

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SCUOLA DI INGEGNERIA E ARCHITETTURA
Sede di Forlì

Corso di Laurea in
INGEGNERIA MECCANICA
Classe LM-33

TESI DI LAUREA

In: Crediti Nel Settore Ing-Ind/13

“Indagine sperimentale sulla risposta dinamica di provini piatti in
lega d'alluminio sottoposti a diverse tipologie di eccitazione
vibratoria non-gaussiana”

CANDIDATO

Baldazzi Matteo

RELATORE:

Ing. Troncosi Marco

Anno Accademico 2013/2014

Sessione III

Ringraziamenti:

Ringrazio tutti coloro che mi hanno appoggiato nella scelta di questa facoltà nonostante provenissi da un istituto tecnico economico, mia madre per essersi presa cura di me durante questi anni contribuendo non solo economicamente ma anche moralmente ed i miei amici, senza di voi sarebbe stato tutto più arduo.

Infine ringrazio il mio Relatore di tesi, l'ing. Marco Troncossi per avermi dato la possibilità di svolgere questo elaborato e per il prezioso contributo ad una stesura corretta.

Sommario

CAPITOLO I: INTRODUZIONE	17
CENNI STORICI.....	17
CAPITOLO II: BACKGROUND TEORICO	21
FUNZIONE PROBABILITÀ E DISTRIBUZIONE DI PROBABILITÀ	21
FUNZIONE DENSITÀ DI PROBABILITÀ	22
Valore atteso	23
Momenti di una variabile casuale	23
DISTRIBUZIONE GAUSSIANA	24
Momenti di ordine superiore (Skewness e Kurtosis)	25
CAPITOLO III: SPECIFICHE TECNICHE	27
CENNI STORICI.....	27
SPECIFICHE TECNICHE	28
Specifiche tecniche da dati sperimentali	29
TEST TAILORING.....	30
1 Analisi delle condizioni d'uso	30
2 Rilevazione di dati sperimentali sul campo	30
3 Elaborazione di un profilo vibratorio equivalente al reale	30
4 Definizione test.....	31
5 METODOLOGIE DI SINTESI	31
METODO FDS-MRS.....	31
Formulazione Analitica	32
CAPITOLO IV: PROGETTAZIONE DEI PROVINI SOTTOPOSTI A TEST	35
PROGETTAZIONE E CARATTERISTICHE DEI PROVINI TESTATI	35
Geometria di partenza.....	37
Ipotesi semplificativa: modello a parametri concentrati a un grado di libertà	38
Vincoli di progetto:.....	42
Verifica preliminare	45
Variazioni geometriche adottate.....	46
ANALISI FEM	47
Analisi Statica	47
Analisi Modale.....	51
CAPITOLO V: SETUP SPERIMENTALE	53
SHAKER.....	53
ACCELEROMETRI.....	54
Posizionamento sul provino	55
ESTENSIMETRI.....	56

ACQUISITORE.....	57
LAYOUT GENERALE.....	58
CAPITOLO VI: DETERMINAZIONE DELLE PROPRIETA MECCANICHE DEL PROVINO	59
PROVA DI TRAZIONE MONOASSIALE	59
DETERMINAZIONE DELLA CURVA DI WOHLER.....	66
INTRODUZIONE.....	66
DETERMINAZIONE CLASSICA.....	66
TEST A FATICA ACCELERATI.....	70
Introduzione	70
Definizione dell'input	70
ELABORAZIONE DEI DATI.....	72
Concatenamento dei run.....	72
Filtro passa banda.....	73
Calcolo approssimato delle tensioni agenti sulla sezione critica	75
Andamento della frequenza naturale nel tempo.....	80
Andamento del fattore di smorzamento nel tempo.....	83
Algoritmo adattato ai dati sperimentali ricavati.....	85
Risultati	88
Determinazione della vita a fatica del provino: Time To Failure	89
Calcolo dell'average frequency	90
Livelli delle sollecitazioni-Determinazione delle tensioni	92
I° Metodo per la determinazione dell'esponente dell'equazione di Basquin.....	93
II° Metodo per la determinazione dell'esponente dell'equazione di Basquin.....	94
III° Metodo per la determinazione dell'esponente dell'equazione di Basquin.....	96
CONCLUSIONI.....	97
Osservazioni	98
CAPITOLO VII: ECCITAZIONI GAUSSIANE E LEPTOCURTICHE, ANALISI DELLA RISPOSTA	99
INTRODUZIONE AI TEST SVOLTI.....	99
TEST AD ELEVATI VALORI DI KURTOSIS	102
DEFINIZIONE DEGLI INPUT	104
Crest Factor	104
Turning Point.....	104
INPUT LEPTOCURTICO "ROAD"	106
INPUT GAUSSIANO "GAUSS"	108
DESCRIZIONE DEI TEST SVOLTI.....	110
ANALISI DEGLI EFFETTI PRODOTTI DA VIBRAZIONI LEPTOCURTICHE	111
Analisi dei TTF	111

Analisi dei parametri statistici	113
Conclusioni	115
ANALISI DELLA FORMA MODALE TORSIONALE.....	116
ANALISI DEI PROVINI STRUMENTATI CON ESTENSIMETRI	118
Risultati	119
Determinazione dei valori di tensione	120
Validazione del metodo di calcolo delle tensioni a partire dai segnali di accelerazione	121
APPENDICE A: SCRIPT DI AIUTO ALLA PROGETTAZIONE DEI PROVINI	123
DESCRIZIONE DELLO SCRIPT:.....	123
APPENDICE B: SCRIPT DI ANALISI PER I DATI RICAVALI DAI TEST A TRAZIONE	127
DESCRIZIONE DELLO SCRIPT:.....	127
APPENDICE C: SCRIPT DI ANALISI DEI DATI UTILIZZATI PER DETERMINARE LA CURVA DI WÖHLER.....	129
DESCRIZIONE DELLO SCRIPT:.....	129
VERIFICA DELLE TENSIONI IN GIOCO ATTRAVERSO IL CALCOLO DEGLI SPOSTAMENTI.....	138
DETERMINAZIONE DELLE TENSIONI VALIDA ANCHE IN CAMPO PLASTICO	142
FILTRO PASSA BANDA.....	143
DETERMINAZIONE DELL' AVERAGE FREQUENCY	144
CALCOLO DEGLI SPETTROGRAMMI DELLE PSD E DETERMINAZIONE DI TUTTI I GRAFICI RIPORTATI.....	145
APPENDICE D: RACCOLTA DEI DATI UTILIZZATI PER LA DETERMINAZIONE DEL PARAMETRO "B"	149
PROVINO: F_022.....	149
PROVINO: F_023.....	154
PROVINO: F_024.....	159
PROVINO: F_031.....	164
PROVINO: F_032.....	169
PROVINO: F_033.....	174
PROVINO: F_041.....	179
PROVINO: F_042.....	184
PROVINO: F_043.....	189
PROVINO: F_051.....	194
PROVINO: F_052.....	199
PROVINO: F_053.....	204
PROVINO: F_061.....	209
PROVINO: F_062.....	214
PROVINO: F_063.....	219
TABELLA RIASSUNTIVA:.....	224

APPENDICE E: SCRIPT UTILIZZATI NEI TEST A DIVERSI VALORI DI KURTOSIS DELL'ECCITAZIONE.....	225
Descrizione:	225
FUNZIONE PER LA DETERMINAZIONE DEI "TURNING POINT"	236
Descrizione	236
APPENDICE F: REPORT DEI DATI RICAVALI DAI PROVINO SOLLECITATI CON DIVERSI VALORI DI KURTOSIS	237
PROVINO RD_f012.....	237
PROVINO RD_f014.....	245
PROVINO RD_f015.....	253
PROVINO RD_f016.....	261
PROVINO RD_f017 (STRUMENTATO CON ESTENSIMETRI)	269
PROVINO RD_f018.....	278
PROVINO GS_f071.....	287
PROVINO GS_f072.....	295
PROVINO GS_f073.....	303
PROVINO GS_f074 (STRUMENTATO CON ESTENSIMETRI)	311
PROVINO GS_f075.....	319
PROVINO GS_f077 (FUORI TREND).....	327
BIBLIOGRAFIA	335

INDICE FIGURE

Figura 1.1: Rottura di un assiale ferroviario Versailles, 1842 [1]	18
Figura 2.1: Distribuzione di probabilità nel lancio di un dado.....	21
Figura 2.2: Calcolo della probabilità dalla funzione densità di probabilità [3]	22
Figura 2.3: Distribuzione Gaussiana di probabilità	24
Figura 2.4: Distribuzioni non gaussiane [4].....	25
Figura 3.1: modello fisico ad un grado di libertà [6]	32
Figura 3.2: Regola di Miner [5]	33
Figure 3.3: FDS per una sollecitazione sinusoidale [6].....	34
Fig 4.1: Input Gaussiano dello shaker in SAWR control	35
Figura 4.2: PSD input.....	36
Figura 4.3: Setup sperimentale con provino cilindrico [4]	37
Figura 4.4: Sistema “reale” continuo	39
Figura 4.5: Semplificazione del sistema con un modello a 1 g.d.l [2]	39
Figura 4.6: Rappresentazione dell’equazione del moto nel piano complesso [3]	40
Figura 4.7: Ampiezza e Fase della risposta forzata a regime [3].....	41
Fig. 4.8: Provino selezionato	45
Fig.4.9: Disegno del provino lavorato	45
Fig. 4.10: Disegno CAD della massa collegata al provino raccordato	46
Figura 4.11: Tipologia di analisi FEM	48
Figura 4.12: Condizioni al contorno del modello analizzato.....	49
Figura 4.13: Mesh utilizzata per il modello	50
Figura 4.14: Andamento delle tensioni nel provino con raccordato.....	50
Fig 4.15: Primo modo di vibrare	51
Fig 4.16 Modi di vibrare-Frequenze [Hz]	51
Figura 5.1: Shaker elettrodinamico[6].....	53
Figura 5.2: Schema di un accelerometro piezoelettrico [4].....	54
Figura 5.3: Posizionamento dei sensori	55
Figura 5.4: Estensimetri impiegati nei test.....	56
Fig 5.5: Scadas Mobile SCM05	57
Figura 5.6: Layout Generale.....	58
Figura 6.1: Provino ad osso di cane	59
Figura 6.2:Provini ad “osso di cane” testati a trazione.....	60
Figura 6.3:Pressa per test a trazione	61
Figura 6.4: Schema semplificato della pressa.....	61
Figura 6.5: Svolgimento prova ed acquisizione dei dati	62

Figura 6.6: Plot risultati del test a trazione.....	62
Figura 6.7: $\sigma - \varepsilon$ provino 1 ad osso di cane	62
Figura 6.8: $\sigma - \varepsilon$ provino 2 ad osso di cane	63
Figura 6.9: $\sigma - \varepsilon$ provino 1 da cella di carico.....	63
Figura 6.10: $\sigma - \varepsilon$ provino 2 da cella di carico.....	64
Figura 6.11: $\sigma - \varepsilon$ provino 3 da cella di carico.....	64
Figura 6.12: $\sigma - \varepsilon$ provino 4 da cella di carico.....	65
Figura 6.13: $\sigma - \varepsilon$ provino 5 da cella di carico.....	65
Figura 6.14: Generico carico dinamico.....	66
Figura 6.15: Interpolazione dei punti costituenti la curva di Wohler.....	67
Figura 6.16: Schema macchina flessione rotante.....	67
Figura 6.17: Immagine reale di una macchina per test a “flessione rotante”	67
Figura 6.18: Rappresentazione di una curva di Wholer [2].....	68
Figura 6.19: PSD piatta non filtrata	71
Figura 6.20: Run singolo	73
Figura 6.21: Segnale concatenato.....	73
Figura 6.22: PSD di un segnale non filtrato	74
Figura 6.23: PSD di un segnale filtrato	74
Figura 6.24: Tensione calcolata usando l’accelerazione relativa-provino f022 RMS=0,2g	76
Figura 6.25: Tensioni ricavate a partire dagli spostamenti relativi- provino f022 RMS=0,2g	77
Figura 6.26: Determinazione delle tensioni con l’ausilio della caratteristica a trazione	79
Figura 6.27: Confronto tra i metodi di calcolo delle tensioni 2 e 3 provino f022 RMS=0,2g.	79
Figura 6.28: Andamento della FRF-provino f022.....	81
Figura 6.29: Andamento della frequenza naturale nel tempo.....	81
Figura 6.30: Confronto di tutte le curve $f_n(t)$	82
Figura 6.31: Andamento della FRF nell’intorno del picco	83
Figura 6.32: Difetto presente nella determinazione dello smorzamento.....	85
Figura 6.33: Oscillazioni presenti nelle FRF	86
Figura 6.34: Determinazione delle radici attraverso il metodo modificato	87
Figura 6.35: Andamento dello smorzamento nel tempo provino f063 RMS=0,15g	88
Figura 6.36: Determinazione del TTF-provino f063 RMS=0,17g	89
Figura 6.37: Grafico $\log(TTF)-\log(Y_{RMS})$ ricavato da tutti e 15 i provini.....	93
Figura 6.38 Grafico $\log(TTF)-\log(Y_{RMS})$ ricavato dai valori mediani.....	94
Figura 6.39: Confronto delle rette ricavate utilizzando i due metodi descritti.....	95

Figura 6.40: retta interpolante i valori medi delle terne di punti	96
Figura 6.41: Grafico di Wöhler della lega utilizzata	97
Figura 6.42: Grafico doppio logaritmico σ -N ricavato utilizzando i punti mediani	98
Figura 7.1: Confronto fra una distribuzione Gaussiana e una leptocurtica (rossa).....	100
Figura 7.2: Distribuzione di probabilità nel lancio di 2 dadi.....	103
Figura 7.3: PDF conseguente al campionamento di intervalli di tempo in assenza di sollecitazioni	105
Figura 7.4: Input ad elevato kurtosis	106
Figura 7.5: Andamento dei Turning point dell'input "Road"	107
Figura 7.6: Confronto delle PSD dei segnali "Gauss" "Road"	108
Figura 7.7: Segnale Gaussiano nel tempo	108
Figura 7.8: Turning Points dell'input Gaussiano	109
Figura 7.9: Confronto $f_n(t)$	113
Figura 7.10: Effetto della Papoulis rule sulla distribuzione di probabilità	115
Figura 7.11: Andamento del kurtosis nel tempo confronto con l'accelerazione trasversale	117
Figura 7.12: Estensimetri incollati sul provino	118
Figura 7.13: Schematizzazione di collegamento a mezzo ponte di Wheatstone	118
Figura 7.14: Deformazioni nel tempo misurate dagli estensimetri*.....	119
Figura 7.15: Andamento delle tensioni misurate dalle deformazioni dell'estensimetro....	121
Figura 7.16: Confronto $T_{est}-T_{sp,rel}$ provino RD_017	122
Figura D 1: Frequenza naturale nel tempo f_022	149
Figura D 2: Smorzamento nel tempo f_022.....	150
Figura D 3: Accelerazioni Provino f_022	151
Figura D 4:PSD Provino f_022	152
Figura D 5: Spettrogrammi Provino f_022	153
Figura D 6: Frequenza naturale nel tempo f_023	154
Figura D 7: Smorzamento nel tempo f_023.....	155
Figura D 8: Accelerazioni Provino f_023	156
Figura D 9:PSD Provino f_023	157
Figura D 10: Spettrogrammi Provino f_023	158
Figura D 11: Frequenza naturale nel tempo f_024	159
Figura D 12: Smorzamento nel tempo f_024.....	160
Figura D 13: Accelerazioni Provino f_024	161
Figura D 14:PSD Provino f_024	162
Figura D 15: Spettrogrammi Provino f_024	163

Figura D 16: Frequenza naturale nel tempo f_031	164
Figura D 17: Smorzamento nel tempo f_031	165
Figura D 18: Accelerazioni Provino f_031	166
Figura D 19:PSD Provino f_031	167
Figura D 20: Spettrogrammi Provino f_031	168
Figura D21: Frequenza naturale nel tempo f_032	169
Figura D22: Smorzamento nel tempo f_032	170
Figura D23: Accelerazioni Provino f_032	171
Figura D24:PSD Provino f_032	172
Figura D 25: Spettrogrammi Provino f_032	173
Figura D 26: Frequenza naturale nel tempo f_033	174
Figura D 27: Smorzamento nel tempo f_033	175
Figura D 28: Accelerazioni Provino f_033	176
Figura D 29:PSD Provino f_033	177
Figura D 30: Spettrogrammi Provino f_033	178
Figura D 31: Frequenza naturale nel tempo f_041	179
Figura D 32: Smorzamento nel tempo f_041	180
Figura D 33: Accelerazioni Provino f_041	181
Figura D 34:PSD Provino f_041	182
Figura D 35: Spettrogrammi Provino f_041	183
Figura D 36: Frequenza naturale nel tempo f_042	184
Figura D 37: Smorzamento nel tempo f_042	185
Figura D 38: Accelerazioni Provino f_042	186
Figura D 39:PSD Provino f_042	187
Figura D 40: Spettrogrammi Provino f_042	188
Figura D 41: Frequenza naturale nel tempo f_043	189
Figura D 42: Smorzamento nel tempo f_043	190
Figura D 43: Accelerazioni Provino f_043	191
Figura D 44:PSD Provino f_043	192
Figura D 45: Spettrogrammi Provino f_043	193
Figura D 46: Frequenza naturale nel tempo f_051	194
Figura D 47: Smorzamento nel tempo f_051	195
Figura D 48: Accelerazioni Provino f_051	196
Figura D 49:PSD Provino f_051	197
Figura D 50: Spettrogrammi Provino f_051	198
Figura D51 : Frequenza naturale nel tempo f_052	199

Figura D 52: Smorzamento nel tempo f_052.....	200
Figura D 53: Accelerazioni Provino f_052	201
Figura D 54:PSD Provino f_052	202
Figura D 55: Spettrogrammi Provino f_052	203
Figura D 56: Frequenza naturale nel tempo f_053.....	204
Figura D 57: Smorzamento nel tempo f_053.....	205
Figura D 58: Accelerazioni Provino f_053	206
Figura D 59:PSD Provino f_053	207
Figura D 60: Spettrogrammi Provino f_053	208
Figura D 61: Frequenza naturale nel tempo f_061	209
Figura D 62: Smorzamento nel tempo f_061.....	210
Figura D 63: Accelerazioni Provino f_061	211
Figura D 64:PSD Provino f_061	212
Figura D 65: Spettrogrammi Provino f_061	213
Figura D 66: Frequenza naturale nel tempo f_062.....	214
Figura D 67: Smorzamento nel tempo f_062.....	215
Figura D 68: Accelerazioni Provino f_062	216
Figura D 69:PSD Provino f_062	217
Figura D 70: Spettrogrammi Provino f_062	218
Figura D 71: Frequenza naturale nel tempo f_063.....	219
Figura D 72 : Smorzamento nel tempo f_063.....	220
Figura D 73: Accelerazioni Provino f_063	221
Figura D 74:PSD Provino f_063	222
Figura D 75: Spettrogrammi Provino f_063	223
Figura F.1: Frequenza naturale nel tempo-RD_f012.....	237
Figura F.2: Smorzamento nel tempo-RD_f012.....	238
Figura F.3: Andamento delle accelerazioni e spostamento relativo-RD_f012	239
Figura F4: PSD dei segnali (scala lineare)-RD_f012.....	240
Figura F6: PSD dei segnali (scala logaritmica)-RD_f012	241
Figura F7: Spettrogramma dell'accelerazione della base-RD_f012	242
Figura F8: Spettrogramma dell'accelerazione relativa-RD_f012	242
Figura F9: Turning point nel tempo-RD_f012	243
Figura F10: Distribuzione di probabilità dei picchi di accelerazione confronto base e massa-RD_f012	244
Figura F11: Frequenza naturale nel tempo-RD_f014.....	245
Figura F12: Smorzamento nel tempo-RD_f014.....	246

Figura F13: Andamento delle accelerazioni e spostamento relativo-RD_f014	247
Figura F14: PSD dei segnali (scala lineare)-RD_f014	248
Figura F15: PSD dei segnali (scala logaritmica)-RD_f014	249
Figura F16: Spettrogramma dell'accelerazione della base-RD_f014	250
Figura F17: Spettrogramma dell'accelerazione relativa-RD_f014	250
Figura F18: Turning point nel tempo-RD_f014	251
Figura F19: Distribuzione di probabilità dei picchi di accelerazione confronto base e massa-RD_f014	252
Figura F20: Frequenza naturale nel tempo-RD_f015	253
Figura F21: Smorzamento nel tempo-RD_f015	254
Figura F22: Andamento delle accelerazioni e spostamento relativo-RD_f015	255
Figura F23: PSD dei segnali (scala lineare) -RD_f015	256
Figura F24: PSD dei segnali (scala logaritmica)-RD_f015	257
Figura F25: Spettrogramma dell'accelerazione della base-RD_f015	258
Figura F26: Spettrogramma dell'accelerazione relativa-RD_f015	258
Figura F27: Turning point nel tempo RD_f015	259
Figura F28: Distribuzione di probabilità dei picchi di accelerazione confronto base e massa-RD_f015	260
Figura F29: Frequenza naturale nel tempo-RD_f016	261
Figura F30: Smorzamento nel tempo-RD_f016	262
Figura F31: Andamento delle accelerazioni e spostamento relativo-RD_f016	263
Figura F32: PSD dei segnali (scala lineare)-RD_f016	264
Figura F33: PSD dei segnali (scala logaritmica)-RD_f016	265
Figura F34: Spettrogramma dell'accelerazione della base-RD_f016	266
Figura F35: Spettrogramma dell'accelerazione relativa-RD_f016	266
Figura F36: Turning point nel tempo-RD_f016	267
Figura F37: Distribuzione di probabilità dei picchi di accelerazione confronto base e massa-RD_f016	268
Figura F38: Frequenza naturale nel tempo-RD_f017	269
Figura F39: Smorzamento nel tempo-RD_f017	270
Figura F40: Andamento delle accelerazioni e spostamento relativo-RD_f017	271
Figura F41: PSD dei segnali (scala lineare) -RD_f017	272
Figura F42: PSD dei segnali (scala logaritmica) -RD_f017	273
Figura F43: Spettrogramma dell'accelerazione della base-RD_f017	274
Figura F44: Spettrogramma dell'accelerazione relativa-RD_f017	274
Figura F45: Turning point nel tempo dell'accelerazione alla base-RD_f017	275
Figura F46: Distribuzione di probabilità dei picchi di accelerazione confronto base e	

massa-RD_f017	276
Figura F47: Deformazioni misurate con l'estensimetro-RD_f017	276
Figura F48: Tensioni ricavate dall'estensimetro-RD_f017	277
Figura F49: Confronto fra le tensioni calcolate dalle deformazioni misurate dall'estensimetro e quelle determinate dallo spostamento relativo.....	277
Figura F50: Frequenza naturale nel tempo-RD_f018	278
Figura F51: Smorzamento nel tempo-RD_f018.....	279
Figura F52: Andamento delle accelerazioni e spostamento relativo-RD_f018	280
Figura F53: PSD dei segnali (scala lineare) -RD_f018.....	281
Figura F54: PSD dei segnali (scala logaritmica) -RD_f018	282
Figura F55: Spettrogramma dell'accelerazione della base-RD_f018	283
Figura F56: Spettrogramma dell'accelerazione relativa-RD_f018	284
Figura F57: Turning point nel tempo dell'accelerazione alla base-RD_f018.....	284
Figura F58: Turning point dell'accelerazione della massa-RD_f018	285
Figura F59: Distribuzione di probabilità dei picchi di accelerazione confronto base e massa-RD_f018	286
Figura F 60: Frequenza naturale nel tempo-GS_f071	287
Figura F 61: Smorzamento nel tempo-GS_f071	288
Figura F 62: Andamento delle accelerazioni e spostamento relativo-GS_f071	289
Figura F 63: PSD dei segnali (scala lineare) -GS_f071	290
Figura F 64: PSD dei segnali (scala logaritmica) -GS_f071.....	291
Figura F 65: Spettrogramma dell'accelerazione della base-GS_f071.....	292
Figura F 66: Spettrogramma dell'accelerazione relativa-GS_f071	292
Figura F67: Turning point nel tempo dell'accelerazione alla base-GS_f071.....	293
Figura F68: Distribuzione di probabilità dei picchi di accelerazione confronto base e massa-GS_f071.....	294
Figura F69: Frequenza naturale nel tempo-GS_f072	295
Figura F70: Smorzamento nel tempo-GS_f072.....	296
Figura F 71: Andamento delle accelerazioni e spostamento relativo-GS_f072	297
Figura F72: PSD dei segnali (scala lineare) -GS_f072	298
Figura F73: PSD dei segnali (scala logaritmica) -GS_f072.....	299
Figura F 74: Spettrogramma dell'accelerazione della base-GS_f072.....	300
Figura F75: Spettrogramma dell'accelerazione relativa-GS_f072	300
Figura F76: Turning point nel tempo dell'accelerazione alla base-GS_f072.....	301
Figura F 77: Distribuzione di probabilità dei picchi di accelerazione confronto base e massa-GS_f072	302
Figura F78: Frequenza naturale nel tempo-GS_f073	303

Figura F79: Smorzamento nel tempo–GS_f073	304
Figura F80: Andamento delle accelerazioni e spostamento relativo–GS_f073	305
Figura F81: PSD dei segnali (scala lineare) –GS_f073	306
Figura F82: PSD dei segnali (scala logaritmica) –GS_f073.....	307
Figura F83: Spettrogramma dell’accelerazione della base–GS_f073.....	308
Figura F84: Spettrogramma dell’accelerazione relativa–GS_f073	308
Figura F85: Turning point nel tempo–GS_f073	309
Figura F 86: Distribuzione di probabilità dei picchi di accelerazione confronto base e massa–GS_f073	310
Figura F87: Frequenza naturale nel tempo–GS_f074	311
Figura F88: Smorzamento nel tempo–GS_f074	312
Figura F89: Andamento delle accelerazioni e spostamento relativo–GS_f074	313
Figura F90: PSD dei segnali (scala lineare) –GS_f074	314
Figura F91: PSD dei segnali (scala logaritmica) –GS_f074.....	315
Figura F: Spettrogramma dell’accelerazione della base–GS_f074.....	316
Figura F: Spettrogramma dell’accelerazione relativa–GS_f074	316
Figura F94: Turning point nel tempo–GS_f074	317
Figura F95: Distribuzione di probabilità dei picchi di accelerazione confronto base e massa–GS_f074.....	318
Figura F96: Frequenza naturale nel tempo–GS_f075	319
Figura F97: Smorzamento nel tempo–GS_f075	320
Figura F98: Andamento delle accelerazioni e spostamento relativo–GS_f075	321
Figura F99: PSD dei segnali (scala lineare) –GS_f075	322
Figura F100: PSD dei segnali (scala logaritmica) –GS_f075.....	323
Figura F101: Spettrogramma dell’accelerazione della base–GS_f075.....	324
Figura F102: Spettrogramma dell’accelerazione relativa–GS_f075	324
Figura F103: Turning point nel tempo–GS_f075	325
Figura F104: Distribuzione di probabilità dei picchi di accelerazione confronto base e massa–GS_f075.....	326
Figura F105: Frequenza naturale nel tempo–GS_f077	327
Figura F106: Smorzamento nel tempo–GS_f077	328
Figura F107: Andamento delle accelerazioni e spostamento relativo–GS_f077	329
Figura F108: PSD dei segnali (scala lineare) –GS_f077	330
Figura F109: PSD dei segnali (scala logaritmica) –GS_f077.....	331
Figura F110: Spettrogramma dell’accelerazione della base–GS_f077.....	332
Figura F111: Spettrogramma dell’accelerazione relativa–GS_f077	332
Figura F112: Turning point nel tempo –GS_f077	333

Figura F123: Distribuzione di probabilità dei picchi di accelerazione confronto base e massa-GS_f077..... 334

CAPITOLO I: INTRODUZIONE

Le strutture e, molto spesso, gli organi delle macchine sono soggetti a sollecitazioni dinamiche di ampiezza variabile dell'ordine di milioni di cicli.

Per descrivere l'insieme di sollecitazioni ripetute nel tempo si usa il termine "fatica", dal verbo *fatigare*, ossia stancare.

Volendone dare una definizione, la "fatica dei materiali" è un termine introdotto per l'appunto nella prima metà dell'ottocento per indicare il fenomeno, definito modernamente dalle normative ASTM come [1]:

" Un processo di modifica progressiva, localizzata e permanente della struttura del materiale che si sviluppa quando le tensioni e le deformazioni in aree limitate del componente variano nel tempo e che può concludersi con la formazione di fessure o con la frattura completa, dopo un numero sufficiente di cicli".

CENNI STORICI

L'esperienza nella pratica costruttiva, di rotture improvvise dovute a carichi che si ripetono ciclicamente è ormai secolare, tuttavia solo da quando il metallo ha iniziato a sostituire in maniera significativa il legno come materiale da costruzione ci si è resi conto pienamente dell'importanza del fenomeno e delle gravi conseguenze che esso può comportare.

La reale comprensione del fenomeno è relativamente recente e ancora oggi non si può affermare che sia completa.

I primi studi del fenomeno furono compiuti in Germania nel 1829 da un ingegnere minerario W.A.S. Albert il quale effettuò esperimenti con carichi ripetuti ciclicamente su catene di acciaio.

Tra il 1852 e 1870 l'ingegnere tedesco Wöhler, condusse esperimenti sistematici per comprendere il fenomeno, egli notò come gli assali dei treni manifestassero nel tempo delle rotture dovute a sollecitazioni in esercizio molto inferiori a quelle che comportavano una rottura statica in laboratorio.

Tale fenomeno ha provocato la perdita d'innomerevoli vite durante tutto l'800 poiché provocava il cedimento degli assali ferroviari, in figura 1.1 è riportato il disegno di uno dei primi cedimenti di assale ferroviario che si ricordi (Versailles, 1842):

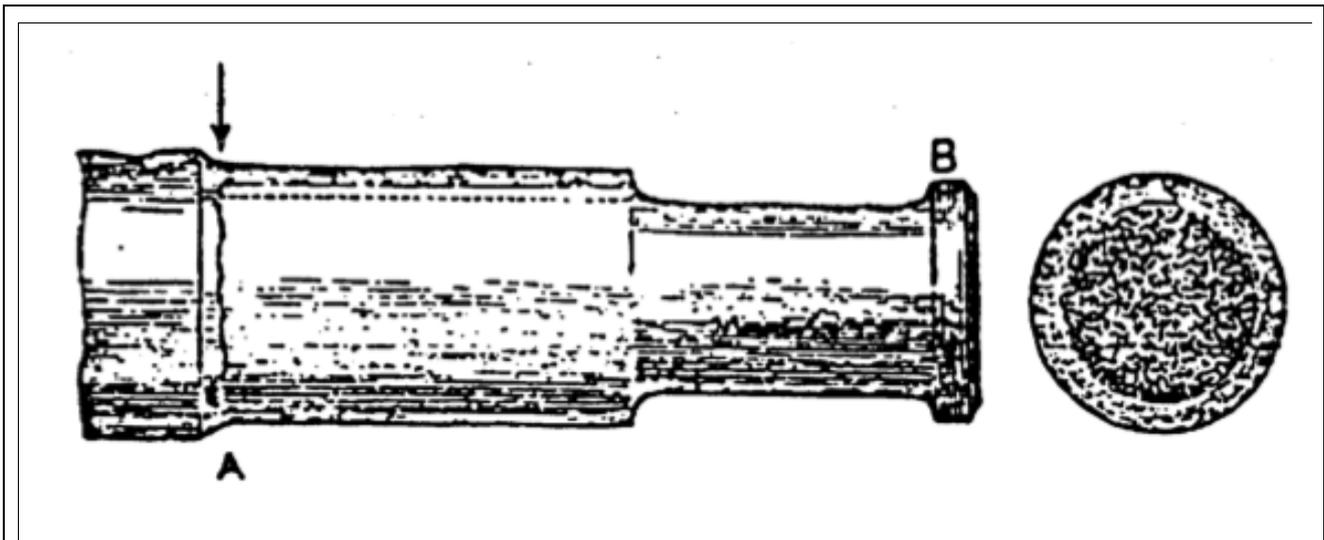


Figura 1.1: Rottura di un assiale ferroviario Versailles, 1842 [1]

Il fenomeno della fatica è un comportamento caratteristico e importante dei materiali metallici, la cui importanza deriva proprio dal fatto che il cedimento del materiale può verificarsi anche per sollecitazioni inferiori ai valori di snervamento, se tali sollecitazioni sono ripetute nel tempo: è come se il materiale si affaticasse.

Questo fenomeno è assai attuale sia dal punto di vista teorico che da quello pratico: nonostante i notevoli progressi compiuti a riguardo, ancora oggi le rotture per fatica costituiscono oltre il 75% di tutte le rotture in esercizio.

Sono interessati i settori dell'automobile, dell'aeronautica, della chimica e delle macchine utensili, cioè quelli in cui gli organi meccanici vengono sottoposti a sollecitazioni ripetute o a vibrazioni e per le quali si vuole che il componente duri nel tempo.

Le rotture per fatica sono molto insidiose perché possono avvenire anche dopo un tempo breve di esercizio senza alcun segno premonitore. Per questo aspetto si potrebbe pensare che queste rotture si avvicinino a quelle di tipo fragile: in realtà ne differiscono per cause e velocità di propagazione.

Risulta quindi fondamentale una progettazione accurata dei componenti sollecitati da vibrazioni o urti così da poter massimizzare la vita utile senza ricorrere a sovradimensionamenti. Una progettazione di questo tipo può essere condotta tramite test sperimentali su prototipi fisici in laboratorio come nel nostro caso, o tramite simulazione numeriche.

La criticità che il progettista incontra durante i suoi calcoli è legata all'impossibilità di conoscere a priori le sollecitazioni effettive che il componente subirà durante la propria vita utile. Si pensi per semplicità ad un'autovettura, le sollecitazioni indotte dalle irregolarità del terreno non possono essere note a priori e costituiscono a tutti gli effetti un fenomeno stocastico.

Poiché non è possibile riprodurre esattamente il profilo vibratorio reale, sia per il motivo appena illustrato che per la durata eccessiva delle prove, si ricorre a procedure di **Test Tailoring** nelle quali viene riprodotta una storia di carico sintetizzata, a partire dalla reale, che andrà a costituire l'input per shaker o tavole vibranti.

Tali strumenti per poter replicare correttamente i profili vibratori desiderati dall'utente, necessitano di software sempre più complessi i quali prima di essere introdotti sul mercato vanno testati con attenzione. Questo lavoro di tesi, frutto di una collaborazione tra l'università di Bologna e l'azienda belga LMS leader mondiale nello sviluppo di software impiegati per test di affidabilità, si pone come obiettivo di verificare il comportamento di sistemi meccanici sollecitati da profili vibratorii leptocurtici (elevati valori di kurtosis) confrontando i risultati con profili vibratorii gaussiani.

Nel prossimo capitolo verrà quindi fornito un background teorico finalizzato a comprendere il significato del Kurtosis.

Nel capitolo III si descrive brevemente cos'è uno standard e quali sono le fasi di un processo di Test Tailoring.

Nel capitolo IV verrà riportato il setup sperimentale utilizzato durante i test.

Nel capitolo V viene descritta la progettazione dei provini

Nel capitolo VI è illustrata la caratterizzazione del provino, ovvero la determinazione dei parametri meccanici del materiale, in particolare si vedrà una procedura non convenzionale per la stima dei parametri a fatica.

Nel capitolo VII viene riportata l'analisi di provini sollecitati con eccitazioni gaussiane e leptocurtiche ricavate da sollecitazioni reali.

CAPITOLO II: BACKGROUND TEORICO

Come già accennato nel capitolo precedente le sollecitazioni (accelerazioni) a cui è sottoposto il componente durante il suo esercizio non sono note a priori dal progettista e costituiscono quindi una variabile aleatoria.

Di seguito verranno quindi riportate le nozioni di teoria delle probabilità ritenute fondamentali per capire il lavoro svolto [3].

Funzione probabilità e distribuzione di probabilità

Sia X una variabile casuale discreta che assume solo un valore discreto di valori x_1, x_2, \dots allora la *funzione di probabilità* $P(X)$ è definita specificando i valori con cui X assume questi valori.

Es: lanciando un dado $x_1 = 1, x_2 = 2 \dots x_6 = 6$ la $P(x)=1/6$ può essere così rappresentata (Fig. 2.1):

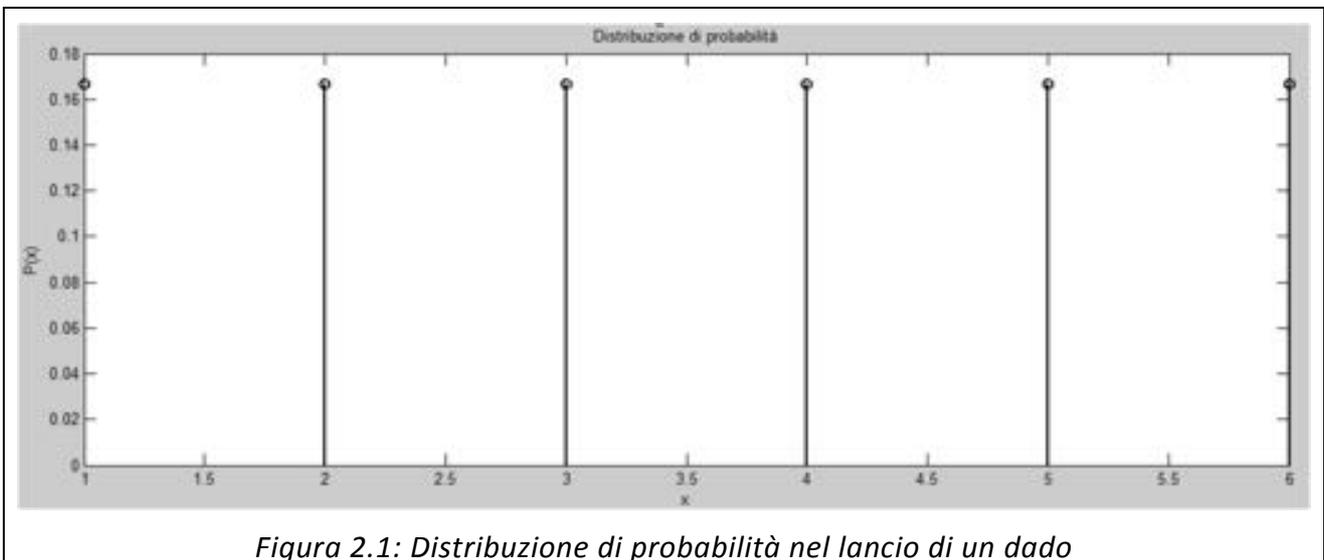


Figura 2.1: Distribuzione di probabilità nel lancio di un dado

Si definisce *funzione di distribuzione delle probabilità* della variabile casuale X , la probabilità che ha X di assumere un valore fino ad x (x compreso):

$$P(x) = \text{prob}(X \leq x)$$

Nel caso in cui la variabile casuale sia continua, la probabilità che $X=x$ è nulla per cui non ha senso parlare di funzione di probabilità. Ha invece senso considerare la *funzione di distribuzione di probabilità*.

Funzione densità di probabilità

Si consideri la probabilità di una variabile casuale continua di cadere nell'intervallo $[x \div x + \Delta x]$:

$$P(x < X < x + \Delta x) = P(x + \Delta x) - P(x)$$

Allora:

$$\frac{P(x < X < x + \Delta x)}{\Delta x}$$

È un'unità di misura delle probabilità, per unità di lunghezza, nell'intorno di x .

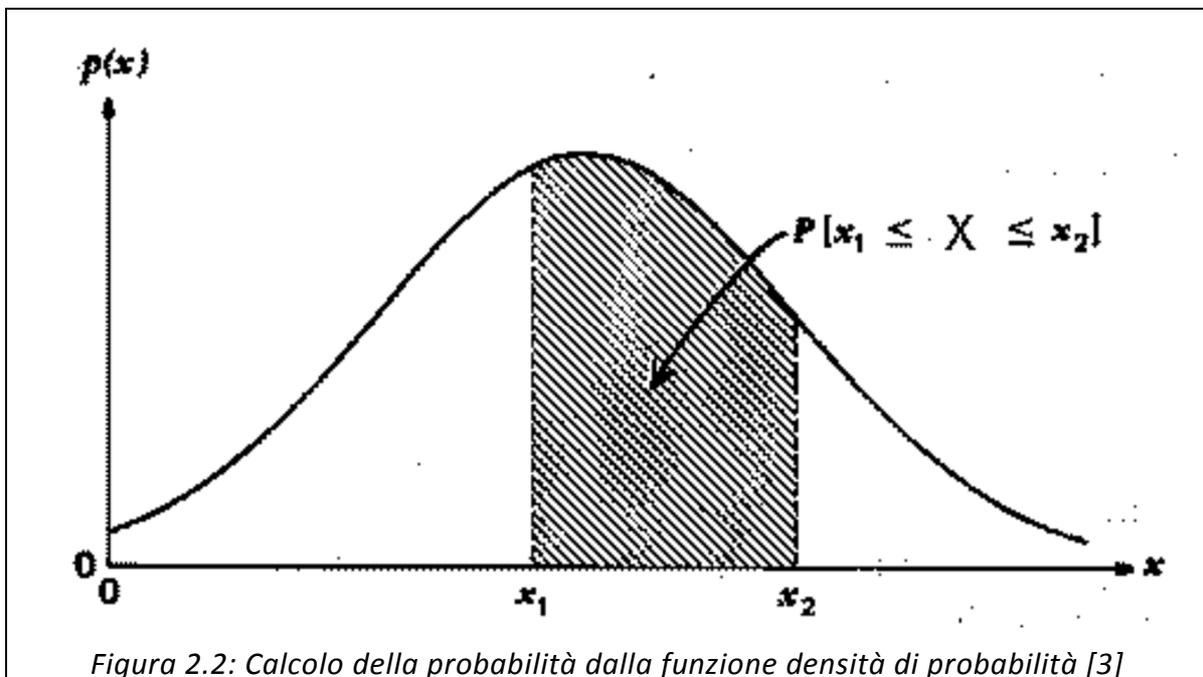
Se il seguente limite esiste, esso è chiamato *funzione densità di probabilità* ed è indicato con il simbolo $p(x)$:

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{P(x < X < x + \Delta x)}{\Delta x}$$

In altre parole la funzione densità di probabilità è la derivata della distribuzione di probabilità rispetto all'ampiezza. Pertanto, la funzione densità di probabilità $p(x)$ e la funzione distribuzione di probabilità $P(x)$ sono legate dalle seguenti relazioni:

$$P(x) = \frac{dP(x)}{dx} \quad \rightarrow \quad P(x) = \int_{-\infty}^x p(\xi) d\xi$$

La figura 2.2 mostra la probabilità che la variabile casuale X cada nell'intervallo $[x_1 \div x_2]$:



Valore atteso

Sia X una variabile casuale *discreta* che può assumere un valore qualunque tra $[x_1, x_2]$, si conduca un esperimento N volte ed il numero di volte che risulta il valore x_i sia n_i .

Il valore medio della variabile casuale X è definito come:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_i x_i n_i$$

Introducendo la frequenza relativa dell'evento x_i come $f_i = \frac{n_i}{N}$ si ha anche:

$$\bar{x} = \sum_i x_i f_i$$

Se passiamo al caso di variabile casuale continua, l'espressione del valore atteso o valor medio, $E[X]$ diventa:

$$E[X] = \int_{-\infty}^{\infty} x \cdot p(x) dx$$

Momenti di una variabile casuale

Si definisce momento di ordine k di una variabile casuale X la quantità:

$$\mu_k = E[X^k] = \int_{-\infty}^{\infty} x^k \cdot p(x) dx$$

Il caso $k=0$ è privo di significato poiché $\mu_0 = E[X^0] = \int_{-\infty}^{\infty} x^0 \cdot p(x) dx = 1$

Il momento di primo ordine ($k=1$), coincide invece col valor medio ed è indicato semplicemente col simbolo μ

Il momento di secondo ordine ($k=2$), è detto valor quadratico medio, ed è indicato col simbolo $\psi^2 = \mu_2 = E[X^2] = \int_{-\infty}^{\infty} x^2 \cdot p(x) dx$

La radice quadrata positiva del valor quadratico medio è detto valore efficace o **valore RMS** (root mean squared).

$$RMS = \sqrt{\psi^2} = \sqrt{\mu_2} = \sqrt{E[X^2]} = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} x^2 \cdot p(x) dx}$$

Per il secondo ordine ed i superiori si dice che i momenti sono calcolati "attorno" al valor medio. Si parla quindi di **momenti centrali** e si indica in generale con μ_k^c .

In particolare, il momento centrale del secondo ordine, chiamato **varianza** indicato in genere col simbolo σ^2 , è definito come:

$$\mu_2^c = E[(X - \mu)^2] = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^2 \cdot p(x) dx = \sigma^2$$

Da cui $\sigma^2 = \psi^2 - \mu^2$

La radice quadrata della varianza $\sigma = \sqrt{\sigma^2}$ è detta **deviazione standard**.

Distribuzione Gaussiana

La funzione densità di probabilità $p(x)$ vista precedentemente può essere sintetizzata in pochi parametri significativi:

- Il valore medio μ che funge da indice della posizione, della funzione densità di probabilità, sull'asse x
- La deviazione standard σ che invece ci fornisce una misura della dispersione dei valori nell'intorno del valor medio (può essere vista come l'ampiezza della campana della curva Gaussiana)

Infatti è interessante osservare che spesso le variabili casuali hanno una distribuzione di probabilità $p(x)$ che segue una curva detta normale o Gaussiana, la cui equazione è:

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

Nel caso di distribuzione Gaussiana le proprietà statistiche della variabile casuale sono completamente descritte dai due parametri μ e σ ovvero dal valore medio e dalla varianza.

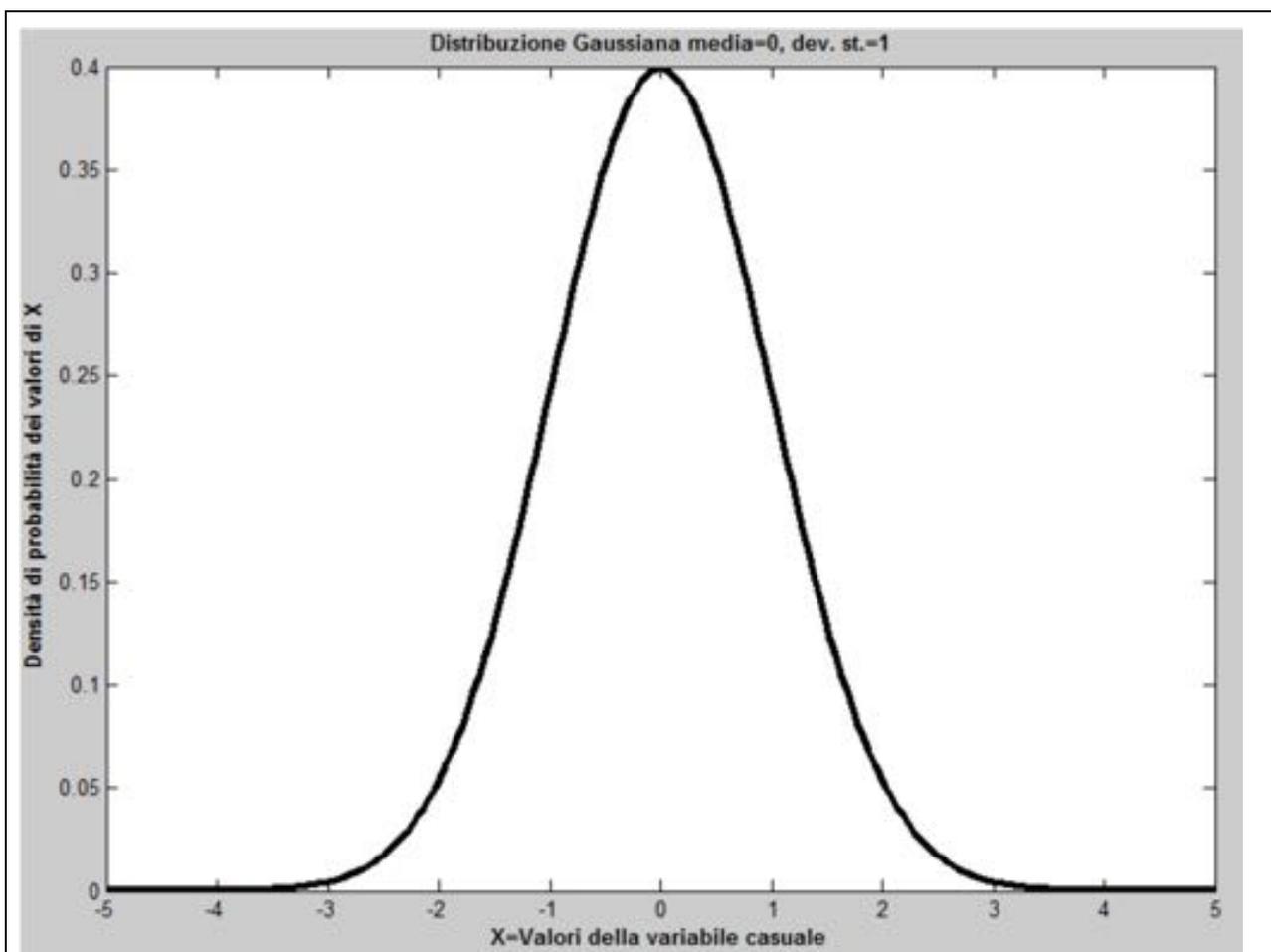


Figura 2.3: Distribuzione Gaussiana di probabilità

Momenti di ordine superiore (Skewness e Kurtosis)

Se la distribuzione di probabilità non segue una legge Gaussiana per descriverla si ricorre a momenti di ordine superiore al secondo.

Per distribuzioni asimmetriche rispetto al valore medio si ricorre al momento di terzo ordine:

$$\mu_3^c = E[(X - \mu)^3] = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^3 \cdot p(x) dx$$

Spesso si utilizza il coefficiente di Skewness:

$$\gamma_1 = \frac{E[(X - \mu)^3]}{\sigma^3}$$

il quale assume un valore nullo per una distribuzione Gaussiana (simmetrica).

Infine prendiamo in considerazione il momento centrale di quarto ordine denominato **Kurtosis** utilizzato per misurare il grado di "appuntimento" della curva.

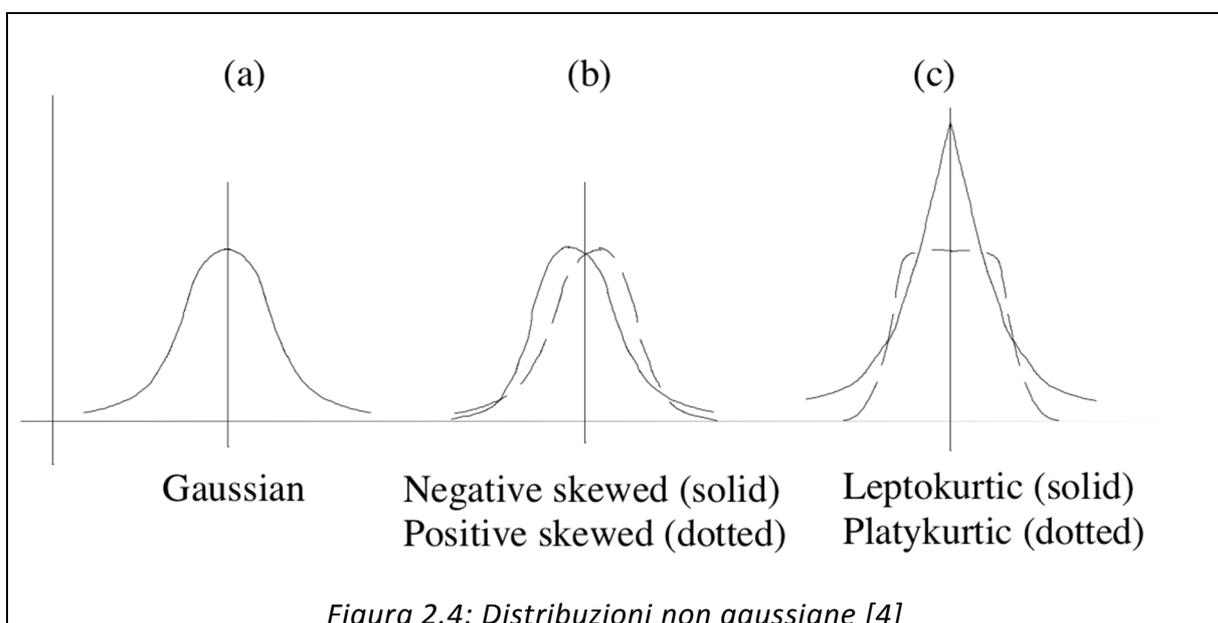
$$\mu_4^c = E[(X - \mu)^4] = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^4 \cdot p(x) dx$$

Anche in questo caso per comodità si utilizza una versione normalizzata:

$$\gamma_2 = \frac{E[(X - \mu)^4]}{\sigma^4}$$

detto coefficiente di kurtosis, in base ai suoi valori si definiscono:

1. Distribuzione gaussiana $\gamma_2 = 3$
2. Distribuzione leptocurtica (più appuntita della gaussiana) $\gamma_2 < 3$
3. Distribuzione platicurtica (meno appuntita della gaussiana) $\gamma_2 > 3$



CAPITOLO III: SPECIFICHE TECNICHE

In questo capitolo viene definito il contesto in cui è posto questo studio. Verranno quindi definiti i concetti di qualifica a vibrazione, le specifiche tecniche da seguire e il processo di Test Tailoring col quale viene sintetizzata la storia di carico.

CENNI STORICI

Inizialmente i primi test (anni '40) venivano eseguiti verificando la resistenza di un componente sollecitato da vibrazioni non necessariamente simili a quelle riscontrate durante la sua vita utile, generalmente esse erano più severe così da prevenire rotture indesiderate. In assenza di una procedura razionale, le specifiche tecniche erano fortemente influenzate dal giudizio personale di chi doveva condurre i test e dalle attrezzature disponibili in laboratorio.

Un elevato numero di segnali vibratorii sono stati misurati e raccolti su aeromobili tra il 1945 e il 1950 i quali sono stati utilizzati per scrivere i primi standard. Uno dei primi metodi per sfruttare questi dati ai fini di ottenere specifiche tecniche è stato quello di classificarli in categorie. I segnali sono stati filtrati con un filtro bassa banda la cui frequenza centrale è stata variata da qualche Hz a 2000 Hz, infine è stato considerato il valore massimo del segnale filtrato in funzione della frequenza centrale del filtro. Questa procedura è stata effettuata per ogni segnale acquisito, su diversi aeromobili e in diverse condizioni operative. Infine sono stati ottenuti dei grafici interpolando con linee rette i punti, in un grafico doppio-logaritmico, dell'ampiezza massima del segnale in funzione della frequenza centrale del filtro. La specifica tecnica poteva essere ricavata sfruttando tali grafici: considerando la frequenza di risonanza del componente in esame e applicando una vibrazione sinusoidale avente ampiezza pari al livello di vibrazione corrispondente a tale frequenza. Queste condizioni sono però poco rappresentative delle reali vibrazioni alle quali è soggetto il componente, in quanto difficilmente esso sarà sollecitato a una frequenza costante (coincidente con una frequenza naturale) per lunghi periodi di tempo.

In seguito a tali considerazioni alcuni autori avanzarono la proposta di variare al frequenza delle vibrazioni e si scelse di replicare vibrazioni sinusoidali a frequenza variabile ("Swept sine").

La durata dei test così realizzati veniva scelta arbitrariamente o ricavata a partire da una formula analoga all'equazione di Basquin utilizzata tutt'ora.

$$\frac{T_{Ridotto}}{T_{Reale}} = \left(\frac{x_{reale}}{x_{ridotto}} \right)^b$$

Essa correla la vita a fatica espressa come grandezza temporale (“T”) anziché numero di cicli all’intensità delle vibrazioni (“x”) attraverso l’esponente “b” dell’equazione di Basquin.

Tuttavia applicando e analizzando i risultati ottenuti tramite questi test si giunse alla conclusione che anche questi profili vibratorii non erano sufficientemente realistici.

La più grande svolta avvenne nel 1955 quando fu scoperta la necessità di simulare in laboratorio vibrazioni random caratteristiche di molte applicazioni.

Tali vibrazioni sono in grado di eccitare contemporaneamente tutte le frequenze naturali. Esse furono introdotte negli standard tra il 1955 e il 1960 anche se con alcune opposizioni. Sostanzialmente i problemi erano legati al fatto che l’attrezzatura per riprodurre le vibrazioni random era poco diffusa e costosa.

SPECIFICHE TECNICHE

Uno standard è un documento che fornisce le specifiche tecniche relative ad un determinato prodotto o ad una classe di prodotti. Al suo interno sono contenute le norme e le tipologie di prove tramite le quali svolgere i test di qualifica a vibrazione [5,6].

La parte senza dubbio più complessa del procedimento di qualifica a vibrazione è la definizione della specifica tecnica con cui eccitare il componente opportunamente montato sullo shaker; i test devono essere severi abbastanza da assicurare che il prodotto sopravvissuto alla prova di “vibration control” resista parimenti alle condizioni operative reali e nel contempo rappresentativi della condizione operativa per evitare una prova eccessivamente severa.

Attualmente si seguono due strade per il reperimento delle specifiche:

1. Con la prima si fa ricorso a **major standard** predefiniti, spesso di origine militare
2. Mentre con la seconda si segue un apposito procedimento chiamato **“Test tailoring”**.

Tra i major standard più noti vi sono:

- AIR 7304 “Environmental Test Condition for Aeronautic Equipment: Electrical, Electronic and On-board Instruments”. (Standard Francese).
- GAM-T13–Inter-Army “General Testing of Electronic and Telecommunications Equipment”. (Standard Francese). Sostituito in seguito da GAM.EG 13.
- MIL-STD standards. Il più noto è il MIL-STD 810 “Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests”. (Standard U.S.A.).

Questi standard stanno andando tuttavia in disuso poiché dagli anni '80 c'è stato un cambio di tendenza, si è iniziato a dare maggiore importanza all'utilizzo di specifiche tecniche che prevedano l'impiego di dati sperimentali.

Si arriva così a definire la specifica basandosi su dati rilevati durante un ciclo di sollecitazione rappresentativo del reale funzionamento; questo metodo risulta molto più lungo e dispendioso anche se porta a risultati migliori sotto ogni punto di vista, tanto che, anche nei sopracitati standard, è presa in considerazione la possibilità di ricorrere al "test tailoring".

Specifiche tecniche da dati sperimentali

Scegliendo di adottare una specifica tecnica basata su dati sperimentali è necessario che le condizioni d'uso siano note e qualora possibile che la vita sia divisa in fasi di tipo e durata note.

L'utilizzo di tali specifiche tecniche porta ad alcuni vantaggi:

- migliore progettazione del componente
- valutazione accurata dei fattori di sicurezza;

e a relativi svantaggi:

- specifiche tecniche definite per un particolare ciclo di vita. Nel caso si cambi la condizione di impiego dovranno essere valutate nuove specifiche con ripetizione dei test di qualifica;
- elevato costo per la creazione della specifica, compensato però durante la fase di sviluppo del componente;
- elevato costo di strumenti idonei alla replica delle specifiche tecniche.

Una specifica tecnica può essere scritta a partire dall'esatta duplicazione dei dati sperimentali o da una replica del danno a fatica provocato dalle sollecitazioni a cui è sottoposto il componente.

Il primo approccio è ideale, difficilmente le vibrazioni con cui vado a testare il componente saranno esattamente le stesse che esso subirà durante la sua vita. Per queste ragioni questo approccio è poco utilizzato; tuttavia viene impiegato per alcune applicazioni con segnali di breve durata che sarebbero difficili da simulare con altri processi.

Il secondo approccio (Test Tailoring) consiste nella sintesi delle vibrazioni a cui il componente sarà sottoposto nell'arco della sua vita. Il processo di sintesi consiste nella riproduzione del danno a fatica provocato dalla reale sollecitazione.

Questo metodo è più flessibile ma necessita di un accettabile criterio per la stima del danno equivalente.

TEST TAILORING

Attualmente sono tre gli standard che richiedono l'utilizzo del Test Tailoring: MIL-STD 810, GAM.EG 13 e lo standard NATO STANAG 430.

Il processo di determinazione di una specifica attraverso l'ausilio del "test tailoring" può essere suddiviso in 5 fasi.

1. Nella prima si analizza quello che è il ciclo di funzionamento del componente in analisi (definizione della missione).
2. Nella seconda si acquisisce il più ingente quantitativo di dati possibile attraverso una serie di rilevazioni sul campo;
3. Si eseguono poi delle analisi delle condizioni di danneggiamento (terza fase)
4. Vengono quindi calcolate le curve di danneggiamento globale (quarta fase).
5. Nell'ultima fase si effettua la sintesi del profilo di prova da usare per le prove laboratorio con lo shaker.

1 Analisi delle condizioni d'uso

Lo scopo di questa fase è la definizione delle condizioni di prova che verranno affrontate dal componente durante la sua vita tecnica.

È conveniente suddividere il ciclo di vita del prodotto in più fasi elementari o scenari, in modo da poter gestire più facilmente la seguente fase di reperimento dati; generalmente la fase più significativa è quella di utilizzo, che può variare da utente a utente.

2 Rilevazione di dati sperimentali sul campo

In questa fase si acquisisce una serie di dati che sia il più possibile rappresentativa delle condizioni operative. Generalmente l'acquisizione e la memorizzazione avviene sotto forma di segnali in funzione del tempo, le cosiddette "time history", o di "power spectral density" (PSD) come nel nostro caso.

3 Elaborazione di un profilo vibratorio equivalente al reale

L'applicazione del metodo di Test Tailoring necessita di un'adeguata procedura di sintesi. Di seguito verranno descritte alcune metodologie di sintesi, in particolare quella oggetto di studio. Sostanzialmente l'operazione di sintesi dei dati ha lo scopo di fornire un profilo vibratorio di durata ridotta rispetto al profilo acquisito preservando gli effetti dal punto di vista del danno indotto.

4 Definizione test.

Durante l'operazione di sintesi dei dati in genere si riducono tutte le misure effettuate a un unico profilo vibratorio. In alcuni casi può essere necessario sintetizzare più vibrazioni ad esempio per effettuare analisi comparative di diversi eventi misurati, oppure perché solo alcuni eventi sono caratterizzati anche da sollecitazioni termiche e si vogliono effettuare test termici/meccanici combinati. In questi casi è necessario stabilire un ordine cronologico con cui condurre i test cercando sia di ottimizzare tempi e costi di realizzazione, sia di realizzare test rappresentativi delle reali condizioni di sollecitazione.

5 METODOLOGIE DI SINTESI

La quinta fase del processo di Test Tailoring riguarda la sintesi dei profili vibratorii. I principali processi sono:

- Inviluppo delle PSD
- Metodo Arberdeen
- Metodo ADP
- Metodo FDS-MRS

Si riporta una breve descrizione di quest'ultimo poiché è probabilmente il più diffuso ed è stato utilizzato durante lo studio riportato al capitolo VII per confrontare il danno prodotto dalla storia Gaussiana e quella ad elevato livello di Kurtosis.

Metodo FDS-MRS

Questo metodo è stato originariamente sviluppato dall'ente "French Atomic Energy Authority" e sfrutta due funzioni denominate Fatigue Damage Spectrum (FDS) e Maximum Response Spectrum (MRS) quest'ultima anche chiamata Extreme Response Spectrum (ERS).

Le funzioni MRS e FDS devono essere viste come uno strumento di studio del danno potenziale che permettono il confronto tra diversi scenari di vita tecnica e combinazioni di questi. Nel caso particolare della funzione FDS, il danno per fatica viene calcolato utilizzando le curve del Wohler e la regola di Miner applicate a sistemi ad un grado di libertà. Per riuscire a comparare il danno indotto da diverse sollecitazioni dinamiche su un dato componente si rende necessario modellarlo con un sistema lineare a un grado di libertà. Si ipotizza quindi che se due sollecitazioni dinamiche producono lo stesso danno sul sistema lineare a un grado di libertà, allora producano lo stesso danno anche sul componente reale.

Il modello a un grado di libertà ha il solo scopo di consentire il confronto fra gli effetti di diverse sollecitazioni dinamiche, la frequenza naturale del sistema lineare viene poi fatta variare in un range tale da coprire le frequenze naturali dei modi di vibrare più significativi.

Con tale metodo si è in grado di quantificare il danno prodotto dalle vibrazioni misurate e sintetizzare un profilo vibratorio che induca lo stesso danno. Si suppone che il danno prodotto dalle sollecitazioni possa essere di due tipi:

1. Danneggiamenti dovuti a urti, il danno indotto da questa tipologia di sollecitazioni viene quantificato dall'MRS che ne calcola le tensioni massime derivanti.
2. Danneggiamento dovuto all'affaticamento del provino, questo danno viene valutato dall'FDS la quale si avvale della regola di Miner.

Entrambe le funzioni, è bene sottolineare, dipendono dalla frequenza naturale del sistema.

Formulazione Analitica

Il sistema reale viene ricondotto a un modello fisico a un grado di libertà in cui le tensioni siano proporzionali allo spostamento come quello rappresentato in figura 3.1:

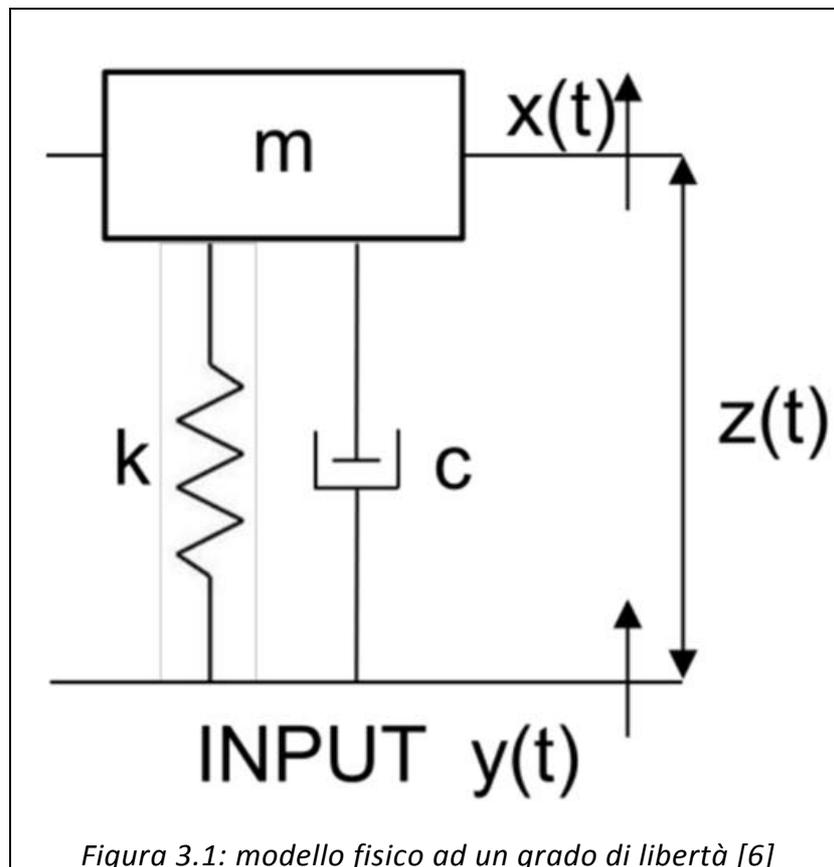


Figura 3.1: modello fisico ad un grado di libertà [6]

La funzione MRS quantifica le tensioni massime dovute allo spostamento relativo massimo (z_{max}) moltiplicandole per il modulo di rigidità k . Tale parametro si può ricavare a partire dalle caratteristiche geometriche del sistema e del modulo di elasticità del materiale.

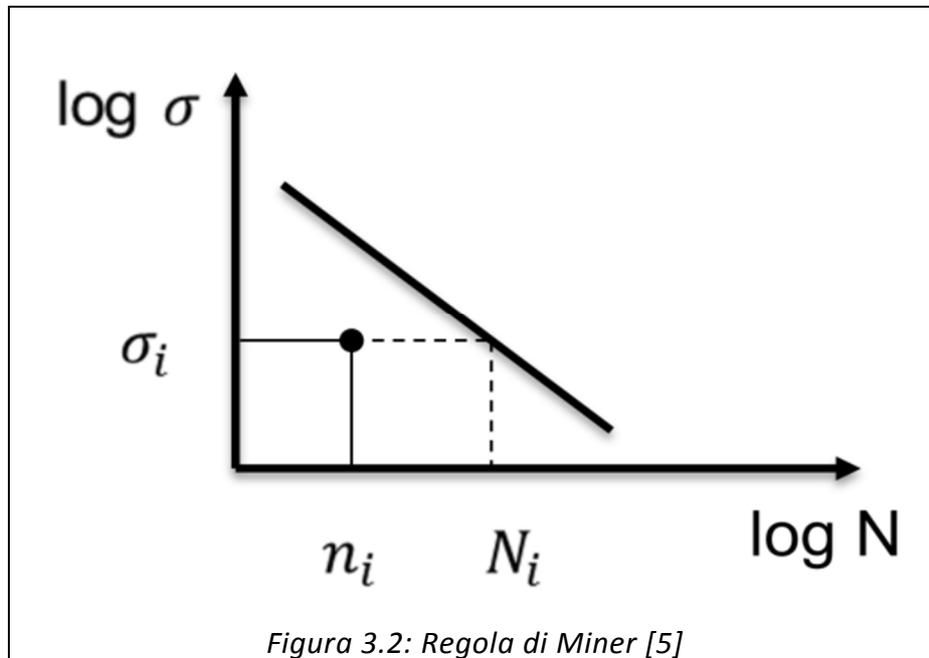
$$\sigma = k \cdot z$$

$$MRS = (2\pi f_n)^2 z_{max}$$

La FDS invece per calcolare il danno indotto a fatica dalle vibrazioni assume anche le seguenti due ipotesi:

- Danno e accumulo del danno secondo la legge di Miner (figura 3.2) secondo la quale il danno (D_i) prodotto dal ciclo di carico i -esimo vale:

$$D_i = \frac{n_i}{N_i}$$



Dove n_i sono il numero di cicli al livello di carico i -esimo, mentre N_i sono il numero di cicli massimi prima di giungere a rottura (lo si ricava dal diagramma di Wohler). La rottura avviene per $D = \sum_i \frac{n_i}{N_i} = 1$.

- Curva a fatica secondo la legge di Basquin

Partendo dalle vibrazioni misurate sul sistema reale $y(t)$ si calcola il danno a fatica che esse inducono sul sistema a un grado di libertà in funzione della sua frequenza naturale e fattore di smorzamento.

La definizione di danno può essere estesa a sollecitazioni random o shock, in questi casi è necessario stimare un istogramma che fornisca il numero di cicli di sollecitazione per una data ampiezza utilizzando uno fra i vari metodi di conteggio ad esempio il Rainflow Counting Method per tenere conto del danno prodotto da tutte le frequenze in gioco. Naturalmente l'eccitazione della frequenza naturale del sistema porta a un danneggiamento maggiore del sistema.

Considerando una generica vibrazione non sinusoidale, si può stimare il danno definendo la funzione FDS come segue:

$$FDS = D = \sum_i d_i = \sum_i \frac{n_i}{N_i} = \sum_i \frac{n_i (\sigma_i)^b}{C} = \frac{K^b}{C} \sum_i n_i (z_i)^b$$

In figura 3.3 viene riportato l'andamento della FDS per una vibrazione sinusoidale a frequenza costante pari a 10 Hz, ampiezza di 10 m/s² e durata di 1 secondo.

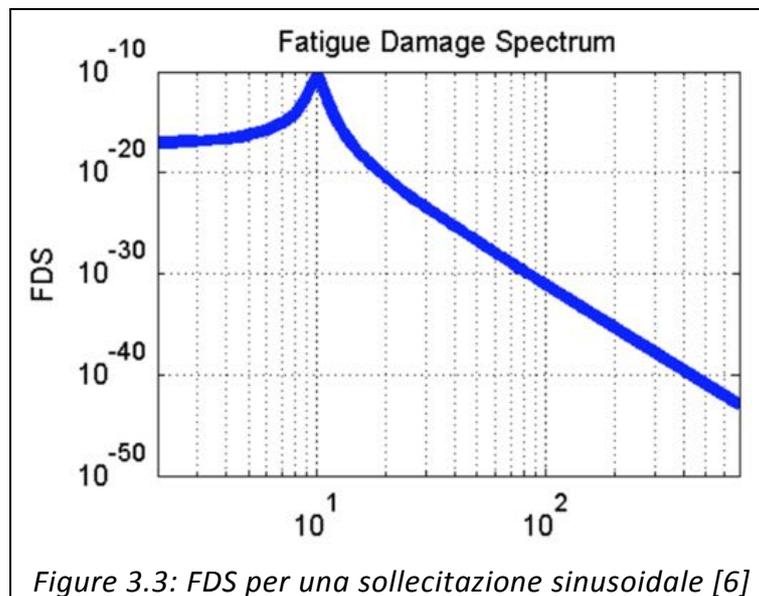


Figure 3.3: FDS per una sollecitazione sinusoidale [6]

Profilo ottenuto dalla sintesi

Il risultato di questo processo di sintesi è un profilo random, in genere definito a partire da una PSD, o un profilo sinusoidale a toni puri o sweep ricavato a partire dalle curve di danneggiamento globale precedentemente calcolate. Nel caso di fatica come causa principale di danno, la sintesi viene fatta a partire dalla funzione della FDS, in essa è contenuto il potenziale di danno a fatica dei carichi originali; mentre dal punto di vista della sollecitazione massima, la sintesi viene fatta sul parametro MRS, contenendo esso il potenziale di danno dovuto alla massima tensione rispetto ai carichi originali.

Un parametro di sintesi fondamentale è la durata della prova, infatti da essa dipende la quantità di danno indotto per fatica. Per ottenere un ugual livello di danneggiamento a fatica nel componente in esame, ad una diminuzione della durata della prova deve corrispondere un incremento del livello di sollecitazione applicata alla struttura, tale correlazione fra durata e intensità delle sollecitazioni è espressa dall'equazione già descritta a pagina 17.

Il profilo di prova risultante deve presentare, pur con una riduzione della durata del test, una funzione FDS molto simile a quello risultante dall'analisi del reale funzionamento. Tuttavia è necessario eseguire operazioni aggiuntive per poter ulteriormente validare il risultato.

Bisogna condurre delle verifiche sulle SRS (Shock Response Spectrum) e MRS relative al reale funzionamento (LC) e alla specifica (SP); la condizione più auspicabile è: $SRS > MRS_{SP} > MRS_{LC}$. [5] che permette di affermare che il test risulta più restrittivo anche per quanto riguarda la massima sollecitazione ammissibile. È bene che la MRS della specifica non superi la SRS onde evitare condizioni di una prova eccessivamente severa.

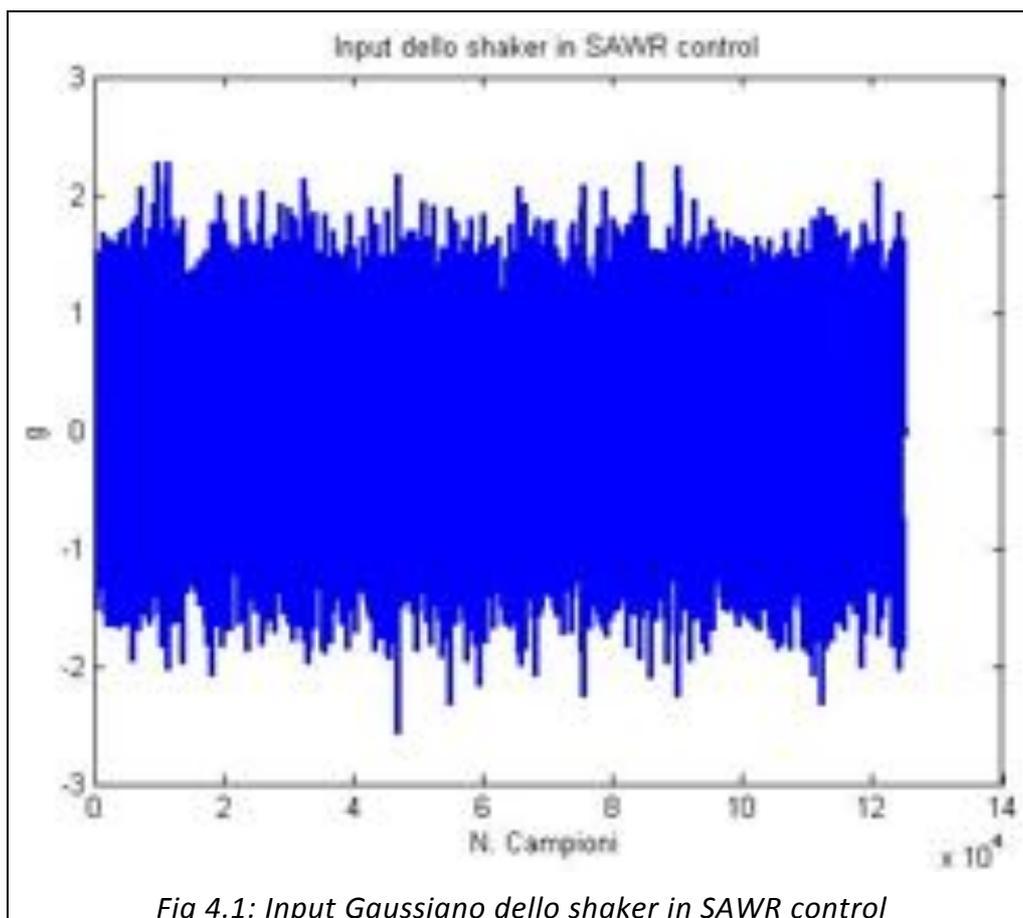
CAPITOLO IV: PROGETTAZIONE DEI PROVINI SOTTOPOSTI A TEST

PROGETTAZIONE E CARATTERISTICHE DEI PROVINI TESTATI

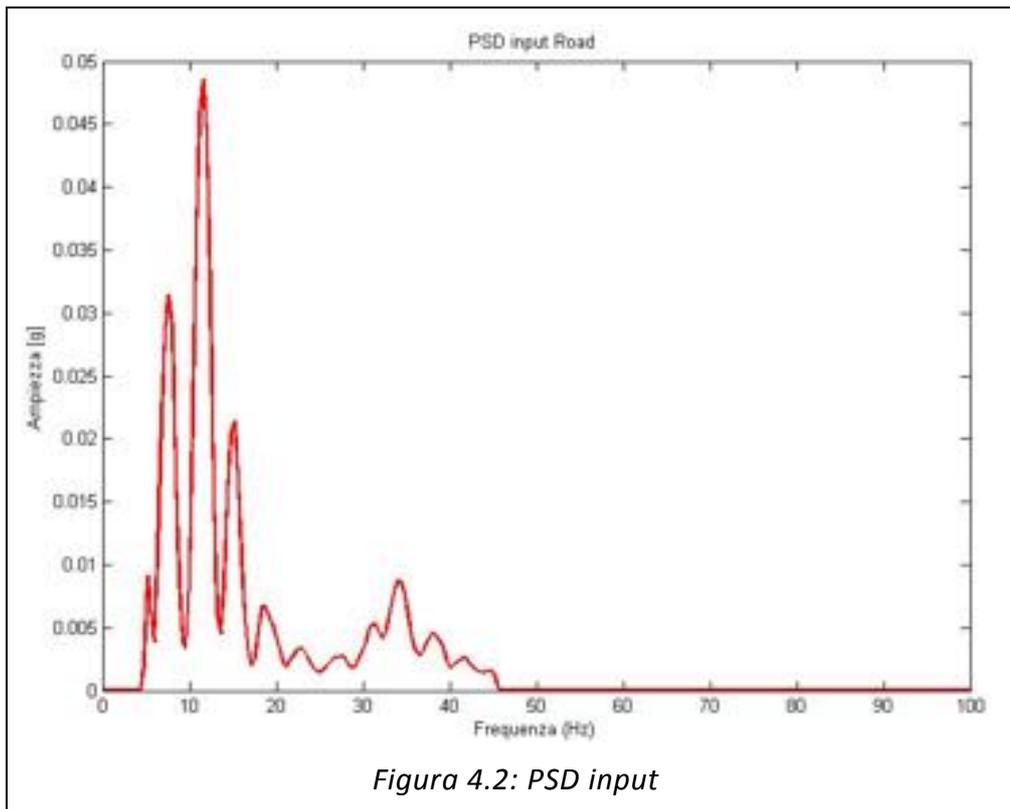
Di seguito verrà descritta la progettazione del provino utilizzato durante i test presentati in questo studio.

Le caratteristiche, e quindi i vincoli progettuali da rispettare, vengono definiti a partire dal profilo vibratorio utilizzato come input per i test (figura 4.1), ricavato attraverso accelerometri posizionati su un'autovettura e avente una durata approssimativa di 10 minuti.

In particolare le caratteristiche modali del provino devono essere tali da far sì che la storia di carico produca un danneggiamento significativo così da contenere la durata delle prove che altrimenti potrebbe durare giorni o settimane anziché ore.



Per determinare quali siano le condizioni più sfavorevoli per il provino, e ricavare così i nostri vincoli di progettazione, si calcola la PSD di tale segnale (figura 4.2).



La forma della PSD rappresenta la distribuzione della potenza della forzante nel dominio delle frequenze. Risulta così evidente che facendo coincidere la frequenza naturale del campione con quella in cui è concentrata la densità di potenza della forzante porta a un danneggiamento significativo in minor tempo come richiesto dal progetto. Dalla PSD illustrata in figura 4.2 le frequenze per le quali si ha una maggior distribuzione di frequenza sono quelle a 7,6 Hz, 11,6 Hz e 15,2 Hz, sarà quindi una di esse quella presa come obiettivo della progettazione.

Il picco avente ampiezza maggiore lo si ha ad una frequenza naturale pari a 11,6-11,7 Hz, questo valore sarà quello scelto per la progettazione del provino. Tuttavia poiché a frequenze minori, corrispondono spostamenti di ampiezza maggiore si vuole mantenere la possibilità di variare questo parametro.

Per rendere possibile questa operazione viene adottato l'impiego di una massa ausiliaria in acciaio le cui dimensioni e conseguente peso verranno anch'esse progettate. Essa aggiunge un grado di libertà facilitando la progettazione e aiuta a localizzare con maggior precisione il baricentro del provino.

Geometria di partenza

Per sollecitare i provini attraverso lo shaker presente in laboratorio l'esperienza porta a una configurazione pari a quella di una trave a sbalzo, in cui il vincolo che collega il provino allo shaker è schematizzabile come un incastro.

La scelta di una geometria della sezione rettangolare deriva da alcune osservazioni fatte su provini a sezione cilindrica, condotti nello studio riportato in [4]. I provini (figura 4.3) lunghi complessivamente 130 mm sono incastrati alla base dello shaker e in prossimità del vincolo presentano una gola a "V" con conseguente riduzione del diametro da 8 a 3 mm.

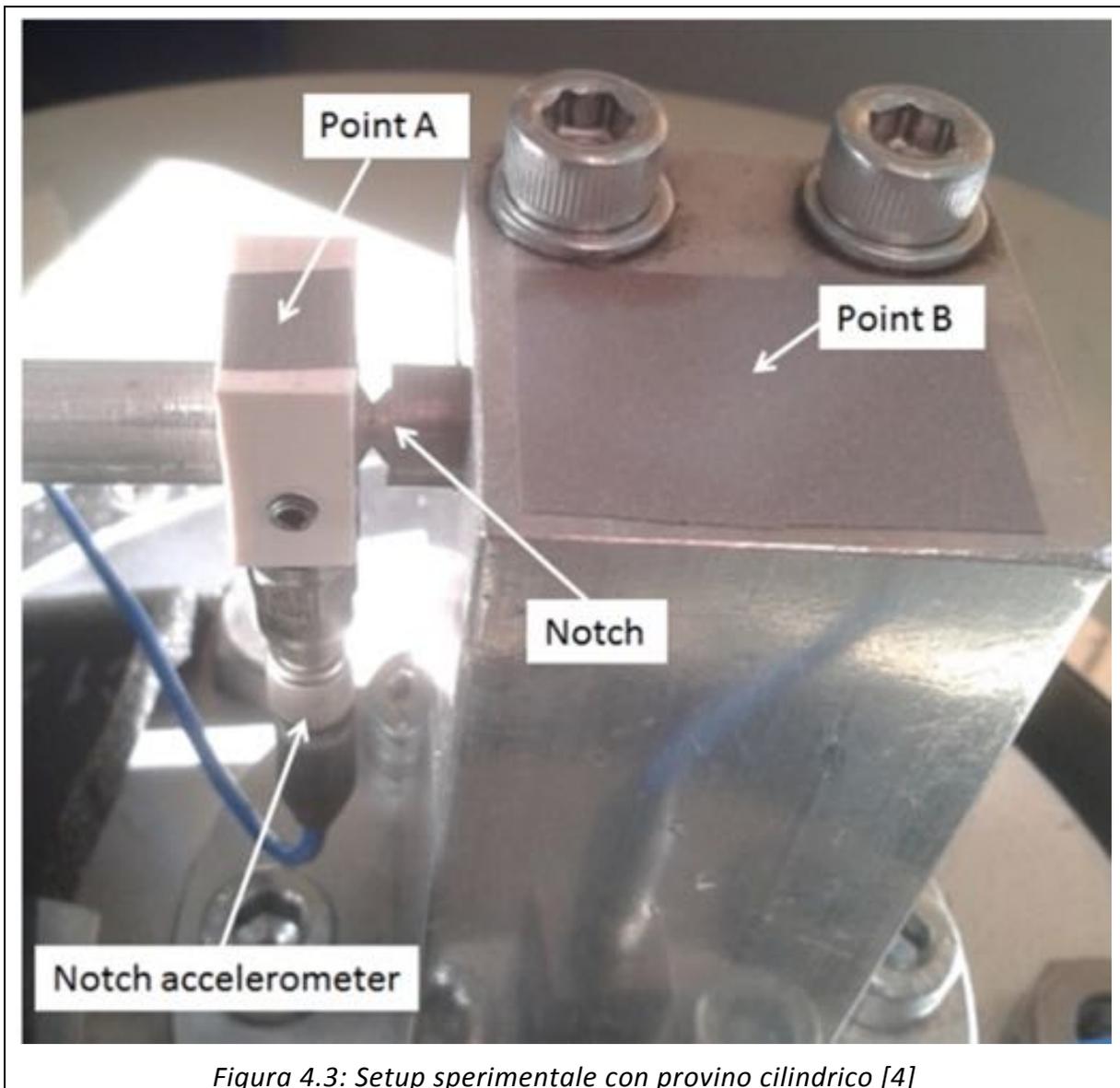


Figura 4.3: Setup sperimentale con provino cilindrico [4]

La realizzazione della gola fa sì che la sezione critica non sia più quella adiacente all'incastro ma diventi quella in prossimità della gola, ciò è dovuto alla riduzione della sezione critica e alla conseguente introduzione di un fattore di concentrazione delle tensioni K_t .

Quando il provino è sollecitato da carichi statici il fattore di concentrazione delle tensioni è pari a una costante, mentre durante prove dinamiche come quelle riportate in questa tesi, esso è variabile, principalmente, per i seguenti due motivi:

1. L'intaglio è realizzato in un secondo momento lavorando il materiale alle macchine utensili con tolleranze rilevanti per le dimensioni dei provini.
2. Durante lo svolgimento dei test, a partire dalla nucleazione superficiale della cricca fino alla rottura completa per fatica, non è possibile monitorare con precisione il valore di questo parametro.

Ciò costituisce una variabile aleatoria che riduce il grado di ripetibilità dei test poiché, le differenze (in termini di vita a fatica) da provino a provino si fanno più marcate.

Per evitare che si ripresenti nuovamente questo problema si è scelto di adottare una geometria a sezione rettangolare, prendendo spunto da uno studio svolto dal centro di ricerca sulle vibrazioni in Henison, Michigan [8].

Il vantaggio nell'adottare questa geometria risiede nella possibilità di realizzare comunque intagli, che riducano la sezione critica trasversalmente alla direzione in cui agisce il momento flettente, senza dover introdurre fattori di concentrazione delle tensioni. È così possibile ricavare il valore della tensione agente sulla sezione critica senza dover impiegare alcun fattore K_t .

Ipotesi semplificativa: modello a parametri concentrati a un grado di libertà

Per poter studiare e stimare il valore della frequenza naturale f_n si è modellato il sistema reale con un modello fisico a parametri concentrati a un singolo grado di libertà. Si utilizza questa tipologia di modello anziché uno continuo (più vicino alla realtà e preciso), poiché nel sistema reale è presente una discontinuità dovuta all'impiego di una massa ausiliaria che porta a una notevole complicazione del modello analitico.

Per modellare il sistema reale, figura 4.4, con un modello a parametri concentrati, si devono concentrare in singoli punti grandezze come rigidità (k), smorzamento (c di tipo viscoso) e massa, ottenendo lo schema in figura 4.5. Per adottare questo schema è bene precisare, si è approssimato l'arco di circonferenza descritto dalla massa, durante il moto vibratorio, con una traslazione verticale.

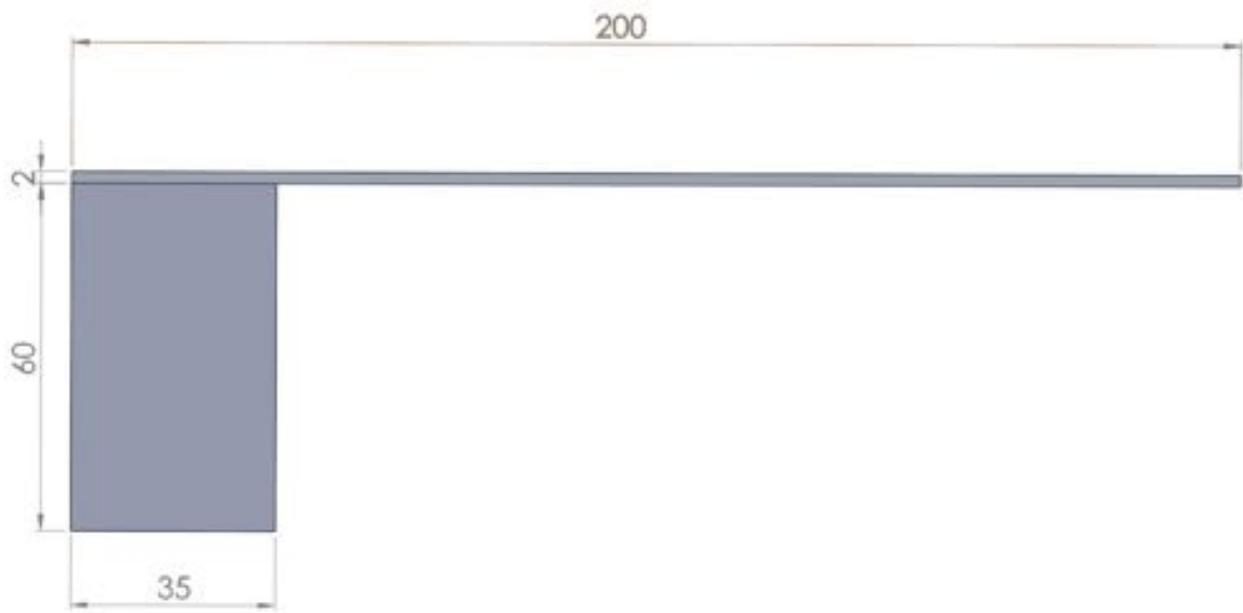


Figura 4.4: Sistema "reale" continuo

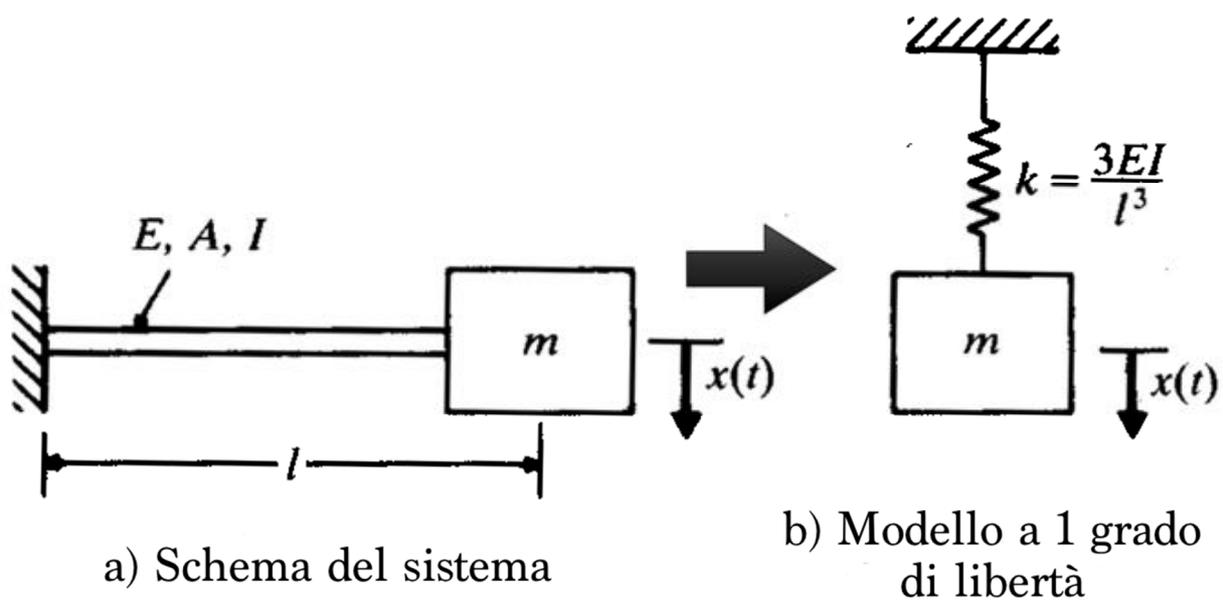


Figura 4.5: Semplificazione del sistema con un modello a 1 g.d.l [2]

Il modello fisico così generato può ora essere descritto da un modello analitico; la legge di moto è un'equazione differenziale non omogenea del secondo ordine:

Legge di moto

$$m\ddot{x} + kx + cx = F_o \cos(\omega t)$$

L'integrale è somma di due contributi l'integrale dell'omogenea e della particolare, essendo la forzante armonica lo sarà anche la particolare.

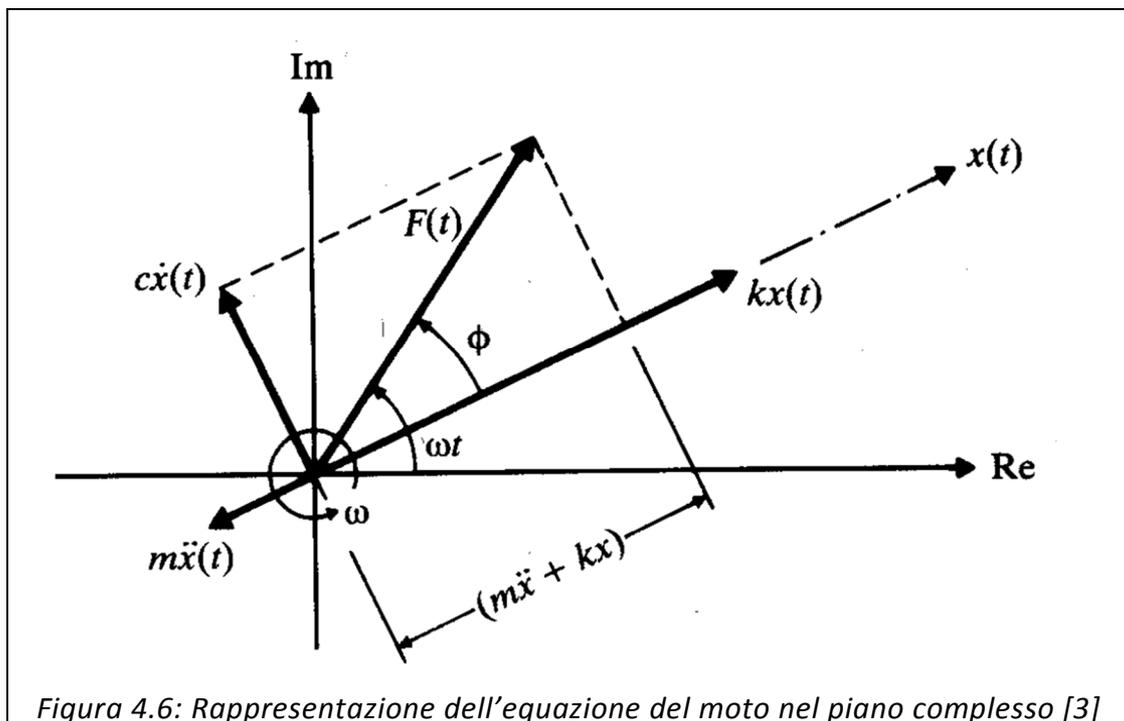
$$x(t) = x_{go}(t) + x_p(t) = x_{go}(t) + X_o \cos(\omega t - \psi)$$

L'omogenea, caratterizza il transitorio iniziale, per valori dello smorzamento inferiori a quello critico può essere espressa nella forma:

$$x_{go}(t) = e^{-\zeta\omega_n t} [(A \cos(\omega_s t) + B \sin(\omega_s t))]$$

Dove A e B sono costanti che dipendono dalle condizioni iniziali e ω_s è la pulsazione naturale del sistema smorzato: $\omega_s = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$. Si tratta di un moto periodico smorzato che, dopo un certo tempo, si annulla.

Trascorso il transitorio resta l'integrale particolare le cui costanti X_0 e ψ dipendono dalle caratteristiche del sistema e dall'eccitazione, esse possono essere ricavate, ad esempio, attraverso una rappresentazione nel piano delle fasi (fig. 4.6):



Attuando semplici operazioni di somma tra vettori (fasori) e introducendo i due parametri:

$-\omega_n^2 = \frac{k}{m}$ **pulsazione naturale** dalla quale si definisce la $f_n = \frac{\omega_n}{2\pi}$ **frequenza naturale**

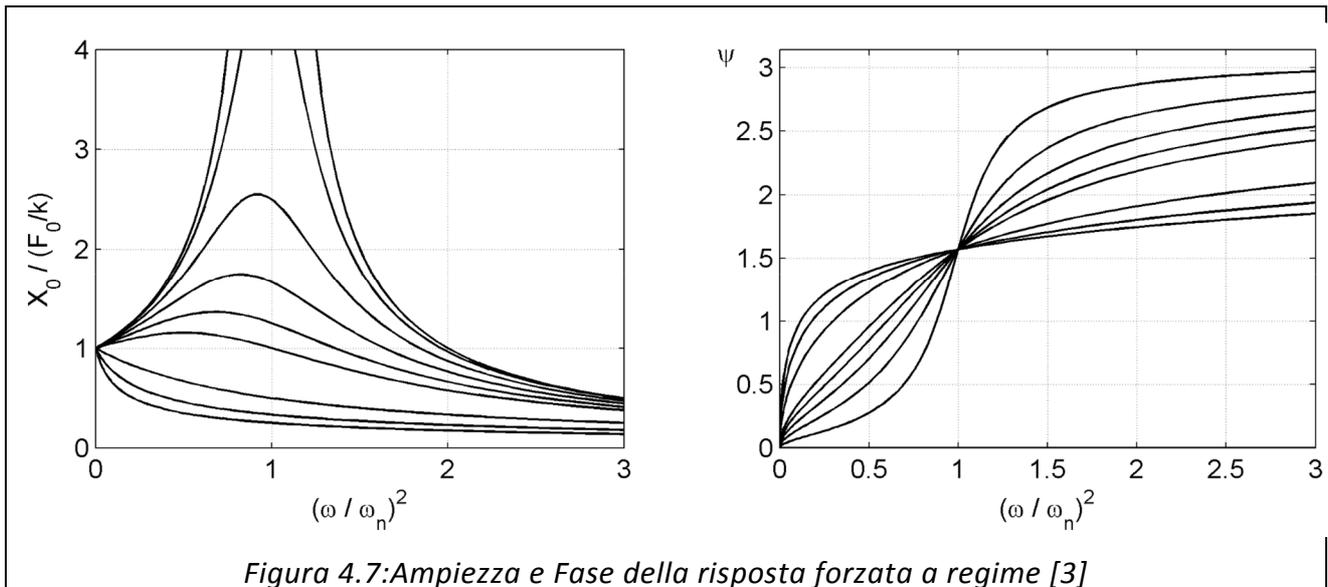
$-\zeta = \frac{c}{2\sqrt{km}}$ **fattore di smorzamento viscoso**

Si ricavano i valori di ampiezza e fase della risposta:

$$X_0 = \frac{F_0}{\sqrt{(k - m\omega^2)^2 + c^2 \omega^2}} = \frac{\frac{F_0}{m\omega_n^2}}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2}\right)^2 + \left(2\zeta \frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}}$$

$$\tan \psi = \frac{c\omega}{k - m\omega^2} = \frac{2\zeta \frac{\omega}{\omega_n}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}$$

Si possono così graficare (fig. 4.7), per diversi valori del fattore di smorzamento ζ i valori di ampiezza X_0 e di fase ψ della risposta forzata a regime, in funzione del rapporto $\frac{\omega}{\omega_n}$.



Si parla di **risonanza di ampiezza** quando l'ampiezza dell'oscillazione a regime X_0 raggiunge il valore massimo.

Tale condizione si ha per $\frac{\omega}{\omega_n} = \sqrt{1 - \zeta^2}$ e il valore dell'ampiezza vale $X_{RA} =$

$\frac{\frac{F_0}{k}}{2\zeta\sqrt{1-\zeta^2}}$ si parlerà invece di **risonanza di fase** quando $\frac{\omega}{\omega_n} = 1$ in tali condizioni

la fase $\psi = \pi/2$. In tale condizione il valore dell'ampiezza a regime vale

$$X_{RF} = \frac{\frac{F_0}{k}}{2\zeta}$$

Vincoli di progetto:

- Frequenza naturale target: 11,7 Hz pari al massimo della PSD.
- Range f_n ottenibili spostando la massa lungo il provino: 8-45 Hz, anche questo intervallo si ricava osservando la PSD riportata in Fig. 4.2
- Larghezza del provino: 15-25 mm, tenendo presente che il supporto del provino è un parallelepipedo di base quadrata avente i lati di 35 mm, tale intervallo è stato scelto sulla base dell'esperienza e di test riportati in altri studi [8].
- Spessore del provino: 1-3 mm, pari allo spessore convenzionale dei lamierini commerciali.
- Lunghezza massima del provino dovuta agli ingombri: 250 mm, a seguito di considerazioni riguardanti gli ingombri e i rischi che la rottura dei provini porterebbe. Lunghezze maggiori potrebbero far cadere fuori dallo shaker il provino rotto, rischiando il danneggiamento dei sensori ad esso collegati.
- Distanza minima tra massa e incastro: 40 mm, tale distanza è misurata fra le due superfici della base e della massa più vicine fra di loro, ad una distanza minore si avrebbe un'interferenza con la base d'alluminio a cui è vincolato il provino.
- Spostamento verticale massimo della massa (freccia statica max): 8 mm, tale vincolo è necessario ad evitare che il provino, durante il suo moto vibratorio, urti lo shaker.
- Tensione massima sulla sezione critica \ll Tensione di rottura: questo poiché si vuole una rottura a fatica e possibilmente la si vuole ad alto numero di cicli.
- $\frac{\text{Massa}}{\text{Massa che comporta una rottura statica il provino}} = M_{\%} = 10-30\%$, questo parametro da una misura preventiva della durata a fatica del provino, avere un $M_{r\%} < 10\%$, sulla base dell'esperienza e della teoria, comporta una durata delle prove eccessiva. Viceversa avere $M_{\%} > 30\%$ fa sì che il provino a riposo sia sottoposto a tensioni sulla sezione critica maggiori al 30% della tensione di rottura rischiando di avere rotture dei campioni testati quasi statiche e non per fatica.

Per ricavare tale parametro occorre prima di tutto conoscere la massa che porta ad una rottura statica (M_s) il provino, tale valore si può ricavare dalla seguente formula:

$$M_r = \frac{\sigma_r \cdot s^2 \cdot w}{g \cdot braccio \cdot 6}$$

Per stimare la frequenza naturale $f_n = \frac{\omega_n}{2\pi}$, ovvero $f_n = \frac{\sqrt{\frac{k}{m}}}{2\pi}$, è necessario stimare il parametro k, per far ciò si è calcolata la freccia statica dovuta alla forza peso come segue.

Siano:

- s spessore del provino [mm]
- w larghezza del provino [mm]
- m massa [Kg]
- l distanza tra estremo vincolato e baricentro della massa [mm]
- g accelerazione di gravità [9,806 m/s²]
- E modulo di Young di una generica lega 6000

Per simulare l'incastro presente nello schema di una trave a sbalzo si utilizza un collegamento filettato fra provino e base d'alluminio, la forza peso $P = m \cdot g$ viene rappresentata con un unico vettore applicato nel baricentro.

È così possibile calcolare la freccia $f = \frac{P \cdot l^3}{3EI}$ [mm] pari alla traslazione verticale della massa, noto tale valore si può ora calcolare la rigidità del nostro modello a un grado di libertà come $k = \frac{P}{f} \cdot 1000$ [N/m]. Tale modello risulta valido se e solo se vi è un legame proporzionale fra spostamenti e tensioni, ovvero se si rimane in campo elastico al di sotto dello snervamento dove vale la legge di Hooke:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

Per verificare che il valore della tensione σ sia inferiore al valore della tensione di snervamento σ_y occorre calcolare il momento flettente generato dalla forza peso, pari a $M_f = P \cdot g \cdot l$ (dove con l si indica il braccio), e lo si divide per il modulo di resistenza flessionale $W = \frac{I}{y_{max}} = \frac{ws^3}{12s}$ con $y_{max} = \frac{s}{2}$ distanza massima dall'asse neutro.

Non essendo ancora previsti intagli si tiene conto di un fattore di concentrazione delle tensioni $K_t = 1$ per cui

$$\sigma = \sigma_{nom} \cdot K_t = \frac{M_f}{W} = \frac{6M_f}{ws^2} < \sigma_y$$

Con l'impiego di uno script come quello riportato in [Appendice A](#) è possibile valutare tutte le possibili combinazioni geometriche a partire dai vincoli imposti precedentemente. Dal database così ottenuto si selezionano i provini in grado di soddisfare al meglio le richieste del progettista.

Distanza a cui è posizionato il baricentro della massa dall'incastro [mm]	Valore della massa [kg]	Larghezza [mm]	Spessore [mm]	Freccia [mm]	Pulsazione naturale	Frequenza naturale [Hz]
85	0,18	15,00	2,00	0,52	136,74	21,76
180	0,26	15,00	2,00	7,20	36,92	5,88
75	0,28	15,00	2,00	0,56	132,28	21,05
170	0,30	15,00	2,00	7,00	37,45	5,96
80	0,30	20,00	2,00	0,55	133,95	21,32
180	0,34	20,00	2,00	7,06	37,28	5,93
75	0,36	20,00	2,00	0,54	134,71	21,44
180	0,36	20,00	2,00	7,47	36,23	5,77
170	0,40	20,00	2,00	7,00	37,45	5,96
115	0,12	25,00	2,00	0,52	137,39	21,87
180	0,42	25,00	2,00	6,98	37,50	5,97
75	0,44	25,00	2,00	0,53	136,23	21,68
180	0,44	25,00	2,00	7,31	36,64	5,83
75	0,46	25,00	2,00	0,55	133,24	21,21
175	0,46	25,00	2,00	7,02	37,38	5,95
180	0,46	25,00	2,00	7,64	35,83	5,70

Effettuata questa prima selezione, per convergere ad un unico provino si ricerca quello in grado di garantire una maggiore flessibilità in termini di Δf_n , senza variare la massa ausiliaria, ma solo attraverso un suo riposizionamento.

Il provino così selezionato, con le caratteristiche riportate in figura 4.8, è stato ottenuto lavorando barre di alluminio di dimensioni 2x25 mm e lunghe 2 m, in tabella non è riportato il valore pari esattamente a 11,7 Hz ciò è dovuto alle impostazioni dello script che calcola le possibili combinazioni geometriche considerando distanze baricentro-incastro a step di 5mm. La distanza voluta sarà comunque in un intorno di tali valori e verrà verificata sperimentalmente con maggior precisione una volta ottenuto il provino.

Dati relativi a un T4 6082										
Distanza massa-vincolo [mm]	Massa [Kg]	Larghezza [mm]	Spessore [mm]	Freccia [mm]	Pulsazione-nat	Frequenza-nat [Hz]	Acc max [g]	Tensione max [MPa]	Massa critica necessaria per una rottura statica [Kg]	Massa/Mcritica [%]
110	0,5	25	2	1,90	71,95	11,45	3	98,56	3,70	13,52
130	0,5	25	2	3,13	56,00	8,91	3	116,79	3,13	15,99
135	0,5	25	2	3,50	52,92	8,42	3	121,36	3,01	16,60
140	0,5	25	2	3,91	50,11	7,98	3	125,94	2,90	17,22
145	0,5	25	2	4,34	47,54	7,57	3	130,53	2,80	17,84

Fig. 4.8: Provino selezionato

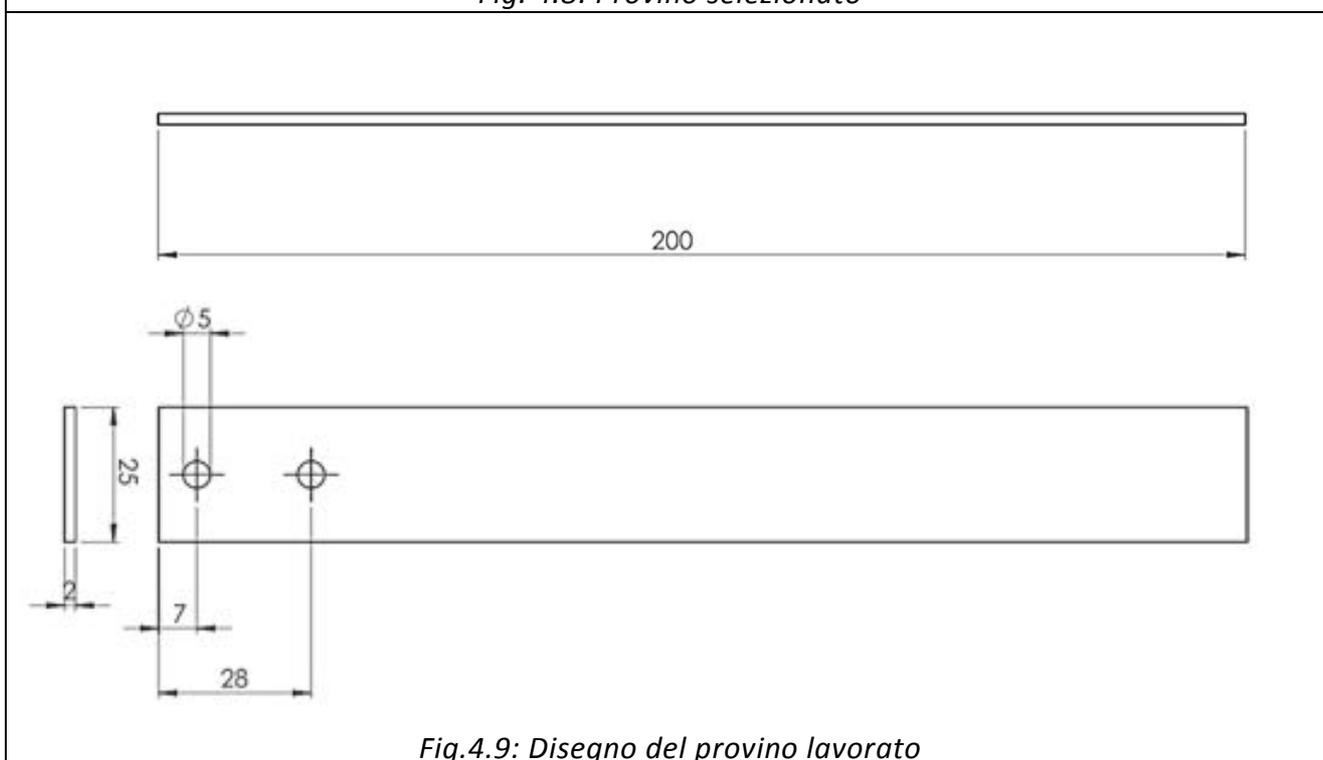


Fig.4.9: Disegno del provino lavorato

Verifica preliminare

L'effettiva vita a fatica del provino, sottoposto a carichi dinamici aleatori, è un parametro difficile da stimare in fase di progettazione. Il vincolo imposto sulla $M\%$ non è sufficientemente preciso per essere certi che il provino si romperà entro un numero di cicli conforme a quello che è richiesto per una rottura ad alto numero di cicli e che non superi il ginocchio della curva di Wohler oltre il quale si ha "vita infinita".

Esistono più modi per verificare che la robustezza del provino sia conforme con quanto richiesto dai test, in questo studio si è sottoposto il provino a profili vibratorii, con distribuzione dei picchi normale, le cui ordinate sono scalate del 40-80-100-200-350% rispetto al profilo originale (100%) avente un valore RMS pari a 0.55 m/s^2 .

Dalla verifica è emersa una robustezza eccessiva del provino, che anche dopo ore di test utilizzando profili aventi un valore $RMS=1,925g$ pari al 350% dell'originale, non riporta fratture.

Variazioni geometriche adottate

Per poter impiegare i profili originali ($RMS=0,55g$) e portare a rottura i campioni in tempi ragionevoli è necessario ridurre la resistenza del provino, la soluzione più semplice da adottare è ridurre la sezione critica del provino mantenendo invariato lo spessore e ridurre la larghezza da 25 a 10 mm attraverso due raccordi di raggio 7,5 mm (Figura 4.10).

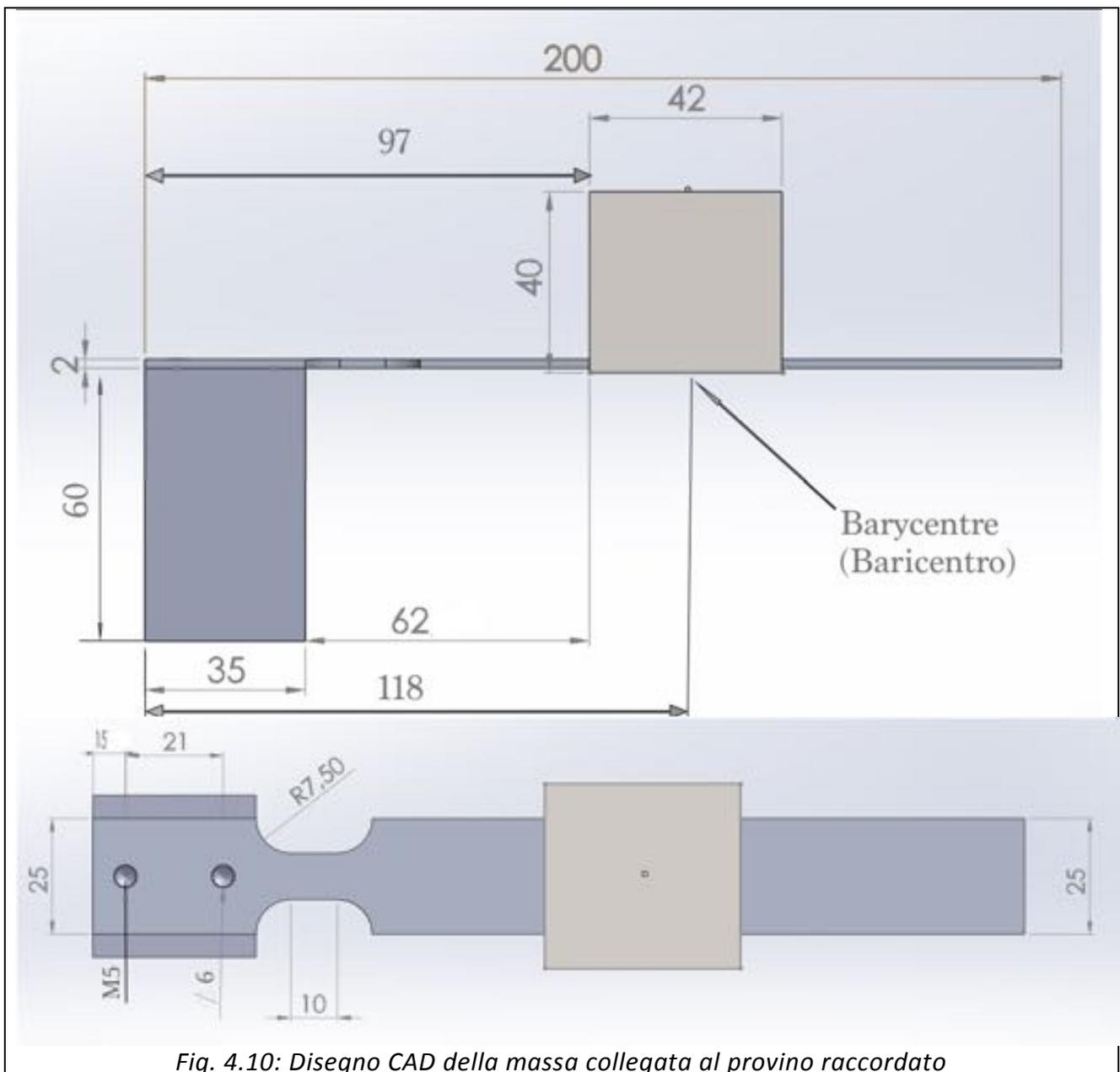


Fig. 4.10: Disegno CAD della massa collegata al provino raccordato

La riduzione di larghezza, ottenuta asportando materiale dal campione, comporta una diminuzione indesiderata della frequenza naturale in seguito a una significativa riduzione della rigidità del provino.

Per compensare tale effetto si interviene sulla posizione della massa ausiliaria, prendendo come riferimento la superficie della massa più vicina all'incastro, la distanza fra essa e l'incastro viene ridotta da 104 a 62 mm.

Questa operazione porta a una diminuzione del valore del momento flettente e della freccia statica ad esso associata, ottenendo nuovamente un valore della $f_n = 11,7 \text{ Hz}$ come richiesto dai vincoli progettuali.

La teoria non prevede l'introduzione di fattori di concentrazione delle tensioni K_t per discontinuità nel piano perpendicolare al piano d'azione del momento flettente. Tuttavia, dati gli effetti negativi che esso comporterebbe, sulla bontà dei test, è bene accertarsene attraverso un'analisi FEM.

Oltre alle modifiche citate la dimensione dei fori passanti, utilizzati per il collegamento filettato fra provino e base, è maggiorata di un millimetro passando da un diametro di 5 mm ad uno di 6 mantenendo inalterata la dimensione delle viti (M5). Così facendo si ha la possibilità di apportare comunque lievi modifiche (nell'ordine di qualche decimo di Hz) al valore della f_n , anche in seguito all'incollaggio della massa e dei sensori.

Analisi FEM

Analisi Statica

L'analisi FEM dall'inglese Finite Element Method è una tecnica numerica atta a cercare soluzioni approssimate di problemi descritti da equazioni differenziali alle derivate parziali riducendo quest'ultime a un sistema di equazioni algebriche.

Il software utilizzato è Ansys Workbench, esso offre varie tipologie di analisi (Figura 4.11) tra le quali l'utente può scegliere quella più idonea al problema studiato, nel nostro caso si sceglie un'analisi statica ("Static Structural") in quanto da essa è possibile ricavare la distribuzione di tensioni nel provino e quindi verificare la presenza di fattori K_t .

Utilizzando questa analisi è importante che la struttura sia isostatica o iperstatica, nel caso in cui sia labile è necessario che il carico non sia applicato secondo la direzione di labilità.

