

Università degli studi di Napoli Federico II



Scuola Politecnica e delle Scienze di Base

Dottorato di ricerca in Ingegneria dei Sistemi Idraulici, di Trasporto e Territoriali

Indirizzo “Infrastrutture viarie e sistemi di trasporto”

XXVII ciclo

Candidata:

Elisabetta Miraglia

**Un contributo sull’analisi delle difettosità geometriche del binario
ai fini della manutenzione delle linee ferroviarie**

Coordinatore di dottorato:

Prof. Arch. Elvira Petroncelli

Relatore:

Prof. Ing. Bruna Festa

Controrelatore:

Prof. Ing. Mauro D’Apuzzo

Anno accademico 2013/2014

Indice dei contenuti

Ringraziamenti	1
Premessa	1
1. Introduzione.....	3
1.1 Obiettivi.....	3
1.2 Metodologia proposta.....	4
2. Stato dell'arte.....	8
3 Il degrado delle sovrastrutture ferroviarie	19
3.1 I difetti del binario	20
3.1.2 Difetti geometrici del binario: scartamento, sopraelevazione e sghembo	24
3.1.3 Indici di qualità del binario.....	30
3.2 I modelli di degrado.....	31
3.3 Strumenti di misura dei difetti del binario.....	35
3.4 Metodologie di elaborazione delle misure, la funzione di densità spettrale di potenza (PSD).....	46
4 Il fenomeno dello svio	54

4.1	Condizioni fisiche di instabilità allo svio e misure preventive.....	60
5	La manutenzione delle infrastrutture ferroviarie	70
5.1	Apparecchiature per la manutenzione	75
5.2	I sistemi RAMS (Railway Asset Management System).....	86
6	Analisi sperimentale	89
6.1	Le linee ferroviarie oggetto di indagine.....	89
6.2	Gli strumenti di misura ad elevato rendimento utilizzati ai fini della sperimentazione	91
6.2.1	il sistema POS/TG	91
6.2.2	Descrizione grandezze monitorate con il POS/TG	94
6.2.3	Il sistema SMAMID	96
6.4	Descrizione campagna sperimentale	98
6.4.1	La linea Napoli-San Giorgio.....	98
6.4.2	Applicazione caso studio linea Napoli-Sorrento	115
6.4.3	Applicazione caso studio linea Napoli-Sarno.....	121
6.4.4	Applicazione caso studio linea Napoli-Baiano.....	138
7	Estensione dei risultati all'intera rete	162
8	Conclusioni e sviluppi futuri	167
	Bibliografia.....	173
	Appendice A – Statistiche applicate: le Spline.....	180
	Appendice B – Statistiche applicate: le Catene di Markov	187
	Appendice C – Caratteristiche dei carichi in termini di traffico agente sulla sovrastruttura	192

Appendice D – Caratteristiche tecniche del materiale rotabile transitante sulle linee.....	195
Appendice E – Livelli di qualità geometrica del binario stabiliti dalla norma UNI EN 13848-5.....	205
Appendice F – Matrici di Probabilità di Transizione (TPM) calibrate mediante catene di Markov.	209
Appendice G – Power Spectral Density function (PSD) calibrate per la linea Napoli – Baiano.....	232

Indice delle figure

Figura 3.1: Difetti delle rotaie: a) tasche ovali; b) disgregazione della superficie di rotolamento; c) ondulazioni; d) sgranamento; e) deformazione; f) fessurazioni; g) schema di usura della sezione del fungo laterale, verticale e deformazioni plastiche; h) ammaccatura.....	23
Figura 3.2: Scartamento (Gauge).....	25
Figura 3.3: Livello trasversale (Cross level)	26
Figura 3.4: Schema relativo all'utilizzo dei modelli di degrado come previsione di interventi di manutenzione.	32
Figura 3.5: Esempio di sistema di monitoraggio del binario con tecnologia ad ultrasuoni.	44
Figura 3.6: Spettro spaziale verticale basico (SAB Swedel) (DB).....	50
Figura 3.7: Spettro spaziale verticale spezzato a due rette (British Railways).....	52
Figura 3.8: Spettro spaziale verticale spezzato raccordato (SNCF).	53
Figura 4.1: Sequenza di svio di una ruota ferroviaria.....	54
Figura 4.2: Schema delle forze agenti nel punto di contatto ruota-rotaia.....	56
Figura 4.3: Angolo d'attacco della sala montata.	58
Figura 4.4: Andamento del coefficiente d'attrito ruota-rotaia in funzione della velocità di fiancata (a); andamento del limite di svio di Nadal in funzione del coefficiente d'attrito ruota rotaia e dell'angolo di inclinazione del bordino (b).	62
Figura 4.5: Traslazione della sede ferroviaria (Lateral track panel shift).....	64
Figura 4.6: Deragliamento causato da un eccessivo valore dello scartamento.....	65
Figura 4.7: Schematizzazione del carrello di un veicolo con relative rigidzze.....	66

Figura 4.8: Schema del veicolo ferroviario ai fini del calcolo dell'incremento di carico causato dagli sghembi.....	68
Figura 4.9: Installazione di controrotaie come misura preventiva dello svio.....	69
Figura 5.1: Moti secondari al moto di avanzamento secondo i tre assi.....	71
Figura 5.2: Catena di degrado della sovrastruttura ferroviaria.....	72
Figura 5.3: Esempio di miglioramento di un parametro della linea a seguito di interventi di manutenzione.....	77
Figura 5.4: insieme delle principali operazioni per la manutenzione e il rinnovamento.....	79
Figura 5.5: Insieme delle principali operazioni e macchine per la manutenzione.....	80
Figura 5.6: Mmacchina per la riprofilatura del ballast.....	83
Figura 5.7: Macchina per la riprofilatura delle rotaie.....	83
Figura 5.8: Macchina rinalzatrice.....	84
Figura 5.9: Dettaglio che evidenzia il principio di funzionamento dell'operazione di rinalzatura.....	84
Figura 5.10: Schema con configurazione dei vagoni del treno Dia.man.te.....	86
Figura 6.1: Schema delle linee della ex Circumvesuviana.....	90
Figura 6.2: Sistema ottico di rilevamento dello scartamento OGMS.....	92
Figura 6.3: Architettura del sistema POS/TG.....	93
Figura 6.4: Cabina di controllo del sistema POS/TG.....	93
Figura 6.5: Particolare del POS/TG montato sul carrello di un veicolo.....	93
Figura 6.6: Esempio di output grafico restituito dallo strumento Plasser POS/TG.....	94
Figura 6.7: Esempio di output numerico restituito dallo strumento Plasser POS/TG.....	95
Figura 6.8: Unità funzionale del sensore SMAMID.....	97
Figura 6.9: Unità funzionale installata in boccia.....	98
Figura 6.10: Tipico andamento dei parametri oggetto di indagine in funzione della progressiva chilometrica. (a) Sghembo; (b) Scartamento; (c) Sopraelevazione; (d) diagramma delle curvature.....	100
Figura 6.11: Andamento dei valori medi di scartamento normalizzati in corrispondenza dei rettili della linea Napoli – S. Giorgio appartenenti al gruppo 3 rapportati alla temperatura ambientale.....	104

Figura 6.12: Andamento dei valori medi di scartamento in corrispondenza dei rettifili della linea Napoli – S. Giorgio appartenenti al gruppo 2 rapportati alla temperatura ambientale.	104
Figura 6.13: Equilibrio delle forze agenti su un veicolo in curva.	105
Figura 6.14: Grafico a dispersione e linea di tendenza della sopraelevazione normalizzata in funzione del parametro X_1 per le curve della linea Napoli – S. Giorgio.	107
Figura 6.15: Modello di regressione ottenuto per le curve della linea Napoli – S.Giorgio, usato per calibrare le catene di Markov.....	109
Figura 6.16: Grafico a dispersione e linea di tendenza dello sghembo normalizzato in funzione del parametro X_2 per le curve di transizione della linea Napoli – S. Giorgio.	110
Figura 6.17.: Basi ricavate utilizzando come predittori i valori relativi alla tratta Napoli-San Giorgio.....	112
Figura 6.18: Andamento dei dati di sopraelevazione normalizzata in funzione del parametro di degrado X_1 , relativi alla linea Napoli-San Giorgio.	112
Figura 6.19: Funzione spline costruita sui dati di sopraelevazione normalizzata relativi alla tratta Napoli-San Giorgio.	113
Figura 6.20: Diverse spline (in rosso) calcolate per descrivere gli andamenti dei valori medi di sopraelevazione in funzione del tempo, rilevati sulla linea della Circumvesuviana Napoli - San. Giorgio.	113
Figura 6.21: Valori delle $y_{unobserved}$ ottenute variando il parametro temporale x , da utilizzare nella calibrazione delle catene di Markov.	114
Figura 6.22: Modello di regressione di funzione di potenza ottenuto per i dati di sopraelevazione in funzione del parametro X_1 per le curve della linea Napoli - S.Giorgio.	115
Figura 6.23: Modello di regressione di funzione di potenza ottenuto per i dati di sghembo in funzione del parametro X_2 per le curve di transizione della linea Napoli - S.Giorgio.	115
Figura 6.24: Tipico andamento delle velocità di fiancata lungo la linea Napoli – Sorrento.	116
Figura 6.25: Andamento dei valori medi di scartamento in corrispondenza dei rettifili della linea Napoli – Sorrento appartenenti al gruppo 1 rapportati alla temperatura ambientale.	117

Figura 6.26: Andamento dei valori medi di scartamento in corrispondenza dei rettifili della linea Napoli – Sorrento appartenenti al gruppo 2 rapportati alla temperatura ambientale.	117
Figura 6.27: Andamento dei valori medi di scartamento in corrispondenza dei rettifili della linea Napoli – Sorrento appartenenti al gruppo 3 rapportati alla temperatura ambientale.	118
Figura 6.28: Grafico a dispersione e linea di tendenza della sopraelevazione normalizzata in funzione del parametro X_1 per le curve della linea Napoli – Sorrento.	118
Figura 6.29: Grafico a dispersione e linea di tendenza dello sghembo normalizzato in funzione del parametro X_2 per le curve di transizione della linea Napoli – Sorrento.	119
Figura 6.30: Modello di regressione ottenuto per le curve della linea Napoli – Sorrento, usato per calibrare le catene di Markov.	119
Figura 6.31: Modello di regressione ottenuto per le curve di transizione della linea Napoli – Sorrento, usato per calibrare le catene di Markov.	120
Figura 6.32: Modello di regressione di funzione di potenza ottenuto per i dati di sopraelevazione in funzione del parametro X_1 per le curve della linea Napoli - Sorrento.	121
Figura 6.33: Modello di regressione di funzione di potenza ottenuto per i dati di sghembo in funzione del parametro X_2 per le curve di transizione della linea Napoli - Sorrento. ...	121
Figura 6.34: Andamento dei valori medi di scartamento in corrispondenza dei rettifili della linea Napoli – Sarno appartenenti al gruppo 1 rapportati alla temperatura ambientale.	122
Figura 6.35: Andamento dei valori medi di scartamento in corrispondenza dei rettifili della linea Napoli – Sarno appartenenti al gruppo 2 rapportati alla temperatura ambientale.	122
Figura 6.36: Andamento dei valori medi di scartamento in corrispondenza dei rettifili della linea Napoli – Sarno appartenenti al gruppo 3 rapportati alla temperatura ambientale.	123
Figura 6.37: Grafico a dispersione e linea di tendenza della sopraelevazione normalizzata in funzione del parametro X_1 per le curve della linea Napoli – Sarno.	124
Figura 6.38: Grafico a dispersione e linea di tendenza dello sghembo normalizzato in funzione del parametro X_2 per le curve di transizione della linea Napoli – Sarno.	124
Figura 6.39: Modello di regressione ottenuto per le curve della linea Napoli – Sarno, usato per calibrare le catene di Markov.	125

Figura 6.40: Modello di regressione ottenuto per le curve di transizione della linea Napoli – Sarno, usato per calibrare le catene di Markov.....	126
Figura 6.41: Modello di regressione di funzione di potenza ottenuto per i dati di sopraelevazione in funzione del parametro X1 per le curve della linea Napoli - Sarno....	127
Figura 6.42: Modello di regressione di funzione di potenza ottenuto per i dati di sghebo in funzione del parametro X2 per le curve di transizione della linea Napoli - Sarno.....	127
Figura 6.43: Andamento delle velocità e delle curvature fornite dal POS/TG in corrispondenza di una tratta analizzata compresa tra due stazioni.	129
Figura 6.44: Esempio di output dei dati di accelerazione monitorati con lo SMAMID....	129
Figura 6.45: Dati SMAMID filtrati mediante tecniche a media mobile.....	130
Figura 6.46: Accelerazioni trasversali calcolate tramite i valori output del POS/TG.	131
Figura 6.47: Stazioni della tratta Napoli-Sarno.	132
Figura 6.48: Schema di posizionamento degli 8 sensori SMAMID utilizzati per il monitoraggio delle accelerazioni in boccia.	132
Figura 6.49: Sovrapposizione dei dati accelerometrici monitorati in direzione trasversale degli 8 SMAMID installati in boccia a) visione di insieme, b) particolare per la tratta Somma – Rione.	133
Figura 6.50: Confronto dati accelerometrici (in alto i valori SMAMID, in basso i valori del PLASSER).....	135
Figura 6.51: Punti singolari della tratta Flocco – Poggiomarino individuati mediante gli strumenti POS/TG e SMAMID.	136
Figura 6.52: Punti singolari della tratta della tratta Ottaviano – S. Leonardo individuati mediante gli strumenti POS/TG e SMAMID.	136
Figura 6.53: Punti singolari della tratta della tratta Cercola – Polena individuati mediante gli strumenti POS/TG e SMAMID.....	137
Figura 6.54: Punti singolari individuati in corrispondenza dei valori altimetrici della linea.	137
Figura 6.55: Andamento dei valori medi di scartamento in corrispondenza dei rettifili della linea Napoli – Baiano appartenenti al gruppo 1 rapportati alla temperatura ambientale...	139
Figura 6.56: Andamento dei valori medi di scartamento in corrispondenza dei rettifili della linea Napoli – Baiano appartenenti al gruppo 2 rapportati alla temperatura ambientale...	139

Figura 6.57: Andamento dei valori medi di scartamento in corrispondenza dei rettifili della linea Napoli – Baiano appartenenti al gruppo 3 rapportati alla temperatura ambientale...	140
Figura 6.58: Grafico a dispersione e linea di tendenza della sopraelevazione normalizzata in funzione del parametro X_1 per le curve della linea Napoli – Baiano.....	141
Figura 6.59: Grafico a dispersione e linea di tendenza dello sghembo normalizzata in funzione del parametro X_2 per le curve della linea Napoli – Baiano.....	141
Figura 6.60: Andamento dei dati di sopraelevazione normalizzata in funzione del parametro di degrado x , relativi alla linea Napoli-Baiano, con funzione spline in rosso..	142
Figura 6.61: Andamento dei dati di sopraelevazione normalizzata in funzione del parametro di degrado x , relativi alla linea Napoli-Baiano, con diverse spline al variare del parametro \square	142
Figura 6.62: Modello di regressione ottenuto per le curve della linea Napoli – Baiano, usato per calibrare le catene di Markov.....	143
Figura 6.63: Modello di regressione ottenuto per le curve di transizione della linea Napoli – Baiano, usato per calibrare le catene di Markov.....	144
Figura 6.64: Modello di regressione di funzione di potenza ottenuto per i dati di sopraelevazione in funzione del parametro X_1 per le curve della linea Napoli – Baiano.	145
Figura 6.65: Modello di regressione di funzione di potenza ottenuto per i dati di sghembo in funzione del parametro X_2 per le curve di transizione della linea Napoli - Sarno.....	145
Figura 6.66: PSD rettifilo 2 anno 2009 Napoli – Baiano.	148
Figura 6.67: PSD rettifilo 2 anno 2012 Napoli – Baiano.	148
Figura 6.68: PSD rettifilo 2 anno 2014 Napoli – Baiano.	148
Figura 6.69: PSD - smoothed rettifilo 2 anno 2009 Napoli – Baiano.....	150
Figura 6.70: PSD - smoothed rettifilo 2 anno 2012 Napoli – Baiano.....	150
Figura 6.71: PSD - smoothed rettifilo 2 anno 2014 Napoli – Baiano.....	150
Figura 6.72: PSD rettifilo 2 anno 2009 Baiano – Napoli.	151
Figura 6.73: PSD rettifilo 2 anno 2012 Baiano – Napoli.	151
Figura 6.74: PSD rettifilo 2 anno 2014 Baiano – Napoli.	152
Figura 6.75: PSD - smoothed rettifilo 2 anno 2014 Baiano – Napoli.....	153
Figura 6.76: PSD - smoothed rettifilo 2 anno 2014 Baiano – Napoli.....	154
Figura 6.77: PSD - smoothed rettifilo 2 anno 2014 Baiano – Napoli.....	154

Figura 6.78: PSD curva 54 anno 2009 Napoli Baiano.....	155
Figura 6.79: PSD curva 54 anno 2012 Napoli Baiano.....	155
Figura 6.80: PSD curva 54 anno 2014 Napoli Baiano.....	155
Figura 6.81: PSD smoothed curva 54 anno 2009 Napoli Baiano.....	157
Figura 6.82: PSD smoothed curva 54 anno 2012 Napoli Baiano.....	157
Figura 6.83: PSD smoothed curva 54 anno 2014 Napoli Baiano.....	158
Figura 6.84: PSD curva 54 anno 2009 Baiano – Napoli.....	158
Figura 6.85: PSD curva 54 anno 2012 Baiano – Napoli.....	159
Figura 6.86: PSD curva 54 anno 2014 Baiano – Napoli.....	159
Figura 6.87: PSD smoothed curva 54 anno 2009 Baiano - Napoli.....	161
Figura 6.88: PSD smoothed curva 54 anno 2012 Baiano – Napoli.....	161
Figura 6.89: PSD smoothed curva 54 anno 2014 Baiano – Napoli.....	161
Figura 7.1: Modello di regressione ottenuto per la sopraelevazione in funzione del parametro X1 esteso alle curve delle 4 tratte analizzate della ex Circumvesuviana.....	164
Figura 7.2: Modello di regressione ottenuto per lo sghembo in funzione del parametro X2 esteso alle curve di transizione delle 4 tratte analizzate della ex Circumvesuviana.....	165
Figura B 1: Esempio di grafo utilizzato come alternativa alla matrice di probabilità di transizione delle catene di Markov.	188
Figura B 2: Modello di regressione ottenuto per i dati di sopraelevazione in corrispondenza delle curve della tratta Napoli-San Giorgio, utilizzato per la calibrazione delle catene di Markov.....	191
Figura D 1: Treno ETR Fe220.	196
Figura D 2: Figurino ETR Fe220.....	198
Figura D 3: Treno ETR T21.....	199
Figura D 4: Figurino ETR T21.....	201
Figura D 5: Treno ETR 200 METROSTAR.....	202
Figura D 6: Figurino ETR 200 METROST.....	204
Figura G 1: PSD rettilineo 57anno 2009 Napoli – Baiano.	232

Figura G 2: PSD rettifilo 57 anno 2012 Napoli – Baiano.....	233
Figura G 3: PSD rettifilo 57 anno 2014 Napoli – Baiano.....	233
Figura G 4: PSD – smoothed rettifilo 57 anno 2009 Napoli – Baiano.	235
Figura G 5: PSD – smoothed rettifilo 57 anno 2012 Napoli – Baiano.	235
Figura G 6: PSD – smoothed rettifilo 57 anno 2014 Napoli – Baiano.	235
Figura G 7: PSD rettifilo 57 anno 2009 Baiano - Napoli.	236
Figura G 8: PSD rettifilo 57 anno 2012 Baiano – Napoli.....	236
Figura G 9: PSD rettifilo 57 anno 2012 Baiano - Napoli.	236
Figura G 10: PSD Smoothed rettifilo 57 anno 2009 Baiano - Napoli.	238
Figura G 11: PSD Smoothed rettifilo 57 anno 2012 Baiano – Napoli.	238
Figura G 12: PSD Smoothed rettifilo 57 anno 2014 Baiano - Napoli.	239
Figura G 13: PSD rettifilo 26 anno 2009 Napoli – Baiano.....	239
Figura G 14: PSD rettifilo 26 anno 2012 Napoli – Baiano.....	240
Figura G 15: PSD rettifilo 26 anno 2014 Napoli – Baiano.....	240
Figura G 16: PSD Smoothed rettifilo 26 anno 2009 Napoli – Baiano.	242
Figura G 17: PSD Smoothed rettifilo 26 anno 2012 Napoli – Baiano.	242
Figura G 18: PSD Smoothed rettifilo 26 anno 2014 Napoli – Baiano.	242
Figura G 19: PSD rettifilo 26 anno 2009 Baiano – Napoli.....	243
Figura G 20: PSD rettifilo 26 anno 2012 Baiano - Napoli.	243
Figura G 21: PSD rettifilo 26 anno 2014 Baiano - Napoli.	243
Figura G 22: PSD Smoothed rettifilo 26 anno 2009 Baiano - Napoli.	245
Figura G 23: PSD Smoothed rettifilo 26 anno 2012 Baiano – Napoli.	245
Figura G 24: PSD Smoothed rettifilo 26 anno 2014 Baiano - Napoli.	246
Figura G 25: PSD rettifilo58 anno 2009 Napoli – Baiano.....	246
Figura G 26: PSD rettifilo58 anno 2012 Napoli – Baiano.....	247
Figura G 27: PSD rettifilo58 anno 2014 Napoli – Baiano.....	247
Figura G 28: PSD Smoothed rettifilo58 anno 2009 Napoli – Baiano.	249
Figura G 29: PSD Smoothed rettifilo58 anno 2012 Napoli – Baiano.	249
Figura G 30: PSD Smoothed rettifilo58 anno 2014 Napoli – Baiano.	249
Figura G 31: PSD rettifilo58 anno 2009 Baiano – Napoli.....	250
Figura G 32: PSD rettifilo58 anno 2012 Baiano – Napoli.....	250

Figura G 33: PSD rettifilo58 anno 2014 Baiano – Napoli.....	250
Figura G 34: PSD Smoothed rettifilo58 anno 2009 Baiano – Napoli.	252
Figura G 35: PSD Smoothed rettifilo58 anno 2012 Baiano – Napoli.	252
Figura G 36: PSD Smoothed rettifilo58 anno 2014 Baiano – Napoli.	253
Figura G 37: PSD rettifilo 30 anno 2009 Napoli – Baiano.....	253
Figura G 38: PSD rettifilo 30 anno 2012 Napoli – Baiano.....	254
Figura G 39: PSD rettifilo 30 anno 2014 Napoli – Baiano.....	254
Figura G 40: PSD Smoothed rettifilo 30 anno 2009 Napoli – Baiano.	256
Figura G 41: PSD Smoothed rettifilo 30 anno 2012 Napoli – Baiano.	256
Figura G 42: PSD Smoothed rettifilo 30 anno 2014 Napoli – Baiano.	256
Figura G 43: PSD rettifilo 30 anno 2009 Baiano – Napoli.....	257
Figura G 44: PSD rettifilo 30 anno 2012 Baiano – Napoli.....	257
Figura G 45: PSD rettifilo 30 anno 2014 Baiano – Napoli.....	257
Figura G 46: PSD Smoothed rettifilo 30 anno 2009 Baiano – Napoli.	259
Figura G 47: PSD Smoothed rettifilo 30 anno 2012 Baiano – Napoli.	259
Figura G 48: PSD Smoothed rettifilo 30 anno 2014 Baiano – Napoli.	260
Figura G 49: PSD rettifilo 46 anno 2009 Napoli – Baiano.....	260
Figura G 50: PSD rettifilo 46 anno 2012 Napoli – Baiano.....	261
Figura G 51: PSD rettifilo 46 anno 2014 Napoli – Baiano.....	261
Figura G 52: PSD Smoothed rettifilo 46 anno 2009 Napoli – Baiano.	263
Figura G 53: PSD Smoothed rettifilo 46 anno 2012 Napoli – Baiano.	263
Figura G 54: PSD Smoothed rettifilo 46 anno 2014 Napoli – Baiano.	263
Figura G 55: PSD rettifilo 46 anno 2009 Baiano – Napoli.....	264
Figura G 56: PSD rettifilo 46 anno 2012 Baiano – Napoli.....	264
Figura G 57: PSD rettifilo 46 anno 2014 Baiano – Napoli.....	264
Figura G 58: PSD Smoothed rettifilo 46 anno 2009 Baiano – Napoli.	266
Figura G 59: PSD Smoothed rettifilo 46 anno 2012 Baiano – Napoli.	266
Figura G 60: PSD Smoothed rettifilo 46 anno 2014 Baiano – Napoli.	267
Figura G 61: PSD curva 4 anno 2009 Napoli – Baiano.....	267
Figura G 62: PSD curva 4 anno 2012 Napoli – Baiano.....	268
Figura G 63: PSD curva 4 anno 2014 Napoli – Baiano.....	268

Figura G 64: PSD smoothed curva 4 anno 2009 Napoli – Baiano.	270
Figura G 65: PSD smoothed curva 4 anno 2012 Napoli – Baiano.	270
Figura G 66: PSD smoothed curva 4 anno 2014 Napoli – Baiano.	270
Figura G 67: PSD curva 7 anno 2009 Baiano – Napoli.....	271
Figura G 68: PSD curva 7 anno 2012 Baiano – Napoli.....	271
Figura G 69: PSD curva 7 anno 2014 Baiano – Napoli.....	271
Figura G 70: PSD smoothed curva 7 anno 2009 Baiano – Napoli.	273
Figura G 71: PSD smoothed curva 7 anno 2012 Baiano – Napoli.	273
Figura G 72: PSD smoothed curva 7 anno 2014 Baiano – Napoli.	274
Figura G 73: PSD curva 33 anno 2009 Napoli – Baiano.....	274
Figura G 74: PSD curva 33 anno 2012 Napoli – Baiano.....	275
Figura G 75: PSD curva 33 anno 2014 Napoli – Baiano.....	275
Figura G 76: PSD smoothed curva 33 anno 2009 Napoli – Baiano.	277
Figura G 77: PSD smoothed curva 33 anno 2012 Napoli – Baiano.	277
Figura G 78: PSD smoothed curva 33 anno 2014 Napoli – Baiano.	277
Figura G 79: PSD curva 33 anno 2009 Baiano – Napoli.....	278
Figura G 80: PSD curva 33 anno 2012 Baiano – Napoli.....	278
Figura G 81: PSD curva 33 anno 2014 Baiano – Napoli.....	278
Figura G 82: PSD smoothed curva 33 anno 2009 Baiano – Napoli.	280
Figura G 83: PSD smoothed curva 33 anno 2012 Baiano – Napoli.	280
Figura G 84: PSD smoothed curva 33 anno 2014 Baiano – Napoli.	281
Figura G 85: PSD curva 8 anno 2009 Napoli – Baiano.....	281
Figura G 86: PSD curva 8 anno 2012 Napoli – Baiano.....	282
Figura G 87: PSD curva 8 anno 2014 Napoli – Baiano.....	282
Figura G 88: PSD smoothed curva 8 anno 2009 Napoli – Baiano.	284
Figura G 89: PSD smoothed curva 8 anno 2012 Napoli – Baiano.	284
Figura G 90: PSD smoothed curva 8 anno 2014 Napoli – Baiano.	284
Figura G 91: PSD curva 8 anno 2009 Baiano – Napoli.....	285
Figura G 92: PSD curva 8 anno 2009 Baiano – Napoli.....	285
Figura G 93: PSD curva 8 anno 2009 Baiano – Napoli.....	285
Figura G 94: PSD smoothed curva 8 anno 2009 Baiano – Napoli.	287

Figura G 95: PSD smoothed curva 8 anno 2012 Baiano – Napoli.	287
Figura G 96: PSD smoothed curva 8 anno 2014 Baiano – Napoli.	288
Figura G 97: PSD curva 73 anno 2009 Napoli – Baiano.....	288
Figura G 98: PSD curva 73 anno 2012 Napoli – Baiano.....	289
Figura G 99: PSD curva 73 anno 2014 Napoli – Baiano.....	289
Figura G 100: PSD smoothed curva 73 anno 2009 Napoli – Baiano.	291
Figura G 101: PSD smoothed curva 73 anno 2012 Napoli – Baiano.	291
Figura G 102: PSD smoothed curva 73 anno 2014 Napoli – Baiano.	291
Figura G 103: PSD curva 73 anno 2009 Baiano – Napoli.....	292
Figura G 104: PSD curva 73 anno 2012 Baiano – Napoli.....	292
Figura G 105: PSD curva 73 anno 2014 Baiano – Napoli.....	292
Figura G 106: PSD smoothed curva 73 anno 2009 Baiano – Napoli.	294
Figura G 107: PSD smoothed curva 73 anno 2012 Baiano – Napoli.	294
Figura G 108: PSD smoothed curva 73 anno 2014 Baiano – Napoli.	295

Indice delle tabelle

Tabella 2.1: Principali modelli di degrado analizzati in letteratura.....	14
Tabella 3.1: valori soglia del parametro geometrico scartamento.....	29
Tabella 3.2: valori soglia del parametro geometrico sghembo.....	29
Tabella 3.3: valori soglia del parametro geometrico sopraelevazione.....	30
Tabella 3.4: Schema riassuntivo delle principali caratteristiche dei treni diagnostici dei gestori italiani.....	43
Tabella 4.1: Riepilogo delle prime e principali sperimentazioni effettuate riguardo il fenomeno dello svio.....	60
Tabella 5.1: Diverse lunghezze d'onda con fenomeni corrispondenti, rilevazione e possibili rimedi.....	78
Tabella 6.1: Raggruppamento in classi delle curve planimetriche in funzione del raggio (R).....	101
Tabella 6.2: Raggruppamento in classi dei rettifili del tracciato in funzione dell'estensione planimetrica (L).....	101
Tabella 6.3: Tipica TPM ottenuta per le curve appartenenti al Gruppo 1 della linea Napoli – S. Giorgio.....	109
Tabella 6.4: Tipica TPM ottenuta per le curve appartenenti al Gruppo 1 della linea Napoli – Sorrento.....	120

Tabella 6.5: Tipica TPM ottenuta per le curve di transizione della linea Napoli – Sorrento.	120
Tabella 6.6: Tipica TPM ottenuta per le curve appartenenti al Gruppo 1 della linea Napoli – Sarno.....	125
Tabella 6.7: Tipica TPM ottenuta per le curve di transizione della linea Napoli – Sorrento.	126
Tabella 6.8: Tipica TPM ottenuta per le curve appartenenti al Gruppo 1 della linea Napoli – Sarno.....	143
Tabella 6.9: Tipica TPM ottenuta per le curve di transizione della linea Napoli – Baiano.	144
Tabella 6.10: Densità spettrale di potenza – Smoothed.....	148
Tabella 6.11: Coefficiente di correlazione	

Tabella C 1: Dati di traffico annuali espressi in Treni/Km con cadenza mensile. 192

Tabella D 1: Scheda tecnica ETR Fe220 197

Tabella D 2: Scheda tecnica ETR T21.199

Tabella D 3: Scheda tecnica ETR 200 METROSTAR.....203

Tabella G 1: Densità spettrale di potenza –Smoothed. 233

Tabella G 2: Coefficiente di correlazione

Tabella G 26: Coefficiente di correlazione

Ringraziamenti

A conclusione di questo periodo di formazione desidero innanzitutto ringraziare la mia tutor Prof. Ing. Bruna Festa per avermi dato la possibilità di svolgere questa attività di ricerca, a lei devo la mia crescita professionale e personale.

Intendo poi ringraziare il Prof. Ing. Mauro D'Apuzzo, la sua disponibilità e i suoi continui stimoli mi hanno permesso di svolgere con impegno, serenità e dedizione il mio lavoro di ricerca.

Ringrazio in particolar modo i miei compagni di stanza con i quali ho condiviso successi e preoccupazioni; Francesco i cui suggerimenti sono sempre stati utili per una buona riuscita della ricerca svolta, nutro per lui profonda stima, e Manuela che si è rivelata oltre che un'ottima collega, un'amica sincera e una perfetta compagna di "viaggio".

Ringrazio inoltre il Prof. Ing. Alfonso Montella, il Prof. Ing. Gennaro Nicola Bifulco, la Prof. Francesca Pagliara, la Dott. Anna Formisano, Laura, Antonella, Luigi, Mena, Lella, Boris, Vittorio, Gregorio, Valerio, Tommaso che ho avuto modo di conoscere in questi anni, con i quali ho condiviso non solo dubbi professionali, ma anche gran parte delle mie giornate di lavoro, ricevendo in ogni momento supporto morale.

Un particolare ringraziamento va al Prof. Antonio D'Ambrosio, una perfetta, chiara e risolutiva guida nella ricerca e nell'applicazione degli strumenti statistici ottimali, utili a risolvere le problematiche connesse alla sperimentazione.

Un doveroso ringraziamento va al personale della ex Circumvesuviana, per la continua ospitalità e collaborazione nel reperire dati e informazioni utili allo svolgimento della mia ricerca.

Ringrazio, poi, la mia grande famiglia ed i miei amici sinceri, in particolare Giuliano, Tonia, Livia, Maria Claudia, Armando e Umberto che mi hanno insegnato a dare il giusto peso agli eventi della mia vita e grazie ai quali e per i quali non ho mai dimenticato quanto sia meraviglioso sorridere.

A Sonia

Premessa

Il presente lavoro di ricerca fornisce un contributo al progetto UniNA Sicurezza Ferroviaria (SISFER), nell'ambito della Rete di Eccellenza Innovazione Tecnologica nei Sistemi di Trasporto (INSIST) finanziata dalla Regione Campania con il programma "Reti di eccellenza della Regione Campania tra Università, Centri di Ricerca ed Imprese, P.O.R. Campania FSE 2007 – 2013, Asse IV".

Il modo di trasporto ferroviario, più di ogni altro, può contribuire a risolvere i problemi di mobilità in modo sostenibile dal punto di vista ambientale e, in generale sulle brevi e medie distanze risulta essere molto competitivo.

Nonostante il suo primato storico e la sua efficienza dal punto di vista energetico (intesa in termini di incidenza non troppo elevata dei consumi sui costi totali di esercizio), il trasporto collettivo su rotaia ha ancora ampi margini di crescita ed innovazione.

Da tale consapevolezza nasce l'esigenza di sviluppare e mettere a punto sistemi e tecnologie avanzate finalizzate al miglioramento del trasporto ferroviario in termini di risparmio energetico e di incremento della sicurezza della circolazione dei veicoli ferroviari e dell'utenza.

Esigenze crescenti in questa direzione nascono dalle profonde modificazioni in atto nel sistema ferroviario, basti pensare all'incremento dell'utilizzo dei veicoli e delle

infrastrutture ferroviarie a cui si è assistito nelle ultime decadi, non accompagnate da ammodernamenti strutturali.

E' aumentato, infatti, il numero di convogli transitanti al giorno su una linea ferroviaria, il carico per asse, la lunghezza dei convogli e la velocità di fiancata.

Tali eventi comportano un incremento delle sollecitazioni sulla linea e quindi, un'evoluzione dei fenomeni di degrado del materiale rotabile e delle infrastrutture non progettate per i nuovi carichi. Di conseguenza risulta necessario potenziare e particolareggiare le azioni di ispezione della linea, da parte del personale addetto alla gestione dei sistemi ferroviari, per individuare quei fenomeni di degrado che possono condurre all'instaurarsi di condizioni di pericolo potenziale per la circolazione ferroviaria e per gli stessi utenti del sistema; il che comporta inevitabilmente un incremento dei costi di esercizio.

Al fine di contenere i costi di gestione dell'infrastruttura ferroviaria, ottimizzandone allo stesso tempo la gestione e mantenendo elevati gli standards di efficienza, qualità e sicurezza, è necessario avere a disposizione parametri sintetici, chiari, affidabili e facilmente monitorabili, tali da poter essere immediatamente utilizzati nei Piani di Manutenzione.

Da tali presupposti nasce l'esigenza di intraprendere un percorso di ricerca mirato a creare modelli previsionali di degrado delle sovrastrutture ferroviarie di immediata accessibilità.

1. Introduzione

1.1 Obiettivi

Scopo del progetto di ricerca è innalzare i livelli di sicurezza del trasporto ferroviario, compatibilmente con i requisiti di competitività del servizio su ferro e con il problema dell'ottimizzazione delle risorse economiche.

L'obiettivo finale è quello di proporre una metodologia per lo sviluppo dei modelli di degrado delle sovrastrutture ferroviarie a basso costo per estendere le tecniche e le metodologie di gestione della manutenzione anche alle piccole amministrazioni locali.

Con ciò si intende, da un lato ottenere criteri teoricamente basati e validati dal punto di vista applicativo, e dall'altro rendere i modelli di facile applicazione, centrati su dati di input immediatamente valutabili senza l'impiego di risorse umane o tecnologie costose e complesse. Per ottimizzare le risorse economiche destinate alla gestione della manutenzione risulta necessario avere a disposizione parametri sintetici, chiari, affidabili e facilmente monitorabili, tali da poter essere immediatamente utilizzati nei Piani di Manutenzione.

1.2 Metodologia proposta

Per conseguire l'obiettivo precedentemente descritto, è necessario avere piena conoscenza dei fenomeni di dinamica di marcia del veicolo ferroviario, dell'interazione ruota-rotai e del concetto di difettosità; al fine di comprendere come questi fenomeni possano influenzare il degrado della linea ferrata, del veicolo e della sovrastruttura.

Da un punto di vista pratico, per comprendere come l'interazione veicolo sovrastruttura possa influenzare il degrado della linea e incidere, quindi, sulla sicurezza di marcia, è essenziale effettuare un'analisi critica sui software disponibili sul mercato al fine di individuare quello ottimale per lo sviluppo del modello e per la calibrazione del sistema tramite l'utilizzo di dati sperimentali, verificando, ove possibile, le condizioni costruttive dell'infrastruttura così da potenziare il Sistema di Gestione della Manutenzione per garantire l'utilizzo in sicurezza delle linee ferroviarie in fase di esercizio.

Il degrado della linea ferroviaria, in riferimento a ciascuna componente della stessa, è ampiamente studiato in letteratura, ed esistono anche dei modelli utilizzati per valutare lo stato di degrado della linea e per programmare gli interventi di manutenzione in modo da ottimizzare i costi di gestione. Tali modelli, dall'impronta fortemente empirica, andrebbero arricchiti completati e perfezionati, al fine di renderli versatili rispetto ai più svariati casi, vicini alle realtà locali.

La difettosità del binario, indice di degrado, insieme a quella plano-altimetrica della linea e delle componenti meccanico-inerziali del veicolo, rappresenta una delle principali cause di instabilità di marcia, che generalmente evolve in veri e propri casi di svio. La diagnosi precoce di tali difetti, è necessaria per intervenire prima che si verifichino eventi disastrosi e pericolosi per l'utenza.

Nelle ultime decadi si stanno diffondendo sul mercato molteplici tecniche ad elevato rendimento, basate sull'utilizzo di diverse tecnologie tra cui quella legata all'uso di profilometri laser. Numerosissimi sono i dispositivi proprietari

specializzati per il monitoraggio complementare della ruota e della rotaia, ma generalmente tali strumentazioni richiedono grossi investimenti iniziali. Tali sistemi di monitoraggio sono, però, privi di giustificazioni tecnico-scientifiche relative alle loro prestazioni, e non sottoposti ad alcuna regola che ne unifichi la produzione.

Altrettanto diffusi sono i mezzi specializzati che effettuano periodicamente le operazioni di manutenzione della linea ferroviaria al fine di contenerne il degrado.

Ai fini della validazione dei modelli di degrado è fondamentale disporre di un adeguato dataset su cui effettuare le calibrazioni.

Nel caso in esame i dati di difettosità analizzati sono stati raccolti mediante rilievo con treno diagnostico e mediante sensori montati direttamente sulle boccole del materiale rotabile, sulle linee della Ex Circumvesuviana. I rilievi sono stati effettuati nelle condizioni di normale esercizio e di normale carico.

Fra gli obiettivi secondari della ricerca, strategici per conseguire l'obiettivo principale è importante annoverare:

- La creazione di una procedura standardizzata per l'analisi e la catalogazione dei bigdata monitorati sulla linea ferroviaria con gli strumenti ad elevato rendimento.
- La creazione di programmi atti a suddividere in maniera automatizzata le linee ferroviarie in transienti omogenei a partire da dati di curvatura e/o di accelerazione monitorata in boccola.
- La creazione di script in linguaggio Matlab utili a ridurre notevolmente i tempi di elaborazione statistica dei dati.

A fronte di tale introduzione al problema, la presente ricerca è improntata sull'analisi teorico-sperimentale dei fenomeni fisici connessi al degrado delle sovrastrutture ferroviarie, ascrivibile tra le principali problematiche di svio. Esula da tale trattazione un'analisi economica finalizzata a definire la scelta ottimale delle operazioni di manutenzione da effettuare sulla linea a seguito dell'individuazione e della previsione del danno.

In coerenza con il raggiungimento degli obiettivi, l'attività di ricerca della durata di tre anni, è stata articolata temporalmente come di seguito riportato.

- I anno: Stato dell'arte sulle problematiche di svio, sul concetto di difettosità e sui modelli di degrado presenti in letteratura. Analisi dei software presenti sul mercato per la modellazione del comportamento della sovrastruttura ferroviaria e degli strumenti necessari al rilievo dei dati sulla linea.
- II anno: Raccolta, analisi e classificazione dati e conseguente creazione di modelli di degrado previsionali della strada ferrata utilizzando gli adeguati strumenti statistici ai fini dell'elaborazione dei dati di difettosità monitorati.
- III anno: Validazione dei modelli ed estensione dei risultati a differenti casi studio applicativi.

L'attività di ricerca proposta è stata articolata a partire da un'esigenza reale della ex Circumvesuviana (oggi Ente Autonomo Volturno, EAV) di pianificazione delle operazioni di manutenzione a partire dai bigdata collezionati negli anni, di difficile interpretazione, con la funzione multiobiettivo di fornire un servizio di trasporto sempre più efficace, competitivo ed omogeneo favorendo innovazioni e miglioramenti nei requisiti funzionali e tecnici.

La struttura della tesi ha una sequenza logica che riflette quindi l'esigenza di conoscere ed analizzare alcuni ambiti per consentire poi un'adeguata risoluzione del problema. Di seguito se ne riporta in maniera schematica la struttura.

- Capitolo 1: è considerato uno schema utile all'inquadramento della ricerca proposta, finalizzato a chiarire in termini introduttivi gli obiettivi della ricerca e le metodologie impiegate per perseguirli.
- Capitolo 2: contiene lo stato dell'arte rivolto principalmente alla ricerca delle cause di svio; alla valutazione dei limiti imposti dalle norme europee e dai regolamenti interni dei gestori ferroviari locali, riguardanti i valori di difettosità geometrica delle linee ferroviarie; alla ricerca delle modalità di

gestione delle operazioni di manutenzione da effettuare sulle linee ferroviarie ai fini dell'ottimizzazione delle risorse economiche e allo studio dei principali modelli di degrado ferroviari, dei parametri fisici alla base dei modelli e degli strumenti matematici e statistici utilizzati.

- Capitolo 3: fornisce una panoramica sulle condizioni di degrado delle linee ferroviarie.
- Capitolo 4: tratta la problematica dello svio e i sistemi di contenimento del fenomeno.
- Capitolo 5: è dedicato al concetto di manutenzione delle linee ferroviarie e alle macchine utilizzate ai fini del ripristino delle caratteristiche funzionali della linea.
- Capitolo 6: riguarda la vera e propria analisi sperimentale, la descrizione delle linee monitorate, del materiale rotabile utilizzato per il rilievo dei dati e allo stesso tempo costituente il carico della linea, senza trascurare le problematiche e le difficoltà connesse alla sperimentazione.
- Capitolo 7: riassume i risultati ottenuti per le singole tratte con annessa generalizzazione a livello di rete.
- Capitolo 8: sintetizza gli obiettivi raggiunti e quelli che si propone di conseguire in futuro.

In appendice sono riportati approfondimenti riguardanti i modelli statistici utilizzati ai fini delle analisi (Appendice A, Appendice B); le caratteristiche dei carichi agenti sulla sovrastruttura intese in termini di traffico cumulato (Appendice C); le caratteristiche tecniche del materiale rotabile costituente i carichi (Appendice D); i livelli di qualità geometrica delle linee ferroviarie stabiliti dalla norma UNI EN 13848 (Appendice E); i risultati delle TPM e delle PSD calibrate a partire dai dati sperimentali monitorati sulle linee ferroviarie oggetto di indagine (Appendice F, Appendice G).

2. Stato dell'arte

Il problema della manutenzione delle sovrastrutture ferroviarie è un problema di grandissima attualità ed importanza, tanto nei Paesi altamente sviluppati in cui i nuovi progetti riguardano esclusivamente piccoli rami di raccordo di infrastrutture già esistenti, quanto nel nostro in cui è attualmente in fase di realizzazione la linea ferroviaria ad alta velocità.

Per tanto la ricerca di procedure finalizzate al monitoraggio e alla manutenzione delle linee esistenti, che tengano conto del risparmio economico ai fini della gestione del sistema, assume un ruolo tutt'altro che secondario.

Per conseguire gli obiettivi della ricerca, lo stato dell'arte è stato indirizzato verso:

- L'analisi delle principali cause di svio, riscontrabili essenzialmente in difetti della linea, del veicolo e delle condizioni di marcia, finalizzata all'individuazione delle caratteristiche della sollecitazione sull'infrastruttura ferroviaria.
- L'indagine sui limiti imposti dalle norme europee e dai regolamenti interni dei gestori ferroviari locali, riguardanti i valori di difettosità geometrica delle linee ferroviarie.
- La ricerca delle modalità di gestione delle operazioni di manutenzione da effettuare sulle linee ferroviarie ai fini dell'ottimizzazione delle risorse economiche.

- Lo studio dei principali modelli di degrado ferroviari, dei parametri fisici alla base dei modelli e degli strumenti matematici e statistici utilizzati.

Evitare lo svio in ferrovia è importante per ragioni di sicurezza ed economiche. Tutte le condizioni che portano ad una riduzione della forza di guida laterale data dalle rotaie, possono incrementare il rischio di svio. Il monitoraggio e la manutenzione attenta delle linee ferroviarie sono operazioni fondamentali per determinare i tempi e i costi connessi alla manutenzione.

Negli ultimi anni si sta assistendo ad un innalzamento dei livelli di sicurezza ferroviaria rispetto alle altre modalità di trasporto. Da quanto riportato nel database del FRA (Federal Railroad Administration), molti incidenti in ferrovia sono causati dai difetti geometrici della linea e da problemi di allargamento dello scartamento (Liu X. et al. Analysis of derailments by accident cause: evaluating railroad track upgrades to reduce transportation risk.), pertanto risulta necessario tenere sotto controllo questi parametri e la loro evoluzione nel tempo in assenza di operazioni di manutenzione.

Stando a Blader (A review of literature and methodologies in the study of derailment caused by excessive forces at the wheel/rail interface), gli svii ferroviari possono essere associati a quattro differenti cause: arrampicamento del bordino della ruota sulla rotaia, allargamento dello scartamento e rotazione della rotaia, traslazione della sede ferroviaria, e instabilità laterale del veicolo.

Alcuni particolari criteri di svio presenti in letteratura, sono stati ottenuti a partire da quelli storici (Nadal, Proud'Homme) e sulla base di alcuni parametri di esercizio importanti come i raggi di curvatura e la velocità di fiancata.

Secondo l'International Union of Railways (ORE. Dynamic vehicle/track interaction phenomena from the point of view of track maintenance. Utrecht: Office for Research and Experiments of the International Union of Railways) gli indici di degrado delle linee ferroviarie sono calcolati in termini di deviazione standard del livello longitudinale, trasversale e dell'allineamento in tronchi di linea

della lunghezza di 200 metri. La deviazione standard di tali parametri è considerata uno degli indici di prestazione anche dalle norme europee (C.E.N. EN13848-5).

Per i parametri geometrici come scartamento, sghembo e sopraelevazione, le norme europee (Track geometric quality standard for speeds up to 300 km/h Part 1; Part 2; Part 3), come quelle amministrazioni locali italiane (RFI), forniscono solamente dei valori soglia.

L'attuale contesto legislativo italiano non fornisce, infatti, una definizione chiara di qualità geometrica della linea ma fornisce dei valori limite di allarme in corrispondenza dei quali la linea si definisce deteriorata. Tali valori limite si riferiscono, però, a valori di scartamento ordinario (1435 mm) visto che si riferiscono alla rete ferroviaria nazionale (RFI), pertanto per poterli comparare a valori di rilievi effettuati in su linee con scartamento ridotto (950 mm), è necessario adimensionalizzare tali valori di soglia rispetto allo scartamento ridotto volendo operare dei confronti.

La programmazione preventiva e l'esecuzione immediata delle operazioni di manutenzione è importante per un risparmio di risorse economiche per il gestore delle infrastrutture ferroviarie. E' necessario usare metodi predittivi per la pianificazione degli interventi manutentivi tali da evitare interruzioni del funzionamento del sistema, che rappresentano ulteriori costi aggiuntivi per il gestore. (Wireman T. Preventative Maintenance).

Anche la manutenzione ordinaria, che generalmente riguarda la sostituzione di piccole parti o componenti dell'infrastruttura mediante l'impiego di macchinari di piccoli ingombri, deve essere effettuata per evitare che il degrado degeneri fino a condizioni irreparabili. Alcuni studi in letteratura mirano alla ricerca dell'equilibrio ottimo tra costi e differenti lavori di manutenzione (Grimes G. A. et al. Cost-Effectiveness of Railway Infrastructure Renewal Maintenance).

Ad oggi ancora non esistono dei modelli di pianificazione delle operazioni di manutenzione delle componenti ferroviarie disponibili gratuitamente e di facile accessibilità. In "Development of an integrated model for the evaluation and

planning of railroad track maintenance” (Lovett A. H. et al) è stato sviluppato un modello utile per la programmazione e la pianificazione delle operazioni di manutenzione. Il modello è costituito da tre moduli: uno riguardante il degrado della sovrastruttura, un altro relativo alla valutazione e alla selezione dell'ideale attività di manutenzione ed un ultimo finalizzato all'ottimizzazione della scelta e della programmazione dell'attività di manutenzione.

Liu X. et al. (Optimization of rail defect inspection frequency to reduce railroad Hazardous materials transportation risk), sviluppa uno strumento di supporto alle decisioni automatizzando il processo decisionale utilizzando la piattaforma Visual Basic in Microsoft Excel. A partire da dati quali età della sovrastruttura, numero di ispezioni effettuate, densità di traffico, il modello stima la rottura delle rotaie legate a eventi pericolosi.

Altri metodi matematici, finalizzati alla ricerca della soluzione migliore per la programmazione delle operazioni di manutenzione, utilizzano un approccio euristico (Higgins, 1998; Peng et al., 2011).

Ad oggi, è certo che tutte le compagnie ferroviarie sono alla ricerca di strumenti che possano rendere efficienti le operazioni di manutenzione. Zio et al. nel 2007 propone un approccio per migliorare i livelli di sicurezza delle reti ferroviarie, mantenendo alti gli standards di sicurezza. Tale approccio è legato all'importanza del monitoraggio dell'infrastruttura atto ad identificare tronchi significativamente pericolosi anche dal punto di vista dei ritardi dei treni. Anche la Rete Ferroviaria Italiana (RFI) propone, con un approccio applicativo, (Macchi M. et al. Maintenance management of railway infrastructures based on reliability analysis) un metodo orientato alle famiglie, orientato al servizio e alla tecnologia atto a migliorare le azioni di manutenzione, tenendo conto degli effetti sul livello di servizio di trasporto.

Nella maggior parte degli studi condotti in letteratura sull'argomento, le indagini e i parametri di stato risultanti sono tutti riferiti a tratte di linea dall'estensione chilometrica standardizzata.

Il monitoraggio delle rotaie e della sovrastruttura ferroviaria in generale, è necessario per garantire un'adeguata sicurezza di marcia (in termini di prevenzione di problemi di svio e comfort del passeggero) e allo stesso tempo per pianificare le operazioni di manutenzione atte a ripristinare le caratteristiche originarie degli elementi costituenti la strada ferrata; che devono essere effettuate al minimo costo. Per prevedere i costi da destinare alla manutenzione ed al rinnovamento dei binari è essenziale sviluppare dei metodi che permettano di monitorare le performance del binario e creare modelli affidabili per la previsione e la pianificazione della manutenzione. In generale i sistemi per la gestione globale delle infrastrutture sono del tipo Asset Management Systems e prevedono al loro interno un tool dedicato al binario (Track Maintenance Management Systems).

Al fine di poter rendere più efficiente la manutenzione, questi strumenti tecnologici necessitano di un elevato numero di dati che devono essere ricavati in parte mediante strumenti di registrazione automatica ed in parte in altro modo (ad esempio ispezioni visive, raccolta di dati storici, ecc.). La lunghezza delle porzioni di binario in cui ricavare questi dati è variabile e dipende generalmente dalla politica di manutenzione adottata dal gestore. Questa in alcuni casi è funzione delle caratteristiche degli strumenti di rilevazione, in altri coincide con lunghezze standard di 100-200 m. E' necessario raccogliere i dati in sezioni brevi di binario in modo da ottimizzare la manutenzione (minimizzando i tratti e quindi i costi) e identificare con maggiore precisione i fattori che influenzano il fenomeno in quanto sezioni simili di binario possono avere differenti gradi di degrado e richiedere quindi differenti modalità di intervento.

Per decidere come e quando intervenire per la manutenzione di una linea ferroviaria, è necessario rappresentare lo stato di qualità della linea mediante parametri sintetici. Un modo semplice è quello di contare tutti i difetti presenti lungo la linea che eccedano in quanto entità, oltre un certo valore.

Oppure è possibile valutare la deviazione standard dei dati raccolti e poi catalogati per tipologia di difetto geometrico. Indici così fatti non forniscono informazioni sulla forma del difetto ma sono comunque utili per prendere decisioni di intervento. I principali dispositivi di misura della geometria del binario sono della casa Plasser & Theurer, o dell'Eurailscout. Questi rilevano in condizioni di normale esercizio con velocità massime di 300 Km/h, mediante degli appositi sensori posizionati sul carrello, parametri geometrici quali sghembo, scartamento, sopraelevazione e profilo orizzontale e verticale. I valori di tali parametri possono essere acquisiti con passi preimpostati e vengono restituiti mediante output grafici e numerici per poter essere manipolati analiticamente. Inoltre, mediante degli appositi sensori è possibile monitorare il profilo e la superficie delle rotaie per indagare sul livello di degrado cui tali elementi sono sottoposti.

Per quanto riguarda i dispositivi di misura del profilo delle rotaie questi sono essenzialmente costituiti da quattro dispositivi laser e quattro videocamere direttamente montate sul carrello del veicolo. I software ad essi connessi elaborano le immagini in tempi reali registrandole e confrontandole con i profili standards per valutare di quanto i dati monitorati, si discostano dai valori di progetto e i casi eccedenti vengono evidenziati.

Per misurare i parametri geometrici della linea quali sghembo, scartamento, sopraelevazione, livelli longitudinali e trasversali del binario, si utilizzano sistemi di misura inerziali in grado di lavorare con velocità di viaggio che vanno da 40 a 300 Km/h al fine di cogliere i segnali di accelerazione in boccola atti a fornire misure con un certo grado di precisione della posizione del veicolo.

Così come per l'ispezione della linea esistono appositi strumenti di monitoraggio, brevetti delle case produttrici, esistono anche molteplici macchine finalizzate alla manutenzione degli elementi singoli della linea ferroviaria o che contemporaneamente siano in grado di ripristinare le caratteristiche di più componenti.

Obiettivo ultimo e comune alla ricerca di modelli di degrado delle linee ferroviarie, attualmente disponibili in letteratura, è quello di ridurre i costi di manutenzione delle linee ferroviarie mantenendo elevati gli standard di sicurezza. Tali modelli di degrado possono essere classificati in modelli deterministici, probabilistici ed empirici.

I primi sono generalmente basati su determinazioni di leggi analitiche di degrado, ottenute a valle di una sperimentazione, e forniscono un valore unico dell'indice di prestazione.

I modelli probabilistici forniscono invece, sulla base di leggi statistiche, la probabilità che una determinata linea, o una sua componente si trovi ad un certo livello di degrado; quelli empirici consentono la caratterizzazione del degrado esclusivamente sulla base di dati storici raccolti sia in sito, su sovrastrutture in esercizio, sia in laboratorio, su sovrastrutture in scala reale e poi analizzati statisticamente e la loro applicabilità è limitata.

Tabella 2.1: Principali modelli di degrado analizzati in letteratura.

Kind of model		Variables
Empirical		vibration measures traffic load
Probabilistic	Markov chains	traffic load - track level
	Neural networks	traffic load - track level
	Bayesian approach	longitudinal level - traffic load longitudinal level
Fuzzy regression		traffic load - track level

Tra i modelli probabilistici si annoverano:

Y. Shafahi e R. Hakhameshi, (Sharif University of Technology, Tehran, Iran); “Application of a Maintenance Management Model for Iranian Railways Based on the Markov Chain and Probabilistic Dynamic Programming”, 2009 Scientia Iranica. Il modello probabilistico ottenuto mediante l'utilizzo di catene di Markov è considerato utile per prevedere le condizioni di degrado del binario di una linea

ferroviaria, Iraniana nel caso in esame. Il degrado della linea è stato correlato a fattori quali il traffico, le caratteristiche topografiche del binario, il clima e il materiale con cui sono realizzati i binari, tali fattori agiscono in maniera casuale sul degrado se combinati tra di loro. Per sviluppare il modello si è considerato un indice di qualità del binario determinato da parametri geometrici in base al quale è stato possibile determinare il livello di degrado della linea e la probabilità che questo evolva in una condizione immediatamente successiva.

In particolare, è stata suddivisa la tratta in funzione del carico viaggiante, espresso in termini di traffico leggero e pesante, e in funzione del livello longitudinale del binario, espresso in termini di piano/montuoso. L'indice di qualità della linea è stato confrontato analiticamente con un indice di degrado valutato secondo esperienze ORE (E) ottenuto in funzione del traffico veicolare (T) e del carico per asse (P).

utilizza le catene di Markov, un modello a logica neurale, ossia con principi simili a quelli della mente umana, un modello con logica fuzzy. I dati a disposizione riguardano le ferrovie iraniane e considerano quattro tipi di parametri: topografia della linea, traffico annuale e carico assiale dei veicoli circolanti, data di costruzione o rinnovamento, condizioni del binario. La rilevazione delle condizioni di binario è stata effettuata con un treno diagnostico MATISA che ne rileva le caratteristiche geometriche. La conclusione dello studio è che tra i quattro modelli i migliori sono quelli non ORE e di questi ultimi il maggiore coefficiente di correlazione statistica tra i dati si riscontra nel modello che utilizza le catene di Markov.

C. Vale. e S. M. Lurdes (Faculty of Engineering University of Porto, Porto, Portugal) in “Stochastic model for the geometrical rail track degradation process in the Portuguese railway Northern Line”, associano il livello di qualità della linea al livello longitudinale analizzato in termini di deviazione standard in tratti di linea di 200 m di lunghezza. Per le analisi statistiche dei dati collezionati, questi sono stati suddivisi per classi di velocità, fino ad un massimo di 220 Km/h. Il tasso di degrado del livello longitudinale (γ) assume una distribuzione asimmetrica del tipo:

A. Ramos Andrade, P. Fonseca Teixeira (Technical University of Lisbon, Lisboa, Portugal) in “A Bayesian model to assess rail track geometry degradation through its life-cycle”, valutano anch'essi il degrado della linea in funzione dell'andamento del livello longitudinale, inteso in termini di deviazione standard (σ) valutato per sezioni della linea di 200 m. Questo è stato valutato prima e dopo le operazioni di manutenzione della linea e in funzione del traffico cumulato con la formula che segue.

e le variabili x_i indicano rispettivamente: il traffico, la velocità, la curvatura, lo sviluppo della curva, la sopraelevazione, il tipo di traversine, il tipo di rotaie, la lunghezza della linea, condizioni di stabilità dei terreni, condizioni atmosferiche.

3 Il degrado delle sovrastrutture ferroviarie

La sovrastruttura ferroviaria ha la funzione di ripartizione dei carichi e per tanto è costituita da strati di spessore differenti con caratteristiche meccaniche decrescenti dall'alto verso il basso in analogia con l'entità dei carichi che la sollecitano. Tali sollecitazioni sono legate soprattutto al traffico veicolare, alla velocità di fiancata, ai moti principali e secondari di transito dei veicoli e alle condizioni ambientali.

Le ripetizioni e le diverse combinazioni di tali sollecitazioni provocano dei fenomeni di fatica e un accumulo di deformazione nei materiali elastoplastico-viscosi costituenti la sede ferroviaria. L'accumulo delle deformazioni fa sì che la sovrastruttura ed ogni sua componente perda la propria funzionalità se non tempestivamente ed adeguatamente ripristinata, causando danni seri agli utenti ed economici ai gestori.

Il degrado della sovrastruttura e delle sue componenti è un fenomeno graduale e continuo dovuto essenzialmente all'usura che colpisce le superfici a contatto (ruota-rotaia) provocando un decadimento progressivo delle caratteristiche funzionali della via e del veicolo.

L'usura, inoltre è fonte di aumento dei giochi, aumento della rumorosità, comparsa dei fenomeni d'urto, aumento delle vibrazioni e delle sollecitazioni per fatica, disuniformità della distribuzione delle pressioni e di imprecisioni di funzionamento dell'intero sistema.

Anche la velocità di fiancata costituisce un carico da degrado della linea qualora su di essa transitino veicoli differenti da quelli di progetto per tipologia, carico e caratteristiche del moto. L'incremento di tali sollecitazioni può non avvenire di pari passo con l'adeguamento e l'ammodernamento della linea, causando così danni da sovraccarichi.

3.1 I difetti del binario

La presenza dei difetti sulle linee ferroviarie comporta dei costi aggiuntivi per il gestore, basti pensare all'incremento delle ispezioni, visive o automatizzate, per l'identificazione e la localizzazione degli ammaloramenti, ai veri e propri interventi per rimediare al danno, ai ritardi dei treni connessi, agli eventuali deragliamenti e soprattutto alla perdita di fiducia da parte dell'utenza nei riguardi dell'infrastruttura di trasporto.

I difetti ferroviari che comportano pericoli di svio, possono riguardare:

- il veicolo e ciascuna sua componente (ne è un esempio l'alterazione delle caratteristiche di rigidità del telaio o delle molle di sospensione dei treni),
- le condizioni del moto (angoli d'attacco ridotti, moti parassiti di beccheggio, galoppo e rollio che possono portare a fenomeni di risonanza e a continue percussioni ruota-rotaia),
- la linea.

Le prime due categorie di difetto, relative al veicolo e alle condizioni di moto esulano dalla presente trattazione. Per quanto riguarda i difetti della linea, questi possono essere distinti in:

- difetti strutturali
- difetti geometrici.

I difetti strutturali riguardano le componenti della sovrastruttura ferroviaria, e per ciascuna componente, rotaie, traversine, attacchi, ballast, è possibile effettuare una sotto-classificazione dei difetti in categorie.

I difetti geometrici, che sono quelli su cui si focalizza l'attenzione nella presente sperimentazione, riguardano parametri di progetto della geometria di una linea ferroviaria che diventano difetti in caso di errata progettazione o cattiva manutenzione.

3.0.1 Difetti strutturali di rotaie, traverse, organi di attacco e ballast

Per amore di completezza, di seguito si riporta una breve disamina dei principali difetti che correntemente interessano le diverse componenti di una sovrastruttura ferroviaria.

Gli ammaloramenti delle rotaie possono essere dovuti a difetti di realizzazione, di posa in opera o malfunzionamento e alle sollecitazioni di fatica. Le tensioni cui sono soggette le rotaie sono essenzialmente:

- dovute al contatto ruota-rotaia,
- dovute all'inflessione delle rotaie conseguenziale alla deformabilità del ballast,
- dovute all'inflessione del gambo,
- dovute ai gradienti termici,
- plastiche residue.

Questi secondo l'UIC (International Union of Railways), sono identificati da un codice a quattro cifre per indicare la posizione del difetto in pianta, in sezione, la forma e la natura del difetto.

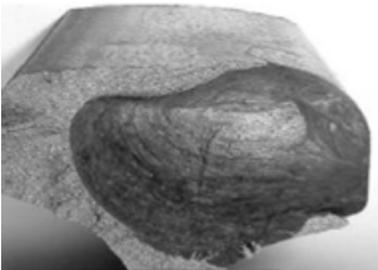
Esempi di difetti possono essere le fessurazioni orizzontali e longitudinali o verticali, dovute essenzialmente a difetti di costruzione. Tra gli altri difetti di produzione si ricordano le tasche ovali che sono causate dal processo termico di realizzazione delle rotaie. Queste possono espandersi fino a raggiungere la superficie, creando delle zone fragili del binario.

Inoltre è possibile osservare disgregazione di materiale della superficie di rotolamento che può degenerare in sgranamento della superficie della rotaia o ondulazioni e corrugazioni di piccola lunghezza d'onda (3-8 cm) che possono provocare danni pericolosi non solo per la sicurezza e il comfort del passeggero ma anche per gli altri elementi contigui alla rotaia.

Altra difettosità non trascurabile è l'usura laterale del fungo, che se supera determinati valori diventa un difetto molto pericoloso perché fa variare la dimensione dello scartamento.

In corrispondenza delle curve è possibile osservare incrinature del bordo del fungo o dell'intera superficie della rotaia a seguito di elevati carichi e scarsa lubrificazione. L'incremento eccessivo dei carichi può portare anche ad ammaccature delle rotaie.

Non occorre trascurare le deformazioni plastiche e i difetti detti usura verticale, laterale e a 45°. Tali difettosità modificano e riducono la sezione della rotaia contribuendo a ridurne la resistenza. (Cannon D.F. et al. Rail defects: an overview. Blackwell Publishing Ltd. Fatigue Fract Engng Mater Struct 26 pp.868-887, 2003)



a)



b)



c)



d)

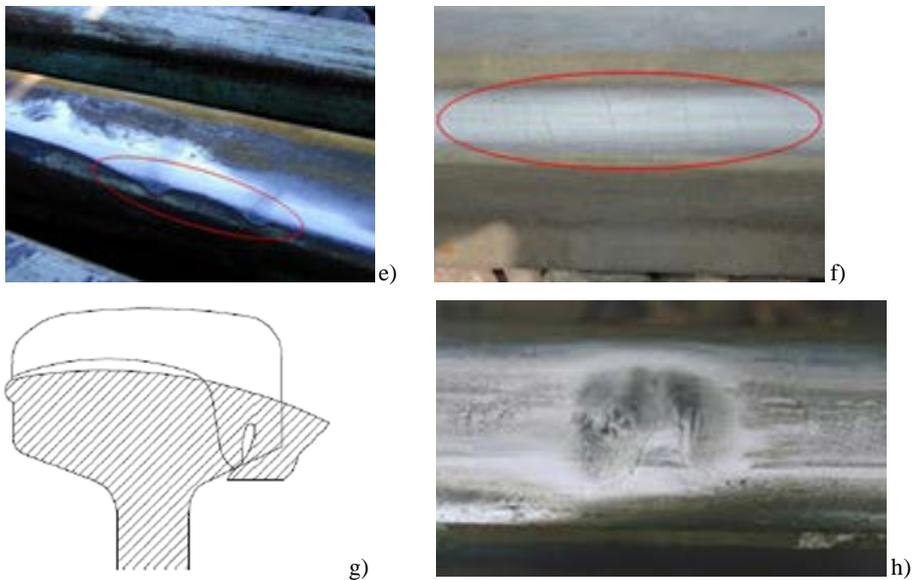


Figura 3.1: Difetti delle rotaie: a) tasche ovali; b) disgregazione della superficie di rotolamento; c) ondulazioni; d) sgranamento; e) deformazione; f) fessurazioni; g) schema di usura della sezione del fungo laterale, verticale e deformazioni plastiche; h) ammaccatura.

Le traverse, a seconda del materiale costituente, possono essere affette da differenti tipologie di difettosità. Le traverse in legno sono generalmente soggette a fessurazioni, abrasioni ed indebolimenti legati alle condizioni atmosferiche, agli attacchi di parassiti, alle variazioni di temperatura e alle sollecitazioni dovute ai veicoli transitanti.

Quelle in acciaio sono soggette essenzialmente a corrosione.

Le traverse di calcestruzzo sono generalmente più resistenti e le difettosità si evidenziano in corrispondenza degli attacchi o a causa di difetti di produzione e posa in opera.

Anche i difetti degli organi di attacco sono strettamente connessi alla tipologia. Gli attacchi rigidi sono soggetti a rottura dei bulloni o dei perni di fissaggio; quelli elastici a perdita di elementi o di parti di essi.

Uno dei difetti più comuni degli attacchi è quello dell'allentamento degli stessi, e quindi della connessione tra rotaia e traversa, quando ciò accade c'è il rischio che non sia garantito il corretto scartamento del binario. Inoltre possono essere soggetti

a rottura a fatica, in tal caso l'attacco è completamente rotto e non svolge nemmeno il minimo necessario della sua funzionalità.

Il ballast è l'elemento generalmente più durevole della sovrastruttura ferroviaria. Gli strati che lo costituiscono sono progettati in maniera tale che le caratteristiche meccaniche durino nel tempo, in quanto una modifica della resistenza e della conformazione del ballast può generare difetti geometrici dell'intero binario.

La vegetazione infestante può generare difetti di portanza del sottofondo, così come la rottura o l'inquinamento del pietrisco, dovuta a fattori ambientali e condizioni particolari di carico.

Altri difetti che possono interessare il ballast sono legati al drenaggio impedito o insufficiente. In tal caso si può assistere alla formazione di sacche causate dall'assestamento del terreno di sottofondo; ad intasamento da materiali fini di degrado o di deposito alle spalle della massicciata; alla formazione di pozze ai lati del rilevato per mancanza di canali per la rimozione dell'acqua proveniente dalla massicciata ed inadeguata inclinazione laterale della superficie del sottoballast per lo smaltimento delle acque.

3.1.2 Difetti geometrici del binario: scartamento, sopraelevazione e sghembo

I parametri scelti come definizione della geometria del binario sono, convenzionalmente, lo scartamento, il livello trasversale, il livello longitudinale e la sopraelevazione e lo sghembo. Analizzando i valori di tali grandezze è possibile risalire alle cause di degrado della sovrastruttura e quindi analizzare le problematiche di svio.

Per garantire un alto livello di qualità e di sicurezza dell'infrastruttura ferroviaria, in termini di geometria del binario, e per omogeneizzare la manutenzione e garantire una gestione dell'infrastruttura economicamente valida, la Norma UNI-

EN 13848 stabilisce i valori limite ammessi di tutti i parametri fondamentali che caratterizzano la geometria del binario. La Norma, oltre a definire ogni parametro, specifica i requisiti per la misurazione, i metodi di analisi e la formulazione dei risultati.

Lo scartamento è definito come la distanza tra i fianchi interni dei funghi delle rotaie costituenti il binario, misurata normalmente all'asse del binario, alla quota di 14 mm al di sotto del piano del ferro (piano di rotolamento). In Italia lo scartamento adottato è di 1435 mm, ma alcune linee, tra le quali si annovera quella della ex Circumvesuviana (oggi EAV, Ente Autonomo Volturmo), adottano scartamenti ridotti di 950 mm. Lo scartamento, inoltre è soggetto ad un allargamento nei tratti planimetrici circolari, funzione del valore del raggio della curva, necessario per consentire l'iscrizione del veicolo ferroviario in curva, a seguito del fatto che le due ruote sono rigidamente calettate sull'asse per formare la sala montata. L'allargamento va ottenuto modificando la posizione planimetrica della rotaia interna e va localizzato lungo la curva di transizione a raggio variabile (generalmente parabolica o clotoidica).

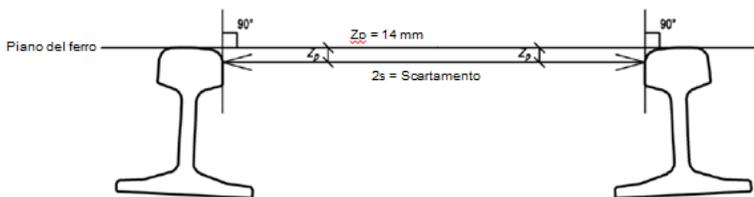


Figura 3.2: Scartamento (Gauge)

Il livello trasversale è la pendenza trasversale del binario espressa come differenza di quota tra le due rotaie, misurata normalmente al binario. La norma, in particolare, definisce tale grandezza come il cateto verticale di un triangolo rettangolo che ha come ipotenusa un segmento costituito dallo scartamento

nominale sommato alla larghezza della testa di una rotaia, con approssimazione ai 10 mm.

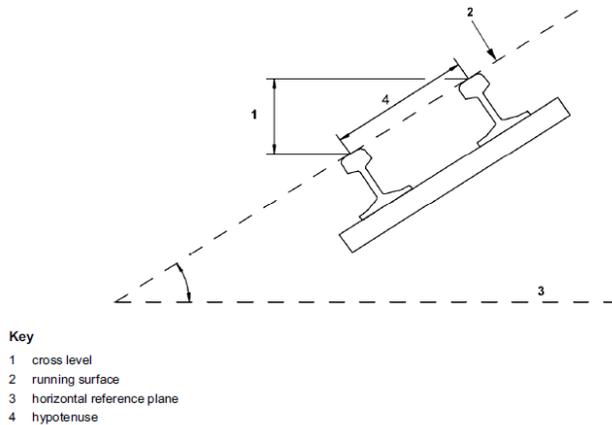


Figura 3.3: Livello trasversale (Cross level)

Il livello longitudinale è la posizione altimetrica del binario individuata dalla generatrice di rotolamento, si esprime misurando la freccia rilevata su una determinata base di misura.

La sopraelevazione della rotaia esterna è necessaria per l'equilibrio del veicolo in curva, in analogia con il caso stradale consente la compensazione dell'accelerazione centripeta.

Un altro parametro, fondamentale per la valutazione della sicurezza di marcia è lo sghembo, questo è un parametro derivato dagli altri che rappresenta la differenza di livello trasversale del binario misurata su una base di lunghezza prefissata ed espresso in percentuale. Questo può riguardare inoltre il carrello, o l'interperno (distanza tra due carrelli) o il veicolo, a seconda che interessi una ruota singola, un fianco o sia la composizione di entrambi. Difetti di sghembo sono preoccupanti ai fini dello svio e generalmente sono dovuti a difetti di posa in opera del binario o costruttivi delle componenti meccaniche del veicolo.

I difetti geometrici del binario possono essere:

- di allineamento o curvatura;

- di livello trasversale;
- di scartamento;
- di stabilità;
- di luci di dilatazione (nei binari non saldati);
- di distribuzione degli appoggi;
- di sghembo.

Difetti di allineamento o curvatura si manifestano con lo spostamento di una o entrambe le rotaie dalla loro posizione planimetrica di progetto o dalla rispettiva posizione relativa.

Difetti di livello trasversale si hanno quando le due rotaie in rettifilo non sono alla stessa quota e quando in curva assumono valori di sopraelevazione diversi da quelli di progetto.

Anche per lo scartamento è valido lo stesso ragionamento, esiste un difetto di tale parametro se in rettifilo è diverso da quello di progetto e in curva l'allargamento non è compatibile con il valore del raggio della curva. Ciò accade se si assiste allo spostamento relativo di una rotaia rispetto all'altra.

Si ha difetto di stabilità quando l'intero binario, sottoposto a carichi, manifesta cedimenti eccessivi.

Se gli appoggi si spostano assumendo interassi diversi dal modulo regolare, allora esistono difetti di distribuzione degli appoggi.

Inoltre il difetto di allineamento si ha quando l'intero binario si sposta dalla sua corretta posizione planimetrica, sia in rettifilo che in curva.

Lo spostamento del binario dalla sua corretta posizione altimetrica prende, invece, il nome di difetto di livello.

Infine il difetto di sghembo, insieme a quello di scartamento, rappresenta una delle principali cause di svio. Il difetto di sghembo si verifica quando una delle due rotaie o entrambe assumono una pendenza diversa da quella della livelletta di progetto in curva e in rettifilo. Lungo i tratti a curvatura variabile lo sghembo diventa problematico per l'equilibrio del veicolo quando supera i valori soglia

stabiliti dalla norma. Considerando un carrello isolato, se esistono difetti di sghembo sulla linea, i punti d'appoggio del carrello non saranno più quattro in corrispondenza delle 4 ruote, ma 3 o 2, creando delle disuniformità nella distribuzione dei carichi e quindi eventuali ribaltamenti del veicolo.

E' evidente che tali parametri di progetto diventano difettosità della linea, e quindi problematici per la sicurezza, in assenza di controllo e manutenzione adeguata.

La Norma RFI TCAR ST AR 01 001 D "Standard di qualità geometrica del binario con velocità fino a 300 km/h", infatti, prevede tre livelli di qualità per il binario, definiti in funzione dei parametri geometrici misurati:

- Primo livello: la geometria del binario non richiede la programmazione di alcun intervento correttivo;
- Secondo livello: le caratteristiche geometriche del binario consentono il normale esercizio ferroviario ma necessitano comunque di analisi per valutare le cause e la velocità di degrado, che può essere valutata tramite il confronto di rilievi geometrici precedenti o attraverso rilievi ad alta precisione;
- Terzo livello: la geometria del binario è tale da consentire ancora il normale esercizio ferroviario, ma bisogna tener conto che devono essere programmati e eseguiti degli interventi di manutenzione prima che sia superato il terzo livello di qualità.

Superato il terzo livello di qualità, i valori della geometria del binario impongono necessariamente delle restrizioni all'esercizio ferroviario. In particolare esistono dei valori soglia entro cui è ancora ammessa la circolazione sulla pista degradata, superati i quali è necessario impedire la circolazione fino a che non siano ripristinate le condizioni corrette della geometria.

Di seguito si riportano alcuni valori soglia suggeriti dalle norme affiancati da analoghi valori soglia calcolati per linee ferroviarie a scartamento ridotto, diverso da quello standard delle linee RFI. Si riportano esclusivamente i valori soglia delle grandezze osservate nella presente sperimentazione.

I valori limite dello scartamento, ricavati dalla norma UNI EN 13848-5 Track geometry quality, Part 5: Geometric quality levels ANNEX B tabella B.1 si riferiscono ad un valore dello scartamento ordinario (1435mm) e sono forniti in funzione della velocità di percorrenza del treno. Per poter comparare tali valori a quelli dei rilievi effettuati in corrispondenza di linee con scartamento ridotto (950mm), adottato anche dalla ex Circumvesuviana oggetto delle analisi presentate nel lavoro, è possibile ottenere dei valori di soglia adimensionalizzati rispetto allo scartamento ridotto. I valori riportati, inoltre, si riferiscono al solo livello di severità di allerta in corrispondenza del quale è necessario intervenire con delle operazioni di manutenzione ordinaria e per una velocità inferiore a 90km/h, che è quella massima che si attinge sulla rete di ex Circumvesuviana.

Tabella 3.1: valori soglia del parametro geometrico scartamento.

Minimum	UNI EN	CIRCUM.
	-7 mm	-4,6341 mm
Maximum	UNI EN	CIRCUM.
	25 mm	16,5505 mm

Per quanto riguarda lo sghembo i valori di tolleranza forniti dall'analogia norma tabella B.7 si riferiscono ad una base di misura di 3m. Al fine di uniformare tali dati al caso oggetto di studio e quindi ai parametri della ex Circumvesuviana, tale valore è stato adimensionalizzato in funzione del valore del passo tra due carrelli dei treni della ex Circumvesuviana, pari a 2,1 m.

Tabella 3.2: valori soglia del parametro geometrico sghembo.

Minimum	UNI EN	CIRCUM.
	0 mm	0,0000 mm
Maximum	UNI EN	CIRCUM.
	4 mm	2,8000 mm

La norma UNI EN 13848-5 non fornisce valori limite per la sopraelevazione in quanto questi dipendono strettamente dalle caratteristiche geometriche della linea, pertanto rimanda a ciascun ente gestore di fornire norme interne. La Circumvesuviana non fornisce valori limite legati a soglie di intervento, per tanto, ai fini della sperimentazione ci si è riferiti ai valori limite imposti da RFI, adimensionalizzandoli opportunamente. Anche in tal caso è opportuno riferirsi ai valori limite corrispondenti ad una velocità di viaggio corrispondente a quella di esercizio della Circumvesuviana, inferiore quindi ai 120 km/h.

Tabella 3.3: valori soglia del parametro geometrico sopraelevazione.

Minimum	UNI EN	CIRCUM.
	0 mm	0,0000 mm
Maximum	UNI EN	CIRCUM.
	30 mm	30,0000 mm

3.1.3 Indici di qualità del binario

Una buona progettazione ed una corretta manutenzione o rinnovo contribuiscono a rendere una sovrastruttura ferroviaria di buona qualità.

Uno dei principali parametri considerati per la stima della qualità del binario è la deviazione standard, anche in virtù del fatto che le norme europee si riferiscono a tale grandezza. Questo parametro statistico rappresenta la dispersione del segnale misurato lungo la linea, o nella sezione oggetto di indagine.

Generalmente si calcola la deviazione standard dell'allineamento, dello sghembo, dello scartamento e dei livelli longitudinali e trasversali. Per questi ultimi parametri geometrici, la deviazione standard è calcolata sia in relazione a ciascuna rotaia (esterna e interna) che rispetto al binario.

Generalmente la deviazione standard di un parametro la si calcola per segmenti di lunghezza di 100 o 200 metri stabilendo eventuali sovrapposizioni o variazioni di lunghezza della base considerata.

Un altro indice di difettosità molto comune si ottiene contando il numero di difetti isolati. Tale valore va confrontato con i valori soglia stabiliti per decidere come procedere con gli interventi di manutenzione. I parametri rispetto ai quali si conteggia il numero di difetti isolati sono gli stessi per i quali si calcola la deviazione standard.

Solitamente il conteggio viene effettuato su una base di lunghezza della linea di 1 Km, ma ovviamente è possibile variare la lunghezza della sezione esaminata, o fare riferimento a punti singolari del tracciato (scambi, attraversamenti). In alternativa al conteggio dei difetti isolati, è possibile esprimere la qualità del binario in percentuale linea affetta da difettosità.

Altra metodologia per la valutazione della qualità geometrica del binario è valutare un indice di qualità dato dalla combinazione delle deviazioni standard di diversi parametri geometrici del binario, fornendo un peso diverso a ciascun fattore geometrico considerato. E' merito dei gestori stabilire i pesi e i valori soglia dei parametri così valutati.

Diversi sono gli esempi in letteratura che forniscono simili modalità di valutazione dell'indice di qualità del binario.

3.2 I modelli di degrado

Tenere sotto controllo il degrado e cercare di valutare la vita utile residua di una sovrastruttura ferroviaria, è parte integrante di un sistema di gestione della manutenzione. Solo in questo modo è possibile programmare i tempi e le modalità di intervento per ripristinare la funzionalità della linea. Creare modelli previsionali

di degrado non vuol dire altro che trovare una funzione matematica che descriva lo stato futuro di uno o più parametri caratterizzanti la sovrastruttura a partire da valori storici registrati del parametro oggetto di indagine.

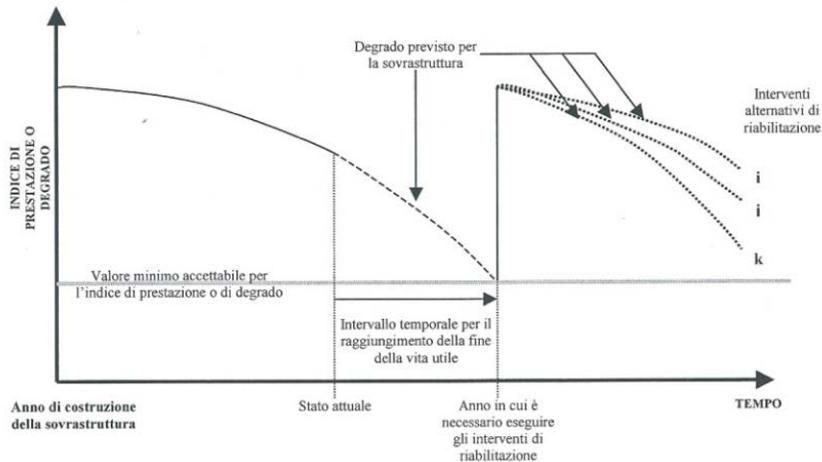


Figura 3.4: Schema relativo all'utilizzo dei modelli di degrado come previsione di interventi di manutenzione.

I modelli di degrado delle sovrastrutture possono essere classificati in base agli obiettivi che si intende perseguire mediante l'utilizzo degli stessi e in funzione dei ragionamenti alla base della loro creazione.

Stando alla prima categoria questi possono essere impiegati all'interno dei sistemi di gestione della manutenzione:

- a livello di rete,
- a livello di progetto.

I primi costituiscono una componente essenziale per le analisi pluriennali condotte per stimare gli effetti del tipo di intervento di manutenzione e riabilitazione e della loro programmazione temporale e i costi delle sovrastrutture per l'intero ciclo di vita utile. Inoltre sono indispensabili per prevedere l'evoluzione dello stato delle sovrastrutture con particolare riferimento all'eventuale raggiungimento delle soglie di attenzione, per individuare i programmi ottimali d'intervento, per valutare

gli impatti a lungo termine dei diversi scenari di intervento e verificare a posteriori i processi di progettazione.

I modelli impiegati per gli scopi sopra elencati, essendo spesso basati su misure effettuate su sezioni rappresentative dell'intera rete, forniscono una indicazione sull'evoluzione media dell'insieme delle sezioni di sovrastrutture costituenti la rete in esame.

I modelli di degrado utilizzati a livello di progetto sono più dettagliati rispetto a quelli utilizzati a livello di rete; essi vengono impiegati nella progettazione di specifici interventi di manutenzione e riabilitazione, su singoli tronchi, e per le analisi comparative tra più interventi basate sull'analisi dei costi per l'intero ciclo di vita.

I modelli di degrado possono essere, inoltre, classificati in:

- deterministici,
- probabilistici,
- empirici.

I primi sono generalmente basati su determinazioni di leggi analitiche di degrado, ottenute a valle di una sperimentazione, e forniscono un valore unico dell'indice di prestazione. I modelli probabilistici forniscono invece, sulla base di leggi statistiche, la probabilità che una determinata linea, o una sua componente si trovi ad un certo livello di degrado; quelli empirici invece consentono la caratterizzazione del degrado esclusivamente sulla base di dati storici raccolti sia in sito, su pavimentazioni in esercizio, sia in laboratorio, su sovrastrutture in scala reale e poi analizzati statisticamente, ma la loro applicabilità è limitata.

Nell'analisi previsionale del degrado applicata ad un ipotetico fenomeno di ammaloramento, in caso di assenza di manutenzione, si individuano tre diversi comportamenti del binario.

Il primo riguarda la fase immediatamente successiva alla ricostruzione o rifacimento ed è caratterizzata da un rapido deterioramento delle caratteristiche dovuto dagli assestamenti iniziali, la durata di tale periodo non è prevedibile e

differisce considerevolmente da una sezione ad un'altra del binario per cui generalmente si preferisce escludere questa fase dai modelli di previsione.

Il secondo è caratterizzato da un comportamento lineare, vi sarà quindi un incremento o riduzione del degrado, questa fase è quella generalmente utilizzata per le analisi.

Infine, nel terzo periodo si osserva un rapidissimo deterioramento dell'elemento oggetto di analisi, con andamento talvolta esponenziale, che non dovrebbe mai esistere in casi reali in quanto evidenzerebbe effetti negativi sulla sicurezza del traffico. Ipotizzando i tre comportamenti sopradescritti, è possibile utilizzare il software ECOTRACK, progettato dall'UIC (International Railway Union) in collaborazione con l'ERRI (European Rail Research Institute) per la programmazione e manutenzione della linea, altamente impiegato come supporto alle decisioni di pianificazione della manutenzione. Il software permette anche di avere una visione globale del sistema nel passato, utile per effettuare previsione future basate sui dati storici.

Per l'ottimizzazione dei costi è altresì necessario avere a disposizione dei veloci ed accurati sistemi di monitoraggio specializzati per ciascuna componente.

I modelli di degrado esistenti in letteratura, come riportato nel capitolo dello Stato dell'arte in relazione all'intera via e non alle singole componenti della sede ferroviaria, sono stati sviluppati quasi sempre utilizzando approcci empirici di correlazione della variabile dipendente misurata alle variabili indipendenti (traffico cumulato, condizioni geometriche della linea, caratteristiche ambientali).

Per tanto l'approccio adottato nella presente sperimentazione è quello di conferire generalità e applicabilità ai modelli di degrado ferroviari. Quelli proposti sono di tipo semi-probabilistico, in quanto tengono conto di parametri geometrici della linea e parametri di esercizio (velocità di fiancata e traffici cumulati), senza ancor considerare le caratteristiche meccaniche della sovrastruttura. Si riserva ad ulteriori indagini future la completezza del modello.

3.3 Strumenti di misura dei difetti del binario

La qualità del binario deve essere definita sulla base della funzionalità dello stesso. In particolare un binario può dirsi che ha una qualità elevata se su di esso sono garantite la sicurezza, l'affidabilità e il comfort di marcia per gli utenti.

La qualità strutturale, cioè la tipologia e le condizioni dei singoli elementi tecnici costituenti il binario è di difficile misurazione ed è comunemente frutto di valutazioni soggettive.

Al contrario la qualità geometrica è di semplice misurazione e informatizzazione.

Tutti i sistemi di misura, che oggi sono in commercio, forniscono dati dettagliati e precisi dai quali si parte per capire lo stato di degrado del binario per poi effettuare la successiva pianificazione degli interventi di manutenzione che su esso devono essere previsti.

In funzione degli obiettivi specifici da raggiungere, ci deve essere una differenziata valutazione della qualità geometrica del binario.

Se si vuole analizzare un singolo difetto geometrico sviluppatosi su una parte limitata della linea ferroviaria, è opportuno utilizzare tutti i dati registrati dal sistema di rilievo che consentono di determinare l'ampiezza, la lunghezza, la forma e le altre caratteristiche del difetto preso in analisi.

Il mercato dei trasporti su rotaia palesa una crescente domanda di soluzioni di monitoraggio dei veicoli in transito e delle infrastrutture che prevengano fenomeni di minaccia alla sicurezza ferroviaria, richiedendo investimenti contenuti e massimizzando l'efficienza gestionale.

A tale scopo, negli ultimi anni, sono stati introdotti sul mercato internazionale sistemi diagnostici automatici installati su materiale rotabile specializzato. Sono numerose le aziende, che operano nel settore, che offrono una serie completa di sistemi specializzati per il monitoraggio complementare della ruota e della rotaia. Dalla scheda tecnica del prodotto, che di fatto è il più delle volte un veicolo ferroviario specializzato in quanto equipaggiato con apparecchiature sofisticate

idonee, è possibile risalire alle tipologie di indagini effettuate dallo strumento, ma generalmente tali strumentazioni richiedono grossi investimenti, soprattutto da parte di esercenti locali. Tali sistemi di monitoraggio sono, quindi, tutti proprietari, privi di giustificazioni tecnico-scientifiche relative alle loro prestazioni, non sottoposti ad alcuna regola di uniformità di produzione né regolamentati da vere e proprie norme esistenti.

