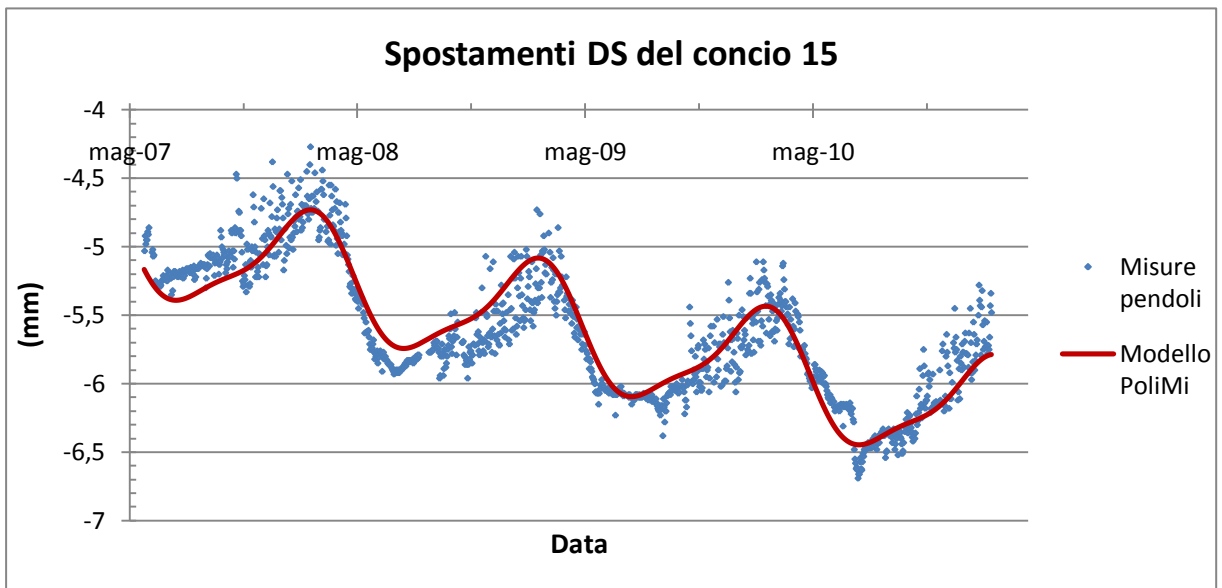


**Figura D. 4**  
Spostamenti in direzione MV del concio 11 – Modello PoliMi.

**Concio 15**

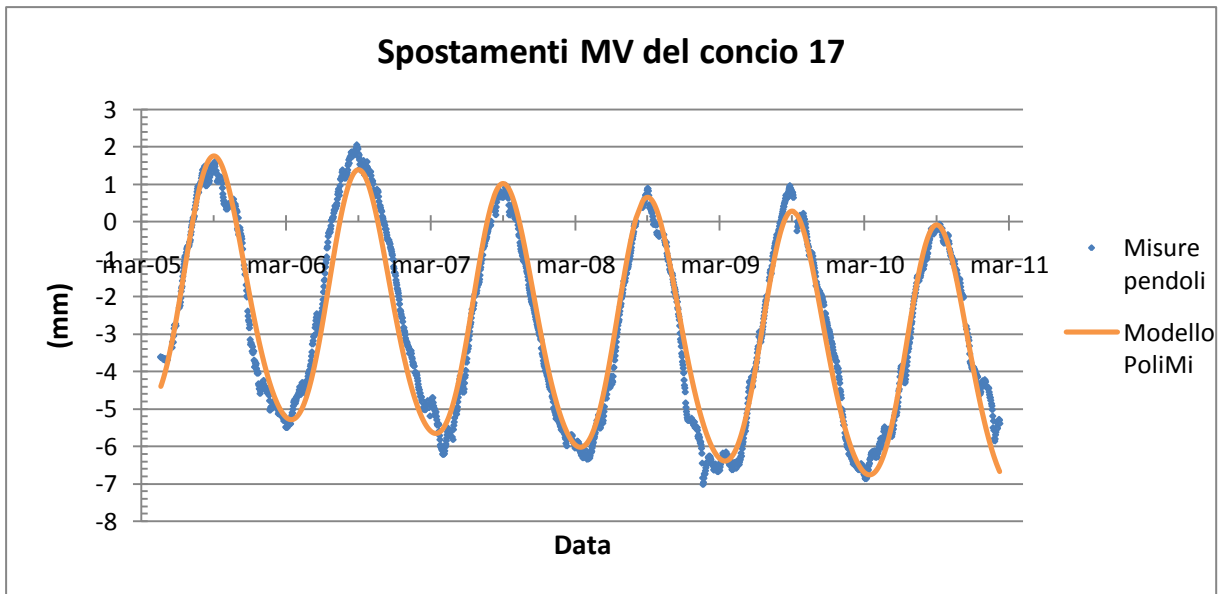


**Figura D. 5**  
Spostamenti in direzione MV del concio 15 – Modello PoliMi.