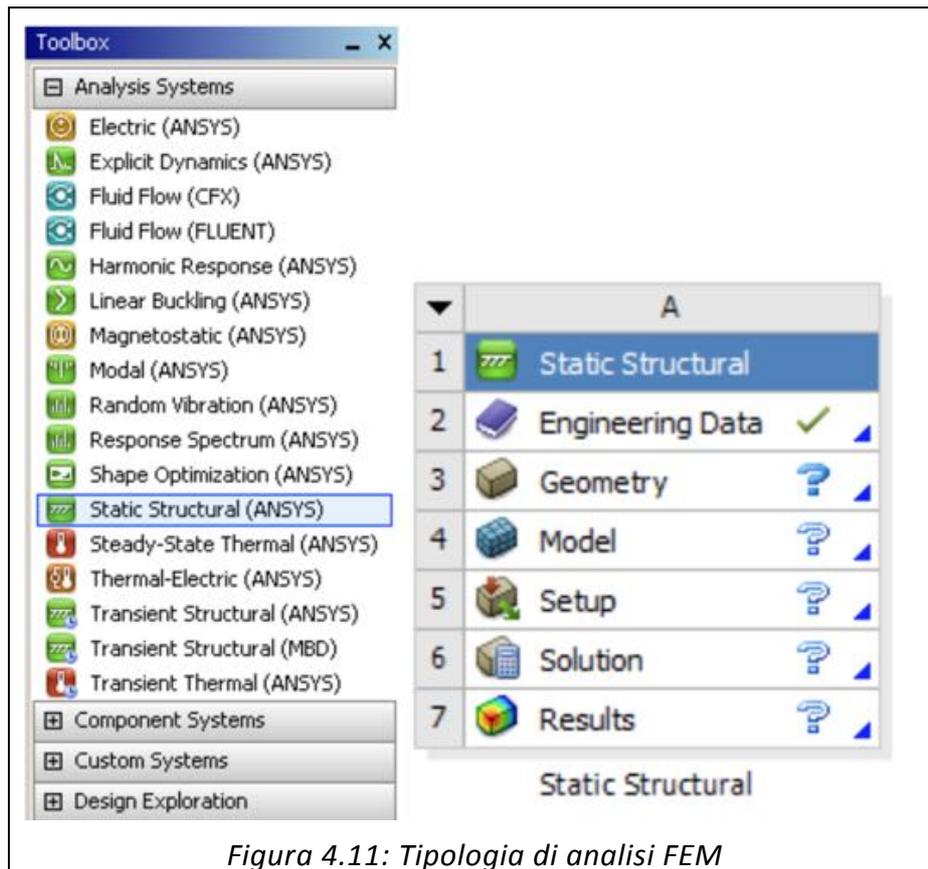


Figura 4.11: Tipologia di analisi FEM

Per svolgere correttamente l'analisi occorre prima di tutto definire i materiali che andranno a comporre il modello e le loro proprietà meccaniche. Il sistema studiato è formato da 3 corpi distinti (figura 4.10):

- Base in lega di alluminio le cui proprietà sono state prese da quelle già presenti in libreria.
- Provino in lega di alluminio, le cui proprietà sono state determinate attraverso le prove riportate nel capitolo VI ed inserite nella libreria del software.
- Massa in acciaio con proprietà già presenti in libreria.

Terminata questa operazione si passa alla determinazione della geometria del modello che idealizza la struttura reale.

Il modello CAD contenente la geometria del sistema è stato disegnato ed assemblato con l'impiego di SolidWorks il quale offre un'interfaccia di disegno CAD più "user friendly" rispetto ad Ansys Workbench. L'assieme così generato (riportato in Fig 4.10) per essere riconosciuto da Ansys è stato salvato con un'estensione specifica ".IGS" anziché ".SLDASM" utilizzato abitualmente da SW.

Implementata la geometria vanno specificate le condizioni al contorno (figura 4.12):

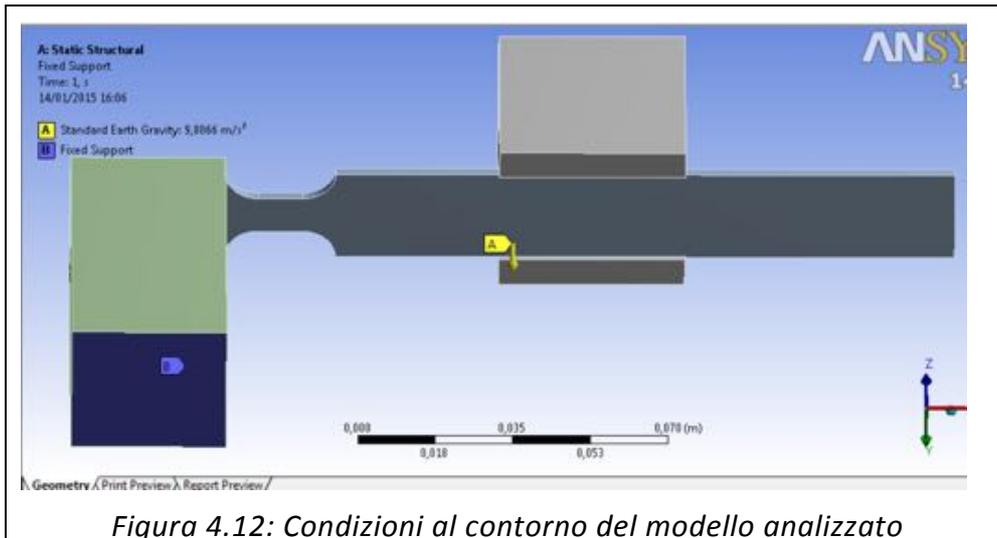


Figura 4.12: Condizioni al contorno del modello analizzato

1. Vincoli:

- a. Incastro tra base e superficie del provino a contatto con essa
- b. Incastro tra massa e provino
- c. Incastro (“Fixed displacement”) sulla superficie inferiore della base

2. Carichi: l’unico carico è quello della forza peso generata dalla definizione del campo gravitazionale in cui è immerso il sistema.

Terminata questa operazione viene definita la mesh, ovvero si crea una griglia che va a discretizzare il sistema dividendolo in più elementi.

Su ciascun elemento la soluzione del problema è assunta essere espressa dalla combinazione lineare di funzioni dette funzioni di forma.

La soluzione così ottenuta è approssimata, tanto maggiore è il numero di elementi in cui è diviso il dominio e tanto minore sarà l’errore dovuto a tale approssimazione.

Rispetto la mesh proposta dal software si è impostata una maggior risoluzione attraverso il comando di “Body Sizing”, adottando una dimensione dei quadrilateri pari a 2 mm (figura 4.13).

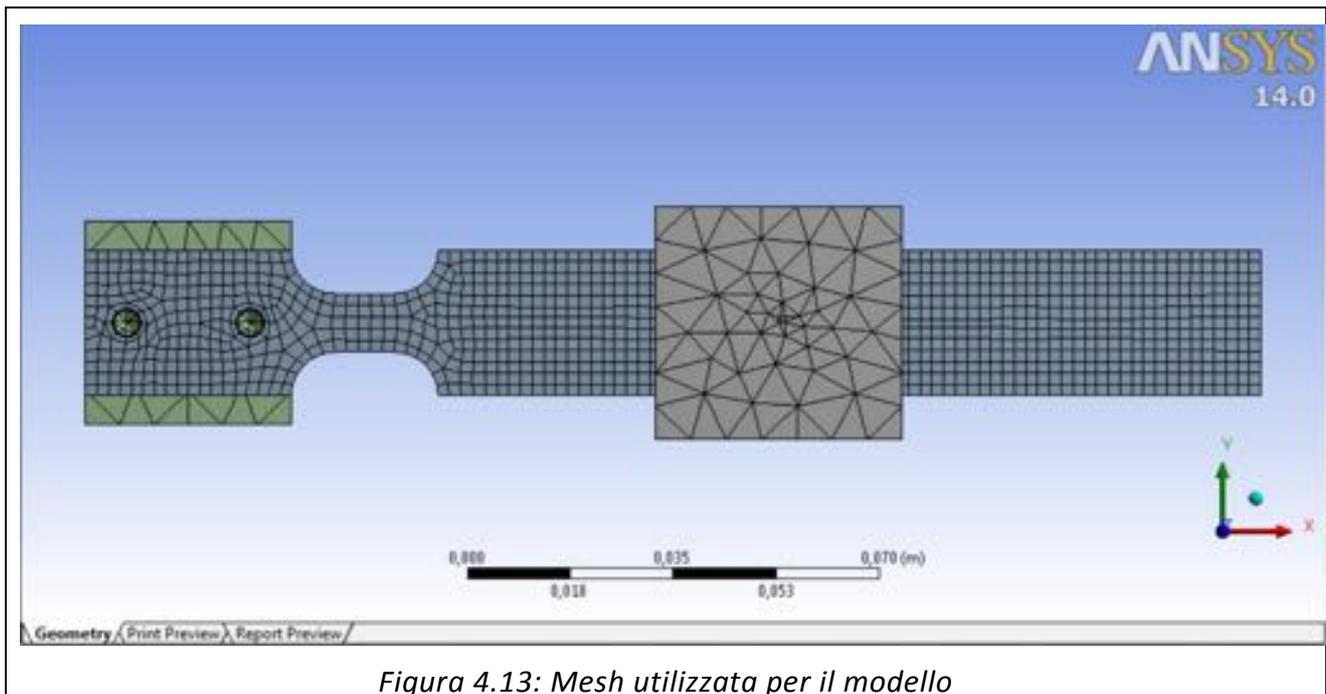


Figura 4.13: Mesh utilizzata per il modello

Effettuato quest'ultimo passaggio il solutore è pronto per essere lanciato e generare i risultati richiesti, nella figura seguente (4.14) è illustrato l'andamento delle tensioni principali calcolate secondo il criterio di Von Mises [1].

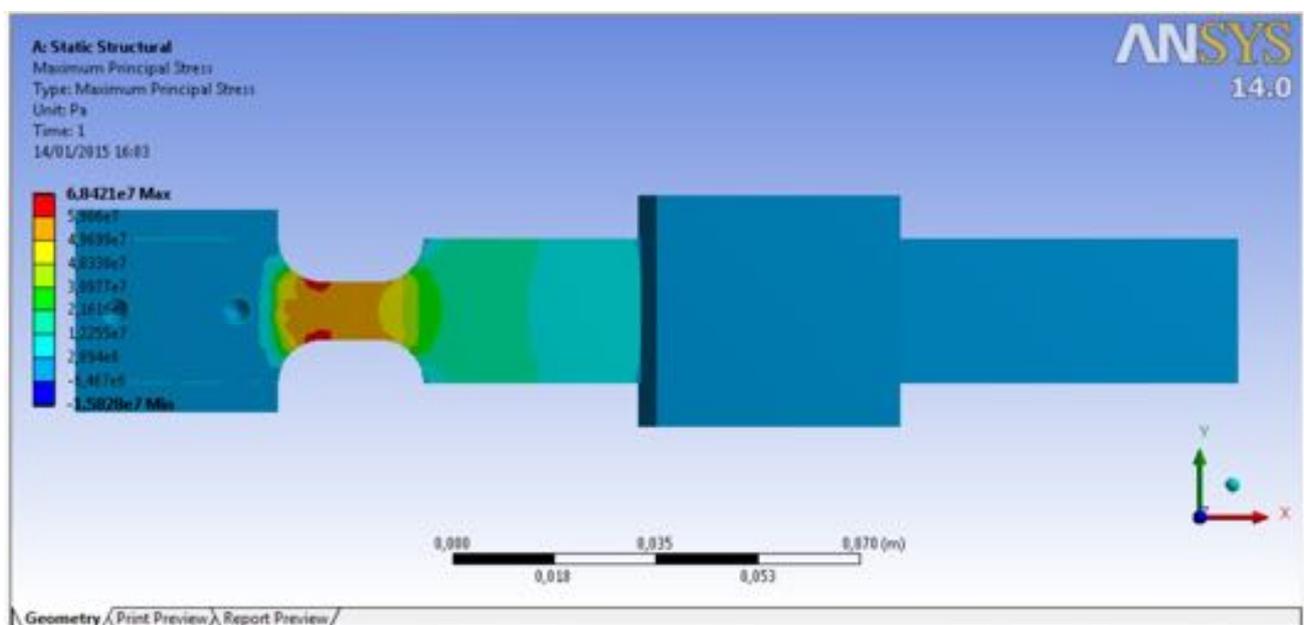


Figura 4.14: Andamento delle tensioni nel provino con raccordato

Dai risultati è visibile una concentrazione delle tensioni in corrispondenza del raccordo, tuttavia essendo di entità modesta è trascurabile e si può quindi assumere un valore del fattore di concentrazione delle tensioni $K_t=1$.

Analisi Modale

Il comportamento di un sistema meccanico in condizioni vibrazionali può essere efficacemente simulato, a partire dal calcolo delle frequenze proprie e dei modi propri di vibrare, tramite simulazioni di dinamica strutturale.

Il software utilizzato per l'analisi FEM permette di individuare sia le frequenze di risonanza che le forme modali ad esse associate.

Si possono così ricavare le forme modali e le frequenze dei modi che rientrano nell'intervallo di interesse pari a 5-45 Hz, così da poter conoscere la causa di eventuali picchi presenti nella PSD della risposta.

Dall'analisi è emerso che oltre al primo modo flessionale è presente anche il primo torsionale ad una frequenza di circa 35 Hz, tale valore ricade nell'intervallo di frequenze [5 Hz, 45 Hz] sul quale è definito l'input (figura 4.16).

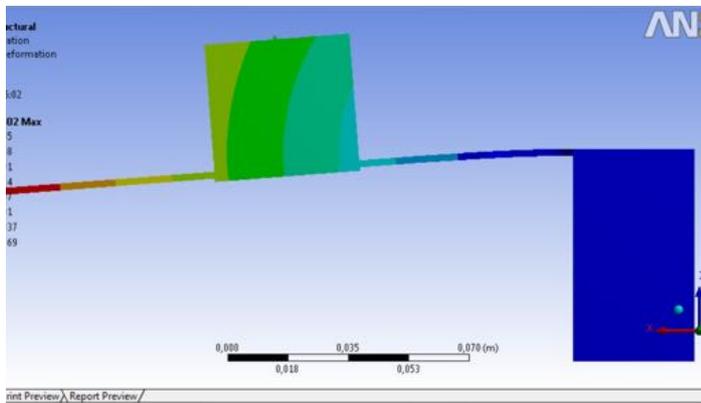


Fig 4.15: Primo modo di vibrare

	Mode	<input checked="" type="checkbox"/> Frequency [Hz]
1	1,	11,28
2	2,	34,878
3	3,	103,11
4	4,	110,11
5	5,	430,45
6	6,	1419,5

Fig 4.16 Modi di vibrare-Frequenze [Hz]

CAPITOLO V: SETUP SPERIMENTALE

Di seguito verrà descritto il setup sperimentale prevalentemente utilizzato durante lo svolgimento dei test.

Shaker

Lo shaker atto a replicare le vibrazioni definite dalla PSD in input è un Dongling ES-2-150/DA-2. Tale strumento viene settato e comandato con l'utilizzo del software LMS TestLab.

Vengono brevemente riportate le principali caratteristiche di tale strumento:



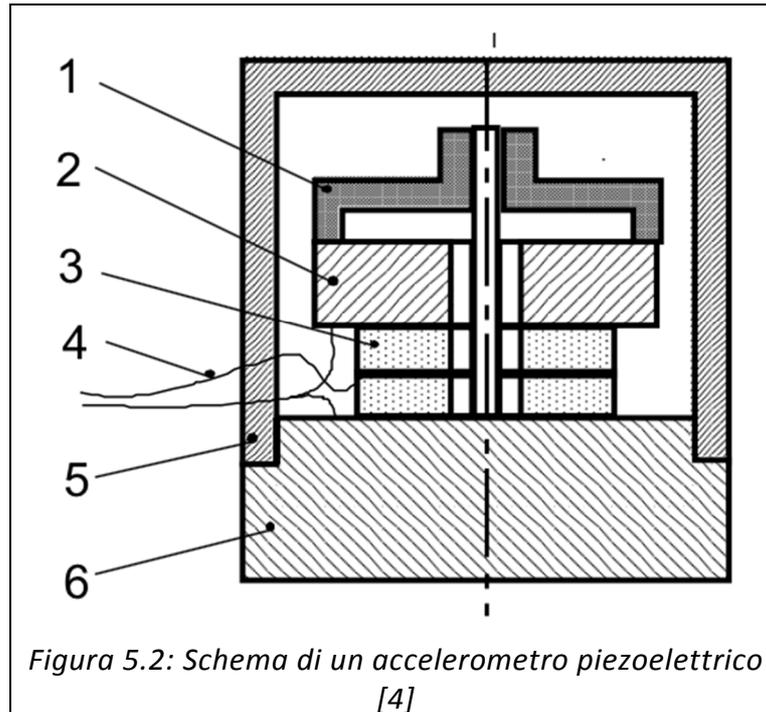
Figura 5.1: Shaker elettrodinamico[6]

Frequenza massima	4000 Hz
Frequenza di risonanza	3621 Hz
Massimo spostamento	12,5 mm
Massima velocità	200 cm/s
Massima accelerazione	100 g
Massa limite applicabile sull'armatura	70 Kg

Accelerometri

I sensori impiegati per misurare le accelerazioni sono trasduttori di vibrazione di tipo piezoelettrico, comunemente chiamati accelerometri. Questo genere di trasduttori converte variazioni grandezze meccaniche in variazioni di altre grandezze fisiche, nel nostro caso elettriche, producendo valori proporzionali alle quantità in ingresso.

Un trasduttore piezoelettrico a massa sismica come quello mostrato in figura:



È composto da sei elementi fondamentali:

1. la molla di precarico
2. la massa sismica
3. dischi piezoelettrici
4. terminali collegati alle superfici metalliche, tra le quali sono compressi i dischi, e alla lamina metallica intermedia
5. l'involucro
6. la base.

I trasduttori piezoelettrici sono strumenti sismici, ossia si basano sul moto relativo di una massa sospesa alla struttura vibrante mediante un elemento elastico, a seguito delle forze inerziali si ha una variazione della carica che è lineare.

L'accelerometro piezoelettrico è considerato, attualmente, il miglior trasduttore disponibile per la misura assoluta delle vibrazioni.

Il suo largo impiego è giustificato dalle seguenti proprietà:

- può essere usato in campi di frequenza molto ampi
- ha una buona linearità su un campo dinamico esteso
- il segnale di accelerazione può essere integrato elettronicamente per ottenere la velocità e lo spostamento
- può essere usato in varie condizioni ambientali mantenendo una buona accuratezza
- è un trasduttore attivo e quindi non necessita di alimentazione
- non ha parti in movimento e quindi è estremamente robusto
- ha un ingombro molto contenuto.

Posizionamento sul provino

Gli accelerometri utilizzati durante lo svolgimento dei test sono 3 (Figura 5.3):

- 1) Accelerometro sulla base CH17: esso misura le accelerazioni che lo shaker induce sulla base del provino e che costituiscono di fatto l'input.
- 2) Accelerometro sotto la massa CH18: incollato al di sotto della massa sul baricentro, misura la risposta del sistema.
- 3) Accelerometro triassiale: posto sulla sommità della massa, anch'esso in corrispondenza del baricentro della massa, viene utilizzato come verifica della risposta misurata dal canale 18 e per monitorare le accelerazioni longitudinali CH24 e trasversali CH22.

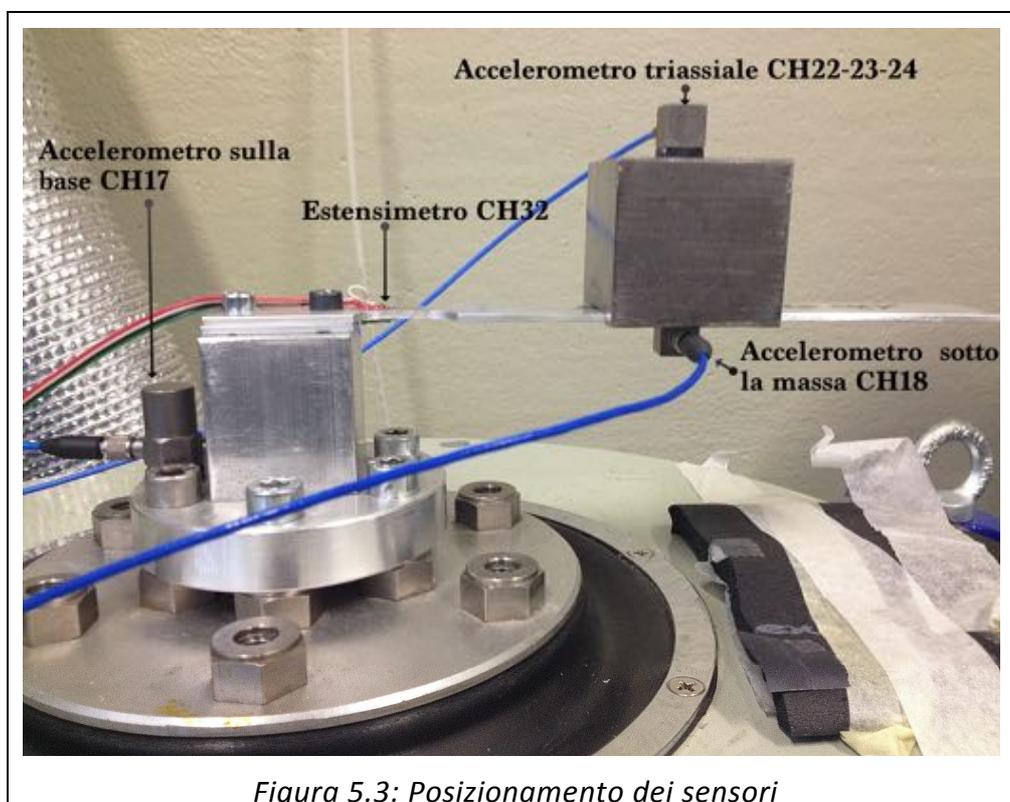
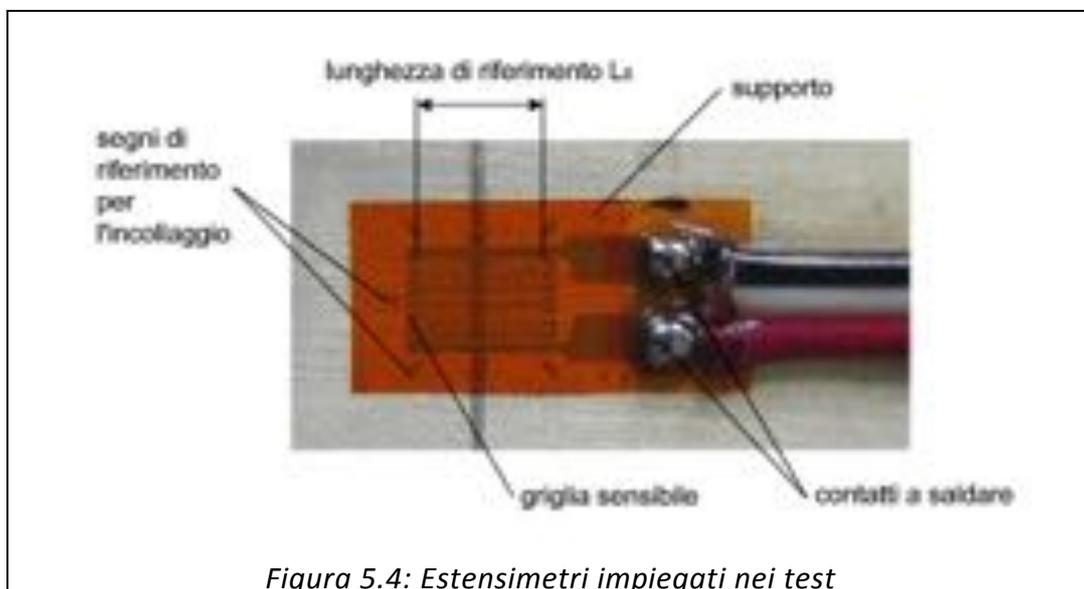


Figura 5.3: Posizionamento dei sensori

Nel layout iniziale era previsto anche un ulteriore accelerometro posto in prossimità del raccordo, tuttavia l'incollaggio di quest'ultimo comportava un incremento della rigidità del provino e quindi anche della f_n .

Estensimetri

Al fine di verificare che i valori di tensione dell'input leptocurtico si mantengano entro i limiti imposti dalle prove a fatica si sono strumentati due provini (Capitolo VIII) utilizzando degli estensimetri (figura 5.4) in prossimità del raccordo, come illustrato nella figura 5.3. L'estensimetro è uno strumento di misura delle deformazioni costituito da una griglia di sottilissimo filo metallico rigidamente applicata su di un supporto di materiale plastico. Esso viene utilizzato incollandolo sulla superficie del corpo di cui si vogliono misurare le deformazioni, allungandosi ed accorciandosi assieme ad essa. Queste deformazioni causano una variazione della resistenza elettrica del filo. Utilizzando una misurazione a "ponte di Wheatstone" o altre configurazioni è possibile risalire all'entità della deformazioni che le ha causate.



Sul metodo di calcolo delle tensioni a partire dal segnale acquisito e sulla particolare configurazione adottata per questi trasduttori si rimanda al capitolo VII.

Acquisitore

Per campionare il segnale si è utilizzato un acquisitore portatile LMS Scadas Mobile SCM05 come quello in figura 5.5 dotato di quattro schede d'acquisizione da 8 canali ciascuna. Ad esso confluiscono i segnali misurati dai 3 accelerometri (5 canali dato che uno di essi è triassiale) e quello dell'estensimetro.



Fig 5.5: Scadas Mobile SCM05

Tale strumento attraverso un cavo ethernet comunica col software LMS text.express installato su un PC dal quale è possibile salvare le acquisizioni e monitorare in real time la frequenza naturale del provino.

Nella tabella seguente vengono riportati i parametri più significativi impostati durante le acquisizioni.

Parametri d'acquisizione	Valori
Frequenza di campionamento	200 Hz
Trigger on CH17-Base	0,3 g
Trigger off CH17-Base	3 g

Layout generale

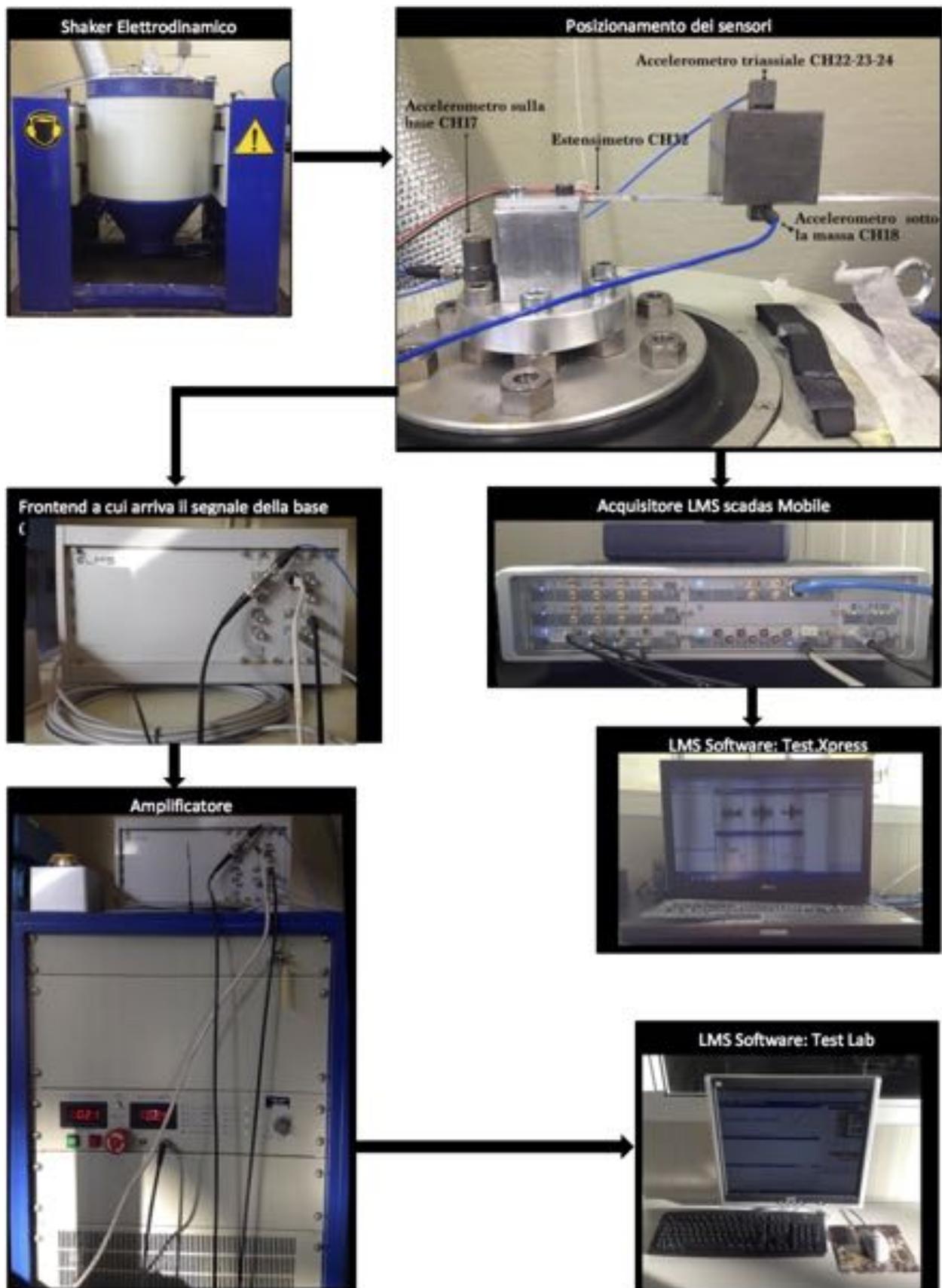


Figura 5.6: Layout Generale

CAPITOLO VI: DETERMINAZIONE DELLE PROPRIETA MECCANICHE DEL PROVINO

In questo capitolo vengono descritti i test utilizzati per caratterizzare la lega d'alluminio di cui sono composti i provini oggetto dello studio.

Prova di trazione monoassiale

Al fine di poter determinare il valore delle tensioni presenti sulla sezione critica del provino, è necessario conoscere i parametri meccanici che legano le deformazioni alle tensioni.

Dato un solido metallico il rapporto tra tensioni e deformazioni può essere:

- *Lineare* se la deformazione è direttamente proporzionale alla tensione applicata
- *Elastico* se le deformazioni si annullano al cessare delle tensioni applicate
- *Plastico* se si verificano deformazioni permanenti al cessare della tensione applicata

Il legame sforzi-deformazioni è generalmente caratterizzato attraverso prove di trazione che prevedono di sottoporre un provino, del materiale in esame, ad un carico F monoassiale, inizialmente nullo, che viene poi incrementato fino a un valore massimo che determina la rottura del materiale [1].

Da tale prova è possibile ricavare:

- σ_y = Tensione di snervamento
- σ_R = Tensione di rottura
- E = Modulo di Young

Lavorando il materiale alle macchine utensili si sono realizzati 5 provini con una forma ad "osso di cane" (Figura 6.2) atta a localizzare la cricca in un tratto "utile" (Figura 6.1) distante dagli afferraggi della macchina. Ciò è possibile riducendo la sezione del provino con dei raccordi, infatti se la sezione fosse uniforme la cricca si localizzerebbe in corrispondenza degli afferraggi a causa dello stato pluriassiale di tensione di trazione e compressione, contravvenendo alla proprietà di uniassialità che deve possedere la prova.

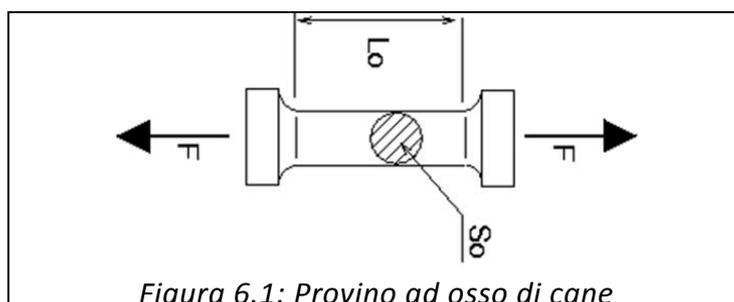


Figura 6.1: Provino ad osso di cane

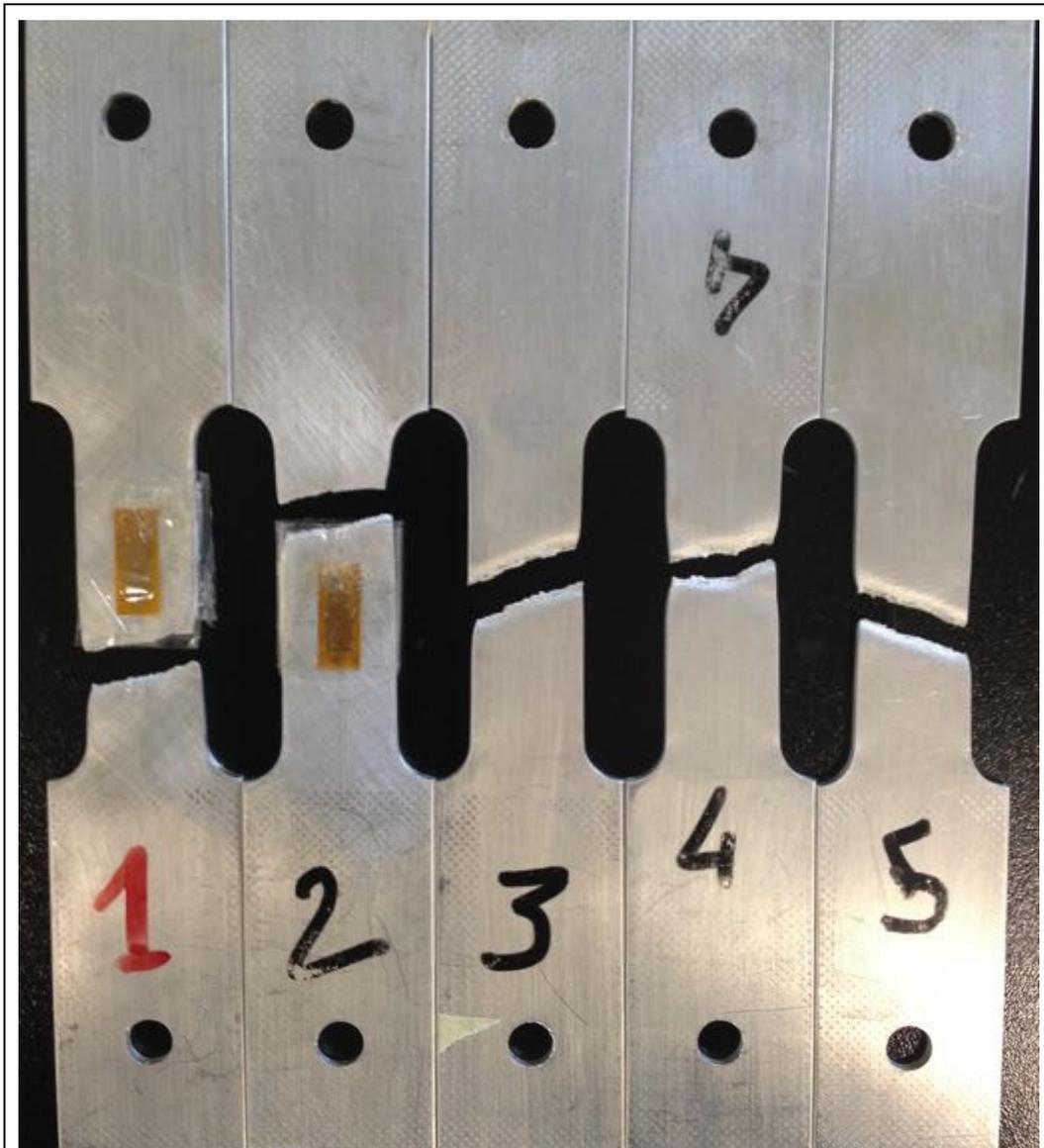


Figura 6.2:Provini ad "osso di cane" testati a trazione

I 5 provini, di cui due strumentati con estensimetri, sono collegati agli afferraggi della pressa riportata in figura 6.3 e schematizzata nell'immagine 6.4.

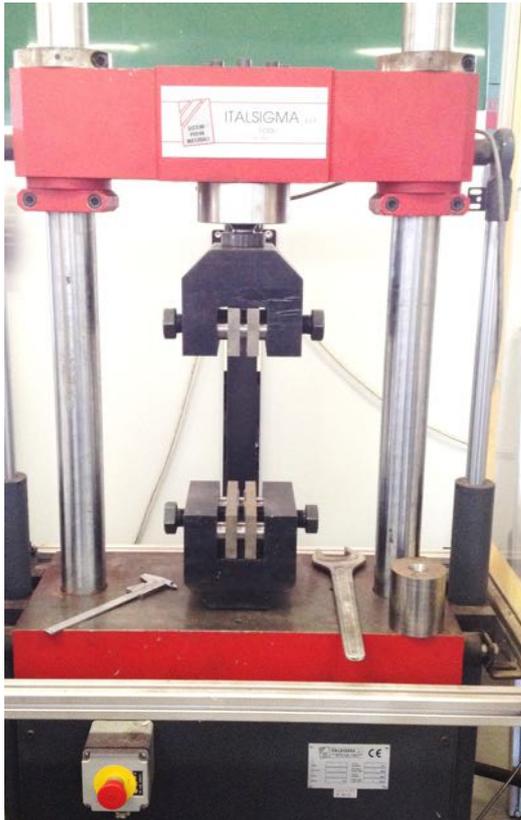


Figura 6.3: Pressa per test a trazione

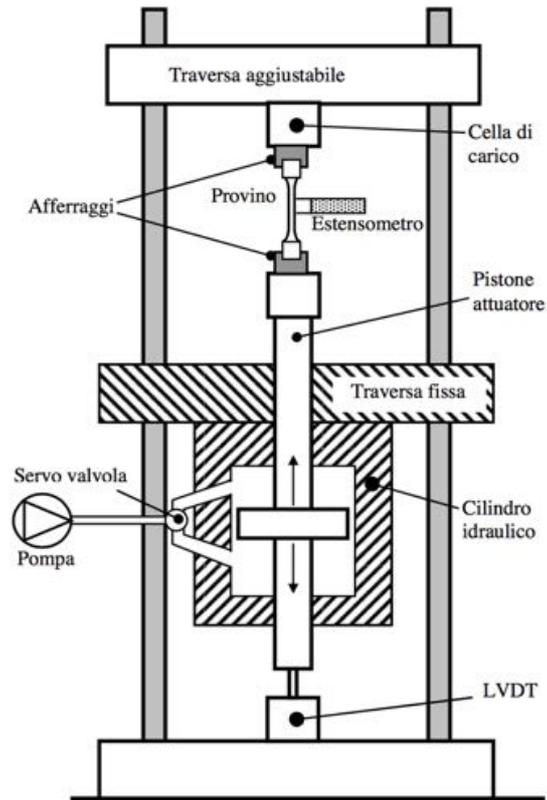


Figura 6.4: Schema semplificato della pressa

Durante la prova si misurano la forza applicata mediante un apposito trasduttore (cella di carico) e lo spostamento dell'elemento mobile (mediante un Linear Variable Differential Transformer). È possibile misurare l'allungamento mediante un estensometro o direttamente da un estensimetro.

I dati così misurati sono riportati su un diagramma tensioni-deformazioni nel quale le tensioni sono date da:

$$\sigma [MPa] = \frac{F [N]}{S_0 [mm^2]}$$

Dove S_0 è l'area iniziale della sezione del provino. Le deformazioni sono invece calcolate come rapporto tra l'allungamento totale e la lunghezza iniziale (grandezza adimensionale).

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0}$$

I dati acquisiti e salvati su file di testo (.txt) (figura 6.5) vengono analizzati utilizzando gli script implementati in Matlab e riportato nell'[Appendice B](#); per ricavare il valore dello snervamento, non visibile sul grafico $\sigma - \varepsilon$, si utilizza il metodo convenzionale per gli allumini e altri materiali duttili. Esso prevede che il valore σ_y si ricavi dall'intersezione fra la curva $\sigma - \varepsilon$ (blu) e una retta fittizia(verde) parallela al tratto rettilineo elastico(rosso) e scostato di 0,2% della deformazione totale (figura 6.6).

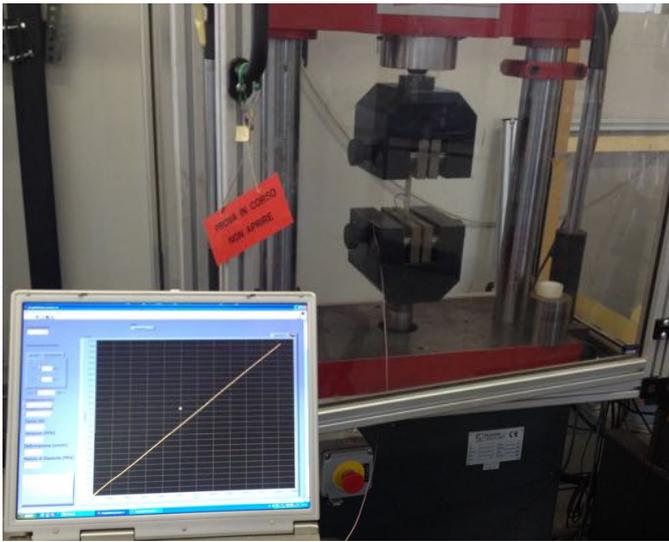


Figura 6.5: Svolgimento prova ed acquisizione dei dati

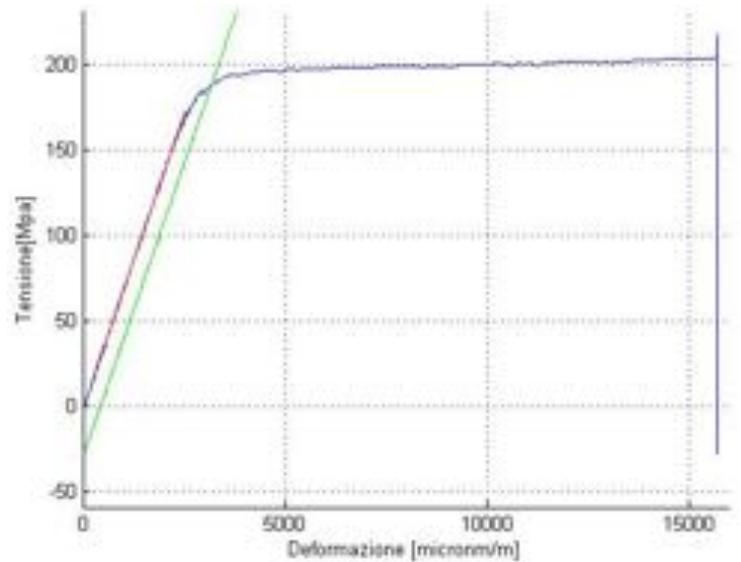


Figura 6.6: Plot risultati del test a trazione

Si utilizzano provini strumentati con estensimetri poiché i valori di deformazione determinati dalla cella di carico sono meno affidabili e precisi, per tale motivo si utilizzeranno questi due provini per ricavare i valori del modulo di Young (“E”) e della tensione di snervamento (“ σ_y ”).

Tuttavia non è possibile utilizzare questi dati per ricavare il valore di tensione a rottura poiché le elevate deformazioni superiori a 15000-14000 $\frac{\mu m}{m}$ comportano un valore di tensione superiore al limite di 10 Volt caratteristico degli estensimetri impiegati.

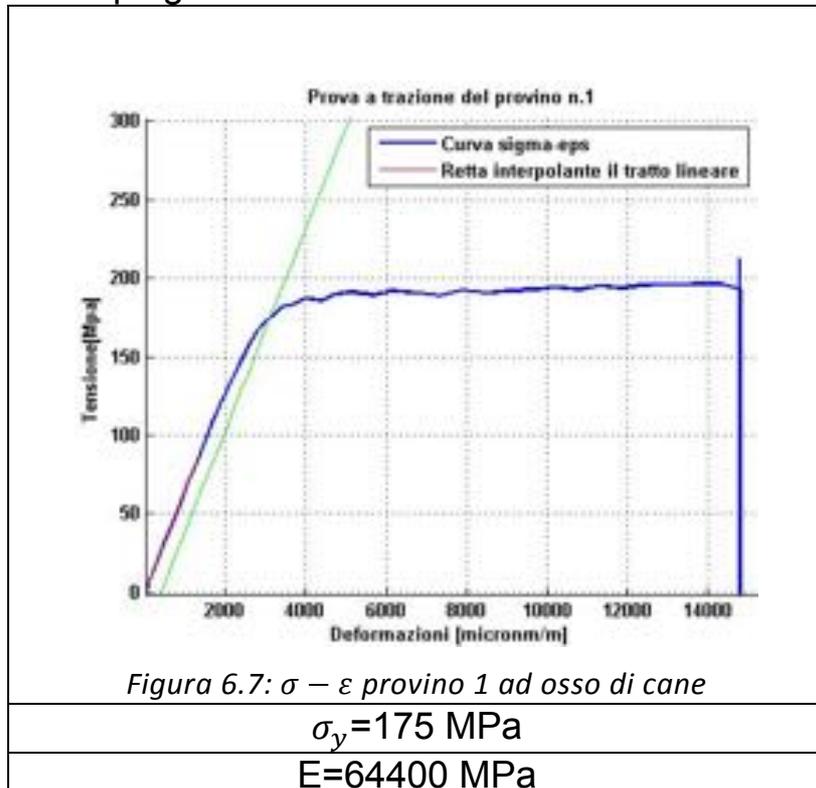
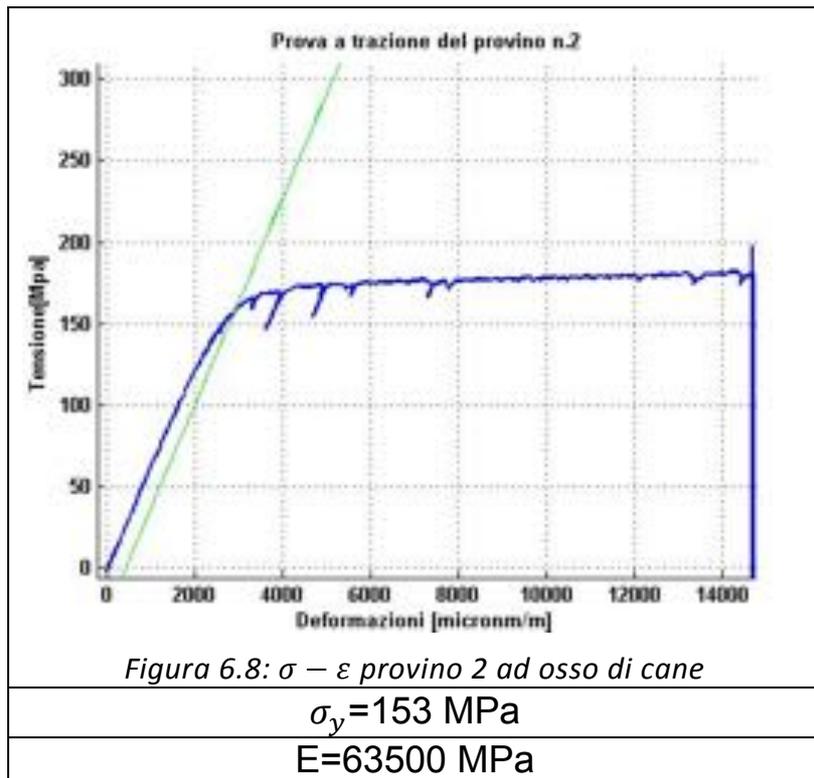
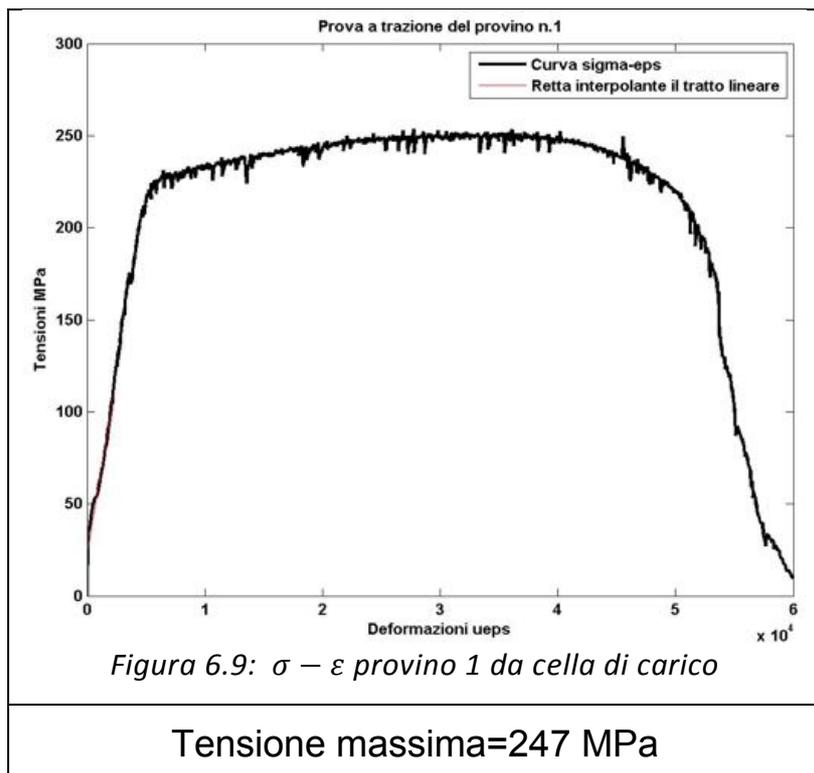


Figura 6.7: $\sigma - \epsilon$ provino 1 ad osso di cane



Per poter determinare il valore di tensione a rottura si utilizzano i dati ricavati dalla cella di carico durante i test di tutti e 5 i provini compresi i due strumentati. Le curve riportate vengono ottenute dividendo il valore della forza applicata alle estremità del provino e dividendolo per la sezione resistente iniziale S_0 ($2 \times 15 \text{ mm}^2$). Di seguito vengono riportati i dati così ricavati.



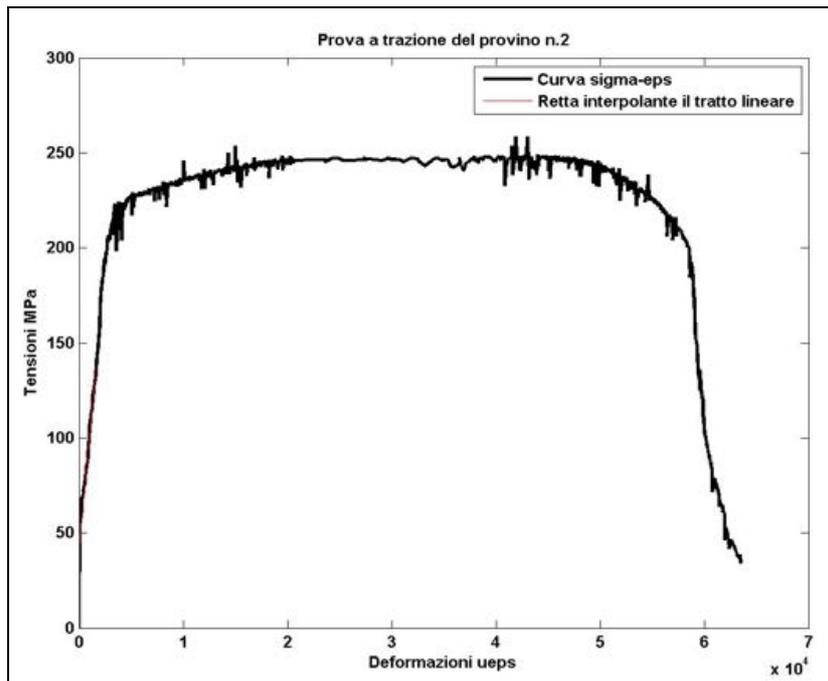


Figura 6.10: $\sigma - \varepsilon$ provino 2 da cella di carico

Tensione massima=247 MPa

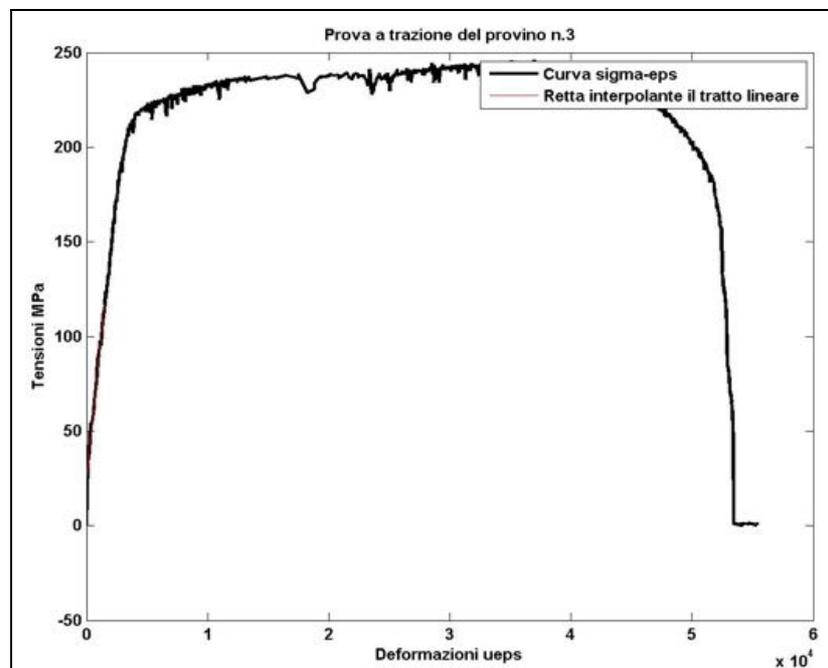
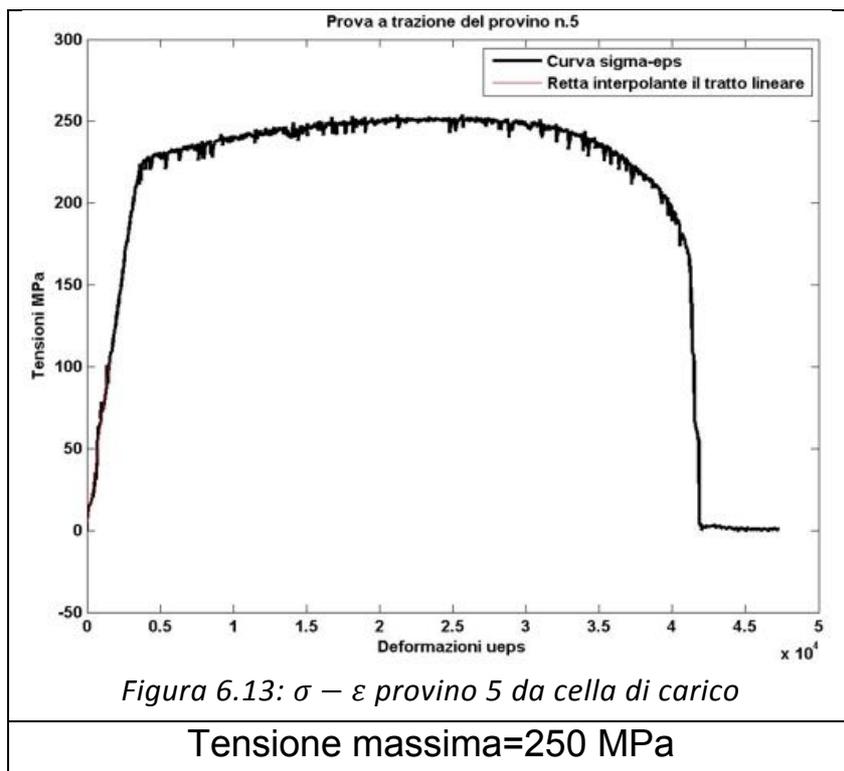
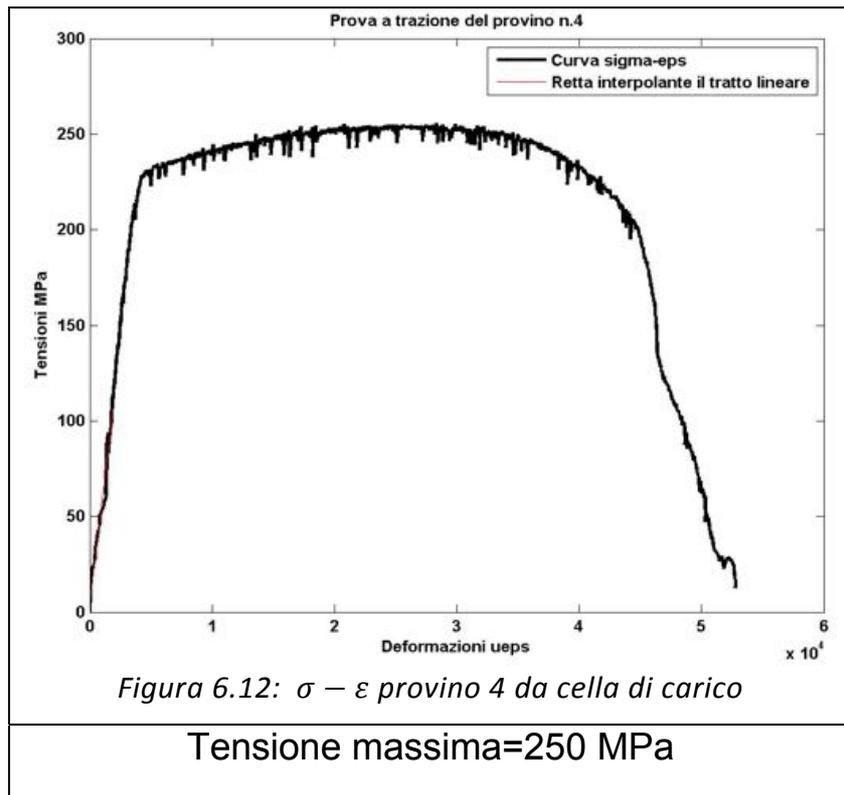


Figura 6.11: $\sigma - \varepsilon$ provino 3 da cella di carico

Tensione massima=242 MPa



Osservando tutti i dati ricavati da questa analisi unitamente all'esperienza e al buon senso sono stati scelti i seguenti valori dei parametri:

- Modulo di Young $E = 64400 \text{ MPa}$
- Tensione di snervamento $\sigma_y = 175 \text{ MPa}$
- Tensione di rottura $\sigma_r = 245 \text{ MPa}$

DETERMINAZIONE DELLA CURVA DI WOHLER

Introduzione

Oltre ai parametri precedentemente ricavati è di fondamentale importanza determinare i parametri meccanici a fatica della lega d'alluminio utilizzata. Questa necessità è dovuta alla formulazione analitica della FDS (capitolo III) nella quale compaiono i parametri b e C relativi all'equazione di Basquin e caratterizzanti la curva di Wohler.

$$FDS = \frac{K^b}{C} \sum_i n_i (z_i)^b$$

Ma cosa rappresenta la curva di Wöhler?

L'ingegnere tedesco Wöhler, a conclusione di estese campagne di prove per individuare la causa delle rotture di assali ferroviari, ricavò conclusioni di natura empirica che ancora oggi vengono impiegate per descrivere la riduzione della resistenza rispetto alla resistenza statica, nel caso di sollecitazioni variabili nel tempo.

La curva di Wöhler fu il primo strumento formale a disposizione dei progettisti per il dimensionamento a fatica dei componenti ed è tutt'oggi di fondamentale importanza.

Determinazione classica

La sua determinazione avviene ricostruendo in laboratorio un determinato ciclo di sollecitazione formato da una tensione media (σ_m) nulla ed una alternata ($\Delta\sigma=2\sigma_a$) (Figura 6.14).

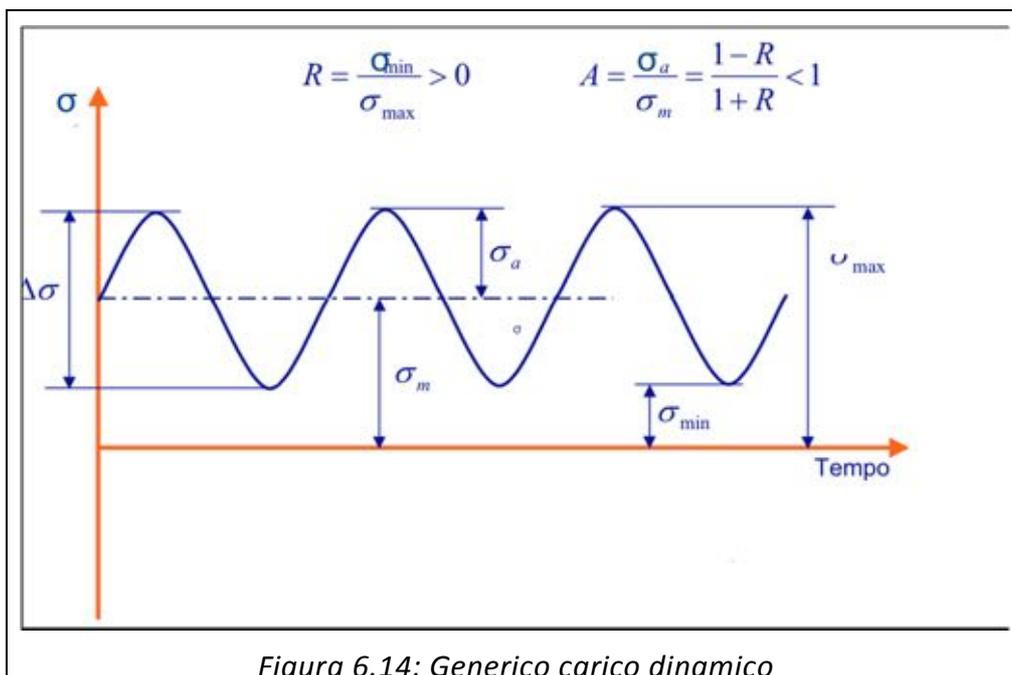


Figura 6.14: Generico carico dinamico

Il carico viene applicato ad un elevato numero di provini, annotando il numero di cicli che essi sopportano prima della rottura (Figura 6.15).

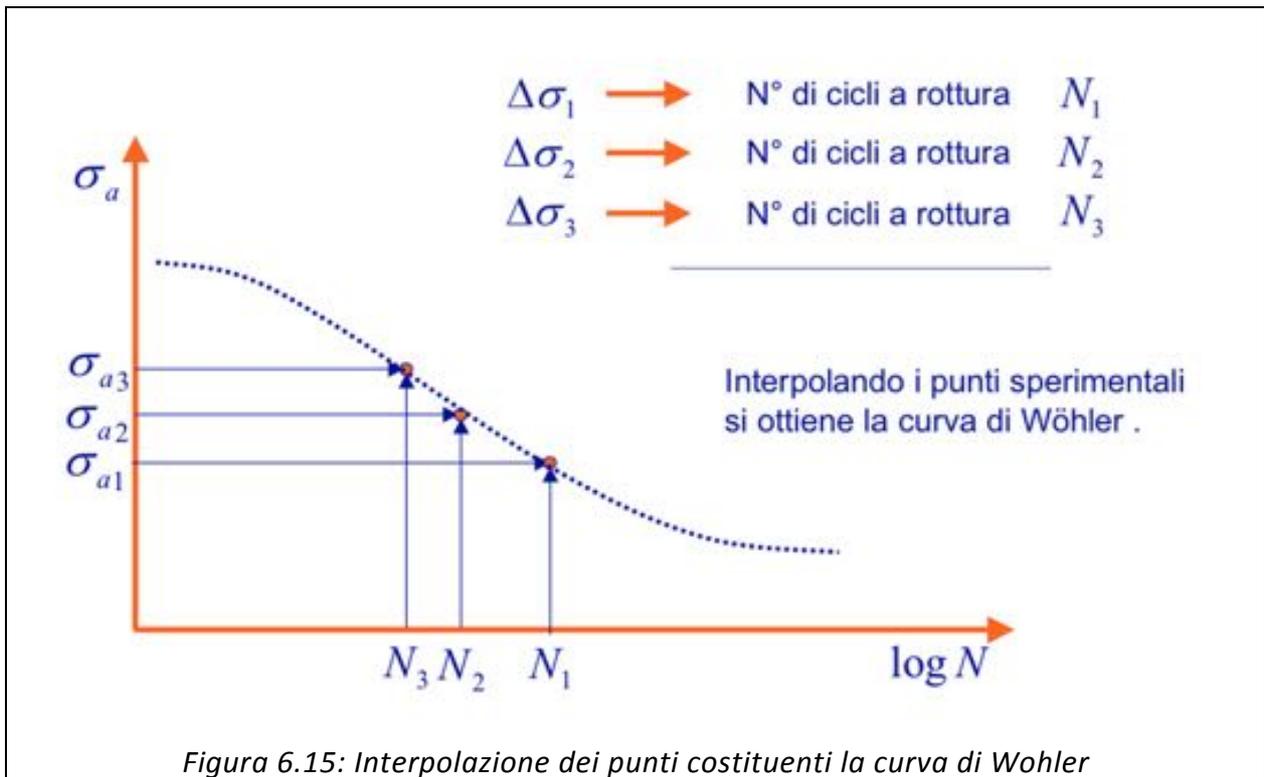


Figura 6.15: Interpolazione dei punti costituenti la curva di Wohler

Tali sollecitazioni vengono riprodotte con macchinari simili a quello in figura 6.17 e schematizzato nella 6.16 dove è illustrata una generica macchina a flessione rotante.

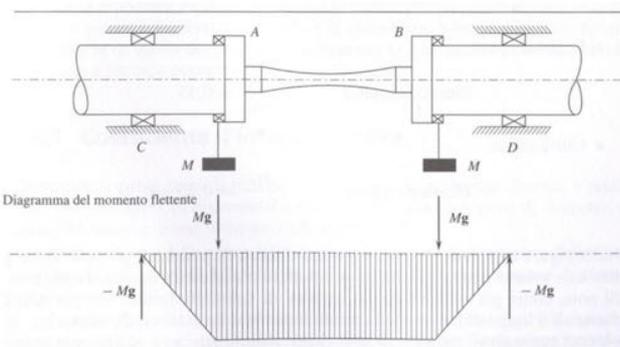


Figura 6.16: Schema macchina flessione rotante

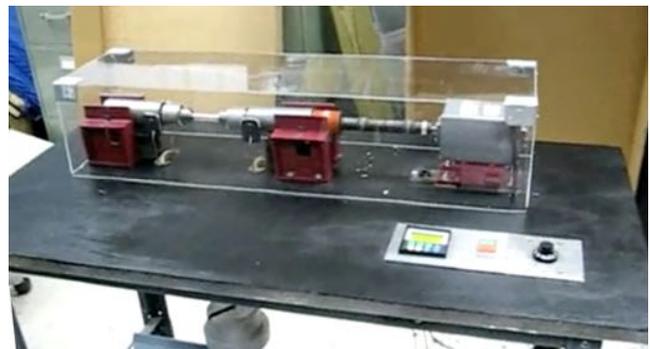


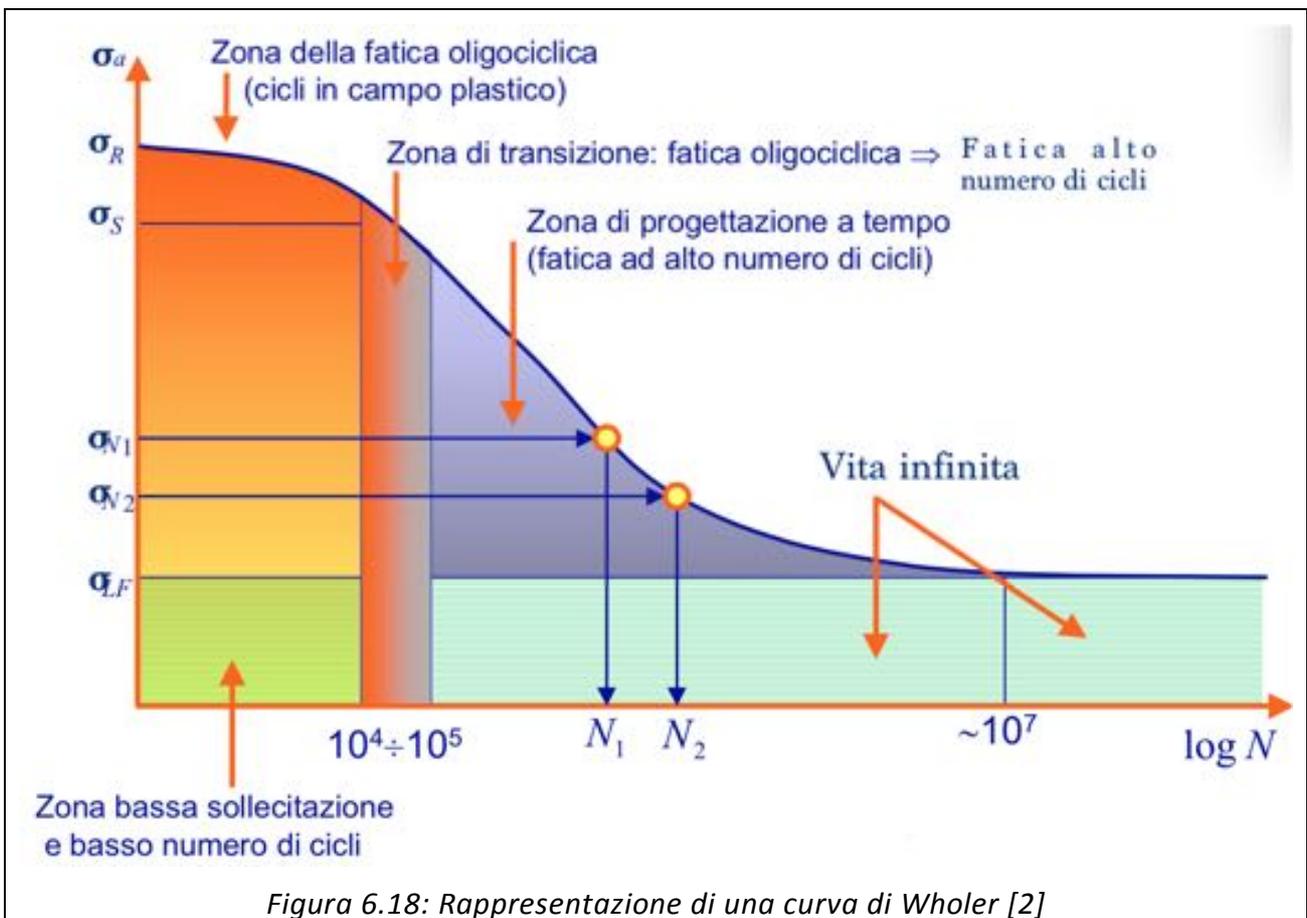
Figura 6.17: Immagine reale di una macchina per test a "flessione rotante"

Fatalmente i provini, pur sottoposti allo stesso carico, non si rompono tutti dopo lo stesso numero di cicli, si avrà una dispersione dei risultati dovuta a differenze microscopiche dei vari provini. L'esperienza dimostra che tale dispersione avviene secondo una distribuzione normale (Gaussiana).

Successivamente si ripete la stessa serie di esperimenti a diversi valori della sigma alternata (componente alternata del ciclo di sforzo), e si annota per ogni distribuzione che si ottiene il valore medio del numero di cicli prima della rottura.

Congiungendo tutti i valori medi ad ogni σ_a si ha la curva di Wöhler al 50% di probabilità di rottura. Questo significa che riguardo ai provini testati, esiste una probabilità del 50% che essi, sottoposti ad un ciclo di carico di ampiezza σ_a , si rompano prima di raggiungere il numero di cicli delimitato dalla curva di Wöhler; ciò deriva semplicemente dalle proprietà della distribuzione normale. Naturalmente, si possono costruire curve al 20%, al 10% o a qualsivoglia probabilità, congiungendo anziché i punti dei valori medi quelli che corrispondono a tale valore di probabilità.

Dato l'alto numero di cicli che si raggiunge si è soliti riportare tale diagramma in scala logaritmica, in questo modo si può semplificare il diagramma dal punto di vista grafico e matematico (Figura 6.18).



Ad ogni ciclo corrispondono due picchi di tensione di segno opposto, per tale motivo la curva non interseca l'asse delle ordinate, pari a $N = \frac{1}{2}$ in coordinate doppio logaritmiche, cioè per mezzo ciclo di carico si ha un valore infinito della resistenza a fatica fatale per il materiale.

Successivamente si mantiene costante per $N =]\frac{1}{2}, 1000]$, zona a rottura quasi statica, per poi decrescere piuttosto velocemente tra $N=10^3$ e $N=10^6$ (per gli acciai).

In questo range si ha che la curva risponde all'equazione di Basquin:

$$N\sigma^b = C \quad \text{Equazione di Basquin}$$

ed è rappresentata da una retta in coordinate doppio logaritmiche. Questo tratto è a sua volta diviso in due regioni, dette LCF (Low-Cycle Fatigue, fatica a basso numero di cicli) e HCF (High-Cycle Fatigue, fatica ad alto numero di cicli) come illustrato nella figura precedente. La prima è compresa tra $N=10^3$ e valori di sigma superiori al carico di snervamento, questa intensità delle sollecitazioni genera plasticizzazioni macroscopiche e di conseguenza la vita del materiale è assai ridotta; la seconda per valori di sigma inferiori allo snervamento è caratterizzata da plasticizzazioni cicliche a livello microscopico.

Infine per valori superiori a $N=10^6$ per gli acciai e $N=5 \cdot 10^8$ per gli alluminio si ha un "ginocchio" che individua la zona a vita infinita, dove i valori di tensione sono talmente bassi che idealmente non portano mai a rottura il pezzo.

Test a fatica accelerati

Introduzione

Le normali procedure con le quali vengono ricavati i parametri a fatica di un materiale necessitano di lunghi periodi di test. Per ovviare a tale inconveniente recentemente sono state sviluppate procedure accelerate in grado di stimare la curva a fatica del materiale attraverso l'utilizzo di shaker che replicano profili vibratorii sia sinusoidali che random [7]. In uno studio pubblicato nel giugno del 2012 su provini in alluminio [8] il valore di 10^6 cicli era raggiunto in appena 21 minuti. Tali test come vedremo, risultano tanto più rapidi quanto maggiore è l'average frequency [5], un parametro influenzato dalla frequenza naturale del sistema la cui definizione analitica verrà data in seguito.

Definizione dell'input

Utilizzando profili vibratorii in "random control" la definizione dell'input avviene attraverso PSD piatte a diversi valori di RMS che definiscono il range di frequenze sollecitate e l'intensità dei picchi di accelerazione i quali hanno una distribuzione normale di probabilità.

L'accelerazione della base dello shaker può quindi essere trattata come una variabile casuale non periodica e per questo motivo non è rappresentabile mediante serie di Fourier.

Tale inconveniente viene superato calcolando la trasformata di Fourier della funzione di autocorrelazione $R_{xx}(\tau)$ contenente tutte le informazioni sulle frequenze presenti nel segnale. La funzione autocorrelazione di un segnale $x(t)$ è definita come:

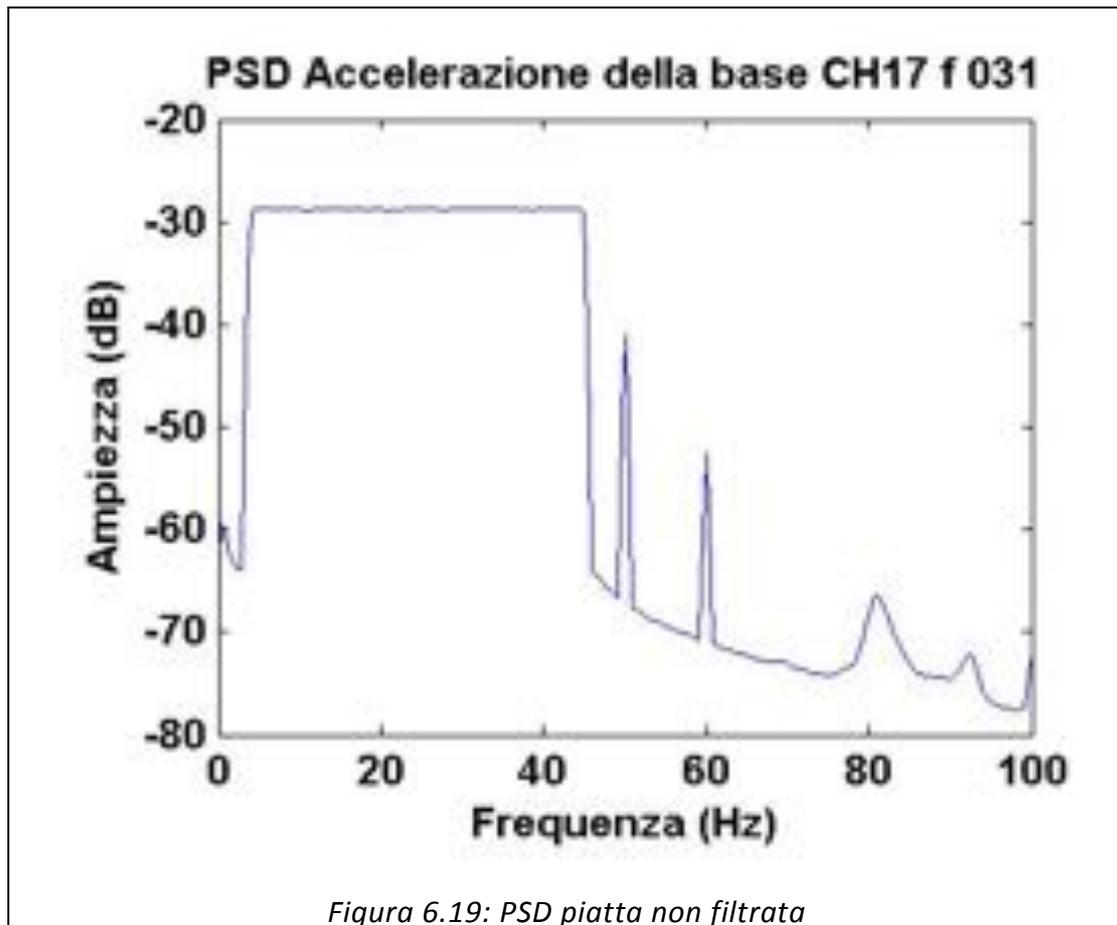
$$R_{xx}(\tau) = \frac{1}{T} \int x(t)x(t + \tau) dt$$

Pari quindi alla media integrale del prodotto $x(t)x(t + \tau)$, applicando poi alla $R_{xx}(\tau)$ la trasformata diretta di Fourier:

$$S_{xx}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_{xx}(\tau) \cdot e^{-j\omega\tau} dt$$

Si ricava la PSD del segnale $x(t)$.

Le PSD sono definite in un intervallo di frequenze pari a [5,45 Hz], così facendo si evita che i picchi presenti nella PSD per valori di frequenza pari a 50 e 60 HZ, dovuti alla frequenza di rete, rientrino nella banda di interesse e possano quindi essere filtrati successivamente senza commettere errori (figura 6.19).



L'intensità delle sollecitazioni è definita imponendo prefissati valori dell'**RMS**. Questi valori sono stati scelti attraverso l'esperienza maturata svolgendo test preliminari sui provini, e confrontandoli con quanto fatto in altri studi [7]. I 5 livelli così selezionati sono riportati in tabella, per ognuno di essi si sono portati a rottura 3 provini per un totale di 15 provini.

Nome identificativo dei provini	Valore RMS
f22-23-24	0,20 g
f31-32-33	0,23 g
f41-42-43	0,17 g
f51-52-53	0,25 g
f61-62-63	0,15 g

Elaborazione dei dati

Utilizzando il setup riportato nel [CAPITOLO V](#), i segnali misurati dagli accelerometri sono acquisiti a una frequenza di campionamento pari a 200 Hz.

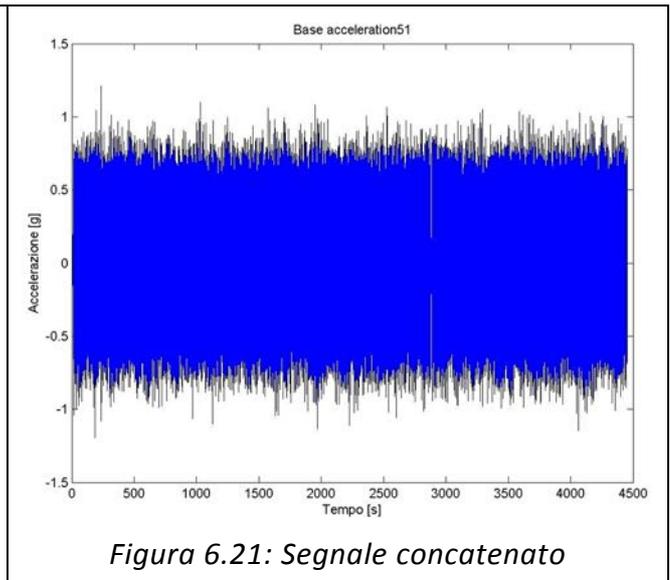
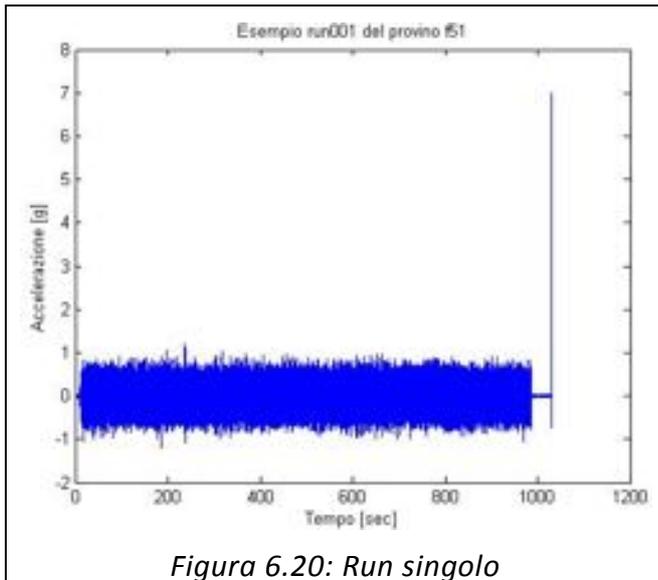
I file così generati sono convertiti ed esportati in file “.mat” processabili con l’impiego del software MATLAB® attraverso gli script riportati in [Appendice C](#) in grado di ricavare:

- Variazione della frequenza naturale nel tempo $f_n(t)$
- Variazione del fattore di smorzamento nel tempo $\zeta(t)$
- Vita a fatica (“Time to failure”)
- Frequenza media (“Average Frequency”)
- Numero di cicli a rottura
- Spostamento e accelerazioni relative fra baricentro della massa e base.
- Valore RMS della risposta intesa come accelerazione relativa (\ddot{z})
- Valore di tensione calcolati
- Costanti dell’equazione di Basquin.
- Parametri statistici dei segnali

Concatenamento dei run

Per ragioni computazionali la storia di carico è frazionata in più parti (denominate “run”) della durata di mezz’ora ciascuna, ottenendo così più file di dimensione contenuta (figura 6.20). Prima di svolgere l’analisi dei segnali essi vanno concatenati costruendo dei vettori contenenti l’intera storia di carico. In concomitanza a tale operazione si ripulisce il segnale da picchi dovuti a rumore elettrico (Figura 6.21).

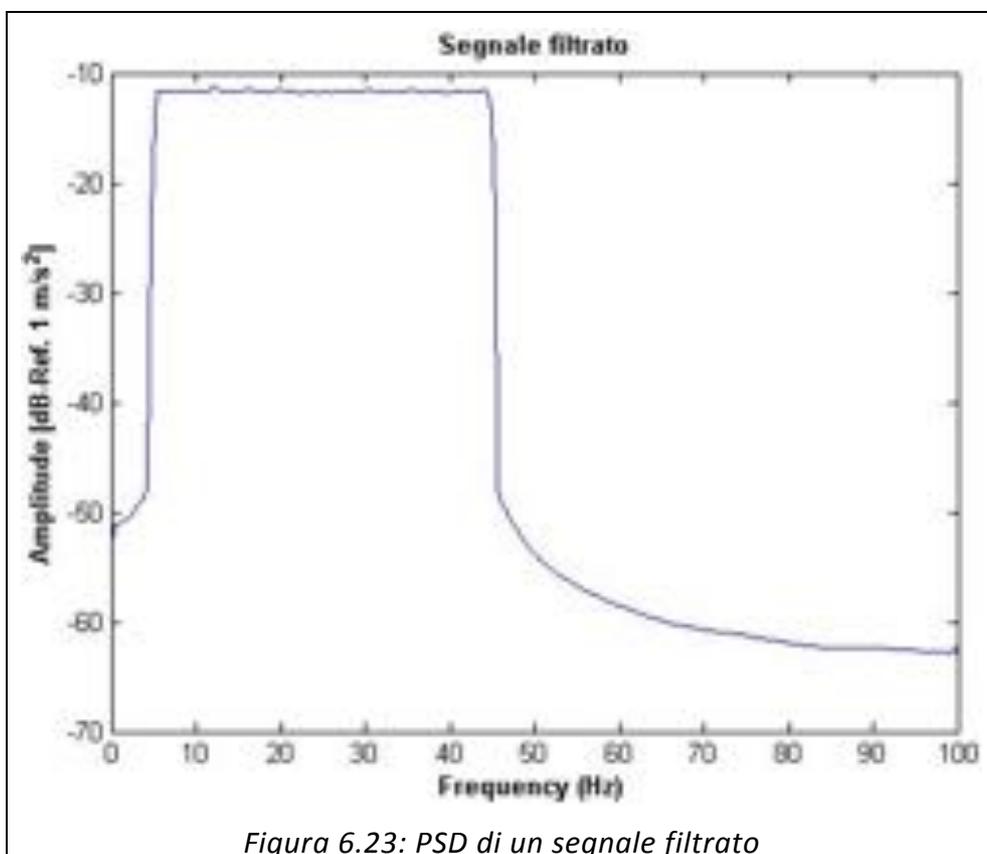
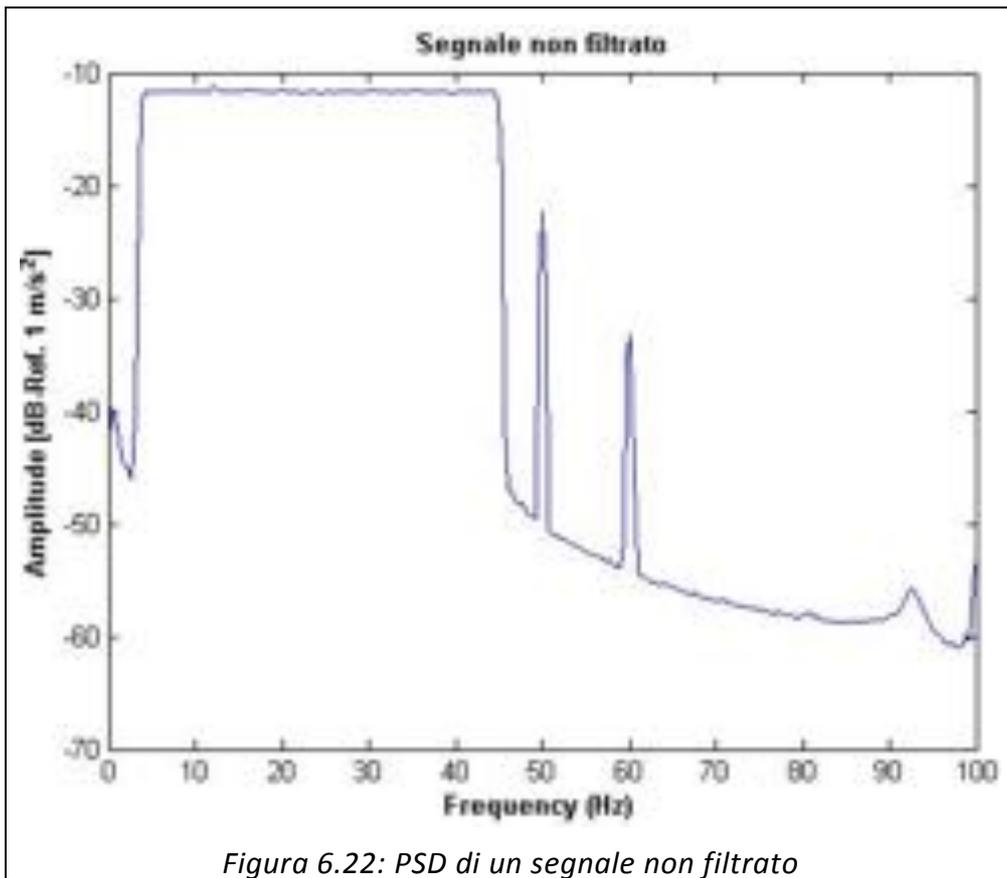
Per correttezza le celle gli stessi indici vengono eliminate da tutti i segnali acquisiti nei sei canali così che essi abbiano ugual dimensione, questa operazione è possibile in quanto la frequenza di campionamento è pari a 200 Hz per tutti i canali.



Filtro passa banda

Una volta terminato il concatenamento i segnali sono elaborati da un filtro passa banda che permette il passaggio delle sole frequenze dell'intervallo di [5,45] Hz.

Grazie a tale intervento è possibile eliminare il rumore elettrico prodotto dalla rete alle frequenze di 50 e 60 Hz e di conseguenza migliorare i risultati ottenuti dalle analisi successive sui segnali. In figura viene riportato il confronto fra la PSD del segnale “della base” prima e dopo essere stato filtrato (le figure 6.22-6.23).



L'algoritmo col quale è possibile filtrare i segnali è riportato nell'[Appendice C](#).

Calcolo approssimato delle tensioni agenti sulla sezione critica

Di seguito verranno descritte diverse metodologie di calcolo atte a stimare le tensioni agenti sulla sezione critica utilizzando come unico input i segnali acquisiti dagli accelerometri. Questa verifica è necessaria per escludere che si generino tensioni di ampiezza tali da portare a rottura quasi statica i provini, compromettendo la validità della prove a fatica.

1. Passaggio diretto dalle accelerazioni alle tensioni

Questo primo metodo si basa su leggi valide solo in campo elastico e correla direttamente i valori di accelerazione relativa fra massa e base ai valori di tensione generati.

La tensione sulla sezione critica di una trave incastrata e sollecitata da un momento flettente vale:

$$\sigma = \frac{M_f}{I} \cdot y_{max} = \frac{M_f \cdot 12 \cdot h}{b \cdot h^3 \cdot 2} = \frac{6 \cdot M_f}{b \cdot h^2} \quad I$$

Dove I è il momento d'inerzia e y_{max} la massima distanza dall'asse neutro. Esplicitando il momento flettente si ottiene:

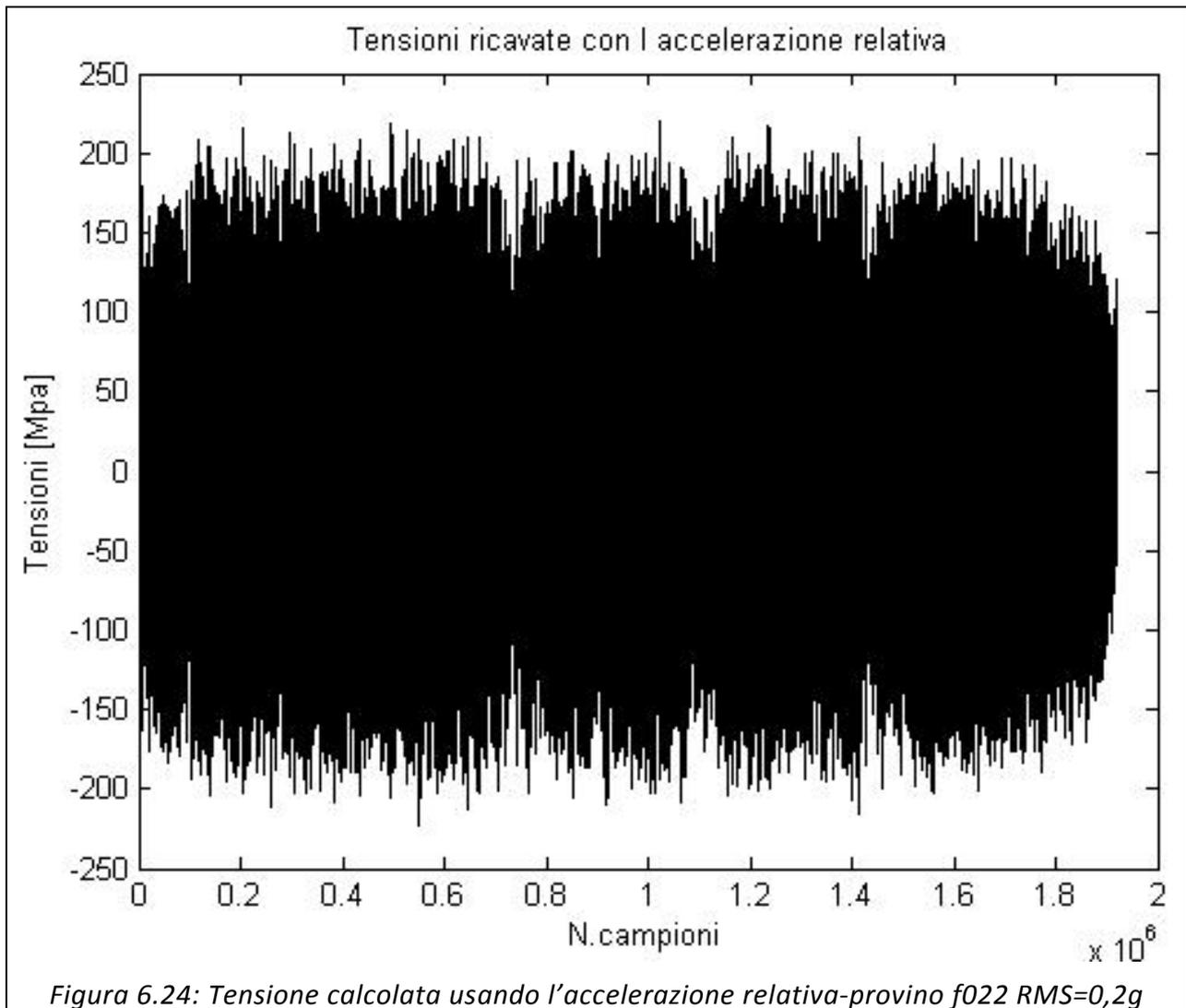
$$M_f = m \cdot l \cdot (a_m - a_b) = m \cdot l \cdot a_r \quad II$$

- m è il valore della massa (pari a 0,495 kg)
- l è la distanza fra il baricentro della massa e la sezione critica (pari a 75,5 mm)
- a_m è l'accelerazione del baricentro della massa ausiliaria
- a_b è l'accelerazione misurata dal sensore sulla base
- a_r è l'accelerazione relativa.

Infine sostituendo la II nella I si ricava la tensione in funzione dell'accelerazione relativa:

$$\sigma = \frac{6 \cdot m \cdot l \cdot a_r}{b \cdot h^2}$$

In figura 6.24 vengono riportati i valori di tensione così calcolati:



2.Determinazione delle tensioni calcolando lo spostamento relativo

Avendo a disposizione i valori di accelerazione misurati sulla massa e sulla base è possibile ottenere lo spostamento relativo (“y_{rel}”):

$$y_{rel} = \iint_0^{tf} (a_m - a_b) \cdot dt = \iint_0^{tf} a_r \cdot dt$$

Poiché la prima forma modale (flessionale) è pari alla deformata statica è possibile porre lo spostamento relativo pari alla freccia statica ottenendo:

$$y_{rel} = f = \frac{P \cdot l^3}{3 \cdot E \cdot I} \quad I$$

Sia inoltre:

$$P \cdot l = M_f = \frac{\sigma \cdot b \cdot h^2}{6} \quad II$$

Sostituendo la II nella I si ottiene:

$$y_{rel} = \frac{P \cdot l^3}{3 \cdot E \cdot I} = \frac{\sigma \cdot b \cdot h^2 \cdot l^2 \cdot 12}{6 \cdot 3 \cdot E \cdot b \cdot h^3} = \frac{\sigma \cdot l^2 \cdot 2}{3 \cdot E \cdot h}$$

Attraverso semplici passaggi algebrici si ricava:

$$\sigma = \frac{y_{rel} \cdot 3 \cdot E \cdot h}{l^2 \cdot 2}$$

In figura 6.25 sono illustrati i risultati ottenuti utilizzando questo metodo di calcolo.

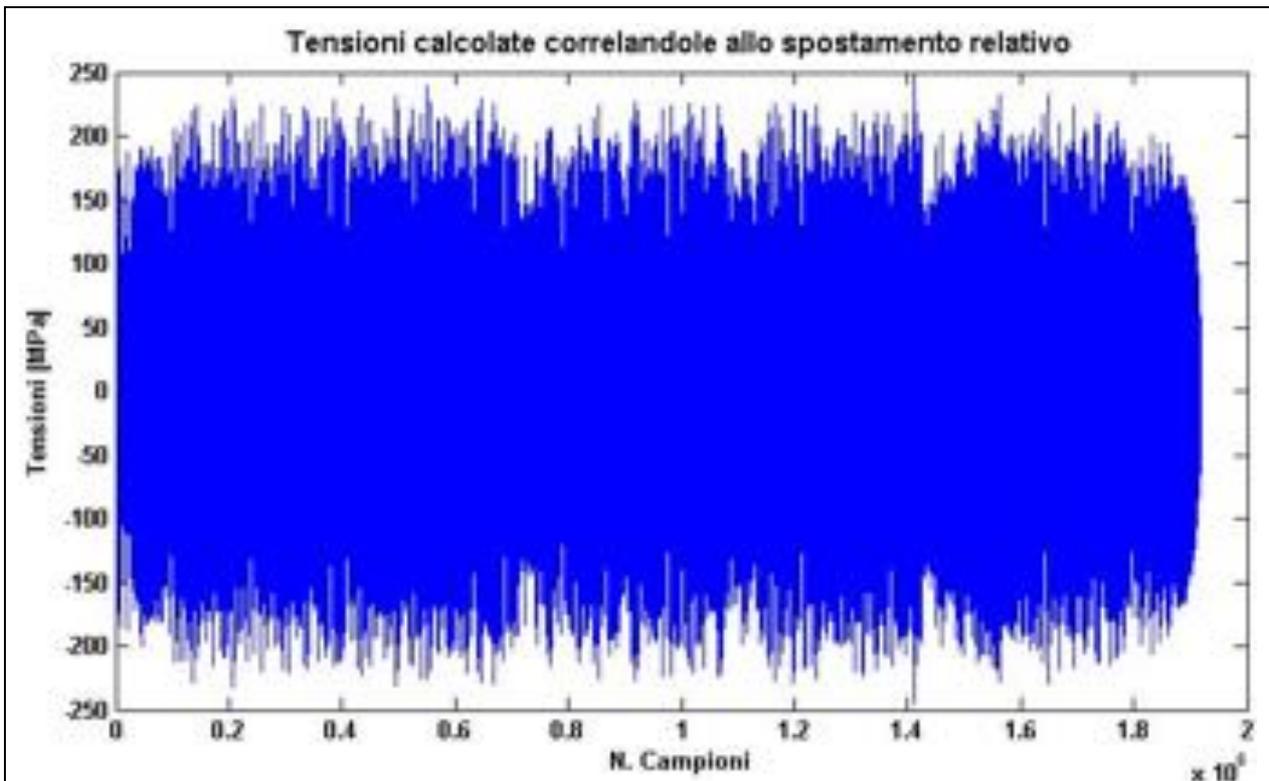


Figura 6.25: Tensioni ricavate a partire dagli spostamenti relativi- provino f022 RMS=0,2g

3. Determinazione delle tensioni in campo plastico

Entrambe le procedure descritte, applicate allo studio condotto, determinano valori di tensione non corretti, superiori non solo allo snervamento ma addirittura prossimi ai valori di rottura statica (figure 6.24, 6.25).

Ciò accade in seguito al superamento della tensione di snervamento, non prevista dalle leggi su cui sono fondati i due metodi presentati, valide solo in campo elastico. Infatti superato il valore di snervamento del materiale si ha che al crescere delle deformazioni le tensioni crescono con minore intensità.

Per poter ricavare correttamente i valori di tensione anche in campo plastico verrà quindi adottata una strategia che preveda la determinazione delle deformazioni a partire dagli spostamenti e li correli agli sforzi utilizzando la caratteristica $\varepsilon \cdot E$ del materiale a trazione.

Partendo dal segnale contenente lo spostamento relativo è possibile ricavare il valore delle deformazioni utilizzando le seguenti formule:

$$\begin{cases} \sigma = \varepsilon \cdot E = \frac{M_f}{I} \cdot y_{max} = \frac{M_f \cdot 12 \cdot h}{b \cdot h^3 \cdot 2} = \frac{6 \cdot M_f}{b \cdot h^2} & I \\ f = y_{rel} = \frac{M_f \cdot l^2}{3 \cdot E \cdot I} & II \end{cases}$$

Isolando M_f dalla II e sostituendolo nella I si ottiene:

$$\sigma = \varepsilon \cdot E = \frac{6 \cdot y_{rel} \cdot 3 \cdot E \cdot I}{b \cdot h^2 \cdot l^2} = \frac{6 \cdot y_{rel} \cdot 3 \cdot E \cdot b \cdot h^3}{b \cdot h^2 \cdot l^2 \cdot 12} = \frac{3 \cdot y_{rel} \cdot E \cdot h}{2 \cdot l^2}$$

È ora possibile esplicitare le deformazioni in funzione degli spostamenti, considerando il provino come una trave inflessa in cui la deformazione è concentrata nella sezione critica:

$$\varepsilon = \frac{3 \cdot y_{rel} \cdot h}{2 \cdot l^2}$$

Nota la caratteristica $\sigma - \varepsilon$ del materiale, ricavata dalle prove di trazione, è possibile ricavare il valore di tensione corretto anche in campo plastico prendendo ogni valore di deformazione e correlandolo al rispettivo valore di tensione (vedi figura 6.26), tale operazione è svolta utilizzando l'algoritmo riportato in [Appendice C](#)

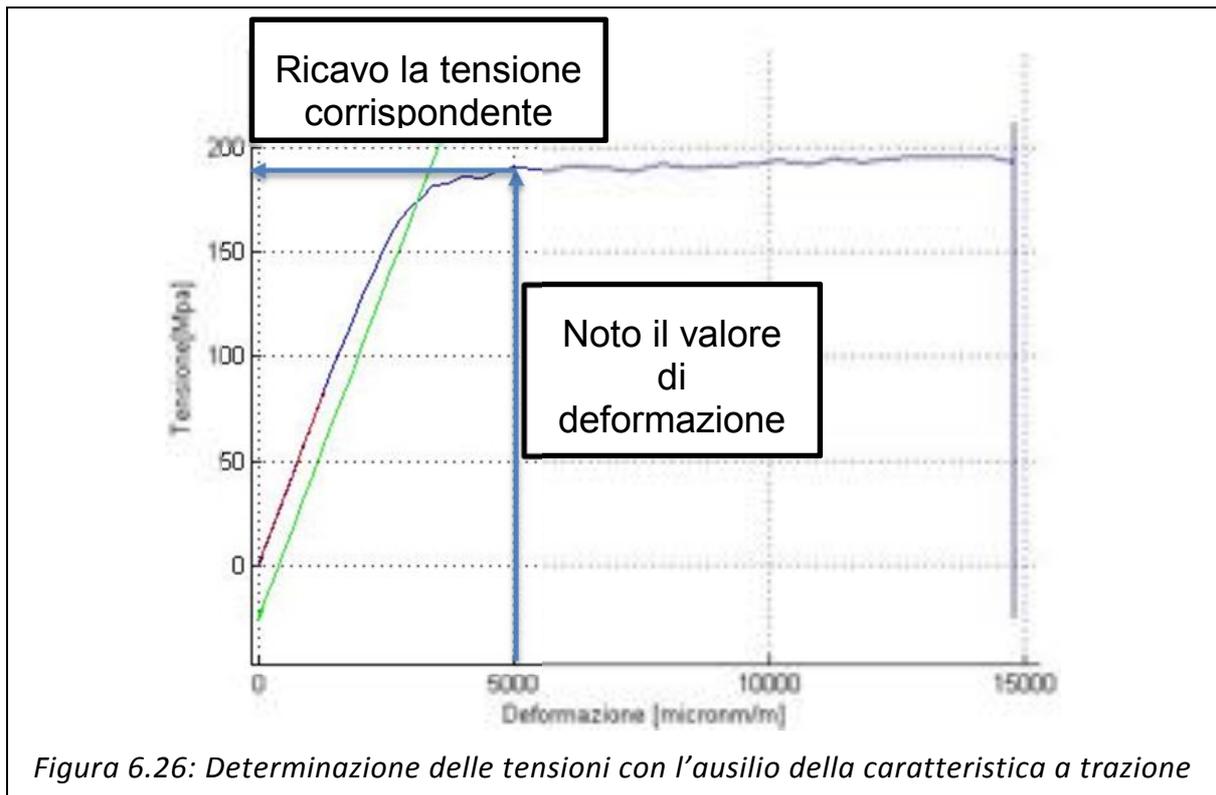


Figura 6.26: Determinazione delle tensioni con l'ausilio della caratteristica a trazione

Utilizzando tale metodo e confrontandolo coi precedenti (Figura 6.27), (i quali producono risultati paragonabili fra di loro) si osserva un'attenuazione dei picchi di tensione che coerentemente con quanto accade nella realtà si mantengono al di sotto del valore di rottura del materiale (245 MPa).

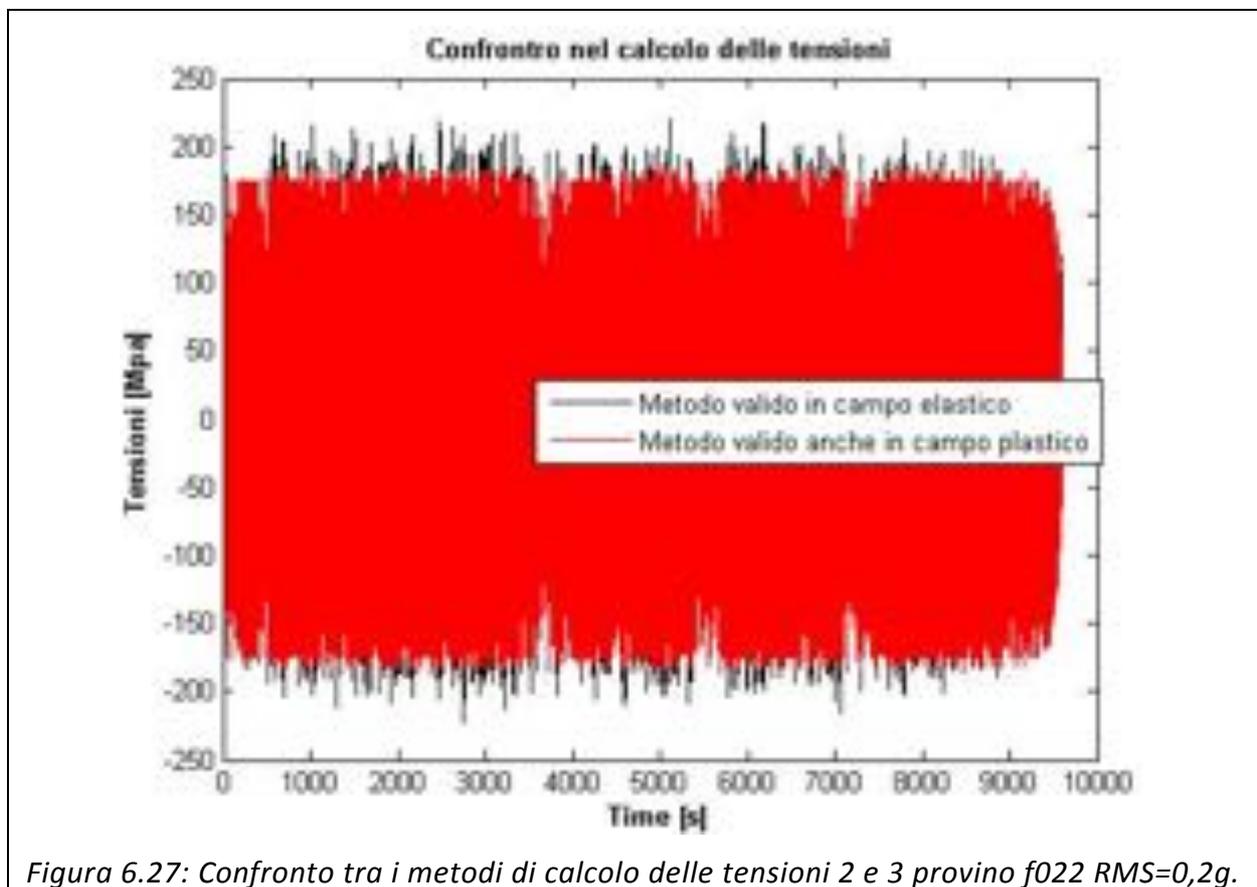


Figura 6.27: Confronto tra i metodi di calcolo delle tensioni 2 e 3 provino f022 RMS=0,2g.

Andamento della frequenza naturale nel tempo

Il campione sottoposto a sollecitazioni di tipo vibratorio prima che giunga ad una frattura completa vede il propagarsi della cricca. Durante questo intervallo di tempo il valore della rigidezza cala e di conseguenza anche il

valore della $f_n = \frac{\sqrt{\frac{k}{m}}}{2\pi}$.

Per determinare l'istante di tempo nel quale si passa dalla nucleazione alla propagazione della cricca si impiegano curve $f_n(t)$ determinando il valore della frequenza naturale per intervalli di tempo di durata prestabilita attraverso il calcolo della FRF (Funzione di risposta in Frequenza).

Poiché l'eccitazione è costituita dalla sola parte reale $F(t)$, la risposta del sistema sarà anch'essa costituita dalla sola parte reale di $z(t)$, $x(t)=\text{Re}[z(t)]$, dove $z(t)$ è una quantità complessa che soddisfa l'equazione differenziale del moto.

Ipotizzata una soluzione particolare del tipo: $z = Z_o e^{i(\omega t - \Psi)} = Z_o e^{i\omega t} Z_o e^{i\Psi}$

Sostituendola all'equazione differenziale del moto del nostro sistema (Cap. IV) e risolvendo tale equazione si ottiene.

$$\frac{Z}{F_0} = \frac{1}{k - m\omega^2 + ic\omega} = \frac{\frac{1}{k}}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2} + i2\zeta\omega \frac{\omega}{\omega_n}} = H(i\omega)$$

L'FRF viene stimata a partire dai segnali di input e output, ricavati attraverso gli accelerometri posizionati sulla base e sul baricentro della massa ausiliaria, rispettivamente.

La stima è tanto più precisa quanto maggiore è il numero di campioni e quindi gli intervalli di tempo considerati, tuttavia è necessario trovare un giusto compromesso che consideri anche la risoluzione (n. di punti) della curva $f_n(t)$.

Dopo aver osservato i risultati ottenuti per intervalli di tempo pari a 20, 50, 100, 200, 400 secondi, si è scelto di adottare intervalli di tempo di 200 secondi che moltiplicati per una frequenza di campionamento di 200 Hz danno 40000 campioni coi quali si ottiene un buon andamento della FRF e una bassa dispersione dei punti che formano la curva $f_n(t)$.

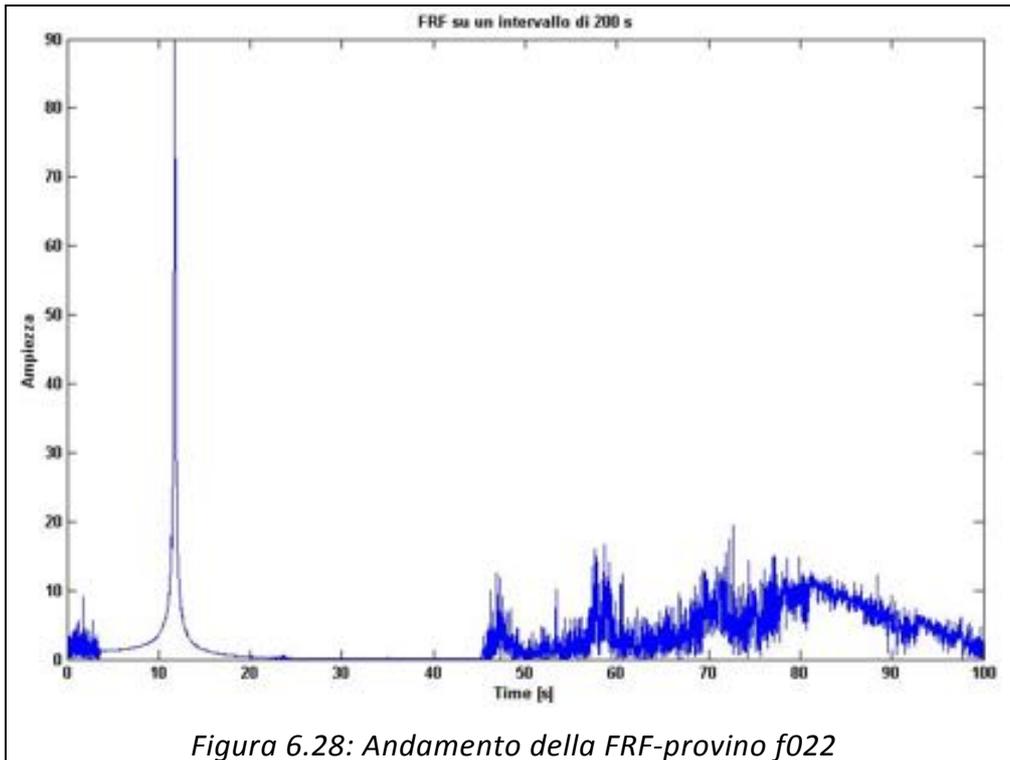


Figura 6.28: Andamento della FRF-provino f022

In figura 6.28 è riportato l'andamento della FRF tra due segnali (accelerazione della base e della massa) non filtrato nei primi 200 secondi di test in cui il massimo della risposta lo si ha ad una frequenza prossima a 11,7 Hz. Ripetendo tale operazione nel tempo monitorando le frequenze a cui corrisponde il massimo assoluto della FRF si ottiene la curva $f_n(t)$ riportata nella figura 6.29.

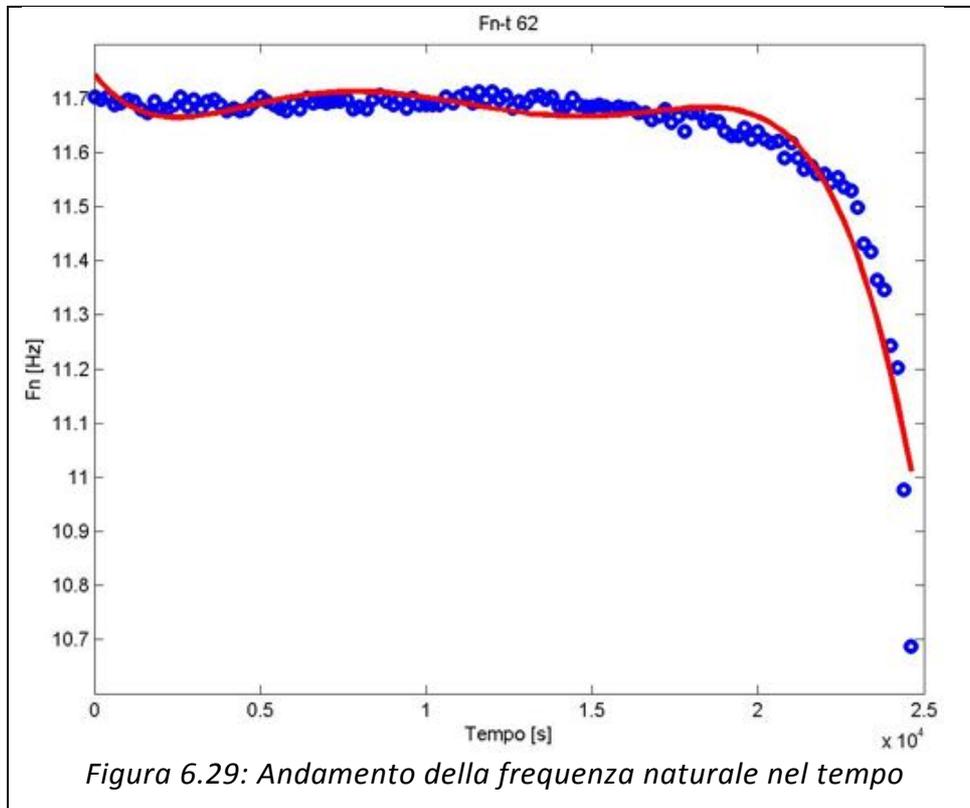


Figura 6.29: Andamento della frequenza naturale nel tempo

Osservando l'andamento della curva $f_n(t)$ il valore della frequenza naturale resta costante sia durante l'innesco della frattura che durante la fase di nucleazione nelle quali avvengono modifiche microstrutturali che non generano alcun effetto a livello macroscopico. Quando invece si ha la propagazione della frattura si può osservare un brusco calo della curva, da tale effetto si potrà quindi determinare l'effettiva vita a fatica del provino (il procedimento sarà descritto in seguito).

In figura 6.30 vengono riportate tutte le curve $f_n(t)$ dei provini testati in questo studio e da cui è visibile la diversa durata dei test in funzione del valore RMS dell'eccitazione:

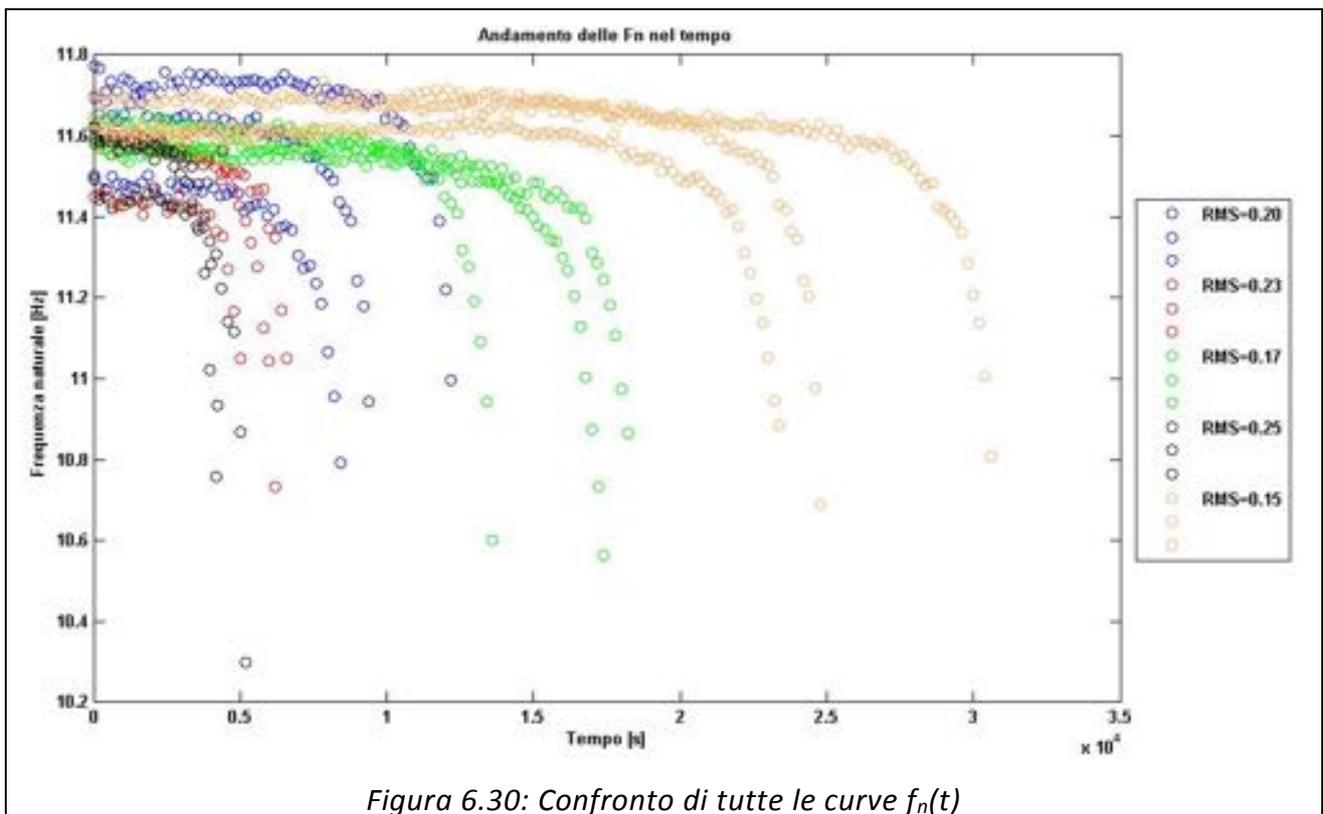


Figura 6.30: Confronto di tutte le curve $f_n(t)$

NOTA: è bene precisare che l'andamento della risposta in frequenza si discosta da un andamento ideale, infatti vi sono più massimi e minimi locali anche in prossimità e con valori paragonabili al massimo assoluto. Ciò porta a una leggera dispersione dei punti che formano le curve $f_n(t)$. Questo difetto viene illustrato in figura 6.31 in cui è riportato uno "zoom" della curva precedente.