I sistemi di monitoraggio della qualità del binario sono, generalmente, sensori di vario tipo che possono essere posizionati:

- a bordo treno,
- in punti fissi della sovrastruttura.

Certamente la prima tipologia consente dei rilievi in tempo reale, sotto carico e continui dell'intera infrastruttura di trasporto.

Nel secondo caso, vengono posizionate lungo la linea ferroviaria, ed in particolare in corrispondenza dei punti singolari, un certo numero di stazioni multisensoriali per estrapolare poi delle leggi utili a valutare lo spostamento relativo tra due tratti della linea. Certamente tali misurazioni andrebbero corredate da altre misure ottenute mediante altri sistemi di monitoraggio.

Le grandezze geometriche di interesse possono, inoltre essere valutate:

- manualmente mediante ispezioni visive (a basso rendimento),
- con strumentazioni a diretto contatto con la sede,
- con strumentazioni non a contatto con la sede.

L'intervallo temporale e spaziale di acquisizione del dato è strettamente connesso alla tipologia di difetto che si vuole rilevare e alle caratteristiche dell'infrastruttura, in termini di velocità massima di viaggio, tipologia e entità del traffico transitante sulla linea, esposizione a rischi di deragliamenti della linea, età di realizzazione. Ne sono un esempio le ferrovie tedesche con i loro 4/24 mesi di intervallo tra una manutenzione e l'altra, quelle nord-americane con rilievi ogni 30 giorni e quelle australiane con programmazione dei rilievi ogni settimana in presenza di carichi per asse transitanti di 37 tonnellate.

I risultati dei rilievi effettuati periodicamente sulla linea ferroviaria, sono fondamentali per la creazione di modelli di degrado e per la programmazione degli adeguati interventi di manutenzione. Tali dati, se adeguatamente collocati nello spazio ed adeguatamente manipolati statisticamente nel tempo, consentono anche di risalire alle cause del degrado. Questo è importante per prevedere delle contromisure di salvaguardia della linea precedenti alla comparsa del danno. (Cannon D.F. et al. Rail defects: an overview. Blackwell Publishing Ltd. Fatigue Fract Engng Mater Struct 26 pp.868-887, 2003).

Per accelerare i tempi di misurazione, e per ottenere misure più precise, rispetto a quelle ottenute con le classiche ispezioni visive, si utilizzano sempre più spesso delle vetture di rilevamento ad elevato rendimento. Queste vetture permettono anche di elaborare direttamente a bordo i dati monitorati per effettuare la diagnosi puntuale dello stato dell'infrastruttura. In tal modo è possibile fornire, in tempi reali, dati sullo stato dei binari, eliminare tempestivamente le eventuali cause di anomalia e accelerare la programmazione e la pianificazione degli interventi di manutenzione.

Questo tipo di ispezione della linea, è detta on condition, data la stretta correlazione tra rilevamento diretto dei difetti ed intervento di correzione.

Le prime vetture per il rilevamento della difettosità del binario utilizzavano sensori meccanici, con rilevatori a diretto contatto con le rotaie (i dati forniti da tre sensori orizzontali, montati su tre assali telescopici in continuo contatto i binari, sono un semplice esempio di monitoraggio dell'allineamento del binario).

Sebbene questi sistemi rappresentavano un'innovazione e consentivano un notevole miglioramento di raccolta dati rispetto alle rilevazioni manuali, non potevano essere utilizzati per le misure sulle linee ad alta velocità, in quanto i sensori non riuscivano a mantenere un contatto continuo con i binari.

Sistemi più recenti hanno permesso la valutazione geometrica del binario attraverso tecnologie senza contatto, con l'utilizzo di sensori laser ottici in congiunzione con

accelerometri e giroscopi verticali. Questo approccio ha consentito il superamento dei limiti di velocità che si esistevano per i sensori meccanici.

Tuttavia l'uso di giroscopi e accelerometri ha comunque portato a dei problemi insiti nella natura del sensore. Infatti quando i rilievi ottenuti mediante accelerometri vengono doppiamente integrati per valutare lo spostamento del veicolo ferroviario, si determina un errore nella valutazione della posizione del veicolo che cresce quadraticamente con il tempo. Questo rende la valutazione dello spostamento inutilizzabile per la caratterizzazione della geometria del binario per basse velocità della vettura. Anche i giroscopi verticali forniscono rilevazioni errate se sottoposti ad una forza centripeta, ciò può causare una scorretta stima della sopraelevazione in curva.

Affinché le misurazioni geometriche siano significative è inoltre opportuno conoscere la posizione degli elementi caratteristici del binario rispetto a punti di riferimento, quali incroci, stazioni ed altro. Questo può avvenire manualmente, con rilevatori geometrici utilizzati direttamente sulla pista, oppure automaticamente con moderni rilevatori di posizione. L'ideale sarebbe utilizzare entrambi gli approcci, in quanto la sincronizzazione manuale è soggetta ad errori ma i rilevatori di posizione automatici sono costosi da installare e possono essere facilmente danneggiati.

Viste le carenze intrinseche legate agli strumenti di misurazione e di posizionamento si è sviluppato un sistema di misurazione della geometria del binario senza contatto, basato sulla tecnologia di posizionamento e orientamento (POS). Questa tecnologia combina i dati forniti da rilevatori GPS e da sensori inerziali, fornendo una continua ed accurata soluzione di navigazione.

Questo nuovo sistema di misura prende il nome di POS/TG e consente di misurare la geometria del binario in condizione di carico normale. Apparecchiature di questo tipo, compatte e leggere, sono anche di facile installazione e configurazione e, non essendo sistemi meccanici, non necessitano di eccessive manutenzioni. Tutti i sensori POS/TG sono tarati dai produttori, quindi non è necessaria nessuna calibrazione sul campo il che può essere un vantaggio ma anche uno svantaggio nel

momento in cui bisogna attendere e debitamente pagare l'addetto alla calibrazione dello strumento. Il POS è caratterizzato da una tecnologia molto robusta e solida, pertanto la dinamica del veicolo ed il senso di marcia non influiscono sulla precisione delle misure ottenute. Quest'apparecchiatura è in grado di monitorare la geometria del binario in maniera continua, in un intervallo selezionabile dall'utente (in genere ogni 25 cm), con un range di velocità che va da un valore minimo prossimo allo zero, ad un valore massimo di 300 km/h. Il limite inferiore di velocità si riferisce alla velocità media su una data lunghezza della corda (in generale 10 o 20 metri) o sulla lunghezza di una curva con una data lunghezza d'onda ad esempio 30 o 50 m, consentendo brevi periodi di stazionarietà, senza invalidare le misurazioni geometriche. Per esempio, per mantenere la precisione misurando la geometria con basse velocità, la lunghezza della corda deve essere percorsa in meno di 300 secondi tale che per una corda di 10 metri di lunghezza la velocità minima deve essere di 0,03 m/s quindi 0,1 Km/h. Il POS/TG essendo anche un sistema di navigazione fornisce la posizione geografica precisa in termini di latitudine, longitudine e altitudine; l'orientamento in termini di rollio, beccheggio e le caratteristiche dinamiche del veicolo quali accelerazione e vettori di velocità. La caratteristica del POS/TG è quella di fornire accurate informazioni sulla posizione del veicolo ferroviario, anche durante le interruzioni del segnale GPS, azionando un sistema di sincronizzazione della posizione che correla dati geometrici con punti di riferimento fisici. Il POS/TG è costituito da un sistema di Computer (PCS), e da quattro sensori: una piattaforma inerziale, un ricevitore GPS, un odometro e dei rilevatori ottici. La piattaforma inerziale è integrata con un gruppo di sensori costituiti da accelerometri lineari in silicio e giroscopi a fibre ottiche. Il ricevitore GPS elabora i segnali provenienti da una rete di 24 satelliti che forniscono una copertura a livello mondiale e un livello di precisione di pochi metri. Se è richiesta una precisione maggiore si può utilizzare un GPS differenziale. L'odometro emette impulsi rappresentativi dei giri frazionari della ruota, sommando questi impulsi è possibile valutare la distanza percorsa dal veicolo. In

combinazione con i dati di posizione, i sensori laser misurano lo spostamento di ciascun binario da un punto di riferimento e permettono la valutazione accurata di grandezze come l'allineamento e la curvatura. Questi rilevatori ottici sono montati su i due assili delle sale montate tale che i rilevatori posteriori possano verificare l'esattezza delle misure elaborate da quelli anteriori. Per garantire prestazioni ottimali il POS/TG calibra costantemente i suoi sensori. Se infatti un sensore mostra un decadimento delle prestazioni, questo verrà isolato e riconfigurato per preservare l'integrità dei dati. Il sistema POS/TG è nato dalla combinazione dell'esperienza ferroviaria di Plasser e dalla competenza nella navigazione integrata di Applanix. Questo dispositivo, montato su un normale convoglio ferroviario, costituisce un treno diagnostico capace di monitorare la geometria del binario con alte prestazioni.

Esistono, comunque, una grande varietà di vetture per il rilevamento, capaci di monitorare con precisione la geometria del binario, in dotazione delle Ferrovie Italiane e Europee.

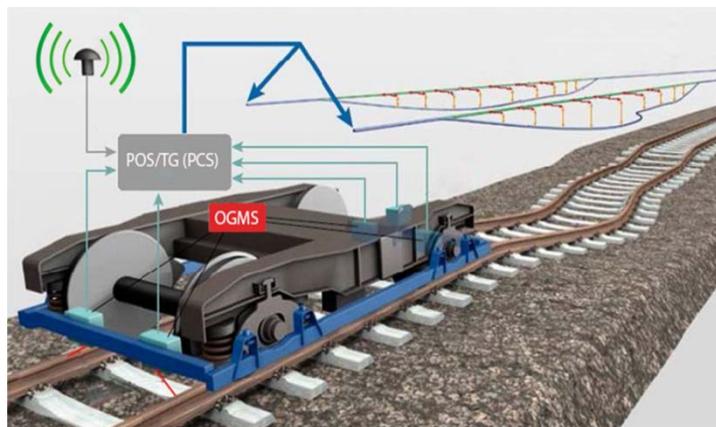


Figura 3.5: Schema del sistema di monitoraggio del binario POS-TG.

Le vetture di rilevamento della geometria del binario, per velocità maggiori o uguali di 200 km/h, sono costituite da carrozze ferroviarie standard, munite di sistemi di misurazione del tipo senza contatto. Uno dei treni di misurazione più avanzati, per elevate velocità, è il EM 250 delle Ferrovie Austriache (OBB),

costituito da un normale treno passeggeri dotato di due sistemi di misura inerziali, utilizzati separatamente per la misurazione della geometria del binario e del profilo delle rotaie. Entrambi i sistemi funzionano senza contatto, su base ottica, mediante l'utilizzo di appositi laser. La geometria del binario viene monitorata con una frequenza di campionamento di 25 cm. Ogni 10 m vengono analizzati i profili delle rotaie, costituiti da oltre 500 punti rilevati per ciascun fungo delle rotaie, analizzati in termini di usura e conicità equivalente. La corretta posizione delle misure effettuate, viene fornita da un sistema di navigazione che utilizza le informazioni di un GPS differenziale.

Per reti ferroviarie tradizionali vengono utilizzati treni diagnostici con velocità di marcia compresa tra 80 a 160 km/h che utilizzano dei sistemi di misurazione senza contatto o con assi telescopici. I treni di misurazione più avanzati, in questo senso, sono i treni UFM 120 delle Ferrovie Olandesi, e EM 130 delle Ferrovie Belghe.

La vettura UFM 120, della compagnia EURAILSCOUT, effettua le rilevazioni con velocità di 120 km/h, ed è equipaggiata con le stesse apparecchiature di misura per il binario e la rotaia della vettura EM 250. In aggiunta, presenta un sistema video per la scansione dei difetti delle rotaie, unito ad un sistema di misurazione laser senza contatto per individuare i difetti superficiali dell'armamento.

L'UFM 120 è equipaggiato con un sistema di misura senza contatto di tipo inerziale (IMS), costituito da tre gruppi di giroscopi e accelerometri per le tre direzioni spaziali. Con la combinazione di un sistema di misura ottico, sensori laser e un sistema di posizionamento GPS si garantisce un'elevata precisione delle misure effettuate a lungo termine. Il sistema di misura della geometria del binario è posizionato nella parte anteriore del veicolo, tra gli assi, ed è in grado di rilevare lo scartamento, il livello trasversale, la sopraelevazione e lo sghembo. Questi parametri vengono misurati ogni 25 cm e memorizzati in un sistema di computer a bordo del veicolo. I dati vengono processati e stampati durante la corsa. Tutti i dati misurati possono essere rappresentati graficamente ed essere rielaborati in valori medi.

La vettura EM 130 delle Ferrovie Belghe è una vettura di rilevamento a quattro assi che può raggiungere velocità di 130 km/h e che utilizza un sistema di misurazione a corda per mezzo di assi telescopici o carrelli di misurazione per la geometria del binario, per la definizione del profilo delle rotaie utilizza un sistema laser senza contatto.

Tra i mezzi di diagnostica mobile in dotazione delle Ferrovie Italiane (RFI), si ricordano i principali per la rilevazione della geometria del binario: il Treno Archimede, i treni ETR 500 Y1-Y2. La flotta dei treni diagnostici di RFI è più ampia in quanto molti treni fungono anche da macchine per la manutenzione.

Di seguito si riporta una tabella riassuntiva delle sole grandezze monitorate dai treni diagnostici delle compagnie ferroviarie italiane; trascurando le caratteristiche di manutenzione.

Archimede è un treno diagnostico per il rilievo dello stato geometrico del binario, della funzionalità della linea di alimentazione e degli apparati tecnologici di sicurezza che controllano la circolazione. E' in grado di correlare tutti i dati tra di loro, è può operare con velocità di marcia massima di 200 km/h. Il treno è un treno specializzato per il rilievo ed ha la carrozza semi-pilota in testa e la motrice è in coda. Sulla seconda e terza carrozza è installato un sistema di misura della progressiva chilometrica e di rilevamento dei punti singolari quali ponti, scambi e passaggi a livelli. Il sistema di rilevamento della posizione è fornito dalla presenza di odometri, di radar che misurano lo spazio sfruttando l'effetto Doppler e di un sistema GPS differenziale. Le misure sull'armamento sono effettuate nella terza carrozza, dove sono dislocati i dispositivi che misurano tutte le grandezze geometriche legate alla singola rotaia ed al binario. Il profilo e l'usura delle rotaie sono rilevati da un sistema di sensori laser unito ad un impianto di telecamere che ne permettono la video-ispezione. L'affidabilità delle grandezze rilevate con il treno Archimede è elevata, in quanto sono del tutto assenti fenomeni di inerzia tipici degli organi di trasmissione meccanica.

La velocità massima che può essere raggiunta, invece, dai treni diagnostici 500 Y1 e 500 Y2 è di 300 km/h. Questi treni presentano accelerometri montati su tutti i carrelli e casse del rotabile: questo permette al treno di raggiungere delle velocità maggiori di quella di fiancata, in quanto le grandezze dinamiche sono monitorate in maniera continua. I treni 500 Y1 e 500 Y2 sono in grado quindi di analizzare sia la geometria del binario che la dinamica del rotabile.

Inoltre si sono sviluppati sistemi complementari per la rilevazione delle onde corte relative alla geometria delle rotaie: carrelli o regoli per la misura dei difetti di ondulazione e corrugazione delle rotaie o relativi alla geometria della saldatura, e appositi strumenti collocati sulle boccole della vettura per la misurazione dell'accelerazione verticale. Quest'ultime misure vengono filtrate in modo che i risultati ottenuti siano il più possibile indipendenti dalla velocità.

Moltissime sono le case produttrici che sul mercato offrono una vasta gamma di sensori utili agli scopi sopra citati.

Tabella 3.4: Schema riassuntivo delle principali caratteristiche dei treni diagnostici dei gestori italiani.

Dnominazione	Grandezze monitorate	Tecnologia di misura	Velocità di misura
Diamante	Prmetri geometrici, di segnalamento, elettrici	Laser ottico, video ispezione digitale GPS	300 Km/h
Galileo	Controllo delle rotaie	Ultrasuoni, video ispezione digitale	45 Km/h
Talete	Geometria del binario, accelrazioni, usura delle rotaie	Laser ottico, giroscopio	160 Km/h
Cartesio	Video controllo analogico delle linee	Telecamere	120 Km/h
Euclide	Usura ondulatoria della rotaia	Laser ottico, giroscopio	90 Km/h
Archimede	Tutti i parametri dell'infrastruttura	Laser ottico	200 Km/h
Aldebaran	Linea di contatto, telecomunicazioni	Laser ottico	-
POS TG Plasser	Geometria del binario	Laser ottico, giroscopio	90 Km/h

Un'altra modalità di rilievo dei difetti del binario largamente diffusa, consiste nell'impiego di sistemi con tecnologia ad ultrasuoni.

I sistemi di monitoraggio ad ultrasuoni possono essere direttamente manovrati da un operatore oppure, i più complessi, richiedono un fissaggio su di un veicolo. Le velocità massime di fiancata per acquisizione del dato sono 40-100 Km/h. Questi sistemi sono in grado di misurare anche lo sviluppo di eventuali fessure nelle rotaie. Il loro principio di funzionamento si basa su l'iniezione diretta di una vibrazione ad alta frequenza, all'interno della rotaia, mediante un trasmettitore piezoelettrico. Le onde generate da un simile impulso possono essere riflesse o assorbite a causa degli eventuali difetti che trovano lungo il loro percorso di propagazione. Un ricevitore raccoglie i segnali dal trasmettitore e, a seconda potenza del segnale e o delle posizioni relative del ricevitore e il trasmettitore, è possibile stimare la dimensione, e talvolta caratteristiche, del difetto.



Figura 3.5: Esempio di sistema di monitoraggio del binario con tecnologia ad ultrasuoni.

Tra i test non distruttivi sulle rotaie si ricordano anche dei sistemi di radiografia finalizzati all'individuazione di eventuali difetti di saldatura o di produzione.

Inoltre stando alle norme UNI EN13848, i principali metodi per l'analisi della geometria del binario, e quindi della sua eventuale difettosità, si basano su due sistemi: il sistema di misura a corda e il sistema di misura inerziale.

Con il metodo di misura della corda le misure di allineamento e di livello si ottengono attraverso la misurazione di tre punti di una corda. I tre punti di misurazione si ottengono con misuratori ottici o assi telescopici. Il sistema di misura a corda presenta un sistema di riferimento locale, che può essere riferito alla cassa del veicolo se questo è molto rigido. I sensori utilizzati per questo metodo di misura possono essere di tipo a contatto o senza contatto. Normalmente con i sistemi di misura a contatto vengono utilizzati sensori montati sulle ruote, per quanto riguarda la direzione verticale, e sensori specifici quali rulli e carrelli per la direzione laterale. I dati rilevati vengono digitalizzati per consentire una loro ulteriore rielaborazione, ed attraverso dei procedimenti di analisi vengono rappresentati sotto forma di diagrammi. Lo svantaggio di questo metodo è legato alla difficoltà del trasferimento della misura rilevata, che deve essere corretta attraverso dei metodi analitici per conformarsi ai requisiti della norma UNI EN-13848, in termini di intervalli di lunghezza d'onda. Questo avviene mediante un'applicazione che ad una data lunghezza d'onda del difetto restituisce il valore numerico del rapporto tra l'ampiezza della funzione misurata e l'ampiezza del difetto reale. Infatti il segnale può essere definito scomponibile in una somma di infinite componenti sinusoidali di differente lunghezza d'onda. Per ogni componente sinusoidale esiste, per effetto della misura a corda, un ben preciso rapporto fra valore reale del difetto e valore rilevato, inoltre il valore rilevato è sfasato rispetto al valore reale. Manipolando analiticamente, a bordo treno, i dati monitorati, è possibile esportare dati con lunghezze d'onda comprese in specifici intervalli fissati dalla normativa. Questo sistema di misurazione, inoltre, non richiede una velocità minima di acquisizione dei dati.

Con il sistema di misura inerziale la geometria del binario viene valutata attraverso la definizione della posizione verticale e orizzontale della rotaia relativamente ad un riferimento inerziale che viene fornito da accelerometri e giroscopi. A seconda di dove è montato il sistema inerziale, nel corpo del veicolo oppure in un carrello, sono montati sensori aggiuntivi per misurare la distanza tra le rotaie e valutare il

sistema di riferimento inerziale. Con i sistemi inerziali, a differenza della misurazione con il sistema a corda, è necessaria una velocità minima di misurazione per ottenere dati attendibili.

Il sistema di misura a corda viene utilizzato per valutare difetti di allineamento e di livello mentre lo scartamento viene misurato attraverso l'utilizzo di sensori meccanici (carrelli o rulli) o sensori senza contatto (generalmente sensori ottici), che possono essere montati sul veicolo o su un carrello. Il difetto di sopraelevazione viene misurato attraverso sistemi inerziali ed in alcuni casi sono necessari sensori addizionali per compensare il moto del sistema inerziale rispetto a quello delle rotaie.

Lo sghembo può essere ricavato dalla misurazione della sopraelevazione, oppure misurato direttamente attraverso sensori appositi.

3.4 Metodologie di elaborazione delle misure, la funzione di densità spettrale di potenza (PSD)

Diversamente da quanto accade in campo stradale (International Standard ISO 8608 “Mechanical Vibration – Road surface profiles Reporting of measured data”), in campo ferroviario le norme vigenti non raccomandano l'utilizzo delle funzioni di densità spettrale di potenza (Power Spectral Density – PSD) per l'analisi di fenomeni aleatori quali la difettosità della linea ferroviaria.

Le irregolarità delle vie di corsa, che di fatto sono processi casuali stazionari, possono essere espresse in forma spaziale generalizzate, oppure in forma sintetica tramite gli spettri di densità spaziale e temporale. Nel primo caso si riproduce fedelmente l'andamento del difetto lungo la linea, nel secondo si effettua una rappresentazione statistica del dato aleatorio.

Un segnale monitorato, inteso come una grandezza fisica associata alla misura di un fenomeno di interesse scientifico, è un processo causale se, fissato un qualunque istante di tempo, il valore assunto dal segnale è caratterizzabile solo in senso statistico, cioè è una variabile casuale descritta dalla sua densità di probabilità.

Considerare i rilievi delle difettosità geometriche della linea ferroviaria alla stregua di un segnale di tipo digitale acquisito elettronicamente, permette, almeno teoricamente, di ricondurre lo stesso ad un processo aleatorio stazionario ed ergodico.

Un segnale digitale è tanto più simile a quello analogico quanto più piccolo è il periodo di campionamento e quanto più grande è il numero di cifre decimali con cui si acquisisce il segnale.

Un processo si definisce stazionario se i suoi parametri statistici sono invariati rispetto al tempo. Un processo stazionario è anche ergodico quando tutti i parametri statistici che lo caratterizzano possono essere ottenuti considerando un unico elemento, scelto casualmente all'interno dell'insieme statistico.

Un segnale così fatto può essere rappresentato nel dominio della frequenza spaziale, passando attraverso la funzione di densità spettrale di potenza.

Un generico segnale può essere espresso come somma di oscillazioni sinusoidali di ampiezza, frequenza e fase opportune. Tali sinusoidi sono generalmente definite come funzioni del tempo. Nei casi in cui sono espresse in funzione della distanza, la frequenza di cicli è detta numero d'onda ed è il reciproco della lunghezza d'onda e rappresenta il numero di cicli per unità di lunghezza.

La trasformata di Fourier è lo strumento matematico che consente di passare, nello studio dei segnali, dall'analisi nel dominio del tempo a quella nel dominio delle frequenze.

Un segnale può essere scomposto in una somma di funzioni armoniche, solo in tal modo è possibile descrivere in forma analitica un fenomeno aleatorio. L'insieme delle frequenze delle armoniche contenute nel segnale, e dei relativi moduli e fasi, costituiscono il contenuto in frequenza del segnale.

La PSD restituisce il contenuto in frequenza di un segnale (difetto) e il valore delle ampiezze delle diverse armoniche in cui è scomposto il segnale.

La rappresentazione dell'irregolarità mediante la PSD offre due vantaggi principali. In primo luogo costituisce una generalizzazione del fenomeno, ad esempio linee con profili individuali diversi ma posate con materiale simile e con analoghi metodi di manutenzione avranno con molta probabilità caratteristiche statisticamente simili. Inoltre riassume in modo sintetico le proprietà in esame e fornisce i dati, in forma immediatamente utilizzabile come segnali di input per elaborazioni più spinte.

Tale rappresentazione non fornisce, però, indicazioni sui difetti isolati che devono essere individuati per altra via.

Pertanto è possibile quantificare il contenuto in termini di densità spettrale di potenza delle ampiezze della forma d'onda difettosità superficiale in relazione ad un intervallo di frequenza spaziale.

Considerato un tronco di lunghezza L e passo di campionamento ΔL , l'intervallo di definizione della funzione discreta PSD, espressa in armoniche con una scansione pari a Δn , va da 0 a n_{max} ; con n_{max} pari alla frequenza teorica spaziale massima. I valori di Δn e n_{max} dipendono solamente dalla lunghezza e dal passo adottato per la misura del profilo.

Per un segnale aleatorio stazionario è possibile definire, in forma discreta data la discretizzazione dei rilievi, la PSD come segue:

Dove in corrispondenza di $F=1$ si ha l'ordinata in corrispondenza della frequenza spaziale unitaria e con N si definisce la pendenza della retta

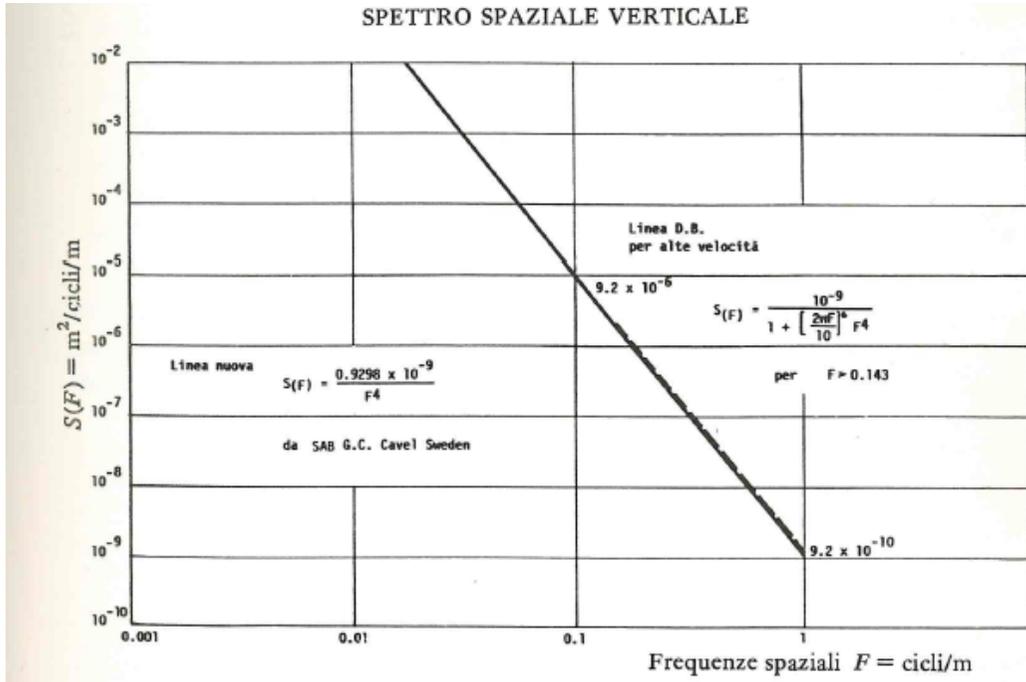


Figura 3.6: Spettro spaziale verticale basico (SAB Swedel) (DB).

Nel caso specifico dello spettro spaziale verticale (SAB Sweden) si ha:

Passando dal campo spaziale al temporale per

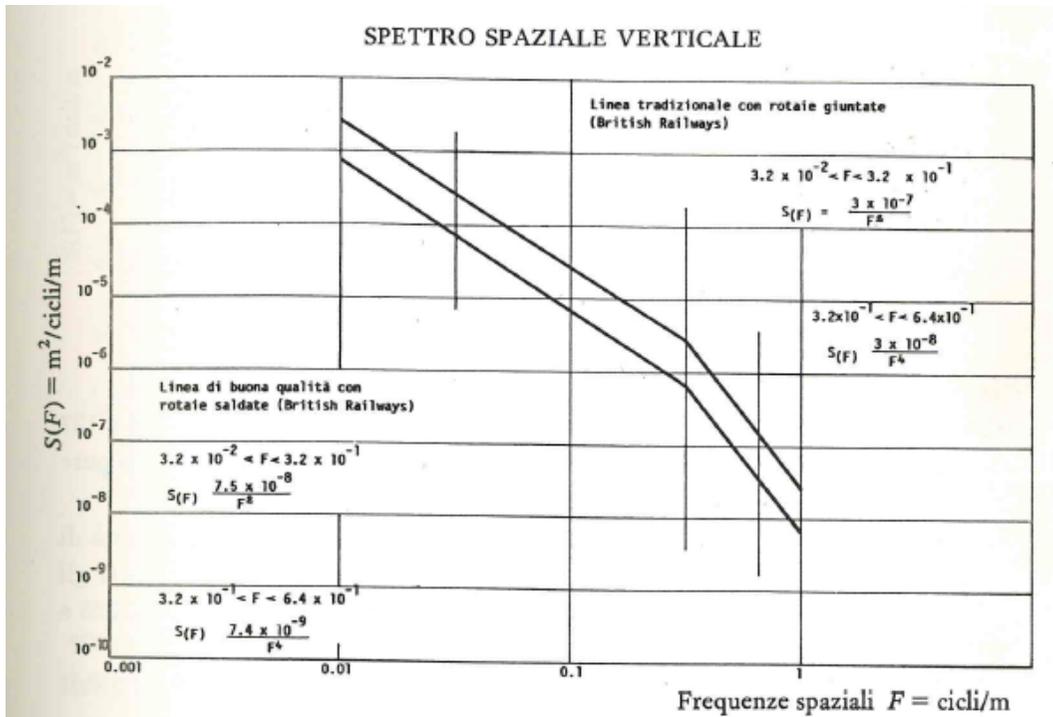


Figura 3.7: Spettro spaziale verticale spezzato a due rette (British Railways).

Le SNFC rilevano nel tratto di linea Paris – Toulouse tra il chilometro 136 e 137 il loro spettro di linea tenendo conto delle disuniformità di linea verticale Z e pure laterale Y, considerando il tratto di linea rappresentativo dell'intero percorso.

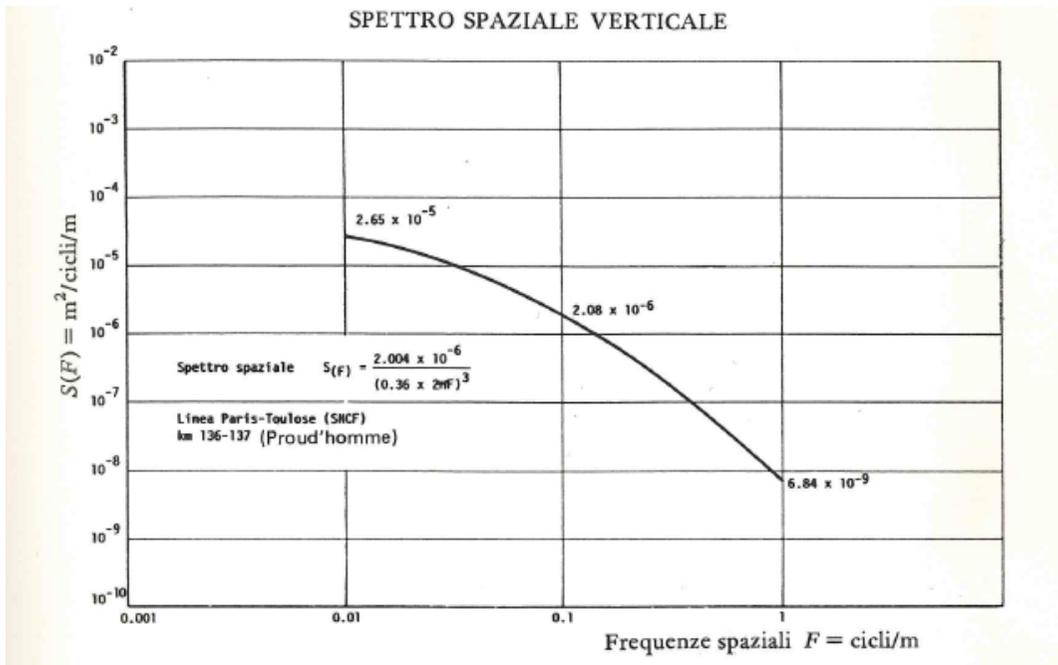
Gli spettri sono ottenuti registrando per banda magnetica le disuniformità di linea tramite le vetture Mauzin e partendo dalle registrazioni si sono ottenuti gli spettri che rappresentano le diverse lunghezze d'onda nel campo di rilievo tra 0.025 e 0.5 cicli/m.

Al di fuori di questo campo la precisione del rilievo è insufficiente dati i mezzi di rilievo disponibili, anche se le lunghezze d'onda più corte e più lunghe intervengono in modo non trascurabile nella definizione dello spettro.

Lo spettro spaziale di densità di potenza che media i rilievi sperimentali è espresso matematicamente con una espressione del tipo:

In questo caso per $F=1$ non si ha l'ordinata caratteristica C, poiché questa varia in funzione dell'esponente N che definisce la pendenza della retta.

Nel campo delle frequenze spaziali, lo spettro di densità di potenza verticale ha i seguenti valori numerici:



4 Il fenomeno dello svio

Il degrado della via, insieme a quello del veicolo e alle avverse condizioni ambientali o proprie del macchinista, sono le principali cause di svio.

Data la complessità e l'aleatorietà del fenomeno, nel settore del trasporto su rotaia assume un peso determinante la ricerca sulla dinamica del veicolo ferroviario. Cento e più anni di studio teorico e sperimentale riguardano, in particolare, il fenomeno dello svio. Fenomeno di instabilità dell'equilibrio, secondo il quale sussiste il sormonto della rotaia da parte di una o più ruote di un veicolo ferroviario.



Figura 4.1: Sequenza di svio di una ruota ferroviaria.

La vasta letteratura tecnica che, continua ad arricchirsi negli anni, è alimentata da una continua ricerca scientifica rivolta al conseguimento di tre obiettivi principali tra loro consequenziali:

- avere la piena conoscenza del fenomeno e delle cause che lo innescano, le azioni agenti al contatto ruota-rotaia sono diverse e sono legate alle svariate condizioni di dinamica di marcia,
- determinare dei limiti parametrici al di sotto dei quali è garantito il contenimento del fenomeno,
- sviluppare provvedimenti tecnologici atti a impedire che si verifichi il fenomeno.

Si riportano di seguito le principali ricerche effettuate in Europa che hanno fornito enormi e validi contributi all'interpretazione del fenomeno.

Dal punto di vista temporale le prime ricerche sono ascrivibili alla scuola francese. (Bruner M.; Corazza G. R.; Cosciotti E. Lo svio. Cento e più anni di ricerche di un problema complesso. Gli inizi e la scuola francese. Ingegneria Ferroviaria, 12/2009, pp. 1083-1096).

Il primo ad aver trattato il fenomeno dello svio è Pochet, nell'ipotesi di ruota isolata con il bordino della ruota a contatto con la rotaia e sollevata di 2-3 millimetri.

Considerando la seguente notazione, schematizzata nella figura che segue,

Y = forza orizzontale di guida agente sulla ruota.

Q = carico verticale dinamico.

β = angolo di inclinazione del bordino valutato rispetto alla verticale (direzione della forza peso).

μ = coefficiente d'attrito ruota-rotaia.

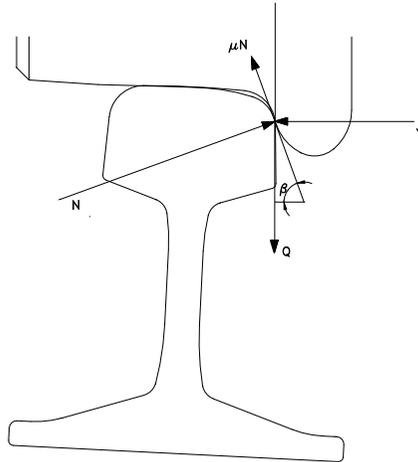
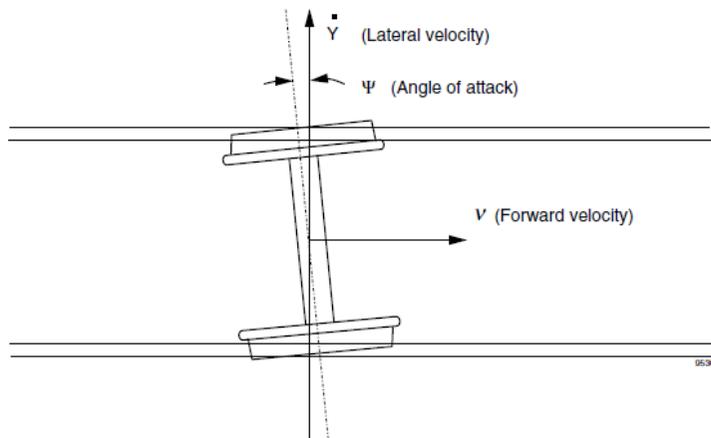


Figura 4.2: Schema delle forze agenti nel punto di contatto ruota-rotaia.

Affinché la ruota possa tornare nella posizione di sicurezza, secondo Pochet occorre che sia verificata la seguente relazione:

Si devono a Mariè ulteriori sviluppi della trattazione, egli considera, nelle ipotesi di sala montata isolata, anche gli effetti legati al veicolo e alla via con i suoi difetti (in particolar modo quelli verticali, dai quali dipendono eventuali possibilità di scarico di una ruota e conseguenzialmente pericolo di svio), all'angolo di attacco della ruota di guida rispetto alla rotaia, all'aleatorietà dei fenomeni, alla forma dei bordini, alla variabilità del coefficiente d'attrito e alla durata dello svio.

Altra trattazione dello svio meritevole di nota è quella del tedesco Uebelacker. (Bruner, M.; Corazza G. R.; Cosciotti E. Lo svio. Cento e più anni di ricerche di un problema complesso. Gli inizi e la scuola tedesca).



effettuata su di modelli in scala e con banchi di prova costituiti da due sale montate contrapposte, una per simulare il binario, con profilo sagomato a fungo, e l'altra la sala montata, con ruote cilindriche, utilizzati per la misura dell'attrito. Le sperimentazioni della SNCF francese sono state effettuate utilizzando un vagone con tre sale montate, quella centrale, opportunamente caricata è oggetto di ossevezione. Analogo dispositivo è stato utilizzato per condurre la sperimentazione nel 2000 al centro sperimentale di Velim (Repubblica Ceca), nell'ambito del progetto DYSAF. (Bruner M., et al. Cento e più anni di ricerche sullo svio. I "deragliatori". Ingegneria Ferroviaria, 6/2012 pp. 509-527)

Tabella 4.1: Riepilogo delle prime e principali sperimentazioni effettuate riguardo il fenomeno dello svio.

	Labrijn	SNFC	DYSAF
Anno	1930	1950-1970	2000
Campo di prova	Modelli e binario reale	Binario reale	Binario reale
Velocità	0-40 Km/h	0-40 Km/h	0-180 Km/h
Variabili	Coefficiente d'attrito, conicità. Usura, angolo d'attacco, forma bordini, Y/Q	Y/Q, tipo del binario, forze orizzontali	Y/Q, coefficiente attrito, forze orizzontali
Modello teorico di riferimento	Heumann	Chartet	Nadal
Utilizzo di software di verifica	No	No	Si
Approccio Multibody	No	No	Si
Risultati	Leggi tra coefficiente d'attrito- angolo d'attacco; velocità di svio - carico	Limiti per il rapporto H/Q, leggi tra resistenza laterale - carico	Analisi dinamica, limiti per il rapporto Y/Q

4.1 Condizioni fisiche di instabilità allo svio e misure preventive

Nella valutazione della sicurezza di marcia di un veicolo ferroviario riveste fondamentale importanza definire in maniera rigorosa ed affidabile il parametro o la grandezza che quantifichi i margini di sicurezza nei riguardi dello svio.

Evitare lo svio è importante sia per ragioni di sicurezza che per ragioni economiche.

In generale la sicurezza a marciare viene garantita quando le forze di interazione ruota-rotaia rimangono contenute entro determinati limiti al fine di evitare lo svio o la deformazione del binario. Diversamente da quanto detterebbe il senso comune lo svio può avvenire anche a basse velocità su binari secondari o in deposito, dove i binari sono soggetti a più blande manutenzioni e a carrozze scariche, (prive di passeggeri).

Le cause che determinano lo svio sono, per tanto, differenti se ci si riferisce a condizioni di marcia quasi statiche (velocità minori di 30 Km/h) o dinamiche (con valori di velocità di fiancata anche maggiori di 200 Km/h.). Nel primo caso giocano un ruolo fondamentale, i difetti del binario, lo sghembo, la sopraelevazione e la presenza di punti singolari della linea quali scambi. Nel secondo caso è importante tenere sotto controllo gli accoppiamenti di frequenze proprie ed eccitrici del binario e del veicolo stesso, la velocità di fiancata, l'entità della forza centrifuga e dei raggi di curvatura per la ragione dell'iscrizione del veicolo in curva e la geometria del binario. Generalmente lo svio avviene in curva o quando il veicolo percorre curve di transizione anche se, con condizioni particolari di vento, questo può verificarsi anche in rettilineo. Inoltre l'esperienza mostra che ad alte velocità, le forze ruota-rotaia possono essere più elevate ma risultano intermittenti. Alla luce di quanto detto, i criteri generalmente adottati per verificare la stabilità di marcia di un veicolo ferroviario riguardano essenzialmente:

- lo svio della ruota (limite di Nadal),
- lo spostamento trasversale permanente del binario (limite di Proud'Homme),
- lo stato di sollecitazione del binario (concetto di velocità critica).

Il limite di Nadal è generalmente molto cautelativo e dipende da numerosi parametri legati alla tipologia della linea e del veicolo. E' possibile definirlo in maniera precisa e aderente alla realtà solo mediante adeguate prove sperimentali o

simulazioni numeriche con software dedicati, finalizzate ad individuare in anticipo le condizioni per cui più facilmente si possono raggiungere i limiti di svio.

Dalla formulazione riportata al paragrafo precedente, ottenuta mediante considerazioni di equilibrio della ruota nelle ipotesi di contatto puntiforme e assenza di forze di inerzia. è evidente che, minore è l'angolo di inclinazione del bordino (β), valutato rispetto alla verticale, direzione della forza peso, e più alta la probabilità che la ruota svii. Così come, maggiore è il coefficiente d'attrito (μ), maggiore è la probabilità di svio. Pertanto, noto che il coefficiente d'attrito aumenta con il ridursi della velocità del veicolo, è chiaro che sussiste pericolo di svio del veicolo ferroviario anche a basse velocità.

Affinché avvenga realmente lo svio, non è necessario superare solo i limiti suggeriti da Nadal, ma è necessario che questi valori vengano superati per una lunghezza planimetrica di almeno 0.5 m; per consentire alla ruota di aggrapparsi alla rotaia e sormontarla in maniera completa.

(Diana G. et al. Sullo svio di un veicolo ferroviario. Influenza dei vari parametri. Ingegneria Ferroviaria, 2/2012 pp.109-135)

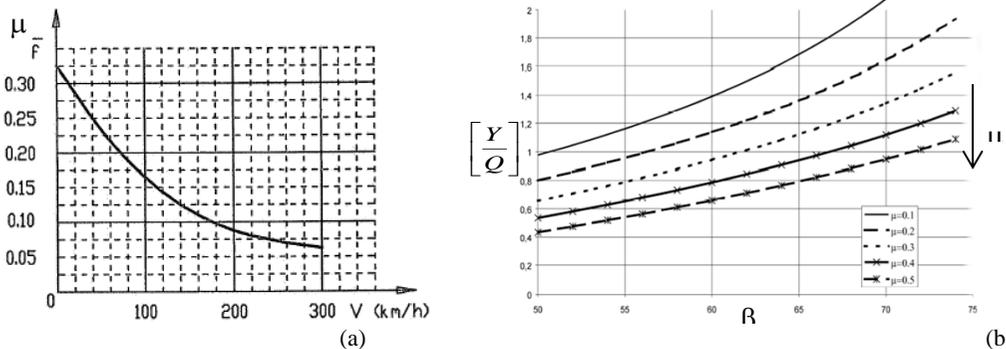
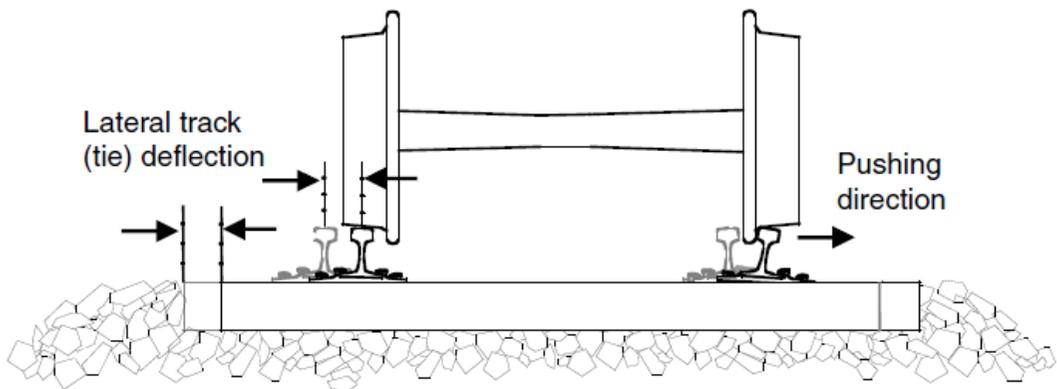


Figura 4.4: Andamento del coefficiente d'attrito ruota-rotaia in funzione della velocità di fiancata (a); andamento del limite di svio di Nadal in funzione del coefficiente d'attrito ruota rotaia e dell'angolo di inclinazione del bordino (b).

Per quanto riguarda lo spostamento laterale del binario (ripage) la sicurezza nei confronti dello svio è garantita finché la spinta assiale (H), o meglio la sommatoria

delle forze orizzontali (Y) agenti sulla rotaia, non superano la resistenza laterale del binario, funzione dell'attrito ballast-rotaia, che aumenta all'aumentare del carico che vi grava sopra. La formula, di derivazione sperimentale, che riassume tale concetto è nota come formula di Proud'Homme. (UNI EN 14363).

per veicoli motori, nei quali le masse in gioco (masse non sospese) possono essere notevolmente superiori a quella della sola sala montata, già di per sé notevolmente più pesante di quelle dei veicoli rimorchiati.



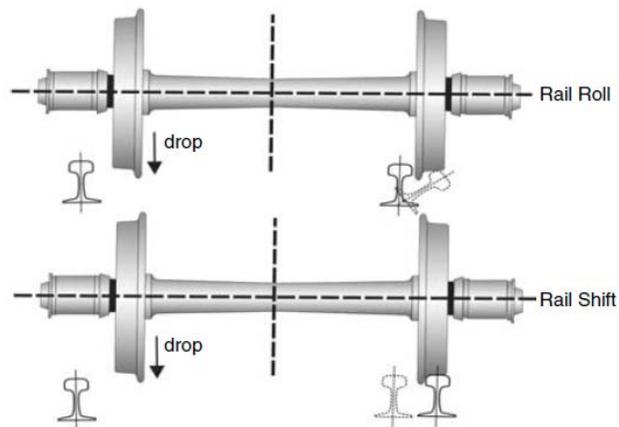


Figura 4.6: Deragliamenti causati da un eccessivo valore dello scartamento.

Un ulteriore indice utilizzabile per verificare la stabilità di marcia è la velocità critica. Questa è la velocità in corrispondenza della quale il moto di serpeggio dell'assile (che aumenta all'aumentare della velocità di fiancata, in frequenza e ampiezza, a causa della riduzione dello smorzamento al contatto ruota-rotaia) diventa di entità tale da recuperare tutto il gioco consentito dalla linea e si ha un fenomeno di percussione ad alta frequenza (urto continuo tra bordino e rotaia).

Per valori medi di velocità (circa pari a 160 Km/h), la sala, grazie alla conformazione troncoconica delle ruote, è nelle condizioni di centraggio rispetto al binario dopo aver subito alcune oscillazioni smorzate sinusoidali.

Con l'aumentare delle velocità le oscillazioni laterali della sala diventano superiori al gioco bordino-rotaia generando il fenomeno di percussione che causa affaticamento del passeggero e notevoli sollecitazioni al veicolo ed alla linea.

La velocità critica segna il passaggio dalla stabilità all'instabilità, questa deve essere maggiore del 10-20% della massima velocità di fiancata per evitare fenomeni di risonanza che comportano un rapido degrado della linea, una diminuzione del comfort e una riduzione della vita utile del veicolo. (Panagin R. La dinamica del veicolo ferroviario. Levrotto & Bella Editore. 1990).

Con:

$2p$ = passo del carrello nonché base longitudinale della sospensione primaria

$2s$ = scartamento

λ = conicità equivalente

r_0 = raggio della ruota

M_w = massa di una sala montata

k_s = rigidità del collegamento trasversale degli assi

k_b = rigidità del collegamento angolare al serpeggio degli assi

Maggiore è la velocità critica, maggiori sono le condizioni di sicurezza con cui viaggia un veicolo ferroviario.

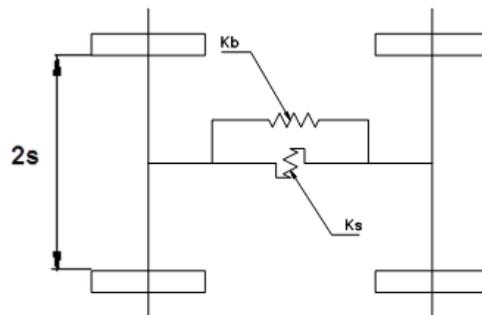


Figura 4.7: Schematizzazione del carrello di un veicolo con relative rigidità.

Dall'esame della formula emerge che un aumento della conicità equivalente, dovuto all'usura, influenza negativamente il limite della velocità critica in quanto abbassa la soglia di stabilità di marcia del rotabile. Una drastica riduzione delle masse non sospese, invece, è sempre favorevole, quindi una sala portante si comporta meglio, a parità di altri parametri, di una sala motrice che presenta parti del motore calettati sull'asse, così come l'aumento del diametro della ruota aiuta alla stabilità di marcia e l'incremento del passo del carrello, compatibilmente con il problema dell'iscrizione in curva, è fondamentale per aumentare la velocità critica che bilancia l'effetto negativo dell'aumento del momento di inerzia del telaio carrello. Contribuisce all'aumento della velocità critica, e quindi alla stabilità di marcia, anche l'installazione di ammortizzatori antiserpeggio, questi però devono

opporre scarsa resistenza all'iscrizione in curva e nel contempo reagire alle velocità corrispondenti alle frequenze di serpeggio.

Tra le condizioni fisiche di instabilità di marcia assumono un ruolo fondamentale i difetti del binario. Si rimanda la disamina dei difetti ai capitoli successivi, ma è bene anticipare che tra i difetti di posa del binario lo sghembo rappresenta la causa più comune di svio. Ogni tipo di veicolo, in ragione della maggiore o minore rigidità della cassa e o del telaio, della deformabilità delle sospensioni e delle condizioni di carico, dell'accoppiabilità tra le varie casse, ha una determinata capacità di adeguarsi alle irregolarità di binario.

La presenza e l'entità stessa dello sghembo altera la distribuzione di carico sulle ruote raggiungendo un valore critico oltre il quale una ruota del veicolo tende prima a scaricare parte del proprio peso, poi ad alzarsi innescando il sormonto del bordino sulla testa della rotaia ed infine il conseguente svio del rotabile.

Un carrello poggia sul binario in quattro punti (le ruote); in condizioni ideali, di carico equiripartito, i quattro punti di appoggio dovrebbero risultare su uno stesso piano ma nella realtà uno dei quattro punti è al di fuori di questo piano. Lo sghembo (g) è la variazione lungo l'asse del binario della pendenza trasversale e si esprime (definito in millesimi) come differenza del livello trasversale h (definito in millimetri) su una distanza di riferimento d (di solito passo o interperno, definita in metri).

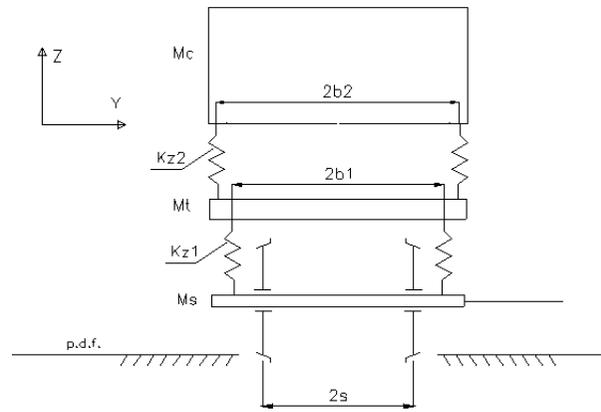


Figura 4.8: Schema del veicolo ferroviario ai fini del calcolo dell'incremento di carico causato dagli sghemi.

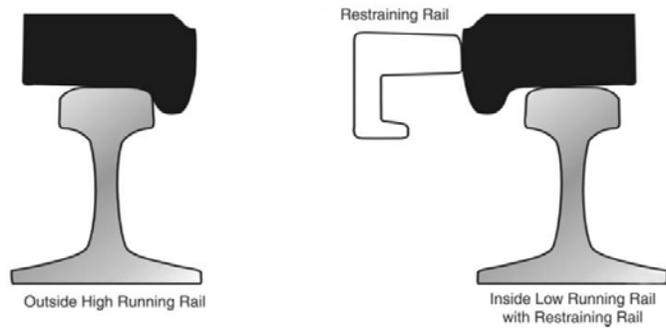


Figura 4.9: ISTALLAZIONE DI CONTROROTAIE COME MISURA PREVENTIVA DELLO SVIO.

5 La manutenzione delle infrastrutture ferroviarie

Come tutti gli impianti, anche i binari e l'intera sovrastruttura necessitano di manutenzione.

La manutenzione è quel complesso di operazioni e attività finalizzate a conservare le caratteristiche funzionali e strutturali delle infrastrutture nell'arco del periodo di vita utile. In base alle caratteristiche meccaniche dei materiali, e alle modalità di posa in opera (basti pensare ad esempio ai livelli di compattazione o bonifica del sottofondo), la vita utile di un'infrastruttura ferroviaria può andare dai 70 ai 100 anni (NTC 2008).

La sovrastruttura ferroviaria, come ogni elemento che la costituisce, è soggetta ad invecchiamento e decadimento delle caratteristiche funzionali dal momento in cui viene realizzata.

La sovrastruttura ferroviaria durante la sua vita utile è sottoposta, infatti, a forze orizzontali e verticali trasmesse dalla ruota ferroviaria durante il moto dei convogli e dovute ai carichi dinamici generati dai rotabili, da forze longitudinali dovute a sbalzi di temperatura e ai carichi termici, all'influenza degli agenti atmosferici e ad altre sollecitazioni esterne di tipo chimico o vegetativo.

Inoltre i carichi possono essere rappresentati dal peso statico del veicolo e dal sovraccarico dei passeggeri e da azioni dinamiche. Tra queste bisogna tener conto della forza centrifuga in curva, delle sollecitazioni legate alle condizioni di moto (accelerazione e frenatura), delle sollecitazioni legate ai moti secondari a quello principale di trazione (rollio, beccheggio e serpeggio), delle forze d'inerzia legate alla sala montata e alle sospensioni e delle stesse forze generate dalla presenza di difetti sulla linea e sul veicolo; le quali rappresentano a loro volta dei carichi.

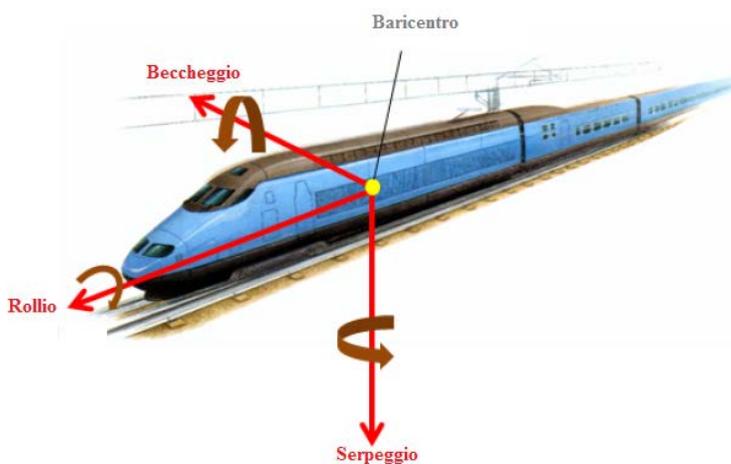


Figura 5.1: Moti secondari al moto di avanzamento secondo i tre assi.

Questi e molti altri fattori, interagendo sinergicamente tra loro, come conseguenza, comportano nel tempo un degrado della sovrastruttura, inteso come discostamento dalla configurazione geometrica di progetto, e l'usura delle singole componenti, tale che tutte le componenti devono essere sottoposte a cicli manutentivi, e una volta terminata la loro vita utile devono essere sostituite e rinnovate. Tale rinnovo è necessario per non ottenere come risultato una riduzione della qualità di marcia e quindi della velocità di fiancata, un ovvio decadimento del livello di servizio dell'infrastruttura, un incremento di consumo di carburante e degli eventuali deragliamenti a causa dell'incremento della difettosità.

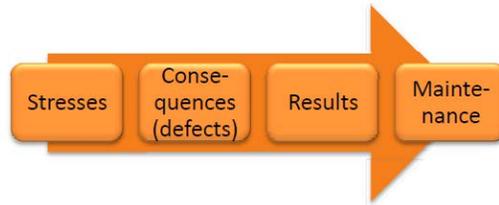


Figura 5.2: Catena di degrado della sovrastruttura ferroviaria.

La manutenzione delle linee ferroviarie interessa particolarmente la geometria e la struttura del binario, la geometria della rotaia e lo strato di ballast.

La geometria del binario è sicuramente il fattore che influenza maggiormente il comfort di marcia e la sicurezza, in quanto difetti geometrici troppo marcati potrebbero comportare pericolosi deragliamenti dei convogli ferroviari. Per questo motivo negli ultimi anni si sono intensificate le operazioni di monitoraggio e manutenzione della geometria del binario con interventi sistematici o meccanizzati ed interventi accidentali, legati cioè alle correzioni di difetti locali.

Esistono differenti tipologie di classificazione della manutenzione. Una di queste prevede la differenza tra:

- manutenzione preventiva: le operazioni di manutenzione ascrivibili a tale categoria servono per eliminare le imperfezioni dovute ad errori di realizzazione o a scorretta manutenzione e sono finalizzate ad evitare deterioramenti prematuri della sovrastruttura;
- manutenzione correttiva: comprende tutte le lavorazioni periodiche finalizzate a garantire la sicurezza e a rallentare il processo di invecchiamento di tutte le componenti del binario;
- sostituzione o rinnovo: necessari quando, per ragioni tecnico-economiche, non è possibile intervenire con ulteriori operazioni di manutenzione. In tal caso è necessario sostituire in parte o completamente l'elemento danneggiato per ripristinare il livello di qualità dell'infrastruttura.

La manutenzione della geometria del binario si può classificare anche in:

- manutenzione predittiva: manutenzione preventiva che viene effettuata a seguito dell'individuazione di uno o più parametri che vengono misurati utilizzando appropriati modelli matematici, allo scopo di individuare il tempo residuo prima del guasto. Questo tipo di analisi permette di programmare gli interventi necessari per evitare che il guasto si verifichi;
- manutenzione correttiva: la manutenzione correttiva avviene in seguito alla segnalazione di un malfunzionamento della linea ferroviaria o di un evento più grave, ad esempio uno svio. Questo tipo di manutenzione è necessaria per correggere difetti rilevanti, che molto spesso comportano obblighi di restrizione del traffico;
- manutenzione on condition: manutenzione preventiva, che per il binario viene eseguita mediante diagnostica mobile.

Un'ulteriore classificazione può essere effettuata tra la:

- manutenzione ordinaria,
- manutenzione straordinaria.

La prima comprende tutte quelle operazioni o trattamenti superficiali che hanno quale unico scopo quello di riportare il sistema, o una sua componente, da uno stato di avaria, allo stato di buon funzionamento, senza modificare o migliorare le funzioni svolte dal sistema, né aumentarne il valore, né migliorarne le prestazioni.

La manutenzione straordinaria, invece, è l'insieme delle azioni migliorative, in seguito a difetti puntuali e non preventivati, che aumentano il valore dei sistemi o ne prolungano la longevità. Quest'ultime richiedono interventi immediati che comportano generalmente, l'interruzione del servizio, per tanto è bene ridurre al minimo tali rischi.

Detto ciò è possibile fare una differenza più generale tra:

- manutenzione, intesa come l'insieme dei metodi e delle tecniche utilizzate per preservare le condizioni della sovrastruttura, la sicurezza, la qualità di marcia, quindi atte a garantirne la vita utile di progetto;

- riabilitazione, intesa come il miglioramento strutturale e funzionale di una sovrastruttura e della qualità di marcia in genere, ottenendo di conseguenza un'estensione della vita utile.

Per tanto la manutenzione e la riabilitazione sono gli strumenti impiegati per rallentare o azzerare il processo di deterioramento della sovrastruttura legato agli effetti combinati dell'incremento di traffico e dell'ambiente.

Intervenendo con le opportune operazioni di manutenzione, si rallenta il tasso di deterioramento, andando a correggere i piccoli difetti che possono peggiorare e contribuire alla formazione di ulteriori difetti. Superato un certo limite, i difetti diventano troppo grandi da poter essere corretti con una semplice attività di manutenzione; per ripristinare tali difetti più gravi si interviene con la riabilitazione ottenendo di conseguenza un netto miglioramento delle condizioni della sovrastruttura.

La velocità di deterioramento del binario, dopo l'assestamento iniziale che corrisponde al veloce calo della qualità del binario entro i primi 0,5-2 milioni di tonnellate di carico di esercizio, può essere influenzata da molteplici fattori e potrebbe essere rallentata con una serie di accorgimenti quali l'utilizzo di rotaie più pesanti, il ravvicinamento delle traverse, l'aumento dei raggi di curvatura, la realizzazione di una fondazione più compatta ed omogenea e la riduzione delle sollecitazioni verticali.

Inoltre la degenerazione delle caratteristiche delle componenti, può essere rallentata con assestamenti mirati e controllati.

Ad esempio le operazioni di manutenzione, rivolte alla correzione dei difetti nell'armamento possono riguardare i difetti di livellamento quando le due rotaie di un binario si scostano insieme dalla posizione planimetrica o altimetrica prevista; i difetti di scartamento quando si ha l'allontanamento di una rotaia rispetto all'altra; i difetti di sghembo quando i due piani di rotolamento delle due rotaie non sono complanari; i difetti di stabilità quando le traverse o le rotaie subiscono cedimenti eccessivi e i difetti degli attacchi o delle traverse in genere.

Le revisioni programmate (generalmente ogni 4 anni) consistono essenzialmente in misurazioni plano-altimetriche, scopertura del binario, ricambio delle traverse ammalorate, verifica degli attacchi, verifica dello scostamento, rettifica del livello, rinalzata delle traverse, copertura e profilatura della massicciata e delle rotaie.

Le revisioni straordinarie, invece, consistono nel rinnovamento della massicciata (asportazione, vagliatura e sostituzione del pietrisco); nel rinnovamento del binario (sostituzione delle parti metalliche in generale con altre di più elevate prestazioni); nel rifacimento del binario (sostituzione delle parti metalliche con altre non nuove recuperate da altre tratte).

5.1 Apparecchiature per la manutenzione

Nel capitolo precedente sono state elencate le macchine e i sistemi di monitoraggio utilizzati dai gestori per l'ispezione e l'identificazione dei difetti sulla linea, ai fini di un miglioramento delle caratteristiche di qualità dell'infrastruttura.

Esistono però sul mercato, soluzioni sempre più vantaggiose dal punto di vista economico e della sicurezza che consentono non solo l'individuazione del difetto ma anche il ripristino contemporaneo delle caratteristiche della linea carenti a causa del degrado.

Le norme europee (UNI EN 13848-5 Track geometry quality. Geometric quality levels), per stabilire un livello di qualità minimo che deve avere un'infrastruttura ferroviaria per garantire sicurezza di marcia, forniscono dei valori soglia per ciascun parametro caratterizzante la geometria di una linea, definendo i seguenti limiti sulla base delle esperienze raccolte da diversi gestori di reti ferroviarie europee.

I tre livelli principali considerati dalla norma sono:

- Immediate Action Limit (IAL), limite di azione immediata. I parametri, i cui valori, superano tale limite necessitano di un'immediata misura manutentiva finalizzata a riportare i limiti entro soglie accettabili. Esempi di azioni richieste in tale situazione sono la chiusura della linea, la riduzione della velocità di marcia o la correzione della geometria del binario.
- Intervention Limit (IL), limite di intervento. Tale limite se superato richiede interventi di manutenzione correttivi affinché non venga superato il limite di azione immediata prima del controllo successivo.
- Alert Limit (AL), limite di allerta. Se superato è un indice utile per capire quali parti della linea bisogna considerare nei piani di manutenzione regolarmente programmate.

Tali limiti suggeriti dalla norma, riguardano i parametri geometrici di scartamento, livello longitudinale, livello trasversale, allineamento, sghembo in funzione della velocità di fiancata. Sono lasciati ai gestori di ciascuna ferrovia i limiti di sicurezza per gli altri parametri geometrici importanti ai fini della garanzia della stabilità e sicurezza di marcia.

Per comprendere meglio l'azione degli interventi manutentivi ci si può riferire alla figura sotto riportata che evidenzia un esempio di comportamento del binario, dal punto di vista delle prestazioni, in seguito ad interventi di manutenzione.

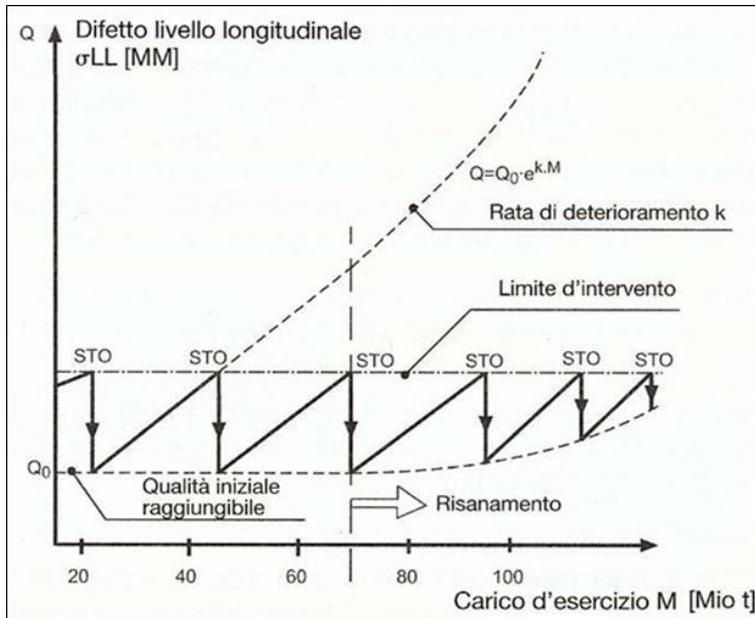


Figura 5.3: Esempio di miglioramento di un parametro della linea a seguito di interventi di manutenzione.

L'andamento della qualità del binario, in particolare del difetto longitudinale, indicato con Q in figura, in funzione del carico di esercizio M , può essere così schematizzato.

Il binario, dopo la prima posa, presenta un indice iniziale di difettosità Q_0 . Successivamente la difettosità cresce, inizialmente con un andamento lineare, corrispondente ad una fase di smussamento e di riassetto del pietrisco in uno strato più compatto, dopodiché tale difettosità cresce con un andamento esponenziale. Raggiunto il limite di difettosità fissato, in relazione al comfort di marcia desiderato, si effettua l'ideale intervento di manutenzione per riportare l'indice di difettosità al valore iniziale, dopodiché tale valore aumenta nuovamente linearmente ed esponenzialmente, fino al successivo intervento. Dopo alcuni cicli manutentivi, l'andamento della qualità iniziale raggiungibile evolve in maniera esponenziale, e per mantenere il limite di difettosità costante si osserva la necessità di interventi sempre più frequenti che con il tempo comportano qualità iniziali peggiori rispetto ai cicli precedenti. Con il tempo, il peggioramento della qualità iniziale rende necessarie misure più drastiche per il miglioramento della qualità del

binario, per esempio il risanamento del pietrisco o della piattaforma finché non sarà necessario il rinnovo del binario.

Dal grafico si può dedurre che i cicli di manutenzione che caratterizzano la vita utile del binario dipendono fortemente dalla qualità iniziale di posa, dal tasso di deterioramento e dall'assestamento iniziale. Tanto maggiore sarà la qualità iniziale, tanto maggiore sarà, a parità di altre condizioni, il tempo di raggiungimento del valore limite di difettosità. Questa viene dettata dai metodi e dalle tecniche di costruzione dell'infrastruttura e dai macchinari e materiali impiegati per la realizzazione della linea ferroviaria che dovrebbero essere di alta qualità.

Un modo per risalire alla tipologia di intervento manutentivo è legato alla lunghezza d'onda che lo identifica. In base a questa, è possibile decidere quale strumento utilizzare e con quale tipologia di intervento manutentivo agire per eliminare il difetto. Negli ultimi tempi si stanno sviluppando sistemi sempre più equipaggiati adatti ad interventi multipli contemporanei, questi sono preferiti dagli enti gestori in quanto consentono una riduzione dell'ingombro della linea e dei costi di monitoraggio. Di seguito si riporta una tabella con alcuni esempi di difetti e manutenzioni richieste per rimediare ai danni.

Tabella 5.1: Diverse lunghezze d'onda con fenomeni corrispondenti, rilevazione e possibili rimedi.

Waveband I	Phenomenon	Detection	Remedy
1 - 30 cm	Corrugation	Axle box acceleration	Grinding
1 - 100 cm	Poor weld geometry	Axle box acceleration	Bending
	Poor wheel threads	Rail accelerations	Turning off
2 - 3 m	Rolling defects	Axle box acceleration/ deflections	Grinding up to 2 m
3 - 25 m	Moderately long waves	Conventional	Automatic tamping
25 - v/f m	Long waves	Stabilized platform	Design tamping
70 - ∞ m	Geometric design	Quasi-static	Design tamping

Le operazioni di manutenzione di una linea ferroviaria sono riassunte nello schema che segue (Esveld C. Modern Railway Track).

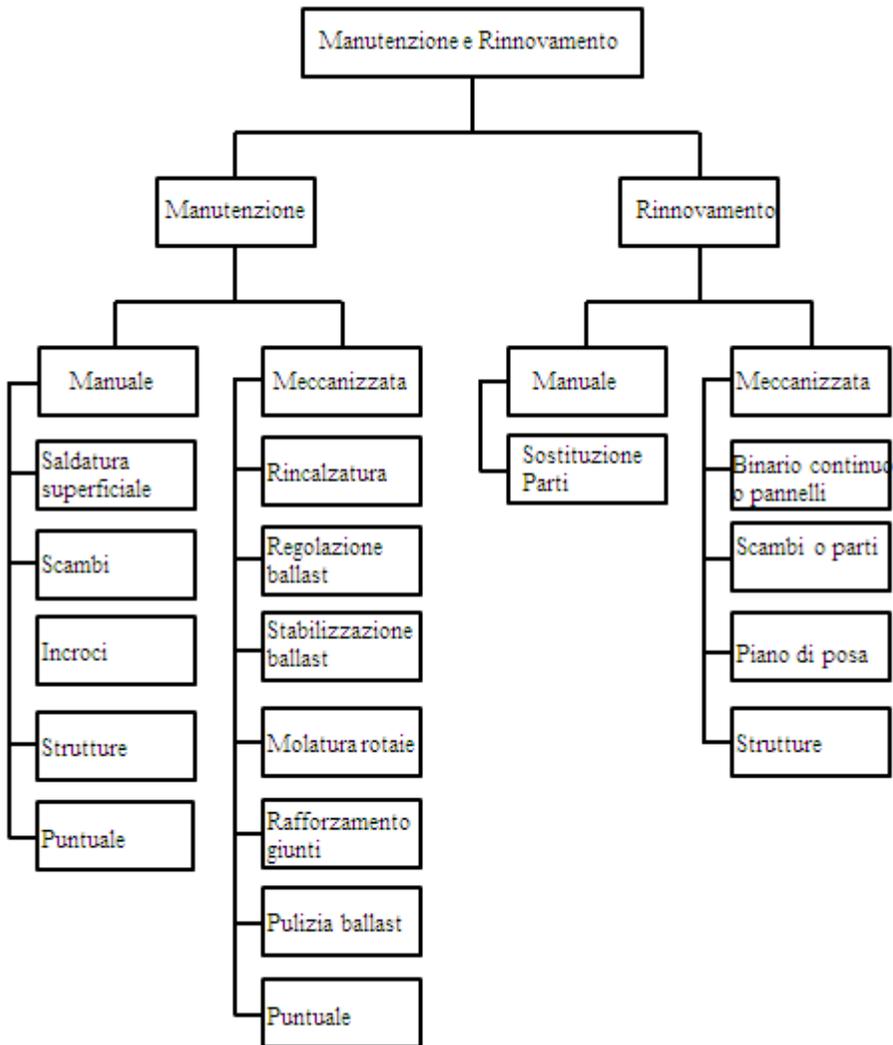


Figura 5.4: insieme delle principali operazioni per la manutenzione e il rinnovamento.

Volendo approfondire alcune tecniche e macchine per la manutenzione, è bene sottolineare che moltissime sono le case produttrici che realizzano macchine di manutenzione per i gestori delle infrastrutture ferroviarie basate essenzialmente sui medesimi principi.

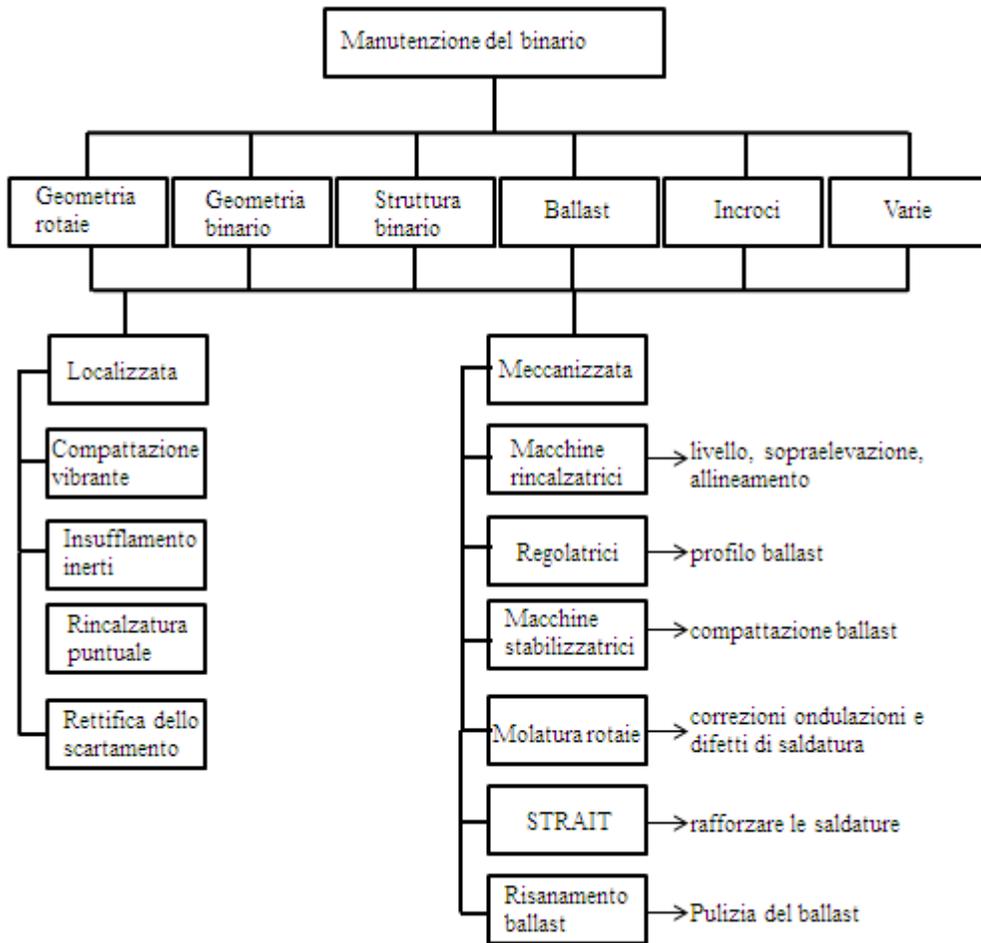


Figura 5.5: Insieme delle principali operazioni e macchine per la manutenzione.

Di seguito si riporta una breve disamina delle principali e più frequenti operazioni di manutenzione per una linea ferroviaria.

La molatura e la riprofilatura sono operazioni finalizzate ad eliminarne i difetti superficiali delle rotaie.

La molatura consente di prolungare la vita utile delle rotaie rimuovendo gli effetti dell'usura ondulatoria riducendo le sollecitazioni trasmesse alle rotaie. Se ben effettuata, tale operazione permette di aumentare gli intervalli temporali tra interventi di rincalzatura successivi che riguardano l'intero binario.

La molatura può essere anche una misura preventiva se effettuata sulle rotaie nuove con lo scopo di eliminare lo strato superficiale povero di carbonio, i piccoli difetti dovuti al processo costruttivo di laminazione e quelli dovuti alla posa di esercizio e di cantiere.

La riprofilatura avviene tramite una vera e propria operazione di piallatura.

Una volta terminata la vita utile delle rotaie queste devono essere sostituite con delle nuove. Questa sostituzione può essere effettuata con appositi treni di rinnovo rotaie, che permettono lo smontaggio e l'asporto delle vecchie rotaie e traverse, nonché il rimontaggio delle nuove. Questi treni sono generalmente costituiti da due parti. Una prima parte marcia sull'armamento da sostituire, preventivamente tagliato, serrato e privato degli organi di contatto; in tal modo, con il passaggio del treno si provvede a divaricare le vecchie rotaie e a rimuovere le vecchie traverse. La seconda parte di questi treni, provvede a posare le vecchie traverse ed a accostare le nuove rotaie.

L'eliminazione dei difetti geometrici del binario, inoltre, può avvenire tramite rinalzatura, che consiste nell'allineamento ed innalzamento del binario, in modo da correggere i difetti causati dal traffico ferroviario e dai cedimenti della piattaforma. Il principio della rinalzatura è quello di fornire vibrazioni non sincrone ma opportunamente direzionate all'interno del ballast al fine di smuovere, ricompattare e riposizionare il ballast senza creare una perdita di materiale.

Per compiere tali operazioni è necessario determinare l'esatto allineamento e quota teorica del binario. Oggigiorno le operazioni inerenti la rinalzatura sono realizzate meccanicamente e gli appositi macchinari utilizzati adottano vari metodi.

Primo fra tutti è la composizione elettronica della freccia. A partire dalla misurazione della geometria del binario e dei corrispondenti difetti, è possibile ricostruire il probabile andamento teorico del binario. Il calcolo della posizione da ripristinare avviene in maniera automatica e non richiede particolari conoscenze tecniche da parte dell'operatore. Prima di procedere al calcolo, però, è necessario

effettuare una corsa per il rilievo della posizione del binario, diminuendo il rendimento della macchina.

Un altro metodo prevede l'allineamento e il livellamento ad alta precisione. In questo caso la geometria teorica del binario deve essere prefissata, dopodiché la macchina ricalzatrice procede al posizionamento del binario secondo la posizione teorica fornita.

Il degrado, come più volte precisato, può anche interessare il ballast e il sottofondo. Ristabilizzare il ballast è importante per continuare a fornire una corretta distribuzione dei carichi sul sottofondo, per ridurre le sollecitazioni dinamiche, per mantenere gli elementi della sovrastruttura nelle posizioni di progetto e soprattutto per assicurare la resistenza orizzontale del binario, legata appunto alle forze di attrito e contatto tra i grani costituenti il ballast.

Per quanto riguarda il ballast, le principali cause di deterioramento sono dovute allo scheggiamento e all'abrasione delle pietre, all'inquinamento derivante dalle perdite dei carichi trasportati dai convogli ferroviari e dallo svilupparsi della vegetazione. Questi fattori determinano una diminuzione delle caratteristiche di portata e resistenza del ballast stesso. Inoltre questo tende a perdere la sua funzione drenante causando il ristagno dell'umidità, che può determinare anche un anticipato deterioramento delle traverse di legno. Per questi motivi è opportuno procedere periodicamente ad operazioni di risanamento e pulizia del ballast attraverso la rimozione del pietrisco preesistente, il recupero di una parte del pietrisco con caratteristiche migliori e l'apporto di nuovo pietrisco, mediante l'insufflamento degli inerti. Il rendimento delle operazioni di risanamento dipende dalla quantità del vaglio del materiale rimosso. Da un lato si dovrebbe cercare di recuperare più materiale possibile, tuttavia l'estrema precisione della vagliatura comporta tempi sensibilmente maggiori, quindi per diminuire i tempi di intervento si adotta una quantità di vagliatura media.

Il deterioramento del sottofondo comporta una carenza della sua resistenza strutturale che si può ripercuotere sulla sovrastruttura ferroviaria in termini di

difetti dell'armamento. Per migliorare il comportamento strutturale del sottofondo, si inserisce uno strato di sabbia e ghiaia sotto lo stato di ballast. Esiste inoltre la possibilità di effettuare il consolidamento della fondazione mediante appositi treni che operano senza smontare il binario.



Figura 5.6: Macchina per la riprofilatura del ballast.

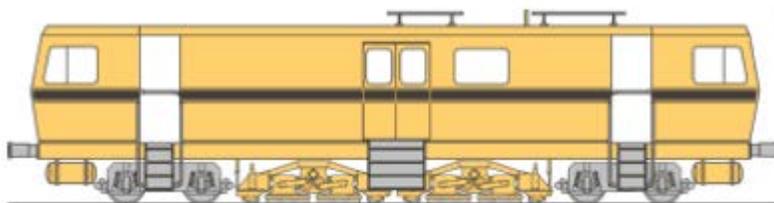


Figura 5.7: Macchina per la riprofilatura delle rotaie.

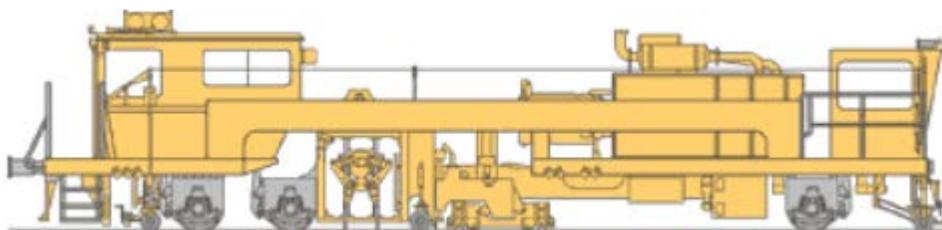


Figura 5.8: Macchina ricalzatrice.

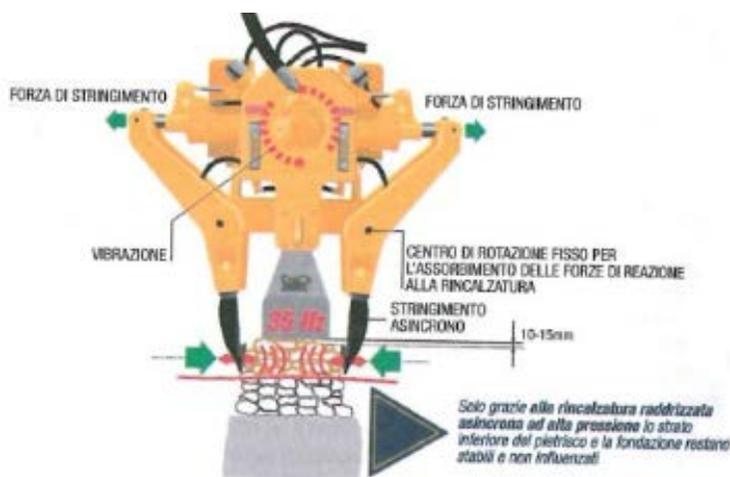


Figura 5.9: Dettaglio che evidenzia il principio di funzionamento dell'operazione di ricalzatura.

E' importante inoltre sottolineare che esistono una moltitudine di macchinari che sono in grado di operare in continuo, agendo con più operazioni di manutenzione contemporanee ai fini di migliorare più componenti della sovrastruttura. Tali tipologie di treni operano anche al termine della vita utile, quindi anche in presenza di una necessità di ricostruzione della sovrastruttura.

Esistono poi treni con duplice funzione, sia quella di diagnosi del difetto che di messa in atto degli adeguati interventi di manutenzione, nello stesso istante in cui il difetto ritenuto pericoloso viene rilevato.

Ne è un esempio il nuovo treno ETR500Y2, anche detto Dia.man.te (acronimo di Diagnostica e Manutenzione Tecnologica), è il treno diagnostico con il quale periodicamente si misura lo stato delle infrastrutture e degli impianti delle linee alta

velocità/alta capacità (AV/AC) italiane, con una velocità di rilievo di 300-330 km/h. Il treno è specializzato per la diagnostica:

- delle infrastrutture e del binario,
- della linea di contatto,
- degli impianti di segnalamento,
- degli impianti di telecomunicazione.

La carrozza dinamica di marcia analizza le accelerazioni trasversali e verticali su boccola, su carrello e in cassa, misurate attraverso accelerometri monoassiali posizionati sulla carrozza stessa e sulle due locomotive. Dall'analisi di tali parametri direttamente rilevati, e dalla loro successiva elaborazione effettuata dal sistema di bordo, è possibile controllare la stabilità del convoglio in movimento e ricavare informazioni rivolte al comfort di marcia.

Il sistema di misura della geometria e del profilo del binario, situato sulla carrozza armamento, rileva i parametri riguardanti la geometria del binario e il profilo delle rotaie quali scartamento, livello longitudinale, allineamento, sopraelevazione, sghembo, curvatura e usura (a 45°, verticale e orizzontale). Tali parametri sono ottenuti, ogni 50 cm, grazie alla misura e alla rilevazione diretta del profilo di ogni singola rotaia, attraverso laser e speciali sensori inerziali. Attraverso un sensore laser montato sul telaio del carrello e un target rigidamente fissato all'assile, Dia.man.te rileva anche l'usura ondulatoria o marezzatura, che, come già visto, consiste in una serie di avvallamenti quasi regolari nella direzione longitudinale del binario, dovuti all'usura della superficie. La misura dell'usura ondulatoria è di fondamentale aiuto nella diagnosi della difettosità della superficie di rotolamento e nella pianificazione delle attività di molatura o riprofilatura delle rotaie.

I sistemi a bordo del treno sono in grado di ricavare anche il parametro conicità equivalente, valutando così la qualità del contatto dinamico tra ruota e rotaia. A tal fine, i profili delle rotaie acquisiti dal treno diagnostico si accoppiano con i profili delle ruote di uno dei veicoli che abitualmente percorrono la linea oggetto della corsa di verifica.

Per quanto riguarda la trazione elettrica, è importante monitorare le condizioni della linea aerea al fine di garantire un buon trasferimento di potenza. Il treno Dia.man.te rileva la geometria e l'usura dei fili costituenti la linea di contatto, senza interagire meccanicamente con essi, ma servendosi di un sistema di box ottici posti sull'imperiale della carrozza trazione elettrica. Inoltre, esegue misure riguardanti l'interazione dinamica tra il pantografo e la linea aerea di contatto.



Figura 5.10: Schema con configurazione dei vagoni del treno Dia.man.te.

Questo permette di mettere in relazione grandezze dinamiche con caratteristiche dei difetti della linea.

5.2 I sistemi RAMS (Railway Asset Management System)

Nelle ultime decadi, con l'intensificarsi dell'utilizzo delle vetture di rilievo e manutenzione dei difetti del binario, si sono rese disponibili ai gestori, ingenti quantità di dati da analizzare. In seguito alla rapida crescita della mole di dati di difettosità del binario raccolti sulle linee, si è sentita l'esigenza di automatizzare il processo di elaborazione dei dati ai fini della programmazione degli interventi di manutenzione. Esigenza alimentata dal fatto che le operazioni di rinnovo e manutenzione vanno programmate non considerando separatamente i singoli elementi costituenti la sovrastruttura ferroviaria, soprattutto in presenza di difetti geometrici del binario. Inoltre le normative europee più recenti divengono sempre più esigenti e restrittive riguardo le prestazioni dell'infrastruttura.

Utilizzando appositi sistemi informatici è possibile sovrapporre differenti informazioni legate alle condizioni geometriche del binario, valutare

contemporaneamente diversi aspetti del problema e prendere la giusta decisione di intervento.

Per colmare la carenza di metodi efficienti, facilmente reperibili sul mercato ed a basso costo, finalizzati ad effettuare indagini ed elaborazioni sui sistemi soggetti a monitoraggio ripetuto e continuo, si sta sviluppando un nuovo concetto di sistema di gestione della manutenzione che tiene conto anche dell'ottimizzazione delle risorse economiche.

I legami complessi esistenti tra la gestione dell'infrastruttura, la disponibilità della linea, il materiale rotabile, i carichi sulla sovrastruttura, le macchine di manutenzione del binario, le caratteristiche dei materiali e soprattutto le risorse economiche disponibili, sono valutati mediante l'Asset Management System (AMS).

Quando si parla di AMS è possibile fare riferimento essenzialmente a due fasi.

La prima fase riguarda la raccolta dei dati e la decisione delle modalità di catalogazione ed elaborazione dei dati. La seconda fase, strettamente correlata alla prima, rappresenta la creazione dei modelli di decisione ottenuti a partire dai dati raccolti sulla linea.

L'obiettivo finale dei sistemi RAMS, ottenuti i modelli adeguati in relazione a punti singolari del tracciato (attraversamenti, scambi, ponti) o all'intera linea, è quello di rendere consultabile e fruibile, in tempi reali, ogni tipo di informazione agli altri gestori di infrastrutture ferroviarie o a chiunque sia interessato ai modelli e ai dataset (Esveld C. Modern Railway Track).

Solo con la condivisione delle esperienze dei diversi gestori di linee ferroviarie è possibile ottimizzarne la gestione. Resta, però, comunque un problema non trascurabile: la conoscenza della storia di rinnovo e manutenzione di una linea ferroviaria, importante anche per evidenziare, ad esempio, dei punti critici del sistema e semplificare la programmazione futura delle operazioni di manutenzione. La maggior parte delle infrastrutture di trasporto su ferro europee ha una vita di almeno 100 anni. Durante tale esistenza, le infrastrutture ferroviarie sono state

certamente sottoposte ad interventi di manutenzione, a sostituzioni di parti di cui però non si conserva memoria.

Le modalità di raccolta ed analisi dei dati, alla base dei sistemi RAMS, possono essere svariate e sono strettamente legate alla politica di gestione della manutenzione. Differenti sono i dispositivi informatici presenti sul mercato con caratteristiche specifiche che consentono di localizzare, prima di tutto, i dati raccolti lungo la linea e poi elaborarli ai fini della gestione e manutenzione del sistema.