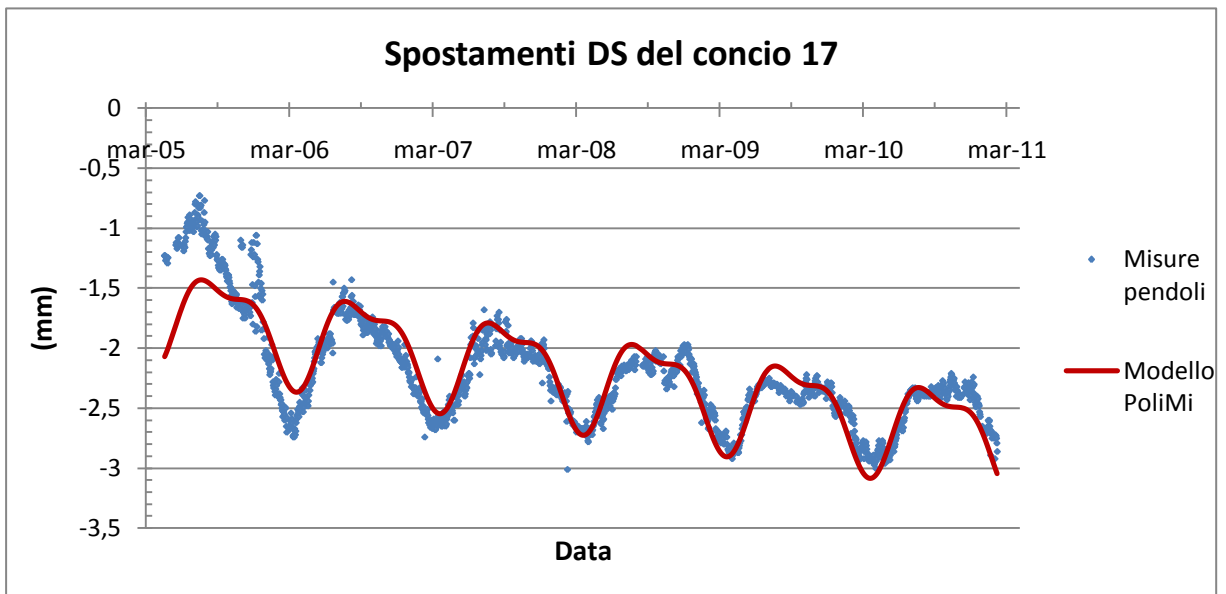


**Figura D. 6**  
Spostamenti in direzione DS del concio 15 – Modello PoliMi.

**Concio 17**



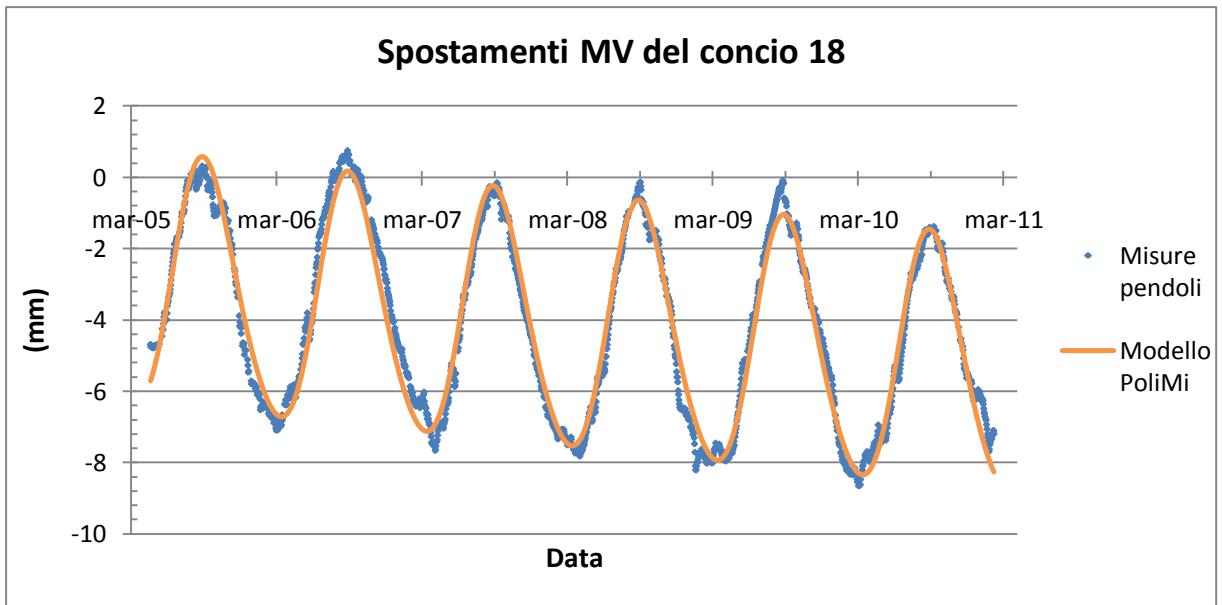
**Figura D. 7**  
Spostamenti in direzione MV del concio 17 – Modello PoliMi.