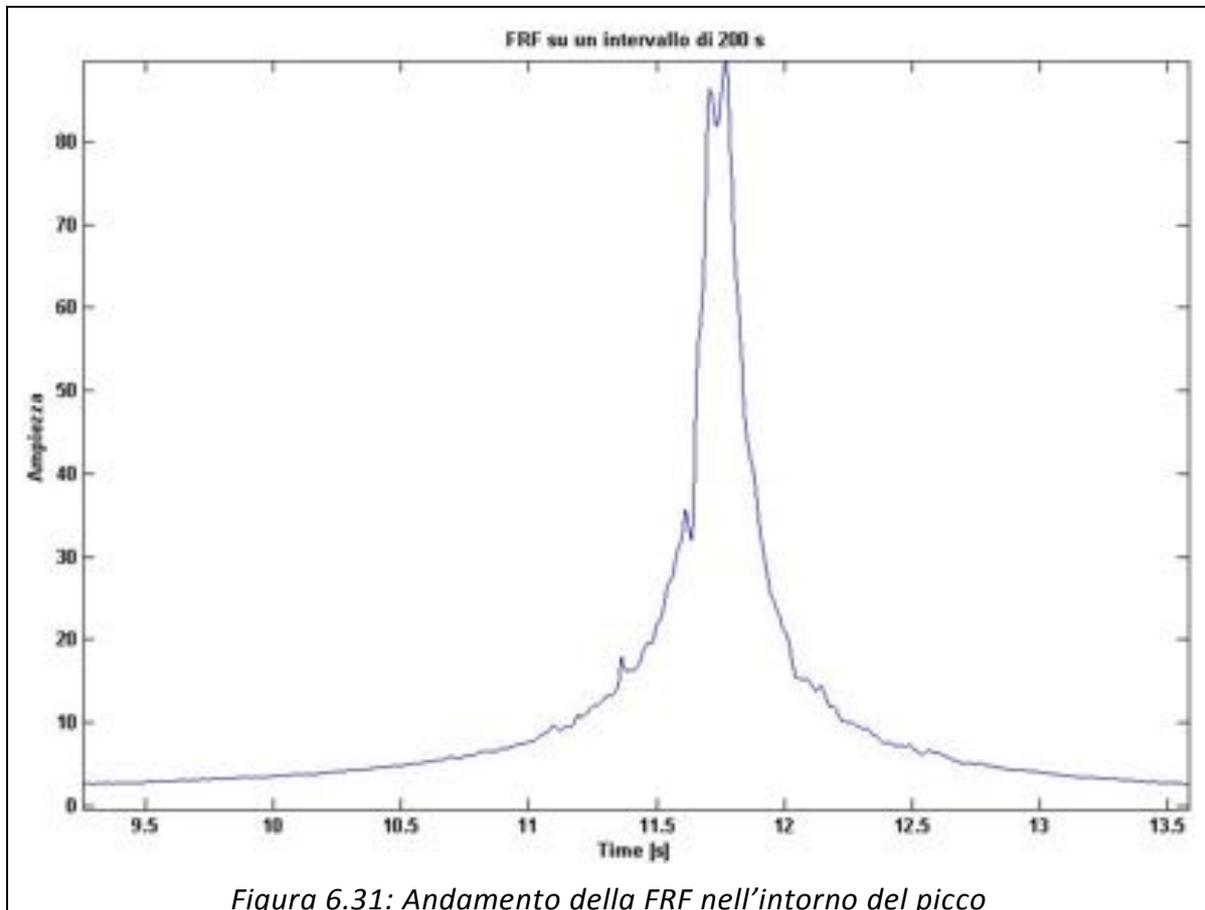


Figura 6.31: Andamento della FRF nell'intorno del picco

Andamento del fattore di smorzamento nel tempo

Dalla FRF oltre alla frequenza naturale si può ricavare il valore del fattore di smorzamento del sistema utilizzando il **metodo della banda di mezza potenza**:

Si considerano i valori del rapporto $r = \frac{\omega}{\omega_n} = \frac{f}{f_n}$ per i quali la risposta a regime vale $\frac{1}{\sqrt{2}}$ l'ampiezza in condizioni di risonanza di fase:

$$\frac{\frac{F_0}{k}}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} = \frac{X_{RF}}{\sqrt{2}} = \frac{F_0}{k} \frac{1}{2\zeta\sqrt{2}}$$

Da cui si ottiene:

$$\frac{1}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} = \frac{1}{2\zeta\sqrt{2}}$$

Elevando all'esponente "-1" entrambi i membri:

$$\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2} = 2\zeta\sqrt{2}$$

E poi elevando al quadrato per eliminare le radici si ha:

$$(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2 = 8\zeta^2$$

Attraverso semplici passaggi algebrici si ricava la seguente equazione di quarto grado:

$$r^4 + 2(2\zeta^2 - 1)r^2 + 1 - 8\zeta^2 = 0$$

Le cui radici sono:

$$\begin{aligned} r_{1,2}^2 &= 1 - 2\zeta^2 \pm \sqrt{1 + 4\zeta^4 - 4\zeta^2 - 1 + 8\zeta^2} \\ &= 1 - 2\zeta^2 \pm 2\zeta\sqrt{1 + \zeta^2} \end{aligned}$$

Per valori piccoli del fattore di smorzamento $\zeta^2 \ll 1$ si può ritenere valida la seguente approssimazione

$$r_{1,2}^2 \approx 1 \pm 2\zeta$$

da cui si ricava il valore del fattore di smorzamento:

$$\zeta = \frac{r_2^2 - r_1^2}{4}$$

Introducendo un'altra approssimazione $\omega_n \approx \frac{\omega_1 + \omega_2}{2}$, si ha:

$$\zeta = \frac{\omega_2^2 - \omega_1^2}{4\omega_n^2} \approx \frac{(\omega_2 - \omega_1)(\omega_2 + \omega_1)}{(\omega_2 + \omega_1)^2} \approx \frac{1}{2} \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_n}$$

L'intervallo di pulsazioni comprese tra ω_2 e ω_1 è detto banda di mezza potenza, poiché la potenza media dissipata ad ogni ciclo per effetto dell'attrito viscoso, nell'intervallo $[\omega_1, \omega_2]$, è circa la metà di quella dissipata in condizioni di risonanza di fase.

Algoritmo adattato ai dati sperimentali ricavati

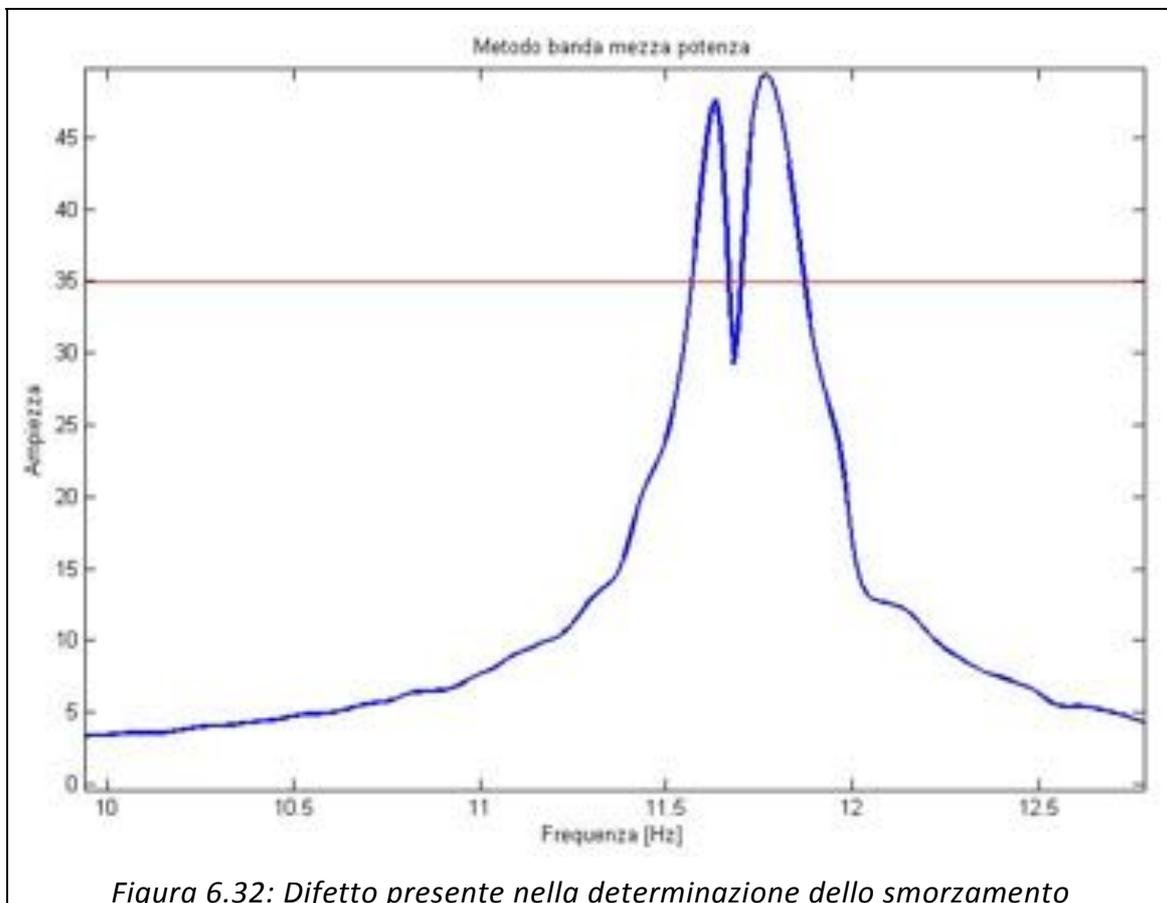
Le funzioni di risposta in frequenza, sono ricavate sperimentalmente a partire dai segnali di accelerazione, misurati alla base dello shaker (input) e sul baricentro della massa ausiliaria (output).

Attraverso questa procedura le FRF presentano un andamento che si discosta da quello teorico principalmente per 2 motivi:

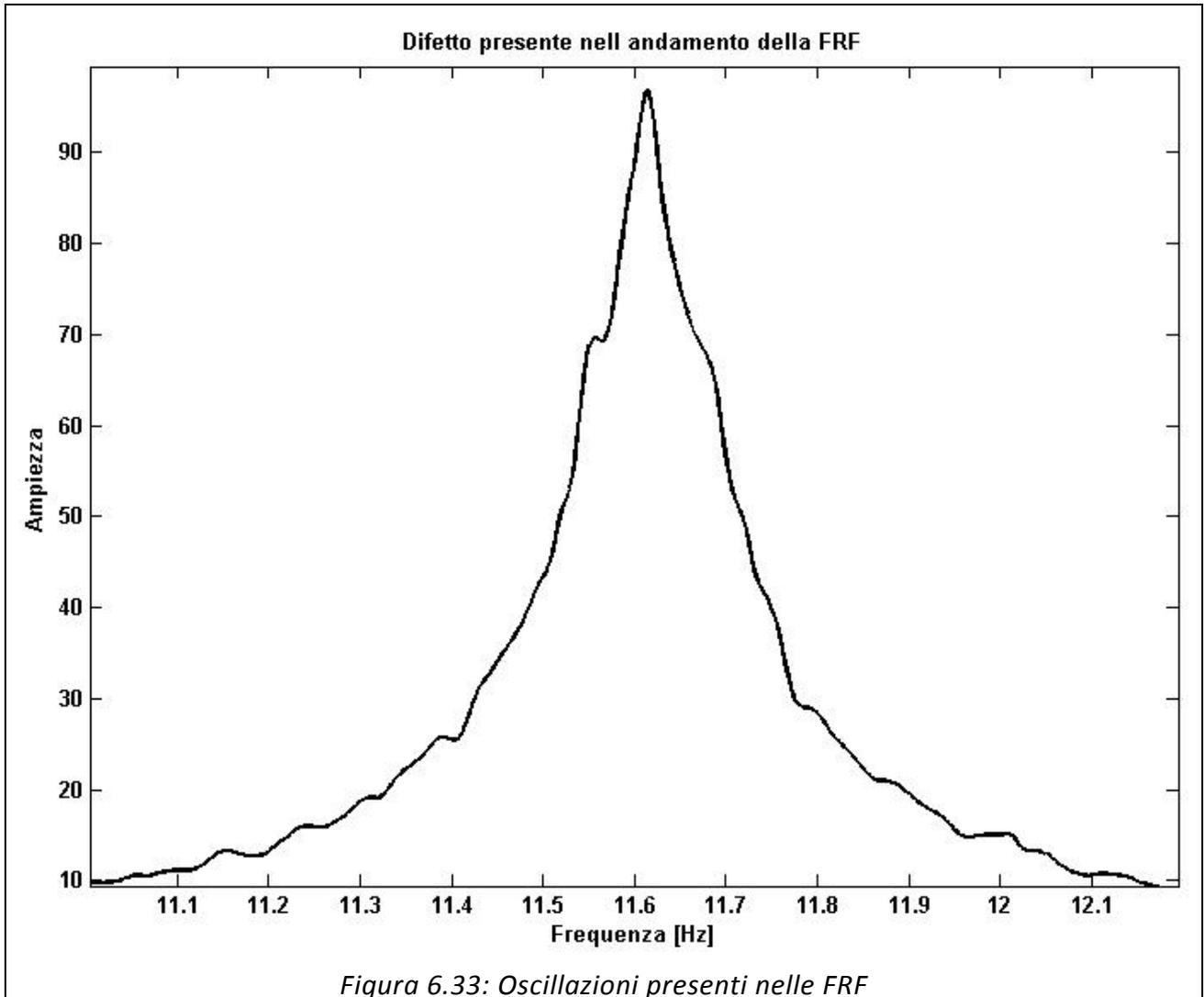
- Il baricentro della massa ausiliaria e l'accelerometro, posto al di sotto di essa, in seguito alla deformazione del provino percorrono un arco di circonferenza, che il segnale dell'accelerometro approssima con una traslazione verticale introducendo così un errore nella misurazione.
- Durante i test l'intera storia di carico si divide in più parti identiche ognuna della durata di 10 minuti, nel passaggio da un replay all'altro si hanno dei tempi morti dell'ordine di 5-6 secondi che vengono acquisiti e compresi nel calcolo delle FRF.

Queste imprecisioni si ripercuotono sia sulla stima della $f_n(t)$ ma soprattutto sulla dispersione dei valori del fattore di smorzamento nel tempo $\zeta(t)$.

Ingrandendo le dimensioni del grafico (figura 6.32, provino f022) in cui è riportato l'andamento di una FRF, la curva nell'intorno della frequenza naturale non presenta un solo picco ma bensì due e fra di essi vi è un minimo locale al di sotto del valore $\frac{X_{RF}}{\sqrt{2}}$ e si ottengono così valori delle radici $r_{1,2}^2$ errati.



Oltre a tale difetto “macroscopico”, presente solo in alcuni intervalli di tempo, ne è presente un altro più entità più lieve presente nella maggior parte delle FRF investigate. La curva presenta delle lievi oscillazioni, che producono imprecisioni nei valori delle radici, tanto maggiori quanto più è “appuntita” la curva (figura 6.33).



Per ottenere una stima migliore del valore dello smorzamento, che tenga conto dei due problemi descritti, si apportano modifiche al metodo della banda di mezza potenza calcolando le radici $r_{1,2}^2$ per le quali la risposta ha una ampiezza uguale a $\frac{X_{RF}}{\sqrt{26}}$.

Modificando tale parametro occorre risolvere nuovamente l’equazione parametrica di quarto grado e ricavare i coefficienti corretti.

Considerando i valori del rapporto $r = \frac{\omega}{\omega_n} = \frac{f}{f_n}$ per i quali la risposta a regime vale $\frac{1}{\sqrt{26}}$ l’ampiezza in condizioni di risonanza di fase, si ricava:

$$\frac{\frac{F_0}{k}}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} = \frac{X_{RF}}{\sqrt{26}} = \frac{F_0}{k} \frac{1}{2\zeta\sqrt{26}}$$

Da cui

$$\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2} = 2\zeta\sqrt{26}$$

Analogamente a quanto già visto nel metodo "originale" si ricava:

$$r^4 + 2(2\zeta^2 - 1)r^2 + 1 - 104\zeta^2 = 0$$

$$r_{1,2}^2 = 1 - 2\zeta^2 \pm \sqrt{1 + 4\zeta^4 - 4\zeta^2 - 1 + 104\zeta^2}$$

$$= 1 - 2\zeta^2 \pm 2\zeta\sqrt{25 + \zeta^2}$$

Per valori piccoli del fattore di smorzamento $\zeta^2 \ll 1$ si può applicare la seguente approssimazione:

$$r_{1,2}^2 \approx 1 \pm 10\zeta$$

E quindi si ricava il valore del fattore di smorzamento come:

$$\zeta = \frac{\omega_2^2 - \omega_1^2}{20\omega_n^2}$$

Nell'immagine sottostante è rappresentata la schematizzazione del metodo appena descritto:

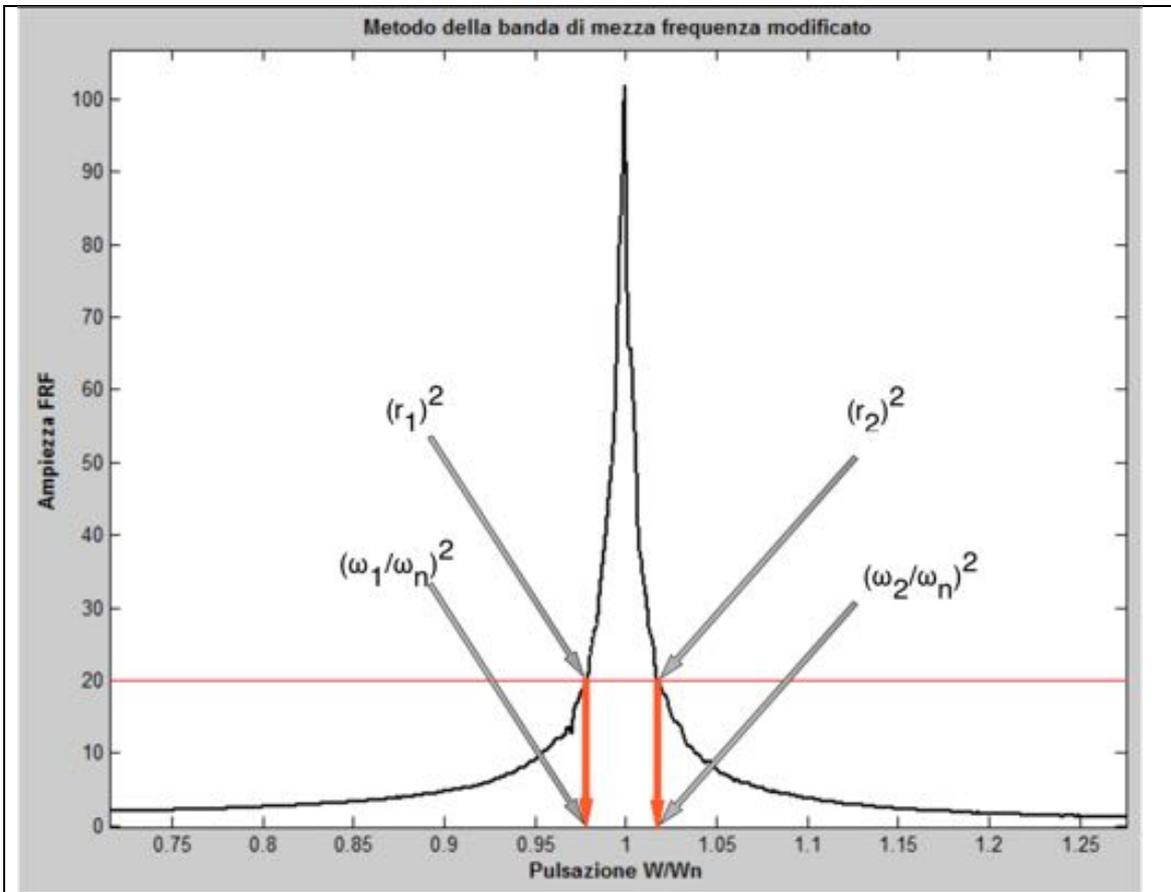


Figura 6.34: Determinazione delle radici attraverso il metodo modificato

Risultati

Con un procedimento del tutto analogo a quello visto per ricavare le curve $f_n(t)$, si riportano i valori dello smorzamento al variare del tempo. Le curve $\zeta(t)$ ottenute per interpolazione dei punti ricavati su finestre temporali di 200 secondi hanno un andamento che generalmente può essere diviso in tre fasi (figura 6.35):

- I. Assestamento del vincolo: Durante i primi minuti si hanno variazioni del valore di smorzamento imputabili a micro-spostamenti del collegamento fra base e provino.
- II. Andamento lievemente decrescente dovuto alla plasticizzazione del materiale, tanto maggiore è la deformazione plastica e tanto meno accurate saranno le misure dell'accelerometro posto nel baricentro della massa ausiliaria.
- III. Rapida ascesa dovuta alle elevate deformazioni del provino che rendono le misurazioni non coerenti con quanto accade in realtà.

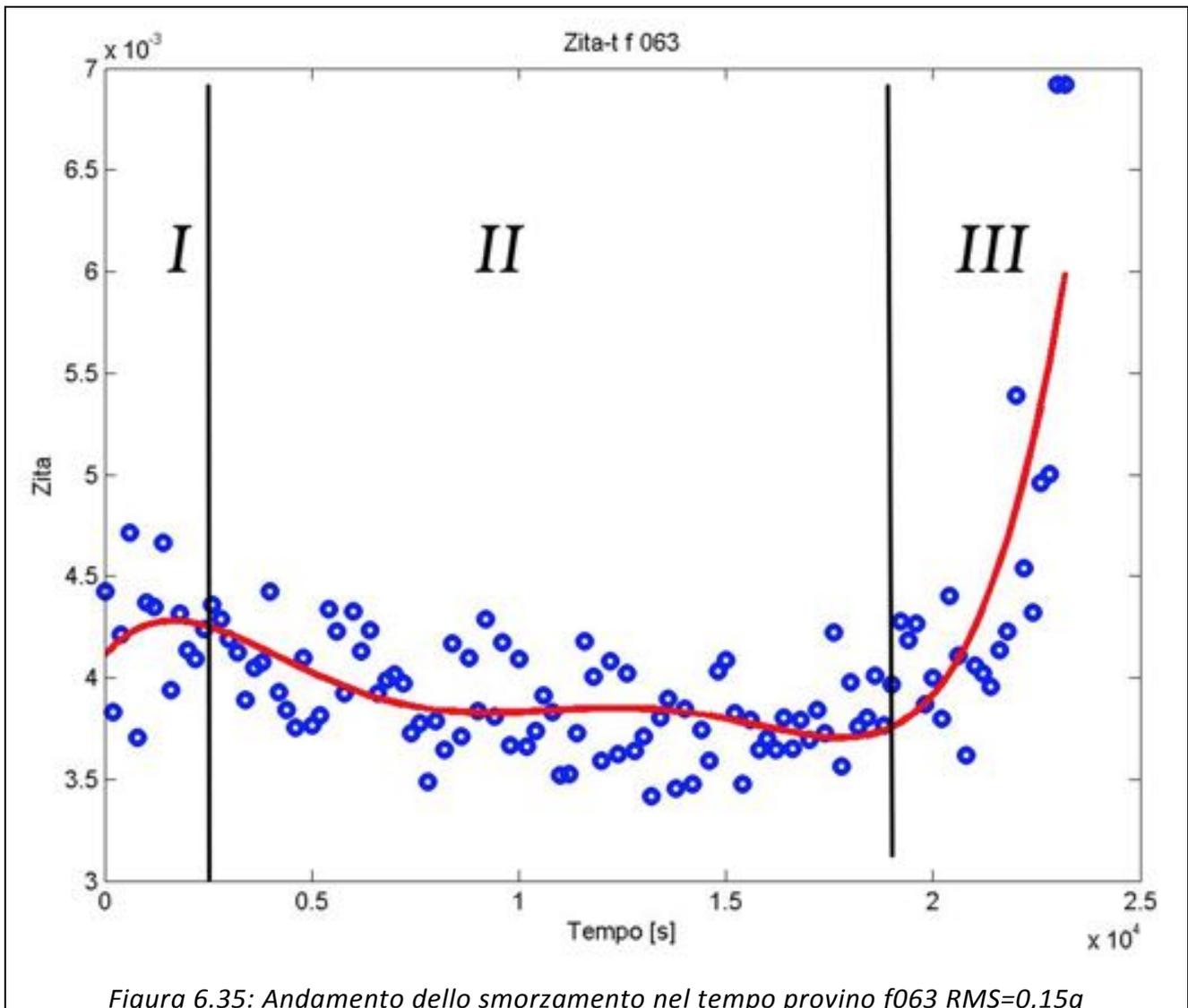


Figura 6.35: Andamento dello smorzamento nel tempo provino f063 RMS=0,15g

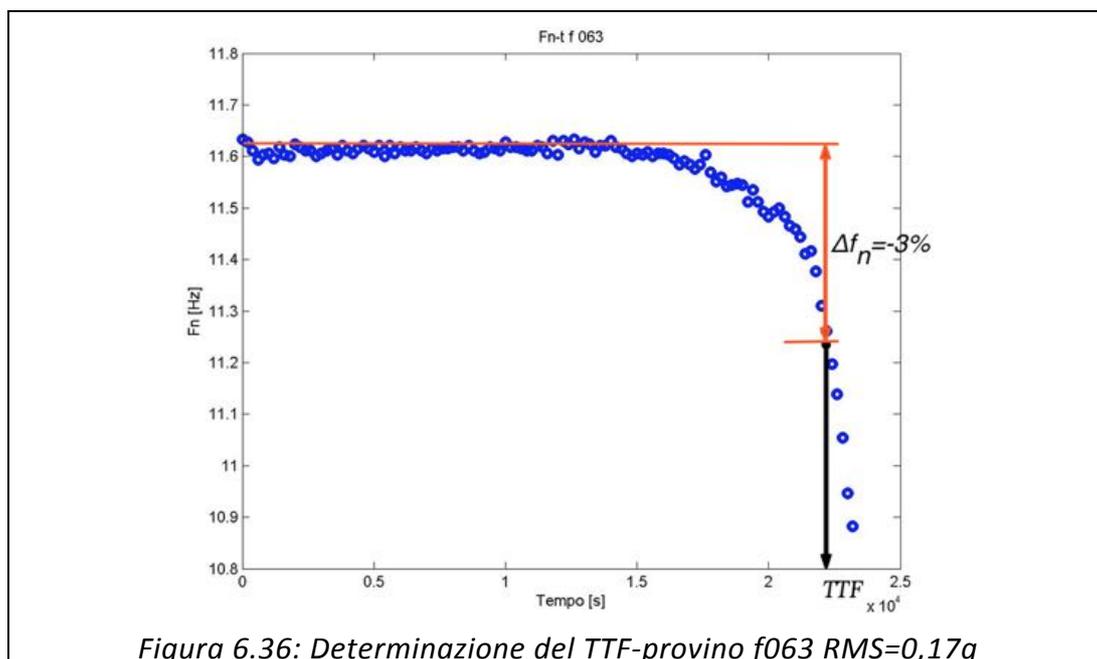
Determinazione della vita a fatica del provino: Time To Failure

La storia di carico di un componente sollecitato da un carico dinamico, osservandola dal punto di vista della propagazione della cricca, si divide in 4 fasi:

- 1) *Innesco della frattura*: in questa fase si ha un assestamento microstrutturale.
- 2) Nella successiva fase di *nucleazione* si ha un addensamento delle micro cricche, generalmente ciò avviene sulla superficie del pezzo a causa di irregolarità superficiali che favoriscono la propagazione della cricca.
- 3) *Propagazione*: la cricca si propaga per un lungo tratto partendo dalla superficie ed entrando più in profondità ad ogni ciclo di carico.
- 4) *Frattura finale*: l'avanzare della cricca riduce sempre più la sezione resistente finché si ha una rottura (di schianto) dovuta a valori di tensione uguali a quelli di rottura statica.

Per determinare la curva di Wöhler occorre calcolare il tempo che intercorre fra l'inizio dei test e l'istante in cui parte la propagazione della cricca, escludendo l'ultima parte delle acquisizioni in cui è compresa la propagazione. I test sono stati bloccati prima che avvenisse la frattura finale per evitare un possibile danneggiamento, causato da urti, dei sensori collegati ad esso.

Questa operazione è possibile misurando l'intervallo di tempo che intercorre fra l'inizio dei test e l'istante di tempo in cui si ha una riduzione del valore di frequenza naturale uguale al 3% del valore iniziale (Figura 6.36). Tale variazione è scelta convenzionalmente osservando la dispersione dei punti delle curve $f_n(t)$ e facendo sì che i valori ricavati siano sufficientemente a ridosso del ginocchio delle curve.



Nella seguente tabella vengono riportati i tempi a rottura (TTF) di tutti e 15 i provini testati:

PROVINO	RMS dell'eccitazione [g]	TTF	Frequenza naturale a rottura [Hz]
22	0,2	8654 s	11,38
23	0,2	7199 s	11,24
24	0,2	11494 s	11,45
31	0,23	5556 s	11,42
32	0,23	4927 s	11,30
33	0,23	5594 s	11,24
41	0,17	16091 s	11,25
42	0,17	17101 s	11,30
43	0,17	13296 s	11,27
51	0,25	3265 s	11,42
52	0,25	4372 s	11,27
53	0,25	4254 s	11,26
61	0,15	29420 s	11,33
62	0,15	24387 s	11,42
63	0,15	23086 s	11,27

Calcolo dell'average frequency

Per determinare il numero di cicli fittizio, noto il valore del time to failure, occorre calcolare la frequenza media ("average frequency") della risposta. Avendo utilizzato vibrazioni random vengono eccitate tutte le frequenze comprese nella banda [5, 45] Hz e per ognuna di esse la risposta assume determinati valori di ampiezza tanto più elevati tanto più la frequenza è prossima alla frequenza naturale. La densità di potenza della risposta nel range delle frequenze è espressa dalla PSD. Essa può quindi essere utilizzata come peso per ricavare l'average frequency che per l'appunto non è altro che una media pesata. Per calcolarla si utilizza quindi il **teorema della media pesata**:

Siano f e g due funzioni continue in un intervallo $[a, b]$ e sia $g(x)$ di segno costante in $[a, b]$ (sempre positiva o sempre negativa nell'intervallo). Allora esiste un punto $c \in [a, b]$ tale che:

$$\int_a^b f(x)g(x)dx = f(c) \int_a^b g(x)dx$$

Teorema media pesata

Siano $f(x)$ e $g(x)$ rispettivamente il vettore contenente le ascisse (x_{psd}) e le ordinate (y_{psd}) della PSD allora l'average frequency è definita come

$$f_{av} = \frac{\int x_{psd} \cdot y_{psd}}{\int y_{psd}}$$

Poiché non abbiamo funzioni continue ma vettori contenenti segnali discreti si è ricorso a uno script in matlab riportato in [Appendice](#).

Ottenuto tale valore si può ricavare un numero di cicli fittizio moltiplicando la vita a fatica del provino (TTF) per l'average frequency calcolata utilizzando la PSD dell'accelerazione relativa.

$$N_{cicli\ a\ rottura} = TTF \cdot f_{av}$$

In tabella si riportano la durata in secondi, il TTF e l'average frequency relativa alla PSD dell'accelerazione relativa.

Provino	TTF [s]	Average Frequency Acc. Relativa [Hz]	Ncicli
22	8654	12,01	103911
23	7667	11,96	91721
24	11494	12,05	138527
31	6224	11,97	74472
32	4862	11,77	57208
33	5537	12,02	66569
41	16082	11,87	190927
42	17104	11,87	202950
43	12635	11,93	150778
51	3790	12,00	45478
52	4318	11,87	51248
53	3871	12,06	46702
61	29425	11,95	351653
62	23688	12,01	284411
63	22232	11,91	264700

Livelli delle sollecitazioni-Determinazione delle tensioni

Per poter fissare i punti in coordinate Y_{RMS} -tempo e ricavare l'esponente della dell'equazione di Basquin è necessario determinare i valori RMS dell'accelerazione relativa tra massa e base, tale valore si pone in analogia al valore di tensione alternata σ_a utilizzata nei test convenzionali.

Nella seguente tabella vengono riportati i valori RMS calcolati sui dati acquisiti dagli accelerometri, si evidenziano i valori relativi all'accelerazione della base e all'accelerazione relativa.

PROVINO	RMS ACC.BASE	RMS ACC. MASSA	RMS ACC. RELATIVA	RMS ACC. TRASVERSALE (X)	RMS ACC. VERTICALE (Y)	RMS ACC. LONGITUDINALE (Z)
22	0,201	1,130	1,141	0,031	1,141	0,911
23	0,201	0,981	0,996	0,061	1,153	0,914
24	0,201	1,345	1,358	0,046	1,161	0,949
31	0,234	1,390	1,406	0,041	1,231	1,004
32	0,235	1,227	1,237	0,073	1,266	1,048
33	0,234	1,314	1,332	0,084	1,190	0,983
41	0,172	1,118	1,129	0,052	1,051	0,815
42	0,168	1,048	1,057	0,111	0,996	0,819
43	0,170	1,070	1,080	0,027	1,020	0,817
51	0,251	1,295	1,313	0,034	1,235	1,019
52	0,251	1,325	1,340	0,053	1,276	1,038
53	0,251	1,322	1,340	0,058	1,266	1,013
61	0,150	1,002	1,011	0,063	0,920	0,727
62	0,152	0,989	0,998	0,086	0,944	0,737
63	0,151	1,032	1,041	0,028	0,951	0,744

Analogamente a quanto fatto per passare dal TTF al Numero di cicli, ci si può ricondurre ai valori di tensione alternata partendo dall'RMS dell'accelerazione relativa e moltiplicandolo per un fattore K_2 :

$$\sigma = Y_{RMS} \cdot K_2$$

Il valore di K_2 si ricava dalla formula [5]:

$$K_2 = \frac{m \cdot l \cdot 6 \cdot \sqrt{Q}}{b \cdot h^2}$$

“m” è la massa, “l” il braccio del momento flettente, “b” è la larghezza del provino, “h” lo spessore e Q il fattore dinamico definito come:

$$Q = \frac{1}{2 \cdot \zeta}$$

1° Metodo per la determinazione dell'esponente dell'equazione di Basquin

La stima tradizionale di questo parametro (descritta a inizio capitolo) prevede che per ogni livello di tensione alternata σ_a vengano portati a rottura più provini dalla distribuzione gaussiana dei tempi si ricavano quindi curve di Wöhler a diversa probabilità di rottura.

Tale procedimento non può essere replicato nel caso studiato poiché a pari valore RMS dell'eccitazione (base) corrispondono diversi valori RMS della risposta (acc. relativa). A causa di tale discrepanza verranno confrontati fra di loro i risultati ottenuti tramite 3 diverse metodologie.

Il primo metodo, il più semplice, determina il valore del parametro b interpolando con una retta tutti e 15 i punti (uno per ogni provino) rappresentati in coordinate $\log(\text{TTF})-\log(Y_{\text{RMS}})$ come illustrato in figura 6.37.

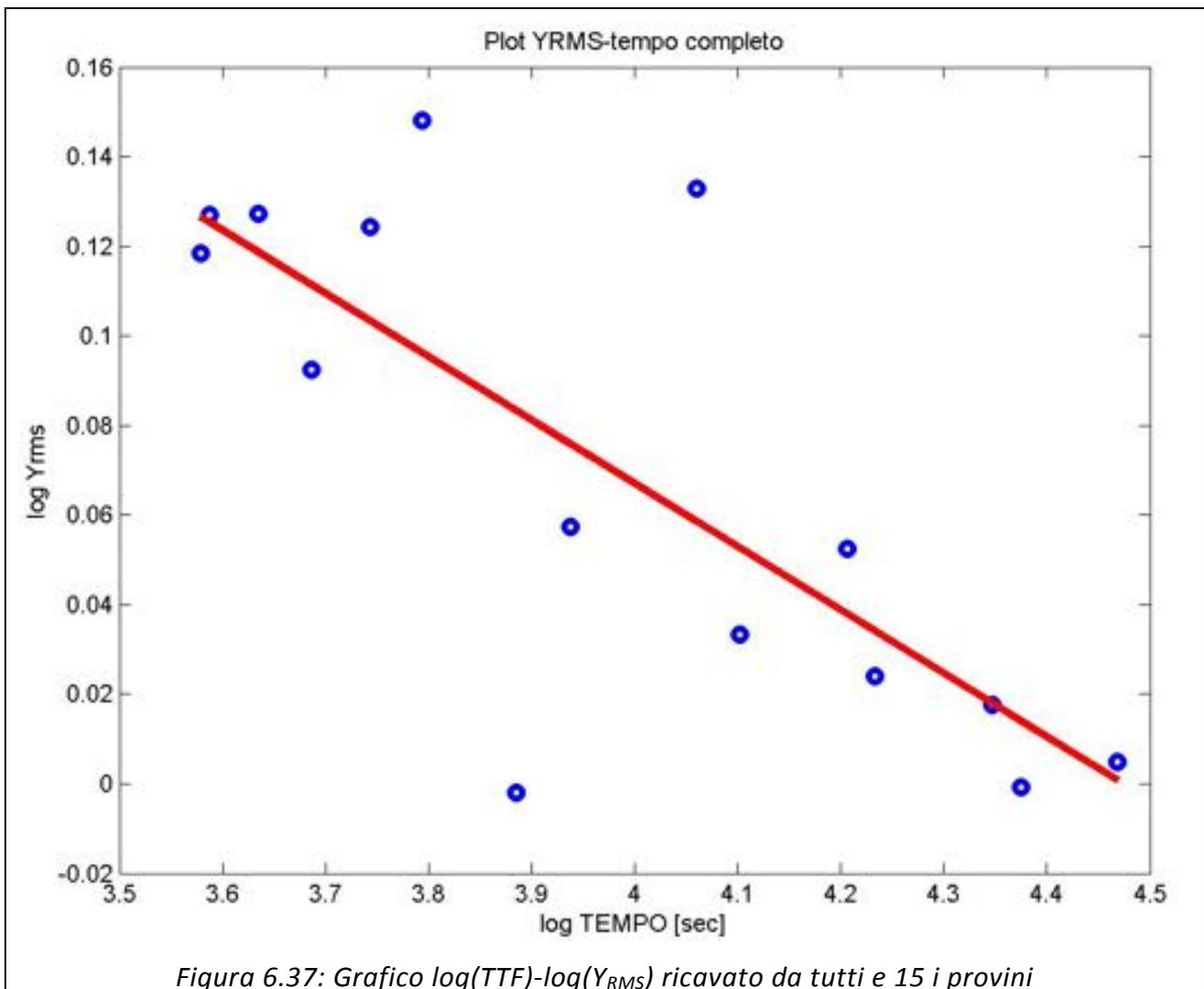


Figura 6.37: Grafico $\log(\text{TTF})-\log(Y_{\text{RMS}})$ ricavato da tutti e 15 i provini

Si è così ottenuto un coefficiente angolare della retta pari a:

$$\mu_1 = -0.1414$$

Utilizzando l'equazione di Basquin nella forma $N \cdot \sigma^b = C$ si ha:

$$b_1 = -\frac{1}{\mu_1} = 7.0711$$

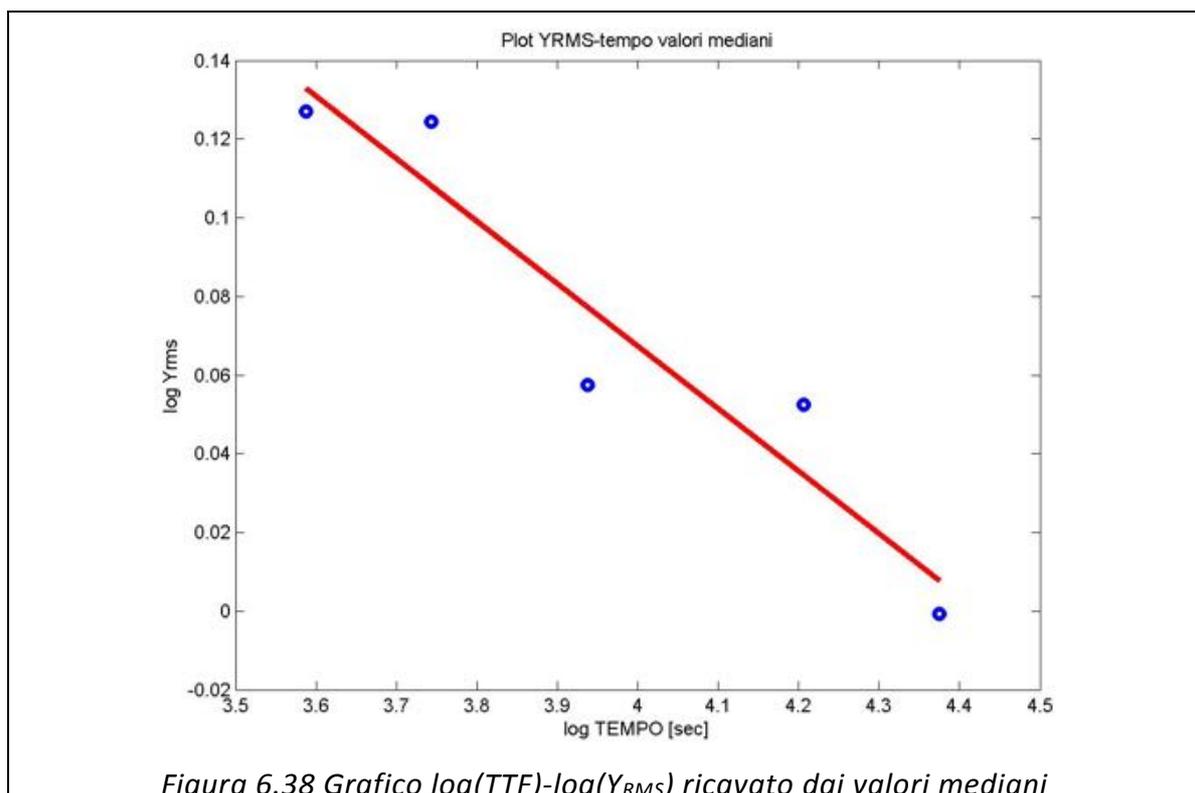
La retta ricavata interpola i punti ricavati da tutti e 15 i provini, trascurando in parte la componente aleatoria del fenomeno, questa omissione si traduce in una notevole dispersione dei punti che la compongono, rendendo poco affidabile il risultato ottenuto.

II° Metodo per la determinazione dell'esponente dell'equazione di Basquin

I 15 provini sono raggruppabili in 5 terne ognuna delle quali presenta un valore RMS dell'eccitazione diverso. Osservando con più attenzione i dati, ciò che emerge è che per ogni terna di campioni si hanno due test con risultati piuttosto simili ed uno che si discosta da essi.

Sulla base delle critiche effettuate al I° metodo, si può ricavare il parametro dell'equazione di Basquin interpolando solo 5 punti anziché 15. Essi vengono selezionati prendendo il valore mediano della durata a rottura (TTF) di ogni terna e ripetendo questa operazione per tutte e 5 le terne di campioni a disposizione.

In figura 6.38 si riportano i risultati ricavati attraverso questo secondo metodo.



Il coefficiente angolare della retta rappresentata vale:

$$\mu_2 = 0.1590$$

Da cui si ha un valore di b uguale a:

$$b_2 = -\frac{1}{\mu_1} = 6.2905$$

La retta rappresentata mostra una minore dispersione dei punti rispetto al metodo precedente e il parametro b risulta inferiore del 12%.

Nella seguente figura viene riportato un confronto fra i due metodi descritti in cui è visibile la differente inclinazione delle rette interpolanti.

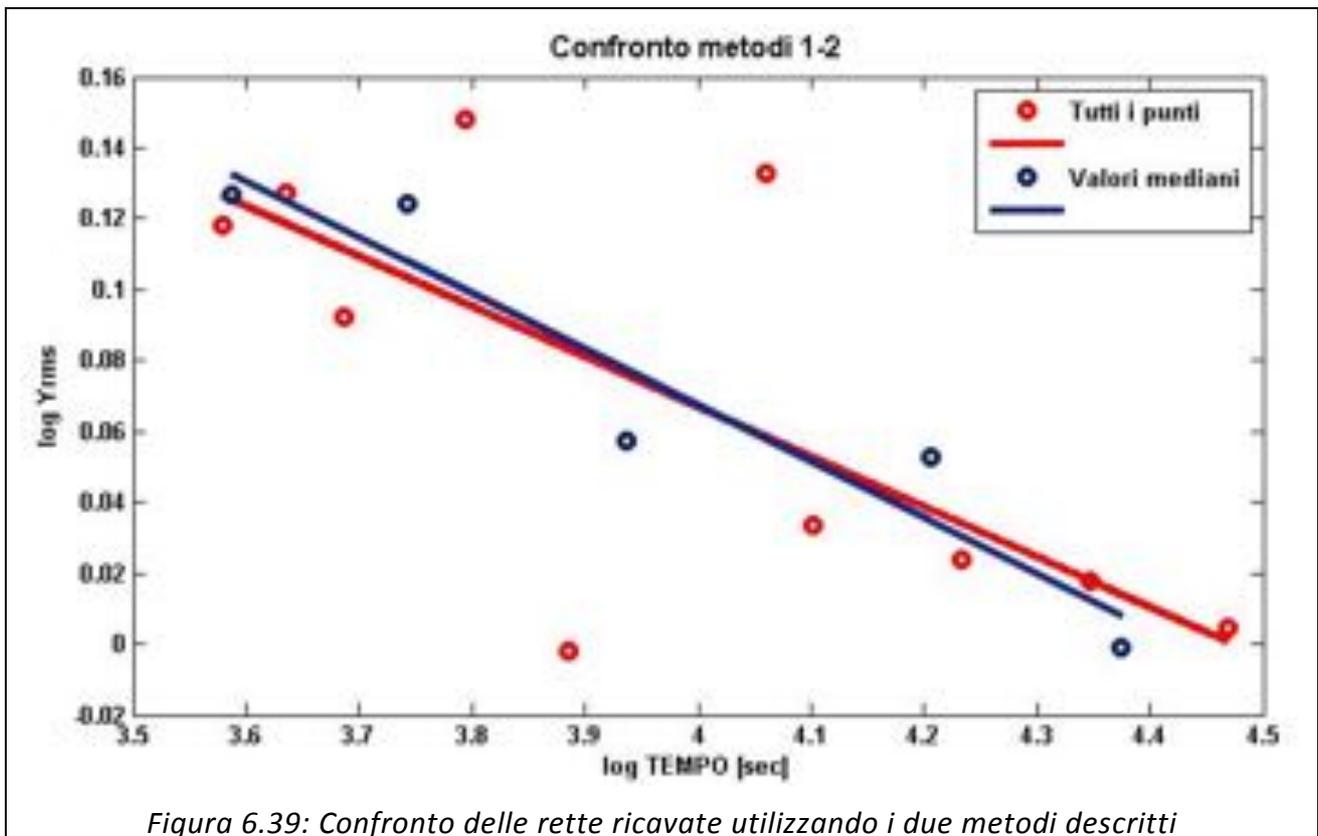
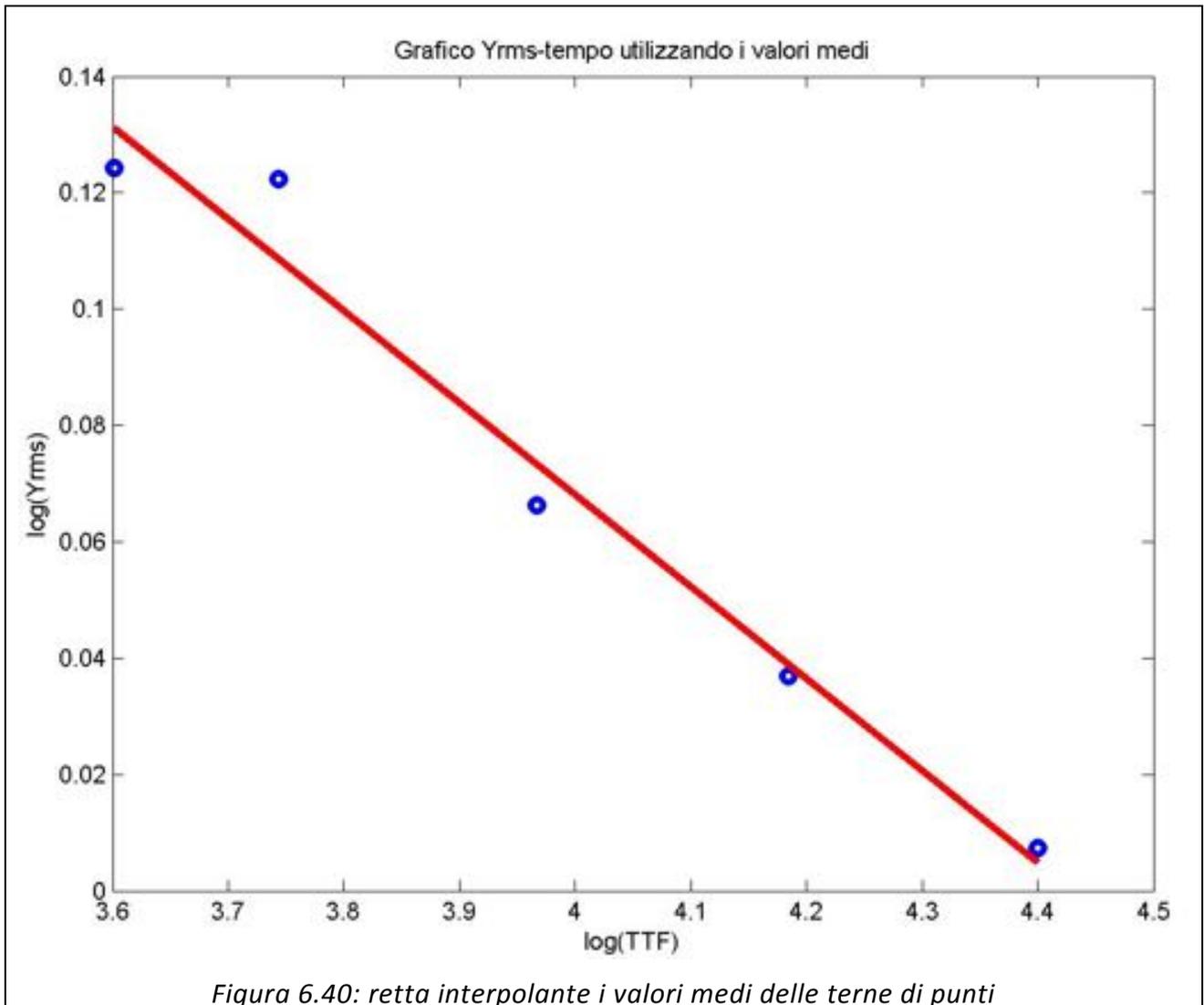


Figura 6.39: Confronto delle rette ricavate utilizzando i due metodi descritti

III° Metodo per la determinazione dell'esponente dell'equazione di Basquin

Data la significativa differenza nei risultati prodotti dai metodi precedentemente analizzati, per poter convergere sulla scelta di un unico valore di tale parametro, si determina un terzo valore di b , ricavato a partire dalla media dei valori RMS e dei TTF di ogni terna di provini a disposizione. Così facendo si ottengono 5 punti "fittizi" ricavati a partire dai dati reali, riportati in figura 6.40.



Il coefficiente angolare della retta rappresentata vale:

$$\mu_3 = -0.1579$$

Da cui si ha un valore di b uguale a:

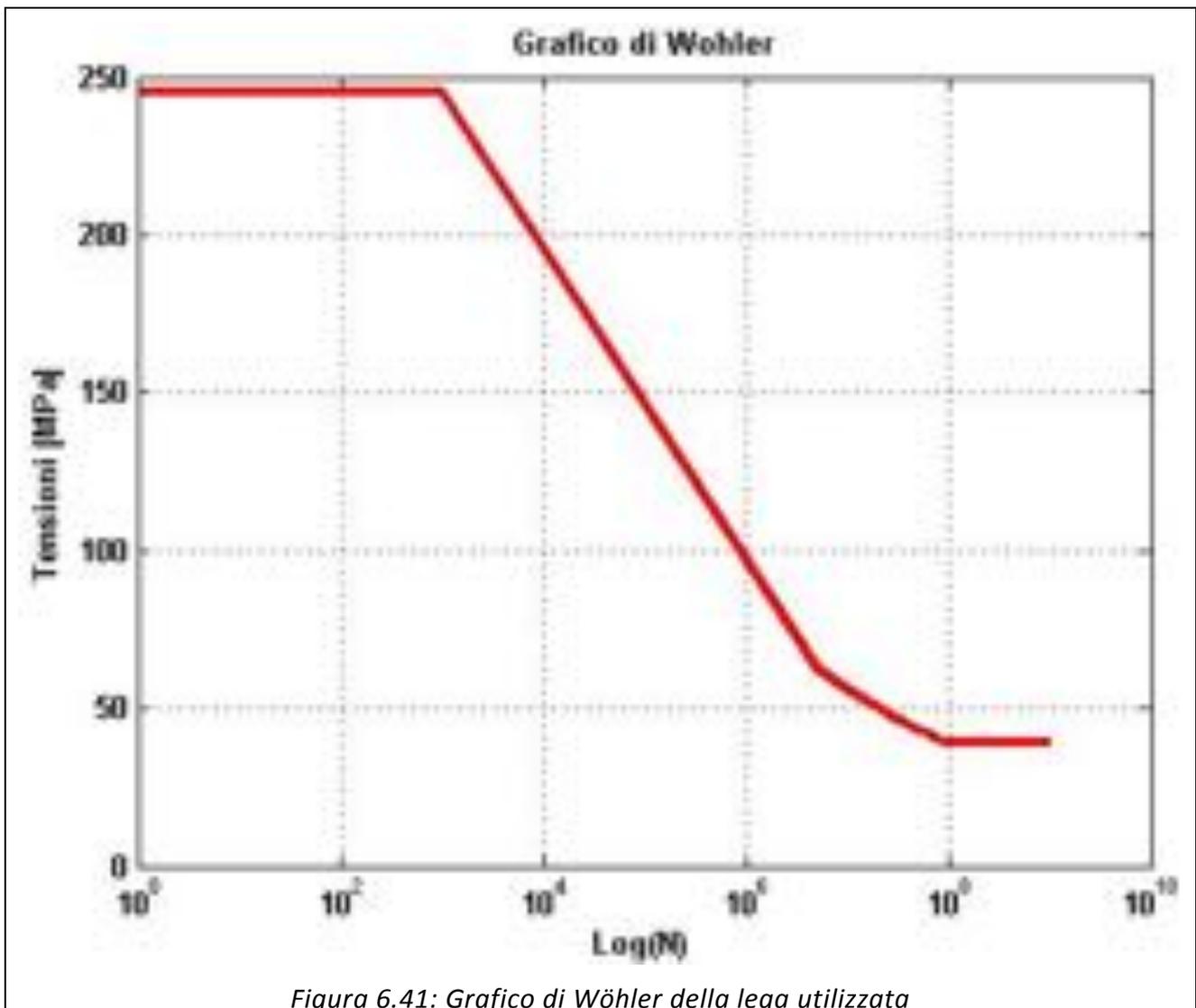
$$b_3 = -\frac{1}{\mu_3} = 6.3325$$

Conclusioni

Attraverso i metodi proposti si sono ottenuti 3 diversi valori del parametro b in esame, poiché esso verrà utilizzato all'interno dell'equazione dell'FDS, per confrontare il danno prodotto da profili aventi distribuzioni di probabilità differenti (vedi capitolo seguente), è necessario convergere ad un unico valore.

I metodi II e III tengono entrambi in considerazione l'aleatorietà del fenomeno studiato, presentano una dispersione ridotta dei punti se confrontata col 1° metodo e i valori ottenuti sono molto simili fra di loro, addirittura uguali se si approssimano alla prima cifra decimale. Sulla base di queste osservazioni viene adottato un valore del parametro $b=6.3$ in linea con i valori tipici di una lega di alluminio [5].

Utilizzando tale valore è così possibile riportare la curva di Wöhler della nostra lega.

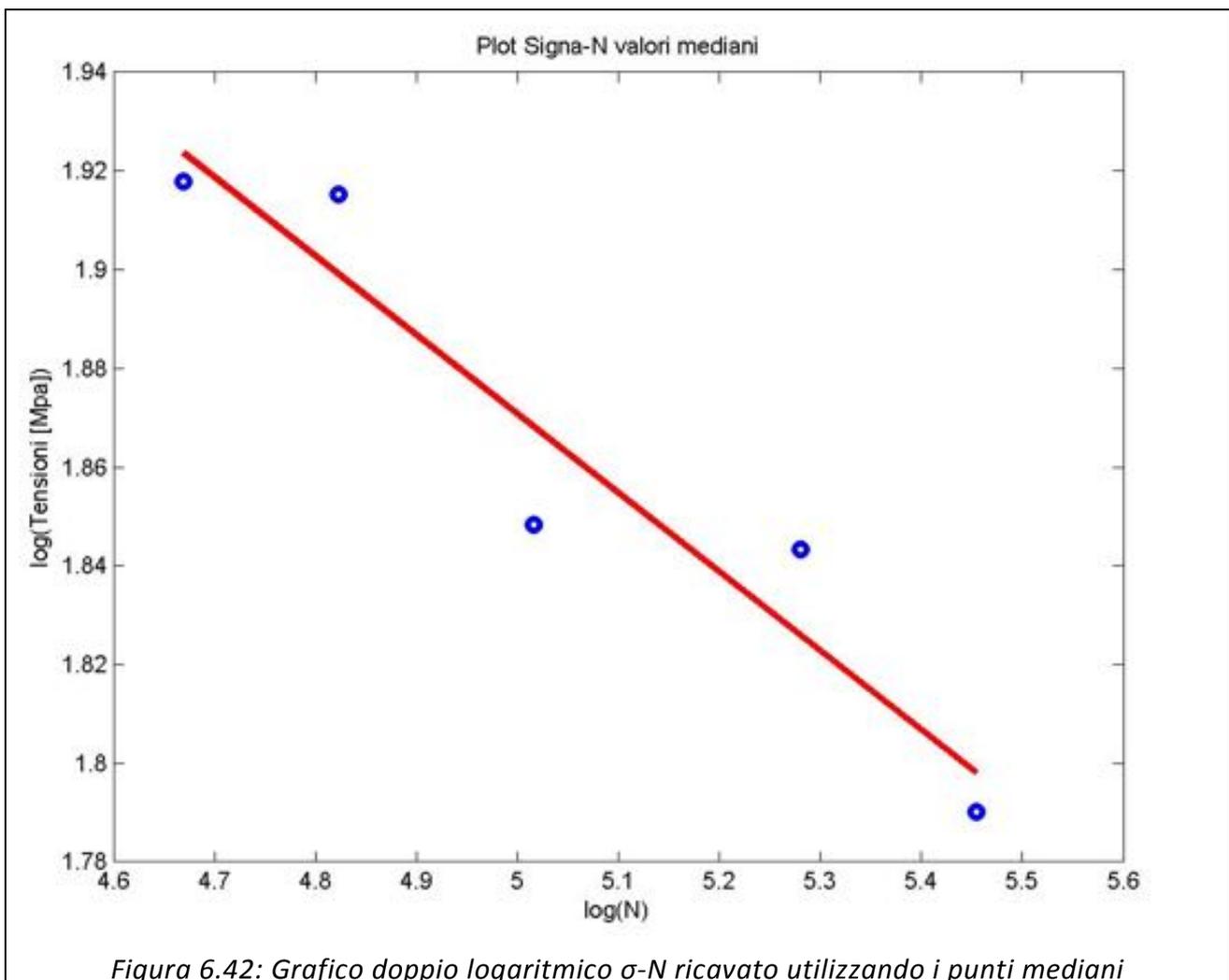


Osservazioni

Si utilizzano grafici doppio logaritmici Y_{RMS} -tempo piuttosto che σ -N poiché le coordinate σ sono fortemente influenzate dai valori del coefficiente di smorzamento ζ contenuto all'interno del fattore K_2 che lega i valori di Y_{RMS} alle tensioni.

Utilizzando valori di ζ , specifici per ogni provino e ricavati mediando i valori delle curve $\zeta(t)$ nel tratto centrale (Figura 6.34), si apprezzano differenze dell'ordine del 30% che portano ad una maggiore dispersione dei punti nei grafici σ -N rispetto agli Y_{RMS} -tempo. Questo è dovuto all'elevata dispersione dei punti nei grafici $\zeta(t)$ che va a ripercuotersi sui valori del fattore di smorzamento "medio" da essi calcolato.

Risultati più vicini a quanto ottenuto utilizzando i grafici Y_{RMS} -tempo, si hanno utilizzando una average frequency diversa da provino a provino ed avvalendosi di un fattore di smorzamento costante ed uguale a 0,0041, coincidente con lo ζ_{medio} del provino f041. Così facendo ed utilizzando il secondo metodo basato sui punti mediani, si è ottenuto un valore del parametro $b=6,25$, a scopo illustrativo si riporta il corrispondente grafico in coordinate doppio logaritmiche σ -N (figura 6.42).



CAPITOLO VII: Eccitazioni Gaussiane e Leptocurtiche, analisi della risposta

Introduzione ai test svolti

Tale attività di tesi è stata svolta all'interno di una collaborazione fra l'università di Bologna e l'azienda belga LMS. LMS è un'azienda facente parte del gruppo Siemens ed è leader nella realizzazione e sviluppo di software nel campo dei test d'affidabilità, rumorosità e vibrazioni. Questi software forniscono alle industrie soluzioni complete e integrate in cui molteplici strumenti di test analisi e reporting sono affiancati dalla possibilità di effettuare acquisizioni ad elevata velocità.

Tale studio ha lo scopo di verificare il comportamento di sistemi sollecitati da eccitazioni sia leptocurtiche che gaussiane, verificando se la "Papoulis rule" (che verrà introdotta in seguito) è valida anche utilizzando profili vibratorii ricavati misurando sollecitazioni reali sul campo.

I test facenti uso di vibrazioni riprodotte in modalità "random control" furono introdotti negli anni '50. Da allora essi costituiscono il cavallo di battaglia di numerose industrie che altrimenti faticerebbero a riprodurre le sollecitazioni subite da una vasta gamma di prodotti durante il loro esercizio [10].

Il controller in modalità random ha bisogno che vengano definiti:

- Valore RMS: definisce l'intensità delle vibrazioni riprodotte
- Distribuzione di potenza nel dominio delle frequenze (PSD)

essi vengono ricavati attraverso un processo di test tailoring ([CAPITOLO III](#)) grazie al quale è possibile sintetizzare i contenuti in frequenza delle sollecitazioni reali. Definiti entrambi i parametri di input il controller genera un profilo vibratorio nel dominio del tempo antitrasformando la PSD, durante questa fase viene adottata una distribuzione gaussiana dei picchi di accelerazione.

Questa tipologia di test ha prodotto un grande passo in avanti offrendo la possibilità di eccitare contemporaneamente più frequenze del componente in esame, nonostante ciò il danno prodotto non è ancora sufficientemente simile a quello prodotto durante le reali condizioni di esercizio.

Perché le attuali tecniche non sono ancora in grado di riprodurre sollecitazioni simili a quelle reali?

Va sempre più affermandosi l'idea che utilizzare una distribuzione gaussiana di probabilità, dei picchi di accelerazione, dovuta al passaggio dal dominio delle frequenze a quello del tempo, in certi contesti, non rispecchi le sollecitazioni reali ed in particolare sottostimi il danno da esse prodotto.

Secondo una distribuzione dei picchi di accelerazione normale, avente media nulla, si ha una probabilità pari al 31,7% che vi siano valori di accelerazione superiori o inferiori a $\pm\sigma$ (scarto quadratico medio), tale probabilità scende al 4,6% considerando valori superiori ed inferiori a $\pm 2\sigma$ e cala ulteriormente al 0,27% considerando $\pm 3\sigma$.

In presenza di sollecitazioni reali caratterizzate da fenomeni ad elevata intensità, si tende a distribuzioni di probabilità leptocurtiche (Kurtosis>3) le quali presentano una probabilità che si verificano fenomeni superiori o inferiori a $\pm 3\sigma$ superiore allo 0,27% caratteristico di una distribuzione gaussiana. Nella figura seguente è possibile apprezzare quanto appena detto, si osserva infatti che le “code” della curva leptocurtica hanno un valore dell’ordinata superiore a quella gaussiana.

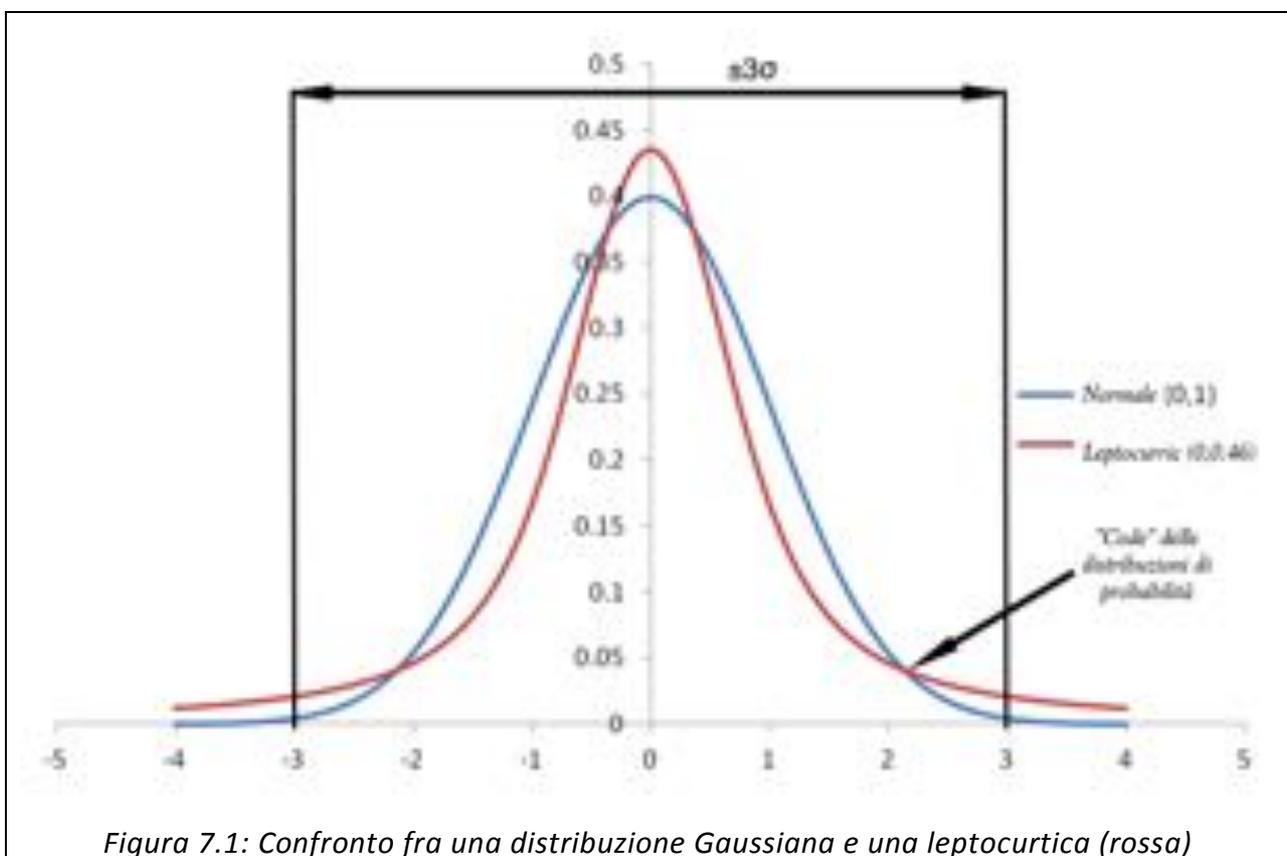


Figura 7.1: Confronto fra una distribuzione Gaussiana e una leptocurtica (rossa)

Poiché il “random control” implementato in Test.Lab 12.0 non è ancora in grado di replicare profili vibratorii caratterizzati da elevati valori di kurtosis [10], viene utilizzata la modalità “Single Axis Waferm Replication” (SAWR). Controllando shaker o tavole vibranti attraverso questo metodo, si “insegue” un profilo vibratorio “reale”, creato misurando direttamente sul campo le sollecitazioni del componente. Così facendo se il profilo tratto dalle misurazioni reali è caratterizzato da una distribuzione dei picchi di accelerazione leptocurtica anche l’eccitazione dello shaker del componente lo sarà.

I critici, tuttavia, sostengono che tale metodo non sia concettualmente corretto poiché la forma delle sollecitazioni replicate sarà sempre la stessa ed uguale a quella misurata sul campo non considerando così l'aleatorietà che caratterizza le sollecitazioni di molti componenti. Si prenda come esempio un'autovettura che percorra più giri di pista. Collocando degli accelerometri su di essa il profilo vibratorio misurato avrà una forma d'onda diversa da giro a giro. Questa variabilità utilizzando il profilo registrato in un solo giro andrà persa. Inoltre la mole di dati coinvolti rende arduo definire uno standard e a causa di ciò sono ancora poche le specifiche riguardanti la definizione degli input in "SAWR control".

Test ad elevati valori di Kurtosis

Test che prevedono l'impiego di profili leptocurtici permettono di testare i componenti utilizzando vibrazioni più realistiche.

Nonostante ciò, da numerosi studi [9,13] condotti utilizzando eccitazioni ad elevato valore di kurtosis, è emerso che la risposta del sistema tende ad avere una distribuzione gaussiana e per qualche motivo il sistema agisce come un filtro dei picchi a più elevata intensità.

Ma perché accade ciò?

Il teorema del limite centrale [9] offre una spiegazione del perché numerosi processi naturali mostrino comportamenti gaussiani o quasi gaussiani. Secondo tale teorema: "Siano $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ variabili indipendenti con la stessa distribuzione, con media μ_x e varianza σ^2 finite. La loro media campionaria \bar{X} vale:

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n X_i$$

Allora la variabile:

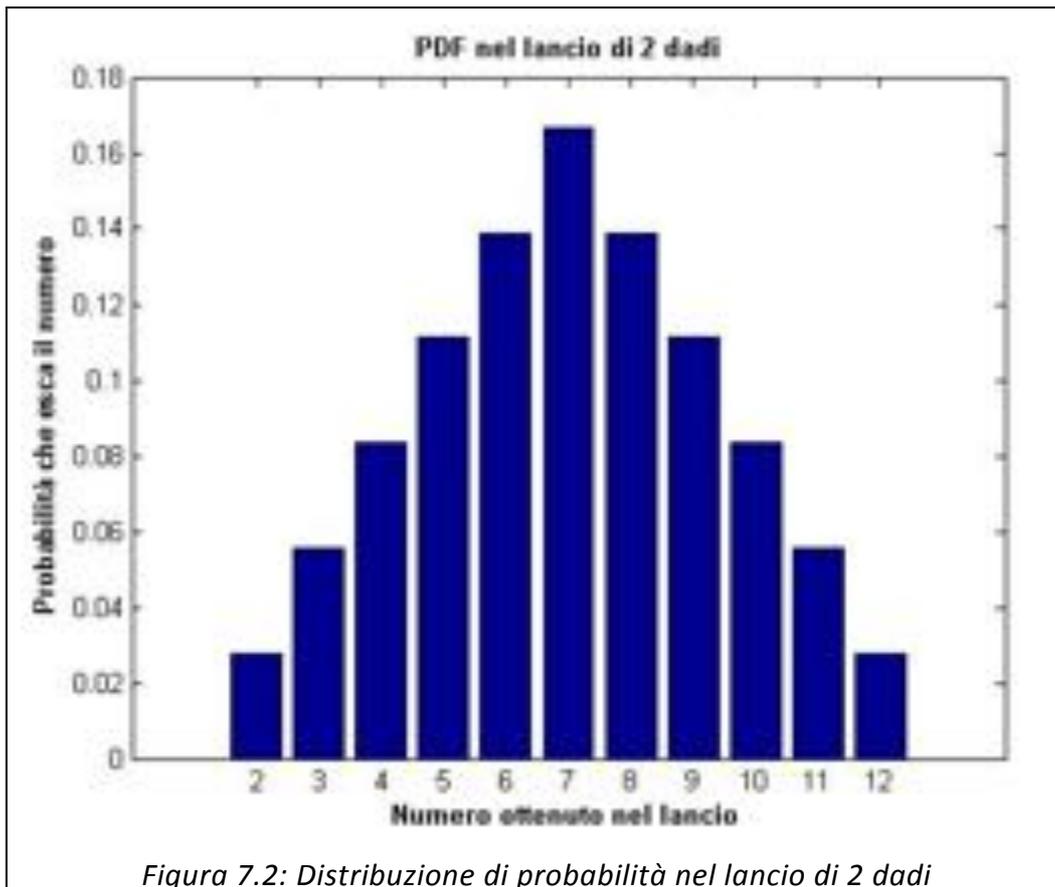
$$Z = \frac{\bar{X} - \mu}{\frac{\sigma}{\sqrt{N}}}$$

È una variabile la cui distribuzione di probabilità tende a una Gaussiana di media $\mu_x = 0$ e $\sigma^2=1$ ".

Ciò significa che la distribuzione di probabilità della somma (o media) di un elevato numero di variabili indipendenti, identicamente distribuite tende a una distribuzione di probabilità Gaussiana, indipendentemente dalla PDF delle singole variabili.

Per citare un esempio pratico di facile comprensione si può riportare l'esempio del lancio dei dadi [9].

Considerando il lancio di un solo dado la probabilità che esca un numero da 1 a 6 è costante e pari a 1/6, se invece si considera il lancio di 2 dadi si ha una distribuzione di probabilità pari a quella schematizzata in figura 7.2:



All'aumentare del numero di dadi la distribuzione di probabilità tende ad approssimare sempre più una distribuzione Gaussiana.

Ma cosa c'entra tutto questo con i test qui descritti?

Questa risposta è stata fornita dal Dr. Athanasios Papoulis (1921-2002), professore in ingegneria elettronica presso l'università di Brooklyn.

Nel libro che egli ha scritto nel 1962 "The Fourier Integral and its Application" Papoulis analizza gli input e gli output di un filtro passa banda e fornisce una dimostrazione analitica del perché il teorema del limite centrale descriva esattamente il fenomeno da lui studiato. Nello specifico l'atto di filtraggio può essere descritto da una convoluzione a sua volta descrivibile come una media ponderata dove i pesi alle differenti frequenze sono definiti dalla caratteristica del filtro. Tenendo presente ciò Papoulis arrivò a un'importante conclusione: "Quando un qualsiasi segnale aleatorio, avente una qualunque distribuzione di probabilità, viene filtrato attraverso un filtro passa banda, il segnale in output avrà una distribuzione di probabilità **tendente** a una gaussiana".

Analogamente a quanto descritto per i filtri passabanda i sistemi meccanici sono caratterizzati da una FRF che lega l'eccitazione alla risposta, tale caratteristica fa sì che il sistema agisca da filtro meccanico per tutte le frequenze al di fuori di quella naturale.

Definizione degli input

Di seguito verranno descritte le caratteristiche dei profili vibratorii utilizzati come input in termini di:

- Media μ_x
- Deviazione standard σ
- RMS
- Indice di Skewness γ_1
- Indice di Kurtosis γ_2

Oltre a questi parametri già descritti al capitolo II vengono introdotti:

- Crest Factor
- Turning Point

Crest Factor

Il “Crest Factor” viene calcolato valutando il valore assoluto del picco del segnale che si discosta maggiormente dal valor medio (μ_x), tale valore viene poi normalizzato dividendolo per l’RMS dell’intero segnale.

$$CF = \frac{\max|x - \mu_x|}{RMS(x)}$$

Poiché si riferisce a un valore puntuale basta avere un solo picco anomalo nel segnale per ottenere variazioni notevoli di tale parametro.

Turning Point

Il parametro Kurtosis fornisce una misura sulla larghezza della base della curva rappresentante la PDF.

Per valori dell’indice di Kurtosis pari a 3 si ha una distribuzione coincidente con quella Gaussiana per la quale l’integrale della PDF(x) valutato nell’intervallo $[\mu_x - 3\sigma, \mu_x + 3\sigma]$ vale 0.9973. Si ha quindi il 99,73% di probabilità che il valore della variabile casuale ricada all’interno di tale intervallo. Tanto maggiore è il valore di Kurtosis è tanto minore è tale probabilità.

Per valori del Kurtosis pari a $\gamma_2=3$ la distribuzione di probabilità risulta di tipo Gaussiano, con il 99.73% di valori compreso tra -3σ e $+3\sigma$. Per valori più elevati del Kurtosis una parte significativa di dati risulta distribuita lontana dal valor medio e la percentuale di valori compresi tra -3σ e $+3\sigma$ risulta minore del 99.73%.

Da studi effettuati [12] è emerso che la maggior parte del danno a fatica è da attribuirsi a sollecitazioni che superano di tre volte il valore della deviazione standard. Per tale motivo tanto maggiore è il valore di Kurtosis e tanto più elevato sarà l’affaticamento del componente causato dalle vibrazioni che lo eccitano.

Come si può ricavare la distribuzione di picchi di accelerazione superiore a $\pm 3\sigma$ nel tempo?

Per descrivere questo andamento si può utilizzare il numero di Turning Point.

Tale parametro viene ricavato su finestre temporali di durata prestabilita (in questo studio si adottano intervalli di 1 secondo) ed è pari al numero di picchi che supera il valore di $\pm 3\sigma$. Tanto più elevato sarà il numero totale di Turning Point del segnale e tanto più elevato sarà l'indice di Kurtosis.

Nota: Il numero di Turning Point, calcolato attraverso lo script riportato in [Appendice E](#) viene calcolato determinando il valore della deviazione standard dell'intero segnale. Tale valore è leggermente falsato a causa degli intervalli di tempo che intercorrono fra un run e l'altro. Ciò si traduce in un andamento anomalo delle distribuzioni di probabilità PDF ([Appendice F](#)) di tutti i segnali misurati, infatti tali curve mostrano un "becco" (Figura 7.3) per valori nulli di accelerazione. Avere una maggior distribuzione dei valori nell'intorno del valore medio ($\mu_x = 0$) comporta un minor valore della deviazione standard e di conseguenza si misurano più Turning Point del reale. Tuttavia tale errore risulta modesto poiché si parla di intervalli di 3-4 in assenza di vibrazioni ogni 600 secondi di sollecitazioni.

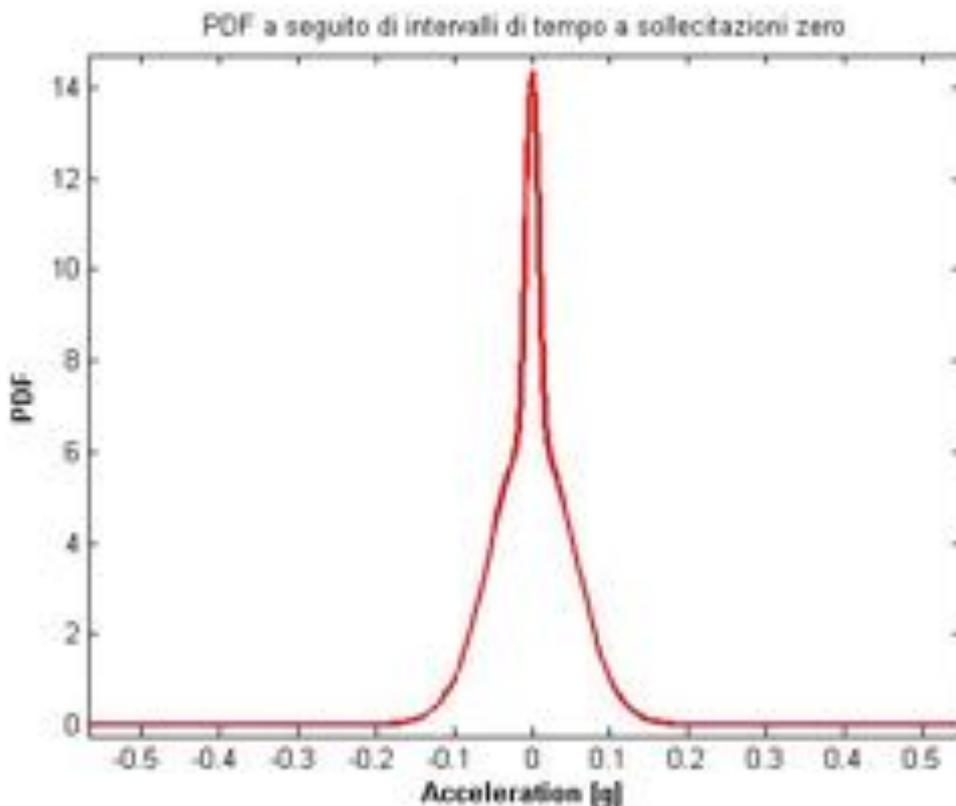
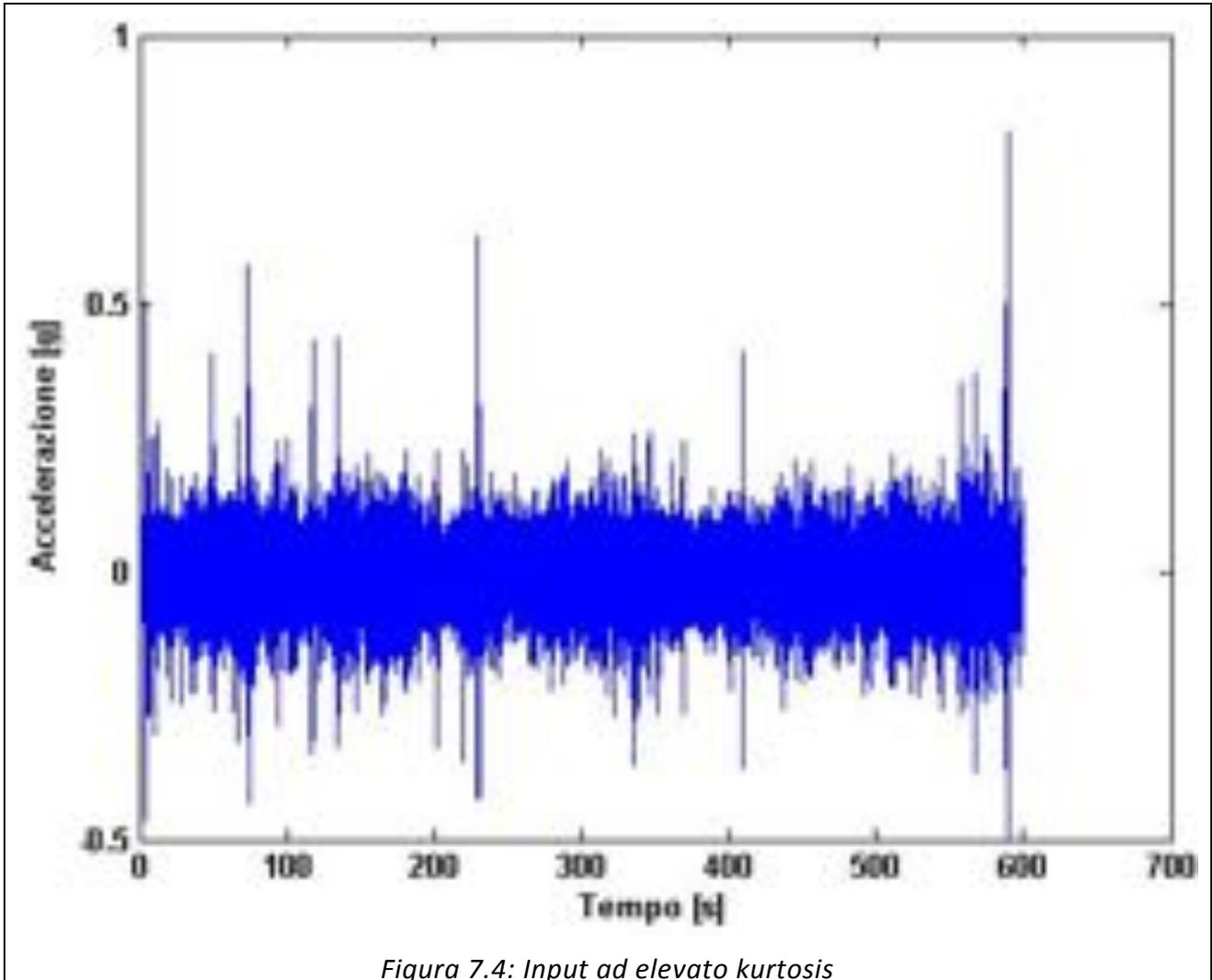


Figura 7.3: PDF conseguente al campionamento di intervalli di tempo in assenza di sollecitazioni

Input Leptocurtico “Road”

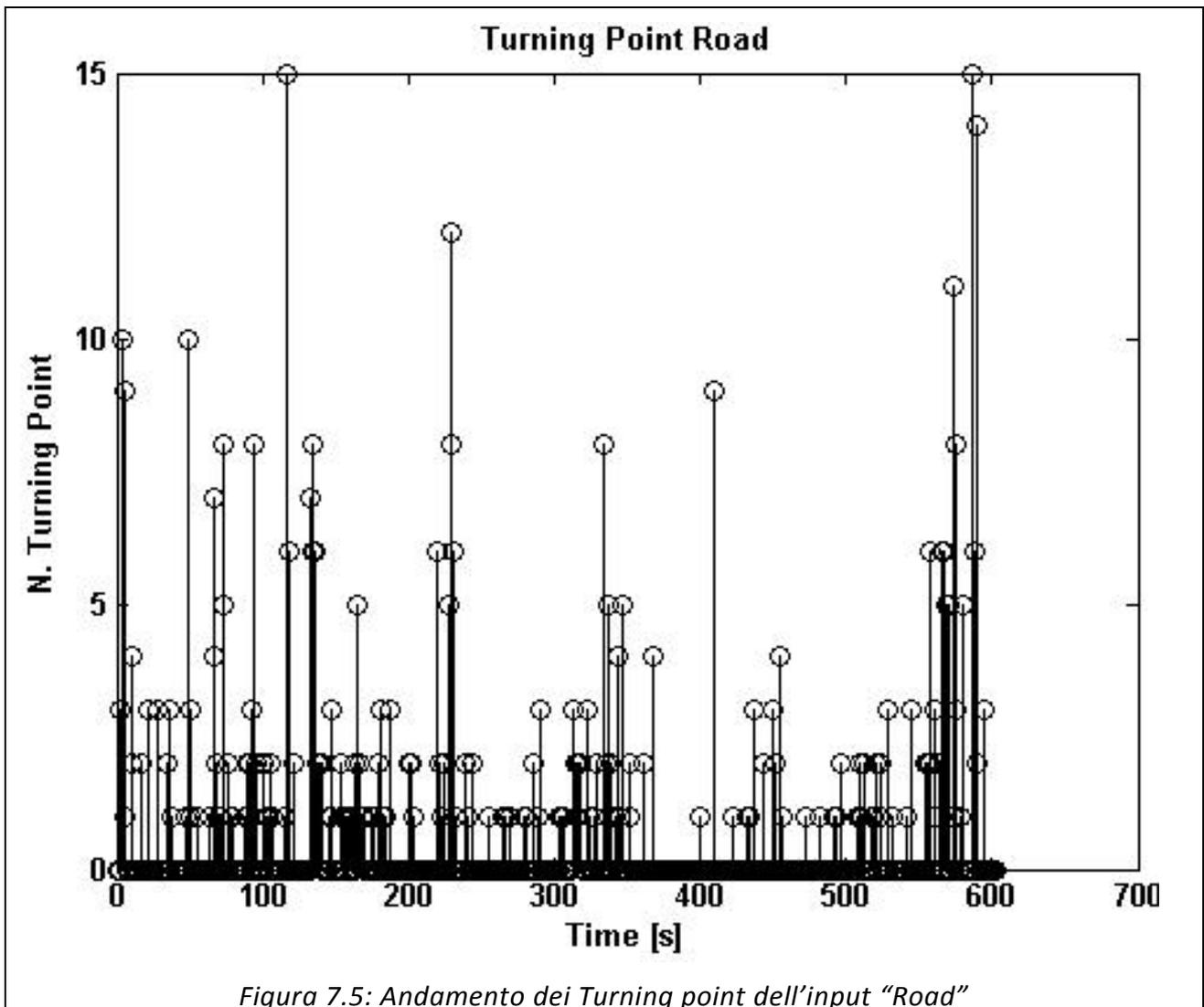
L'input ad elevato valore di kurtosis (denominato Road) è ottenuto misurando le accelerazioni reali di un'autovettura in moto. Così facendo si è ottenuto un profilo vibratorio come quello riportato in figura 7.4.



In tabella si riportano i parametri statistici più significativi caratterizzanti l'input:

Valore medio μ_x	5.4955e-07
Deviazione standard σ	0.0571
RMS	0.0571
Skewness	-0.0833
Indice di Kurtosis	6.565
Crest Factor	14.40
Turning Points	508

Nell'immagine 7.5 si riporta l'andamento dei Turning Point nel tempo, calcolandoli su finestre temporali di durata pari ad 1 secondo.



Input Gaussiano “Gauss”

A partire dal profilo ad elevato valore di Kurtosis (“Road”) determinato da sollecitazioni reali (misurate sul campo), se ne è costruito un secondo avente una distribuzione di probabilità dei picchi di accelerazione Gaussiana.

Per poter effettuare un confronto su come incida il valore del Kurtosis dell’eccitazione, il segnale generato deve possedere la stessa PSD (e quindi anche lo stesso valore RMS) del profilo da cui trae origine (Figura 7.6).

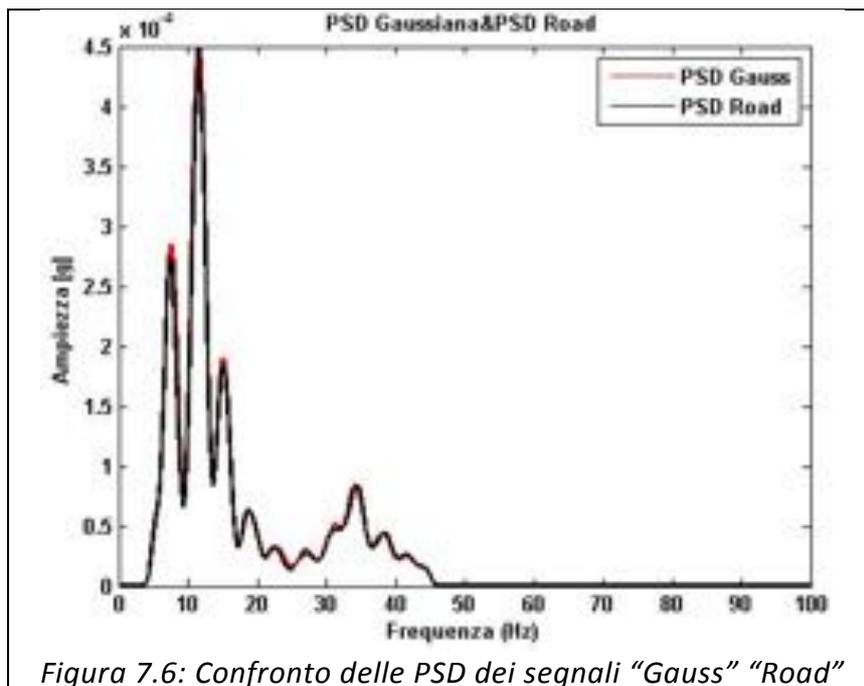


Figura 7.6: Confronto delle PSD dei segnali “Gauss” “Road”

Nota la PSD basta effettuare l’antitrasformata per ottenere un profilo vibratorio nel dominio del tempo con una distribuzione di probabilità Gaussiana (Figura 7.7).

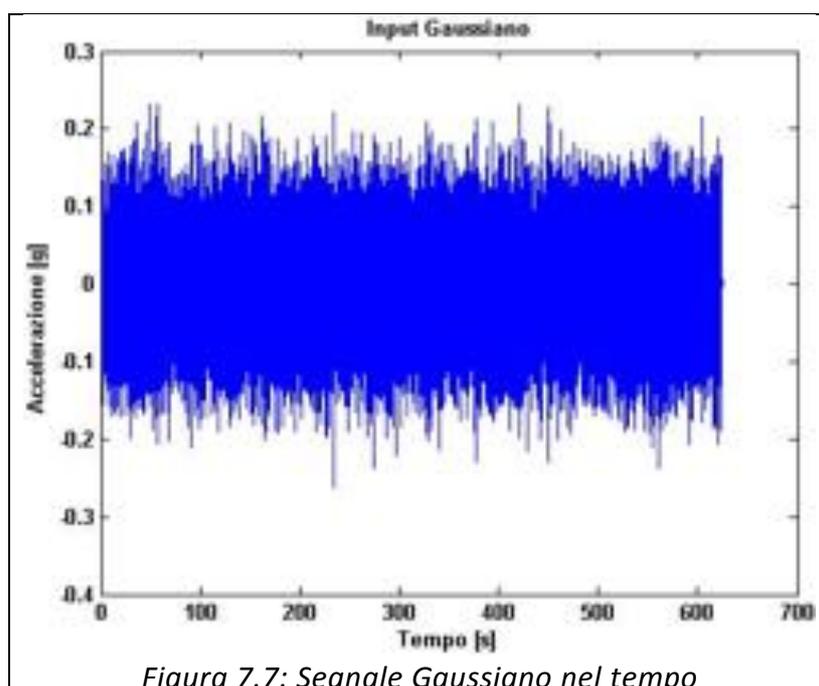


Figura 7.7: Segnale Gaussiano nel tempo

Nella seguente tabella si riportano i dati statistici caratterizzanti questa tipologia di input:

Valore medio μ_x	-1.9923e-06
Deviazione standard σ	0.0561
RMS	0.0561
Skewness	-0.0075
Indice di Kurtosis	3.0121
Crest Factor	4.1340
Turning Points	246

In figura 7.8 si riporta l'andamento dei turning points calcolandoli su finestre temporali di durata pari ad 1 secondo. Si osserva un valore massimo pari a 3 turning point ogni secondo, mentre per il "road" si raggiungono valori prossimi ai 15, questo comportamento è conforme a quanto già detto, per valori di Kurtosis elevati si ha una maggior probabilità che si verificano fenomeni di intensità superiore a $\pm 3\sigma$.

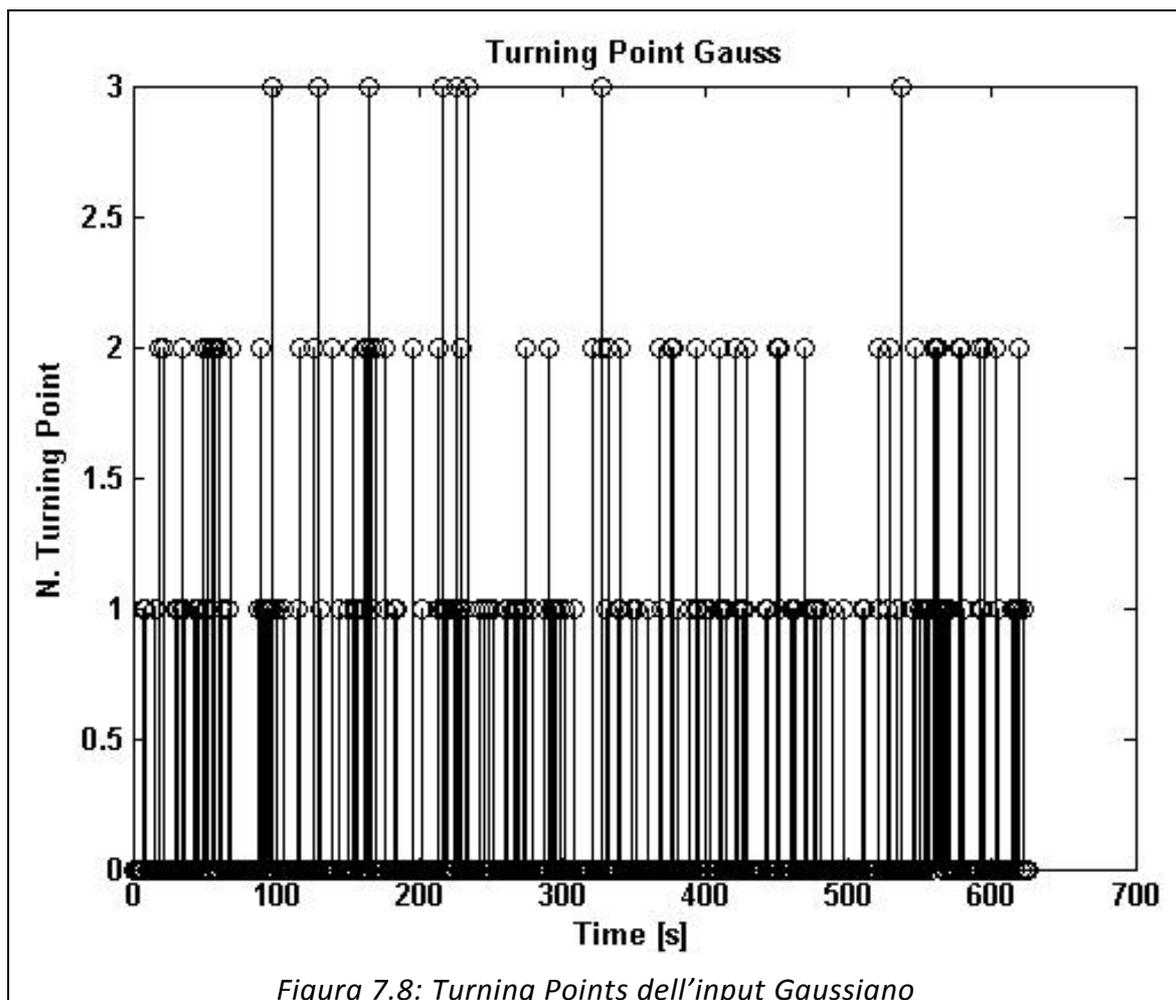


Figura 7.8: Turning Points dell'input Gaussiano

Descrizione dei test svolti

Per entrambi i profili descritti sono stati testati cinque provini aventi una frequenza naturale di circa 11,7 Hz. Tale frequenza coincide con il massimo assoluto della PSD dell'input, così facendo le sollecitazioni imposte al sistema risultano significative e si hanno tempi di rottura ragionevoli (per ulteriori informazioni a riguardo si rimanda al [CAPITOLO IV](#)).

Le caratteristiche fisiche del materiale sono state verificate e ricavate attraverso le prove riportate al [CAPITOLO VI](#), i cui valori sono:

- $E=64400$ MPa Modulo di Young
- $\sigma_y=175$ MPa Tensione di snervamento
- $\sigma_r=254$ MPa Tensione a rottura
- $b=6.3$ Esponente dell'equazione di Basquin

Comandando lo shaker presente in laboratorio utilizzando la modalità "SAWR control" si sono replicati i due profili, determinati nel dominio del tempo, fino a portare a rottura i pezzi. Utilizzando un set up come quello descritto al [CAPITOLO V](#) si sono così acquisiti i segnali di accelerazione dell'eccitazione e della risposta.

Si è scelto di testare cinque provini per ogni profilo vibratorio poiché ritenuti sufficienti a garantire una buona ripetibilità dei test e a valutare il grado di dispersione dei dati.

Oltre a questi dieci provini se ne sono testati altri due, uno per ogni input, strumentandoli con estensimetri in corrispondenza della sezione critica al fine di misurare i valori di deformazione e risalire così alle tensioni agenti su di essa.

Analisi degli effetti prodotti da vibrazioni leptocurtiche

Di seguito si descrive il processo di analisi effettuato sui provini testati, al fine di capire quali siano gli effetti prodotti da eccitazioni con diversi valori di kurtosis.

Per ogni provino sono stati calcolati i seguenti parametri:

- 1) Tempo a rottura (TTF) attraverso la determinazione del tempo a cui si verifica una variazione di frequenza naturale pari al 3%.
- 2) Andamento della curva $f_n(t)$.
- 3) Andamento della curva $\zeta(t)$.
- 4) Frequenza naturale iniziale, mediando i valori dei primi 10 punti della curva $f_n(t)$.
- 5) Smorzamento medio (determinato seguendo il metodo riportato al capitolo VI)
- 6) PSD di ogni canale
- 7) Spettrogrammi di ogni segnale
- 8) Parametri statistici di tutti e 5 i canali acquisiti, dell'accelerazione relativa e dello spostamento relativo [5,45] Hz:
 - a) Valor medio del segnale
 - b) Deviazione standard
 - c) RMS
 - d) Indice di Skewness
 - e) Indice di Kurtosis
 - f) Crest Factor
 - g) Turning Point calcolati sui primi 10 minuti con finestre temporali di 1 secondo

Analisi dei TTF

Dall'analisi dei tempi a rottura (TTF) è stato confermato quanto ci si aspettava: i provini sollecitati dall'input leptocurtico si rompono in un minor tempo rispetto ai provini sollecitati dal profilo gaussiano.

Infatti, le sollecitazioni ad elevato valore di kurtosis sono caratterizzate da un numero più elevato di picchi di accelerazione. Questi picchi ad elevata intensità si traducono in elevate tensioni in corrispondenza della sezione critica. A causa del legame esponenziale fra tensioni e numero di cicli, (descritto dalla regola di Miner e dall'equazione di Basquin), risulta evidente che i picchi di tensione siano la principale causa di danneggiamento del provino.

Di seguito viene riportata la tabella contenente i risultati dei provini testati con entrambi gli input a disposizione, i TTF sono stati determinati utilizzando il metodo del $\Delta f_n = -3\%$ (Capitolo VI).

Input "Road" RD_0	TTF [s]	Numero cicli*	Input "Gauss" GS_0	TTF	Numero cicli
12	25777	292005	71	72058	816282
14	16296	184603	72	21653	245288
15	19071	223488	73	43461	475355
16	21466	251555	74*	>40h	/
17	33220	363344	75	56265	659355
18	38753	438999	77*	>40 h	/
<p>*Provini 74 e 77 Fuori trend, superate le 40 ore si è deciso di interrompere la prova.</p> <p>*Provini RD017 e provini GS074 strumentati con estensimetri</p> <p>Provini corrispondenti ai TTF mediani, escludendo da tale calcolo i provini strumentati GS075 e RD016</p> <p>*N. cicli ottenuto moltiplicando l'average frequency dell'acc. Relativa per il TTF</p>					

Si osserva inoltre una dispersione dei risultati notevole soprattutto per quanto riguarda i valori relativi ai provini testati dall'eccitazione gaussiana.

Per giustificare tale comportamento sono state avanzate le seguenti ipotesi:

- I. L'elevato TTF dei provini RD_018 e GS_077 coincide con la fornitura di un nuovo lotto di provini, la cui finitura superficiale dei raccordi si presenta migliore rispetto a quella dei precedenti. Inoltre questi due provini sono stati ripuliti dal lubrificante utilizzando un panno umido che ha indotto ossido di alluminio sulla superficie, caratterizzato da un'elevata durezza e resistenza all'usura.
- II. I provini sottoposti ad eccitazioni gaussiane sono sollecitati da picchi di minore intensità la maggior parte dei quali genera valori di tensione prossimi al ginocchio della curva a fatica. Per questo motivo i provini "GS" hanno durate che risentono notevolmente delle tolleranze di lavorazione con cui sono stati realizzati i provini. Variazioni di pochi decimi di mm della geometria della sezione resistente si traducono in elevate differenze dei tempi di rottura.
- III. I provini RD017 e GS074 sono stati strumentati con estensimetri collocati in corrispondenza della sezione critica. Tale incollaggio si suppone agisca da "crack stopper", facendo sì che il provino RD017 resista più dei suoi predecessori mentre il provino GS_f074 non arrivi a rottura nemmeno dopo 40h.
- IV. Un'ulteriore causa della dispersione dei dati potrebbe essere legata alle vibrazioni torsionali del provino, tale problema verrà discusso in seguito facendo uso dei parametri statistici ricavati dal segnale contenente l'accelerazione trasversale (CH22).

Di seguito viene riportato il confronto tra le curve $f_n(t)$ una ricavata da un provino "GS" e l'altra da un "RD". Questi due provini (RD_016 e GS_075) vengono scelti prendendo il valore mediano del TTF, escludendo da tale selezione i provini fuori trend e quelli strumentati con estensimetri.

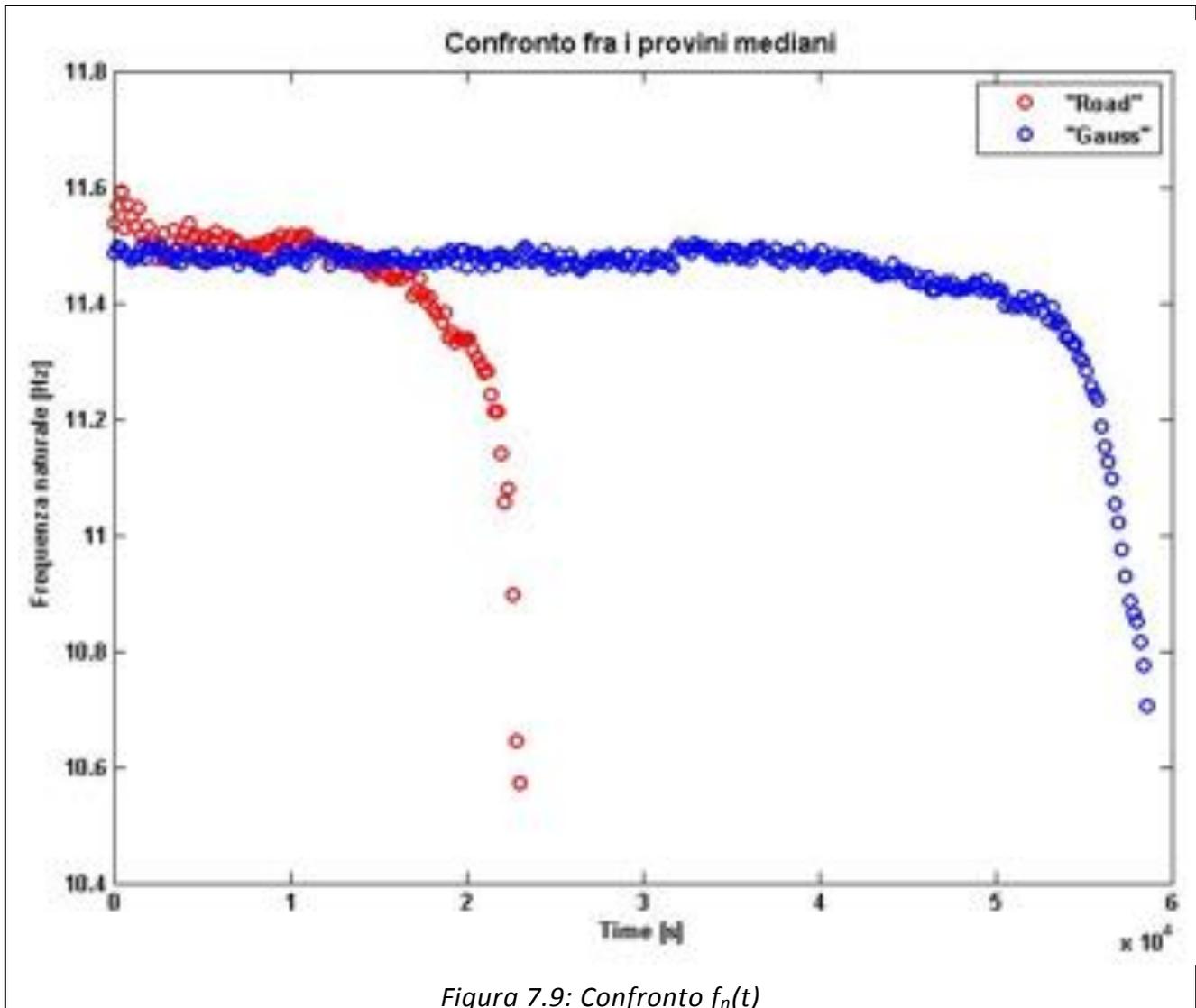


Figura 7.9: Confronto $f_n(t)$

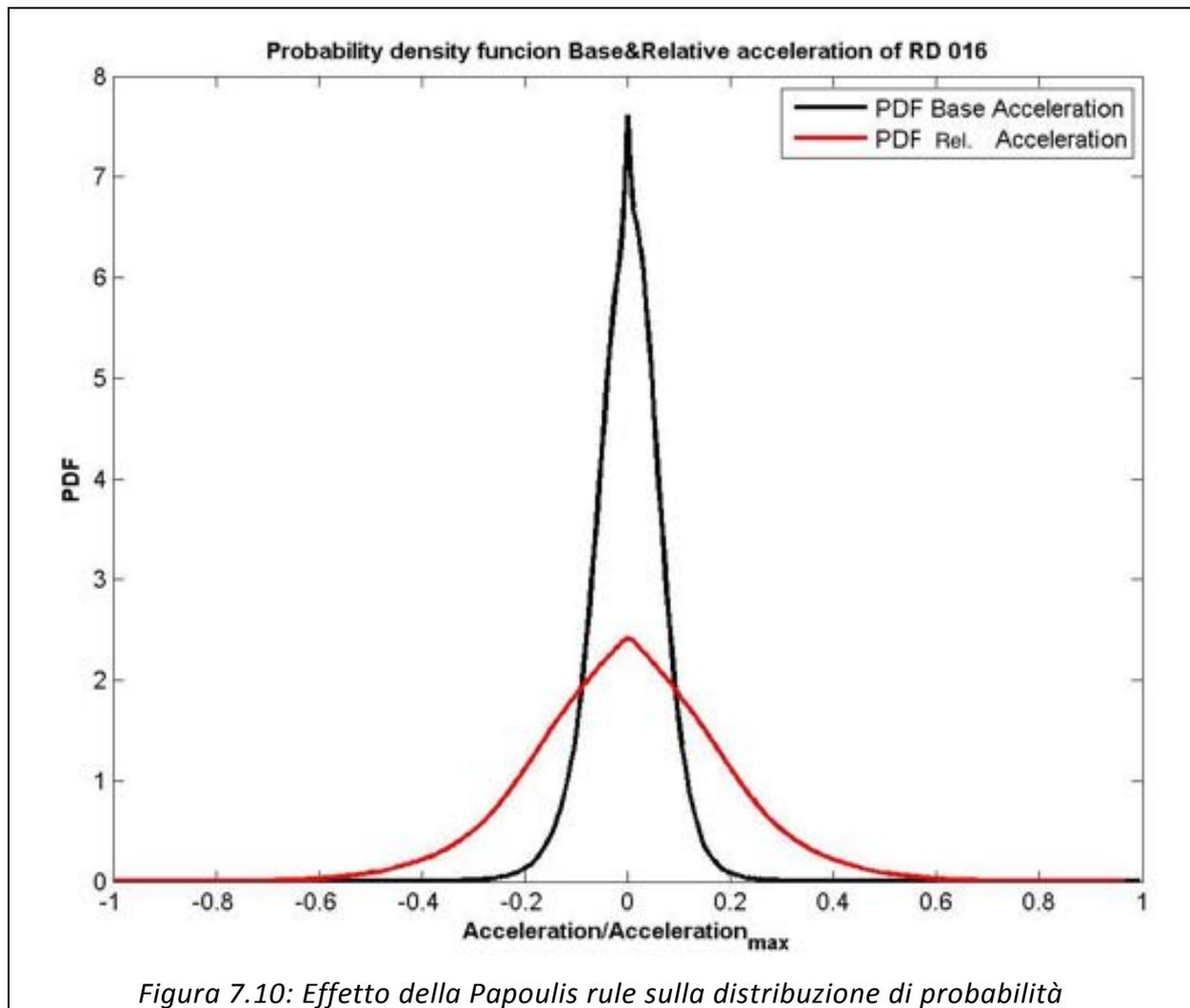
Analisi dei parametri statistici

Di seguito si riporta una tabella contenente i parametri statistici ritenuti più importanti per tutti i provini testati, sia per l'input leptocurtico "RD" che per quello gaussiano "GS".

Provincia	TTF [s]	Average Frequency Acc. Rel. [Hz]	Ncidi	Frequenza a naturale iniziale [Hz]	Smorzamento	Accelerazione Base			Accelerazione Massa			Accelerazione Relativa			Spostamento			Turning Point eccitazione	Turning Point risposta
						RMS [g]	Indice Kurtosis	Crest Facto f	RMS [g]	Indice Kurtosis	Crest Facto f	RMS [g]	Indice Kurtosis	Crest Factor	RMS [mm]	Indice Kurtosis	Crest Facto f		
RD_0																			
12	25777	11,33	292005	11,62	0,0039	0,0583	6,59	14,43	0,848	3,66	69,47	0,849	3,65	68,79	1,539	3,66	5,08	521	421
14	16296	11,33	184603	11,61	0,0034	0,0575	6,67	14,35	0,964	3,28	71,66	0,964	3,27	71,06	1,751	3,27	4,65	519	270
15	19071	11,72	223488	11,57	0,0036	0,0569	6,68	14,63	0,916	3,44	74,54	0,917	3,43	75,08	1,684	3,44	5,06	497	217
16	21466	11,72	251555	11,55	0,0042	0,0557	6,68	14,84	0,804	3,65	72,57	0,805	3,65	73,69	1,487	3,67	5,46	503	202
17	13220	10,94	163344	11,17	0,0044	0,0565	6,68	14,56	0,797	3,65	66,55	0,794	3,65	67,99	1,507	3,72	4,94	511	128
18	18753	11,33	438999	11,64	0,0052	0,0571	6,63	14,41	0,730	3,87	69,05	0,731	3,87	69,12	1,315	3,89	5,89	520	414
Nota: i valori relativi allo spostamento relativo sono riferiti al segnale avendo unità di misura [mm]																			
Valori medi TTF				Prova Strumentali con estensimetri															
Provincia	TTF [s]	Average Frequency Acc. Rel. [Hz]	Ncidi	Frequenza a naturale iniziale [Hz]	Smorzamento	Accelerazione Base			Accelerazione Massa			Accelerazione Relativa			Spostamento			Turning Point eccitazione	Turning Point risposta
G5_0						RMS [g]	Indice Kurtosis	Crest Facto f	RMS [g]	Indice Kurtosis	Crest Facto f	RMS [g]	Indice Kurtosis	Crest Factor	RMS [mm] <td>Indice Kurtosis</td> <td>Crest Facto f</td>	Indice Kurtosis	Crest Facto f		
71	72058	11,33	816282	11,61	0,0032	0,0556	3,07	9,18	0,814	3,11	60,65	0,815	3,10	60,72	1,479	3,10	4,69	264	139
72	21653	11,33	245288	11,68	0,0030	0,0576	3,06	4,73	1,008	2,84	64,42	1,010	2,84	64,61	1,813	2,81	5,09	264	107
73	43461	10,94	475355	11,33	0,0054	0,0560	3,07	9,22	0,755	3,12	52,52	0,757	3,11	52,48	1,437	3,12	14,02	294	222
74	17055	11,33	419517	11,62	0,0064	0,0556	3,05	4,48	0,658	3,10	48,40	0,657	3,10	48,31	1,198	3,13	4,09	253	192
75	56265	11,72	659355	11,49	0,0034	0,0544	3,06	4,54	0,847	2,99	62,63	0,847	2,98	62,91	1,569	3,00	4,21	257	146
77	72838	11,33	825118	11,62	0,0048	0,0557	3,06	8,63	0,722	3,15	54,87	0,723	3,15	54,59	0,000	0,00	0,00	265	227

Ciò che si evince dall'analisi dei dati è che a fronte di un input ad elevato valore dell'indice di kurtosis ($\gamma_2=6,56$) il valore della risposta tende ad assumere una distribuzione di probabilità gaussiana per la quale l'indice di kurtosis vale $\gamma_2=3$, ovvero il sistema agisce da filtro meccanico attenuando i valori dei picchi di accelerazione.

In figura 7.10 si mostra un confronto fra la distribuzione di probabilità dell'eccitazione e della risposta, per effettuare tale confronto i valori di accelerazione in ascissa sono stati normalizzati rispetto al loro valore massimo.



Conclusioni

Analizzando i valori dell'indice di kurtosis dell'eccitazione e della risposta si può affermare che la "regola di Papoulis" risulta valida anche se i profili vibratorii in input sono una replica delle accelerazioni ricavate da misurazioni reali.

Analisi della forma modale torsionale

Dall'analisi modale condotta agli elementi finiti si è osservato che il primo modo di vibrare della forma modale torsionale ha una frequenza prossima a 35 Hz (Capitolo IV).

Idealmente le vibrazioni verticali della base dello shaker non dovrebbero eccitare questo modo di vibrare, tuttavia poiché non si ha una simmetria perfetta del sistema in seguito a:

- Tolleranze geometriche
- Collegamento manuale dei componenti sistema
- Cablaggio asimmetrico dei sensori

il provino potrebbe vibrare anche a torsione.

Osservando la forma delle PSD della risposta in scala logaritmica si osservano infatti picchi anche a 35 Hz imputabili alle vibrazioni torsionali: si vuole quindi analizzare in maniera più approfondita tale contributo così da verificare se è imputabile a questo fenomeno la dispersione nei TTF dei provini.

Nella seguente tabella viene riportata un'analisi dedicata allo studio degli effetti delle vibrazioni torsionali sulla vita a fatica:

Provino GS_0	TTF	RMS Acc. Torsionale	Kurtosis Eccitazione (Base)	Kurtosis dell'accelerazione torsionale
71	72058	0,1449	3,074	4,974
72	21653	0,0162	3,062	5,262
73	43461	0,0477	3,065	7,625
74	>40h	0,0229	3,045	6,647
75	56265	0,0206	3,063	12,572
77	>40h	0,0268	3,058	10,754
Strumentati con estensimetri				
Provino RD_0	TTF	RMS Acc. Torsionale	Kurtosis Eccitazione (Base)	Kurtosis dell'accelerazione torsionale
12	25777	0,0196	6,593	4,305
14	16296	0,0368	6,668	4,719
15	19071	0,0998	6,677	3,988
16	21466	0,0364	6,679	6,320
17	33220	0,0613	6,679	11,987
18	38753	0,0275	6,628	7,647

Osservando i dati riportati non vi è una corrispondenza biunivoca fra i valori dei parametri statistici misurati sul segnale dell'accelerazione trasversale e i TTF, è quindi impossibile giungere a conclusioni che leghino tali parametri alla dispersione dei risultati calcolati.

Inoltre analizzando in maniera più approfondita l'andamento del kurtosis nel tempo dell'accelerazione trasversale e confrontandolo con quello dell'eccitazione (Figura 7.11) si è visto un andamento indipendente fra le due grandezze, tale comportamento ha senso in quanto le vibrazioni torsionali sono indipendenti dall'eccitazione verticale dello shaker.