Tra i metodi utilizzati per la localizzazione dei dati, i più comuni sono:

- l'utilizzo di ortofoto. Con questa tecnica è possibile acquisire foto aeree della linea ferroviaria con un margine di sovrapposizione di sicurezza tra i fotogrammi successivi, georeferenziare e vettorializzare opportunamente le foto per associare, a ciascun vettore i parametri di qualità legati agli elementi fotografati;
- l'utilizzo di GPS;
- la videosorveglianza. Con appositi strumenti e software associati, è possibile ottenere una registrazione in continuo della linea, da più angolazioni e memorizzare i filmati ottenuti nel corso degli anni. Un sistema così fatto è sicuro, perché non affetto da errori di sovrapposizione dei fotogrammi; veloce perché le acquisizioni vengono effettuate con velocità pari a quella di fiancata; accurato e riutilizzabile, grazie alla precisione del rilievo e alla memorizzazione dei filmati;
- l'utilizzo di immagini satellitari, utilizzate sempre di più anche per scopi civili.

6 Analisi sperimentale

6.1 Le linee ferroviarie oggetto di indagine

I dati utilizzati per la presente ricerca sono dati di difettosità geometrica del binario raccolti, con apposita strumentazione ad elevato rendimento, sulle linee della ex Circumvesuviana.

La Circumvesuviana è stata una rete di trasporto pubblico locale su ferro che ha servito dal 1890 al 2012 l'area orientale di Napoli, circondando il Vesuvio ed entrando nelle province di Salerno ed Avellino.

Il 27 Dicembre 2012 viene assorbita, insieme ad altre aziende di trasporto pubblico locale campane, dall'Ente Autonomo Volturno (EAV), senza mutare la tipologia di servizio offerto.

Ad oggi la rete ferroviaria locale ex Circumvesuviana, collega circa 50 comuni intorno a Napoli ed ha una rete di circa 145 km, di cui circa 45 km a doppio binario, con un collegamento ferroviario di 4 milioni di chilometri-treno, 40 milioni di passeggeri all'anno. Con 118 elettrotreni si raggiungono in totale 96 stazioni. La maggior parte della rete è realizzata con rotaie del profilo 50 UNI, saldate in barra continua. La sovrastruttura è quasi interamente in ballast salvo alcuni tronchi,

principalmente in corrispondenza delle gallerie, dove la sovrastruttura è su piastra. E' caratterizzata da uno scartamento ridotto, di 950 mm, inferiore a quello standard per le altre reti ferroviarie italiane.

Le linee della Circumvesuviana sono:

- Napoli - San Giorgio a Cremano (11,9 Km);
- Napoli - Pompei scavi - Sorrento (42,5 Km);
- Napoli - Sarno (38,4 Km);
- Napoli - Nola - Baiano (38,6 Km);
- Napoli - Scafati - Poggiomarino (42,7 Km);
- Napoli - Pomigliano - Acerra (19,8 Km).

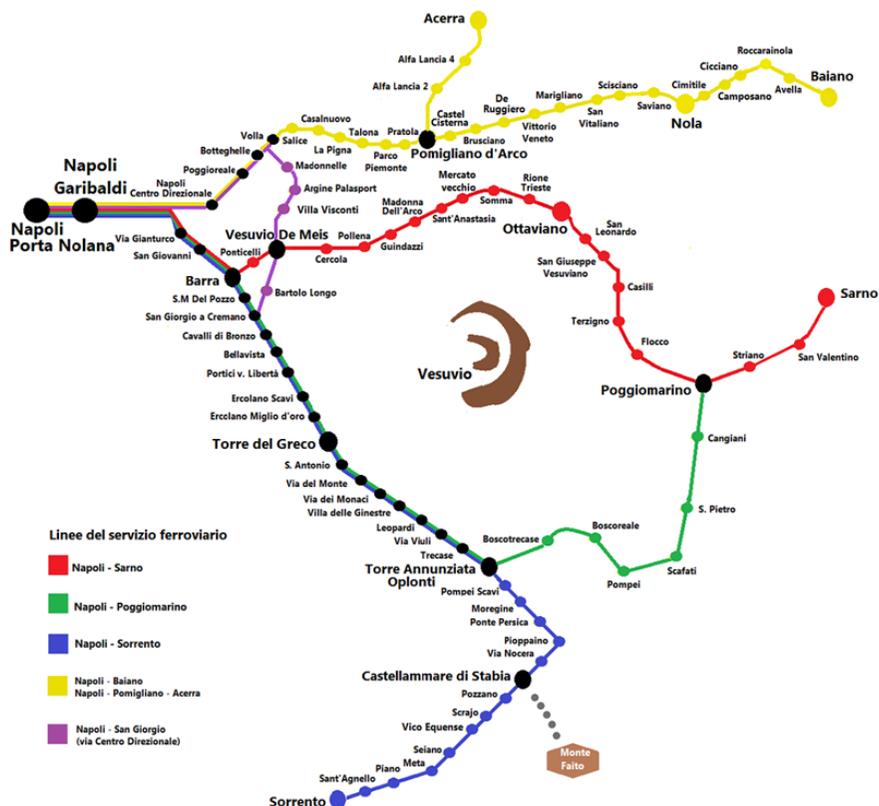


Figura 6.1: Schema delle linee della ex Circumvesuviana.

L'estesa campagna di indagini sperimentali ha interessato l'intera rete ferroviaria della ex Circumvesuviana, ad eccezione di alcuni tratti secondari, e l'analisi della difettosità del binario ha avuto come dati di input quelli ottenuti mediante rilievo, effettuato periodicamente dalla ex Circumvesuviana, con treno appositamente equipaggiato con strumento ad elevato rendimento.

6.2 Gli strumenti di misura ad elevato rendimento utilizzati ai fini della sperimentazione

6.2.1 il sistema POS/TG

Lo strumento ad elevato rendimento utilizzato dalla ex Circumvesuviana per rilevare periodicamente i parametri di difettosità geometrica del binario è installato sul carrello di un ETR Fe220 in normale esercizio ed opera, senza contatto, con una velocità di fiancata che va da 0 a 90 Km/h.

Il sistema utilizzato è il POS/TG, un brevetto della Plasser & Theurer, che in cooperazione con l'Applanix Corporation/Canada, ha sviluppato un sistema di misurazione delle difettosità geometriche del binario. Integrato al sistema c'è un modulo di localizzazione ed orientamento assistito da GPS (Global Position System).

L'apparato si compone essenzialmente di computer POS/TG (PCS) e appositi sensori:

- una piattaforma inerziale (IMU);
- un ricevitore GPS differenziale;
- un sistema di misurazione odometrica (DMI);
- un sistema di misura dello scartamento (OGMS);

- una coppia di rilevatori ottici, montati sui due assili delle sale montate per verificare l'esattezza delle misure e allo stesso tempo fungere da elemento di allerta per eventuali errori di rilievo.



Figura 6.2: Sistema ottico di rilevamento dello scartamento OGMS.

Considerato l'alto grado di precisione delle misure, l'esatta localizzazione dei valori è un fattore non trascurabile per i lavori di rilevamento. Con l'aiuto dell'algoritmo inerziale di navigazione, il sistema POS/TG calcola la posizione del veicolo, correlando in modo ottimale i dati del sistema veicolare con i dati del sistema di posizionamento globale GPS.

Il sistema di misura a raggio laser OGMS esplora i bordi di rotolamento delle rotaie senza contatto. Il sistema di misura inerziale speciale forma le basi di riferimento del processo, provvedendo insieme ai trasduttori lineari di compensazione, al rilevamento continuo della posizione delle due rotaie rispetto al piano di riferimento orizzontale formato dal sistema inerziale.

I rilievi della difettosità vengono effettuati in entrambe le direzioni di marcia, e per una pura convenzione si è definito come binario dispari quello che va da Napoli verso la destinazione e come binario pari quello che va verso Napoli.

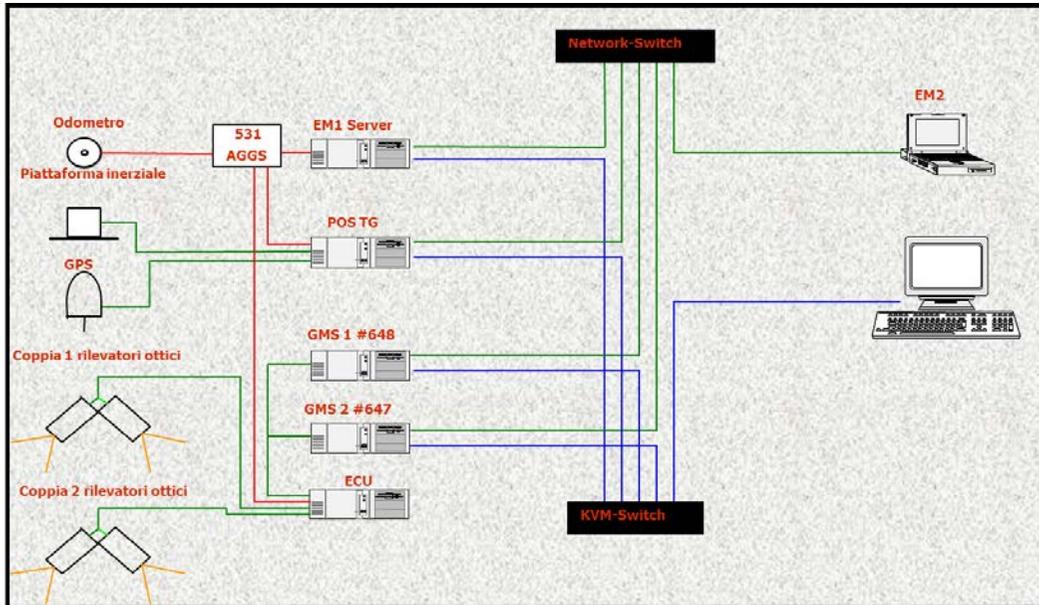


Figura 6.3: Architettura del sistema POS/TG.



Figura 6.4: Cabina di controllo del sistema POS/TG.



Figura 6.5: Particolare del POS/TG montato sul carrello di un veicolo.

I parametri del binario vengono misurati ad intervalli spaziali preimpostati, nel caso in esame ogni 25 cm, memorizzati ed elaborati dal calcolatore di bordo.

L'affidabilità e il grado di precisione rendono il dispositivo un sistema di riferimento nel campo del rilevamento al fine di manutenzione e sicurezza della sede ferroviaria.

Essendo il POS/TG, un'apparecchiatura tutelata da brevetto, i manuali di tale strumentazione non chiariscono in maniera univoca il punto della rotaia sul quale l'apparecchio effettua le sue misure restituite in output per rilevare i difetti, né le formule matematiche mediante le quali fornisce limiti di allarme.

6.2.2 Descrizione grandezze monitorate con il POS/TG

Le grandezze monitorate sulle linee della ex Circumvesuviana dal dispositivo della Plasser vengono restituite sottoforma grafica e numerica, come mostrato negli esempi che seguono.

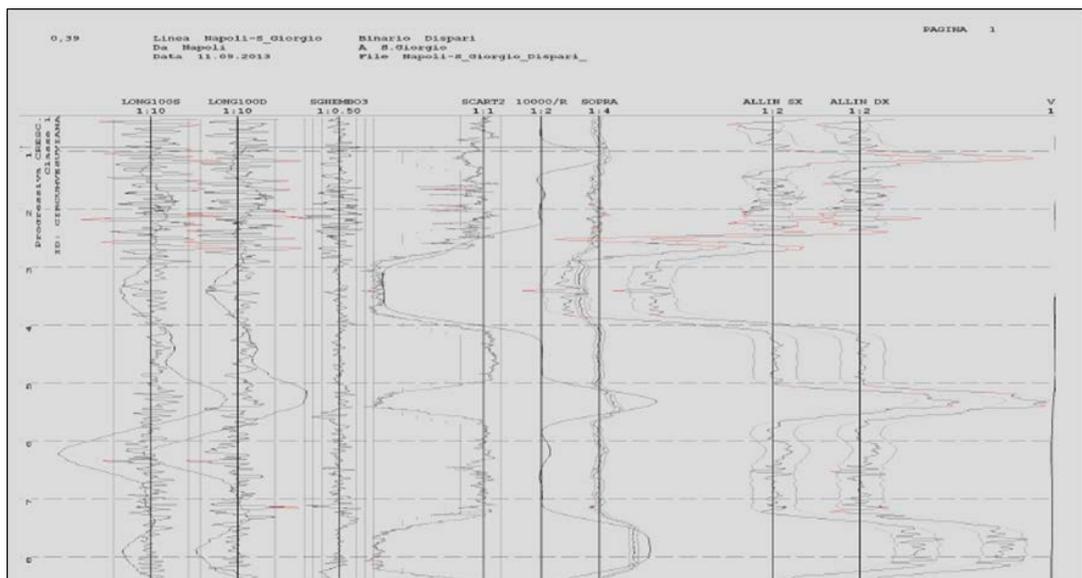


Figura 6.6: Esempio di output grafico restituito dallo strumento Plasser POS/TG.

0,39

Linea Napoli-S_Giorgio
Da Napoli
Data 11.09.2013Binario Dispari
A S.Giorgio
File Napoli-S_Giorgio_Dispari_

LOCAZIONE	VEL.	SCART	SOPRA	10000/R	SGHEMBO					
0,72.00	21.6	-2.2	2.2	0.4	-0.7	40.8495655850430	14.2699216600427	48.86		
0,72.25	21.6	-2.4	2.0	0.4	-0.6	40.8495674104702	14.2699236558921	48.86		
0,72.50	21.6	-2.5	2.0	0.4	-0.4	40.8495692305548	14.2699256484828	48.86		
0,72.75	22.1	-2.5	2.1	0.4	-0.3	40.8495710419272	14.2699276327672	48.86		
0,73.00	22.1	-2.5	2.2	0.3	-0.4	40.8495728561483	14.2699296196445	48.86		
0,73.25	22.1	-2.5	3.0	0.3	-0.2	40.8495746793133	14.2699316160845	48.86		
0,73.50	22.1	-2.5	2.4	0.3	0.0	40.8495765194706	14.2699336300424	48.86		
0,73.75	22.1	-3.0	2.8	0.2	0.0	40.8495783451020	14.2699356284473	48.86		
0,74.00	22.1	-3.3	2.9	0.2	-0.1	40.8495801781693	14.2699376342601	48.86		
0,74.25	22.1	-3.6	2.8	0.2	-0.2	40.8495820038691	14.2699396313365	48.86		
0,74.50	22.1	-3.8	2.3	0.2	-0.3	40.8495838260681	14.2699416205326	48.86		
0,74.75	22.1	-4.3	2.3	0.1	-0.5	40.8495856434971	14.2699436068525	48.86		
0,75.00	22.1	-4.8	2.3	0.1	-0.6	40.8495874563514	14.2699455873368	48.86		
0,75.25	22.1	-5.1	1.9	0.0	-0.7	40.8495892738874	14.2699475706084	48.86		
0,75.50	22.1	-5.2	1.7	0.0	-0.8	40.8495910968476	14.2699495634159	48.86		
0,75.75	22.1	-5.1	1.6	-0.0	-0.6	40.8495929388459	14.2699515743695	48.86		
0,76.00	22.1	-5.0	1.3	-0.1	-0.4	40.8495947653184	14.2699535677368	48.86		
0,76.25	22.1	-4.8	1.5	-0.2	-0.4	40.8495965985152	14.2699555698776	48.86		
0,76.50	22.1	-3.9	0.6	-0.2	-0.3	40.8495984259432	14.2699575686846	48.86		
0,76.75	22.1	-2.8	0.5	-0.3	-0.3	40.8496002363753	14.2699595568881	48.86		
0,77.00	22.1	-1.3	0.4	-0.4	-0.0	40.8496020463226	14.2699615416125	48.86		
0,77.25	22.1	-0.1	1.0	-0.4	0.0	40.8496038531741	14.2699635270478	48.86		
0,77.50	22.1	1.6	1.2	-0.5	0.0	40.8496057457080	14.2699651658119	48.86		
0,77.75	22.1	3.5	1.0	-0.6	-0.3	40.8496075712911	14.2699671663582	48.86		
0,78.00	22.1	5.2	1.4	-0.7	0.0	40.8496094086608	14.2699691788618	48.86		
0,78.25	22.1	6.8	1.0	-0.8	0.0	40.8496112353785	14.2699711807858	48.86		
0,78.50	22.1	8.0	1.5	-0.9	-0.0	40.8496130697353	14.2699731935149	48.86		
0,78.75	22.1	8.6	1.7	-0.9	-0.3	40.8496148999043	14.2699751989707	48.86		
0,79.00	22.1	8.7	1.2	-1.1	-0.2	40.8496167227504	14.2699771967363	48.86		
0,79.25	22.1	8.7	0.7	-1.1	-0.1	40.8496185351509	14.2699791833573	48.86		
0,79.50	22.1	8.6	0.6	-1.2	-0.2	40.8496203447542	14.2699811671130	48.86		
0,79.75	22.1	8.4	0.5	-1.4	0.1	40.8496221500115	14.2699831482984	48.86		
0,80.00	22.1	8.6	0.3	-1.5	-0.2	40.8496239760704	14.2699851521534	48.86		
0,80.25	22.1	8.2	0.2	-1.6	-0.4	40.8496258048311	14.2699871599454	48.86		
0,80.50	22.1	7.1	0.7	-1.7	-0.4	40.8496276287272	14.2699891604793	48.86		
0,80.75	22.1	6.1	0.5	-1.8	-0.1	40.8496294573737	14.2699911628770	48.86		

Figura 6.7: Esempio di output numerico restituito dallo strumento Plasser POS/TG.

Emerge chiaramente dagli esempi che per una corretta localizzazione spaziale dei valori monitorati è necessario leggere tutti i valori di rilievo in funzione della prima colonna che rappresenta la progressiva chilometrica. A partire da uno zero di rilievo, lo strumento procede restituendo i valori di difettosità geometrica ogni 25 cm, senza però avere accortezza nel considerare sempre lo stesso zero di partenza. Tra i parametri rilevati dalla strumentazione assume particolare valenza scientifica analizzare lo scartamento, la sopraelevazione e lo sghembo, in quanto parametri che caratterizzano in maniera immediata la geometria del binario, storicamente più esaminati e ai quali è più immediato attribuire il concetto di difettosità della linea anche in virtù del fatto che esistono dei valori soglia forniti dalle norme UNI-EN 13848 o da prescrizioni interne di altri gestori di linee ferroviarie locali (RFI).

E' chiaro che ai fini della creazione di modelli di degrado del binario, è impensabile considerare ogni parametro geometrico come una variabile indipendente dalle altre, ma per ragioni matematico-fisiche, questi sono strettamente connessi tra loro.

Ai fini delle analisi dei dati è stato necessario creare degli script per rendere catalogabili e manipolabili statisticamente i dati raccolti con la strumentazione.

6.2.3 Il sistema SMAMID

Ulteriori misure sono state effettuate mediante l'utilizzo di un sensore di piccole dimensioni realizzato da STRAGO, lo SMAMID. Tali monitoraggi non hanno, però, interessato l'intera rete della ex Circumvesuviana.

SMAMID è un sistema di misura miniaturizzato, costituito essenzialmente da un sensore accelerometrico MEMS (Micro-Electro-Mechanical-System), in grado di monitorare, in funzione del suo posizionamento, le accelerazioni a bordo veicolo nelle tre direzioni dello spazio, oppure in punti strategici della sovrastruttura. Utilizzando un sensore accelerometrico MEMS, STRAGO ha progettato e realizzato una scheda integrata, denominata Unità Funzionale (UF) con capacità di acquisizione, elaborazione e trasmissione dei dati accelerometrici. Ciascuna UF è dunque un strumento di misura delle vibrazioni completamente autonomo costituito nella sua forma più generale da:

- un accelerometro a tecnologia MEMS triassiale con interfaccia digitale;
- un microcontrollore a 8 bit per la gestione del sistema;
- 2MB di RAM;
- un sistema di trasmissione dati wired (interfaccia di comunicazione seriale RS485) o wireless;
- un sistema di alimentazione a batteria;
- sensore di temperatura;

- orologio di sistema.

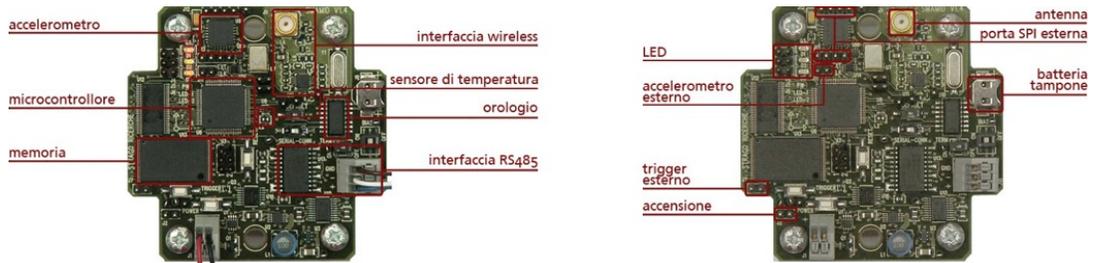


Figura 6.8: Unità funzionale del sensore SMAMID.

Occorre precisare che l'accelerometro impiegato misura anche le componenti statiche delle accelerazioni e quindi in assenza di movimento, misura comunque le componenti dell'accelerazione di gravità sui 3 assi. Per tale ragione il sensore funge anche da inclinometro. Il sistema è stato progettato e realizzato per poter funzionare in completa autonomia; esso può essere alimentato da batterie oppure da un alimentatore esterno. Le capacità del sistema consente l'acquisizione di dati accelerometrici in scala ± 2 g oppure ± 6 g a 40, 160, 640 o 2560 Hz a 12 bit, contemporaneamente sui tre assi, stabiliti, diversamente dalla consuetudine, come segue: X (verticale al senso di marcia), Y (longitudinale al senso di marcia) e Z (trasversale al senso di marcia). La capacità di memorizzazione complessiva è di 983.040 campioni. I dati acquisiti possono essere elaborati e/o trasmessi verso altre unità o verso un computer centrale, in modalità wired (RS485) o wireless (adottando un protocollo proprietario); la portata della connessione wireless è di circa 100 metri in campo aperto. Il protocollo di comunicazione consente di convogliare verso il computer centrale i dati elaborati da tutte le unità.

Lo SMAMID è installabile direttamente sulla boccia di un treno in normale esercizio, consente di acquisire le accelerazioni in modo diretto e di fornire una misura di vibrazioni indipendente dai modi di vibrare di altri elementi, e quindi adatta ad individuare problematiche della ruota e della rotaia. Una campagna di

monitoraggio in continuo, su uno o più treni che percorrano sempre la stessa tratta, potrebbe consentire di individuare:

- le sollecitazioni standard e anomale che si registrano lungo il tracciato;
- la ripetibilità dei picchi, ossia di presumibili irregolarità, alle stesse progressive;
- l'eventuale presenza di difetti delle ruote (sfaccettature, ovalizzazione);
- l'accelerazione non compensata reale in curva;
- la presenza di sghembo di binario e gli effetti sulla marcia del treno.

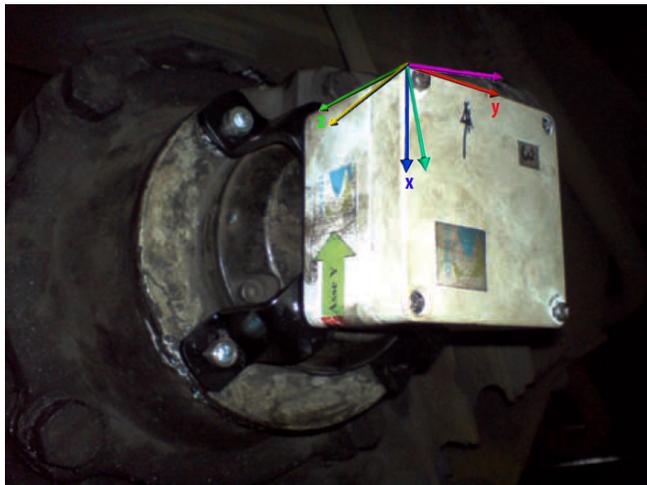


Figura 6.9: Unità funzionale installata in boccola.

6.4 Descrizione campagna sperimentale

6.4.1 La linea Napoli-San Giorgio

La tratta della Circumvesuviana Napoli – San Giorgio ha un'estensione di circa 11,8 Km in parte a doppio binario. Questa è stata la prima linea storicamente ad essere analizzata, per la disponibilità dei dati.

E' caratterizzata da 11 stazioni distanziate da un minimo di 500 metri ad un massimo di 12 Km.

Dopo aver ricostruito la geometria della linea, ai fini delle analisi statistiche per la creazione dei modelli di degrado, sono state considerate 22 curve, 19 rettifici e 45 curve di transizione, nello specifico raccordi parabolici.

Al fine di analizzare elementi con caratteristiche analoghe si è proceduto elaborando i dati in maniera differenziata per i tratti su ballast e su piastra. Inoltre, si è deciso di eliminare dalle analisi i transienti con estensione eccessivamente ridotta e quelli siti in stazione, in quanto oggetto della sperimentazione è l'analisi del degrado del binario in condizioni di effettivo esercizio del materiale rotabile.

I dati analizzati si riferiscono ad un periodo di monitoraggio del binario che va da Novembre 2009 a Ottobre 2013. Le date di rilievo considerate sono nella fattispecie: 21/11/2009; 17/06/2010; 21/02/2011, 22/03/2011; 10/05/2011; 20/06/2011; 28/07/2011; 28/09/2011; 15/11/2011; 11/09/2013; 24/10/2013. Questo a testimonianza del fatto che non esiste alcuna regolarità nella programmazione e nella realizzazione dei monitoraggi.

Dalle prime elaborazioni dei dati di output del dispositivo Plasser, è emersa una variazione significativa nel tempo dei parametri oggetto di indagine, a parità di elemento geometrico planimetrico omogeneo. Per tale ragione i valori dei parametri oggetto di studio, rilevati ogni 25 cm, sono stati elaborati in termini di valori medi giornalieri e deviazioni standard associate a ciascun elemento geometrico omogeneo (rettifici, curve, curve di transizione). Su questi nuovi valori sono state effettuate le indagini successive, data una bassa variabilità delle deviazioni standard dei parametri osservati a parità di transiente omogeneo.

Di seguito si riporta un'immagine esplicativa relativa ad un tronco della linea Napoli – S. Giorgio. Tale considerazione è, però, valida per tutta l'estensione del tracciato e per le 4 linee oggetto di indagine.

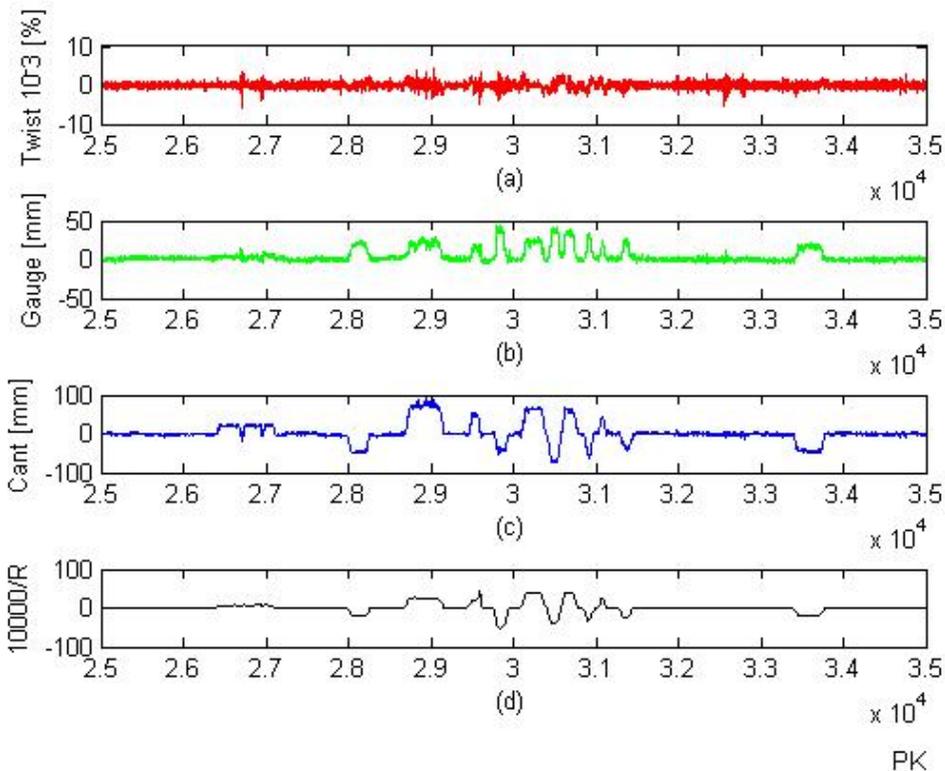


Figura 6.10: Tipico andamento dei parametri oggetto di indagine in funzione della progressiva chilometrica. (a) Sghembo; (b) Scartamento; (c) Sopraelevazione; (d) diagramma delle curvature.

La suddivisione del tracciato in tronchi omogenei è stata effettuata mediante l'applicazione di algoritmi di calcolo, appositamente sviluppati in ambiente Matlab, a causa della mancata disponibilità delle informazioni sulla geometria delle linee. Allo stesso modo sono state valutate le caratteristiche geometriche associate a ciascun transiente, in termini di estensione dell'elemento e/o raggio di curvatura e i valori statistici significativi.

L'andamento nel tempo dei valori dei parametri esaminati è stato osservato per gli elementi a curvatura costante percorsi ad una velocità non nulla.

Alla luce dei risultati ottenuti si è ritenuto opportuno procedere con le analisi suddividendo gli elementi oggetto di indagini in classi.

Per quanto riguarda le curve, queste sono state suddivise in funzione del raggio. Di seguito sono riportate le caratteristiche di ciascun gruppo.

Tabella 6.1: Raggruppamento in classi delle curve planimetriche in funzione del raggio (R).

CLASSI	R [m]
1	0 ÷ 300
2	300 ÷ 600
3	600 ÷ 900
4	>900

Per ciascuna di queste curve, raggruppate in classi si è ritenuto opportuno normalizzare i valori medi giornalieri delle grandezze in esame (pari o dispari) rispetto al primo giorno di misurazione.

Per i rettifili si è proceduto in maniera analoga alle curve, la suddivisione è stata effettuata in funzione della lunghezza. Sono stati quindi identificati tre gruppi i cui valori sono riportati nella tabella successiva.

Tabella 6.2: Raggruppamento in classi dei rettifili del tracciato in funzione dell'estensione planimetrica (L).

CLASSI	L [m]
1	0 ÷ 100
2	100 ÷ 200
3	L > 200

Diversamente dalle altre linee oggetto di indagine, per la linea Napoli – San Giorgio, i dati di velocità di fiancata non sono stati raccolti nelle prime giornate di rilievo.

Per tale ragione l'effettiva velocità di percorrenza è stata ricavata dal diagramma delle velocità. Trattandosi di una linea regionale, con distanza tra due stazioni successive contenuta, si è supposto un andamento delle velocità di tipo trapezoidale. Il diagramma delle velocità è stato costruito per l'intera linea a partire dai dati del timetable, considerando un'accelerazione e una decelerazione pari ad 1 m/s^2 (lati del trapezio) al fine di garantire il comfort dei passeggeri in accelerazione e in frenata. Occorre precisare che il diagramma di velocità è limitato dai valori massimi consentiti dalla geometria del tracciato forniti dagli operatori della ex

Circumvesuviana, differenti ovviamente per tratti di linea, e dai valori della velocità di rango.

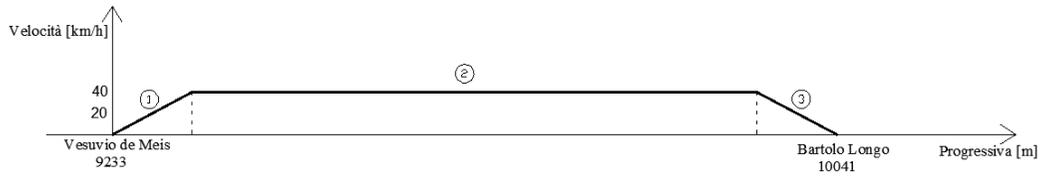


Figura 6.11: Esempio di diagramma delle velocità di fiancata tra due stazioni successive.

Noto il tempo totale necessario per arrivare da una stazione a quella successiva, depurato dei perditempo alle stazioni, è possibile ricavare analiticamente il valore della velocità massima di percorrenza alle progressive di interesse.

Suddividendo il diagramma di velocità trapezoidale in tre aree, due triangolari (relative ai tronchi di accelerazione e decelerazione) e una centrale rettangolare, è possibile valutare il tempo totale come somma dei tre tempi relativi a ciascun tratto.

Quanto descritto per il calcolo delle velocità non è stato ripetuto per le altre linee oggetto di indagine in quanto i valori delle velocità di fiancata sono stati direttamente restituiti dallo strumento.

Fatte tali considerazioni preliminari, si riporta l'indagine effettuata sulla variabilità nel tempo dei parametri geometrici esaminati (scartamento, sopraelevazione, sghembo). La variabilità dello scartamento, della sopraelevazione e dello sghembo è stata studiata rispettivamente in corrispondenza dei rettifili, delle curve e delle curve di transizione del tracciato, ovvero in corrispondenza degli elementi geometrici rispetto ai quali non è previsto da progetto un allargamento (basti pensare all'allargamento dello scartamento in curva in funzione del raggio ai fini dell'iscrizione del veicolo).

I valori medi giornalieri dello scartamento, riferiti a transienti omogenei, in particolare ai rettifili, sono stati analizzati in funzione della temperatura registrata nei giorni di rilievo dopo essere stati normalizzati rispetto al primo giorno di rilievo. Occorre precisare che più che il valore dello scartamento puro, lo strumento rileva le variazioni di scartamento rispetto a quello standard. Pertanto le analisi e gli output delle stesse si riferiscono a tale parametro.

I dati di temperatura sono stati ricavati da dati storici registrati nel Bollettino Agrometeorologico della regione Campania. La normalizzazione dei dati rispetto al primo giorno di misura è stata effettuata per definire uno zero del sistema rispetto al quale osservare il degrado, nell'ipotesi di assenza di operazioni di manutenzione. Dalle indagini si deduce una sensibile riduzione dei valori di scartamento in corrispondenza dei mesi estivi e un fenomeno del tutto opposto nei mesi invernali. Da ciò discendono contrazioni e dilatazioni del binario dovute agli stress termici cui sono sottoposti. Pertanto il valore delle temperature stagionali influenza notevolmente le caratteristiche del binario in termini di scartamento. Il fenomeno risulta accentuato in corrispondenza dell'estate 2011 caratterizzata da un elevato gradiente termico, si nota infatti una maggiore riduzione dello scartamento. Di seguito sono riportati i diagrammi di tutti i differenti gruppi di rettifili analizzati.

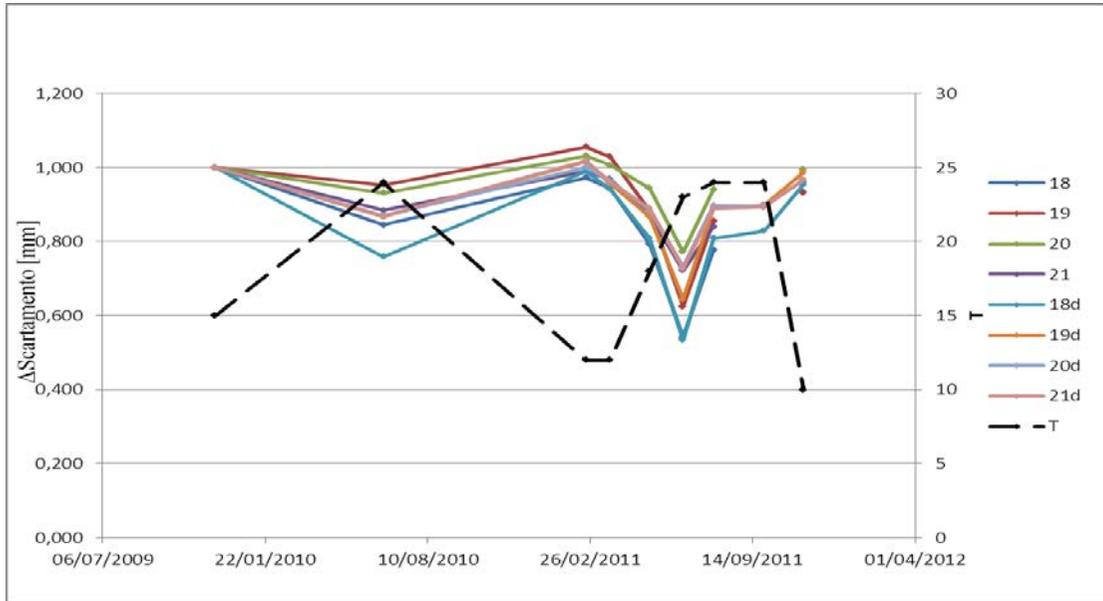


Figura 6.11: Andamento dei valori medi di scartamento normalizzati in corrispondenza dei rettifili della linea Napoli – S. Giorgio appartenenti al gruppo 3 rapportati alla temperatura ambientale.

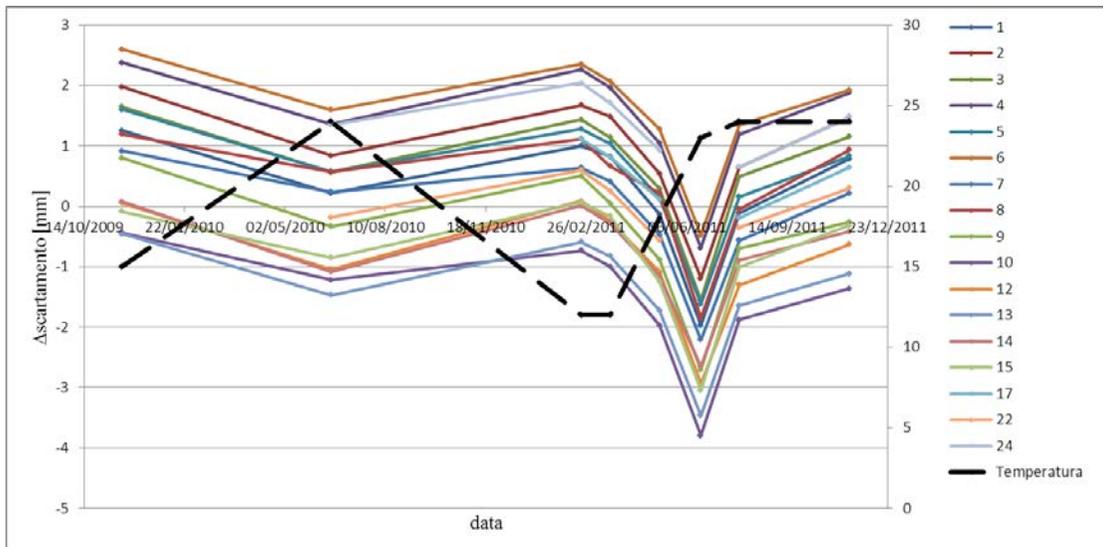


Figura 6.12: Andamento dei valori medi di scartamento in corrispondenza dei rettifili della linea Napoli – S. Giorgio appartenenti al gruppo 2 rapportati alla temperatura ambientale.

Dall'analisi dei diagrammi e dei dati ad essi collegati si è giunti alla conclusione che l'ipotesi fatta sulla relazione tra la variazione termica del binario e la

variazione dello scartamento fosse corretta. Questo sembra essere in accordo con le teorie di termica del binario.

Anche la sopraelevazione, come lo scartamento è stata analizzata in termini di valori medi giornalieri. La variazione nel tempo di tale parametro è stata osservata in corrispondenza di curve e rettifili selezionati con il medesimo criterio adottato per gli altri parametri.

Dato il modesto scostamento della deviazione standard dal valor medio si può dedurre una scarsa variabilità del dato a parità di elemento geometrico omogeneo, pertanto è lecito utilizzare, per le indagini successive, i valori medi giornalieri della sopraelevazione riferiti a tratti omogeni.

Per osservare la variabilità del parametro nel tempo, si è ritenuto opportuno normalizzare i valori medi della sopraelevazione in funzione del primo giorno di rilievo. In tal caso si osservano due andamenti predominanti che meritano di essere analizzati separatamente suddividendo gli elementi in gruppi. Tale differenza di comportamento è da ricercarsi nell'entità delle forze scambiate al contatto ruota-rotaia. Per evidenziare tale aspetto si è ritenuto opportuno ragionare tenendo in considerazione l'equilibrio delle forze in curva e i valori di velocità effettiva di viaggio e velocità critica.

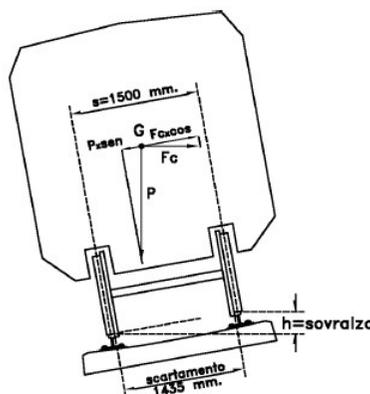


Figura 6.13: Equilibrio delle forze agenti su un veicolo in curva.

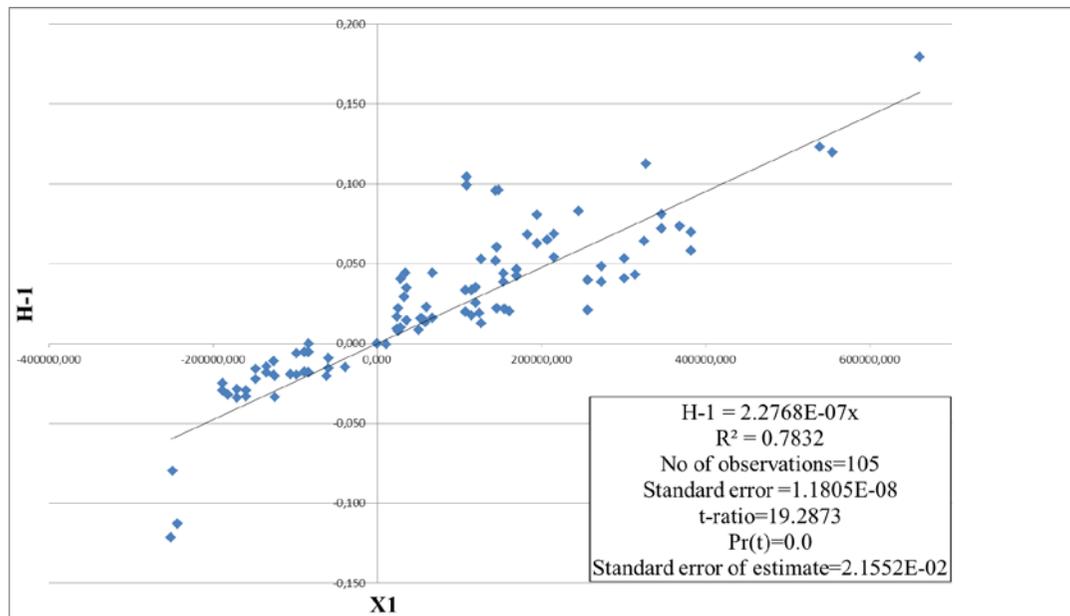
Quando un veicolo marcia in curva di raggio R con velocità v e peso statico P , è soggetto ad una forza centrifuga F_c .

L'andamento nel tempo della sopraelevazione è stato studiato inoltre in funzione del carico sul binario inteso in termini di traffico giornaliero medio e traffico cumulato.

Il traffico giornaliero è stato ottenuto dividendo i dati di traffico mensile forniti dal Consorzio Unico Campania per il numero di giorni del mese corrispondente.

Il traffico cumulato è stato ricavato, per un fissato giorno di rilievo, come sommatoria dei traffici giornalieri registrati fino alla data in esame. Inoltre occorre precisare che si è considerato come zero di riferimento il primo giorno in assoluto di rilievi, al quale è stato fatto corrispondere un valore nullo del traffico medio giornaliero.

Si è infine, analizzato l'andamento dei valori medi della sopraelevazione normalizzata in funzione del fattore X_1 ottenuto come prodotto tra i due fattori sopra esaminati e implicitamente funzione del tempo.



Incrementando il dataset anche con i rilievi del 2014, grazie al rilievo diretto delle caratteristiche di marcia dei convogli, è stato possibile verificare l'ipotesi di velocità trapezoidale assunta per l'analisi dei dati degli anni precedenti. Inoltre la validità del modello di regressione è stata confermata da appositi test statistici effettuati mediante software di calcolo statistici (Datafit - Oakdale Engineering, SPSS Statistics - IBM) e le grandezze caratteristiche sono state riportate in grafico. La validità del modello di regressione è stata verificata tenendo opportunamente in considerazione il legame delle variabili in funzione del tempo.

Ottenuto il modello di regressione sono state effettuate previsioni del degrado del parametro in esame su 20 anni utilizzando lo strumento statistico catene di Markov. La scelta di utilizzare tale strumento è nata dall'esame dei modelli di degrado presenti in letteratura, in Appendice B è riportato un adeguato approfondimento relativo alle catene di Markov.

Una catena di Markov è un processo stocastico grazie al quale, nota la distribuzione di probabilità del processo al tempo presente, è possibile conoscere anche la distribuzione di probabilità per le previsioni future. Al fine di utilizzare tale strumento statistico è necessario avere a disposizione dati monitorati con cadenza temporale costante. A causa di assenza di rilievi equispaziati nel tempo è stato necessario ricorrere ad un'ulteriore strumento statistico, le P-Spline. Le P-Spline sono un caso particolare delle curve di Smoothing Spline; un'attenta analisi sulle Spline è riportata in Appendice C. Grazie a tale manipolazione statistica dei dati oggetto di indagine è stato possibile risalire a valori del parametro oggetto di studio che si sarebbero osservati qualora i rilievi fossero realmente stati effettuati con cadenza temporale costante (nel caso in esame ogni 6 mesi).

I risultati ottenuti sono riportati di seguito.

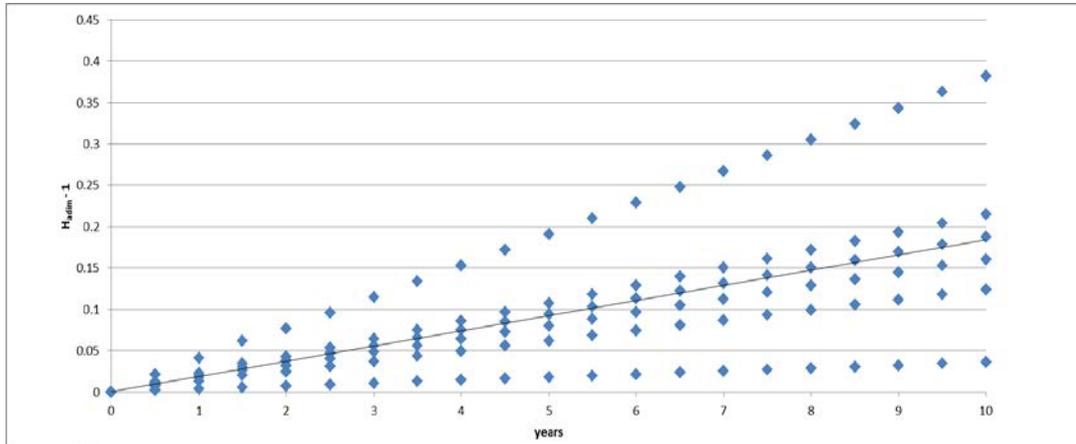


Figura 6.15: Modello di regressione ottenuto per le curve della linea Napoli – S.Giorgio, usato per calibrare le catene di Markov.

Dalle matrici di probabilità di transizione è possibile risalire alla probabilità che ha il parametro in esame in ciascuna classe di curve esaminata, di passare da una condizione di degrado a quella immediatamente successiva, attraverso le diverse condizioni di degrado, stabilite qualitativamente e quantitativamente a priori (very good, good, fairy, very poor, poor).

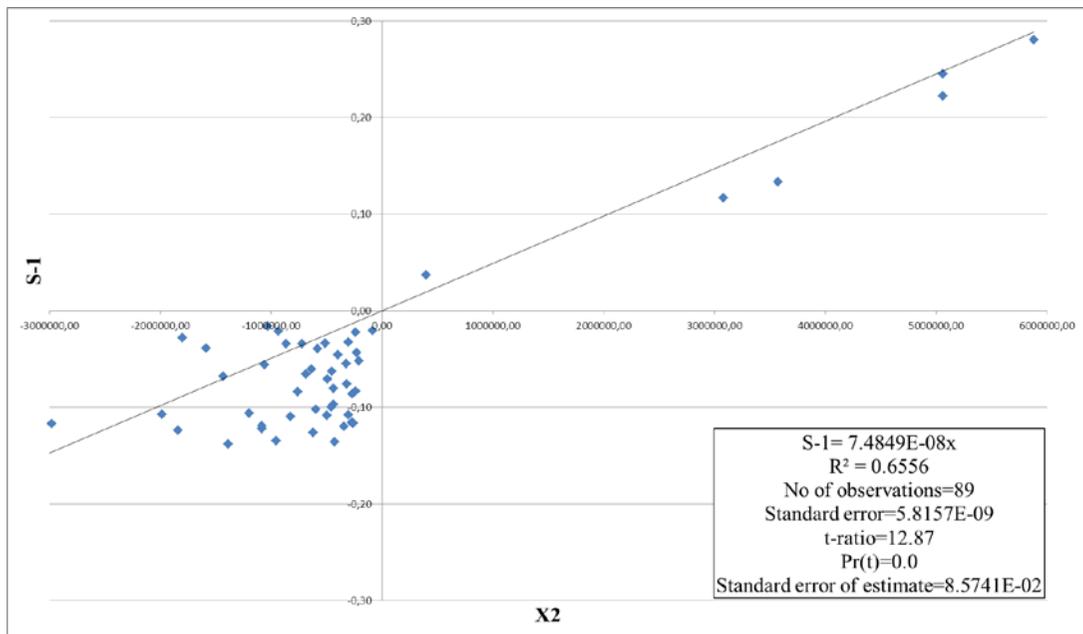
Di seguito si riporta una tipica matrice di transizione ottenuta per le curve appartenenti al primo gruppo della linea Napoli – S. Giorgio. In appendice sono riportati gli altri risultati.

Tabella 6.3: Tipica TPM ottenuta per le curve appartenenti al Gruppo 1 della linea Napoli – S. Giorgio.

P				
0.943186	0.056814	0.000000	0.000000	0.000000
0.000000	0.793665	0.206335	0.000000	0.000000
0.000000	0.000000	0.608944	0.391056	0.000000
0.000000	0.000000	0.000000	0.340501	0.659499
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

Il parametro sghembo è stato analizzato in corrispondenza dei raccordi compresi tra due elementi a curvatura costante, in quanto è in corrispondenza delle curve di transizione che si apprezza maggiormente una variazione di tale parametro data la sensibilità dello strumento utilizzato.

I valori medi giornalieri dello sghembo calcolati per elementi a raggio variabile, sono stati confrontati, in termini di evoluzione nel tempo, con il parametro caratterizzante gli elementi e la marcia del materiale rotabile



Anche in tal caso si è proceduto con la calibrazione delle catene di Markov, dopo la valutazione dei parametri equispaziati nel tempo mediante l'utilizzo di P-Spline, come riportato in Appendice A e in Appendice B.

Per la creazione delle P-Spline, di fatto si è proceduto ordinando le variabili in senso crescente in funzione dei predittori (x); si sono poi create le basi, definite indipendentemente dal numero di dati il cui numero è dato dalla somma del numero di nodi (ndx) scelti (nel caso in esame 20, scelta effettuata sulla base di studi presenti in letteratura che dimostrano l'efficacia dell'utilizzo di un numero di nodi compreso tra 20 e 50 per garantire stabilità al risultato.) e del grado di libertà ($bdeg$), nel caso in esame posto pari a 3. La matrice B delle basi, ha tante righe quante sono le righe della variabile x e tante colonne quanti sono il numero di nodi sommati ai gradi di libertà. Ad ogni colonna corrisponde una spline. Create le basi è possibile definire i λ , imponendo la minimizzazione della generalized cross validation (gvc) che hanno la stessa numerosità degli a , coefficienti di regressione, noti i quali è possibile stimare le y_{hat} . I coefficienti di regressione a sono di fondamentale importanza, in quanto, lasciandoli invariati, ci consentono di ricavare valori di y in corrispondenza di valori di x non osservati.

Di seguito si riportano alcuni risultati riassuntivi dell'intera analisi effettuata che ha interessato tutte le linee oggetto di indagine.

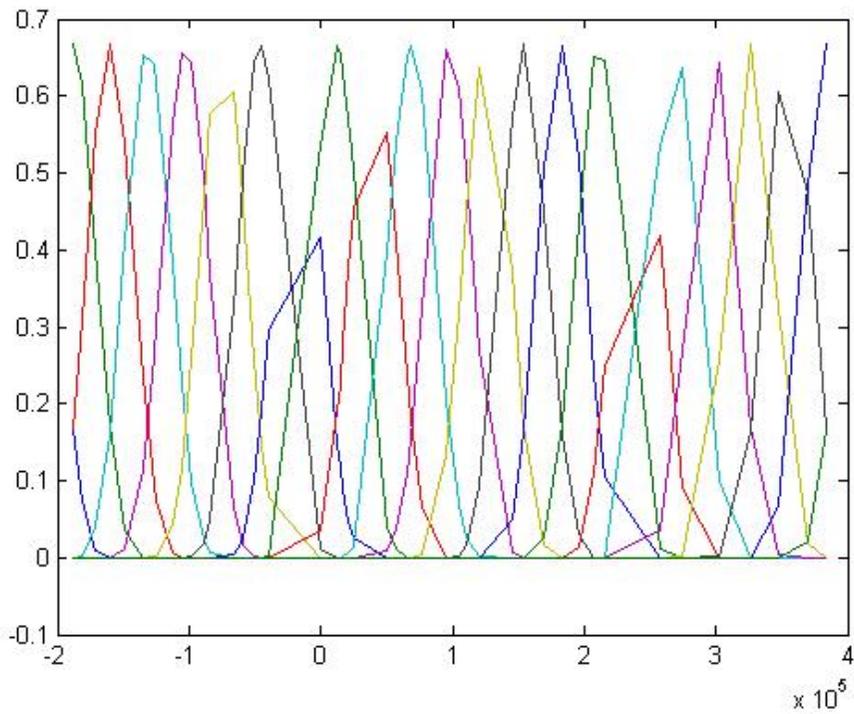


Figura 6.17.: Basi ricavate utilizzando come predittori i valori relativi alla tratta Napoli-San Giorgio.

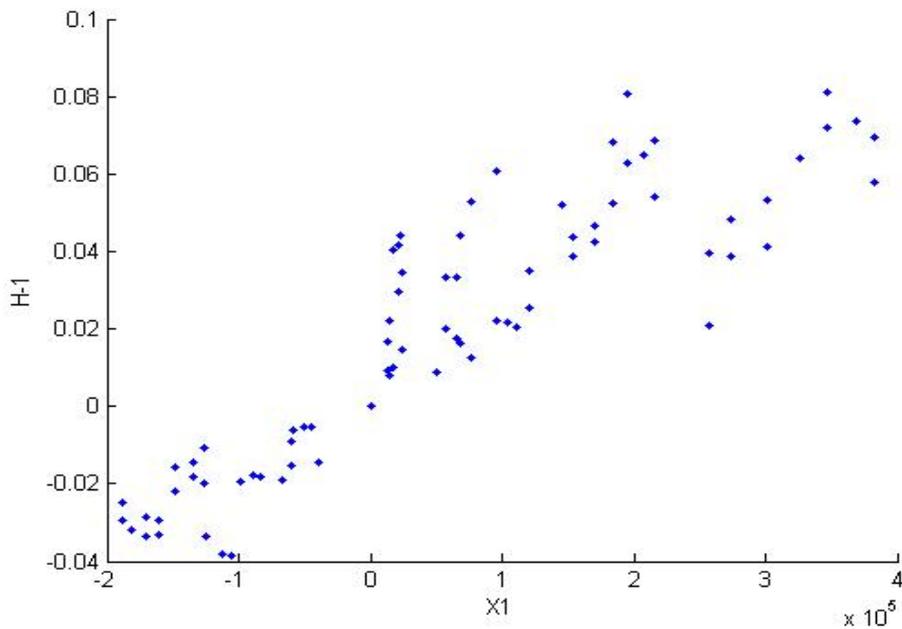


Figura 6.18: Andamento dei dati di sopraelevazione normalizzata in funzione del parametro di degrado X_1 , relativi alla linea Napoli-San Giorgio.

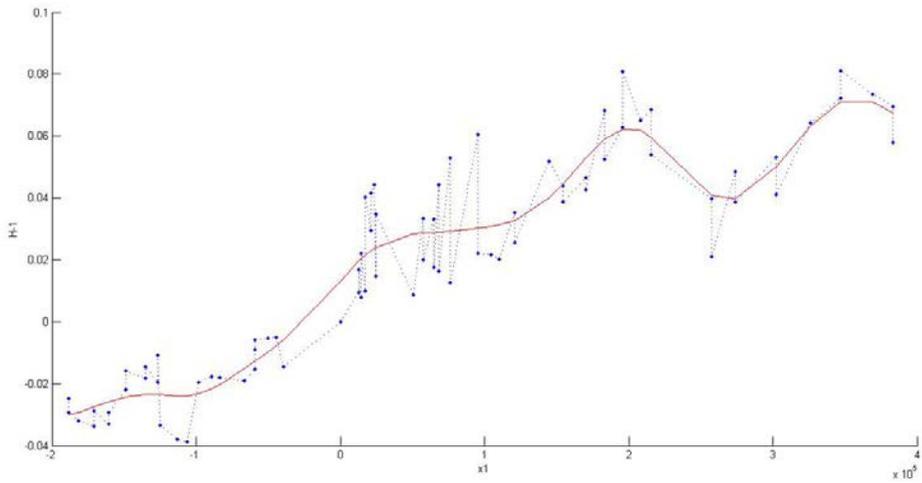


Figura 6.19: Funzione spline costruita sui dati di sopraelevazione normalizzata relativi alla tratta Napoli-San Giorgio.

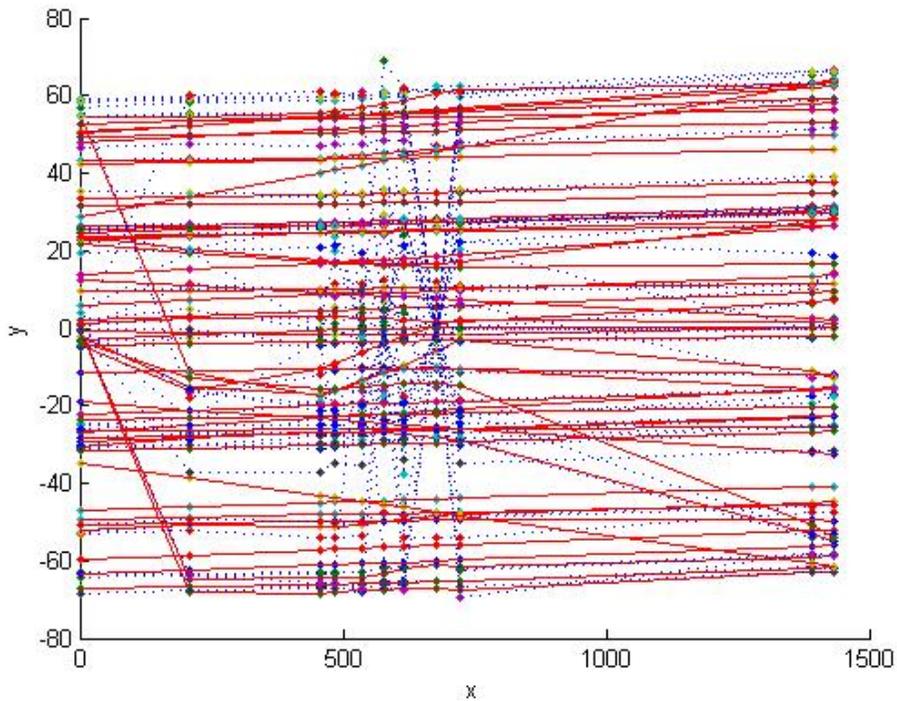


Figura 6.20: Diverse spline (in rosso) calcolate per descrivere gli andamenti dei valori medi di sopraelevazione in funzione del tempo, rilevati sulla linea della Circumvesuviana Napoli - San. Giorgio.

A partire dal risultato evidenziato dalla figura sopra riportata, è possibile variare il valore della x in modo tale che rappresenti, non più i giorni reali in cui sono stati effettuati i dati di difettosità, ma un numero di giorni temporalmente equidistanti. A valle di ciò è possibile ottenere i valori delle $y_{unobserved}$, bensì stimate, utilizzabili per l'applicazione delle catene di Markov e la creazione dei modelli di degrado.

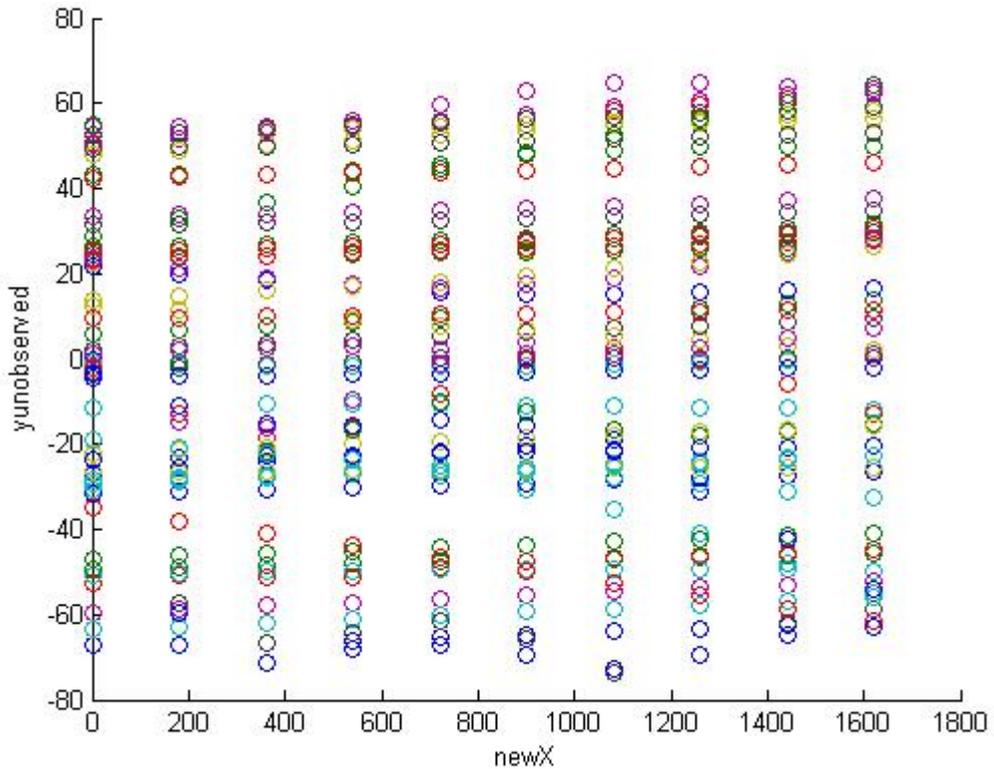


Figura 6.21: Valori delle $y_{unobserved}$ ottenute variando il parametro temporale x , da utilizzare nella calibrazione delle catene di Markov.

Alla luce dei risultati ottenuti si è ritenuto opportuno valutare quanto un modello di regressione polinomiale potesse descrivere con maggiore precisione il dataset. Quello che meglio sembra fittare i dati sperimentali è un modello di regressione funzione potenza. Di seguito si riportano i risultati ottenuti.

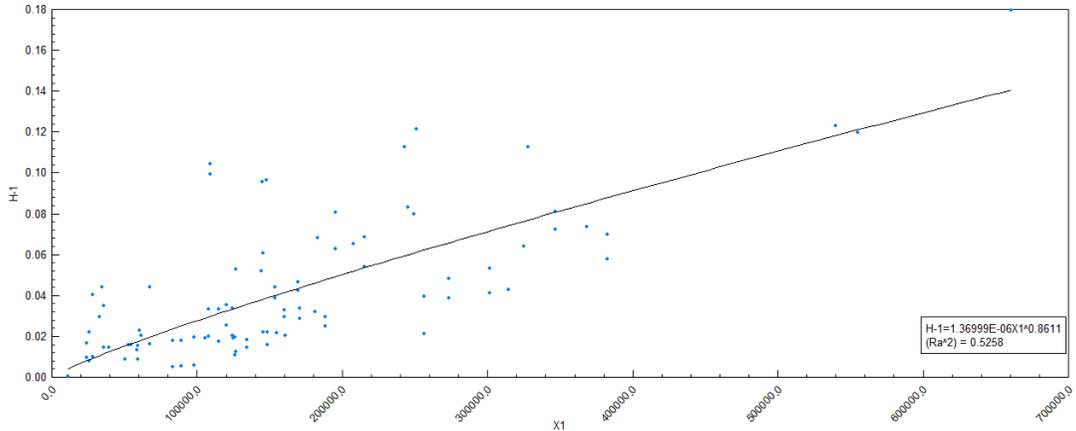


Figura 6.22: Modello di regressione di funzione di potenza ottenuto per i dati di sopraelevazione in funzione del parametro X1 per le curve della linea Napoli - S.Giorgio.

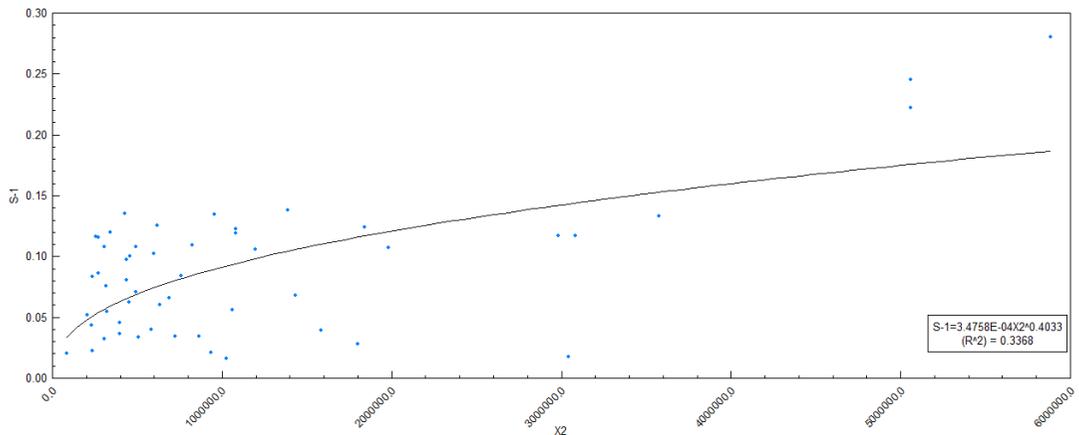


Figura 6.23: Modello di regressione di funzione di potenza ottenuto per i dati di sghembo in funzione del parametro X2 per le curve di transizione della linea Napoli - S.Giorgio.

6.4.2 Applicazione caso studio linea Napoli-Sorrento

La tratta costiera che da Napoli si spinge fino a Sorrento ha un'estensione di 42,5 Km e serve 34 stazioni, salvo corse direttissime, in cui alcune stazioni vengono eliminate variando il normale esercizio.

La distanza minima tra due stazioni successive è circa 500 metri, la massima 2,5 Km.

I rilievi sono stati effettuati nelle date 11/01/2006; 07/09/2007; 18/02/2008; 09/09/2008; 07/04/2009; 13/10/2009; 18/02/2010; 29/04/2010; 24/02/2011; 06/04/2012; 12/12/2013; 17/09/2014.

La tratta analizzata comprende 69 curve, 60 rettifili e 131 curve di transizione paraboliche.

I dati di raccolti in corrispondenza della linea Napoli – Sorrento, in tutte le giornate di rilievo sono comprensivi anche dei valori di velocità di fiancata, per tanto non è stato necessario calcolare il diagramma delle velocità. Ma questo si è ottenuto direttamente dai dati monitorati. Si riporta a titolo esemplificativo un diagramma delle velocità reale, assimilabile ad un diagramma trapezoidale.

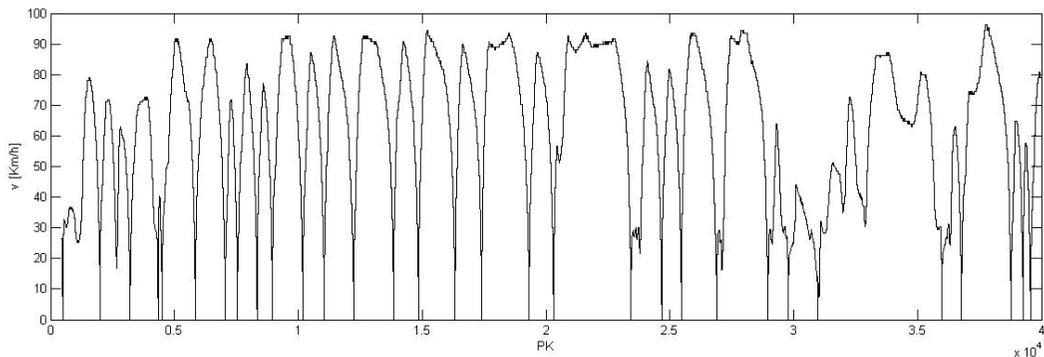


Figura 6.24: Tipico andamento delle velocità di fiancata lungo la linea Napoli – Sorrento.

Tenendo in considerazione la difficoltà di associare nel tempo i parametri monitorati agli elementi geometrici planimetrici costanti, a causa di problemi legati allo zero di riferimento dello strumento e alla taratura dello stesso, i risultati ottenuti in corrispondenza dei transienti omogenei sono riportati di seguito.

Ripetendo gli stessi ragionamenti descritti per la tratta descritta al paragrafo precedente, i risultati ottenuti per i rettifili sono di seguito riportati.

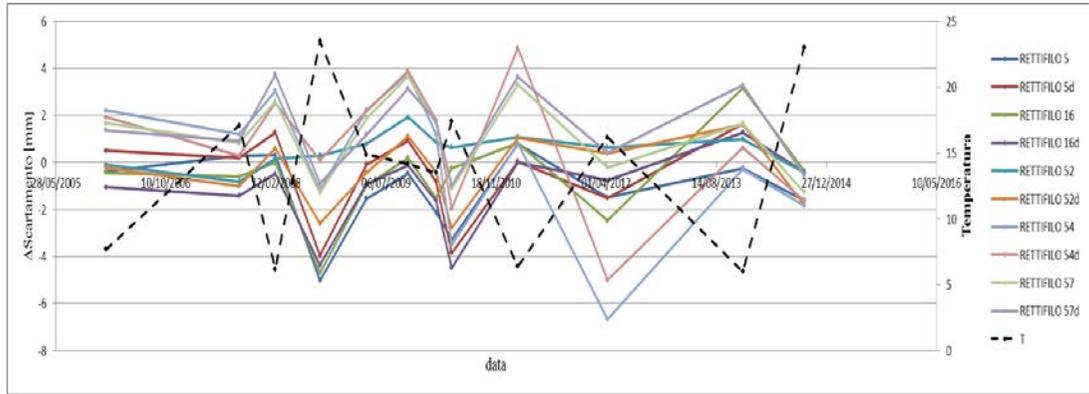


Figura 6.25: Andamento dei valori medi di scartamento in corrispondenza dei rettifici della linea Napoli – Sorrento appartenenti al gruppo 1 rapportati alla temperatura ambientale.

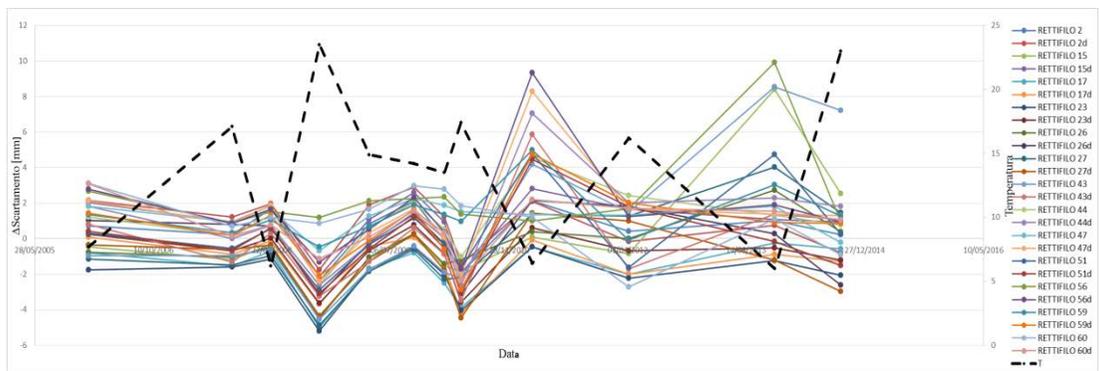


Figura 6.26: Andamento dei valori medi di scartamento in corrispondenza dei rettifici della linea Napoli – Sorrento appartenenti al gruppo 2 rapportati alla temperatura ambientale.

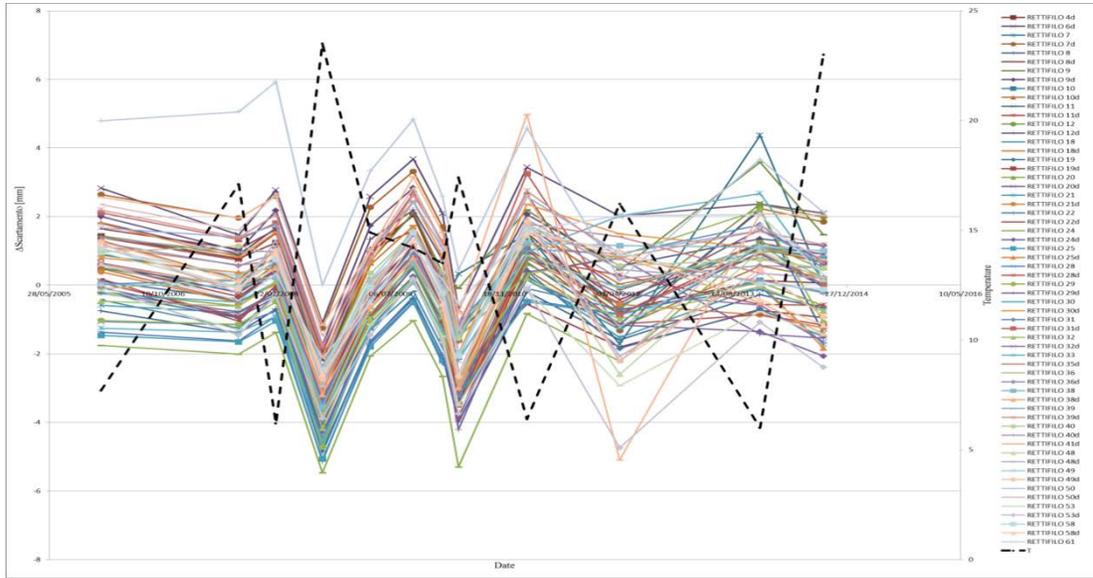


Figura 6.27: Andamento dei valori medi di scartamento in corrispondenza dei rettifici della linea Napoli – Sorrento appartenenti al gruppo 3 rapportati alla temperatura ambientale.

Per ragioni di brevità si riportano di seguito esclusivamente i modelli di regressione ottenuti in corrispondenza delle curve e delle curve di transizione del tracciato. Sono escluse tutte le altre rappresentazioni delle elaborazioni statistiche effettuate riguardanti valori di difettosità analizzati in corrispondenza di ciascun elemento esaminato.

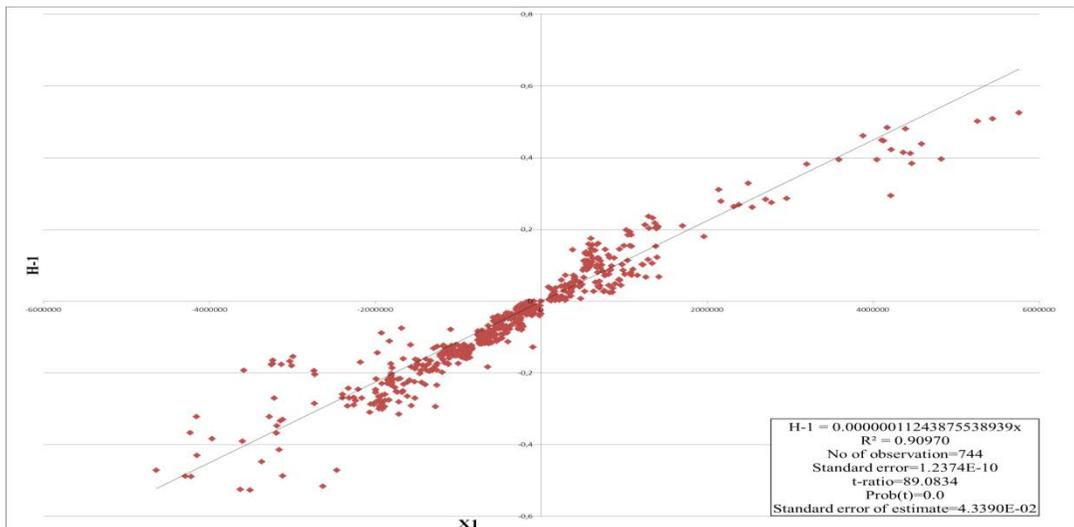


Figura 6.28: Grafico a dispersione e linea di tendenza della sopraelevazione normalizzata in funzione del parametro X_1 per le curve della linea Napoli – Sorrento.

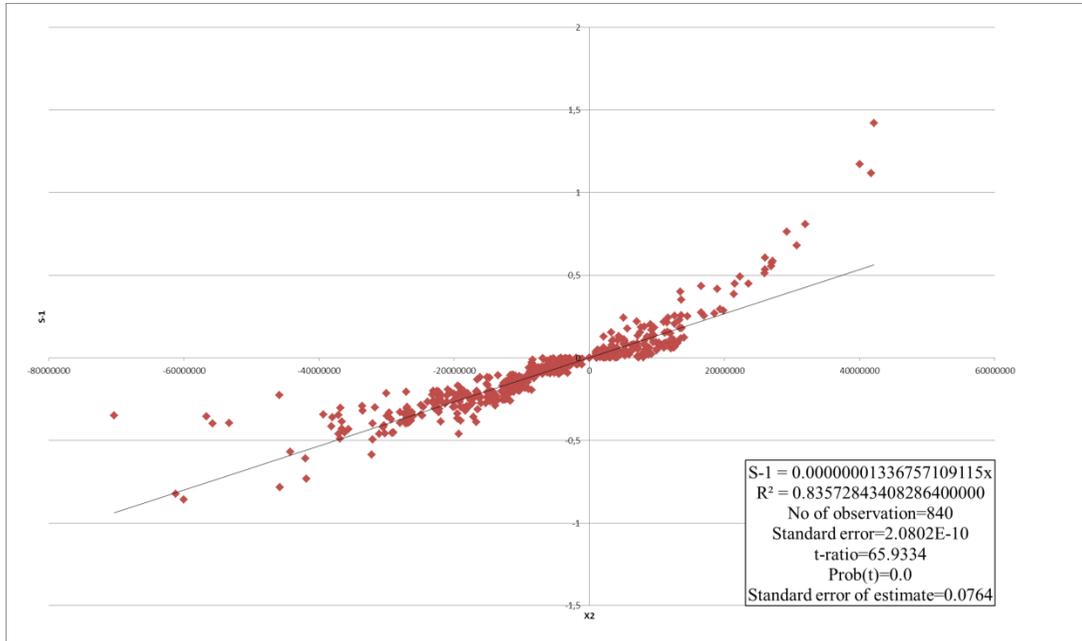


Figura 6.29: Grafico a dispersione e linea di tendenza dello sghembo normalizzato in funzione del parametro X₂ per le curve di transizione della linea Napoli – Sorrento.

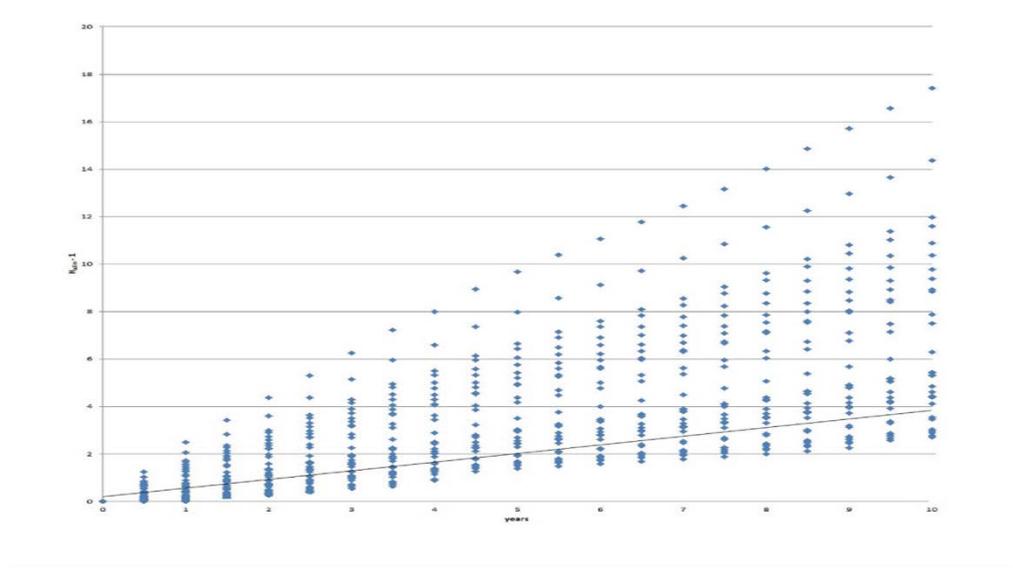


Figura 6.30: Modello di regressione ottenuto per le curve della linea Napoli – Sorrento, usato per calibrare le catene di Markov.

Tabella 6.4: Tipica TPM ottenuta per le curve appartenenti al Gruppo 1 della linea Napoli – Sorrento.

P				
0.992733	0.007267	0.000000	0.000000	0.000000
0.000000	0.809671	0.190329	0.000000	0.000000
0.000000	0.000000	0.729682	0.270318	0.000000
0.000000	0.000000	0.000000	0.623131	0.376869
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

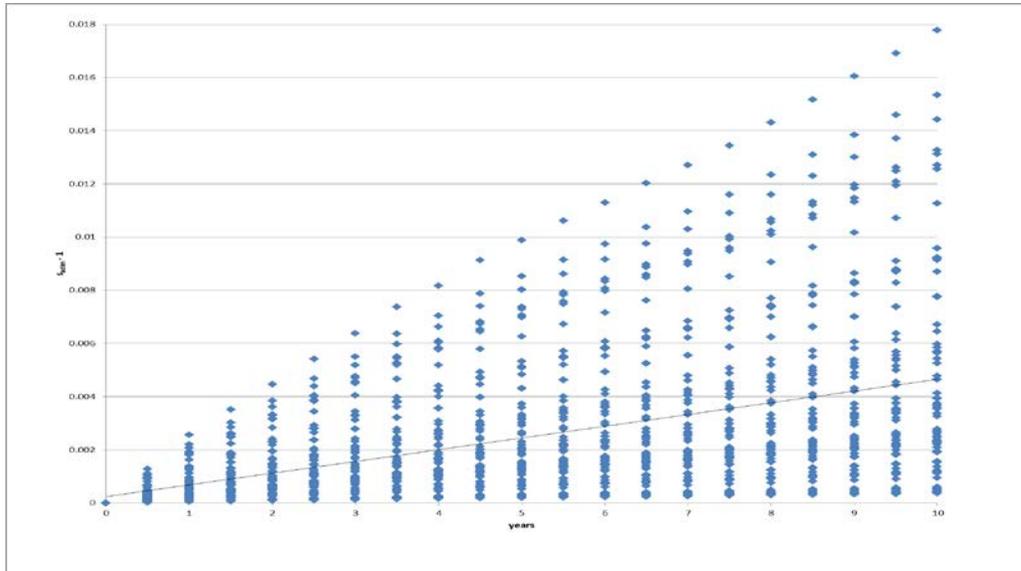


Figura 6.31: Modello di regressione ottenuto per le curve di transizione della linea Napoli – Sorrento, usato per calibrare le catene di Markov.

Tabella 6.5: Tipica TPM ottenuta per le curve di transizione della linea Napoli – Sorrento.

P				
0.996487	0.003513	0.000000	0.000000	0.000000
0.000000	0.864714	0.135286	0.000000	0.000000
0.000000	0.000000	0.750408	0.249592	0.000000
0.000000	0.000000	0.000000	0.629664	0.370336
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

Anche per la linea Napoli – Sorrento si è utilizzato un modello di regressione funzione potenza per l’analisi dei dati di sopraelevazione e sghembo normalizzati rispetto alla prima giornata di misura. I risultati ottenuti sono riportati di seguito.

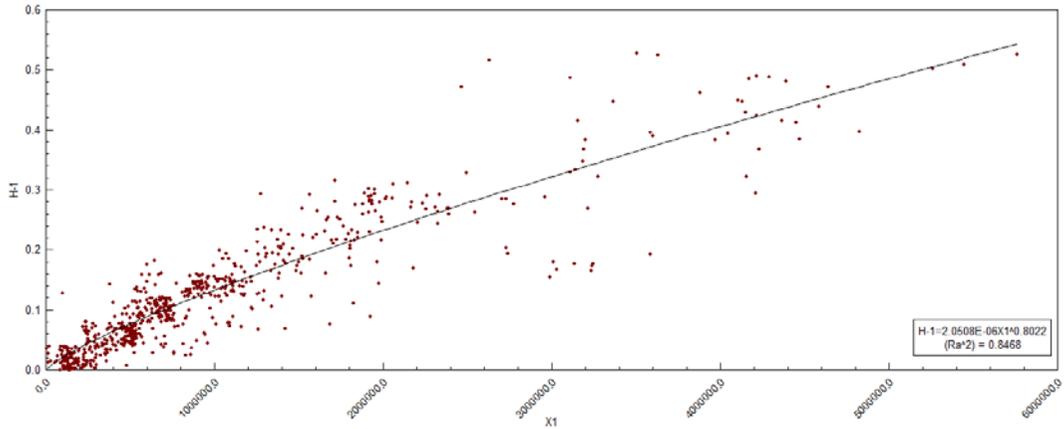


Figura 6.32: Modello di regressione di funzione di potenza ottenuto per i dati di sopraelevazione in funzione del parametro $X1$ per le curve della linea Napoli - Sorrento.

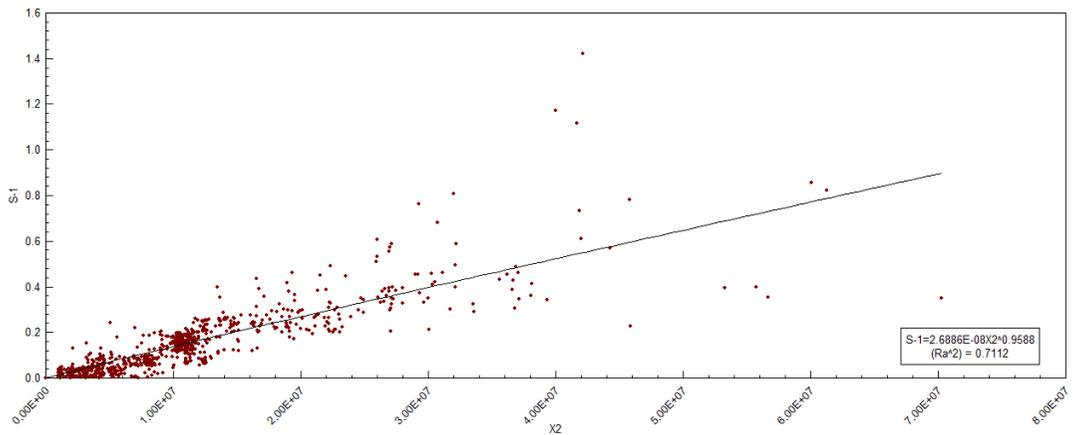


Figura 6.33: Modello di regressione di funzione di potenza ottenuto per i dati di sgembo in funzione del parametro $X2$ per le curve di transizione della linea Napoli - Sorrento.

6.4.3 Applicazione caso studio linea Napoli-Sarno

La linea Napoli – Sarno arriva nel comune di Salerno con le ultime due fermate (San Valentino e Sarno). Ha una lunghezza di 38,4 Km con 25 stazioni distanziate tra loro da un minimo di 200 metri a un massimo di circa 3 Km.

Le date dei rilievi a cui si riferiscono le indagini sono: 05/12/2007; 06/02/2008; 17/04/2008; 15/10/2009; 03/05/2010; 25/01/2011; 14/07/2011; 16/04/2012; 24/10/2013; 18/09/2014.

4.1.1 Si riportano di seguito i risultati ottenuti in corrispondenza dei transienti omogenei, come per le altre linee descritte

4.1.2

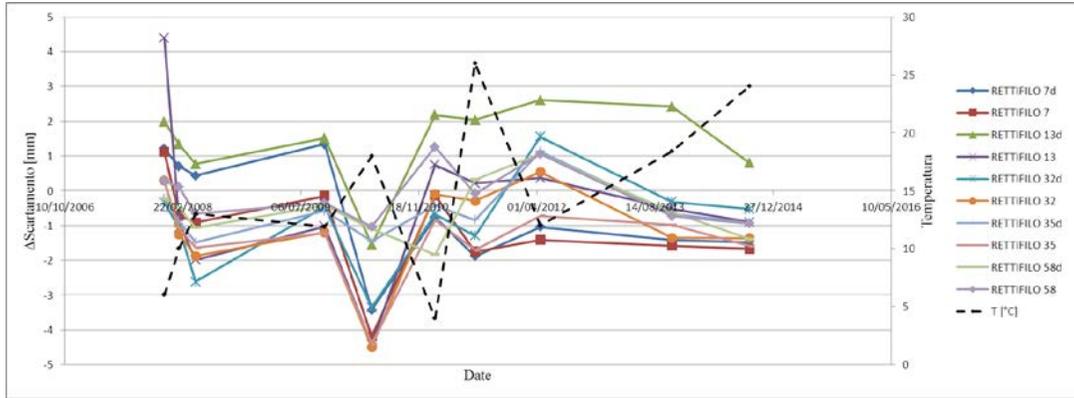


Figura 6.34: Andamento dei valori medi di scartamento in corrispondenza dei rettifici della linea Napoli – Sarno appartenenti al gruppo 1 rapportati alla temperatura ambientale.