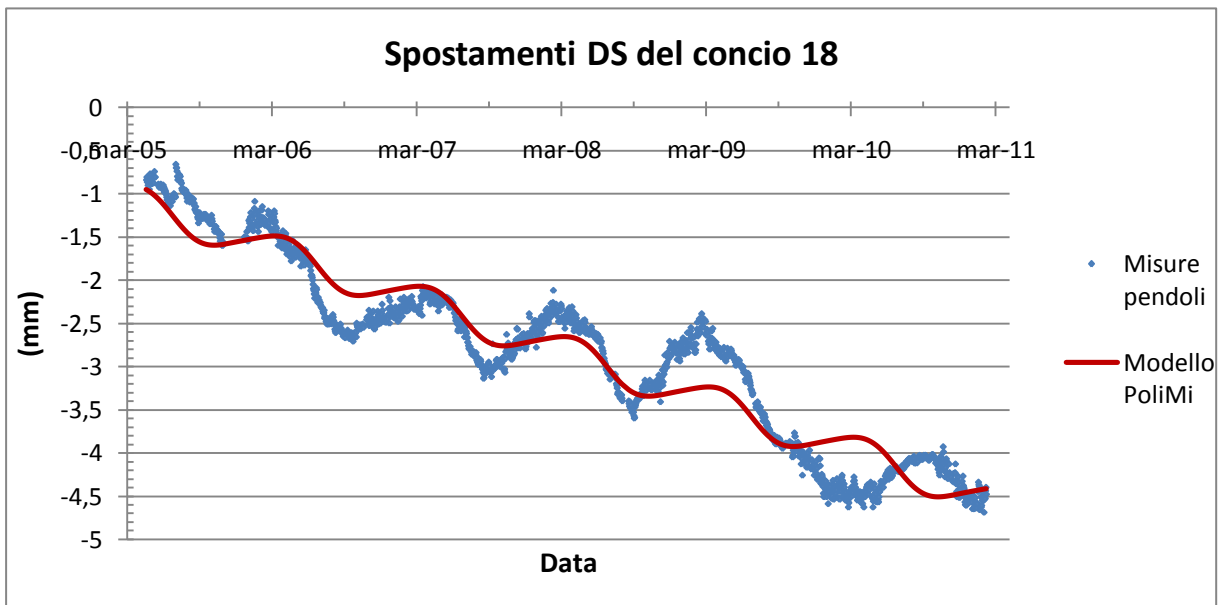
**Figura D. 8**  
Spostamenti in direzione DS del concio 17 – Modello PoliMi.