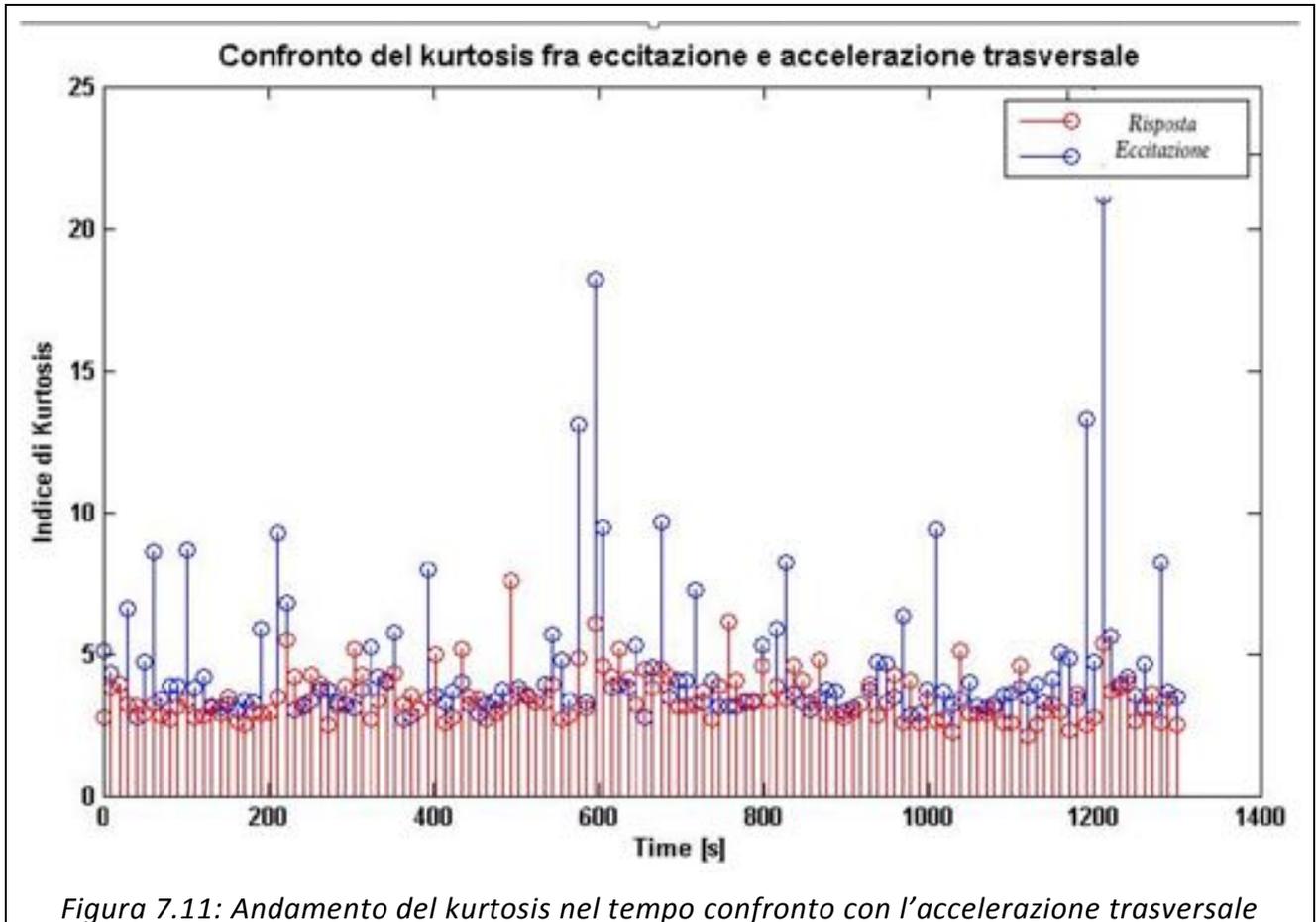


Figura 7.11: Andamento del kurtosis nel tempo confronto con l'accelerazione trasversale

Analisi dei provini strumentati con estensimetri

Affinché i test risultino validi, la causa della rottura deve essere l'affaticamento del provino, sebbene i TTF e le durate espresse in numero di cicli ci diano già una conferma della bontà delle prove si vuole comunque effettuare un'ulteriore verifica per essere certi che le tensioni in ogni intervallo si mantengano sufficientemente al di sotto della tensione di rottura ($\sigma_r=245$ MPa).

Per compiere tale verifica si sceglie di strumentare i provini con due estensimetri, collocandoli su entrambe le superfici della sezione critica e adottando una configurazione a mezzo Ponte di Wheatstone (Figura 7.12-7.13).

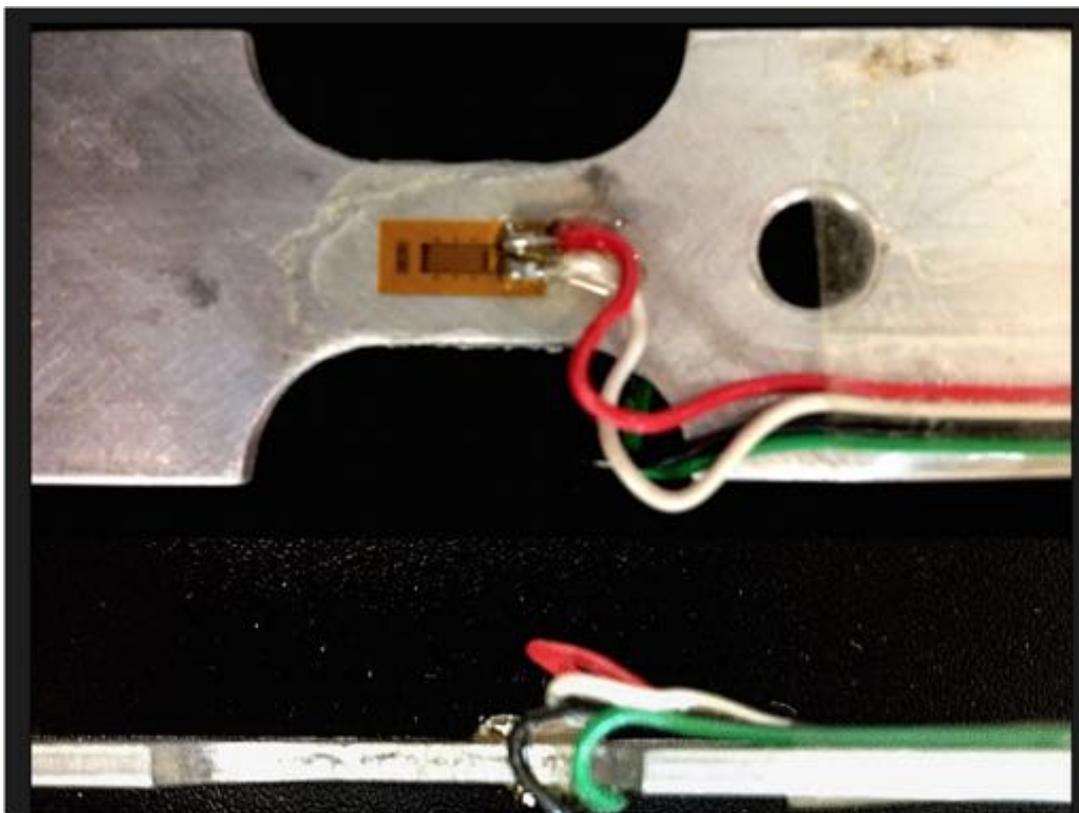


Figura 7.12: Estensimetri incollati sul provino

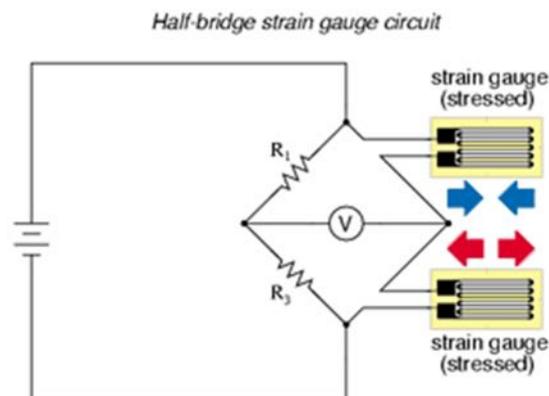


Figura 7.13: Schematizzazione di collegamento a mezzo ponte di Wheatstone

I due campioni strumentati sono sollecitati uno dall'input leptocurtico (RD_f017) mentre l'altro dal profilo vibratorio gaussiano (GS_f074).

Per entrambi i provini si campionano i segnali dell'estensimetro ad una frequenza pari a 200Hz (layout riportato al Capitolo V). Dai valori di deformazione misurati si ricavano i valori di tensione usufruendo della caratteristica $\sigma - \varepsilon$ determinata nella prova di trazione uniassiale del provino ad "osso di cane" 1.

Risultati

Di seguito si riportano i risultati ricavati dal provino RD_017 poiché esso, sollecitato da un input leptocurtico, presenta valori dei picchi di accelerazione più elevati e di conseguenza deformazioni e tensioni maggiori (l'analisi del provino GS074 è riportata in appendice F).

I segnali in tensione (Volt) dell'estensimetro sono opportunamente convertiti in valori di deformazione in $\mu\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 10^6$, in figura si riporta l'andamento di questa grandezza.

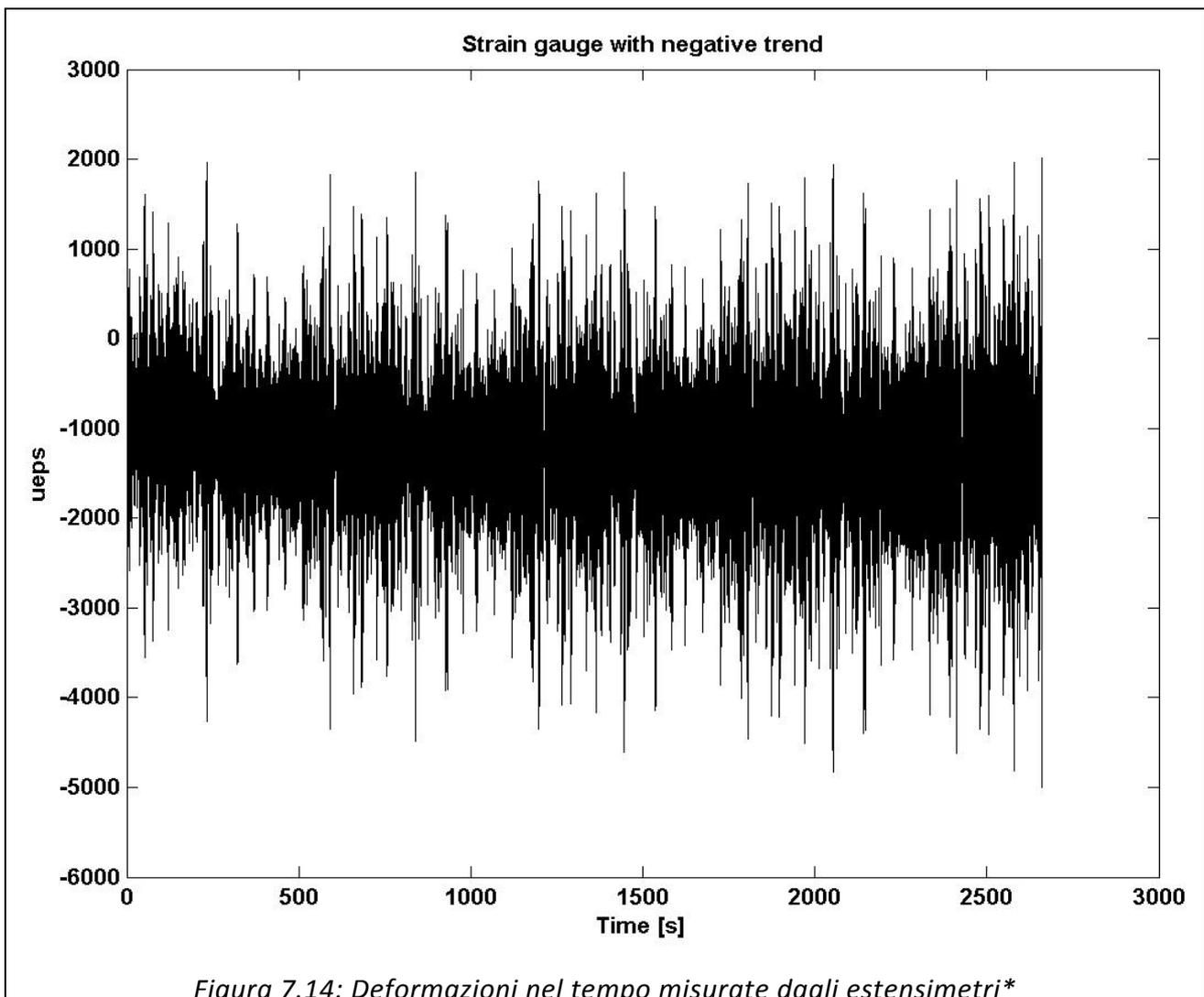


Figura 7.14: Deformazioni nel tempo misurate dagli estensimetri*

Questo segnale presenta un offset di $760 \mu\epsilon$, tale scostamento dallo zero è dovuto alla deformazione provocata dalla forza peso agente sulla massa del baricentro, infatti dalla teoria si ricava:

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{6 \cdot M_f}{b \cdot h^2} = \frac{6 \cdot P \cdot l}{b \cdot h^2 \cdot E} = \frac{6 \cdot 0.495 \text{ Kg} \cdot 9.806 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 75.5 \text{ mm}}{10 \cdot 2^2 \text{ mm}^2 \cdot 64500 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} = 850 \cdot 10^{-6}$$

Oltre alla presenza di questo offset è apprezzabile anche un trend negativo dovuto allo snervamento del materiale. Per valori di tensione superiori a 175 MPa il provino si deforma plasticamente e i valori dell'estensimetro ne risentono. A tale deformazione non è però associata alcuna tensione ed è quindi lecito eliminarla dal segnale attraverso l'algoritmo riportato in appendice F. Si pensi ad un provino piegato appoggiato su un tavolo, l'estensimetro misura deformazioni seppure non vi siano applicate tensioni.

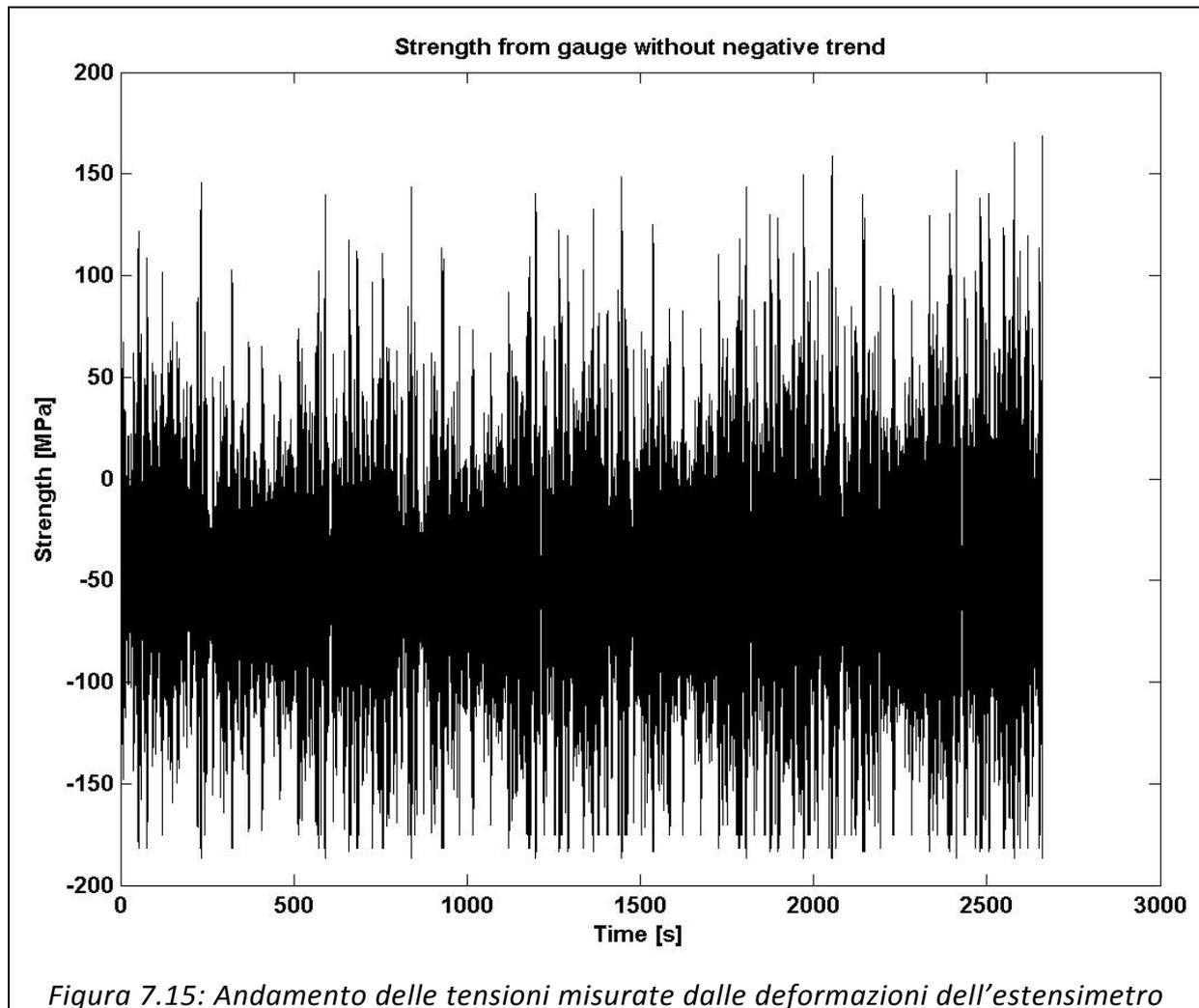
*Nota: Tale segnale ha una durata di soli 50 minuti a fronte di una prova della durata di nove ore poiché i collegamenti degli estensimetri si sono rotti per affaticamento.

Determinazione dei valori di tensione

Per determinare il valore delle tensioni viene quindi utilizzato il comando "detrend" col quale il software Matlab elimina il trend negativo e sottrae anche l'offset dal segnale, quest'ultimo passaggio non è corretto poiché l'offset di $760 \mu\epsilon$ causato dalla forza peso genera tensioni e viene quindi riaggiunto.

A partire dal segnale dell'estensimetro (ripulito dal trend negativo) ed estrapolando per ogni punto di tale vettore il rispettivo valore di tensione usando la curva $\sigma - \epsilon$ (Figura 6.26) si è ottenuto un andamento delle tensioni nel tempo come quello illustrato in figura Figura 7.15.

I valori delle tensioni calcolati presentano valori dei picchi superiori al limite di snervamento (175 MPa) ma sono molto inferiori rispetto ai valori di tensione a rottura (245 MPa), si può quindi affermare che la rottura avviene per fatica e i test effettuati si possono ritenere corretti. La tendenza a valori più elevati delle tensioni negative è causata dalla componente di deformazione statica di $760 \mu\epsilon$:



Validazione del metodo di calcolo delle tensioni a partire dai segnali di accelerazione

Dai valori delle tensioni “ T_{est} ” ricavate utilizzando le deformazioni misurate attraverso gli estensimetri, si vuole verificare la validità del metodo proposto al capitolo VI col quale si ricavava il valore delle tensioni “ $T_{sp.rel.}$ ” agenti sulla sezione critica, questo valore è ricavato utilizzando i segnali dello spostamento relativo calcolati per doppia integrazione delle accelerazioni relative fra risposta ed eccitazione (Figura 7.16).

Per poter effettuare correttamente tale confronto è stato necessario introdurre un offset anche nelle deformazioni misurate attraverso lo spostamento relativo. L'offset aggiunto non è di $760 \mu\epsilon$ bensì di $850 \mu\epsilon$ poiché in assenza degli estensimetri è questo il valore a cui si giunge utilizzando le equazioni ricavate dalla teoria.

Calcolando l'errore rms percentuale fra i due valori di tensione nel tempo si ha:

$$Errore_{RMS} = \frac{rms(T_{est} - T_{sp.rel})}{rms(T_{est})} \cdot 100 = 11,3\%$$

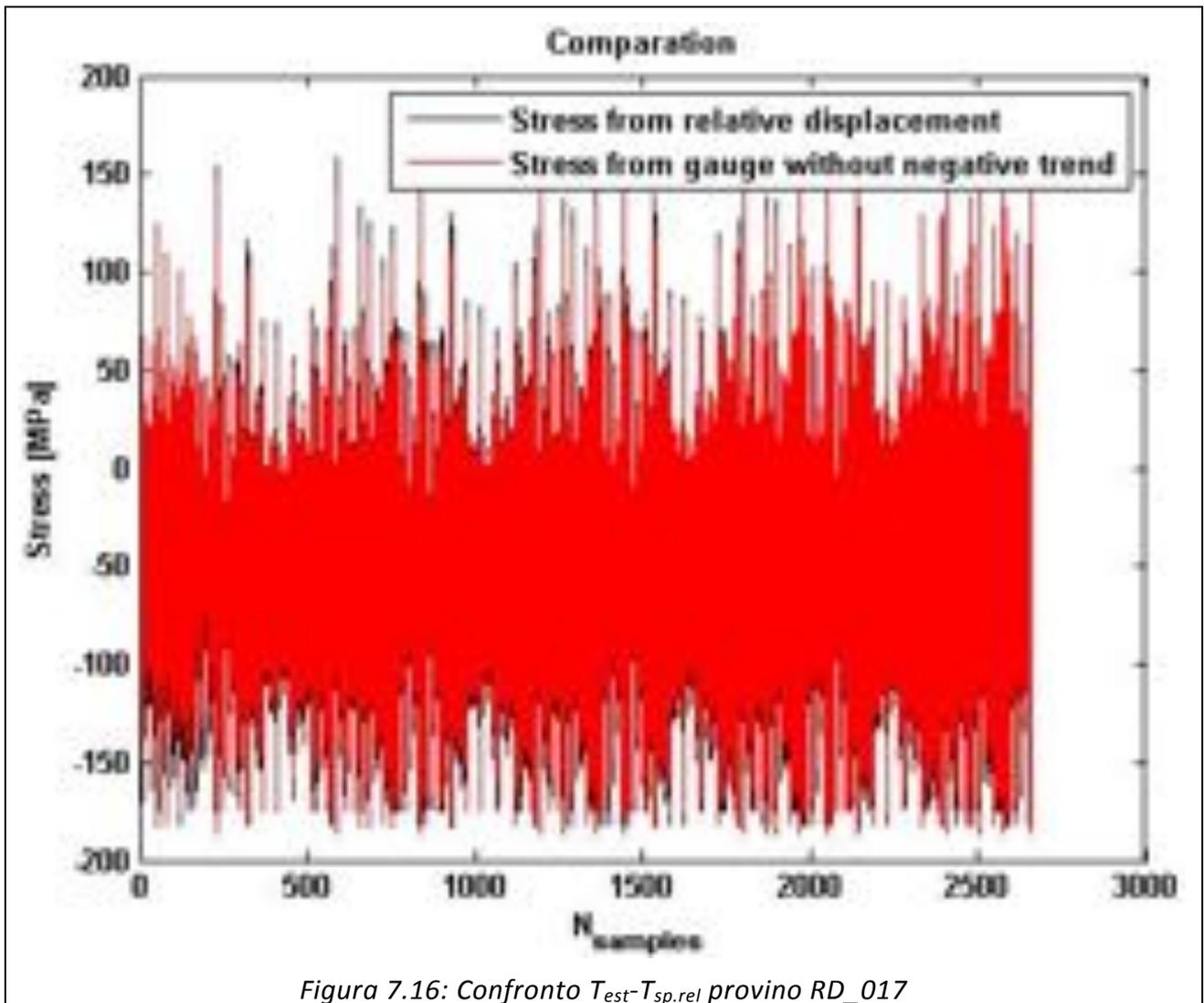


Figura 7.16: Confronto $T_{est}-T_{sp,rel}$ provino RD_017

Tale errore è ritenuto accettabile ed anche da un'analisi visiva si ha un buon raffronto fra i due segnali, ripetendo la stessa analisi coi dati ricavati dal provino GS074 l'errore rms calcolato su un intervallo temporale di 20h è pari al 14% sufficientemente contenuto per ritenere l'algoritmo valido.

Appendice A: Script di aiuto alla progettazione dei provini

Descrizione dello script:

A causa della mole di variabili progettuali i cui valori sono compresi entro predeterminati range di validità, si è scelto di impiegare uno script che prendesse in considerazione tutte le combinazioni possibili ottenendo $3 \times 3 \times 14 \times 110 = 13860$ provini aventi diverse geometrie e masse.

```
clc
clear all
%% PROPRIETA DI UNA GENERICA LEGA DI ALLUMINIO
E=68.9*1000;           %modulo di elasticità MPa= N/mm^2
choice=menu('Scegli il trattamento termico della lega','T4','T6');
if choice==2
    R=335;              %tensione di rottura MPa=N/mm^2
    S=290;              %tensione di snervamento MPa
else
    R=240;
    S=150;
end
d=2700;                %densità del materiale kg/m^3
u=1;
acc0=input('Inserisci il valore dell acc max: ');
choice0=menu('Inserisci il fattore di scala dell acc. max','20%','40%','100%');
acc=0.2*choice0*acc0;
Kt=1;
if choice0==3
    acc=acc0;
end
choice=menu('Matrice Filtrata o Completa?','Filtrata','Completa');
%% PARAMETRI VARIABILI ENTRO DETERMINATO RANGE
for s=2 %SPESSORE
    for r=25 %LARGHEZZA
        for M=0.5 %MASSA
            for L=105:5:115 %LUNGHEZZA
                %% DEFINIZIONE DEI PARAMETRI NECESSARI PER LO STUDIO
                I=r*(s^3)/12;           %INERZIA mm^4
                W=r*(s^2)/6;           %RES. FLESSIONALE
                A=r*s;                 %AREA SEZ. CRITICA [mm^2]
                P=M*9.81;              %FORZA PESO [N]
                f=P*L^3/(3*E*I);       %FRECCIA [mm]
                k=P/f*1000;            %rigidezza concentrata N/m
                wn=(k/M)^(1/2);       %pulsazione naturale con la quale vibra
            il provino
                freqnat=wn/(2*pi);     %frequenza naturale
                %% VERIFICA A CARICO STATICO
                Mf=(M*acc*9.81*L)+(d*((A*L)/(1000^3))*acc*9.81*L/2);
                %momento flettente generato dal picco di acc massima durante la prova
                Rnom=Mf/W;
            %sigma nominale MPa
                Rstat=Rnom*Kt;
                if Rstat<S && freqnat<12.5 && freqnat>7.5;
```

```

%parametro di controllo
    q=1;
    else
        q=0;
    end
%% STUDIO A FATICA
    if choice0==1
        accs=0.18;
    end
    if choice0==2
        accs=0.32;
    end
    if choice0==3
        accs=0.9;
    end
%% METODO APPROSSIMATO PER IL CALCOLO DELLA VITA A FATICA
Mfvf=(M*acc*9.81*L)+(d*((A*L)/(1000^3))*acc*9.81*L/2);
Rnomvf=Mfvf/W;
Rstatvf=Rnomvf*Kt;
%% VITA A FATICA SECONDO IL CRITERIO DI JUVINALL
Rlim=R*0.4; %tensione limite a fatica pari a metà
della tensione a rottura la lega di alluminio dopo 5*10^8 cicli
Rjuvinall=0.9*0.8*R; %tensione di juvinall che porta a
rottura dopo 10^3 cicli, 0.8 perchè è più duttile dell'acciaio
b=(log(Rlim)-log(Rjuvinall))/(log(5*10^8)-log(10^3));
%coefficiente curva di woler
a=Rlim/((5*10^8)^b);
N=(Rstatvf/a)^(1/b);
%Numero di cicli a fatica
%% TABELLA RIASSUNTIVA DI TUTTI I PROVINI SELEZIONABILI
if choice==1; %matrice pulita dai valori fuori dai nostri
range di validità
    if q==1 && freqnat>11;
        Mver=(R*W-(d*((A*L)/(1000^3))*9.81*L/2))/(9.81*L);
%Massa che porta alla rottura statica del provino
        p=M/Mver*100;
%Massa percentuale rispetto quella che porta a rott statica il provino
        if p<45 && p>5
            D(u,:)=[L,M,r,s,f,wn,freqnat,acc,Rstat,Kt,N,Mver,p];
%Matrice contenente tutti i dati
            u=u+1;
        end
    elseif q==1&& freqnat<9;
        Mver=(R*W-(d*((A*L)/(1000^3))*9.81*L/2))/(9.81*L);
%Mver=massa che porta a rottura statica il provino
        p=M/Mver*100; %M/Mver
        if p<40 && p>10
            %% MATRICE CON I PROVINI OTTENUTI
            D(u,:)=[L,M,r,s,f,wn,freqnat,acc,Rstat,Kt,N,Mver,p];
            u=u+1;
        end
    end
else
    Mver=(R*W-(d*((A*L)/(1000^3))*9.81*L/2))/(9.81*L);
    p=M/Mver*100;
    D(u,:)=[L,M,r,s,f,wn,freqnat,acc,Rstat,Kt,N,q,Mver,p];
    u=u+1;
end
end
end
end
end
end

```

```

%% ULTERIORE SELEZIONE CHE PREVEDE DI MANTENERE LA MASSA COSTANTE E VARIARE
%LA POSIZIONE DI QUESTULTIMA
c=size(D);
t=c(1,1);
h=1;
choice2=menu('La massa da applicare al provino da dimensionare la consideriamo
variabile?','si','no');
if choice2==1
    for h=1:1:(t-1);
        if D(h,3)==D(h+1,3) && D(h,4)==D(h+1,4)
            h=h+1;
            F(h,:)=D(h,:);
        else
            h=h+1;
        end
    end
else
    for h=1:1:(t-1);
        if D(h,2)==D(h+1,2) && D(h,3)==D(h+1,3) && D(h,4)==D(h+1,4)
            h=h+1;
            F(h,:)=D(h,:);
        else
            h=h+1;
        end
    end
end
end
end

```


Appendice B: Script di analisi per i dati ricavati dai test a trazione

Descrizione dello script:

Partendo dai dati contenuti all'interno del file .txt si prendono 18 campioni che giacciono sul tratto lineare e si calcola la retta interpolante così da verificare il valore del modulo di Young, fatto ciò si determina l'equazione della retta parallela a quest'ultima passante per il punto di ascissa pari allo 0,2 per cento di deformazione della lunghezza iniziale.

Si calcola così il punto di intersezione di quest'ultima retta con il grafico tensione-deformazione determinato la tensione a snervamento σ_y .

```
clc
clear all
%% CARICO IL FILE CONTENENTE I RISULTATI E LA GEOMETRIA DELLA SEZIONE
D=load('Tronco_Prov_1.txt');
l=0.2;           %lunghezza iniziale del provino[m]
s=0.002*l*10^6; %scostamento dello 0,2% dalla lunghezza iniziale [um/m]
%% CALCOLO IL MODULO DI YOUNG
L=D(2:20,:);
figure(1);
hold on;
grid on;
plot(D(:,2),D(:,1),'b');
xlabel('Deformazione [micronm/m]');
ylabel('Tensione[Mpa]');
p=polyfit(L(:,2),L(:,1),1);
xr=(L(1,2):L(18,2));
yr=xr*p(1,1)+p(1,2);
plot(xr,yr,'r');
disp('il modulo di Young vale: ');
E=p(1,1)*10^6
%% DETERMINAZIONE DELLA TENSIONE DI SNERVAMENTO
xs=D(:,2);
ys=xs*p(1,1)+(-s*p(1,1));
plot(xs,ys,'g');
delta=abs((D(:,1)-ys)); %vettore scostamento fra retta aux e curva trazione
d=find(delta==min(delta));
disp('Lo snervamento vale:')
D(d,1)
```


Appendice C: Script di analisi dei dati utilizzati per determinare la curva di Wöhler

Descrizione dello script:

Lo script sotto riportato ha le seguenti funzioni:

- concatena i vari run opportunamente
- calcola le FRF per intervalli di 200 secondi
- determina i valori di frequenza naturale e smorzamento e ne monitora l'andamento nel tempo
- calcola il tempo al quale si verifica la rottura
- calcola i parametri statistici delle sollecitazioni tra cui l'RMS
- determina i valori mediani per ogni terna di provini
- plotta i grafici Y_{rms-t} e $\Sigma-N$ ricavando i parametri della curva di Wholer

```
clc
clear all
%% VETTORE CONTENENTE I NOMI DEI PROVINI TESTATI
nflat=[22,23,24,31,32,33,41,42,43,51,52,53,61,62,63];
nrun=[ 5, 5, 8, 4, 4, 4,11,11,10, 4, 3, 3,19,17,14];
%% DEFINIZIONE DI ALCUNE COSTANTI
Fs=200; %FREQUENZA DI CAMPIONAMENTO
numprovini=length(nflat); %NUMERO PROVINI TESTATI
ti=input('Inserisci il numero di secondi in cui frazionare il segnale per il
calcolo della fft: '); %INTERVALLO DI TEMPO IN CUI SI CALCOLA LA FRF
%% PREALLOCO MEMORIA
fniniziale=zeros(1,length(nflat));
indiniziocricca=zeros(1,length(nflat));
tempoiniziocricca=zeros(1,length(nflat));
frequenzainiziocricca=zeros(1,length(nflat));
iniziocricca=zeros(1,length(nflat));
CRICCA=zeros(15,25);
continua=menu('Fermati alla definizione di cricca?','Si','No');
%% CALCOLO DELLA DURATA T DELLE PROVE
for k=1:numprovini;
    flat=nflat(k);
    %RESET DEI VETTORI AD OGNI CICLO
    yC17=[];
    yC18=[];
    yC22=[];
    yC23=[];
    yC24=[];
    tempo=[];
    auxfn=[];
    fn=[];
    zita=[];
    FRFm=[];
    FRFma=[];
    f1=[];
    f2=[];
    xv=[];
    yv=[];
```

```

%% CARICA I FILE ACQUISITI
for i = 1:nrun(k);
    if i<10
        name=['RC_f' num2str(flat) '_Run00' num2str(i)];
        RC(i,1)=load (name, '-mat');
    else
        name=['RC_f' num2str(flat) '_Run0' num2str(i)];
        RC(i,1)=load (name, '-mat');
    end
    %% PULIZIA DEI SEGNALI
    %%ELIMINO IL PICCO DOVUTO ALLO SCOLLEGAMENTO DEL CANALE CH17
    if i==nrun(k) %PER L'ULTIMO PROVINO TOGLI PIU SECONDI PER IL BATTIMENTO
        SULLA GOMMA PIUMA
    Indexmax=find(abs(RC(i,1).C17_Base_acceleration.y_values.values)==(max(abs(RC(i,
    1).C17_Base_acceleration.y_values.values))));

    RC(i,1).C18_Mass_acceleration.y_values.values=RC(i,1).C18_Mass_acceleration.y_va
    lues.values(1:(Indexmax-2*3*Fs));

    RC(i,1).C17_Base_acceleration.y_values.values=RC(i,1).C17_Base_acceleration.y_va
    lues.values(1:(Indexmax-2*3*Fs));

    RC(i,1).C22_Mass_X_transv_acc.y_values.values=RC(i,1).C22_Mass_X_transv_acc.y_va
    lues.values(1:(Indexmax-2*3*Fs));

    RC(i,1).C23_Mass_Y_vert_acc.y_values.values=RC(i,1).C23_Mass_Y_vert_acc.y_values
    .values(1:(Indexmax-2*3*Fs));

    RC(i,1).C24_Mass_Z_long_acc.y_values.values=RC(i,1).C24_Mass_Z_long_acc.y_values
    .values(1:(Indexmax-2*3*Fs));
    else
    Indexmax=find(abs(RC(i,1).C17_Base_acceleration.y_values.values)==(max(abs(RC(i,
    1).C17_Base_acceleration.y_values.values))));

    RC(i,1).C18_Mass_acceleration.y_values.values=RC(i,1).C18_Mass_acceleration.y_va
    lues.values(1:(Indexmax-3*Fs));

    RC(i,1).C17_Base_acceleration.y_values.values=RC(i,1).C17_Base_acceleration.y_va
    lues.values(1:(Indexmax-3*Fs));

    RC(i,1).C22_Mass_X_transv_acc.y_values.values=RC(i,1).C22_Mass_X_transv_acc.y_va
    lues.values(1:(Indexmax-3*Fs));

    RC(i,1).C23_Mass_Y_vert_acc.y_values.values=RC(i,1).C23_Mass_Y_vert_acc.y_values
    .values(1:(Indexmax-3*Fs));

    RC(i,1).C24_Mass_Z_long_acc.y_values.values=RC(i,1).C24_Mass_Z_long_acc.y_values
    .values(1:(Indexmax-3*Fs));
    end
    %% TROVA ALTRI PICCHI PRESUBILMENTE ELETTRICI
    Indexmax2=(find(abs(RC(i,1).C17_Base_acceleration.y_values.values)>1.3));%tale
    valore deriva dall'esperienza
    auxindexmax=length(Indexmax2);
    if auxindexmax~=0;
        for q=1:auxindexmax;
            RC(i,1).C18_Mass_acceleration.y_values.values(Indexmax2(q)-
q+1)=[];
            RC(i,1).C17_Base_acceleration.y_values.values(Indexmax2(q)-
q+1)=[];
            RC(i,1).C22_Mass_X_transv_acc.y_values.values(Indexmax2(q)-
q+1)=[];

```

```

                RC(i,1).C23_Mass_Y_vert_acc.y_values.values(Indexmax2(q)-
q+1)=[];
                RC(i,1).C24_Mass_Z_long_acc.y_values.values(Indexmax2(q)-
q+1)=[];
            end
        end
        %% ELIMINO IL TEMPO CHE PASSA TRA FINE DELLA PROVA E SCOLLEGAMENTO
SENSORE

Indexmin1=max(find(abs((RC(i,1).C17_Base_acceleration.y_values.values)>0.05)));

RC(i,1).C18_Mass_acceleration.y_values.values=RC(i,1).C18_Mass_acceleration.y_va
lues.values(1:Indexmin1);

RC(i,1).C17_Base_acceleration.y_values.values=RC(i,1).C17_Base_acceleration.y_va
lues.values(1:Indexmin1);

RC(i,1).C22_Mass_X_transv_acc.y_values.values=RC(i,1).C22_Mass_X_transv_acc.y_va
lues.values(1:Indexmin1);

RC(i,1).C23_Mass_Y_vert_acc.y_values.values=RC(i,1).C23_Mass_Y_vert_acc.y_values
.values(1:Indexmin1);

RC(i,1).C24_Mass_Z_long_acc.y_values.values=RC(i,1).C24_Mass_Z_long_acc.y_values
.values(1:Indexmin1);
        %% ELIMINO IL PRIMO SECONDO DI PRE-TRIGGER

Indexmin2=min(find(abs(RC(i,1).C17_Base_acceleration.y_values.values)>0.03 ));

RC(i,1).C18_Mass_acceleration.y_values.values=RC(i,1).C18_Mass_acceleration.y_va
lues.values(Indexmin2:end);

RC(i,1).C17_Base_acceleration.y_values.values=RC(i,1).C17_Base_acceleration.y_va
lues.values(Indexmin2:end);

RC(i,1).C22_Mass_X_transv_acc.y_values.values=RC(i,1).C22_Mass_X_transv_acc.y_va
lues.values(Indexmin2:end);

RC(i,1).C23_Mass_Y_vert_acc.y_values.values=RC(i,1).C23_Mass_Y_vert_acc.y_values
.values(Indexmin2:end);

RC(i,1).C24_Mass_Z_long_acc.y_values.values=RC(i,1).C24_Mass_Z_long_acc.y_values
.values(Indexmin2:end);
        %% CONCATENO IN UN UNICO VETTORE I SEGNALI DEI SENSORI
auxyC17=RC(i,1).C17_Base_acceleration.y_values.values;
yC17=[yC17;auxyC17];
auxyC18=-(RC(i,1).C18_Mass_acceleration.y_values.values);
yC18=[yC18;auxyC18];
        %CAMBIO SEGNO AL CANALE CH18 POICHE CON VERSO OPPOSTO A QUELLO DEL
%SENSORE ALLA BASE
auxyC22=RC(i,1).C22_Mass_X_transv_acc.y_values.values;
yC22=[yC22;auxyC22];
auxyC23=RC(i,1).C23_Mass_Y_vert_acc.y_values.values;
yC23=[yC23;auxyC23];
auxyC24=RC(i,1).C24_Mass_Z_long_acc.y_values.values;
yC24=[yC24;auxyC24];
        %% DURATA T
%Matrice contenente la durata delle prove ad ogni riga un flat
%diverso e ad ogni colonna un run diverso
durata(k,i)=length(auxyC18)/Fs;
    end

```

```

%% CALCOLO FN E ZITA
yC25=yC18;
auxfor=fix(length(yC25)/(ti*Fs));
auxxC25=length(yC25);
for p=0:auxfor-1;
    %MATRICE CON SPEZZONI CH18
    YC25(:,p+1)=yC25(1+p*ti*Fs:(p+1)*ti*Fs);
    %MATRICE CON SPEZZONI CH17
    YC17(:,p+1)=yC17(1+p*ti*Fs:(p+1)*ti*Fs);
end
%% CALCOLO FRF
L=length(YC25(:,1));
NFFT=2^nextpow2(L);
for p=0:auxfor-1;
    [FRFm(:,p+1),Fm]=tfestimate(YC17(:,p+1),YC25(:,p+1),[],[],NFFT,(Fs));
    %MODULO FRF
    FRFma(:,p+1)=abs(FRFm(:,p+1));
    %% CALCOLO DELLA Fn
    LF=find((abs((Fm(:)-5))==min(abs((Fm(:)-5)))));
%indice che rimanda ad una frequenza di quasi 5Hz
    HF=find((abs((Fm(:)-45))==min(abs((Fm(:)-45)))));
%indice che rimanda ad una frequenza di quasi 45Hz
    auxfn(p+1)=find(FRFma(LF:HF),p+1)==max(FRFma(LF:HF),p+1))+LF;
%Vettore con gli indici che rimandano al massimo delle frf
    fn(p+1,1)=Fm(auxfn(p+1));
%DELTAFN
    tempo(p+1,1)=ti*p+ti/2;
%ASCISSA FN SEC
    %% FATTORE DI SMORZAMENTO
    auxzita(p+1)=(FRFma(auxfn(p+1),p+1))/sqrt(26);
    % CALCOLO R1 R2 PER CALCOLO ZITA
    xv=[5,45];
    yv1=[auxzita(p+1),auxzita(p+1)];
    [xint1,yint1]=polyxpoly(xv,yv1,Fm(LF:HF),FRFma(LF:HF),(p+1));
%trovo i punti di intersezione
    if length(xint1)==1
        disp('c'è un errore nello script');
    elseif length(xint1)==2
        f1(p+1)=xint1(1);
        f2(p+1)=xint1(2);
    else
        auxf1=find((xint1(:)-fn(p+1))==min((xint1(:)-fn(p+1))));
        if xint1(auxf1)<fn(p+1)
            f1(p+1)=xint1(auxf1);
            f2(p+1)=xint1(auxf1+1);
        else
            f2(p+1)=xint1(auxf1);
            f1(p+1)=xint1(auxf1-1);
        end
    end
end
zita(p+1)=(((f2(p+1))^2)-((f1(p+1))^2))/((20*(fn(p+1))^2));
%% PROBLEMA DEI BUCHI NEI SEGNALI
if zita(p+1)<(2*(10^(-3))) && p>1;
    zita(p+1)=zita(p);
end
end
%% CALCOLO FN PER LA QUALE HO L'INIZIO DELLA CRICCA
auxperc=(1-0.03);
gradon=9;
fninterp=polyfit(tempo,fn,gradon);
tempofitt=[1:(length(yC18)/Fs)];
fnf=polyval(fninterp,tempofitt);

```

```

fniniziale(k)=mean(fnf(1:10));
indiniziocricca(k)= find((abs((fnf(:)-
(fniniziale(k)*auxperc))))==min(abs((fnf(:)-(fniniziale(k)*auxperc)))));
tempoiniziocricca(k)=tempofitt(indiniziocricca(k));
frequenzainiziocricca(k)=fnf(indiniziocricca(k));
%% VETTORI NON FILTRATI E NON ACCORCIATI
yC17nfa=yC17;
yC18nfa=yC18;
yC18_17nfa=yC18-yC17;
%% VETTORI FILTRATI
yC17f=bpfilter(yC17nfa,0.039,0.45);
yC18f=bpfilter(yC18nfa,0.039,0.45);
yC18_17f=bpfilter(yC18-yC17nfa,0.039,0.45);
yC22=bpfilter(yC22,0.039,0.45);
yC23=bpfilter(yC23,0.039,0.45);
yC24=bpfilter(yC24,0.039,0.45);
%% INTEGRAZIOE SEGNALE FILTRATO NON ACCORCIATO+CAMBIO UNITA DI MISURA
yC17na=yC17f;
yC18na=yC18f;
yC18_C17na=yC18-yC17f;
VELOCITACH17na=bpfilter((cumtrapz(yC17f*9.806)/Fs),0.039,0.45);
VELOCITACH18na=bpfilter((cumtrapz(yC18f*9.806)/Fs),0.039,0.45);
SPOSTAMENTICH17na=bpfilter((cumtrapz(VELOCITACH17na)/Fs),0.039,0.45);
SPOSTAMENTICH18na=bpfilter((cumtrapz(VELOCITACH18na)/Fs),0.039,0.45);
SPOSTRELCH17_CH18na=((SPOSTAMENTICH18na)-(SPOSTAMENTICH17na));
%% SEGNALE ACCORCIATO FIN DOVE INIZIA LA CRICCA FILTRATO
yC17af=yC17f(1:indiniziocricca(k)*200);
yC18af=yC18f(1:indiniziocricca(k)*200);
yC18_17af=yC18_17f(1:indiniziocricca(k)*200);
%% STRUTTURA PER FN
FN(k).name=['Fn' num2str(nflat(k))];
FN(k).value=fn(:);
FN;
%% STRUTTURA CONTENENTE I ZITA
ZITA(k).name=['Zita' num2str(nflat(k))];
ZITA(k).value=zita(:);
ZITA;
%% MATRICE RMS
RMS(k,1)=rms(yC17af);
RMS(k,2)=rms(yC18af);
RMS(k,3)=rms(yC18_17af);
RMS(k,4)=rms(SPOSTRELCH17_CH18na(1:indiniziocricca(k)*200));
RMS(k,5)=rms(yC22);
RMS(k,6)=rms(yC23);
RMS(k,7)=rms(yC24);
%% KURTOSIS
KURTOSIS(k,1)=kurtosis(yC17af);
KURTOSIS(k,2)=kurtosis(yC18af);
KURTOSIS(k,3)=kurtosis(yC18_17af);
KURTOSIS(k,4)=kurtosis(SPOSTRELCH17_CH18na(1:indiniziocricca(k)*200));
KURTOSIS(k,5)=kurtosis(yC22);
KURTOSIS(k,6)=kurtosis(yC23);
KURTOSIS(k,7)=kurtosis(yC24);
%% SKEWNESS
SKEWNESS(k,1)=skewness(yC17af);
SKEWNESS(k,2)=skewness(yC18af);
SKEWNESS(k,3)=skewness(yC18_17af);
SKEWNESS(k,4)=skewness(SPOSTRELCH17_CH18na(1:indiniziocricca(k)*200));
SKEWNESS(k,5)=skewness(yC22);
SKEWNESS(k,6)=skewness(yC23);
SKEWNESS(k,7)=skewness(yC24);

```

```

%% MEDIA
MEDIA(k,1)=mean(yC17af);
MEDIA(k,2)=mean(yC18af);
MEDIA(k,3)=mean(yC18_17af);
MEDIA(k,4)=mean(SPOSTRELCH17_CH18na(1:indiniziocricca(k)*200));
MEDIA(k,5)=mean(yC22);
MEDIA(k,6)=mean(yC23);
MEDIA(k,7)=mean(yC24);
%% CRICCA--->B
% TTF,Fncricca, TTFmed, RMSmed,AVFR18-17med,Nciclmed,AVFR17,AVFR18
% AVFR17-18, Fni,Zitai, duratatot, Nciclitot,Nttf,
CRICCA(k,1)=tempoiniziocricca(k); %TTF
CRICCA(k,2)=frequenzainiziocricca(k); %Fn Cricca
[xf,ypwel,xwel,avfr]=averagefr(yC17af,0.039,0.45,200);
CRICCA(k,7)=avfr;
[xf,ypwel,xwel,avfr]=averagefr(yC18af,0.039,0.45,200);
CRICCA(k,8)=avfr;
[xf,ypwel,xwel,avfr]=averagefr(yC18_17af,0.039,0.45,200);
CRICCA(k,9)=avfr;
CRICCA(k,10)=mean(fn(1:10)); %Fni
CRICCA(k,11)=mean(zita(5:end-10)); %Zitai
%%FREQUENZE MEDIE
[xf,ypwel,xpwel,avfrC17]=averagefr(yC17af,0.05,0.45,200);
[xf,ypwel,xpwel,avfrC18]=averagefr(yC18af,0.05,0.45,200);
[xf,ypwel,xpwel,avfrC22]=averagefr(yC22,0.05,0.45,200);
[xf,ypwel,xpwel,avfrC23]=averagefr(yC23,0.05,0.45,200);
[xf,ypwel,xpwel,avfrC24]=averagefr(yC24,0.05,0.45,200);
[xf,ypwel,xpwel,avfryC18_17]=averagefr(yC18_17af,0.05,0.45,200);

[xf,ypwel,xpwel,avfrSPOSTRELCH17_CH18na]=averagefr(SPOSTRELCH17_CH18na,0.05,0.45,200);
AVFR(k,1)=avfrC17;
AVFR(k,2)=avfrC18;
AVFR(k,3)=avfrC22;
AVFR(k,4)=avfrC23;
AVFR(k,5)=avfrC24;
AVFR(k,6)=avfryC18_17;
AVFR(k,7)=avfrSPOSTRELCH17_CH18na;
if continua==2
save(['SEGNALI_PROVINO_f0'
num2str(k)], 'yC17nfa', 'yC18nfa', 'yC18_17nfa', 'SPOSTRELCH17_CH18na');
end
end
numeromassimodirun=nrnun(nrun==max(nrun));
%% RACCOLGO LE DURATE IN UN'UNICA MATRICE
for k=1:numprovini
durata(k,numeromassimodirun+1)=(sum(durata(k,:))); %durata in secondi
end
%% VALORI MEDIANI SUL TEMPO CHE RIMANDANO AGLI RMS SULLA ACC. RELATIVA
for k=0:3:numprovini-3;
CRICCA((k+3)/3,3)=median(CRICCA((k+1):(k+3),1)); %Ttf mediano
indicemediano((k+3)/3)=find((CRICCA(:,1))==CRICCA((k+3)/3,3)); %indice che
rimanda al valore mediano sulla matrice RMS
CRICCA((k+3)/3,4)=RMS(indicemediano((k+3)/3),3); %RMS mediano
CRICCA((k+3)/3,5)=AVFR(indicemediano((k+3)/3),6); %AVFR mediano

CRICCA((k+3)/3,6)=CRICCA(indicemediano((k+3)/3),1)*AVFR(indicemediano((k+3)/3),6); %Nciclmed
End

```

```

%% DEFINIZIONE DELLE COSTANTI NECESSARIE A CALCOLARE K2
b=10; %[mm]
h=2; %[mm]
l=62+21-7.5; %distanza fra sezione critica e baricentro della massa [mm]
m=0.5; %massa a sbalzo
Sy=175;
Sr=245;
zitamedio=0.0042; %valore ricavato dal provino f41
auxk2=sqrt(1/(2*zitamedio)); %valore ausiliario per il calcolo della costante
k2
k2=m*1*6*auxk2/(b*h^2); %costante che lega accelerazioni a tensioni
k1=AVFR(i,6); %average frequency nell'intervallo 5-45[Hz]
%% COMPLETO LA MATRICE CRICCA
CRICCA(:,12)=durata(:,20);
for i=1:15
    CRICCA(i,13)=AVFR(i,6)*CRICCA(i,12); %Ncicli tot
    CRICCA(i,14)=AVFR(i,6)*CRICCA(i,1); %Nciclitff
    CRICCA(i,15)=k2*RMS(i,3); %Sigma
end
%% PLOT Yrms-TEMPO RMS RELATIVI
h1=figure;
binterp1=polyfit(log10(CRICCA(:,1)),log10(RMS(:,3)),1);
bf1=polyval(binterp1,log10(CRICCA(:,1)));
plot(log10(CRICCA(:,1)),log10(RMS(:,3)),'o',log10(CRICCA(:,1)),bf1,'r','Linewidth
h',3);
title('Plot YRMS-tempo completo')
xlabel('log TEMPO [sec]');
ylabel('log Yrms');
hold on
saveas(h1,'RMS-TEMPO COMPLETO .jpg')
bwholer1=-(1/binterp1(1));
save('bwholer1','bwholer1');
%% PLOT GRAFICO SIGMA-N CON AV. FREQ.
h2=figure;
binterp2=polyfit(log10(CRICCA(:,14)),log10(CRICCA(:,15)),1);
bf2=polyval(binterp2,log10(CRICCA(:,14)));
plot(log10(CRICCA(:,14)),log10(CRICCA(:,15)),'o',log10(CRICCA(:,14)),bf2,'r','Li
newidth',3);
title('Plot Sigma-N ricavato da tutti e 15 i provini')
xlabel('log(N)');
ylabel('log(Tensioni [Mpa])');
hold on
bwholer2=-(1/binterp2(1));
saveas(h2,'Sigma-N COMPLETO.jpg')
save('bwholer2','bwholer2');
%% PLOT USANDO I VALORI MEDIANI
h3=figure;
binterp3=polyfit(log10(CRICCA(1:5,3)),log10(CRICCA(1:5,4)),1);
bf3=polyval(binterp3,log10(CRICCA(1:5,3)));
plot(log10(CRICCA(1:5,3)),log10(CRICCA(1:5,4)),'o',log10(CRICCA(1:5,3)),bf3,'r',
'Linewidth',3);
title('Plot YRMS-tempo valori mediani')
xlabel('log TEMPO [sec]');
ylabel('log Yrms');
hold on
bwholered3=-(1/binterp3(1));
saveas(h3,'RMS-TEMPO MEDIANI .jpg')
save('bwholered3','bwholered3');

```

```

%% PLOT SIGMA N-USANDO I VALORI MEDIANI
for i2=1:5
    sigmamed(i2)=k2*CRICCA(i2,4);
    Nciclimed(i2)=CRICCA(i2,5)*CRICCA(i2,3);
end
h4=figure;
binterp4=polyfit(log10(Nciclimed),log10(sigmamed),1);
bf4=polyval(binterp4,log10(Nciclimed));
plot(log10(Nciclimed),log10(sigmamed),'o',log10(Nciclimed),bf4,'r','Linewidth',3);
title('Plot Signa-N valori mediani')
xlabel('log(N)');
ylabel('log(Tensioni [Mpa])');
hold on
bwholmed4=-(1/binterp4(1));
saveas(h4,'SIGMA-NCICLI MEDIANI .jpg')
save('bwholmed4','bwholmed4');

%% GRAFICO COMPLETO
espbwh=bwholmed4;
costCwh=(10^3)*(Sr)^espbwh;
Ncicli=[linspace(1,1000),linspace(1000,5*10^8),linspace(5*10^8,(10^9))];
for plo=1:length(Ncicli)
    if Ncicli(plo)<=1000
        Sigma(plo)=Sr;
    elseif Ncicli(plo)>10^3 && Ncicli(plo)<=10^8
        Sigma(plo)=(costCwh/Ncicli(plo))^(1/espbwh);
    else
        Sigma(plo)=Sigma(end);
    end
end
h5=figure;
semilogx(Ncicli,Sigma,'r','Linewidth',3);
xlabel('N.Cicli')
ylabel('Tensioni')
title('Grafico di Wohler');
saveas(h5,'Grafico di Wohler completo .jpg')
hold on
%% CICLI PREVISTI
for i=1:15
    CRICCA(i,16)=costCwh/((CRICCA(i,15))^bwholmed4); %Errore
    CRICCA(i,17)=CRICCA(i,16)/CRICCA(i,14)*100; %Errore
end
%% GRAFICO OTTENUTO USANDO I VALORI MEDI ANZICHE MEDIANI
for k=0:3:numprovini-3;
    CRICCA((k+3)/3,18)=mean(CRICCA((k+1):(k+3),1)); %Ttf medio
    CRICCA((k+3)/3,19)=mean(RMS((k+1):(k+3),3)); %RMS medio
    CRICCA((k+3)/3,20)=mean(AVFR((k+1):(k+3),3)); %AVFR medio
    CRICCA((k+3)/3,21)=mean(CRICCA((k+1):(k+3),11)); %Zita medio
end
Nciclimedia(1:5)=CRICCA(1:5,20).*CRICCA(1:5,18); %Nciclimedia
Sigmamedio(1:5)=m*1*6*((1./(2*CRICCA(1:5,21))).^1/2)/(b*h^2).*CRICCA(1:5,19);
%Sigmamedio
CRICCA(1:5,22)=Nciclimedia;
CRICCA(1:5,23)=Sigmamedio;

h6=figure;
binterp6=polyfit(log10(CRICCA(1:5,18)),log10(CRICCA(1:5,19)),1);
bf6=polyval(binterp6,log10(CRICCA(1:5,18)));
plot(log10(CRICCA(1:5,18)),log10(CRICCA(1:5,19)),'o',log10(CRICCA(1:5,18)),bf6,'r','Linewidth',3);
title('Plot Signa-N valori medi')

```

```

xlabel('log(N)');
ylabel('log(Tensioni [Mpa])');
hold on
bwholermedio6=-(1/binterp6(1));
saveas(h6,'SIGMA-NCICLI VALORI MEDI .jpg')
save('bwholermedio6','bwholermedio6');
%% CICLI PREVISTI
for i=1:15
    CRICCA(i,24)=((10^3)*(Sr)^bwholermedio6)/((CRICCA(i,15))^bwholermedio6);
%Nprevisto con l'esponente medio
    CRICCA(i,25)=CRICCA(i,24)/CRICCA(i,14)*100;    %Errore nella previsione
end

%% Confronto fra le rette interpolanti
clear ('Ncicli')
h7=figure;
save('Raccolta
parametri','MEDIA','RMS','SKEWNESS','KURTOSIS','CRICCA','AVFR','ZITA','FN','dura
ta','indiniziocricca','k2','bwholerm4','indicemediano','bwholermedio6')

```

Verifica delle tensioni in gioco attraverso il calcolo degli spostamenti

Descrizione: Tramite doppia integrazione dei segnali acquisiti dagli accelerometri si misura lo spostamento relativo massa-base, e da esso si ricavano le tensioni da momento flettente in corrispondenza sezione critica.

```
clc
clear all
%CARICA COSTANTI
E=64400;
Sy=175;
Sr=240;
larg=10;
spes=2;
Fs=200;                                %FREQUENZA DI CAMPIONAMENTO
%CARICA I SEGNALI DEI SENSORI
%% DEFINIZIONE DEI FILE DA CARICARE
nflat=[61]; %NOME PROVINO
nrun= [ 1]; %RUN PER OGNI PROVINO
numprovini=length(nflat);              %NUMERO PROVINI TESTATI
fr=50;
%% CARICO I SEGNALI DOPO AVERLI "PULITI"
for k=1:numprovini;
    flat=nflat(k);
    yC17=[];                             %AZZERO I VETTORI SENO CONCATENO
    DI NUOVO
    yC18=[];
    yC23=[];
    yC24=[];
    YC17=[];
    YC18=[];
    YC23=[];
    SPOSTAMENTI(k).CH17=[];
    SPOSTAMENTI(k).CH18=[];
    for i = 1:nrun(k);
        if i<10
            name=['RC_f' num2str(flat) '_Run0' num2str(i)];
            RC(i,1)=load (name, '-mat');
        else
            name=['RC_f' num2str(flat) '_Run0' num2str(i)];
            RC(i,1)=load (name, '-mat');
        end
        %% PULIZIA DEI SEGNALI
        %%ELIMINO IL PICCO DOVUTO ALLO SCOLLEGAMENTO DEL CANALE CH17
        if i==nrun(k) %PER L'ULTIMO PROVINO TOGLI PIU SECONDI PER IL BATTIMENTO
            SULLA GOMMA PIUMA
            Indexmax=find(RC(i,1).C17_Base_acceleration.y_values.values==(max(RC(i,1).C17_Base_acceleration.y_values.values)));
            RC(i,1).C18_Mass_acceleration.y_values.values=RC(i,1).C18_Mass_acceleration.y_values.values(1:(Indexmax-2*3*Fs));
            RC(i,1).C17_Base_acceleration.y_values.values=RC(i,1).C17_Base_acceleration.y_values.values(1:(Indexmax-2*3*Fs));
        end
    end
end
```

```

RC(i,1).C23_Mass_Y_vert_acc.y_values.values=RC(i,1).C23_Mass_Y_vert_acc.y_values
.values(1:(Indexmax-2*3*Fs));

RC(i,1).C24_Mass_Z_long_acc.y_values.values=RC(i,1).C24_Mass_Z_long_acc.y_values
.values(1:(Indexmax-2*3*Fs));
    else

Indexmax=find(RC(i,1).C17_Base_acceleration.y_values.values==(max(RC(i,1).C17_Ba
se_acceleration.y_values.values)));

RC(i,1).C18_Mass_acceleration.y_values.values=RC(i,1).C18_Mass_acceleration.y_va
lues.values(1:(Indexmax-3*Fs));

RC(i,1).C17_Base_acceleration.y_values.values=RC(i,1).C17_Base_acceleration.y_va
lues.values(1:(Indexmax-3*Fs));

RC(i,1).C23_Mass_Y_vert_acc.y_values.values=RC(i,1).C23_Mass_Y_vert_acc.y_values
.values(1:(Indexmax-3*Fs));

RC(i,1).C24_Mass_Z_long_acc.y_values.values=RC(i,1).C24_Mass_Z_long_acc.y_values
.values(1:(Indexmax-3*Fs));
    end
    %% TROVA ALTRI PICCHI PRESUBILMENTE ELETTRICI
    Indexmax2=(find(RC(i,1).C17_Base_acceleration.y_values.values>2));
%picchi maggiori di 5g
auxindexmax=length(Indexmax2);
if auxindexmax~=0;
    for q=1:auxindexmax;
        RC(i,1).C18_Mass_acceleration.y_values.values(Indexmax2(q))=[];
        RC(i,1).C17_Base_acceleration.y_values.values(Indexmax2(q))=[];

RC(i,1).C23_Mass_Y_vert_acc.y_values.values(Indexmax2(q))=[];%tolgo gli ultimi
due secondi necessari a scollegare il senore
        RC(i,1).C24_Mass_Z_long_acc.y_values.values(Indexmax2(q))=[];
    end
end
    %% ELIMINO IL TEMPO CHE PASSA TRA FINE DELLA PROVA E SCOLLEGAMENTO
SENSORE

Indexmin1=max(find((RC(i,1).C17_Base_acceleration.y_values.values>0.05)));
%prendi l'indice più grande per il quale acc>0,05

RC(i,1).C18_Mass_acceleration.y_values.values=RC(i,1).C18_Mass_acceleration.y_va
lues.values(1:Indexmin1);

RC(i,1).C17_Base_acceleration.y_values.values=RC(i,1).C17_Base_acceleration.y_va
lues.values(1:Indexmin1);

RC(i,1).C23_Mass_Y_vert_acc.y_values.values=RC(i,1).C23_Mass_Y_vert_acc.y_values
.values(1:Indexmin1);

RC(i,1).C24_Mass_Z_long_acc.y_values.values=RC(i,1).C24_Mass_Z_long_acc.y_values
.values(1:Indexmin1);
    %% ELIMINO I PRIMI SECONDI FRA L'INIZIO DEL RECORD E LO START SUL TL
    Indexmin2=min(find(RC(i,1).C17_Base_acceleration.y_values.values>0.03
));

RC(i,1).C18_Mass_acceleration.y_values.values=RC(i,1).C18_Mass_acceleration.y_va
lues.values(Indexmin2:end);

```

```

RC(i,1).C17_Base_acceleration.y_values.values=RC(i,1).C17_Base_acceleration.y_val
ues.values(Indexmin2:end);

RC(i,1).C23_Mass_Y_vert_acc.y_values.values=RC(i,1).C23_Mass_Y_vert_acc.y_values
.values(Indexmin2:end);%tolgo gli ultimi due secondi necessari a scollegare il
senore

RC(i,1).C24_Mass_Z_long_acc.y_values.values=RC(i,1).C24_Mass_Z_long_acc.y_values
.values(Indexmin2:end);
    %% CONCATENO IN UN UNICO VETTORE I SEGNALI DEI SENSORI
    auxyC17=RC(i,1).C17_Base_acceleration.y_values.values;
    yC17=[yC17;auxyC17];
    auxyC18=-(RC(i,1).C18_Mass_acceleration.y_values.values);           %GIRO
IL SEGNALE YCH18
    yC18=[yC18;auxyC18];
    auxyC23=RC(i,1).C23_Mass_Y_vert_acc.y_values.values;
    yC23=[yC23;auxyC23];
    auxyC24=RC(i,1).C24_Mass_Z_long_acc.y_values.values;
    yC24=[yC24;auxyC24];
end
%%CONVERTO LE UNITA DI MISURA
yC17=yC17*9.806; %passaggio da g a m/s^2
yC24=yC24*9.806;
yC18=yC18*9.806;
%%FILTRO
YC17=bpfilter(yC17,0.039,0.45);
YC24=bpfilter(yC24,0.039,0.45);
YC18=bpfilter(yC18,0.039,0.45);
%%PER COMODITA METTO TUTTI I SEGNALI STUDIATI DENTRO UN'UNICA STRUTTURA
SEGNALI(k).name=['Fn' num2str(nflat(k))];
SEGNALI(k).CH17=YC17(:)-mean(YC17);
SEGNALI(k).CH18=YC18(:)-mean(YC18);
SEGNALI;
save ('SEGNALI.mat', '-struct','SEGNALI');
VELOCITA(k).name=['Fn' num2str(nflat(k))];
VELOCITA(k).CH17=bpfilter((cumtrapz(SEGNALI(k).CH17)/Fs),0.039,0.45);
VELOCITA(k).CH18=bpfilter((cumtrapz(SEGNALI(k).CH18)/Fs),0.039,0.45);
VELOCITA;
save ('VELOCITA.mat', '-struct','VELOCITA');
SPOSTAMENTI(k).name=['Fn' num2str(nflat(k))];
SPOSTAMENTI(k).CH17=bpfilter((cumtrapz(VELOCITA(k).CH17)/Fs),0.039,0.45);
SPOSTAMENTI(k).CH18=bpfilter((cumtrapz(VELOCITA(k).CH18)/Fs),0.039,0.45);
SPOSTAMENTI;
save ('SPOSTAMENTI.mat', '-struct','SPOSTAMENTI');
SPOSTREL(k).name=['Fn' num2str(nflat(k))];
SPOSTREL(k).CH17_CH18=((SPOSTAMENTI(k).CH18)-(SPOSTAMENTI(k).CH17));
SPOSTREL;
save ('SPOSTREL.mat', '-struct','SPOSTREL');
%TENSIONE
TENSIONE(k).name=['Fn' num2str(nflat(k))];
TENSIONE(k).CH18=((SPOSTAMENTI(k).CH18)/((62+21-
7.5)^3)*(3*E*larg*(spes^3)/12))*(62+21-7.5)*6/(larg*spes^2)*1000;
TENSIONE(k).CH17_CH18=((SPOSTREL(k).CH17_CH18)/((62+21-
7.5)^3)*(3*E*larg*(spes^3)/12))*(62+21-7.5)*6/(larg*spes^2)*1000;
TENSIONE;
save ('TENSIONE.mat', '-struct','TENSIONE');
end
tempo(:,1)=0:1/Fs:(length(TENSIONE(1,1).CH18)-1)/Fs);
figure
plot(tempo,TENSIONE(1,1).CH18,tempo,Sy,'r');
xlabel('Sec')

```

```
ylabel('Mpa')
title('CH18')
hold on

figure
plot(tempo,TENSIONE(1,1).CH17_CH18,tempo,Sy,'r');
xlabel('Sec')
ylabel('Mpa')
title('CH18-CH17');
```

Determinazione delle tensioni valida anche in campo plastico

Descrizione: Si riporta una “function” atta a determinare i valori di tensione presenti in corrispondenza della sezione critica, valido anche in campo plastico. Per compiere tale stima l’algoritmo calcola le deformazioni a partire dagli spostamenti e li correla ai rispettivi valori di tensione utilizzando la caratteristica $\sigma - \varepsilon$ del materiale.

```
function [T,def,D] = tensioni(vsr,name,h,l,Sy)
%% INPUT
% vsr=vettore contenente gli spostamenti relativi precedentemente calcolati
% in [mm]
% name=stringa contenente il nome del file della prova a trazione
% h=spessore della sezione critica [mm]
% l=distanza fra sezione critica e posizione in cui si misura lo
% spostamento [mm]
% Sy= Tensione snervamento del materiale
%% OUTPUT
% tensioni=vettore contenente i valori di tensione
%% PASSAGGIO DAGLI SPOSTAMENTI ALLE DEFORMAZIONI
def=vsr*3/2*h/(l^2)*10^6;
%% CARICO LA PROVA DI TRAZIONE
D=load(name);
D(1,1)=0;
D(1,2)=0;
p=polyfit(D(1:22,2),D(1:22,1),1);
Efit=p(1,1)*10^6;
auxtraz=find(D(:,1)-Sy==min(abs((D(:,1)-Sy))));
eD2=1:fix(Sy/Efit*10^6);
sD2=(eD2./(10^6)).*Efit;
eD2=[eD2';D(auxtraz+1:150,2)];
sD2=[sD2';D(auxtraz+1:150,1)];
D2(:,1)=sD2;
D2(:,2)=eD2;
%% PREALLOCO MEMORIA
auxc=zeros(length(def),1);
T=zeros(length(def),1);
%% CICLO FOR COL QUALE RICAPO IL VETTORE CONTENENETE LE TENSIONI
for c=1:length(def);
    auxc(c)=find(abs(D2(:,2)-abs(def(c)))==min(abs(D2(:,2)-abs(def(c)))));
    if def(c)>=0
        T(c,1)=D2(auxc(c),1);
    else
        T(c,1)=-D2(auxc(c),1);
    end
end
end
```

Filtro passa banda

Descrizione: Questo script calcola la fft del segnale per poi porre a 0 tutti i contributi in frequenza al di fuori del range voluto, completata tale operazione si calcola la inverse fft ritornando nel dominio del tempo.

```
function [xf]=bpfilter(x,L,U)

% [xf]=bpfilter(x,L,U);
% Filtro passabanda
% x Segnale
% L Frequenza di taglio superiore
% U Frequenza di taglio inferiore
% Le frequenze L, U devono essere comprese tra 0 e 1.
% Ad uno corrisponde metà della frequenza di campionamento
% A. Rivola - Maggio 2001
% Modifica: Nel nostro caso specifico si sono post a 0 anche
% i contributi in frequenza 0 pari alle componenti continue

x=x(:);
N=length(x);
Nl=floor(L*N/2)+1; %indice con il valore corrispondente alla frequenza di taglio
bassa
Nu=ceil(U*N/2)+1; %indice con il valore corrispondente alla frequenza di
taglio alta
% Ci si cautela nel caso U sia >=1
if Nu>=N/2+1,
    Nu=N/2;
end
X=fft(x);

X(1:Nl)=zeros(Nl,1);
X(Nu:N/2)=zeros(N/2-Nu+1,1);
X(N-Nl+2:N)=zeros(Nl-2+1,1);
X(N/2+2:N-Nu+2)=zeros(N/2-Nu+1,1);

xf=real(ifft(X));

return
```

Determinazione dell'average frequency

Descrizione dello script:

Funzione per il calcolo dell'average frequency attraverso il teorema della media pesata precedentemente illustrato al capitolo II.

```
function [xf,ypwel,xpwel,avfr]=averagefr(segnale,L,U,Fs)
%% DESCRIZIONE
% http://it.wikipedia.org/wiki/Teorema\_della\_media\_pesata
% xf=segnale filtrato
% ypwel=ordinata psd calcolata col metodo di welch
% xpwel=ascissa psd
% avfr=average frequency
% segnale=vettore in ingresso
% Fs=frequenza di campionamento
% L=frequenza di taglio bassa definita come Fcutlow*2/Fs
% U=frequenza di taglio alta definita come Fcutlow*2/Fs
%% FILTRO
segnale=segnale(:);
N=length(segnale);
Nl=floor(L*N/2)+1; %indice con il valore corrispondente alla frequenza di
taglio "bassa"
Nu=ceil(U*N/2)+1; %indice con il valore corrispondente alla frequenza di
taglio "alta"
% Ci si cautela nel caso U sia >=1
if Nu>=N/2+1,
    Nu=N/2;
end
X=fft(segnale);
X(1:Nl)=zeros(Nl,1); %tolgo la componente continua poichè nel mio caso
non c'è
X(Nu:N/2)=zeros(N/2-Nu+1,1);
X(N-Nl+2:N)=zeros(Nl-2+1,1);
X(N/2+2:N-Nu+2)=zeros(N/2-Nu+1,1);
xf=real(iff(X));
%% calcolo la PSD
[ypwel,xpwel] = pwelch(xf,500,300,512,Fs);
deltafr=(U*Fs/2)-(L*Fs/2);
%% AVERAGE FR
avfr=trapz(ypwel.*xpwel)/trapz(ypwel);
return
```

Calcolo degli spettrogrammi delle PSD e determinazione di tutti i grafici riportati

Descrizione: Di seguito è riportata la procedura di calcolo delle PSD e degli Spettrogrammi oltre alla creazione e salvataggio di tutti i grafici relativi ai provini testati riportati nell'appendice seguente.

```
clc
clear all
Fs=200;
nflat=[22,23,24,31,32,33,41,42,43,51,52,53,61,62,63]; %NOME PROVINO
ti=200;
%% CARICO I DATI
load('Raccolta parametri.mat')
CRICCA(1:15,10)=zeros(15,1);
for k=1:length(nflat);
    tempo=[];
    tempo2=[];
    fn=[];
    zita=[];
    pxx=[];
    f=[];
    yC17nfa=[];
    yC18nfa=[];
    yC18_17nfa=[];
    SPOSTRELCH17_CH18na=[];
    pl=k;
    indice=k;
    flat=nflat(k);
    load(['SEGNALI_PROVINO_f0' num2str(k) '.mat'])
    %'yC17nfa','yC18nfa','yC18_17nfa','SPOSTRELCH17_CH18na'

    %% PLOT FN
    fn=FN(1,indice).value;
    tempo(:,1)=0:ti:(length(fn)-1)*ti;
    h1=figure;
    plot(tempo,fn,'o','Linewidth',3);
    title(['Fn-t f 0' num2str(nflat(pl))]);
    xlabel('Tempo [s]')
    ylabel('Fn [Hz]')
    saveas(h1,['Fn-t f0' num2str(nflat(pl)) '.jpg'])
    hold on
    %PLOT ZITA-t
    zita=ZITA(1,indice).value;
    zitainterp=polyfit(tempo,zita,5);
    zitaf=polyval(zitainterp,tempo);
    zitain=mean(zita(1:10));
    CRICCA(k,10)=zitain;
    h2=figure;
    plot(tempo,zita,'o',tempo,zitaf,'r','Linewidth',3);
    title(['Zita-t f 0' num2str(nflat(pl))]);
    xlabel('Tempo [s]')
    ylabel('Zita')
    saveas(h2,['Zita-t f0' num2str(nflat(pl)) '.jpg'])
    hold on
    %% BASE ACC
    h3= figure;
```

```

auxxC17=length(yC17nfa);
tempo2=(0:1/Fs:((auxxC17-1)/Fs));
subplot(2,2,1);
plot (tempo2,yC17nfa)
title(['Accelerazione della base CH17 f 0'
num2str(nflat(pl))'],'FontSize',10,'FontWeight','bold')
xlabel ('Tempo [s]','FontSize',10,'FontWeight','bold');
ylabel ('Accelerazione [g]','FontSize',10,'FontWeight','bold');
set(gca,'FontSize',10,'FontWeight','bold')
hold on
%% MASS ACC
auxxC17=length(yC18nfa);
tempo2=(0:1/Fs:((auxxC17-1)/Fs));
subplot(2,2,2);
plot (tempo2,yC18nfa)
title(['Accelerazione della massa CH18 f 0'
num2str(nflat(pl))'],'FontSize',10,'FontWeight','bold')
xlabel ('Tempo [s]','FontSize',10,'FontWeight','bold');
ylabel ('Accelerazione [g]','FontSize',10,'FontWeight','bold');
set(gca,'FontSize',10,'FontWeight','bold')
hold on
%% RELATIVE ACC
subplot(2,2,3);
plot (tempo2,yC18_17nfa)
title(['Accelerazione relativa f 0'
num2str(nflat(pl))'],'FontSize',10,'FontWeight','bold')
xlabel ('Tempo [s]','FontSize',10,'FontWeight','bold');
ylabel ('Accelerazione [g]','FontSize',10,'FontWeight','bold');
set(gca,'FontSize',10,'FontWeight','bold')
hold on
%% RELATIVE DISPLACEMENT
auxxSPOSTRELCH17_CH18na=length(SPOSTRELCH17_CH18na);
xSPOSTRELCH17_CH18na=(0:1/Fs:((auxxC17-1)/Fs));
subplot(2,2,4);
plot (xSPOSTRELCH17_CH18na,SPOSTRELCH17_CH18na*1000)
title(['Spostamento relativo f 0'
num2str(nflat(pl))'],'FontSize',10,'FontWeight','bold')
xlabel ('Tempo [s]','FontSize',10,'FontWeight','bold');
ylabel ('Spostamento [mm]','FontSize',10,'FontWeight','bold');
set(gca,'FontSize',10,'FontWeight','bold')
hold on
saveas(h3,['Segnali accelerazioni f 0' num2str(nflat(pl)) '.jpg'])
%% PSD BASE ACC
[pxx,f] = pwelch(yC17nfa,500,300,500,Fs);
h4=figure;
subplot(2,2,1);
plot(f,10*log10(pxx));
title(['PSD Accelerazione della base CH17 f 0'
num2str(nflat(pl))'],'FontSize',10,'FontWeight','bold')
xlabel('Frequenza (Hz)','FontSize',10,'FontWeight','bold')
ylabel('Ampiezza (dB)','FontSize',10,'FontWeight','bold')
set(gca,'FontSize',10,'FontWeight','bold')
hold on
%% PSD MASS ACC
[pxx,f] = pwelch(yC18nfa,500,300,500,Fs);
subplot(2,2,2);
plot(f,10*log10(pxx))
title(['PSD Accelerazione della massa CH18 f 0'
num2str(nflat(pl))'],'FontSize',10,'FontWeight','bold')
xlabel('Frequenza (Hz)','FontSize',10,'FontWeight','bold')
ylabel('Ampiezza (dB)','FontSize',10,'FontWeight','bold')
set(gca,'FontSize',10,'FontWeight','bold')

```

```

hold on
%% PSD RELATIVE ACC
[pxx,f] = pwelch(yC18_17nfa,500,300,500,Fs);
subplot(2,2,3);
plot(f,10*log10(pxx))
title(['PSD Accelerazione relativa f 0'
num2str(nflat(pl))], 'FontSize',10,'FontWeight','bold')
xlabel('Frequenza (Hz)', 'FontSize',10,'FontWeight','bold')
ylabel('Ampiezza (dB)', 'FontSize',10,'FontWeight','bold')
set(gca, 'FontSize',10, 'FontWeight', 'bold')
hold on
%% PSD RELATIVE DISPLACEMENT
[pxx,f] = pwelch(SPOSTRELCH17_CH18na*1000,500,300,500,Fs);
subplot(2,2,4);
plot(f,10*log10(pxx))
title(['PSD Spostamento relativo f 0'
num2str(nflat(pl))], 'FontSize',10,'FontWeight','bold')
xlabel('Frequenza (Hz)', 'FontSize',10,'FontWeight','bold')
ylabel('Ampiezza (dB)', 'FontSize',10,'FontWeight','bold')
set(gca, 'FontSize',10, 'FontWeight', 'bold')
hold on
saveas(h4,['PSD f0' num2str(nflat(pl)) '.jpg'])

%% SPETTROGRAMMA CH17
NN=3200;
[S3,freq2,tim2] = spectrogram(yC17nfa,NN,0,NN,Fs);
h5=figure('Renderer','zbuffer');
subplot(2,2,1)
pcolor(tim2,freq2,abs(S3))
box on
colormap(jet)
shading interp
ylabel('Frequenza [Hz]', 'FontSize',10,'FontWeight','bold')
xlabel('Tempo [s]', 'FontSize',10,'FontWeight','bold');
title(['Spettrogramma acc. base f 0'
num2str(nflat(pl))], 'FontSize',10,'FontWeight','bold')
ylim([8 50])

set(gca, 'XTick',0:tim2(end)/4:tim2(end), 'YTick',10:5:50, 'FontSize',10, 'FontWeight', 'bold')
mSI1p5yab=max(max(abs(S3)));
caxis([0 mSI1p5yab*1])
hold on
%% SPETTROGRAMMA CH18
NN=3200;
[S3,freq2,tim2] = spectrogram(yC18nfa,NN,0,NN,Fs);
subplot(2,2,2)
pcolor(tim2,freq2,abs(S3))
box on
colormap(jet)
shading interp
ylabel('Frequenza [Hz]', 'FontSize',10,'FontWeight','bold')
xlabel('Tempo [s]', 'FontSize',10,'FontWeight','bold');
title(['Spettrogramma acc. massa f 0'
num2str(nflat(pl))], 'FontSize',10,'FontWeight','bold')
ylim([8 50])

set(gca, 'XTick',0:tim2(end)/4:tim2(end), 'YTick',10:5:50, 'FontSize',10, 'FontWeight', 'bold')
mSI1p5yab=max(max(abs(S3)));
caxis([0 mSI1p5yab*1])
hold on

```

```

%% SPETTROGRAMMA CH18_17
NN=3200;
[S3,freq2,tim2] = spectrogram(yC18_17nfa,NN,0,NN,Fs);
subplot(2,2,3)
pcolor(tim2,freq2,abs(S3))
box on
colormap(jet)
shading interp
ylabel('Frequenza[Hz'],'FontSize',10,'FontWeight','bold');
xlabel('Tempo [s'],'FontSize',10,'FontWeight','bold');
title(['Spettrogramma acc. relativa f 0'
num2str(nflat(pl))'],'FontSize',10,'FontWeight','bold')
ylim([8 50])

set(gca,'XTick',0:tim2(end)/4:tim2(end),'YTick',10:5:50,'FontSize',10,'FontWeigh
t','bold')
mSI1p5yab=max(max(abs(S3)));
caxis([0 mSI1p5yab*1])
hold on
saveas(h5,['SPECTROGRAM RELATIVE ACCELERATION f0' num2str(nflat(pl))
'.jpg'])
end

```

Appendice D: Raccolta dei dati utilizzati per la determinazione del parametro “b”

PROVINO: f_022

	Media [g]	RMS [g]	Skewness	Kurtosis	Frequenza media [Hz]
Accelerazione Base CH17	9,48E-07	0,201	-6,13E-03	2,990	25,02
Accelerazione Massa CH18	-1,70E-06	1,130	-6,92E-03	2,611	11,58
Accelerazione relativa CH17-CH18	-2,65E-06	1,141	-5,95E-03	2,627	12,01
Spostamento Relativo	2,87E-09	0,002	1,66E-03	2,639	11,54
Accelerazione Trasversale CH22	1,80E-20	0,031	-1,03E-02	4,970	28,27
Accelerazione Verticale CH23	4,61E-19	1,141	7,47E-02	2,656	11,55
Accelerazione Longitudinale CH24	-6,70E-20	0,911	-7,40E-02	2,670	12,08

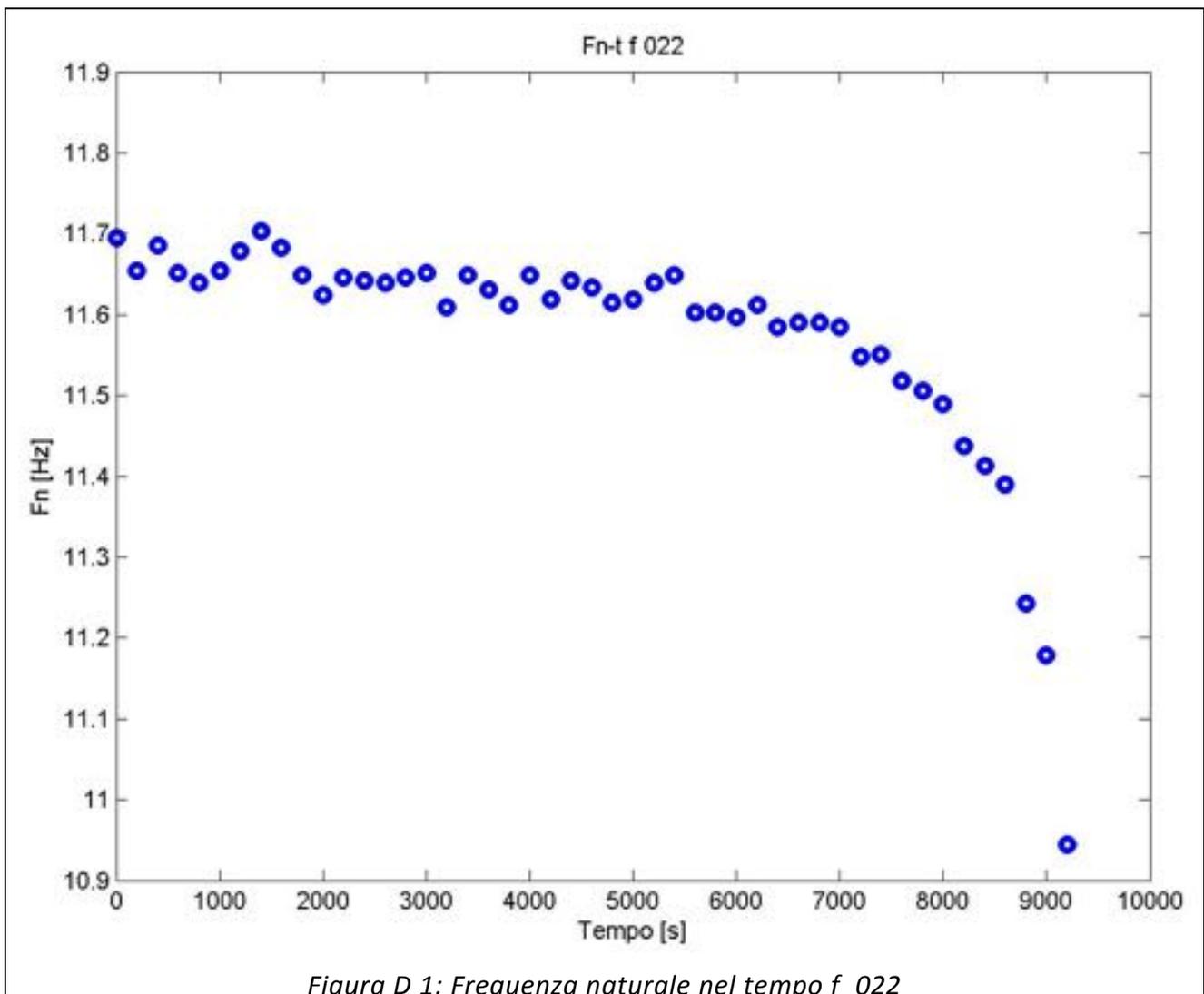


Figura D 1: Frequenza naturale nel tempo f_022

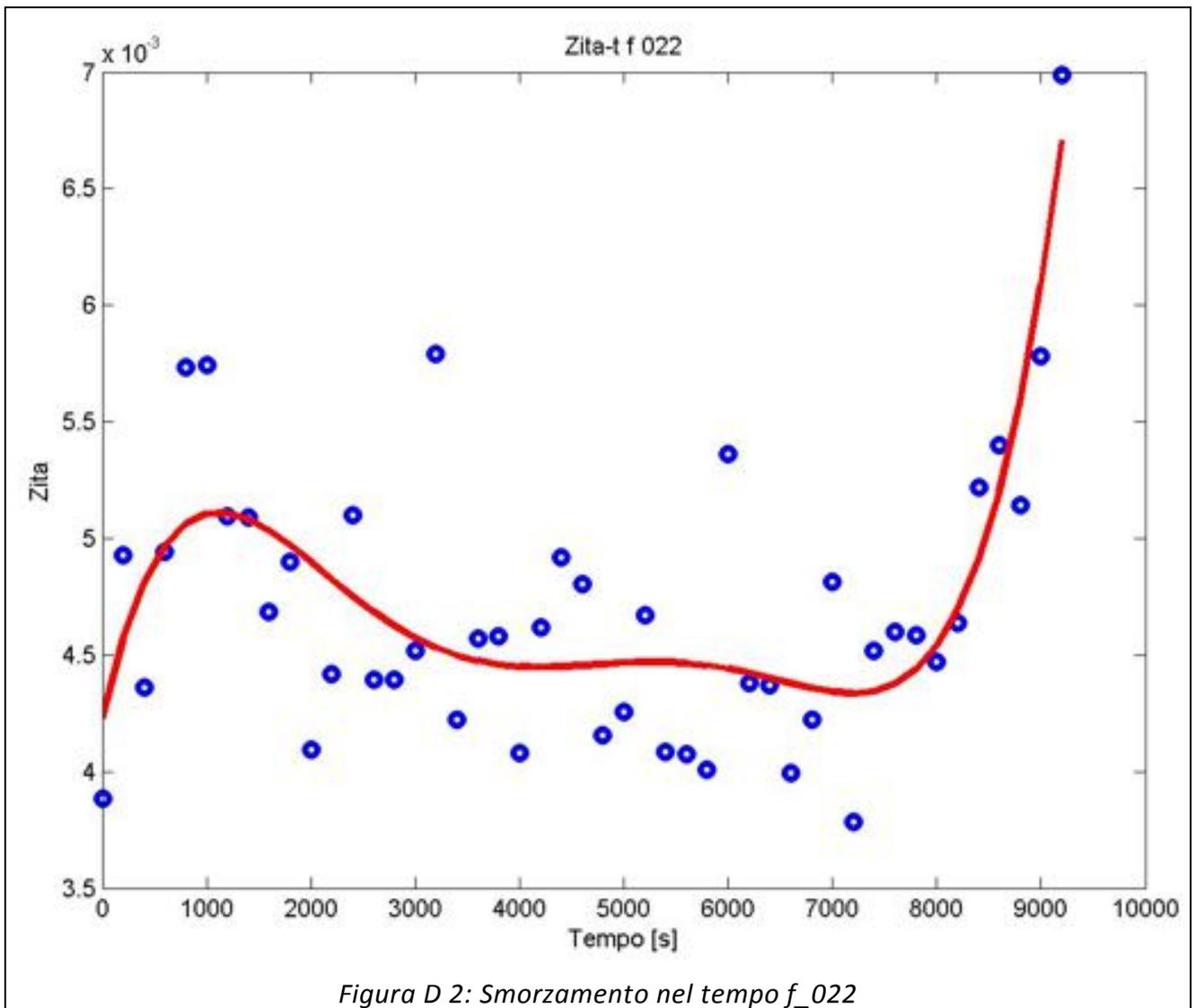
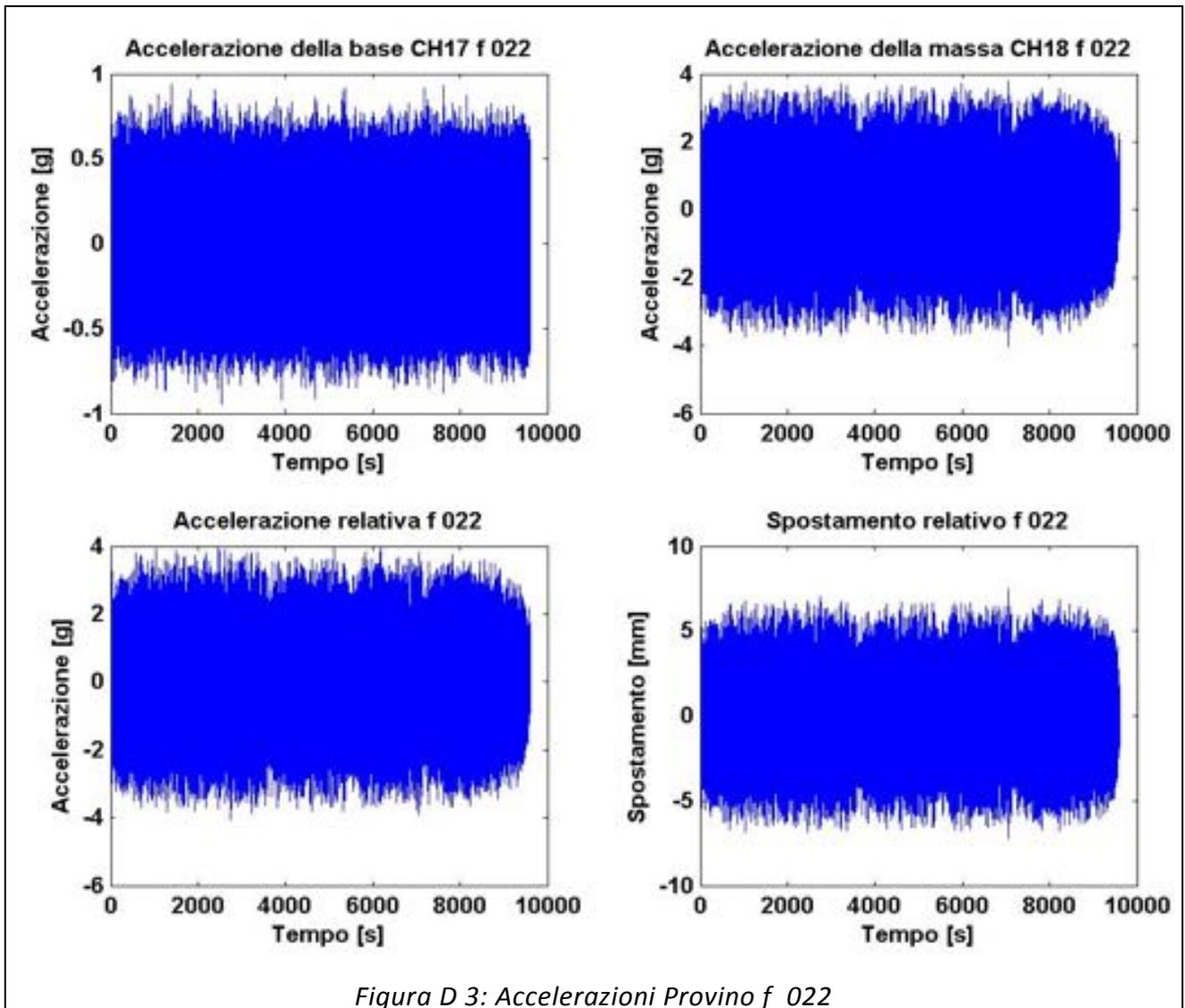
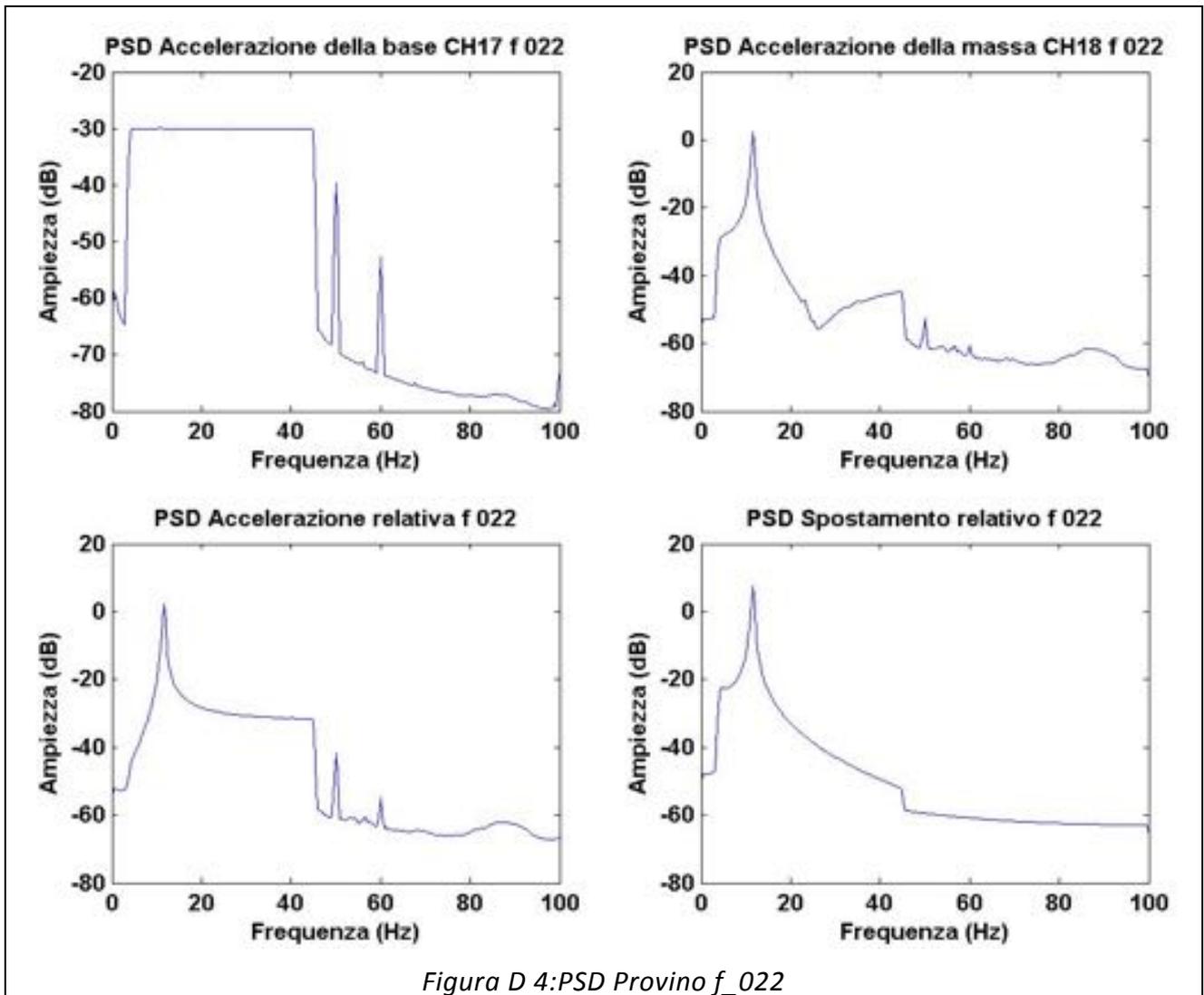


Figura D 2: Smorzamento nel tempo f_022





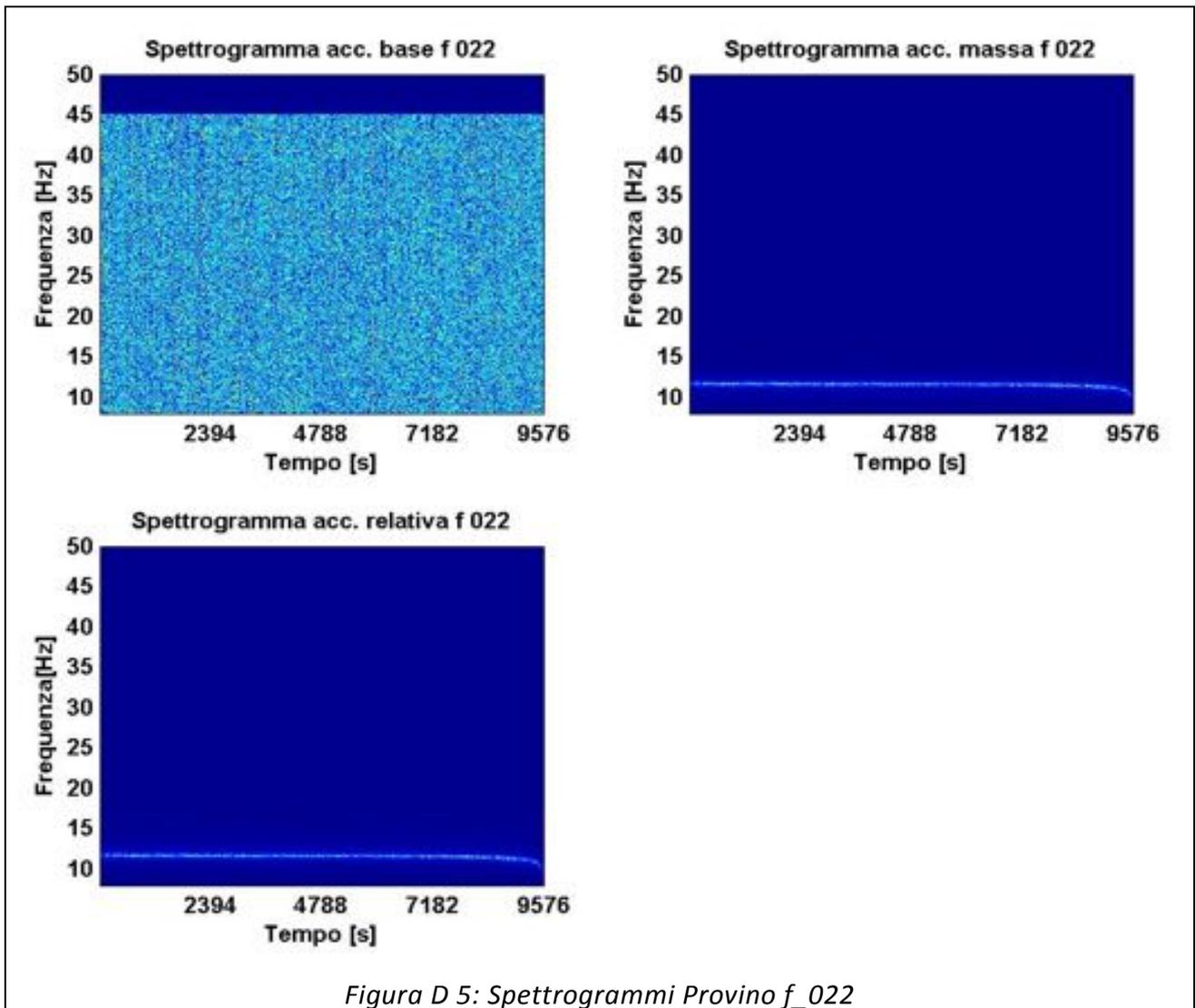
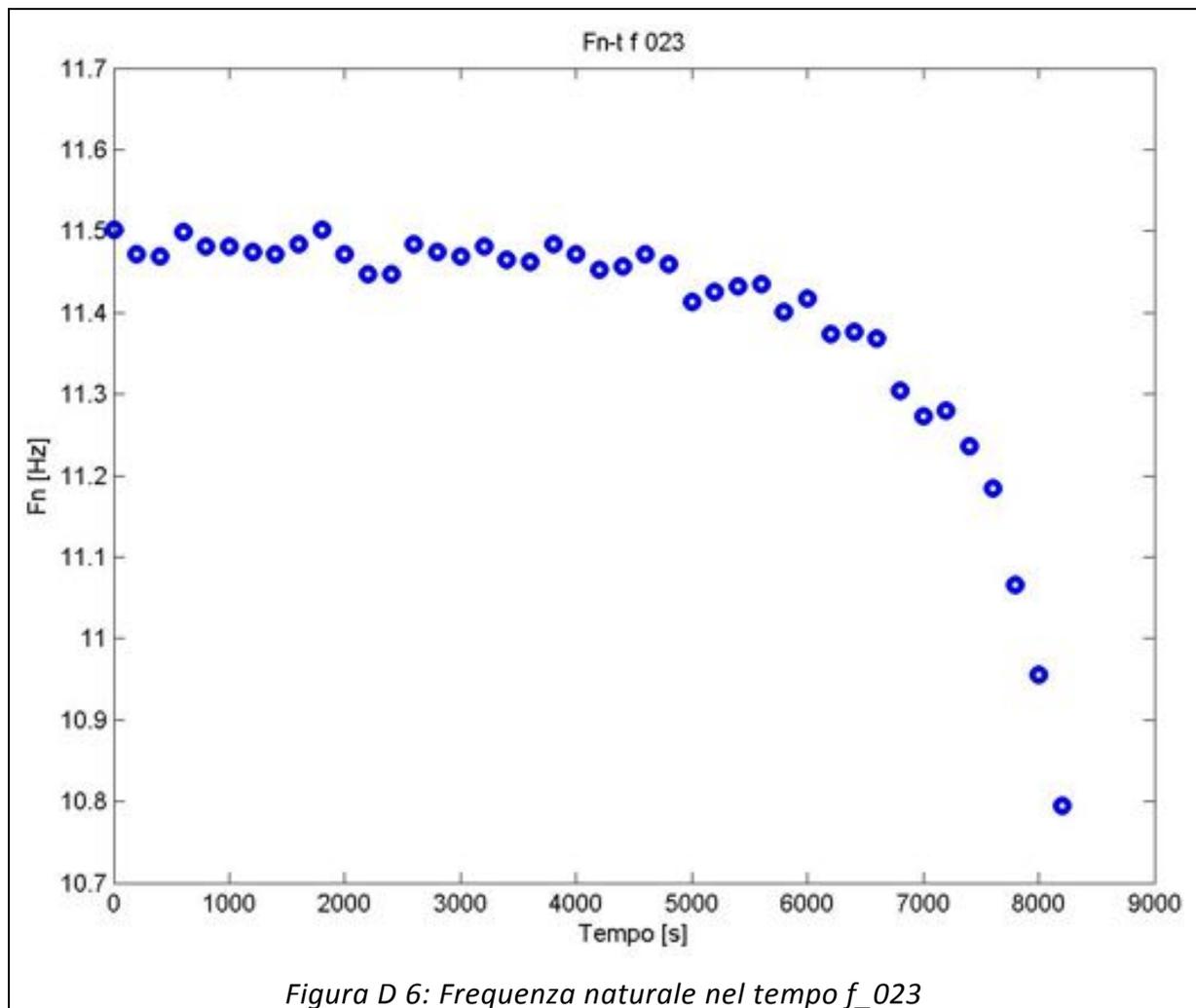


Figura D 5: Spettrogrammi Provino f_{022}

PROVINO: f_023

	Media [g]	RMS [g]	Skewness	Kurtosis	Frequenza media [Hz]
Accelerazione Base CH17	1,44E-07	0,201	-8,53E-03	2,996	25,03
Accelerazione Massa CH18	1,47E-06	0,981	8,44E-03	2,627	11,41
Accelerazione relativa CH17-CH18	1,33E-06	0,996	8,36E-03	2,650	11,96
Spostamento Relativo	-2,97E-09	0,002	-2,20E-03	2,629	11,41
Accelerazione Trasversale CH22	-5,34E-21	0,061	-2,14E-02	3,547	31,73
Accelerazione Verticale CH23	-4,22E-19	1,153	7,91E-02	2,661	11,39
Accelerazione Longitudinale CH24	3,15E-19	0,914	-6,68E-02	2,680	11,91



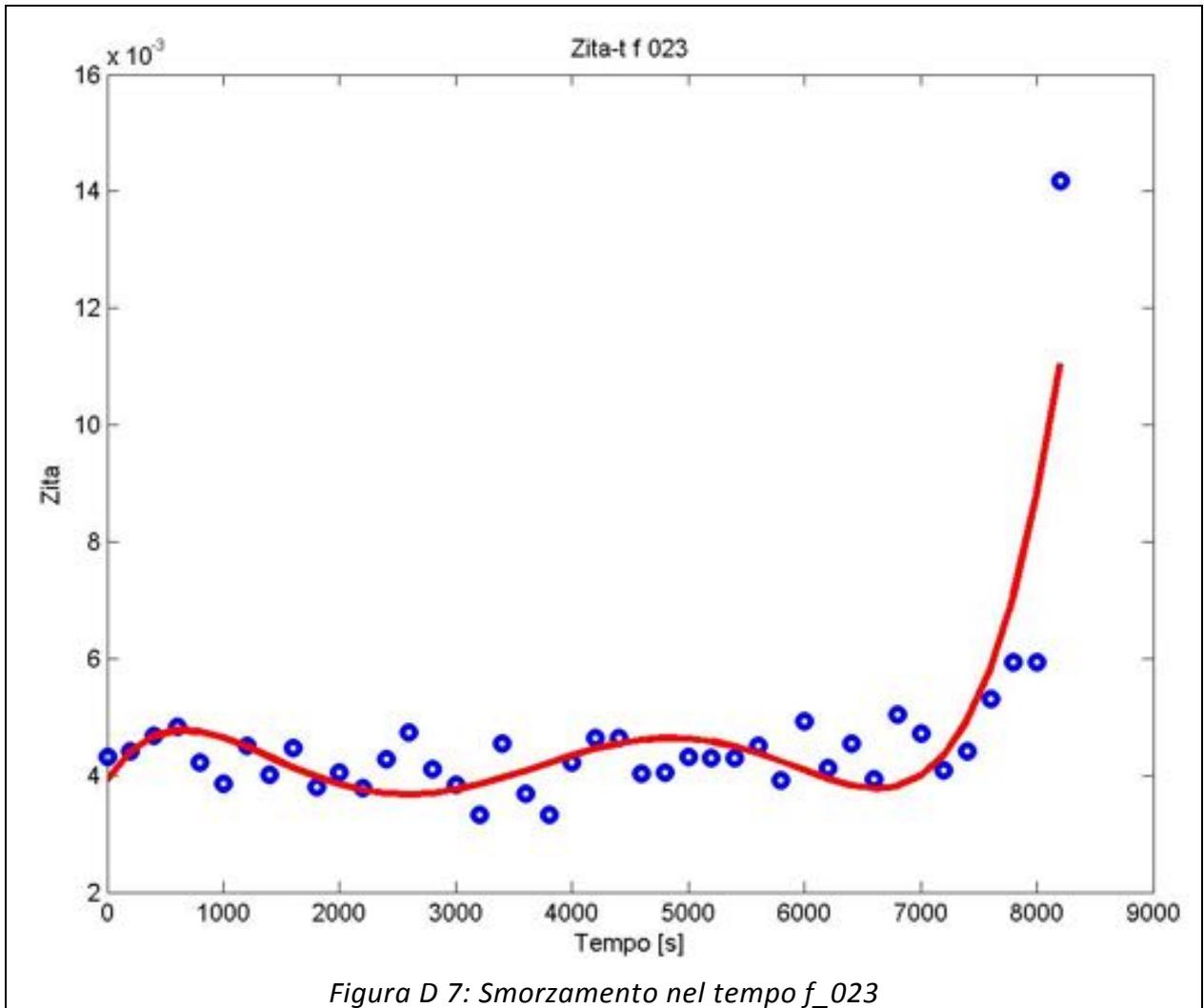
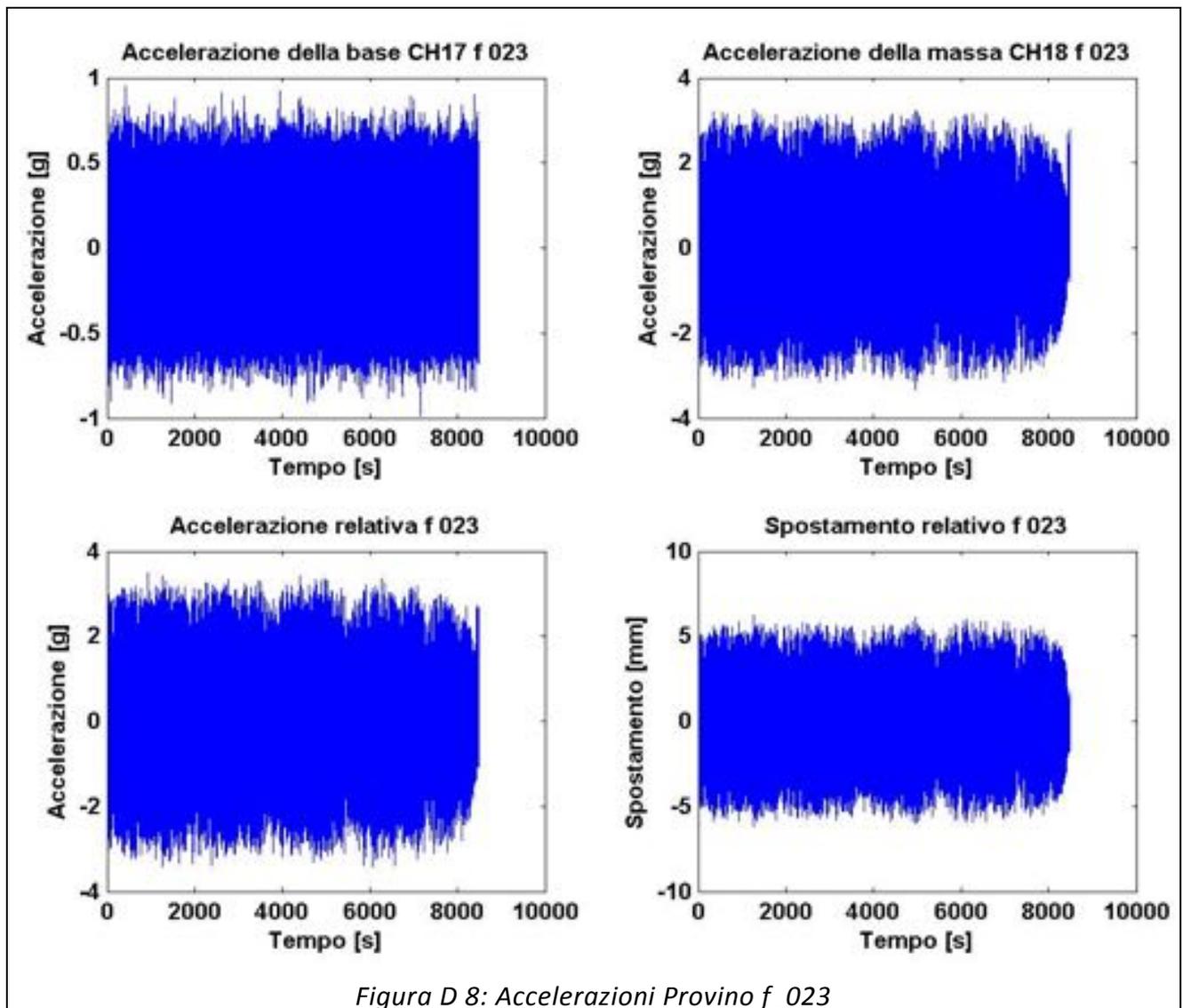
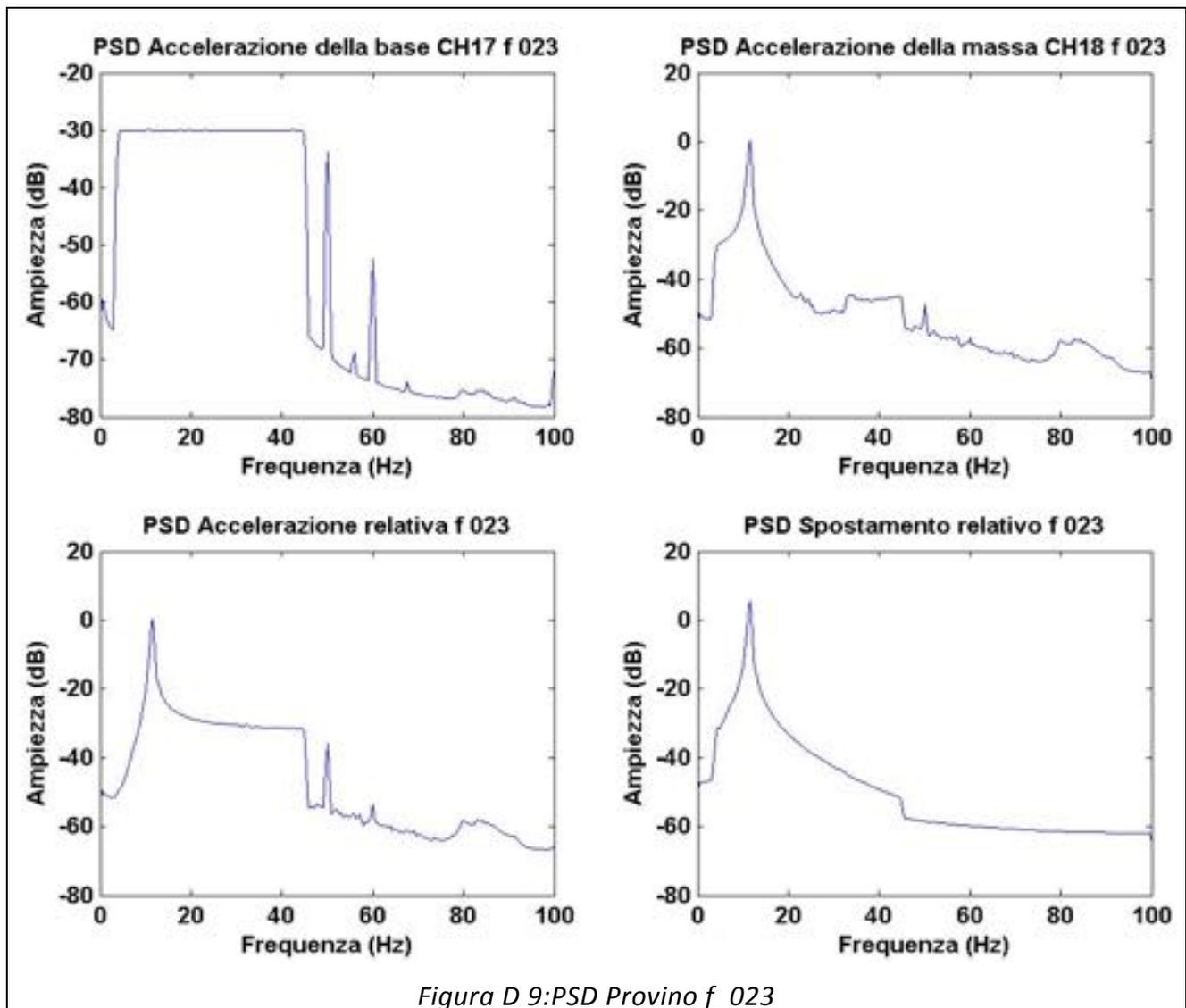