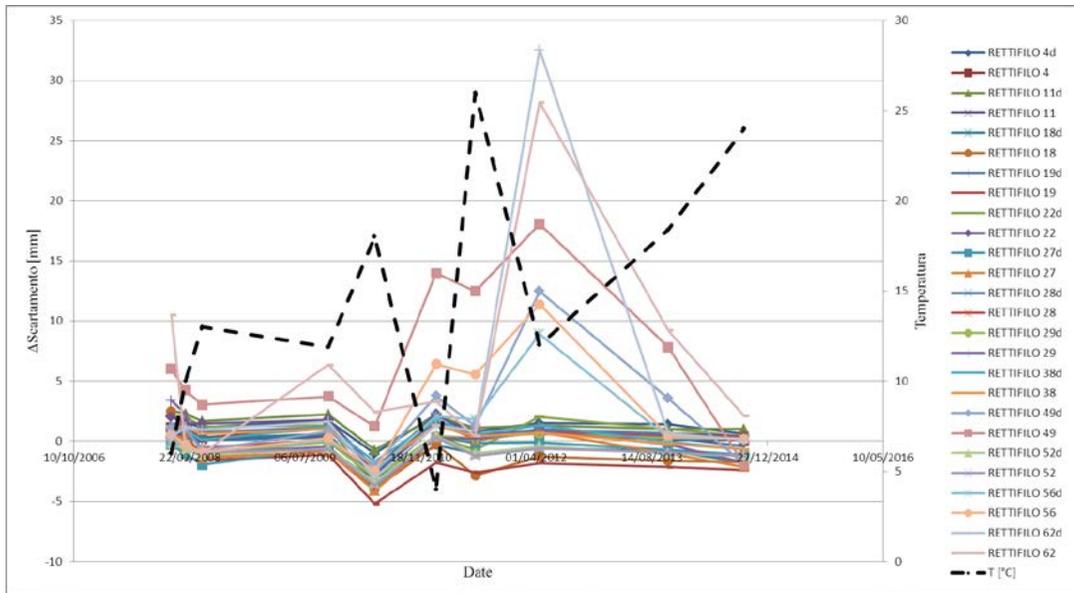


Figura 6.35: Andamento dei valori medi di scartamento in corrispondenza dei rettifici della linea Napoli – Sarno appartenenti al gruppo 2 rapportati alla temperatura ambientale.

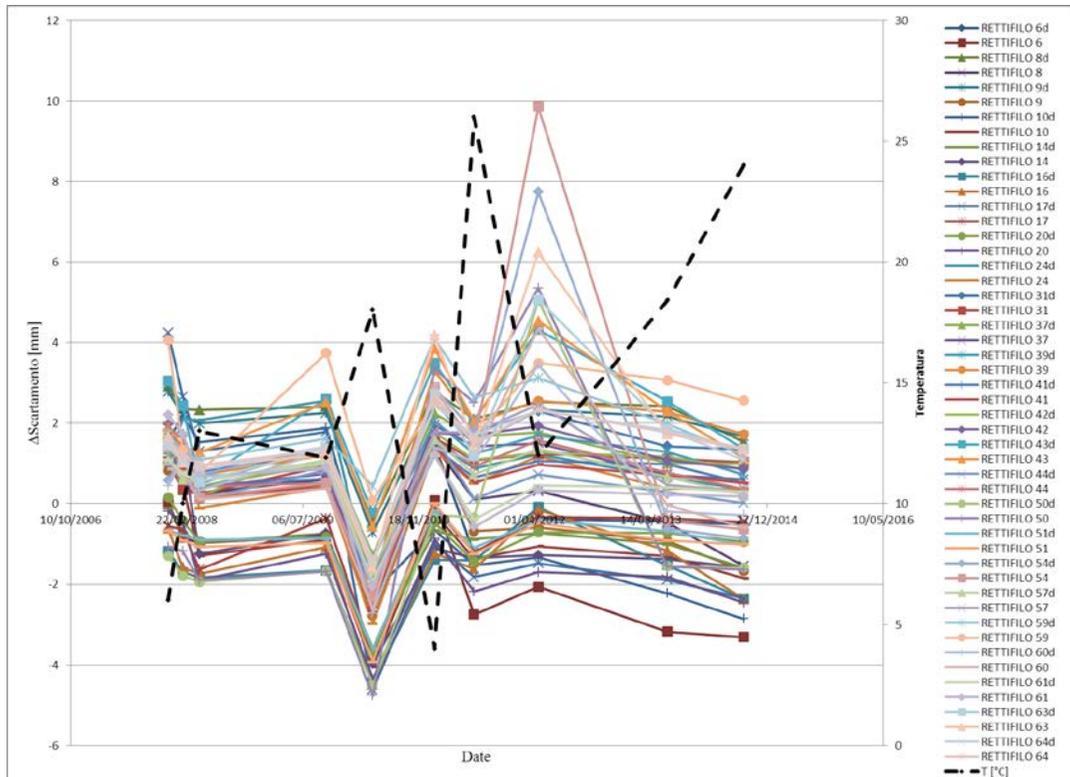


Figura 6.36: Andamento dei valori medi di scartamento in corrispondenza dei rettifici della linea Napoli – Sarno appartenenti al gruppo 3 rapportati alla temperatura ambientale.

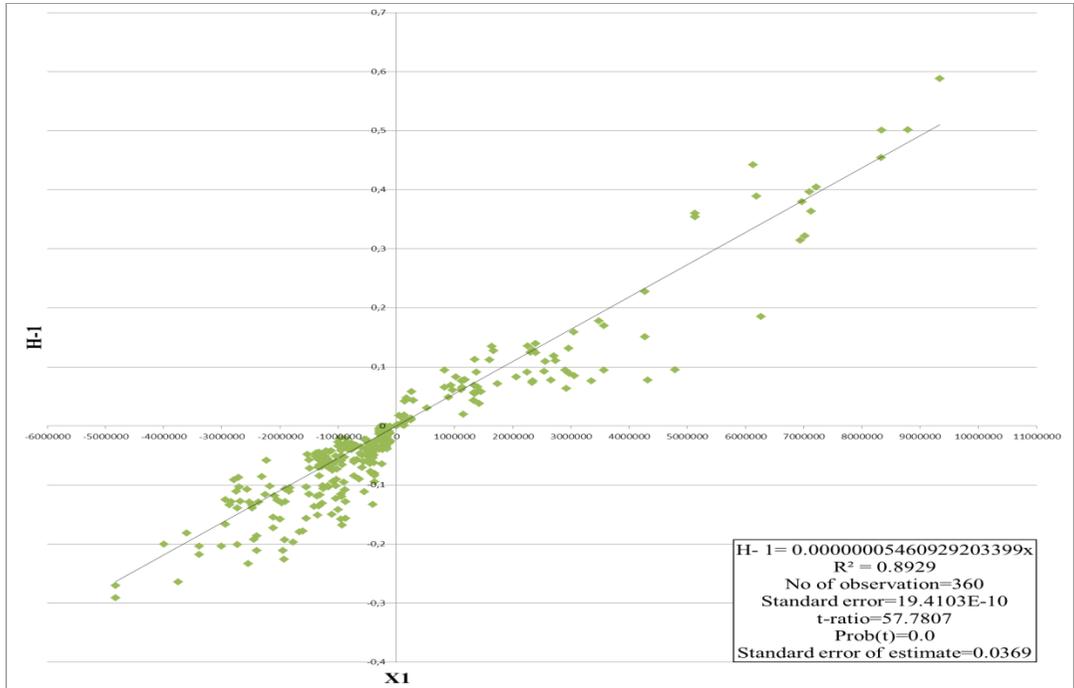


Figura 6.37: Grafico a dispersione e linea di tendenza della sopraelevazione normalizzata in funzione del parametro X_1 per le curve della linea Napoli – Sarno.

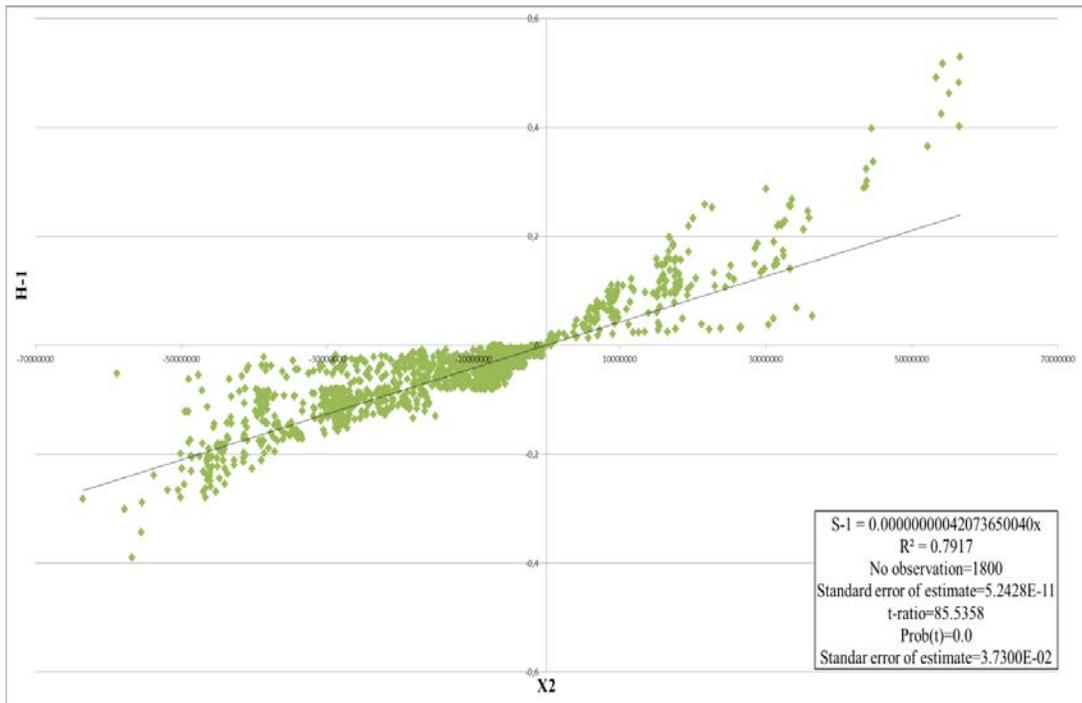


Figura 6.38: Grafico a dispersione e linea di tendenza dello sghembo normalizzato in funzione del parametro X_2 per le curve di transizione della linea Napoli – Sarno.

I risultati ottenuti calibrando le catene di Markov ai dati generati utilizzando le funzioni di smoothing P-spline, sono riportati di seguito.

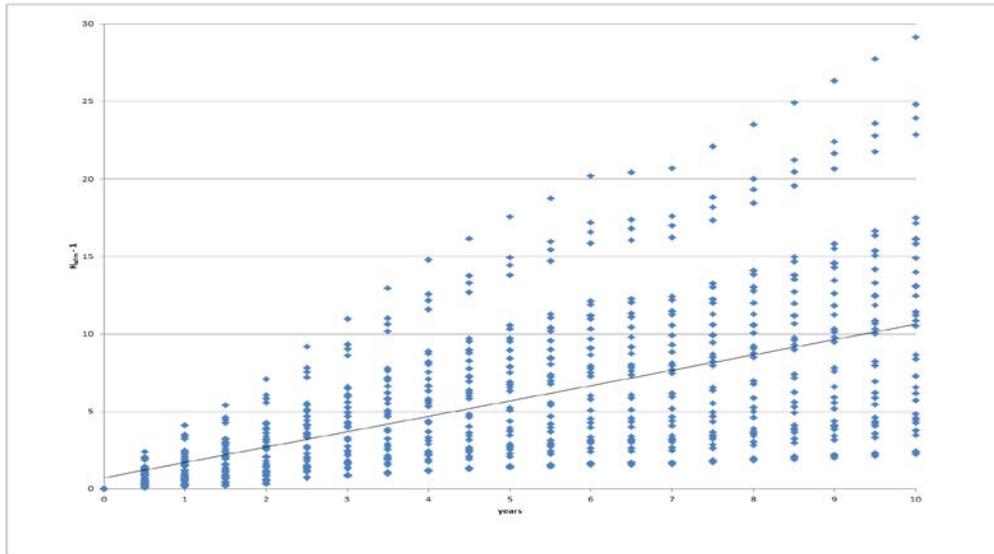


Figura 6.39: Modello di regressione ottenuto per le curve della linea Napoli – Sarno, usato per calibrare le catene di Markov.

Tabella 6.6: Tipica TPM ottenuta per le curve appartenenti al Gruppo 1 della linea Napoli – Sarno.

P				
0.147709	0.852291	0.000000	0.000000	0.000000
0.000000	0.281612	0.718388	0.000000	0.000000
0.000000	0.000000	0.238980	0.761020	0.000000
0.000000	0.000000	0.000000	0.096925	0.903075
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

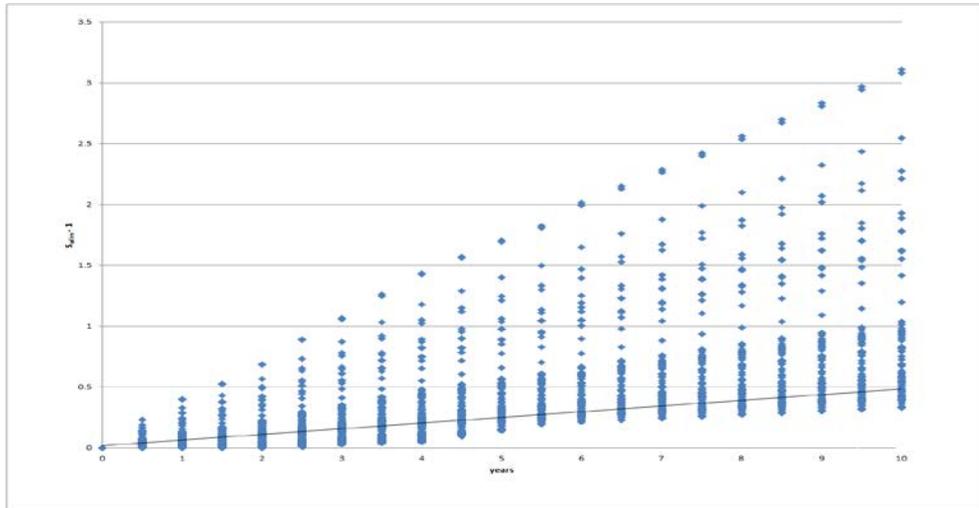


Figura 6.40: Modello di regressione ottenuto per le curve di transizione della linea Napoli – Sarno, usato per calibrare le catene di Markov.

Tabella 6.7: Tipica TPM ottenuta per le curve di transizione della linea Napoli – Sorrento.

P				
0.243223	0.756777	0.000000	0.000000	0.000000
0.000000	0.220866	0.779134	0.000000	0.000000
0.000000	0.000000	0.139236	0.860764	0.000000
0.000000	0.000000	0.000000	0.027600	0.972400
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

Anche per la linea Napoli – Sarno si è utilizzato un modello di regressione funzione potenza per l'analisi dei dati di sopraelevazione e sghembo normalizzati rispetto alla prima giornata di misura. I risultati ottenuti sono riportati di seguito.

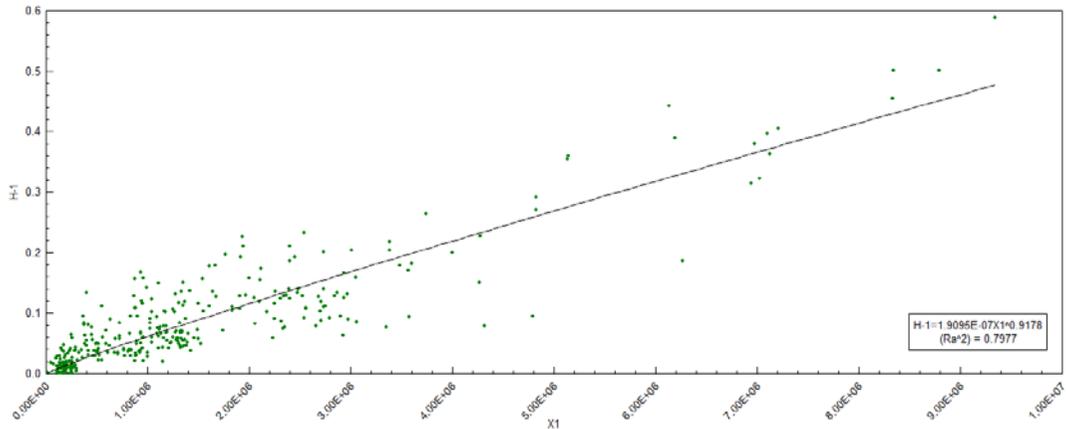


Figura 6.41: Modello di regressione di funzione di potenza ottenuto per i dati di sopraelevazione in funzione del parametro X_1 per le curve della linea Napoli - Sarno.

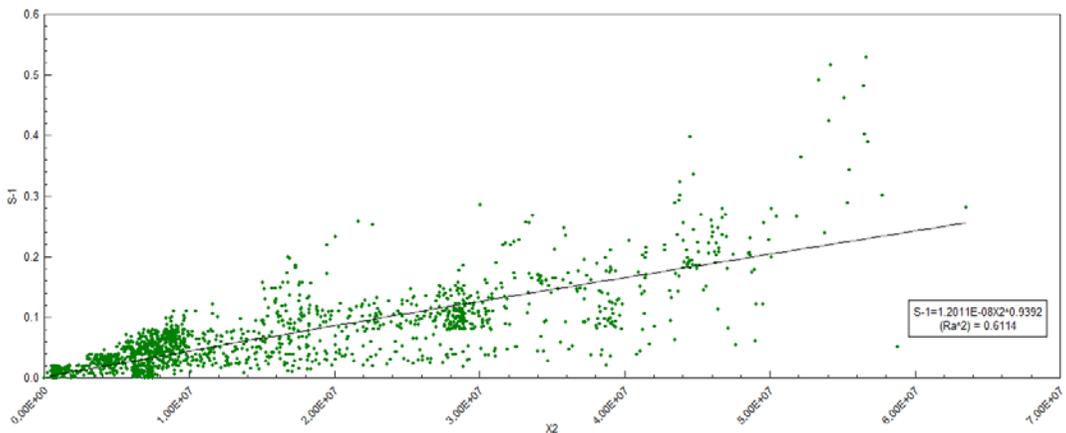


Figura 6.42: Modello di regressione di funzione di potenza ottenuto per i dati di sghebo in funzione del parametro X_2 per le curve di transizione della linea Napoli - Sarno.

In riferimento alla linea Napoli – Sarno è stata condotta un'ulteriore indagine del tutto preliminare. Data la disponibilità di dati di accelerazione raccolti mediante il sensore SMAMID direttamente montato sulla boccola di un treno in esercizio è stato possibile effettuare una prima ricerca di eventuali difettosità della linea a partire dai dati monitorati; e verificare la precisione e quindi l'affidabilità e i vantaggi della tecnologia a basso costo SMAMID a confronto con quella Plasser. Le apparecchiature di misura mobile oggetto di studio sfruttano tecnologie sensibilmente differenti.

Le grandezze monitorate con il POS/TG (valori di curvatura, sghembo, scartamento, sopraelevazione, allineamento e livello longitudinale) rilevate ogni 25 cm con grado di precisione al millimetro, sono state prese a riferimento al fine di verificare l'esattezza e la veridicità dei dati ricavati con gli accelerometri, posizionati sulle boccole dei carrelli.

A partire dai dati output dei grafici, il primo passo è stato quello di ricostruire la composizione degli elementi geometrici della tratta in questione. Il sistema Plasser fornisce le progressive ogni 25 cm lungo l'intero tracciato. Sulla base dei dati di curvatura, ad ogni elemento geometrico; rettili, curve di transizione e curve; è stata associata la progressiva di inizio e fine elemento.

In seguito all'identificazione degli elementi geometrici si è proceduto con i confronti.

Anche per la linea Napoli – Sarno la principale anomalia riscontrata è la non perfetta coincidenza degli elementi geometrici nel tempo, dovuta essenzialmente allo zero di misura dello strumento, non mantenuto costante nelle diverse date di monitoraggio, e all'errore di campionamento dell'odometro dell'ordine di 30 m.

Essendo POS/TG e SMAMID due strumenti sostanzialmente differenti tra loro, è stato necessario elaborare i dati output degli strumenti cercando di ottenere valori tra loro comparabili. Per l'individuazione di eventuali problemi e difettosità sono stati elaborati i valori accelerometrici di entrambi gli strumenti.

Al fine di operare tale confronto la linea Napoli – Sarno è stata analizzata solo per alcune tratte. Ciascuna tratta presa in analisi è compresa tra due stazioni consecutive. Dai dati POS/TG si rilevano con facilità le posizioni di ciascuna fermata tramite l'analisi del diagramma delle velocità, individuando le stazioni nei punti con velocità pari a 0 km/h.

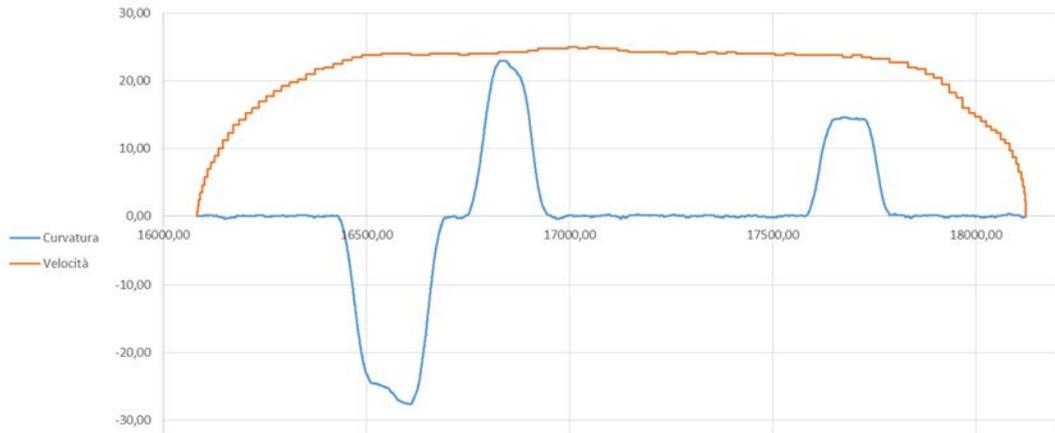


Figura 6.43: Andamento delle velocità e delle curvatures fornite dal POS/TG in corrispondenza di una tratta analizzata compresa tra due stazioni.

In egual modo l'analisi delle accelerazioni individua le fermate e quindi le rispettive stazioni, visto che l'accelerometro della coordinata verticale (indicata con X, per lo strumento SMAMID) registra esclusivamente l'accelerazione di gravità pari a $9,81 \text{ m/s}^2$.

Lo SMAMID fornisce dati accelerometrici con una frequenza di 640 Hz (un valore di accelerazione ogni 0.0015625 sec.). Analizzando e diagrammando i valori per tratte ferroviarie di diversi chilometri comprese tra due stazioni, e per ciascuna delle tre coordinate (X,Y,Z) si ottengono rappresentazioni grafiche complesse e di difficile interpretazione.

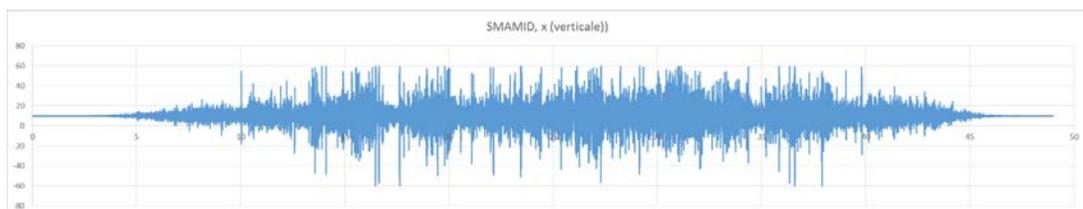


Figura 6.44: Esempio di output dei dati di accelerazione monitorati con lo SMAMID.

Analizzando i dati di output a parità di coordinata spaziale e in riferimento a ciascuna delle tratte comprese tra due stazioni, si è proceduto al filtraggio del segnale mediante l'utilizzo di tecniche a media mobile, in tal modo è stato possibile

anche individuare variazioni anomale. Questa procedura oltre ad essere indispensabile per operare un confronto tra i dati Plasser (già filtrati) e i dati SMAMID, si è rivelata un efficace tecnica automatizzata per il rilevamento della curvatura degli elementi geometrici caratterizzanti l'andamento planimetrico della tratta analizzata.

L'analisi accelerometrica effettuata si è soffermata principalmente sui dati restituiti lungo le direzioni Z ed X, che rappresentano rispettivamente le accelerazioni trasversali e le accelerazioni verticali registrate dallo SMAMID. Le maggiori accelerazioni si registrano in presenza delle curve, e sono minime lungo i rettifili. Inoltre, accelerazioni positive indicano curve a sinistra e accelerazioni negative curve a destra. L'analisi dei dati monitorati lungo la direzione Z (accelerazioni trasversali) permette inoltre di individuare eventuali difetti di allineamento, ovvero, di spostamento dei binari dalla loro posizione originale.

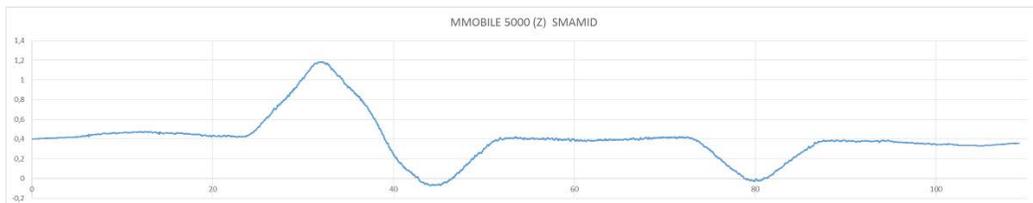


Figura 6.45: Dati SMAMID filtrati mediante tecniche a media mobile.

Dovendo comparare i suddetti dati con i valori forniti dal POS/TG, è stato necessario calcolare i valori di accelerazione dai dati dello strumento PLASSER.

Il calcolo delle accelerazioni trasversali è dato dalla relazione:

R = raggio di curvatura

h = sopraelevazione

$2S$ = scartamento

L'elaborazione dei dati output del POS/TG tramite le relazioni sopra indicate, fornisce i valori accelerometrici in riferimento alle progressive registrate dal sistema con l'ausilio dell'odometro.

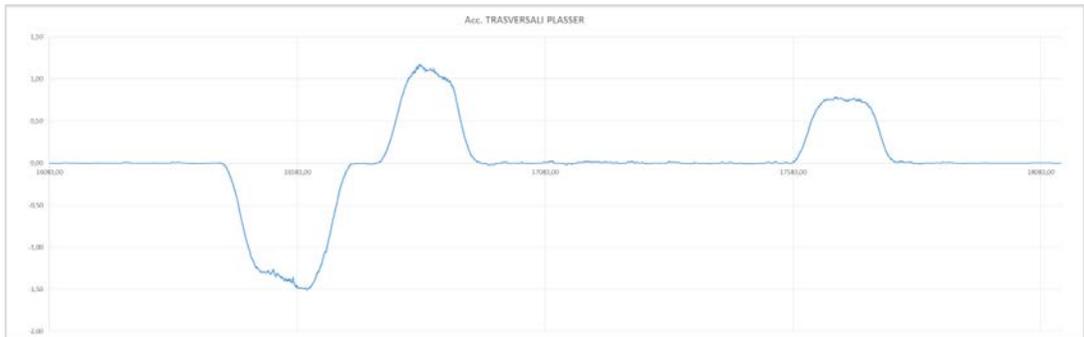


Figura 6.46: Accelerazioni trasversali calcolate tramite i valori output del POS/TG.

La figura mostra come è possibile indentificare le curve a sinistra con accelerazioni negative, le curve a destra con accelerazioni positive e la presenza di rettili nei tratti con accelerazioni che si attestano attorno al valore zero.

L'analisi dei dati accelerometrici, precedentemente illustrata, ha interessato diverse tratte del collegamento Napoli-Sarno e nello specifico:

- Via Gianturco – San Giovanni
- San Giovanni – Barra
- Officine Ponticelli – Ponticelli
- Ponticelli – Vesuvio De Meis
- Cercola – Polena
- Mercato Vecchio – Somma
- Somma – Rione Trieste
- Rione Trieste – Ottaviano
- Ottaviano – San Leonardo
- Flocco – Poggiomarino

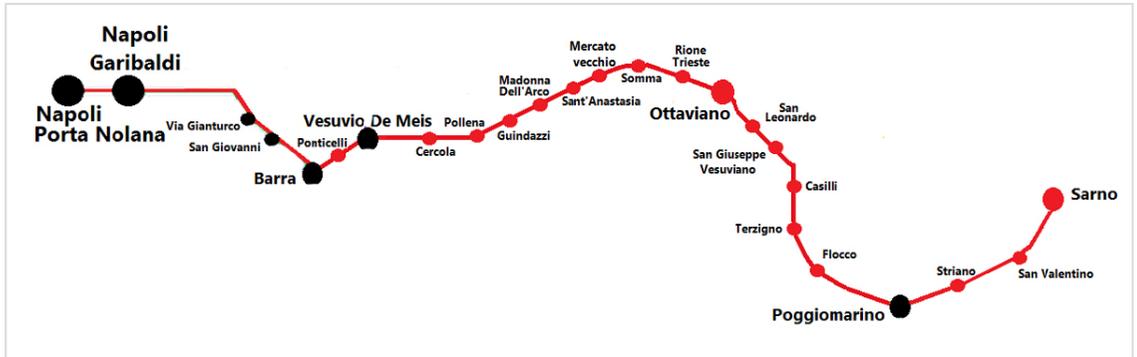


Figura 6.47: Stazioni della tratta Napoli-Sarno.

Gli accelerometri della SMAMID sono stati installati su un ETR 085 in servizio sulla Napoli – Sarno. La posizione degli 8 accelerometri è riportata nello schema che segue.

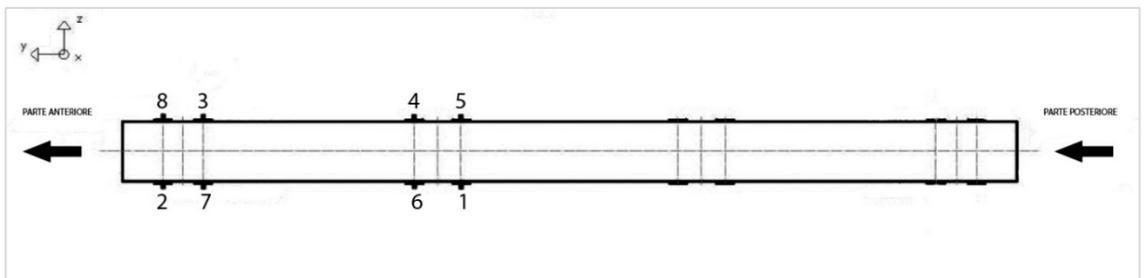


Figura 6.48: Schema di posizionamento degli 8 sensori SMAMID utilizzati per il monitoraggio delle accelerazioni in boccia.

In seguito all'analisi dei dati output dello SMAMID, con frequenza a 640 Hz, si riportano gli andamenti delle accelerazioni trasversali (corrispondenti alla coordinata Z) per le suddette tratte.

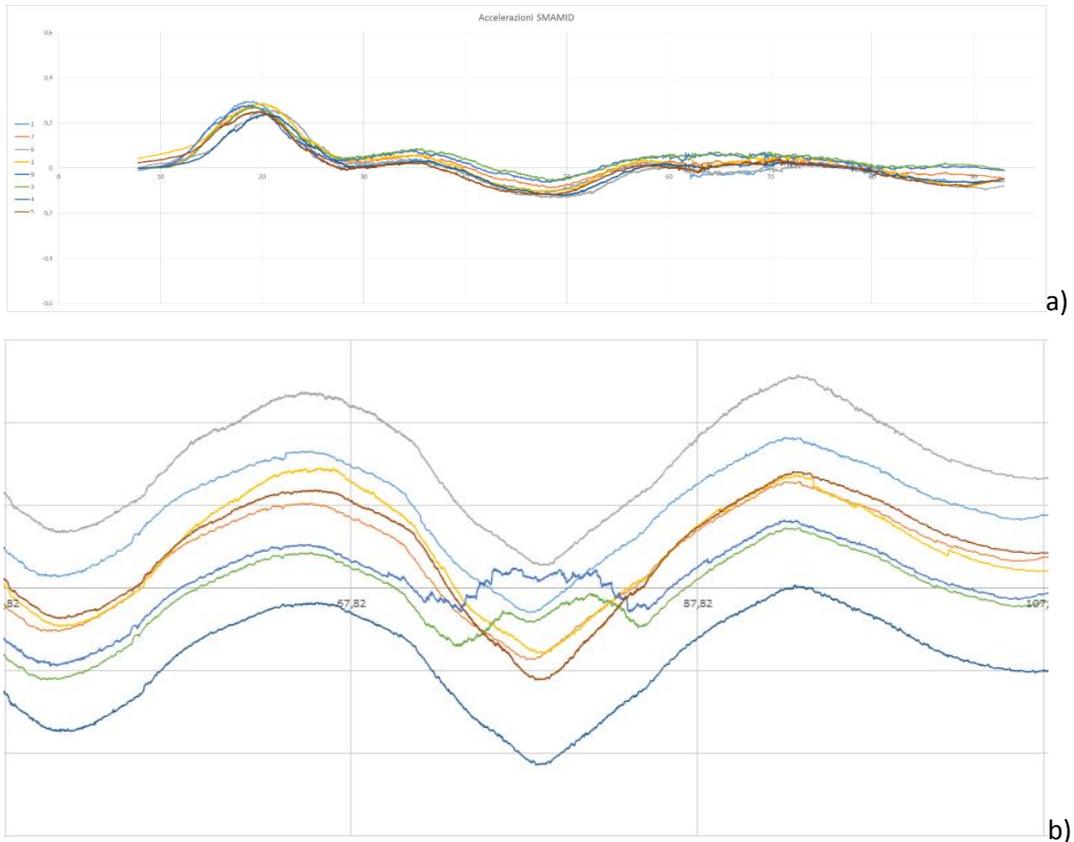


Figura 6.49: Sovrapposizione dei dati accelerometrici monitorati in direzione trasversale degli 8 SMAMID installati in boccola a) visione di insieme, b) particolare per la tratta Somma – Rione.

Essendo le analisi effettuate in tratte comprese tra due stazioni, è stato possibile individuare i punti dove obbligatoriamente il treno è fermo, che in termini accelerometrici, sono indicati da valori nulli per le coordinate X, Z (trasversali al moto) e valori prossimi a quelli dell'accelerazione di gravità sulla coordinata Y (lungo la verticale). Prendendo in esempio la tratta Somma - Rione, si possono evincere due particolari. Il primo evidenzia per ognuno degli 8 accelerometri SMAMID, valori differenti dallo zero sugli estremi della rappresentazione grafica, quindi, in corrispondenza delle stazioni. Il secondo dato rilevante è dato dall'andamento registrato dallo SMAMID numero 8 e lo SMAMID numero 3 rispetto all'andamento medio (in colore rosso).

In base alle diverse valutazioni effettuate, la prima problematica, è riconducibile ad una installazione non corretta degli strumenti SMAMID sulla boccola dell'ETR. Il non perfetto assemblaggio dell'apparecchiatura rispetto ai tre assi fondamentali, induce lo strumento a registrare piccoli valori di accelerazione anche nei momenti di stasi del treno.

La seconda problematica è probabilmente dovuta a un non corretto funzionamento dell'unità funzionale numero 8, che procede a una registrazione erronea dei valori accelerometrici quando quest'ultima è soggetta alle accelerazioni trasversali in curva. E' stata effettuata una verifica dei dati relativi allo SMAMID numero 8 e numero 3, con i dati accelerometrici medi tramite il calcolo della deviazione standard. Essendo, per definizione, la deviazione standard un modo per esprimere la dispersione dei dati intorno ad un indice di posizione (nel nostro caso, la media delle accelerazioni degli 8 SMAMID installati), si è osservato che l'apparecchiatura che restituisce valori di molto superiori a quelli medi.

Con questa soluzione, in affiancamento alla rappresentazione grafica, si individuano eventuali anomalie delle Unità Funzionali SMAMID, si ritiene quindi necessario provvedere alla manutenzione degli stessi.

Proseguendo nell'analisi sperimentale di confronto tra gli strumenti di misura SMAMID e PLASSER POS/TG, è stata rilevata una differente estensione degli elementi geometrici (rettifili e curve) e quindi la non perfetta corrispondenza rispetto alla progressiva di riferimento.

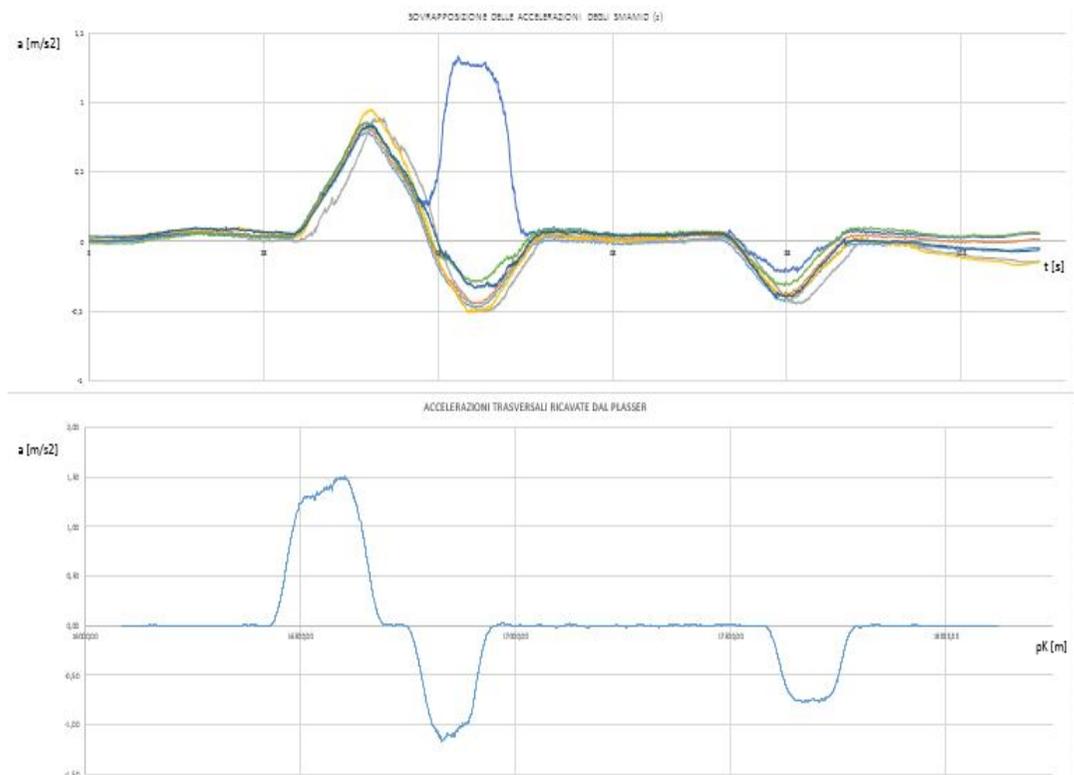


Figura 6.50: Confronto dati accelerometrici (in alto i valori SMAMID, in basso i valori del PLASSER).

Questa sostanziale differenza è dovuta alle diverse velocità di campionamento che seguono i treni con a bordo le strumentazioni di misura. La velocità è quindi un fattore legato essenzialmente al conducente del mezzo che segue il tragitto e le tempistiche classiche del trasporto viaggiatori. Di conseguenza, l'errore di disallineamento degli elementi geometri sembrerebbe non da attribuire all'inefficienza delle apparecchiature ma alle condizioni di marcia del treno durante le fasi rilevamento con lo SMAMID sulla tratta.

Per le analisi delle difettosità con l'ausilio dello SMAMID, ai fini del confronto dei risultati ottenuti con le difettosità individuate dallo strumento Plasser, in una fase preliminare si è proceduto con la disamina dei valori di curvatura e di allineamento destro e sinistro. Sono state poi calcolate le accelerazioni con la relazione sopra esposte. Di seguito è riportata l'analisi di punti singolari evidenziati tra le fermate delle stazioni Flocco e Poggiomarino. Solo in alcuni casi i punti singolari sono

associabili alle difettosità della linea e non ad elementi geometrici caratteristici quali scambi e deviatori. L'elaborazione dei dati SMAMID (con media mobile con base 5000), ha attenuato i picchi di difettosità pur rimanendo ben distinguibili.

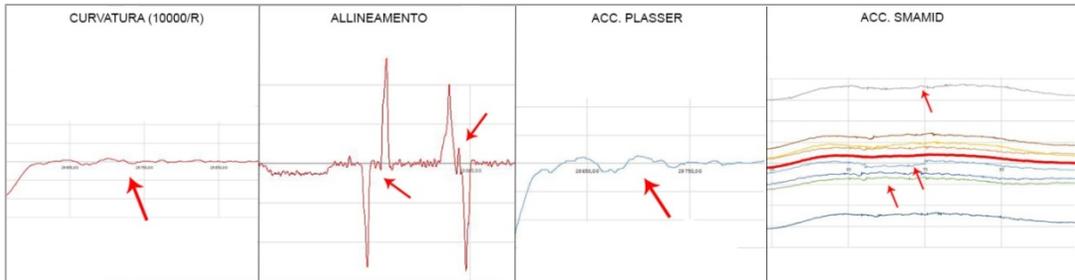


Figura 6.51: Punti singolari della tratta Flocco – Poggiomarino individuati mediante gli strumenti POS/TG e SMAMID.

Un altro esempio di difettosità del binario è stato rilevato, con la stessa metodica, lungo la tratta compresa tra le stazioni Ottaviano - S. Leonardo e Cercola - Polella. Anche in questo caso il POS/TG rileva oscillazioni anomale per la curvatura e l'allineamento; difettosità che, in seguito alle suddette elaborazioni, viene confermata anche dalle accelerazioni SMAMID.

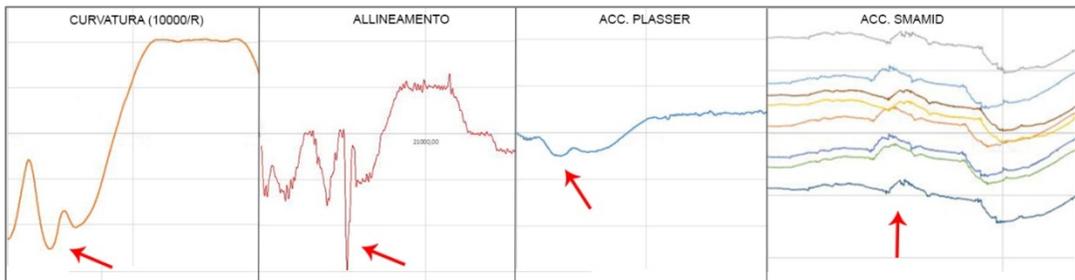


Figura 6.52: Punti singolari della tratta della tratta Ottaviano – S. Leonardo individuati mediante gli strumenti POS/TG e SMAMID.

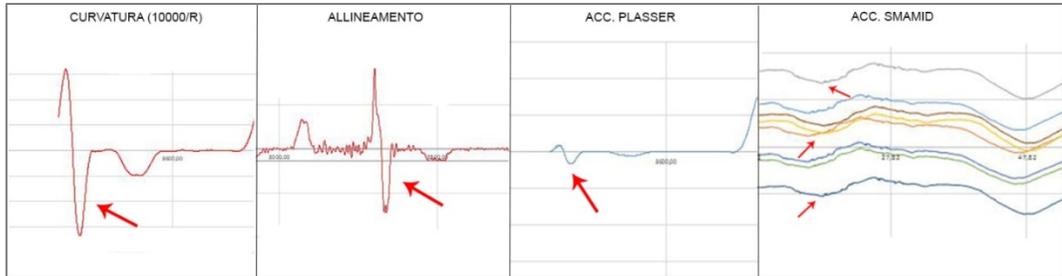


Figura 6.53: Punti singoli della tratta della tratta Cercola – Polena individuati mediante gli strumenti POS/TG e SMAMID.

Analoga procedura di comparazione è stata effettuata confrontando i valori dei livelli longitudinali delle rotaie raccolti con il POS/TG, con i valori di accelerazione verticale ricavati dallo SMAMID. Le accelerazioni verticali sono state opportunamente filtrate sottraendo ai dati output dello SMAMID i dati elaborati mediante media mobile. Questa procedura facilita l'individuazione dei picchi causati da difettosità.

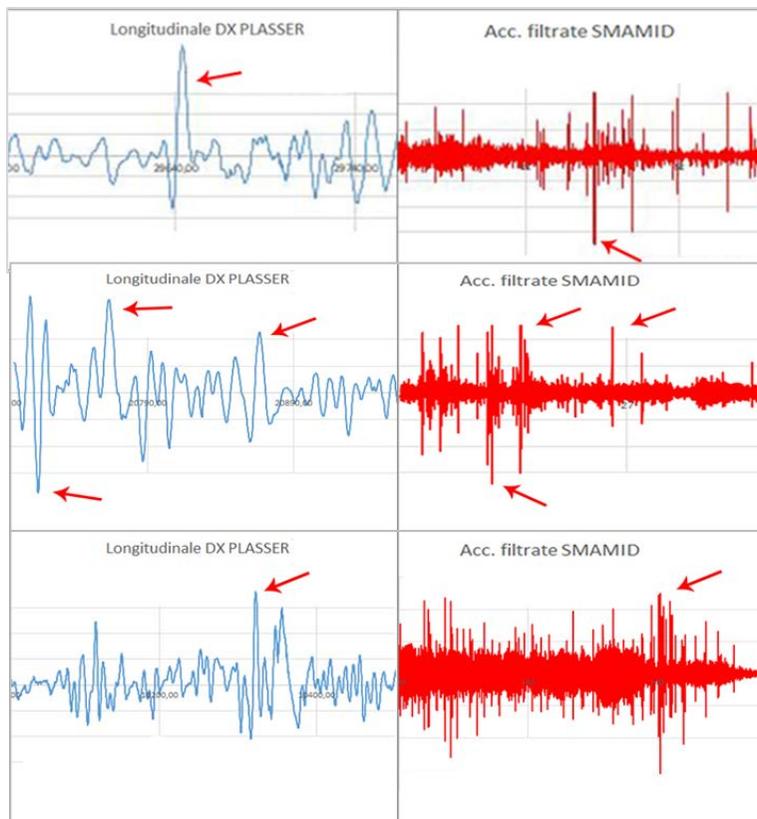


Figura 6.54: Punti singoli individuati in corrispondenza dei valori altimetrici della linea.

Si può quindi definire un valore di soglia delle accelerazioni di 4g oltre il quale, una variazione altimetrica, può indicare un difetto del binario.

Tali indagini preliminari effettuate sulla sola tratta Napoli – Sarno andrebbero estese all'intera rete al fine di poter conferire validità ai primi risultati raggiunti.

6.4.4 Applicazione caso studio linea Napoli-Baiano

La tratta della ex Circumvesuviana Napoli – Baiano, con un estensione di 39 Km circa, serve il comune di Avellino con le sole due, delle 28 stazioni, di Avella e Baiano. Le stazioni distano da un minimi di 600 metri circa a un massimo di 4 Km circa.

Le caratteristiche della sovrastruttura della linea in esame sono omogenee, ovvero struttura tradizionale su ballast, fatta eccezione per un tratto di circa 2500 metri dove la struttura è su piastra, nei pressi delle stazioni di Poggioreale e Centro.

I dati oggetto di analisi sono stati monitorati nelle giornate di rilievo eseguite, il 18/11/2009; 15/11/ 2011; 18/04/2012; 30/09/2013; 18/09/2014.

Per consentire un'agevole lettura, analisi, elaborazione e riorganizzazione dei dati raccolti, nell'immediato e in lunghi periodi è stato necessario, anche per l'ultima tratta analizzata, utilizzare supporti idonei anche per individuare eventuali dati anomali da eliminare dalle analisi in quanto causa di imprecisioni nei risultati e nei modelli. La presenza di dati anomali, dovuta essenzialmente ad errori accidentali, quale staratura delle strumentazioni o errori umani commessi nel prelevare o nel trasferire i dati, va evidenziata essenzialmente contemporaneamente alla fase di raccolta dati e creazione dei database.

Si riportano di seguito i risultati ottenuti osservando la variabilità dei parametri scartamento, sopraelevazione e sghembo a parità di elemento geometrico planimetrico omogeneo.

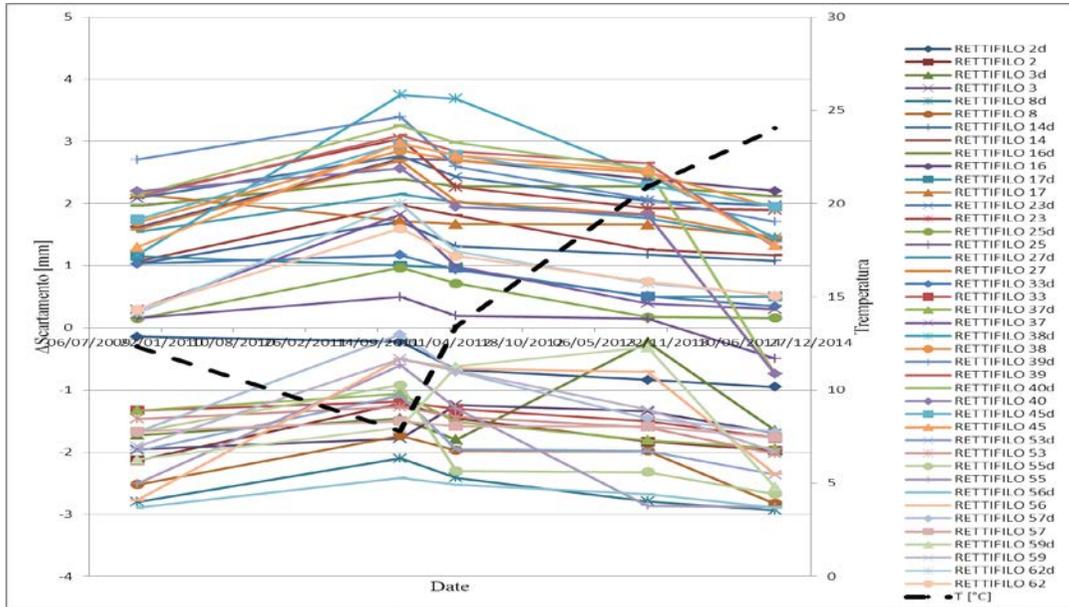


Figura 6.55: Andamento dei valori medi di scartamento in corrispondenza dei rettifici della linea Napoli – Baiano appartenenti al gruppo 1 rapportati alla temperatura ambientale.

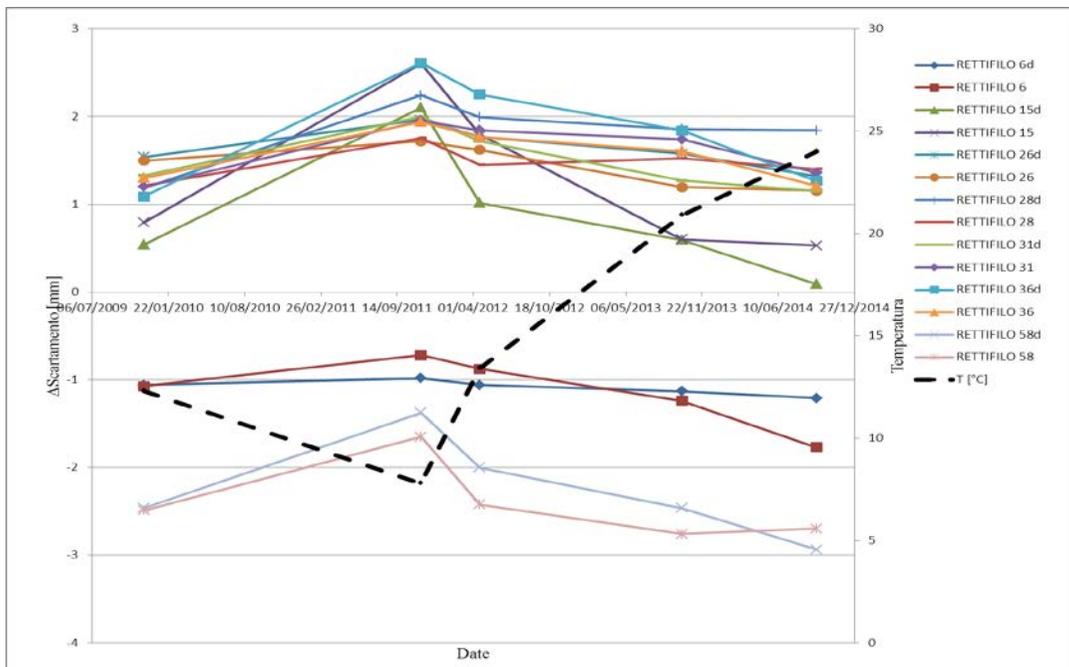


Figura 6.56: Andamento dei valori medi di scartamento in corrispondenza dei rettifici della linea Napoli – Baiano appartenenti al gruppo 2 rapportati alla temperatura ambientale.

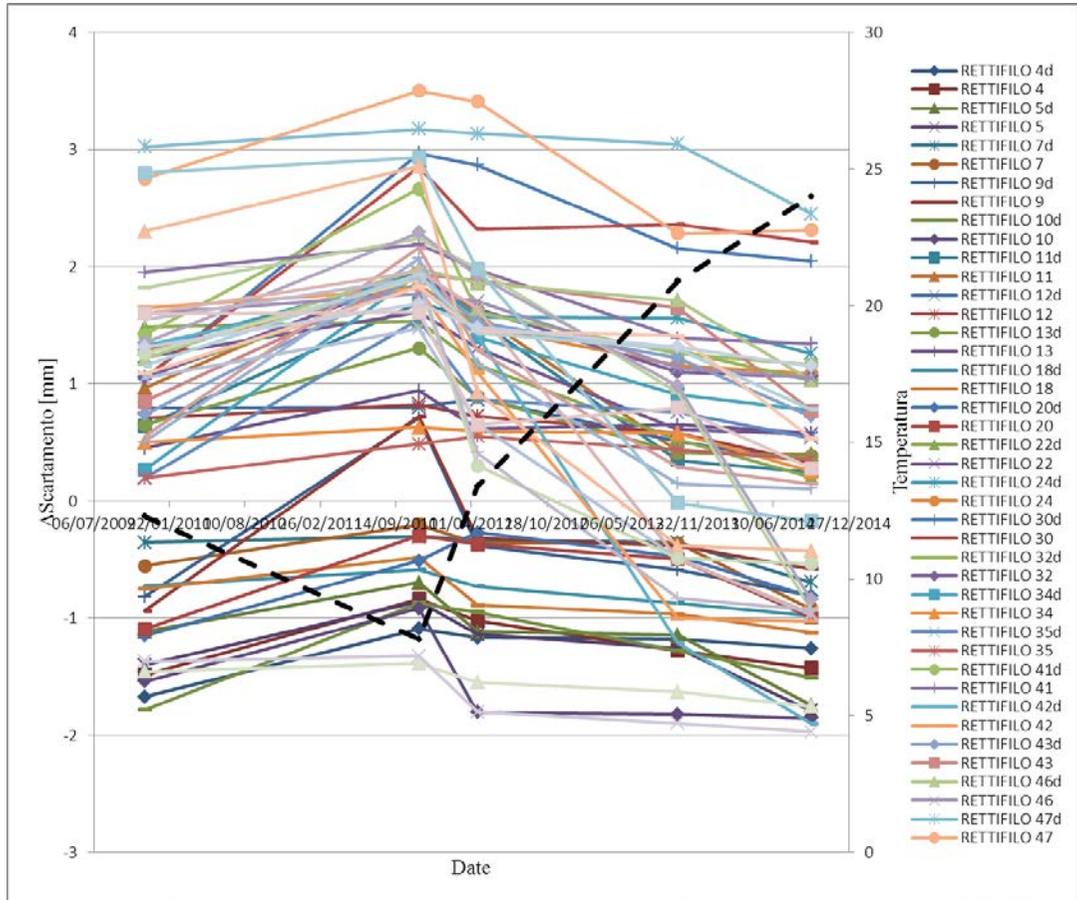


Figura 6.57: Andamento dei valori medi di scartamento in corrispondenza dei rettifici della linea Napoli – Baiano appartenenti al gruppo 3 rapportati alla temperatura ambientale.

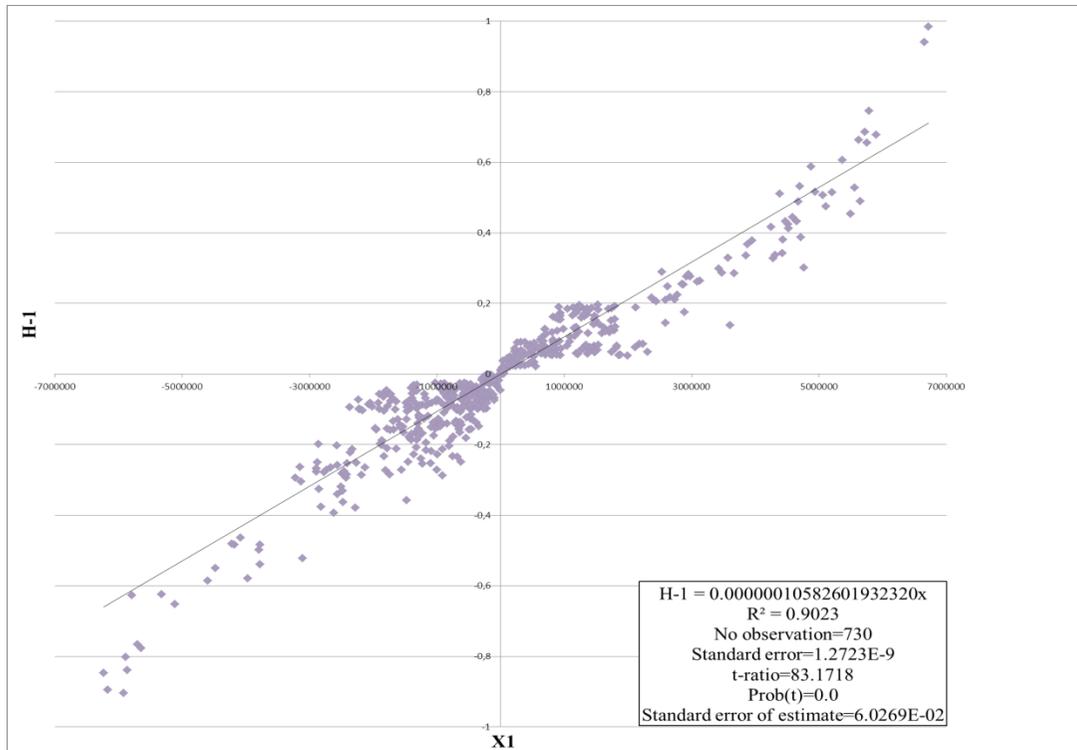


Figura 6.58: Grafico a dispersione e linea di tendenza della sopraelevazione normalizzata in funzione del parametro X_1 per le curve della linea Napoli – Baiano.

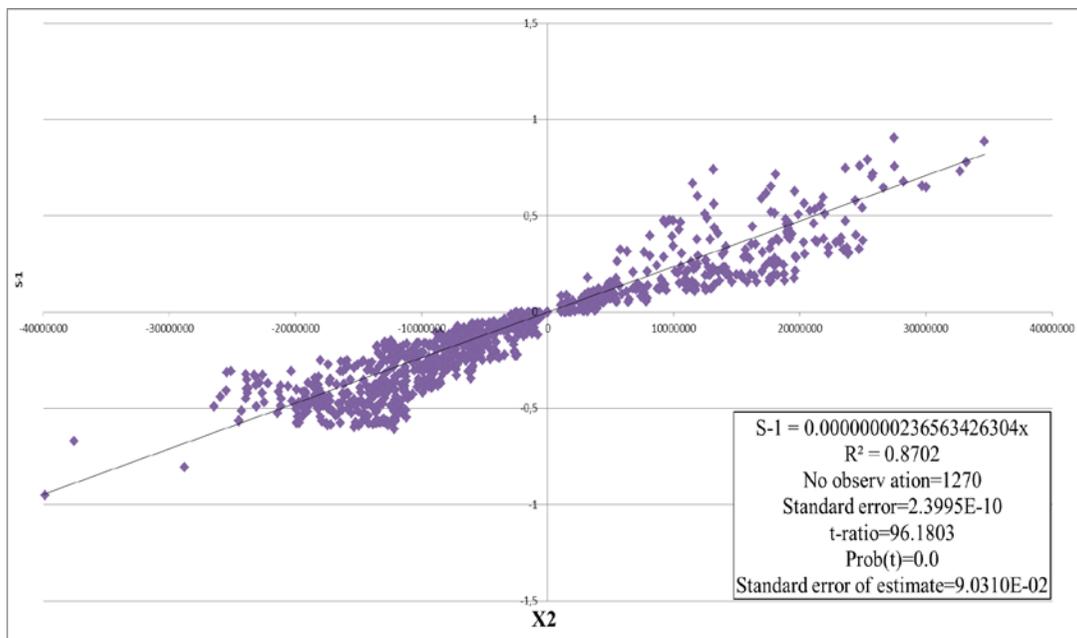


Figura 6.59: Grafico a dispersione e linea di tendenza dello sghembo normalizzata in funzione del parametro X_2 per le curve della linea Napoli – Baiano.

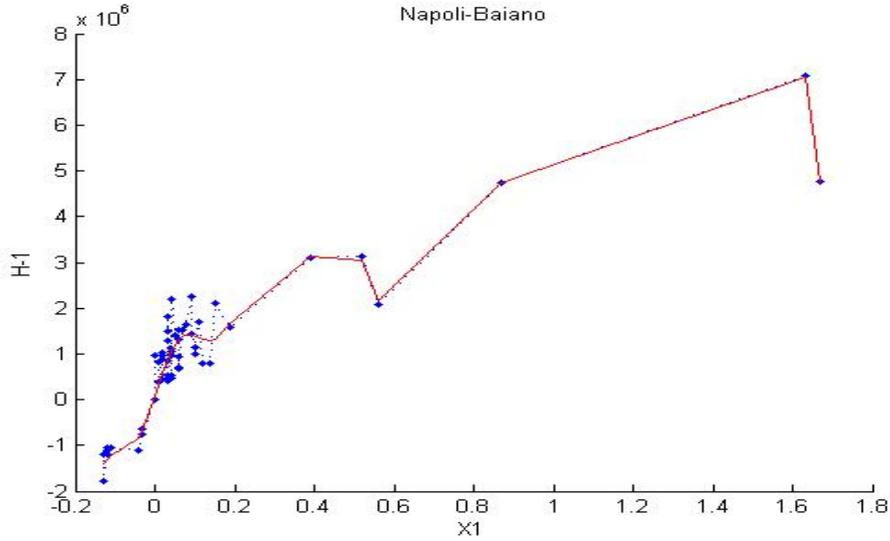


Figura 6.60: Andamento dei dati di sopraelevazione normalizzata in funzione del parametro di degrado x , relativi alla linea Napoli-Baiano, con funzione spline in rosso.

Dalla figura 7 si può notare come, a causa dell'autocorrelazione tra i dati, il parametro di smoothing λ troppo piccolo, fitta esattamente i dati. In tal caso si può procedere, impostando manualmente il valore di λ , in funzione dell'esperienza, oppure utilizzare il metodo della L-curve per selezionare il λ migliore.

Si riporta di seguito il risultato raggiunto variando il valore di λ manualmente.

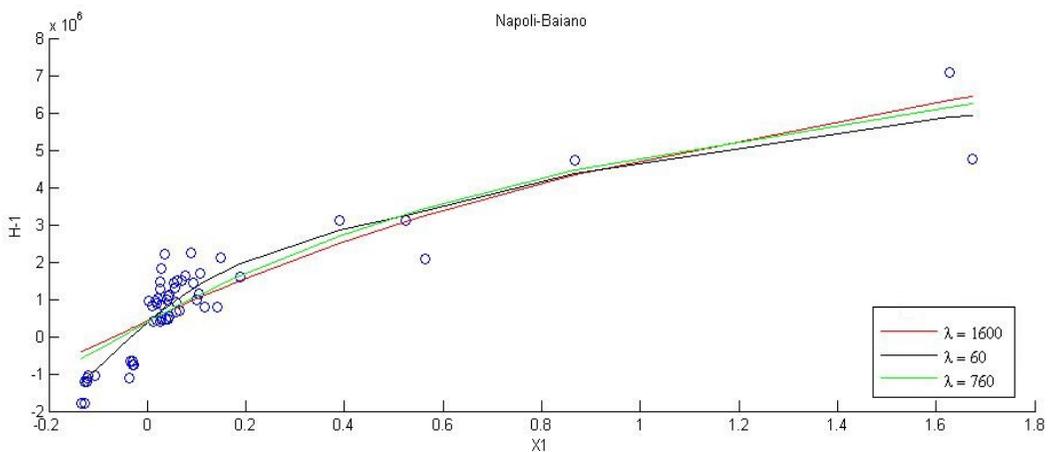


Figura 6.61: Andamento dei dati di sopraelevazione normalizzata in funzione del parametro di degrado x , relativi alla linea Napoli-Baiano, con diverse spline al variare del parametro λ .

Riscrivendo il codice come di seguito riportato, è possibile creare più spline relative ai dati medi dei parametri di difettosità monitorati in funzione del tempo.

I risultati ottenuti calibrando le catene di Markov sono riportati di seguito.

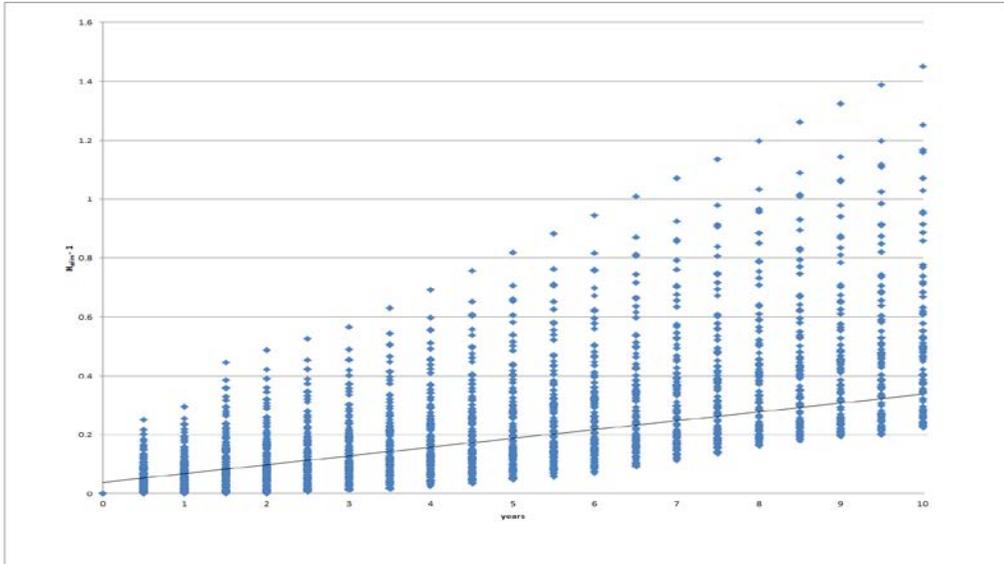


Figura 6.62: Modello di regressione ottenuto per le curve della linea Napoli – Baiano, usato per calibrare le catene di Markov.

Tabella 6.8: Tipica TPM ottenuta per le curve appartenenti al Gruppo 1 della linea Napoli – Sarno.

P				
0.799828	0.200172	0.000000	0.000000	0.000000
0.000000	0.759343	0.240657	0.000000	0.000000
0.000000	0.000000	0.671984	0.328016	0.000000
0.000000	0.000000	0.000000	0.530742	0.469258
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

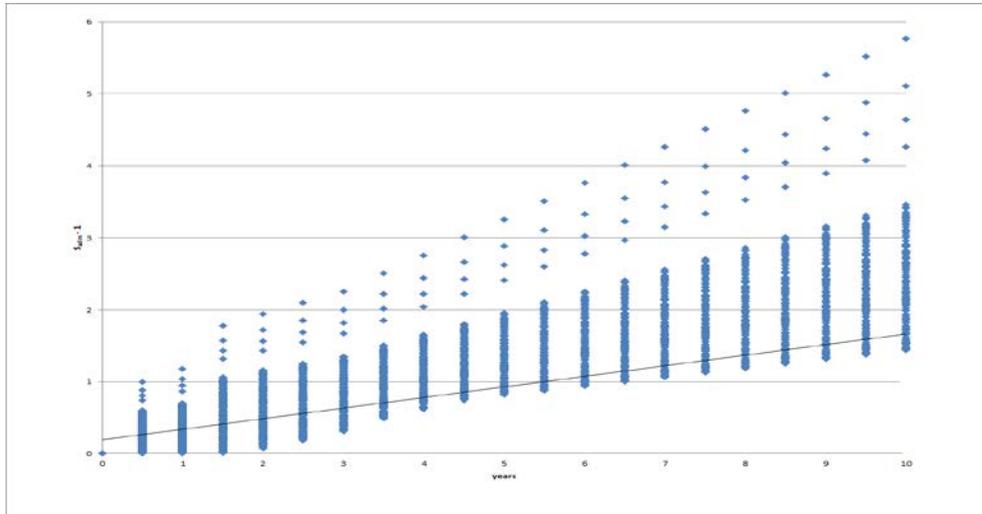


Figura 6.63: Modello di regressione ottenuto per le curve di transizione della linea Napoli – Baiano, usato per calibrare le catene di Markov.

Tabella 6.9: Tipica TPM ottenuta per le curve di transizione della linea Napoli – Baiano.

P				
0.863702	0.136298	0.000000	0.000000	0.000000
0.000000	0.825639	0.174361	0.000000	0.000000
0.000000	0.000000	0.732625	0.267375	0.000000
0.000000	0.000000	0.000000	0.618650	0.381350
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

Come per le altre linee anche in tal caso si è utilizzato un modello di regressione funzione potenza per l'analisi dei dati di sopraelevazione e sghembo normalizzati rispetto alla prima giornata di misura. I risultati ottenuti sono riportati di seguito.

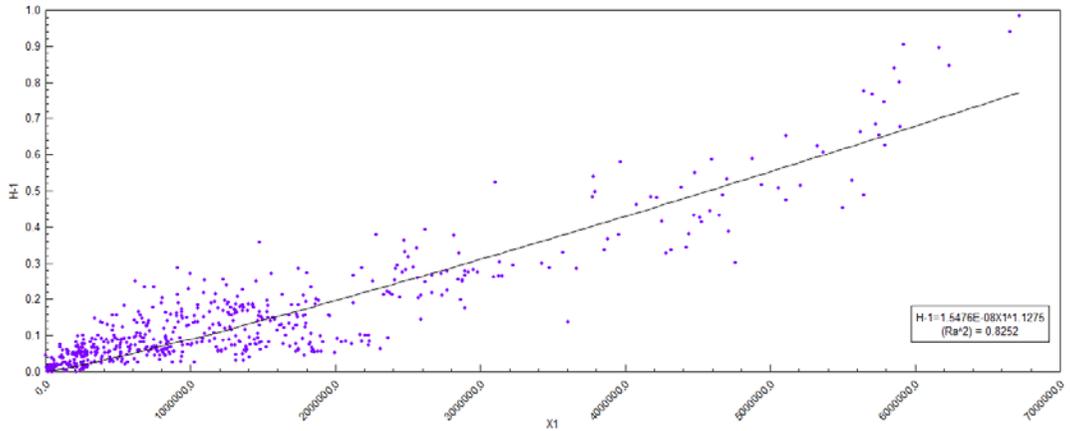


Figura 6.64: Modello di regressione di funzione di potenza ottenuto per i dati di sopraelevazione in funzione del parametro X1 per le curve della linea Napoli – Baiano.

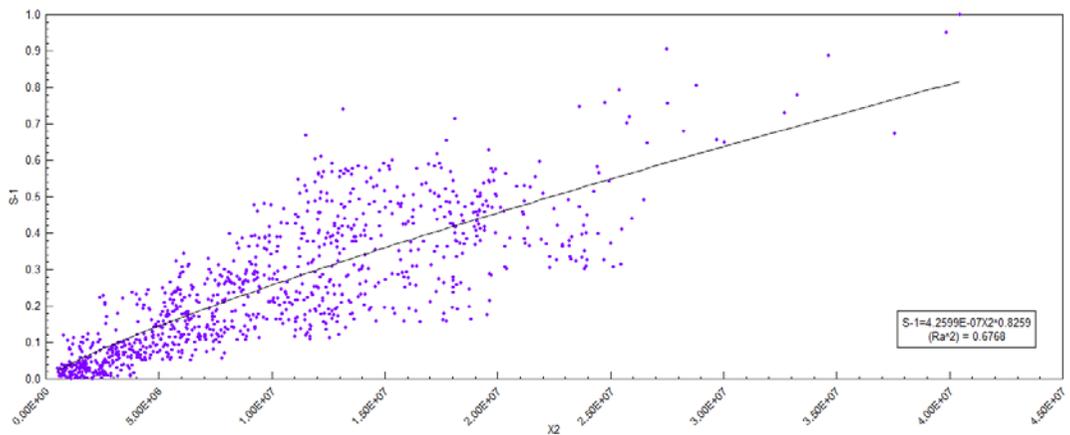


Figura 6.65: Modello di regressione di funzione di potenza ottenuto per i dati di sghebo in funzione del parametro X2 per le curve di transizione della linea Napoli - Sarno.

Per la tratta Napoli – Baiano, ai fini della validazione dei modelli ricavati e ai fini di generalizzare i risultati raggiunti, sono state effettuate delle indagini preliminari che potrebbero essere approfondite in indagini successive, basate sull'utilizzo delle Power Spectral Density Function per descrivere le difettosità del binario in termini di scartamento in corrispondenza dei rettifili e di sopraelevazione in curva. Se i modelli di regressione sono stati utili per osservare la variabilità dei parametri di difettosità in termini di valore medio, con le PSD è possibile osservarne la variabilità intorno al valore medio.

Queste irregolarità possono essere espresse in tramite spettri di densità spaziale o temporale.

Un'analisi preliminare è stata fatta su un gruppo di curve e di rettili della tratta Napoli – Baiano. Per i primi si è analizzato il difetto di scartamento, in corrispondenza delle curve il difetto si sopraelevazione.

La prima operazione effettuata è stata quella di generare le PSD utilizzando la trasformata di Fourier (FFT Fast Fourier Transform). Successivamente, è stata applicata la procedura di “smoothing” secondo la ISO 8608 validata per le rappresentazioni dei profili stradali.

Quando le funzioni PSD sono calcolate con larghezze di banda costante, la loro rappresentazione in un diagramma bilogaritmico evidenzia una accentuata fluttuazione, alle alte frequenze, determinata dalla reale distribuzione delle potenze e del rumore statistico. Sono queste le principali ragioni per cui la stessa ISO raccomanda di rappresentare le PSD di un profilo anche nella forma smussata, ottenuta quest'ultima calcolando la PSD media nelle seguenti bande d'ottava, individuata dagli estremi

-

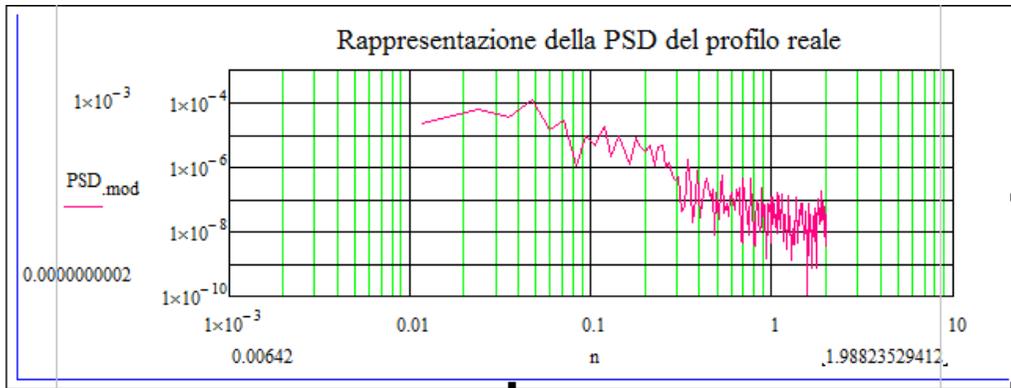


Figura 6.66: PSD rettifilo 2 anno 2009 Napoli – Baiano.

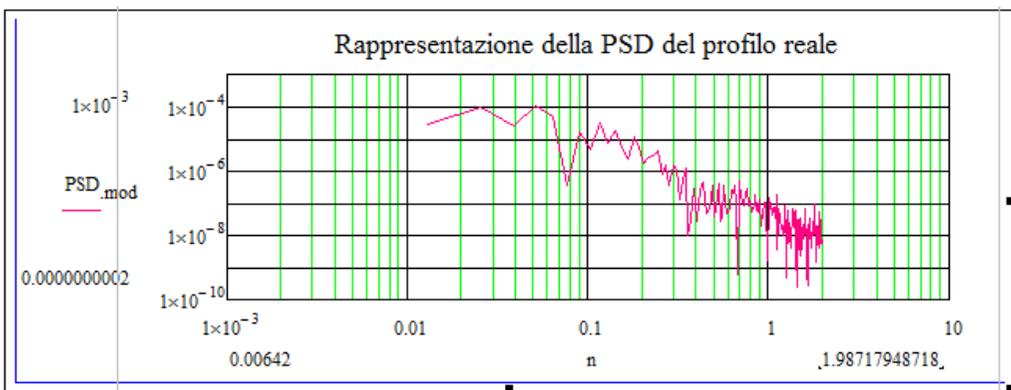


Figura 6.67: PSD rettifilo 2 anno 2012 Napoli – Baiano.

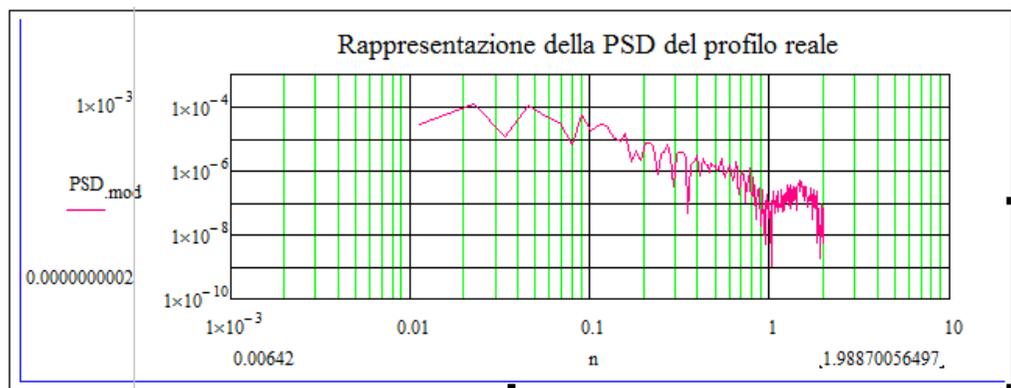


Figura 6.68: PSD rettifilo 2 anno 2014 Napoli – Baiano.

Tabella 6.10: Densità spettrale di potenza – Smoothed.

Psd Smoothed lineare

a=-16.774535

a=-16.756423

a=-15.160442

b=-1.406286 R ² =0.912253		b=-1.518361 R ² =0.904019		b=-1.199058 R ² =0.863263	
N	2009	N	2012	N	2014
0.011799	3.82E-05	0.012862	3.92E-05	0.011331	5.61E-05
0.023599	5.56E-05	0.025723	1.37E-05	0.022663	2.44E-05
0.035398	9.3E-05	0.038585	7.40E-06	0.033994	1.50E-05
0.047198	1.88E-05	0.051447	4.78E-06	0.045326	1.06E-05
0.058997	1.05E-05	0.064309	3.41E-06	0.056657	8.14E-06
0.070796	6.95E-06	0.07717	2.58E-06	0.067989	6.54E-06
0.082596	1.00E-05	0.090032	2.04E-06	0.07932	5.44E-06
0.094395	4.37E-06	0.102894	1.67E-06	0.090652	4.64E-06
0.106195	4.19E-06	0.115756	1.40E-06	0.101983	4.02E-06
0.117994	2.37E-06	0.128617	1.19E-06	0.113314	3.55E-06
0.129794	8.13E-07	0.141479	1.03E-06	0.124646	3.16E-06
0.141593	8.13E-07	0.154341	9.02E-07	0.135977	2.85E-06
0.153392	2.01E-07	0.167203	7.98E-07	0.147309	2.59E-06
0.165192	6.44E-07	0.180064	7.13E-07	0.15864	2.37E-06
0.176991	6.44E-07	0.192926	6.42E-07	0.169972	2.18E-06
0.188791	1.38E-07	0.205788	5.82E-07	0.181303	2.02E-06
0.20059	3.62E-07	0.21865	5.31E-07	0.192635	1.88E-06
0.212389	2.08E-07	0.231511	4.87E-07	0.203966	1.75E-06
0.224189	3.04E-07	0.244373	4.49E-07	0.215297	1.64E-06
0.235988	1.22E-07	0.257235	4.15E-07	0.226629	1.55E-06
0.247788	9.13E-08	0.270096	3.85E-07	0.23796	1.46E-06
0.259587	3.04E-07	0.282958	3.59E-07	0.249292	1.38E-06
0.271386	5.41E-08	0.29582	3.36E-07	0.260623	1.31E-06
0.283186	1.15E-07	0.308682	3.15E-07	0.271955	1.24E-06
0.294985	1.17E-07	0.321543	2.96E-07	0.283286	1.18E-06
0.306785	9.43E-08	0.334405	2.79E-07	0.294618	1.13E-06
0.318584	1.92E-07	0.347267	2.63E-07	0.305949	1.08E-06
0.330383	1.72E-07	0.360129	2.49E-07	0.31728	1.03E-06
0.342183	4.44E-08	0.37299	2.36E-07	0.328612	9.90E-07
0.353982	4.76E-08	0.385852	2.24E-07	0.339943	9.50E-07
0.365782	7.71E-08	0.398714	2.13E-07	0.351275	9.14E-07
0.377581	4.29E-08	0.411576	2.03E-07	0.362606	8.79E-07
0.389381	6.47E-08	0.424437	1.94E-07	0.373938	8.48E-07
0.40118	7.45E-08	0.437299	1.85E-07	0.385269	8.18E-07
0.412979	6.70E-08	0.450161	1.78E-07	0.396601	7.90E-07

0.424779	1.40E-08	0.463023	1.70E-07	0.407932	7.64E-07
0.436578	3.17E-08	0.475884	1.63E-07	0.419263	7.39E-07
0.448378	3.84E-08	0.488746	1.57E-07	0.430595	7.16E-07
0.460177	3.31E-08	0.501608	1.51E-07	0.441926	6.94E-07
0.471976	2.81E-08	0.514469	1.45E-07	0.453258	6.73E-07
0.483776	2.19E-08	0.527331	1.40E-07	0.464589	6.53E-07
0.495575	1.75E-08	0.540193	1.35E-07	0.475921	6.35E-07
0.507375	3.76E-08	0.553055	1.30E-07	0.487252	6.17E-07
0.519174	5.49E-08	0.565916	1.25E-07	0.498584	6.00E-07

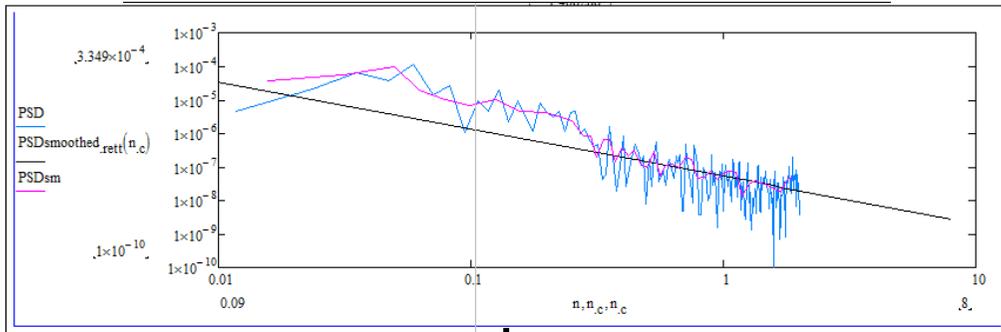


Figura 6.69: PSD - smoothed rettifilo 2 anno 2009 Napoli – Baiano.

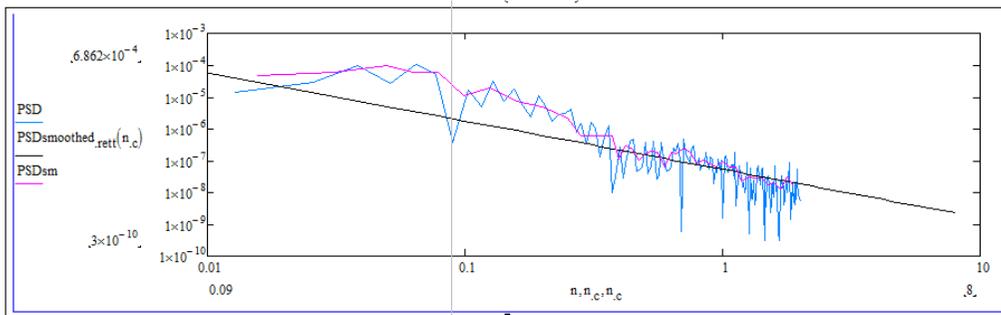


Figura 6.70: PSD - smoothed rettifilo 2 anno 2012 Napoli – Baiano.

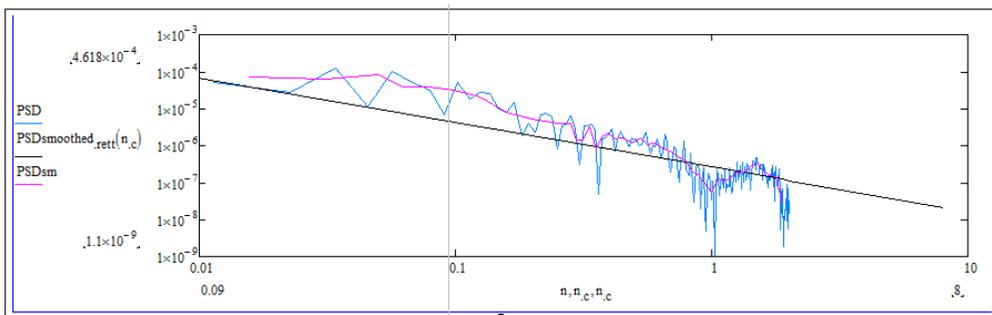
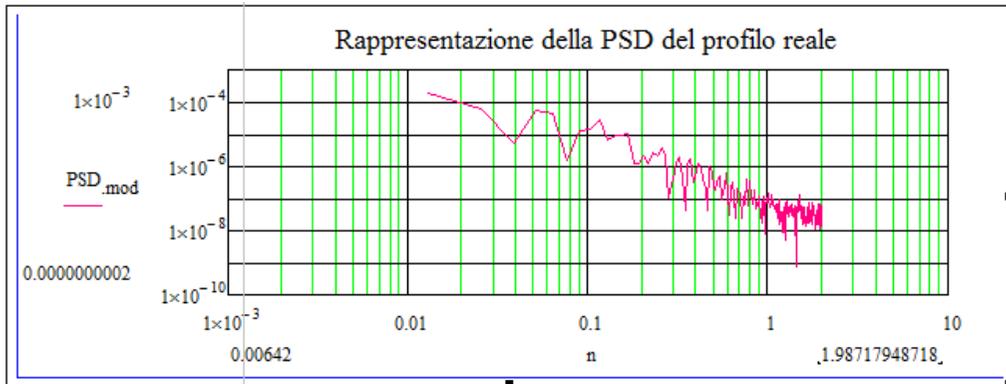
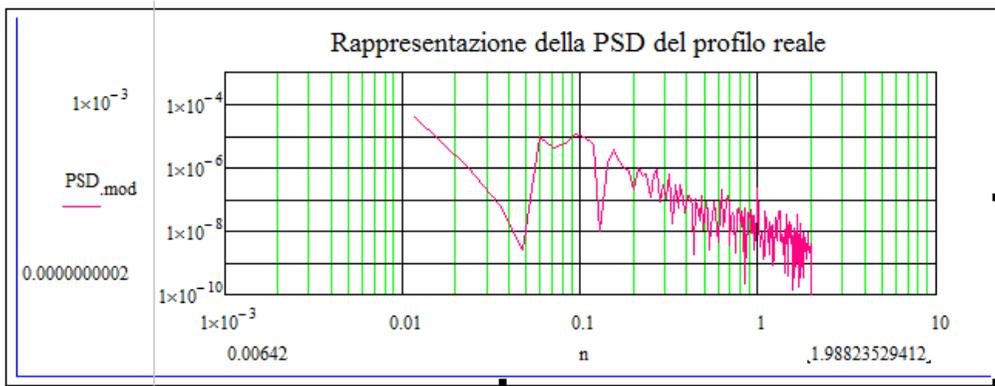


Figura 6.71: PSD - smoothed rettifilo 2 anno 2014 Napoli – Baiano.

Tabella 6.11: Coefficiente di correlazione



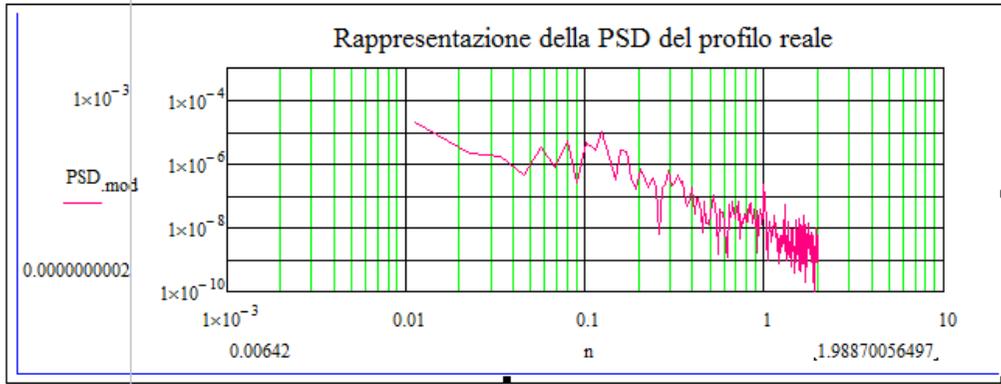


Figura 6.74: PSD rettifilo 2 anno 2014 Baiano – Napoli.

Tabella 6.12: Densità spettrale di potenza – Smoothed.