**Concio 18**

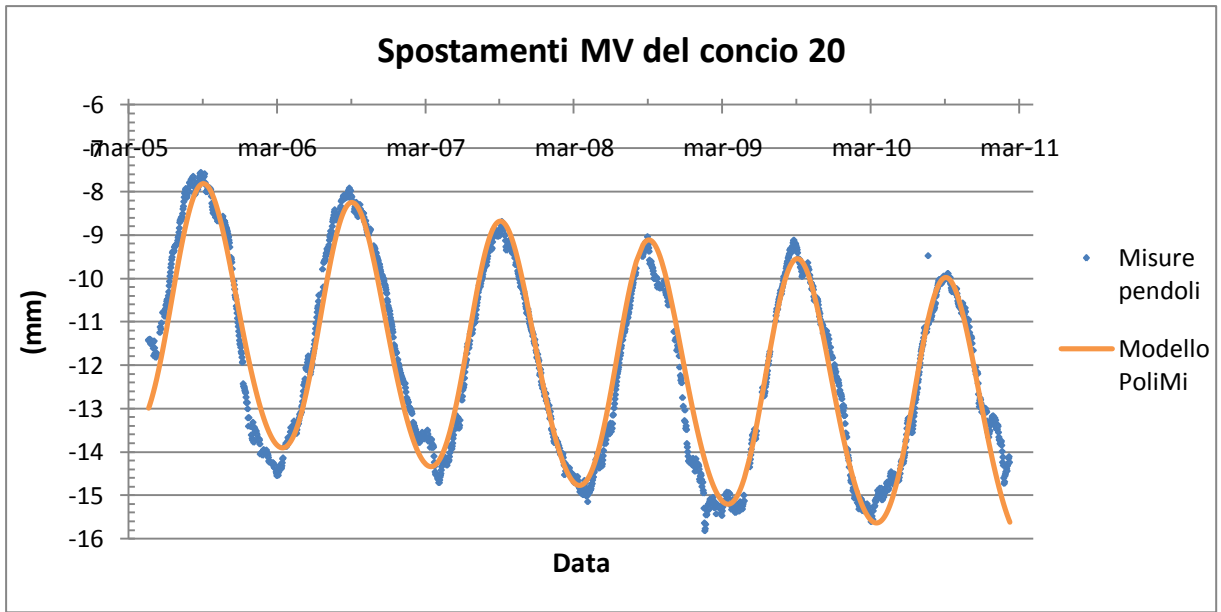


**Figura D. 9**  
Spostamenti in direzione MV del concio 18 – Modello PoliMi.

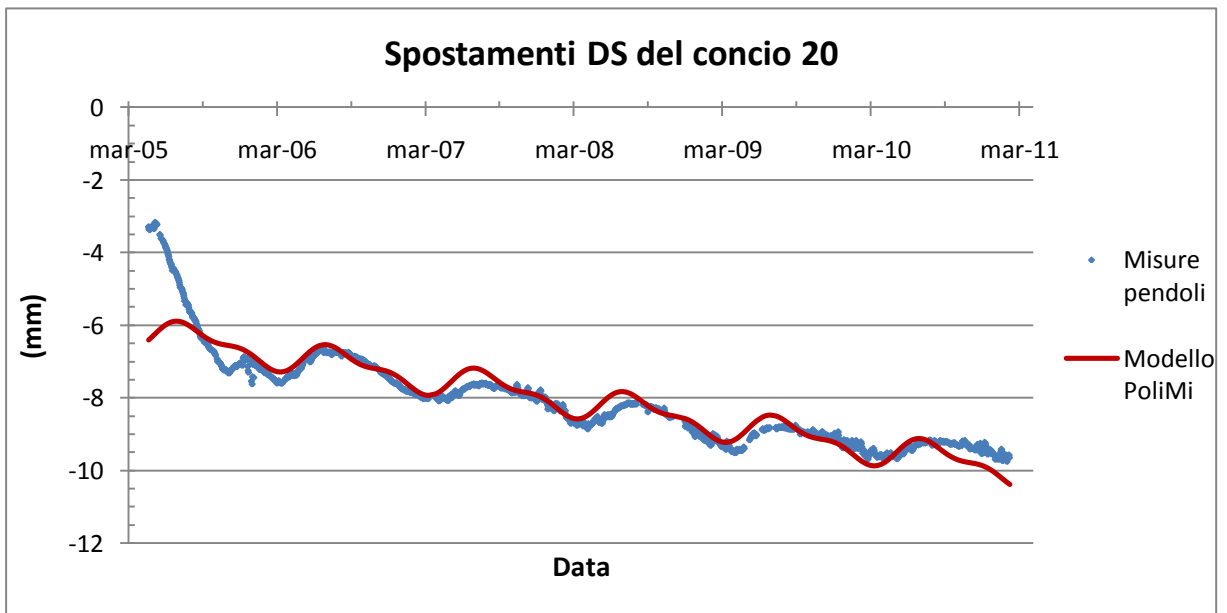


**Figura D. 10**  
Spostamenti in direzione DS del concio 18 – Modello PoliMi.

**Concio 20**

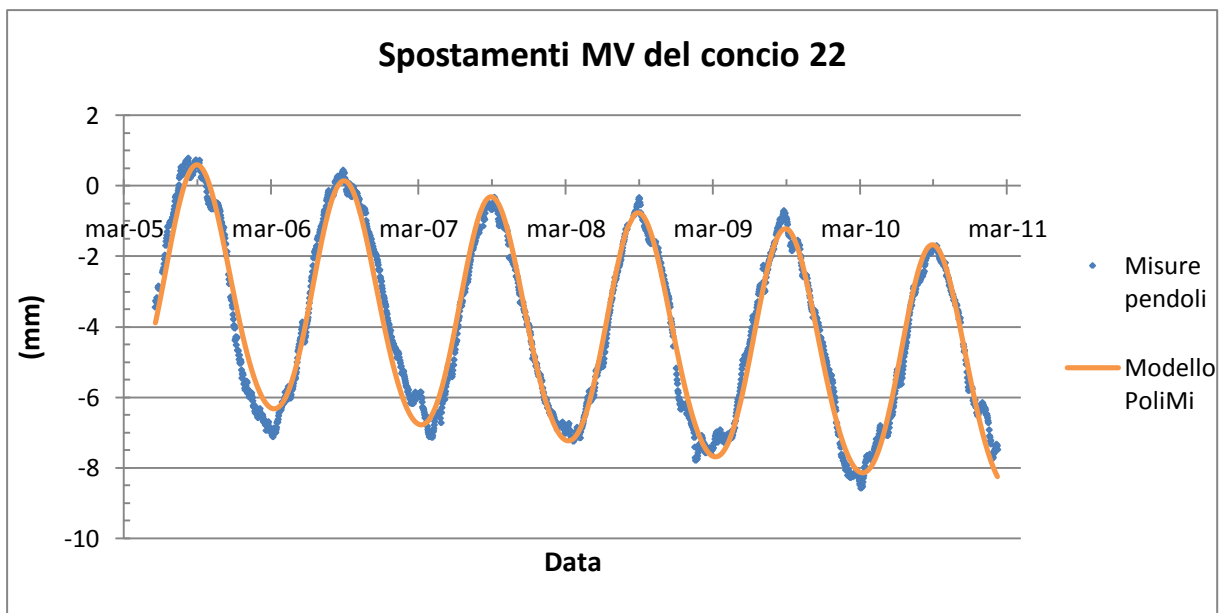


**Figura D. 11**  
Spostamenti in direzione MV del concio 20 – Modello PoliMi.