Figura D 7: Smorzamento nel tempo f_{023}





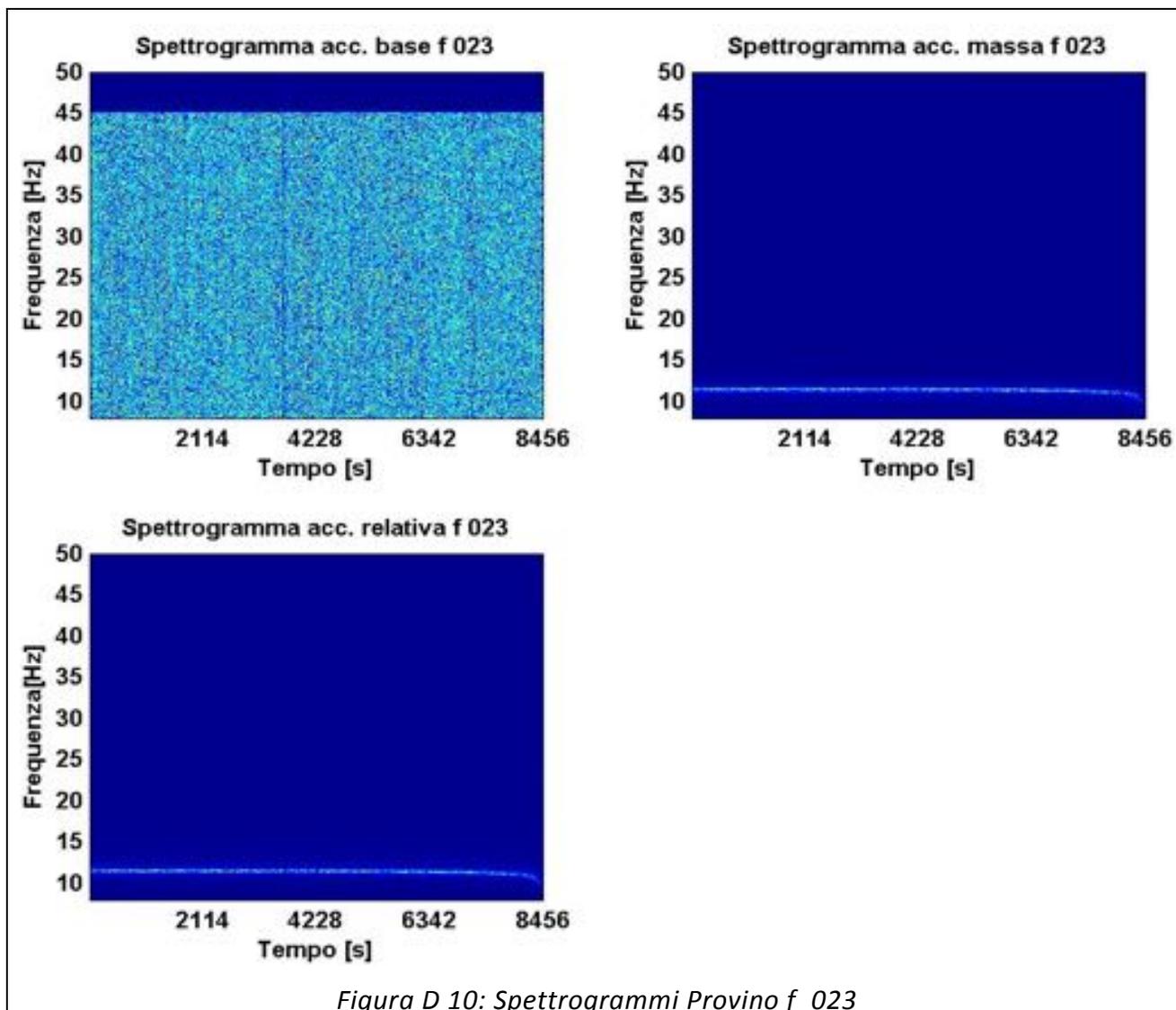
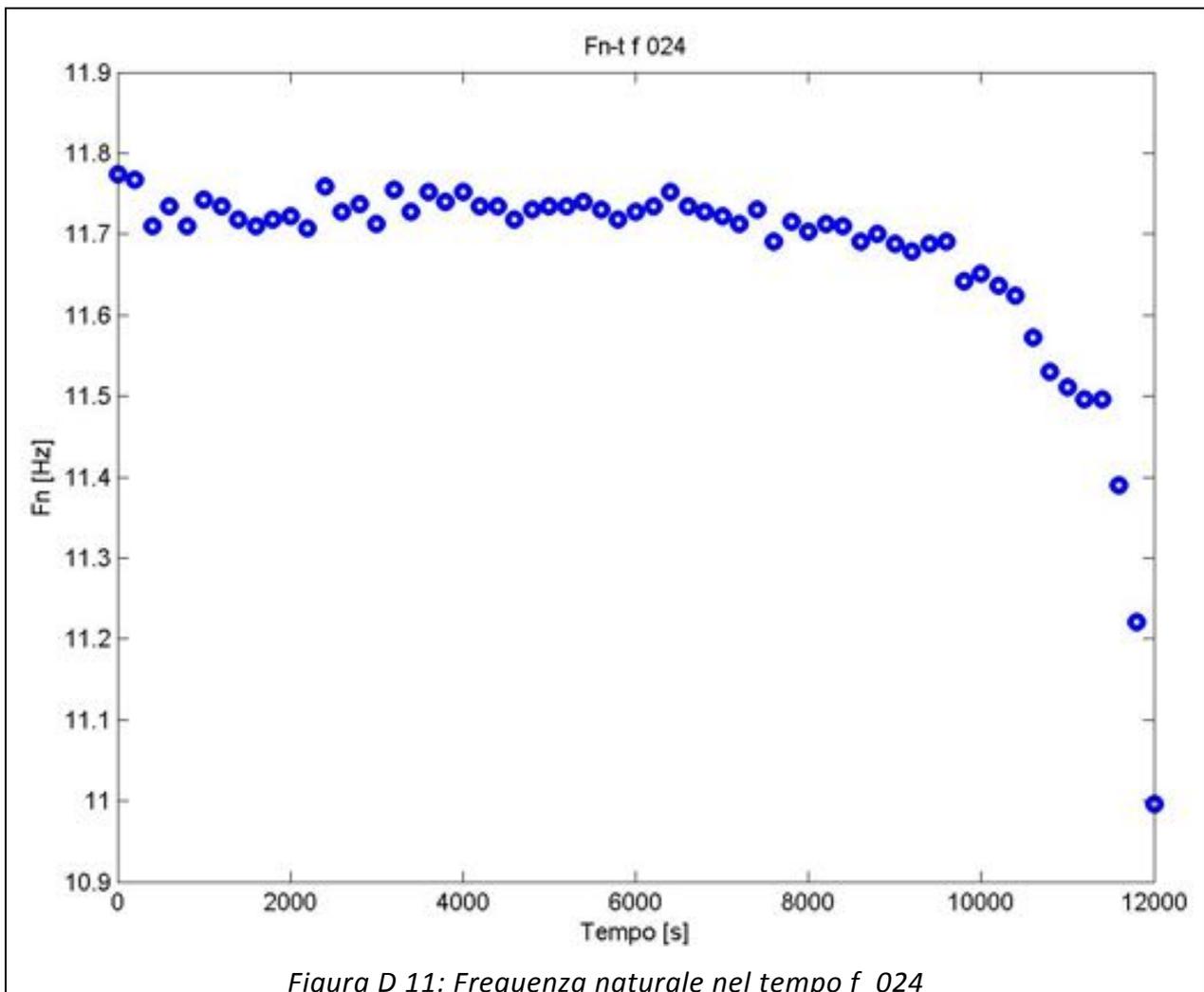


Figura D 10: Spettrogrammi Provino f_023

PROVINO: f_024

	Media [g]	RMS [g]	Skewness	Kurtosis	Frequenza media [Hz]
Accelerazione Base CH17	-1,38E-07	0,201	-6,39E-03	3,016	25,04
Accelerazione Massa CH18	3,29E-06	1,345	-2,58E-02	2,614	11,69
Accelerazione relativa CH17-CH18	3,43E-06	1,358	-2,55E-02	2,632	12,05
Spostamento Relativo	-6,17E-09	0,002	8,43E-03	2,637	11,64
Accelerazione Trasversale CH22	1,08E-21	0,046	-1,08E-01	4,488	31,81
Accelerazione Verticale CH23	9,09E-20	1,161	7,42E-02	2,656	11,67
Accelerazione Longitudinale CH24	-1,71E-20	0,949	-5,41E-02	2,598	12,23



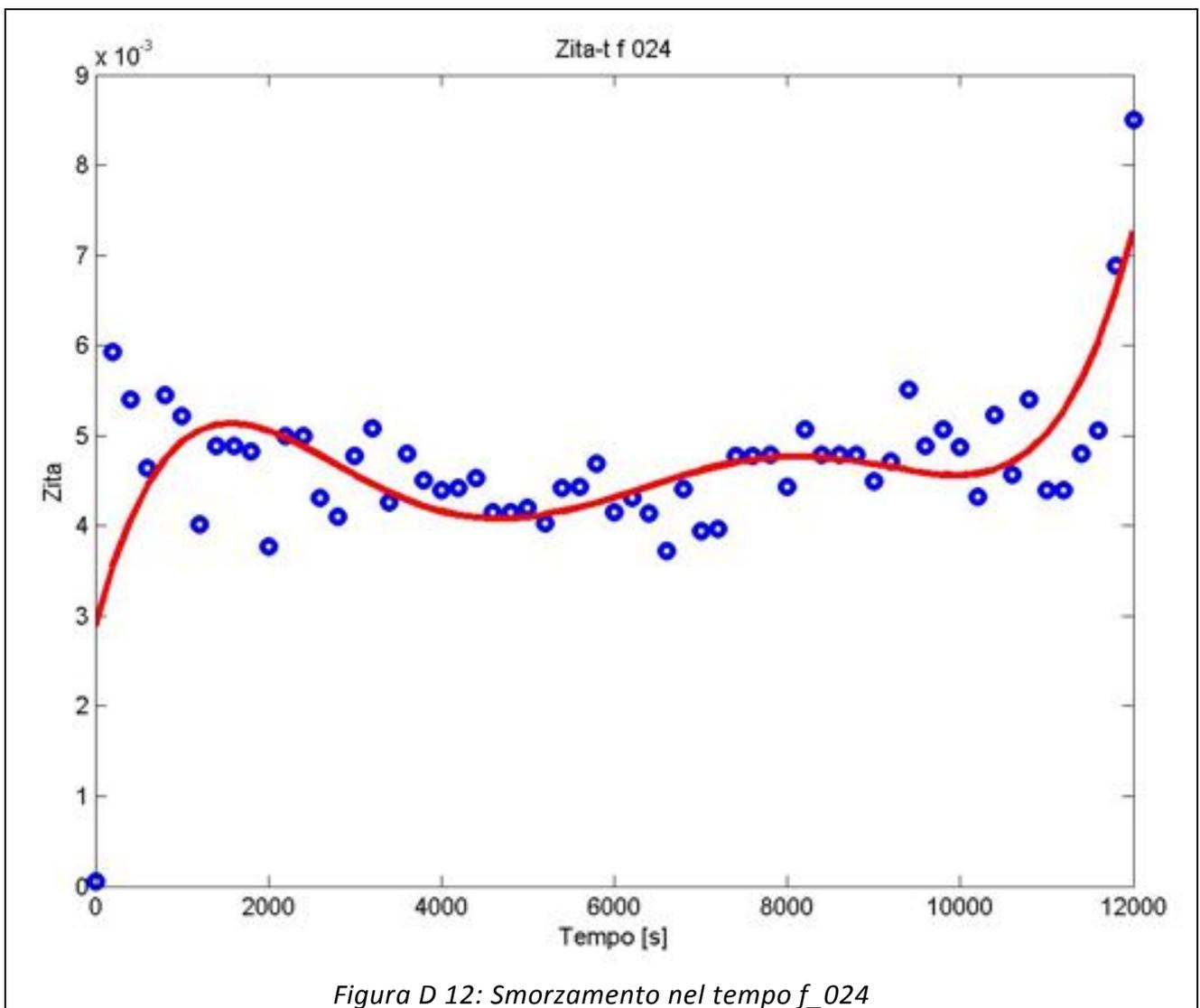
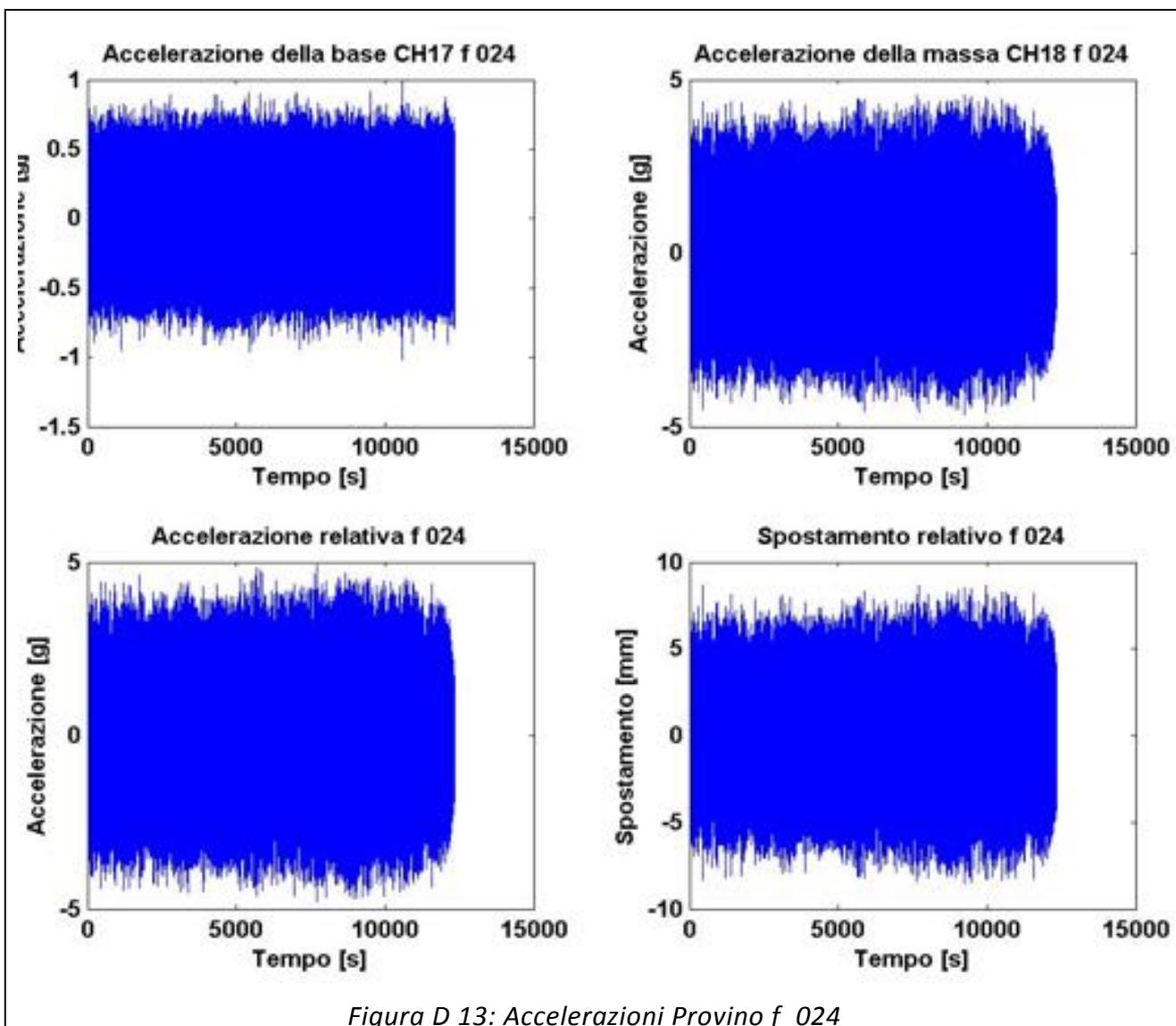


Figura D 12: Smorzamento nel tempo f_024



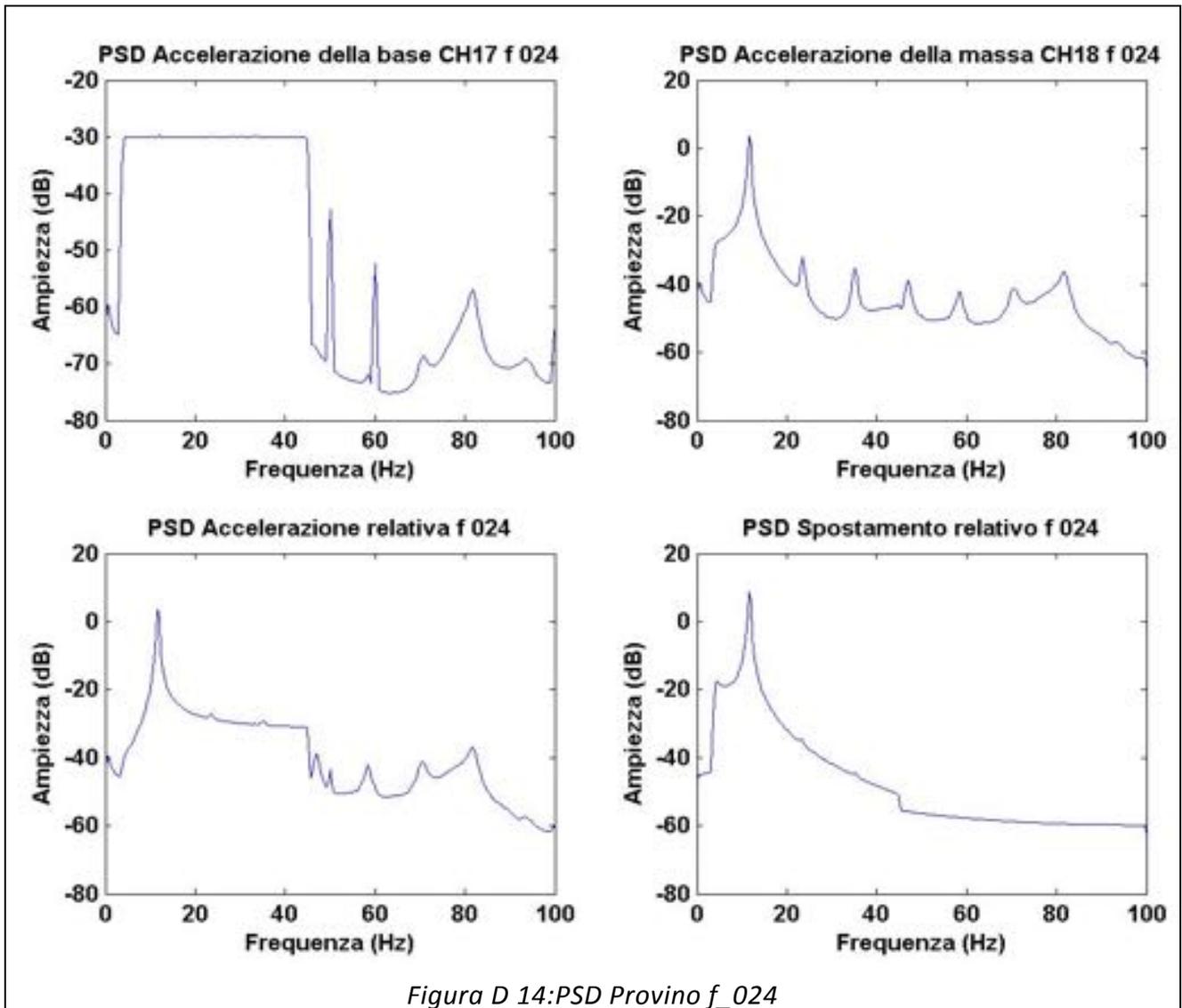


Figura D 14:PSD Provino f_024

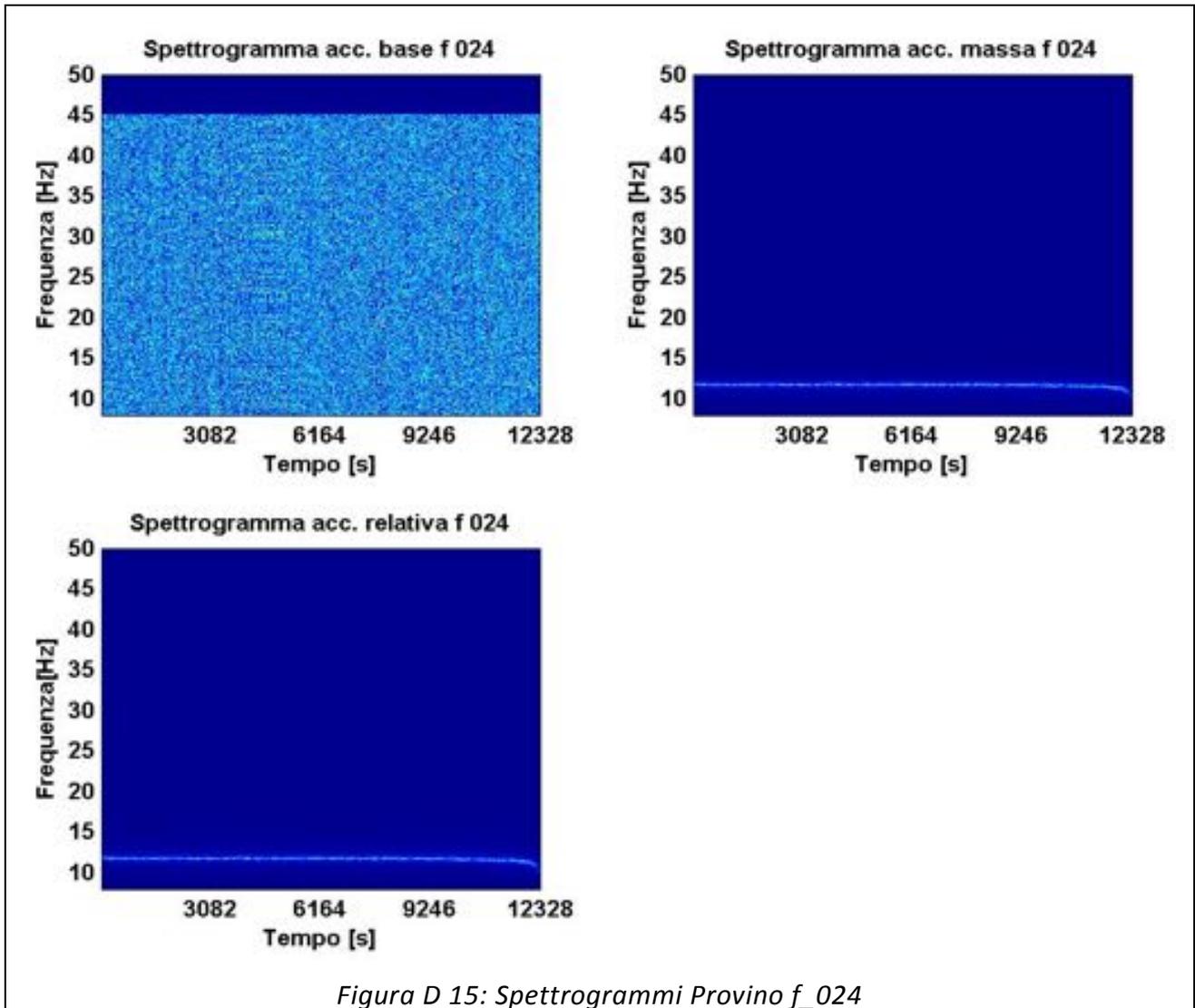
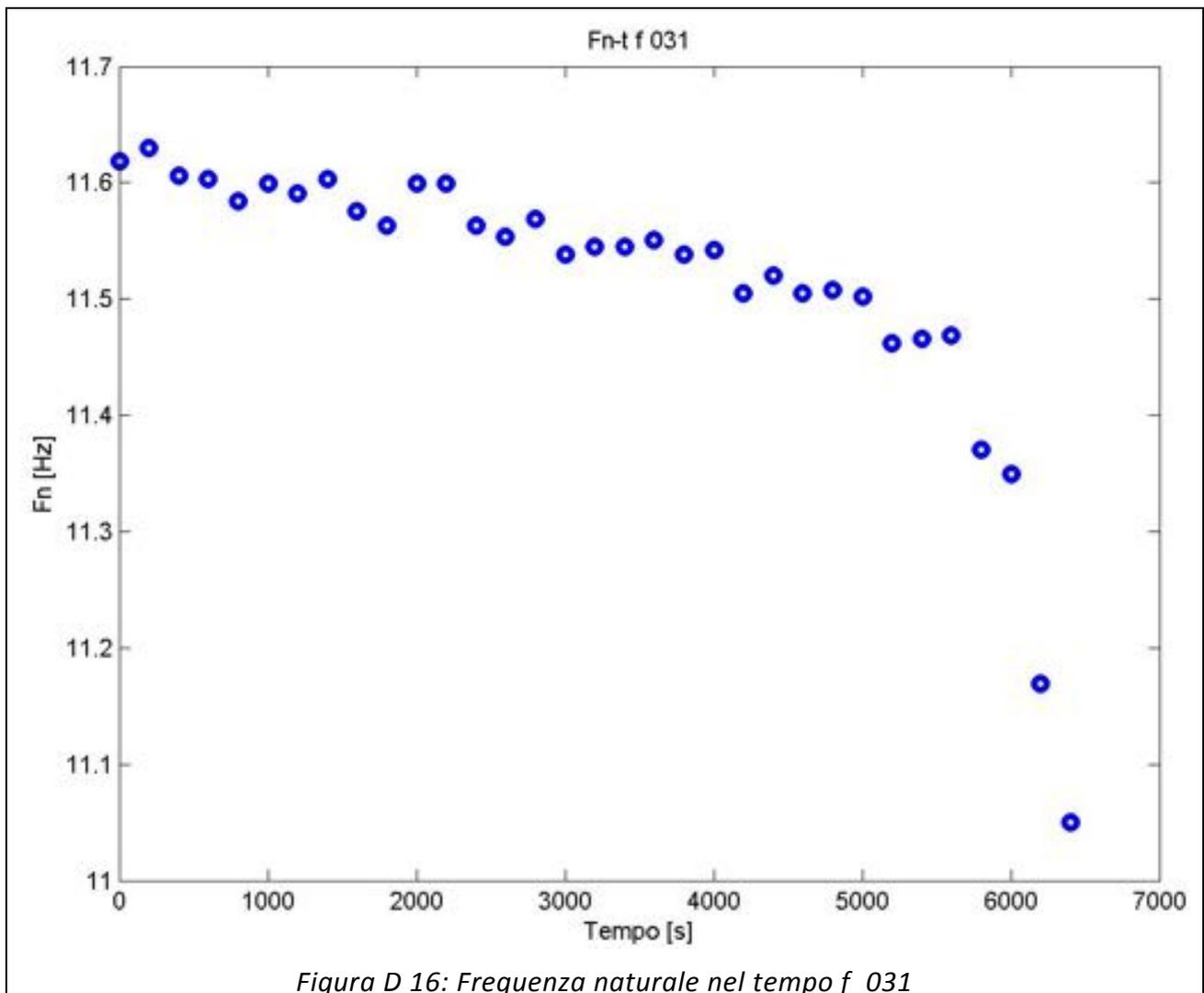
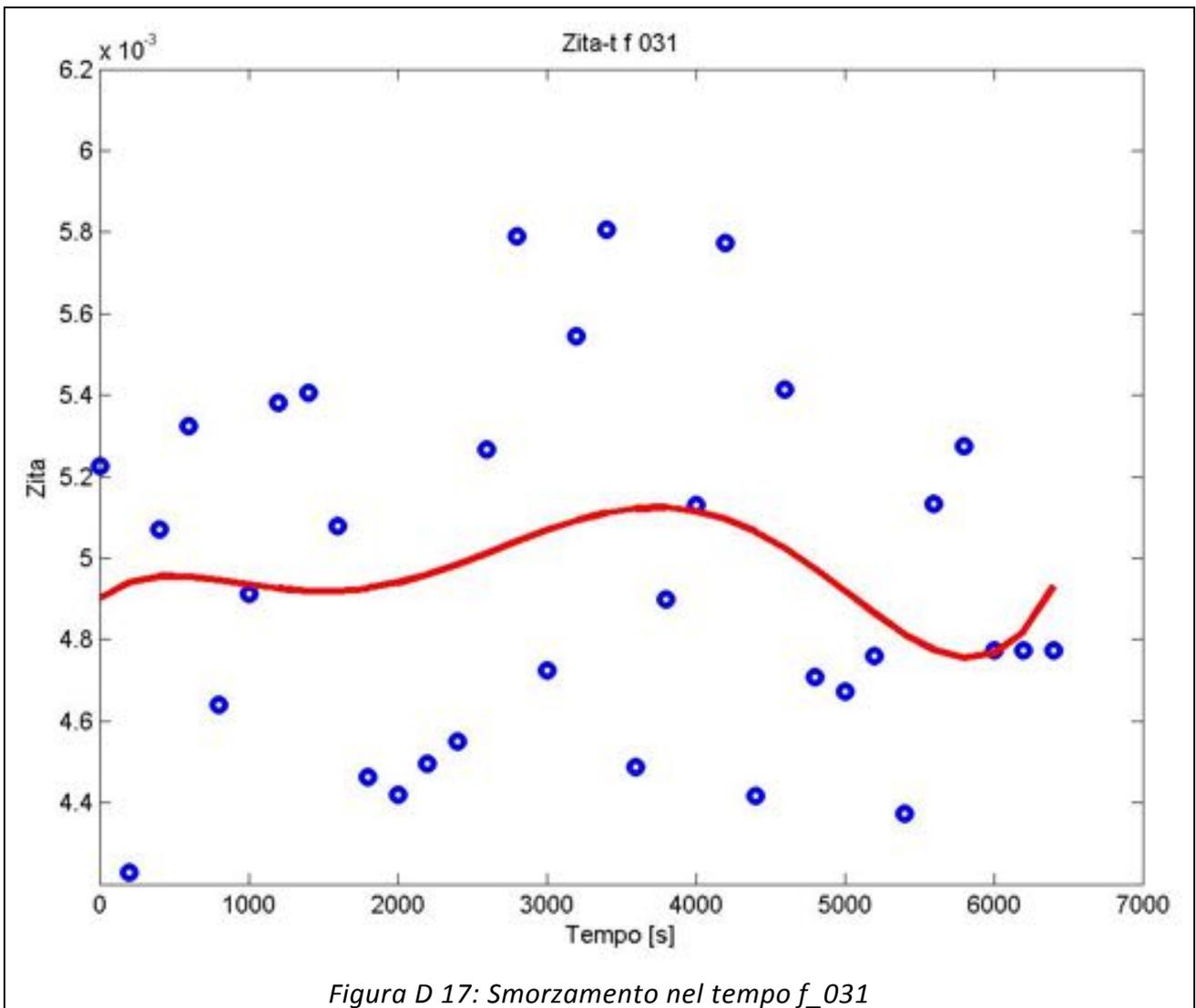


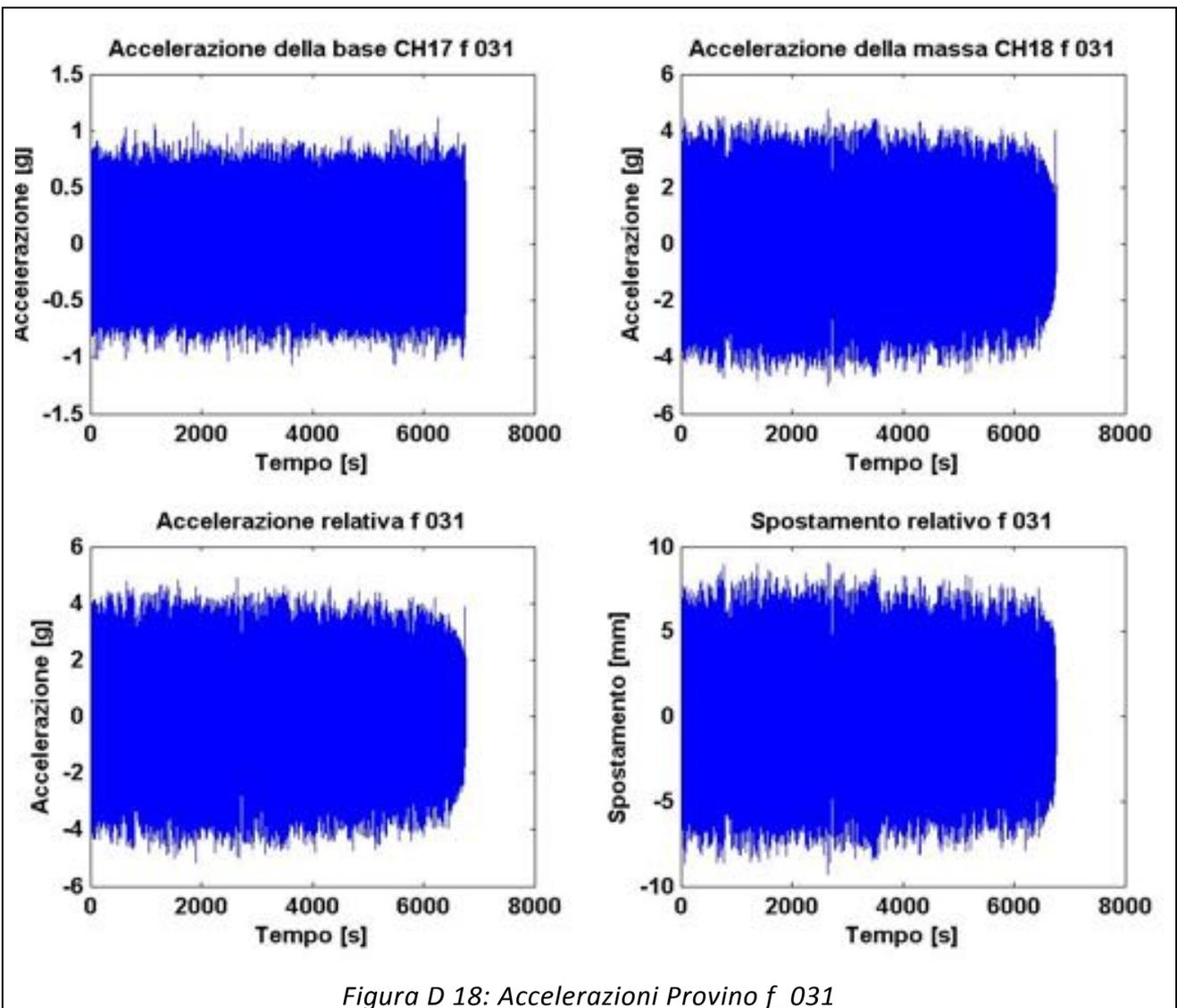
Figura D 15: Spettrogrammi Provino f_024

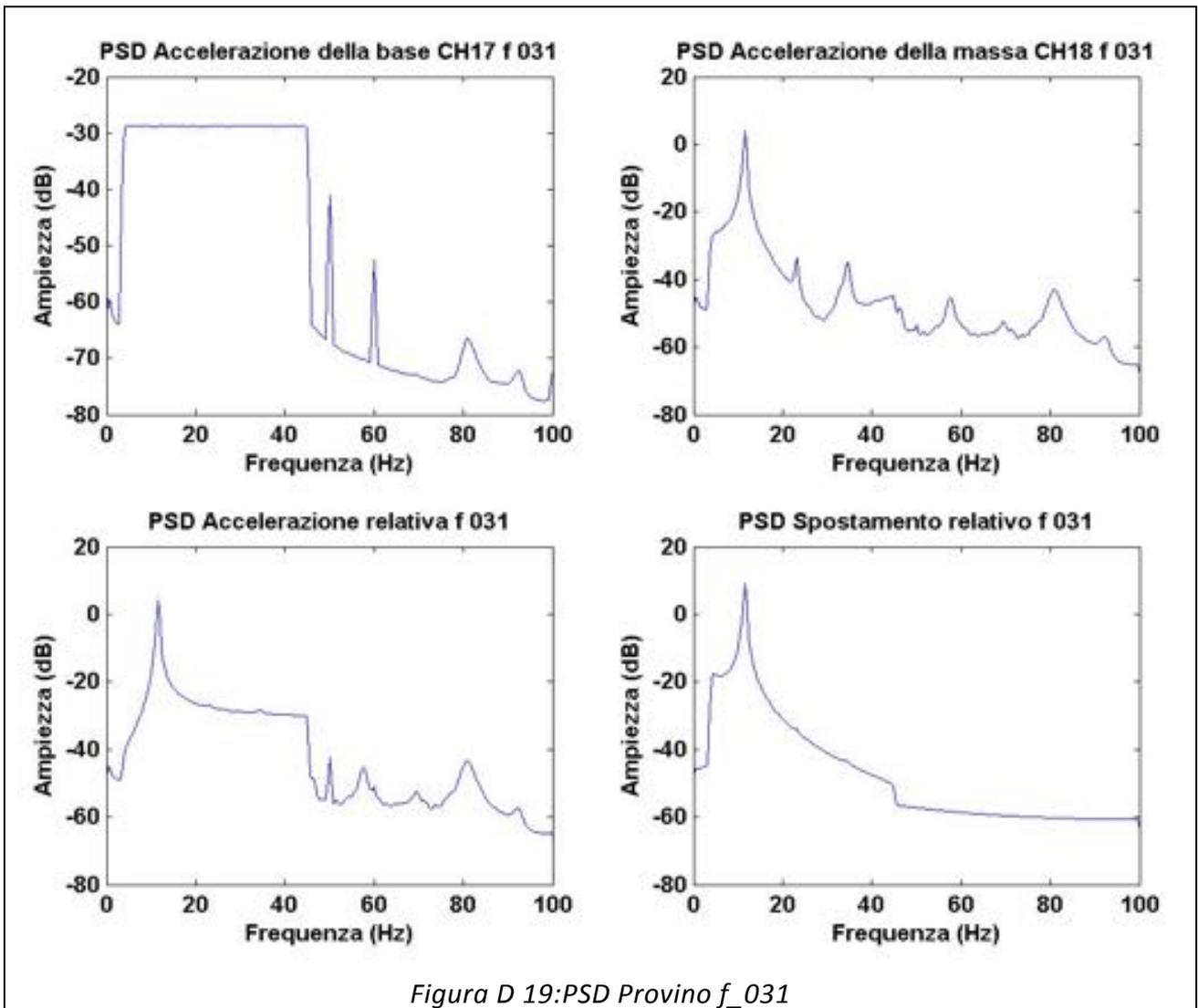
PROVINO: f_031

	Media [g]	RMS [g]	Skewness	Kurtosis	Frequenza media [Hz]
Accelerazione Base CH17	9,61E-08	0,234	-5,47E-03	2,988	25,01
Accelerazione Massa CH18	2,14E-06	1,390	-3,63E-02	2,689	11,53
Accelerazione relativa CH17-CH18	2,04E-06	1,406	-3,63E-02	2,703	11,97
Spostamento Relativo	-4,26E-09	0,003	9,82E-03	2,669	11,48
Accelerazione Trasversale CH22	-3,68E-20	0,041	-2,68E-01	5,032	27,63
Accelerazione Verticale CH23	4,75E-19	1,231	7,53E-02	2,642	11,50
Accelerazione Longitudinale CH24	3,77E-19	1,004	-7,07E-02	2,639	12,11









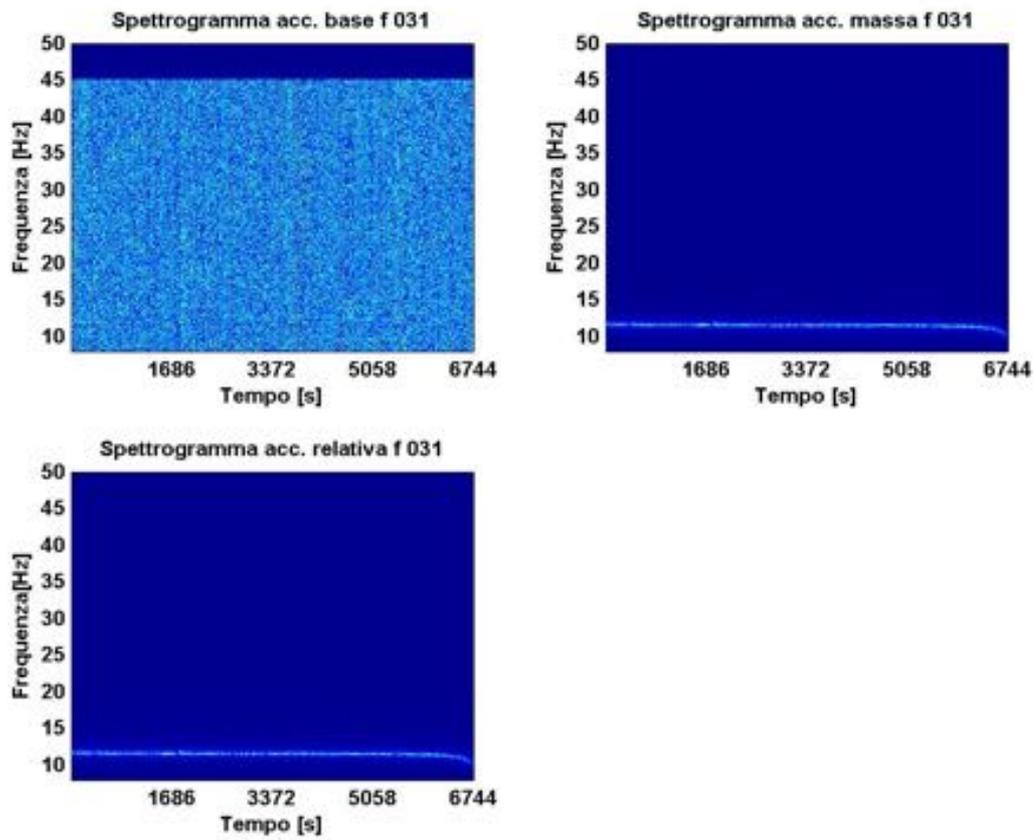
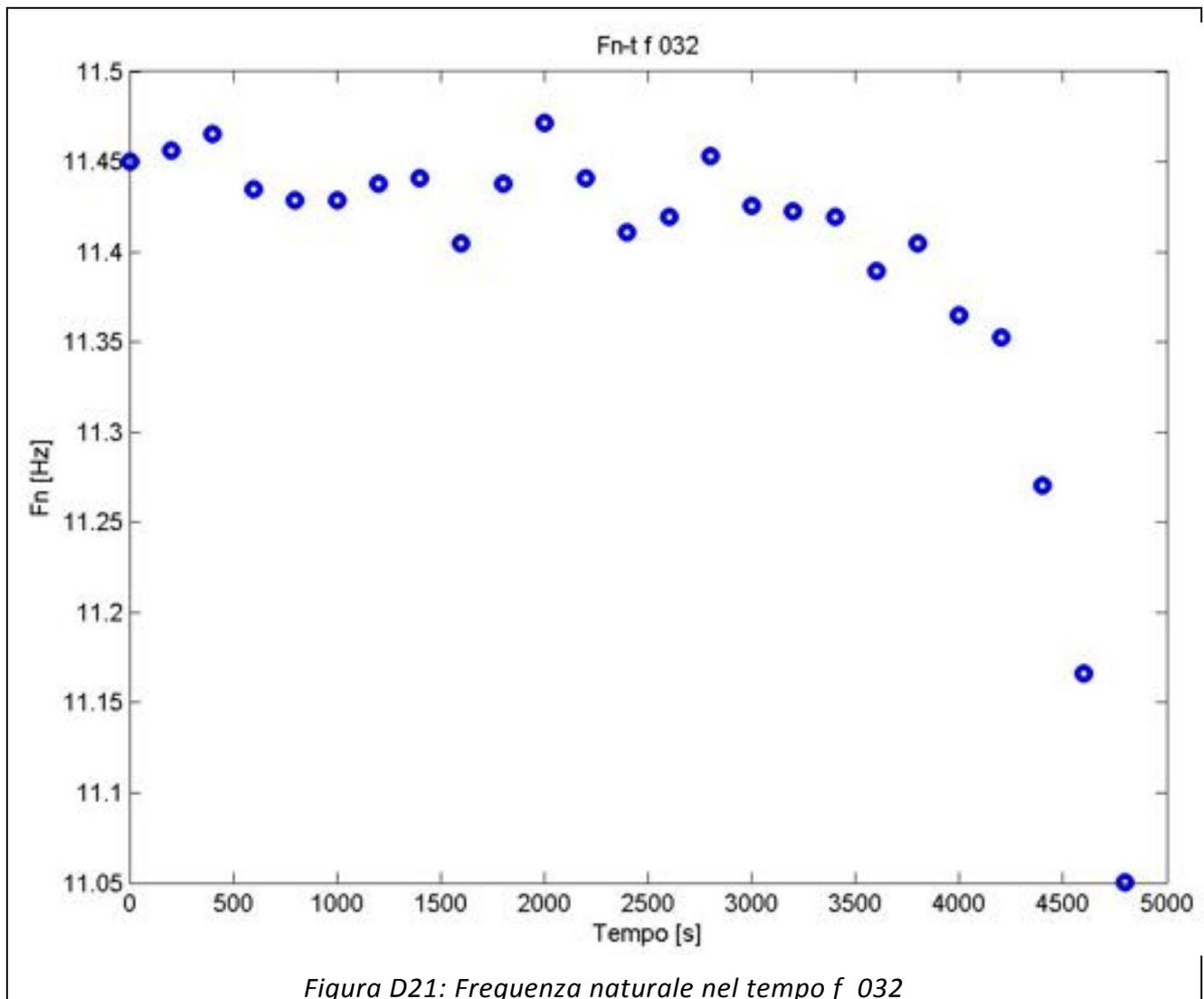
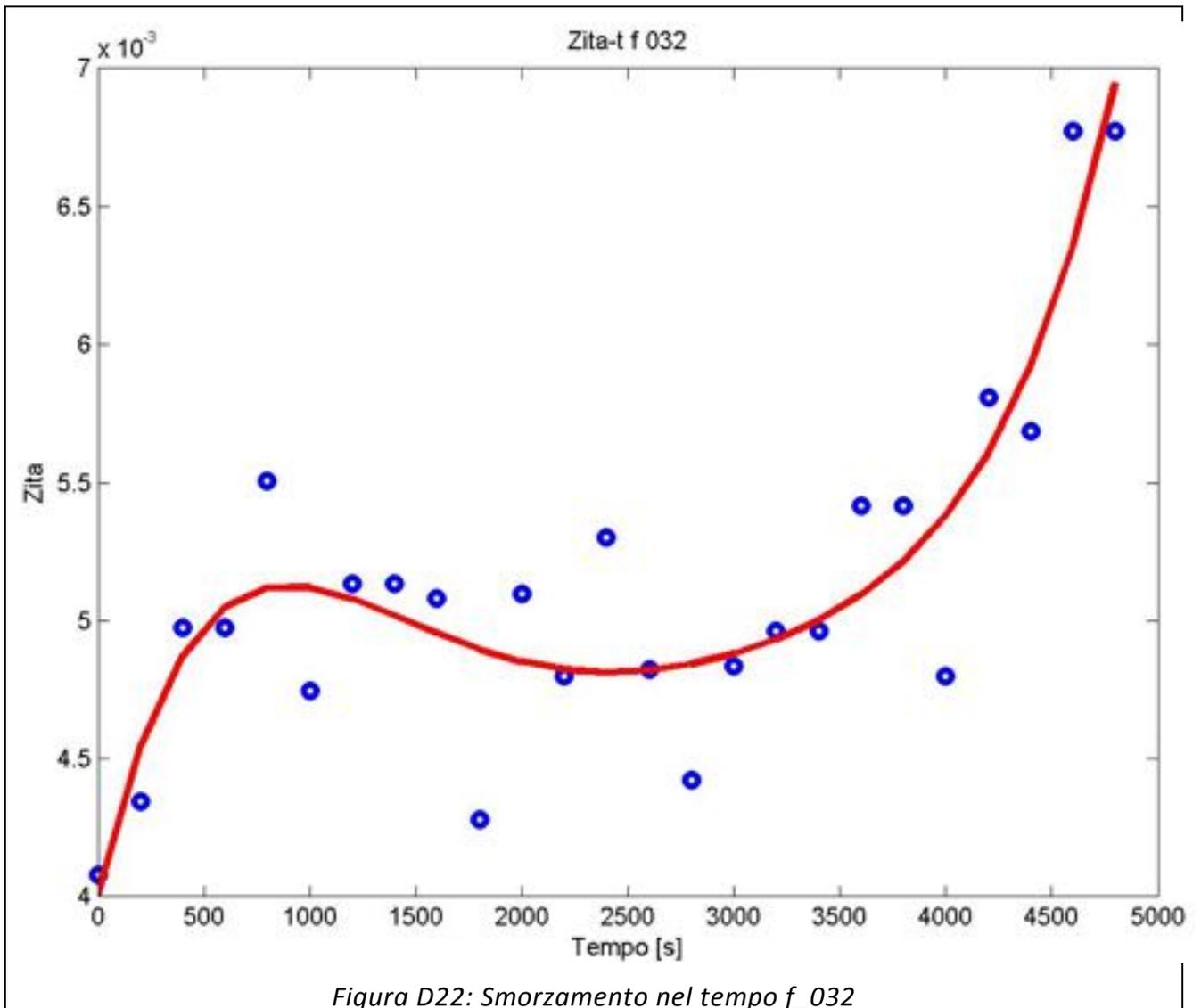


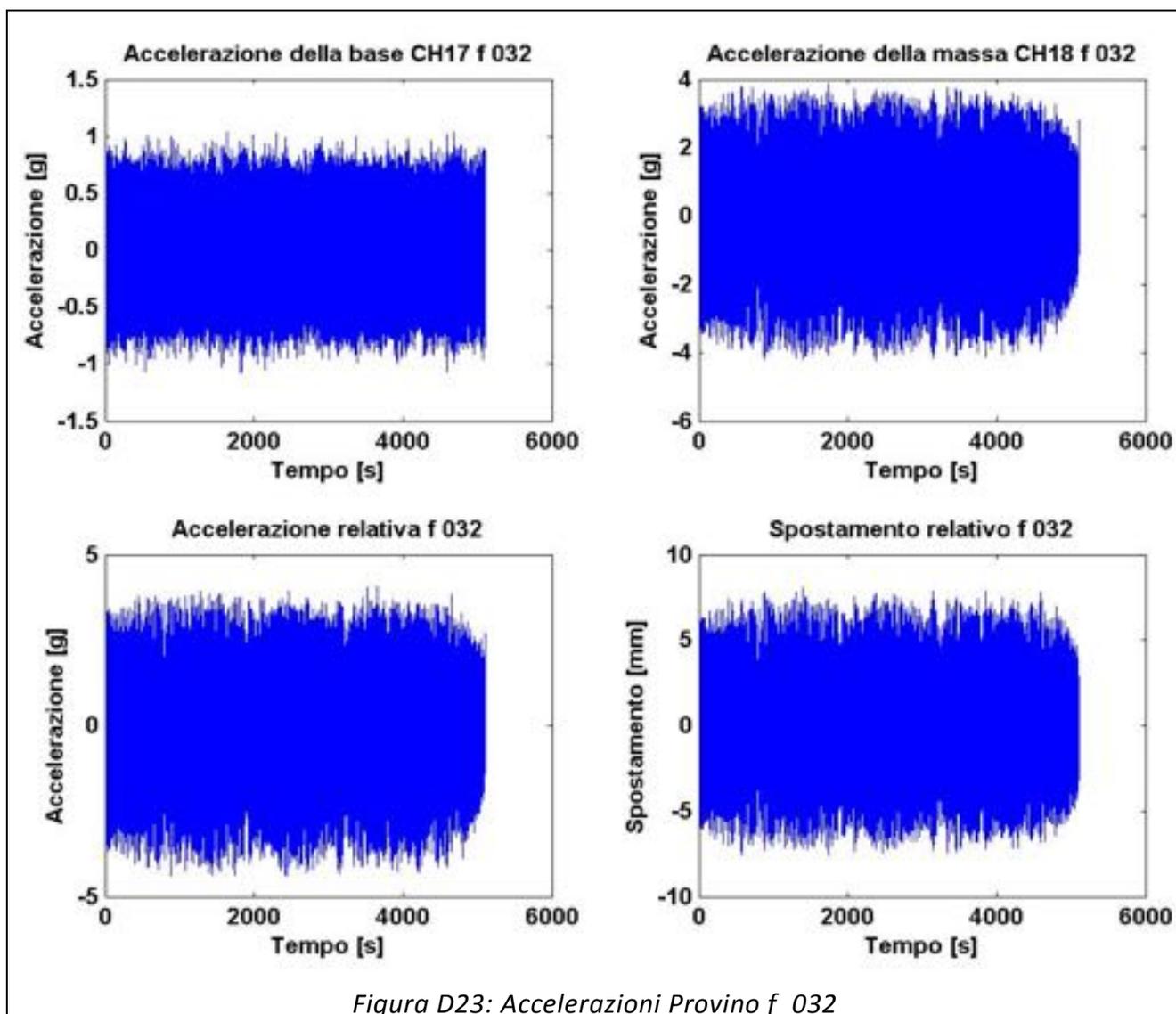
Figura D 20: Spettrogrammi Provino f_031

PROVINO: f_032

	Media [g]	RMS [g]	Skewness	Kurtosis	Frequenza media [Hz]
Accelerazione Base CH17	-7,04E-07	0,235	-1,56E-02	3,013	24,99
Accelerazione Massa CH18	-2,91E-06	1,227	-8,25E-02	2,712	11,42
Accelerazione relativa CH17-CH18	-2,20E-06	1,237	-8,83E-02	2,742	11,77
Spostamento Relativo	5,91E-09	0,002	2,93E-02	2,680	11,35
Accelerazione Trasversale CH22	1,17E-20	0,073	-1,44E-01	3,230	29,71
Accelerazione Verticale CH23	-2,61E-19	1,266	8,71E-02	2,579	11,38
Accelerazione Longitudinale CH24	-4,40E-19	1,048	-4,52E-02	2,531	12,08







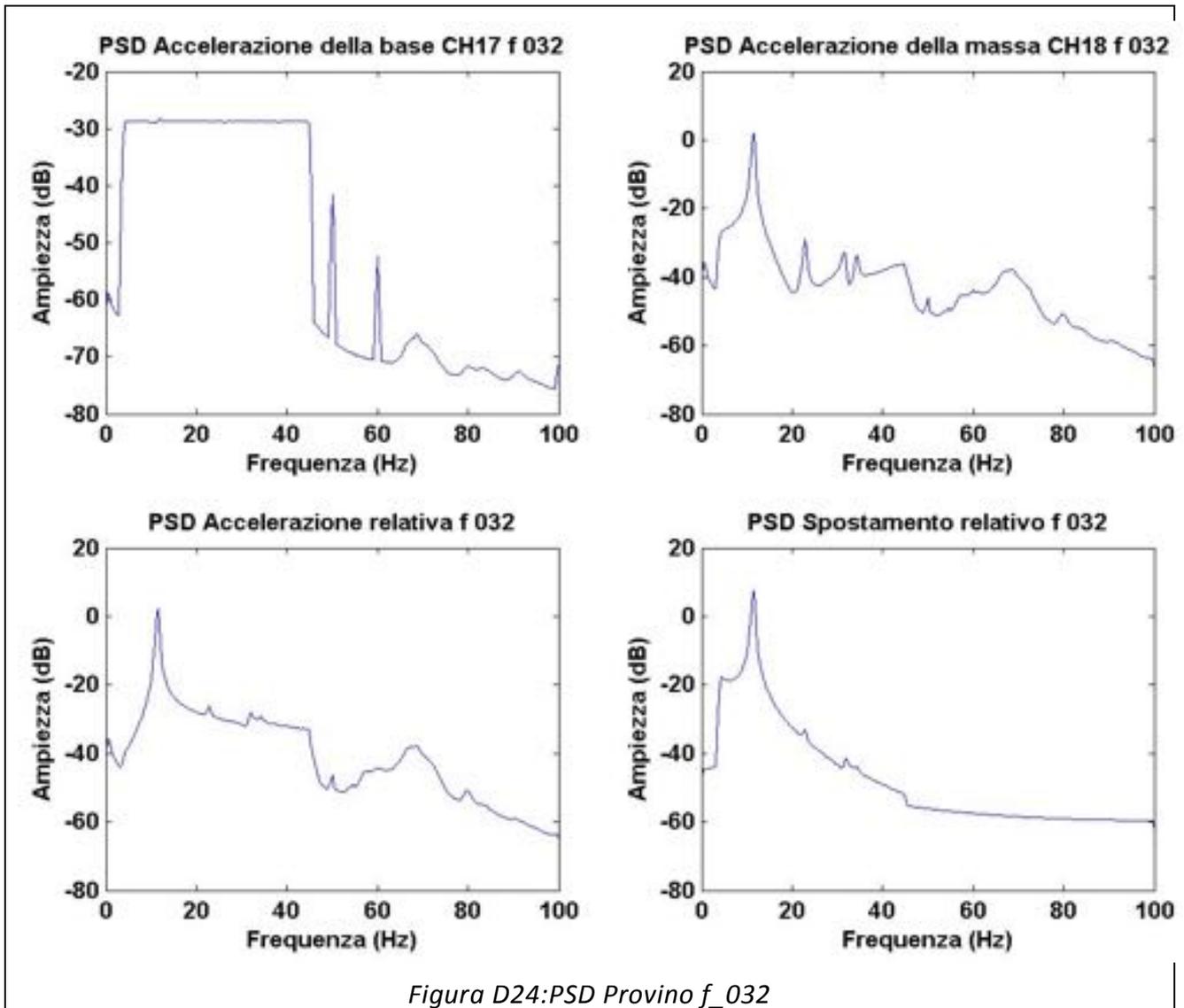
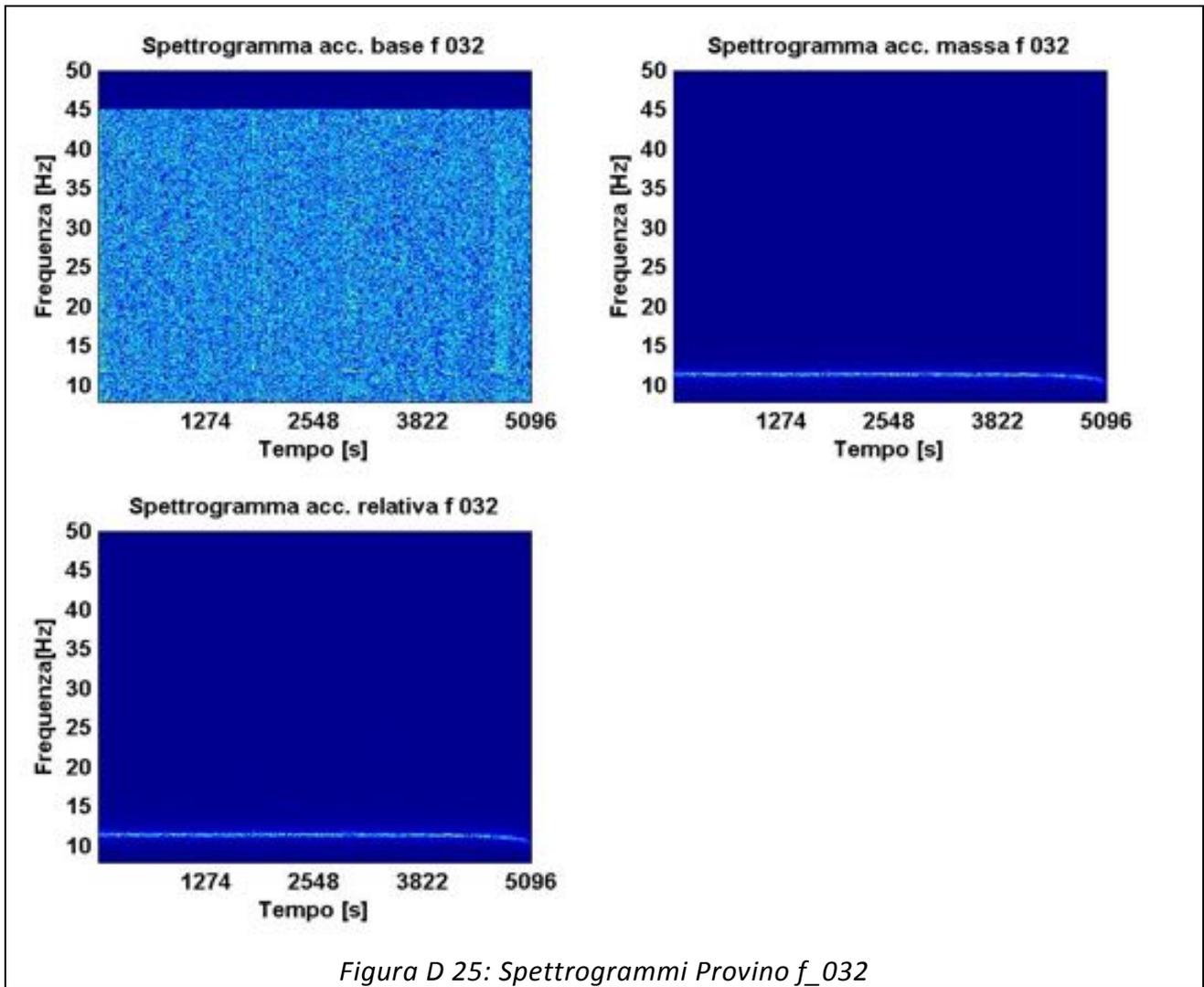


Figura D24: PSD Provino f_032



PROVINO: f_033

	Media [g]	RMS [g]	Skewness	Kurtosis	Frequenza media [Hz]
Accelerazione Base CH17	9,98E-08	0,234	-1,17E-02	3,001	25,02
Accelerazione Massa CH18	2,54E-06	1,314	-1,04E-01	2,507	11,53
Accelerazione relativa CH17-CH18	2,44E-06	1,332	-1,11E-01	2,520	12,02
Spostamento Relativo	-6,45E-09	0,002	2,97E-02	2,531	11,44
Accelerazione Trasversale CH22	-2,14E-20	0,084	-2,16E-02	3,515	30,84
Accelerazione Verticale CH23	5,22E-19	1,190	8,42E-02	2,693	11,46
Accelerazione Longitudinale CH24	-4,97E-20	0,983	-3,75E-02	2,733	12,19

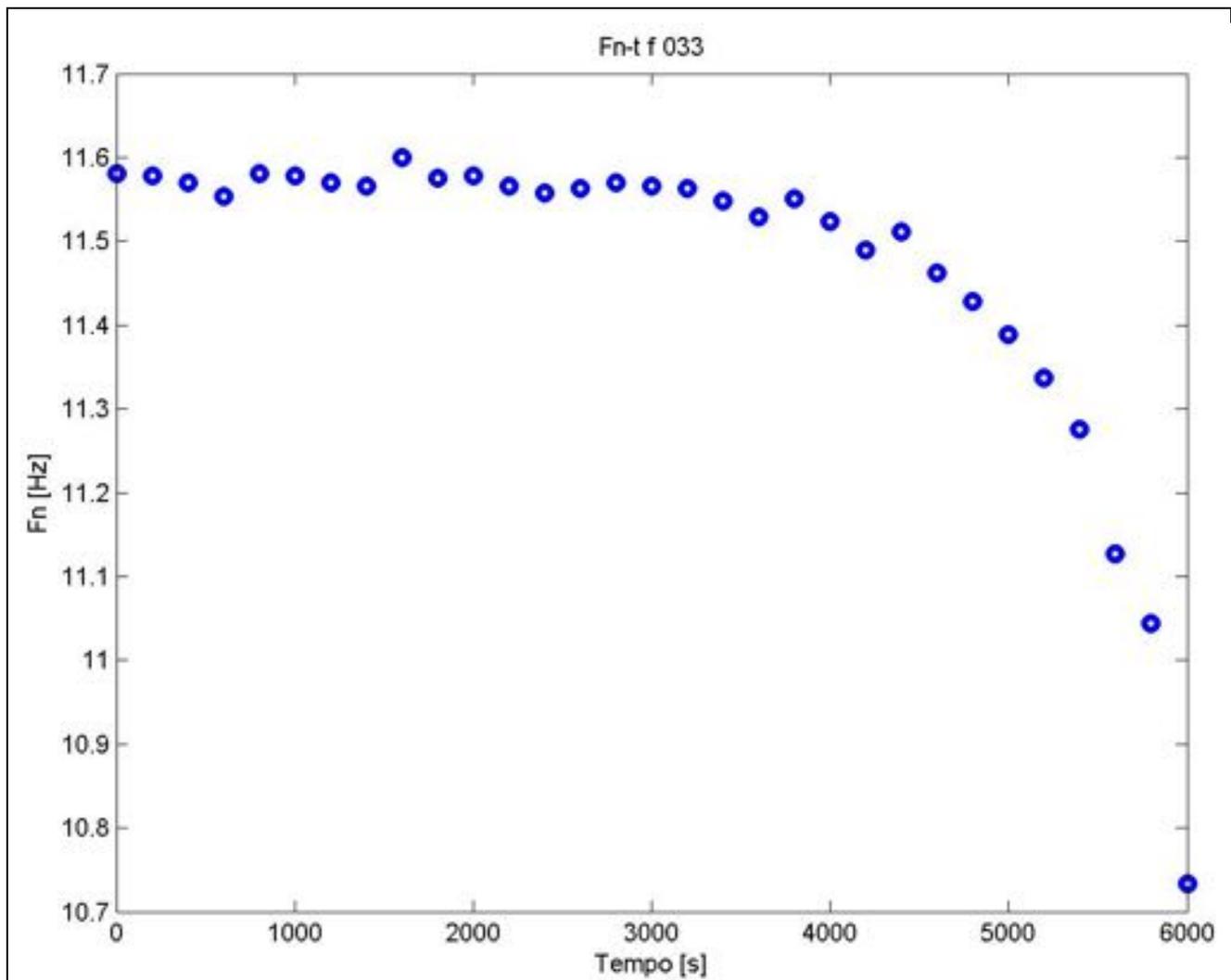
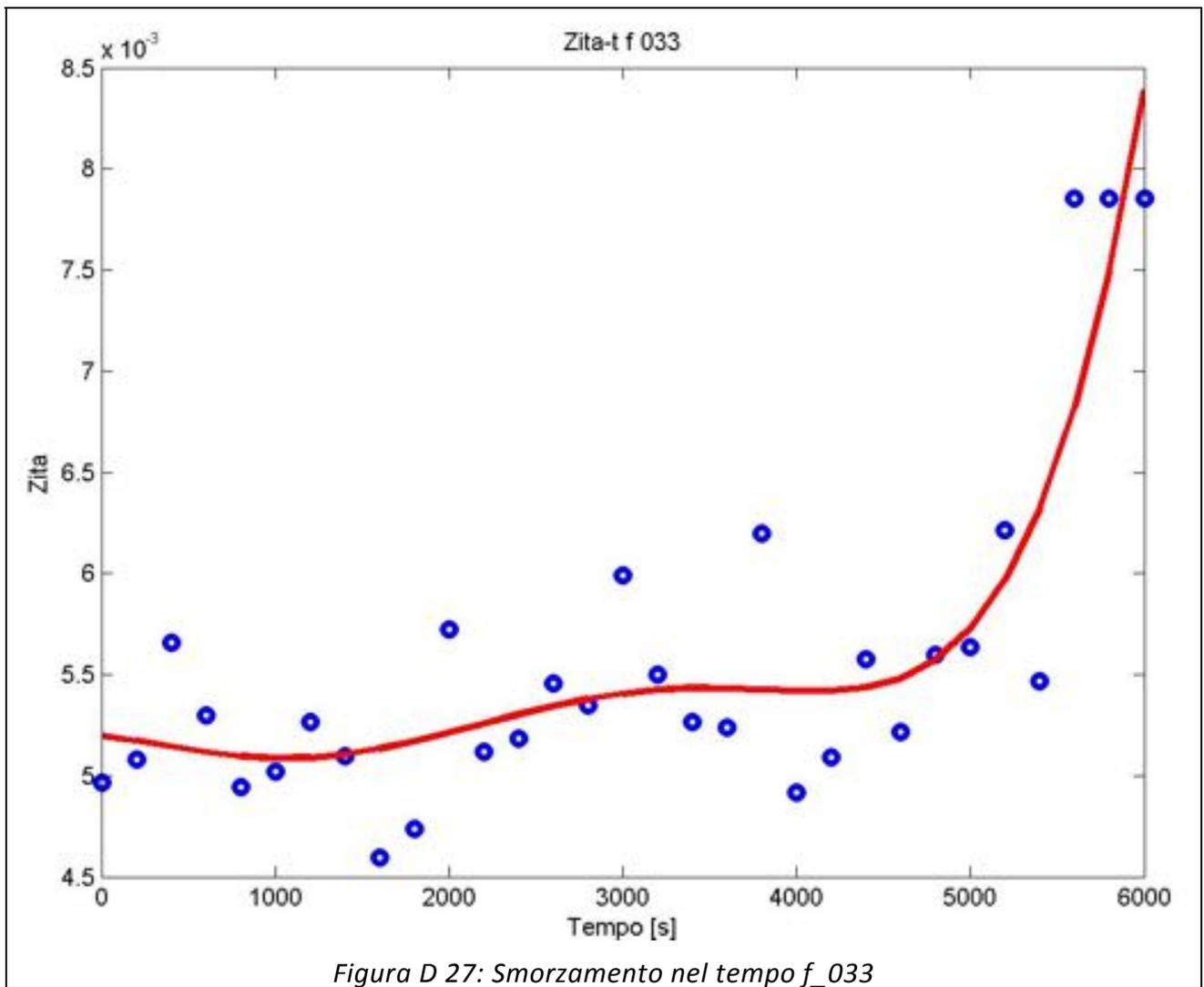


Figura D 26: Frequenza naturale nel tempo f_033



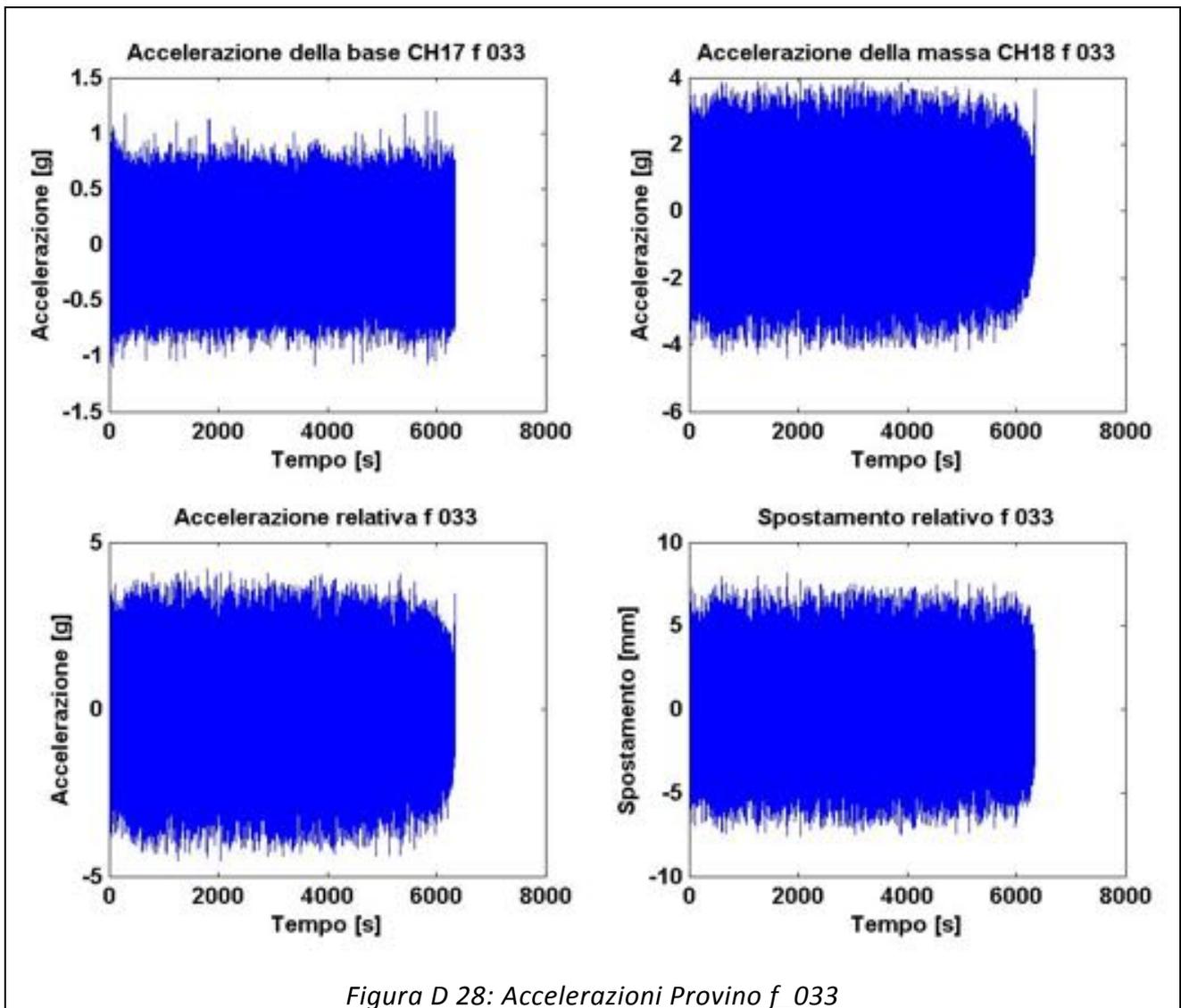


Figura D 28: Accelerazioni Provino f_033

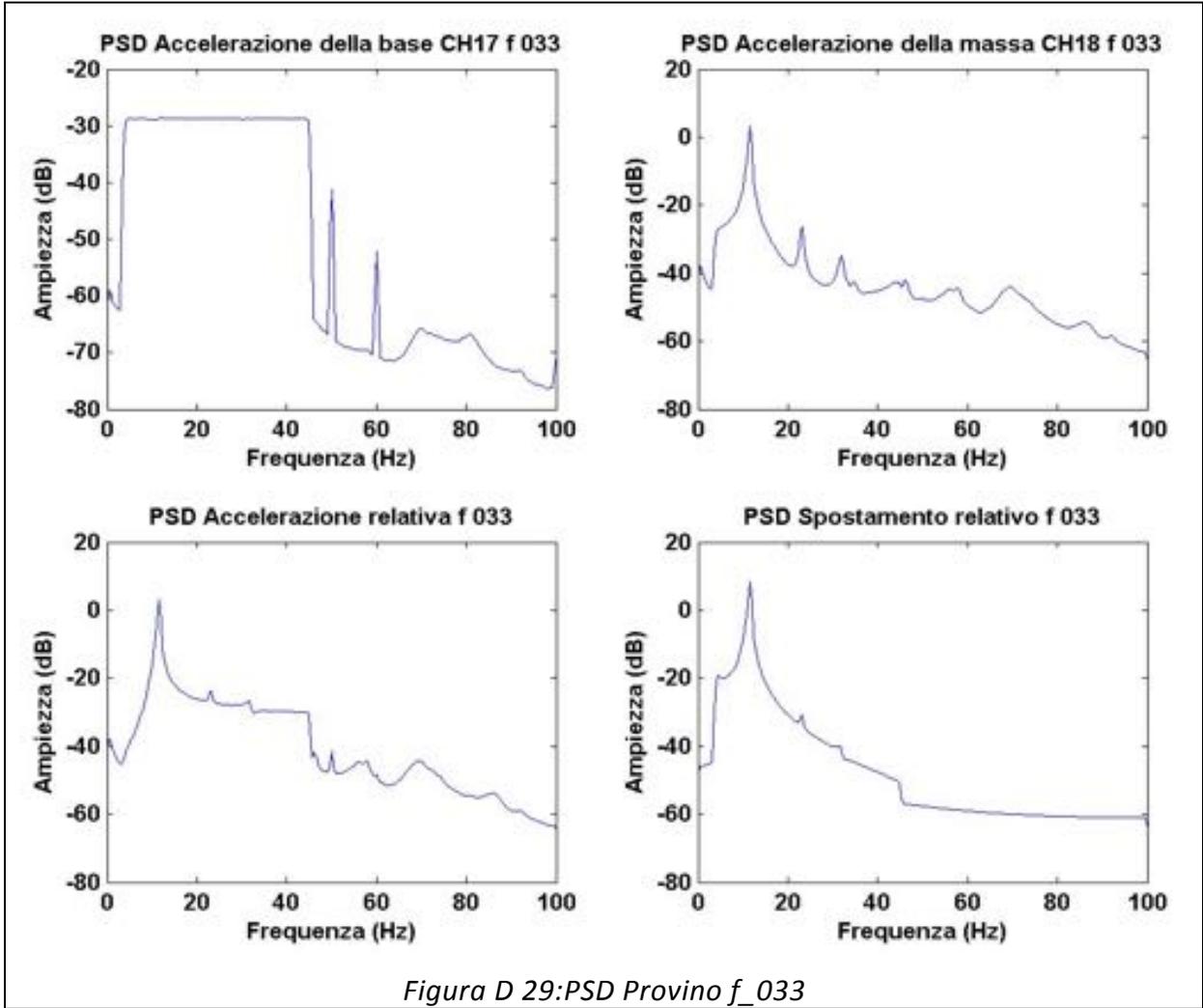


Figura D 29:PSD Provino f_033

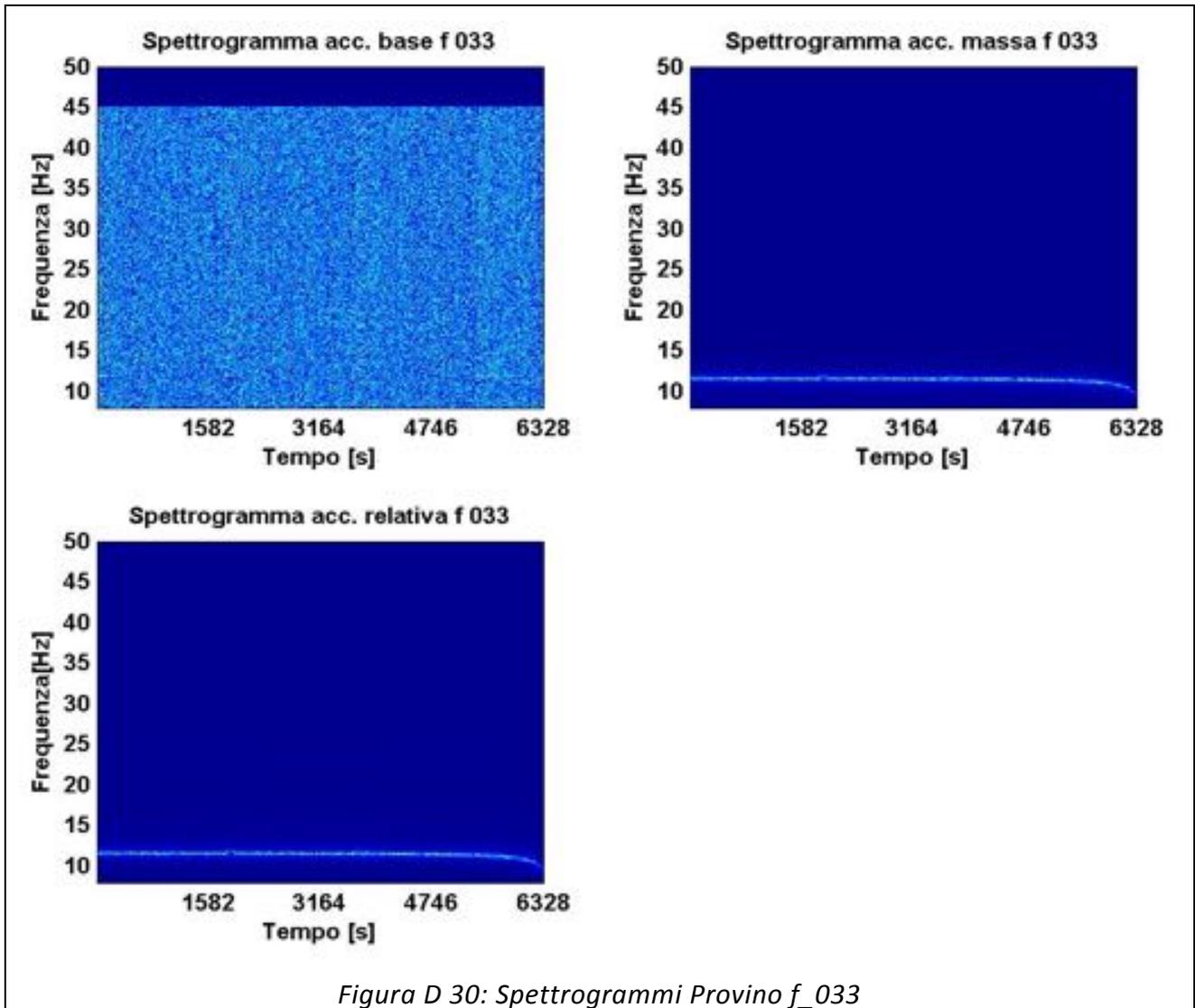
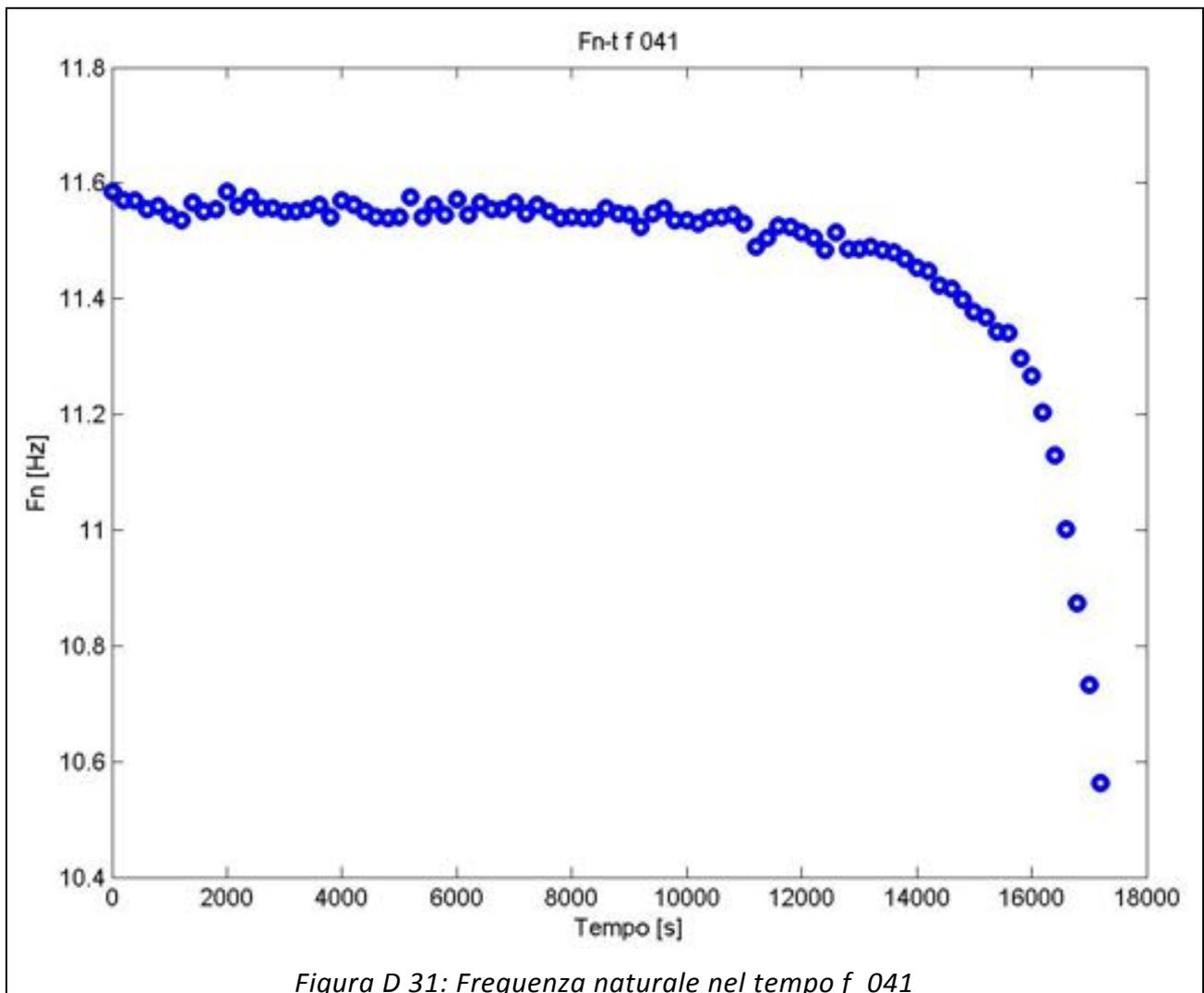
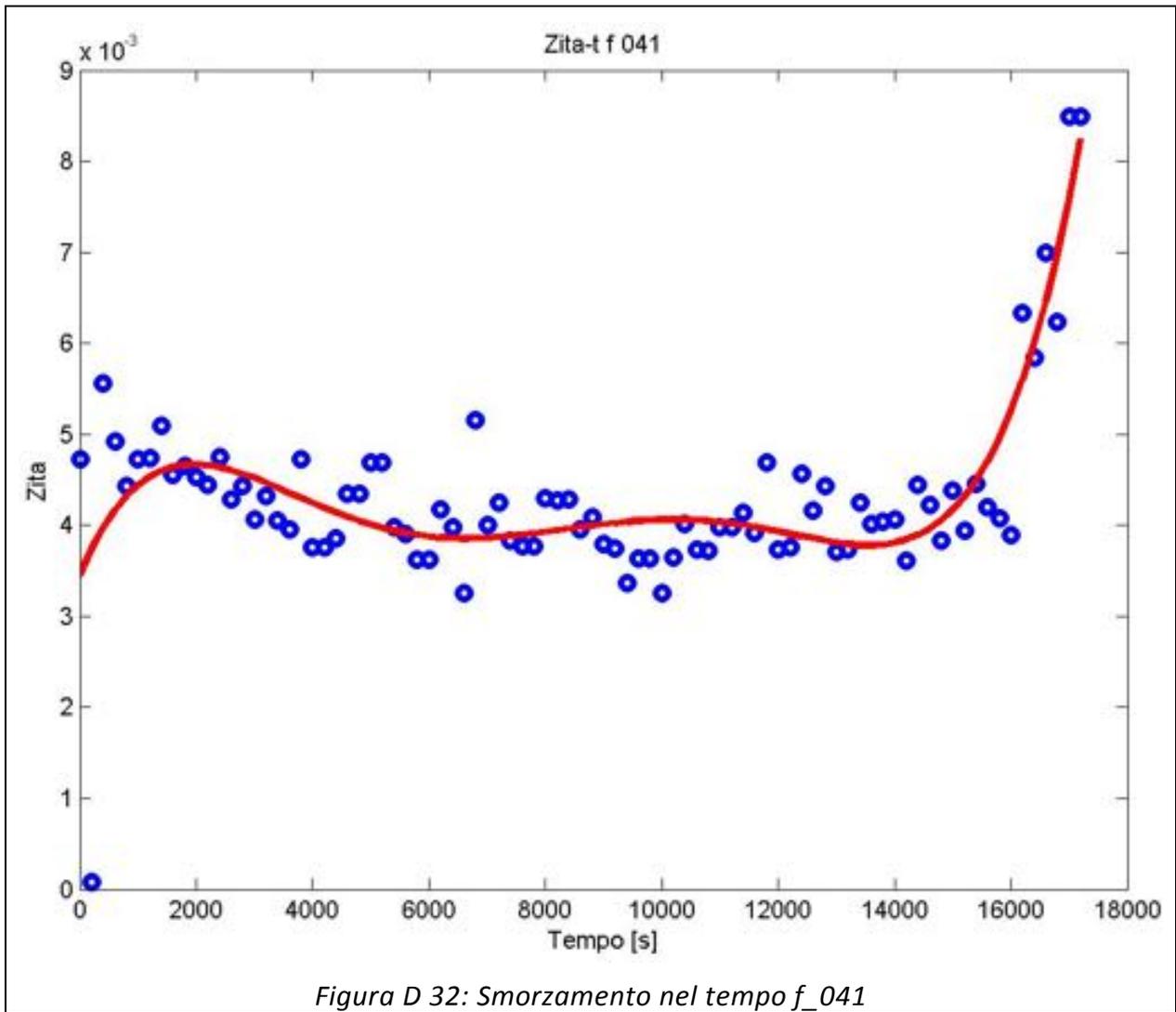


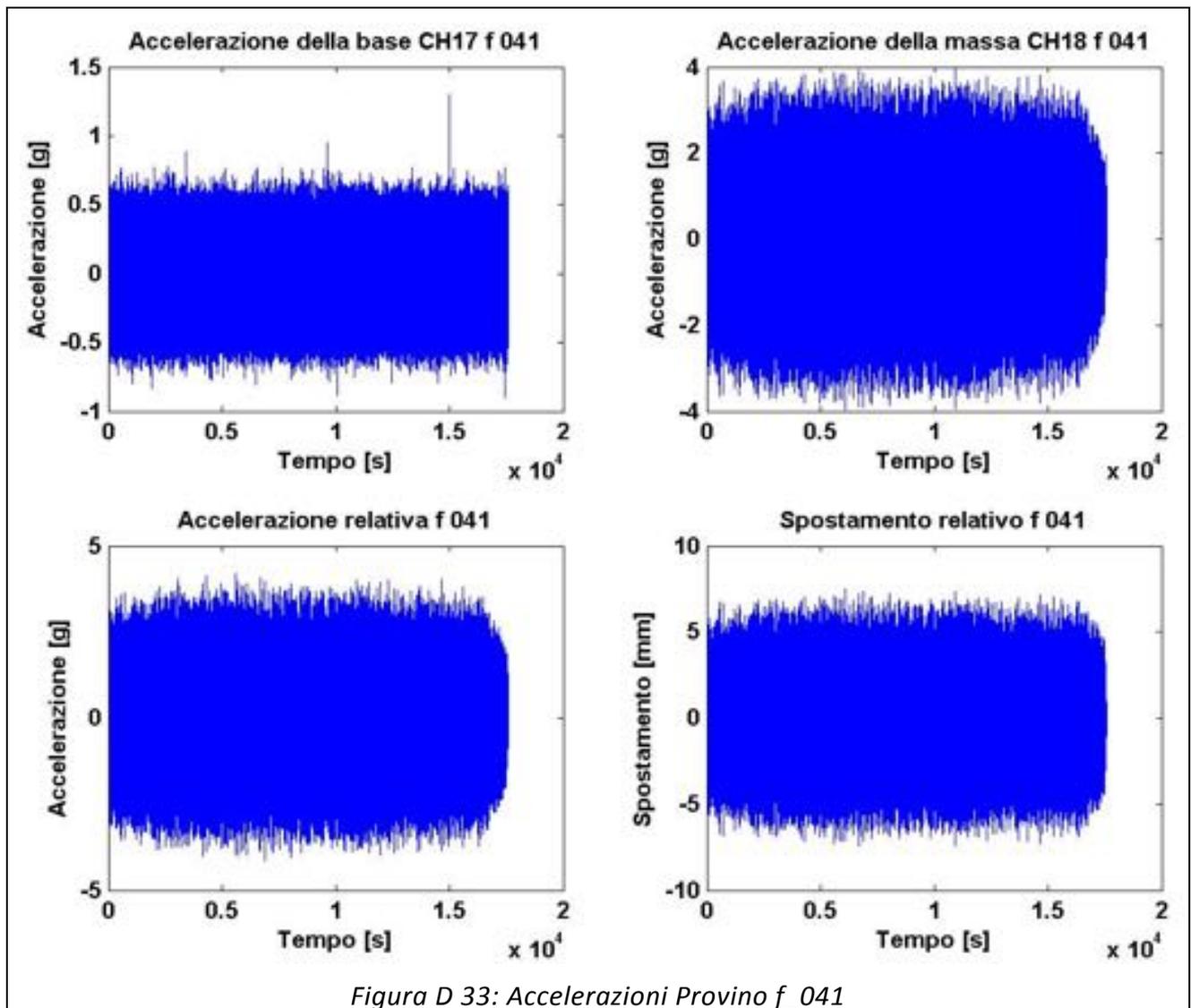
Figura D 30: Spettrogrammi Provino f_033

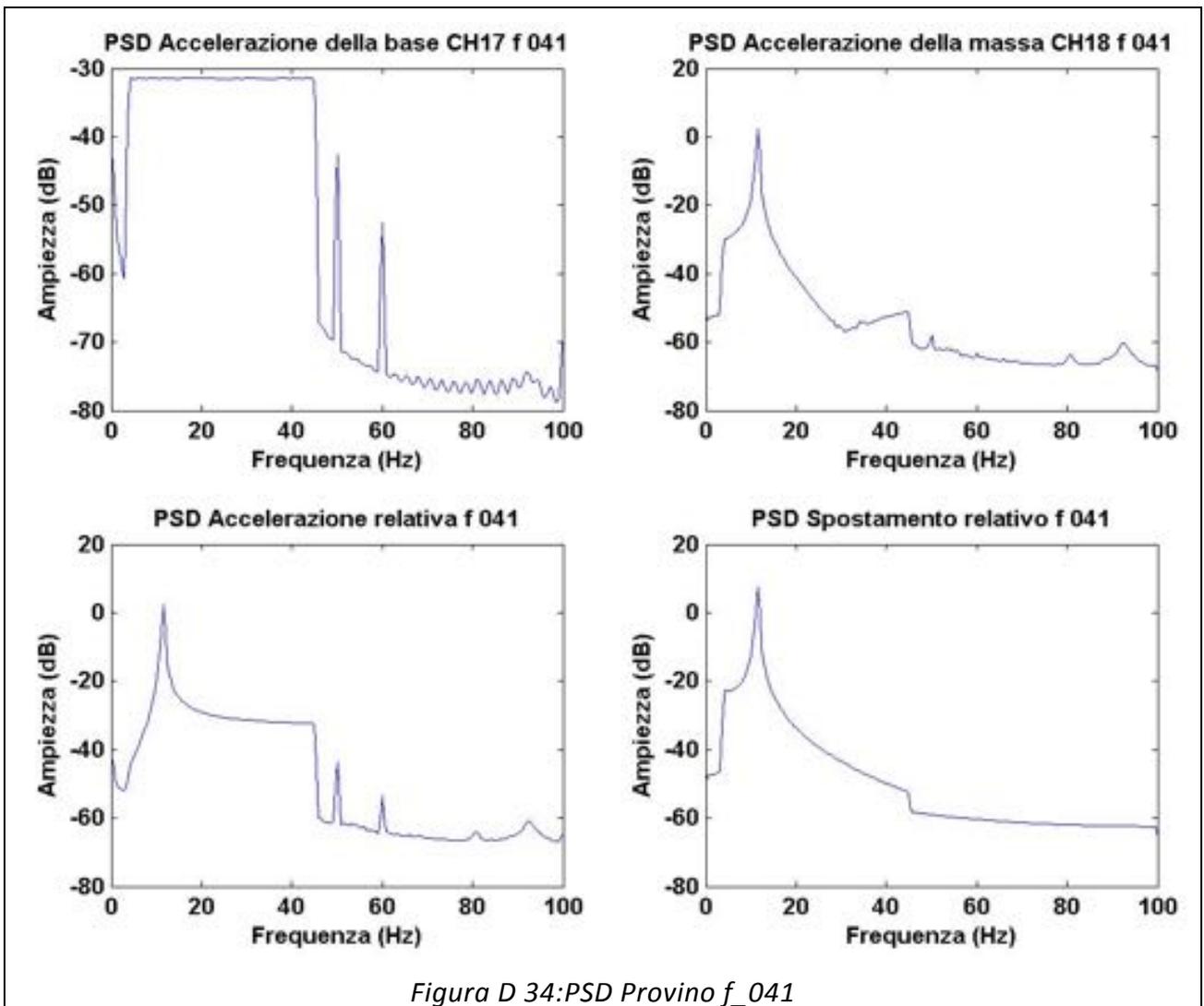
PROVINO: f_041

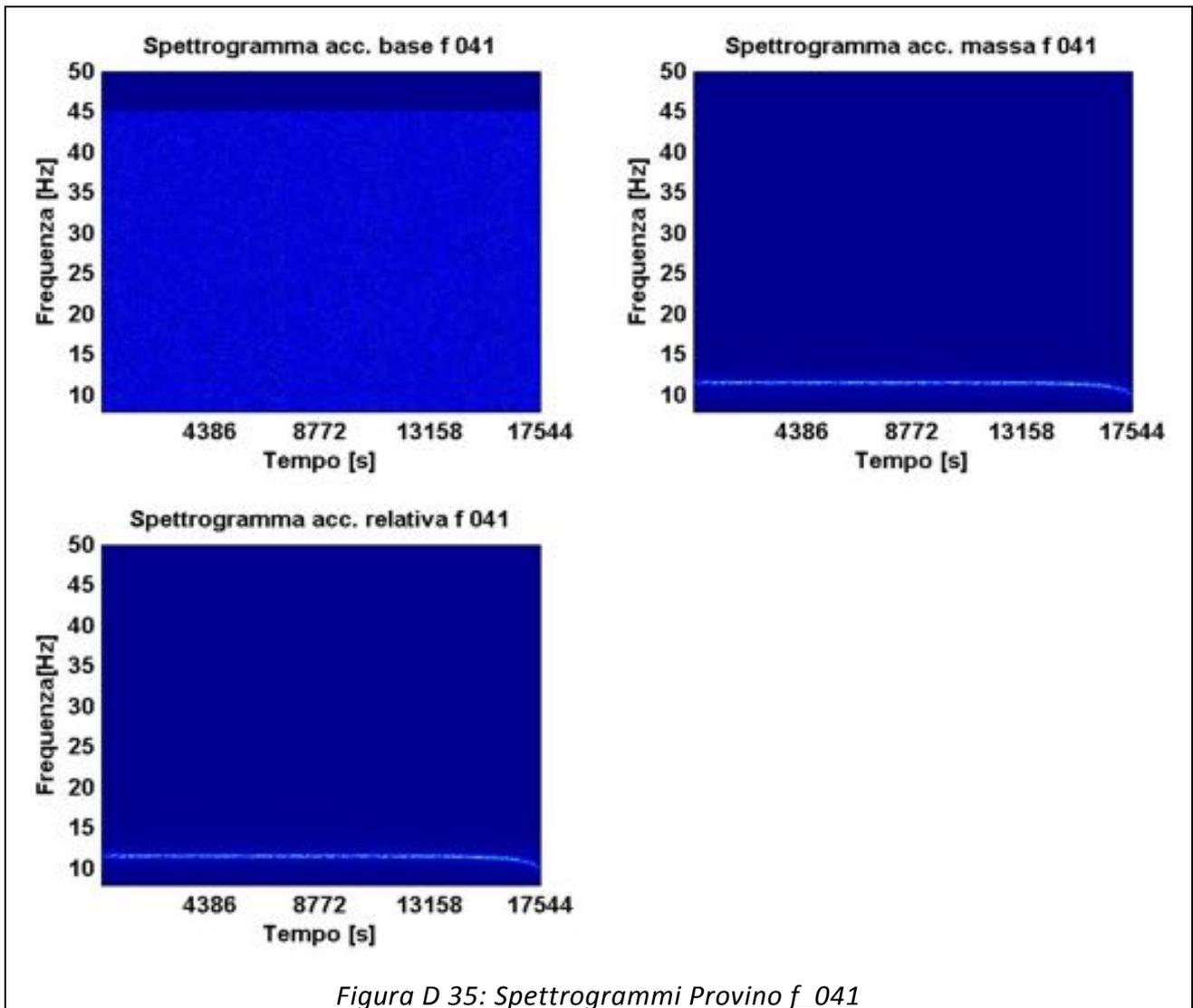
	Media [g]	RMS [g]	Skewness	Kurtosis	Frequenza media [Hz]
Accelerazione Base CH17	-3,15E-08	0,172	-7,70E-03	2,997	24,99
Accelerazione Massa CH18	-2,56E-07	1,118	1,08E-03	2,734	11,50
Accelerazione relativa CH17-CH18	-2,24E-07	1,129	5,52E-04	2,749	11,87
Spostamento Relativo	5,90E-10	0,002	1,13E-04	2,754	11,46
Accelerazione Trasversale CH22	-4,82E-22	0,052	1,45E-02	3,062	32,44
Accelerazione Verticale CH23	-2,53E-19	1,051	7,73E-02	2,784	11,47
Accelerazione Longitudinale CH24	-4,07E-19	0,815	-5,67E-02	2,768	11,92











PROVINO: f_042

	Media [g]	RMS [g]	Skewness	Kurtosis	Frequenza media [Hz]
Accelerazione Base CH17	2,97E-08	0,168	-1,10E-02	3,008	25,25
Accelerazione Massa CH18	4,20E-07	1,048	-5,87E-02	2,690	11,52
Accelerazione relativa CH17-CH18	3,91E-07	1,057	-6,20E-02	2,701	11,87
Spostamento Relativo	-3,27E-11	0,002	1,65E-02	2,713	11,48
Accelerazione Trasversale CH22	-1,18E-20	0,111	5,58E-01	215,298	12,68
Accelerazione Verticale CH23	-3,77E-19	0,996	6,55E-02	2,763	11,50
Accelerazione Longitudinale CH24	-2,90E-20	0,819	-3,26E-02	2,709	12,07

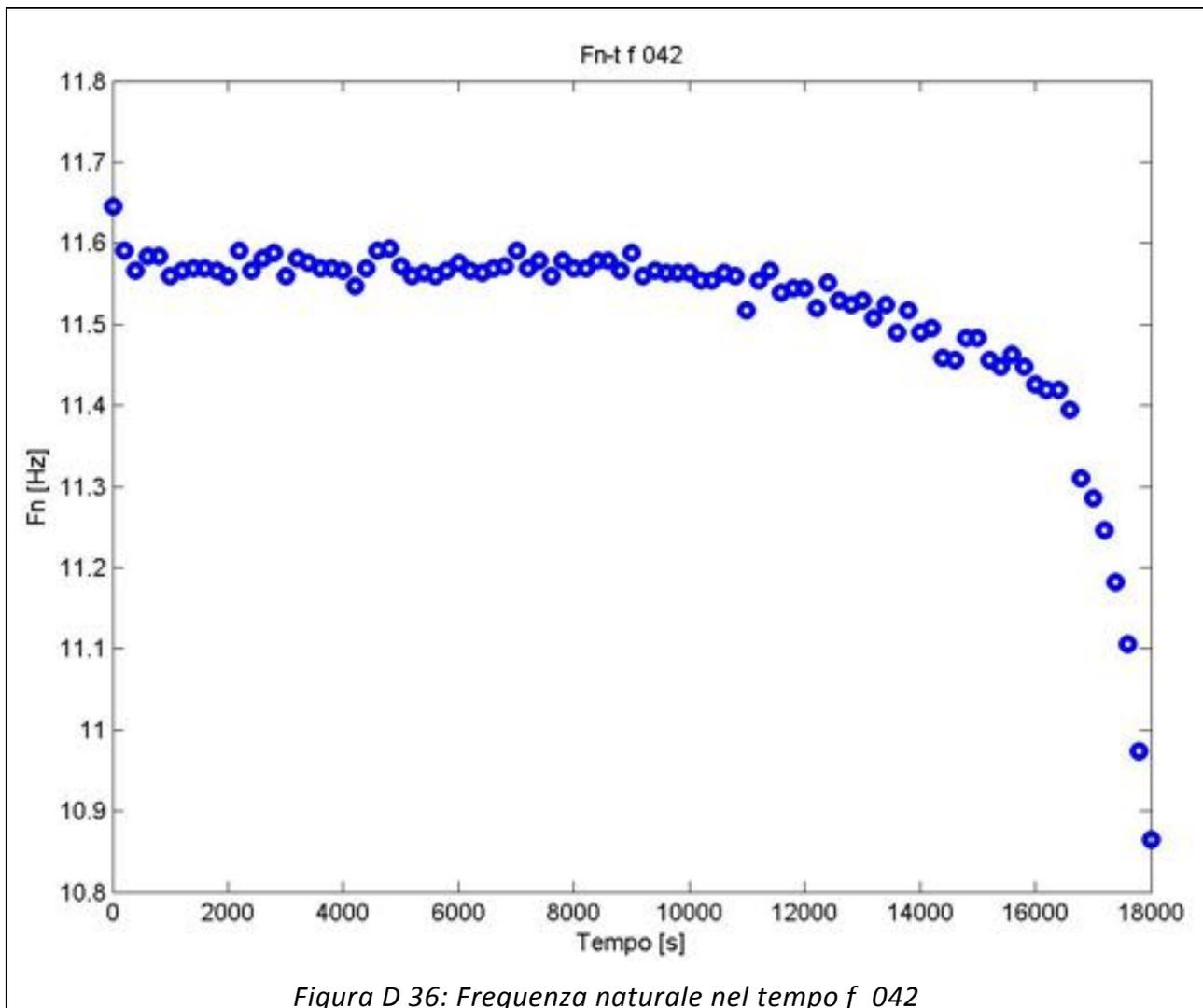


Figura D 36: Frequenza naturale nel tempo f_042

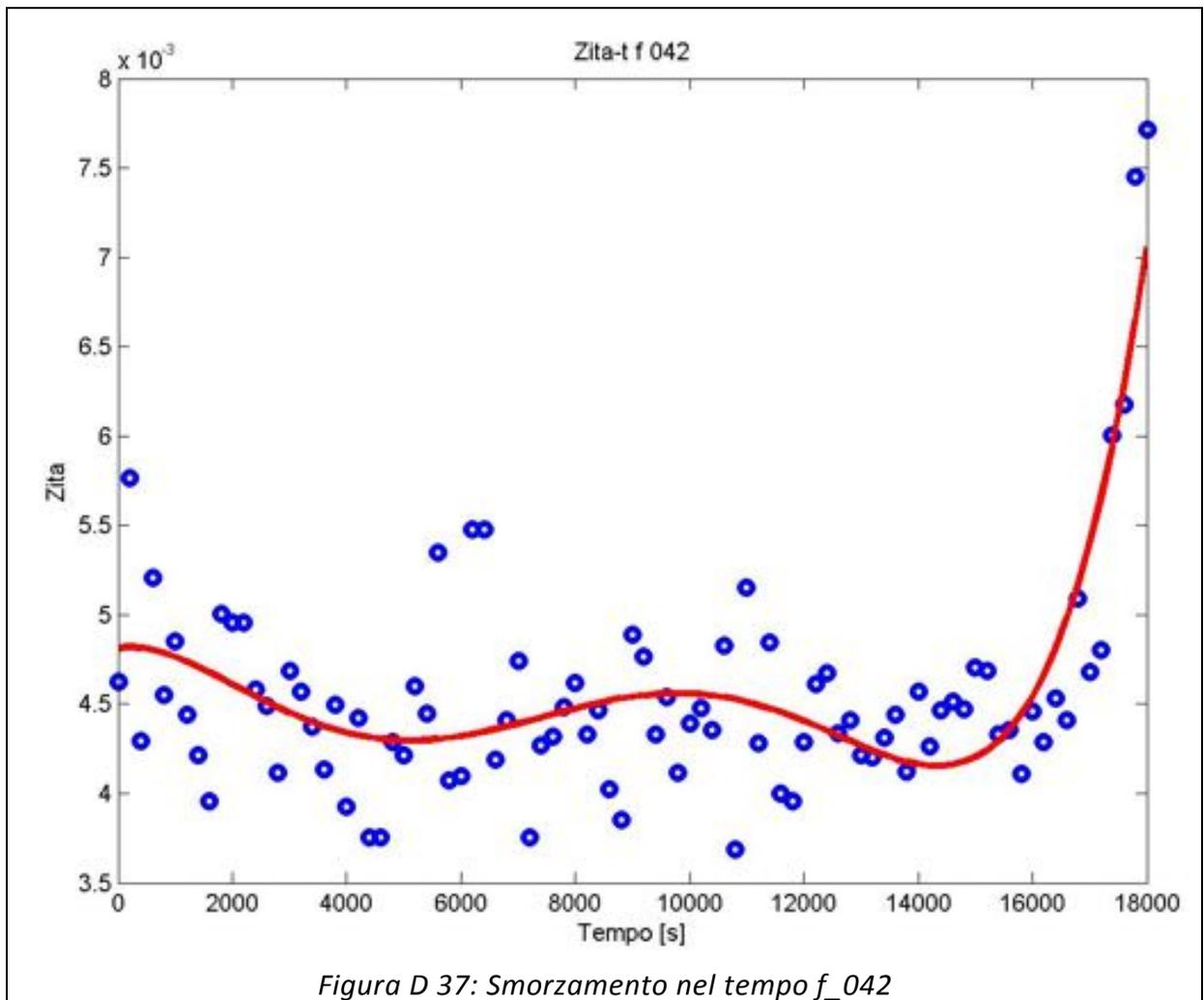
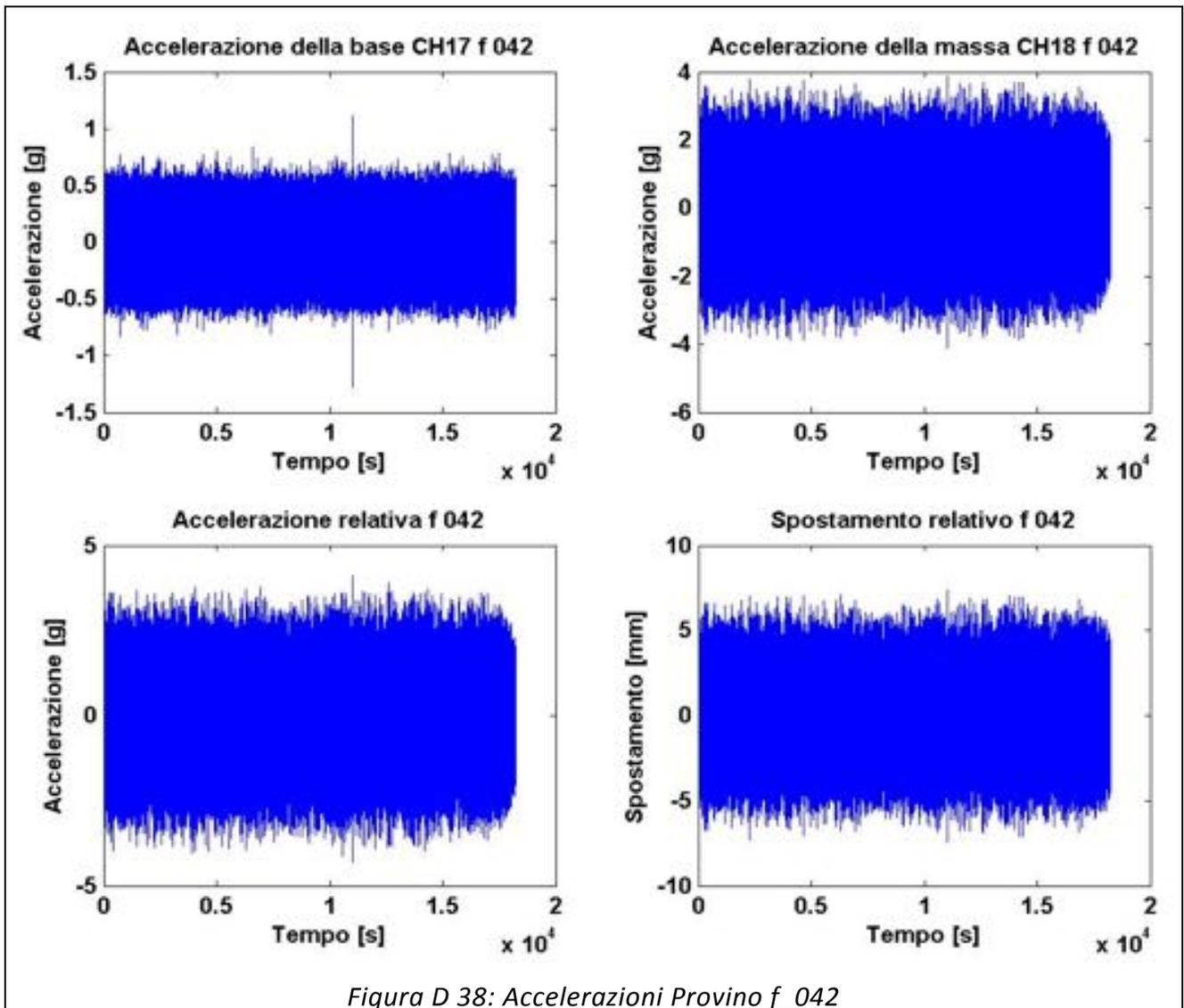
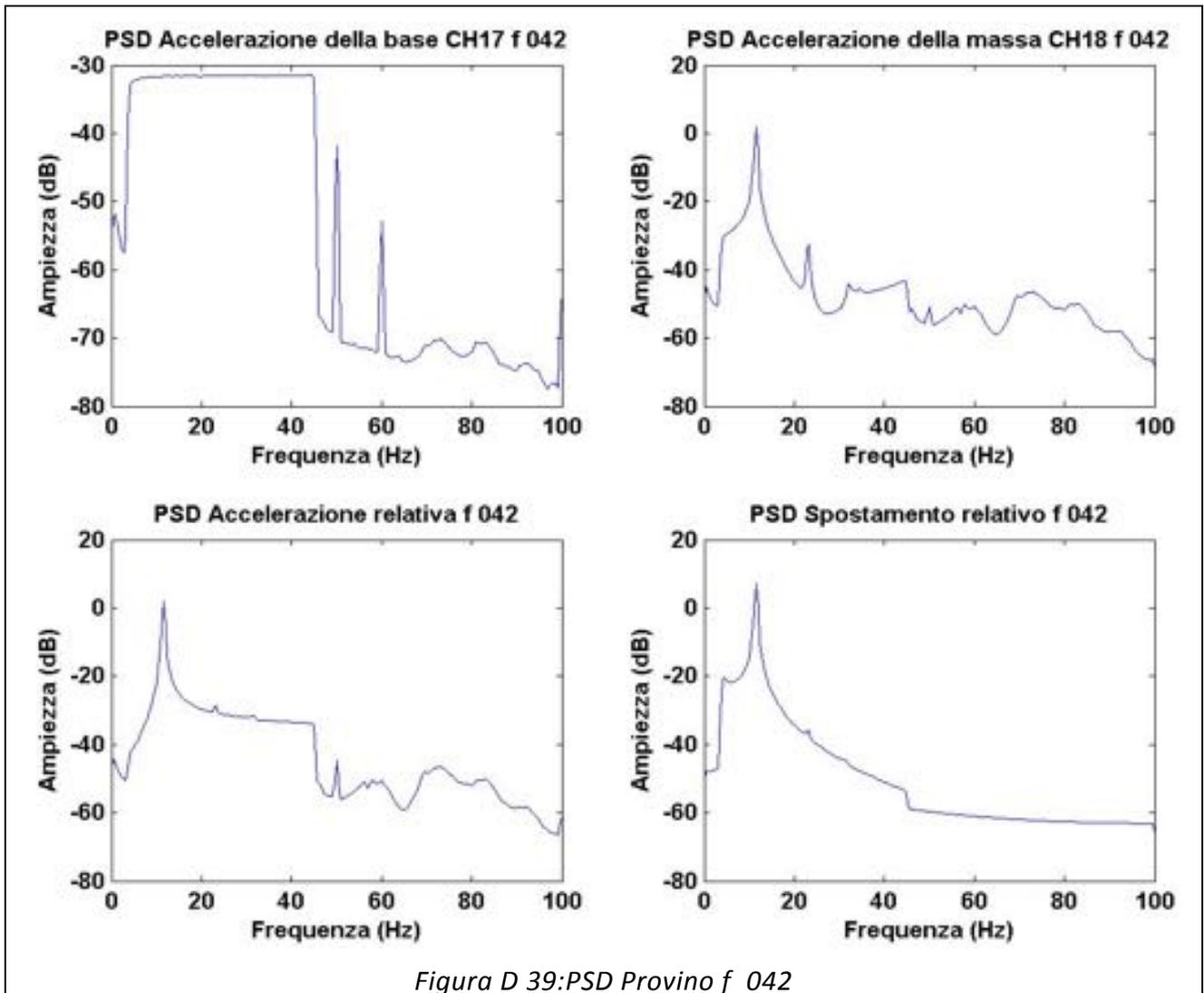


Figura D 37: Smorzamento nel tempo f_042





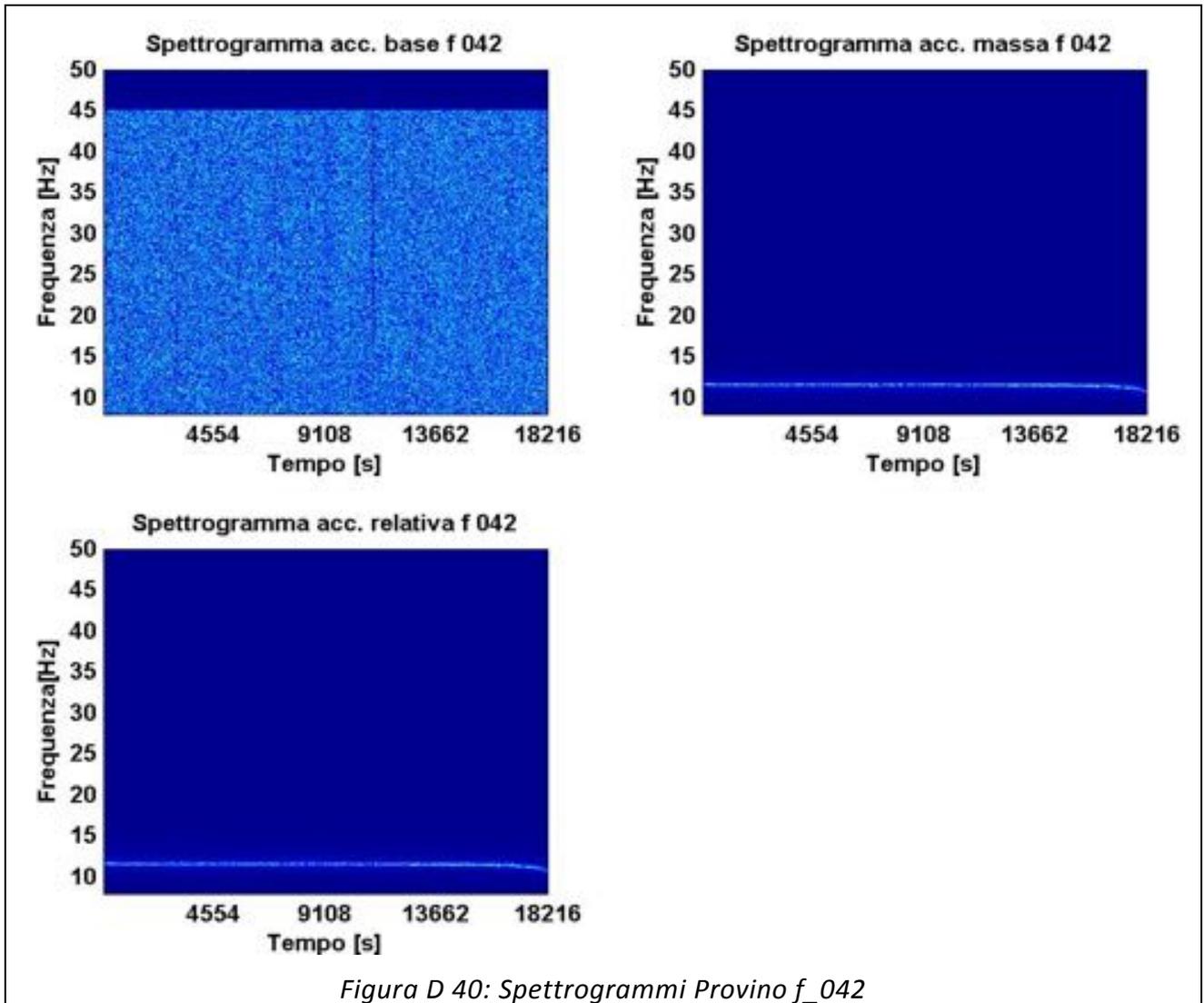
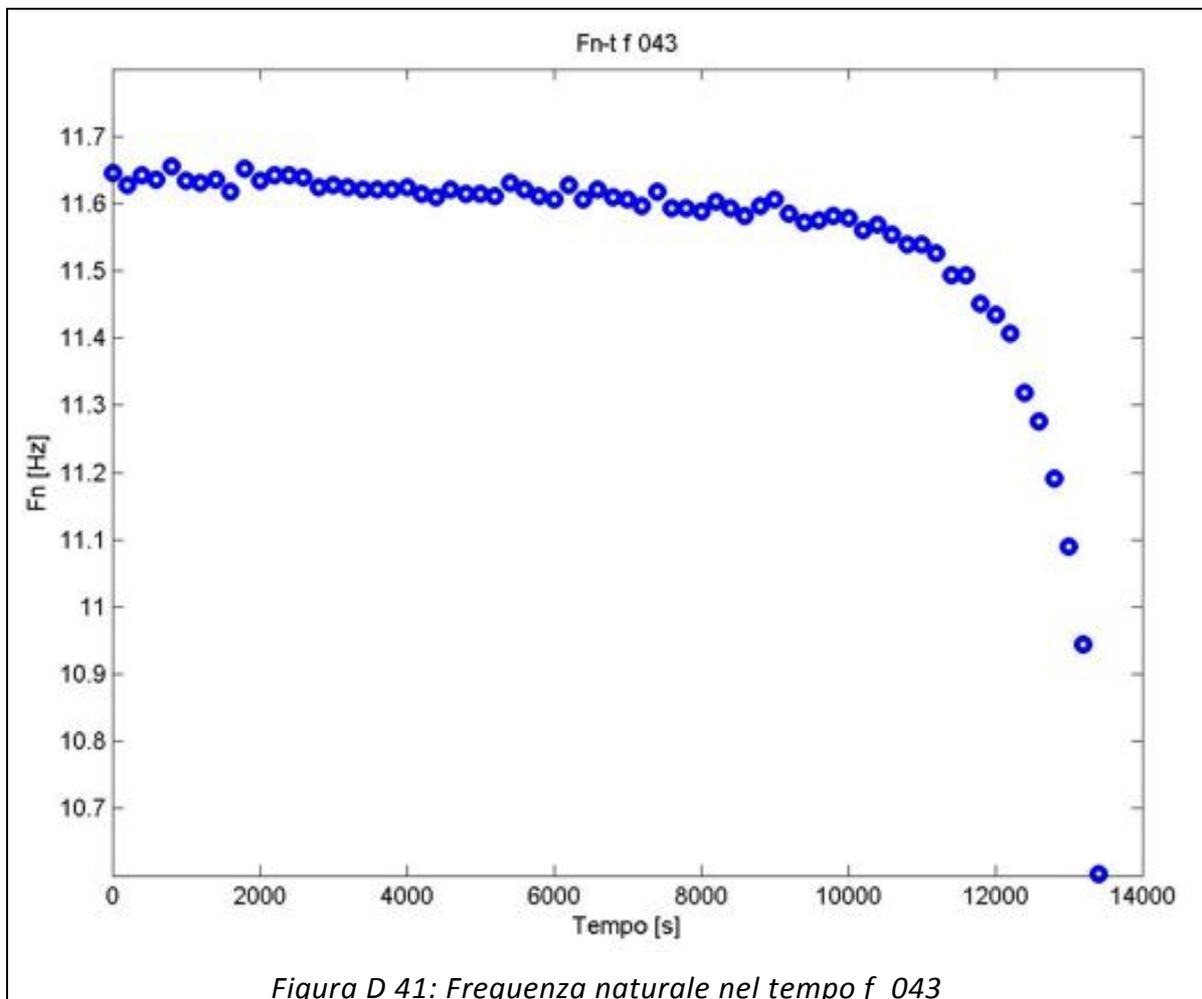
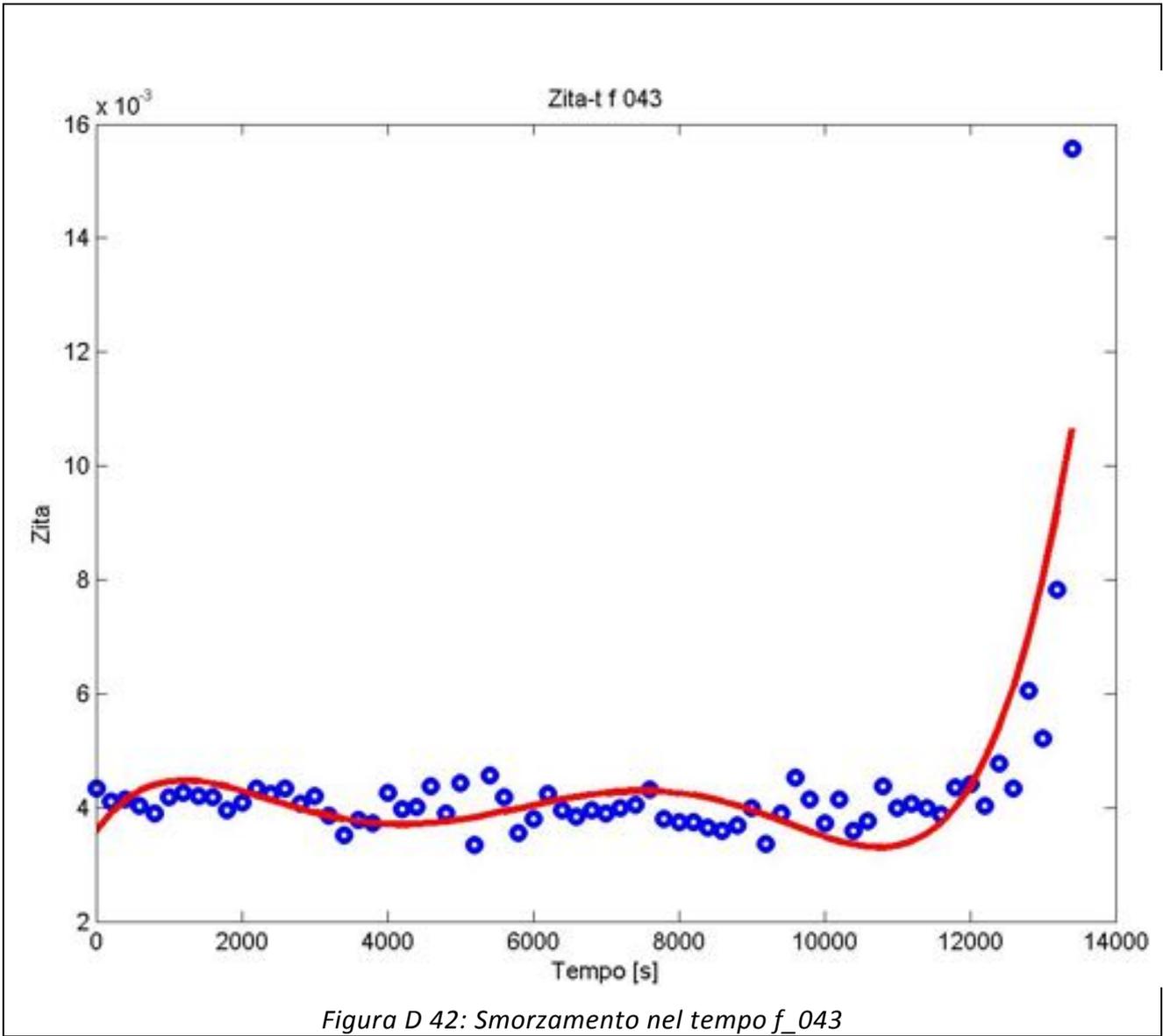