Psd Smoothed lineare					
	a=-17.778533		a=-16.31674		a=-18.025551
	b=-1.245134		b=-1.417304		b=-1.250519
	R ² =0.781265		R ² =0.912842		R ² =0.807989
N	2009	N	2012	N	2014
0.011799	4.78E-06	0.012862	3.92E-05	0.011331	4.02E-06
0.023599	2.02E-06	0.025723	1.47E-05	0.022663	1.69E-06
0.035398	1.22E-06	0.038585	8.26E-06	0.033994	1.02E-06
0.047198	8.51E-07	0.051447	5.50E-06	0.045326	7.11E-07
0.058997	6.45E-07	0.064309	4.01E-06	0.056657	5.38E-07
0.070796	5.14E-07	0.07717	3.09E-06	0.067989	4.28E-07
0.082596	4.24E-07	0.090032	2.49E-06	0.07932	3.53E-07
0.094395	3.59E-07	0.102894	2.06E-06	0.090652	2.99E-07
0.106195	3.10E-07	0.115756	1.74E-06	0.101983	2.58E-07
0.117994	2.72E-07	0.128617	1.50E-06	0.113314	2.26E-07
0.129794	2.42E-07	0.141479	1.31E-06	0.124646	2.01E-07
0.141593	2.17E-07	0.154341	1.16E-06	0.135977	1.80E-07
0.153392	1.96E-07	0.167203	1.03E-06	0.147309	1.63E-07
0.165192	1.79E-07	0.180064	9.31E-07	0.15864	1.48E-07
0.176991	1.64E-07	0.192926	8.44E-07	0.169972	1.36E-07
0.188791	1.52E-07	0.205788	7.71E-07	0.181303	1.26E-07
0.20059	1.41E-07	0.21865	7.07E-07	0.192635	1.16E-07
0.212389	1.31E-07	0.231511	6.52E-07	0.203966	1.08E-07
0.224189	1.22E-07	0.244373	6.04E-07	0.215297	1.01E-07

0.235988	1.15E-07	0.257235	5.62E-07	0.226629	9.50E-08
0.247788	1.08E-07	0.270096	5.24E-07	0.23796	8.94E-08
0.259587	1.02E-07	0.282958	4.91E-07	0.249292	8.43E-08
0.271386	9.64E-08	0.29582	4.61E-07	0.260623	7.98E-08
0.283186	9.14E-08	0.308682	4.34E-07	0.271955	7.56E-08
0.294985	8.69E-08	0.321543	4.09E-07	0.283286	7.19E-08
0.306785	8.28E-08	0.334405	3.87E-07	0.294618	6.84E-08
0.318584	7.90E-08	0.347267	3.67E-07	0.305949	6.53E-08
0.330383	7.55E-08	0.360129	3.49E-07	0.31728	6.24E-08
0.342183	7.22E-08	0.37299	3.32E-07	0.328612	5.97E-08
0.353982	6.93E-08	0.385852	3.16E-07	0.339943	5.72E-08
0.365782	6.65E-08	0.398714	3.02E-07	0.351275	5.49E-08
0.377581	6.39E-08	0.411576	2.89E-07	0.362606	5.28E-08
0.389381	6.15E-08	0.424437	2.76E-07	0.373938	5.08E-08
0.40118	5.93E-08	0.437299	2.65E-07	0.385269	4.89E-08
0.412979	5.72E-08	0.450161	2.54E-07	0.396601	4.72E-08
0.424779	5.52E-08	0.463023	2.44E-07	0.407932	4.56E-08
0.436578	5.33E-08	0.475884	2.35E-07	0.419263	4.40E-08
0.448378	5.16E-08	0.488746	2.26E-07	0.430595	4.26E-08
0.460177	5.00E-08	0.501608	2.18E-07	0.441926	4.12E-08
0.471976	4.84E-08	0.514469	2.10E-07	0.453258	3.99E-08
0.483776	4.69E-08	0.527331	2.03E-07	0.464589	3.87E-08
0.495575	4.56E-08	0.540193	1.96E-07	0.475921	3.76E-08
0.507375	4.42E-08	0.553055	1.90E-07	0.487252	3.65E-08
0.519174	4.30E-08	0.565916	1.84E-07	0.498584	3.54E-08

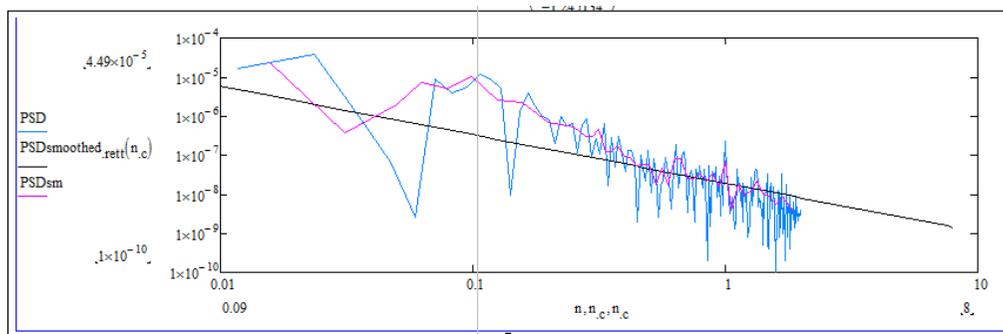


Figura 6.75: PSD - smoothed rettilo 2 anno 2014 Baiano – Napoli.

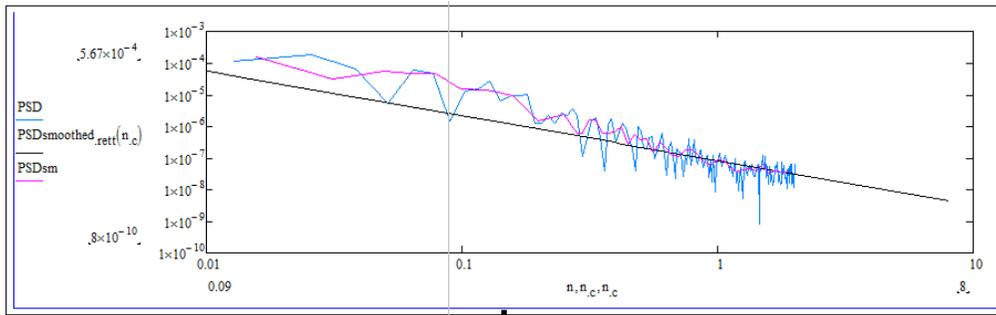


Figura 6.76: PSD - smoothed rettifilo 2 anno 2014 Baiano – Napoli.

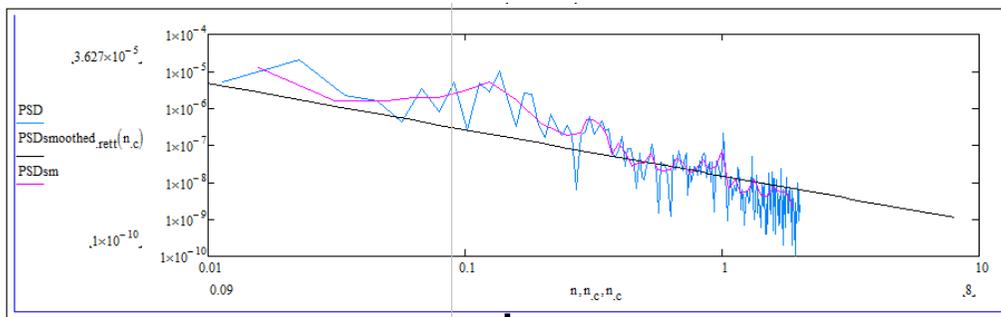


Figura 6.77: PSD - smoothed rettifilo 2 anno 2014 Baiano – Napoli.

Tabella 6.13: Coefficiente di correlazione

- Curva 54 (2009 2012 2014) Dispari

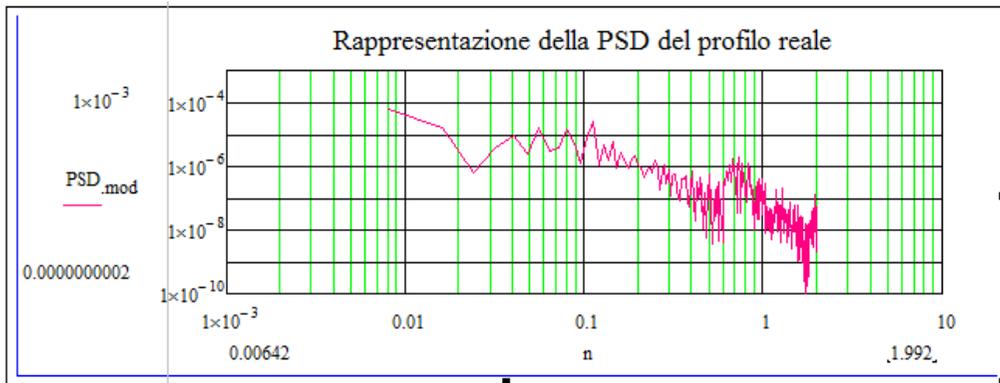


Figura 6.78: PSD curva 54 anno 2009 Napoli Baiano.

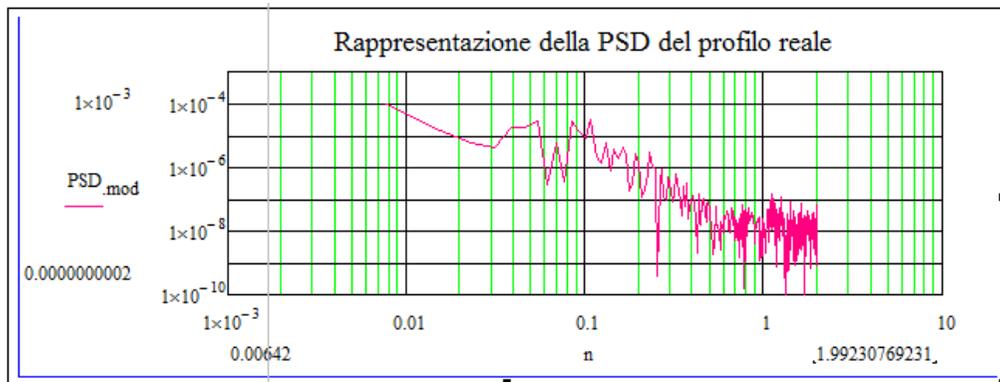


Figura 6.79: PSD curva 54 anno 2012 Napoli Baiano.

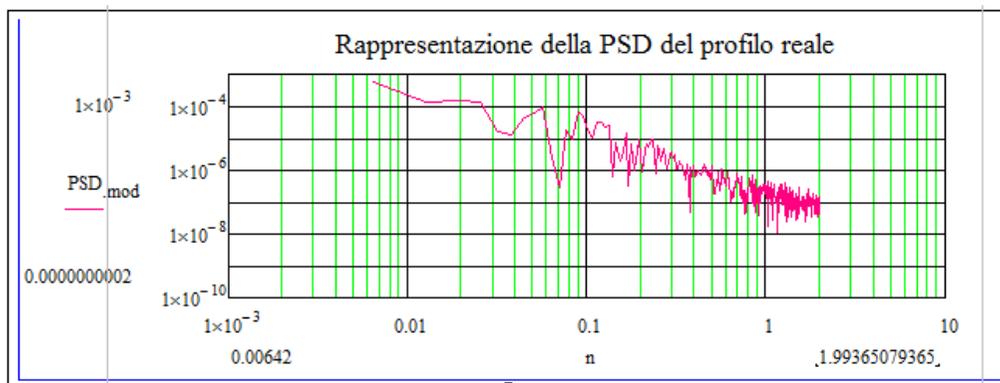


Figura 6.80: PSD curva 54 anno 2014 Napoli Baiano.

Tabella 6.14: Densità spettrale di potenza – Smoothed.

Psd Smoothed lineare					
a=-16.588402 b=0.854443 R^2=0.464419		a=-17.887549 b=-1.292142 R^2=0.715733		a=15.745425 b=-1.259692 R^2=0.799003	
n	2009	N	2012	n	2014
0.004004	6.9868E-06	0.00385	2.25E-05	0.003177	0.000203
0.008008	3.8643E-06	0.0077	9.17E-06	0.006354	8.5E-05
0.012012	2.7328E-06	0.01155	5.43E-06	0.009531	5.1E-05
0.016016	2.1372E-06	0.015399	3.75E-06	0.012708	3.55E-05
0.02002	1.7662E-06	0.019249	2.81E-06	0.015886	2.68E-05
0.024024	1.5115E-06	0.023099	2.22E-06	0.019063	2.13E-05
0.028028	1.3249E-06	0.026949	1.82E-06	0.02224	1.75E-05
0.032032	1.1821E-06	0.030799	1.53E-06	0.025417	1.48E-05
0.036036	1.0689E-06	0.034649	1.31E-06	0.028594	1.28E-05
0.04004	9.769E-07	0.038499	1.15E-06	0.031771	1.12E-05
0.044044	9.0057E-07	0.042348	1.01E-06	0.034948	9.92E-06
0.048048	0.000000836	0.046198	9.06E-07	0.038125	8.89E-06
0.052052	7.807E-07	0.050048	8.17E-07	0.041303	8.04E-06
0.056056	7.328E-07	0.053898	7.42E-07	0.04448	7.32E-06
0.06006	6.908E-07	0.057748	6.79E-07	0.047657	6.71E-06
0.064064	6.538E-07	0.061598	6.25E-07	0.050834	6.19E-06
0.068068	6.208E-07	0.065448	5.78E-07	0.054011	5.73E-06
0.072072	5.912E-07	0.069297	5.36E-07	0.057188	5.34E-06
0.076076	5.645E-07	0.073147	5E-07	0.060365	4.99E-06
0.08008	5.403E-07	0.076997	4.68E-07	0.063542	4.67E-06
0.084084	5.182E-07	0.080847	4.4E-07	0.06672	4.39E-06
0.088088	0.000000498	0.084697	4.14E-07	0.069897	4.14E-06
0.092092	4.795E-07	0.088547	3.91E-07	0.073074	3.92E-06
0.096096	4.623E-07	0.092397	3.7E-07	0.076251	3.71E-06
0.1001	4.465E-07	0.096246	3.51E-07	0.079428	3.53E-06
0.104104	4.318E-07	0.100096	3.34E-07	0.082605	3.36E-06
0.108108	4.181E-07	0.103946	3.18E-07	0.085782	3.2E-06
0.112112	4.053E-07	0.107796	3.03E-07	0.088959	3.06E-06
0.116116	3.933E-07	0.111646	2.9E-07	0.092137	2.93E-06
0.12012	3.821E-07	0.115496	2.77E-07	0.095314	2.8E-06
0.124124	3.715E-07	0.119346	2.66E-07	0.098491	2.69E-06
0.128128	3.616E-07	0.123195	2.55E-07	0.101668	2.59E-06
0.132132	3.522E-07	0.127045	2.45E-07	0.104845	2.49E-06

0.136136	3.433E-07	0.130895	2.36E-07	0.108022	2.4E-06
0.14014	3.349E-07	0.134745	2.27E-07	0.111199	2.31E-06
0.144144	0.000000327	0.138595	2.19E-07	0.114376	2.23E-06
0.148148	3.194E-07	0.142445	2.11E-07	0.117554	2.15E-06
0.152152	3.122E-07	0.146295	2.04E-07	0.120731	2.08E-06
0.156156	3.054E-07	0.150144	1.98E-07	0.123908	2.02E-06
0.16016	2.988E-07	0.153994	1.91E-07	0.127085	1.95E-06
0.164164	2.926E-07	0.157844	1.85E-07	0.130262	1.89E-06
0.168168	2.866E-07	0.161694	1.8E-07	0.133439	1.84E-06
0.172172	2.809E-07	0.165544	1.74E-07	0.136616	1.78E-06
0.176176	2.755E-07	0.169394	1.69E-07	0.139793	1.73E-06
0.18018	2.702E-07	0.173244	1.64E-07	0.142971	1.68E-06
0.184184	2.652E-07	0.177093	1.6E-07	0.146148	1.64E-06

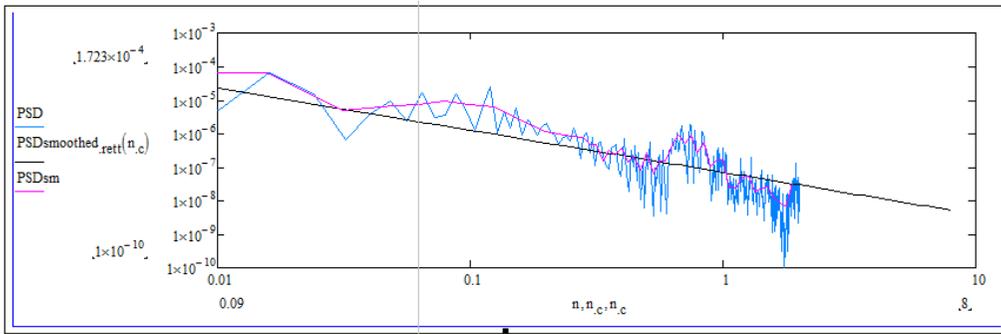


Figura 6.81: PSD smoothed curva 54 anno 2009 Napoli Baiano.

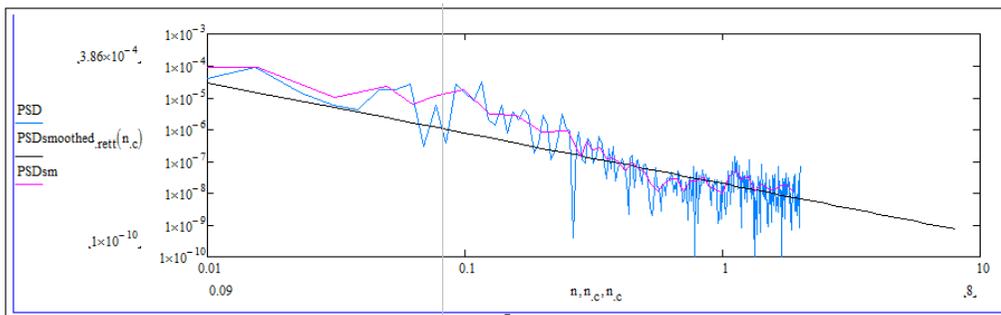


Figura 6.82: PSD smoothed curva 54 anno 2012 Napoli Baiano.

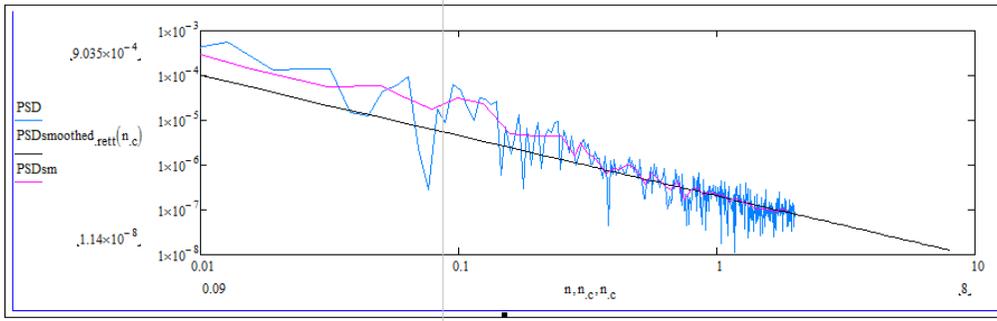
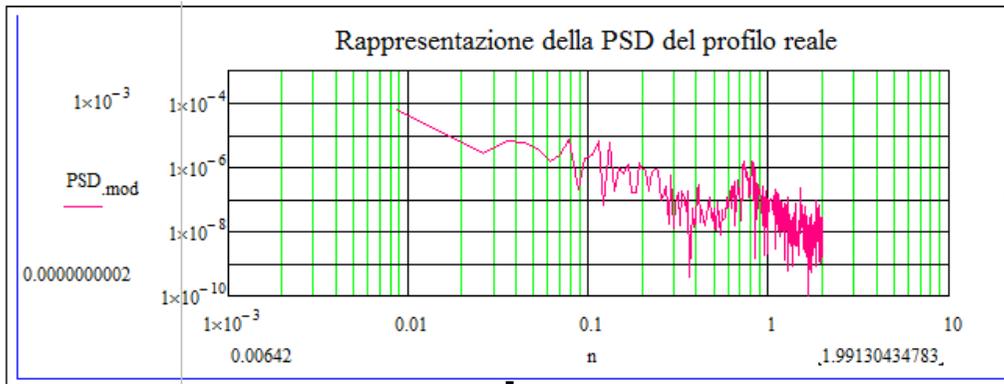


Figura 6.83: PSD smoothed curva 54 anno 2014 Napoli Baiano.

Tabella 6.15: Coefficiente di correlazione



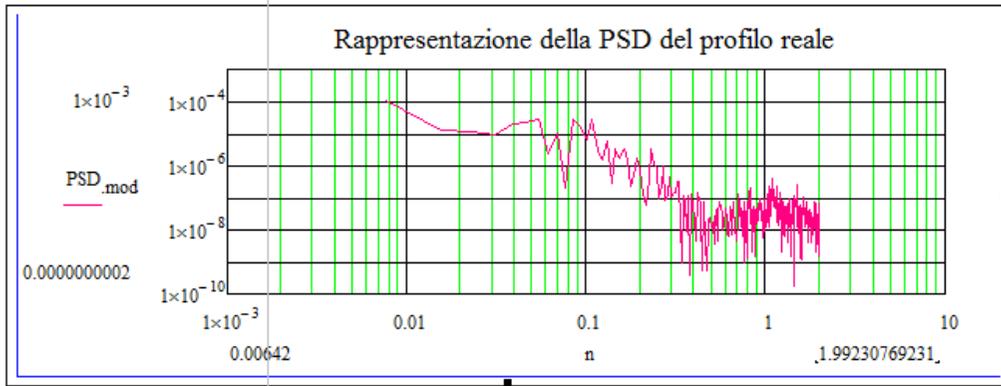


Figura 6.85: PSD curva 54 anno 2012 Baiano – Napoli.

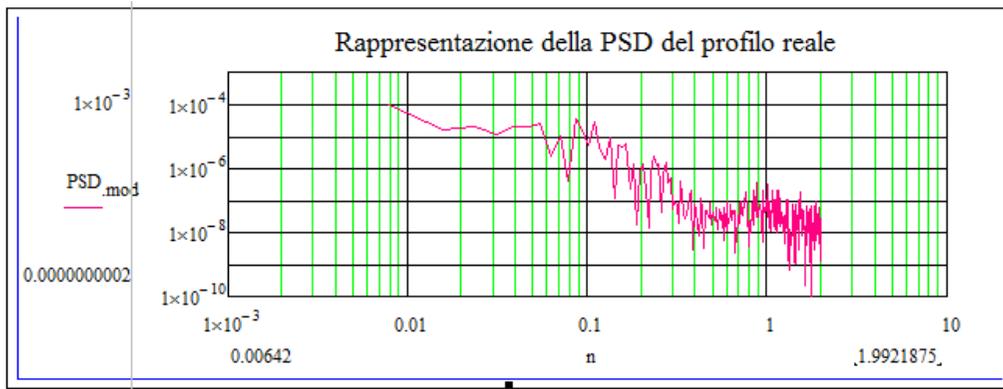


Figura 6.86: PSD curva 54 anno 2014 Baiano – Napoli.

Tabella 6.16: Densità spettrale di potenza –Smoothed.

Psd Smoothed lineare					
a=-16.88912		a=-17.271909		a=-17.263802	
b=-0.916362		b=-1.204349		b=-1.27607	
R^2=0.604064		R^2=0.728812		R^2=0.746309	
N	2009	n	2012	n	2014
0.004353	6.74E-06	0.00385	2.55E-05	0.00391	3.76E-05
0.008705	3.57E-06	0.0077	1.11E-05	0.00782	1.55E-05
0.013058	2.46E-06	0.01155	6.8E-06	0.01173	9.25E-06
0.01741	1.89E-06	0.015399	4.81E-06	0.01564	6.41E-06
0.021763	1.54E-06	0.019249	3.67E-06	0.01955	4.82E-06
0.026115	1.31E-06	0.023099	2.95E-06	0.02346	3.82E-06
0.030468	1.13E-06	0.026949	2.45E-06	0.02737	3.14E-06
0.03482	1E-06	0.030799	2.09E-06	0.031281	2.65E-06
0.039173	9.01E-07	0.034649	1.81E-06	0.035191	2.28E-06

0.043526	8.18E-07	0.038499	1.59E-06	0.039101	1.99E-06
0.047878	7.49E-07	0.042348	1.42E-06	0.043011	1.76E-06
0.052231	6.92E-07	0.046198	1.28E-06	0.046921	1.58E-06
0.056583	6.43E-07	0.050048	1.16E-06	0.050831	1.42E-06
0.060936	6.01E-07	0.053898	1.06E-06	0.054741	1.3E-06
0.065288	5.64E-07	0.057748	9.78E-07	0.058651	1.19E-06
0.069641	5.32E-07	0.061598	9.05E-07	0.062561	1.09E-06
0.073993	5.03E-07	0.065448	8.41E-07	0.066471	1.01E-06
0.078346	4.77E-07	0.069297	7.85E-07	0.070381	9.4E-07
0.082699	4.54E-07	0.073147	7.36E-07	0.074291	8.77E-07
0.087051	4.33E-07	0.076997	6.92E-07	0.078201	8.22E-07
0.091404	4.14E-07	0.080847	6.52E-07	0.082111	7.72E-07
0.095756	3.97E-07	0.084697	6.17E-07	0.086022	7.28E-07
0.100109	3.81E-07	0.088547	5.85E-07	0.089932	6.88E-07
0.104461	3.67E-07	0.092397	5.55E-07	0.093842	6.51E-07
0.108814	3.53E-07	0.096246	5.29E-07	0.097752	6.18E-07
0.113166	3.41E-07	0.100096	5.04E-07	0.101662	5.88E-07
0.117519	3.29E-07	0.103946	4.82E-07	0.105572	5.6E-07
0.121872	3.18E-07	0.107796	4.61E-07	0.109482	5.35E-07
0.126224	3.08E-07	0.111646	4.42E-07	0.113392	5.12E-07
0.130577	2.99E-07	0.115496	4.25E-07	0.117302	4.9E-07
0.134929	2.9E-07	0.119346	4.08E-07	0.121212	4.7E-07
0.139282	2.82E-07	0.123195	3.93E-07	0.125122	4.51E-07
0.143634	2.74E-07	0.127045	3.79E-07	0.129032	4.34E-07
0.147987	2.66E-07	0.130895	3.65E-07	0.132942	4.18E-07
0.152339	2.59E-07	0.134745	3.53E-07	0.136852	4.02E-07
0.156692	2.53E-07	0.138595	3.41E-07	0.140762	3.88E-07
0.161045	2.47E-07	0.142445	3.3E-07	0.144673	3.75E-07
0.165397	2.41E-07	0.146295	3.19E-07	0.148583	3.62E-07
0.16975	2.35E-07	0.150144	3.1E-07	0.152493	3.51E-07
0.174102	2.3E-07	0.153994	3E-07	0.156403	3.39E-07
0.178455	2.24E-07	0.157844	2.91E-07	0.160313	3.29E-07
0.182807	2.2E-07	0.161694	2.83E-07	0.164223	3.19E-07
0.18716	2.15E-07	0.165544	2.75E-07	0.168133	3.09E-07
0.191513	2.1E-07	0.169394	2.68E-07	0.172043	3.01E-07
0.195865	2.06E-07	0.173244	2.61E-07	0.175953	2.92E-07
0.200218	2.02E-07	0.177093	2.54E-07	0.179863	2.84E-07

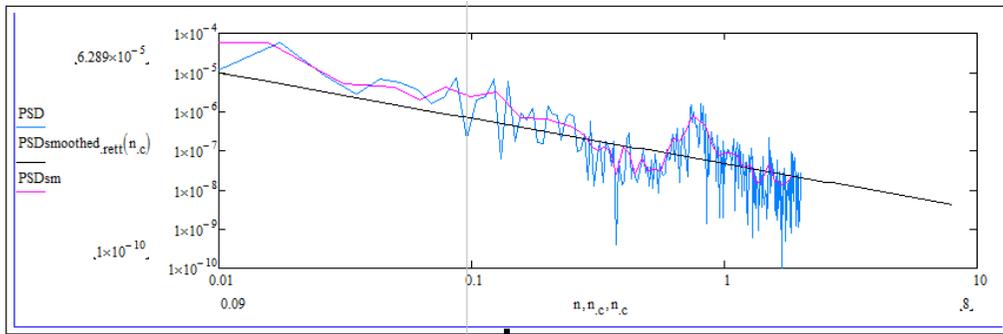


Figura 6.87: PSD smoothed curva 54 anno 2009 Baiano - Napoli.

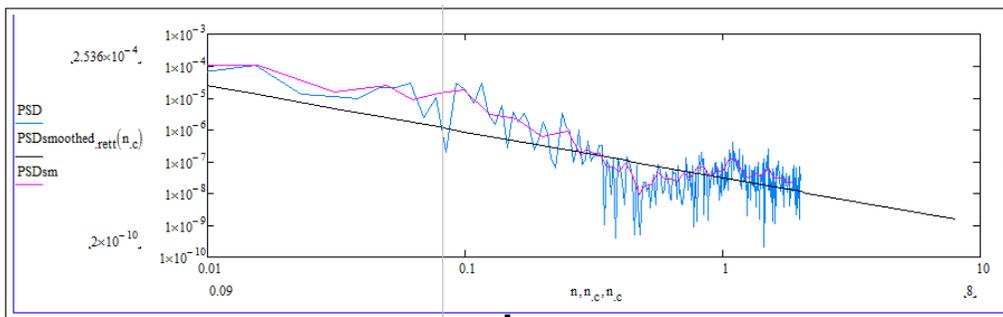


Figura 6.88: PSD smoothed curva 54 anno 2012 Baiano - Napoli.

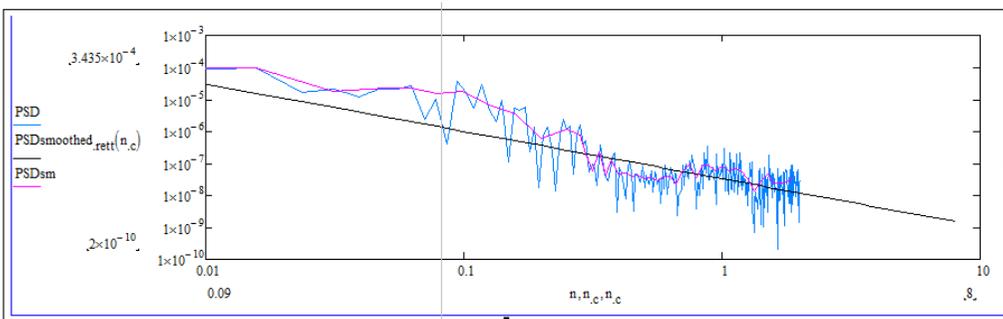


Figura 6.89: PSD smoothed curva 54 anno 2014 Baiano - Napoli.

Tabella 6.17: Coefficiente di correlazione

7 Estensione dei risultati all'intera rete

I dati monitorati sulle linee della ex Circumvesuviana con il dispositivo ad elevato rendimento della Plasser, sono stati elaborati statisticamente al fine di ottenere un valore caratteristico dei singoli parametri di difettosità per ciascun elemento caratterizzante la geometria della linea ferroviaria esaminata.

I valori dei parametri oggetto di studio, rilevati ogni 25 cm, sono stati elaborati in termini di valori medi giornalieri e deviazioni standard associate a ciascun elemento geometrico omogeneo (rettifili, curve, curve di transizione).

Questa scelta è stata effettuata in quanto si è osservata una variabilità dei dati meno evidente in corrispondenza degli elementi a curvatura costante.

Il parametro di difettosità rappresentativo dell'elemento a curvatura costante è stato scelto sulla base di considerazioni ingegneristiche. Nello specifico è stato analizzato lo scartamento in corrispondenza dei rettifili, la sopraelevazione in corrispondenza delle curve e lo sghembo in corrispondenza delle curve di transizione.

A partire da tali valori ottenuti elaborando dati rilevati in periodi diversi, si è osservata la variabilità nel tempo di ciascun parametro in funzione delle caratteristiche geometriche della linea, della velocità di viaggio e del carico espresso in termini di traffico cumulato.

Ai dati si è deciso di applicare le funzioni di smoothing P-spline con parametro λ di penalizzazione, procedendo con la creazione di una spline per ciascun elemento geometrico omogeneo. In tal modo è possibile ottenere valori delle grandezze in esame non osservati ma intervallati regolarmente nel tempo; basta osservare il coefficiente delle P-spline in corrispondenza dei nodi imposti. I nuovi valori dei parametri di difettosità possono essere utilizzati per costruire catene di Markov ed ottenere, così, modelli previsionali di degrado basati sui dati di difettosità che si sarebbero registrati con monitoraggi effettuati in intervalli di tempo regolari.

I modelli ricavati per ciascuna linea delle 4 linee della ex Circumvesuviana esaminate, riassunti nella tabella che segue, sono stati generalizzati a livello di rete ottenendo i risultati di seguito riportati.

Tabella 7.1: Modelli di regressione lineari della sopraelevazione ottenuti per le 4 linee oggetto di indagine.

CURVE			
1	Napoli-S.Giorgio	$H-1=0.00000022768X_1$	$R^2 = 0.7832$
2	Napoli -Sorrento	$H-1 = 0.00000011243875538939X_1$	$R^2 = 0.9097$
3	Napoli-Sarno	$H- 1= 0.00000005460929203399X_1$	$R^2 = 0.8929$
4	Napoli - Baiano	$H-1 = 0.00000010582601932320X_1$	$R^2 = 0.9023$

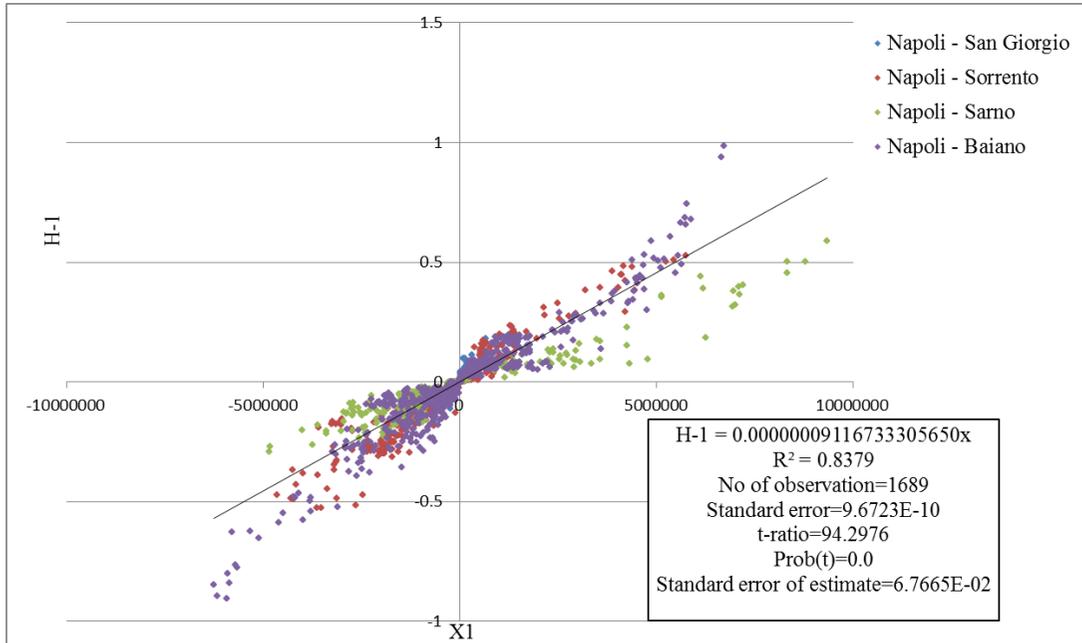


Figura 7.1: Modello di regressione ottenuto per la sopraelevazione in funzione del parametro X1 esteso alle curve delle 4 tratte analizzate della ex Circumvesuviana.

Se per le curve la bontà del dato è validata statisticamente, non può dirsi altrettanto per le curve di transizione. Si riserva ad analisi successive l'affinamento del modello. Ciò si evince dai risultati di seguito riportati.

Tabella 7.2: Modelli di regressione lineari dello sghembo ottenuti per le 4 linee oggetto di indagine.

CURVE DI TRANSIZIONE			
1	Napoli-S.Giorgio	$S-1 = 0.000000074849X_2$	$R^2 = 0.6556$
2	Napoli -Sorrento	$S-1 = 0.00000001336757109115X_2$	$R^2 = 0.8357$
3	Napoli-Sarno	$S-1 = 0,00000000042073650040X_2$	$R^2 = 0,7917$
4	Napoli - Baiano	$S-1 = 0,00000000236563426304X_2$	$R^2 = 0,8702$

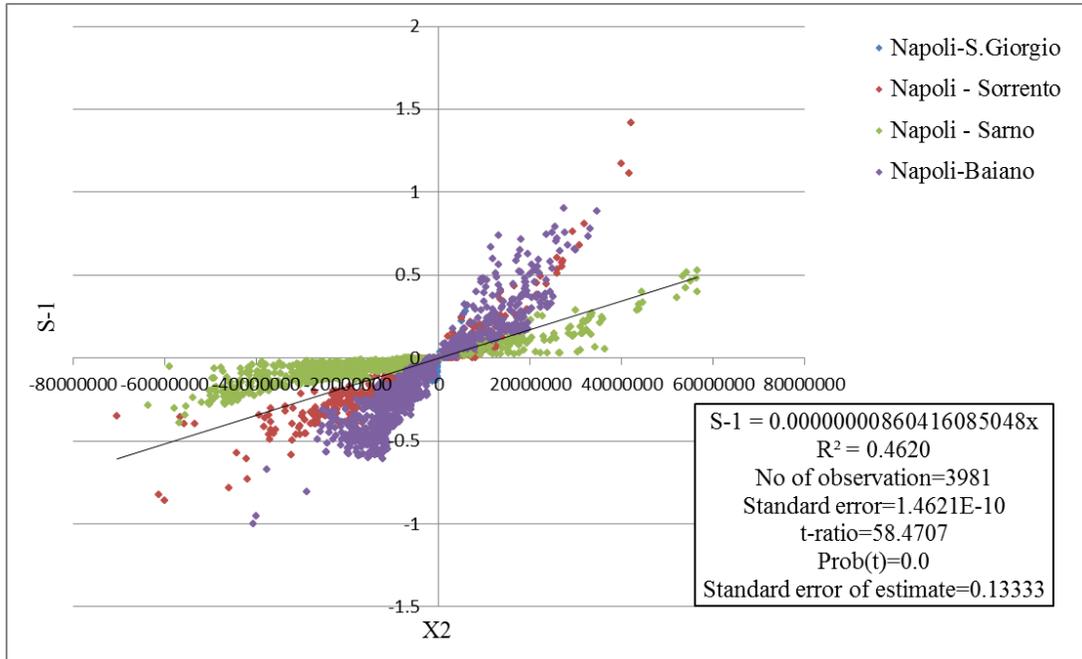


Figura 7.2: Modello di regressione ottenuto per lo sghebo in funzione del parametro X2 esteso alle curve di transizione delle 4 tratte analizzate della ex Circumvesuviana.

Come visto al paragrafo precedente, in alcuni casi, i dati sono ben descritti mediante un modello di regressione di potenza. Di seguito si riportano le espressioni analitiche dei modelli ricavate sulle 4 linee oggetto di indagine, sia per la sopraelevazione che per lo sghebo.

Tabella 7.3: Modelli di regressione di potenza della sopraelevazione ottenuti per le 4 linee oggetto di indagine.

CURVE		
1	Napoli-S.Giorgio	$H-1=1.36999E-06X_1^{0.8611}$ $Ra^2= 0.5258$
2	Napoli -Sorrento	$H-1=2.0508E-06X_1^{0.8022}$ $Ra^2 = 0.8468$
3	Napoli-Sarno	$H-1=1.9095E-07X_1^{0.9178}$ $Ra^2 = 0.7977$
4	Napoli - Baiano	$H-1=1.5476E-08X_1^{1,1275}$ $Ra^2 = 0.8252$

Tabella 7.4: Modelli di regressione di potenza dello sgembo ottenuti per le 4 linee oggetto di indagine.

CURVE DI TRANSIZIONE		
1	Napoli-S.Giorgio	$S-1=3.4758E-4X_2^{0.4033}$ $Ra^2 = 0.3368$
2	Napoli -Sorrento	$S-1= 2.6886E-08X_2^{0.9588}$ $Ra^2 = 0.7112$
3	Napoli-Sarno	$S-1= 1.2011E-08X_2^{0.9392}$ $Ra^2 = 0.6114$
4	Napoli - Baiano	$S-1=4,2599E-07X_2^{0.8259}$ $Ra^2 = 0.6768$

Come per il modelli di regressione lineari, anche nel caso di modello di potenza è necessario affinare le analisi statistiche per migliorare l'affidabilità dei risultati.

8 Conclusioni e sviluppi futuri

Le reti ferroviarie sono soggette a degrado in quanto sollecitate da molteplici fattori ambientali e da sovraccarichi che, in assenza di interventi mirati di manutenzione, possono minacciare la funzionalità della struttura. Si è reso necessario lo sviluppo di dispositivi ad alto rendimento per il monitoraggio della difettosità del binario, che hanno permesso di ottimizzare la pianificazione degli interventi di manutenzione. Con l'utilizzo di questi strumenti innovativi è possibile avere a disposizione una grande quantità di dati sperimentali relativi ai parametri caratterizzanti la geometria del binario con i quali è possibile sviluppare dei modelli previsionali di degrado. Questi modelli permettono di studiare la variazione nel tempo della geometria del binario, fondamentale per una corretta gestione degli interventi di manutenzione che servono a garantire un adeguato livello di qualità del binario, ma che risultano essere spesso molto costosi.

A conclusione del progetto di ricerca e del raggiungimento degli obiettivi preposti, quindi al termine del terzo anno di dottorato, si auspica principalmente che lo sviluppo di modelli di degrado consentirà un miglioramento nella gestione della manutenzione delle linee ferroviarie e dell'armamento e nel monitoraggio della difettosità delle stesse, ai fini di prevenire i pericoli di svio dei veicoli ferroviari in condizioni di normale carico e quindi di normale esercizio.

Lo sviluppo di un modello a basso costo consentirà di estendere le tecniche di gestione della manutenzione e di programmazione degli interventi anche alle piccole amministrazioni locali.

Allo stesso modo consentirà di acquisire il convincimento che la progettazione, la realizzazione, l'esercizio e la manutenzione sono fasi inscindibili di un medesimo progetto, finalizzato a fornire all'utente un sistema di reti ferroviarie caratterizzato costantemente e contemporaneamente da funzionalità, comfort e sicurezza. Con la presente ricerca sperimentale è stato possibile analizzare una grossa mole di dati sperimentali di difettosità della geometria del binario intesi in termini di scartamento, sopraelevazione e sghembo. L'analisi della difettosità geometrica del binario è stata effettuata a parità di elemento geometrico omogeneo al fine di fornire un supporto valido alla programmazione delle operazioni di manutenzione ma anche alla progettazione delle nuove linee ferroviarie. La difettosità geometrica del binario è stata studiata mediante l'utilizzo di parametri statistici sintetici, non solo in termini di valori medi dei parametri monitorati, ma anche osservandone la variabilità intorno al valor medio.

L'innovazione rispetto alle indagini già condotte in letteratura, sta nel valutare la difettosità geometrica della linea dal punto di vista dell'ingegneria civile; vale a dire, andare ad indagare su come i parametri di progetto della linea possano scadere e diventare difetti a causa dell'assenza delle operazioni di manutenzione. Questo per fornire un valido indirizzo ai progettisti in fase di realizzazione dell'opera ma soprattutto per suggerire ai gestori delle infrastrutture ferroviarie gli adeguati valori soglia di difettosità da tenere in conto per la programmazione delle operazioni di manutenzione. E' stata effettuata un'ulteriore valutazione della difettosità geometrica della linea mediante tecniche e funzioni generalmente utilizzate in campo stradale (PSD), ai fini della generalizzazione dei modelli.

Inoltre nel presente studio è stata fornita una procedura automatizzata utile a classificare i dati di difettosità monitorati in funzione di transienti omogenei della linea ferroviaria.

Sono state analizzate separatamente le cause di degrado di ciascun parametro monitorato.

E' stato altresì creato e validato un modello previsionale di degrado differente per ciascuna componente analizzata, considerando i carichi agenti sulla sovrastruttura e cercando di fornire omogeneità ed immediatezza dal punto di vista dell'applicabilità del modello.

Infine, per validare i modelli, i risultati ottenuti sono stati analizzati utilizzando gli stessi dati implementati in software differenti. E' stato operato poi, un confronto tra differenti tipologie di strumenti atti a monitorare i difetti della linea per confermare l'esattezza dei risultati e per generalizzare ed estendere il campo di operatività ed applicabilità dei risultati ai più svariati casi reali.

Dall'analisi dei dati di difettosità monitorati con lo strumento della Plasser ogni 25 cm lungo le linee, in andata e in ritorno (binario definito convenzionalmente pari e dispari), mediamente per 7 anni (con una numerosità di dati di circa 50 milioni), è emersa una bassa variabilità di difettosità geometrica a parità di elemento planimetrico geometrico costante.

Pertanto si è proceduto studiando il difetto di scartamento in corrispondenza dei rettifili del tracciato, quello di sopraelevazione in corrispondenza delle curve e quello di sghembo in corrispondenza delle curve di transizione. Tali parametri sono parametri di progetto, la cui variabilità è considerabile alla stregua di un difetto, solo a parità di elemento geometrico costante. Basti pensare all'allargamento voluto dello scartamento in curva in funzione del raggio della curva, o alla variazione della sopraelevazione nelle curve di transizione per ragioni di stabilità del veicolo.

Per le quattro linee analizzate, i risultati mostrano che:

- La variazione dello scartamento in corrispondenza dei rettifili è inversamente proporzionale alla variazione di temperatura, questo sembra essere in accordo con la fenomenologia di termica del binario.

- La variazione della sopraelevazione studiata in curva dipende da caratteristiche del moto e della geometria della linea. Questi fattori, in termini di velocità di fiancata dei treni, di raggio delle curve planimetriche, e traffico cumulato (numero veicoli transitanti sulla linea), sono stati, inoltre, utilizzati per la creazione di modelli previsionali di degrado degli elementi costituenti la linea ferroviaria. I modelli di degrado sono stati riferiti al valore del parametro adimensionalizzato rispetto al primo giorno di misura e nell'ipotesi veritiera di assenza di operazioni di manutenzione. In corrispondenza delle curve, inoltre, si sono evidenziati due comportamenti di degrado differenti legati alla differenza tra la velocità di fiancata e la velocità critica di progetto dell'elemento. Richiamando i concetti di equilibrio del veicolo in curva, tale variabilità comporta la sollecitazione differenziata della rotaia interna ed esterna nei casi sopra citati.
- In analogia con quanto ricavato per la sopraelevazione in curva, anche lo sghembo studiato in corrispondenza dei tratti a curvatura variabile, è affetto da variazioni, che comportano difettosità della linea, variabili con la velocità del moto dei veicoli transitanti, con la lunghezza dell'elemento geometrico considerato e con il sovraccarico rappresentato dal numero di veicoli transitati nel periodo di osservazione. Un analogo modello di degrado è stato ottenuto anche per le curve di transizione.
- Per i parametri di sopraelevazione e sghembo, analizzati rispettivamente in curva e in curve di transizione, sulla base dei dati storici analizzati e dei modelli di degrado ricavati utilizzando come strumento statistico le Catene di Markov, è stato possibile creare modelli previsionali di degrado (con previsioni a 20 anni) e valutare la probabilità di degrado nel tempo di ciascun elemento. Una catena di Markov è un processo stocastico grazie al quale, nota la distribuzione di probabilità del processo al tempo presente, è possibile conoscere anche la distribuzione di probabilità per le previsioni

future. Al fine di applicare tale strumento è necessario disporre di dati monitorati equispaziati nel tempo. A causa dell'assenza di tale caratteristica nel dataset raccolto, è stato necessario descrivere i dati monitorati mediante le funzioni di smoothing b-spline. Solo in questo modo, a partire dal dato osservato, si è ricavato il dato che si sarebbe osservato qualora le indagini fossero a cadenza temporale scandita. Solo dopo tale elaborazione si è potuto procedere con la realizzazione delle matrici di probabilità di degrado. I modelli ottenuti per le 4 linee analizzate sembrano essere in accordo stando ai valori dei coefficienti caratterizzanti i modelli.

Per la linea Napoli-Sarno, a valle delle elaborazioni sopra esposte, ulteriori indagini preliminari sono state effettuate ai fini dell'individuazione dei difetti geometrici della linea mediante informazioni basate sulle accelerazioni del treno raccolte mediante appositi sensori posizionati sulle boccole di un veicolo in normale esercizio (SMAMID). Le grandezze monitorate con il POS/TG (valori di curvatura, sghembo, scartamento, sopraelevazione, allineamento e livello longitudinale) rilevate ogni 25 cm con grado di precisione al millimetro, sono state prese a riferimento al fine di verificare l'esattezza e la veridicità dei dati ricavati con gli accelerometri, posizionati sulle boccole. I risultati ottenuti sono perfettamente in accordo salvo alcune piccole problematiche legate alla taratura degli strumenti, assente in alcune giornate di rilievo. L'elaborazione dei dati di accelerazione SMAMID mediante l'utilizzo di medie mobili a passo variabile, utile ai fini del confronto con i dati omologhi ottenuti dal Plasser, può essere inoltre considerata una procedura valida per identificare in maniera automatizzata la curvatura degli elementi geometrici costituenti la linea, problematica non secondaria nell'analisi della difettosità di una linea ferroviaria in seguito a rilievi ottenuti con strumenti ad elevato rendimento. Lo strumento PLASSER rimane un punto di riferimento nell'analisi delle difettosità della sede ferroviaria per l'immediatezza nella lettura dei dati di output. Resta comunque uno strumento vincolato a brevetti e caratterizzato da costi di acquisto e di gestione elevati e da problematiche di

taratura e di manutenzione non trascurabili. Lo SMAMID è uno strumento più economico, più facile da installare, sottoponibile a una manutenzione più accessibile e immediata ma richiede molteplici interventi di correzione e interpretazione dei dati di rilievo.

Per la linea Napoli-Baiano, inoltre, un'ulteriore indagine sulla difettosità geometrica del binario è stata effettuata anche mediante l'utilizzo di Power Spectral Density Function, in analogia con il campo stradale. Sono stati calibrati quattro modelli di PSD (ERRI B176, SNFC - metodo francese, SNCF - spettro spezzato raccordato, Chen) partendo dai valori delle PSD "smoothed" e sono stati confrontati e generalizzati i risultati ottenuti. Nel complesso il modello che fornisce migliori valori del coefficiente di correlazione statistica è per i rettili quello di ERRI, mentre per le curve è quello di CHEN. Infine i coefficienti delle funzioni PSD calibrati in relazione ai dati, di scartamento in corrispondenza dei rettili e sui dati di sopraelevazione in curva, sembrano essere valori accettabili se confrontati con quelli in letteratura. Pertanto è possibile utilizzare tale modo ai fini della rappresentazione della difettosità del binario.

L'impiego di ulteriori metodologie atte a valutare i difetti di alcune delle linee esaminate, è servito a validare e confermare i modelli di degrado ottenuti mediante l'utilizzo delle catene di Markov. Ulteriori studi andrebbero condotti per affinare i modelli ottenuti, incrementando il dataset dal punto di vista spaziale e temporale, a valle dell'automatizzazione delle procedure di analisi dei dati.

Bibliografia

1. Agostinacchio M., Ciampa D., Olita S. Strade, ferrovie, aeroporti, EPC libri 2007.
2. Andersson C., Abrahamsson T. Vehicle System Dynamics, Simulation of interaction between a train in general motion and a track, 2002.
3. Andersson M. Strategic planning of track maintenance, Department of infrastructure, Royal Institute of Technology, 2002.
4. Bayati H., Iwnicki S.D., Stow J.M. Opportunities for improving interfaces between railway engineering analysis tools, Railway Engineering 2002, London.
5. Beichelt, K. Fisher. General failure model applied to preventive maintenance policies, IEE Transaction on Reliability, vol. R-29, no. 1, pp. 39-41, 1980.
6. Bracciali, L. Di Benedetto, F. Piccioli. Analisi statistica delle vibrazioni misurate sulle boccole delle sale ferroviarie, AIAS (Associazione Italiana per l'analisi delle sollecitazioni) 40° Convegno Nazionale, 7-10 Settembre 2011, Università degli Studi di Palermo.
7. Bruner M., Cioffi E., Corazza G. R., Kajon G. Modelli analitici d'armamento e loro impiego nello studio del degrado della via.

8. Bruner M., et al. Cento e più anni di ricerche sullo svio. I “deragliatori”. *Ingegneria Ferroviaria*, 6/2012 pp. 509-527.
9. Bruner, M.; Corazza G. R.; Cosciotti E. Lo svio. Cento e più anni di ricerche di un problema complesso. Gli inizi e la scuola francese. *Ingegneria Ferroviaria*, 12/2009, pp. 1083-1096.
10. Bruner, M.; Corazza G. R.; Cosciotti E. Lo svio. Cento e più anni di ricerche di un problema complesso. La scuola tedesca. *Ingegneria Ferroviaria*, 12/2010, pp. 1047-1076.
11. Bruni S., Braghin F. Effect of Damage on Vehicle Dynamics in Wheel-Rail Interface Handbook, WP, 2009.
12. Cannon D.F. et al. Rail defects: an overview. Blackwell Publishing Ltd. *Fatigue Fract Engng Mater Struct* 26/2003 pp.868-887.
1. Castagna E. Catene di Markov finite: teoria elementare. Aprile 2000.
13. D’Apuzzo M., Aiello V., Boiero D., Socco L.V. & Silvestri F. 2008. Experimental and numerical analysis of vibrations induced by underground trains in urban environment. *Structural Control & Health Monitoring*, vol. 15, p. 315–348, ISSN: 1545-2255, doi: 10.1002/stc.247.
14. D’Apuzzo M., Festa B., Miraglia E.; 2014. Evaluation of rail defects provided by high performance measuring devices Sustainability, Eco-efficiency, and Conservation in Transportation Infrastructure Asset Management Edited by Massimo Losa and Tom Papagiannakis CRC Press pp. 649–Print ISBN: 978-1-138-00147-eBook ISBN: 978-1-315-75712-4 doi: 10.1201/b16730-95.
1. D’Apuzzo M., Festa B., Miraglia E.; Railroad geometric defects: a methodology to develop degradation models from experimental data. *International journal for traffic and transport engineering (IJTTE)*.
2. D’Apuzzo M., Festa B., Miraglia E.; Balsamo V.; Preliminary analysis of track geometry defects collected by high performance measuring devices.

-
- Transportation Research Board (TRB) 93rd Annual Meeting – Washington DC (USA).
15. D'Apuzzo M., Nicolosi V. & Bogazzi E. 2012. A Unified Approach for the Prediction of Vibration Induced by Underground Metro. *Procedia: Social & Behavioral Sciences*, vol. 53, p. 62–71, ISSN: 1877-0428, doi: 10.1016/j.sbspro.2012.09.860.
 16. Di Majo F. *Costruzione di materiale ferroviario*, Levrotto & Bella, 1979.
 17. Diana G. et al. Sullo svio di un veicolo ferroviario. Influenza dei vari parametri. *Ingegneria Ferroviaria*, 2/2012 pp.109-135.
 2. Eilers P. H. C., Marx B. D.; *Flexible Smoothing with B-splines and Penalties*.
 18. Esveld C. *A new safety philosophy for CWR*, International Union of Railways (UIC) ERRI, 1997.
 19. Esveld C. *Improved knowledge of cwr track*, International Union of Railways (UIC) ERRI, 1992.
 20. Esveld C. *Modern Railway Track*, 2001 (2nd edition) MRT-Productions.
 21. Esveld C. *Modern railway Track*. MRT Production, Zalt Bommel. The Nerthelands 2001.
 22. Esveld C., J. van't Zand, Scheepmarker P.N., Suiker A.S.J. *Dynamic Behaviour of Railway track*, International Union of Railways (UIC) ERRI, 1995.
 23. Esveld C., Kok A.W. M. *Interaction between moving vehicles and railway track at high speed*, 1998.
 3. Fagnola F., Sasso E. *Catene di Markov*. 19 Febbraio 2008
 4. Frasso G. *Splines, differential equations, and optimal smoothing*. Tesi di dottorato, Aprile 2014.
 5. Frasso G., Eilers P. H.C. *An innovative procedure for smoothing parameter selection*.

24. Grimes, G. A. and Barkan, C. P. L. Cost-Effectiveness of Railway Infrastructure Renewal Maintenance, *Journal of transportation engineering asce* 2006.
25. Guangwu C., Shoune X., Dingchang J. Application of simpack multi-body system analysis software in dynamics analysis of railway freight vehicle.
26. Guler H., Jovanovic S., Evren G. Modelling railway track geometry deterioration, *Transport Volume 164 Issue TR2* pp. 65-75, ICE, May 2011.
27. Higgins A. Scheduling of railway Track Maintenance Activities and Crews. *Journal of Operational Research Society*, Vol. 49, No 10, 1026-1033 1998.
28. ISO 8608 “Mechanical Vibration – Road surface profiles Reporting of measured data”.
29. Iwnicki S. Handbook of railway vehicle dynamics. Taylor & Francis press, 2006.
30. Iwnicki S., Grassie S., Kik W. – Track settlement prediction using computer simulation tools, *Vehicle System Dynamics* 33(13), 2000.
31. Lichtberger B. Railway manual, Ed. Eurailpress First Edition, 2010.
32. Liu X., Barkan et al. 2011. Analysis of Derailments by Accident Cause: Evaluating Railroad Track Upgrades to Reduce Transportation Risk; *Transportation Research Record* 2261.
33. Lovett A. H. et al. Development of an integrated model for the evaluation and planning of railroad track maintenance. In proceedings of the 2013 Joint Rail Conference April 15-18, 2013.
34. Macchi, M. et al. Maintenance management of railway infrastructures based on reliability analysis, *Reliability Engineering and System Safety* 104, 2012.
35. Markine V. L., de Man A.P., Jovanovic S., Esveld C. Optimum design of embedded rail structure for high-speed lines.
36. Markine V. L., Esveld C. Analysis of longitudinal and lateral behaviour of a cwr track using a computer system longin.

37. Markine V.L., Esveld C. Determination of train speed limits on renewed tracks using tamping machine and numerical optimization.
38. Ortiz-Garcia J., Costello S., Snaith M. Derivation of Transition Probability Matrices for Pavement Deterioration Modelling, *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 132, No. 2, ASCE. doi: 10.1061/(ASCE) 0733-947X(2006)132:2(141), 2006.
39. Paci U., Di Matteo M. Elettrotreno snodato a 3 elementi ETR 200. *Ingegneria Ferroviaria*, 8/1195, pp. 627-634.
40. Panagin R. *La dinamica del veicolo ferroviario*, Levrotto & Bella, 1990.
41. Panagin R. *La dinamica del veicolo ferroviario*. Libreria editrice universitaria Levrotto&Bella, 1990.
42. Peng F. et al. Optimal clustering of railroad track maintenance jobs. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* Volume 29, Issue 4, 235–247, 2014.
43. Ramos Andrade A., Fonseca Teixeira P. A Bayesian model to assess rail track geometry degradation through its life-cycle, *Research in Transportation Economics* 36 pp. 1-8, Elsevier, April 2012.
44. RFI 2004, Track geometric quality standards for speed up to 300 Km/h. Part1. Part 2, Part 3. Italian Railway Company (in Italian).
45. Shafahi Y., Hakhamaneshi R. Application of a Maintenance Management Model for Iranian Railways Based on the Markov Chain and Probabilistic Dynamic Programming, *Scientia Iranica, Transaction A, Journal of Civil Engineering* Vol. 16 No. 1, February 2009.
46. Shafahi Y., Masoudi P., Hakhamaneshi R. Track Degradation Prediction Models, Using Markov Chain, Artificial Neural Network and Neuro-Fuzzy, 8th World Congress on Railway Research, Seoul, Korea, May 2008.
47. Sibaie El, Zhang Y. J. Objective track quality indices, *Transportation research record: Journal of the Transportation Research Board*, no. 1863, pp. 81-87, 2004.

-
48. Simson S. A., Ferreira L., Murray M.H. – Rail track maintenance planning: An assessment model, Transportation Research Record 1713, Transportation Research Board, National Research Council, National Academy Press, Washington D.C., USA, pp. 29-35, 2000.
 49. Tocchetti A. Infrastrutture ferroviarie, Aracne, 2008.
 50. Tolliver, D. Benson - Freight railway track maintenance cost model, North Dakota State University, MPC-357, 2010.
 51. Track geometric quality standard for speeds up to 300 km/h Part 1; Part 2; Part 3, RFI – Italian Railway Administration.
 52. Tzanakakis K. The Railway Track and Its Long Term Behaviour, STTT 2, pp. 255–257. DOI: 10.1007/978-3-642-36051-0_33, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013.
 53. UIC 2002, Handbook of Rail Defects. UIC Code 712R (4th edn), Paris.
 54. UNI EN 13848 Track geometry quality, Part 1: Characterization of track geometry; Part 2: Measuring systems, Track recording vehicles; Part 3: Measuring systems, Track construction and maintenance machines; Part 5: Geometric Quality Levels.
 55. UNI EN 13848-1, Track geometry quality Part 1: Characterisation of track geometry.
 56. UNI EN 13848-2, Track geometry quality Part 2: Measuring systems - Track recording vehicles.
 57. UNI EN 13848-3, Track geometry quality Part 3: Measuring systems - Track construction and maintenance machines.
 58. UNI EN 13848-5, Track geometry quality Part 5: Geometric Quality Levels.
 59. UNI EN 14363, Testing for the acceptance of running characteristics of railway vehicles. Testing of running behavior and stationary tests.
 60. UNI-EN 13674, Track - Rail - Part 1.

61. Vale C., Lurdes S. M. – Stochastic model for the geometrical rail track degradation process in the Portuguese railway Northern Line, *Reliability Engineering and System Safety* 116 pp. 91-98, Elsevier, February 2013.
62. Van Zante de Fokkert D., den Hertog, F. J., van den Berg J. H. M. Verhoeven I. The Netherlands schedules track maintenance to improve track workers' safety, *Interfaces*, vol. 37, no. 2, pp. 133-142, 2007.
63. Wireman, T. *Preventative Maintenance*, Industrial Press, Inc., New York 2008.
64. Zio E. et al. Importance measures-based prioritization for improving the performance of multi-state systems: application to the railway industry. *Reliability Engineering & System Safety*; 92:1303–14, 2007.

Appendice A – Statistiche applicate: le Spline

Le spline si utilizzano per la costruzione di funzioni polinomiali a tratti a partire da punti noti detti nodi. La funzione spline ha la proprietà di passare per i nodi ed essere libera negli altri punti. Da tale caratteristica prende il suo nome. Il termine veniva utilizzato in principio per indicare delle asticcioline flessibili di legno impiegate per la progettazione degli scafi delle navi, forzate a descrivere delle curve regolari dopo essere state bloccate in alcuni punti.

Le spline presentano un andamento regolare, sono delle curve di smoothing utilizzate per interpolare e descrivere delle grandezze imponendo il passaggio per i nodi.

Laddove l'interpolazione mediante polinomi classici presenta delle instabilità o forti oscillazioni, si può ovviare applicando le spline, intese come un caso particolare di interpolazione polinomiale a tratti. Ciò perché non sempre i polinomi interpolanti sono adatti ad approssimare una certa funzione con un'accuratezza sufficiente su tutto l'intervallo di esistenza della funzione.

Le spline sono caratterizzate dall'ordine, o grado di libertà e dal numero di nodi. Detto q l'ordine della spline, questa è fatta da $q+1$ polinomi che si uniscono in funzione del numero di nodi. Nei punti di unione dei polinomi, le derivate sono continue fino all'ordine $q-1$. La spline, inoltre, assume valori diversi da zero solo

nel dominio definito da $q+2$ nodi. E' sufficiente che il grado di libertà sia pari a 3 affinché l'occhio umano non percepisca la discontinuità della funzione.

Dal punto di vista operativo, la costruzione delle spline è stata effettuata mediante il software Matlab.

Si è proceduto con la costruzione di un caso particolare delle spline, le cosiddette penalized spline (p-spline). In queste viene introdotto un parametro positivo di penalizzazione (λ) che agisce come parametro di smoothing.

Se $\lambda=0$ non esiste penalità per l'irregolarità della funzione, identificata dall'integrale della derivata seconda della funzione al quadrato.

Se $\lambda=\infty$ la penalità è massima e la funzione complessiva è la retta dei minimi quadrati.

La retta dei minimi quadrati è quella che rappresenta l'andamento di una serie di punti e che si trova molto vicina a questi al fine di rappresentare al meglio la realtà.

Se la distanza di ciascun punto dalla retta, viene definita errore, occorre minimizzare questa distanza con il metodo dei minimi quadrati. Tale metodo è un processo di minimizzazione dei quadrati delle deviazioni dei punti dalla retta, e restituisce, appunto, la retta dei minimi quadrati.

Con gli script creati in Matlab, di fatto si è proceduto ordinando le variabili in senso crescente in funzione dei predittori (x). Si sono poi create le basi, definite indipendentemente dalla numerosità dei dati. Il numero delle basi è dato dalla somma del numero di nodi (ndx) scelti e del grado di libertà ($bdeg$).

Nel caso in esame il numero dei nodi è stato posto pari a 20, scelta effettuata sulla base di studi presenti in letteratura che dimostrano l'efficacia dell'utilizzo di un numero di nodi compreso tra 20 e 50 per conferire stabilità al risultato; il grado di libertà è stato posto pari a 3.

La matrice B delle basi, ha tante righe quante sono le righe della variabile x e tante colonne quanti sono il numero di nodi sommati ai gradi di libertà. Ad ogni colonna corrisponde una spline.

Creare le basi è possibile definire i λ , imponendo la minimizzazione della *generalized cross validation* (gvc). Questi hanno la stessa numerosità degli a , coefficienti di regressione, noti i quali è possibile stimare le \hat{y} . I coefficienti di regressione a sono di fondamentale importanza, in quanto, lasciandoli invariati, ci consentono di ricavare valori di y in corrispondenza di valori di x non osservati.

Di seguito si riporta sotto forma analitica quanto detto.

```

B=(-1)^(bdeg+1).*P*D';
end
function tp=tpower(X,ndx,deg)

tp=(X-ndx).^deg.*(X>ndx)*1;

end

B=bases(X,20,3);
function [yhat,a,gcv] = PsplineEli(B,y)

[m n] = size(B);
D = diff(eye(n), 2);

L=-5:0.1:5; %% si crea un vettore di possibili valori di log10(L)

lambda=10.^L;

for k=1:length(L)
a = (B' * B + lambda(k) * D' * D) \ (B' * y);
yhat = B * a;
Q = inv(B' * B + lambda(k) * D' * D);
s = sum((y - yhat) .^ 2);
t = sum(diag(Q * (B' * B)));
gcv(k,1) = s / (m - t)^2;

end

[lambdastar ind]=min(gcv);
a=(B' * B + lambda(ind) * D' * D) \ (B' * y);
yhat=B*a;

[yhat,a,gcv] = PsplineEli(B,Y);

scatter(X,Y, '.')
hold on
plot(X,Y, 'b:', 'linewidth', 0.5)
plot(X,yhat, 'r')

```

Riscrivendo il codice come di seguito riportato, è possibile creare più spline relative ai dati medi dei parametri di difettosità monitorati in funzione del tempo.

```

matriceyhat=matricey;
    x1 = min(x);
    xr = max(x);

B=bases2(x,8,3, x1, xr);

```

```

figure(1);
plot(x,B)

matricea=zeros(size(B,2),size(matricey,2));

for i=1:size(matricey,2)
figure(2);
hold all
scatter(x,matricey(:,i),'.')
[matriceyhat(:,i),matricea(:,i)] = Pspline2(B,matricey(:,i));
scatter(x,matriceyhat(:,i),'.')
hold all
plot(x,matricey(:,i),'b','linewidth',0.5)
plot(x,matriceyhat(:,i),'r')
end

newB=bases2(newX,8,3,min(newX),max(newX));
figure
for k=1:size(matricey,2)
    hold on
    fit(:,k)=newB*matricea(:,k);
    scatter(newX,fit(:,k));
end

scatter(repmat(newX,25,1),fit(:))
plot(newX,fit,':','color',[.5 .5 .5])

```

Per generalizzare lo script alle diverse e numerose famiglie di dati a disposizione sono state effettuate le modifiche sotto riportate.

```

%prima, carica i dati (in formato *.mat)
load('datimedielisabetta.mat')
%Y sono i dati (i tuoi valori medi). Ogni colonna è una curva. Ogni
riga
%una data. I valori zero sono mancate misurazioni
%ax sono le date reali

WY=Y; %rinomino la Y;
id1=find(Y(1,:)==0); %restituisce un indice delle colonne che
iniziano per zero. Non possono essereutilizzate!!!
id2=find(Y(end,:)==0); %restituisce un indice delle colonne che
finiscono per zero. Non possono essereutilizzate!!!

id=sort([id1 id2]); %indice delle colonne da eliminare

```

```

%%SE L'INDICE E' NON VUOTO
if ~isempty(id)
    WY(:,id)=[]; %matrice da utilizzare
end
%%

%%%costruzione delle splines%%%
for k=1:size(WY,2); %per ogni colonna di WY

    y=WY(:,k); %isolo la k-ma curva
    x=ax; %rinomino le date
    x(y==0)=[]; %elimino le mancate misurazioni intermedie dalle
date
    y(y==0)=[]; %elimino le mancate misurazioni intermedie dalle
curve
    %B=Bbase(x,min(x),max(x),15,3);
    %D=diff(eye(size(B,2)),2);
    [~,as(:,k),~,~,~,~]=LPspline(y,x,2,6,3,1); %per la k-ma curva,
conserva i coefficienti p-spline il numero di basi qui deve essere
uguale a quello alla riga 60
    %%in INPUT della funzione LPspline voglio:
    %
    %                                     y -> la k-ma curva
    %                                     x -> le date
    %                                     2 -> devi usare
sempre il
    %                                     valore 2
    %                                     15 -> numero nodi
interni
    %                                     3 -> grado del
polinomio
    %                                     1 -> lascia sempre
questo
    %                                     valore

End

%decido le date equispaziate nel tempo
axpr=[min(ax):180:max(ax)]; % axpr è un vettore che parte da 0 (o
comunque il valore minimo dei giorni), ha un passo di 180 giorni e
finisce con il valore massimo

if max(axpr)~=max(ax) %se il valore massimo delle date equispaziate
non è uguale al valore massimo delle date reali, aggiungi il valore
massimo delle date reali
    axpr=[axpr max(ax)];
end

Bn=Bbase(axpr,min(axpr),max(axpr),6,3); %costruisco le basi per le
date non osservate
fits=Bn*as; %stima dei valori delle curve nelle date non osservate
(VALORI NUMERICI)

```

```
scatter(axpr, fits(:,1)); %scatter plot delle nuove curve
hold on
for j=2:size(WY,2)
    scatter(axpr, fits(:,j))
end

for k=1:length(axpr)
    line([axpr(k) axpr(k)], [-80 80], 'linestyle', ':')
end

plot(axpr, Bn) per vedere a video le nuove basi
```

Appendice B – Statistiche applicate: le Catene di Markov

Una catena di Markov è un processo stocastico grazie al quale, nota la distribuzione di probabilità del processo al tempo presente, è possibile conoscere anche la distribuzione di probabilità per le previsioni future.

Una tipica proprietà Markoviana è, infatti: “The future depends on the past through the present”.

Un processo stocastico

nel tempo, in assenza di interventi di manutenzione, ma può permanere nello stesso stato, senza ulteriore degrado.

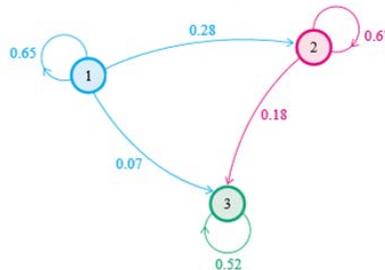


Figura B 1: Esempio di grafo utilizzato come alternativa alla matrice di probabilità di transizione delle catene di Markov.

I valori soggetti ad analisi mediante la creazione di catene di Markov sono: sghembo per i tratti a curvatura variabile e sopraelevazione per quelli curvi, in termini di valori medi adimensionalizzati in funzione del valore rilevato il primo giorno di misurazione.

I dati di sopraelevazione sono stati analizzati per classi di curve. Tali classi sono state determinate in funzione dei valori dei raggi di curvatura, e la suddivisione in classi è stata effettuata in seguito all’osservazione di andamenti dei parametri in funzione del tempo, analoghi a parità di classe omogenea. Inoltre si è registrato un andamento analogo dei parametri in corrispondenza di curve percorse ad una velocità maggiore di quella critica e viceversa. Al fine di procedere con l’applicazione del modello statistico in esame, sono stati individuati cinque valori qualitativi rappresentativi dello stato della struttura (very good, good, fair, poor, very poor) corrispondenti ad intervalli numerici idoneamente costruiti. Occorre sottolineare che il dato di partenza, sottoposto ad analisi, è espresso in termini di valore normalizzato meno 1, ed è stato studiato in funzione di un parametro x dato dal prodotto di caratteristiche geometriche della linea (raggio di curvatura o estensione dell’elemento), e caratteristiche dei convogli (differenza tra la velocità di viaggio e quella critica e traffico cumulato, indice di carico sulla sovrastruttura), rappresentative del carico agente sulla linea.

L'obiettivo dell'applicazione delle catene di Markov ai dati manipolati è quello di creare dei modelli previsionali di degrado della sovrastruttura con proiezioni di 20 anni. Al fine di utilizzare tale modello è necessario predisporre di dati equispaziati dal punto di vista temporale (nello specifico ogni sei mesi). E', inoltre, necessario predisporre di valori di difettosità, elaborati statisticamente come sopra esposto, in funzione della variabile temporale. Non avendo a disposizione tale tipo di dipendenza analitica in forma esplicita, si è ritenuto necessario effettuare un cambio di variabili, vale a dire che la dipendenza temporale si è ottenuta in funzione del traffico cumulato, essendo questo funzione del tempo.

Il traffico cumulato è stato fornito in termini di valori mensili, per tanto rispetto ai dati registrati, non si è fatto altro che sommare il traffico reale registrato nei mesi in questione. Riguardo le previsioni a 20 anni, il traffico cumulato è stato ottenuto mediante una stima effettuata facendo la media aritmetica dei valori di traffico cumulato nei mesi in cui si predisponeva del dato monitorato. Il valore medio totale è stato sommato tante volte quanti erano gli intervalli temporali in previsione.

Dal punto di vista operativo, creare una catena di Markov vuol dire sottoporre i dati ad un processo iterativo finalizzato a minimizzare la differenza tra il valore previsto e quello realmente osservato sulla base dei dati passati registrati. Solo in tal modo si ottiene una previsione futura che rispecchi l'andamento reale. Ciò vuol dire che, diagrammando in funzione del tempo, sui 20 anni, l'andamento stimato del parametro di difettosità del singolo elemento geometrico sottoposto ad indagine, è possibile determinare un'equazione di regressione del tipo $y=ax+b$. A questo punto si può procedere impostando un processo iterativo in cui, indicando con c_i il valor medio degli intervalli di soglia considerati, per ogni intervallo di tempo (x) si è considerata la differenza al quadrato tra la y vista prima (regressione) ed una y media ottenuta come prodotto scalare tra il vettore a_i del generico istante considerato ed il vettore c dei valori medi degli intervalli.

Un'operazione preliminare da fare è creare il vettore colonna p_n (vettore di probabilità iniziale) rappresentativo delle probabilità in cui si trova inizialmente il

sistema, ai fini pratici si è posto pari a 0,5 ciascun elemento tranne l'ultimo, posto pari ad uno.

Successivamente è necessario predisporre la matrice di transizione iniziale (T01) rappresentativa delle probabilità che la linea possa passare da uno stato iniziale a quello immediatamente successivo o permanga nello stato in cui si trova. La matrice è diagonale in quanto non è possibile che lo stato del sistema migliori ed ha inoltre valori diversi da zero sulla linea parallela alla diagonale a testimonianza del fatto che non ci può essere un salto di classe di degrado. Gli elementi della matrice si ottengono osservando i dati registrati e confrontandoli con i valori soglia imposti per la transizione da uno stato qualitativo ad un altro. Le matrici di transizione (P) sono tante quanti sono gli stati del sistema. Le altre matrici si ottengono come prodotto matriciale della prima matrice per se stessa, della seconda per la prima, della terza per la prima e così via.

Analogo discorso si è ripetuto per lo sghembo in corrispondenza delle clotoidi.

Di seguito si riportano i risultati ottenuti per i dati di sopraelevazione in corrispondenza di elementi planimetrici circolari, a curvatura costante finita.

Tabella B 1: Vettore di probabilità iniziali relativo allo stato zero del sistema.

$$P_n =$$

Tabella B 2: Esempio di matrice di transizione.



$$P =$$

Le matrici di transizione, utili per la stima del modello di degrado della sovrastruttura ferroviaria, sono state ottenute risolvendo il problema di ottimizzazione sotto riportato.

$$Z = \min \sum_t [y(t) - y_m(t)]^2 \tag{C.1}$$

Dove $y(t)$ rappresenta il valore del parametro stimato con il modello empirico di degrado al tempo t ;

$y_m(t)$ il valore medio ottenuto con la valutazione delle matrici di transizione.

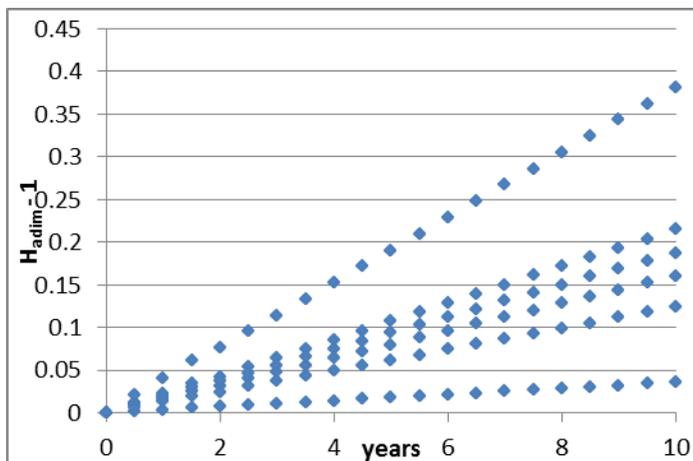


Figura B 2: Modello di regressione ottenuto per i dati di sopraelevazione in corrispondenza delle curve della tratta Napoli-San Giorgio, utilizzato per la calibrazione delle catene di Markov.

Tabella B 3: Tipica matrice di transizione ottenuta in corrispondenza di una curva circolare con raggio di 178 metri (T01)

P				
0.988801	0.011199	0.000000	0.000000	0.000000
0.000000	0.822717	0.177283	0.000000	0.000000
0.000000	0.000000	0.705778	0.294222	0.000000
0.000000	0.000000	0.000000	0.654614	0.345386
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

Appendice C – Caratteristiche dei carichi in termini di traffico agente sulla sovrastruttura

I dati di traffico dati della sottostante tabella sono stati reperiti direttamente dai conteggi di traffico della ex Circumvesuviana.

Tabella C 1: Dati di traffico annuali espressi in Treni/Km con cadenza mensile.

	NAPOLI - SARNO	NAPOLI - SORRENTO	NAPOLI - BAIANO	NAPOLI - S.GIORGIO
MESE	Treni/Km effettuati			
Gennaio	72 543	104 844	77 926	23 285
Febbraio	66 420	96 293	71 636	21 224
Marzo	76 156	111 551	81 214	24 008
Aprile	72 220	101 327	76 483	22 693
Maggio	74 818	106 534	79 794	23 935
Giugno	73 526	105 757	78 383	22 926
Luglio	53 637	109 632	59 871	23 964
Agosto	51 616	107 155	54 847	23 512
Settembre	74 488	103 434	79 480	23 265
Ottobre	76 862	109 095	82 026	24 022
Novembre	73 434	107 911	78 713	23 207
Dicembre	71 644	107 111	77 041	22 951

ANNO 2009

	NAPOLI - SARNO	NAPOLI - SORRENTO	NAPOLI - BAIANO	NAPOLI - S.GIORGIO
	Treni/Km effettuati			
ANNO 2010				
Gennaio	72 778	108 604	77 477	23 474
Febbraio	68 457	100 066	72 768	21 492
Marzo	76 962	111 604	82 089	23 970
Aprile	72 645	106 460	77 216	22 712
Maggio	75 192	112 665	80 014	23 970
Giugno	72 682	108 555	77 306	23 183
Luglio	52 675	111 495	58 827	23 451
Agosto	51 616	109 938	51 704	16 561
Settembre	74 485	108 215	73 646	22 943
Ottobre	75 193	110 511	74 733	23 469
Novembre	71 577	104 478	71 042	21 958
Dicembre	73 189	107 438	72 221	22 722

	NAPOLI - SARNO	NAPOLI - SORRENTO	NAPOLI - BAIANO	NAPOLI - S.GIORGIO
	Treni/Km effettuati			
ANNO 2011				
Gennaio	72 915	108 773	76 421	23 417
Febbraio	66 515	97 773	71 445	20 794
Marzo	74 637	111 080	80 704	23 933
Aprile	69 855	103 118	75 154	22 246
Maggio	73 684	109 059	79 790	23 843
Giugno	71 319	105 557	77 501	23 012
Luglio	52 032	107 263	56 964	22 543
Agosto	42 993	105 984	52 899	19 694
Settembre	38 563	83 830	52 232	7 887
Ottobre	53 183	85 925	57 184	12 543
Novembre	46 927	78 210	51 731	10 854
Dicembre	49 373	79 746	52 790	11 397

	NAPOLI - SARNO	NAPOLI - SORRENTO	NAPOLI - BAIANO	NAPOLI - S.GIORGIO
	Treni/Km effettuati			
ANNO 2012				
Gennaio	50 275	82 670	54 557	11 755
Febbraio	48 125	78 627	52 585	11 729
Marzo	46 720	78 424	49 917	4 936
Aprile	38 476	71 505	39 705	3 357
Maggio	38 124	85 497	43 278	7 656
Giugno	36 904	83 441	42 439	9 682
Luglio	37 519	85 294	42 814	12 406
Agosto	38 012	86 592	43 279	12 649
Settembre	40 320	83 382	45 769	12 406
Ottobre	43 060	81 512	48 471	12 856
Novembre	31 225	59 922	37 341	10 628
Dicembre	35 560	66 113	38 721	3 661

	NAPOLI - SARNO	NAPOLI - SORRENTO	NAPOLI - BAIANO	NAPOLI - S.GIORGIO
MESE	Treni/Km effettuati			
Gennaio	50 275	82 670	54 557	11 755
Febbraio	48 125	78 627	52 585	11 729
Marzo	46 720	78 424	49 917	4 936
Aprile	38 476	71 505	39 705	3 357
Maggio	38 124	85 497	43 278	7 656
Giugno	36 904	83 441	42 439	9 682
Luglio	37 519	85 294	42 814	12 406
Agosto	38 012	86 592	43 279	12 649
Settembre	40 320	83 382	45 769	12 406
Ottobre	43 060	81 512	48 471	12 856
Novembre	31 225	59 922	37 341	10 628
Dicembre	35 560	66 113	38 721	3 661

ANNO 2013

Appendice D – Caratteristiche tecniche del materiale rotabile transitante sulle linee

Il parco rotabile della ex Circumvesuviana è costituito da 3 tipologie differenti di elettrotreni:

- ETR FE 220
- ETR T21
- ETR 200 METROSTAR

Gli elettrotreni sono treni elettrici automotore non scomponibili, senza locomotiva con potenza di trazione distribuita sulle carrozze e non concentrata tutta sulla locomotiva, installata mediante motori di trazione sui carrelli comandati a distanza dai posti di manovra situati alle estremità del veicolo.

Circa l'80% della flotta è costituita da elettrotreni costruiti tra il 1971 ed il 1993 (ETR FE 220, ETR T21) sulla base di un progetto elaborato alla fine degli anni '60. Tutti gli elettrotreni della flotta, sono tra loro accoppiabili mediante accoppiatore automatico per formare convogli di due o tre elementi per complessivi 120 m. Tutto il parco rotabile è dotato di sistema ATP (Automatic Train Protection) a quattro codici con ripetizione in cabina, nonché di dispositivo vigilante per il rilievo della presenza attiva del macchinista a bordo. L'ATP fornisce indicazioni continue delle condizioni dei segnali a valle del convoglio, determina le condizioni

di velocità provocando, sotto particolari condizioni, l'intervento della frenata automatica di emergenza.

Le caratteristiche comuni alle tre tipologie sono:

- Alimentazione 1500 Volt
- Impianto frenante a disco
- Porte automatiche elettropneumatiche

L'architettura dei veicoli è basata su di una composizione bloccata di tre casse su quattro carrelli con scartamento ridotto pari a 950 mm. Ogni elettrotreno è bidirezionale e dotato di due cabine di guida. La lunghezza complessiva è di 40 m. L'incarozzamento avviene a raso alla quota di 1000 mm sul piano del ferro mediante quattro porte per fiancata.

ETR Fe220



Figura D 1: Treno ETR Fe220.

La capienza a carico massimo è di 372 passeggeri, di cui 124 posti a sedere e 252 posti in piedi (con 6 passeggeri/m²)

A composizione bloccata di tre casse su quattro carrelli, di cui quelli interni sono di trazione e quelli esterni portanti. La velocità massima di servizio pari a 90 km/h.

L'impianto frenante è a comando pneumatico automatico continuo a depressione con distributori tipo U-1 e rubinetto autoregolatore tipo WU prodotti dalla Westinghouse.

Tabella D 1: Scheda tecnica ETR Fe220

Sigla motrice (elettrotreno tre casse/quattro carrelli, rodiggio 2BB2, 2 motori di trazione alimentati a 1500 V cc con avviamento reostatico)	Fe220
Massa a vuoto	56 ton
Scartamento	950 mm
Lunghezza	40 m
Massimo numero di passeggeri (6p/m ²)	376
Passeggeri seduti	124
Velocità massima	90 km/h
Numero assi	8
Rapporto di trasmissione	1/3,61
Diametro delle ruote (a nuovo)	750 mm
Numero di motori	2
Rendimento meccanico	0.93
Tensione nominale	1,5 kV cc
Corrente massima motore	420 A
Potenza nominale singolo motore	350 kW
Tensione minima	1,0 kV cc
Potenza assorbita agli ausiliari (comprensiva della potenza delle scaldiglie e dei compressori a 1500 V)	52 kW
Scostamento % positivo dalla tensione nominale	20%
Scostamento % negativo dalla tensione nominale	33%

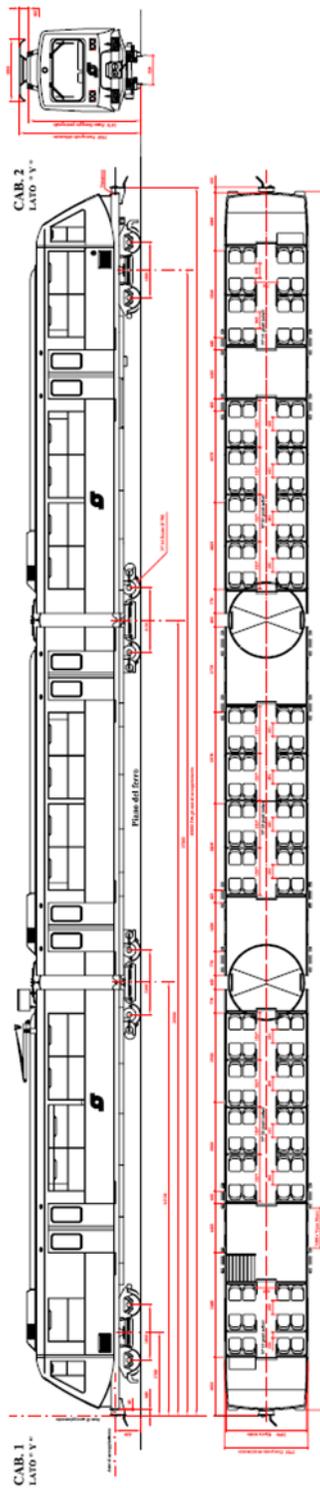


Figura D 2: Figurino ETR Fe220.

ETR T21



Figura D 3: Treno ETR T21

Tabella D 2: Scheda tecnica ETR T21.

Sigla motrice (elettrotreno tre casse/quattro carrelli, rodiggio 2BB2, motori di trazione alimentati a 1500 V cc con avviamento reostatico)	T21
Massa a vuoto	62 ton
Scartamento	950 mm
Lunghezza	40 m
Massimo numero di passeggeri (6p/m ²)	396
Passeggeri seduti	120
Velocità massima	90 km/h
Numero assi	8
Rapporto di trasmissione	1/3,61
Diametro delle ruote (a nuovo)	750 mm
Numero di motori	2
Rendimento meccanico	0.93
Tensione nominale	1,5 kV cc
Corrente massima	420 A
Potenza nominale singolo motore	350 kW
Tensione minima	1,0 kV cc
Potenza assorbita agli ausiliari	57 kW
Scostamento % positivo nella tensione nominale	20%
Scostamento % negativo nella tensione nominale	33%

La capienza a carico massimo è di 120 posti a sedere e 276 posti in piedi (con 6 passeggeri/m²). E' a composizione bloccata di tre casse su quattro carrelli, di cui quelli interni sono di trazione e quelli esterni portanti. Ogni elettrotreno è bidirezionale e dotato di due cabine di guida. La lunghezza complessiva è di 39,56 m e la velocità massima di servizio pari a 90 km/h.

L'impianto frenante è a comando pneumatico automatico continuo a depressione con distributori tipo U-1 e rubinetto autoregolatore tipo WU prodotti dalla Westinghouse, uguale a quello dell'ETR Fe220.

ETR 200 METROSTAR



Figura D 5: Treno ETR 200 METROSTAR

Il veicolo è articolato a tre casse con due articolazioni, con sei porte per fiancata ed è equipaggiato con un rodiggio composto da tre carrelli motore ed un carrello portante. La struttura cassa è realizzata in lega leggera con l'utilizzo della tecnologia dei grandi estrusi. Gli equipaggiamenti sono posti prevalentemente sottocassa. Il veicolo è equipaggiato con un moderno impianto di propulsione realizzato con la tecnologia a IGBT a ventilazione naturale con un inverter che controlla e alimenta ciascun carrello motore di tipo bimotorico; sono previsti due gruppi statici per l'alimentazione dei principali carichi in media tensione (380 Vac-220 Vac) e due gruppi statici per l'alimentazione dei carichi in bassa tensione (24 Vcc). L'impianto freno è di tipo pneumatico con un gruppo di produzione aria sistemato sotto la cassa centrale ed adotta il sistema frenante denominato EPAC prodotto dalla Faiveley Transport. Lo stesso gruppo di produzione aria alimenta l'impianto pneumatico per le sole sospensioni secondarie di ogni carrello e per le sabbie.

Tabella D 3: Scheda tecnica ETR 200 METROSTAR.

Sigla motrice (elettrotreno tre casse/quattro carrelli, rodiggio BoBo2Bo, motori asincroni trifase alimentati tramite inverter ad IGBT. In costruzione **ETR 200 METROSTAR** dall'A.T.I. AnsaldoBreda-Firema Trasporti)

Massa a vuoto	63 ton
Scartamento	950 mm
Lunghezza	40 m
Massimo numero di passeggeri (6p/m ²)	445/400
Velocità massima	120 km/h (Limitata a 90 km/h)
Numero assi	8
Rapporto di trasmissione	1/5,53
Diametro delle ruote (a nuovo)	760 mm
Numero di motori	6
Rendimento meccanico	0,97
Tensione nominale	1,5 kV cc
Corrente massima efficace	550 A
Corrente massima di picco	1150 A
Potenza nominale	170 kW
Tensione minima	1,0 kV cc
Potenza assorbita agli ausiliari (2 convertitori 1500 V cc/380 V ca - 24 V cc ciascuno da 65 kVA)	130 kVA
Scostamento % positivo nella tensione nominale	33%
Scostamento % negativo nella tensione nominale	33%

Appendice E – Livelli di qualità geometrica del binario stabiliti dalla norma UNI EN 13848-5

Di seguito si riportano i valori limite dei principali parametri geometrici della sovrastruttura ferroviaria significativi dal punto di vista della difettosità.

Le tabelle si riferiscono ai limiti di intervento ampiamente descritti nel Capitolo 5 e le numerazioni delle tabelle sono fedeli a quelle della norma, al fine di renderne più agevole la ricerca e la comparazione.