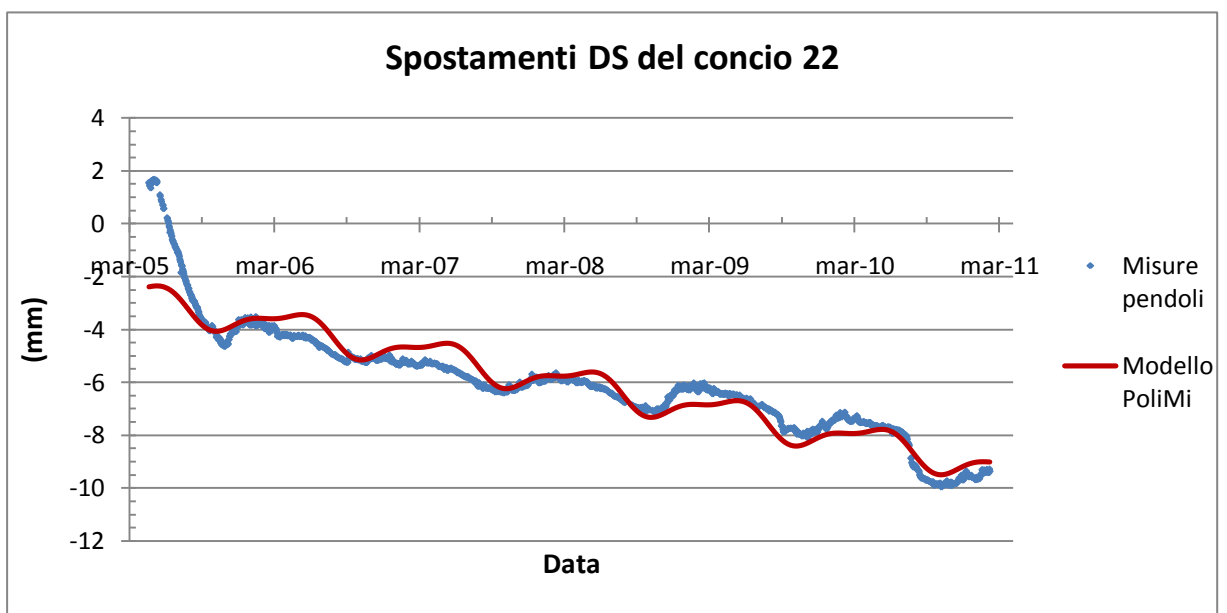


**Figura D. 12**  
Spostamenti in direzione DS del concio 20 – Modello PoliMi.

**Concio 22**

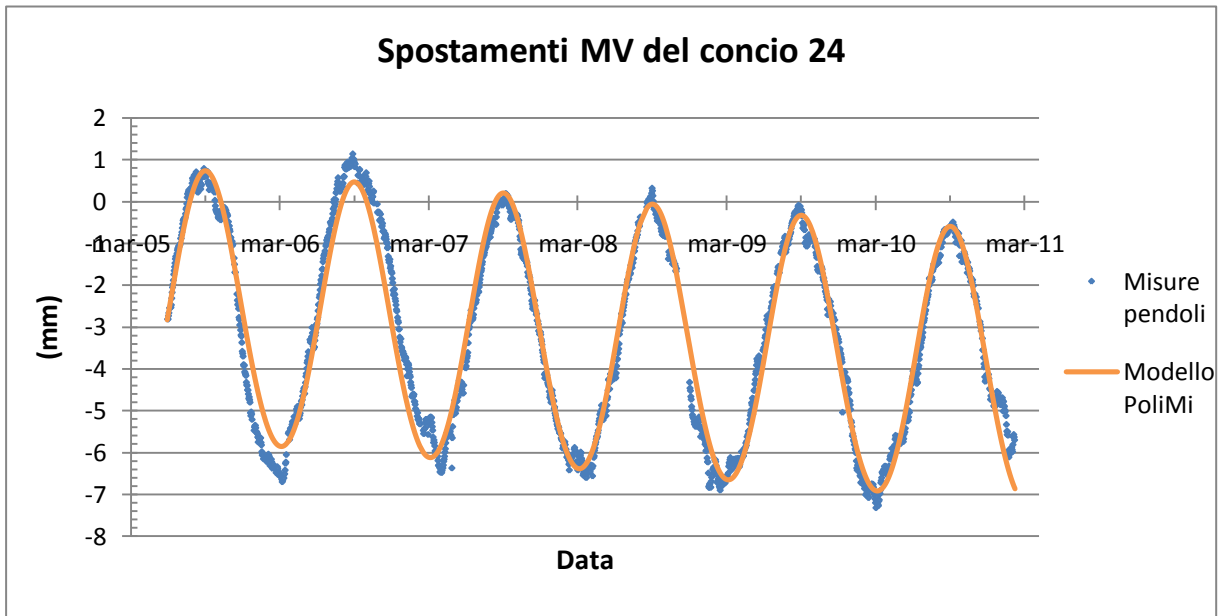


**Figura D. 13**  
Spostamenti in direzione MV del concio 22 – Modello PoliMi.

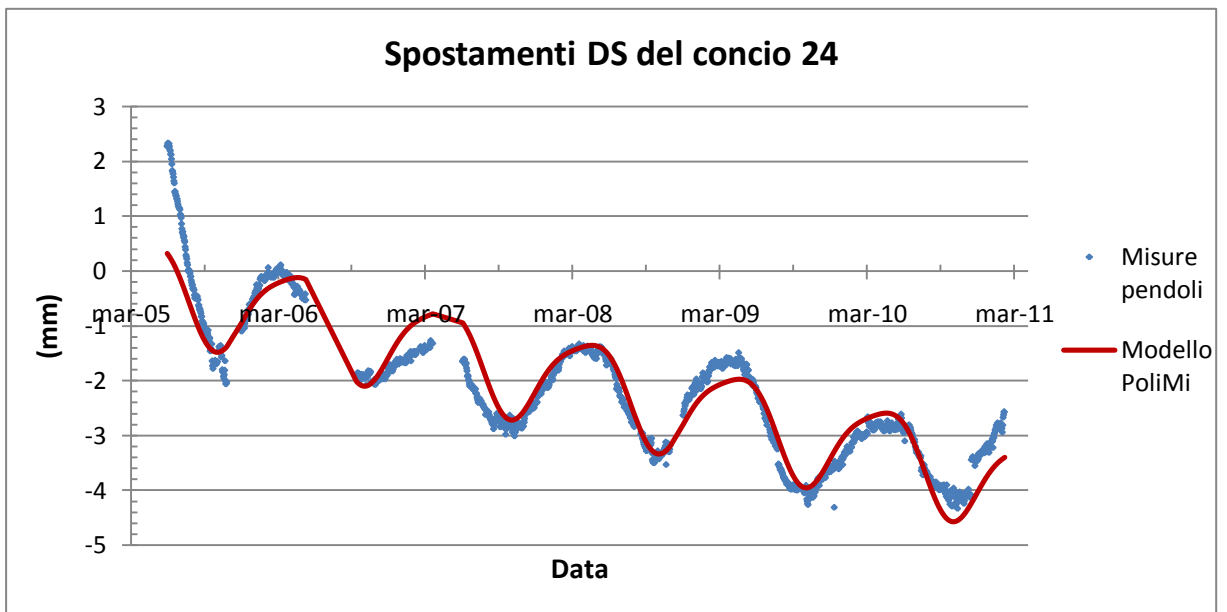


**Figura D. 14**  
Spostamenti in direzione DS del concio 22 – Modello PoliMi.

**Concio 24**

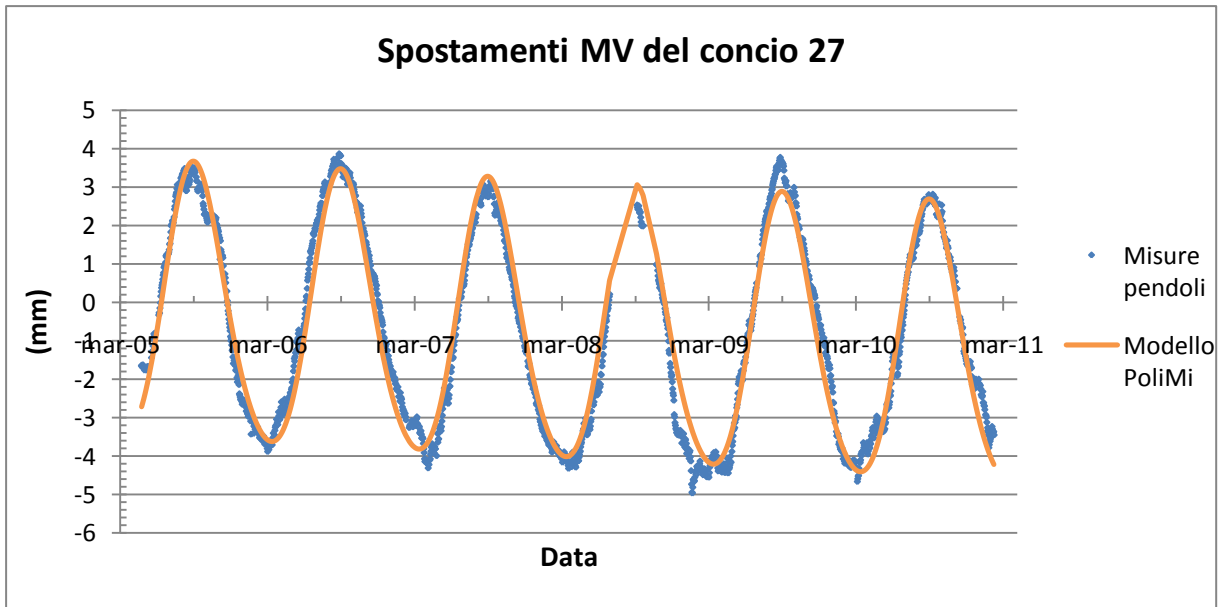