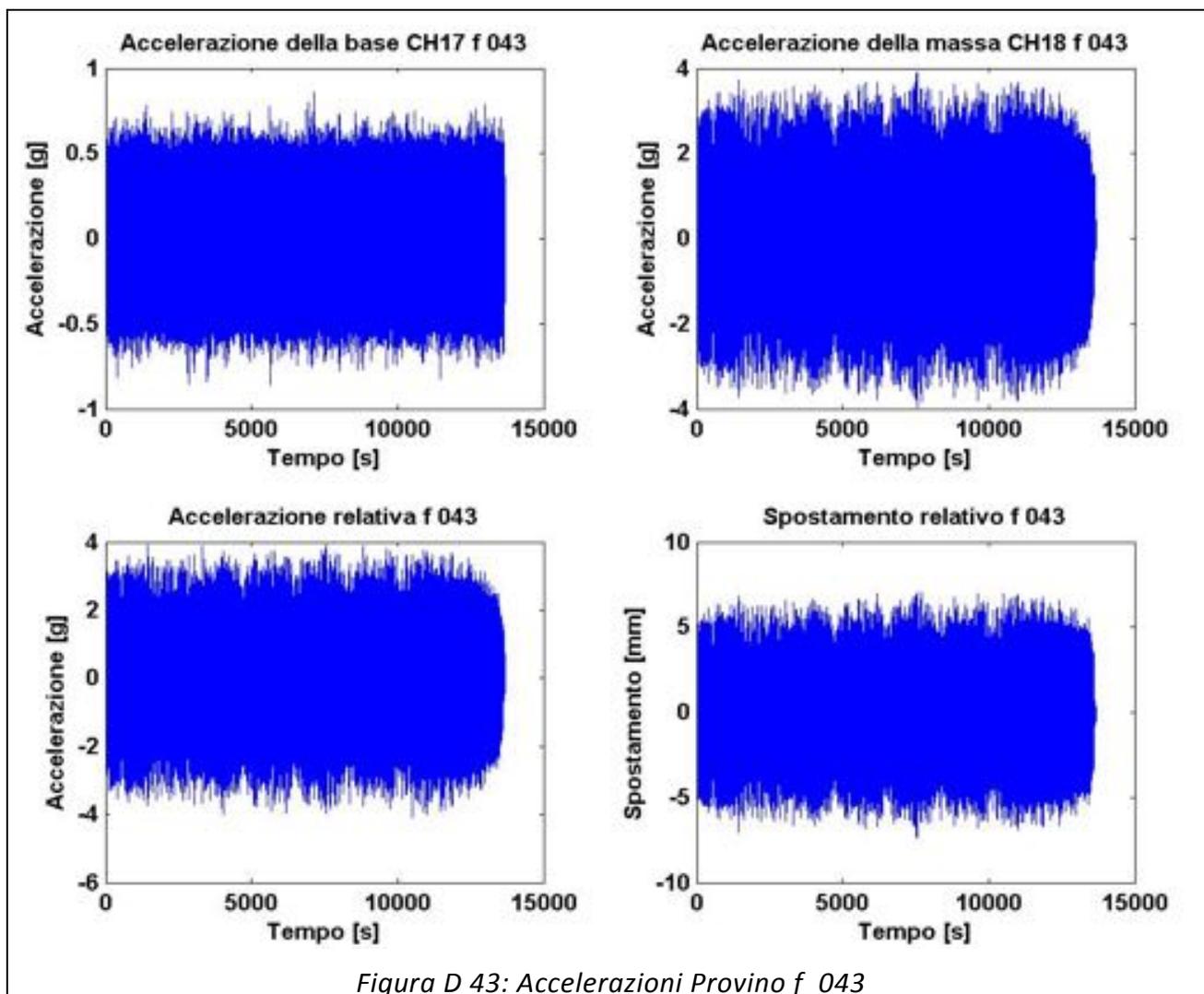
Figura D 40: Spettrogrammi Provino f_042

PROVINO: f_043

	Media [g]	RMS [g]	Skewness	Kurtosis	Frequenza media [Hz]
Accelerazione Base CH17	5,50E-08	0,170	-1,15E-02	2,996	25,11
Accelerazione Massa CH18	2,88E-06	1,070	-1,08E-02	2,719	11,56
Accelerazione relativa CH17-CH18	2,83E-06	1,080	-9,20E-03	2,730	11,93
Spostamento Relativo	-5,83E-09	0,002	2,44E-03	2,729	11,53
Accelerazione Trasversale CH22	-5,82E-22	0,027	-9,16E-02	4,848	30,84
Accelerazione Verticale CH23	-1,66E-19	1,020	6,60E-02	2,749	11,54
Accelerazione Longitudinale CH24	-1,95E-19	0,817	-4,45E-02	2,755	12,03







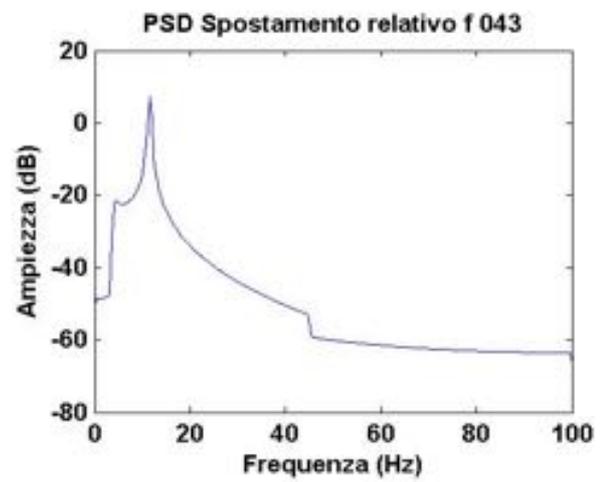
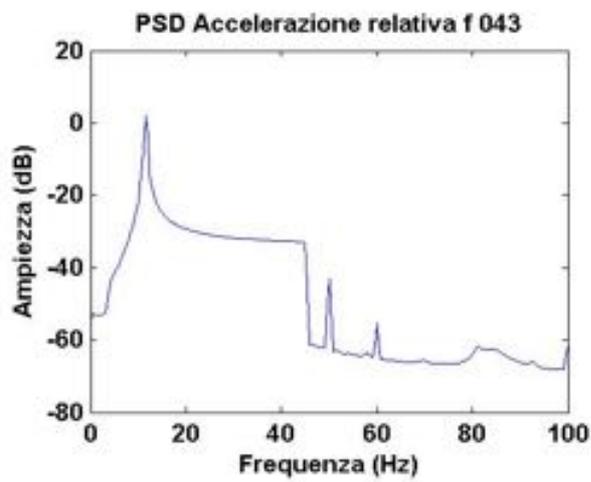
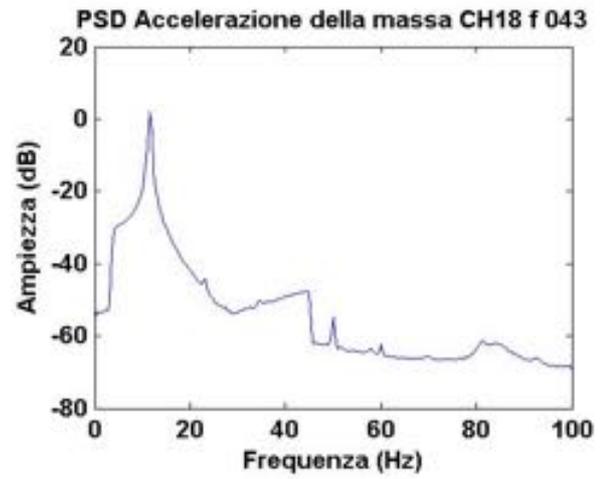
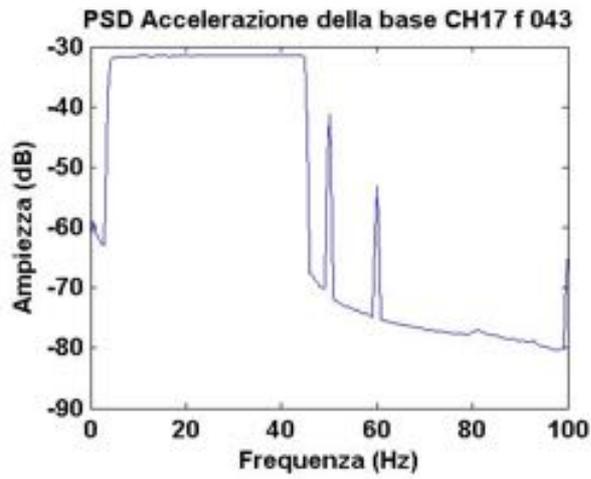


Figura D 44: PSD Provino f_043

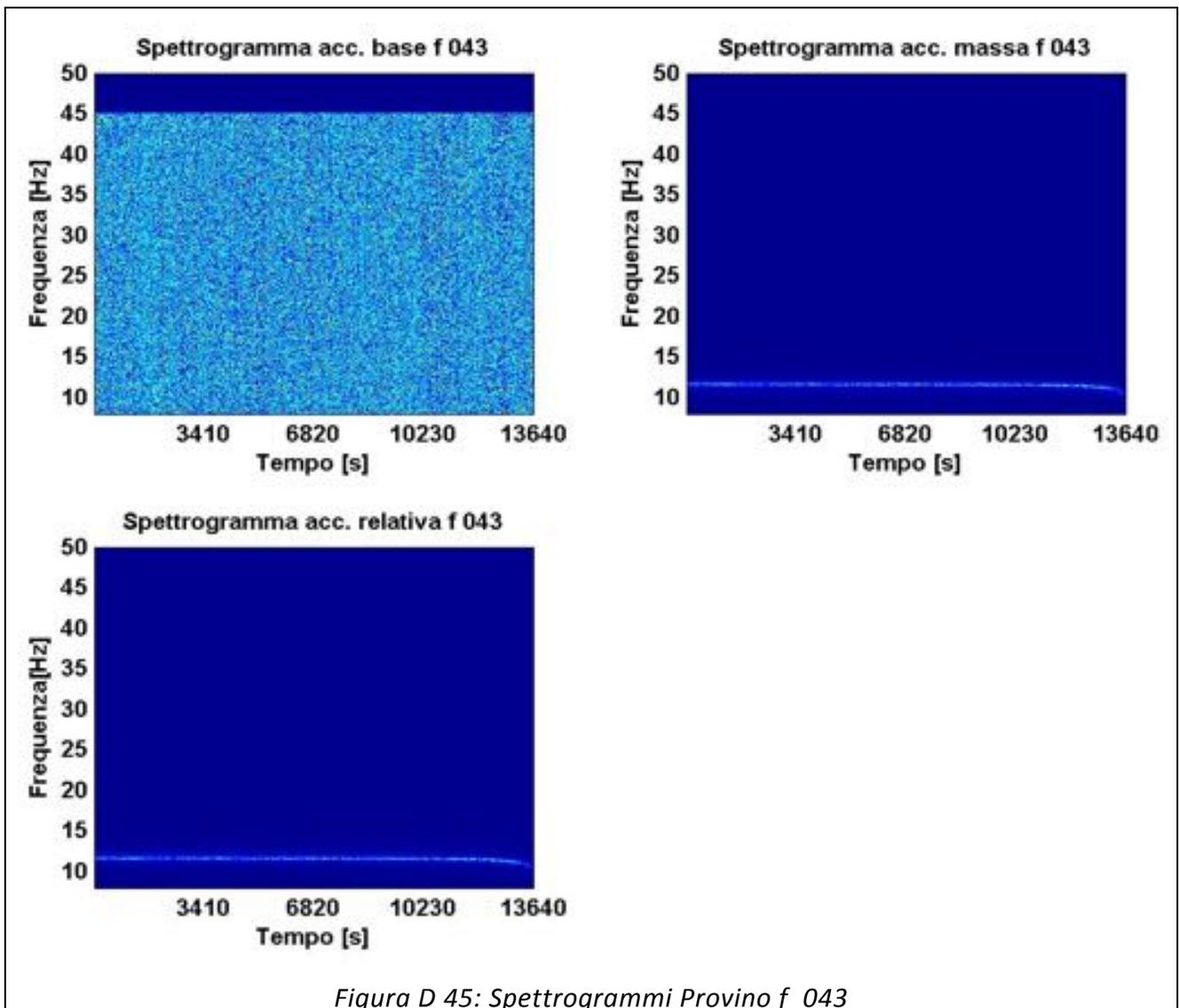
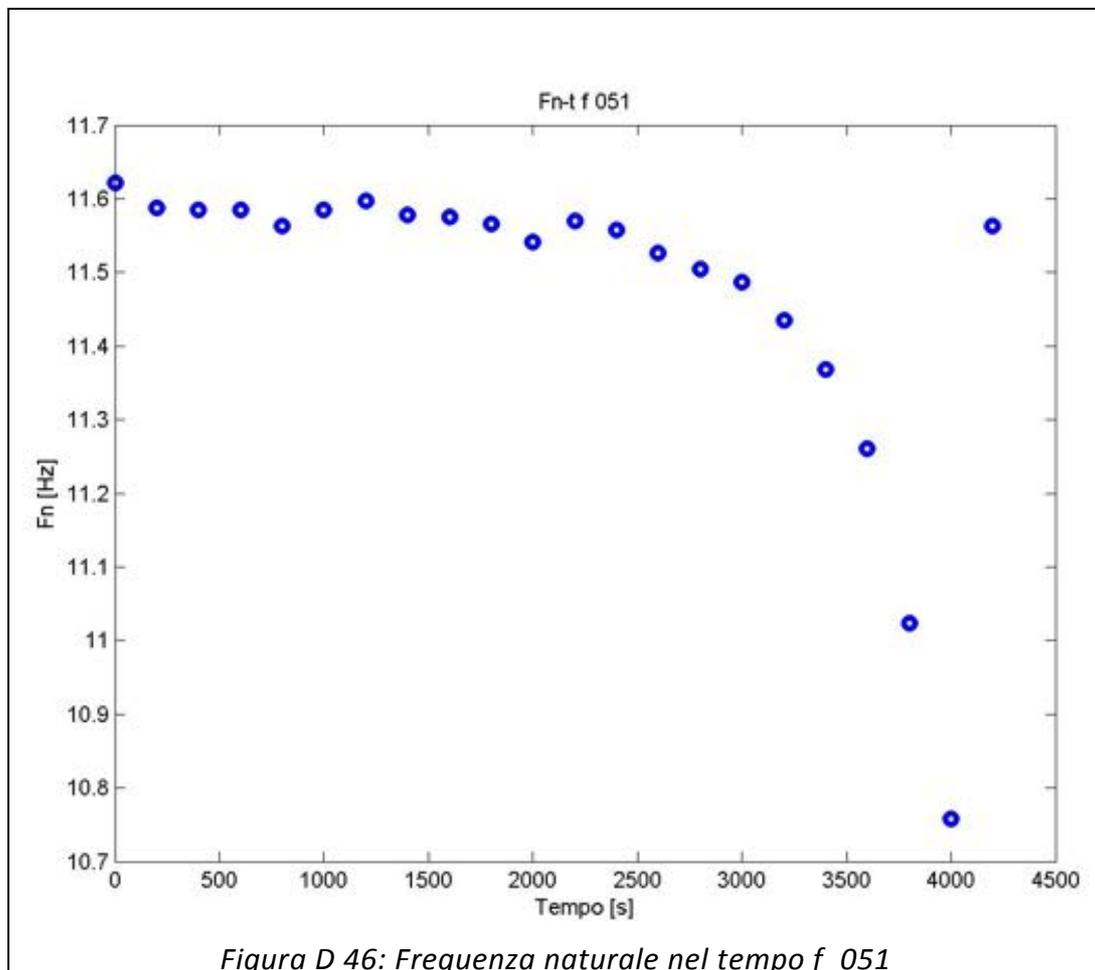
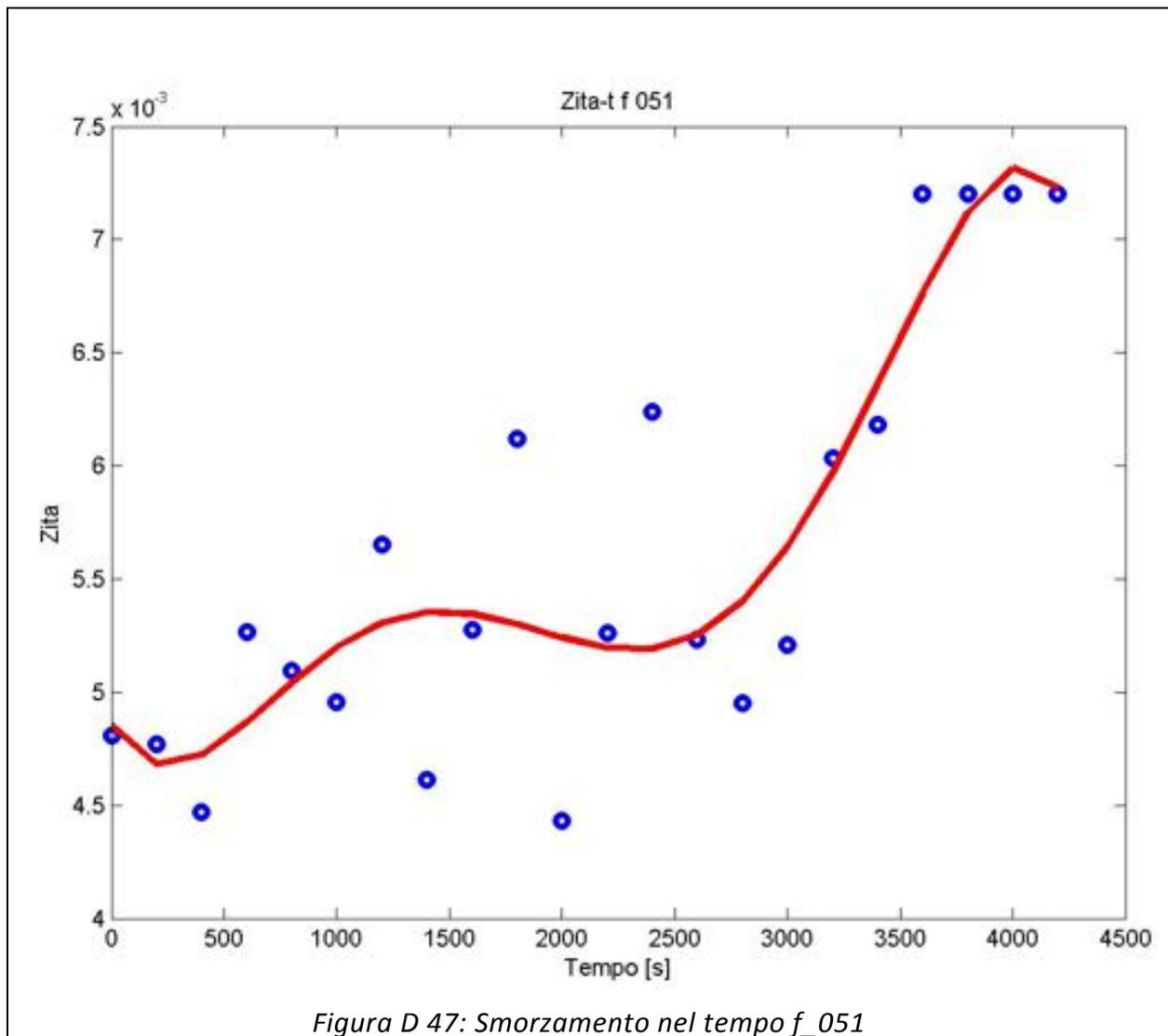


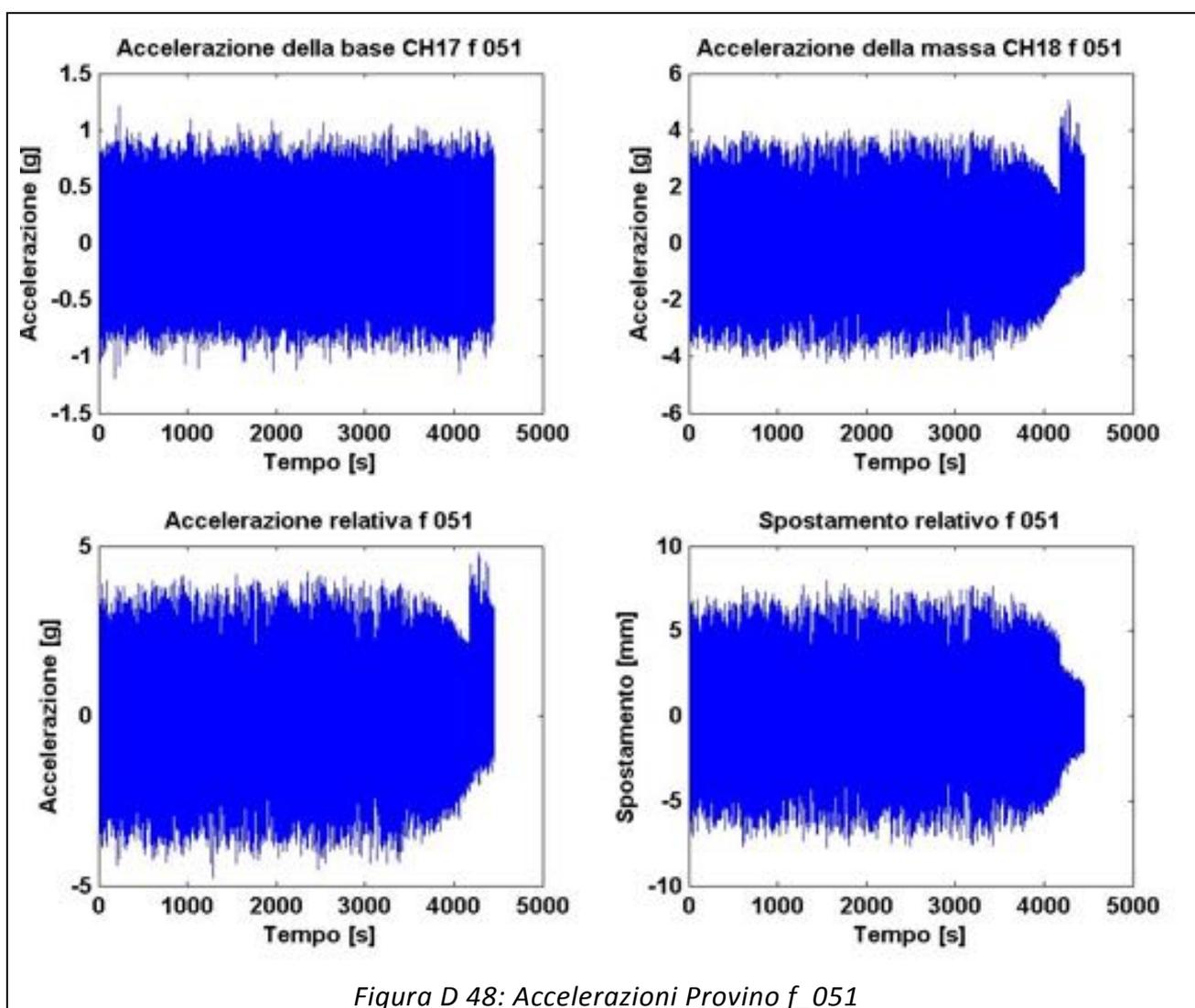
Figura D 45: Spettrogrammi Provino f_043

PROVINO: f_051

	Media [g]	RMS [g]	Skewness	Kurtosis	Frequenza media [Hz]
Accelerazione Base CH17	-8,81E-07	0,251	-8,02E-03	2,994	24,98
Accelerazione Massa CH18	-7,17E-06	1,295	-4,00E-02	2,576	11,51
Accelerazione relativa CH17-CH18	-6,29E-06	1,313	-4,30E-02	2,592	12,00
Spostamento Relativo	1,15E-08	0,002	1,27E-02	2,585	11,45
Accelerazione Trasversale CH22	-1,33E-20	0,034	3,14E-02	7,909	31,18
Accelerazione Verticale CH23	-2,97E-19	1,235	9,15E-02	2,757	11,51
Accelerazione Longitudinale CH24	7,24E-19	1,019	-3,68E-02	2,785	12,20







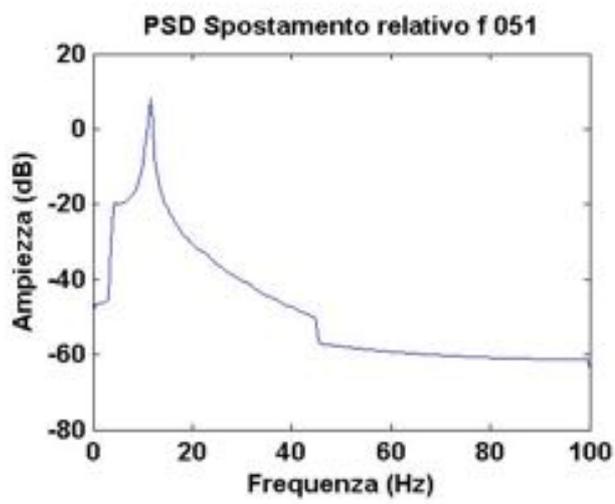
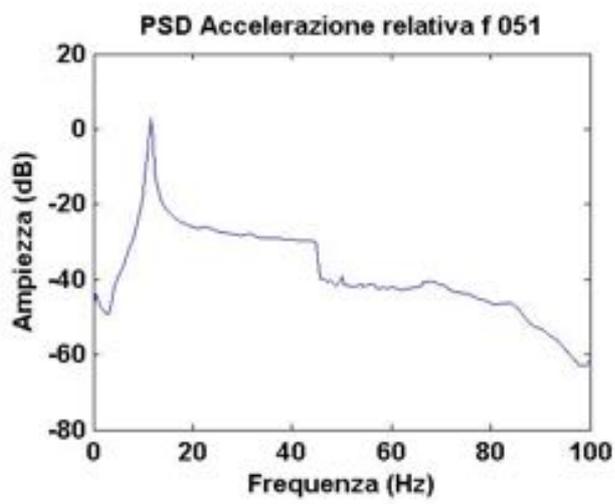
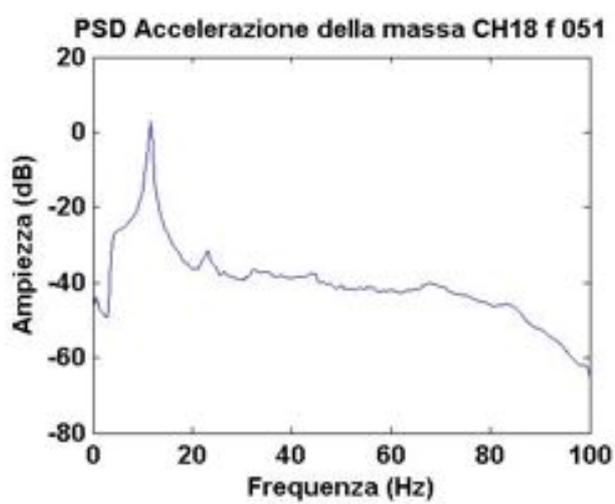
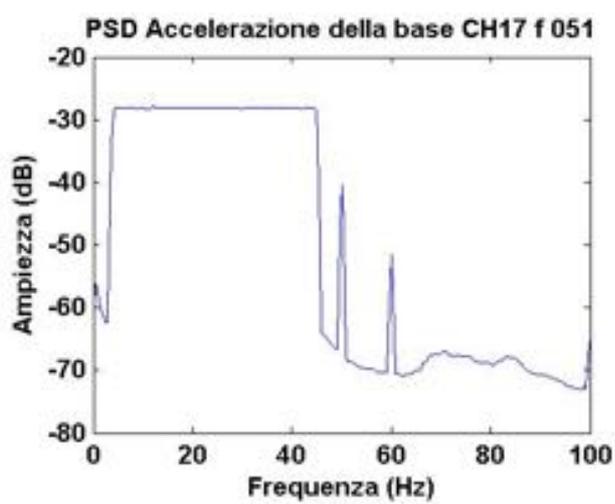


Figura D 49:PSD Provino f_051

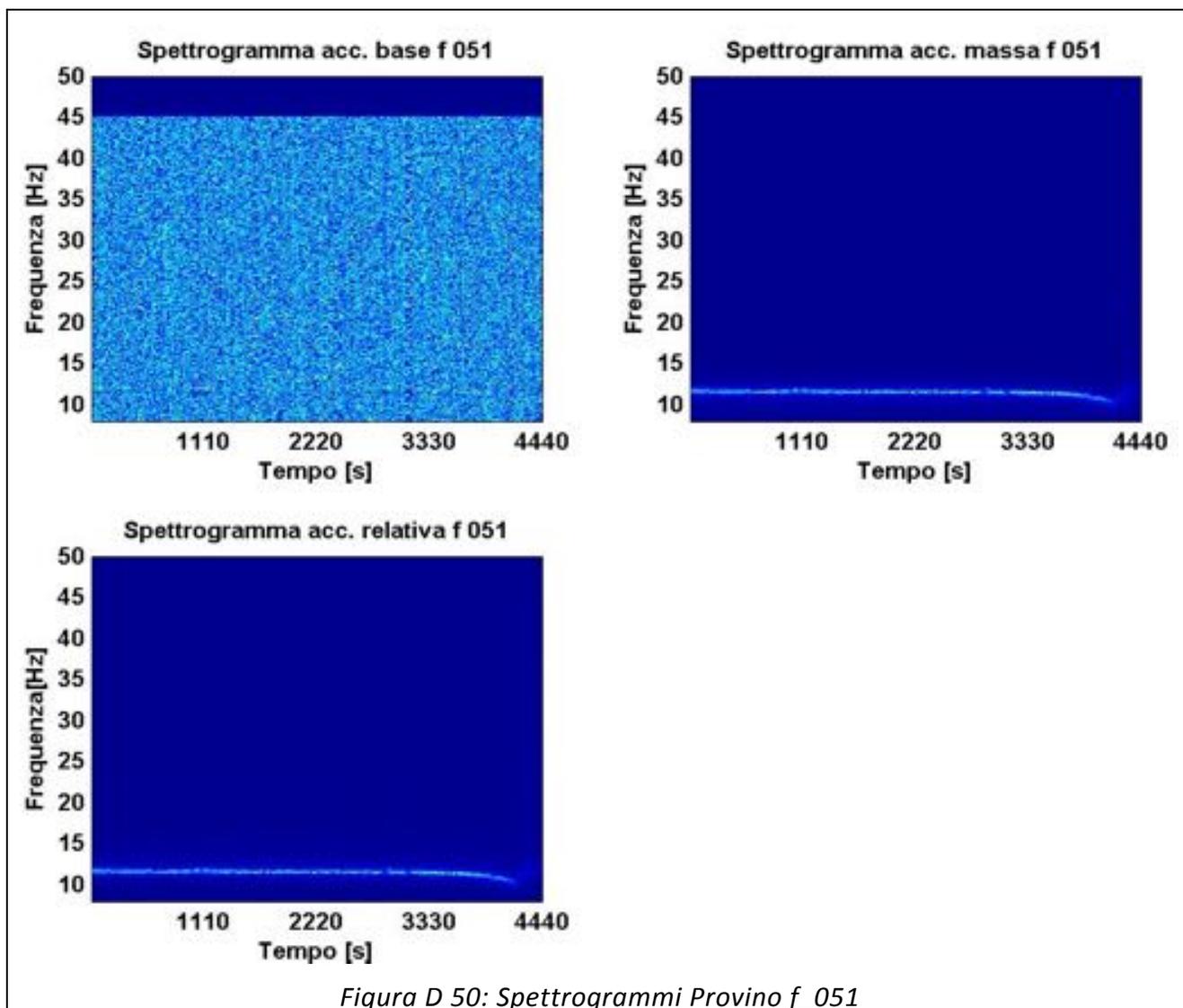
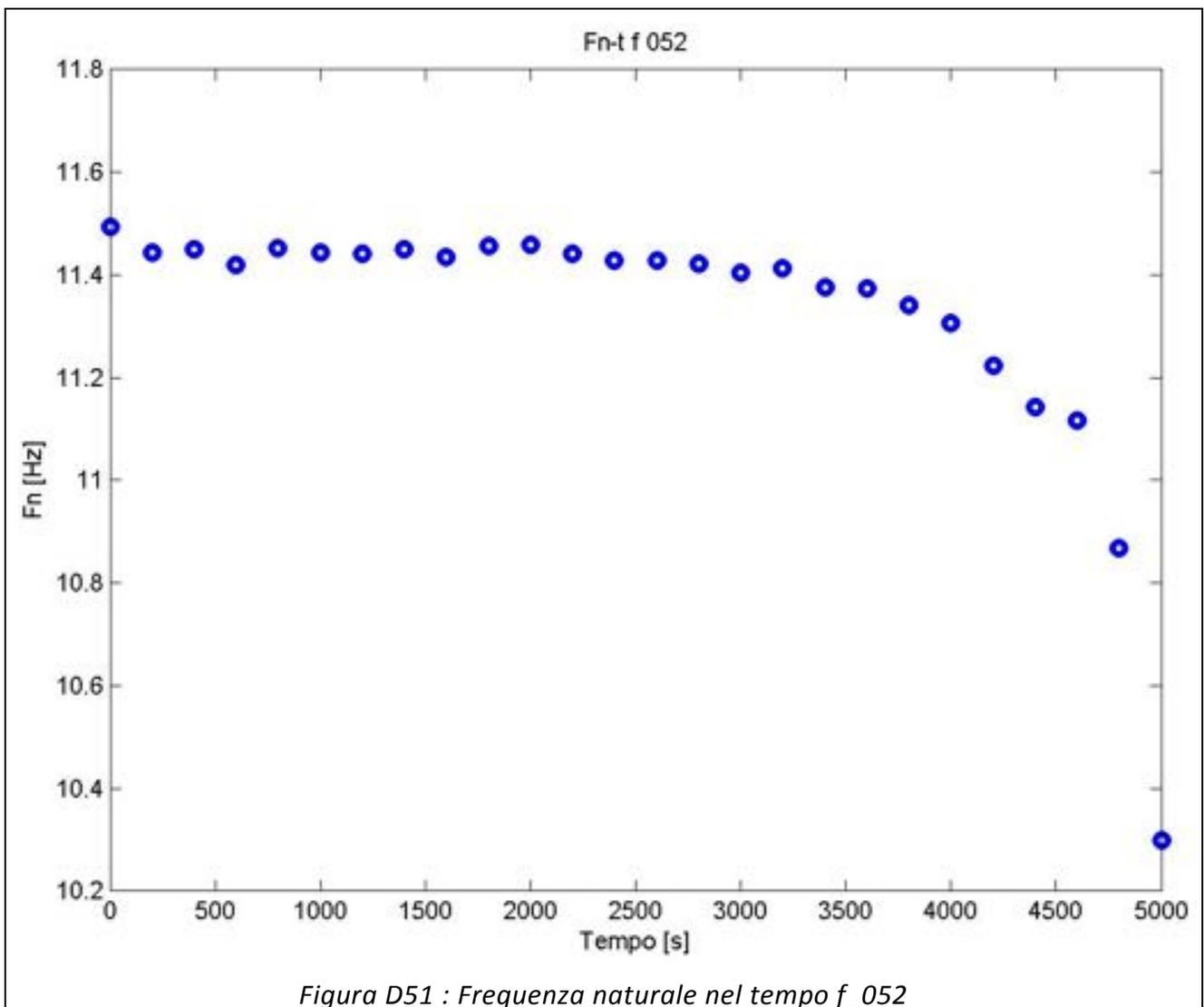


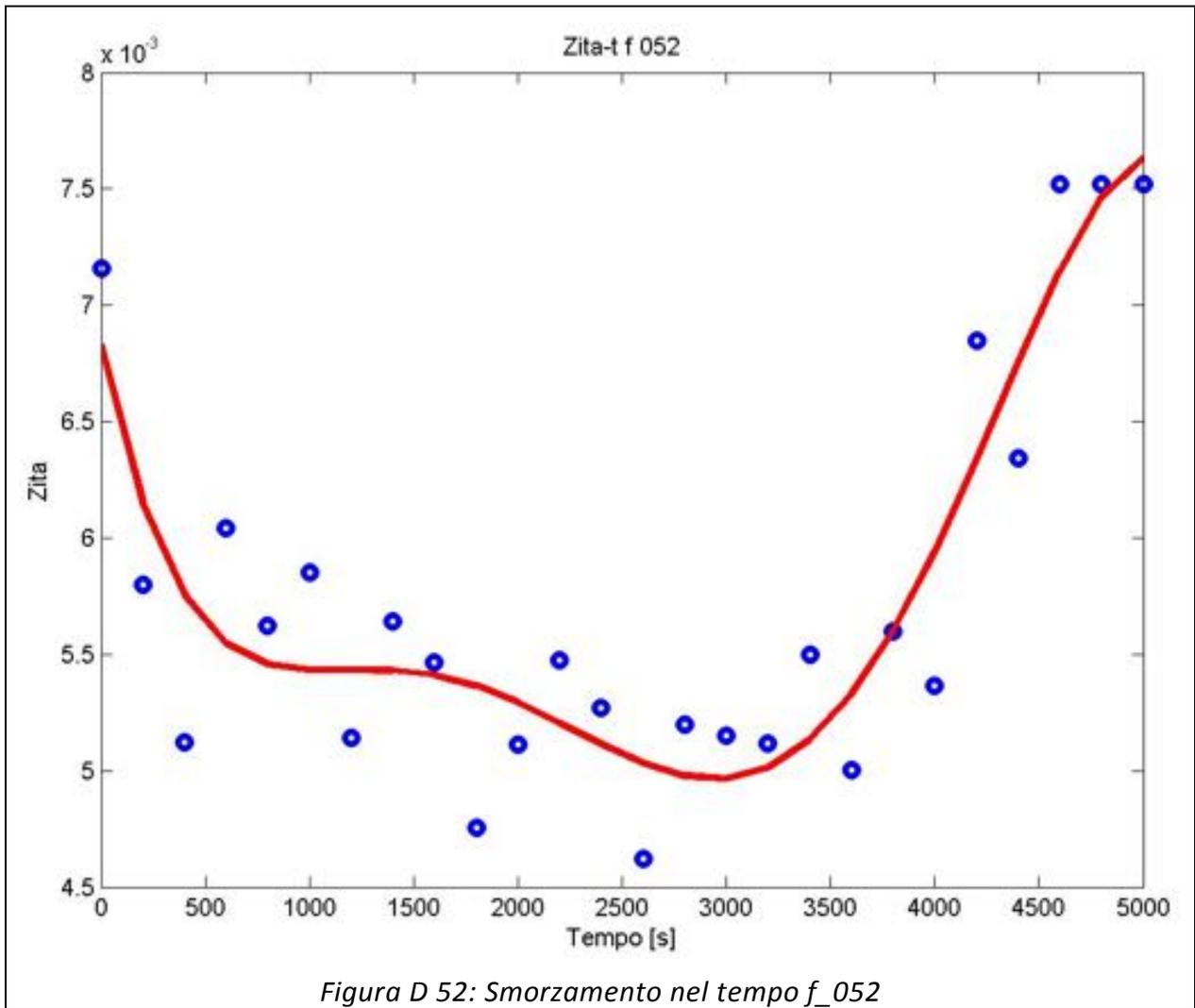
Figura D 50: Spettrogrammi Provino f_051

PROVINO: f_052

	Media [g]	RMS [g]	Skewness	Kurtosis	Frequenza media [Hz]
Accelerazione Base CH17	-5,21E-07	0,251	-1,00E-02	2,985	24,97
Accelerazione Massa CH18	6,79E-07	1,325	-9,03E-02	2,564	11,41
Accelerazione relativa CH17-CH18	1,20E-06	1,340	-9,46E-02	2,583	11,87
Spostamento Relativo	-3,74E-09	0,002	2,76E-02	2,574	11,32
Accelerazione Trasversale CH22	-4,88E-21	0,053	8,46E-04	3,916	32,38
Accelerazione Verticale CH23	-2,73E-19	1,276	7,36E-02	2,632	11,35
Accelerazione Longitudinale CH24	-5,18E-20	1,038	-5,89E-02	2,667	12,06

Note: Durante lo svolgimento dei test si sono misurati picchi inaspettati sul CH18 (Massa)





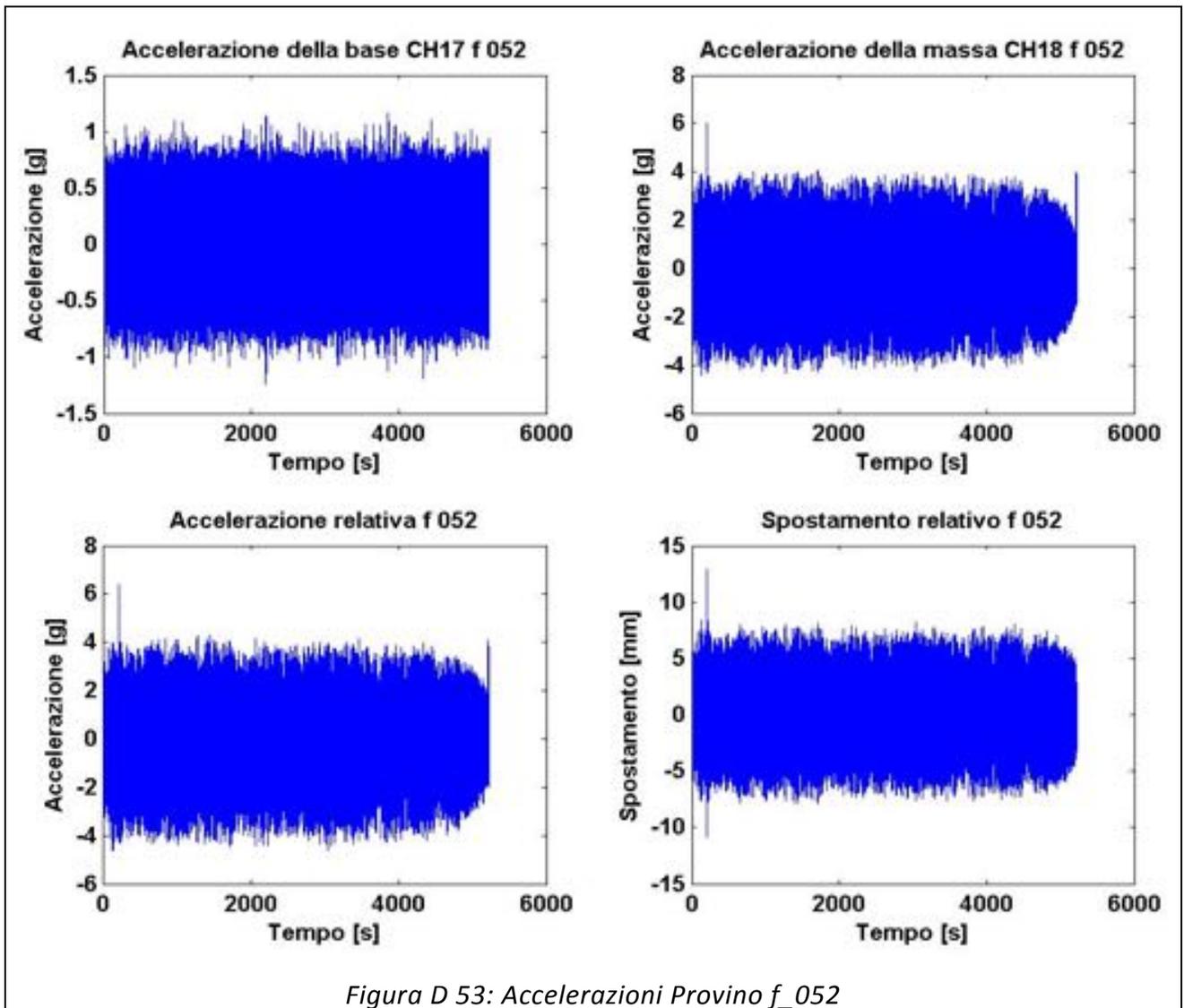
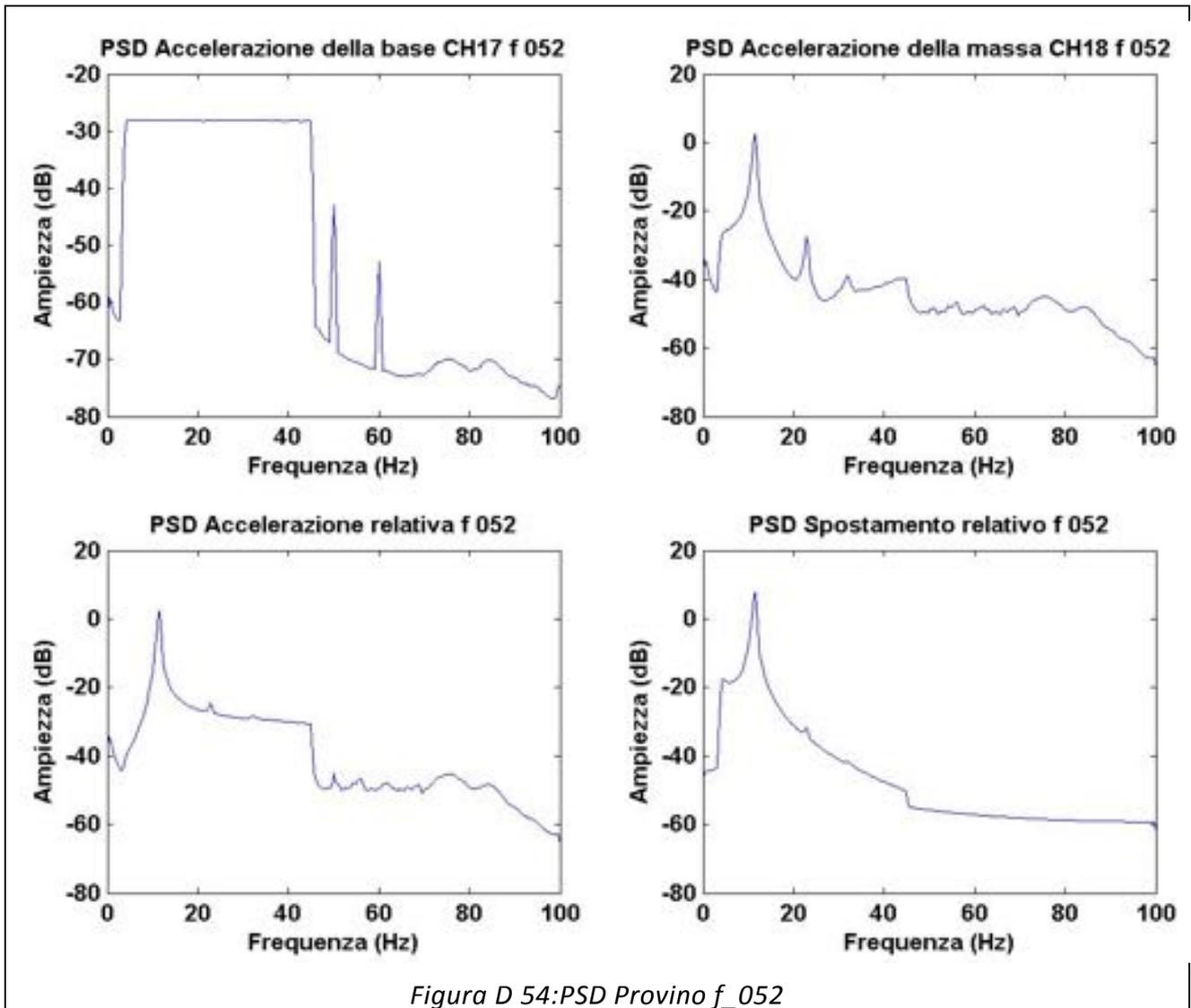
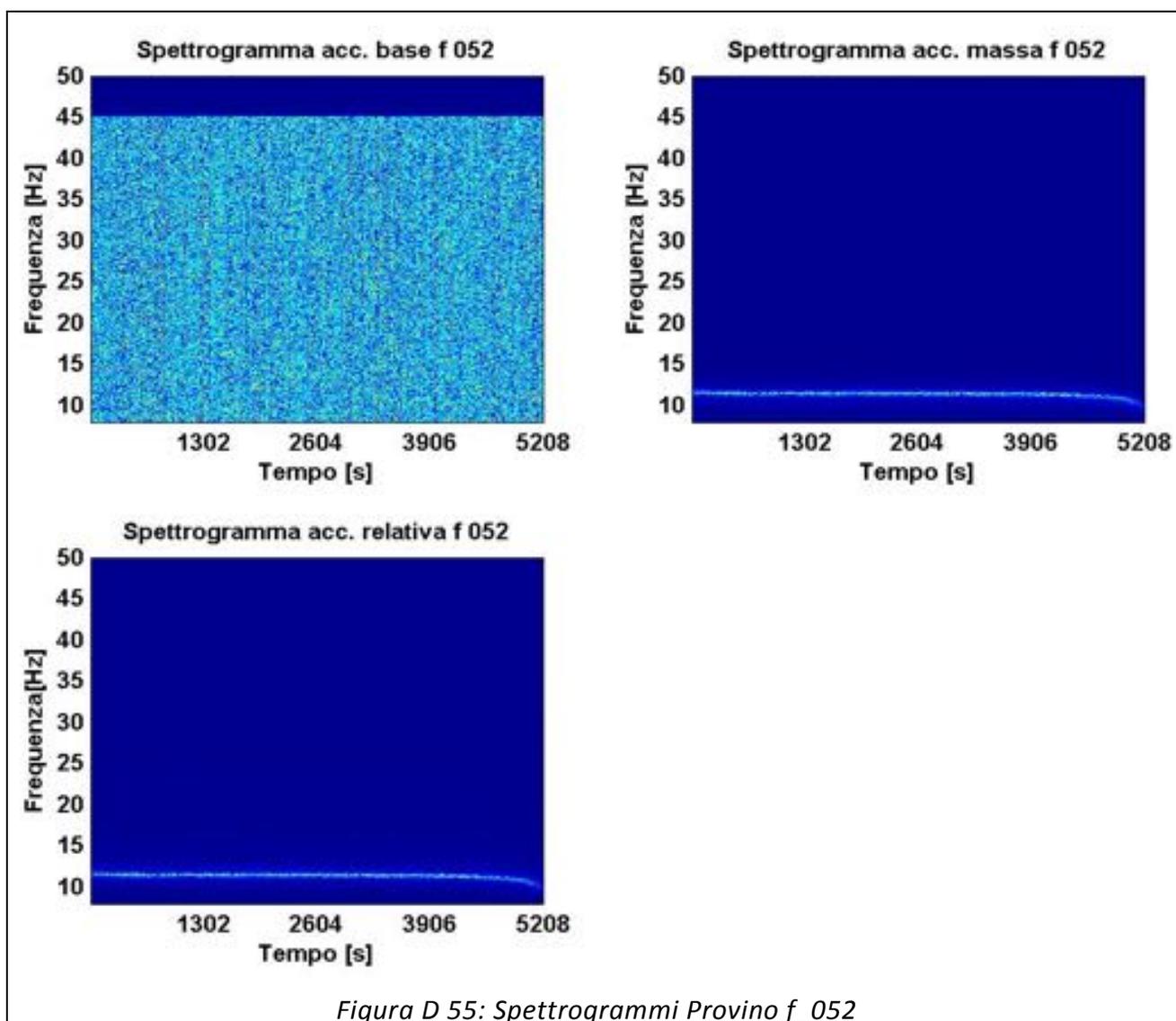


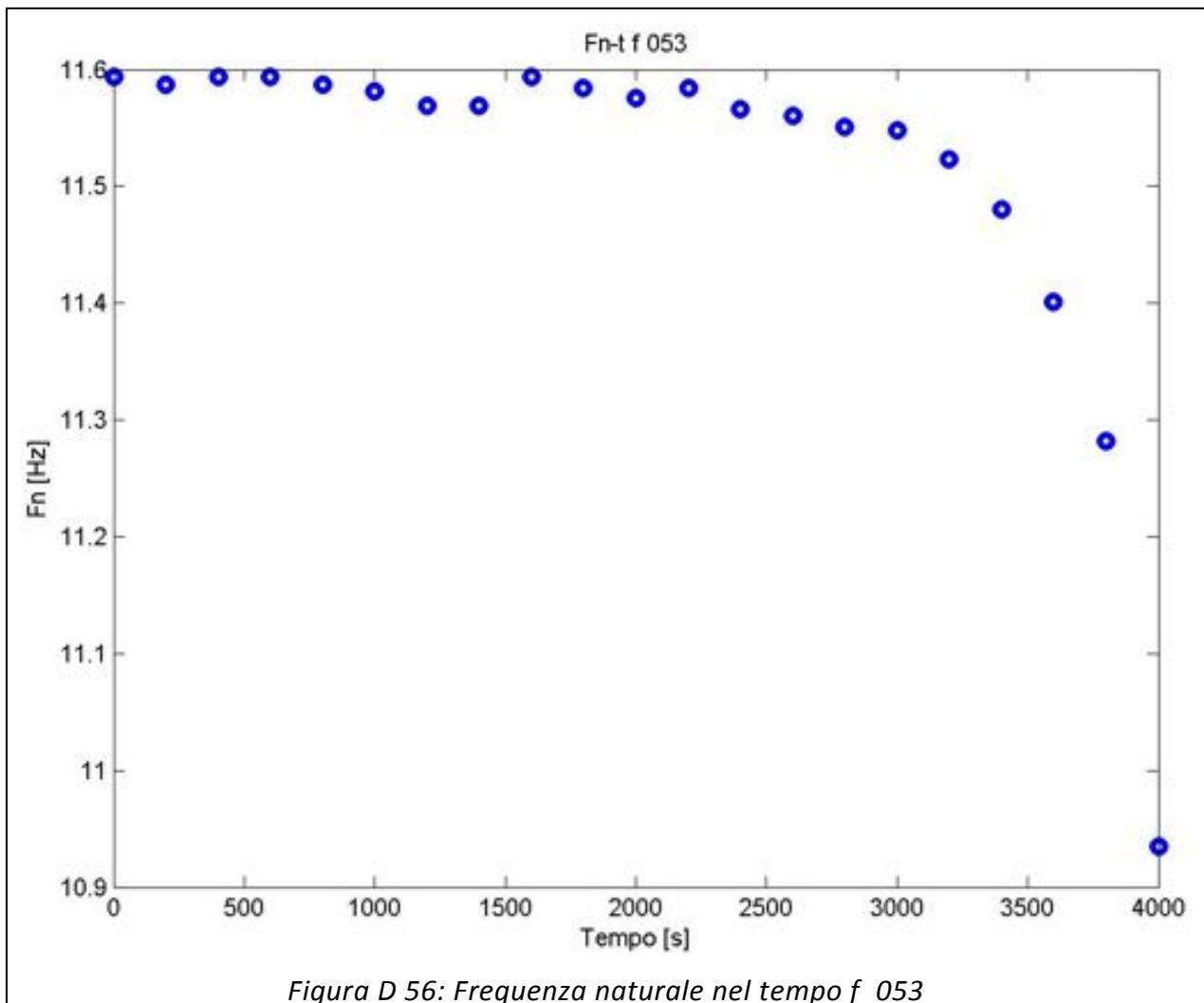
Figura D 53: Accelerazioni Provino f_052

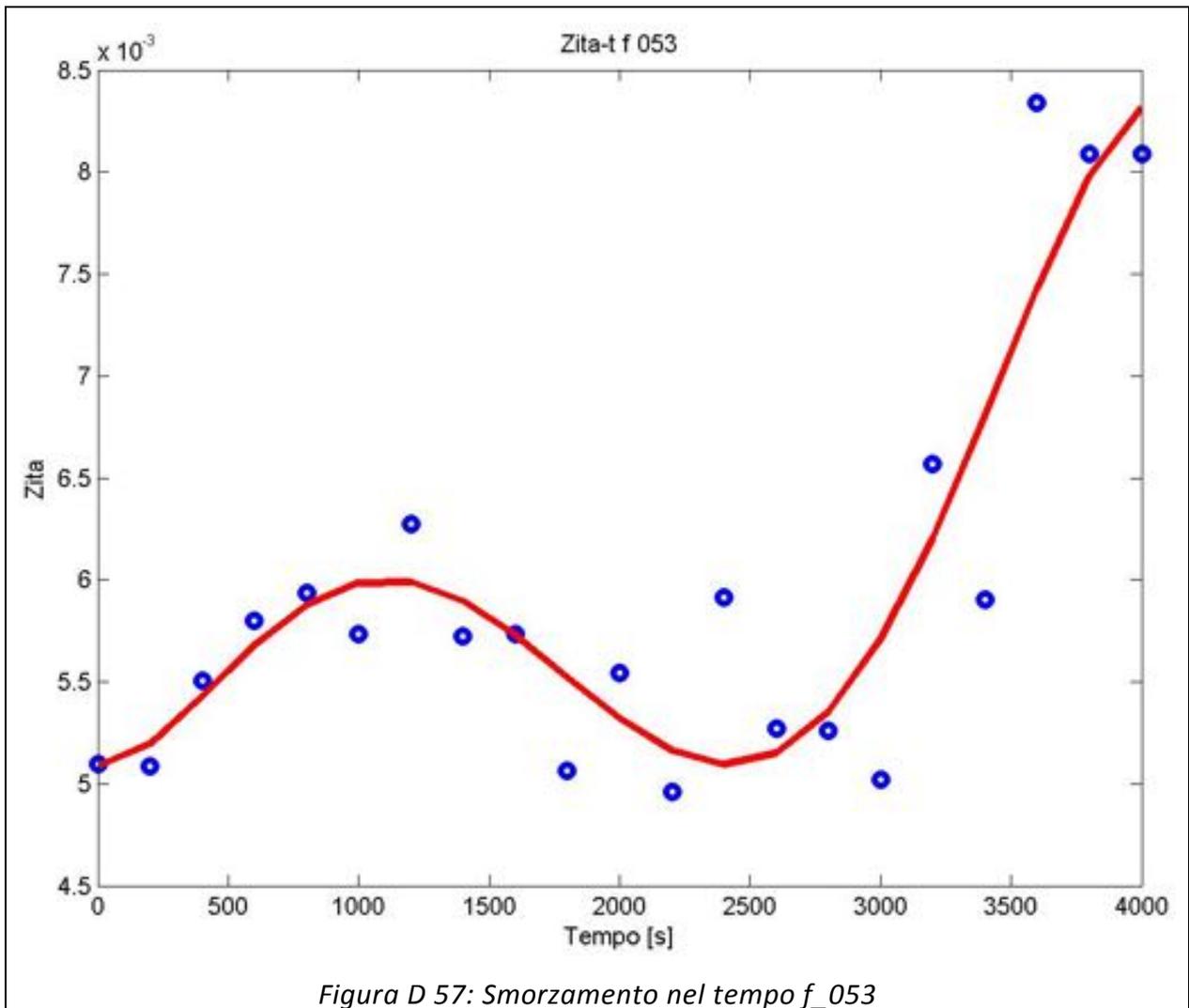




PROVINO: f_053

	Media [g]	RMS [g]	Skewness	Kurtosis	Frequenza media [Hz]
Accelerazione Base CH17	-3,24E-07	0,251	-5,87E-03	2,979	25,04
Accelerazione Massa CH18	-9,38E-07	1,322	-8,64E-03	2,612	11,52
Accelerazione relativa CH17-CH18	-6,14E-07	1,340	-7,18E-03	2,636	12,06
Spostamento Relativo	3,30E-09	0,002	2,18E-03	2,629	11,49
Accelerazione Trasversale CH22	-1,50E-20	0,058	7,52E-03	4,878	33,31
Accelerazione Verticale CH23	-4,62E-19	1,266	8,26E-02	2,657	11,50
Accelerazione Longitudinale CH24	1,41E-19	1,013	-7,02E-02	2,701	12,17





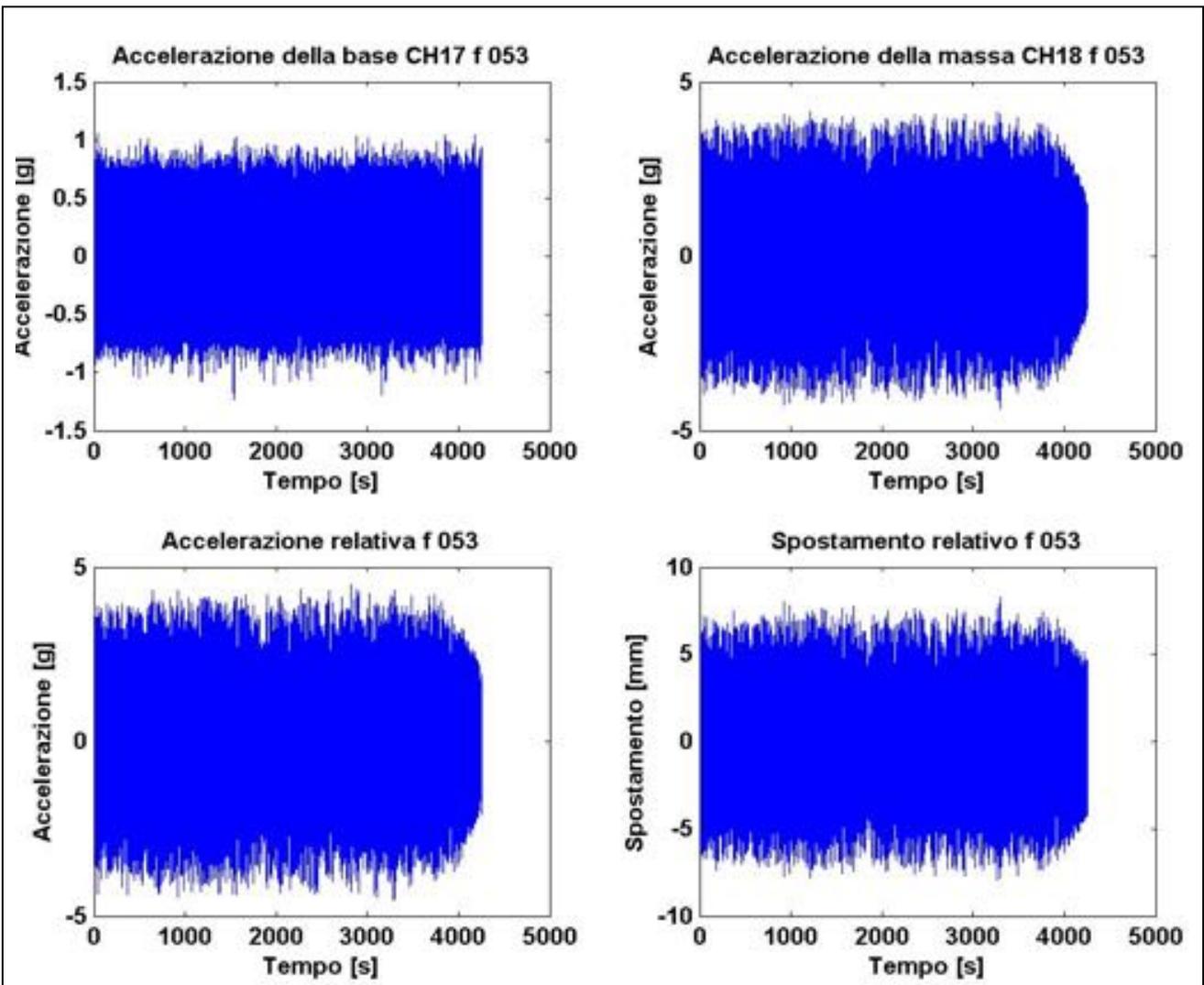
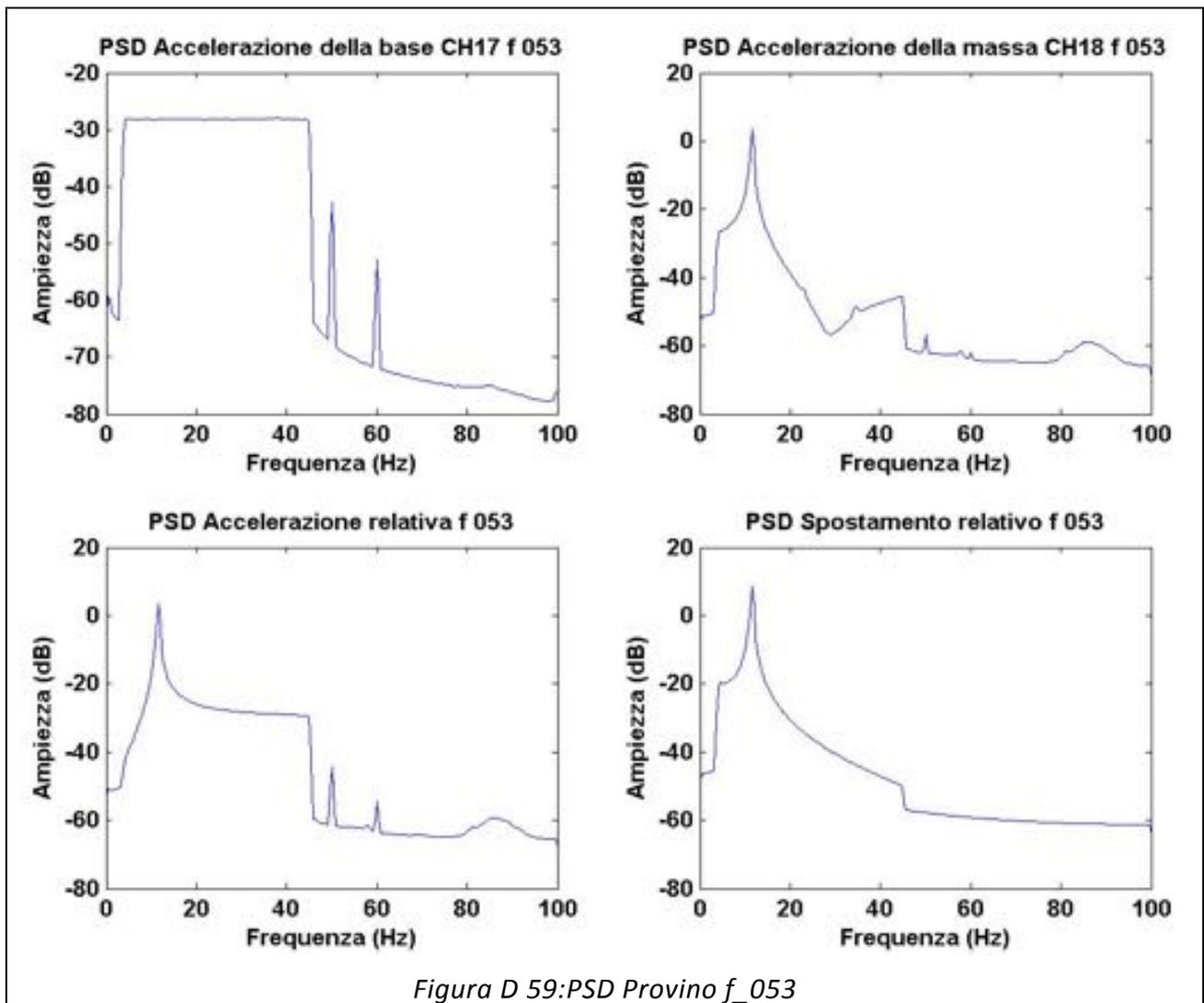
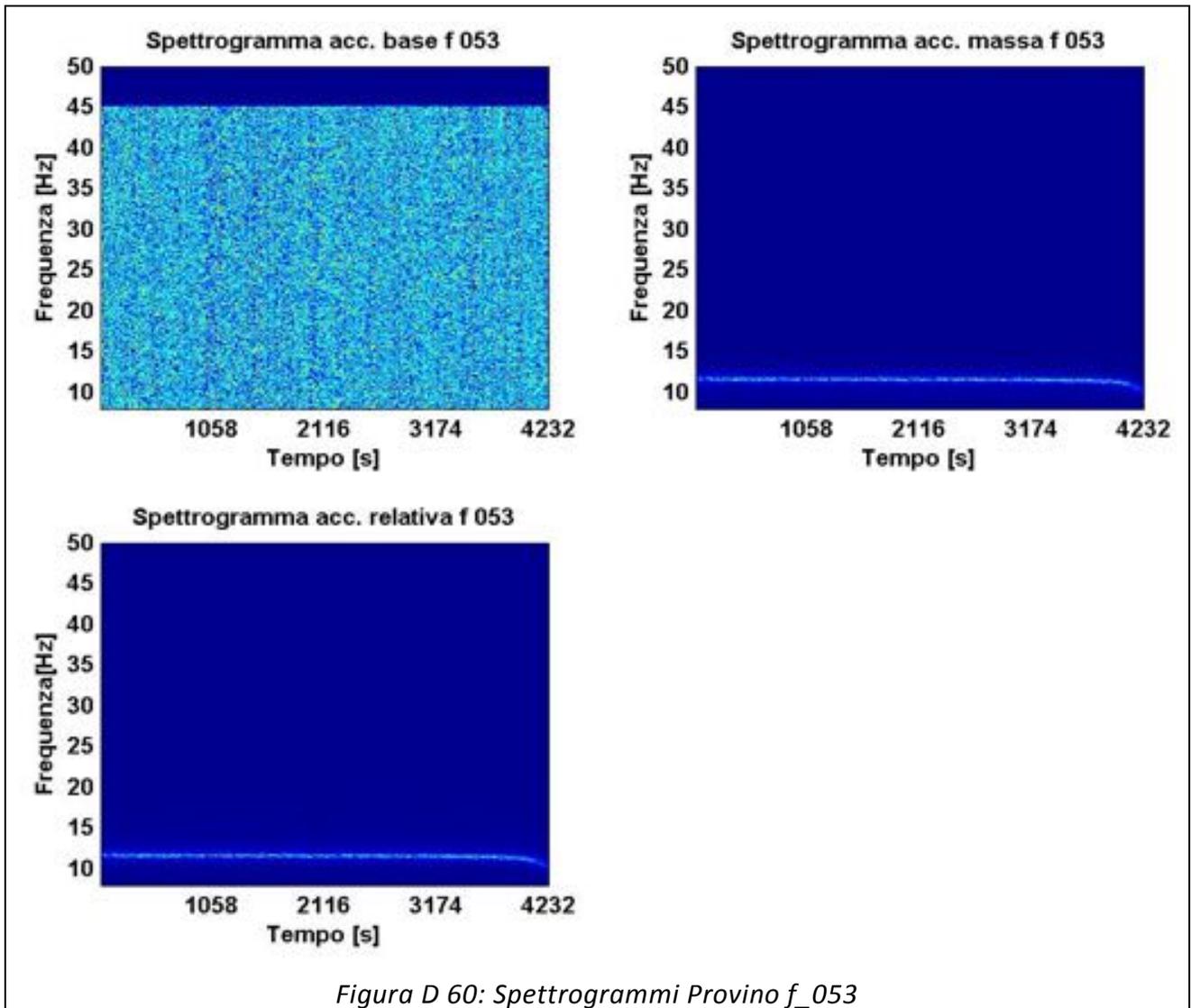


Figura D 58: Accelerazioni Provino f_053





PROVINO: f_061

	Media [g]	RMS [g]	Skewness	Kurtosis	Frequenza media [Hz]
Accelerazione Base CH17	-8,49E-08	0,150	-6,09E-03	2,991	24,99
Accelerazione Massa CH18	5,02E-08	1,002	-1,29E-02	2,876	11,62
Accelerazione relativa CH17-CH18	1,35E-07	1,011	-1,46E-02	2,882	11,95
Spostamento Relativo	-5,68E-10	0,002	3,49E-03	2,890	11,58
Accelerazione Trasversale CH22	-7,06E-21	0,063	-2,36E-02	4,557	33,52
Accelerazione Verticale CH23	-1,74E-20	0,920	6,26E-02	2,760	11,59
Accelerazione Longitudinale CH24	-3,90E-21	0,727	-2,55E-02	2,777	12,08

Note: Durante la prova si è verificato il distacco della massa poi incollata nuovamente

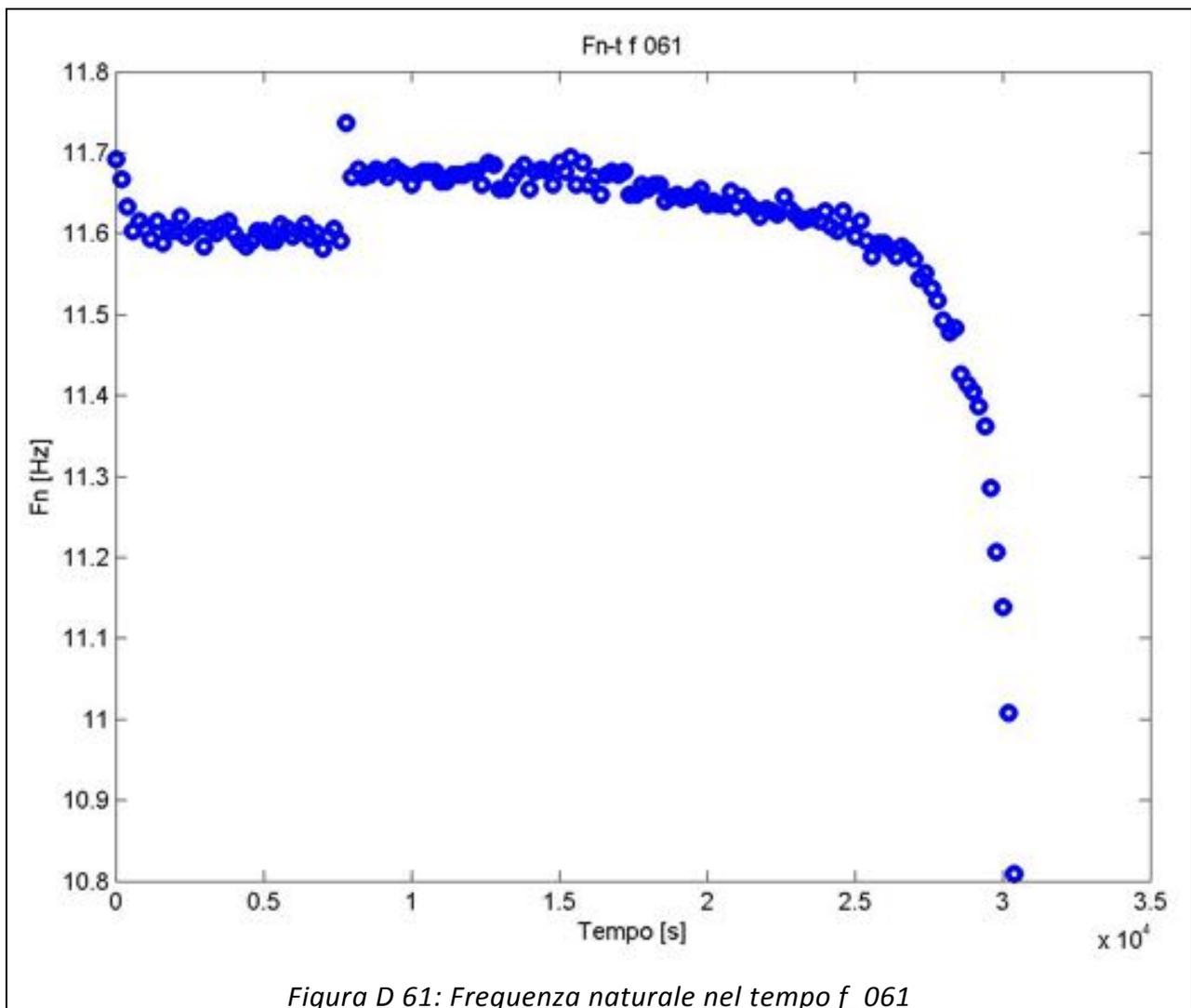
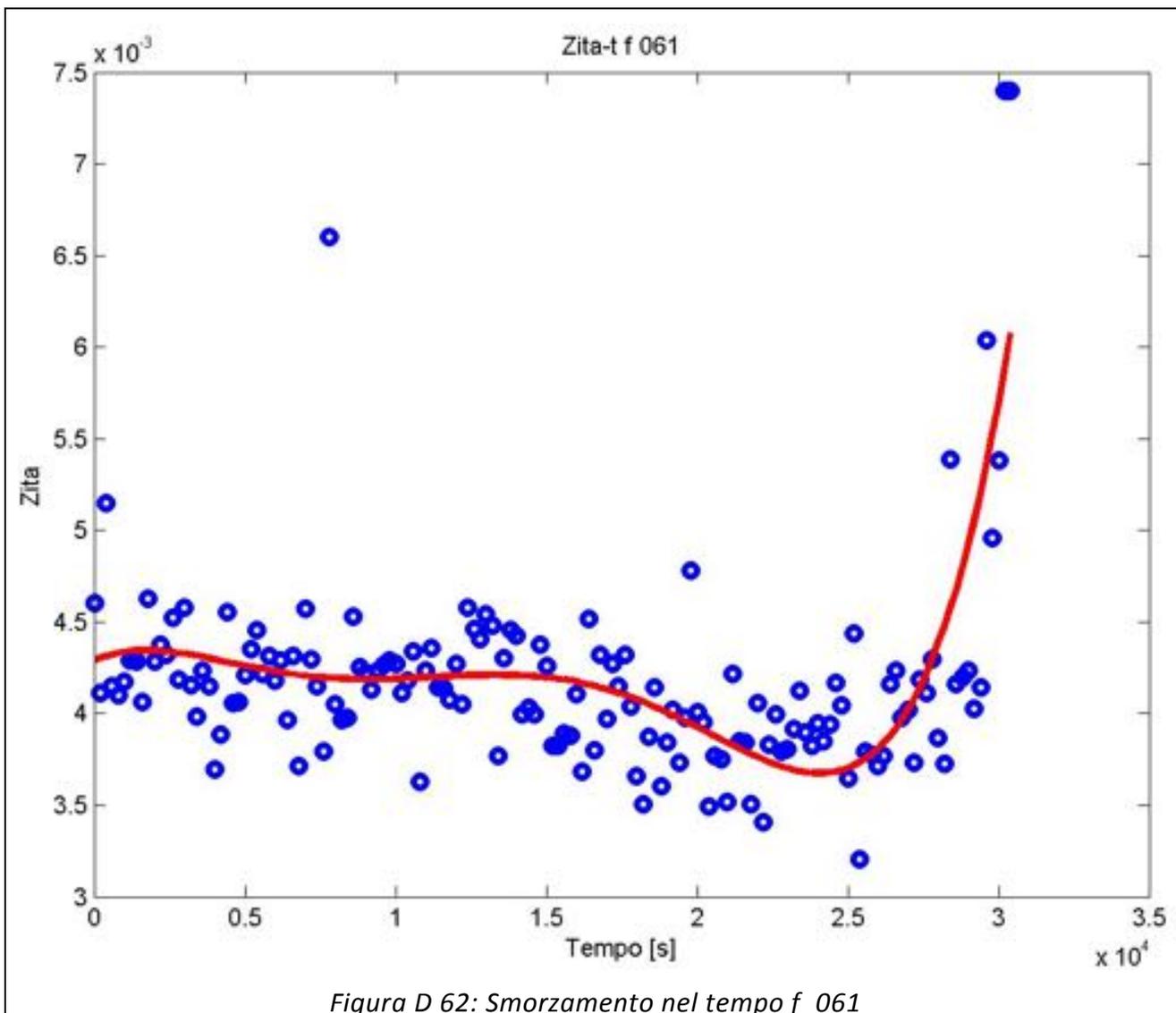
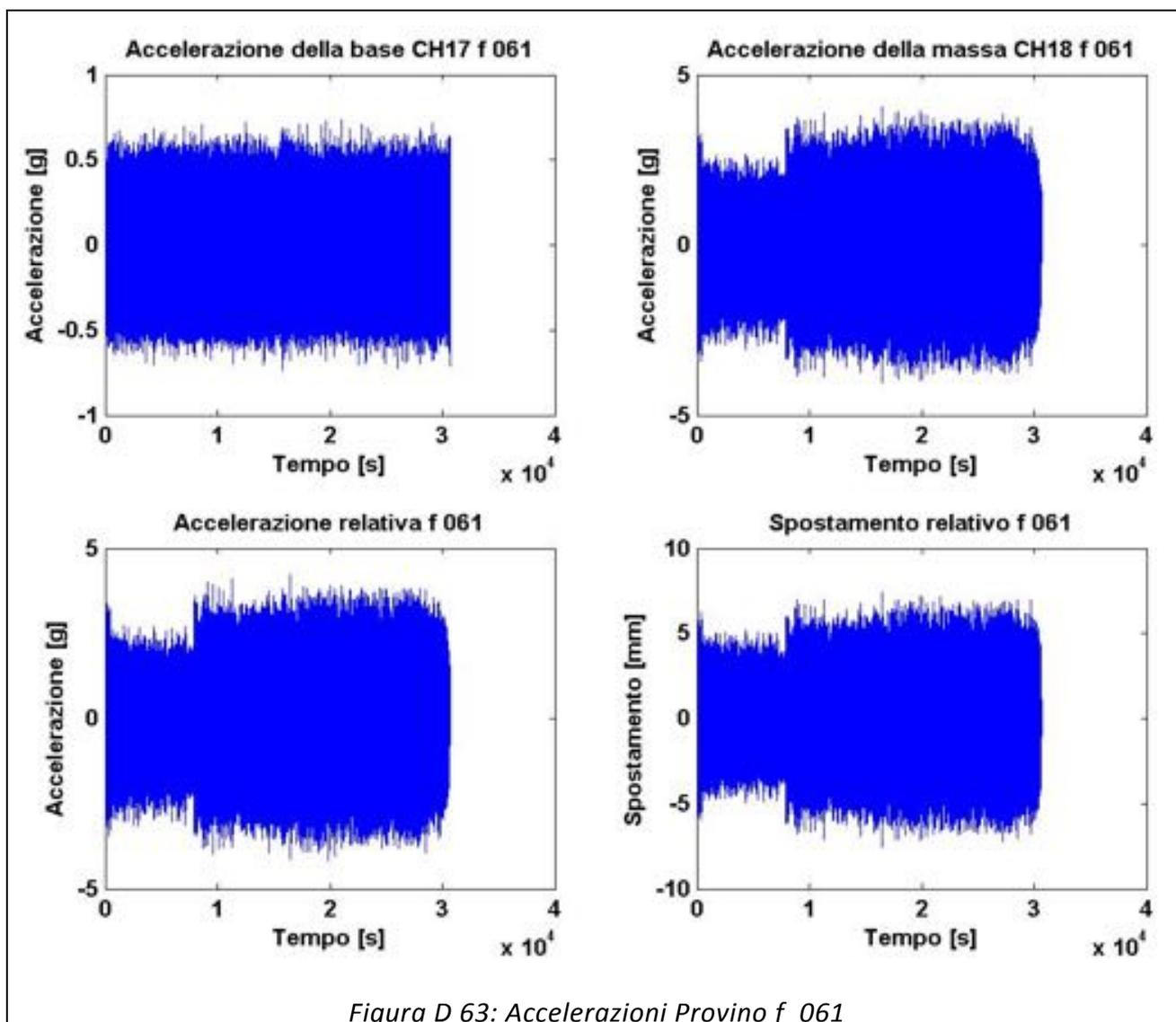
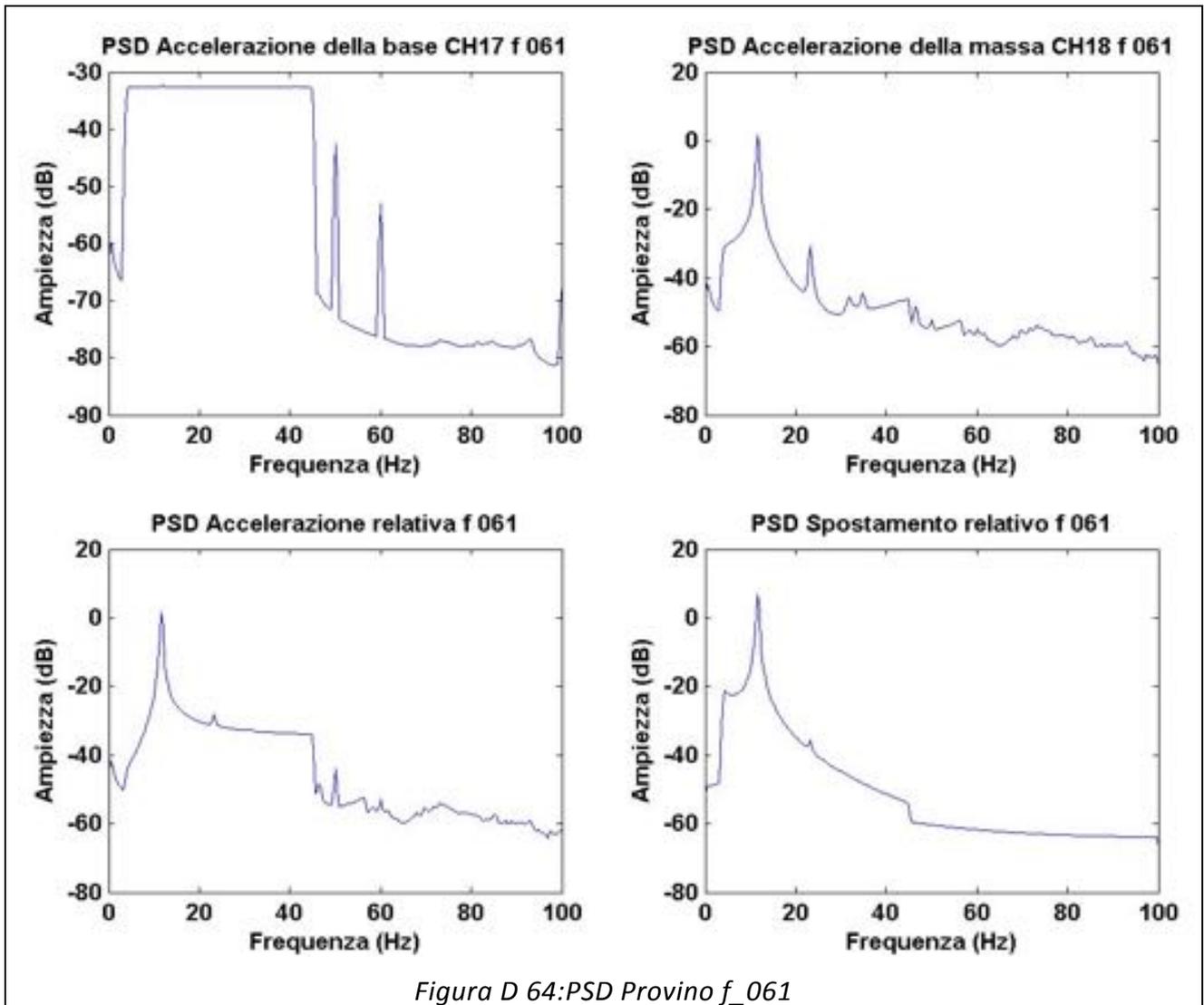


Figura D 61: Frequenza naturale nel tempo f_061







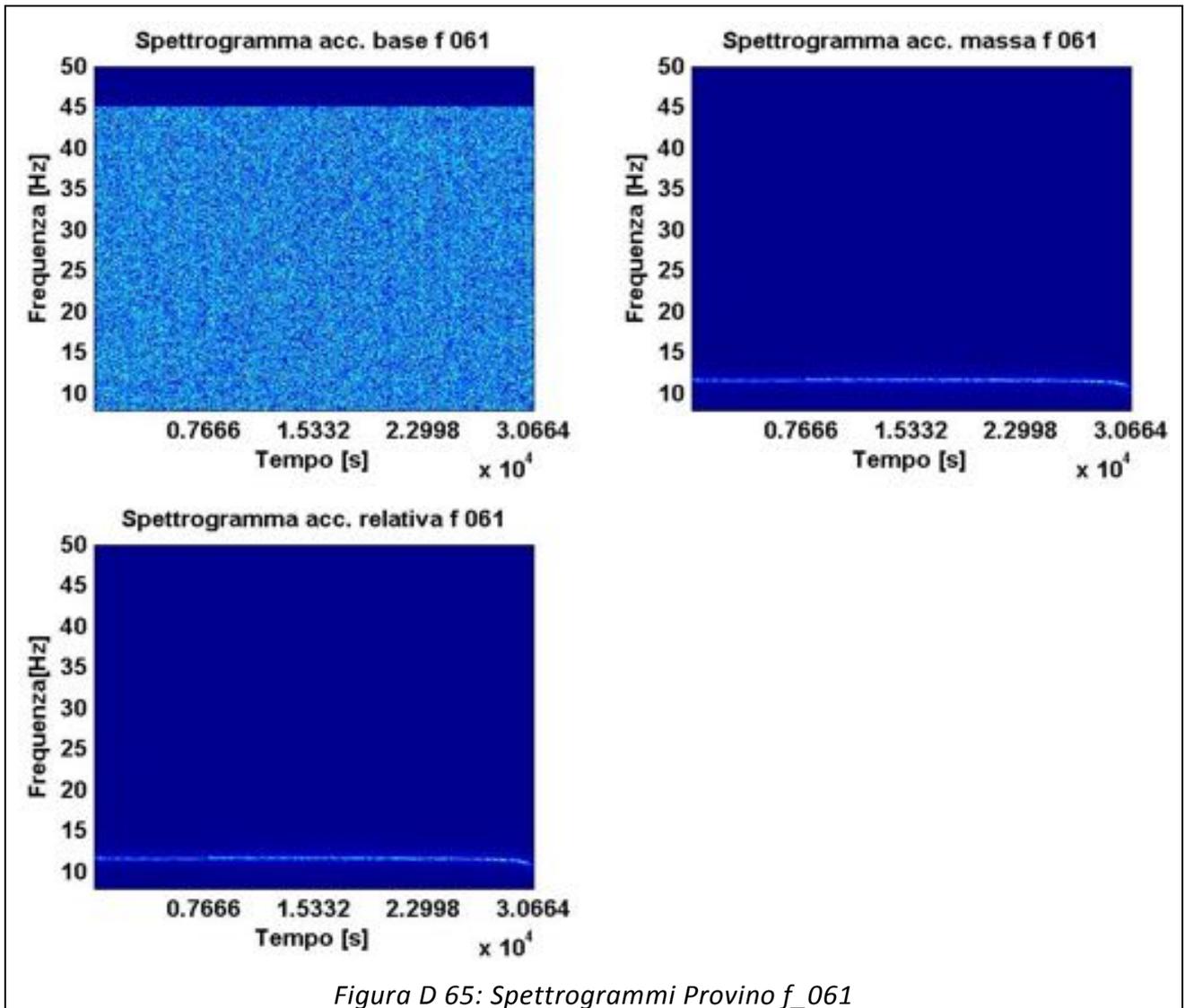


Figura D 65: Spettrogrammi Provino f_061

PROVINO: f_062

	Media [g]	RMS [g]	Skewness	Kurtosis	Frequenza media [Hz]
Accelerazione Base CH17	6,44E-08	0,152	-1,45E-02	2,985	24,96
Accelerazione Massa CH18	1,80E-07	0,989	-4,11E-03	2,773	11,64
Accelerazione relativa CH17-CH18	1,16E-07	0,998	-4,23E-03	2,781	12,01
Spostamento Relativo	-2,05E-10	0,002	1,26E-03	2,766	11,63
Accelerazione Trasversale CH22	-1,59E-21	0,086	-2,51E-02	3,981	34,29
Accelerazione Verticale CH23	-7,28E-20	0,944	6,24E-02	2,806	11,63
Accelerazione Longitudinale CH24	-6,50E-19	0,737	-5,94E-02	2,830	12,06

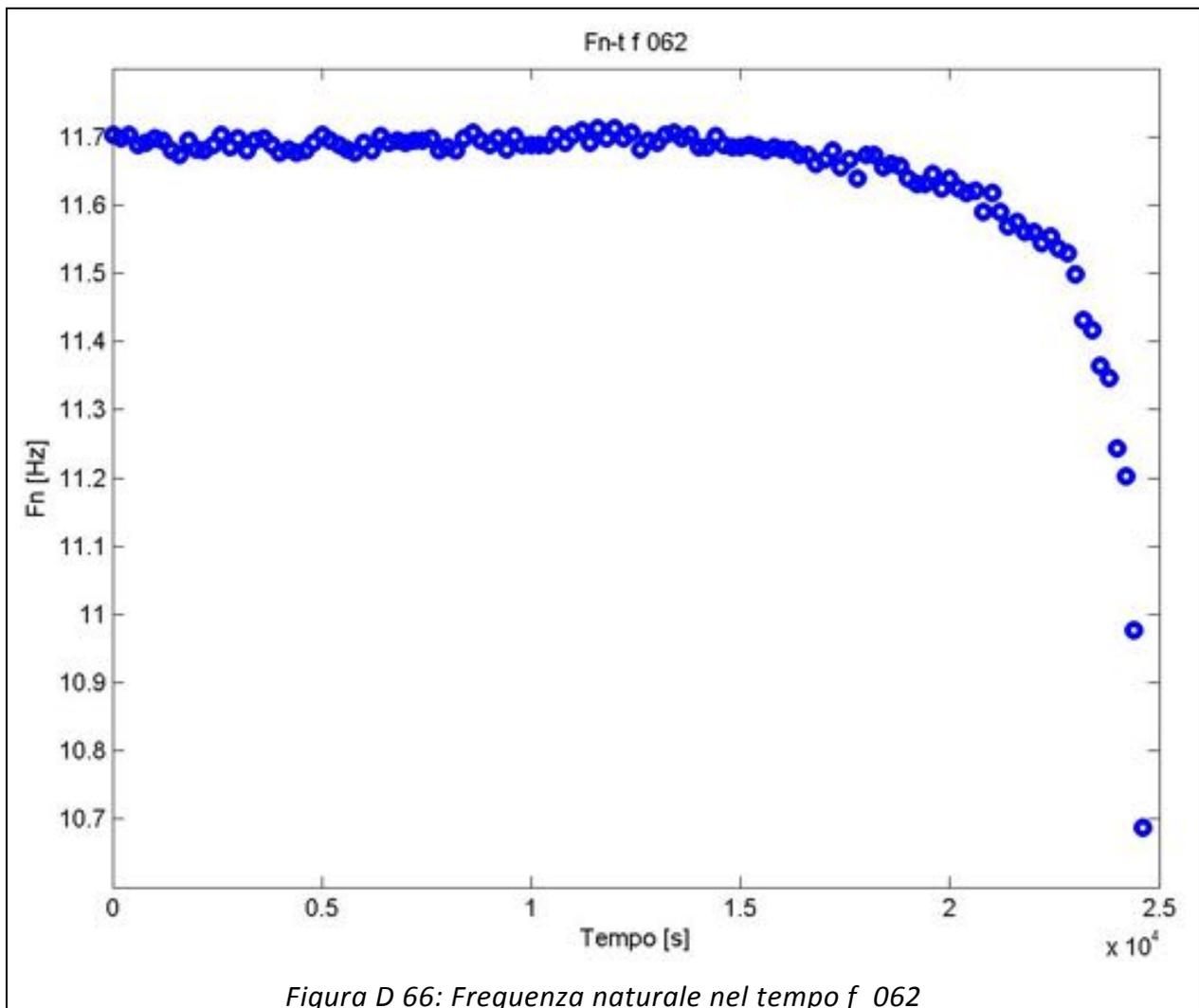
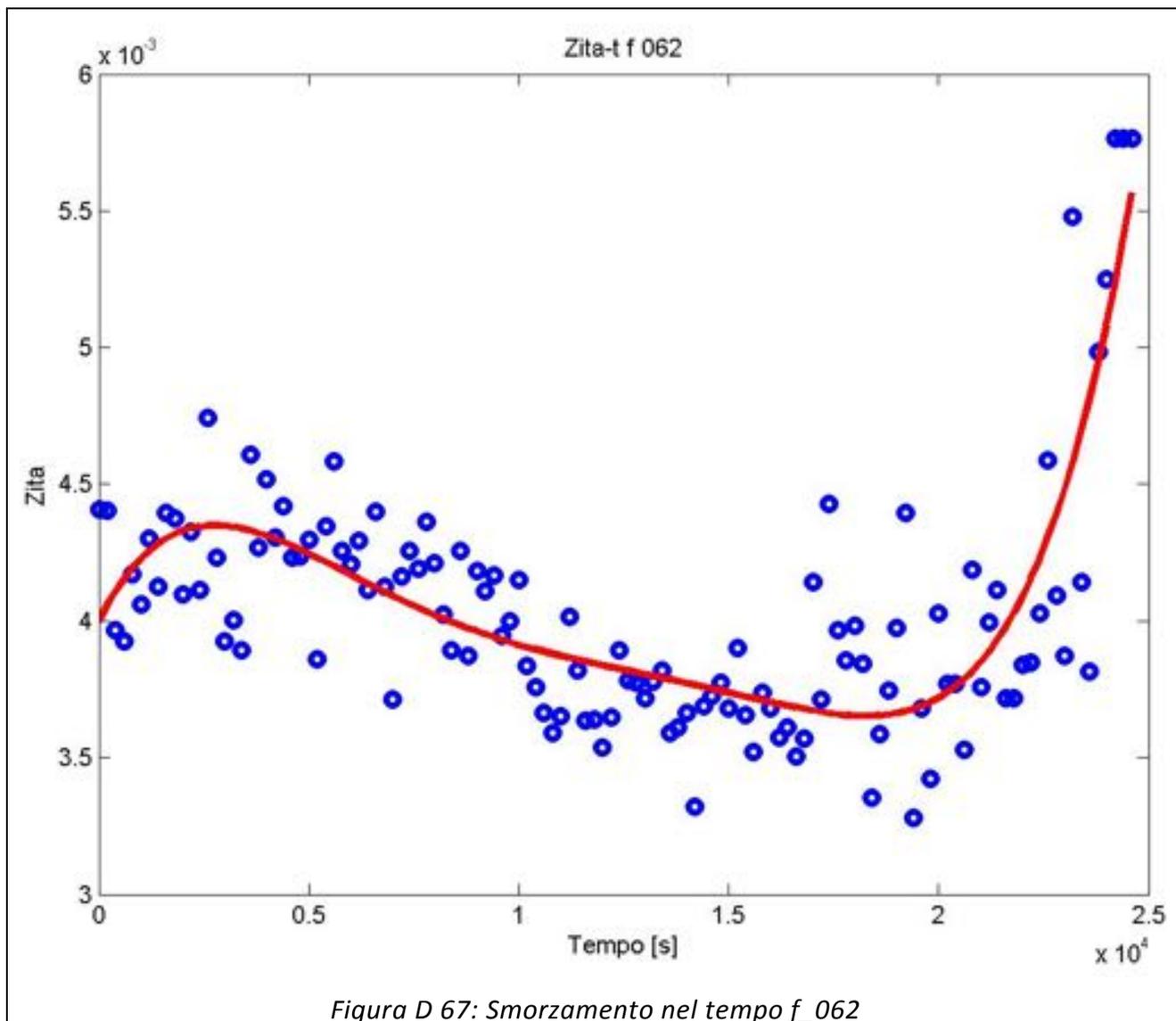
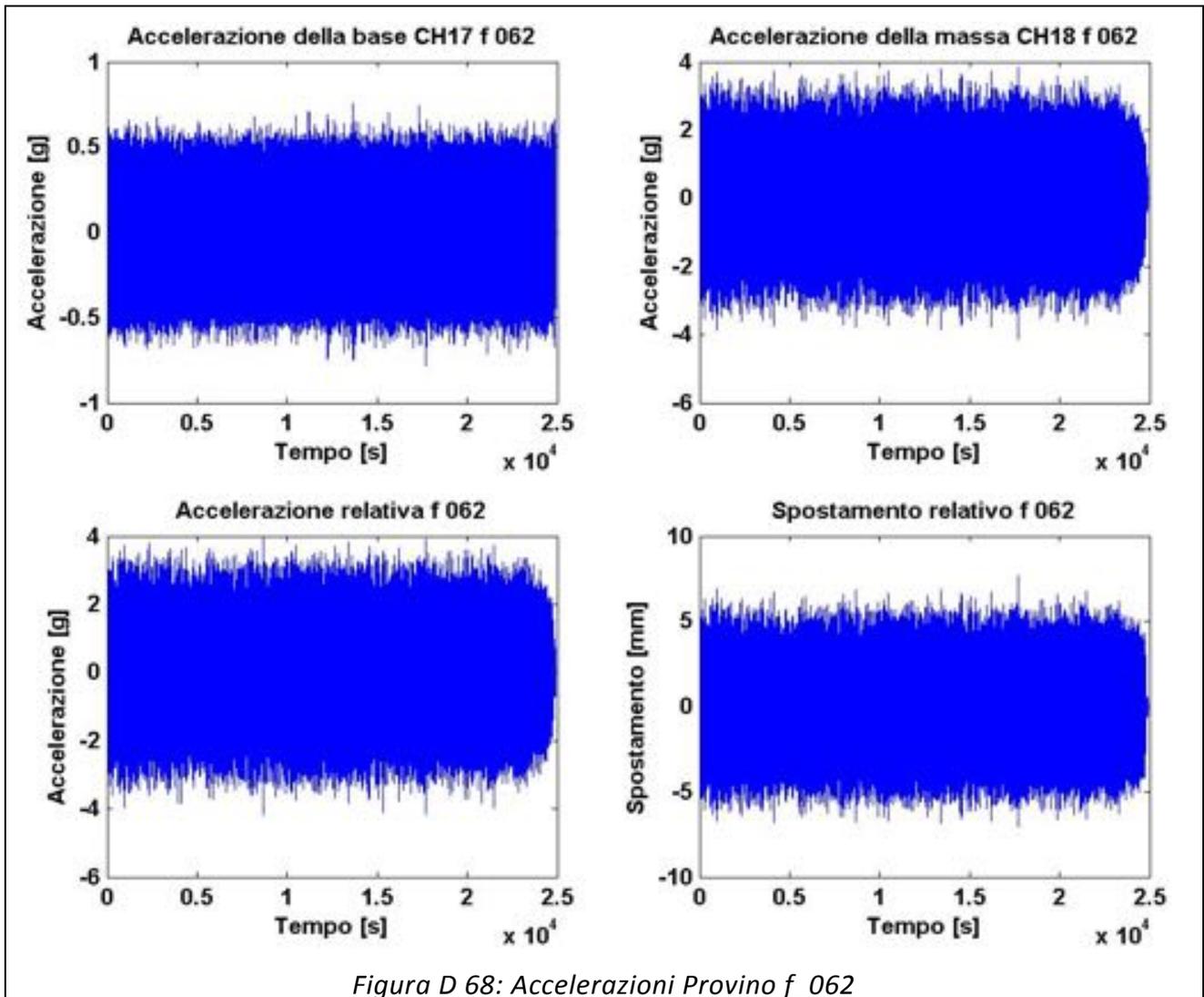
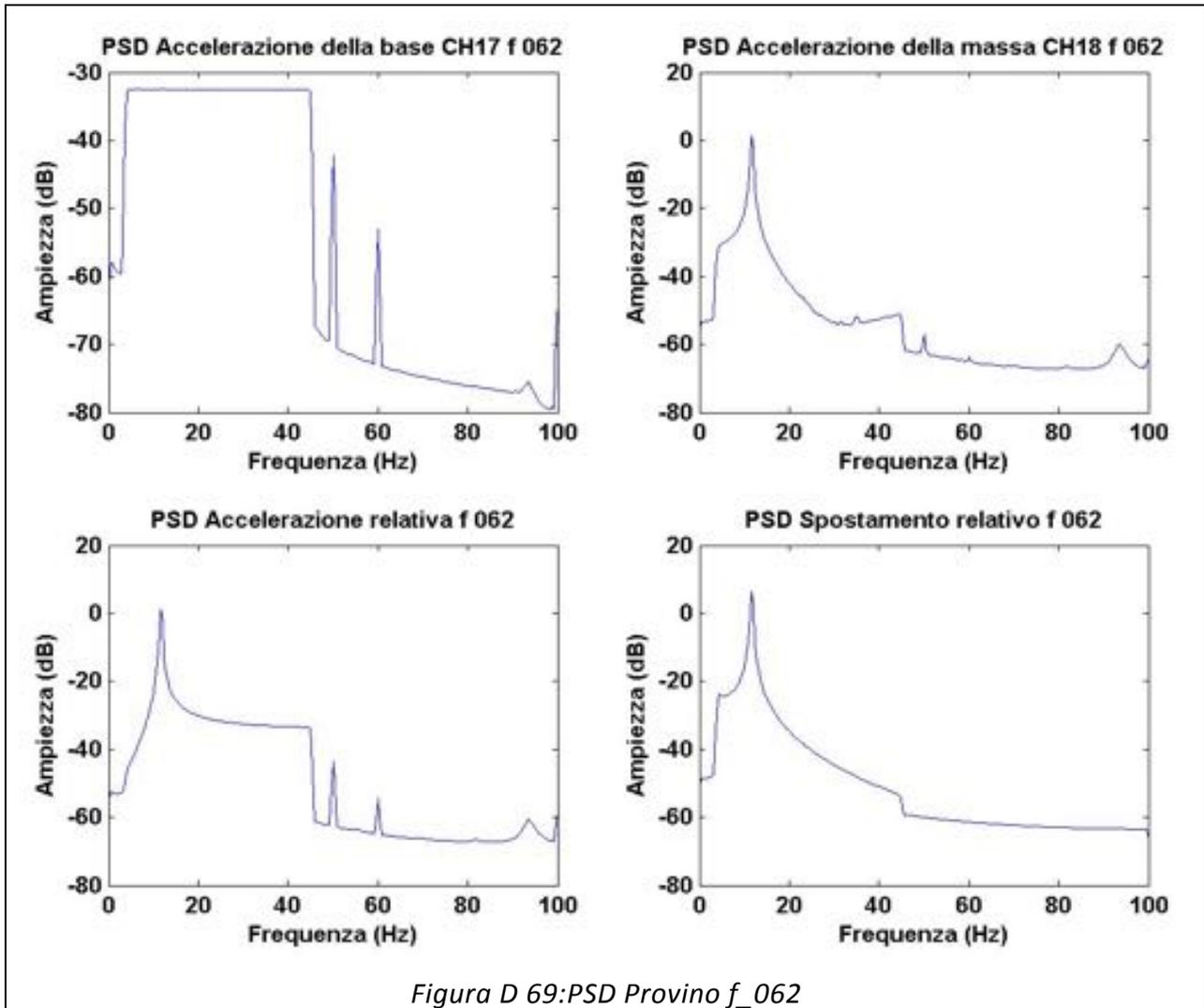


Figura D 66: Frequenza naturale nel tempo f_062







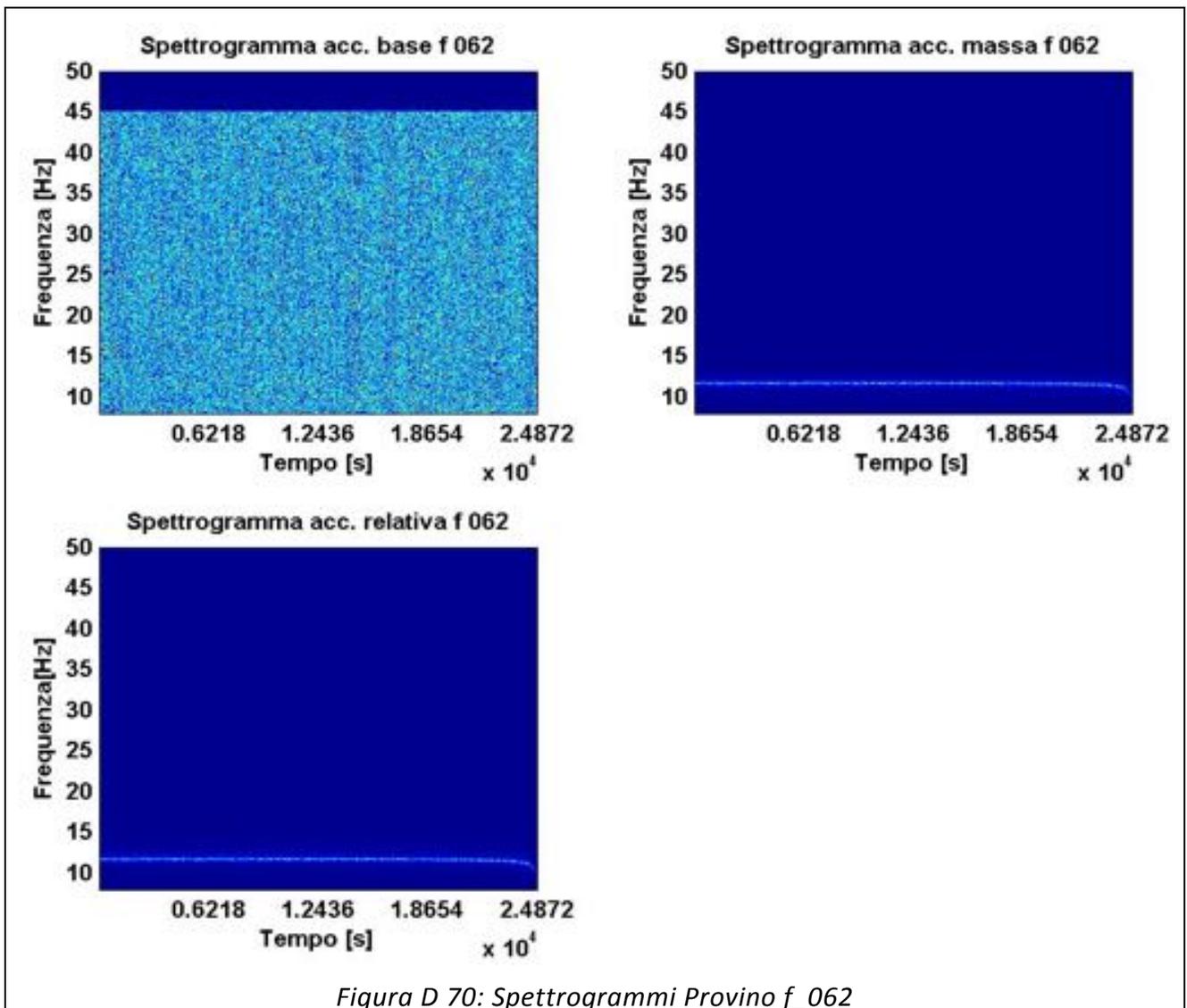


Figura D 70: Spettrogrammi Provino f_062

PROVINO: f_063

	Media [g]	RMS [g]	Skewness	Kurtosis	Frequenza media [Hz]
Accelerazione Base CH17	-6,29E-08	0,151	-4,30E-03	2,992	25,01
Accelerazione Massa CH18	5,48E-07	1,032	-1,09E-02	2,665	11,56
Accelerazione relativa CH17-CH18	6,11E-07	1,041	-1,07E-02	2,675	11,91
Spostamento Relativo	-1,32E-09	0,002	3,44E-03	2,660	11,54
Accelerazione Trasversale CH22	-3,34E-21	0,028	1,06E-02	3,747	33,10
Accelerazione Verticale CH23	1,84E-19	0,951	6,88E-02	2,697	11,55
Accelerazione Longitudinale CH24	1,29E-21	0,744	-4,25E-02	2,725	12,02

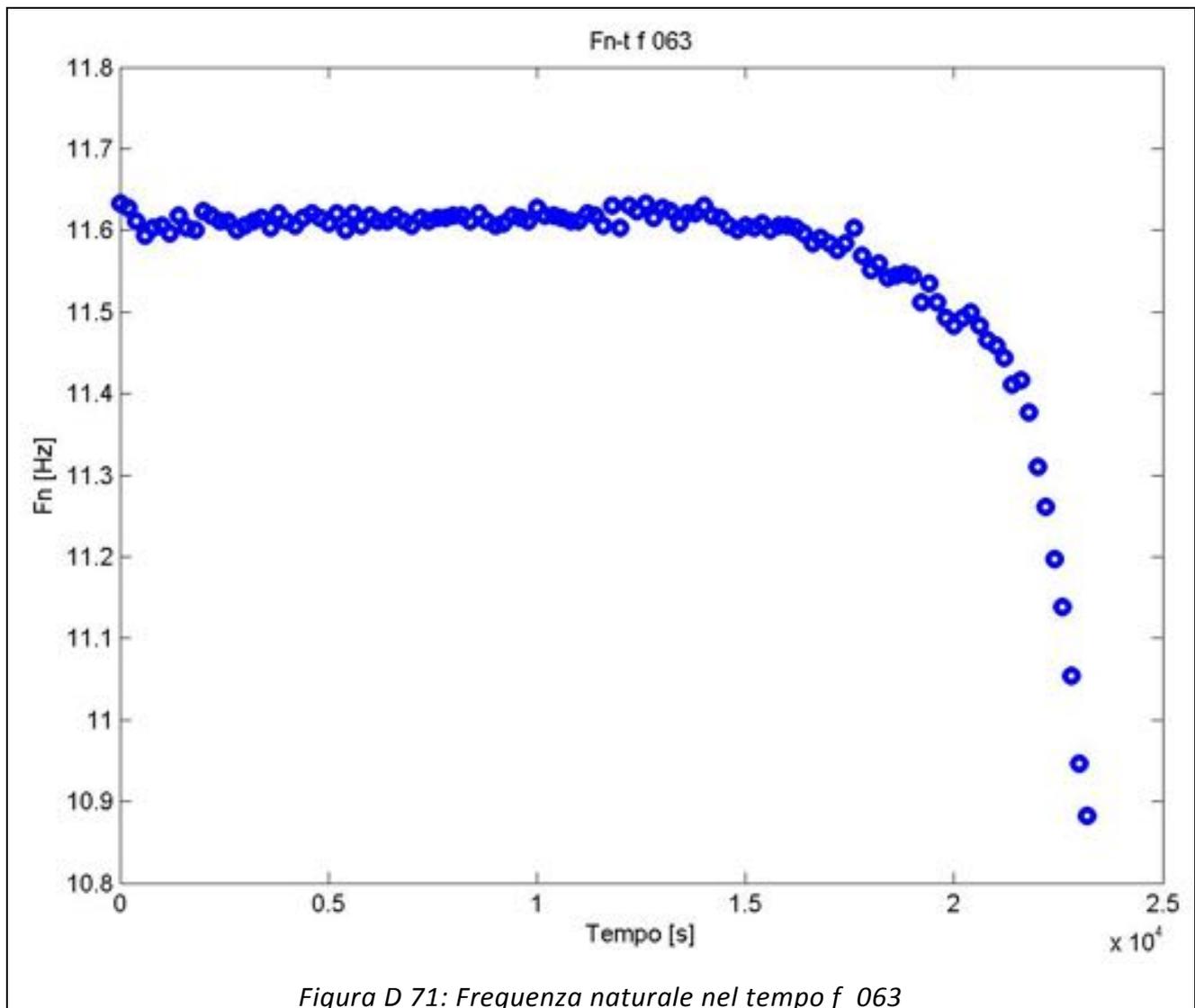


Figura D 71: Frequenza naturale nel tempo f_063

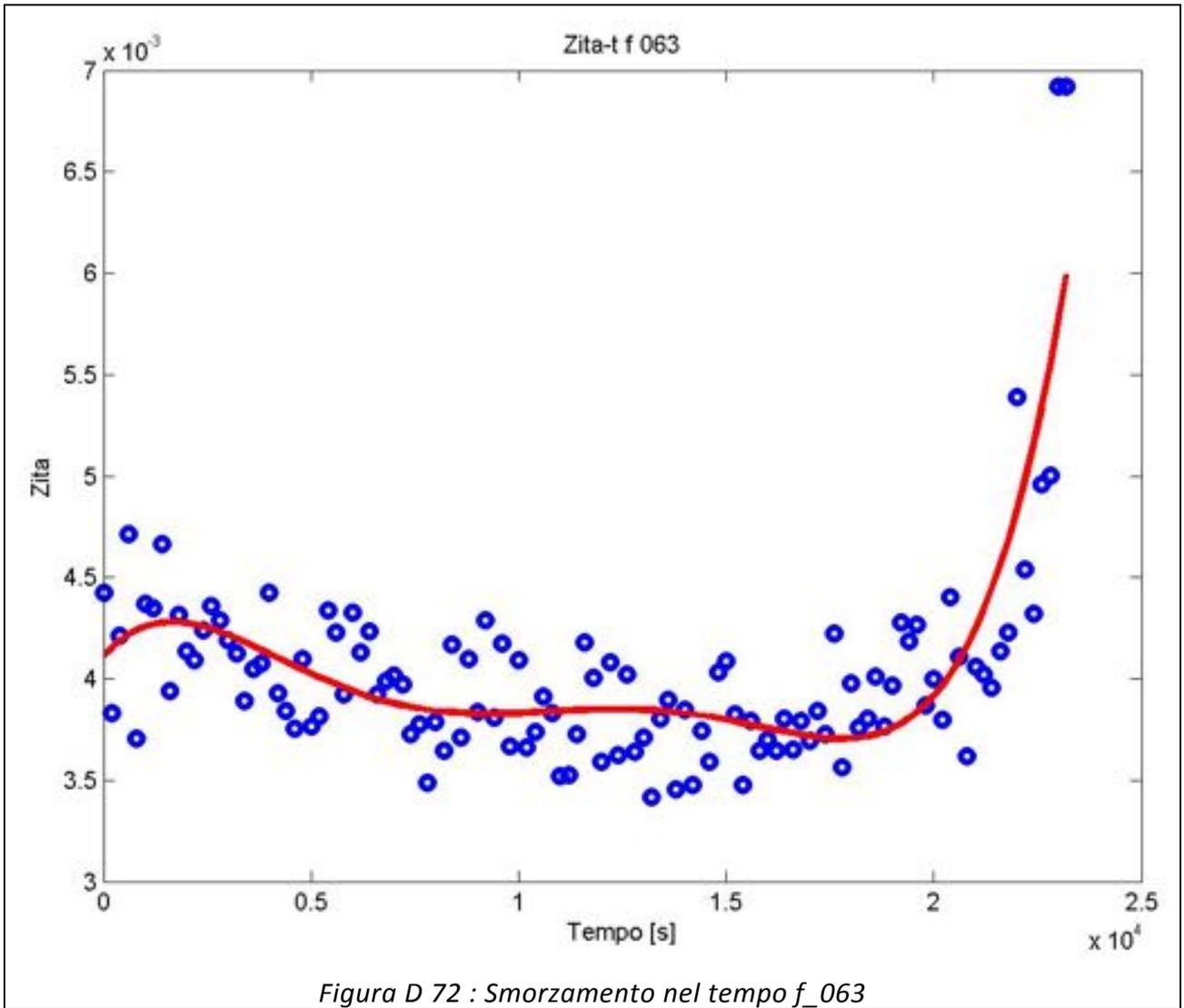


Figura D 72 : Smorzamento nel tempo f_063

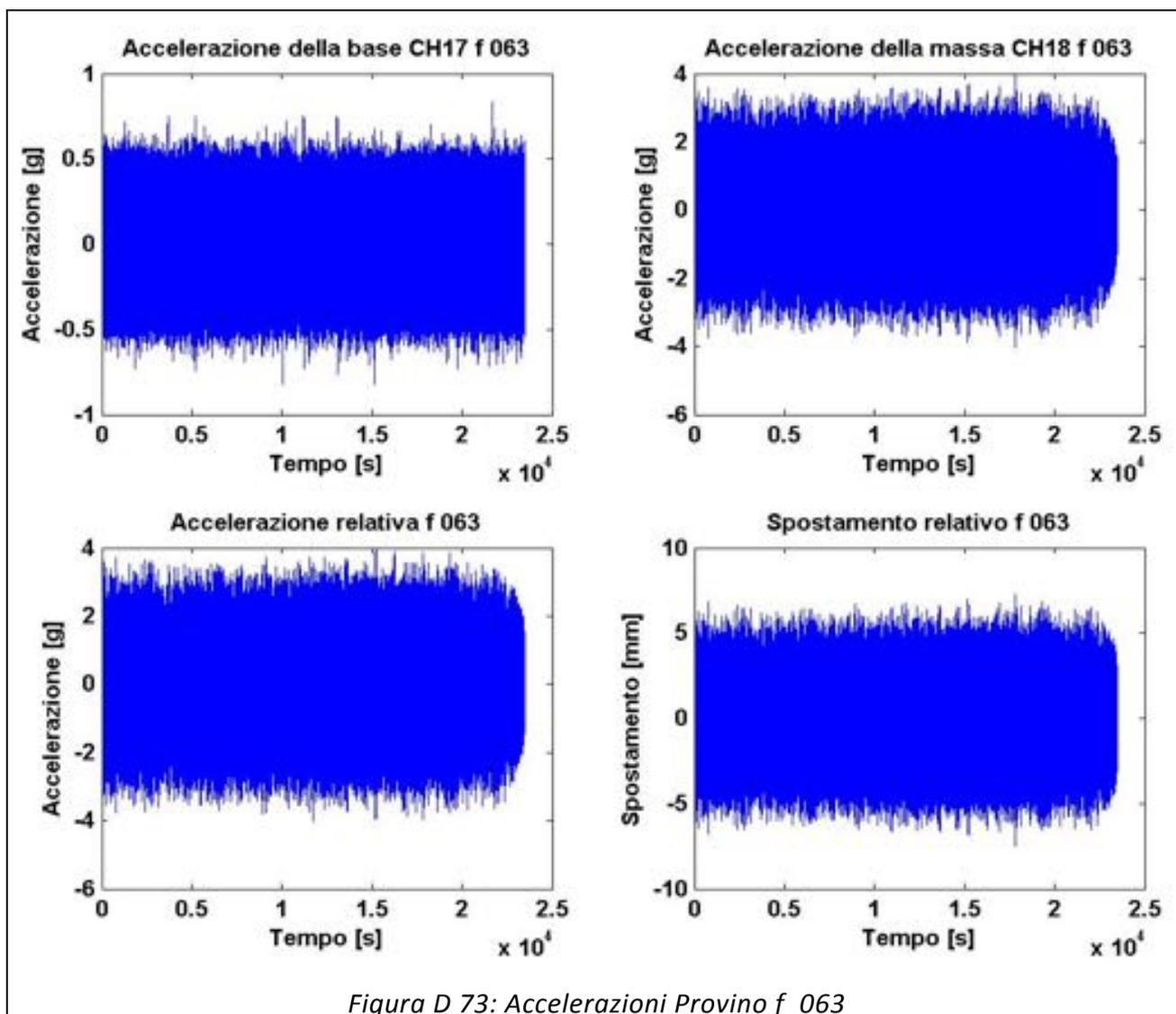
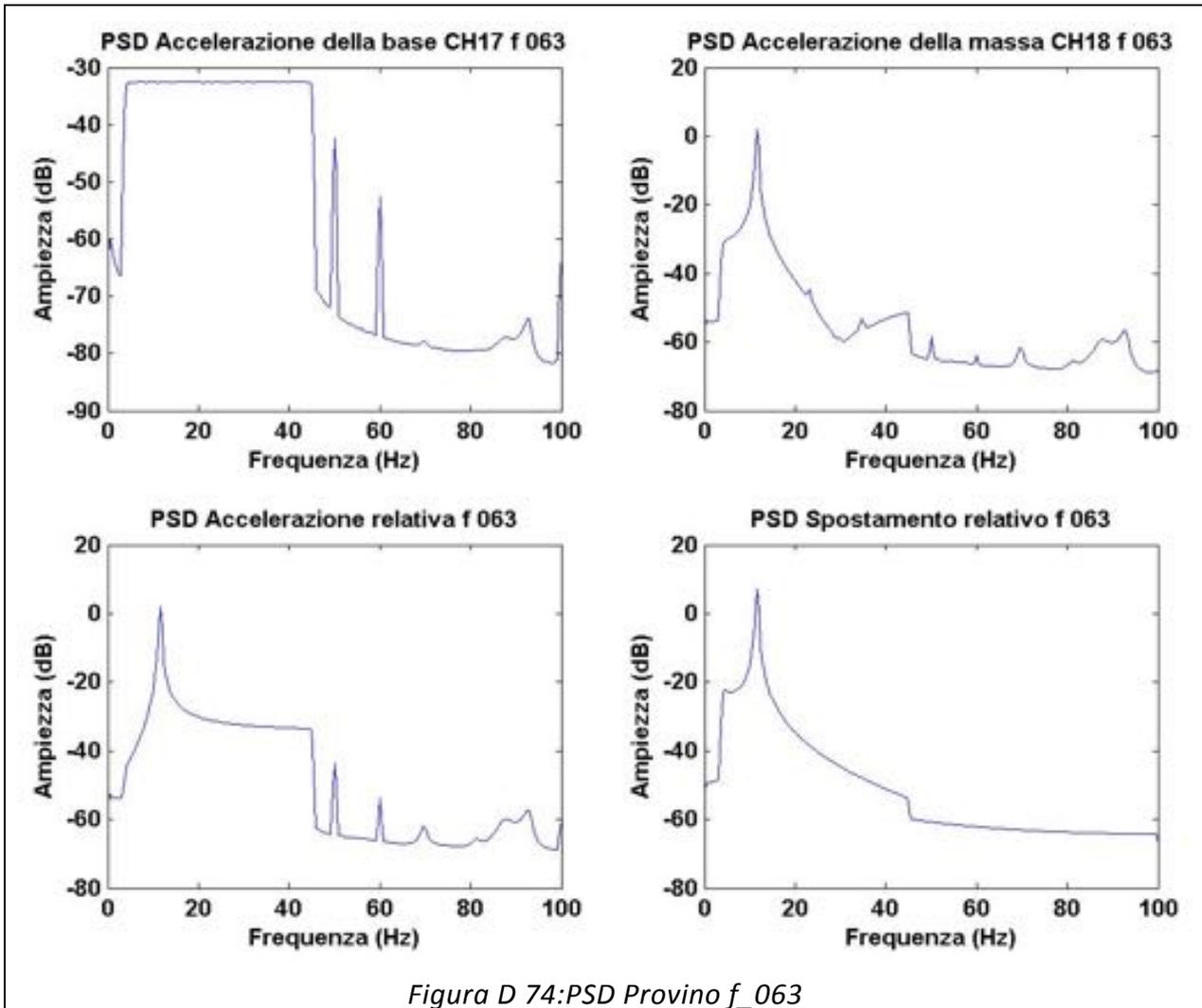


Figura D 73: Accelerazioni Provino f_063



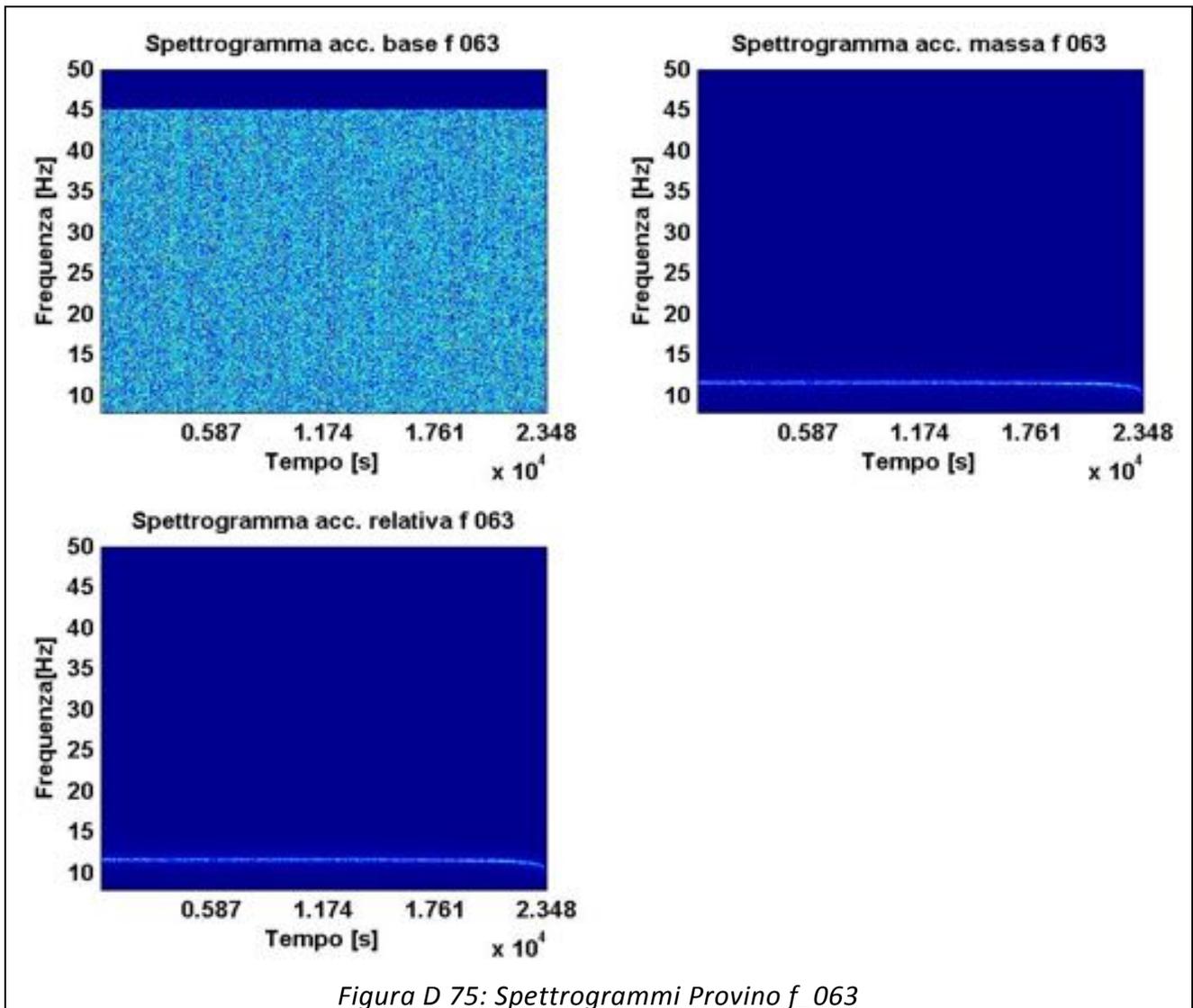


Figura D 75: Spettrogrammi Provino f_063

Tabella riassuntiva:

Si riporta una tabella contenente tutti i dati più significativi per i test svolti, in cui si evidenziano i provini aventi TTF pari al valore mediano della terna (vedi Capito VI).