Table 2 — Track gauge – LAL – Isolated defects – Nominal track gauge to peak value

Speed (in km/h)	Nominal track gauge to peak value (in mm) <i>LAL</i>		Nominal track gauge to peak value (in mm) <i>HS INS TSI (reminder)</i>	
	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum
$V \leq 80$	-11	+35	-9	+35
$80 < V \leq 120$	-11	+35	-9	+35
$120 < V \leq 160$	-10	+35	-8	+35
$160 < V \leq 230$	-7	+28	-7	+28
$230 < V \leq 300$	-5	+28	-5	+28

Table 3 — Track gauge – *LAL* – Nominal track gauge to mean track gauge over 100 m

Speed (in km/h)	Nominal track gauge to mean track gauge over 100 m (in mm)	
	Minimum	Maximum
$V \leq 40$	N/A	+32
$40 < V \leq 80$	-8	+32
$80 < V \leq 120$	-7	+27
$120 < V \leq 160$	-5	+20
$160 < V \leq 230$	-5	+20
$230 < V \leq 300$	-3	+20

Table 4 — Gauge – *HS/INS TSI LAL* – Minimum value of mean gauge (mm) over 100 m in service, on straight track and in curves of radius $R > 10\,000$ m (reminder)

Speed (in km/h)	Minimum value of mean gauge (mm) over 100 m in service, on straight track and in curves of radius $R > 10\,000$ m
$V \leq 160$	1 430
$160 < V \leq 200$	1 430
$200 < V \leq 230$	1 432
$230 < V \leq 250$	1 433
$250 < V \leq 280$	1 434
$280 < V \leq 300$	1 434
$V > 300$	1 434

Table 5 — Longitudinal level – *LAL* – Isolated defects – Mean to peak value

Speed (in km/h)	Mean to peak value (in mm)	
	Wavelength range	
	<i>D1</i>	<i>D2</i>
$V \leq 80$	28	N/A
$80 < V \leq 120$	26	N/A
$120 < V \leq 160$	23	N/A
$160 < V \leq 230$	20	33
$230 < V \leq 300$	16	28

Table 6 — Alignment – IAL – Isolated defects – Mean to peak value

Speed (in km/h)	Mean to peak value (in mm)	
	Wavelength range	
	<i>D1</i>	<i>D2</i>
$V \leq 80$	22	N/A
$80 < V \leq 120$	17	N/A
$120 < V \leq 160$	14	N/A
$160 < V \leq 230$	12	24
$230 < V \leq 300$	10	20

Table 6 — Alignment – IAL – Isolated defects – Mean to peak value

Speed (in km/h)	Mean to peak value (in mm)	
	Wavelength range	
	<i>D1</i>	<i>D2</i>
$V \leq 80$	22	N/A
$80 < V \leq 120$	17	N/A
$120 < V \leq 160$	14	N/A
$160 < V \leq 230$	12	24
$230 < V \leq 300$	10	20

Table B.1 — Track gauge – *AL* & *IL* – Isolated defects – Nominal track gauge to peak value

Speed (In km/h)	Nominal track gauge to peak value (in mm) <i>AL</i>		Nominal track gauge to peak value (in mm) <i>IL</i>		Nominal track gauge to peak value (in mm) <i>IAL</i> (reminder)	
	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum
	$V \leq 80$	-7	+25	-9	+30	-11
$80 < V \leq 120$	-7	+25	-9	+30	-11	+35
$120 < V \leq 160$	-6	+25	-8	+30	-10	+35
$160 < V \leq 230$	-4	+20	-5	+23	-7	+28
$230 < V \leq 300$	-3	+20	-4	+23	-5	+28

Table B.2 — Track gauge – *AL* & *IL* – Nominal track gauge to mean track gauge over 100 m

Speed (In km/h)	nominal track gauge to mean track gauge over 100 m (in mm) <i>AL</i>		nominal track gauge to mean track gauge over 100 m (in mm) <i>IL</i>		nominal track gauge to mean track gauge over 100 m (in mm) <i>IAL</i> (reminder)	
	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum
	$V \leq 40$	N/A	+25	N/A	+28	N/A
$40 < V \leq 80$	-6	+25	-7	+28	-8	+32
$80 < V \leq 120$	-5	+22	-6	+25	-7	+27
$120 < V \leq 160$	-3	+16	-4	+18	-5	+20
$160 < V \leq 230$	-3	+16	-4	+18	-5	+20
$230 < V \leq 300$	-1	+16	-2	+18	-3	+20

Table B.3 — Longitudinal level – *AL* & *IL* – Isolated defects – Mean to peak value

Speed (In km/h)	Mean to peak value (in mm) <i>AL</i>		Mean to peak value (in mm) <i>IL</i>		Mean to peak value (in mm) <i>IAL</i> (reminder)	
	Wavelength range		Wavelength range		Wavelength range	
	<i>D1</i>	<i>D2</i>	<i>D1</i>	<i>D2</i>	<i>D1</i>	<i>D2</i>
	$V \leq 80$	12 to 18	N/A	17 to 21	N/A	28
$80 < V \leq 120$	10 to 16	N/A	13 to 19	N/A	26	N/A
$120 < V \leq 160$	8 to 15	N/A	10 to 17	N/A	23	N/A
$160 < V \leq 230$	7 to 12	14 to 20	9 to 14	18 to 23	20	33
$230 < V \leq 300$	6 to 10	12 to 18	8 to 12	16 to 20	16	28

Appendice F – Matrici di Probabilità di Transizione (TPM) calibrate mediante catene di Markov.

Si riportano di seguito le TPM calcolate per le linee oggetto di indagine.

- Napoli – S. Giorgio:

Vettore di probabilità iniziale e TPM per curva appartenente al Gruppo 1.

P_{ii}	
P_{11}	0.9866
P_{22}	0.8257
P_{33}	0.6291
P_{44}	0.3486
P_{55}	1.0000

P					P^2				
0.986619	0.013381	0.000000	0.000000	0.000000	0.973416	0.024252	0.002332	0.000000	0.000000
0.000000	0.825727	0.174273	0.000000	0.000000	0.000000	0.681825	0.253545	0.064630	0.000000
0.000000	0.000000	0.629146	0.370854	0.000000	0.000000	0.000000	0.395825	0.362602	0.241573
0.000000	0.000000	0.000000	0.348604	0.651396	0.000000	0.000000	0.000000	0.121525	0.878475
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P^3					P^4				
0.960391	0.033051	0.005694	0.000865	0.000000	0.947539	0.040142	0.009342	0.002413	0.000563
0.000000	0.563001	0.278341	0.116558	0.042100	0.000000	0.464885	0.273233	0.143856	0.118025
0.000000	0.000000	0.249032	0.273198	0.477770	0.000000	0.000000	0.156678	0.187592	0.655730
0.000000	0.000000	0.000000	0.042364	0.957636	0.000000	0.000000	0.000000	0.014768	0.985232
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P⁵					P⁶				
0.934860	0.045826	0.012873	0.004306	0.002135	0.922350	0.050350	0.016085	0.006275	0.004940
0.000000	0.383868	0.252921	0.151478	0.211733	0.000000	0.316970	0.226022	0.146603	0.310405
0.000000	0.000000	0.098573	0.123500	0.777927	0.000000	0.000000	0.062017	0.079609	0.858374
0.000000	0.000000	0.000000	0.005148	0.994852	0.000000	0.000000	0.000000	0.001795	0.998205
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000
P⁷					P⁸				
0.910008	0.053917	0.018895	0.008153	0.009027	0.897831	0.056698	0.021284	0.009849	0.014338
0.000000	0.261731	0.197440	0.134927	0.405901	0.000000	0.216118	0.169832	0.120258	0.493793
0.000000	0.000000	0.039018	0.050751	0.910231	0.000000	0.000000	0.024548	0.032162	0.943290
0.000000	0.000000	0.000000	0.000626	0.999374	0.000000	0.000000	0.000000	0.000218	0.999782
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000
P⁹					P¹⁰				
0.885816	0.058831	0.023272	0.011327	0.020754	0.873963	0.060432	0.024894	0.012579	0.028132
0.000000	0.178455	0.144513	0.104905	0.572128	0.000000	0.147355	0.122019	0.090163	0.640463
0.000000	0.000000	0.015444	0.020315	0.964240	0.000000	0.000000	0.009717	0.012810	0.977474
0.000000	0.000000	0.000000	0.000076	0.999924	0.000000	0.000000	0.000000	0.000027	0.999973
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000
P¹¹					P¹²				
0.862268	0.061595	0.026194	0.013617	0.036326	0.850730	0.062399	0.027214	0.014461	0.045196
0.000000	0.121675	0.102448	0.076683	0.699195	0.000000	0.100470	0.085659	0.064725	0.749145
0.000000	0.000000	0.006113	0.008069	0.985818	0.000000	0.000000	0.003846	0.005080	0.991074
0.000000	0.000000	0.000000	0.000009	0.999991	0.000000	0.000000	0.000000	0.000003	0.999997
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000
P¹³					P¹⁴				
0.839346	0.062909	0.027996	0.015134	0.054616	0.828114	0.063177	0.028577	0.015658	0.064474
0.000000	0.082961	0.071402	0.054331	0.791307	0.000000	0.068503	0.059380	0.045419	0.826698
0.000000	0.000000	0.002420	0.003197	0.994383	0.000000	0.000000	0.001522	0.002012	0.996466
0.000000	0.000000	0.000000	0.000001	0.999999	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000
P¹⁵					P¹⁶				
0.817033	0.063248	0.028989	0.016056	0.074673	0.806100	0.063159	0.029261	0.016348	0.085132
0.000000	0.056565	0.049297	0.037855	0.856284	0.000000	0.046707	0.040873	0.031478	0.880942
0.000000	0.000000	0.000958	0.001266	0.997776	0.000000	0.000000	0.000603	0.000797	0.998601
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P¹⁷					P¹⁸				
0.795313	0.062939	0.029416	0.016550	0.095781	0.784671	0.062613	0.029476	0.016679	0.106562
0.000000	0.038567	0.033855	0.026131	0.901447	0.000000	0.031846	0.028021	0.021665	0.918469
0.000000	0.000000	0.000379	0.000501	0.999120	0.000000	0.000000	0.000239	0.000315	0.999446
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P¹⁹					P²⁰				
0.774171	0.062201	0.029456	0.016745	0.117427	0.763811	0.061720	0.029372	0.016761	0.128335
0.000000	0.026296	0.023179	0.017944	0.932581	0.000000	0.021713	0.019166	0.014851	0.944269
0.000000	0.000000	0.000150	0.000198	0.999652	0.000000	0.000000	0.000094	0.000125	0.999781
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

Vettore di probabilità iniziale e TPM per curva appartenente al Gruppo 2.

P_{ii}	
P ₁₁	0.8418
P ₂₂	0.7381
P ₃₃	0.6026
P ₄₄	0.4026
P ₅₅	1.0000

P					P²				
0.841802	0.158198	0.000000	0.000000	0.000000	0.708631	0.249932	0.041438	0.000000	0.000000
0.000000	0.738065	0.261935	0.000000	0.000000	0.000000	0.544740	0.351164	0.104096	0.000000
0.000000	0.000000	0.602589	0.397411	0.000000	0.000000	0.000000	0.363113	0.399482	0.237405
0.000000	0.000000	0.000000	0.402622	0.597378	0.000000	0.000000	0.000000	0.162104	0.837896
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P³					P⁴				
0.596527	0.296570	0.090436	0.016468	0.000000	0.502157	0.313257	0.132177	0.042570	0.009837
0.000000	0.402054	0.354294	0.181468	0.062185	0.000000	0.296742	0.318805	0.213863	0.170590
0.000000	0.000000	0.218808	0.305145	0.476047	0.000000	0.000000	0.131851	0.209815	0.658334
0.000000	0.000000	0.000000	0.065267	0.934733	0.000000	0.000000	0.000000	0.026278	0.973722
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P⁵					P⁶				
0.422717	0.310645	0.161702	0.069669	0.035268	0.355844	0.296149	0.178808	0.092312	0.076887
0.000000	0.219015	0.269835	0.212803	0.298347	0.000000	0.161647	0.219967	0.192915	0.425471
0.000000	0.000000	0.079452	0.136875	0.783673	0.000000	0.000000	0.047877	0.086684	0.865439
0.000000	0.000000	0.000000	0.010580	0.989420	0.000000	0.000000	0.000000	0.004260	0.995740
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P⁷					P⁸				
0.299550	0.274871	0.185319	0.108227	0.132032	0.252162	0.250261	0.183670	0.117223	0.196685
0.000000	0.119306	0.174891	0.165089	0.540714	0.000000	0.088056	0.136638	0.135972	0.639334
0.000000	0.000000	0.028850	0.053928	0.917222	0.000000	0.000000	0.017385	0.033178	0.949438
0.000000	0.000000	0.000000	0.001715	0.998285	0.000000	0.000000	0.000000	0.000691	0.999309
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000
P⁹					P¹⁰				
0.212270	0.224600	0.176229	0.120189	0.266711	0.178690	0.199351	0.165024	0.118426	0.338509
0.000000	0.064991	0.105401	0.109047	0.720561	0.000000	0.047968	0.080537	0.085792	0.785703
0.000000	0.000000	0.010476	0.020267	0.969257	0.000000	0.000000	0.006313	0.012323	0.981364
0.000000	0.000000	0.000000	0.000278	0.999722	0.000000	0.000000	0.000000	0.000112	0.999888
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000
P¹¹					P¹²				
0.150421	0.175402	0.151659	0.113264	0.409254	0.126625	0.153255	0.137332	0.105873	0.476916
0.000000	0.035403	0.061095	0.066548	0.836954	0.000000	0.026130	0.046088	0.051074	0.876708
0.000000	0.000000	0.003804	0.007470	0.988726	0.000000	0.000000	0.002292	0.004519	0.993188
0.000000	0.000000	0.000000	0.000045	0.999955	0.000000	0.000000	0.000000	0.000018	0.999982
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000
P¹³					P¹⁴				
0.106593	0.133144	0.122897	0.097204	0.540162	0.089730	0.115132	0.108931	0.087977	0.598230
0.000000	0.019286	0.034617	0.038879	0.907218	0.000000	0.014234	0.025911	0.029411	0.930444
0.000000	0.000000	0.001381	0.002731	0.995888	0.000000	0.000000	0.000832	0.001648	0.997519
0.000000	0.000000	0.000000	0.000007	0.999993	0.000000	0.000000	0.000000	0.000003	0.999997
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000
P¹⁵					P¹⁶				
0.075535	0.099170	0.095798	0.078712	0.650785	0.063586	0.085143	0.083703	0.069762	0.697806
0.000000	0.010506	0.019342	0.022139	0.948013	0.000000	0.007754	0.014407	0.016600	0.961239
0.000000	0.000000	0.000502	0.000994	0.998504	0.000000	0.000000	0.000302	0.000600	0.999098
0.000000	0.000000	0.000000	0.000001	0.999999	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000
P¹⁷					P¹⁸				
0.053527	0.072900	0.072740	0.061352	0.739481	0.045059	0.062273	0.062928	0.053610	0.776131
0.000000	0.005723	0.010713	0.012409	0.971155	0.000000	0.004224	0.007954	0.009254	0.978568
0.000000	0.000000	0.000182	0.000362	0.999456	0.000000	0.000000	0.000110	0.000218	0.999672
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P^{19}					P^{20}				
0.037931	0.053090	0.054231	0.046592	0.808156	0.031930	0.045184	0.046585	0.040311	0.835990
0.000000	0.003117	0.005900	0.006887	0.984096	0.000000	0.002301	0.004372	0.005117	0.988210
0.000000	0.000000	0.000066	0.000131	0.999803	0.000000	0.000000	0.000040	0.000079	0.999881
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

Vettore di probabilità iniziale e TPM per curva appartenente al Gruppo 3.

P_{ii}	
P_{11}	0.9432
P_{22}	0.7937
P_{33}	0.6089
P_{44}	0.3405
P_{55}	1.0000

P					P^2				
0.943186	0.056814	0.000000	0.000000	0.000000	0.889599	0.098678	0.011723	0.000000	0.000000
0.000000	0.793665	0.206335	0.000000	0.000000	0.000000	0.629904	0.289408	0.080688	0.000000
0.000000	0.000000	0.608944	0.391056	0.000000	0.000000	0.000000	0.370813	0.371286	0.257901
0.000000	0.000000	0.000000	0.340501	0.659499	0.000000	0.000000	0.000000	0.115941	0.884059
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P^3					P^4				
0.839057	0.128859	0.027499	0.004584	0.000000	0.791387	0.149942	0.043334	0.012315	0.003023
0.000000	0.499933	0.306204	0.140649	0.053214	0.000000	0.396779	0.289615	0.167634	0.145972
0.000000	0.000000	0.225805	0.271432	0.502763	0.000000	0.000000	0.137503	0.180725	0.681772
0.000000	0.000000	0.000000	0.039478	0.960522	0.000000	0.000000	0.000000	0.013442	0.986558
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P^5					P^6				
0.746424	0.163966	0.057326	0.021139	0.011145	0.704017	0.172541	0.068740	0.029616	0.025086
0.000000	0.314909	0.258229	0.170335	0.256526	0.000000	0.249933	0.222224	0.158981	0.368862
0.000000	0.000000	0.083731	0.115308	0.800960	0.000000	0.000000	0.050988	0.072006	0.877006
0.000000	0.000000	0.000000	0.004577	0.995423	0.000000	0.000000	0.000000	0.001559	0.998441
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P^7					P^8				
0.664019	0.176938	0.077460	0.036965	0.044617	0.626293	0.178155	0.083678	0.042878	0.068996
0.000000	0.198363	0.186892	0.141035	0.473710	0.000000	0.157434	0.154736	0.121108	0.566723
0.000000	0.000000	0.031049	0.044457	0.924494	0.000000	0.000000	0.018907	0.027280	0.953813
0.000000	0.000000	0.000000	0.000531	0.999469	0.000000	0.000000	0.000000	0.000181	0.999819
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P⁹					P¹⁰				
0.590710	0.176978	0.087715	0.047323	0.097274	0.557149	0.174022	0.089930	0.050415	0.128483
0.000000	0.124949	0.126710	0.101748	0.646593	0.000000	0.099168	0.102941	0.084196	0.713696
0.000000	0.000000	0.011513	0.016682	0.971804	0.000000	0.000000	0.007011	0.010183	0.982806
0.000000	0.000000	0.000000	0.000062	0.999938	0.000000	0.000000	0.000000	0.000021	0.999979
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P¹¹					P¹²				
0.525495	0.169769	0.090669	0.052334	0.161732	0.495640	0.164596	0.090242	0.053277	0.196246
0.000000	0.078706	0.083147	0.068924	0.769223	0.000000	0.062466	0.066872	0.055984	0.814678
0.000000	0.000000	0.004269	0.006209	0.989522	0.000000	0.000000	0.002600	0.003784	0.993617
0.000000	0.000000	0.000000	0.000007	0.999993	0.000000	0.000000	0.000000	0.000002	0.999998
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P¹³					P¹⁴				
0.467480	0.158793	0.088914	0.053430	0.231382	0.440921	0.152588	0.086908	0.052964	0.266619
0.000000	0.049577	0.053610	0.045213	0.851599	0.000000	0.039348	0.042875	0.036360	0.881417
0.000000	0.000000	0.001583	0.002305	0.996112	0.000000	0.000000	0.000964	0.001404	0.997632
0.000000	0.000000	0.000000	0.000001	0.999999	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P¹⁵					P¹⁶				
0.415870	0.146155	0.084407	0.052020	0.301548	0.392243	0.139625	0.081556	0.050721	0.335856
0.000000	0.031229	0.034227	0.029147	0.905397	0.000000	0.024785	0.027286	0.023309	0.924619
0.000000	0.000000	0.000587	0.000855	0.998558	0.000000	0.000000	0.000357	0.000521	0.999122
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P¹⁷					P¹⁸				
0.369958	0.133101	0.078473	0.049163	0.369306	0.348939	0.126656	0.075249	0.047427	0.401729
0.000000	0.019671	0.021730	0.018607	0.939992	0.000000	0.015612	0.017291	0.014833	0.952263
0.000000	0.000000	0.000218	0.000317	0.999465	0.000000	0.000000	0.000133	0.000193	0.999674
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P¹⁹					P²⁰				
0.329114	0.120347	0.071956	0.045576	0.433007	0.310416	0.114214	0.068649	0.043657	0.463064
0.000000	0.012391	0.013751	0.011813	0.962046	0.000000	0.009834	0.010930	0.009400	0.969836
0.000000	0.000000	0.000081	0.000118	0.999802	0.000000	0.000000	0.000049	0.000072	0.999879
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

▪ Napoli – Sorrento:

Vettore di probabilità iniziale e TPM per curva appartenente al Gruppo 3.

P_{ii}

P ₁₁	0.9927
P ₂₂	0.8097
P ₃₃	0.7297
P ₄₄	0.6231
P ₅₅	1.0000

P

0.992733	0.007267	0.000000	0.000000	0.000000
0.000000	0.809671	0.190329	0.000000	0.000000
0.000000	0.000000	0.729682	0.270318	0.000000
0.000000	0.000000	0.000000	0.623131	0.376869
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P²

0.985520	0.013097	0.001383	0.000000	0.000000
0.000000	0.655567	0.292984	0.051449	0.000000
0.000000	0.000000	0.532436	0.365689	0.101874
0.000000	0.000000	0.000000	0.388292	0.611708
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P³

0.978358	0.017766	0.003502	0.000374	0.000000
0.000000	0.530793	0.338559	0.111258	0.019390
0.000000	0.000000	0.388509	0.371799	0.239692
0.000000	0.000000	0.000000	0.241956	0.758044
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P⁴

0.971249	0.021494	0.005937	0.001180	0.000141
0.000000	0.429768	0.348066	0.160847	0.061320
0.000000	0.000000	0.283488	0.336700	0.379811
0.000000	0.000000	0.000000	0.150770	0.849230
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P⁵

0.964191	0.024461	0.008423	0.002340	0.000585
0.000000	0.347970	0.335775	0.194317	0.121938
0.000000	0.000000	0.206856	0.286440	0.506703
0.000000	0.000000	0.000000	0.093950	0.906050
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P⁶

0.957185	0.026811	0.010802	0.003735	0.001467
0.000000	0.281741	0.311238	0.211851	0.195170
0.000000	0.000000	0.150939	0.234407	0.614654
0.000000	0.000000	0.000000	0.058543	0.941457
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P⁷

0.950229	0.028664	0.012985	0.005247	0.002875
0.000000	0.228118	0.280728	0.216144	0.275010
0.000000	0.000000	0.110138	0.186868	0.702995
0.000000	0.000000	0.000000	0.036480	0.963520
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P⁸

0.943325	0.030113	0.014930	0.006780	0.004852
0.000000	0.184700	0.248260	0.210572	0.356468
0.000000	0.000000	0.080366	0.146215	0.773419
0.000000	0.000000	0.000000	0.022732	0.977268
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P⁹

0.936470	0.031237	0.016626	0.008261	0.007407
0.000000	0.149546	0.216305	0.198323	0.435826
0.000000	0.000000	0.058641	0.112835	0.828523
0.000000	0.000000	0.000000	0.014165	0.985835
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P¹⁰

0.929665	0.032096	0.018077	0.009642	0.010521
0.000000	0.121083	0.186297	0.182052	0.510568
0.000000	0.000000	0.042790	0.086163	0.871047
0.000000	0.000000	0.000000	0.008827	0.991173
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P ¹¹					P ¹²				
0.922909	0.032743	0.019299	0.010894	0.014154	0.916203	0.033217	0.020314	0.012006	0.018260
0.000000	0.098038	0.158983	0.163801	0.579178	0.000000	0.079378	0.134667	0.145046	0.640909
0.000000	0.000000	0.031223	0.065258	0.903520	0.000000	0.000000	0.022783	0.049104	0.928113
0.000000	0.000000	0.000000	0.005500	0.994500	0.000000	0.000000	0.000000	0.003427	0.996573
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P ¹³					P ¹⁴				
0.909545	0.033553	0.021145	0.012972	0.022784	0.902936	0.033776	0.021815	0.013799	0.027673
0.000000	0.064270	0.113372	0.126785	0.695573	0.000000	0.052038	0.094958	0.109650	0.743354
0.000000	0.000000	0.016624	0.036757	0.946619	0.000000	0.000000	0.012130	0.027398	0.960472
0.000000	0.000000	0.000000	0.002136	0.997864	0.000000	0.000000	0.000000	0.001331	0.998669
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P ¹⁵					P ¹⁶				
0.896375	0.033909	0.022347	0.014496	0.032874	0.889861	0.033968	0.022760	0.015074	0.038337
0.000000	0.042133	0.079193	0.093995	0.784678	0.000000	0.034114	0.065805	0.079979	0.820102
0.000000	0.000000	0.008851	0.020352	0.970797	0.000000	0.000000	0.006459	0.015074	0.978467
0.000000	0.000000	0.000000	0.000829	0.999171	0.000000	0.000000	0.000000	0.000517	0.999483
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P ¹⁷					P ¹⁸				
0.883395	0.033970	0.023073	0.015545	0.044018	0.876976	0.033923	0.023301	0.015924	0.049876
0.000000	0.027621	0.054510	0.067625	0.850243	0.000000	0.022364	0.045032	0.056874	0.875729
0.000000	0.000000	0.004713	0.011139	0.984148	0.000000	0.000000	0.003439	0.008215	0.988346
0.000000	0.000000	0.000000	0.000322	0.999678	0.000000	0.000000	0.000000	0.000201	0.999799
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P ¹⁹					P ²⁰				
0.870603	0.033839	0.023459	0.016221	0.055877	0.864277	0.033725	0.023558	0.016449	0.061991
0.000000	0.018108	0.037116	0.047613	0.897164	0.000000	0.014661	0.030529	0.039702	0.915108
0.000000	0.000000	0.002509	0.006049	0.991442	0.000000	0.000000	0.001831	0.004447	0.993722
0.000000	0.000000	0.000000	0.000125	0.999875	0.000000	0.000000	0.000000	0.000078	0.999922
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

Vettore di probabilità iniziale e TPM per curva di transizione L=33 m.

P _{ii}	
P ₁₁	0.9965
P ₂₂	0.8647
P ₃₃	0.7504
P ₄₄	0.6297
P ₅₅	1.0000

P					P ²				
0.996487	0.003513	0.000000	0.000000	0.000000	0.992987	0.006538	0.000475	0.000000	0.000000
0.000000	0.864714	0.135286	0.000000	0.000000	0.000000	0.747730	0.218503	0.033766	0.000000
0.000000	0.000000	0.750408	0.249592	0.000000	0.000000	0.000000	0.563113	0.344455	0.092433
0.000000	0.000000	0.000000	0.629664	0.370336	0.000000	0.000000	0.000000	0.396477	0.603523
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P ³					P ⁴				
0.989498	0.009142	0.001241	0.000119	0.000000	0.986023	0.011381	0.002168	0.000384	0.000044
0.000000	0.646573	0.265124	0.075798	0.012505	0.000000	0.559101	0.286424	0.113900	0.040576
0.000000	0.000000	0.422564	0.357439	0.219997	0.000000	0.000000	0.317096	0.330535	0.352369
0.000000	0.000000	0.000000	0.249648	0.750352	0.000000	0.000000	0.000000	0.157194	0.842806
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P ⁵					P ⁶				
0.982559	0.013305	0.003167	0.000783	0.000186	0.979107	0.014957	0.004176	0.001284	0.000476
0.000000	0.483462	0.290573	0.143208	0.082757	0.000000	0.418057	0.283454	0.162697	0.135792
0.000000	0.000000	0.237951	0.287271	0.474778	0.000000	0.000000	0.178561	0.240275	0.581164
0.000000	0.000000	0.000000	0.098980	0.901020	0.000000	0.000000	0.000000	0.062324	0.937676
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P ⁷					P ⁸				
0.975668	0.016373	0.005157	0.001851	0.000952	0.972240	0.017585	0.006085	0.002452	0.001637
0.000000	0.361499	0.269264	0.173193	0.196044	0.000000	0.312594	0.250963	0.176259	0.260184
0.000000	0.000000	0.133993	0.195860	0.670147	0.000000	0.000000	0.100550	0.156770	0.742681
0.000000	0.000000	0.000000	0.039243	0.960757	0.000000	0.000000	0.000000	0.024710	0.975290
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P ⁹					P ¹⁰				
0.968825	0.018621	0.006945	0.003063	0.002545	0.965422	0.019505	0.007731	0.003662	0.003680
0.000000	0.270304	0.230615	0.173622	0.325459	0.000000	0.233736	0.209623	0.166883	0.389757
0.000000	0.000000	0.075453	0.123809	0.800738	0.000000	0.000000	0.056621	0.096790	0.846589
0.000000	0.000000	0.000000	0.015559	0.984441	0.000000	0.000000	0.000000	0.009797	0.990203
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P ¹¹					P ¹²				
0.962030	0.020258	0.008440	0.004236	0.005036	0.958651	0.020897	0.009074	0.004774	0.006604
0.000000	0.202115	0.188924	0.157401	0.451560	0.000000	0.174771	0.169114	0.146264	0.509851
0.000000	0.000000	0.042489	0.075078	0.882434	0.000000	0.000000	0.031884	0.057879	0.910238
0.000000	0.000000	0.000000	0.006169	0.993831	0.000000	0.000000	0.000000	0.003884	0.996116
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P¹³					P¹⁴				
0.955283	0.021437	0.009636	0.005271	0.008372	0.951928	0.021893	0.010131	0.005724	0.010324
0.000000	0.151127	0.150548	0.134306	0.564018	0.000000	0.130682	0.133418	0.122144	0.613756
0.000000	0.000000	0.023926	0.044402	0.931672	0.000000	0.000000	0.017954	0.033930	0.948116
0.000000	0.000000	0.000000	0.002446	0.997554	0.000000	0.000000	0.000000	0.001540	0.998460
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P¹⁵					P¹⁶				
0.948584	0.022275	0.010565	0.006133	0.012444	0.945251	0.022594	0.010941	0.006498	0.014715
0.000000	0.113002	0.117798	0.110210	0.658991	0.000000	0.097715	0.103684	0.098796	0.699805
0.000000	0.000000	0.013473	0.025846	0.960681	0.000000	0.000000	0.010110	0.019637	0.970253
0.000000	0.000000	0.000000	0.000970	0.999030	0.000000	0.000000	0.000000	0.000611	0.999389
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P¹⁷					P¹⁸				
0.941931	0.022858	0.011267	0.006823	0.017122	0.938622	0.023074	0.011547	0.007108	0.019648
0.000000	0.084495	0.091025	0.088087	0.736393	0.000000	0.073064	0.079737	0.078184	0.769015
0.000000	0.000000	0.007587	0.014888	0.977525	0.000000	0.000000	0.005693	0.011268	0.983039
0.000000	0.000000	0.000000	0.000384	0.999616	0.000000	0.000000	0.000000	0.000242	0.999758
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P¹⁹					P²⁰				
0.935325	0.023250	0.011787	0.007358	0.022281	0.932039	0.023390	0.011990	0.007575	0.025006
0.000000	0.063180	0.069720	0.069132	0.797969	0.000000	0.054632	0.060866	0.060931	0.823571
0.000000	0.000000	0.004272	0.008516	0.987212	0.000000	0.000000	0.003206	0.006429	0.990365
0.000000	0.000000	0.000000	0.000152	0.999848	0.000000	0.000000	0.000000	0.000096	0.999904
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

Vettore di probabilità iniziale e TPM per curva di transizione L=133 m.

P_{ii}	
P ₁₁	0.9637
P ₂₂	0.7589
P ₃₃	0.7091
P ₄₄	0.6162
P ₅₅	1.0000

P					P²				
0.963670	0.036330	0.000000	0.000000	0.000000	0.928660	0.062580	0.008759	0.000000	0.000000
0.000000	0.758894	0.241106	0.000000	0.000000	0.000000	0.575919	0.353954	0.070126	0.000000
0.000000	0.000000	0.709147	0.290853	0.000000	0.000000	0.000000	0.502890	0.385469	0.111641
0.000000	0.000000	0.000000	0.616161	0.383839	0.000000	0.000000	0.000000	0.379654	0.620346
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P³					P⁴				
0.894923	0.081230	0.021300	0.002548	0.000000	0.862410	0.094157	0.034690	0.007765	0.000978
0.000000	0.437061	0.389864	0.146158	0.026917	0.000000	0.331683	0.381849	0.203449	0.083018
0.000000	0.000000	0.356623	0.383778	0.259599	0.000000	0.000000	0.252899	0.340194	0.406908
0.000000	0.000000	0.000000	0.233928	0.766072	0.000000	0.000000	0.000000	0.144137	0.855863
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P⁵					P⁶				
0.831079	0.102786	0.047302	0.014874	0.003958	0.800886	0.108197	0.058327	0.022923	0.009668
0.000000	0.251712	0.350758	0.236419	0.161110	0.000000	0.191023	0.309429	0.247691	0.251857
0.000000	0.000000	0.179342	0.283170	0.537487	0.000000	0.000000	0.127180	0.226641	0.646179
0.000000	0.000000	0.000000	0.088812	0.911188	0.000000	0.000000	0.000000	0.054722	0.945278
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P⁷					P⁸				
0.771790	0.111206	0.067449	0.031089	0.018466	0.743751	0.112432	0.074644	0.038773	0.030399
0.000000	0.144966	0.265487	0.242616	0.346931	0.000000	0.110014	0.223222	0.226708	0.440056
0.000000	0.000000	0.090190	0.176638	0.733173	0.000000	0.000000	0.063958	0.135069	0.800973
0.000000	0.000000	0.000000	0.033718	0.966282	0.000000	0.000000	0.000000	0.020776	0.979224
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P⁹					P¹⁰				
0.716731	0.112344	0.080042	0.045601	0.045282	0.690693	0.111296	0.083848	0.051378	0.062785
0.000000	0.083489	0.184822	0.204613	0.527076	0.000000	0.063359	0.151196	0.179831	0.605614
0.000000	0.000000	0.045355	0.101827	0.852818	0.000000	0.000000	0.032164	0.075933	0.891903
0.000000	0.000000	0.000000	0.012801	0.987199	0.000000	0.000000	0.000000	0.007888	0.992112
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P¹¹					P¹²				
0.665600	0.109554	0.086295	0.056044	0.082506	0.641419	0.107321	0.087610	0.059631	0.104018
0.000000	0.048083	0.122497	0.154780	0.674640	0.000000	0.036490	0.098461	0.130998	0.734051
0.000000	0.000000	0.022809	0.056142	0.921049	0.000000	0.000000	0.016175	0.041226	0.942599
0.000000	0.000000	0.000000	0.004860	0.995140	0.000000	0.000000	0.000000	0.002995	0.997005
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P¹³					P¹⁴				
0.618116	0.104748	0.088004	0.062224	0.126907	0.595660	0.101948	0.087663	0.063936	0.150791
0.000000	0.027692	0.078621	0.109354	0.784333	0.000000	0.021015	0.062431	0.090247	0.826307
0.000000	0.000000	0.011470	0.030107	0.958423	0.000000	0.000000	0.008134	0.021887	0.969979
0.000000	0.000000	0.000000	0.001845	0.998155	0.000000	0.000000	0.000000	0.001137	0.998863
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P¹⁵					P¹⁶				
0.574020	0.099008	0.086747	0.064892	0.175333	0.553166	0.095991	0.085388	0.065215	0.200241
0.000000	0.015948	0.049340	0.073765	0.860948	0.000000	0.012103	0.038834	0.059801	0.889261
0.000000	0.000000	0.005768	0.015852	0.978380	0.000000	0.000000	0.004091	0.011445	0.984465
0.000000	0.000000	0.000000	0.000701	0.999299	0.000000	0.000000	0.000000	0.000432	0.999568
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000
P¹⁷					P¹⁸				
0.533070	0.092943	0.083696	0.065018	0.225273	0.513704	0.089900	0.081762	0.064405	0.250229
0.000000	0.009185	0.030457	0.048142	0.912215	0.000000	0.006970	0.023813	0.038522	0.930694
0.000000	0.000000	0.002901	0.008242	0.988858	0.000000	0.000000	0.002057	0.005922	0.992021
0.000000	0.000000	0.000000	0.000266	0.999734	0.000000	0.000000	0.000000	0.000164	0.999836
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000
P¹⁹					P²⁰				
0.495041	0.086887	0.079657	0.063464	0.274950	0.477056	0.083923	0.077438	0.062273	0.299310
0.000000	0.005290	0.018568	0.030662	0.945481	0.000000	0.004014	0.014443	0.024293	0.957250
0.000000	0.000000	0.001459	0.004247	0.994294	0.000000	0.000000	0.001035	0.003041	0.995924
0.000000	0.000000	0.000000	0.000101	0.999899	0.000000	0.000000	0.000000	0.000062	0.999938
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

Vettore di probabilità iniziale e TPM per curva di transizione L=60 m.

P_{ii}	
P ₁₁	0.9431
P ₂₂	0.7866
P ₃₃	0.5831
P ₄₄	0.5543
P ₅₅	1.0000

P					P²				
0.943095	0.056905	0.000000	0.000000	0.000000	0.889427	0.098430	0.012142	0.000000	0.000000
0.000000	0.786625	0.213375	0.000000	0.000000	0.000000	0.618779	0.292260	0.088960	0.000000
0.000000	0.000000	0.583080	0.416920	0.000000	0.000000	0.000000	0.339982	0.474176	0.185842
0.000000	0.000000	0.000000	0.554250	0.445750	0.000000	0.000000	0.000000	0.307193	0.692807
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000
P³					P⁴				
0.838814	0.128041	0.028082	0.005062	0.000000	0.791081	0.148453	0.043695	0.014514	0.002257
0.000000	0.486748	0.302443	0.171155	0.039654	0.000000	0.382888	0.280208	0.220957	0.115946
0.000000	0.000000	0.198237	0.404557	0.397206	0.000000	0.000000	0.115588	0.306875	0.577537
0.000000	0.000000	0.000000	0.170262	0.829738	0.000000	0.000000	0.000000	0.094368	0.905632
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P⁵					P⁶				
0.746064	0.161794	0.057154	0.026262	0.008726	0.703609	0.169726	0.067848	0.038384	0.020432
0.000000	0.301189	0.245082	0.239290	0.214438	0.000000	0.236923	0.207169	0.234806	0.321102
0.000000	0.000000	0.067397	0.218276	0.714327	0.000000	0.000000	0.039298	0.149079	0.811623
0.000000	0.000000	0.000000	0.052303	0.947697	0.000000	0.000000	0.000000	0.028989	0.971011
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P⁷					P⁸				
0.663570	0.173550	0.075776	0.049562	0.037542	0.625809	0.174280	0.081215	0.059062	0.059634
0.000000	0.186370	0.171349	0.216514	0.425767	0.000000	0.146603	0.139677	0.191442	0.522278
0.000000	0.000000	0.022914	0.099011	0.878075	0.000000	0.000000	0.013361	0.064430	0.922209
0.000000	0.000000	0.000000	0.016067	0.983933	0.000000	0.000000	0.000000	0.008905	0.991095
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P⁹					P¹⁰				
0.590197	0.172705	0.084542	0.066595	0.085961	0.556612	0.169439	0.086145	0.072158	0.115646
0.000000	0.115322	0.112724	0.164341	0.607613	0.000000	0.090715	0.090334	0.138083	0.680868
0.000000	0.000000	0.007790	0.041281	0.950929	0.000000	0.000000	0.004542	0.026128	0.969330
0.000000	0.000000	0.000000	0.004936	0.995064	0.000000	0.000000	0.000000	0.002736	0.997264
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P¹¹					P¹²				
0.524938	0.164960	0.086384	0.075909	0.147810	0.495066	0.159633	0.085567	0.078088	0.181646
0.000000	0.071359	0.072028	0.114195	0.742418	0.000000	0.056133	0.057224	0.093322	0.793321
0.000000	0.000000	0.002649	0.016375	0.980976	0.000000	0.000000	0.001544	0.010180	0.988276
0.000000	0.000000	0.000000	0.001516	0.998484	0.000000	0.000000	0.000000	0.000840	0.999160
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P¹³					P¹⁴				
0.466894	0.153743	0.083954	0.078955	0.216454	0.440325	0.147507	0.081757	0.078763	0.251648
0.000000	0.044155	0.045344	0.075582	0.834919	0.000000	0.034734	0.035861	0.060796	0.868610
0.000000	0.000000	0.000900	0.006286	0.992813	0.000000	0.000000	0.000525	0.003860	0.995615
0.000000	0.000000	0.000000	0.000466	0.999534	0.000000	0.000000	0.000000	0.000258	0.999742
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P¹⁵					P¹⁶				
0.415268	0.141090	0.079145	0.077740	0.286757	0.391637	0.134616	0.076253	0.076085	0.321409
0.000000	0.027322	0.028321	0.048647	0.895710	0.000000	0.021492	0.022343	0.038770	0.917394
0.000000	0.000000	0.000306	0.002358	0.997336	0.000000	0.000000	0.000179	0.001435	0.998387
0.000000	0.000000	0.000000	0.000143	0.999857	0.000000	0.000000	0.000000	0.000079	0.999921
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P ¹⁷					P ¹⁸				
0.369351	0.128179	0.073185	0.073961	0.355324	0.348333	0.121847	0.070023	0.071505	0.388292
0.000000	0.016907	0.017614	0.030804	0.934676	0.000000	0.013299	0.013878	0.024417	0.948407
0.000000	0.000000	0.000104	0.000870	0.999026	0.000000	0.000000	0.000061	0.000525	0.999414
0.000000	0.000000	0.000000	0.000044	0.999956	0.000000	0.000000	0.000000	0.000024	0.999976
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P ¹⁹					P ²⁰				
0.328511	0.115670	0.066828	0.068826	0.420166	0.309817	0.109683	0.063647	0.066009	0.450845
0.000000	0.010461	0.010930	0.019319	0.959290	0.000000	0.008229	0.008605	0.015264	0.967902
0.000000	0.000000	0.000035	0.000316	0.999648	0.000000	0.000000	0.000021	0.000190	0.999789
0.000000	0.000000	0.000000	0.000014	0.999986	0.000000	0.000000	0.000000	0.000007	0.999993
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

▪ Napoli – Sarno:

Vettore di probabilità iniziale e TPM per curva appartenente al Gruppo 1.

P _{ii}	
P ₁₁	0.1477
P ₂₂	0.2816
P ₃₃	0.2390
P ₄₄	0.0969
P ₅₅	1.0000

P					P ²				
0.147709	0.852291	0.000000	0.000000	0.000000	0.021818	0.365907	0.612276	0.000000	0.000000
0.000000	0.281612	0.718388	0.000000	0.000000	0.000000	0.079306	0.373987	0.546707	0.000000
0.000000	0.000000	0.238980	0.761020	0.000000	0.000000	0.000000	0.057111	0.255631	0.687258
0.000000	0.000000	0.000000	0.096925	0.903075	0.000000	0.000000	0.000000	0.009395	0.990605
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P ³					P ⁴				
0.003223	0.121639	0.409184	0.465954	0.000000	0.000476	0.037002	0.185171	0.356560	0.420791
0.000000	0.022333	0.146348	0.337601	0.493718	0.000000	0.006289	0.051018	0.144096	0.798597
0.000000	0.000000	0.013648	0.068240	0.918111	0.000000	0.000000	0.003262	0.017001	0.979737
0.000000	0.000000	0.000000	0.000911	0.999089	0.000000	0.000000	0.000000	0.000088	0.999912
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P ⁵					P ⁶				
0.000070	0.010826	0.070834	0.175478	0.742792	0.000010	0.003109	0.024705	0.070914	0.901262
0.000000	0.001771	0.016711	0.052792	0.928726	0.000000	0.000499	0.005266	0.017834	0.976401
0.000000	0.000000	0.000779	0.004130	0.995090	0.000000	0.000000	0.000186	0.000994	0.998820
0.000000	0.000000	0.000000	0.000009	0.999991	0.000000	0.000000	0.000000	0.000001	0.999999
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P ⁷					P ⁸				
0.000002	0.000884	0.008137	0.025674	0.965303	0.000000	0.000250	0.002580	0.008681	0.988489
0.000000	0.000140	0.001617	0.005736	0.992507	0.000000	0.000040	0.000487	0.001786	0.997687
0.000000	0.000000	0.000045	0.000238	0.999717	0.000000	0.000000	0.000011	0.000057	0.999932
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P ⁹					P ¹⁰				
0.000000	0.000071	0.000796	0.002805	0.996328	0.000000	0.000020	0.000241	0.000878	0.998861
0.000000	0.000011	0.000145	0.000544	0.999300	0.000000	0.000003	0.000043	0.000163	0.999791
0.000000	0.000000	0.000003	0.000014	0.999984	0.000000	0.000000	0.000001	0.000003	0.999996
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P ¹¹					P ¹²				
0.000000	0.000006	0.000072	0.000269	0.999654	0.000000	0.000002	0.000021	0.000081	0.999896
0.000000	0.000001	0.000012	0.000048	0.999938	0.000000	0.000000	0.000004	0.000014	0.999982
0.000000	0.000000	0.000000	0.000001	0.999999	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P ¹³					P ¹⁴				
0.000000	0.000000	0.000006	0.000024	0.999969	0.000000	0.000000	0.000002	0.000007	0.999991
0.000000	0.000000	0.000001	0.000004	0.999995	0.000000	0.000000	0.000000	0.000001	0.999998
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P ¹⁵					P ¹⁶				
0.000000	0.000000	0.000001	0.000002	0.999997	0.000000	0.000000	0.000000	0.000001	0.999999
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P ¹⁷					P ¹⁸				
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P^{19}					P^{20}				
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

Vettore di probabilità iniziale e TPM per curva di transizione L=60 m.

P_{ii}	
P_{11}	0.2432
P_{22}	0.2209
P_{33}	0.1392
P_{44}	0.0276
P_{55}	1.0000

P					P^2				
0.243223	0.756777	0.000000	0.000000	0.000000	0.059158	0.351212	0.589630	0.000000	0.000000
0.000000	0.220866	0.779134	0.000000	0.000000	0.000000	0.048782	0.280568	0.670650	0.000000
0.000000	0.000000	0.139236	0.860764	0.000000	0.000000	0.000000	0.019387	0.143607	0.837006
0.000000	0.000000	0.000000	0.027600	0.972400	0.000000	0.000000	0.000000	0.000762	0.999238
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P^3					P^4				
0.014389	0.122340	0.355739	0.507532	0.000000	0.000350	0.037910	0.144851	0.320215	0.493524
0.000000	0.010774	0.077073	0.260013	0.652140	0.000000	0.002380	0.019126	0.073518	0.904976
0.000000	0.000000	0.002699	0.020651	0.976650	0.000000	0.000000	0.000376	0.002893	0.996731
0.000000	0.000000	0.000000	0.000021	0.999979	0.000000	0.000000	0.000000	0.000001	0.999999
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P^5					P^6				
0.000851	0.011021	0.049705	0.133521	0.804902	0.000207	0.003078	0.015508	0.046470	0.934737
0.000000	0.000526	0.004517	0.018492	0.976465	0.000000	0.000116	0.001038	0.004399	0.994447
0.000000	0.000000	0.000052	0.000403	0.999544	0.000000	0.000000	0.000007	0.000056	0.999937
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P^7					P^8				
0.000050	0.000837	0.004558	0.014631	0.979924	0.000012	0.000223	0.001286	0.004327	0.994151
0.000000	0.000026	0.000235	0.001015	0.998724	0.000000	0.000006	0.000053	0.000230	0.999711
0.000000	0.000000	0.000001	0.000008	0.999991	0.000000	0.000000	0.000000	0.000001	0.999999
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

▪ Napoli – Baiano:

Vettore di probabilità iniziale e TPM per curva appartenente al Gruppo 1.

P_{ii}

P ₁₁	0.7998
P ₂₂	0.7593
P ₃₃	0.6720
P ₄₄	0.5307
P ₅₅	1.0000

P

0.799828	0.200172	0.000000	0.000000	0.000000
0.000000	0.759343	0.240657	0.000000	0.000000
0.000000	0.000000	0.671984	0.328016	0.000000
0.000000	0.000000	0.000000	0.530742	0.469258
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P²

0.639724	0.312103	0.048173	0.000000	0.000000
0.000000	0.576603	0.344458	0.078939	0.000000
0.000000	0.000000	0.451562	0.394514	0.153924
0.000000	0.000000	0.000000	0.281688	0.718312
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P³

0.511669	0.365049	0.107481	0.015801	0.000000
0.000000	0.437839	0.370234	0.154884	0.037043
0.000000	0.000000	0.303443	0.357505	0.339053
0.000000	0.000000	0.000000	0.149504	0.850496
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P⁴

0.409247	0.379619	0.160077	0.043642	0.007415
0.000000	0.332470	0.354160	0.203646	0.109723
0.000000	0.000000	0.203908	0.289277	0.506814
0.000000	0.000000	0.000000	0.079348	0.920652
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P⁵

0.327327	0.370181	0.198927	0.075670	0.027894
0.000000	0.252459	0.318001	0.224254	0.205286
0.000000	0.000000	0.137023	0.220417	0.642560
0.000000	0.000000	0.000000	0.042113	0.957887
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P⁶

0.261805	0.346617	0.222762	0.105413	0.063403
0.000000	0.191703	0.274447	0.223330	0.310519
0.000000	0.000000	0.092077	0.161930	0.745992
0.000000	0.000000	0.000000	0.022351	0.977649
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P⁷

0.209399	0.315607	0.233108	0.129017	0.112869
0.000000	0.145569	0.230559	0.208554	0.415318
0.000000	0.000000	0.061875	0.116146	0.821979
0.000000	0.000000	0.000000	0.011863	0.988137
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P⁸

0.167483	0.281570	0.232598	0.144938	0.173411
0.000000	0.110537	0.189964	0.186316	0.513184
0.000000	0.000000	0.041579	0.081940	0.876482
0.000000	0.000000	0.000000	0.006296	0.993704
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P⁹

0.133958	0.247334	0.224064	0.153221	0.241424
0.000000	0.083935	0.154254	0.161197	0.600614
0.000000	0.000000	0.027940	0.057127	0.914933
0.000000	0.000000	0.000000	0.003342	0.996658
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P¹⁰

0.107143	0.214626	0.210090	0.154817	0.313324
0.000000	0.063736	0.123856	0.136152	0.676257
0.000000	0.000000	0.018775	0.039485	0.941740
0.000000	0.000000	0.000000	0.001774	0.998226
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P¹¹					P¹²				
0.085696	0.184422	0.192828	0.151081	0.385973	0.068542	0.157194	0.173960	0.143436	0.456869
0.000000	0.048397	0.098567	0.112888	0.740147	0.000000	0.036750	0.077883	0.092246	0.793121
0.000000	0.000000	0.012617	0.027115	0.960268	0.000000	0.000000	0.008478	0.018529	0.972992
0.000000	0.000000	0.000000	0.000941	0.999059	0.000000	0.000000	0.000000	0.000500	0.999500
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P¹³					P¹⁴				
0.054822	0.133084	0.154728	0.133189	0.524177	0.043848	0.112030	0.136002	0.121442	0.586677
0.000000	0.027906	0.061180	0.074506	0.836408	0.000000	0.021190	0.047828	0.059612	0.871370
0.000000	0.000000	0.005697	0.012615	0.981687	0.000000	0.000000	0.003828	0.008564	0.987607
0.000000	0.000000	0.000000	0.000265	0.999735	0.000000	0.000000	0.000000	0.000141	0.999859
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P¹⁵					P¹⁶				
0.035071	0.093847	0.118352	0.109065	0.643665	0.028051	0.078282	0.102115	0.096707	0.694845
0.000000	0.016091	0.037239	0.047327	0.899344	0.000000	0.012218	0.028896	0.037333	0.921552
0.000000	0.000000	0.002573	0.005801	0.991626	0.000000	0.000000	0.001729	0.003923	0.994348
0.000000	0.000000	0.000000	0.000075	0.999925	0.000000	0.000000	0.000000	0.000040	0.999960
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P¹⁷					P¹⁸				
0.022436	0.065058	0.087459	0.084822	0.740225	0.017945	0.053892	0.074428	0.073707	0.780029
0.000000	0.009278	0.022358	0.029293	0.939071	0.000000	0.007045	0.017257	0.022881	0.952817
0.000000	0.000000	0.001162	0.002649	0.996189	0.000000	0.000000	0.000781	0.001787	0.997432
0.000000	0.000000	0.000000	0.000021	0.999979	0.000000	0.000000	0.000000	0.000011	0.999989
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P¹⁹					P²⁰				
0.014353	0.044515	0.062984	0.063533	0.814616	0.011480	0.036675	0.053037	0.054379	0.844429
0.000000	0.005350	0.013292	0.017804	0.963554	0.000000	0.004062	0.010219	0.013810	0.971909
0.000000	0.000000	0.000525	0.001205	0.998271	0.000000	0.000000	0.000353	0.000811	0.998836
0.000000	0.000000	0.000000	0.000006	0.999994	0.000000	0.000000	0.000000	0.000003	0.999997
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

Vettore di probabilità iniziale e TPM per curva appartenente al Gruppo 2.

P_{ii}	
P ₁₁	0.8773
P ₂₂	0.8394
P ₃₃	0.7427
P ₄₄	0.6242
P ₅₅	1.0000

P					P²				
0.877253	0.122747	0.000000	0.000000	0.000000	0.769572	0.210718	0.019710	0.000000	0.000000
0.000000	0.839423	0.160577	0.000000	0.000000	0.000000	0.704631	0.254050	0.041319	0.000000
0.000000	0.000000	0.742684	0.257316	0.000000	0.000000	0.000000	0.551579	0.351712	0.096709
0.000000	0.000000	0.000000	0.624163	0.375837	0.000000	0.000000	0.000000	0.389579	0.610421
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000
P³					P⁴				
0.675109	0.271344	0.048475	0.005072	0.000000	0.592241	0.310641	0.079573	0.015639	0.001906
0.000000	0.591484	0.301826	0.091161	0.015529	0.000000	0.496505	0.319140	0.134564	0.049791
0.000000	0.000000	0.409649	0.361456	0.228895	0.000000	0.000000	0.304240	0.331017	0.364744
0.000000	0.000000	0.000000	0.243161	0.756839	0.000000	0.000000	0.000000	0.151772	0.848228
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000
P⁵					P⁶				
0.519545	0.333455	0.108979	0.030237	0.007784	0.455772	0.343683	0.134482	0.046915	0.019148
0.000000	0.416778	0.316747	0.166110	0.100365	0.000000	0.349853	0.302168	0.185184	0.162795
0.000000	0.000000	0.225954	0.284894	0.489152	0.000000	0.000000	0.167812	0.235962	0.596226
0.000000	0.000000	0.000000	0.094731	0.905269	0.000000	0.000000	0.000000	0.059127	0.940873
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000
P⁷					P⁸				
0.399827	0.344440	0.155065	0.063887	0.036780	0.350750	0.338209	0.170474	0.079777	0.060791
0.000000	0.293675	0.280594	0.193338	0.232394	0.000000	0.246517	0.255550	0.192875	0.305057
0.000000	0.000000	0.124632	0.190460	0.684909	0.000000	0.000000	0.092562	0.150948	0.756491
0.000000	0.000000	0.000000	0.036905	0.963095	0.000000	0.000000	0.000000	0.023035	0.976965
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000
P⁹					P¹⁰				
0.307696	0.326954	0.180916	0.093659	0.090774	0.269927	0.312222	0.186865	0.105011	0.125975
0.000000	0.206932	0.229378	0.186143	0.377547	0.000000	0.173704	0.203584	0.175206	0.447506
0.000000	0.000000	0.068744	0.118033	0.813222	0.000000	0.000000	0.051055	0.091361	0.857584
0.000000	0.000000	0.000000	0.014377	0.985623	0.000000	0.000000	0.000000	0.008974	0.991026
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000
P¹¹					P¹²				
0.236794	0.295219	0.188917	0.113628	0.165442	0.207728	0.276879	0.187711	0.119534	0.208148
0.000000	0.145811	0.179091	0.161742	0.513355	0.000000	0.122397	0.156422	0.147037	0.574144
0.000000	0.000000	0.037918	0.070162	0.891921	0.000000	0.000000	0.028161	0.053549	0.918290
0.000000	0.000000	0.000000	0.005601	0.994399	0.000000	0.000000	0.000000	0.003496	0.996504
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P¹³					P¹⁴				
0.182230	0.257917	0.183870	0.122909	0.253073	0.159862	0.238870	0.177973	0.124028	0.299267
0.000000	0.102743	0.135826	0.132025	0.629406	0.000000	0.086245	0.117374	0.117355	0.679026
0.000000	0.000000	0.020915	0.040670	0.938416	0.000000	0.000000	0.015533	0.030766	0.953701
0.000000	0.000000	0.000000	0.002182	0.997818	0.000000	0.000000	0.000000	0.001362	0.998638
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P¹⁵					P¹⁶				
0.140239	0.220136	0.170535	0.123209	0.345881	0.123025	0.202001	0.162002	0.120784	0.392188
0.000000	0.072396	0.101021	0.103451	0.723132	0.000000	0.060771	0.086652	0.090565	0.762013
0.000000	0.000000	0.011536	0.023200	0.965264	0.000000	0.000000	0.008568	0.017449	0.973983
0.000000	0.000000	0.000000	0.000850	0.999150	0.000000	0.000000	0.000000	0.000531	0.999469
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P¹⁷					P¹⁸				
0.107924	0.184665	0.152753	0.117075	0.437583	0.094677	0.168260	0.143100	0.112379	0.481584
0.000000	0.051012	0.074113	0.078824	0.796050	0.000000	0.042821	0.063234	0.068269	0.825675
0.000000	0.000000	0.006363	0.013096	0.980541	0.000000	0.000000	0.004726	0.009811	0.985463
0.000000	0.000000	0.000000	0.000331	0.999669	0.000000	0.000000	0.000000	0.000207	0.999793
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P¹⁹					P²⁰				
0.083055	0.152862	0.133297	0.106965	0.523820	0.072861	0.138511	0.123544	0.101063	0.564022
0.000000	0.035945	0.053839	0.058882	0.851334	0.000000	0.030173	0.045757	0.050606	0.873464
0.000000	0.000000	0.003510	0.007340	0.989150	0.000000	0.000000	0.002607	0.005484	0.991909
0.000000	0.000000	0.000000	0.000129	0.999871	0.000000	0.000000	0.000000	0.000081	0.999919
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

Vettore di probabilità iniziale e TPM per curva di transizione L=99 m.

P_{ii}	
P ₁₁	0.8637
P ₂₂	0.8256
P ₃₃	0.7326
P ₄₄	0.6187
P ₅₅	1.0000

P					P²				
0.863702	0.136298	0.000000	0.000000	0.000000	0.745980	0.230255	0.023765	0.000000	0.000000
0.000000	0.825639	0.174361	0.000000	0.000000	0.000000	0.681680	0.271701	0.046620	0.000000
0.000000	0.000000	0.732625	0.267375	0.000000	0.000000	0.000000	0.536740	0.361297	0.101963
0.000000	0.000000	0.000000	0.618650	0.381350	0.000000	0.000000	0.000000	0.382728	0.617272
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P³					P⁴				
0.644304	0.291783	0.057558	0.006354	0.000000	0.556487	0.328725	0.093044	0.019321	0.002423
0.000000	0.562821	0.317913	0.101487	0.017778	0.000000	0.464687	0.331045	0.147787	0.056481
0.000000	0.000000	0.393229	0.367027	0.239744	0.000000	0.000000	0.288090	0.332201	0.379709
0.000000	0.000000	0.000000	0.236775	0.763225	0.000000	0.000000	0.000000	0.146481	0.853519
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P⁵					P⁶				
0.480638	0.347257	0.125483	0.036830	0.009791	0.415128	0.352219	0.152480	0.056336	0.023836
0.000000	0.383664	0.323556	0.179941	0.112839	0.000000	0.316768	0.303941	0.197831	0.181460
0.000000	0.000000	0.211062	0.282544	0.506394	0.000000	0.000000	0.154629	0.231228	0.614142
0.000000	0.000000	0.000000	0.090620	0.909380	0.000000	0.000000	0.000000	0.056062	0.943938
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P⁷					P⁸				
0.358547	0.347387	0.173124	0.075622	0.045320	0.309677	0.335686	0.187406	0.093072	0.074159
0.000000	0.261536	0.277907	0.203654	0.256903	0.000000	0.215934	0.249203	0.200296	0.334566
0.000000	0.000000	0.113285	0.184393	0.702321	0.000000	0.000000	0.082996	0.144365	0.772640
0.000000	0.000000	0.000000	0.034683	0.965317	0.000000	0.000000	0.000000	0.021457	0.978543
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P⁹					P¹⁰				
0.267469	0.319364	0.195829	0.107687	0.109652	0.231013	0.300135	0.199154	0.118980	0.150718
0.000000	0.178284	0.220223	0.190544	0.410949	0.000000	0.147198	0.192427	0.176762	0.483613
0.000000	0.000000	0.060805	0.111502	0.827693	0.000000	0.000000	0.044547	0.085238	0.870214
0.000000	0.000000	0.000000	0.013274	0.986726	0.000000	0.000000	0.000000	0.008212	0.991788
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P¹¹					P¹²				
0.199526	0.279290	0.198237	0.126856	0.196091	0.172331	0.257788	0.193931	0.131483	0.244468
0.000000	0.121532	0.166642	0.160804	0.551021	0.000000	0.100342	0.143277	0.144037	0.612344
0.000000	0.000000	0.032636	0.064644	0.902720	0.000000	0.000000	0.023910	0.048718	0.927372
0.000000	0.000000	0.000000	0.005080	0.994920	0.000000	0.000000	0.000000	0.003143	0.996857
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

P¹³					P¹⁴				
0.148843	0.236328	0.187027	0.133194	0.294609	0.128556	0.215409	0.178227	0.132407	0.345402
0.000000	0.082846	0.122464	0.127417	0.667272	0.000000	0.068401	0.104165	0.111570	0.715863
0.000000	0.000000	0.017517	0.036532	0.945950	0.000000	0.000000	0.012834	0.027284	0.959882
0.000000	0.000000	0.000000	0.001944	0.998056	0.000000	0.000000	0.000000	0.001203	0.998797
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

p¹⁵					p¹⁶				
0.111034	0.195372	0.168132	0.129567	0.395895	0.095900	0.176440	0.157243	0.125111	0.445306
0.000000	0.056475	0.088241	0.096874	0.758410	0.000000	0.046628	0.074494	0.083525	0.795353
0.000000	0.000000	0.009402	0.020311	0.970287	0.000000	0.000000	0.006888	0.015079	0.978032
0.000000	0.000000	0.000000	0.000744	0.999256	0.000000	0.000000	0.000000	0.000460	0.999540
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

p¹⁷					p¹⁸				
0.082829	0.158747	0.145965	0.119443	0.493017	0.071540	0.142357	0.134617	0.112920	0.538566
0.000000	0.038498	0.062706	0.071590	0.827206	0.000000	0.031785	0.052653	0.061056	0.854507
0.000000	0.000000	0.005047	0.011171	0.983783	0.000000	0.000000	0.003697	0.008260	0.988043
0.000000	0.000000	0.000000	0.000285	0.999715	0.000000	0.000000	0.000000	0.000176	0.999824
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

p¹⁹					p²⁰				
0.061789	0.127286	0.123445	0.105851	0.581628	0.053367	0.113514	0.112633	0.098491	0.621995
0.000000	0.026243	0.044117	0.051850	0.877790	0.000000	0.021667	0.036897	0.043873	0.897563
0.000000	0.000000	0.002709	0.006099	0.991193	0.000000	0.000000	0.001984	0.004497	0.993518
0.000000	0.000000	0.000000	0.000109	0.999891	0.000000	0.000000	0.000000	0.000067	0.999933
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	1.000000

Appendice G – Power Spectral Density function (PSD) calibrate per la linea Napoli – Baiano.

- Rettifilo 57 (2009 2012 2014) Dispari

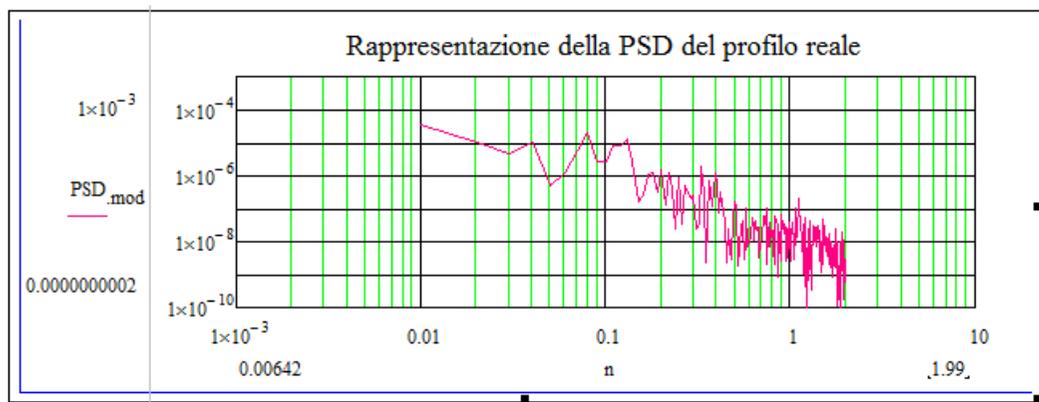


Figura G 1: PSD rettifilo 57anno 2009 Napoli – Baiano.

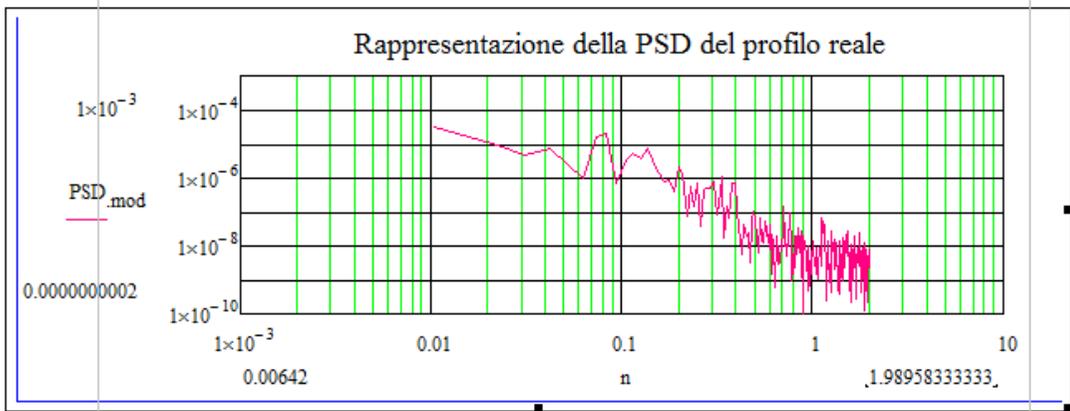


Figura G 2: PSD rettifilo 57 anno 2012 Napoli – Baiano.

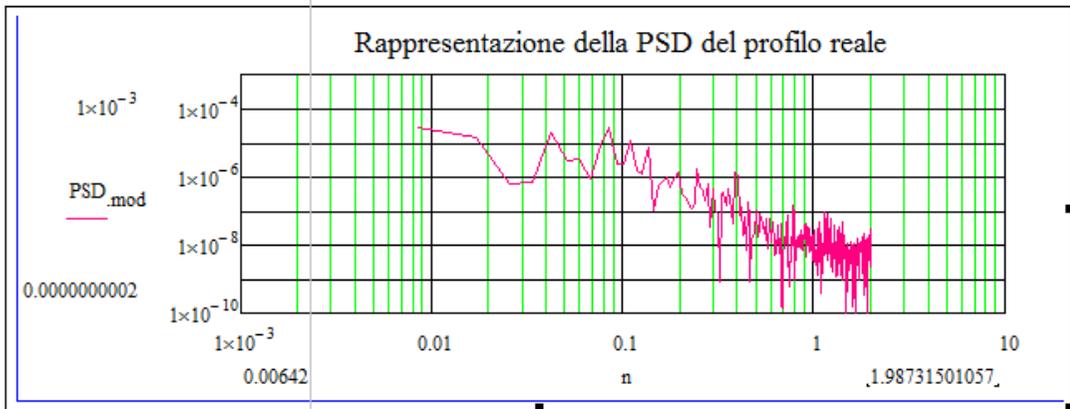


Figura G 3: PSD rettifilo 57 anno 2014 Napoli – Baiano.

Tabella G 1: Densità spettrale di potenza –Smoothed.

Psd Smoothed lineare					
a=-17.658372		a=-18.124784		a=-17.846964	
b=-1.433133		b=-1.542513		b=-1.460901	
R ² =0.837602		R ² =0.841297		R ² =0.878593	
N	2009	N	2012	N	2014
0.010025	1.57E-05	0.010444	1.53E-05	0.008493	1.88E-05
0.02005	5.81E-06	0.020888	5.25E-06	0.016985	6.84E-06
0.030075	3.25E-06	0.031332	2.81E-06	0.025478	3.78E-06
0.0401	2.15E-06	0.041775	1.80E-06	0.03397	2.49E-06
0.050125	1.56E-06	0.052219	1.28E-06	0.042463	1.79E-06
0.06015	1.20E-06	0.062663	9.64E-07	0.050955	1.37E-06
0.070175	9.65E-07	0.073107	7.60E-07	0.059448	1.10E-06
0.080201	7.97E-07	0.083551	6.19E-07	0.067941	9.03E-07

0.090226	6.73E-07	0.093995	5.16E-07	0.076433	7.60E-07
0.100251	5.79E-07	0.104439	4.39E-07	0.084926	6.52E-07
0.110276	5.05E-07	0.114883	3.79E-07	0.093418	5.67E-07
0.120301	4.46E-07	0.125326	3.31E-07	0.101911	4.99E-07
0.130326	3.98E-07	0.13577	2.93E-07	0.110403	4.44E-07
0.140351	3.58E-07	0.146214	2.61E-07	0.118896	3.99E-07
0.150376	3.24E-07	0.156658	2.35E-07	0.127389	3.61E-07
0.160401	2.95E-07	0.167102	2.12E-07	0.135881	3.28E-07
0.170426	2.71E-07	0.177546	1.93E-07	0.144374	3.00E-07
0.180451	2.49E-07	0.18799	1.77E-07	0.152866	2.76E-07
0.190476	2.31E-07	0.198433	1.63E-07	0.161359	2.55E-07
0.200501	2.14E-07	0.208877	1.51E-07	0.169851	2.37E-07
0.210526	2.00E-07	0.219321	1.40E-07	0.178344	2.21E-07
0.220551	1.87E-07	0.229765	1.30E-07	0.186837	2.06E-07
0.230576	1.76E-07	0.240209	1.21E-07	0.195329	1.93E-07
0.240602	1.65E-07	0.250653	1.14E-07	0.203822	1.81E-07
0.250627	1.56E-07	0.261097	1.07E-07	0.212314	1.71E-07
0.260652	1.47E-07	0.27154	1.00E-07	0.220807	1.61E-07
0.270677	1.40E-07	0.281984	9.47E-08	0.229299	1.53E-07
0.280702	1.32E-07	0.292428	8.96E-08	0.237792	1.45E-07
0.290727	1.26E-07	0.302872	8.49E-08	0.246285	1.38E-07
0.300752	1.20E-07	0.313316	8.05E-08	0.254777	1.31E-07
0.310777	1.14E-07	0.32376	7.66E-08	0.26327	1.25E-07
0.320802	1.09E-07	0.334204	7.29E-08	0.271762	1.19E-07
0.330827	1.05E-07	0.344648	6.95E-08	0.280255	1.14E-07
0.340852	1.00E-07	0.355091	6.64E-08	0.288747	1.09E-07
0.350877	9.61E-08	0.365535	6.35E-08	0.29724	1.05E-07
0.360902	9.23E-08	0.375979	6.08E-08	0.305732	1.00E-07
0.370927	8.88E-08	0.386423	5.83E-08	0.314225	9.64E-08
0.380952	8.55E-08	0.396867	5.59E-08	0.322718	9.27E-08
0.390977	8.23E-08	0.407311	5.37E-08	0.33121	8.93E-08
0.401003	7.94E-08	0.417755	5.17E-08	0.339703	8.60E-08
0.411028	7.66E-08	0.428198	4.97E-08	0.348195	8.30E-08
0.421053	7.40E-08	0.438642	4.79E-08	0.356688	8.01E-08
0.431078	7.16E-08	0.449086	4.62E-08	0.36518	7.74E-08
0.441103	6.93E-08	0.45953	4.46E-08	0.373673	7.48E-08
0.451128	6.71E-08	0.469974	4.31E-08	0.382166	7.24E-08

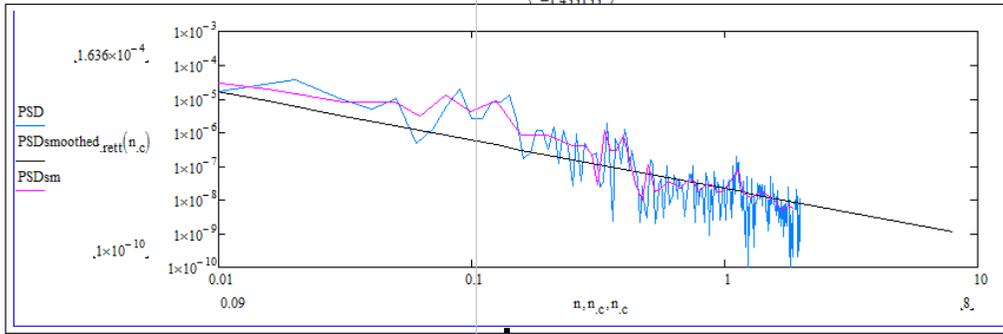


Figura G 4: PSD – smoothed rettifilo 57 anno 2009 Napoli – Baiano.

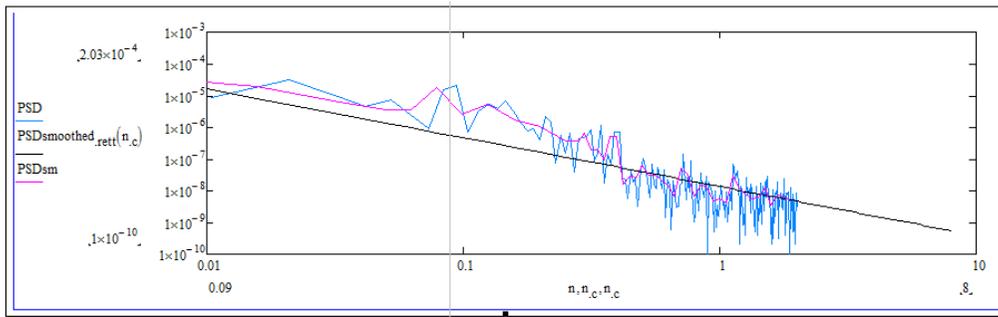


Figura G 5: PSD – smoothed rettifilo 57 anno 2012 Napoli – Baiano.

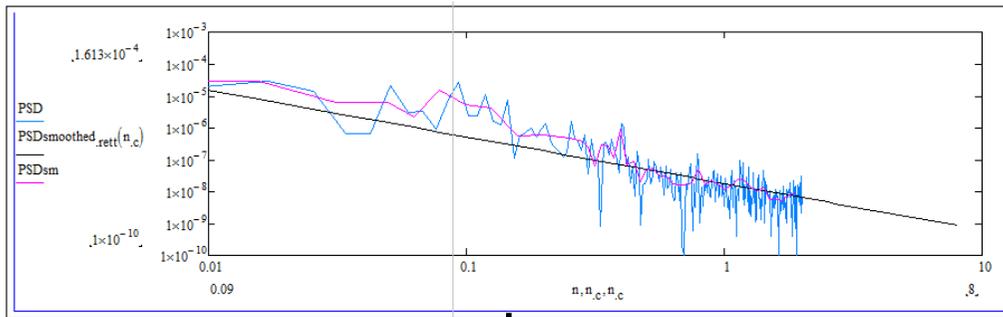


Figura G 6: PSD – smoothed rettifilo 57 anno 2014 Napoli – Baiano.

Tabella G 2: Coefficiente di correlazione

- Rettifilo 57 (2009 2012 2014) Pari

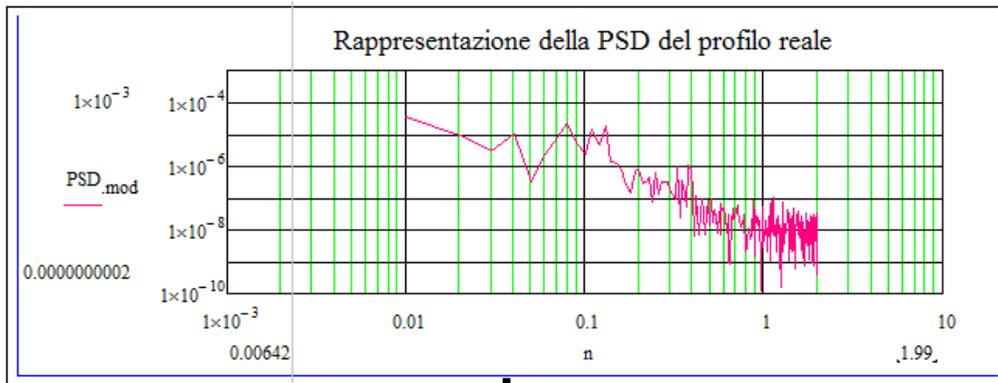


Figura G 7: PSD rettifilo 57 anno 2009 Baiano - Napoli.

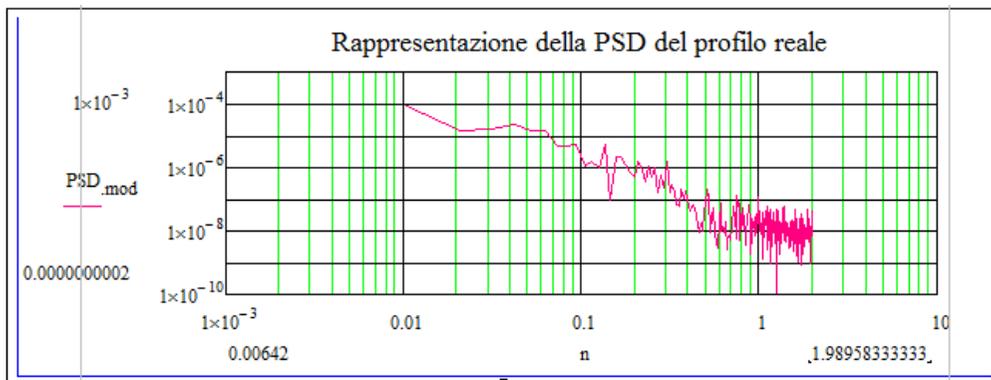


Figura G 8: PSD rettifilo 57 anno 2012 Baiano – Napoli.

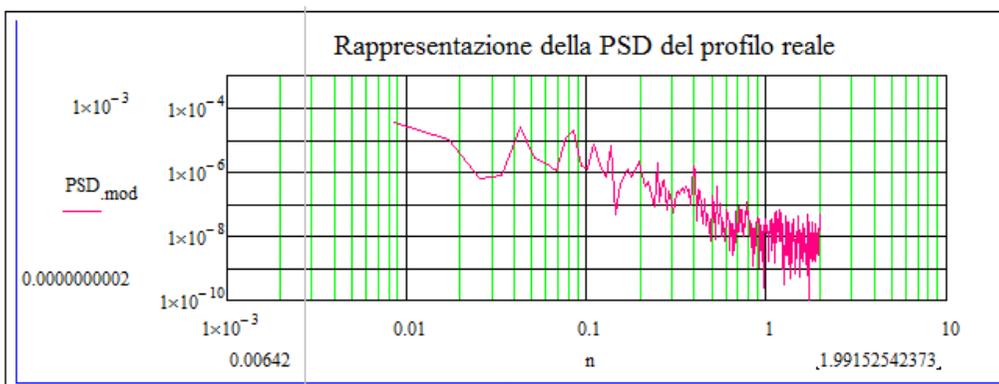


Figura G 9: PSD rettifilo 57 anno 2012 Baiano - Napoli.

Tabella G 3: Densità spettrale di potenza –Smoothed.

Psd Smoothed lineare					
a=-17.676153		a=-17.701478		a=-17.61107	
b=-1.426086		b=-1.539948		b=-1.418146	
R ² =0.854639		R ² =0.908562		R ² =0.888013	
N	2009	N	2012	N	2014
0.010025	1.49E-05	0.010444	2.31E-05	0.008493	1.94E-05
0.02005	5.55E-06	0.020888	7.94E-06	0.016985	7.27E-06
0.030075	3.12E-06	0.031332	4.25E-06	0.025478	4.09E-06
0.0401	2.07E-06	0.041775	2.73E-06	0.03397	2.72E-06
0.050125	1.50E-06	0.052219	1.94E-06	0.042463	1.98E-06
0.06015	1.16E-06	0.062663	1.46E-06	0.050955	1.53E-06
0.070175	9.31E-07	0.073107	1.15E-06	0.059448	1.23E-06
0.080201	7.69E-07	0.083551	9.39E-07	0.067941	1.02E-06
0.090226	6.50E-07	0.093995	7.83E-07	0.076433	8.62E-07
0.100251	5.60E-07	0.104439	6.66E-07	0.084926	7.42E-07
0.110276	4.89E-07	0.114883	5.75E-07	0.093418	6.48E-07
0.120301	4.32E-07	0.125326	5.03E-07	0.101911	5.73E-07
0.130326	3.85E-07	0.13577	4.44E-07	0.110403	5.11E-07
0.140351	3.46E-07	0.146214	3.97E-07	0.118896	4.60E-07
0.150376	3.14E-07	0.156658	3.57E-07	0.127389	4.18E-07
0.160401	2.86E-07	0.167102	3.23E-07	0.135881	3.81E-07
0.170426	2.63E-07	0.177546	2.94E-07	0.144374	3.50E-07
0.180451	2.42E-07	0.18799	2.69E-07	0.152866	3.22E-07
0.190476	2.24E-07	0.198433	2.48E-07	0.161359	2.99E-07
0.200501	2.08E-07	0.208877	2.29E-07	0.169851	2.78E-07
0.210526	1.94E-07	0.219321	2.12E-07	0.178344	2.59E-07
0.220551	1.82E-07	0.229765	1.98E-07	0.186837	2.43E-07
0.230576	1.71E-07	0.240209	1.85E-07	0.195329	2.28E-07
0.240602	1.61E-07	0.250653	1.73E-07	0.203822	2.14E-07
0.250627	1.52E-07	0.261097	1.62E-07	0.212314	2.02E-07
0.260652	1.43E-07	0.27154	1.53E-07	0.220807	1.91E-07
0.270677	1.36E-07	0.281984	1.44E-07	0.229299	1.81E-07
0.280702	1.29E-07	0.292428	1.36E-07	0.237792	1.72E-07
0.290727	1.23E-07	0.302872	1.29E-07	0.246285	1.64E-07
0.300752	1.17E-07	0.313316	1.23E-07	0.254777	1.56E-07
0.310777	1.12E-07	0.32376	1.17E-07	0.26327	1.49E-07

0.320802	1.07E-07	0.334204	1.11E-07	0.271762	1.43E-07
0.330827	1.02E-07	0.344648	1.06E-07	0.280255	1.37E-07
0.340852	9.77E-08	0.355091	1.01E-07	0.288747	1.31E-07
0.350877	9.38E-08	0.365535	9.67E-08	0.29724	1.26E-07
0.360902	9.01E-08	0.375979	9.26E-08	0.305732	1.21E-07
0.370927	8.66E-08	0.386423	8.88E-08	0.314225	1.16E-07
0.380952	8.34E-08	0.396867	8.52E-08	0.322718	1.12E-07
0.390977	8.03E-08	0.407311	8.19E-08	0.33121	1.08E-07
0.401003	7.75E-08	0.417755	7.87E-08	0.339703	1.04E-07
0.411028	7.48E-08	0.428198	7.58E-08	0.348195	1.00E-07
0.421053	7.23E-08	0.438642	7.30E-08	0.356688	9.69E-08
0.431078	6.99E-08	0.449086	7.04E-08	0.36518	9.38E-08
0.441103	6.76E-08	0.45953	6.80E-08	0.373673	9.08E-08
0.451128	6.55E-08	0.469974	6.57E-08	0.382166	8.79E-08

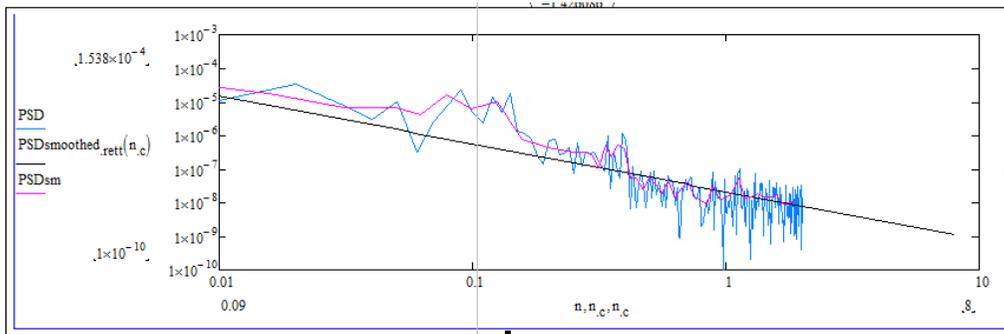


Figura G 10: PSD Smoothed rettifilo 57 anno 2009 Baiano - Napoli.

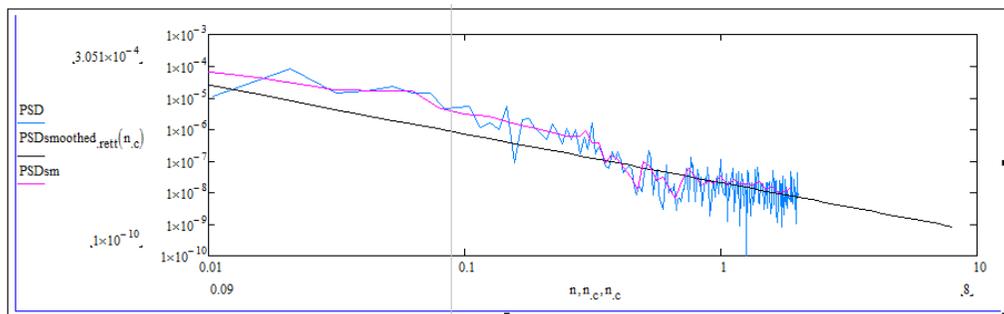


Figura G 11: PSD Smoothed rettifilo 57 anno 2012 Baiano - Napoli.

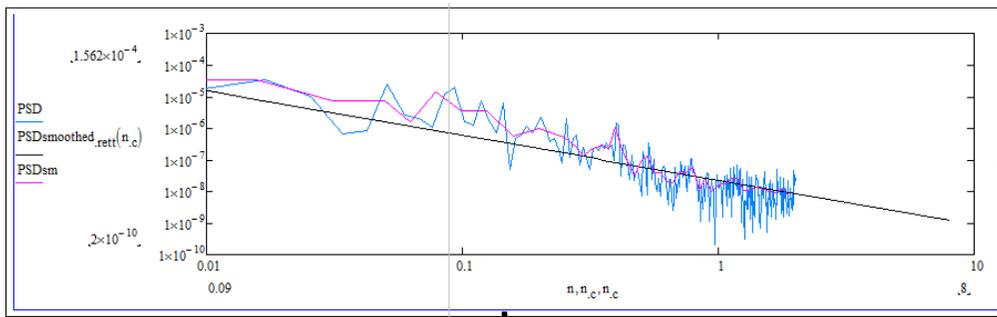
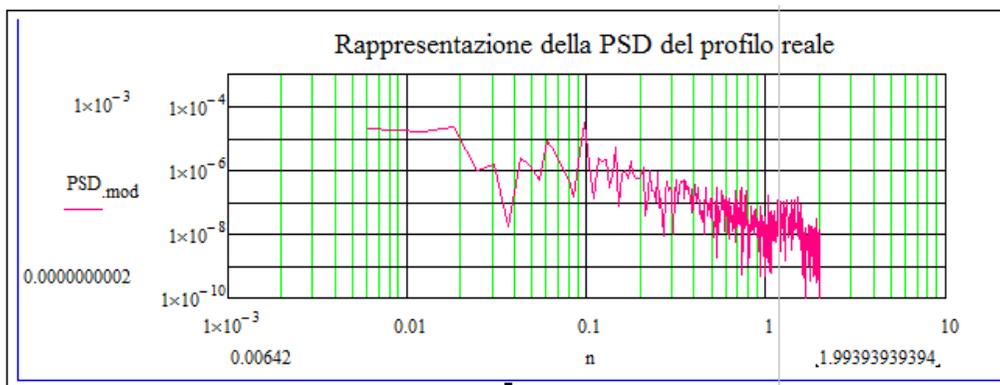


Figura G 12: PSD Smoothed rettifilo 57 anno 2014 Baiano - Napoli.

Tabella G 4: Coefficiente di correlazione



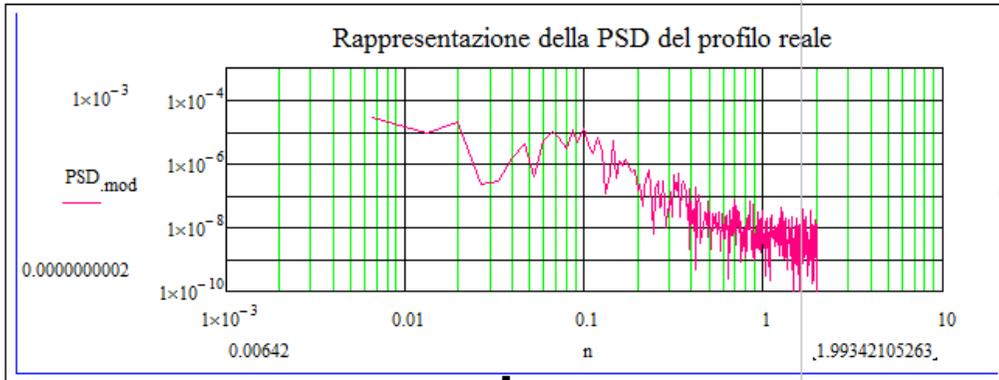


Figura G 14: PSD rettifilo 26 anno 2012 Napoli – Baiano.

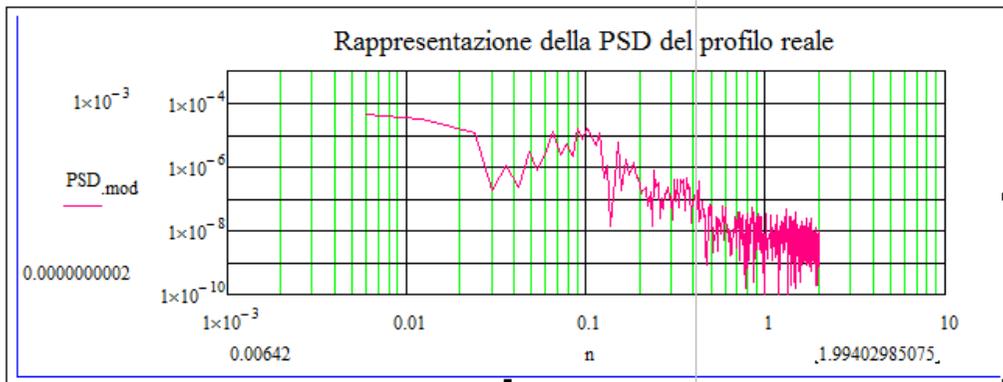


Figura G 15: PSD rettifilo 26 anno 2014 Napoli – Baiano.