**Figura D. 15**  
Spostamenti in direzione MV del concio 24 – Modello PoliMi.

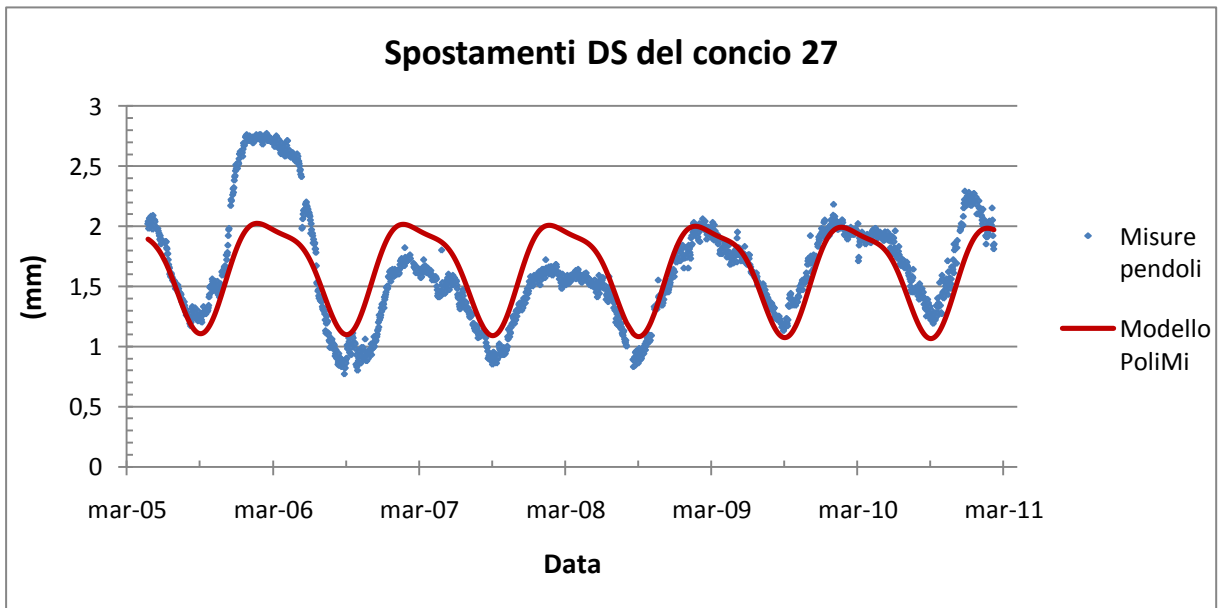


**Figura D. 16**  
Spostamenti in direzione DS del concio 24 – Modello PoliMi.

**Concio 27**

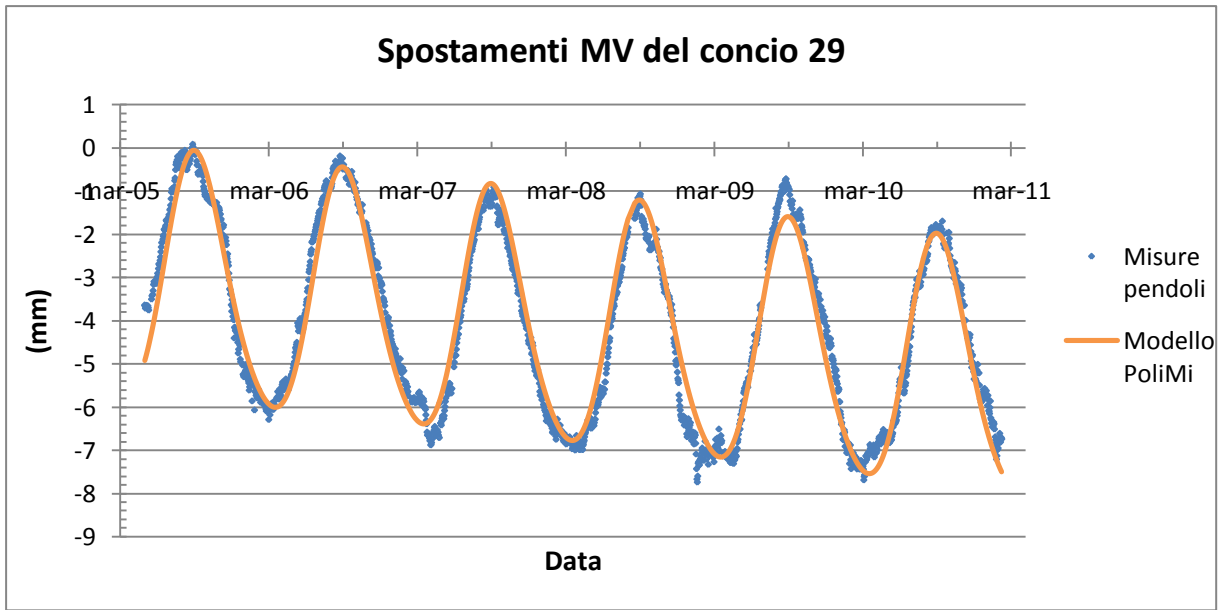


**Figura D. 17**  
Spostamenti in direzione MV del concio 27 – Modello PoliMi.

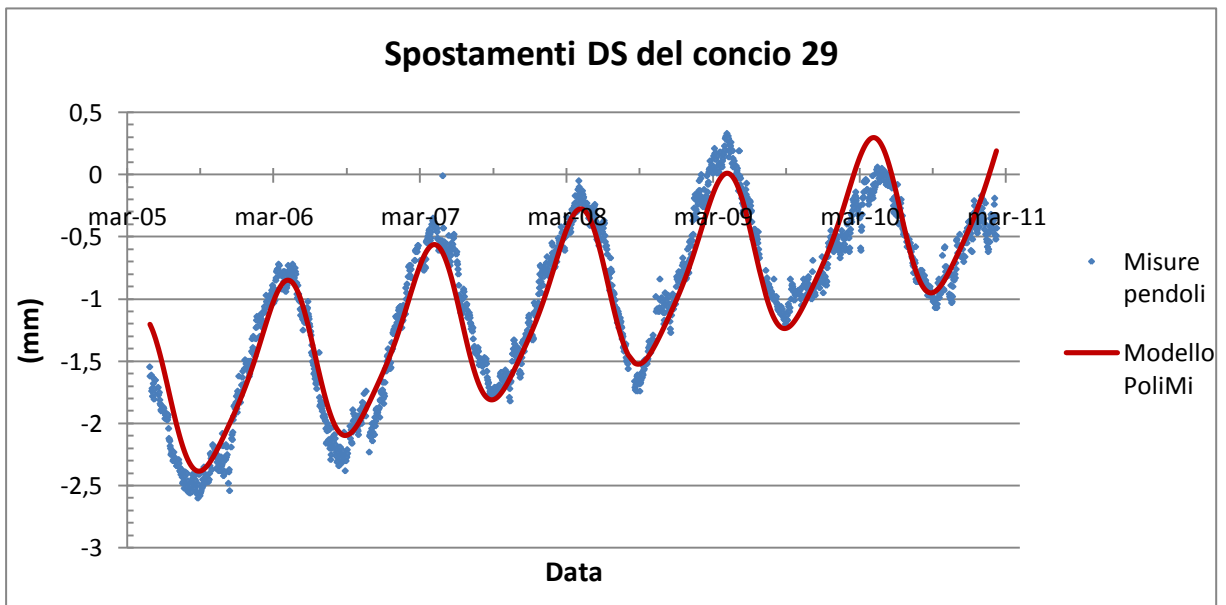


**Figura D. 18**  
Spostamenti in direzione DS del concio 27 – Modello PoliMi.

**Concio 29**



**Figura D. 19**  
Spostamenti in direzione MV del concio 29 – Modello PoliMi.



**Figura D. 20**  
Spostamenti in direzione DS del concio 29 – Modello PoliMi.

# BIBLIOGRAFIA

## Da libri:

Ajovalasit A. (2008). *Analisi sperimentale delle tensioni con gli estensimetri elettrici a resistenza*, Aracne Editrice, Roma.