Provino f:	RMS Input [g]	RMS Acc. Massa [g]	RMS Acc. Relativa [g]	Durata Complessiva della prova [s]	Time to Failure [s]	Frequenza Media [Hz]	N. cicli a rottura	Frequenza naturale iniziale [Hz]	Smorzamento medio
22	0,201	1,130	1,141	9.596	8.654	12,01	103.911	11,67	0,00477
23	0,201	0,981	0,996	8.478	7.667	11,96	91.721	11,48	0,00414
24	0,201	1,345	1,358	12.343	11.494	12,05	138.527	11,73	0,00455
31	0,234	1,390	1,406	6.756	6.224	11,97	74.472	11,60	0,00499
32	0,235	1,227	1,237	5.106	4.862	11,77	57.208	11,44	0,00491
33	0,234	1,314	1,332	6.347	5.537	12,02	66.569	11,58	0,00528
41	0,172	1,118	1,129	17.568	16.082	11,87	190.927	11,56	0,00435
42	0,168	1,048	1,057	18.234	17.104	11,87	202.950	11,58	0,00461
43	0,170	1,070	1,080	13.662	12.635	11,93	150.778	11,64	0,00407
51	0,251	1,295	1,313	4.456	3.790	12,00	45.478	11,58	0,00545
52	0,251	1,325	1,340	5.229	4.318	11,87	51.248	11,45	0,00543
53	0,251	1,322	1,340	4.254	3.871	12,06	46.702	11,59	0,00584
61	0,150	1,002	1,011	30.685	29.425	11,95	351.653	11,62	0,00432
62	0,152	0,989	0,998	24.883	23.688	12,01	284.411	11,69	0,00422
63	0,151	1,032	1,041	23.499	22.232	11,91	264.700	11,61	0,00420

APPENDICE E: Script utilizzati nei test a diversi valori di Kurtosis dell'eccitazione.

Descrizione:

Si riporta lo script utilizzato per l'analisi dei dati relativo al provino "Road" 017 dotato di estensimetro in quanto esso comprende anche tutte le righe di comando utilizzate per gli altri provini. Da esso vengono ricavati:

- Segnali concatenati e filtrati dai picchi elettrici utilizzando un filtro passa banda tra [5,45] Hz
- Spostamenti della base, della massa e lo spostamento relativo
- $f_n(t)$ frequenza naturale nel tempo
- $\zeta(t)$ smorzamento nel tempo
- Media, RMS, Skewness, Kurtosis, Crest Factor, Turning Point e "Average Frequency" dei segnali acquisiti.
- PSD sia in scala logaritmica che lineare
- Spettrogrammi
- Funzione Densità di Probabilità dell'eccitazione e della risposta
- Valori di tensione determinati sia dagli spostamenti relativi, sia attraverso le deformazioni misurate dall'estensimetro e loro confronto.

```
clc
clear all
%% CARICA FILE ROAD DATA
    nflat=(17); %NOME PROVINO
    nrun= (20); %RUN PER OGNI PROVINO
%% OFFSET ESTENSIMETRO
os=[];
os=load('RD_f017_offset');
OFFSET=mean(os.C32_Estensimetro.y_values.values(1:1800));
%% COSTANTI
Fs=200; %FREQUENZA DI CAMPIONAMENTO
numprovini=length(nflat); %NUMERO PROVINI TESTATI
E=64400;
Sy=175;
Sr=240;
larg=10;
spes=2;
ti=200;
% PREALLOCO MEMORIA
fniniziale=zeros(1,length(nflat)); %prealloco un vettore riga
di 15 zero
indiniziocricca=zeros(1,length(nflat)); %prealloco
tempoiniziocricca=zeros(1,length(nflat)); %prealloco
frequenzainiziocricca=zeros(1,length(nflat)); %prealloco
iniziocricca=zeros(1,length(nflat)); %prealloco
CRICCA=zeros(15,7);
%% CALCOLO DELLA DURATA T DELLE PROVE
for k=1:numprovini;
yC17=[];
yC18=[];
```

```

yC22=[];
yC23=[];
yC24=[];
yC32=[];
    for i = 1:nrun(k);
        if i<10
            name=['RD_f0' num2str(nflat) '_Run00' num2str(i)];
            RD(i,1)=load (name, '-mat');
        else
            name=['RD_f0' num2str(nflat) '_Run0' num2str(i)];
            RD(i,1)=load (name, '-mat');
        end
        %% PULIZIA DEI SEGNALI
        % SCOLLEGO IL SENSORE ALLA BASE
Indexmax=find(RD(i,1).C17_Base_acceleration.y_values.values==(max(RD(i,1).C17_Base_acceleration.y_values.values)));
RD(i,1).C18_Mass_acceleration.y_values.values=RD(i,1).C18_Mass_acceleration.y_values.values(1:(Indexmax-3*Fs));
RD(i,1).C17_Base_acceleration.y_values.values=RD(i,1).C17_Base_acceleration.y_values.values(1:(Indexmax-3*Fs));
RD(i,1).C22_Mass_X_transv_acc.y_values.values=RD(i,1).C22_Mass_X_transv_acc.y_values.values(1:(Indexmax-3*Fs));
RD(i,1).C23_Mass_Y_vert_acc.y_values.values=RD(i,1).C23_Mass_Y_vert_acc.y_values.values(1:(Indexmax-3*Fs));
RD(i,1).C24_Mass_Z_long_acc.y_values.values=RD(i,1).C24_Mass_Z_long_acc.y_values.values(1:(Indexmax-3*Fs));
RD(i,1).C32_Estensimetro.y_values.values=RD(i,1).C32_Estensimetro.y_values.values(1:(Indexmax-3*Fs));
        %% TROVA ALTRI PICCHI PRESUBILMENTE ELETTRICI SULLA BASE
        Indexmax2=(find(RD(i,1).C17_Base_acceleration.y_values.values>2));
%picchi maggiori di 2g
auxindexmax=length(Indexmax2);
if auxindexmax~=0;
    for q=1:auxindexmax;
        RD(i,1).C18_Mass_acceleration.y_values.values(Indexmax2(q)-
q)=[];
        RD(i,1).C17_Base_acceleration.y_values.values(Indexmax2(q)-
q)=[];
        RD(i,1).C22_Mass_X_transv_acc.y_values.values(Indexmax2(q)-
q)=[];
        RD(i,1).C23_Mass_Y_vert_acc.y_values.values(Indexmax2(q)-q)=[];
        RD(i,1).C24_Mass_Z_long_acc.y_values.values(Indexmax2(q)-q)=[];
        RD(i,1).C32_Estensimetro.y_values.values(Indexmax2(q)-q)=[];
    end
end
        %% ELIMINO IL Time CHE PASSA TRA FINE DELLA PROVA E SCOLLEGAMENTO
SENSORE
Indexmin1=max(find((RD(i,1).C17_Base_acceleration.y_values.values>0.05)));
%prendi l'indice più grande per il quale acc>0,05
RD(i,1).C18_Mass_acceleration.y_values.values=RD(i,1).C18_Mass_acceleration.y_values.values(1:Indexmin1);
RD(i,1).C17_Base_acceleration.y_values.values=RD(i,1).C17_Base_acceleration.y_values.values(1:Indexmin1);
RD(i,1).C22_Mass_X_transv_acc.y_values.values=RD(i,1).C22_Mass_X_transv_acc.y_values.values(1:Indexmin1);
RD(i,1).C23_Mass_Y_vert_acc.y_values.values=RD(i,1).C23_Mass_Y_vert_acc.y_values.values(1:Indexmin1);

```

```

RD(i,1).C24_Mass_Z_long_acc.y_values.values=RD(i,1).C24_Mass_Z_long_acc.y_values
.values(1:Indexmin1);

RD(i,1).C32_Estensimetro.y_values.values=RD(i,1).C32_Estensimetro.y_values.value
s(1:Indexmin1);
    %% ELIMINO I PRIMI SECONDI FRA L'INIZIO DEL RECORD E LO START SUL TL
    Indexmin2=min(find(RD(i,1).C17_Base_acceleration.y_values.values>0.03
));

RD(i,1).C18_Mass_acceleration.y_values.values=RD(i,1).C18_Mass_acceleration.y_va
lues.values(Indexmin2:end);

RD(i,1).C17_Base_acceleration.y_values.values=RD(i,1).C17_Base_acceleration.y_va
lues.values(Indexmin2:end);

RD(i,1).C22_Mass_X_transv_acc.y_values.values=RD(i,1).C22_Mass_X_transv_acc.y_va
lues.values(Indexmin2:end);

RD(i,1).C23_Mass_Y_vert_acc.y_values.values=RD(i,1).C23_Mass_Y_vert_acc.y_values
.values(Indexmin2:end);%tolgo gli ultimi due secondi necessari a scollegare il
senore

RD(i,1).C24_Mass_Z_long_acc.y_values.values=RD(i,1).C24_Mass_Z_long_acc.y_values
.values(Indexmin2:end);

RD(i,1).C32_Estensimetro.y_values.values=RD(i,1).C32_Estensimetro.y_values.value
s(Indexmin2:end);
    %% CONCATENO IN UN UNICO VETTORE I SEGNALI DEI SENSORI
    auxyC17=RD(i,1).C17_Base_acceleration.y_values.values;
    yC17=[yC17;auxyC17];
    auxyC18=-(RD(i,1).C18_Mass_acceleration.y_values.values);%GIRO IL
SEGNALE YCH18
    yC18=[yC18;auxyC18];
    auxyC22=(RD(i,1).C22_Mass_X_transv_acc.y_values.values);
    yC22=[yC22;auxyC22];
    auxyC23=RD(i,1).C23_Mass_Y_vert_acc.y_values.values;
    yC23=[yC23;auxyC23];
    auxyC24=RD(i,1).C24_Mass_Z_long_acc.y_values.values;
    yC24=[yC24;auxyC24];
    auxyC32=-(RD(i,1).C32_Estensimetro.y_values.values);
    yC32=[yC32;auxyC32];
    %% DURATA T
    durata(k,i)=length(yC18)/Fs;    %Matrice contenente la durata delle
prove ad ogni riga un flat diverso e ad ogni colonna un run diverso
end
%VERIFICA COMPATIBILITA' SEGNALE-CARATTERISTICHE PROVINO
verificaresistenza=find(yC18>3.8);
if ~isempty(yC18>0);
    disp('Il sensore sulla massa misura picchi che porterebbero a
snervamento il materiale per il flat n:');
    nflat(k)
end
%% CH25 CANALE FITTIZIO NEL CASO SI VOGLIA UTILIZZARE IL CANALE 23 CORRETTO
yC25=yC18;
%% CALCOLO FN E ZITA
auxfor=fix(length(yC25)/(ti*Fs)); %in quante parti devo dividere il segnale?
auxxC25=length(yC25);
%% auxxC17=length(yC17);
for p=0:auxfor-1;
    %MATRICE CON SPEZZONI CH18
    YC25(:,p+1)=yC25(1+p*ti*Fs:(p+1)*ti*Fs);

```

```

        %MATRICE CON SPEZZONI CH17
        YC17(:,p+1)=yC17(1+p*ti*Fs:(p+1)*ti*Fs);
    end
    %%
    L=length(YC25(:,1)); %lunghezza dei vettori colonna contenuti nella matrice
FFt
    NFFT=2^nextpow2(L);
    for p=0:auxfor-1;
        [FRFm(:,p+1),Fm]=tfestimate(YC17(:,p+1),YC25(:,p+1),[],[],NFFT,(Fs));
    %Ho il valore della frf a FM frequenza di default ho un overlap del 50%
        %MODULO FRF
        FRFma(:,p+1)=abs(FRFm(:,p+1));
        %% CALCOLO DELLA Fn
        LF=find((abs((Fm(:)-5)))==(min(abs((Fm(:)-5)))));
    %indice che rimanda ad una frequenza di quasi 5Hz
        HF=find((abs((Fm(:)-45)))==(min(abs((Fm(:)-45)))));
    %indice che rimanda ad una frequenza di quasi 45Hz
        auxfn(p+1)=find(FRFma((LF:HF),p+1)==max(FRFma((LF:HF),p+1))+LF;
    %Vettore con gli indici che rimandano al massimo delle frf
        fn(p+1,1)=Fm(auxfn(p+1));
    %DELTA FN
        tempo(p+1,1)=ti*p+ti/2;
    %ASCISSA FN SEC
        %% FATTORE DI SMORZAMENTO
        auxzita(p+1)=(FRFma(auxfn(p+1),p+1))/sqrt(26);        %valore ausiliario
    necesario per l'utilizzo della banda di mezza potenza
        % CALCOLO R1 R2 PER CALCOLO ZITA
        xv=[5,45];
        yv1=[auxzita(p+1),auxzita(p+1)];
        [xint1,yint1]=polyxpoly(xv,yv1,Fm(LF:HF),FRFma((LF:HF),(p+1))); %trovo i
    punti di intersezione
        if length(xint1)==1
            disp('c'è un errore nello script');
        elseif length(xint1)==2
            %Se la
    lunghezza e due non ci sono tanti problemi
            f1(p+1)=xint1(1);
            f2(p+1)=xint1(2);
        else
            %Se invece
    si han più di 2 intersezioni??
            auxf1=find((xint1(:)-fn(p+1))==min((xint1(:)-fn(p+1)))); %indice
    col valore più vicino alla frequenza naturale
            if xint1(auxf1)<fn(p+1)
                f1(p+1)=xint1(auxf1);        %Se il valore più vicino alla fn è
    minore di fn allora è f1 e di conseguenza trovo f2 aggiungendo un indice
                f2(p+1)=xint1(auxf1+1);
            else
                f2(p+1)=xint1(auxf1);
                f1(p+1)=xint1(auxf1-1);
            end
        end
    end
        zita(p+1,1)=(((f2(p+1))^2)-((f1(p+1))^2))/((20*(fn(p+1))^2));

    end

    %% CALCOLO FN PER LA QUALE HO L'INIZIO DELLA CRICCA
    auxpeRD=(1-0.03);
    gradon=9;
    fninterp=polyfit(tempo,fn,gradon);
    tempofitt=[1:(length(yC18)/Fs)];
    fnf=polyval(fninterp,tempofitt);
    fniniziale(k)=mean(fnf(1:10));
    indiniziocricca(k)= find((abs((fnf(:)-
    (fniniziale(k)*auxpeRD))))==min(abs((fnf(:)-(fniniziale(k)*auxpeRD)))));

```

```

tempoiniziocricca(k)=tempofitt(indiniziocricca(k));
frequenzainiziocricca(k)=fnf(indiniziocricca(k));
%% VARIABILE CONTENENTE FN
FN=fn(:);
%% VARIABILE CONTENENTE ZITA
ZITA=zita(:);
%% VETTORI NE FILTRATI NE ACCORCIATI
yC17=yC17;
yC18=yC18;
yC22=yC22;
yC23=yC23;
yC24=yC24;
yC18_17=yC18-yC17;
%% VETTORI FILTRATI NON ACCORCIATI
yC17f=bpfilter(yC17,0.05,0.45);
yC18f=bpfilter(yC18,0.05,0.45);
yC22f=bpfilter(yC22,0.05,0.45);
yC23f=bpfilter(yC23,0.05,0.45);
yC24f=bpfilter(yC24,0.05,0.45);
yC18_17f=bpfilter(yC18_17,0.05,0.45);
%% vettori cambiati di varibile
yC17cv=yC17*9.806; %passaggio da g a m/s^2
yC18cv=yC18*9.806;
%% SPOST RELATIVO (FILTRATO) non accorciato
VELOCITACH17na=bpfilter((cumtrapz(yC17cv)/Fs),0.05,0.45);
VELOCITACH18na=bpfilter((cumtrapz(yC18cv)/Fs),0.05,0.45);
SPOSTAMENTICH17na=bpfilter((cumtrapz(VELOCITACH17na)/Fs),0.05,0.45);
SPOSTAMENTICH18na=bpfilter((cumtrapz(VELOCITACH18na)/Fs),0.05,0.45);
SPOSTRELCH17_CH18na=((SPOSTAMENTICH18na)-(SPOSTAMENTICH17na)); %[m]
%% VETTORI FILTRATI E ACCORCIATI
yC17af=yC17f(1:indiniziocricca*200);
yC18af=yC18f(1:indiniziocricca*200);
yC22af=yC22f(1:indiniziocricca*200);
yC23af=yC23f(1:indiniziocricca*200);
yC24af=yC24f(1:indiniziocricca*200);
yC18_17af=yC18_17f(1:indiniziocricca*200);
SPOSTRELCH17_CH18af=SPOSTRELCH17_CH18na(1:indiniziocricca*200);
%% Tensioni a partire dagli spostamenti relativi
TENSIONECH18=((SPOSTRELCH17_CH18na/((62+21-
7.5)^3)*(3*E*larg*(spes^3)/12))*(62+21-7.5))*6/(larg*spes^2)*1000;
TENSIONECH17_CH18=((SPOSTRELCH17_CH18na/((62+21-
7.5)^3)*(3*E*larg*(spes^3)/12))*(62+21-7.5))*6/(larg*spes^2)*1000;
%%MEDIA
MEDIA(k,1)=mean(yC17);
MEDIA(k,2)=mean(yC18);
MEDIA(k,3)=mean(yC22);
MEDIA(k,4)=mean(yC23);
MEDIA(k,5)=mean(yC24);
MEDIA(k,6)=mean(yC18_17af);
MEDIA(k,7)=mean(SPOSTRELCH17_CH18af);
%% MATRICE RMS
RMS(k,1)=rms(yC17);
RMS(k,2)=rms(yC18);
RMS(k,3)=rms(yC22);
RMS(k,4)=rms(yC23);
RMS(k,5)=rms(yC24);
RMS(k,6)=rms(yC18_17af);
RMS(k,7)=rms(SPOSTRELCH17_CH18af);
%% KURTOSIS
KURTOSIS(k,1)=kurtosis(yC17);
KURTOSIS(k,2)=kurtosis(yC18);
KURTOSIS(k,3)=kurtosis(yC22);

```

```

KURTOSIS(k,4)=kurtosis(yC23);
KURTOSIS(k,5)=kurtosis(yC24);
KURTOSIS(k,6)=kurtosis(yC18_17af);
KURTOSIS(k,7)=kurtosis(SPOSTRELCH17_CH18af);
%%SKEWNESS indice di asimmetria
SKEWNESS(k,1)=skewness(yC17);
SKEWNESS(k,2)=skewness(yC18);
SKEWNESS(k,3)=skewness(yC22);
SKEWNESS(k,4)=skewness(yC23);
SKEWNESS(k,5)=skewness(yC24);
SKEWNESS(k,6)=skewness(yC18_17af);
SKEWNESS(k,7)=skewness(SPOSTRELCH17_CH18af);
%%FREQUENZE MEDIE
[xf,ypwel,xpwel,avfrC17af]=averagefr(yC17af,0.05,0.45,200);
[xf,ypwel,xpwel,avfrC18af]=averagefr(yC18af,0.05,0.45,200);
[xf,ypwel,xpwel,avfrC22af]=averagefr(yC22af,0.05,0.45,200);
[xf,ypwel,xpwel,avfrC23af]=averagefr(yC23af,0.05,0.45,200);
[xf,ypwel,xpwel,avfrC24af]=averagefr(yC24af,0.05,0.45,200);
[xf,ypwel,xpwel,avfryC18_17af]=averagefr(yC18_17af,0.05,0.45,200);

[xf,ypwel,xpwel,avfrSPOSTRELCH17_CH18af]=averagefr(SPOSTRELCH17_CH18af,0.05,0.45,200);
AVFR(k,1)=avfrC17af;
AVFR(k,2)=avfrC18af;
AVFR(k,3)=avfrC22af;
AVFR(k,4)=avfrC23af;
AVFR(k,5)=avfrC24af;
AVFR(k,6)=avfryC18_17af;
AVFR(k,7)=avfrSPOSTRELCH17_CH18af;
%%CREST FACTOR
CRFT(k,1)=max(yC17af)/RMS(k,1);
CRFT(k,2)=max(yC18af)/RMS(k,1);
CRFT(k,3)=max(yC22af)/RMS(k,1);
CRFT(k,4)=max(yC23af)/RMS(k,1);
CRFT(k,5)=max(yC24af)/RMS(k,1);
CRFT(k,6)=max(yC18_17af)/RMS(k,1);
CRFT(k,7)=max(SPOSTRELCH17_CH18af)/RMS(k,1);
end
%% CRICCA
CRICCA(k,1)=tempoiniziocricca(k);
CRICCA(k,2)=frequenzainiziocricca(k);
CRICCA(k,3)=mean(zita(5:end-10)); %Zitai
CRICCA(k,4)=mean(fn(1:10)); %Fni
CRICCA(k,5)=CRICCA(k,1)*AVFR(k,6);
%% Turning point su un intervallo di 22 minuti
[TPe]=tp(yC17af(1:22*Fs*60),1,Fs);
[TPr]=tp(yC18af(1:22*Fs*60),1,Fs);
h10=figure;
stem(TPe,'k','linewidth',0.5)
xlabel('Time [s]','FontSize',10,'FontWeight','bold')
ylabel('n. Turning Points','FontSize',10,'FontWeight','bold')
title(['Turning Points Base Acceleration 22 min RD 0' num2str(nflat)],'FontSize',10,'FontWeight','bold')
hold on
saveas(h10,['Turning Points Base Acceleration RD 0' num2str(nflat) '.jpeg'])
h11=figure;
stem(TPr,'k','linewidth',0.5)
xlabel('Time [s]','FontSize',10,'FontWeight','bold')
ylabel('n. Turning Points','FontSize',10,'FontWeight','bold')
title(['Turning Points Mass Acceleration 22 min RD 0' num2str(nflat)],'FontSize',10,'FontWeight','bold')
hold on

```

```

saveas(h11,['Turning Points Mass Acceleration RD 0' num2str(nflat) '.jpeg'])
%% Distribuzione di probabilità
h12=figure;
[fb,xib]=ksdensity(yC17af/max(abs(yC17af)),min(yC17af)/max(abs(yC17af)):1/200:ma
x(yC17af)/max(abs(yC17af)),'function','pdf','npoints',800);
[fr,xir]=ksdensity(yC18af/max(abs(yC18af)),min(yC18af)/max(abs(yC18af)):1/200:ma
x(yC18af)/max(abs(yC18af)),'function','pdf','npoints',800);
plot(xib,fb,'k',xir,fr,'r','linewidth',2)
legend('PDF Base Acceleration','PDF Mass Acceleration')
xlabel('Acceleration/Acceleration_{max}','FontSize',10,'FontWeight','bold')
ylabel('PDF','FontSize',10,'FontWeight','bold')
title(['Probability density funcion Base&Mass acceleration of RD 0'
num2str(nflat)],'FontSize',10,'FontWeight','bold')
saveas(h12,['Confronto PDF RD 0' num2str(nflat) '.jpeg'])
%%Salvo il n.ttp
CRICCA(k,6)=sum(TPe);
CRICCA(k,7)=sum(TPr);
%% SALVO I DATI UTILI ALL'APPENDICE
save(['PARAMETRI STATISTICI RD_flat0'
num2str(nflat)],'MEDIA','RMS','SKEWNESS','KURTOSIS','CRICCA','SPOSTRELCH17_CH18a
f','ZITA','FN','AVFR','CRFT')
%% ESTENSIMETRO
% ELIMINO IL SEGNALE ACQUISITO CON L'ESTENSIMETRO ROTTO
yC32=yC32(1:(min(find(abs(yC32)>10))))*1000/2;
%DETREND
yC32d=detrend(yC32);
%% DALLE DEFORMAZIONI RICA VO LE TENSIONI CARICO IL FILE CONTENENTE I RISULTATI E
LA GEOMETRIA DELLA SEZIONE
D=load('Tronco_Prov_1.txt');
D(1,1)=0;
D(1,2)=0;
p=polyfit(D(1:22,2),D(1:22,1),1);
Efit=p(1,1)*10^6;
auxtraz=find(D(:,1)-175==min(abs((D(:,1)-175))));
eD2=1:fix(175/Efit*10^6);
sD2=(eD2./(10^6)).*Efit;
eD2=[eD2';D(auxtraz+1:150,2)];
sD2=[sD2';D(auxtraz+1:150,1)];
D2(:,1)=sD2;
D2(:,2)=eD2;
%% DETERMINO LE TENSIONI MANTENENDO L'OFFSET E IL TOGLIENDO TREND NEGATIVO
for c=1:length(yC32d);
    auxc(c)=find(abs(D2(:,2)-abs(yC32d(c)))==min(abs(D2(:,2)-abs(yC32d(c)))));
    if yC32d(c)>=0
        tC32d(c,1)=D2(auxc(c),1);
    else
        tC32d(c,1)=-D2(auxc(c),1);
    end
end
end
pl=menu('Vuoi plottare i risultati?','Si','No');
if pl==1;
    %% Acc Base
    h1=figure;
    auxxC17=length(yC17);
    tempo2=(0:1/Fs:((auxxC17-1)/Fs));
    subplot(2,2,1)
    plot(tempo2,yC17)
    title(['Base Acceleration CH17 RD 0'
num2str(nflat)],'FontSize',10,'FontWeight','bold')
    xlabel('Time [s]','FontSize',10,'FontWeight','bold');
    ylabel('Acceleration [g]','FontSize',10,'FontWeight','bold');
    set(gca,'FontSize',10,'FontWeight','bold')

```

```

hold on
%% ACC Massa
subplot(2,2,2)
plot(tempo2,yC18)
title(['Mass acceleration CH18 RD 0'
num2str(nflat)], 'FontSize',10, 'FontWeight', 'bold')
xlabel ('Time [s]', 'FontSize',10, 'FontWeight', 'bold');
ylabel ('Acceleration [g]', 'FontSize',10, 'FontWeight', 'bold');
set(gca, 'FontSize',10, 'FontWeight', 'bold')
hold on
%% ACC Relativa
subplot(2,2,3)
plot(tempo2,yC18_17)
title(['Relative Acceleration RD 0'
num2str(nflat)], 'FontSize',10, 'FontWeight', 'bold')
xlabel ('Time [s]', 'FontSize',10, 'FontWeight', 'bold');
ylabel ('Acceleration [g]', 'FontSize',10, 'FontWeight', 'bold');
set(gca, 'FontSize',10, 'FontWeight', 'bold')
hold on
%% Plot spost relativo
subplot(2,2,4)
auxxsprel=length(SPOSTRELCH17_CH18na);
temposprel=(0:1/Fs:(auxxsprel-1)/Fs);
plot(temposprel,SPOSTRELCH17_CH18na.*1000);
title(['Relative Displacement RD 0'
num2str(nflat)], 'FontSize',10, 'FontWeight', 'bold')
xlabel ('Time [s]', 'FontSize',10, 'FontWeight', 'bold');
ylabel ('Relative Displacement [mm]', 'FontSize',10, 'FontWeight', 'bold');
set(gca, 'FontSize',10, 'FontWeight', 'bold')
saveas(h1,['Accelerazioni RD 0' num2str(nflat) '.jpg'])
hold on
%% Plot fn
h2=figure;
plot(tempo,fn,'o','Linewidth',3);
title(['Fn-t RD 0' num2str(nflat)]);
xlabel('Time [s]')
ylabel('Fn [Hz]')
saveas(h2,['Fn-t RD 0' num2str(nflat) '.jpg'])
hold on
%% Plot zita
zitainterp=polyfit(tempo,zita,5);
zitaf=polyval(zitainterp,tempo);
zitam=mean(zita);
h3=figure;
plot(tempo,zita,'o',tempo,zitaf,'r','Linewidth',3);
title(['Zita-t RD 0' num2str(nflat)]);
xlabel('Time [s]')
ylabel('Zita')
saveas(h3,['Zita-t RD 0' num2str(nflat) '.jpg'])
hold on
%% PSD base
h4=figure;
[pxx,f] = pwelch(yC17*9.806,500,300,512,Fs);
subplot(2,2,1)
plot(f,10*log10(pxx));
title(['PSD Base Acceleration CH17 RD 0'
num2str(nflat)], 'FontSize',10, 'FontWeight', 'bold')
xlabel('Frequency (Hz)', 'FontSize',10, 'FontWeight', 'bold')
ylabel('Amplitude [dB-Ref. 1 m/s^2]', 'FontSize',10, 'FontWeight', 'bold')
set(gca, 'FontSize',10, 'FontWeight', 'bold')
hold on
%% PSD massa

```

```

[pxx,f] = pwelch(yC18*9.806,500,300,512,Fs);
%calcolo della psd con una finestra di Hanning pari a 500 campioni di
%cui 300 vengono sovrapposti e il calcolo della fft avviene con una
%nfft di 512.
subplot(2,2,2);
plot(f,10*log10(pxx))
title(['PSD Mass Acceleration CH18 RD 0'
num2str(nflat)], 'FontSize',10,'FontWeight','bold')
xlabel('Frequency (Hz)', 'FontSize',10,'FontWeight','bold')
ylabel('Amplitude [dB-Ref. 1 m/s^2]', 'FontSize',10,'FontWeight','bold')
set(gca, 'FontSize',10, 'FontWeight', 'bold')
hold on
%% PSD acc relativa
[pxx,f] = pwelch(yC18_17*9.806,500,300,512,Fs);
%calcolo della psd con una finestra di Hanning pari a 500 campioni di
%cui 300 vengono sovrapposti e il calcolo della fft avviene con una
%nfft di 512.
subplot(2,2,[3,4]);
plot(f,10*log10(pxx))
title(['PSD Relative Acceleration RD 0'
num2str(nflat)], 'FontSize',10,'FontWeight','bold')
xlabel('Frequency (Hz)', 'FontSize',10,'FontWeight','bold')
ylabel('Amplitude [dB-Ref. 1 m/s^2]', 'FontSize',10,'FontWeight','bold')
set(gca, 'FontSize',10, 'FontWeight', 'bold')
hold on
saveas(h4,['PSD dB RD 0' num2str(nflat) '.jpg'])
%% PSD base
h5=figure;
[pxx,f] = pwelch(yC17*9.806,500,300,512,Fs);
subplot(2,2,1)
plot(f,pxx);
title(['PSD Base Acceleration CH17 RD 0'
num2str(nflat)], 'FontSize',10,'FontWeight','bold')
xlabel('Frequency (Hz)', 'FontSize',10,'FontWeight','bold')
ylabel('Amplitude [m/s^2]', 'FontSize',10,'FontWeight','bold')
set(gca, 'FontSize',10, 'FontWeight', 'bold')
hold on
%% PSD massa
[pxx,f] = pwelch(yC18*9.806,500,300,512,Fs);
%calcolo della psd con una finestra di Hanning pari a 500 campioni di
%cui 300 vengono sovrapposti e il calcolo della fft avviene con una
%nfft di 512.
subplot(2,2,2);
plot(f,pxx)
title(['PSD Mass Acceleration CH18 RD 0'
num2str(nflat)], 'FontSize',10,'FontWeight','bold')
xlabel('Frequency (Hz)', 'FontSize',10,'FontWeight','bold')
ylabel('Amplitude [m/s^2]', 'FontSize',10,'FontWeight','bold')
set(gca, 'FontSize',10, 'FontWeight', 'bold')
hold on
%% PSD acc relativa
[pxx,f] = pwelch(yC18_17*9.806,500,300,512,Fs);
%calcolo della psd con una finestra di Hanning pari a 500 campioni di
%cui 300 vengono sovrapposti e il calcolo della fft avviene con una
%nfft di 512.
subplot(2,2,[3,4]);
plot(f,pxx)
title(['PSD Relative Acceleration RD 0'
num2str(nflat)], 'FontSize',10,'FontWeight','bold')
xlabel('Frequency (Hz)', 'FontSize',10,'FontWeight','bold')
ylabel('Amplitude [m/s^2]', 'FontSize',10,'FontWeight','bold')
set(gca, 'FontSize',10, 'FontWeight', 'bold')

```

```

hold on
saveas(h5,['PSD RD 0' num2str(nflat) '.jpg'])
%% SPETTROGRAMMA CH17
h6=figure;
NN=3200;
[S3,freq2,tim2] = spectrogram(yC17*9.806,NN,0,NN,Fs);
pcolor(tim2,freq2,abs(S3))
box on
colormap(jet)
shading interp
ylabel('Frequency [Hz]','FontSize',10,'FontWeight','bold')
xlabel('Time [s]','FontSize',10,'FontWeight','bold');
title(['Base Spectrogram RD 0'
num2str(nflat)],'FontSize',10,'FontWeight','bold')
ylim([8 50])
set(gca,'XTick',0:6000:tim2(end),'YTick',10:5:50,'FontSize',10,'FontWeight','bold')
mSI1p5yab=max(max(abs(S3)));
caxis([0 mSI1p5yab*1])
hold on
saveas(h6,['SPECTROGRAM BASE ACCELERATION RD 0' num2str(nflat(pl)) '.jpg'])
%% SPETTROGRAMMA CH18
h7=figure;
NN=3200;
[S3,freq2,tim2] = spectrogram(yC18,NN,0,NN,Fs);
pcolor(tim2,freq2,abs(S3))
box on
colormap(jet)
shading interp
ylabel('Frequency [Hz]','FontSize',10,'FontWeight','bold')
xlabel('Time [s]','FontSize',10,'FontWeight','bold');
title(['Mass Spectrogram RD 0'
num2str(nflat)],'FontSize',10,'FontWeight','bold')
ylim([8 50])
set(gca,'XTick',0:6000:tim2(end),'YTick',10:5:50,'FontSize',10,'FontWeight','bold')
mSI1p5yab=max(max(abs(S3)));
caxis([0 mSI1p5yab*1])
hold on
saveas(h7,['SPECTROGRAM MASS ACCELERATION RD 0' num2str(nflat(pl)) '.jpg'])
%% SPETTROGRAMMA ACC RELATIVA
h8=figure;
NN=3200;
[S3,freq2,tim2] = spectrogram(yC18_17,NN,0,NN,Fs);
pcolor(tim2,freq2,abs(S3))
box on
colormap(jet)
shading interp
ylabel('Frequency[Hz]','FontSize',10,'FontWeight','bold');
xlabel('Time [s]','FontSize',10,'FontWeight','bold');
title(['Relative Acc. Spectrogram RD 0'
num2str(nflat(pl))],'FontSize',10,'FontWeight','bold')
ylim([8 50])
set(gca,'XTick',0:6000:tim2(end),'YTick',10:5:50,'FontSize',10,'FontWeight','bold')
mSI1p5yab=max(max(abs(S3)));
caxis([0 mSI1p5yab*1])
hold on
saveas(h8,['SPECTROGRAM RELATIVE ACCELERATION RD 0' num2str(nflat(pl))
'.jpg'])
%% SEGNALE ESTENSIMETRO CON TREND
h9=figure;

```

```

plot(yC32,'k');
title('Strain gauge with negative trend','FontSize',10,'FontWeight','bold');
xlabel('N_{samples}','FontSize',10,'FontWeight','bold');
ylabel('ueps','FontSize',10,'FontWeight','bold');
set(gca,'FontSize',10,'FontWeight','bold')
hold on
saveas(h9,['Deformazioni estensimetro con trend RD 0' num2str(nflat(pl))
'.jpg'])

%% SEGNALE ESTENSIMETRO SENZA TREND
h10=figure;
plot(yC32d,'k');
title('Strain gauge without negative
trend','FontSize',10,'FontWeight','bold');
xlabel('N_{samples}','FontSize',10,'FontWeight','bold');
ylabel('ueps','FontSize',10,'FontWeight','bold');
set(gca,'FontSize',10,'FontWeight','bold')
hold on
saveas(h10,['Deformazioni estensimetro senza trend RD 0' num2str(nflat(pl))
'.jpg'])

%% TENSIONI DA ESTENSIMETRO CON OFFSET SENZA TREND NEGATIVO
h11=figure;
plot(tC32d,'k');
title('Strength from gauge without negative
trend','FontSize',10,'FontWeight','bold');
xlabel('N_{samples}','FontSize',10,'FontWeight','bold');
ylabel('Strength [MPa]','FontSize',10,'FontWeight','bold');
set(gca,'FontSize',10,'FontWeight','bold')
hold on
saveas(h11,['Tensioni estensimetro senza trend RD 0' num2str(nflat(pl))
'.jpg'])

%% TENSIONI OTTENUTE A PARTIRE DALLO SPOSTAMENTO
T=tensioni(SPOSTRELCH17_CH18af*1000,'Tronco_Prov_1.txt',2,75.5,175);
h12=figure;
plot(T,'r');
title('Strength from relative
displacement','FontSize',10,'FontWeight','bold');
xlabel('N_{samples}','FontSize',10,'FontWeight','bold');
ylabel('Strength [MPa]','FontSize',10,'FontWeight','bold');
set(gca,'FontSize',10,'FontWeight','bold')
hold on
saveas(h12,['Tensioni da spost relativo RD 0' num2str(nflat(pl)) '.jpg'])
%% CONFRONTO DEI DUE METODI
h13=figure;
plot(T(1:length(tC32d)), 'k')
hold on
plot(tC32d,'r');
legend('Strength from relative displacement','Strength from gauge without
negative trend')
title('Comparison','FontSize',10,'FontWeight','bold');
xlabel('N_{samples}','FontSize',10,'FontWeight','bold');
ylabel('Strength [MPa]','FontSize',10,'FontWeight','bold');
set(gca,'FontSize',10,'FontWeight','bold')
hold on
saveas(h13,['Confronto tensioni RD 0' num2str(nflat(pl)) '.jpg'])
end

```

Funzione per la determinazione dei “Turning Point”

Descrizione

L’algoritmo presentato determina per intervalli generici di tempo T il numero di picchi (massimi e minimi locali) presenti nel vettore y $>+3\sigma$. Valido per versioni di Matlab pari alla 2013b o più recenti.

```
function [ttp]=tp(y,T,Fs);
    % y=vettore
    % T=intervallo di tempo per il calcolo dei turning points
    % Fs=freq di campionamento del segnale
    y=abs(y);
    ttp=zeros(round(length(y)/(200*T)),1);
    s=std(y);
    for i=1:(length(y)/(200*T))-1
        yt=[];
        yt=y(1+i*T*Fs:(i+1)*T*Fs);
        auxttp=findpeaks(yt,'MINPEAKHEIGHT',3*s);
        ttp(i,1)=length(auxttp);
    end
```

APPENDICE F: Report dei dati ricavati dai provini sollecitati con diversi valori di Kurtosis

Provino RD_f012

	Media [g]	RMS [g]	Skewness	Kurtosis	Crest Factor	Frequenza media [Hz]
Accelerazione Base CH17	7,15E-09	0,058	-1,03E-01	6,597	14,428	11,33
Accelerazione Massa CH18	-4,06E-08	0,848	-2,89E-02	3,660	69,474	11,33
Accelerazione Trasversale CH22	3,03E-09	0,020	-6,32E-03	4,275	3,079	33,98
Accelerazione Verticale CH23	-4,68E-08	0,809	6,94E-02	3,586	68,737	11,33
Accelerazione Longitudinale CH24	-4,07E-08	0,635	-6,24E-02	3,583	47,336	11,33
Accelerazione relativa CH17-CH18	-4,77E-08	0,849	-3,05E-02	3,654	68,800	11,33

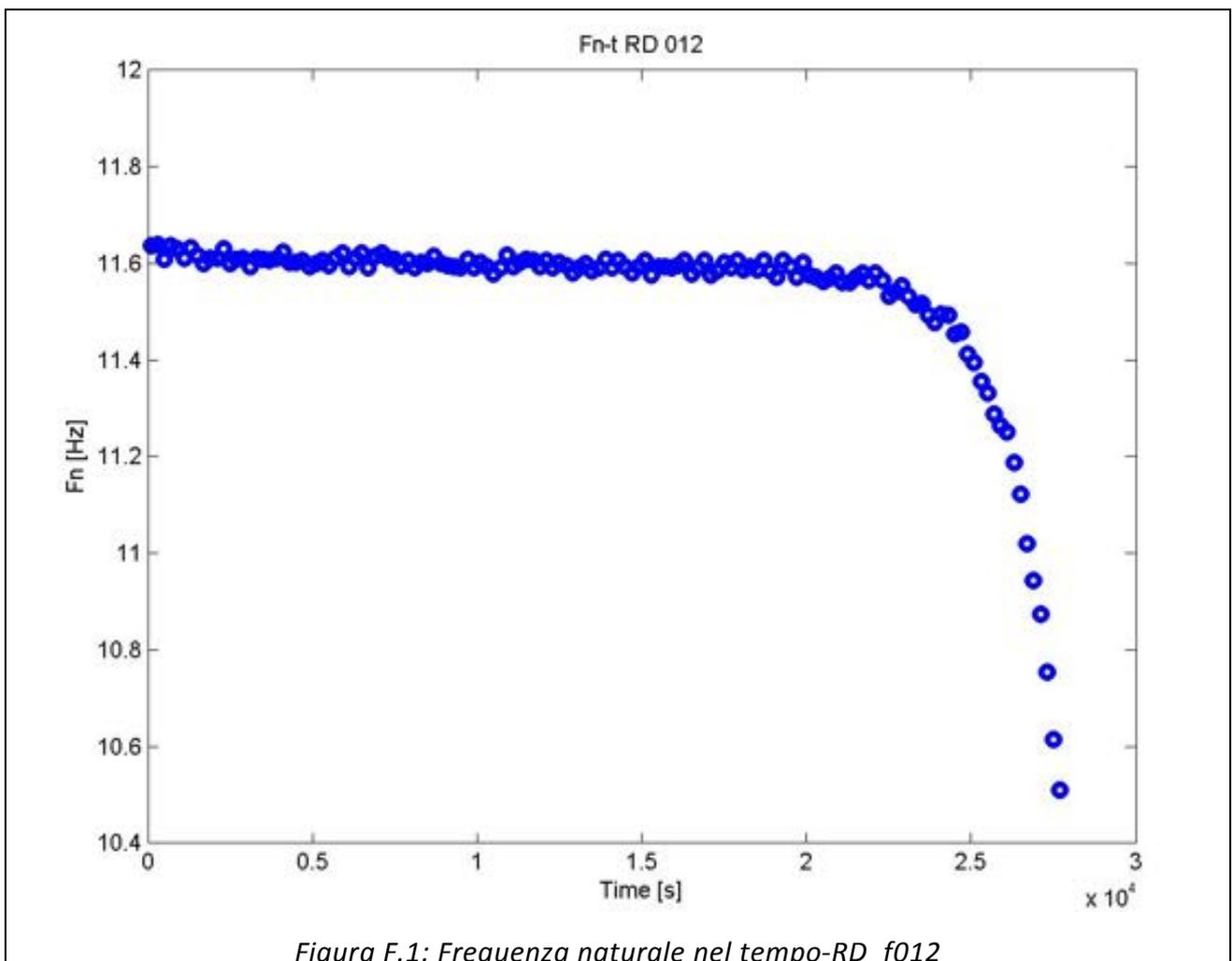
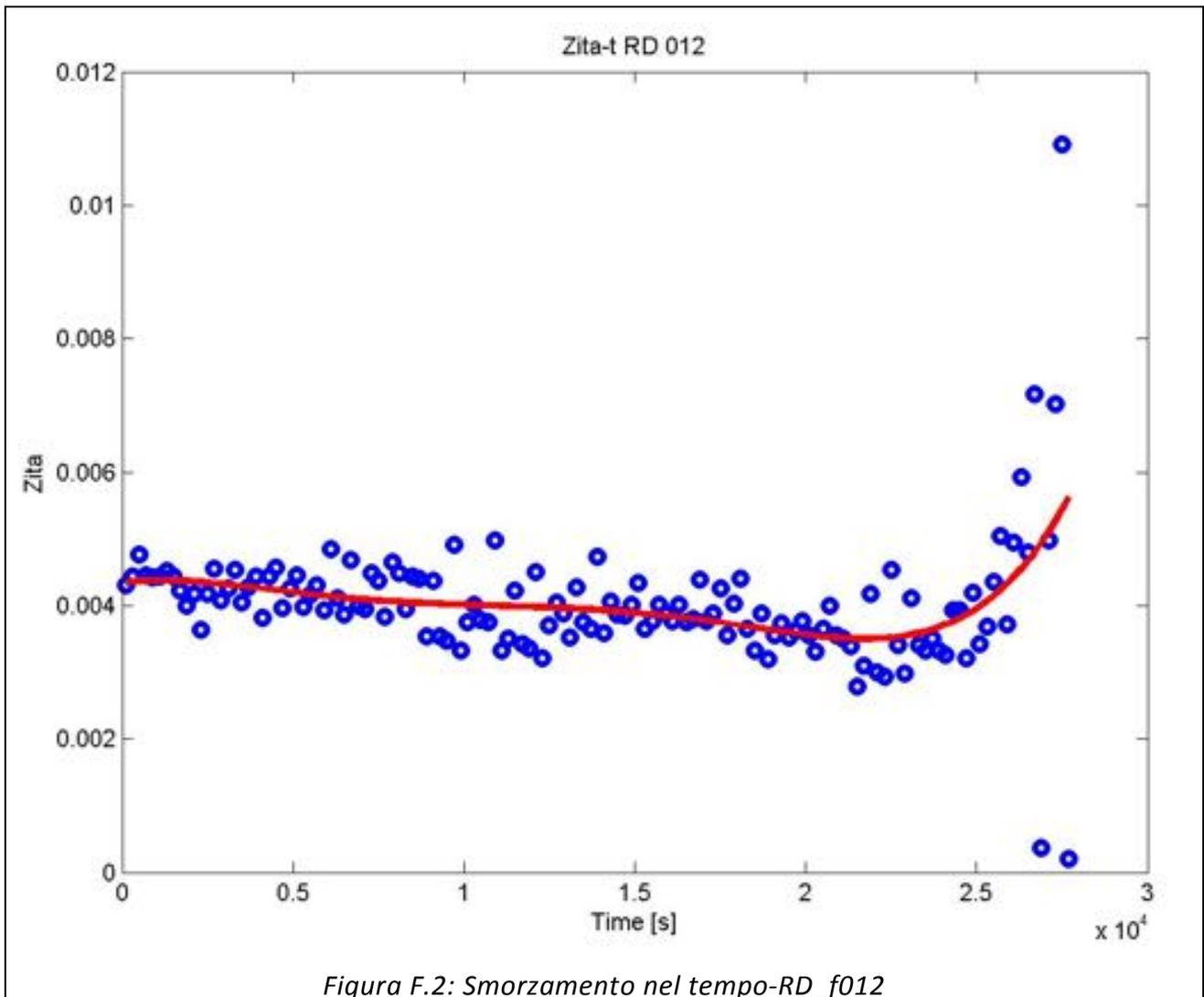


Figura F.1: Frequenza naturale nel tempo-RD_f012



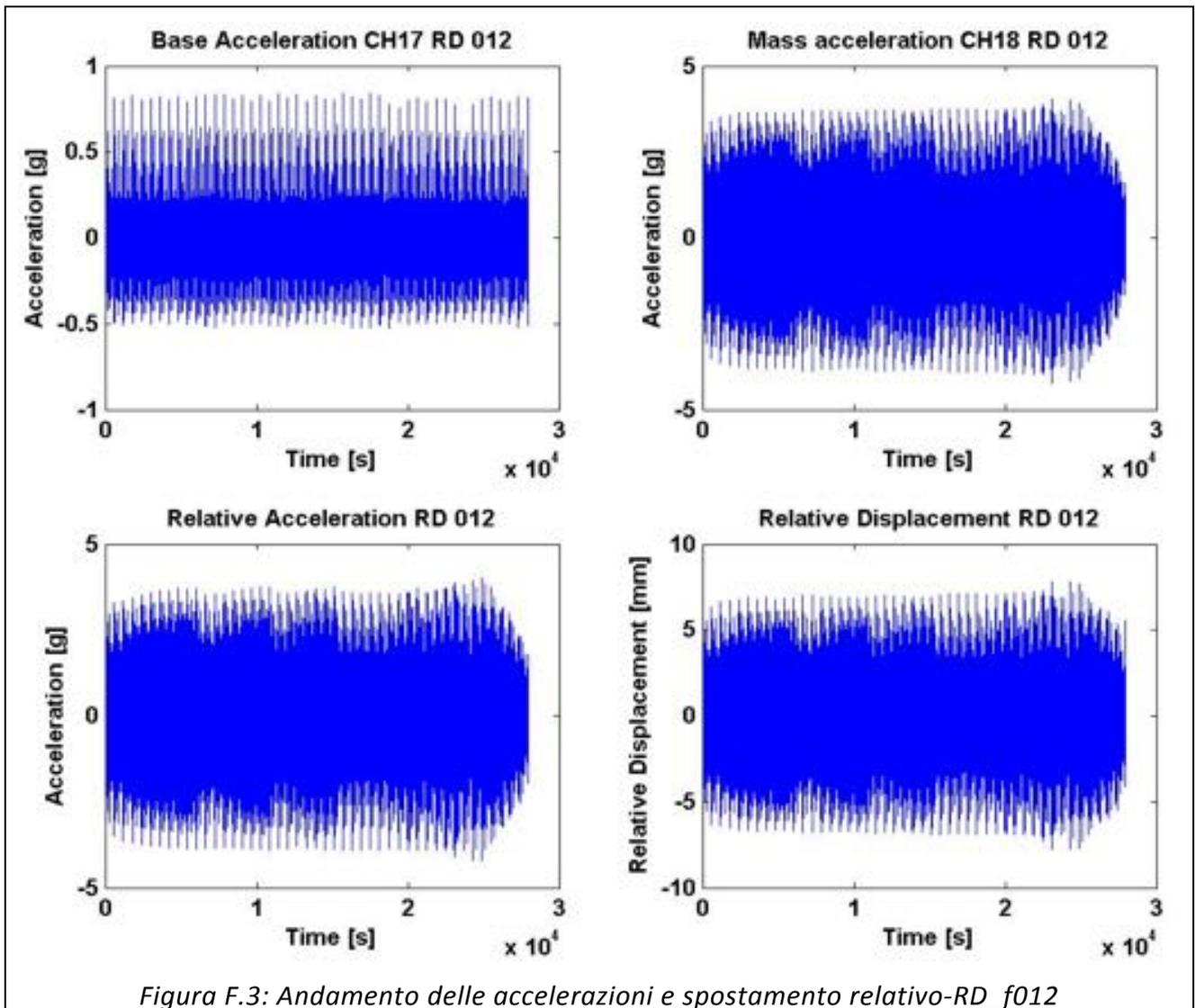


Figura F.3: Andamento delle accelerazioni e spostamento relativo-RD_f012

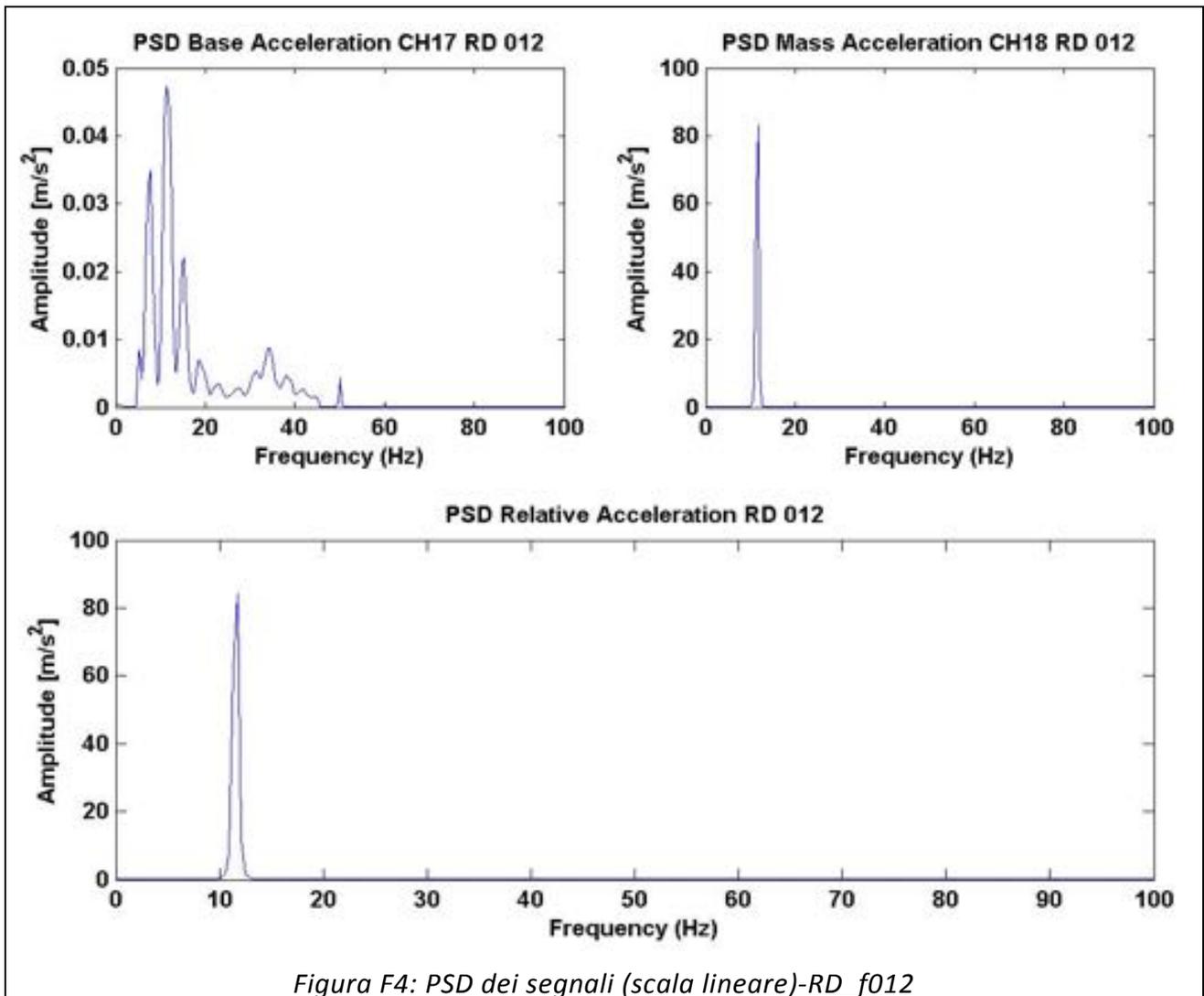
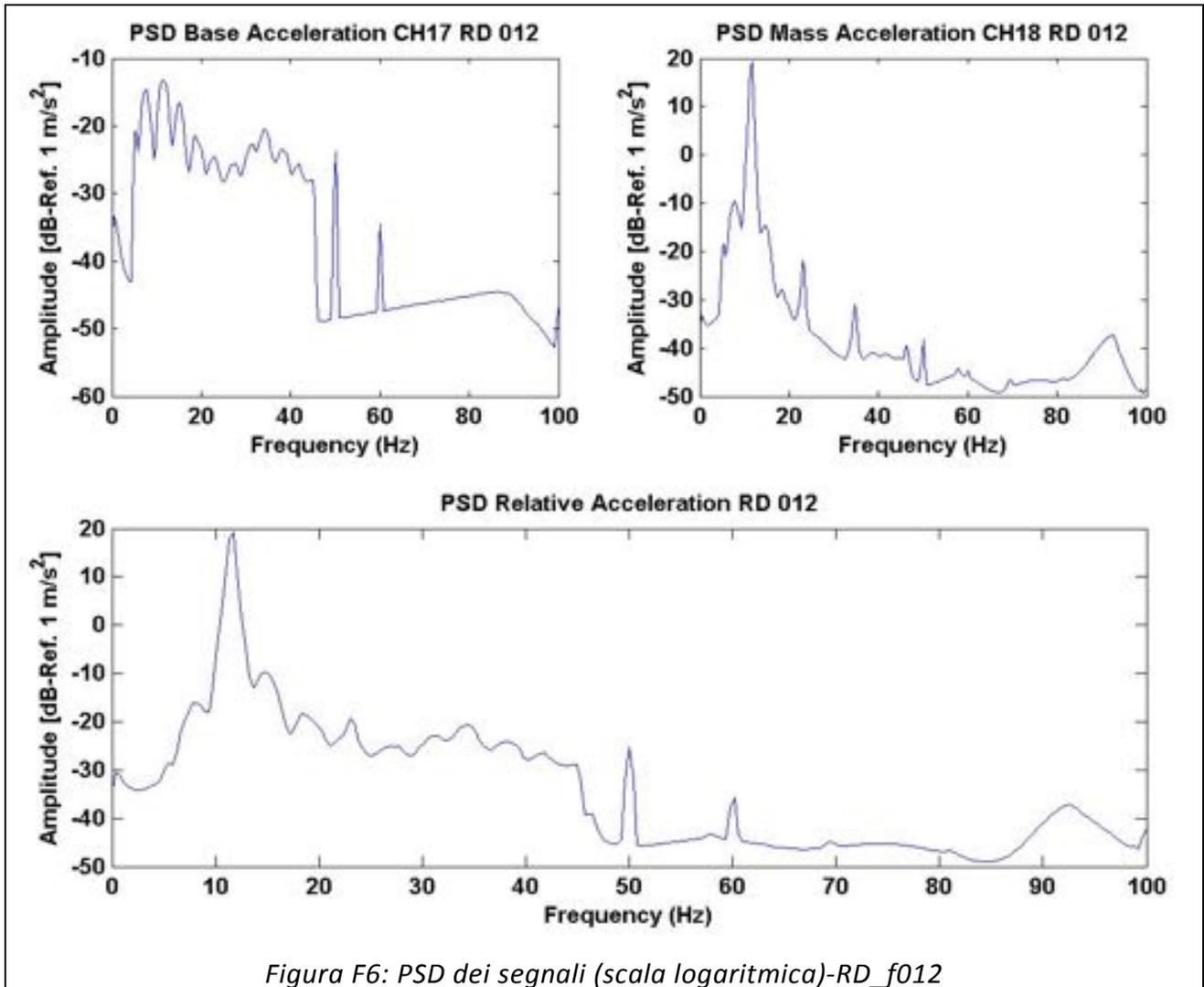
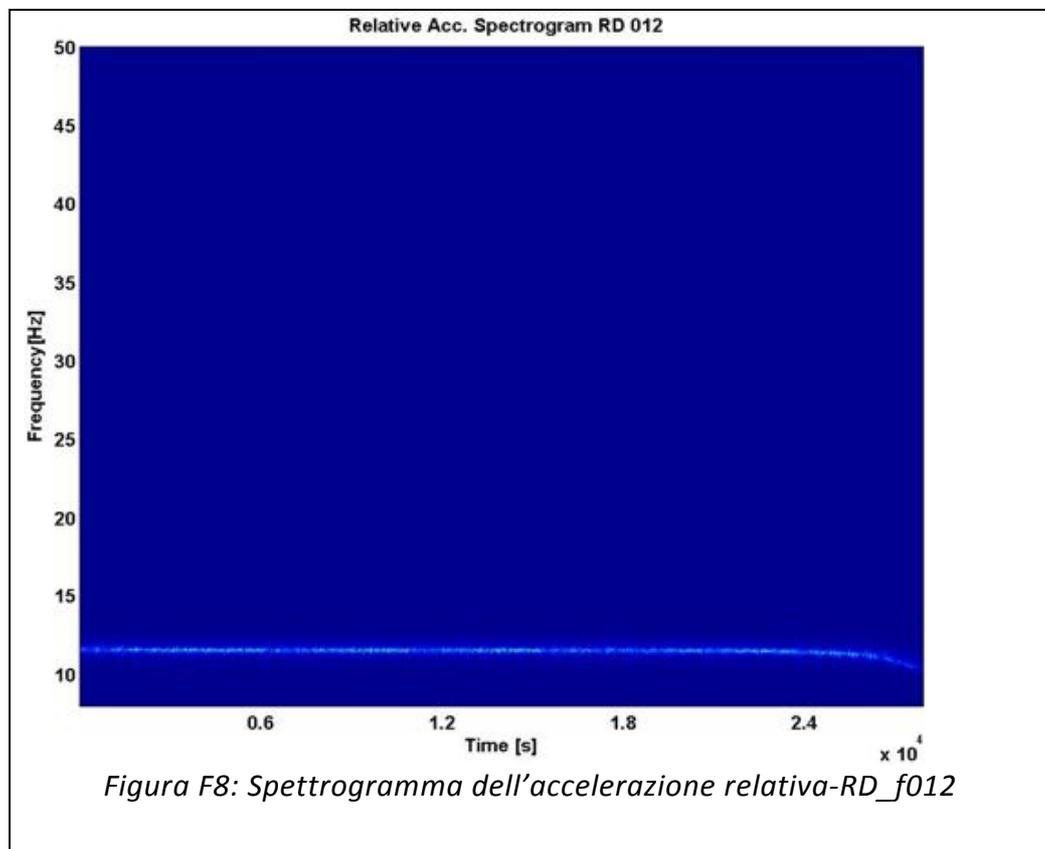
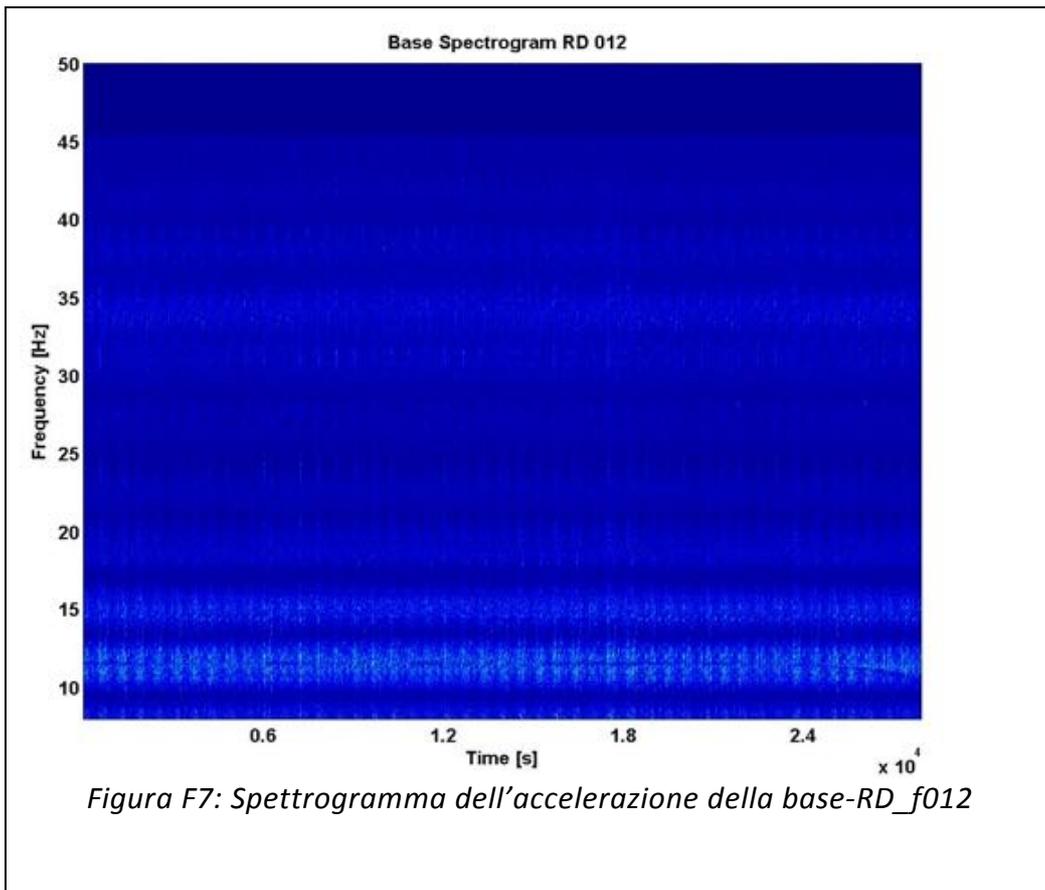
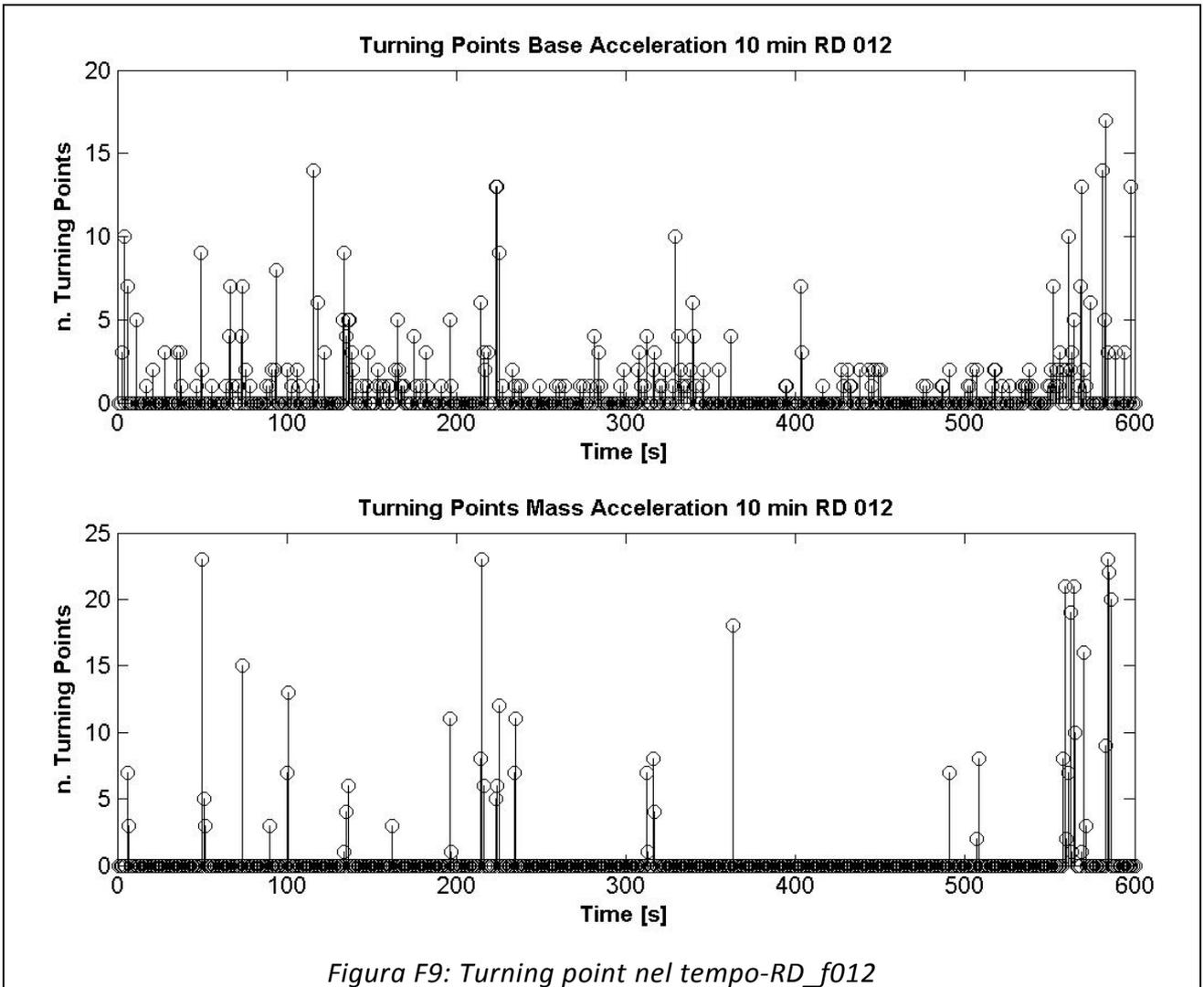
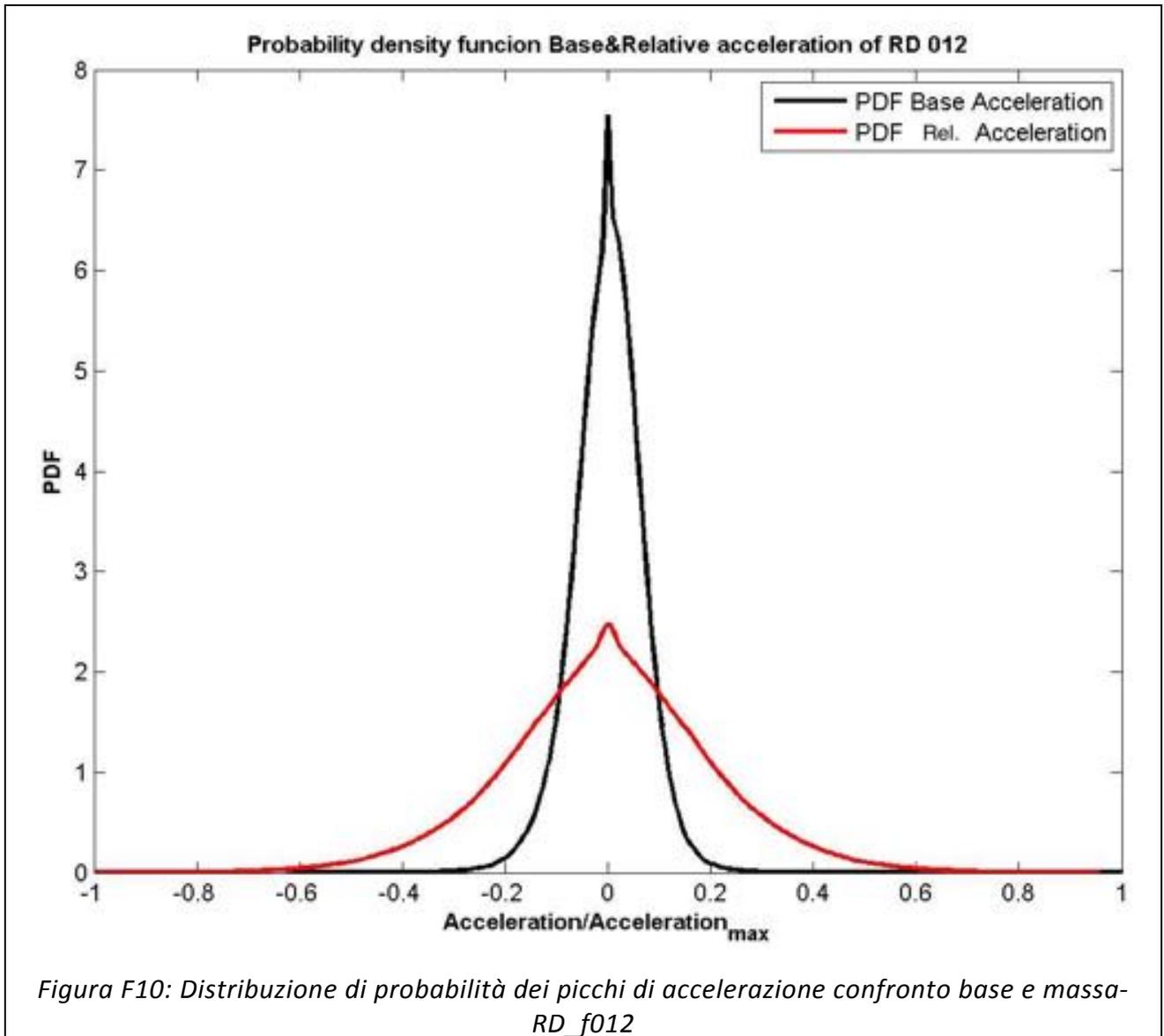


Figura F4: PSD dei segnali (scala lineare)-RD_f012



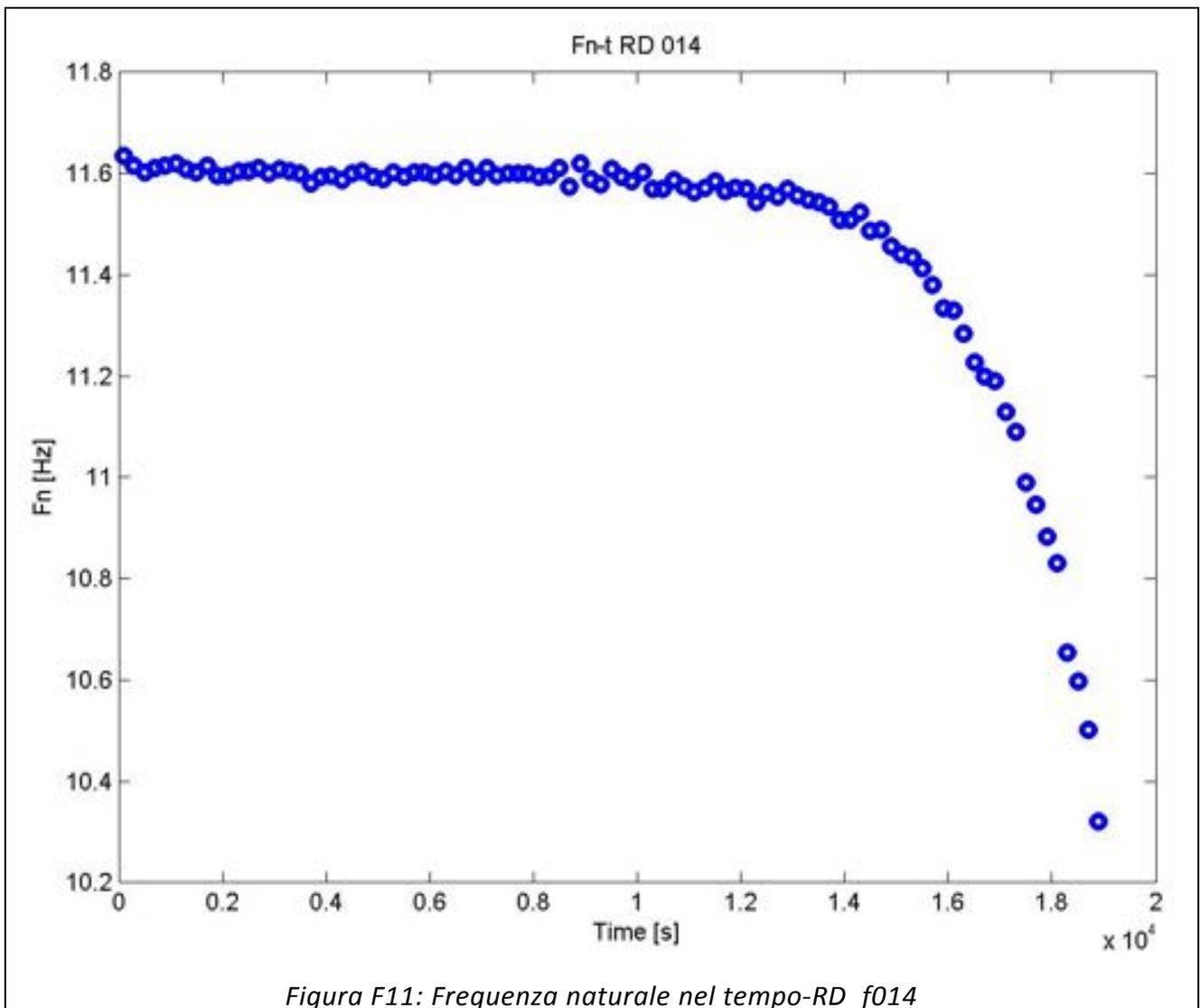






Provino RD_f014

	Media [g]	RMS [g]	Skewness	Kurtosis	Crest Factor	Frequenza media [Hz]
Accelerazione Base CH17	4,29E-08	0,057	-9,29E-02	6,672	14,396	11,33
Accelerazione Massa CH18	-4,64E-07	0,964	-2,93E-03	3,276	71,654	11,33
Accelerazione Trasversale CH22	9,49E-10	0,037	-7,98E-03	4,713	5,728	34,77
Accelerazione Verticale CH23	-4,35E-07	0,926	7,61E-02	3,272	72,264	11,33
Accelerazione Longitudinale CH24	-3,46E-07	0,716	-6,85E-02	3,310	48,755	11,33
Accelerazione relativa CH17-CH18	-5,07E-07	0,964	-4,21E-03	3,270	71,059	11,33



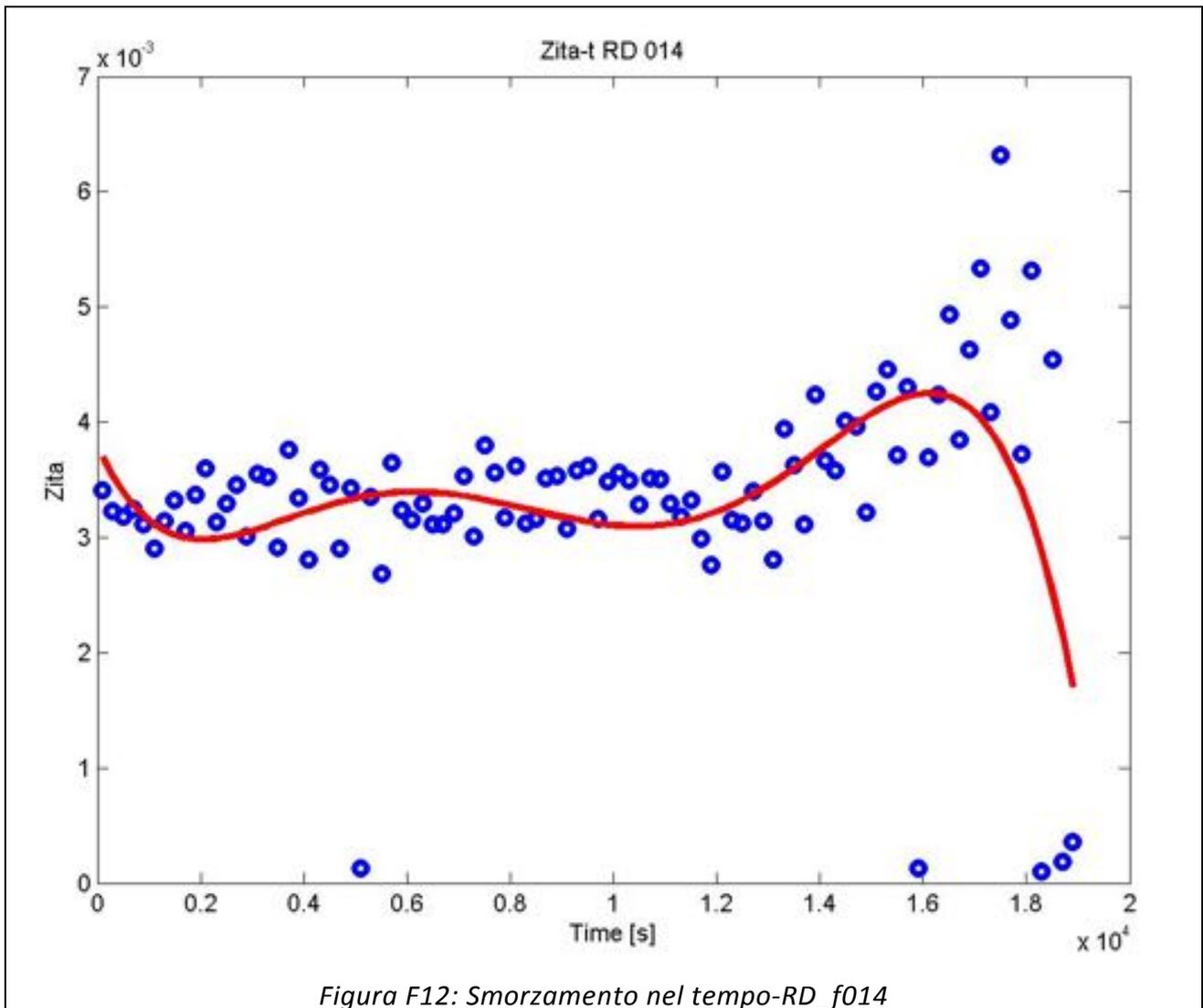


Figura F12: Smorzamento nel tempo-RD_f014

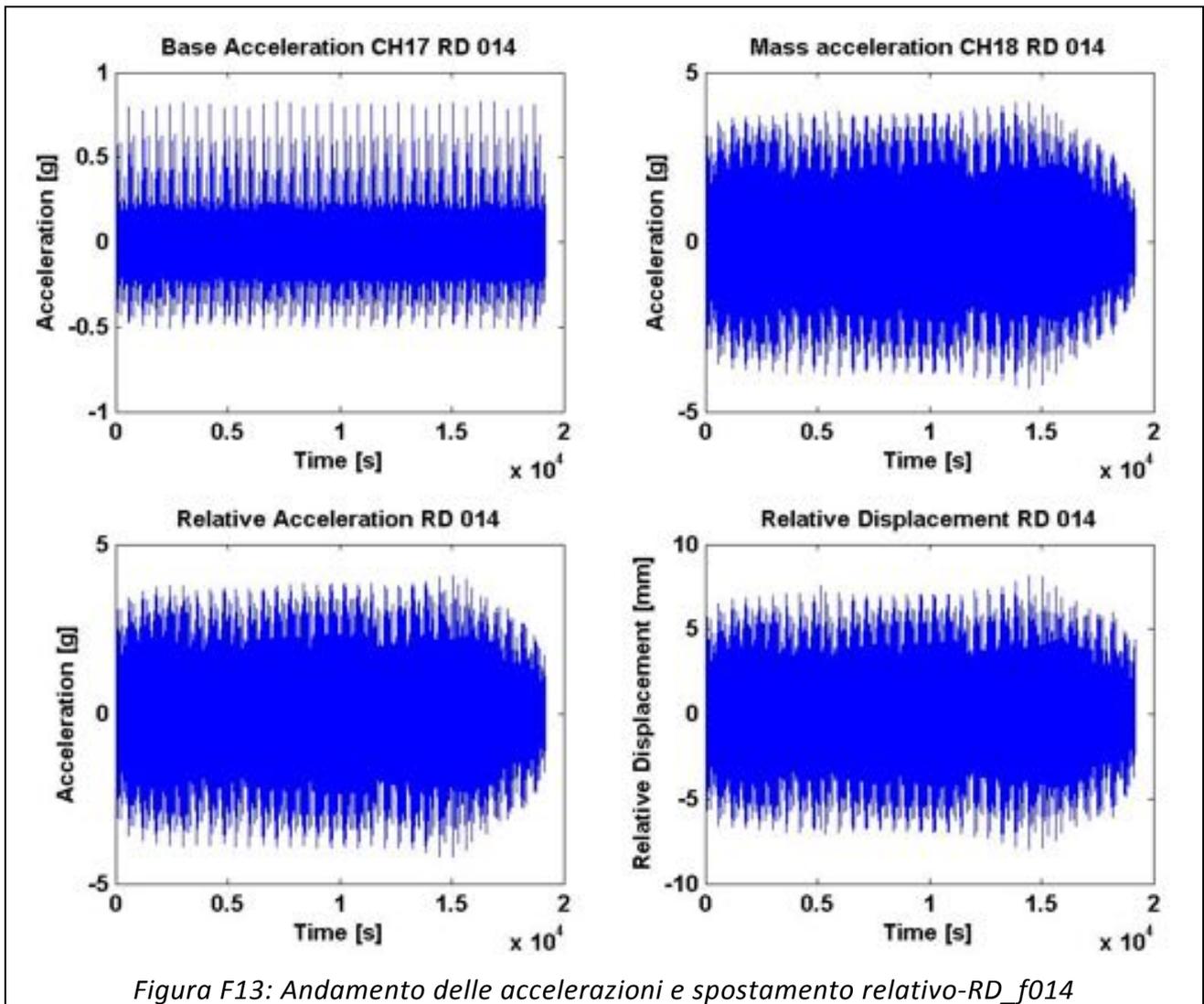


Figura F13: Andamento delle accelerazioni e spostamento relativo-RD_f014

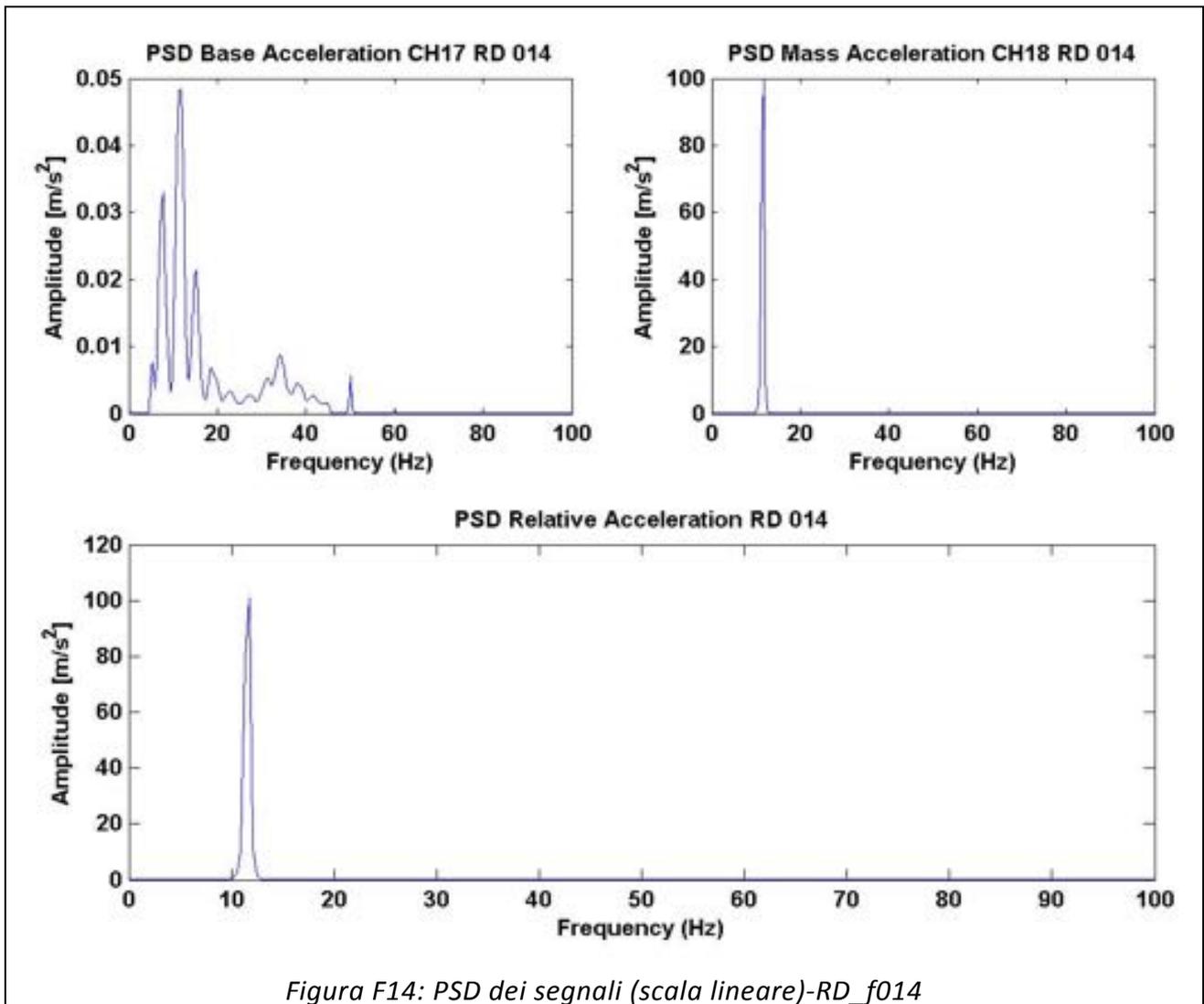
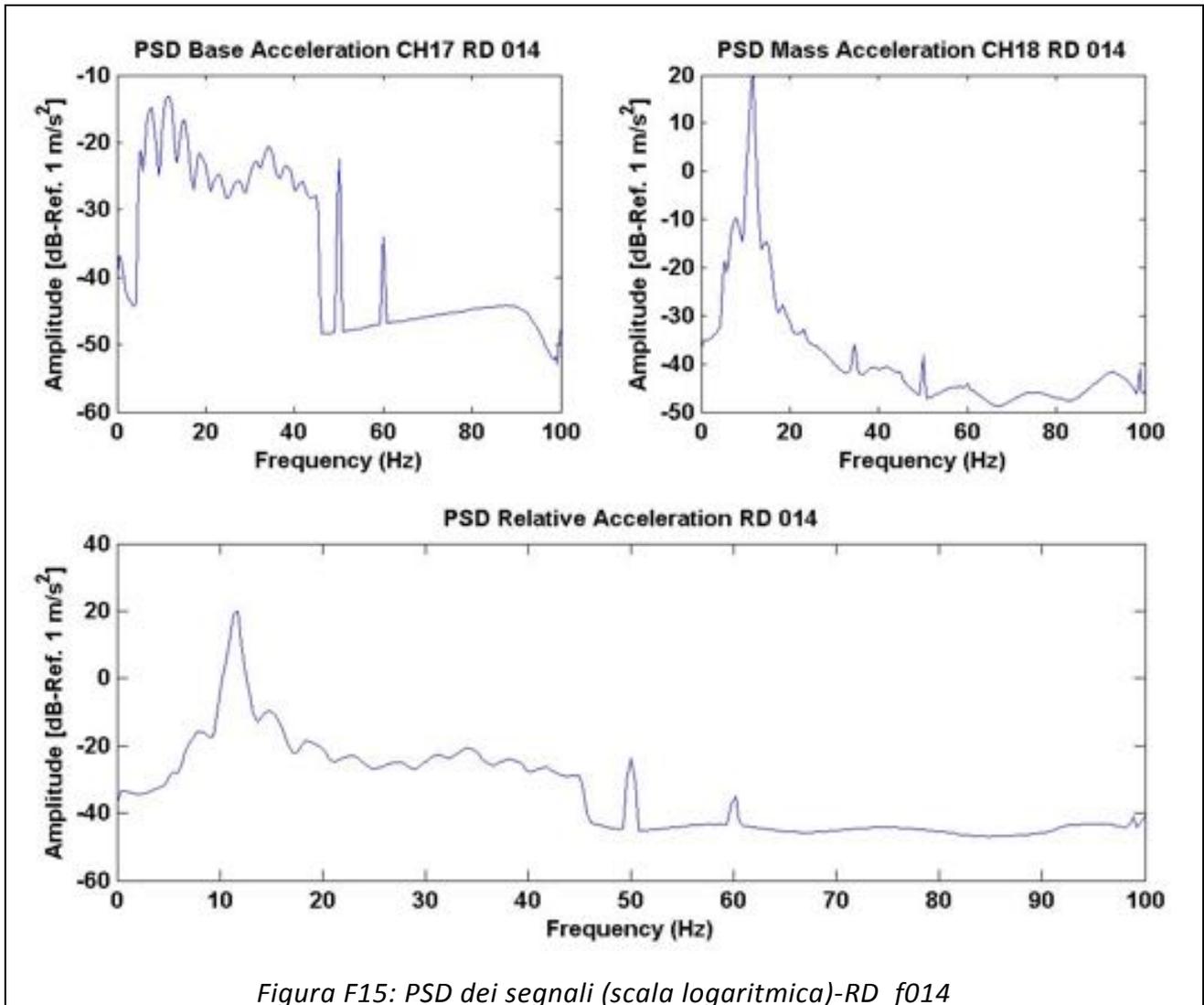
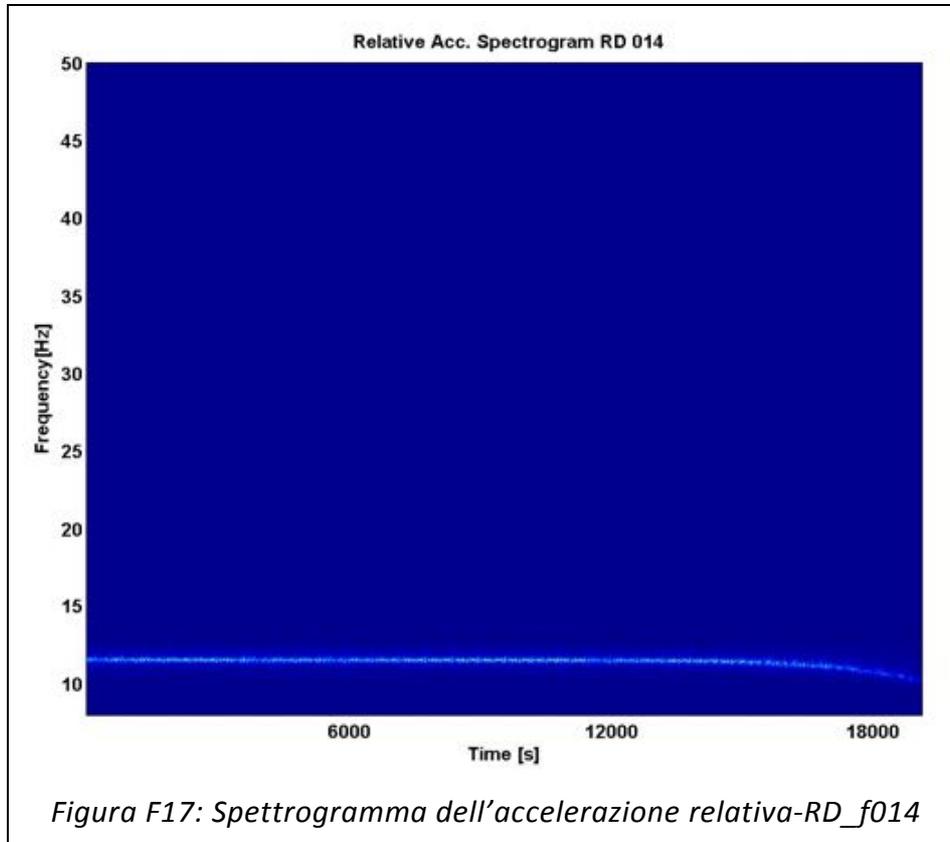
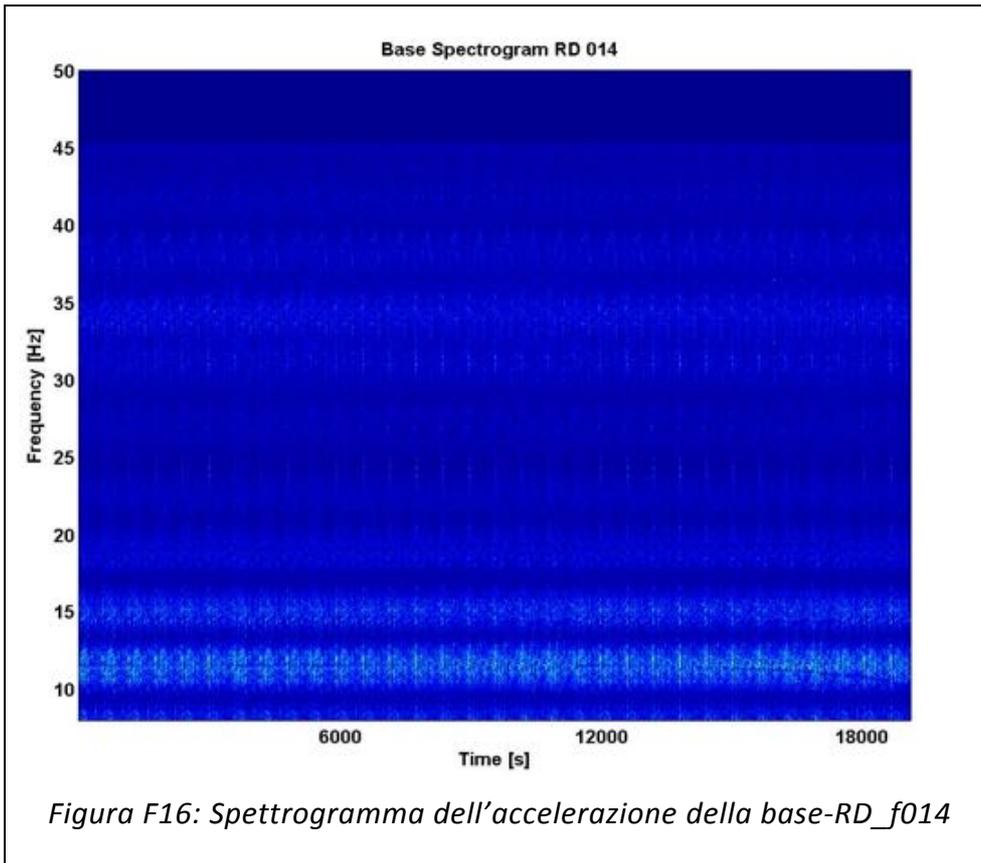
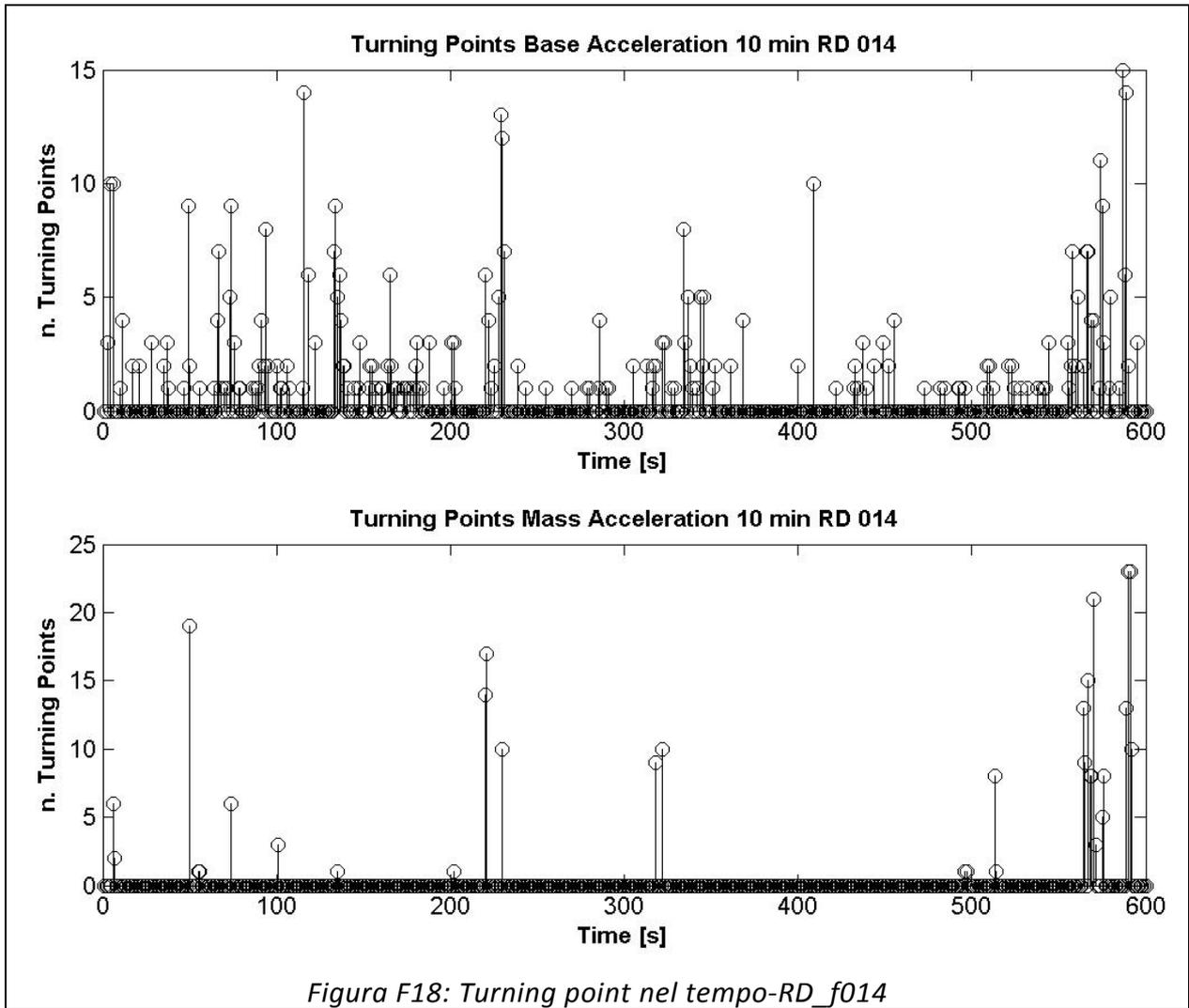
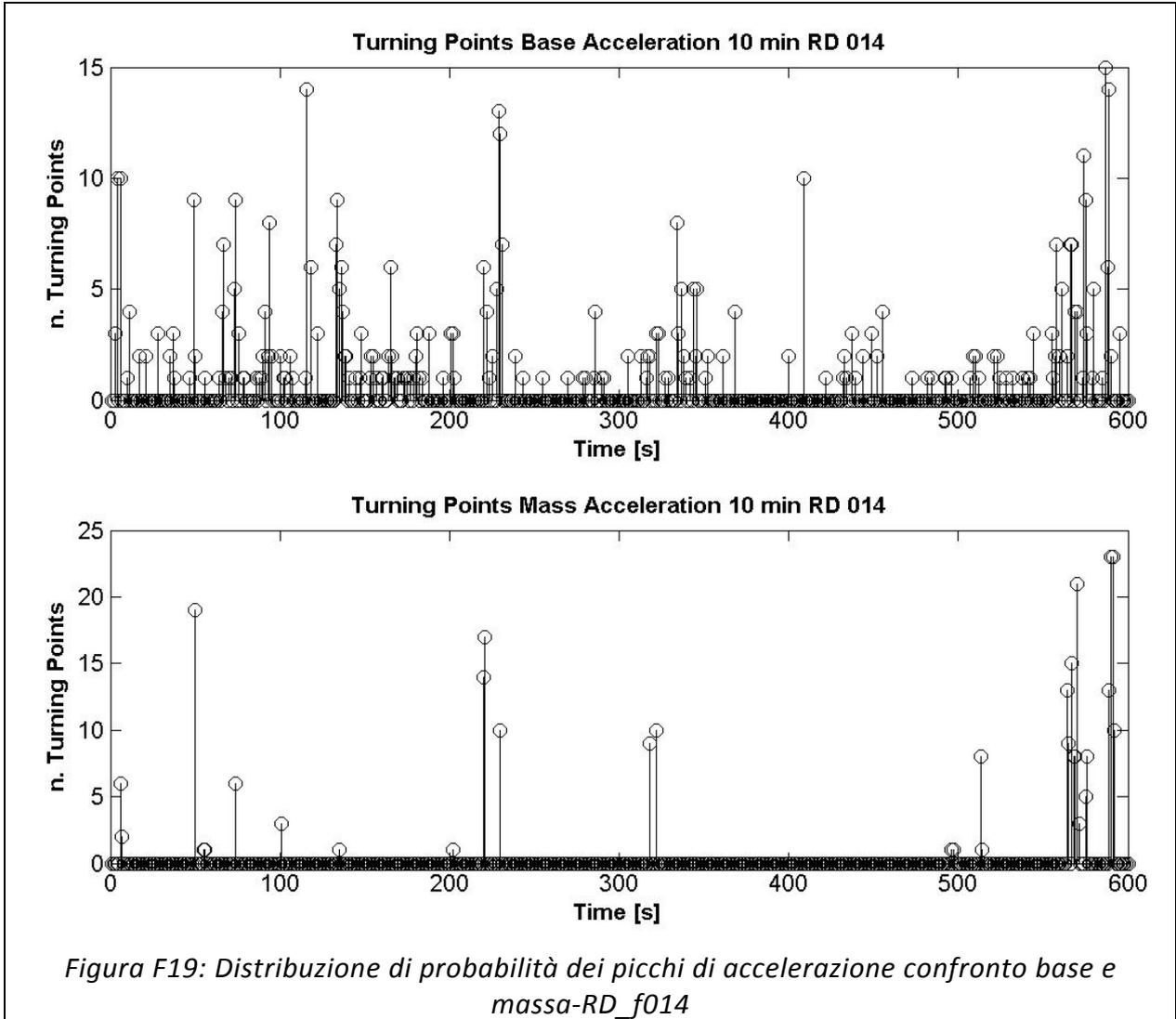