Tabella G 5: Densità spettrale di potenza –Smoothed

Psd Smoothed lineare					
a=-17.182051		a=-18.29775		a=-18.219031	
b=-1.138507		b=-1.455201		b=-1.507285	
R ² =0.848553		R ² =0.866712		R ² =0.875621	
N	2009	N	2012	N	2014
0.00607	1.15E-05	0.00659	1.69E-05	0.005979	2.75E-05
0.01214	5.24E-06	0.01318	6.16E-06	0.011958	9.66E-06
0.018209	3.3E-06	0.019769	3.41E-06	0.017937	5.24E-06
0.024279	2.38E-06	0.026359	2.25E-06	0.023916	3.40E-06
0.030349	1.85E-06	0.032949	1.62E-06	0.029895	2.43E-06
0.036419	1.50E-06	0.039539	1.24E-06	0.035874	1.84E-06
0.042489	1.26E-06	0.046129	9.94E-07	0.041854	1.46E-06
0.048558	1.08E-06	0.052718	8.19E-07	0.047833	1.20E-06

0.054628	9.45E-07	0.059308	6.90E-07	0.053812	1.00E-06
0.060698	8.38E-07	0.065898	5.92E-07	0.059791	8.54E-07
0.066768	7.52E-07	0.072488	5.15E-07	0.06577	7.40E-07
0.072838	6.81E-07	0.079077	4.54E-07	0.071749	6.49E-07
0.078907	6.22E-07	0.085667	4.04E-07	0.077728	5.75E-07
0.084977	5.71E-07	0.092257	3.63E-07	0.083707	5.14E-07
0.091047	5.28E-07	0.098847	3.28E-07	0.089686	4.64E-07
0.097117	4.91E-07	0.105437	2.99E-07	0.095665	4.21E-07
0.103187	4.58E-07	0.112026	2.73E-07	0.101644	3.84E-07
0.109256	4.29E-07	0.118616	2.52E-07	0.107623	3.52E-07
0.115326	4.04E-07	0.125206	2.33E-07	0.113602	3.25E-07
0.121396	3.81E-07	0.131796	2.16E-07	0.119581	3.01E-07
0.127466	3.60E-07	0.138386	2.01E-07	0.125561	2.79E-07
0.133536	3.42E-07	0.144975	1.88E-07	0.13154	2.60E-07
0.139605	3.25E-07	0.151565	1.76E-07	0.137519	2.43E-07
0.145675	3.09E-07	0.158155	1.66E-07	0.143498	2.28E-07
0.151745	2.95E-07	0.164745	1.56E-07	0.149477	2.15E-07
0.157815	2.82E-07	0.171334	1.47E-07	0.155456	2.02E-07
0.163885	2.71E-07	0.177924	1.40E-07	0.161435	1.91E-07
0.169954	2.60E-07	0.184514	1.32E-07	0.167414	1.81E-07
0.176024	2.49E-07	0.191104	1.26E-07	0.173393	1.72E-07
0.182094	2.40E-07	0.197694	1.20E-07	0.179372	1.63E-07
0.188164	2.31E-07	0.204283	1.14E-07	0.185351	1.55E-07
0.194234	2.23E-07	0.210873	1.09E-07	0.19133	1.48E-07
0.200303	2.15E-07	0.217463	1.04E-07	0.197309	1.41E-07
0.206373	2.08E-07	0.224053	9.97E-08	0.203288	1.35E-07
0.212443	2.01E-07	0.230643	9.56E-08	0.209268	1.29E-07
0.218513	1.95E-07	0.237232	9.18E-08	0.215247	1.24E-07
0.224583	1.89E-07	0.243822	8.82E-08	0.221226	1.19E-07
0.230653	1.83E-07	0.250412	8.48E-08	0.227205	1.14E-07
0.236722	1.78E-07	0.257002	8.17E-08	0.233184	1.10E-07
0.242792	1.73E-07	0.263591	7.87E-08	0.239163	1.06E-07
0.248862	1.68E-07	0.270181	7.59E-08	0.245142	1.02E-07
0.254932	1.64E-07	0.276771	7.33E-08	0.251121	9.82E-08
0.261002	1.59E-07	0.283361	7.09E-08	0.2571	9.48E-08
0.267071	1.55E-07	0.289951	6.85E-08	0.263079	9.16E-08
0.273141	1.51E-07	0.29654	6.63E-08	0.269058	8.85E-08

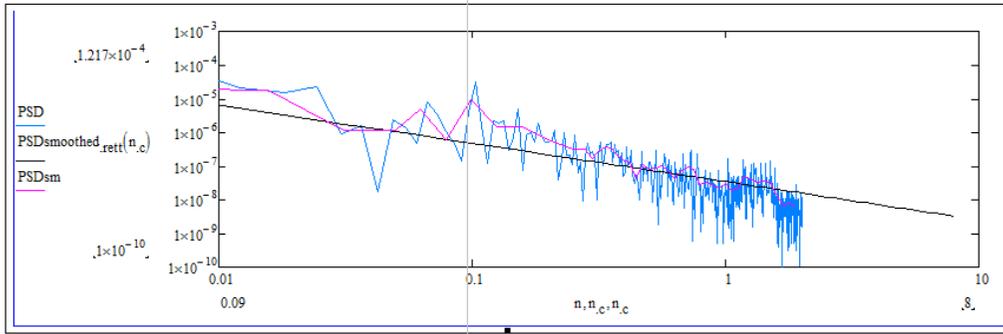


Figura G 16: PSD Smoothed rettifilo 26 anno 2009 Napoli – Baiano.

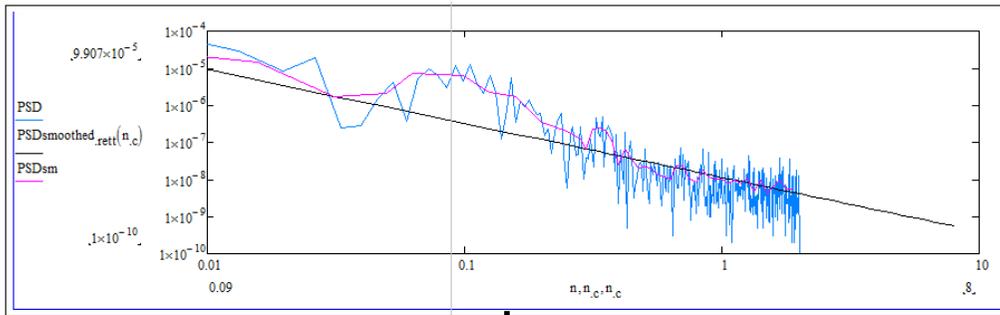


Figura G 17: PSD Smoothed rettifilo 26 anno 2012 Napoli – Baiano.

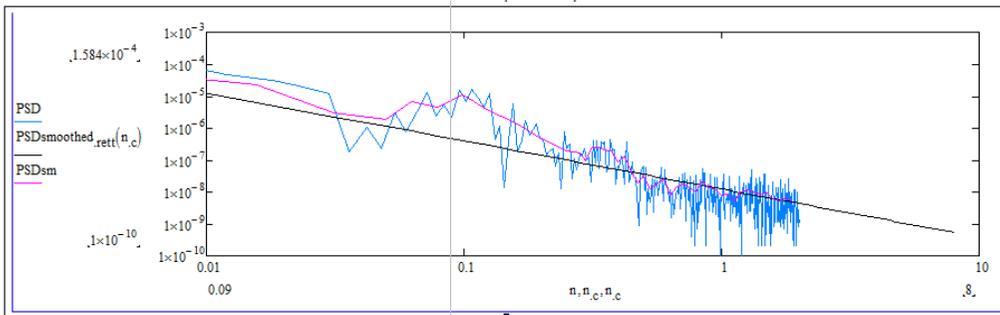


Figura G 18: PSD Smoothed rettifilo 26 anno 2014 Napoli – Baiano.

Tabella G 6: Coefficiente di correlazione

- Rettifilo 26 (2009 2012 2014) Pari

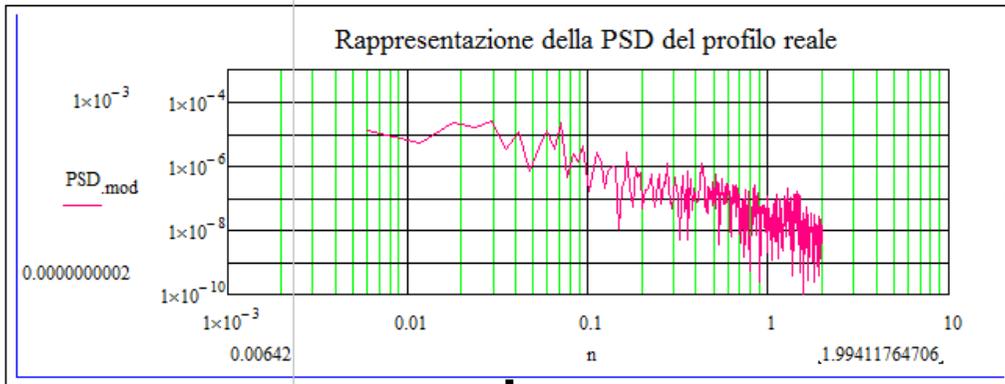


Figura G 19: PSD rettifilo 26 anno 2009 Baiano – Napoli.

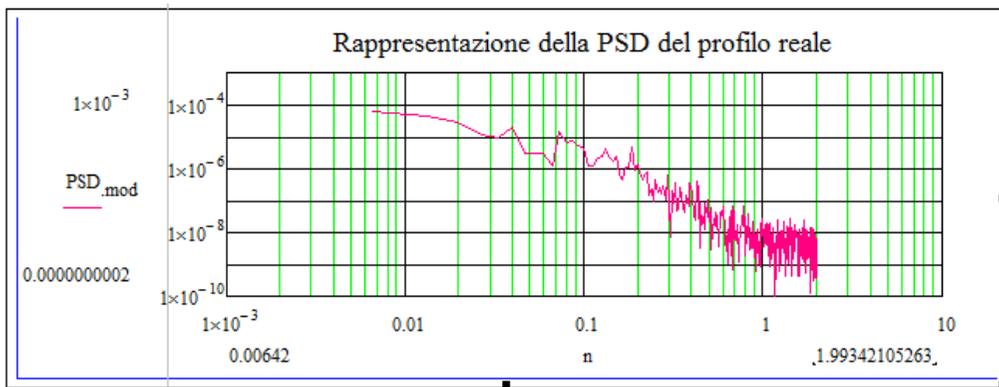


Figura G 20: PSD rettifilo 26 anno 2012 Baiano - Napoli.

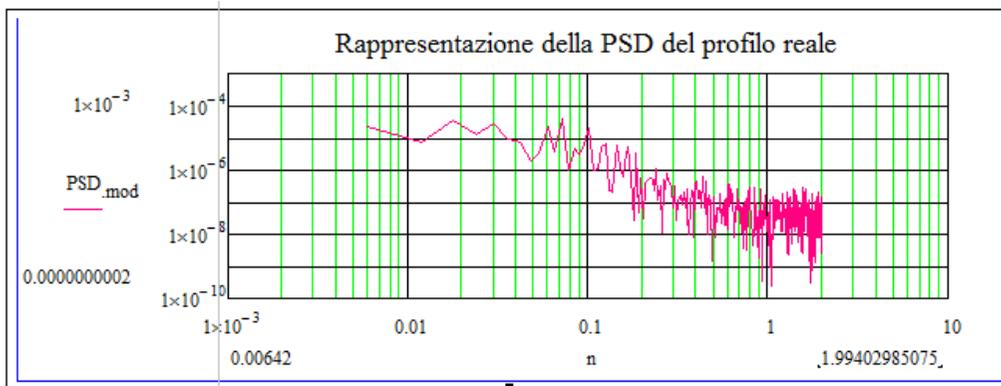


Figura G 21: PSD rettifilo 26 anno 2014 Baiano - Napoli.

Tabella G 7: Densità spettrale di potenza –Smoothed.

Psd Smoothed lineare					
a=-16.957628		a=-18.26524		a=-16.683789	
b=-1.149995		b=-1.60031		b=-1.149354	
R ² =0.875362		R ² =0.9185		R ² =0.869848	
N	2009	N	2012	N	2014
0.005891	1.58E-05	0.00659	3.61E-05	0.005979	2.04E-05
0.011782	7.14E-06	0.01318	1.19E-05	0.011958	9.20E-06
0.017673	4.48E-06	0.019769	6.23E-06	0.017937	5.77E-06
0.023564	3.22E-06	0.026359	3.93E-06	0.023916	4.15E-06
0.029455	2.49E-06	0.032949	2.75E-06	0.029895	3.21E-06
0.035346	2.02E-06	0.039539	2.05E-06	0.035874	2.60E-06
0.041237	1.69E-06	0.046129	1.61E-06	0.041854	2.18E-06
0.047128	1.45E-06	0.052718	1.30E-06	0.047833	1.87E-06
0.053019	1.27E-06	0.059308	1.07E-06	0.053812	1.63E-06
0.05891	1.12E-06	0.065898	9.07E-07	0.059791	1.45E-06
0.064801	1.00E-06	0.072488	7.79E-07	0.06577	1.30E-06
0.070692	9.09E-07	0.079077	6.78E-07	0.071749	1.17E-06
0.076583	8.29E-07	0.085667	5.96E-07	0.077728	1.07E-06
0.082474	7.61E-07	0.092257	5.30E-07	0.083707	9.83E-07
0.088365	7.03E-07	0.098847	4.74E-07	0.089686	9.08E-07
0.094256	6.53E-07	0.105437	4.28E-07	0.095665	8.43E-07
0.100147	6.09E-07	0.112026	3.88E-07	0.101644	7.86E-07
0.106038	5.70E-07	0.118616	3.54E-07	0.107623	7.36E-07
0.111929	5.36E-07	0.125206	3.25E-07	0.113602	6.92E-07
0.11782	5.05E-07	0.131796	2.99E-07	0.119581	6.52E-07
0.123711	4.78E-07	0.138386	2.77E-07	0.125561	6.17E-07
0.129602	4.53E-07	0.144975	2.57E-07	0.13154	5.85E-07
0.135493	4.30E-07	0.151565	2.39E-07	0.137519	5.56E-07
0.141384	4.10E-07	0.158155	2.24E-07	0.143498	5.29E-07
0.147275	3.91E-07	0.164745	2.09E-07	0.149477	5.05E-07
0.153166	3.74E-07	0.171334	1.97E-07	0.155456	4.82E-07
0.159057	3.58E-07	0.177924	1.85E-07	0.161435	4.62E-07
0.164948	3.43E-07	0.184514	1.75E-07	0.167414	4.43E-07
0.170839	3.30E-07	0.191104	1.65E-07	0.173393	4.26E-07
0.17673	3.17E-07	0.197694	1.56E-07	0.179372	4.09E-07
0.182622	3.05E-07	0.204283	1.48E-07	0.185351	3.94E-07

0.188513	2.94E-07	0.210873	1.41E-07	0.19133	3.80E-07
0.194404	2.84E-07	0.217463	1.34E-07	0.197309	3.67E-07
0.200295	2.75E-07	0.224053	1.28E-07	0.203288	3.54E-07
0.206186	2.66E-07	0.230643	1.22E-07	0.209268	3.43E-07
0.212077	2.57E-07	0.237232	1.17E-07	0.215247	3.32E-07
0.217968	2.49E-07	0.243822	1.12E-07	0.221226	3.22E-07
0.223859	2.42E-07	0.250412	1.07E-07	0.227205	3.12E-07
0.22975	2.34E-07	0.257002	1.03E-07	0.233184	3.03E-07
0.235641	2.28E-07	0.263591	9.87E-08	0.239163	2.94E-07
0.241532	2.21E-07	0.270181	9.48E-08	0.245142	2.86E-07
0.247423	2.15E-07	0.276771	9.13E-08	0.251121	2.78E-07
0.253314	2.10E-07	0.283361	8.79E-08	0.2571	2.71E-07
0.259205	2.04E-07	0.289951	8.47E-08	0.263079	2.64E-07
0.265096	1.99E-07	0.29654	8.17E-08	0.269058	2.57E-07

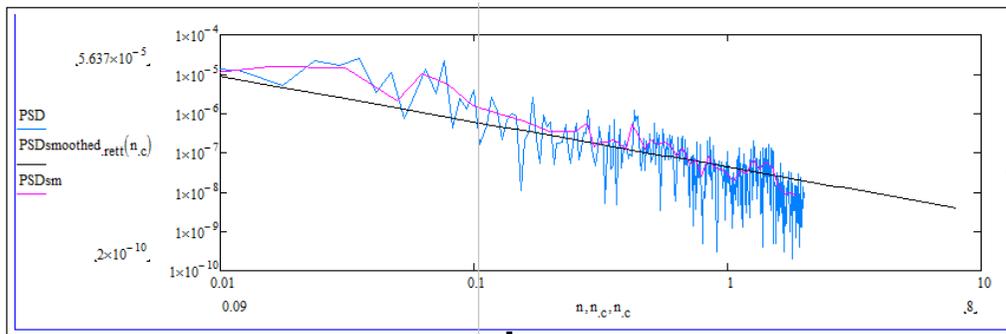


Figura G 22: PSD Smoothed rettifilo 26 anno 2009 Baiano - Napoli.

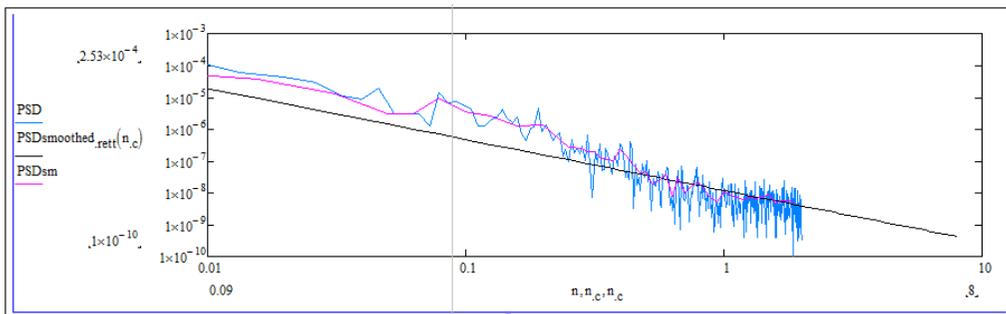


Figura G 23: PSD Smoothed rettifilo 26 anno 2012 Baiano – Napoli.

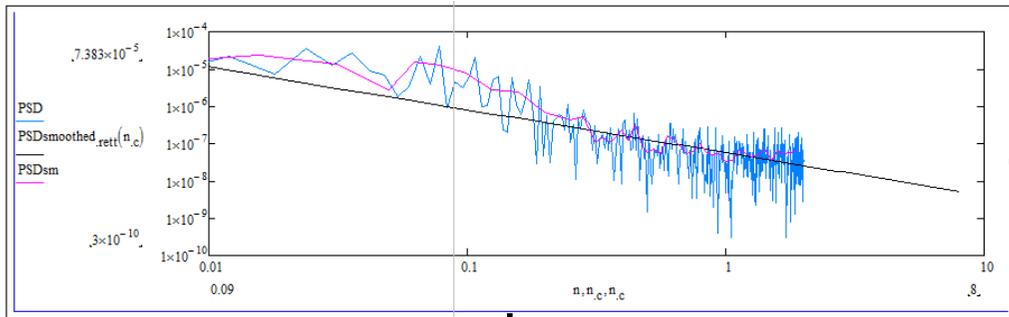
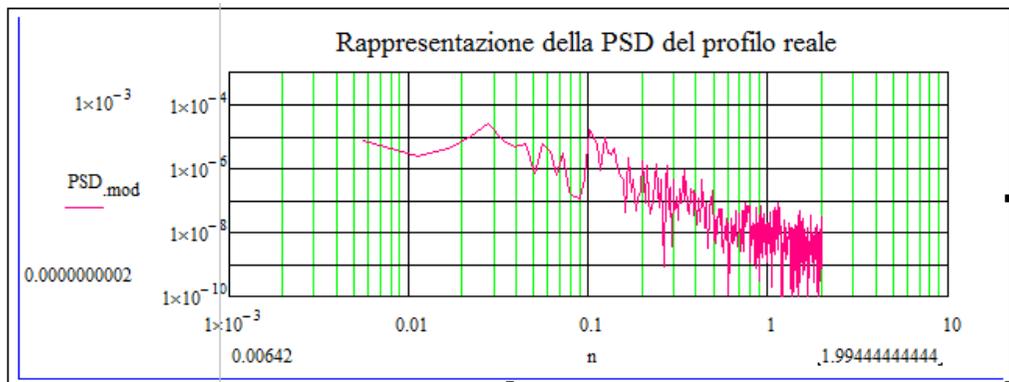


Figura G 24: PSD Smoothed rettifilo 26 anno 2014 Baiano - Napoli.

Tabella G 8: Coefficiente di correlazione



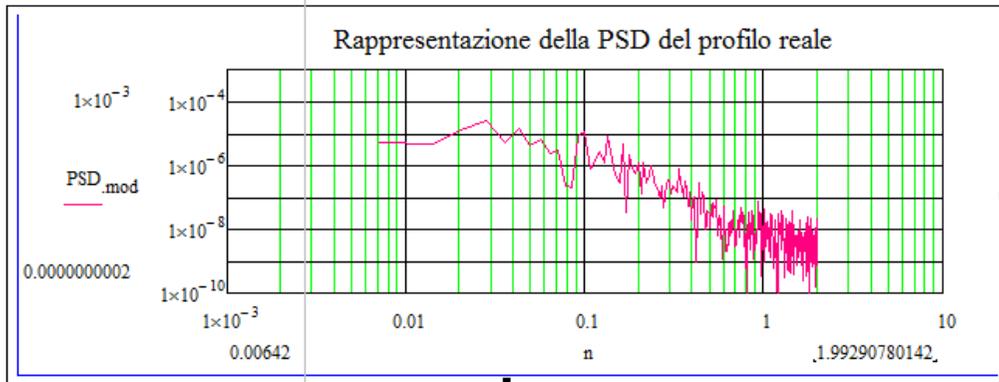


Figura G 26: PSD rettifilo58 anno 2012 Napoli – Baiano.

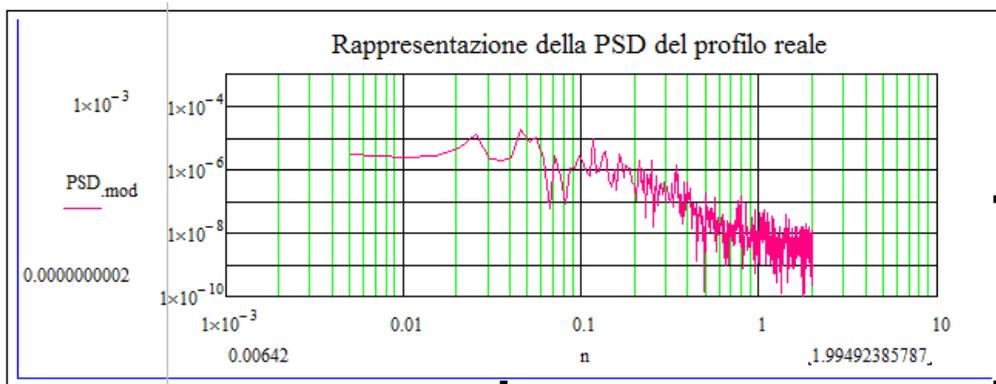


Figura G 27: PSD rettifilo58 anno 2014 Napoli – Baiano.

Tabella G 9: Densità spettrale di potenza –Smoothed.

Psd Smoothed lineare					
a=-17.93326		a=-18.060248		a=-17.795183	
b=-1.332354		b=-1.431106		b=-1.288518	
R ² =0.845311		R ² =0.857031		R ² =0.798755	
N	2009	N	2012	N	2014
0.005563	1.64E-05	0.007105	1.70E-05	0.005083	1.69E-05
0.011127	6.53E-06	0.01421	6.29E-06	0.010165	6.91E-06
0.01669	3.8E-06	0.021314	3.52E-06	0.015248	4.10E-06
0.022253	2.59E-06	0.028419	2.33E-06	0.02033	2.83E-06
0.027816	1.93E-06	0.035524	1.69E-06	0.025413	2.12E-06
0.03338	1.51E-06	0.042629	1.31E-06	0.030496	1.68E-06
0.038943	1.23E-06	0.049734	1.05E-06	0.035578	1.38E-06
0.044506	1.03E-06	0.056838	8.65E-07	0.040661	1.16E-06

0.05007	8.80E-07	0.063943	7.31E-07	0.045743	9.95E-07
0.055633	7.64E-07	0.071048	6.29E-07	0.050826	8.69E-07
0.061196	6.73E-07	0.078153	5.48E-07	0.055909	7.68E-07
0.066759	6.00E-07	0.085258	4.84E-07	0.060991	6.87E-07
0.072323	5.39E-07	0.092362	4.32E-07	0.066074	6.20E-07
0.077886	4.88E-07	0.099467	3.88E-07	0.071156	5.63E-07
0.083449	4.45E-07	0.106572	3.52E-07	0.076239	5.15E-07
0.089013	4.09E-07	0.113677	3.21E-07	0.081321	4.74E-07
0.094576	3.77E-07	0.120782	2.94E-07	0.086404	4.39E-07
0.100139	3.49E-07	0.127886	2.71E-07	0.091487	4.07E-07
0.105702	3.25E-07	0.134991	2.51E-07	0.096569	3.80E-07
0.111266	3.04E-07	0.142096	2.33E-07	0.101652	3.56E-07
0.116829	2.85E-07	0.149201	2.17E-07	0.106734	3.34E-07
0.122392	2.67E-07	0.156306	2.03E-07	0.111817	3.15E-07
0.127955	2.52E-07	0.16341	1.91E-07	0.1169	2.97E-07
0.133519	2.38E-07	0.170515	1.80E-07	0.121982	2.81E-07
0.139082	2.26E-07	0.17762	1.69E-07	0.127065	2.67E-07
0.144645	2.14E-07	0.184725	1.60E-07	0.132147	2.54E-07
0.150209	2.04E-07	0.191829	1.52E-07	0.13723	2.42E-07
0.155772	1.94E-07	0.198934	1.44E-07	0.142313	2.31E-07
0.161335	1.85E-07	0.206039	1.37E-07	0.147395	2.20E-07
0.166898	1.77E-07	0.213144	1.31E-07	0.152478	2.11E-07
0.172462	1.69E-07	0.220249	1.25E-07	0.15756	2.02E-07
0.178025	1.62E-07	0.227353	1.19E-07	0.162643	1.94E-07
0.183588	1.56E-07	0.234458	1.14E-07	0.167726	1.87E-07
0.189152	1.50E-07	0.241563	1.09E-07	0.172808	1.80E-07
0.194715	1.44E-07	0.248668	1.05E-07	0.177891	1.73E-07
0.200278	1.39E-07	0.255773	1.01E-07	0.182973	1.67E-07
0.205841	1.34E-07	0.262877	9.66E-08	0.188056	1.61E-07
0.211405	1.29E-07	0.269982	9.30E-08	0.193139	1.56E-07
0.216968	1.25E-07	0.277087	8.96E-08	0.198221	1.50E-07
0.222531	1.21E-07	0.284192	8.64E-08	0.203304	1.46E-07
0.228095	1.17E-07	0.291297	8.34E-08	0.208386	1.41E-07
0.233658	1.13E-07	0.298401	8.06E-08	0.213469	1.37E-07
0.239221	1.10E-07	0.305506	7.79E-08	0.218551	1.33E-07
0.244784	1.06E-07	0.312611	7.54E-08	0.223634	1.29E-07
0.250348	1.03E-07	0.319716	7.30E-08	0.228717	1.25E-07

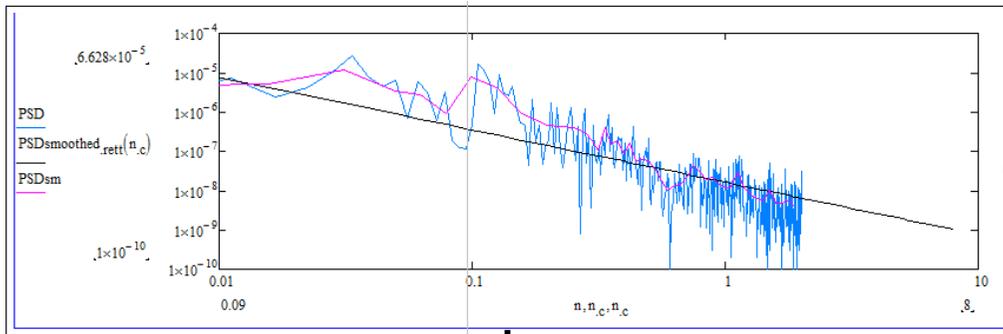


Figura G 28: PSD Smoothed rettifilo58 anno 2009 Napoli – Baiano.

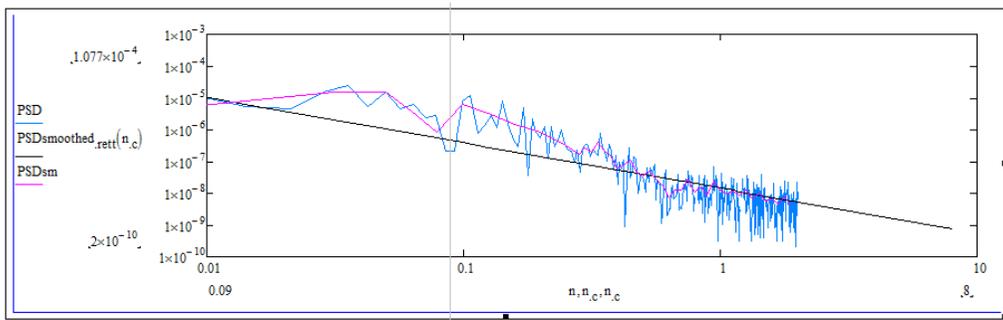


Figura G 29: PSD Smoothed rettifilo58 anno 2012 Napoli – Baiano.

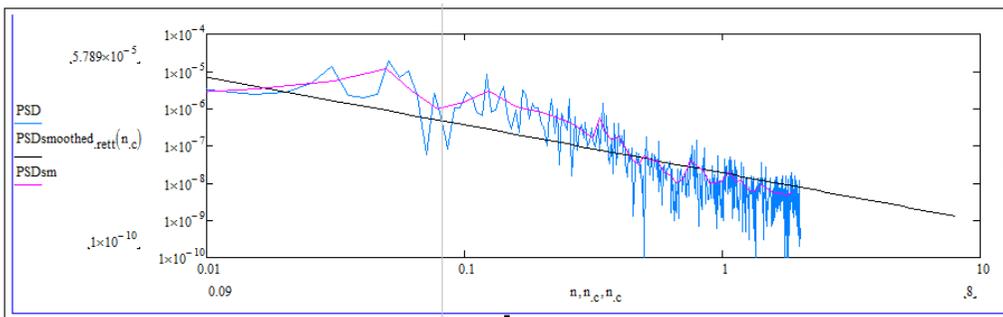


Figura G 30: PSD Smoothed rettifilo58 anno 2014 Napoli – Baiano.

Tabella G 10: Coefficiente di correlazione

- Rettifilo 58 ID 248 (2009 2012 2014) Pari

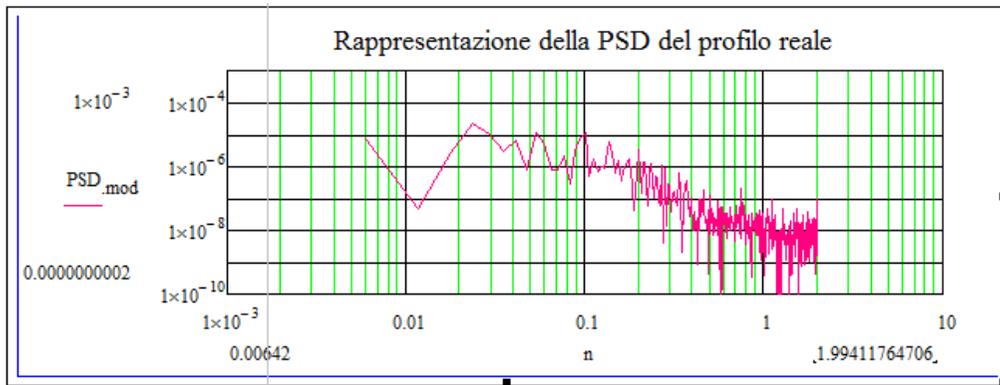


Figura G 31: PSD rettifilo58 anno 2009 Baiano – Napoli.

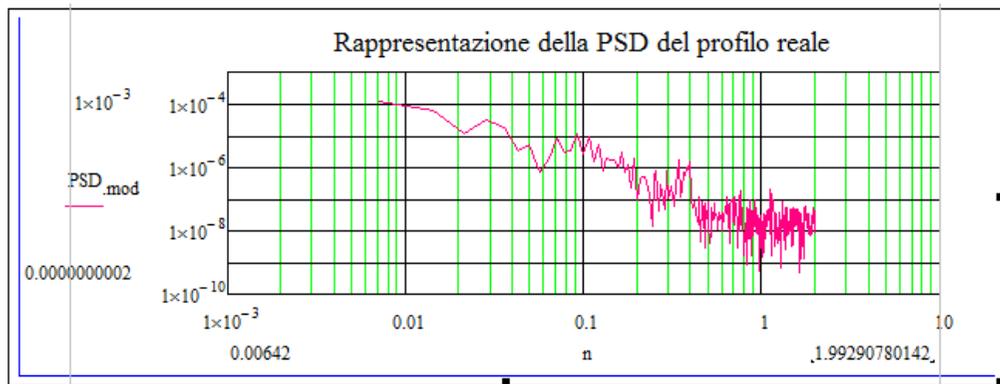


Figura G 32: PSD rettifilo58 anno 2012 Baiano – Napoli.

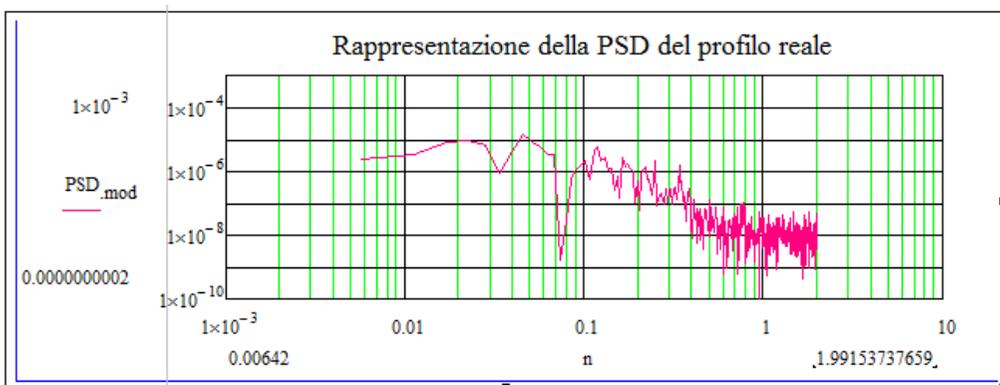


Figura G 33: PSD rettifilo58 anno 2014 Baiano – Napoli.

Tabella G 11: Densità spettrale di potenza –Smoothed.

Psd Smoothed lineare					
a=-17.895264		a=-17.373132		a=-17.761032	
b=-1.305038		b=-1.431333		b=-1.230243	
R ² =0.855325		R ² =0.903883		R ² =0.834685	
N	2009	N	2012	N	2014
0.005891	1.37E-05	0.007105	3.39E-05	0.005658	1.13E-05
0.011782	5.56E-06	0.01421	1.26E-05	0.011315	4.80E-06
0.017673	3.28E-06	0.021314	7.03E-06	0.016973	2.91E-06
0.023564	2.25E-06	0.028419	4.66E-06	0.022631	2.04E-06
0.029455	1.68E-06	0.035524	3.39E-06	0.028289	1.55E-06
0.035346	1.33E-06	0.042629	2.61E-06	0.033946	1.24E-06
0.041237	1.08E-06	0.049734	2.09E-06	0.039604	1.03E-06
0.047128	9.11E-07	0.056838	1.73E-06	0.045262	8.72E-07
0.053019	7.81E-07	0.063943	1.46E-06	0.050919	7.54E-07
0.05891	6.81E-07	0.071048	1.26E-06	0.056577	6.62E-07
0.064801	6.01E-07	0.078153	1.10E-06	0.062235	5.89E-07
0.070692	5.37E-07	0.085258	9.67E-07	0.067893	5.29E-07
0.076583	4.84E-07	0.092362	8.62E-07	0.07355	4.80E-07
0.082474	4.39E-07	0.099467	7.76E-07	0.079208	4.38E-07
0.088365	4.01E-07	0.106572	7.03E-07	0.084866	4.02E-07
0.094256	3.69E-07	0.113677	6.41E-07	0.090523	3.72E-07
0.100147	3.41E-07	0.120782	5.87E-07	0.096181	3.45E-07
0.106038	3.16E-07	0.127886	5.41E-07	0.101839	3.21E-07
0.111929	2.95E-07	0.134991	5.01E-07	0.107496	3.01E-07
0.11782	2.76E-07	0.142096	4.66E-07	0.113154	2.82E-07
0.123711	2.59E-07	0.149201	4.34E-07	0.118812	2.66E-07
0.129602	2.43E-07	0.156306	4.06E-07	0.12447	2.51E-07
0.135493	2.30E-07	0.16341	3.81E-07	0.130127	2.38E-07
0.141384	2.17E-07	0.170515	3.59E-07	0.135785	2.26E-07
0.147275	2.06E-07	0.17762	3.38E-07	0.141443	2.15E-07
0.153166	1.96E-07	0.184725	3.20E-07	0.1471	2.04E-07
0.159057	1.86E-07	0.191829	3.03E-07	0.152758	1.95E-07
0.164948	1.78E-07	0.198934	2.88E-07	0.158416	1.87E-07
0.170839	1.70E-07	0.206039	2.74E-07	0.164074	1.79E-07
0.17673	1.62E-07	0.213144	2.61E-07	0.169731	1.71E-07
0.182622	1.56E-07	0.220249	2.49E-07	0.175389	1.65E-07

0.188513	1.49E-07	0.227353	2.38E-07	0.181047	1.58E-07
0.194404	1.43E-07	0.234458	2.27E-07	0.186704	1.53E-07
0.200295	1.38E-07	0.241563	2.18E-07	0.192362	1.47E-07
0.206186	1.33E-07	0.248668	2.09E-07	0.19802	1.42E-07
0.212077	1.28E-07	0.255773	2.01E-07	0.203678	1.37E-07
0.217968	1.24E-07	0.262877	1.93E-07	0.209335	1.32E-07
0.223859	1.19E-07	0.269982	1.86E-07	0.214993	1.28E-07
0.22975	1.15E-07	0.277087	1.79E-07	0.220651	1.24E-07
0.235641	1.12E-07	0.284192	1.73E-07	0.226308	1.20E-07
0.241532	1.08E-07	0.291297	1.67E-07	0.231966	1.17E-07
0.247423	1.05E-07	0.298401	1.61E-07	0.237624	1.13E-07
0.253314	1.02E-07	0.305506	1.56E-07	0.243281	1.10E-07
0.259205	9.85E-08	0.312611	1.51E-07	0.248939	1.07E-07
0.265096	9.56E-08	0.319716	1.46E-07	0.254597	1.04E-07

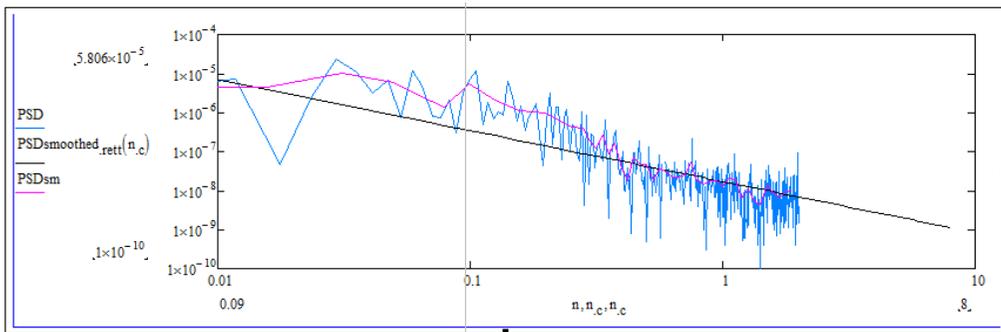


Figura G 34: PSD Smoothed rettifilo58 anno 2009 Baiano – Napoli.

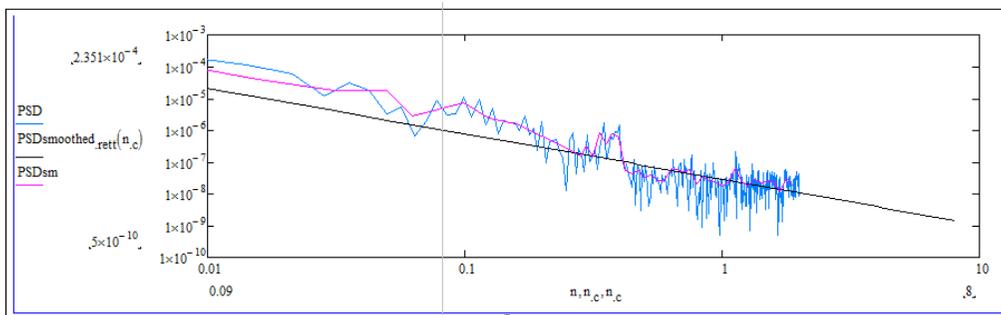


Figura G 35: PSD Smoothed rettifilo58 anno 2012 Baiano – Napoli.

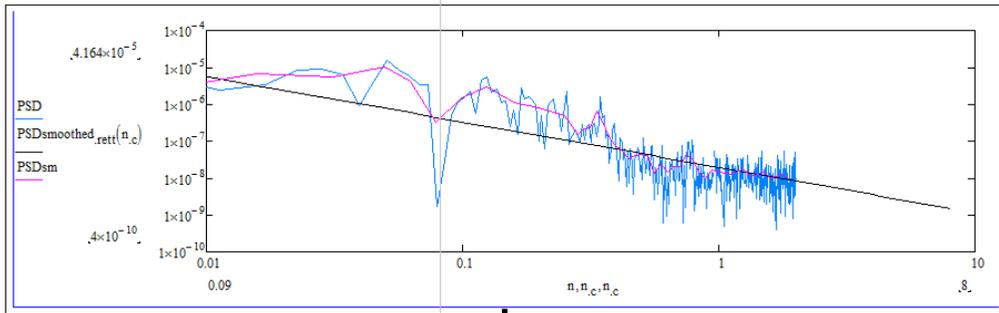
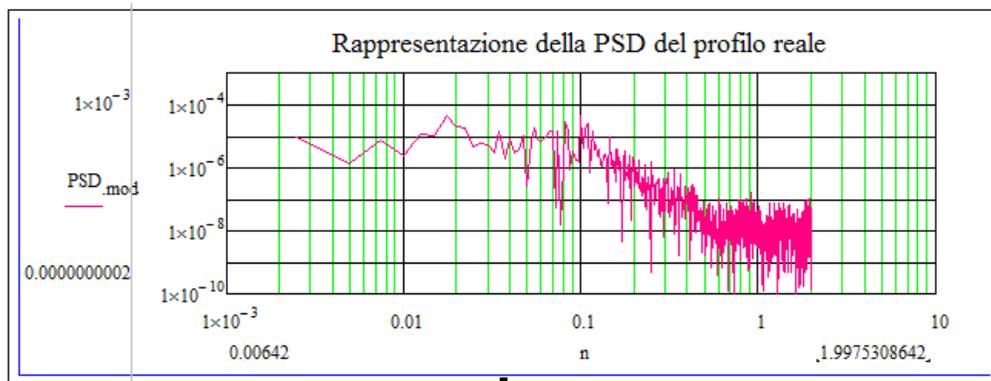


Figura G 36: PSD Smoothed retifilo58 anno 2014 Baiano – Napoli.

Tabella G 12: Coefficiente di correlazione



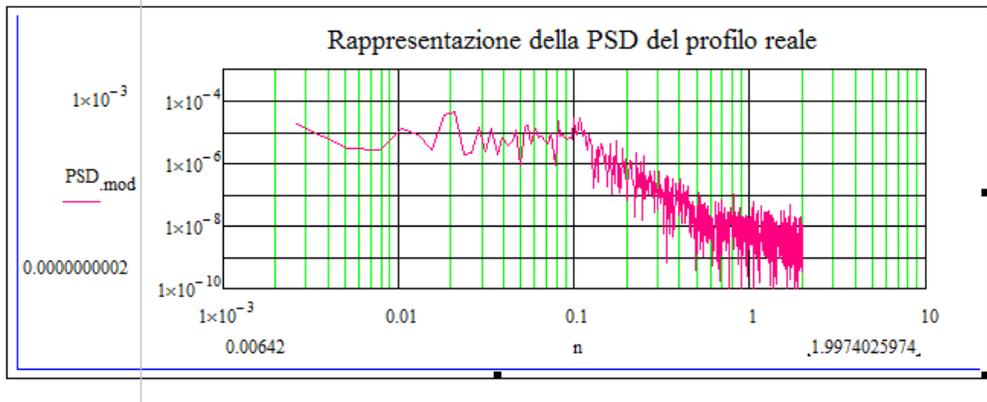


Figura G 38: PSD rettifilo 30 anno 2012 Napoli – Baiano.

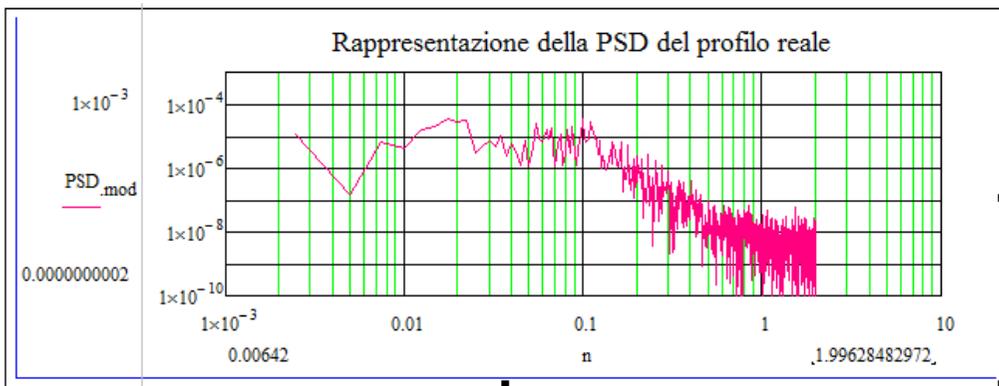


Figura G 39: PSD rettifilo 30 anno 2014 Napoli – Baiano.

Tabella G 13: Densità spettrale di potenza –Smoothed

Psd Smoothed lineare					
a=-17.440331		a=-17.996724		a=-17.946113	
b=-1.36037		b=-1.592151		b=-1.550299	
R ² =0.788736		R ² =0.836309		R ² =0.793412	
N	2009	N	2012	N	2014
0.002471	9.39E-05	0.002599	2.00E-04	0.00248	1.76E-04
0.004941	3.66E-05	0.005198	6.62E-05	0.00496	6.01E-05
0.007412	2.11E-05	0.007797	3.47E-05	0.00744	3.21E-05
0.009883	1.42E-05	0.010396	2.20E-05	0.009919	2.05E-05
0.012353	1.05E-05	0.012995	1.54E-05	0.012399	1.45E-05
0.014824	8.20E-06	0.015595	1.15E-05	0.014879	1.09E-05
0.017295	6.65E-06	0.018194	9.01E-06	0.017359	8.62E-06
0.019765	5.55E-06	0.020793	7.28E-06	0.019839	7.01E-06

0.022236	4.72E-06	0.023392	6.04E-06	0.022319	5.84E-06
0.024707	4.09E-06	0.025991	5.10E-06	0.024799	4.96E-06
0.027177	3.60E-06	0.02859	4.39E-06	0.027278	4.28E-06
0.029648	3.19E-06	0.031189	3.82E-06	0.029758	3.74E-06
0.032119	2.87E-06	0.033788	3.36E-06	0.032238	3.30E-06
0.034589	2.59E-06	0.036387	2.99E-06	0.034718	2.94E-06
0.03706	2.36E-06	0.038986	2.68E-06	0.037198	2.64E-06
0.039531	2.16E-06	0.041585	2.42E-06	0.039678	2.39E-06
0.042001	1.99E-06	0.044185	2.19E-06	0.042157	2.18E-06
0.044472	1.84E-06	0.046784	2.00E-06	0.044637	1.99E-06
0.046943	1.71E-06	0.049383	1.84E-06	0.047117	1.83E-06
0.049413	1.59E-06	0.051982	1.69E-06	0.049597	1.69E-06
0.051884	1.49E-06	0.054581	1.57E-06	0.052077	1.57E-06
0.054355	1.40E-06	0.05718	1.45E-06	0.054557	1.46E-06
0.056825	1.32E-06	0.059779	1.36E-06	0.057037	1.36E-06
0.059296	1.24E-06	0.062378	1.27E-06	0.059516	1.28E-06
0.061767	1.18E-06	0.064977	1.19E-06	0.061996	1.20E-06
0.064237	1.12E-06	0.067576	1.12E-06	0.064476	1.13E-06
0.066708	1.06E-06	0.070175	1.05E-06	0.066956	1.06E-06
0.069179	1.01E-06	0.072775	9.91E-07	0.069436	1.00E-06
0.071649	9.62E-07	0.075374	9.37E-07	0.071916	9.51E-07
0.07412	9.19E-07	0.077973	8.88E-07	0.074396	9.03E-07
0.07659	8.78E-07	0.080572	8.43E-07	0.076875	8.58E-07
0.079061	8.41E-07	0.083171	8.01E-07	0.079355	8.17E-07
0.081532	8.07E-07	0.08577	7.63E-07	0.081835	7.79E-07
0.084002	7.75E-07	0.088369	7.27E-07	0.084315	7.44E-07
0.086473	7.45E-07	0.090968	6.95E-07	0.086795	7.11E-07
0.088944	7.17E-07	0.093567	6.64E-07	0.089275	6.80E-07
0.091414	6.91E-07	0.096166	6.36E-07	0.091754	6.52E-07
0.093885	6.66E-07	0.098765	6.09E-07	0.094234	6.26E-07
0.096356	6.43E-07	0.101365	5.85E-07	0.096714	6.01E-07
0.098826	6.21E-07	0.103964	5.62E-07	0.099194	5.78E-07
0.101297	6.01E-07	0.106563	5.40E-07	0.101674	5.56E-07
0.103768	5.81E-07	0.109162	5.20E-07	0.104154	5.36E-07
0.106238	5.63E-07	0.111761	5.01E-07	0.106634	5.17E-07
0.108709	5.46E-07	0.11436	4.83E-07	0.109113	4.99E-07
0.11118	5.29E-07	0.116959	4.66E-07	0.111593	4.81E-07
0.11365	5.14E-07	0.119558	4.5E-07	0.114073	4.65E-07

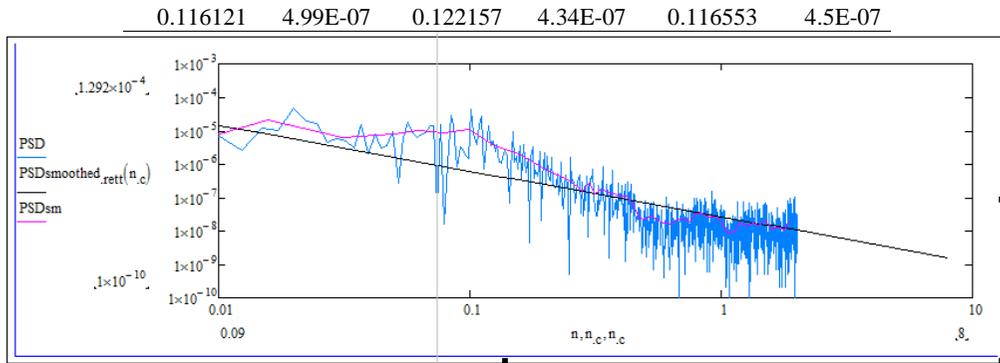


Figura G 40: PSD Smoothed rettifilo 30 anno 2009 Napoli – Baiano.

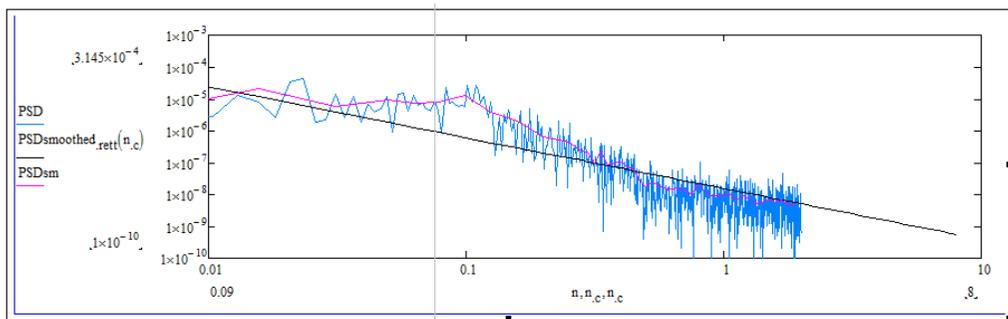


Figura G 41: PSD Smoothed rettifilo 30 anno 2012 Napoli – Baiano.

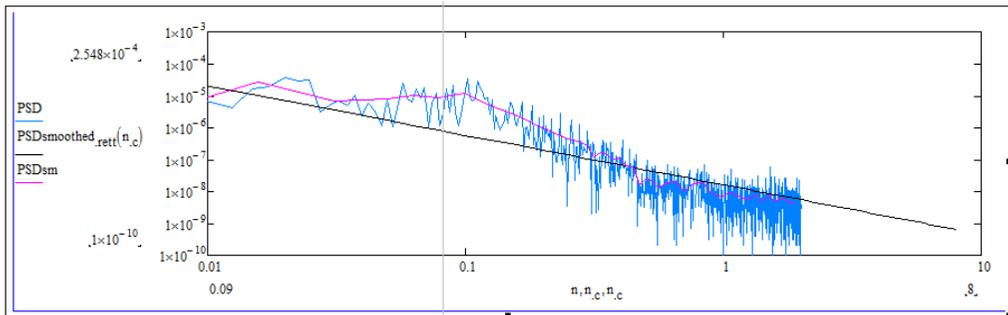


Figura G 42: PSD Smoothed rettifilo 30 anno 2014 Napoli – Baiano.

Tabella G 14: Coefficiente di correlazione

- Rettifilo 30 (2009 2012 2014) Pari

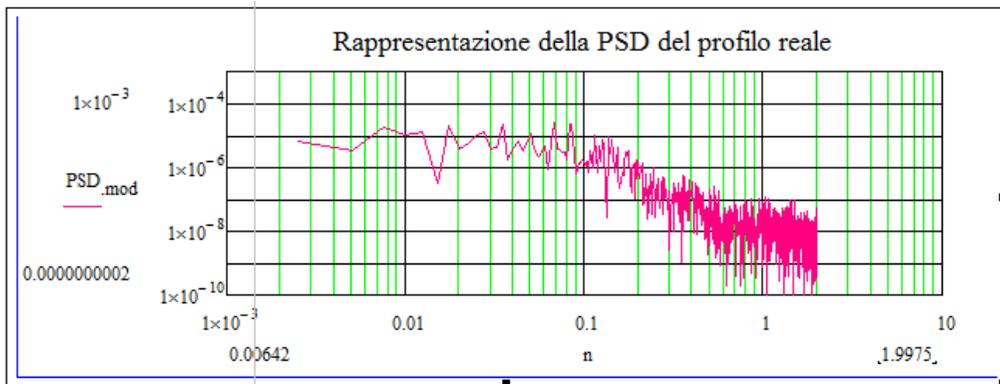


Figura G 43: PSD rettifilo 30 anno 2009 Baiano – Napoli.

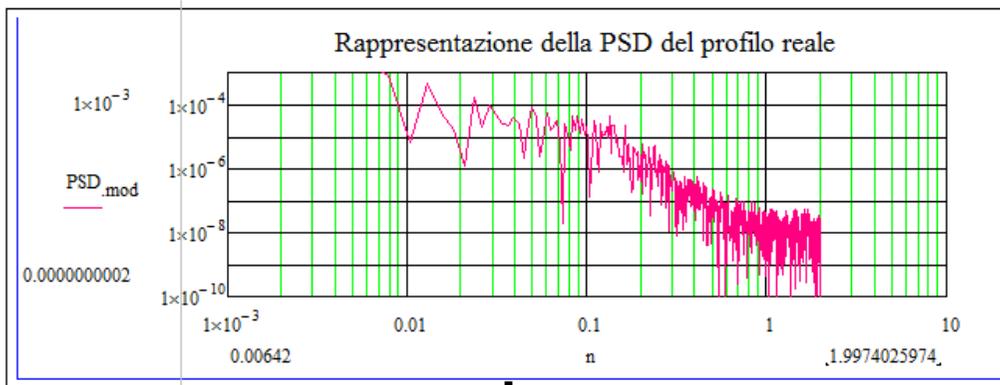


Figura G 44: PSD rettifilo 30 anno 2012 Baiano – Napoli.

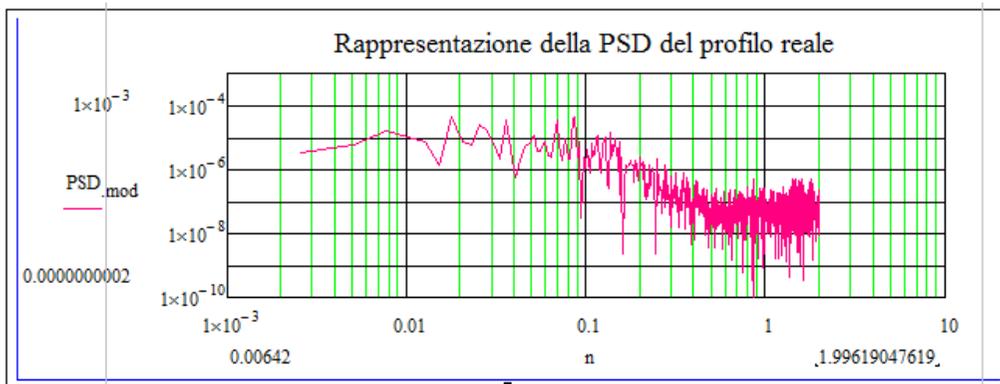


Figura G 45: PSD rettifilo 30 anno 2014 Baiano – Napoli.

Tabella G 15: Densità spettrale di potenza – Smoothed.

Psd Smoothed lineare					
a=-17.434785 b=-1.342655 R ² =0.825026		a=-17.483789 b=-2.133809 R ² =0.9506		a=-16.189916 b=-1.00397 R ² =0.728878	
N	2009	N	2012	N	2014
0.002502	8.35E-05	0.002599	8.38E-03	0.002543	3.75E-05
0.005003	3.29E-05	0.005198	1.91E-03	0.005086	1.87E-05
0.007505	1.91E-05	0.007797	8.04E-04	0.007629	1.24E-05
0.010006	1.30E-05	0.010396	4.35E-04	0.010172	9.32E-06
0.012508	9.62E-06	0.012995	2.70E-04	0.012715	7.45E-06
0.015009	7.53E-06	0.015595	1.83E-04	0.015257	6.20E-06
0.017511	6.12E-06	0.018194	1.32E-04	0.0178	5.31E-06
0.020013	5.12E-06	0.020793	9.91E-05	0.020343	4.65E-06
0.022514	4.37E-06	0.023392	7.71E-05	0.022886	4.13E-06
0.025016	3.79E-06	0.025991	6.16E-05	0.025429	3.71E-06
0.027517	3.34E-06	0.02859	5.02E-05	0.027972	3.37E-06
0.030019	2.97E-06	0.031189	4.17E-05	0.030515	3.09E-06
0.03252	2.67E-06	0.033788	3.52E-05	0.033058	2.85E-06
0.035022	2.41E-06	0.036387	3.00E-05	0.035601	2.65E-06
0.037523	2.20E-06	0.038986	2.59E-05	0.038144	2.47E-06
0.040025	2.02E-06	0.041585	2.26E-05	0.040687	2.32E-06
0.042527	1.86E-06	0.044185	1.98E-05	0.043229	2.18E-06
0.045028	1.72E-06	0.046784	1.76E-05	0.045772	2.06E-06
0.04753	1.60E-06	0.049383	1.57E-05	0.048315	1.95E-06
0.050031	1.50E-06	0.051982	1.40E-05	0.050858	1.85E-06
0.052533	1.40E-06	0.054581	1.26E-05	0.053401	1.76E-06
0.055034	1.32E-06	0.05718	1.14E-05	0.055944	1.68E-06
0.057536	1.24E-06	0.059779	1.04E-05	0.058487	1.61E-06
0.060038	1.17E-06	0.062378	9.51E-06	0.06103	1.54E-06
0.062539	1.11E-06	0.064977	8.71E-06	0.063573	1.48E-06
0.065041	1.05E-06	0.067576	8.01E-06	0.066116	1.42E-06
0.067542	9.99E-07	0.070175	7.39E-06	0.068659	1.37E-06
0.070044	9.52E-07	0.072775	6.84E-06	0.071202	1.32E-06
0.072545	9.08E-07	0.075374	6.35E-06	0.073744	1.28E-06
0.075047	8.67E-07	0.077973	5.91E-06	0.076287	1.23E-06
0.077548	8.30E-07	0.080572	5.51E-06	0.07883	1.19E-06

0.08005	7.95E-07	0.083171	5.15E-06	0.081373	1.16E-06
0.082552	7.63E-07	0.08577	4.82E-06	0.083916	1.12E-06
0.085053	7.33E-07	0.088369	4.52E-06	0.086459	1.09E-06
0.087555	7.05E-07	0.090968	4.25E-06	0.089002	1.06E-06
0.090056	6.79E-07	0.093567	4.00E-06	0.091545	1.03E-06
0.092558	6.55E-07	0.096166	3.78E-06	0.094088	9.99E-07
0.095059	6.32E-07	0.098765	3.57E-06	0.096631	9.72E-07
0.097561	6.10E-07	0.101365	3.37E-06	0.099174	9.47E-07
0.100063	5.90E-07	0.103964	3.20E-06	0.101716	9.23E-07
0.102564	5.70E-07	0.106563	3.03E-06	0.104259	9.01E-07
0.105066	5.52E-07	0.109162	2.88E-06	0.106802	8.79E-07
0.107567	5.35E-07	0.111761	2.74E-06	0.109345	8.59E-07
0.110069	5.19E-07	0.11436	2.61E-06	0.111888	8.39E-07
0.11257	5.03E-07	0.116959	2.49E-06	0.114431	8.20E-07
0.115072	4.89E-07	0.119558	2.37E-06	0.116974	8.03E-07
0.117573	4.75E-07	0.122157	2.27E-06	0.119517	7.85E-07

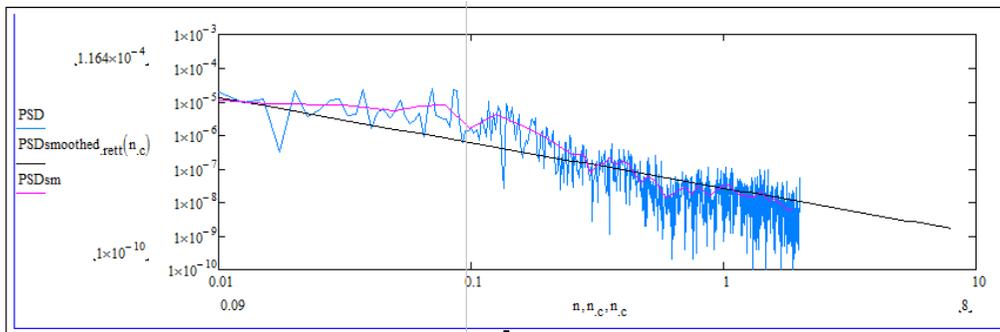


Figura G 46: PSD Smoothed rettifilo 30 anno 2009 Baiano – Napoli.

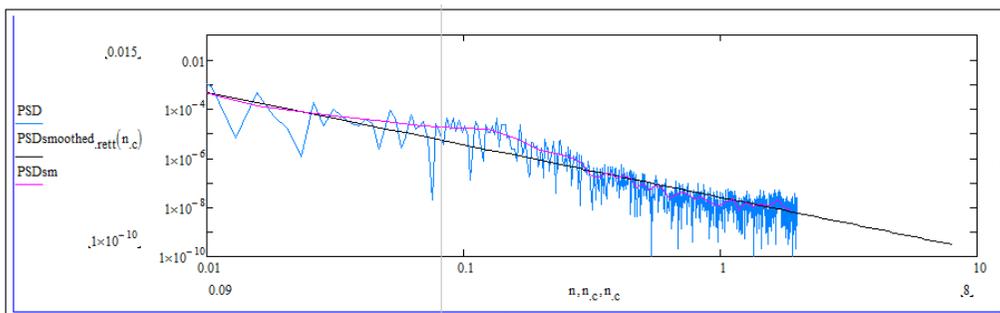


Figura G 47: PSD Smoothed rettifilo 30 anno 2012 Baiano – Napoli.

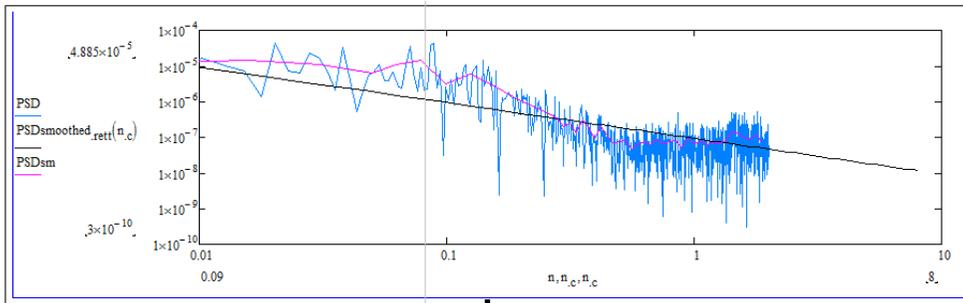
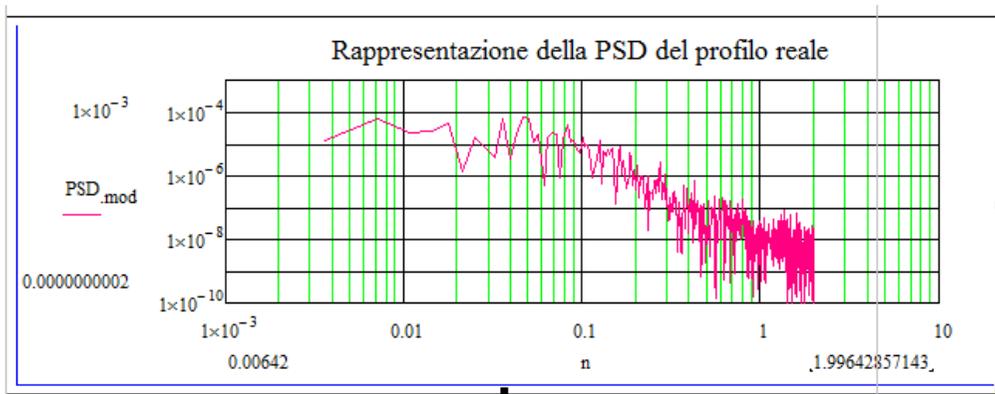


Figura G 48: PSD Smoothed rettilo 30 anno 2014 Baiano – Napoli.

Tabella G 16: Coefficiente di correlazione



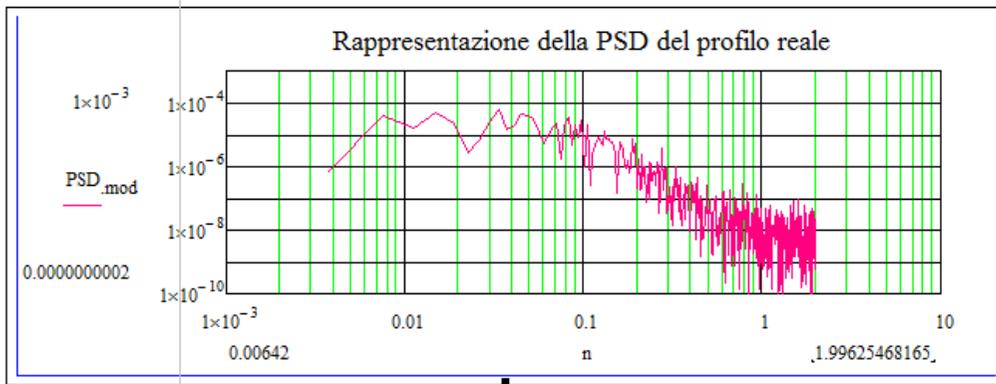


Figura G 50: PSD rettifilo 46 anno 2012 Napoli – Baiano.

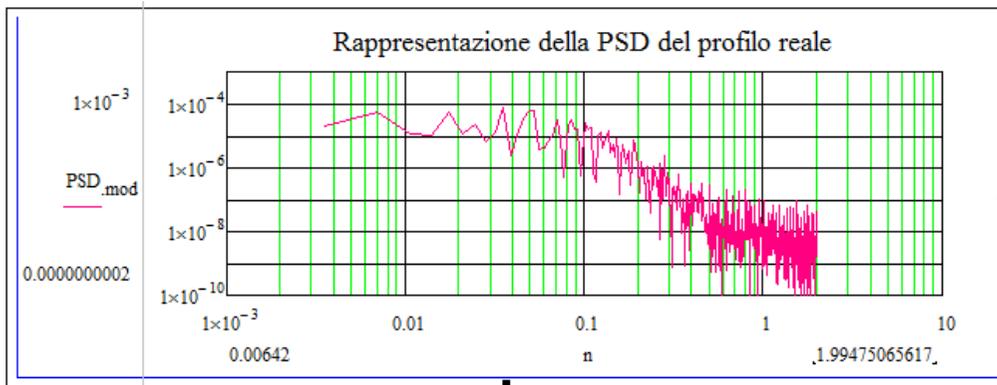


Figura G 51: PSD rettifilo 46 anno 2014 Napoli – Baiano.

Tabella G 17: Densità spettrale di potenza –Smoothed.

Psd Smoothed lineare					
	a=-18.013596		a=-18.042156		a=-18.212508
	b=-1.507537		b=-1.568825		b=-1.534269
	R^2=0.758302		R^2=0.767174		R^2=0.73946
n	2009	n	2012	n	2014
0.001787	0.000208688	0.001874	0.000277	0.001751	0.000209
0.003573	7.33979E-05	0.003747	9.35E-05	0.003501	7.22E-05
0.00536	3.98309E-05	0.005621	4.95E-05	0.005252	3.87E-05
0.007146	2.58149E-05	0.007494	3.15E-05	0.007002	2.49E-05
0.008933	1.84406E-05	0.009368	2.22E-05	0.008753	1.77E-05
0.010719	0.000014009	0.011241	1.67E-05	0.010503	1.34E-05
0.012506	0.000011104	0.013115	1.31E-05	0.012254	1.06E-05
0.014292	9.0794E-06	0.014988	1.06E-05	0.014004	8.6E-06

0.016079	7.6022E-06	0.016862	8.83E-06	0.015755	7.18E-06
0.017865	6.4858E-06	0.018735	7.49E-06	0.017505	6.11E-06
0.019652	5.6177E-06	0.020609	6.45E-06	0.019256	5.28E-06
0.021438	4.9271E-06	0.022482	5.62E-06	0.021007	4.62E-06
0.023225	0.000004367	0.024356	4.96E-06	0.022757	4.08E-06
0.025011	3.9054E-06	0.02623	4.42E-06	0.024508	3.64E-06
0.026798	3.5196E-06	0.028103	3.96E-06	0.026258	3.28E-06
0.028584	3.1933E-06	0.029977	3.58E-06	0.028009	2.97E-06
0.030371	2.9144E-06	0.03185	3.26E-06	0.029759	2.71E-06
0.032157	2.6738E-06	0.033724	2.98E-06	0.03151	2.48E-06
0.033944	2.4645E-06	0.035597	2.74E-06	0.03326	2.28E-06
0.03573	2.2811E-06	0.037471	2.52E-06	0.035011	2.11E-06
0.037517	2.1194E-06	0.039344	2.34E-06	0.036761	1.96E-06
0.039303	1.9758E-06	0.041218	2.17E-06	0.038512	1.82E-06
0.04109	1.8477E-06	0.043091	2.03E-06	0.040263	1.7E-06
0.042876	1.7329E-06	0.044965	1.9E-06	0.042013	1.59E-06
0.044663	1.6295E-06	0.046838	1.78E-06	0.043764	1.5E-06
0.046449	1.5359E-06	0.048712	1.67E-06	0.045514	1.41E-06
0.048236	0.000001451	0.050585	1.58E-06	0.047265	1.33E-06
0.050022	1.3736E-06	0.052459	1.49E-06	0.049015	1.26E-06
0.051809	1.3028E-06	0.054333	1.41E-06	0.050766	1.19E-06
0.053595	1.2379E-06	0.056206	1.34E-06	0.052516	1.13E-06
0.055382	1.1782E-06	0.05808	1.27E-06	0.054267	1.08E-06
0.057168	1.1231E-06	0.059953	1.21E-06	0.056018	1.03E-06
0.058955	1.0722E-06	0.061827	1.15E-06	0.057768	9.78E-07
0.060741	0.000001025	0.0637	1.1E-06	0.059519	9.34E-07
0.062528	9.812E-07	0.065574	1.05E-06	0.061269	8.94E-07
0.064314	9.404E-07	0.067447	1E-06	0.06302	8.56E-07
0.066101	9.024E-07	0.069321	9.61E-07	0.06477	8.21E-07
0.067887	8.668E-07	0.071194	9.22E-07	0.066521	7.88E-07
0.069674	8.335E-07	0.073068	8.85E-07	0.068271	7.57E-07
0.07146	8.023E-07	0.074941	8.51E-07	0.070022	7.28E-07
0.073247	0.000000773	0.076815	8.18E-07	0.071772	7.01E-07
0.075033	7.454E-07	0.078689	7.88E-07	0.073523	6.76E-07
0.07682	7.194E-07	0.080562	7.59E-07	0.075274	6.52E-07
0.078607	6.949E-07	0.082436	7.33E-07	0.077024	6.29E-07
0.080393	6.718E-07	0.084309	7.07E-07	0.078775	6.08E-07
0.08218	6.499E-07	0.086183	6.83E-07	0.080525	5.88E-07
0.083966	6.291E-07	0.088056	6.61E-07	0.082276	5.68E-07

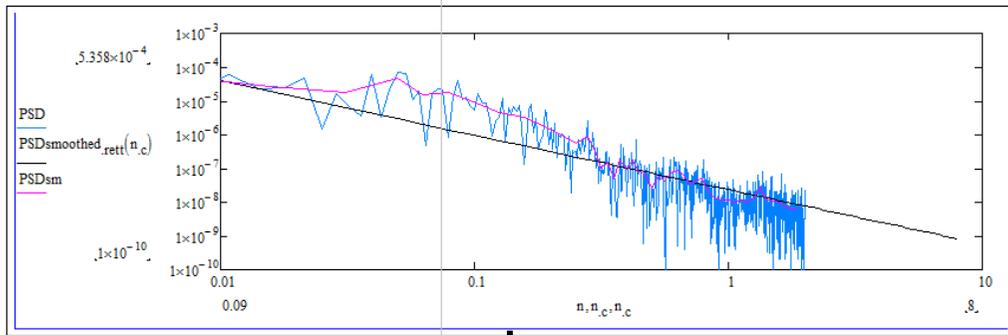


Figura G 52: PSD Smoothed rettifilo 46 anno 2009 Napoli – Baiano.

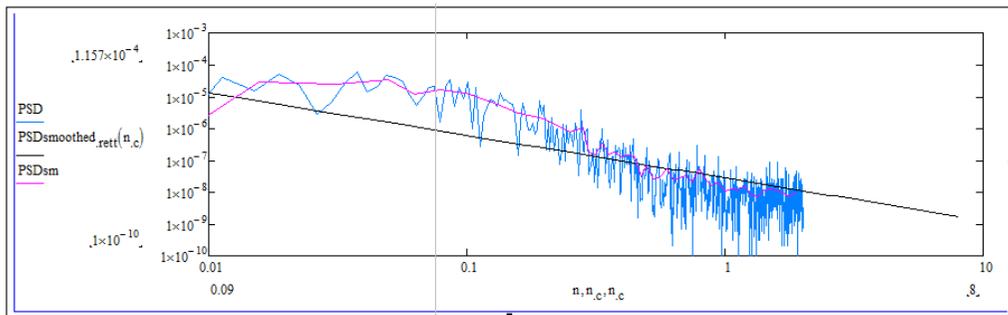


Figura G 53: PSD Smoothed rettifilo 46 anno 2012 Napoli – Baiano.

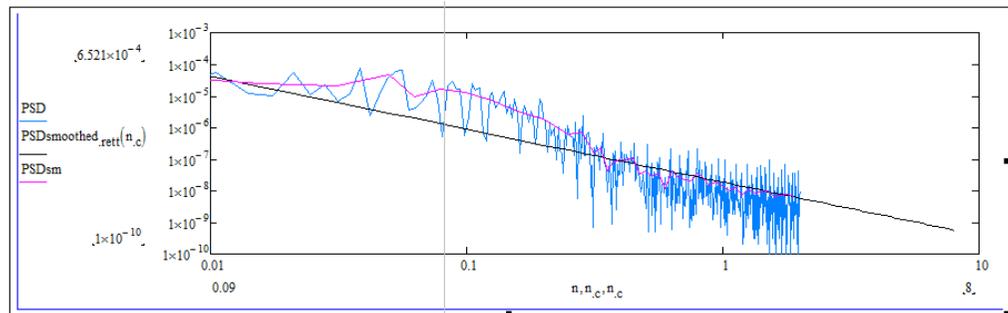


Figura G 54: PSD Smoothed rettifilo 46 anno 2014 Napoli – Baiano.

Tabella G 18: Coefficiente di correlazione

- Rettifilo 46 (2009 2012 2014) Pari

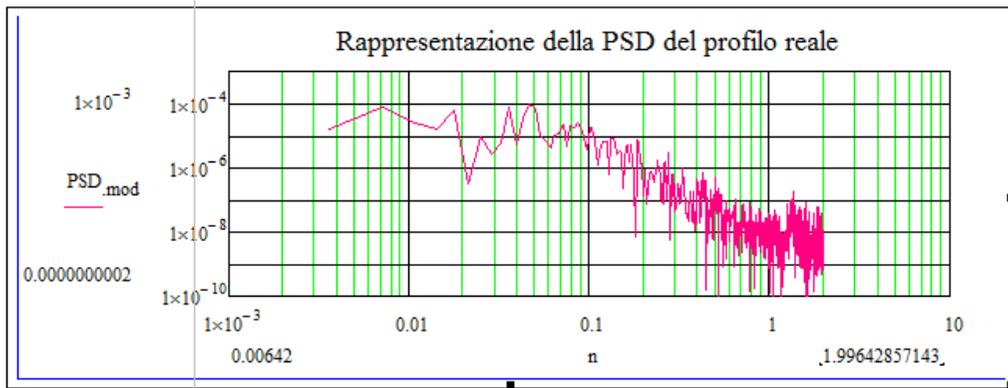


Figura G 55: PSD rettifilo 46 anno 2009 Baiano – Napoli.

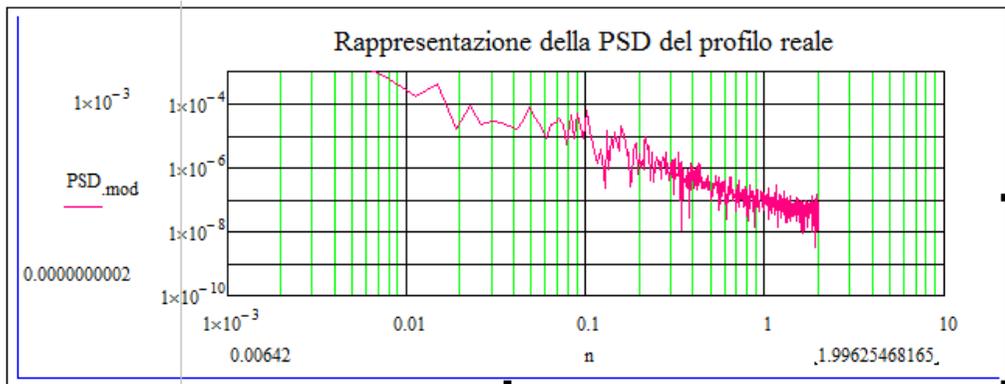


Figura G 56: PSD rettifilo 46 anno 2012 Baiano – Napoli.

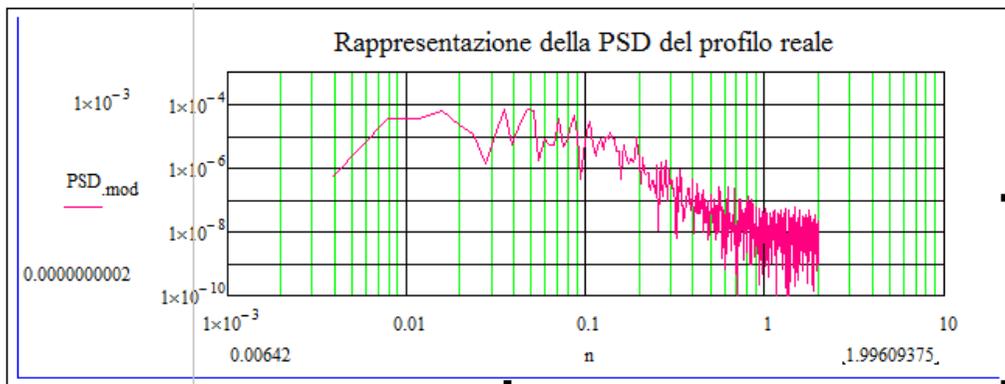


Figura G 57: PSD rettifilo 46 anno 2014 Baiano – Napoli.

Tabella G 19: Densità spettrale di potenza –Smoothed.

Psd Smoothed lineare					
a=-18.105793		a=-16.515361		a=-17.881724	
b=-1.524965		b=-1.633454		b=-1.503397	
R^2=0.736817		R^2=0.840775		R^2=0.751609	
n	2009	n	2012	N	2014
0.001787	0.000212	0.001874	0.001916	0.001954	0.000203
0.003573	7.38E-05	0.003747	0.000618	0.003908	7.15E-05
0.00536	3.98E-05	0.005621	0.000318	0.005862	3.89E-05
0.007146	2.57E-05	0.007494	0.000199	0.007816	2.52E-05
0.008933	1.83E-05	0.009368	0.000138	0.00977	1.8E-05
0.010719	1.38E-05	0.011241	0.000103	0.011724	1.37E-05
0.012506	1.09E-05	0.013115	7.98E-05	0.013679	1.09E-05
0.014292	8.92E-06	0.014988	6.42E-05	0.015633	8.9E-06
0.016079	7.45E-06	0.016862	5.29E-05	0.017587	7.45E-06
0.017865	6.34E-06	0.018735	4.46E-05	0.019541	6.36E-06
0.019652	5.49E-06	0.020609	3.81E-05	0.021495	5.51E-06
0.021438	4.8E-06	0.022482	3.31E-05	0.023449	4.84E-06
0.023225	4.25E-06	0.024356	2.9E-05	0.025403	4.29E-06
0.025011	3.8E-06	0.02623	2.57E-05	0.027357	3.84E-06
0.026798	3.42E-06	0.028103	2.3E-05	0.029311	3.46E-06
0.028584	3.1E-06	0.029977	2.07E-05	0.031265	3.14E-06
0.030371	2.82E-06	0.03185	1.87E-05	0.033219	2.86E-06
0.032157	2.59E-06	0.033724	1.71E-05	0.035173	2.63E-06
0.033944	2.38E-06	0.035597	1.56E-05	0.037128	2.42E-06
0.03573	2.2E-06	0.037471	1.44E-05	0.039082	2.24E-06
0.037517	2.05E-06	0.039344	1.33E-05	0.041036	2.08E-06
0.039303	1.91E-06	0.041218	1.23E-05	0.04299	1.94E-06
0.04109	1.78E-06	0.043091	1.14E-05	0.044944	1.82E-06
0.042876	1.67E-06	0.044965	1.07E-05	0.046898	1.71E-06
0.044663	1.57E-06	0.046838	9.98E-06	0.048852	1.6E-06
0.046449	1.48E-06	0.048712	9.36E-06	0.050806	1.51E-06
0.048236	1.4E-06	0.050585	8.8E-06	0.05276	1.43E-06
0.050022	1.32E-06	0.052459	8.29E-06	0.054714	1.35E-06
0.051809	1.25E-06	0.054333	7.83E-06	0.056668	1.28E-06
0.053595	1.19E-06	0.056206	7.41E-06	0.058622	1.22E-06
0.055382	1.13E-06	0.05808	7.02E-06	0.060576	1.16E-06
0.057168	1.08E-06	0.059953	6.67E-06	0.062531	1.11E-06
0.058955	1.03E-06	0.061827	6.34E-06	0.064485	1.06E-06

0.060741	9.82E-07	0.0637	6.04E-06	0.066439	1.01E-06
0.062528	9.39E-07	0.065574	5.76E-06	0.068393	9.67E-07
0.064314	9E-07	0.067447	5.5E-06	0.070347	9.27E-07
0.066101	8.63E-07	0.069321	5.26E-06	0.072301	8.9E-07
0.067887	8.28E-07	0.071194	5.03E-06	0.074255	8.55E-07
0.069674	7.96E-07	0.073068	4.83E-06	0.076209	8.22E-07
0.07146	7.66E-07	0.074941	4.63E-06	0.078163	7.91E-07
0.073247	7.38E-07	0.076815	4.45E-06	0.080117	7.62E-07
0.075033	7.11E-07	0.078689	4.28E-06	0.082071	7.35E-07
0.07682	6.86E-07	0.080562	4.11E-06	0.084025	7.1E-07
0.078607	6.62E-07	0.082436	3.96E-06	0.085979	6.86E-07
0.080393	6.4E-07	0.084309	3.82E-06	0.087934	6.63E-07
0.08218	6.19E-07	0.086183	3.68E-06	0.089888	6.41E-07
0.083966	5.99E-07	0.088056	3.56E-06	0.091842	6.21E-07

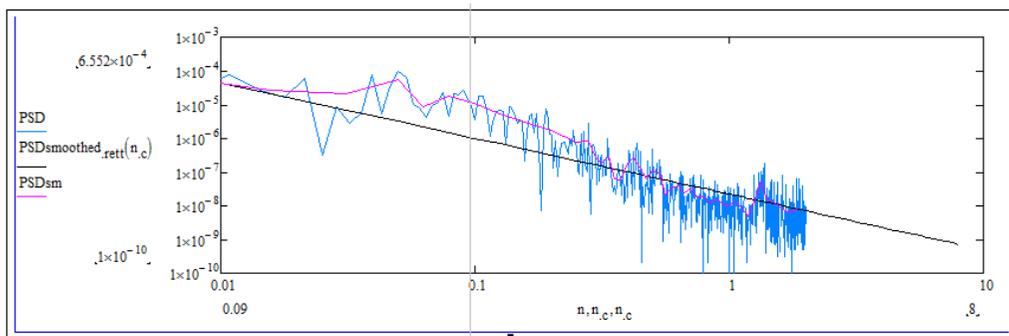


Figura G 58: PSD Smoothed rettifilo 46 anno 2009 Baiano – Napoli.

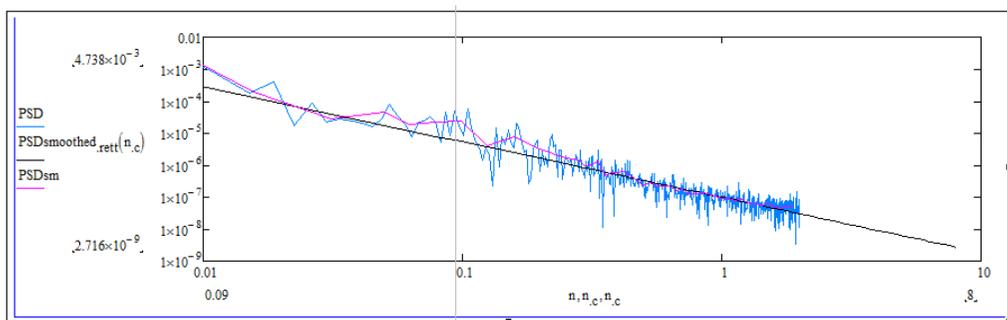


Figura G 59: PSD Smoothed rettifilo 46 anno 2012 Baiano – Napoli.

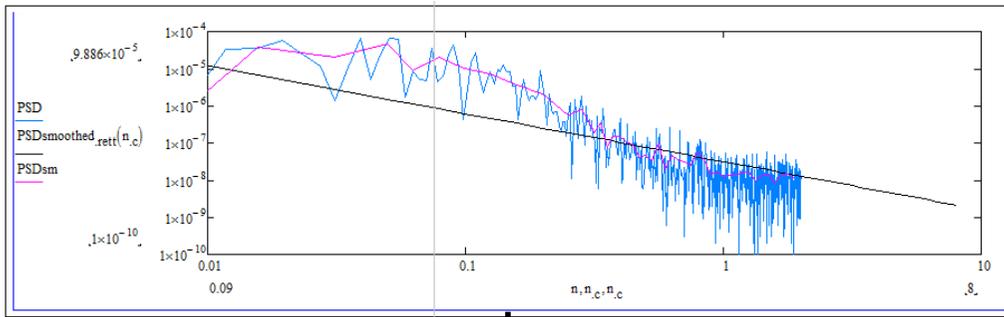
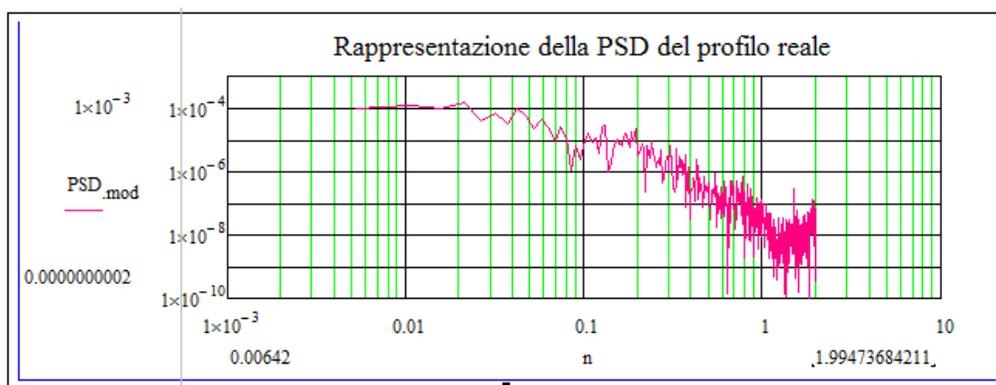


Figura G 60: PSD Smoothed rettifilo 46 anno 2014 Baiano – Napoli.

Tabella G 20: Coefficiente di correlazione



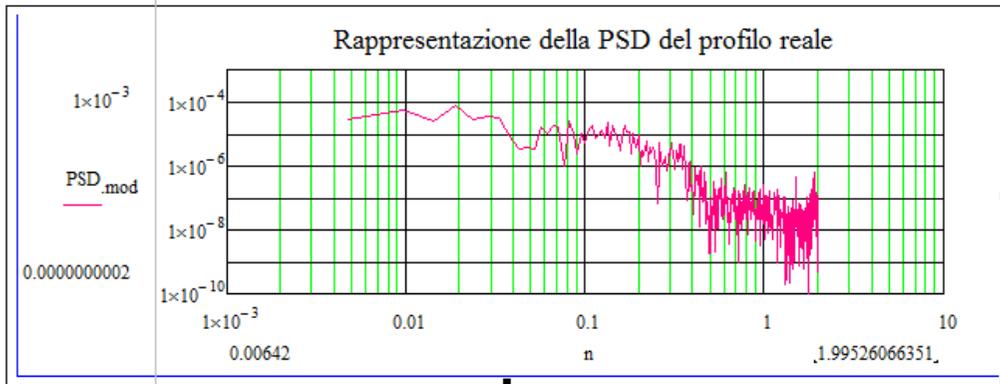


Figura G 62: PSD curva 4 anno 2012 Napoli – Baiano.