Bramanti M. (1997). *Calcolo delle Probabilità e Statistica per il Corso di Diploma in Ingegneria. Teoria ed esercizi*, Progetto Leonardo, Bologna.

Cazzaniga N. E. (2008). *Trattamento dei dati*, Maggioli Editore, Santarcangelo Di Romagna (RN).

Cina A. (2002). *Trattamento delle misure topografiche. Teoria ed esercizi*, Celid, Torino.

Evangelisti G. (1982). *Impianti idroelettrici*, Vol. I, II, Pàtron Editore, Bologna.

Manzino A. (2000). *Lezioni di topografia*, Dipartimento di Georisorse e Territorio del Politecnico di Torino, Otto Editore, Torino.

Monti C., Pinto L. (2002). *Trattamento dei dati topografici e cartografici*, Libreria CLUP, Milano.

Rosso R. (2002). *Manuale di protezione idraulica del territorio*, CUSL, Milano.

## Da riviste:

Branzanti M., Colosimo G., Crespi M., Mazzoni A., Dautermann T. (2011). *Una strategia semplice per la GPS Seismology e i sistemi di early warning per gli tsunami denominata VADASE*, GEOmedia, No 1 – 2011, 12 – 15.

Carosio A., Dupraz H. (1993). *Mesures de deformation géodesiques et photogrammétriques pour la surveillance des ouvrages de retenue (Exploitation, precision et fiabilité)*, Wasser, Energie, Luft, N. 85/9.

De Sortis A., Paoliani P. (2007). *Statistical analysis and structural identification in concrete dam monitoring*, Engineering Structures, Vol. 29, Issue 1, January 2007, 110 – 120.

Lombardi G. (2004). *La modellazione nel campo delle dighe in calcestruzzo*, Problemi strutturali dell'ingegneria delle dighe, Conferenza del 26 febbraio 2004, Accademia Nazionale dei Lincei, Roma.

## Da dispense:

Balletti C. (2002). *La tecnica topografica nei collaudi e controlli di grandi strutture*, corso di laurea in Architettura, Università Iuav di Venezia, Venezia.

Bianchi A. (2010). *Dispense del corso di impianti speciali idraulici*, corso di laurea in Ingegneria Civile, Politecnico di Milano, Milano.

Debei S. (2008). *Dispense del corso di misurazione e metrologia meccanica generale*, corso di laurea in Ingegneria Meccanica, Università degli Studi di Padova, Padova.

Fregonese L. (2010). *Dispense del corso di topografia 2*, corso di laurea in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio, Politecnico di Milano, Milano.



Galetto R., Spalla A. (2000). *Lezioni di topografia*, corso di laurea in Ingegneria Civile, Università degli Studi di Pavia, Pavia.

Mantica I. (1993). *Lezioni di Costruzioni Idrauliche*, corso di laurea in Ingegneria Civile, Università degli studi di Ancona, Ancona.

Pinto L. (2010). *Dispense del corso di topografia e trattamento delle osservazioni*, corso di laurea in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio, Politecnico di Milano, sede di Cremona, Cremona.

Spalla A. (2010). *Dispense del corso di topografia*, corso di laurea in Ingegneria Civile, Università degli Studi di Pavia, Pavia.

### **Da tesi:**

Gaetani M. E. (2008). *Controllo di strutture mediante metodologie GPS*, Tesi di dottorato in Geodesia e Geomatica, Politecnico di Milano, Milano.

### **Da siti internet:**

#### **Agisco:**

<http://www.agisco.it/>

Data di ultima consultazione: agosto 2011

#### **Consorzio di Bonifica del Cixerri:**

<http://www.consorziobonificacixerri.it/>

Data di ultima consultazione: agosto 2011

**Consorzio di Bonifica dell'Oristanese:**

*<http://www.bonificaoristanese.it/>*

Data di ultima consultazione: agosto 2011

**Enea:**

*<http://www.afs.enea.it/>*

Data di ultima consultazione: giugno 2011

**Enel:**

*<http://www.enel.it/>*

Data di ultima consultazione: agosto 2011

**Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia:**

*<http://www.ingv.it/>*

Data di ultima consultazione: settembre 2011

**Progetto dighe:**

*<http://www.progettodighe.it/>*

Data di ultima consultazione: agosto 2011

**Regione Lombardia:**

*<http://www.trasporti.regione.lombardia.it/>*

Data di ultima consultazione: settembre 2011

**Regione Sardegna:**

*<http://www.regione.sardegna.it/>*

Data di ultima consultazione: settembre 2011

**Registro Italiano Dighe:**

*<http://www.registroitalianodighe.it/leg.html>*

*[http://web.tiscali.it/sndcagliari/Schede/Cantoniera\\_it.htm](http://web.tiscali.it/sndcagliari/Schede/Cantoniera_it.htm)*

Data di ultima consultazione: agosto 2011

**U.S. Geological Survey:**

*<http://www.usgs.gov/>*

Data di ultima consultazione: settembre 2011

**Wikipedia:**

*<http://it.wikipedia.org/>*

Data di ultima consultazione: settembre 2011