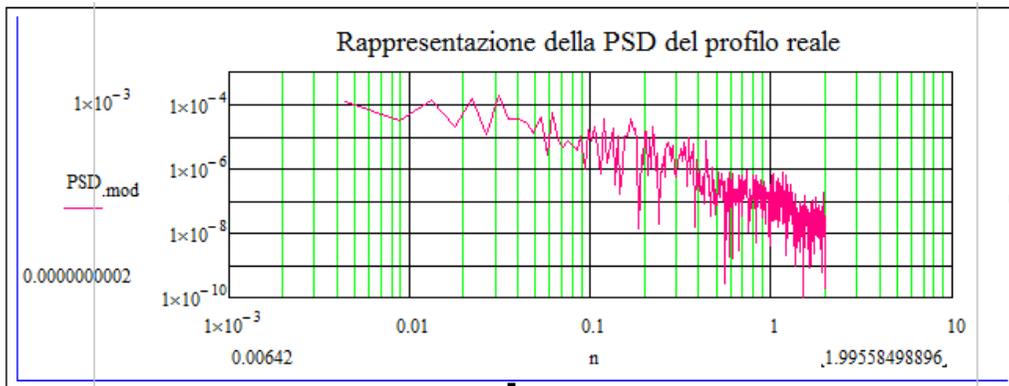


Figura G 63: PSD curva 4 anno 2014 Napoli – Baiano.

Tabella G 21: Densità spettrale di potenza –Smoothed.

Psd Smoothed lineare					
a=-17.116359		a=-16.71389		a=-16.304626	
b=-1.674635		b=-1.3369		b=-1.456375	
R^2=0.750987		R^2=0.723221		R^2=0.771937	
N	2009	N	2012	N	2014
0.002633	0.000769443	0.002371	0.000178	0.002209	0.000612
0.005267	0.000241024	0.004742	7.05E-05	0.004417	0.000223
0.0079	0.000122229	0.007113	4.1E-05	0.006626	0.000124
0.010533	7.54998E-05	0.009484	2.79E-05	0.008835	8.13E-05
0.013167	5.19585E-05	0.011855	2.07E-05	0.011044	5.87E-05
0.0158	3.82875E-05	0.014226	1.62E-05	0.013252	4.5E-05
0.018433	2.95764E-05	0.016598	1.32E-05	0.015461	3.6E-05
0.021066	0.00002365	0.018969	1.1E-05	0.01767	2.96E-05
0.0237	1.94164E-05	0.02134	9.44E-06	0.019879	2.5E-05

0.026333	1.62758E-05	0.023711	8.2E-06	0.022087	2.14E-05
0.028966	1.38747E-05	0.026082	7.22E-06	0.024296	1.86E-05
0.0316	1.19934E-05	0.028453	6.43E-06	0.026505	1.64E-05
0.034233	1.04889E-05	0.030824	5.77E-06	0.028713	1.46E-05
0.036866	9.2647E-06	0.033195	5.23E-06	0.030922	1.31E-05
0.0395	8.2538E-06	0.035566	4.77E-06	0.033131	1.19E-05
0.042133	7.4082E-06	0.037937	4.37E-06	0.03534	1.08E-05
0.044766	0.000006693	0.040308	4.03E-06	0.037548	9.88E-06
0.0474	6.0821E-06	0.042679	3.74E-06	0.039757	9.09E-06
0.050033	5.5556E-06	0.04505	3.48E-06	0.041966	8.41E-06
0.052666	5.0983E-06	0.047421	3.25E-06	0.044174	7.8E-06
0.0553	4.6983E-06	0.049793	3.04E-06	0.046383	7.27E-06
0.057933	4.3462E-06	0.052164	2.86E-06	0.048592	6.79E-06
0.060566	4.0344E-06	0.054535	2.69E-06	0.050801	6.36E-06
0.063199	3.7569E-06	0.056906	2.54E-06	0.053009	5.98E-06
0.065833	3.5086E-06	0.059277	2.41E-06	0.055218	5.64E-06
0.068466	3.2856E-06	0.061648	2.29E-06	0.057427	5.32E-06
0.071099	3.0844E-06	0.064019	2.17E-06	0.059636	5.04E-06
0.073733	2.9021E-06	0.06639	2.07E-06	0.061844	4.78E-06
0.076366	2.7365E-06	0.068761	1.98E-06	0.064053	4.54E-06
0.078999	2.5855E-06	0.071132	1.89E-06	0.066262	4.32E-06
0.081633	2.4473E-06	0.073503	1.81E-06	0.06847	4.12E-06
0.084266	2.3206E-06	0.075874	1.73E-06	0.070679	3.93E-06
0.086899	0.000002204	0.078245	1.66E-06	0.072888	3.76E-06
0.089533	2.0966E-06	0.080616	1.6E-06	0.075097	3.6E-06
0.092166	1.9972E-06	0.082988	1.54E-06	0.077305	3.45E-06
0.094799	1.9052E-06	0.085359	1.48E-06	0.079514	3.31E-06
0.097433	1.8197E-06	0.08773	1.43E-06	0.081723	3.18E-06
0.100066	1.7403E-06	0.090101	1.38E-06	0.083932	3.06E-06
0.102699	1.6662E-06	0.092472	1.33E-06	0.08614	2.95E-06
0.105332	0.000001597	0.094843	1.29E-06	0.088349	2.84E-06
0.107966	1.5323E-06	0.097214	1.24E-06	0.090558	2.74E-06
0.110599	1.4717E-06	0.099585	1.2E-06	0.092766	2.65E-06
0.113232	1.4149E-06	0.101956	1.17E-06	0.094975	2.56E-06
0.115866	1.3614E-06	0.104327	1.13E-06	0.097184	2.47E-06
0.118499	1.3111E-06	0.106698	1.1E-06	0.099393	2.39E-06
0.121132	1.2638E-06	0.109069	1.07E-06	0.101601	2.32E-06
0.123766	1.2191E-06	0.11144	1.04E-06	0.10381	2.25E-06

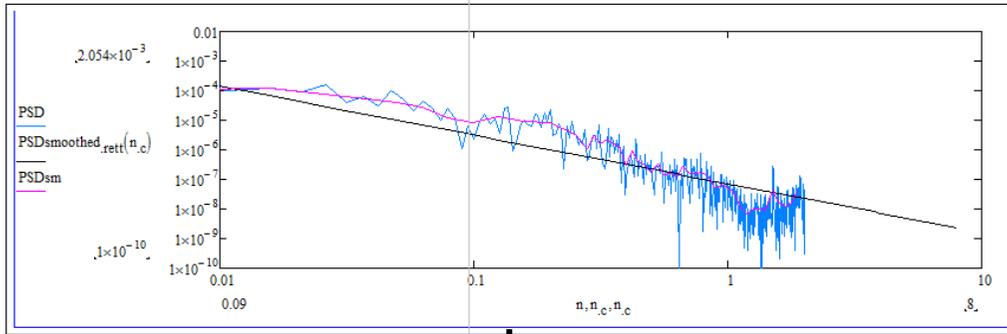


Figura G 64: PSD smoothed curva 4 anno 2009 Napoli – Baiano.

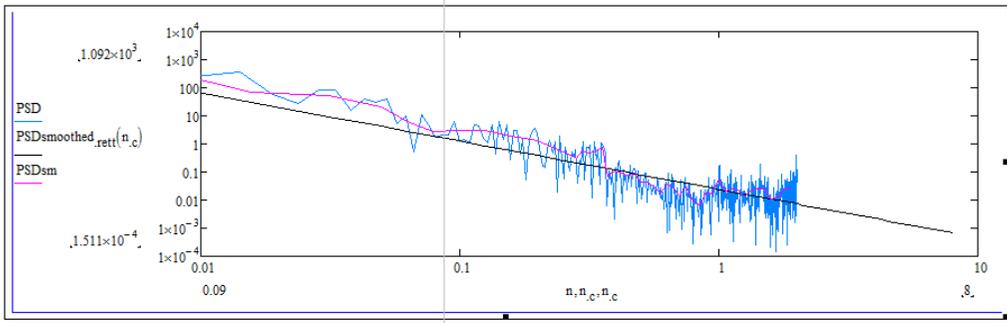


Figura G 65: PSD smoothed curva 4 anno 2012 Napoli – Baiano.

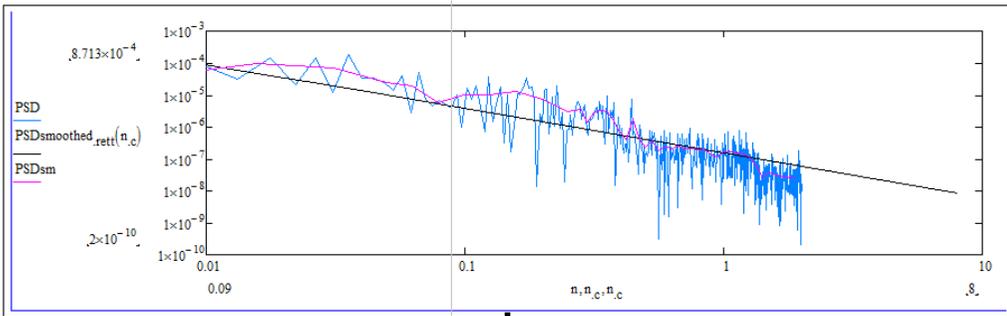


Figura G 66: PSD smoothed curva 4 anno 2014 Napoli – Baiano.

Tabella G 22: Coefficiente di correlazione

- Curva 7 (2009 2012 2014) Pari - Gruppo 2

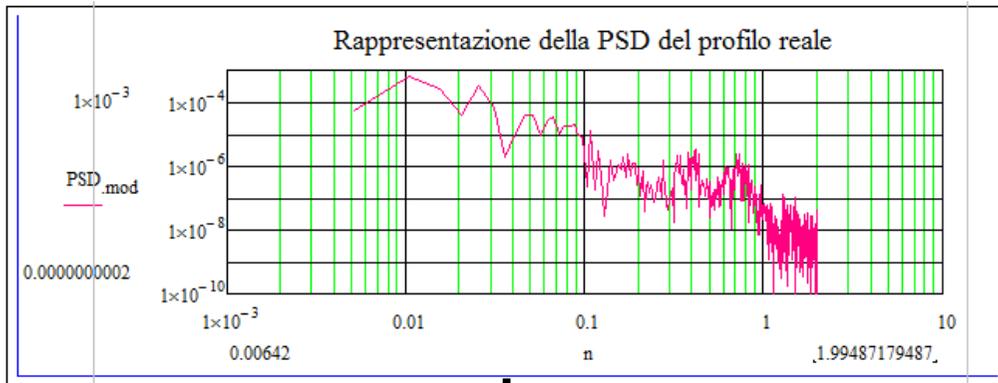


Figura G 67: PSD curva 7 anno 2009 Baiano – Napoli.

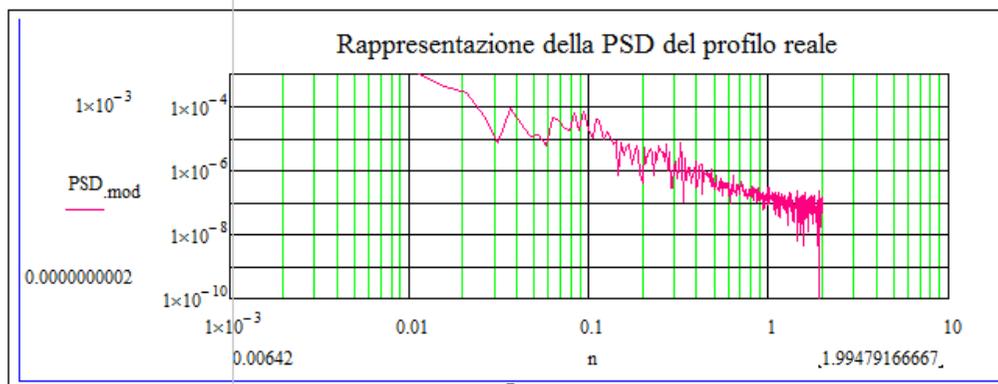


Figura G 68: PSD curva 7 anno 2012 Baiano – Napoli.

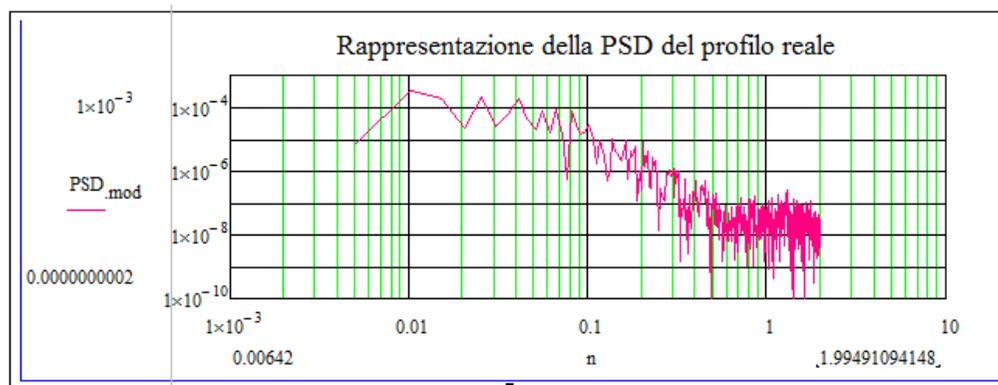


Figura G 69: PSD curva 7 anno 2014 Baiano – Napoli.

Tabella G 23: Densità spettrale di potenza –Smoothed.

Psd Smoothed lineare					
a=-17.090854		a=-16.139268		a=-17.17381	
b=-1.466716		b=-1.64207		b=-1.344279	
R^2=0.687479		R^2=0.843414		R^2=0.693107	
n	2009	n	2012	N	2014
0.002566	0.000238	0.002606	0.001714	0.002546	0.000107
0.005131	8.63E-05	0.005212	0.000549	0.005092	4.21E-05
0.007697	4.76E-05	0.007818	0.000282	0.007638	2.44E-05
0.010263	3.12E-05	0.010423	0.000176	0.010185	1.66E-05
0.012829	2.25E-05	0.013029	0.000122	0.012731	1.23E-05
0.015394	1.72E-05	0.015635	9.04E-05	0.015277	9.61E-06
0.01796	1.37E-05	0.018241	7.02E-05	0.017823	7.81E-06
0.020526	1.13E-05	0.020847	5.64E-05	0.020369	6.53E-06
0.023092	9.5E-06	0.023453	4.65E-05	0.022915	5.57E-06
0.025657	8.14E-06	0.026059	3.91E-05	0.025461	4.84E-06
0.028223	7.08E-06	0.028664	3.34E-05	0.028008	4.25E-06
0.030789	6.23E-06	0.03127	2.9E-05	0.030554	3.78E-06
0.033355	5.54E-06	0.033876	2.54E-05	0.0331	3.4E-06
0.03592	4.97E-06	0.036482	2.25E-05	0.035646	3.08E-06
0.038486	4.49E-06	0.039088	2.01E-05	0.038192	2.8E-06
0.041052	4.09E-06	0.041694	1.81E-05	0.040738	2.57E-06
0.043618	3.74E-06	0.0443	1.63E-05	0.043285	2.37E-06
0.046183	3.44E-06	0.046906	1.49E-05	0.045831	2.19E-06
0.048749	3.18E-06	0.049511	1.36E-05	0.048377	2.04E-06
0.051315	2.95E-06	0.052117	1.25E-05	0.050923	1.9E-06
0.053881	2.74E-06	0.054723	1.16E-05	0.053469	1.78E-06
0.056446	2.56E-06	0.057329	1.07E-05	0.056015	1.68E-06
0.059012	2.4E-06	0.059935	9.95E-06	0.058561	1.58E-06
0.061578	2.25E-06	0.062541	9.28E-06	0.061108	1.49E-06
0.064144	2.12E-06	0.065147	8.68E-06	0.063654	1.41E-06
0.066709	2.01E-06	0.067752	8.14E-06	0.0662	1.34E-06
0.069275	1.9E-06	0.070358	7.65E-06	0.068746	1.27E-06
0.071841	1.8E-06	0.072964	7.21E-06	0.071292	1.21E-06
0.074407	1.71E-06	0.07557	6.8E-06	0.073838	1.16E-06
0.076972	1.63E-06	0.078176	6.43E-06	0.076384	1.1E-06
0.079538	1.55E-06	0.080782	6.1E-06	0.078931	1.06E-06
0.082104	1.48E-06	0.083388	5.79E-06	0.081477	1.01E-06
0.08467	1.41E-06	0.085993	5.5E-06	0.084023	9.71E-07
0.087235	1.35E-06	0.088599	5.24E-06	0.086569	9.33E-07
0.089801	1.3E-06	0.091205	4.99E-06	0.089115	8.98E-07

0.092367	1.24E-06	0.093811	4.77E-06	0.091661	8.64E-07
0.094933	1.2E-06	0.096417	4.56E-06	0.094208	8.33E-07
0.097498	1.15E-06	0.099023	4.36E-06	0.096754	8.04E-07
0.100064	1.11E-06	0.101629	4.18E-06	0.0993	7.76E-07
0.10263	1.07E-06	0.104235	4.01E-06	0.101846	7.5E-07
0.105196	1.03E-06	0.10684	3.85E-06	0.104392	7.26E-07
0.107761	9.92E-07	0.109446	3.7E-06	0.106938	7.03E-07
0.110327	9.59E-07	0.112052	3.56E-06	0.109484	6.81E-07
0.112893	9.27E-07	0.114658	3.43E-06	0.112031	6.6E-07
0.115459	8.97E-07	0.117264	3.31E-06	0.114577	6.4E-07
0.118024	8.68E-07	0.11987	3.19E-06	0.117123	6.22E-07
0.12059	8.41E-07	0.122476	3.08E-06	0.119669	6.04E-07

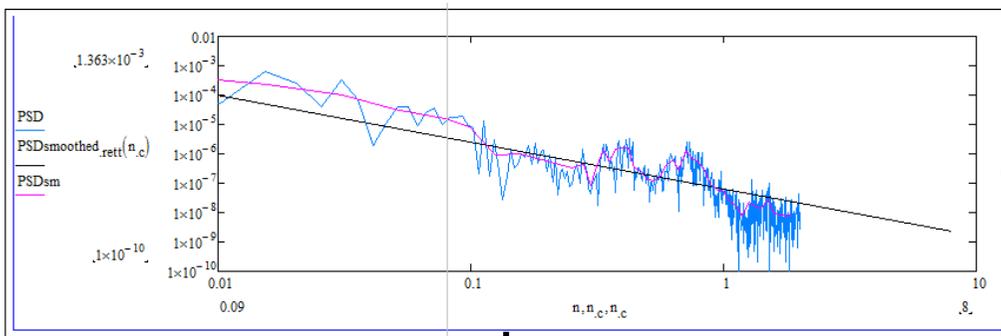


Figura G 70: PSD smoothed curva 7 anno 2009 Baiano – Napoli.

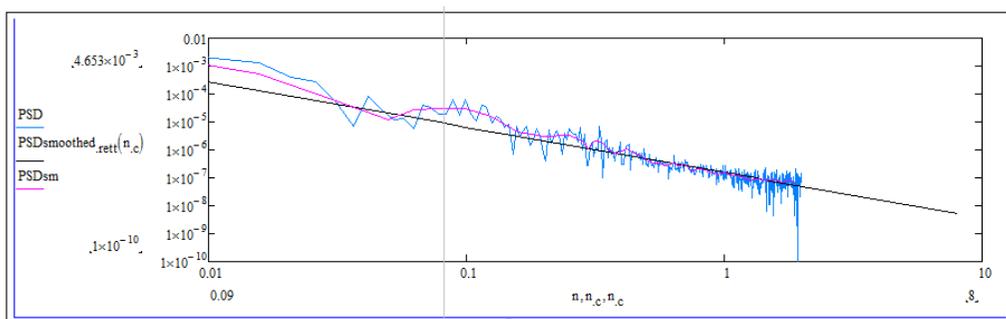


Figura G 71: PSD smoothed curva 7 anno 2012 Baiano – Napoli.

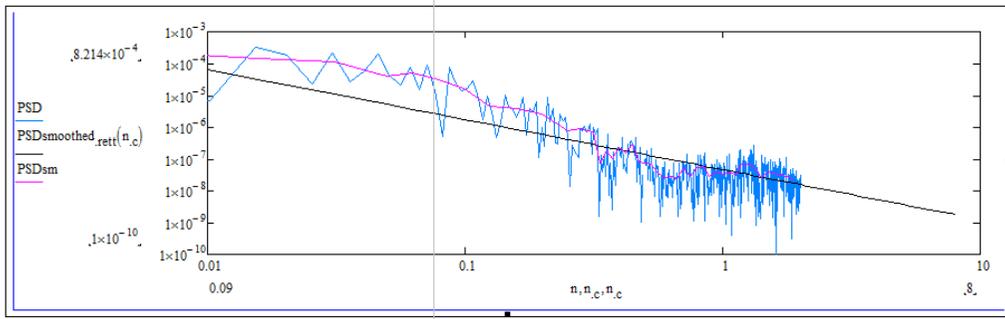
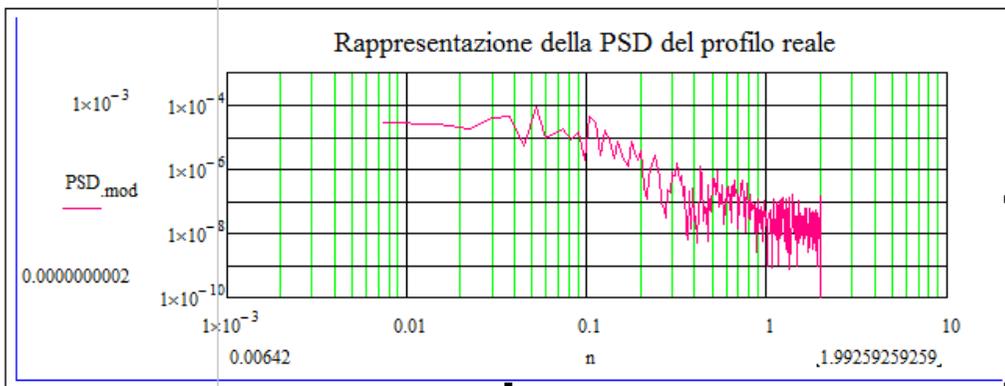


Figura G 72: PSD smoothed curva 7 anno 2014 Baiano – Napoli.

Tabella G 24: Coefficiente di correlazione



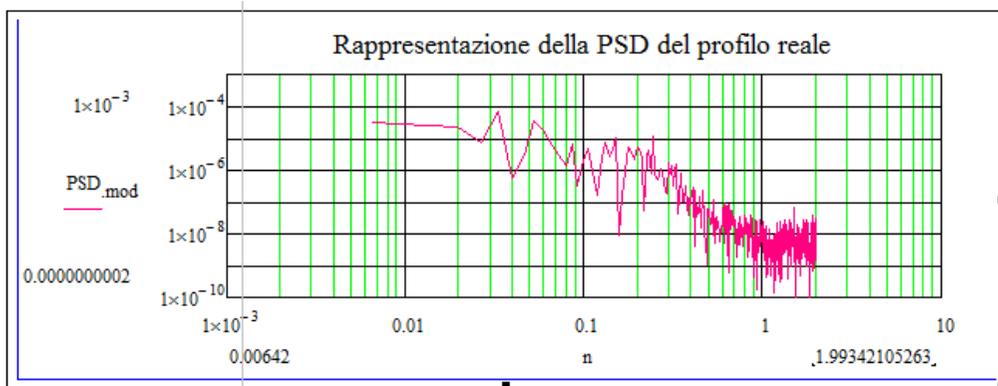


Figura G 74: PSD curva 33 anno 2012 Napoli – Baiano.

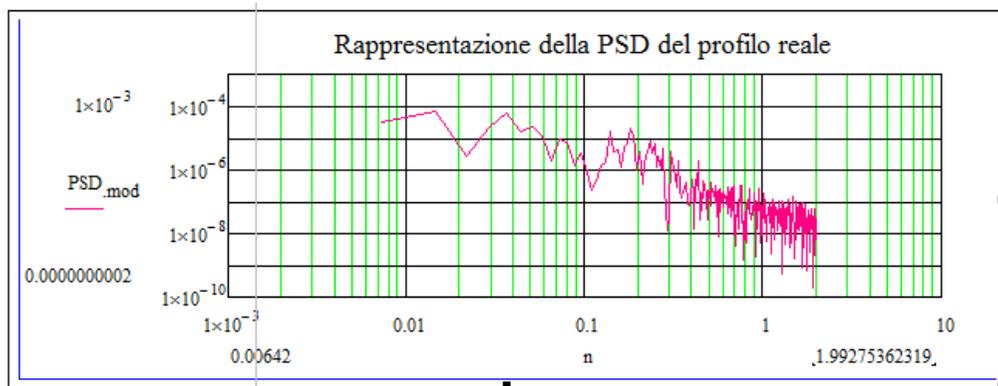


Figura G 75: PSD curva 33 anno 2014 Napoli – Baiano.

Tabella G 25: Densità spettrale di potenza –Smoothed.

Psd Smoothed lineare					
a=-17.051961		a=-18.353006		a=-15.745425	
b=-1.340803		b=-1.405449		b=-1.259692	
R^2=0.761717		R^2=0.696681		R^2=0.799003	
n	2009	n	2012	n	2014
0.003707	0.000071428	0.003292	3.3E-05	0.003177	0.000203
0.007414	2.81998E-05	0.006584	1.25E-05	0.006354	8.5E-05
0.011121	1.63736E-05	0.009877	7.04E-06	0.009531	5.1E-05
0.014829	1.11333E-05	0.013169	4.7E-06	0.012708	3.55E-05
0.018536	8.2544E-06	0.016461	3.44E-06	0.015886	2.68E-05
0.022243	6.4643E-06	0.019753	2.66E-06	0.019063	2.13E-05
0.02595	5.2572E-06	0.023045	2.14E-06	0.02224	1.75E-05
0.029657	4.3954E-06	0.026337	1.78E-06	0.025417	1.48E-05
0.033364	3.7533E-06	0.02963	1.5E-06	0.028594	1.28E-05

0.037071	3.2589E-06	0.032922	1.3E-06	0.031771	1.12E-05
0.040778	2.8679E-06	0.036214	1.13E-06	0.034948	9.92E-06
0.044486	2.5521E-06	0.039506	1E-06	0.038125	8.89E-06
0.048193	2.2924E-06	0.042798	8.97E-07	0.041303	8.04E-06
0.0519	2.0756E-06	0.046091	8.08E-07	0.04448	7.32E-06
0.055607	1.8922E-06	0.049383	7.34E-07	0.047657	6.71E-06
0.059314	1.7353E-06	0.052675	6.7E-07	0.050834	6.19E-06
0.063021	1.5998E-06	0.055967	6.15E-07	0.054011	5.73E-06
0.066728	1.4818E-06	0.059259	5.68E-07	0.057188	5.34E-06
0.070436	1.3782E-06	0.062551	5.26E-07	0.060365	4.99E-06
0.074143	1.2866E-06	0.065844	4.9E-07	0.063542	4.67E-06
0.07785	1.2051E-06	0.069136	4.57E-07	0.06672	4.39E-06
0.081557	1.1323E-06	0.072428	4.28E-07	0.069897	4.14E-06
0.085264	1.0667E-06	0.07572	4.02E-07	0.073074	3.92E-06
0.088971	1.0076E-06	0.079012	3.79E-07	0.076251	3.71E-06
0.092678	9.539E-07	0.082305	3.58E-07	0.079428	3.53E-06
0.096386	0.000000905	0.085597	3.39E-07	0.082605	3.36E-06
0.100093	8.604E-07	0.088889	3.21E-07	0.085782	3.2E-06
0.1038	8.194E-07	0.092181	3.05E-07	0.088959	3.06E-06
0.107507	7.818E-07	0.095473	2.91E-07	0.092137	2.93E-06
0.111214	0.000000747	0.098765	2.77E-07	0.095314	2.8E-06
0.114921	7.149E-07	0.102058	2.65E-07	0.098491	2.69E-06
0.118628	6.851E-07	0.10535	2.53E-07	0.101668	2.59E-06
0.122335	6.574E-07	0.108642	2.42E-07	0.104845	2.49E-06
0.126043	6.316E-07	0.111934	2.32E-07	0.108022	2.4E-06
0.12975	6.075E-07	0.115226	2.23E-07	0.111199	2.31E-06
0.133457	0.000000585	0.118519	2.14E-07	0.114376	2.23E-06
0.137164	5.639E-07	0.121811	2.06E-07	0.117554	2.15E-06
0.140871	5.441E-07	0.125103	1.99E-07	0.120731	2.08E-06
0.144578	5.255E-07	0.128395	1.92E-07	0.123908	2.02E-06
0.148285	0.000000508	0.131687	1.85E-07	0.127085	1.95E-06
0.151993	4.914E-07	0.134979	1.79E-07	0.130262	1.89E-06
0.1557	4.758E-07	0.138272	1.73E-07	0.133439	1.84E-06
0.159407	0.000000461	0.141564	1.67E-07	0.136616	1.78E-06
0.163114	0.000000447	0.144856	1.62E-07	0.139793	1.73E-06
0.166821	4.337E-07	0.148148	1.57E-07	0.142971	1.68E-06
0.170528	4.212E-07	0.15144	1.52E-07	0.146148	1.64E-06

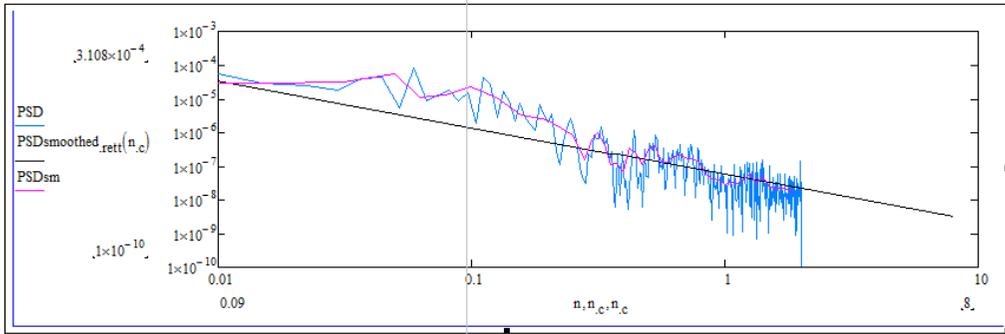


Figura G 76: PSD smoothed curva 33 anno 2009 Napoli – Baiano.

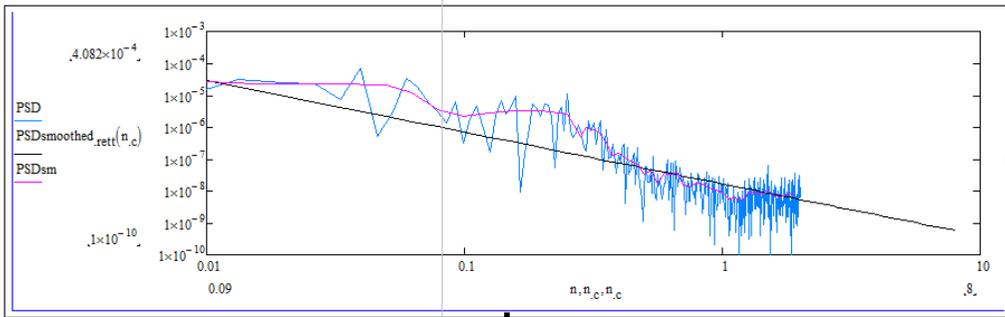


Figura G 77: PSD smoothed curva 33 anno 2012 Napoli – Baiano.

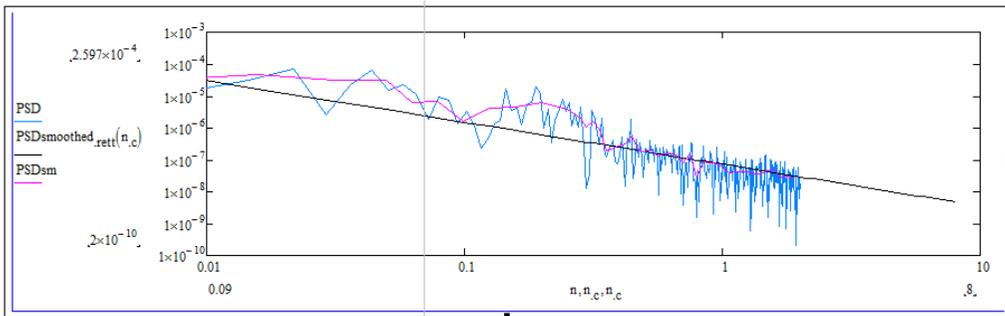


Figura G 78: PSD smoothed curva 33 anno 2014 Napoli – Baiano.

Tabella G 26: Coefficiente di correlazione

- Curva 33 (2009 2012 2014) Pari

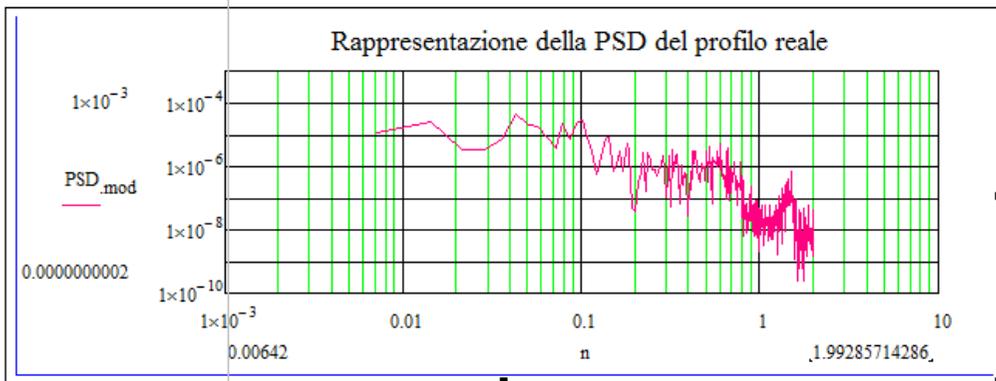


Figura G 79: PSD curva 33 anno 2009 Baiano – Napoli.

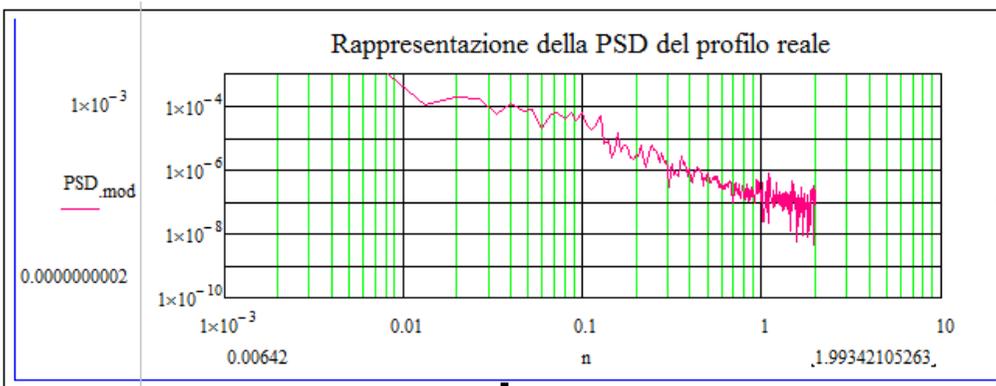


Figura G 80: PSD curva 33 anno 2012 Baiano – Napoli.

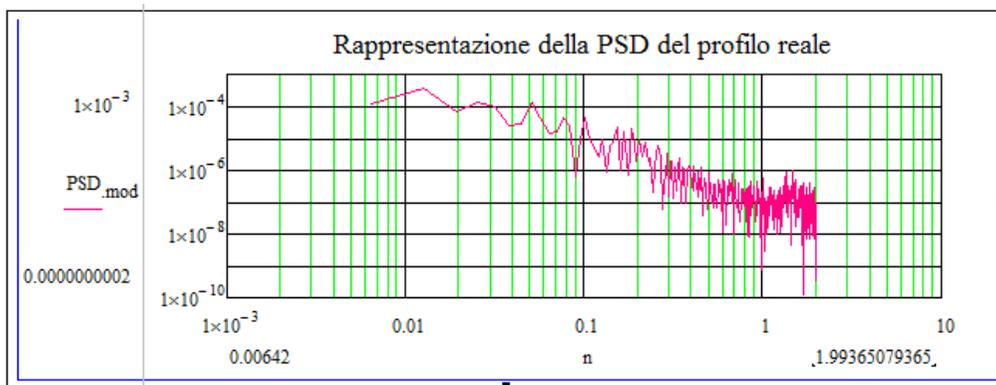


Figura G 81: PSD curva 33 anno 2014 Baiano – Napoli.

Tabella G 27: Densità spettrale di potenza –Smoothed.

Psd Smoothed lineare					
a=-16.587556		a=-15.883534		a=-15.952316	
b=-1.178126		b=-1.426245		b=-1.287354	
R^2=0.594998		R^2=0.819266		R^2=0.802787	
N	2009	n	2012	N	2014
0.003575	4.77E-05	0.003292	0.000439	0.003177	0.000194
0.007149	2.11E-05	0.006584	0.000163	0.006354	7.95E-05
0.010724	1.31E-05	0.009877	9.16E-05	0.009531	4.72E-05
0.014298	9.32E-06	0.013169	6.08E-05	0.012708	3.26E-05
0.017873	7.17E-06	0.016461	4.42E-05	0.015886	2.44E-05
0.021448	5.78E-06	0.019753	3.41E-05	0.019063	1.93E-05
0.025022	4.82E-06	0.023045	2.74E-05	0.02224	1.58E-05
0.028597	4.12E-06	0.026337	2.26E-05	0.025417	1.33E-05
0.032172	3.59E-06	0.02963	1.91E-05	0.028594	1.15E-05
0.035746	3.17E-06	0.032922	1.65E-05	0.031771	1E-05
0.039321	2.83E-06	0.036214	1.44E-05	0.034948	8.85E-06
0.042895	2.55E-06	0.039506	1.27E-05	0.038125	7.92E-06
0.04647	2.32E-06	0.042798	1.13E-05	0.041303	7.14E-06
0.050045	2.13E-06	0.046091	1.02E-05	0.04448	6.49E-06
0.053619	1.96E-06	0.049383	9.23E-06	0.047657	5.94E-06
0.057194	1.82E-06	0.052675	8.42E-06	0.050834	5.47E-06
0.060769	1.69E-06	0.055967	7.72E-06	0.054011	5.06E-06
0.064343	1.58E-06	0.059259	7.12E-06	0.057188	4.7E-06
0.067918	1.49E-06	0.062551	6.59E-06	0.060365	4.38E-06
0.071492	1.4E-06	0.065844	6.12E-06	0.063542	4.1E-06
0.075067	1.32E-06	0.069136	5.71E-06	0.06672	3.85E-06
0.078642	1.25E-06	0.072428	5.34E-06	0.069897	3.63E-06
0.082216	1.19E-06	0.07572	5.02E-06	0.073074	3.43E-06
0.085791	1.13E-06	0.079012	4.72E-06	0.076251	3.24E-06
0.089366	1.08E-06	0.082305	4.45E-06	0.079428	3.08E-06
0.09294	1.03E-06	0.085597	4.21E-06	0.082605	2.93E-06
0.096515	9.83E-07	0.088889	3.99E-06	0.085782	2.79E-06
0.100089	9.41E-07	0.092181	3.79E-06	0.088959	2.66E-06
0.103664	9.03E-07	0.095473	3.6E-06	0.092137	2.54E-06
0.107239	8.68E-07	0.098765	3.43E-06	0.095314	2.43E-06
0.110813	8.35E-07	0.102058	3.28E-06	0.098491	2.33E-06
0.114388	8.04E-07	0.10535	3.13E-06	0.101668	2.24E-06
0.117962	7.76E-07	0.108642	3E-06	0.104845	2.15E-06

0.121537	7.49E-07	0.111934	2.87E-06	0.108022	2.07E-06
0.125112	7.24E-07	0.115226	2.76E-06	0.111199	2E-06
0.128686	7E-07	0.118519	2.65E-06	0.114376	1.92E-06
0.132261	6.78E-07	0.121811	2.55E-06	0.117554	1.86E-06
0.135836	6.57E-07	0.125103	2.45E-06	0.120731	1.79E-06
0.13941	6.37E-07	0.128395	2.36E-06	0.123908	1.74E-06
0.142985	6.18E-07	0.131687	2.28E-06	0.127085	1.68E-06
0.146559	6.01E-07	0.134979	2.2E-06	0.130262	1.63E-06
0.150134	5.84E-07	0.138272	2.13E-06	0.133439	1.58E-06
0.153709	5.68E-07	0.141564	2.06E-06	0.136616	1.53E-06
0.157283	5.53E-07	0.144856	1.99E-06	0.139793	1.49E-06
0.160858	5.38E-07	0.148148	1.93E-06	0.142971	1.44E-06
0.164433	5.25E-07	0.15144	1.87E-06	0.146148	1.4E-06

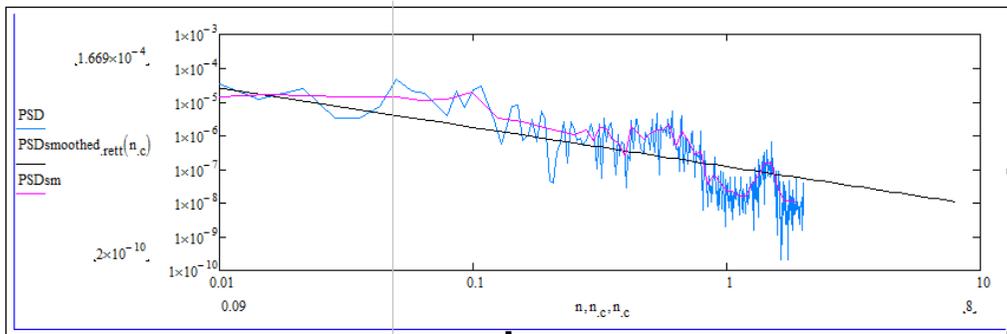


Figura G 82: PSD smoothed curva 33 anno 2009 Baiano – Napoli.

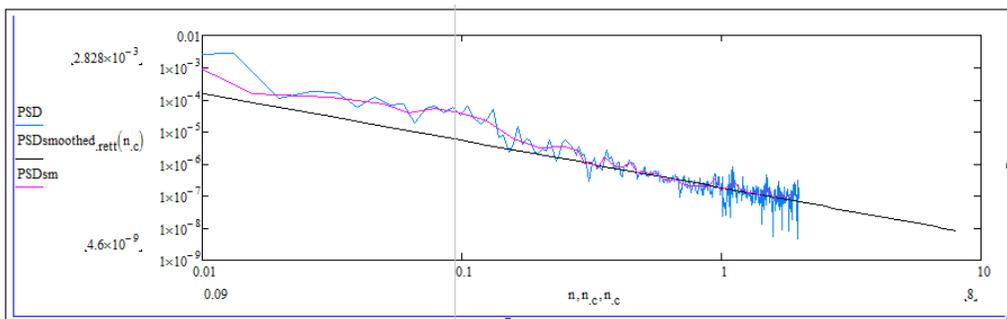


Figura G 83: PSD smoothed curva 33 anno 2012 Baiano – Napoli.

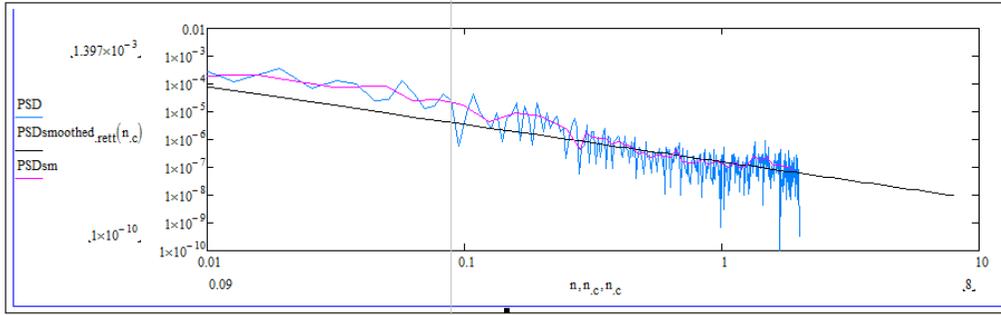
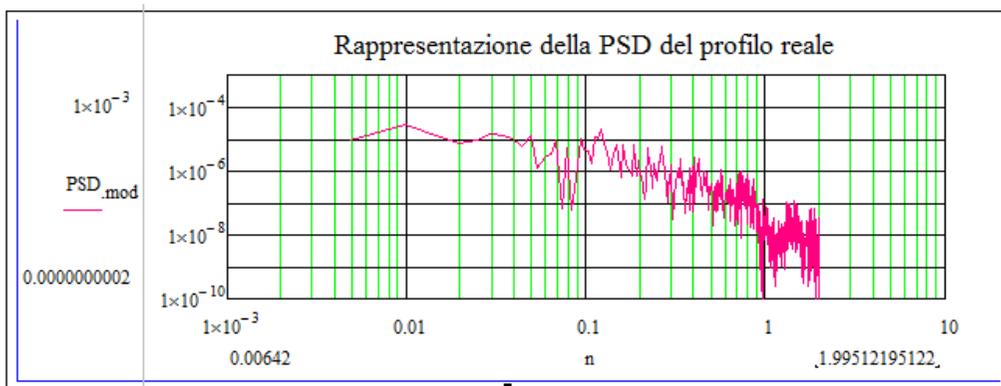


Figura G 84: PSD smoothed curva 33 anno 2014 Baiano – Napoli.

Tabella G 28: Coefficiente di correlazione



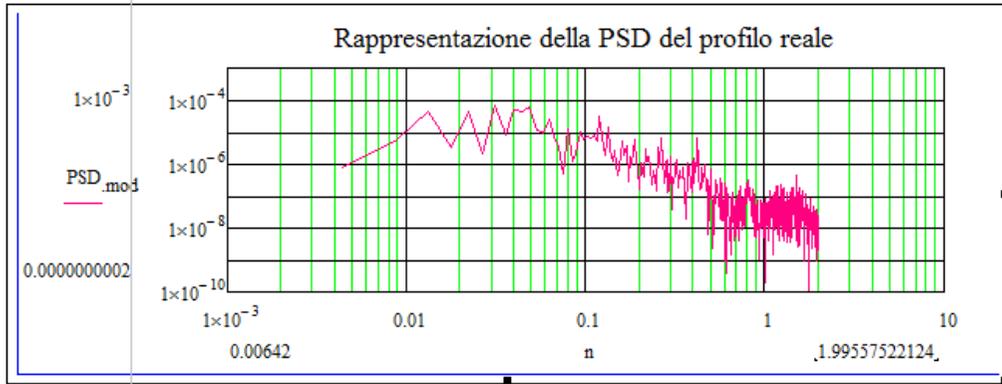


Figura G 86: PSD curva 8 anno 2012 Napoli – Baiano.

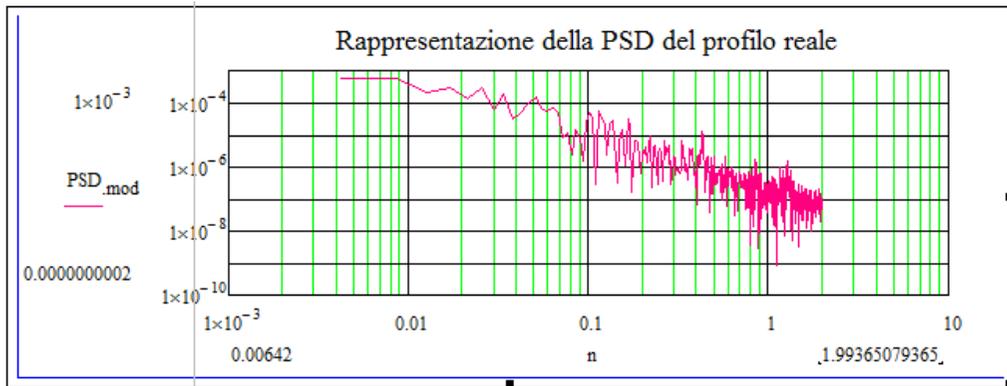


Figura G 87: PSD curva 8 anno 2014 Napoli – Baiano.

Tabella G 29: Densità spettrale di potenza –Smoothed.

Psd Smoothed lineare					
a=-17.014565		a=-16.793162		a=-15.627038	
b=-1.133984		b=-1.196239		b=-1.459933	
R^2=0.573665		R^2=0.701209		R^2=0.810219	
n	2009	n	2012	n	2014
0.002441	3.51057E-06	0.002214	7.63E-05	0.002118	0.00131
0.004881	7.41872E-06	0.004427	3.33E-05	0.004235	0.000476
0.007322	1.88249E-05	0.006641	2.05E-05	0.006353	0.000264
0.009762	1.0638E-05	0.008854	1.45E-05	0.00847	0.000173
0.012203	4.86013E-06	0.011068	1.11E-05	0.010588	0.000125
0.014643	4.31942E-06	0.013282	8.95E-06	0.012705	9.58E-05
0.017084	8.86111E-06	0.015495	7.44E-06	0.014823	7.65E-05
0.019524	3.0793E-06	0.017709	6.34E-06	0.01694	6.29E-05
0.021965	1.45833E-06	0.019923	5.51E-06	0.019058	5.3E-05

0.024405	2.00998E-06	0.022136	4.86E-06	0.021175	4.54E-05
0.026846	6.02756E-07	0.02435	4.33E-06	0.023293	3.95E-05
0.029286	7.83568E-07	0.026563	3.91E-06	0.02541	3.48E-05
0.031727	3.321E-07	0.028777	3.55E-06	0.027528	3.1E-05
0.034167	4.02194E-07	0.030991	3.25E-06	0.029645	2.78E-05
0.036608	1.26687E-07	0.033204	2.99E-06	0.031763	2.51E-05
0.039048	2.33707E-07	0.035418	2.77E-06	0.03388	2.29E-05
0.041489	1.23164E-07	0.037631	2.58E-06	0.035998	2.09E-05
0.043929	3.95628E-07	0.039845	2.41E-06	0.038115	1.93E-05
0.04637	3.41435E-07	0.042059	2.25E-06	0.040233	1.78E-05
0.04881	3.61941E-07	0.044272	2.12E-06	0.04235	1.65E-05
0.051251	1.58479E-07	0.046486	0.000002	0.044468	1.54E-05
0.053691	7.64184E-08	0.0487	1.89E-06	0.046585	1.44E-05
0.056132	2.25304E-08	0.050913	1.79E-06	0.048703	1.35E-05
0.058572	3.45378E-08	0.053127	1.7E-06	0.050821	1.27E-05
0.061013	1.33882E-08	0.05534	1.62E-06	0.052938	1.19E-05
0.063453	8.13756E-09	0.057554	1.55E-06	0.055056	1.13E-05
0.065894	7.56453E-09	0.059768	1.48E-06	0.057173	1.07E-05
0.068334	9.93902E-09	0.061981	1.42E-06	0.059291	1.01E-05
0.070775	3.11705E-08	0.064195	1.36E-06	0.061408	9.6E-06
0.073215	2.94667E-08	0.066408	1.31E-06	0.063526	9.14E-06
0.075656	3.23736E-08	0.068622	1.26E-06	0.065643	8.71E-06
0.078096	1.16801E-08	0.070836	1.21E-06	0.067761	8.32E-06
0.080537	7.76636E-09	0.073049	1.16E-06	0.069878	7.95E-06
0.082977	1.22746E-08	0.075263	1.12E-06	0.071996	7.61E-06
0.085418	1.28258E-08	0.077476	1.09E-06	0.074113	7.3E-06
0.087858	7.57414E-09	0.07969	1.05E-06	0.076231	7E-06
0.090299	1.26338E-08	0.081904	1.02E-06	0.078348	6.73E-06
0.092739	1.14868E-08	0.084117	9.84E-07	0.080466	6.47E-06
0.09518	9.11841E-09	0.086331	9.54E-07	0.082583	6.23E-06
0.097621	3.08928E-08	0.088545	9.25E-07	0.084701	6E-06
0.100061	2.44367E-08	0.090758	8.98E-07	0.086818	5.79E-06
0.102502	8.08894E-09	0.092972	8.73E-07	0.088936	5.59E-06
0.104942	2.33082E-08	0.095185	8.49E-07	0.091053	5.4E-06
0.107383	2.27315E-07	0.097399	8.26E-07	0.093171	5.22E-06
0.109823	2.6008E-07	0.099613	8.04E-07	0.095289	5.06E-06
0.112264	6.00359E-07	0.101826	7.83E-07	0.097406	4.9E-06
0.114704	2.53E-06	0.10404	7.63E-07	0.099524	4.74E-06

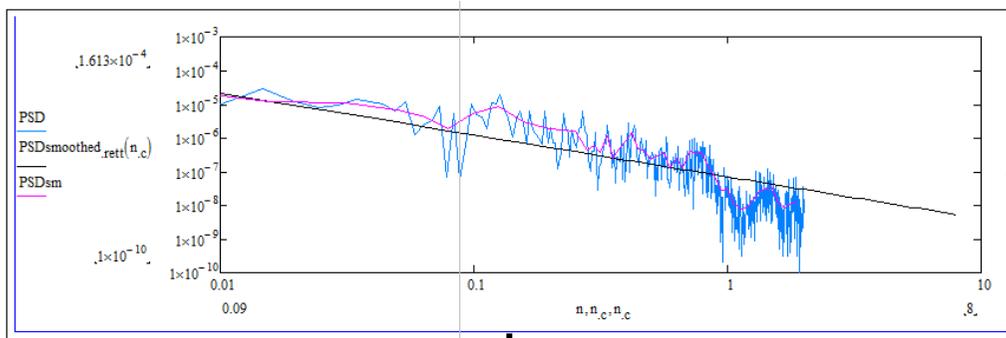


Figura G 88: PSD smoothed curva 8 anno 2009 Napoli – Baiano.

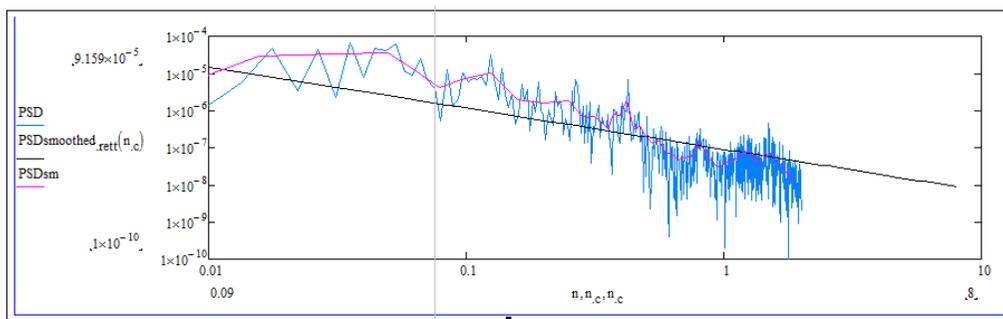


Figura G 89: PSD smoothed curva 8 anno 2012 Napoli – Baiano.

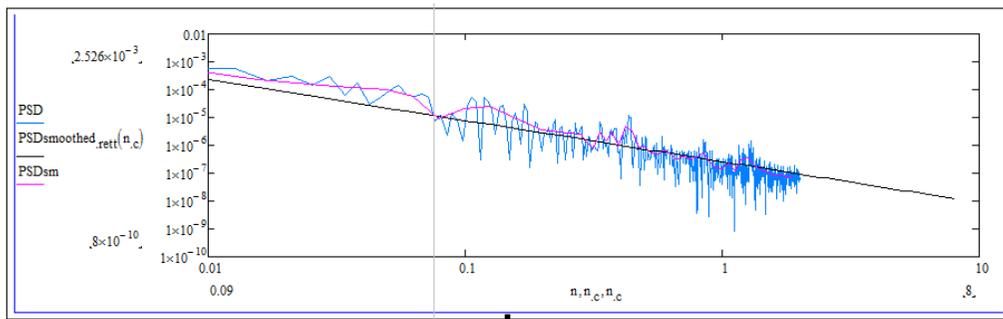


Figura G 90: PSD smoothed curva 8 anno 2014 Napoli – Baiano.

Tabella G 30: Coefficiente di correlazione

▪ Curva 8 (2009 2012 2014) Pari

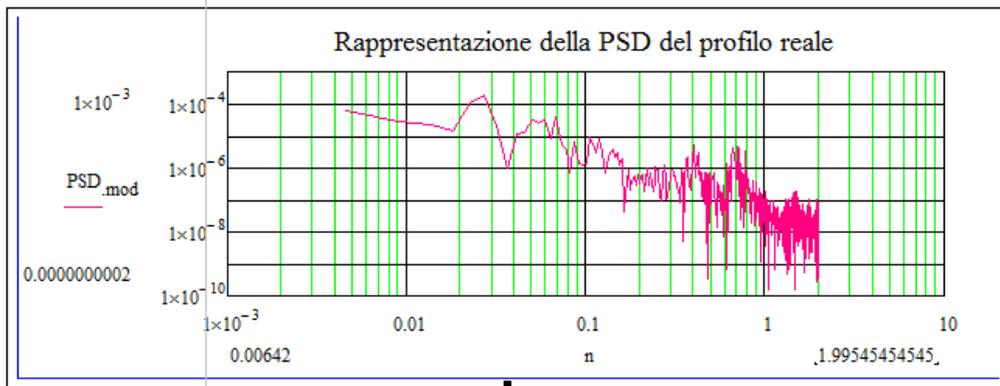


Figura G 91: PSD curva 8 anno 2009 Baiano – Napoli.

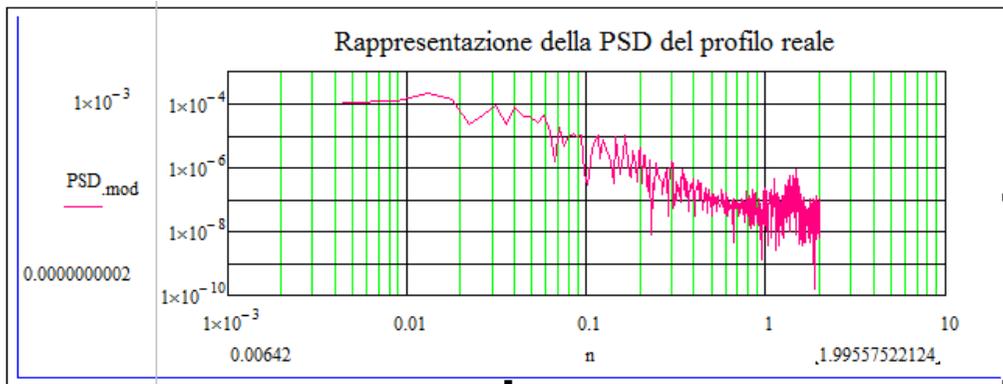


Figura G 92: PSD curva 8 anno 2009 Baiano – Napoli.

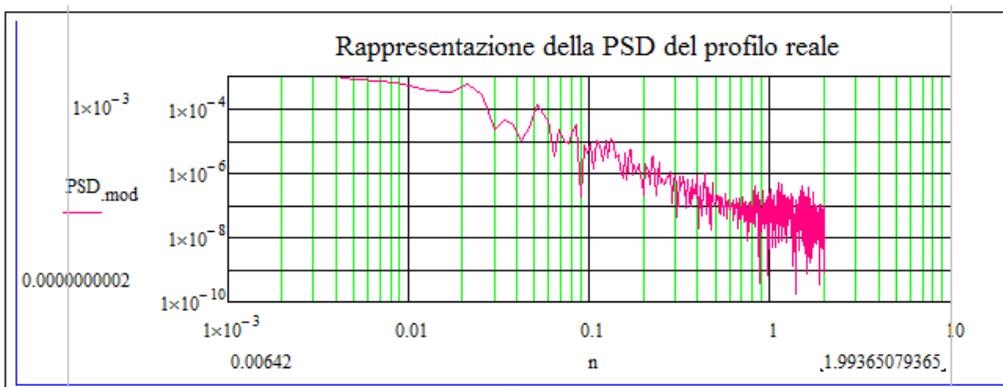


Figura G 93: PSD curva 8 anno 2009 Baiano – Napoli.

Tabella G 31: Densità spettrale di potenza –Smoothed.

Psd Smoothed lineare					
a=-16.480364		a=-16.680621		a=-16.674124	
b=-1.193384		b=-1.314792		b=-1.544636	
R^2=0.668147		R^2=0.778396		R^2=0.827469	
N	2009	n	2012	N	2014
0.002274	9.93E-05	0.002214	0.000176	0.002118	0.000775
0.004548	4.34E-05	0.004427	7.09E-05	0.004235	0.000266
0.006822	2.68E-05	0.006641	4.16E-05	0.006353	0.000142
0.009096	1.9E-05	0.008854	2.85E-05	0.00847	9.1E-05
0.01137	1.46E-05	0.011068	2.12E-05	0.010588	6.45E-05
0.013644	1.17E-05	0.013282	1.67E-05	0.012705	4.87E-05
0.015918	9.74E-06	0.015495	1.37E-05	0.014823	3.84E-05
0.018192	8.3E-06	0.017709	1.15E-05	0.01694	3.12E-05
0.020466	7.22E-06	0.019923	9.81E-06	0.019058	2.6E-05
0.02274	6.36E-06	0.022136	8.54E-06	0.021175	2.21E-05
0.025014	5.68E-06	0.02435	7.54E-06	0.023293	1.91E-05
0.027288	5.12E-06	0.026563	6.72E-06	0.02541	1.67E-05
0.029562	4.65E-06	0.028777	6.05E-06	0.027528	1.47E-05
0.031836	4.26E-06	0.030991	5.49E-06	0.029645	1.31E-05
0.03411	3.92E-06	0.033204	5.01E-06	0.031763	1.18E-05
0.036384	3.63E-06	0.035418	4.6E-06	0.03388	1.07E-05
0.038658	3.38E-06	0.037631	4.25E-06	0.035998	9.74E-06
0.040932	3.16E-06	0.039845	3.94E-06	0.038115	8.92E-06
0.043206	2.96E-06	0.042059	3.67E-06	0.040233	8.2E-06
0.04548	2.78E-06	0.044272	3.43E-06	0.04235	7.58E-06
0.047754	2.62E-06	0.046486	3.22E-06	0.044468	7.03E-06
0.050028	2.48E-06	0.0487	3.03E-06	0.046585	6.54E-06
0.052302	2.35E-06	0.050913	2.86E-06	0.048703	6.11E-06
0.054576	2.24E-06	0.053127	2.7E-06	0.050821	5.72E-06
0.05685	2.13E-06	0.05534	2.56E-06	0.052938	5.37E-06
0.059125	2.03E-06	0.057554	2.43E-06	0.055056	5.05E-06
0.061399	1.94E-06	0.059768	2.31E-06	0.057173	4.77E-06
0.063673	1.86E-06	0.061981	2.21E-06	0.059291	4.51E-06
0.065947	1.79E-06	0.064195	2.11E-06	0.061408	4.27E-06
0.068221	1.72E-06	0.066408	2.01E-06	0.063526	4.05E-06
0.070495	1.65E-06	0.068622	1.93E-06	0.065643	3.85E-06
0.072769	1.59E-06	0.070836	1.85E-06	0.067761	3.67E-06
0.075043	1.53E-06	0.073049	1.78E-06	0.069878	3.5E-06

0.077317	1.48E-06	0.075263	1.71E-06	0.071996	3.34E-06
0.079591	1.43E-06	0.077476	1.65E-06	0.074113	3.19E-06
0.081865	1.38E-06	0.07969	1.59E-06	0.076231	3.06E-06
0.084139	1.34E-06	0.081904	1.53E-06	0.078348	2.93E-06
0.086413	1.29E-06	0.084117	1.48E-06	0.080466	2.81E-06
0.088687	1.25E-06	0.086331	1.43E-06	0.082583	2.7E-06
0.090961	1.22E-06	0.088545	1.38E-06	0.084701	2.6E-06
0.093235	1.18E-06	0.090758	1.34E-06	0.086818	2.5E-06
0.095509	1.15E-06	0.092972	1.29E-06	0.088936	2.41E-06
0.097783	1.12E-06	0.095185	1.26E-06	0.091053	2.32E-06
0.100057	1.09E-06	0.097399	1.22E-06	0.093171	2.24E-06
0.102331	1.06E-06	0.099613	1.18E-06	0.095289	2.17E-06
0.104605	1.03E-06	0.101826	1.15E-06	0.097406	2.09E-06
0.106879	1E-06	0.10404	1.12E-06	0.099524	2.02E-06

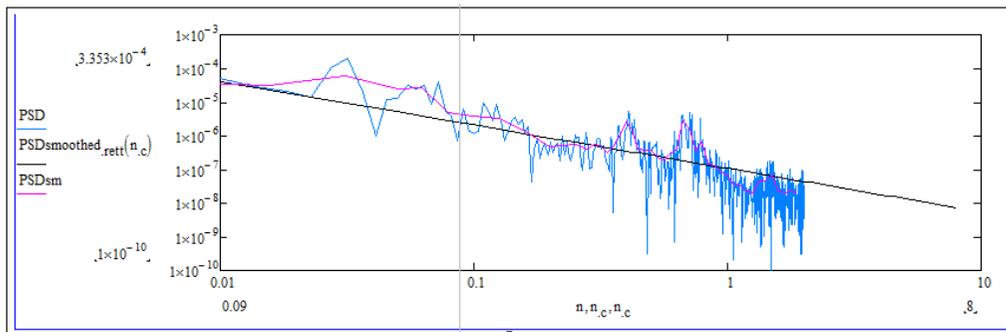


Figura G 94: PSD smoothed curva 8 anno 2009 Baiano – Napoli.

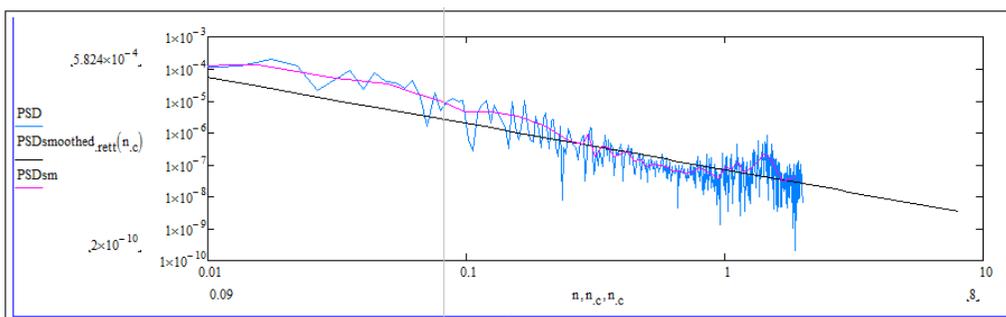


Figura G 95: PSD smoothed curva 8 anno 2012 Baiano – Napoli.

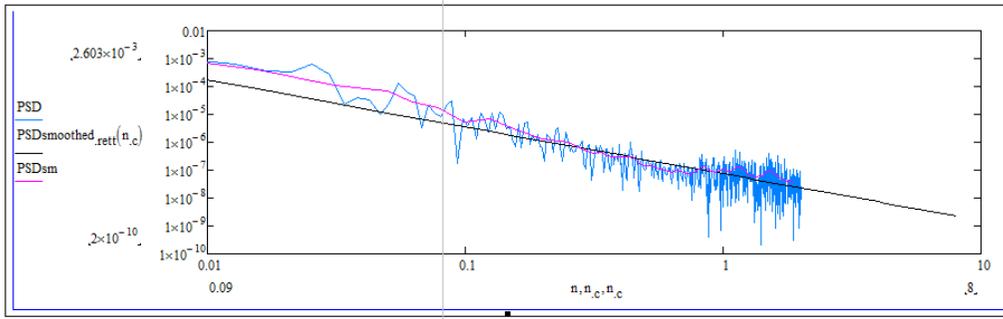
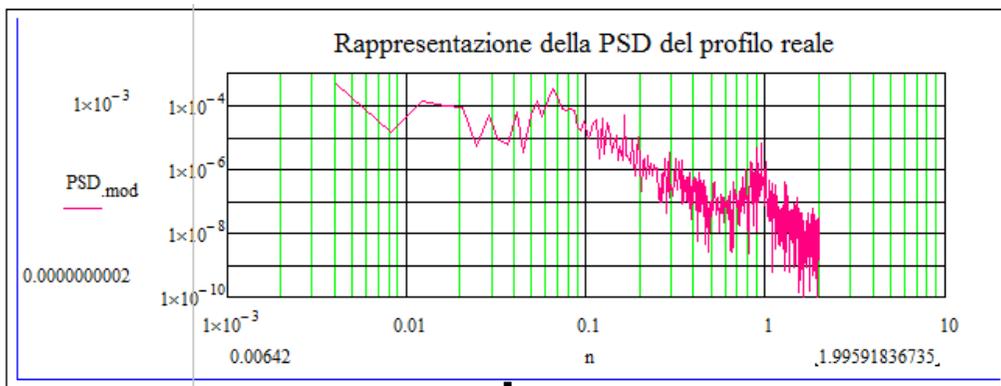


Figura G 96: PSD smoothed curva 8 anno 2014 Baiano – Napoli.

Tabella G 32: Coefficiente di correlazione



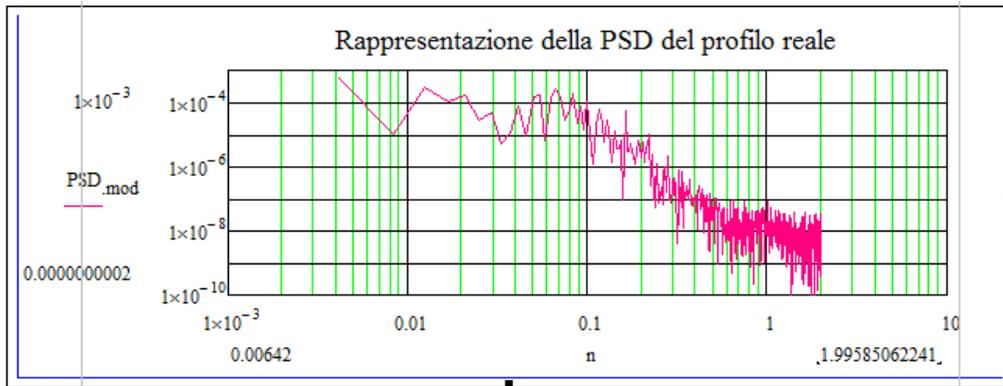


Figura G 98: PSD curva 73 anno 2012 Napoli – Baiano.

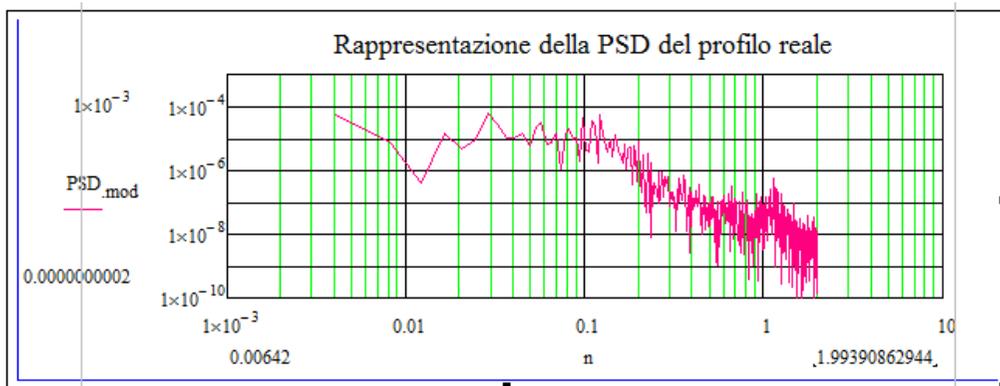


Figura G 99: PSD curva 73 anno 2014 Napoli – Baiano.

Tabella G 33: Densità spettrale di potenza –Smoothed.

Psd Smoothed lineare					
a=-16.481355		a=-17.925726		a=-15.627038	
b=-1.191934		b=-1.433857		b=-1.459933	
R^2=0.563899		R^2=0.586355		R^2=0.810219	
n	2009	N	2012	n	2014
0.002042	0.00011818	0.002076	0.000115	0.002118	0.00131
0.004084	4.89444E-05	0.004152	4.27E-05	0.004235	0.000476
0.006126	3.01866E-05	0.006227	2.39E-05	0.006353	0.000264
0.008167	2.14237E-05	0.008303	1.58E-05	0.00847	0.000173
0.010209	1.64204E-05	0.010379	1.15E-05	0.010588	0.000125
0.012251	1.32131E-05	0.012455	8.83E-06	0.012705	9.58E-05
0.014293	1.09954E-05	0.01453	7.08E-06	0.014823	7.65E-05
0.016335	9.3775E-06	0.016606	5.85E-06	0.01694	6.29E-05
0.018377	8.1492E-06	0.018682	4.94E-06	0.019058	5.3E-05

0.020419	7.1875E-06	0.020758	4.25E-06	0.021175	4.54E-05
0.02246	6.4156E-06	0.022833	3.7E-06	0.023293	3.95E-05
0.024502	5.7836E-06	0.024909	3.27E-06	0.02541	3.48E-05
0.026544	5.2573E-06	0.026985	2.91E-06	0.027528	3.1E-05
0.028586	4.8128E-06	0.029061	2.62E-06	0.029645	2.78E-05
0.030628	4.4329E-06	0.031136	2.37E-06	0.031763	2.51E-05
0.03267	4.1047E-06	0.033212	2.16E-06	0.03388	2.29E-05
0.034712	3.8185E-06	0.035288	1.98E-06	0.035998	2.09E-05
0.036753	0.000003567	0.037364	1.83E-06	0.038115	1.93E-05
0.038795	3.3444E-06	0.03944	1.69E-06	0.040233	1.78E-05
0.040837	3.1461E-06	0.041515	1.57E-06	0.04235	1.65E-05
0.042879	2.9683E-06	0.043591	1.47E-06	0.044468	1.54E-05
0.044921	2.8082E-06	0.045667	1.37E-06	0.046585	1.44E-05
0.046963	2.6633E-06	0.047743	1.29E-06	0.048703	1.35E-05
0.049005	2.5316E-06	0.049818	1.21E-06	0.050821	1.27E-05
0.051046	2.4113E-06	0.051894	1.14E-06	0.052938	1.19E-05
0.053088	2.3012E-06	0.05397	1.08E-06	0.055056	1.13E-05
0.05513	0.0000022	0.056046	1.02E-06	0.057173	1.07E-05
0.057172	2.1067E-06	0.058121	9.7E-07	0.059291	1.01E-05
0.059214	2.0204E-06	0.060197	9.22E-07	0.061408	9.6E-06
0.061256	1.9403E-06	0.062273	8.79E-07	0.063526	9.14E-06
0.063298	0.000001866	0.064349	8.38E-07	0.065643	8.71E-06
0.065339	1.7967E-06	0.066424	8.01E-07	0.067761	8.32E-06
0.067381	0.000001732	0.0685	7.66E-07	0.069878	7.95E-06
0.069423	1.6714E-06	0.070576	7.34E-07	0.071996	7.61E-06
0.071465	1.6147E-06	0.072652	7.04E-07	0.074113	7.3E-06
0.073507	1.5614E-06	0.074728	6.76E-07	0.076231	7E-06
0.075549	1.5112E-06	0.076803	6.5E-07	0.078348	6.73E-06
0.077591	1.4639E-06	0.078879	6.26E-07	0.080466	6.47E-06
0.079632	1.4193E-06	0.080955	6.03E-07	0.082583	6.23E-06
0.081674	1.3771E-06	0.083031	5.82E-07	0.084701	6E-06
0.083716	1.3371E-06	0.085106	5.61E-07	0.086818	5.79E-06
0.085758	1.2993E-06	0.087182	5.42E-07	0.088936	5.59E-06
0.0878	1.2634E-06	0.089258	5.24E-07	0.091053	5.4E-06
0.089842	1.2292E-06	0.091334	5.07E-07	0.093171	5.22E-06
0.091884	1.1967E-06	0.093409	4.91E-07	0.095289	5.06E-06
0.093925	1.1658E-06	0.095485	4.76E-07	0.097406	4.9E-06
0.095967	1.1363E-06	0.097561	4.62E-07	0.099524	4.74E-06

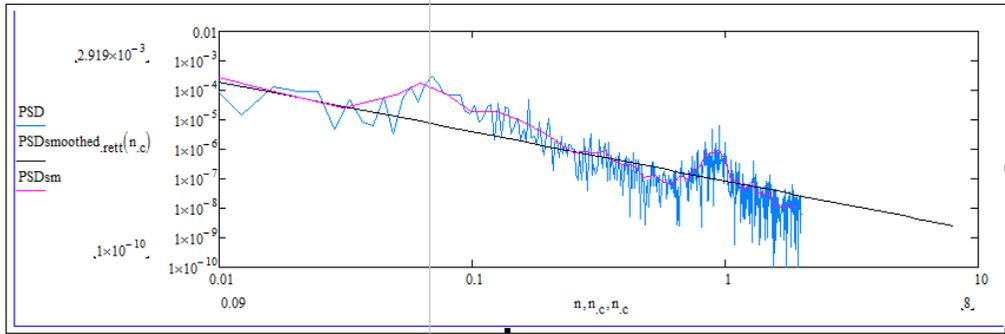


Figura G 100: PSD smoothed curva 73 anno 2009 Napoli – Baiano.

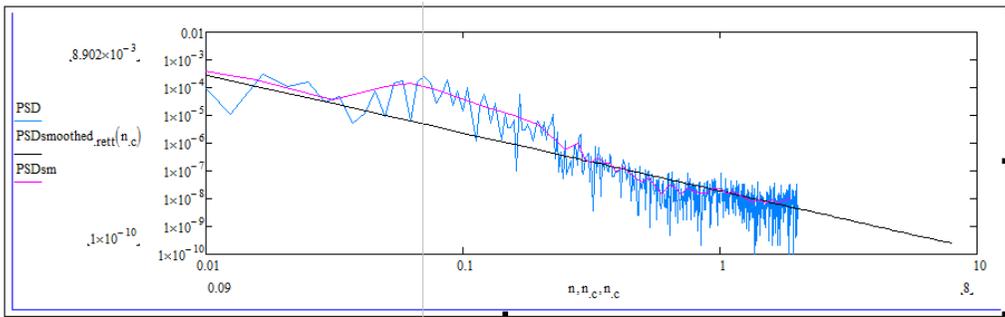


Figura G 101: PSD smoothed curva 73 anno 2012 Napoli – Baiano.

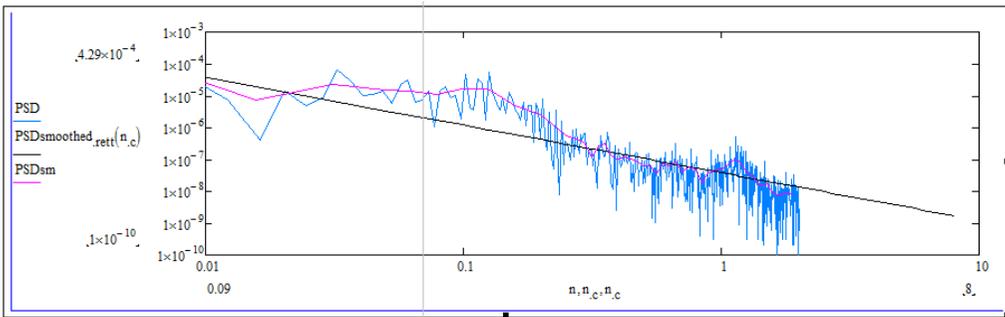


Figura G 102: PSD smoothed curva 73 anno 2014 Napoli – Baiano.

Tabella G 34: Coefficiente di correlazione

▪ Curva 73 (2009 2012 2014) Pari

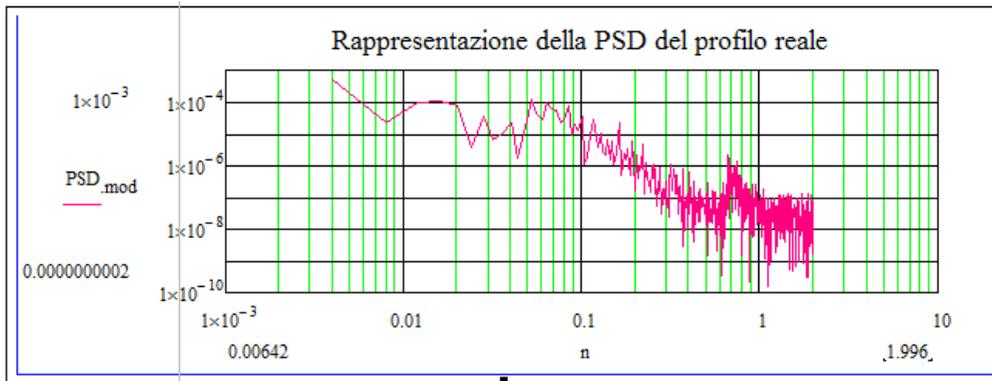


Figura G 103: PSD curva 73 anno 2009 Baiano – Napoli.

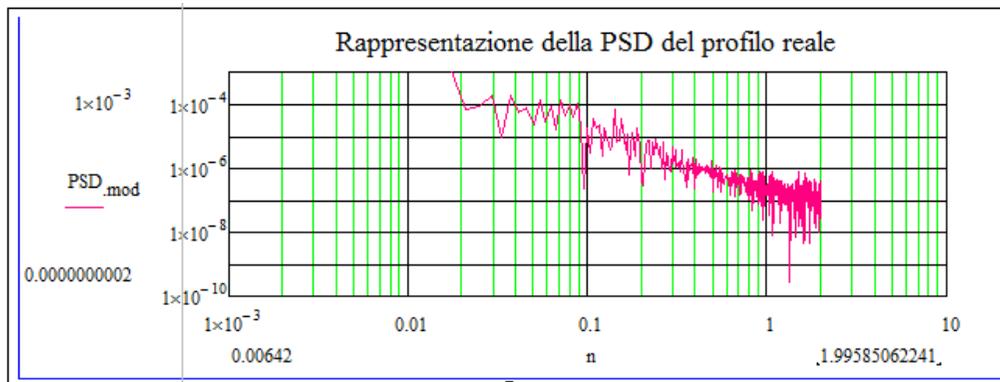


Figura G 104: PSD curva 73 anno 2012 Baiano – Napoli.

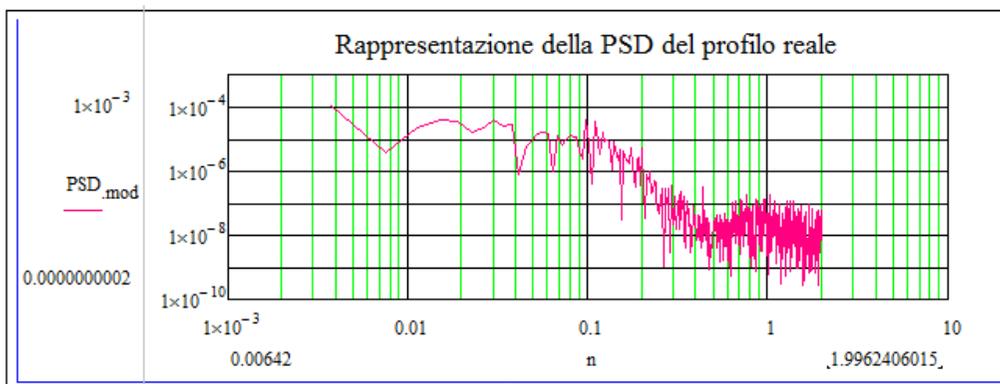


Figura G 105: PSD curva 73 anno 2014 Baiano – Napoli.

Tabella G 35: Densità spettrale di potenza –Smoothed.

Psd Smoothed lineare					
a=-16.804512		a=-15.659434		a=-17.64828	
b=-1.196042		b=-1.732975		b=-1.256019	
R^2=0.659642		R^2=0.846508		R^2=0.685003	
n	2009	n	2012	N	2014
0.002001	8.51E-05	0.002076	0.007054	0.001881	5.74E-05
0.004002	3.71E-05	0.004152	0.002122	0.003761	2.4E-05
0.006003	2.29E-05	0.006227	0.001051	0.005642	1.44E-05
0.008004	1.62E-05	0.008303	0.000638	0.007522	1.01E-05
0.010005	1.24E-05	0.010379	0.000434	0.009403	7.6E-06
0.012006	9.98E-06	0.012455	0.000316	0.011283	6.05E-06
0.014007	8.3E-06	0.01453	0.000242	0.013164	4.98E-06
0.016008	7.07E-06	0.016606	0.000192	0.015045	4.21E-06
0.018009	6.14E-06	0.018682	0.000157	0.016925	3.63E-06
0.02001	5.42E-06	0.020758	0.00013	0.018806	3.18E-06
0.022011	4.83E-06	0.022833	0.000111	0.020686	2.82E-06
0.024012	4.35E-06	0.024909	9.51E-05	0.022567	2.53E-06
0.026013	3.96E-06	0.026985	8.28E-05	0.024448	2.29E-06
0.028014	3.62E-06	0.029061	7.28E-05	0.026328	2.09E-06
0.030015	3.33E-06	0.031136	6.46E-05	0.028209	1.91E-06
0.032016	3.09E-06	0.033212	5.78E-05	0.030089	1.76E-06
0.034017	2.87E-06	0.035288	5.2E-05	0.03197	1.64E-06
0.036018	2.68E-06	0.037364	4.71E-05	0.03385	1.52E-06
0.038019	2.51E-06	0.03944	4.29E-05	0.035731	1.42E-06
0.04002	2.36E-06	0.041515	3.92E-05	0.037612	1.33E-06
0.042021	2.23E-06	0.043591	3.61E-05	0.039492	1.25E-06
0.044022	2.11E-06	0.045667	3.33E-05	0.041373	1.18E-06
0.046023	0.000002	0.047743	3.08E-05	0.043253	1.12E-06
0.048024	1.9E-06	0.049818	2.86E-05	0.045134	1.06E-06
0.050025	1.81E-06	0.051894	2.67E-05	0.047015	1.01E-06
0.052026	1.73E-06	0.05397	2.49E-05	0.048895	9.59E-07
0.054027	1.65E-06	0.056046	2.33E-05	0.050776	9.15E-07
0.056028	1.58E-06	0.058121	2.19E-05	0.052656	8.74E-07
0.058029	1.52E-06	0.060197	2.06E-05	0.054537	8.36E-07
0.06003	1.46E-06	0.062273	1.94E-05	0.056417	8.01E-07
0.062031	1.4E-06	0.064349	1.84E-05	0.058298	7.69E-07
0.064032	1.35E-06	0.066424	1.74E-05	0.060179	7.39E-07
0.066033	1.3E-06	0.0685	1.65E-05	0.062059	7.11E-07

0.068034	1.25E-06	0.070576	1.56E-05	0.06394	6.85E-07
0.070035	1.21E-06	0.072652	1.49E-05	0.06582	6.6E-07
0.072036	1.17E-06	0.074728	1.42E-05	0.067701	6.37E-07
0.074037	1.13E-06	0.076803	1.35E-05	0.069582	6.16E-07
0.076038	1.1E-06	0.078879	1.29E-05	0.071462	5.95E-07
0.078039	1.06E-06	0.080955	1.23E-05	0.073343	5.76E-07
0.08004	1.03E-06	0.083031	1.18E-05	0.075223	5.58E-07
0.082041	1E-06	0.085106	1.13E-05	0.077104	5.41E-07
0.084042	9.73E-07	0.087182	1.08E-05	0.078984	5.25E-07
0.086043	9.46E-07	0.089258	1.04E-05	0.080865	5.1E-07
0.088044	9.21E-07	0.091334	1E-05	0.082746	4.95E-07
0.090045	8.96E-07	0.093409	9.63E-06	0.084626	4.81E-07
0.092046	8.73E-07	0.095485	9.27E-06	0.086507	4.68E-07
0.094047	8.51E-07	0.097561	8.93E-06	0.088387	4.56E-07

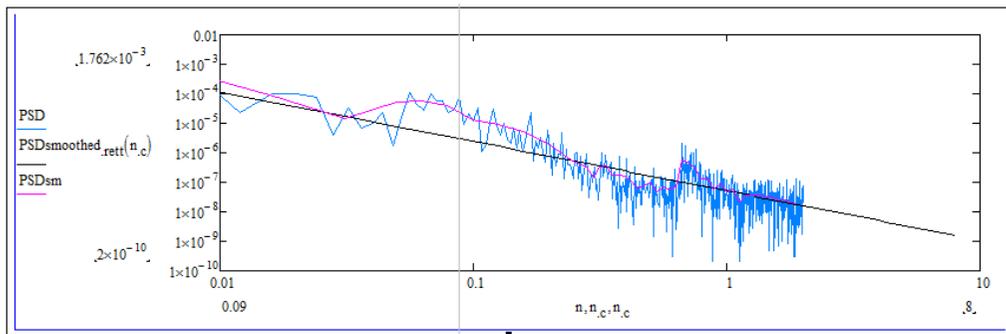


Figura G 106: PSD smoothed curva 73 anno 2009 Baiano – Napoli.

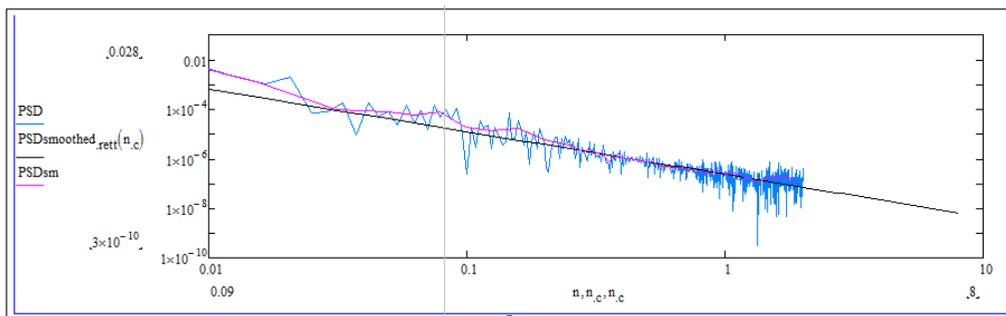


Figura G 107: PSD smoothed curva 73 anno 2012 Baiano – Napoli.

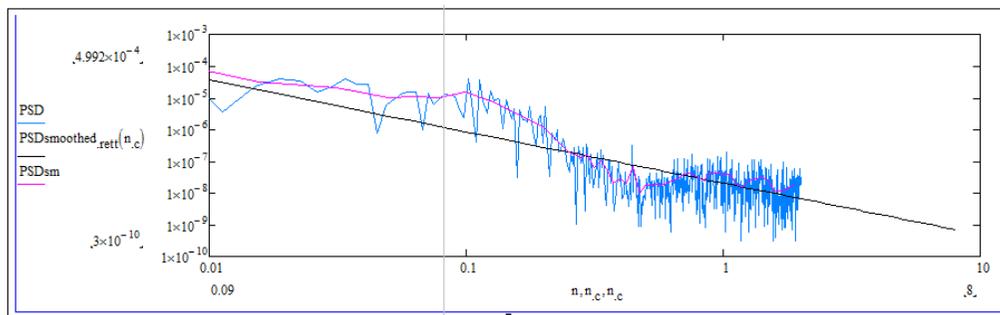


Figura G 108: PSD smoothed curva 73 anno 2014 Baiano – Napoli.

Tabella 5.4: Coefficiente di correlazione