Figura F14: PSD dei segnali (scala lineare)-RD_f014



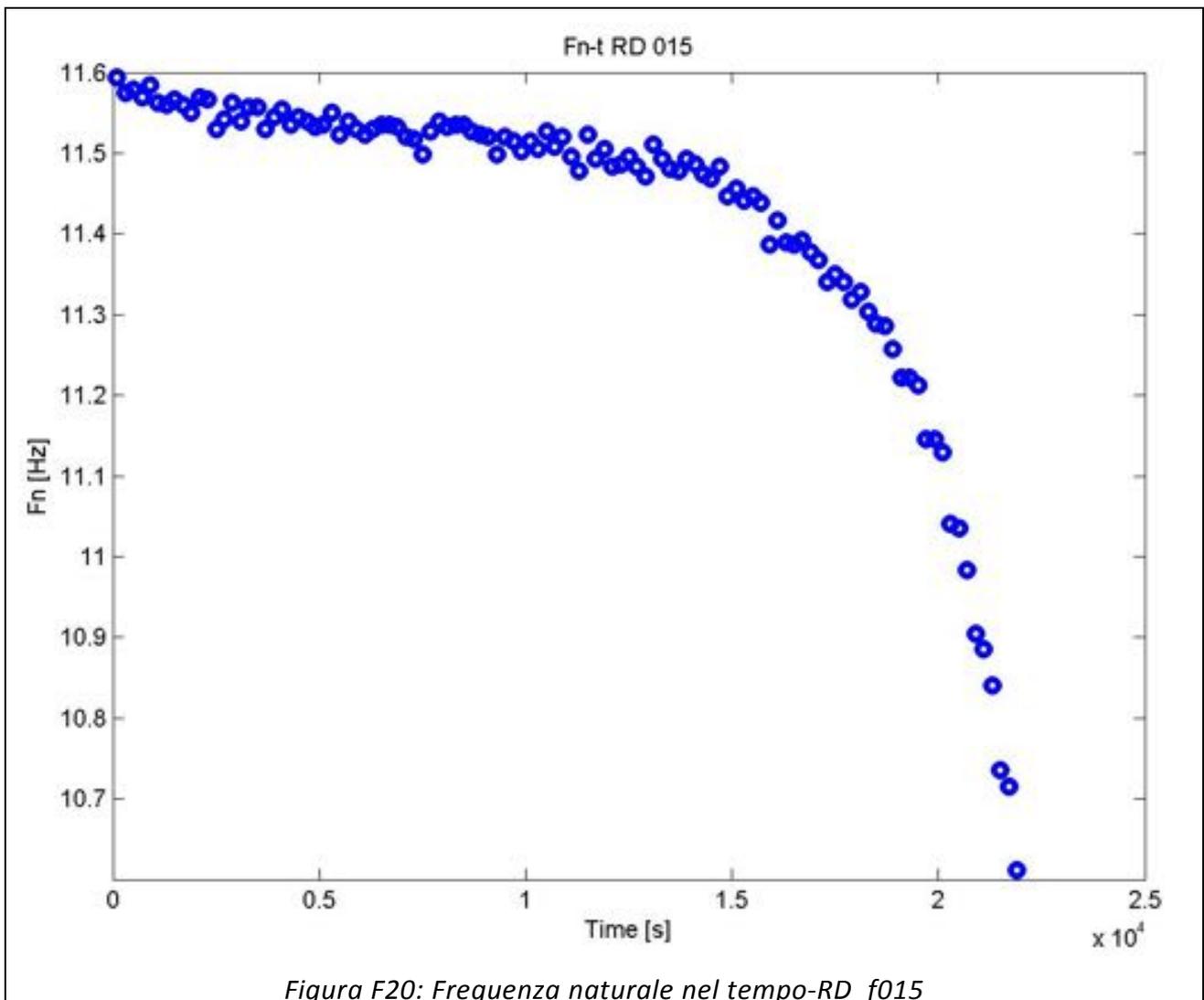


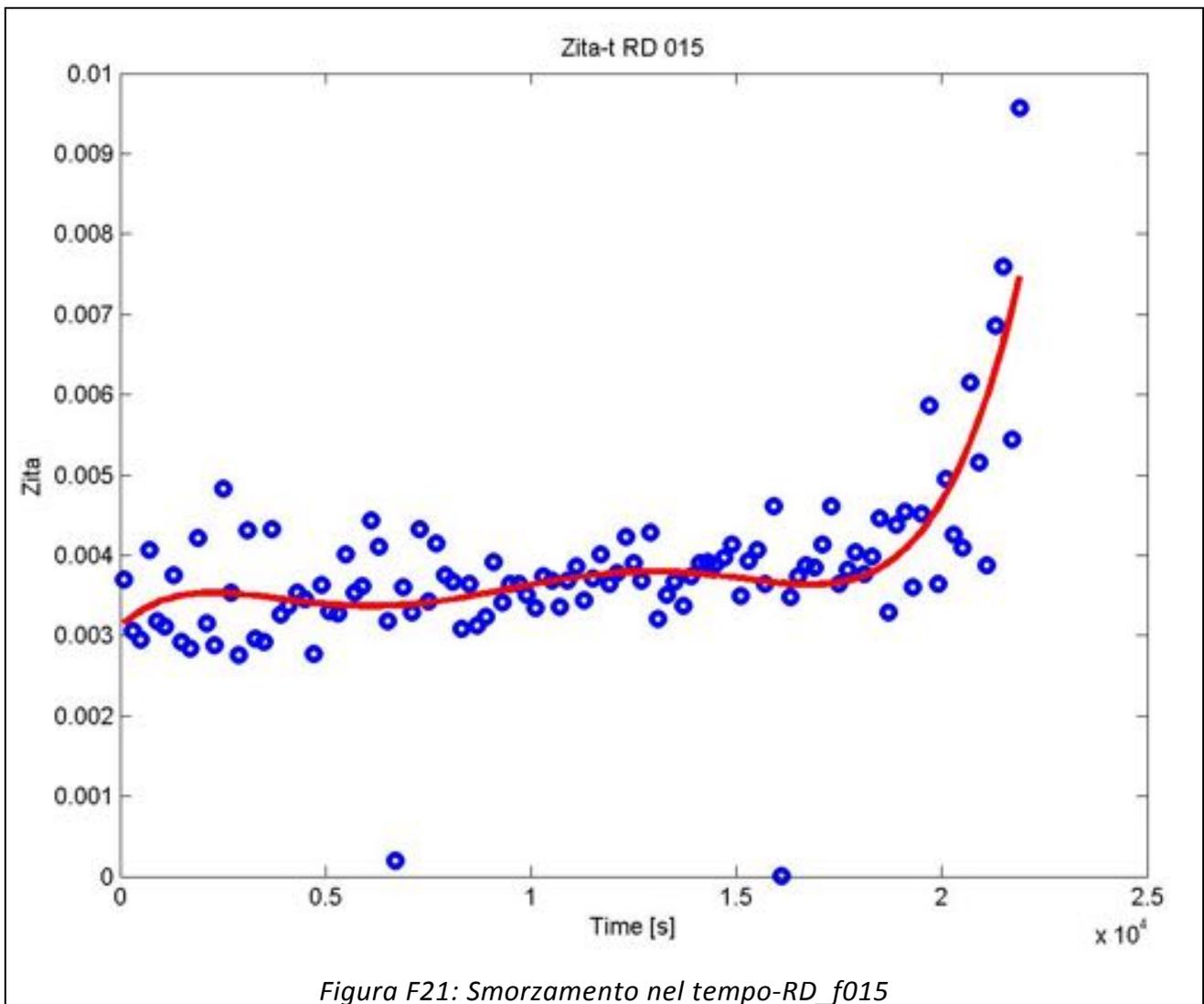




Provino RD_f015

	Media [g]	RMS [g]	Skewness	Kurtosis	Crest Factor	Frequenza media [Hz]
Accelerazione Base CH17	-2,18E-08	0,057	-8,47E-02	6,682	14,658	11,72
Accelerazione Massa CH18	-1,41E-07	0,916	-1,52E-03	3,438	74,513	11,72
Accelerazione Trasversale CH22	-3,87E-09	0,100	-1,13E-02	3,988	9,362	34,38
Accelerazione Verticale CH23	-1,37E-07	0,870	7,67E-02	3,431	74,517	11,72
Accelerazione Longitudinale CH24	-9,61E-08	0,676	-4,66E-02	3,450	51,925	11,72
Accelerazione relativa CH17-CH18	-1,19E-07	0,917	-2,60E-03	3,431	75,102	11,72





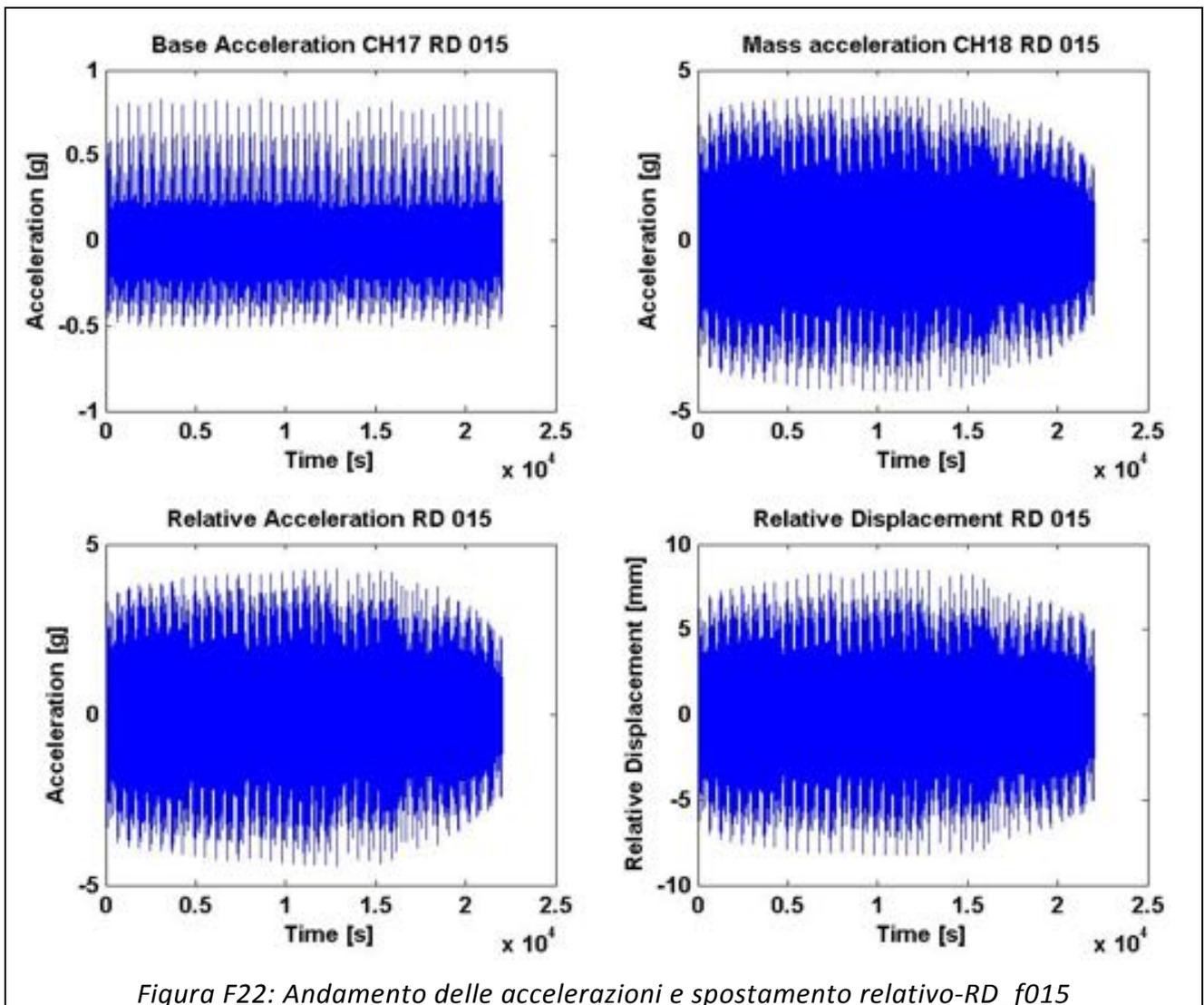


Figura F22: Andamento delle accelerazioni e spostamento relativo-RD_f015

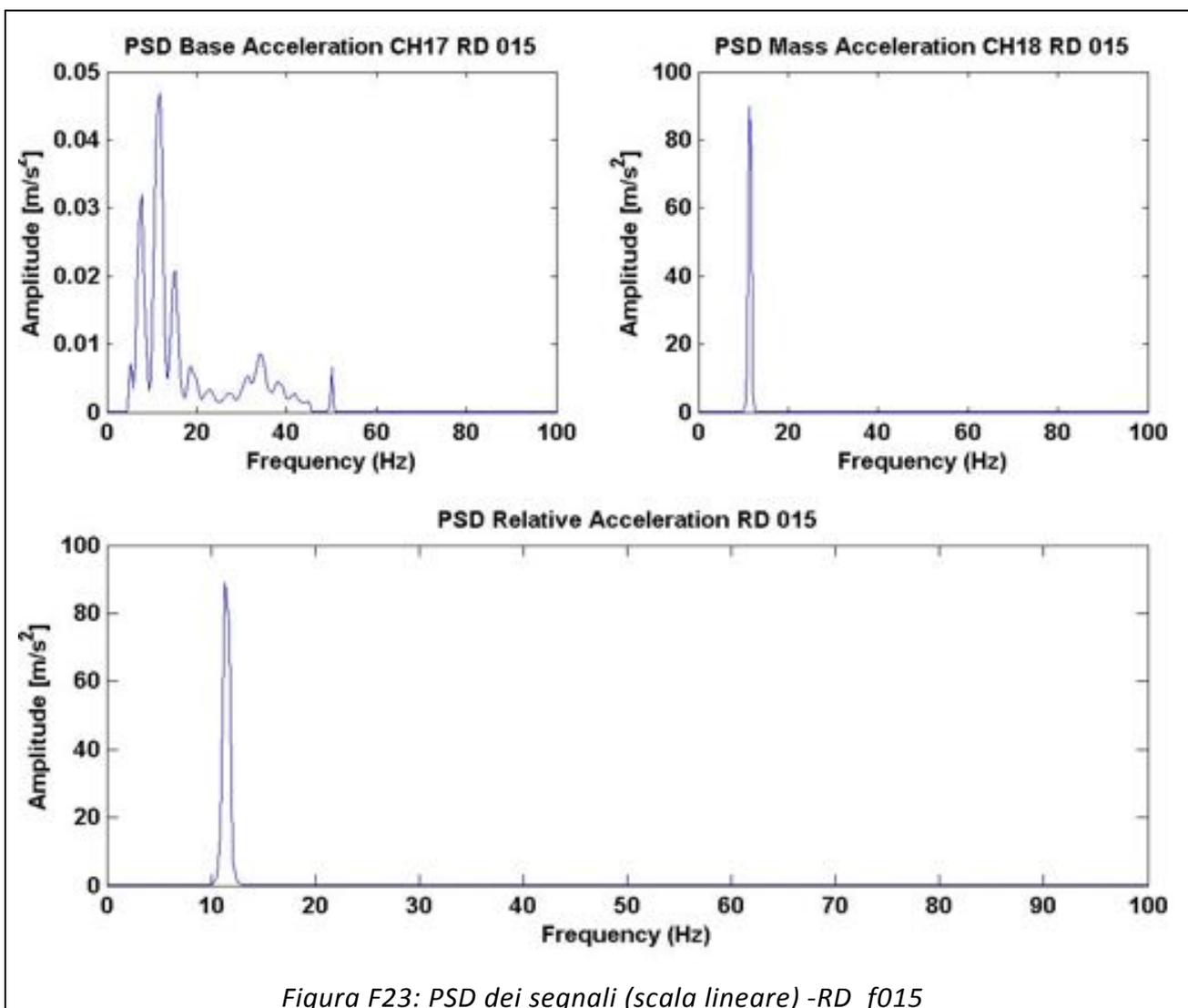


Figura F23: PSD dei segnali (scala lineare) -RD_f015

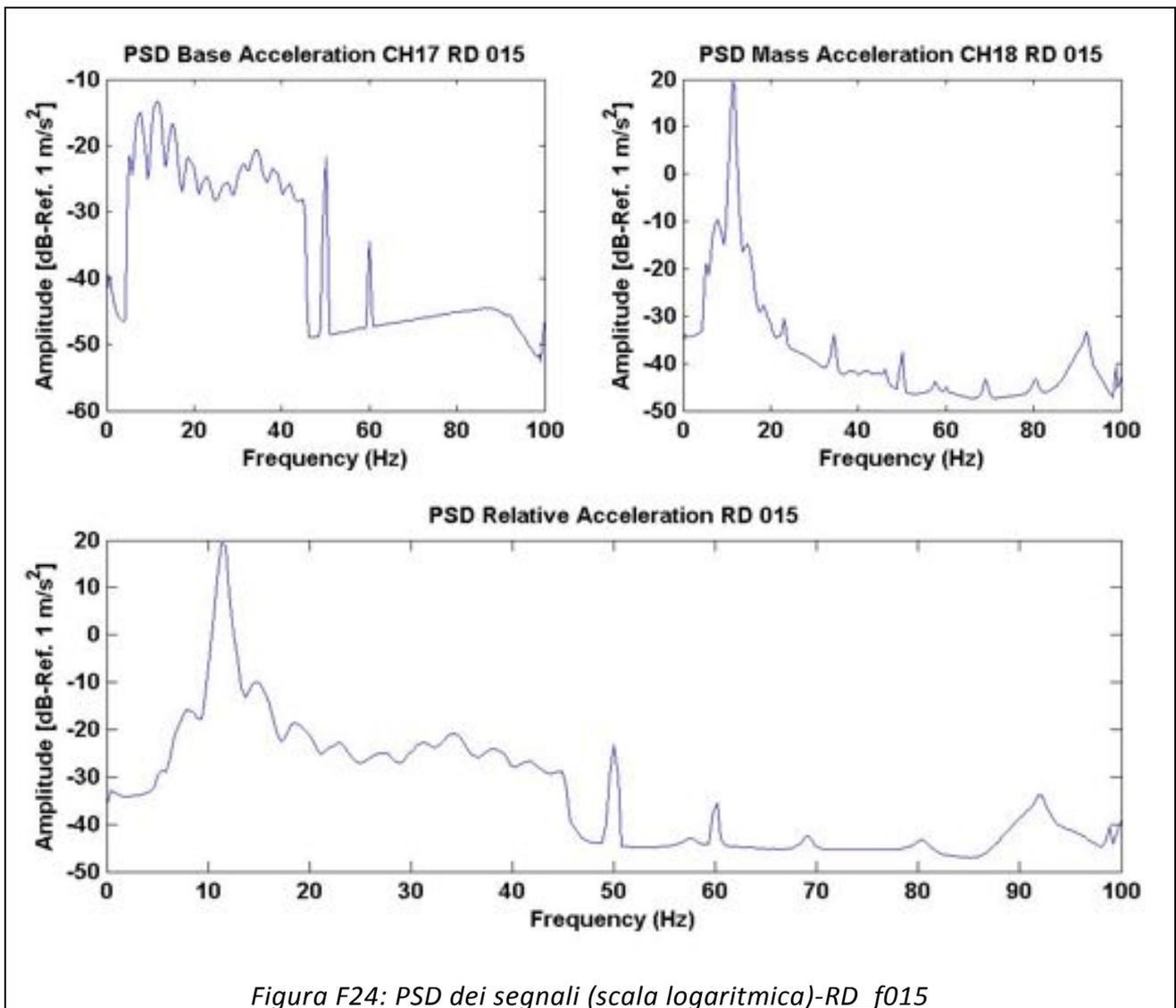
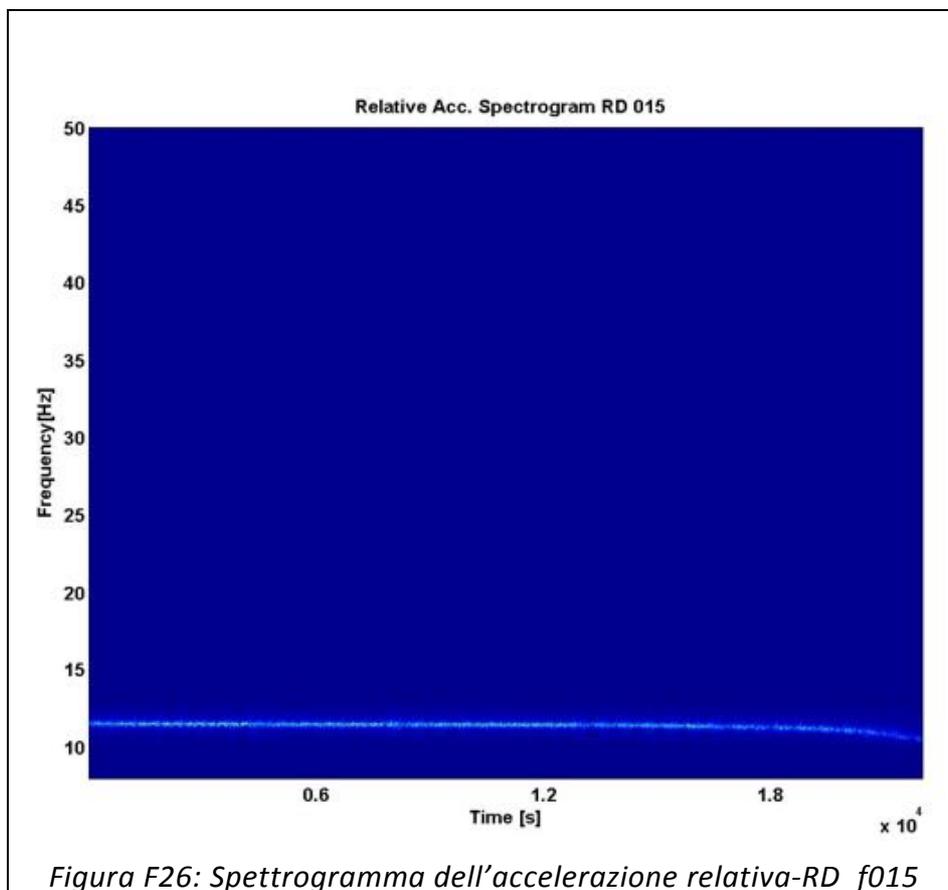
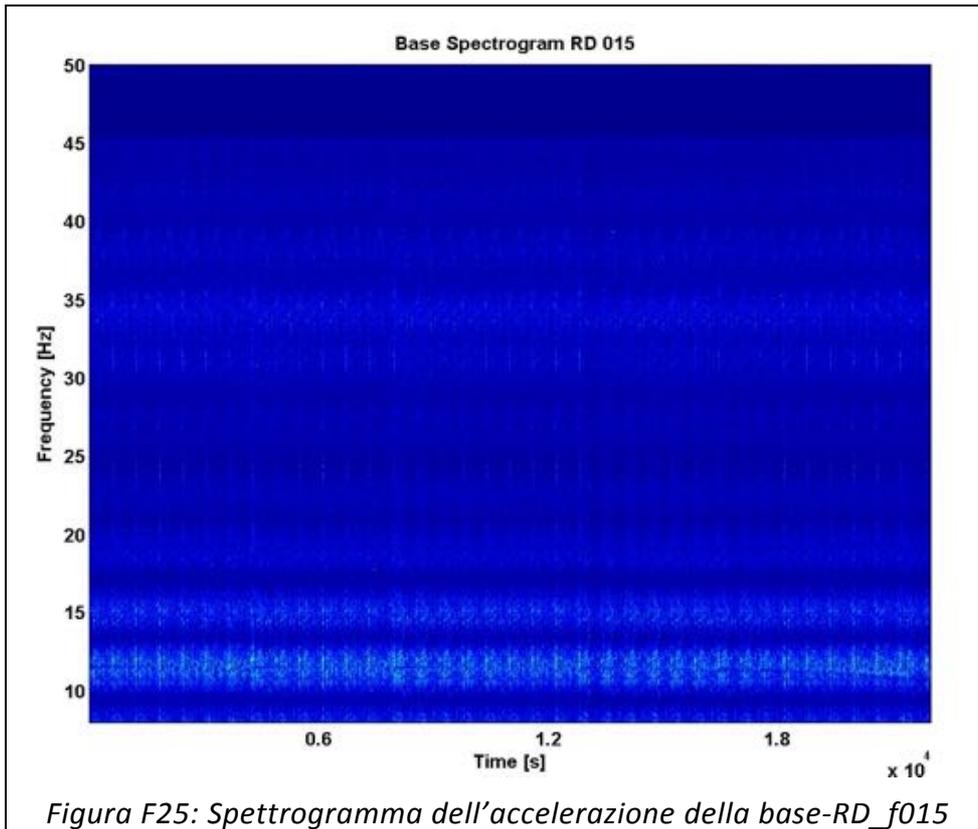


Figura F24: PSD dei segnali (scala logaritmica)-RD_f015



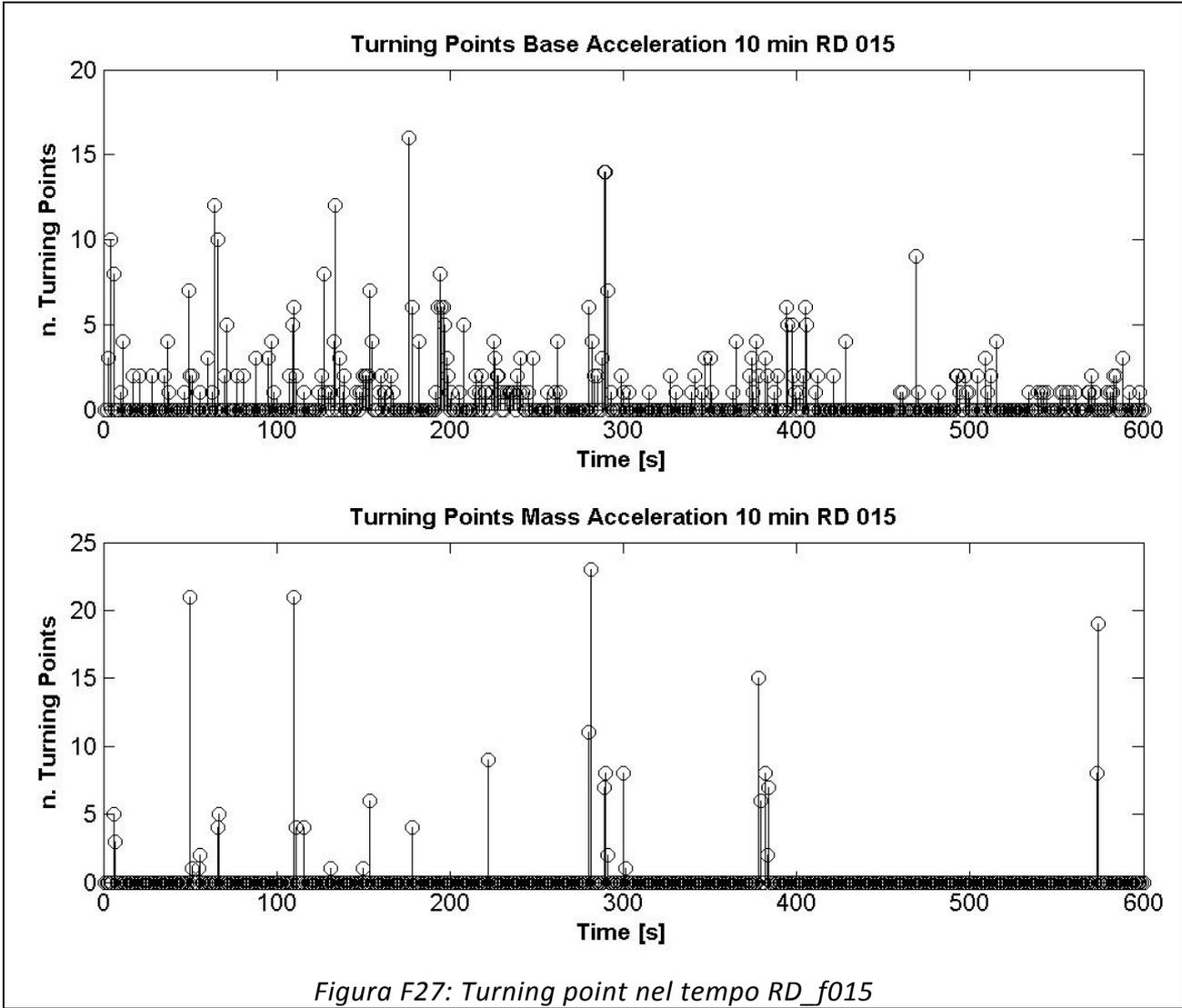
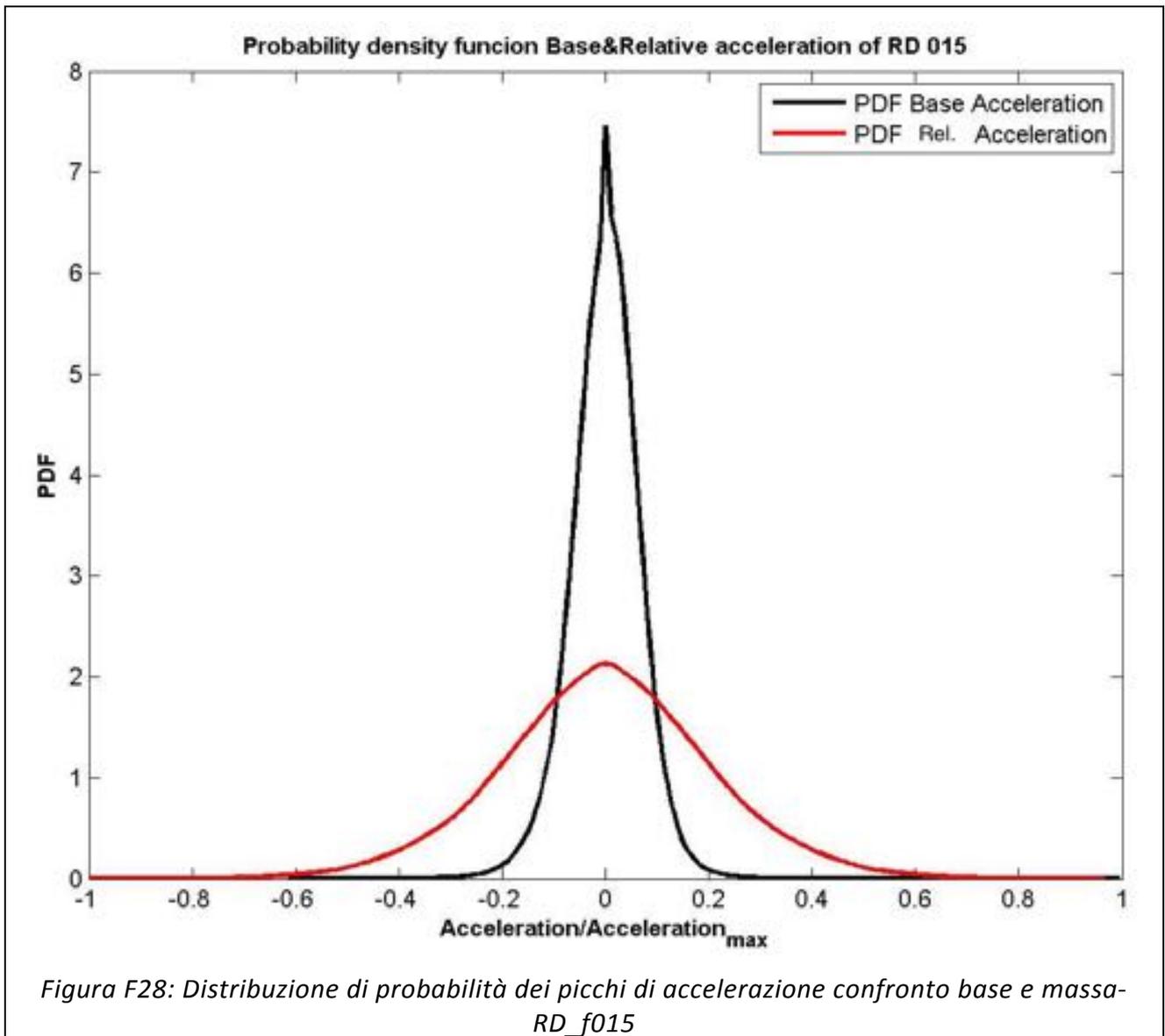


Figura F27: Turning point nel tempo RD_f015



Provino RD_f016

	Media [g]	RMS [g]	Skewness	Kurtosis	Crest Factor	Frequenza media [Hz]
Accelerazione Base CH17	-1,15E-08	0,056	-8,46E-02	6,682	14,860	11,72
Accelerazione Massa CH18	9,43E-08	0,804	-1,06E-02	3,648	72,568	11,72
Accelerazione Trasversale CH22	5,81E-09	0,036	-3,28E-02	6,319	9,459	33,98
Accelerazione Verticale CH23	8,11E-08	0,756	6,76E-02	3,646	72,481	11,72
Accelerazione Longitudinale CH24	7,89E-08	0,605	-2,88E-02	3,589	51,335	11,72
Accelerazione relativa CH17-CH18	1,06E-07	0,805	-1,21E-02	3,645	73,478	11,72

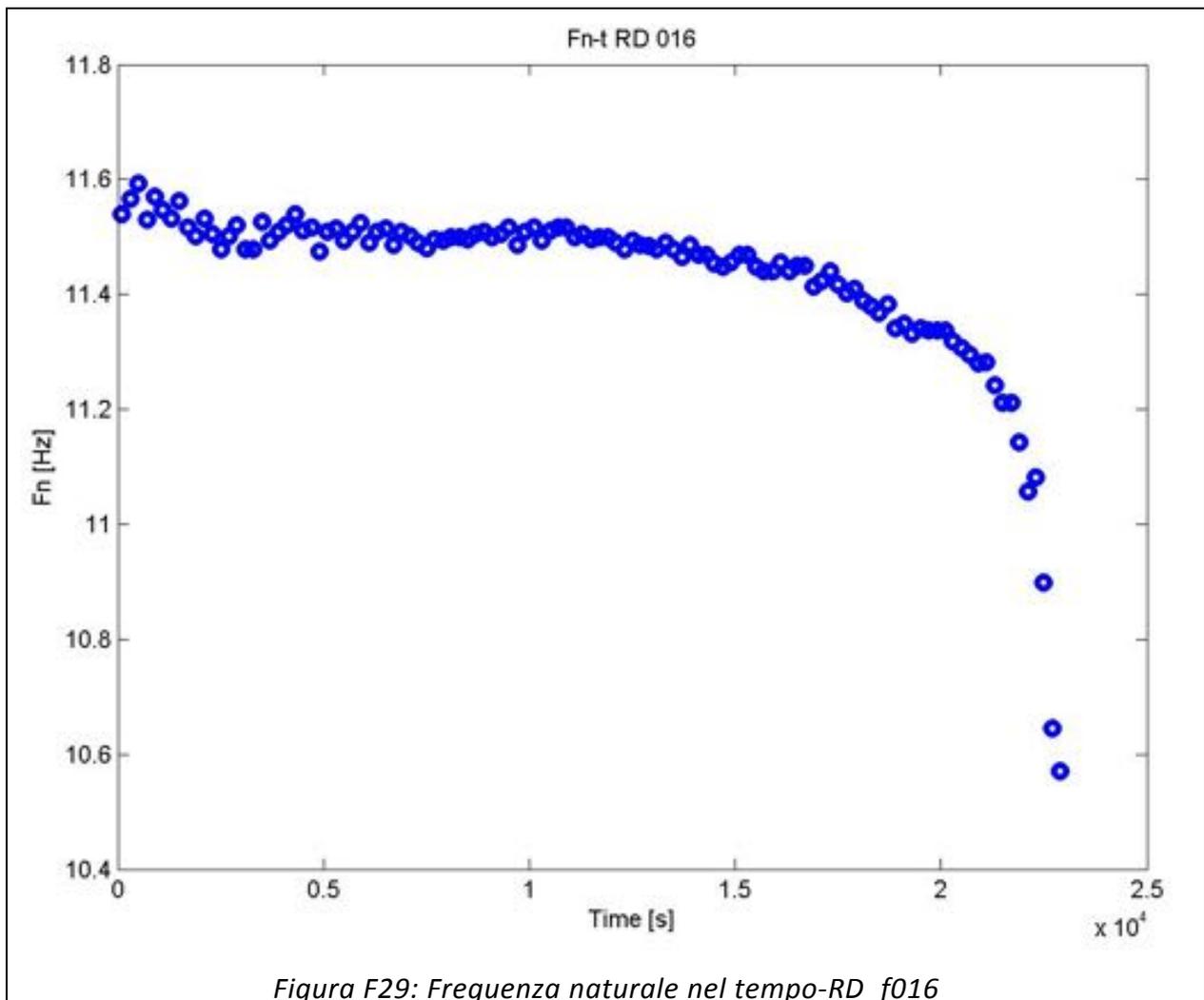


Figura F29: Frequenza naturale nel tempo-RD_f016

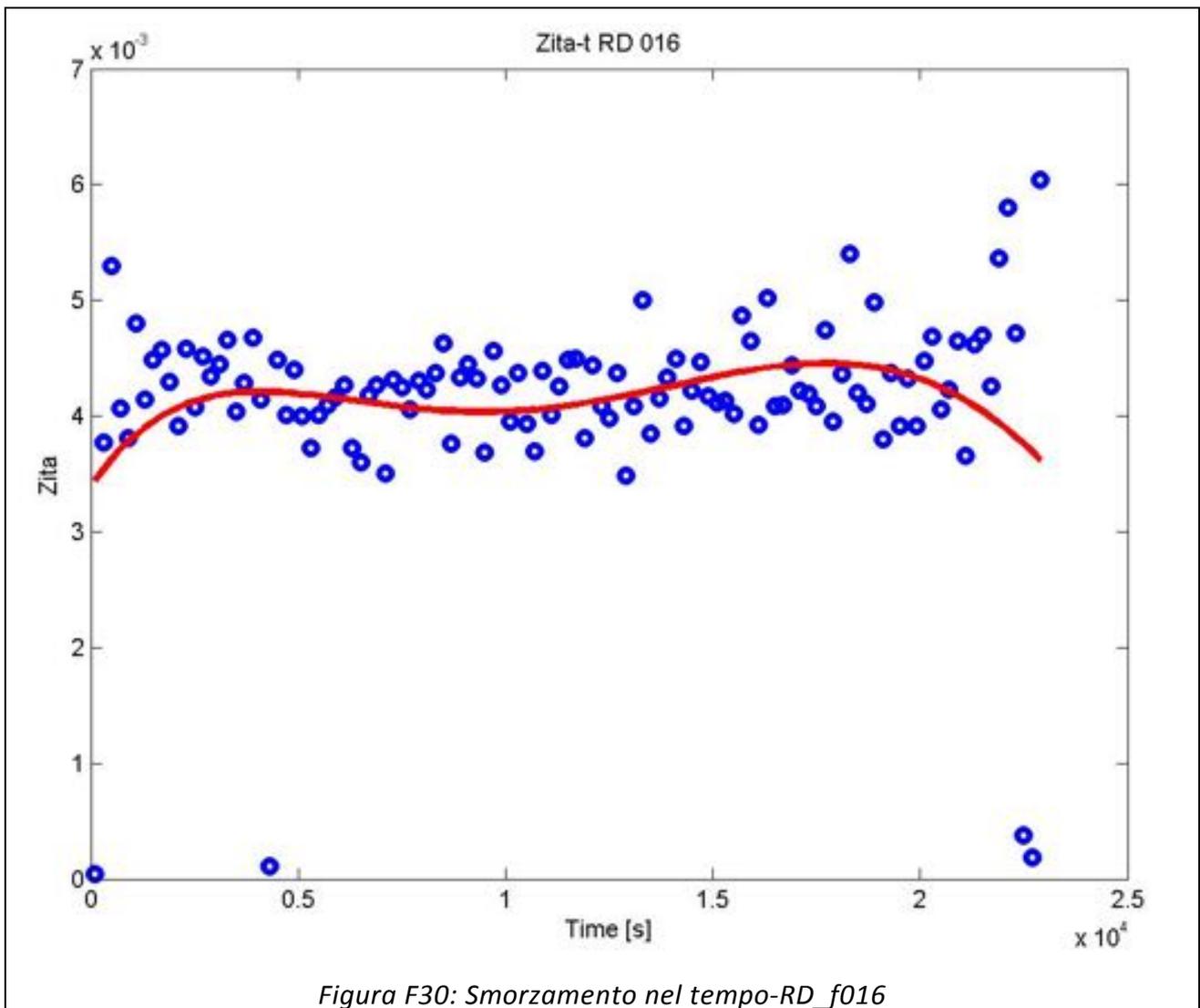


Figura F30: Smorzamento nel tempo-RD_f016

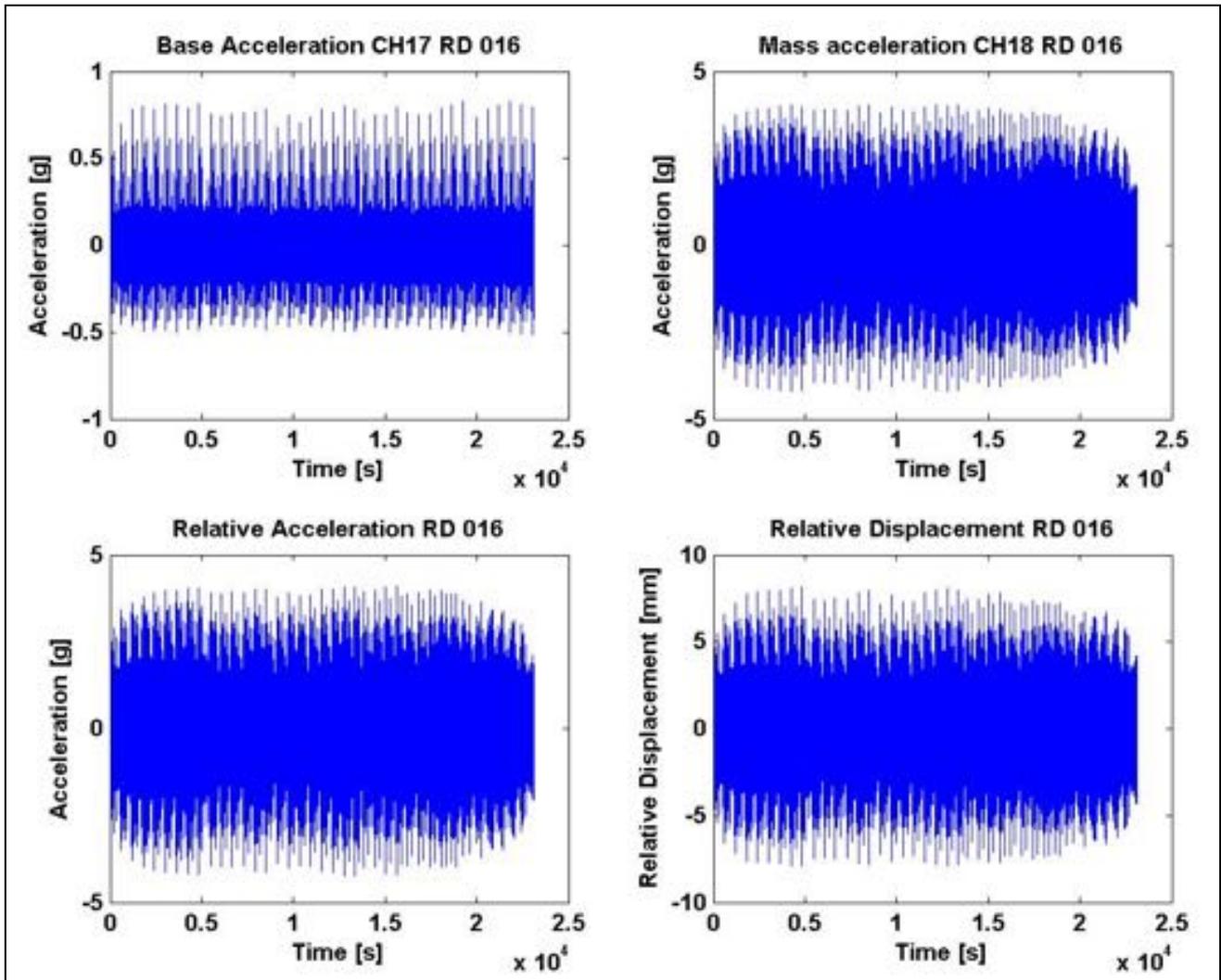


Figura F31: Andamento delle accelerazioni e spostamento relativo-RD_f016

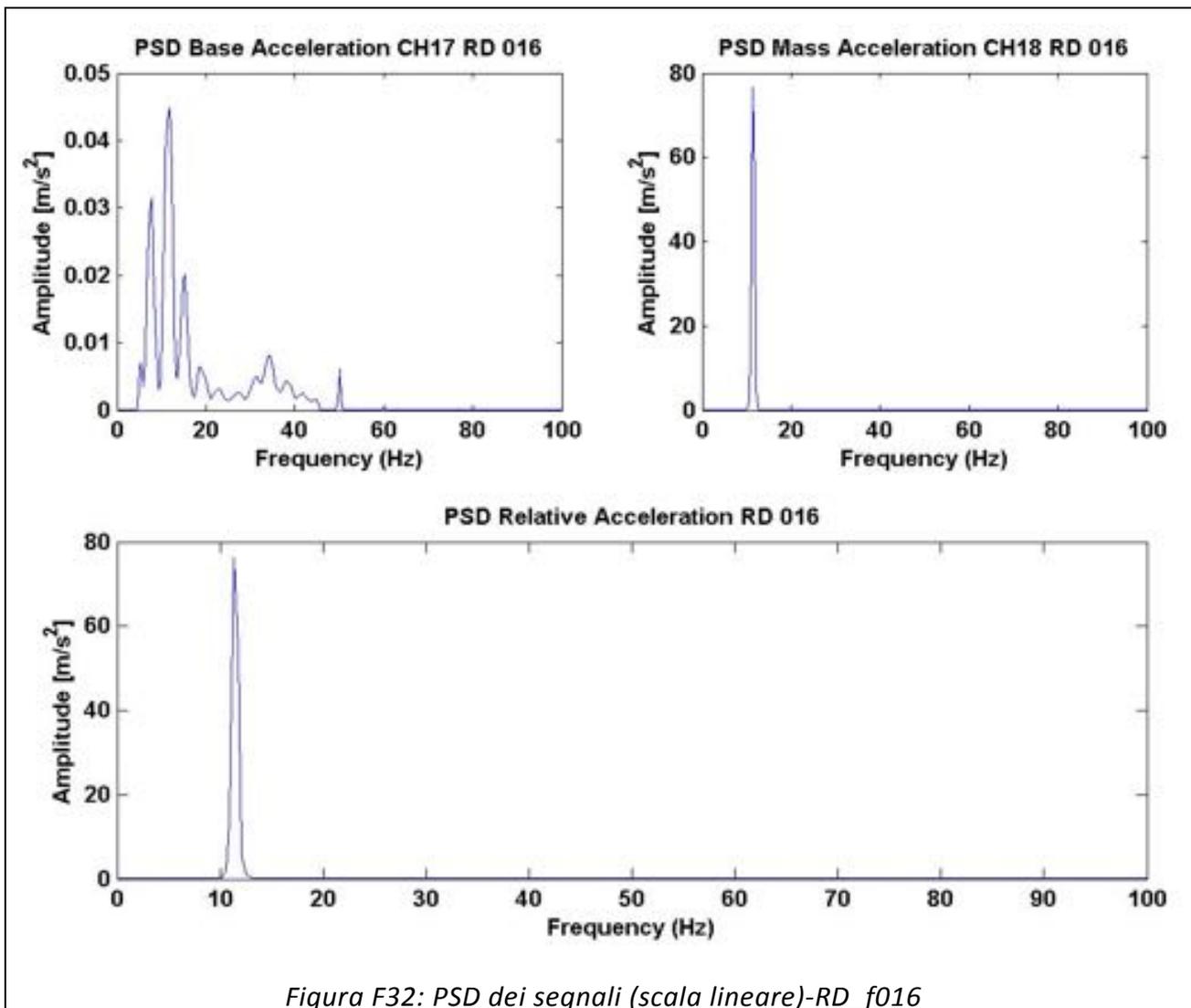


Figura F32: PSD dei segnali (scala lineare)-RD_f016

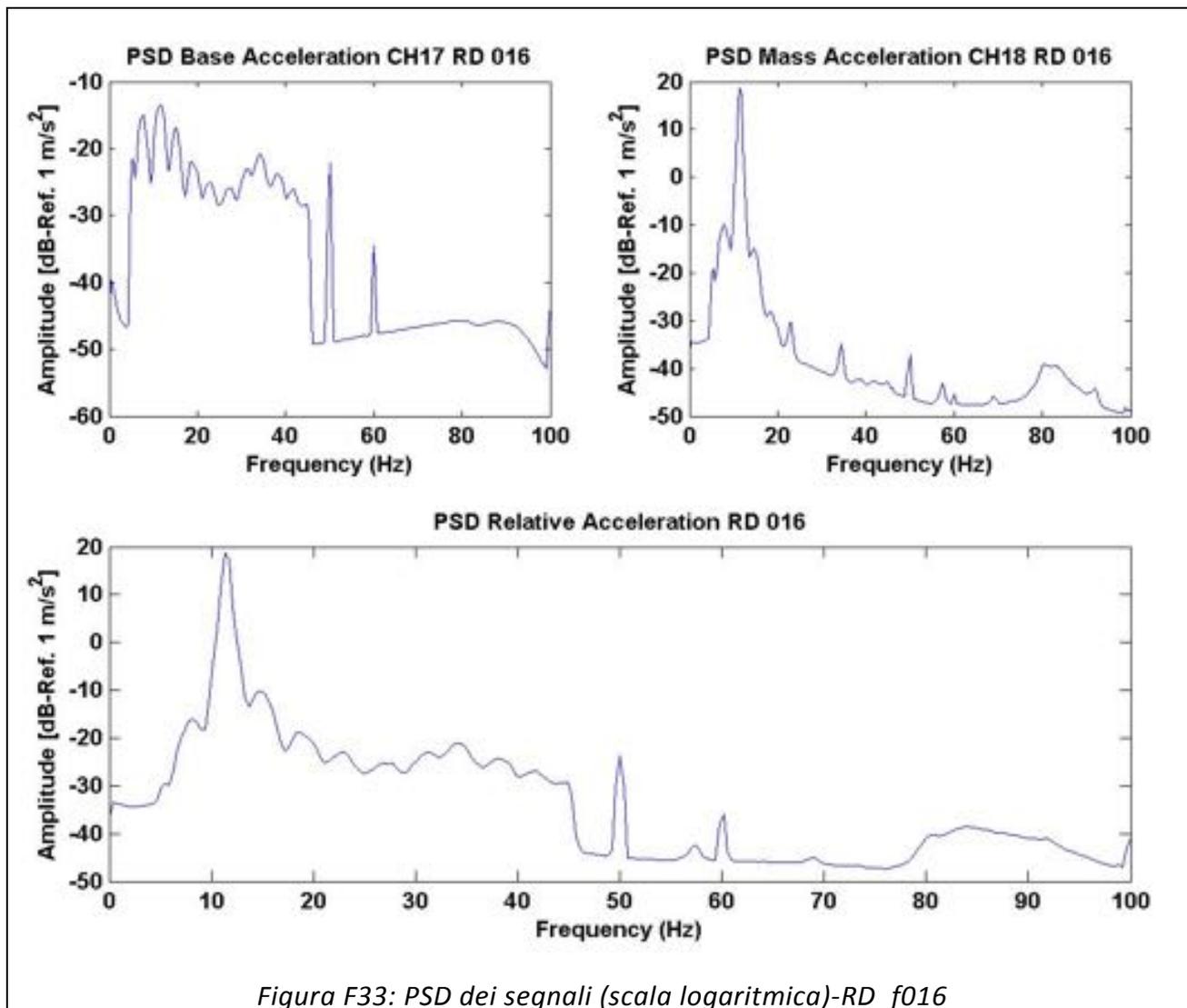
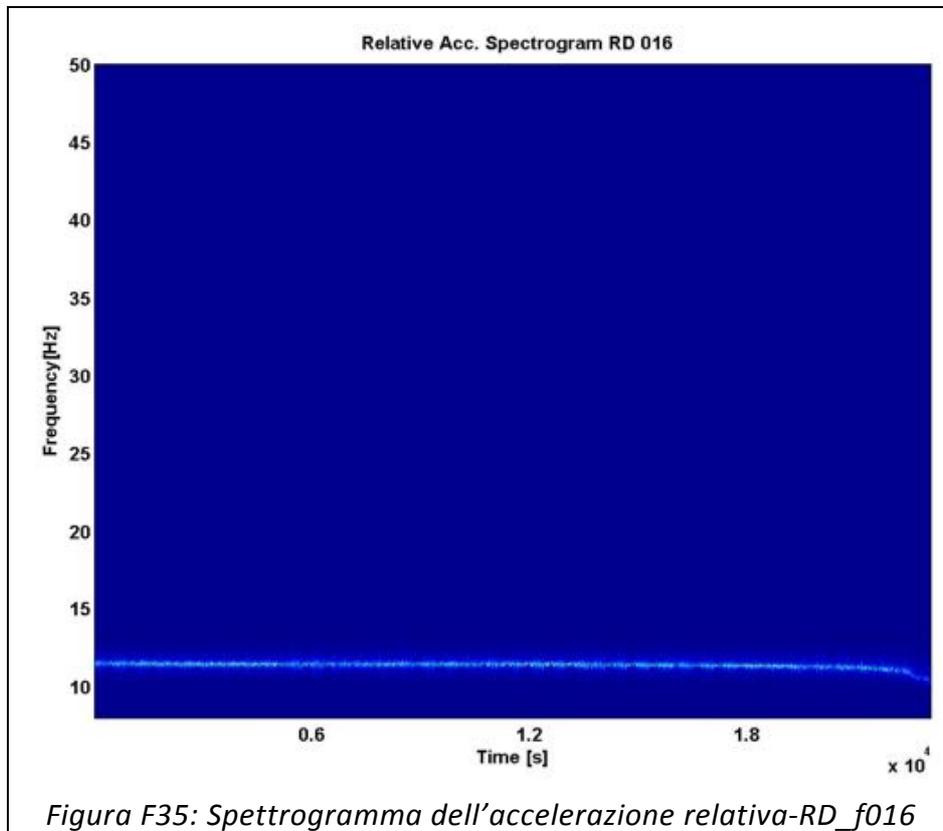
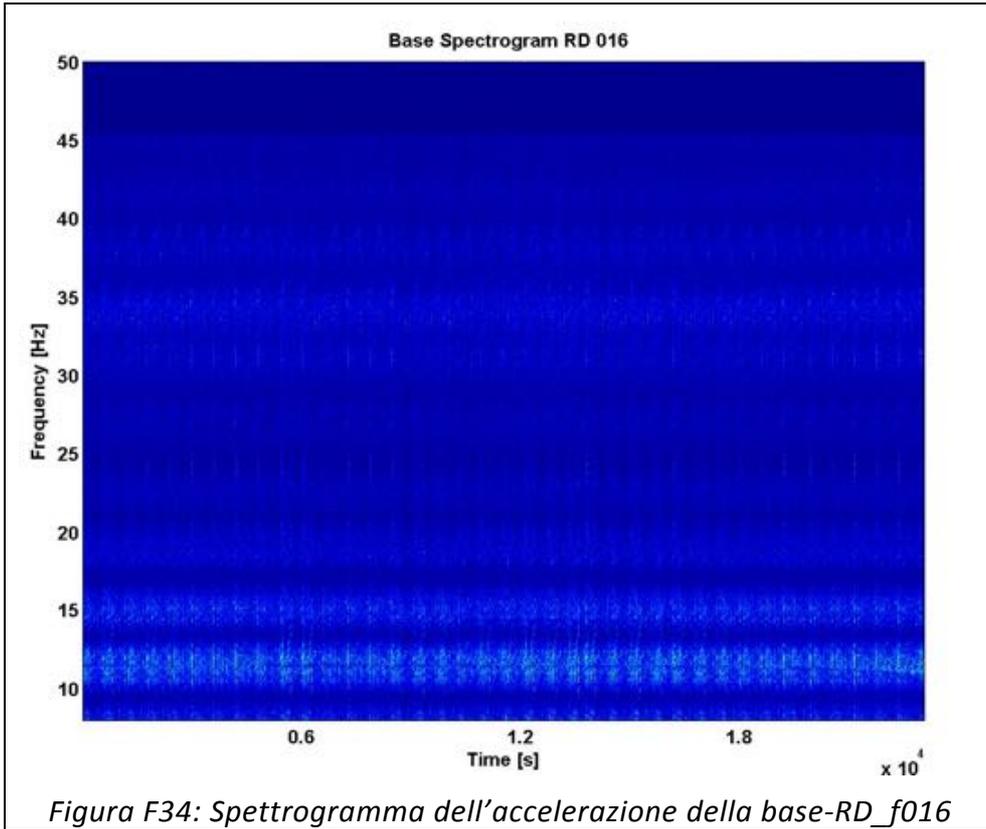


Figura F33: PSD dei segnali (scala logaritmica)-RD_f016



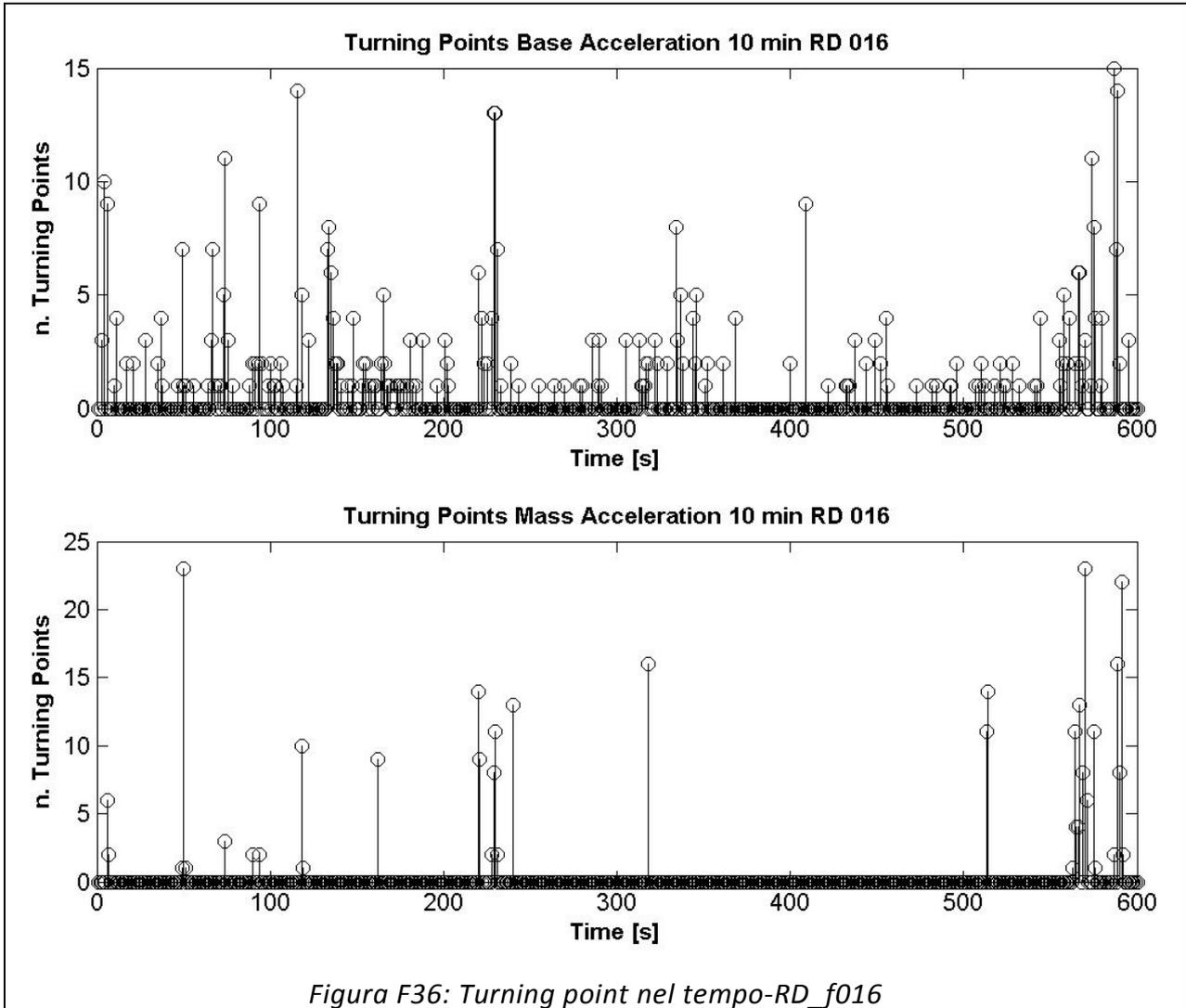
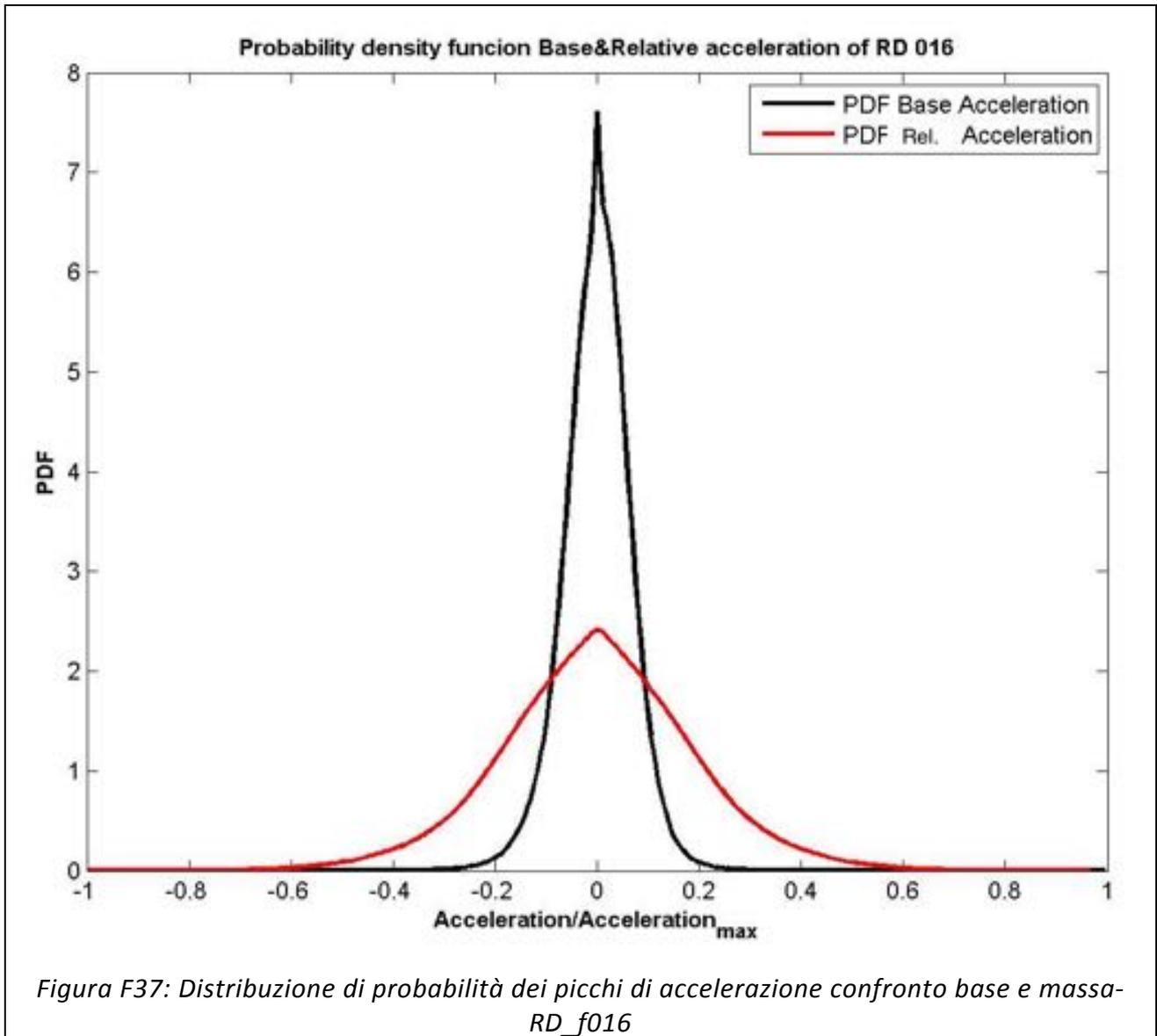


Figura F36: Turning point nel tempo-RD_f016



Provino RD_f017 (Strumentato con estensimetri)

	Media [g]	RMS [g]	Skewness	Kurtosis	Crest Factor	Frequenza media [Hz]
Accelerazione Base CH17	5,02E-09	0,056	-8,39E-02	6,679	14,557	11,72
Accelerazione Massa CH18	-1,45E-07	0,791	2,21E-02	3,652	66,553	10,94
Accelerazione Trasversale CH22	4,76E-09	0,061	-1,70E-02	11,987	9,561	33,59
Accelerazione Verticale CH23	-1,34E-07	0,752	9,57E-02	3,661	66,125	10,94
Accelerazione Longitudinale CH24	-1,11E-07	0,588	-2,73E-03	3,599	47,778	10,94
Accelerazione relativa CH17-CH18	-1,50E-07	0,794	2,15E-02	3,651	67,991	10,94

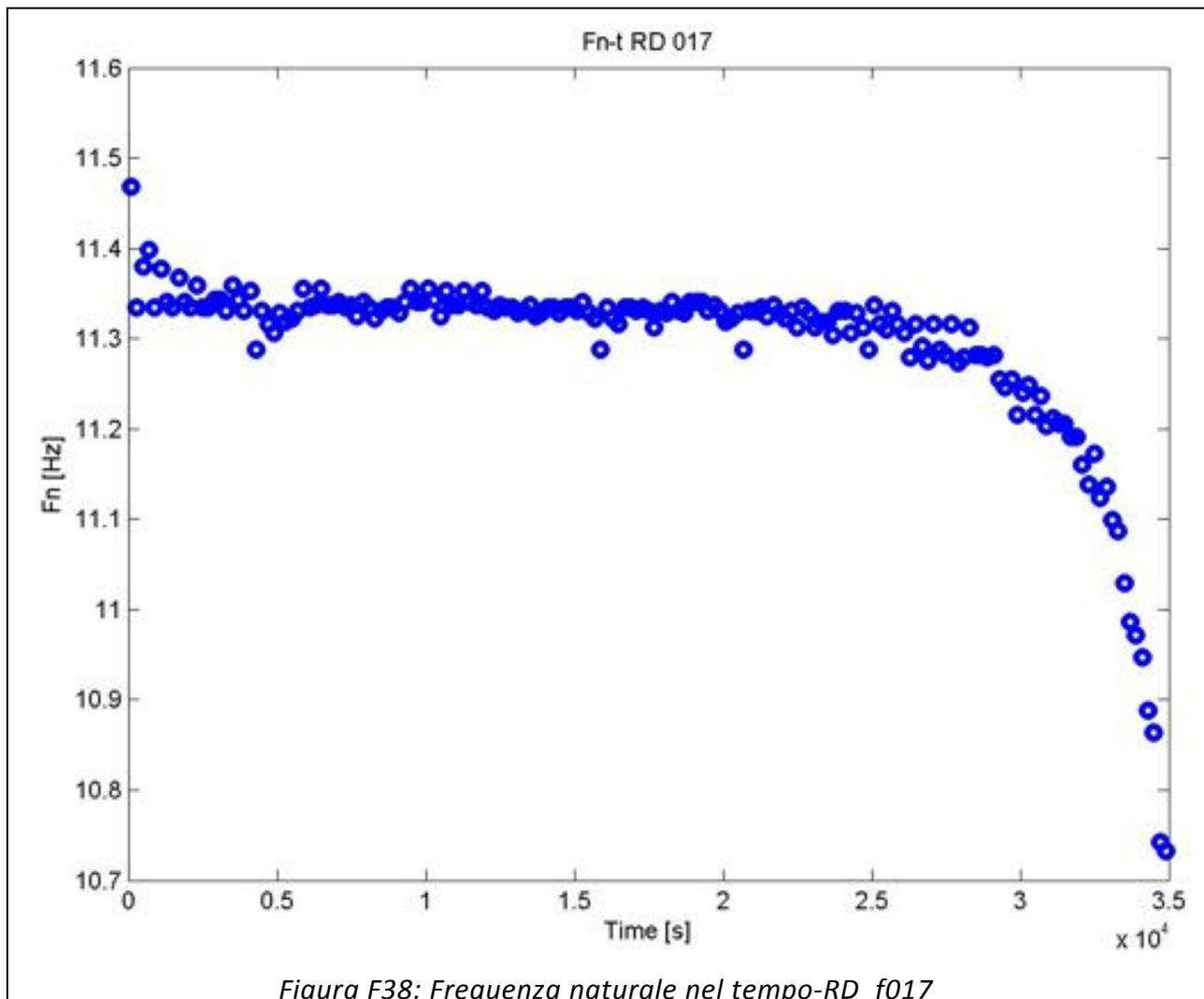


Figura F38: Frequenza naturale nel tempo-RD_f017

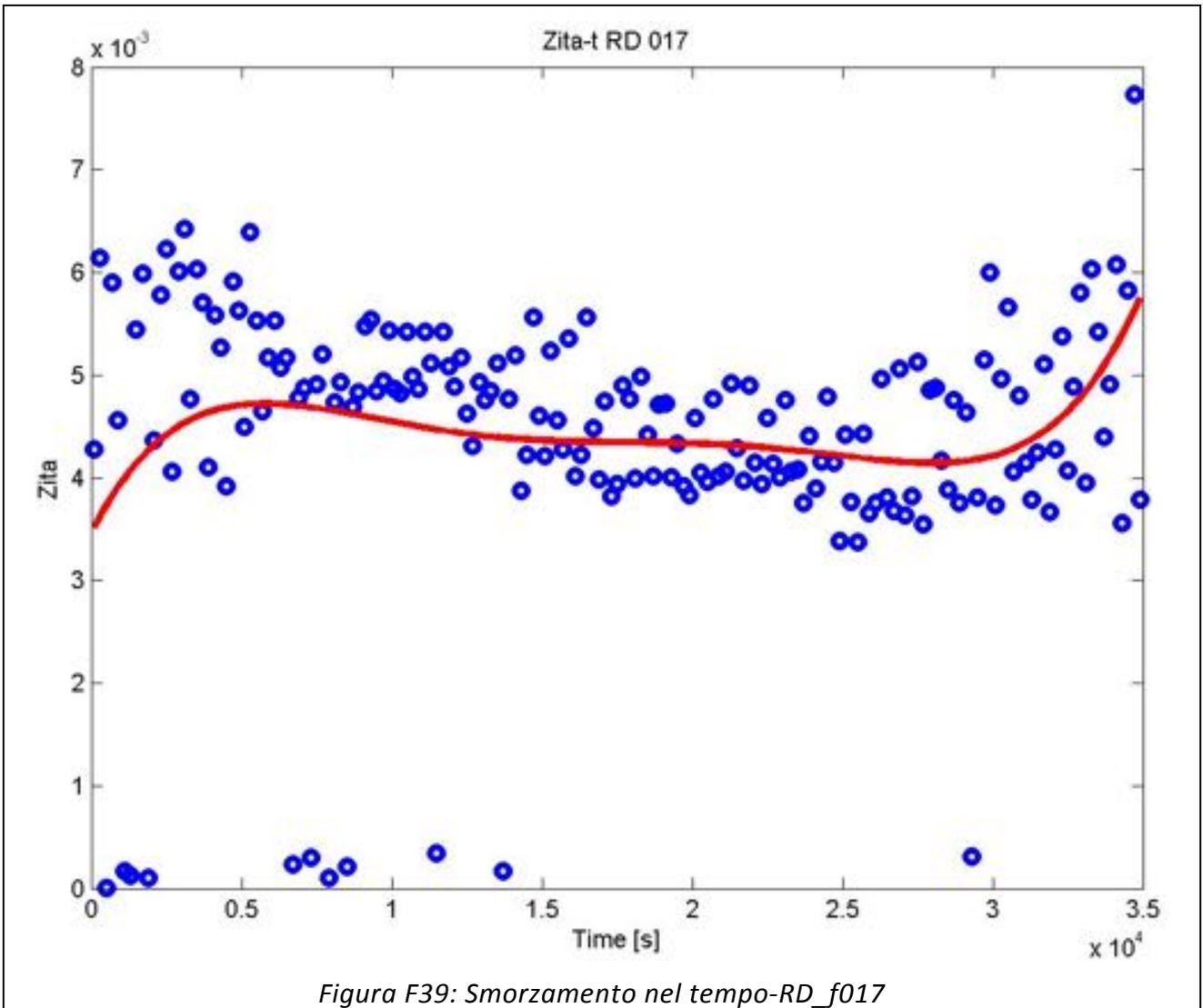
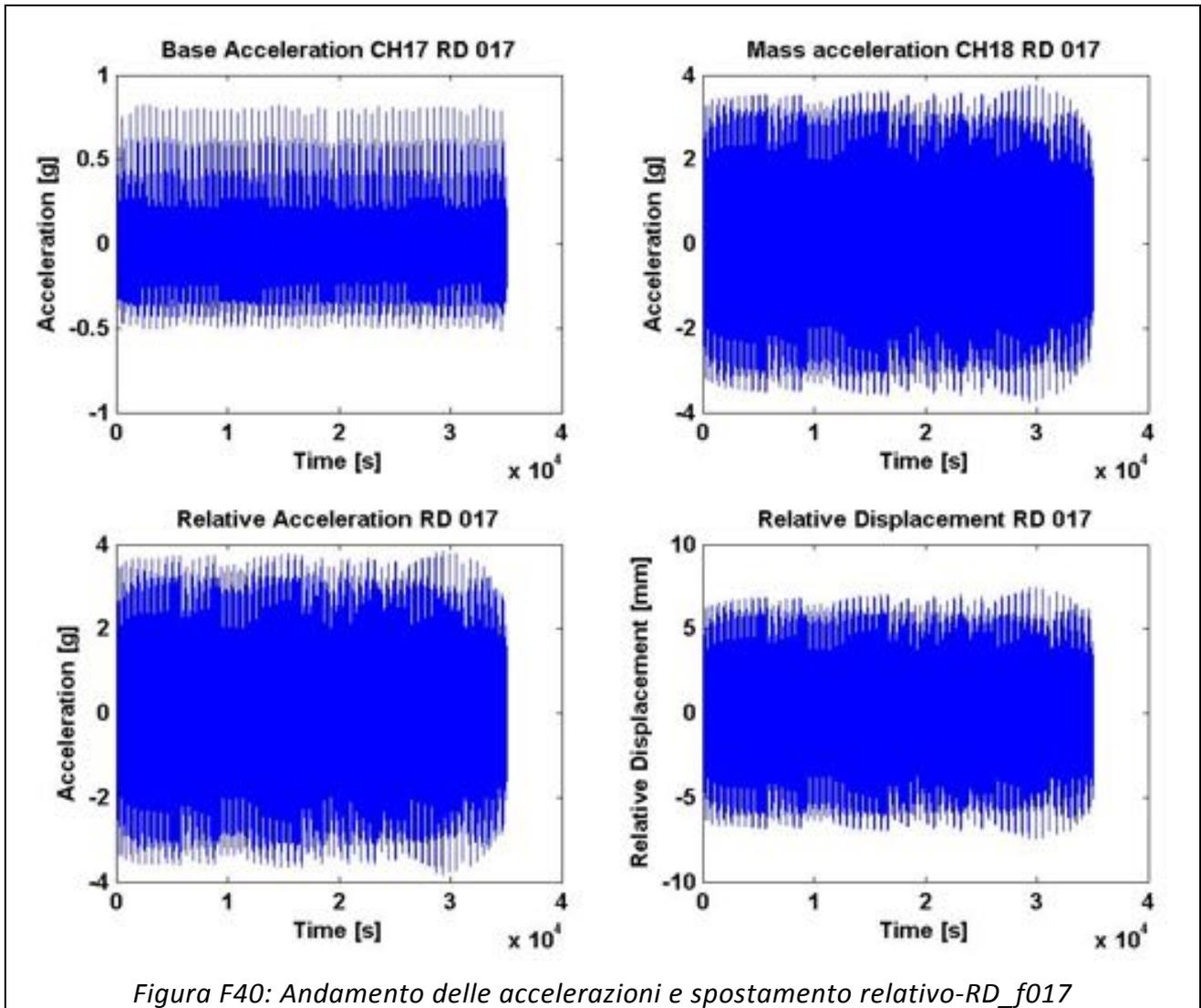


Figura F39: Smorzamento nel tempo-RD_f017



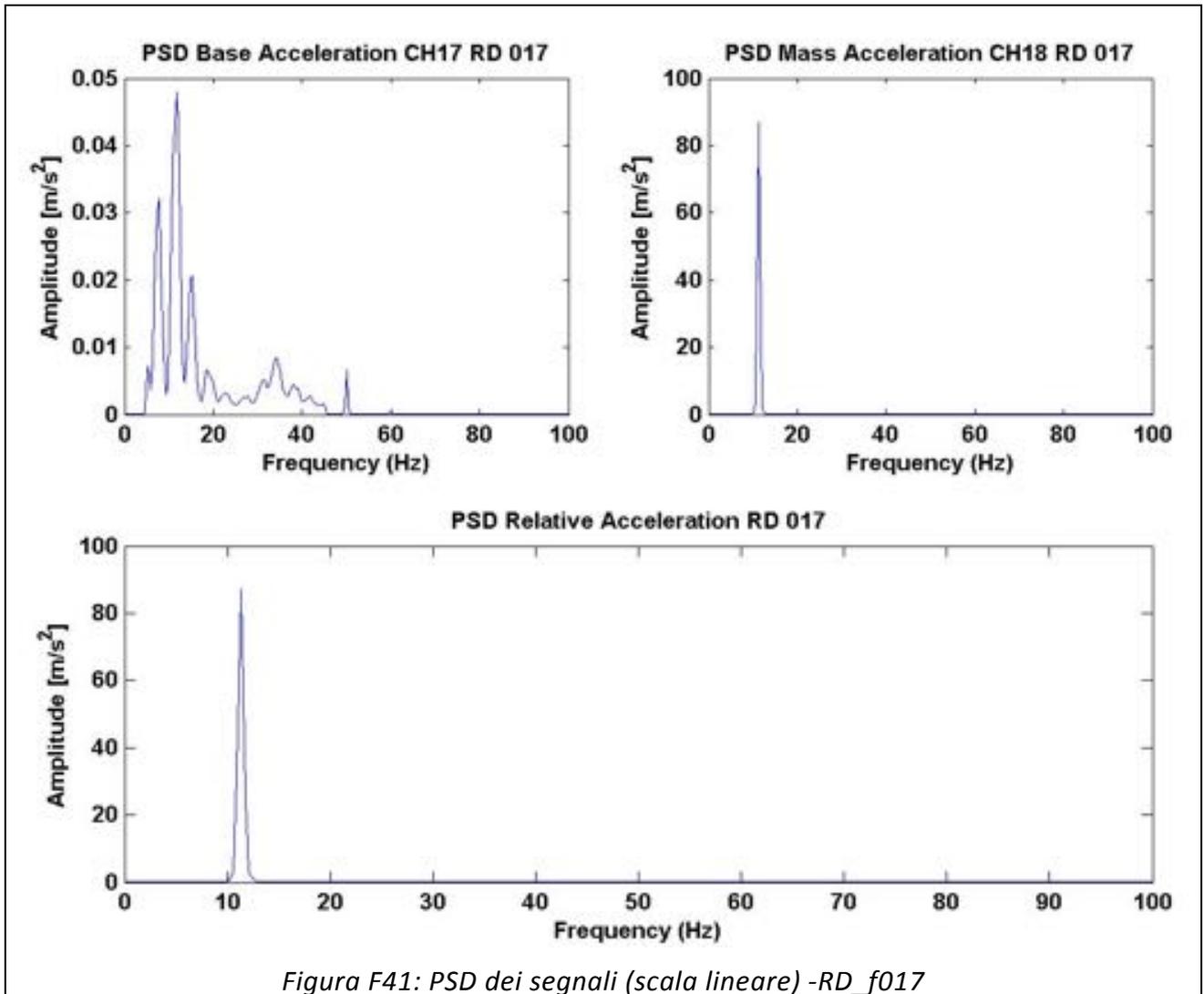
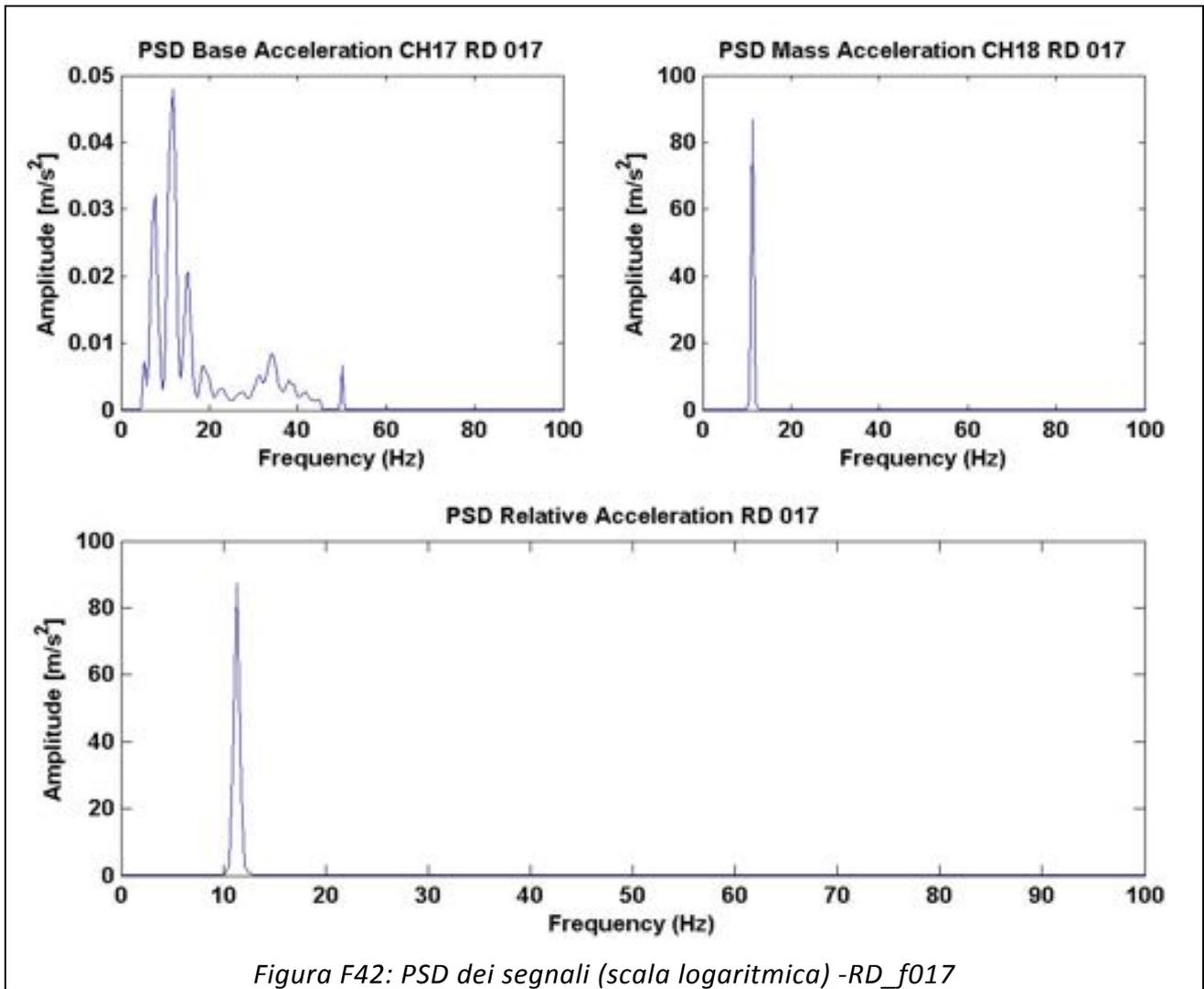
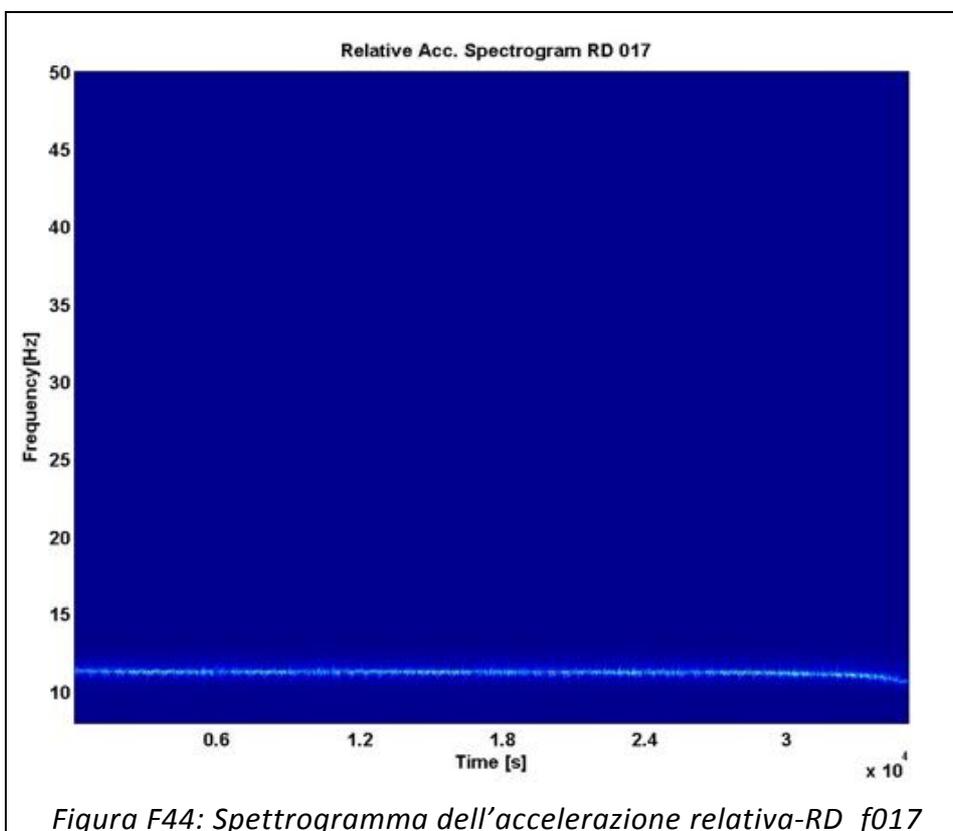
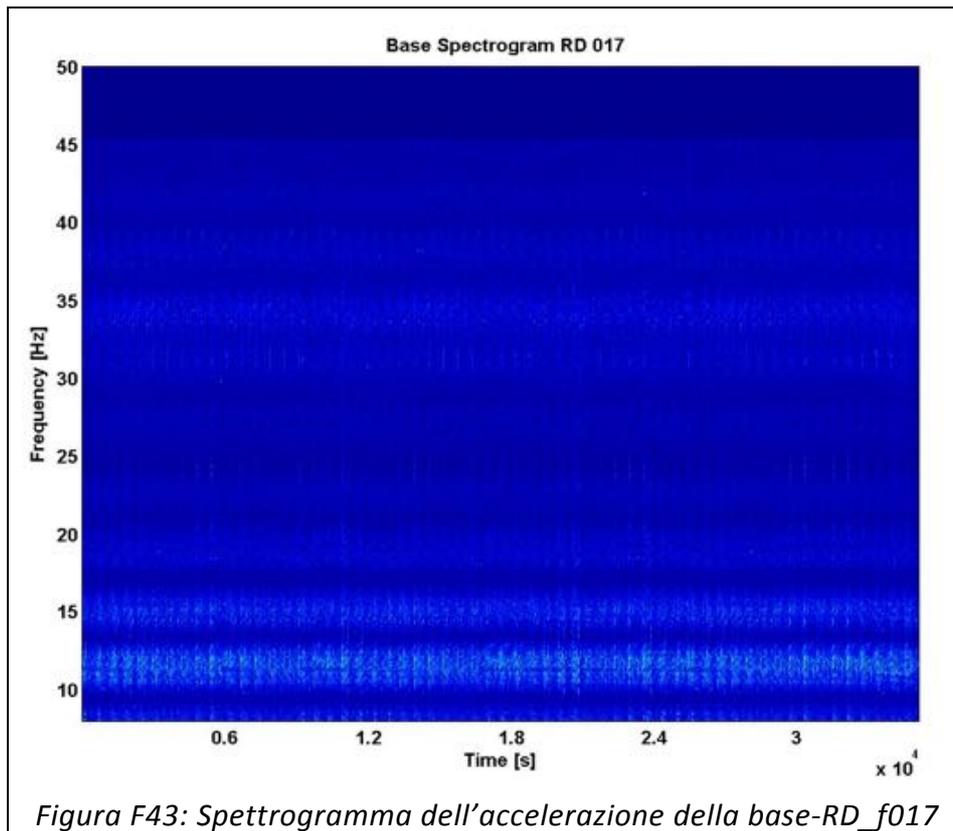
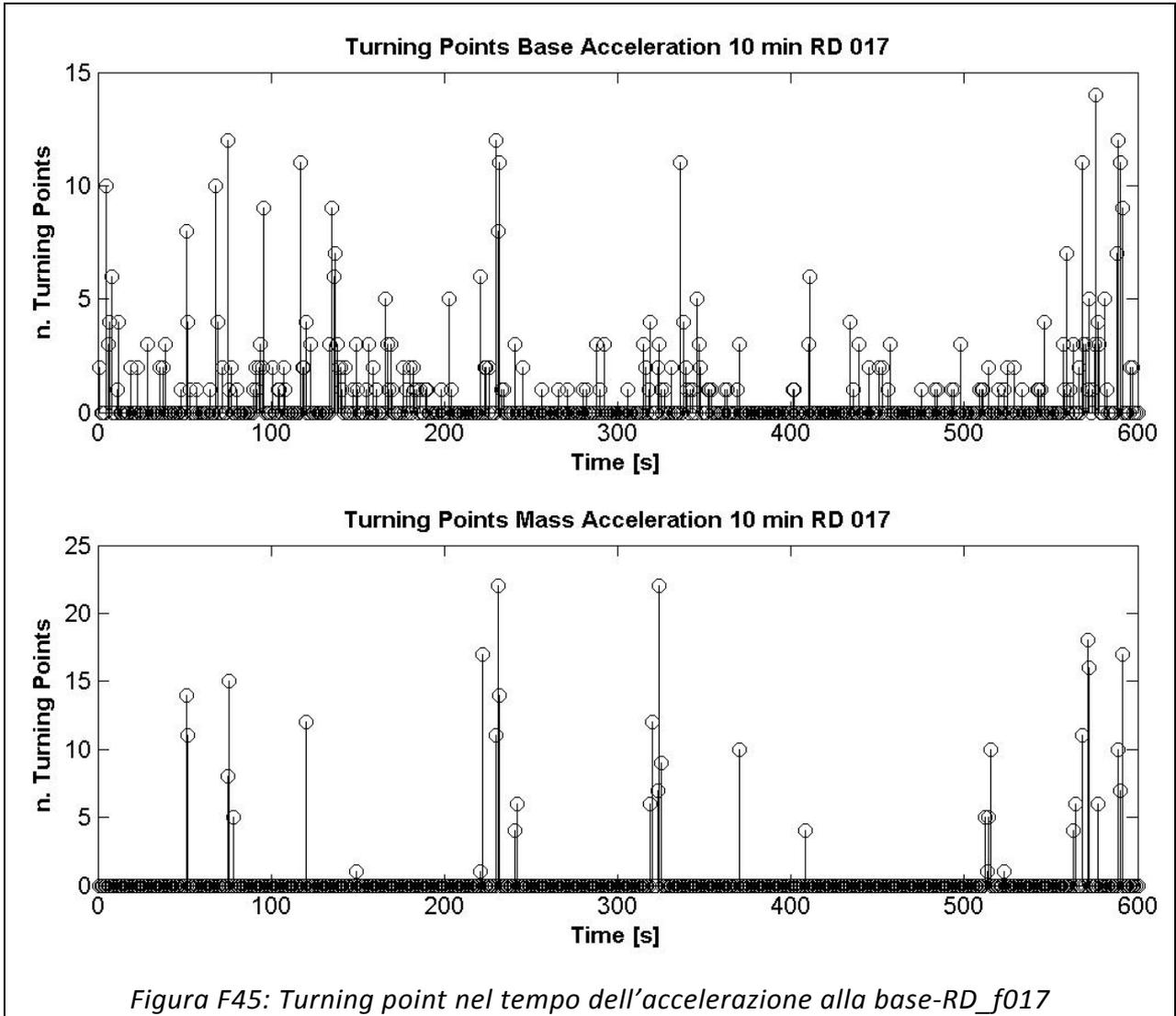
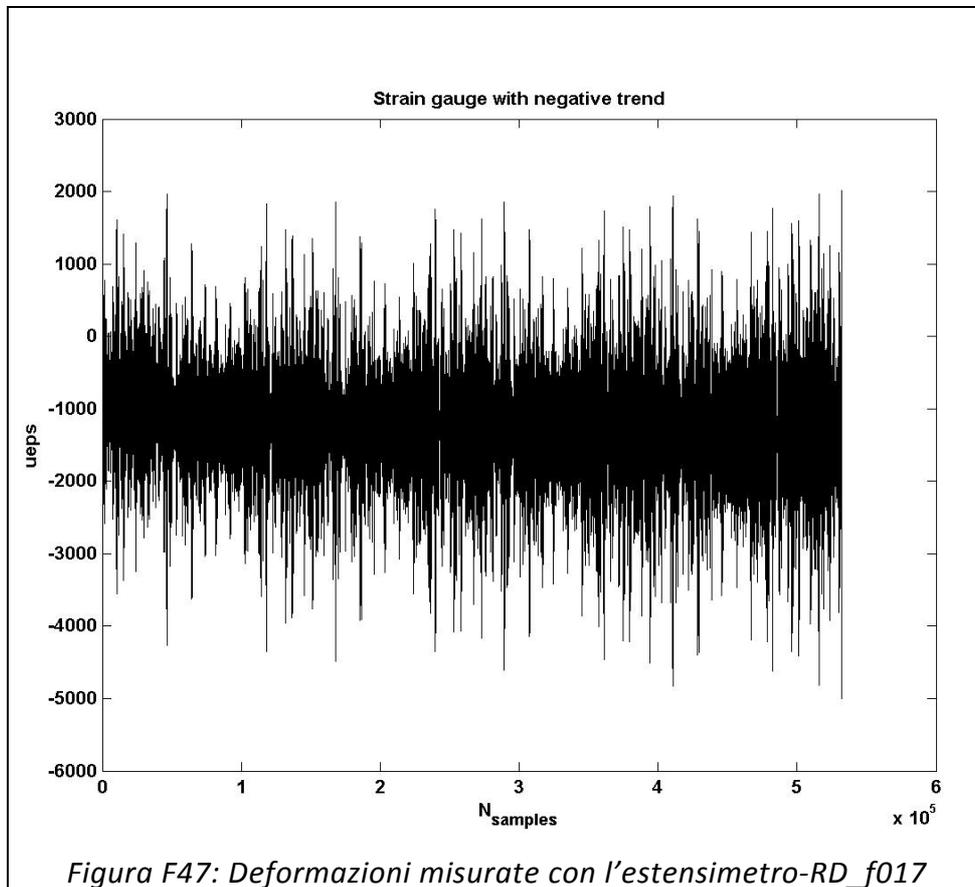
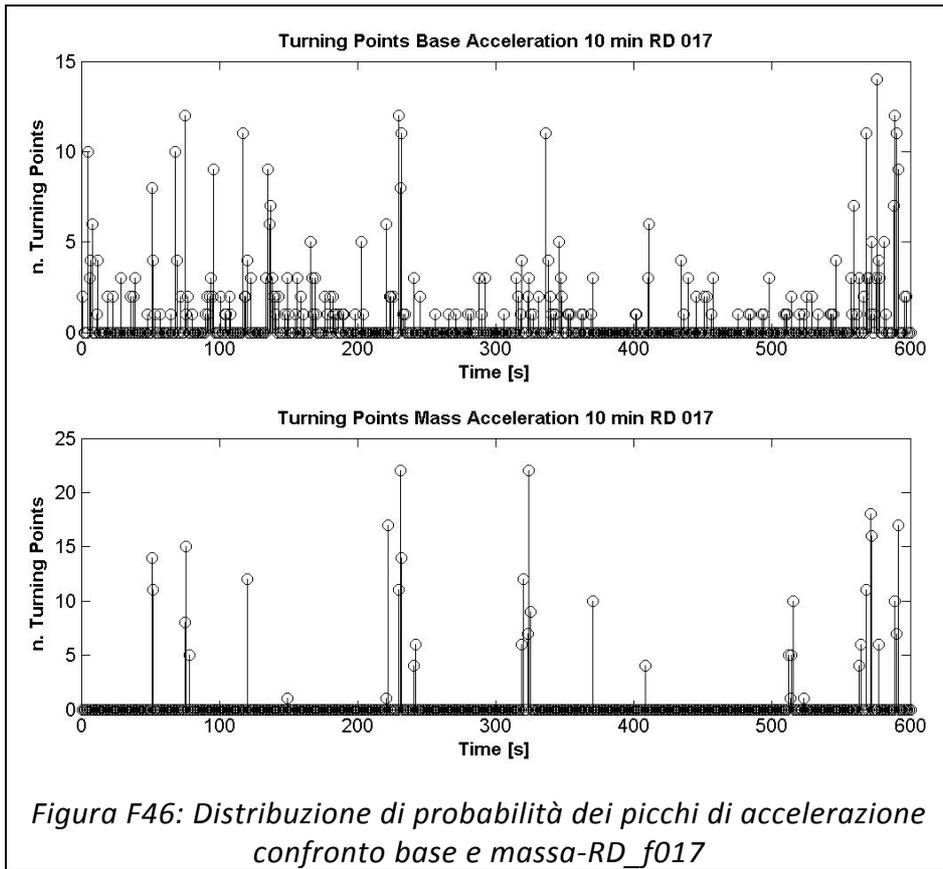


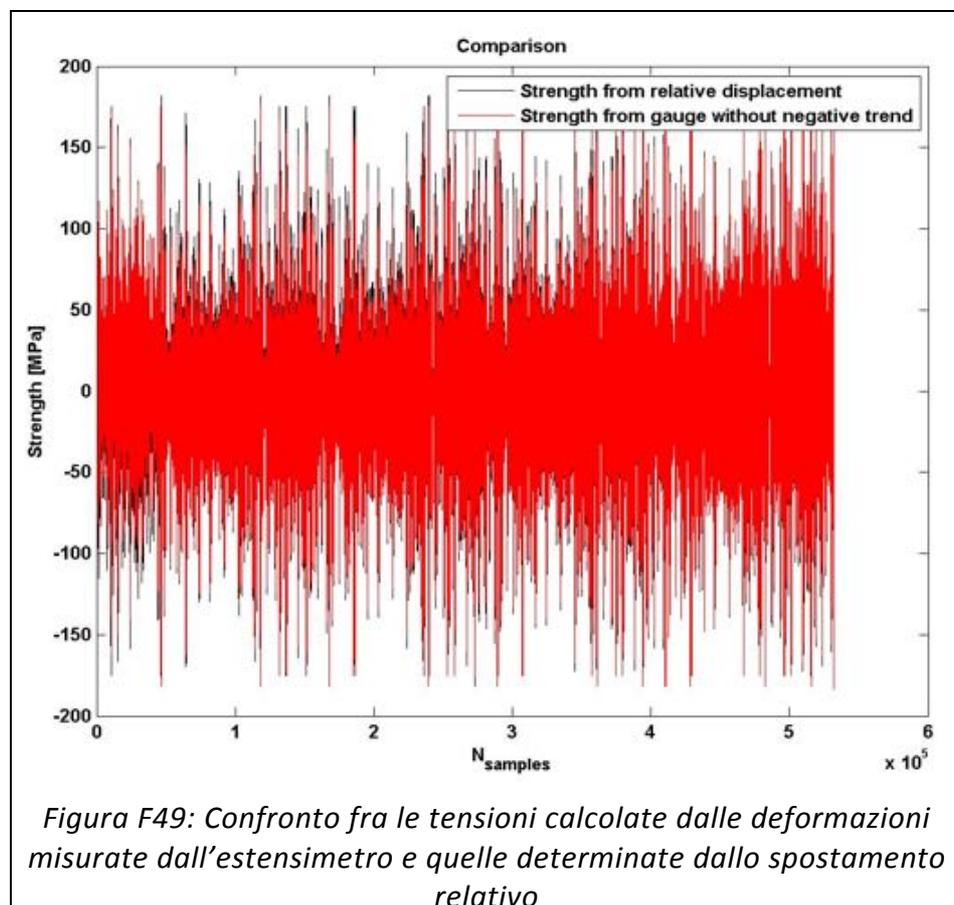
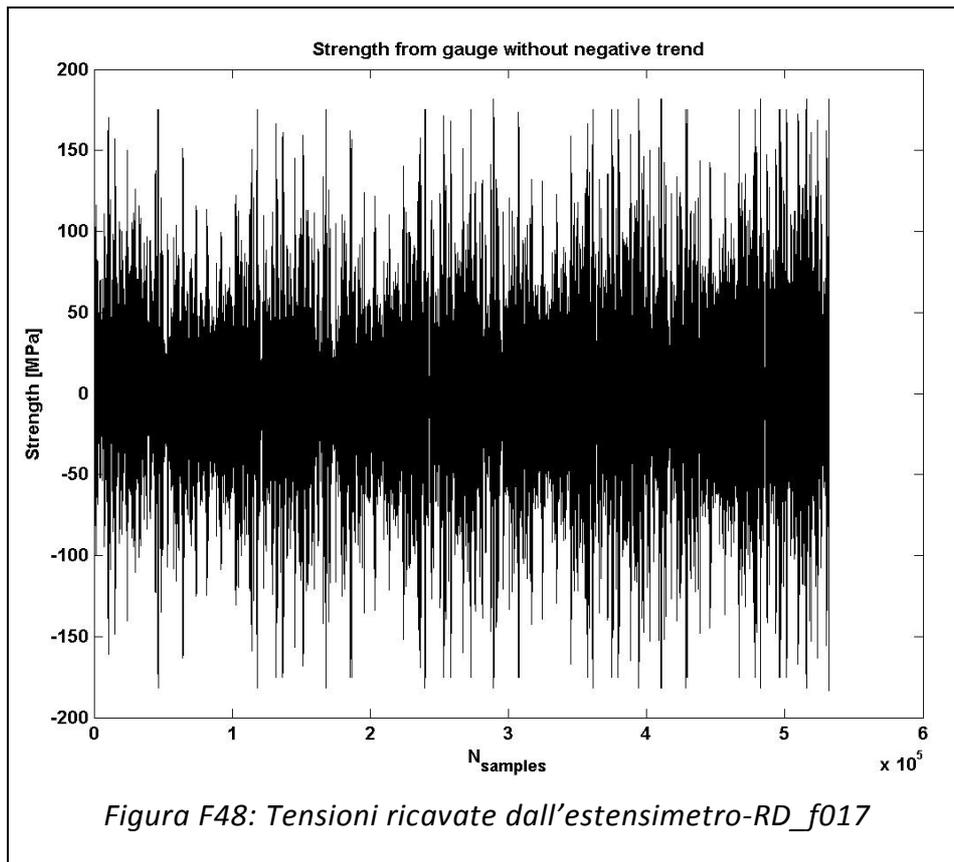
Figura F41: PSD dei segnali (scala lineare) -RD_f017











Provino RD_f018

	Media [g]	RMS [g]	Skewness	Kurtosis	Crest Factor	Frequenza media [Hz]
Accelerazione Base CH17	-3,56E-10	0,056	-1,73E-02	3,074	9,931	11,33
Accelerazione Massa CH18	3,39E-08	0,814	-3,29E-03	3,107	60,651	11,33
Accelerazione Trasversale CH22	-3,95E-08	0,145	-2,09E-03	4,974	16,019	34,77
Accelerazione Verticale CH23	2,49E-08	0,787	6,06E-02	3,102	60,536	11,33
Accelerazione Longitudinale CH24	1,91E-08	0,609	-5,43E-02	3,100	43,602	11,33
Accelerazione relativa CH17-CH18	3,42E-08	0,815	-3,88E-03	3,102	60,728	11,33

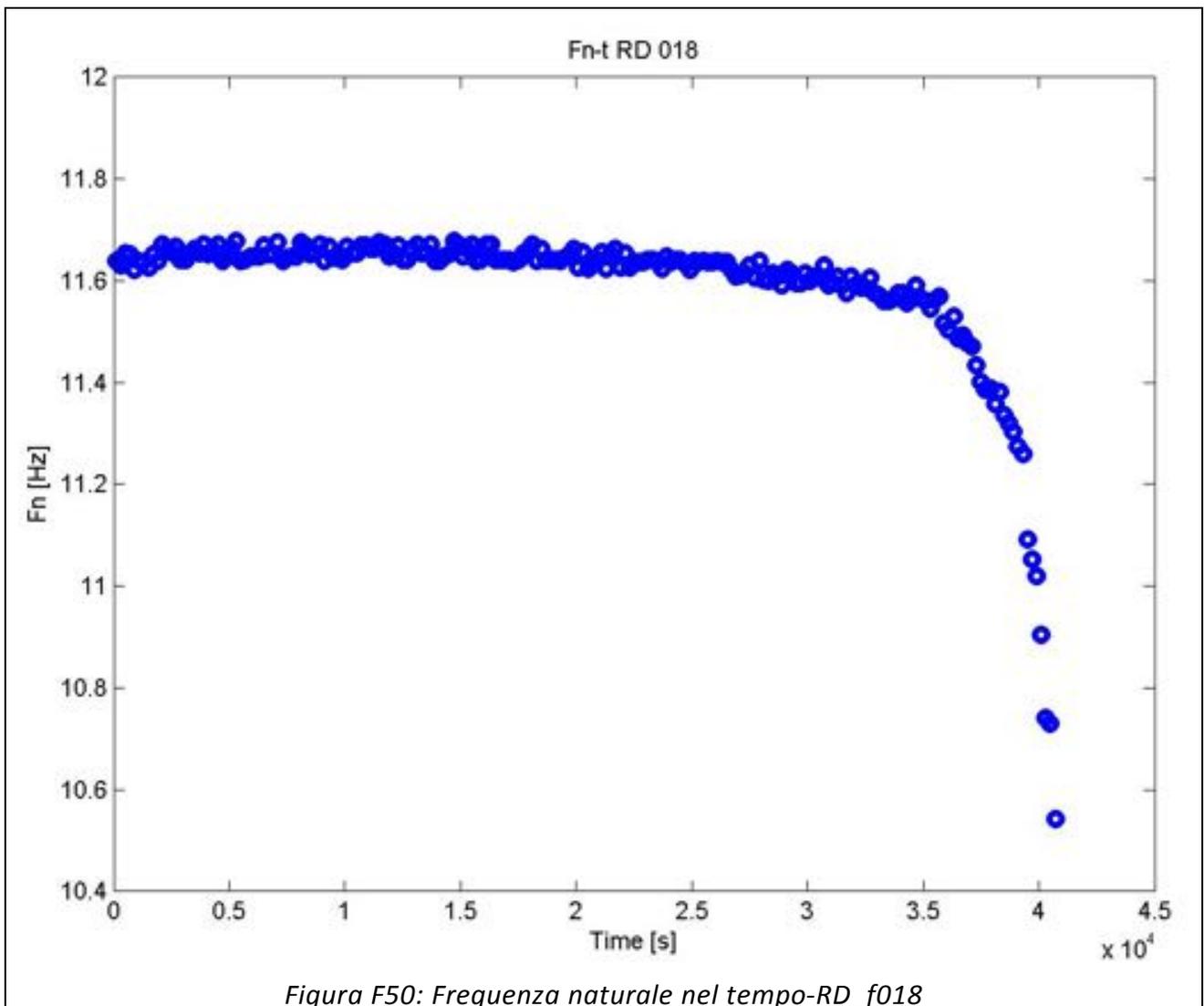
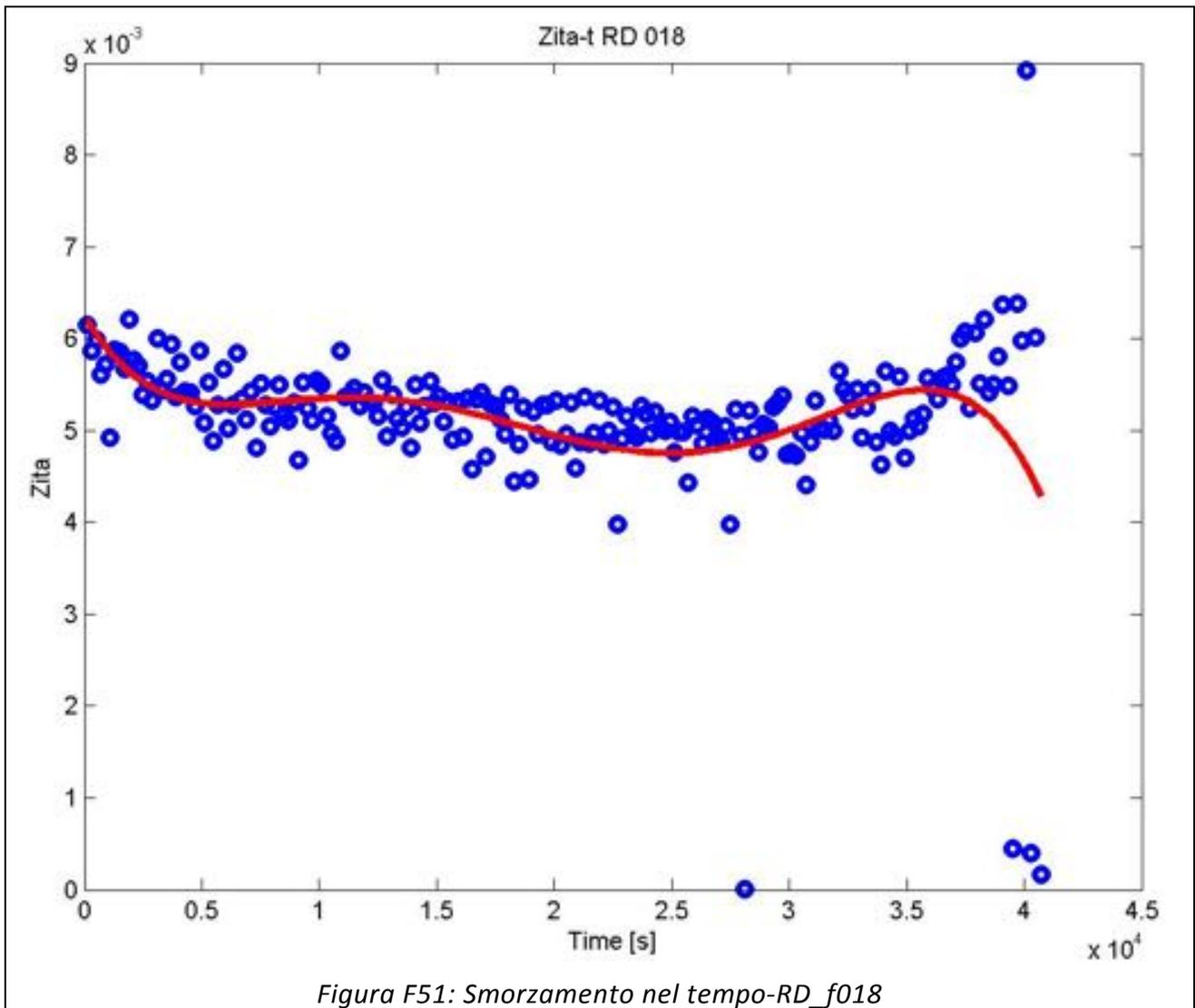


Figura F50: Frequenza naturale nel tempo-RD_f018



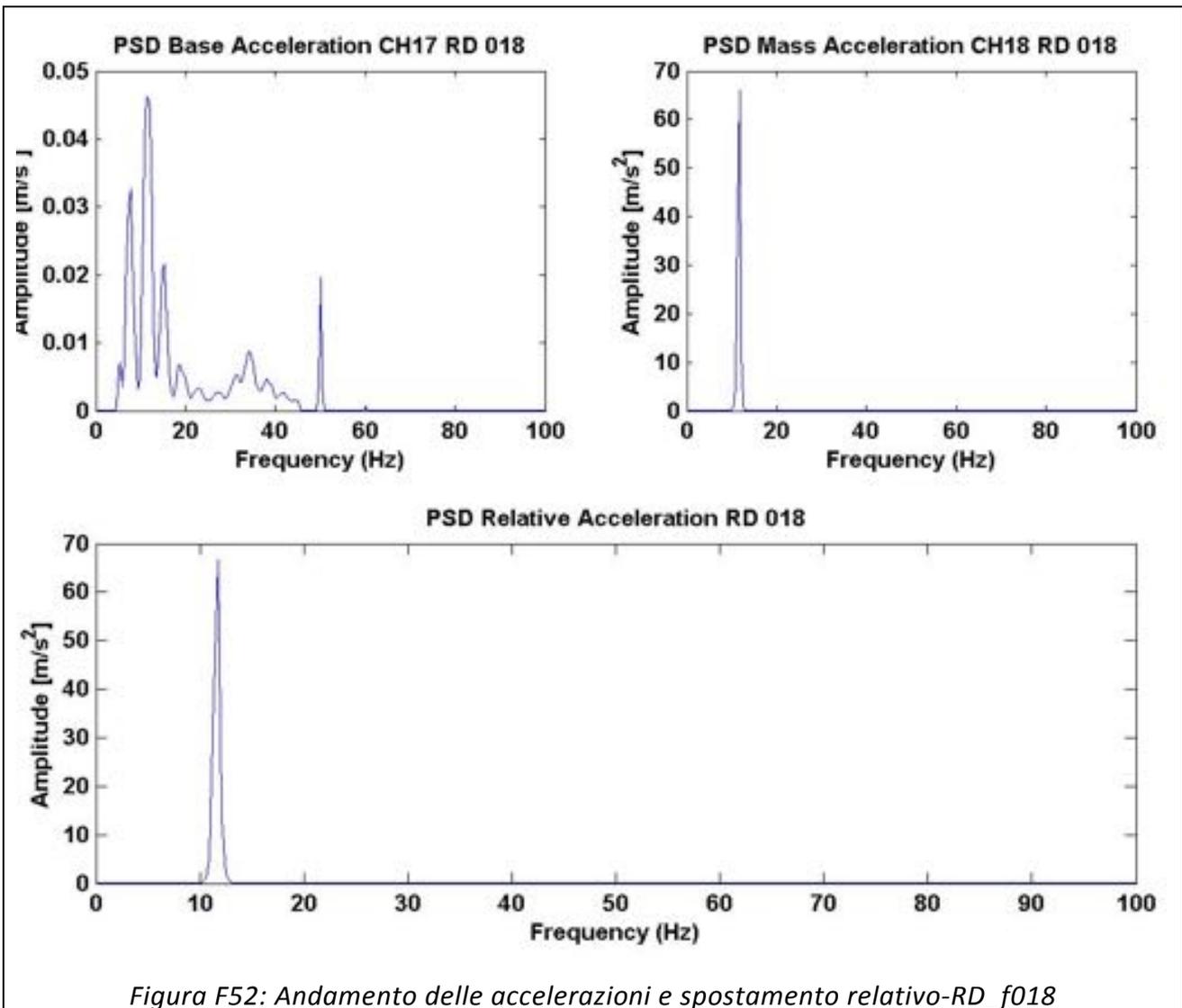


Figura F52: Andamento delle accelerazioni e spostamento relativo-RD_f018

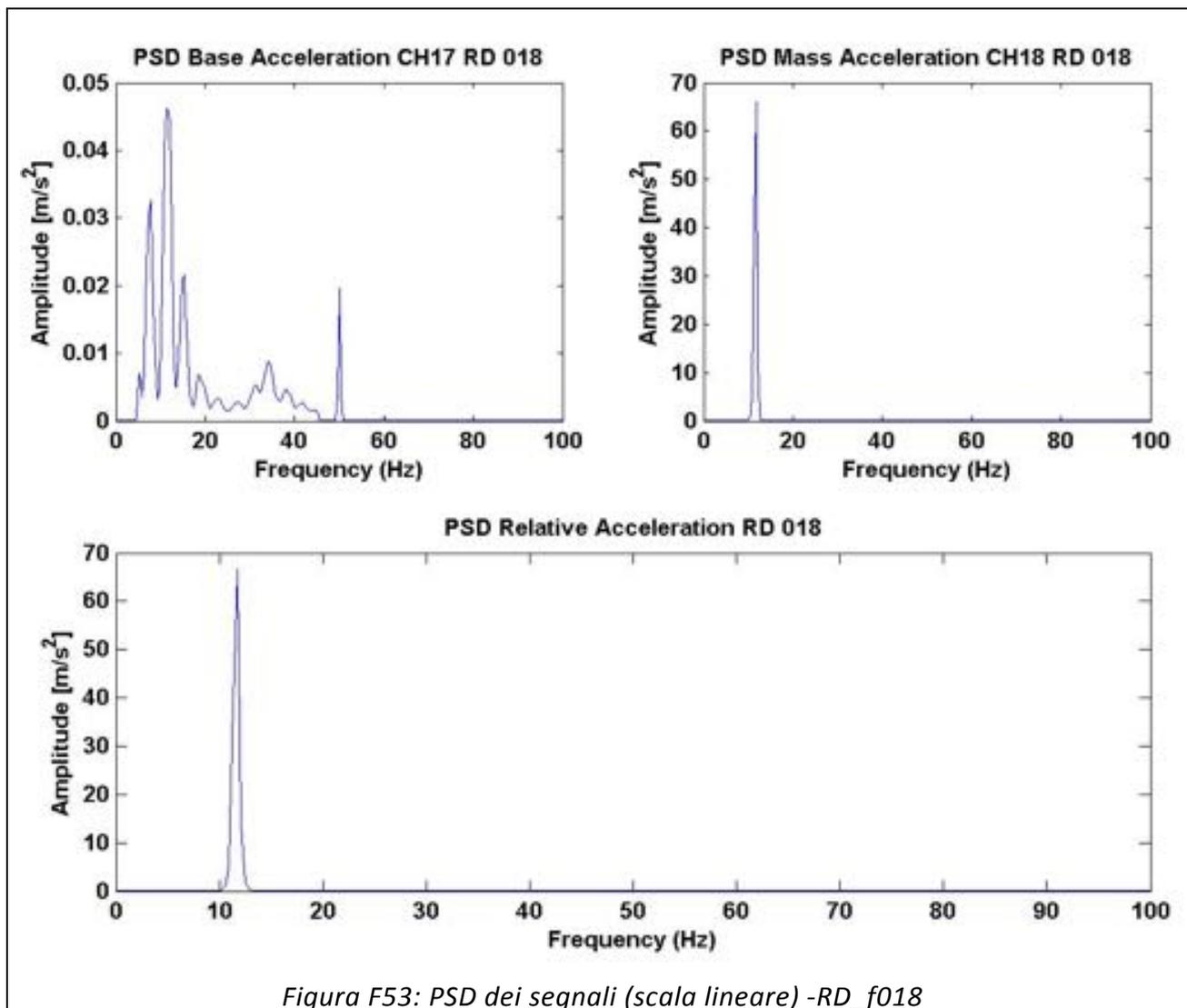


Figura F53: PSD dei segnali (scala lineare) -RD_f018

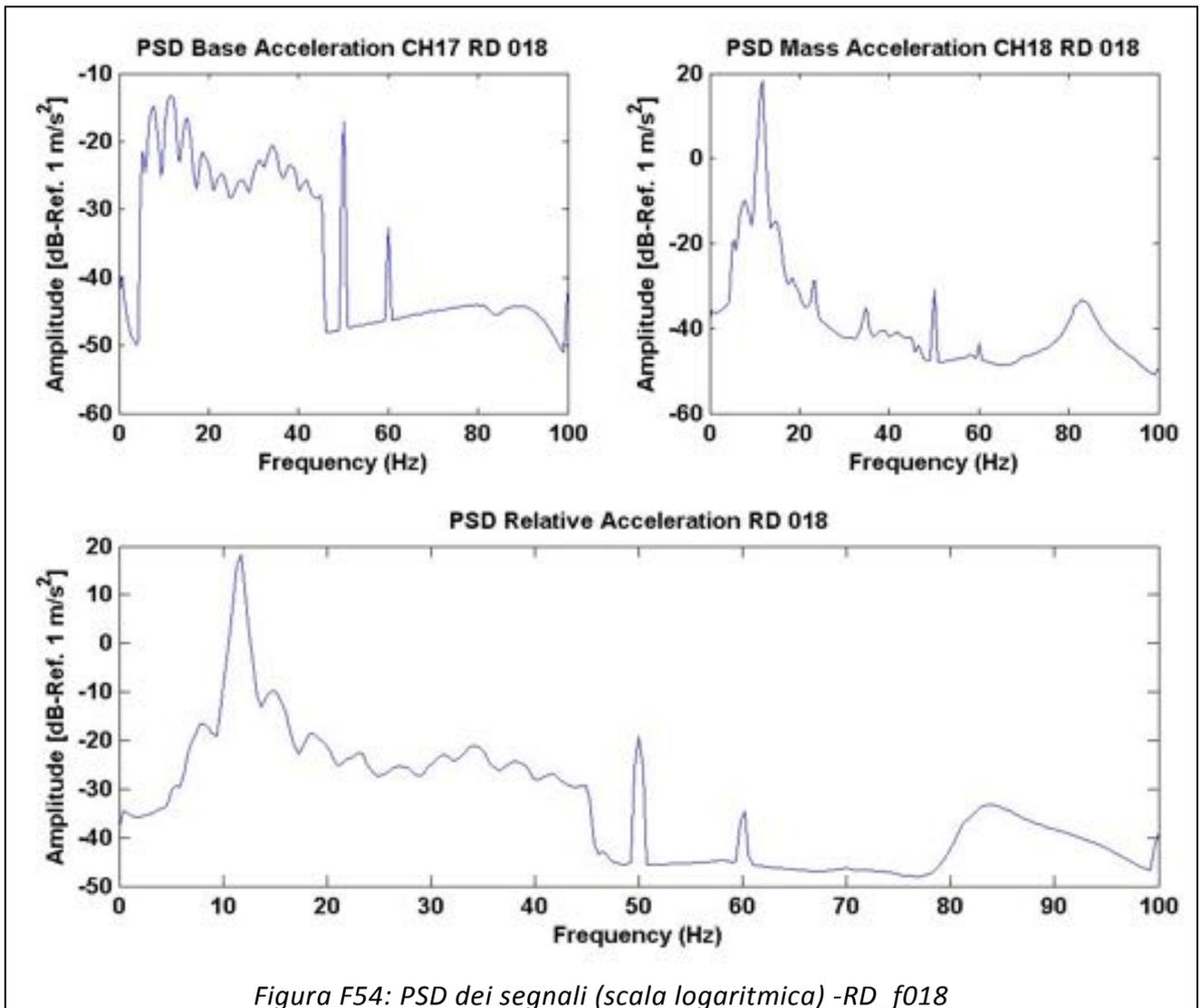
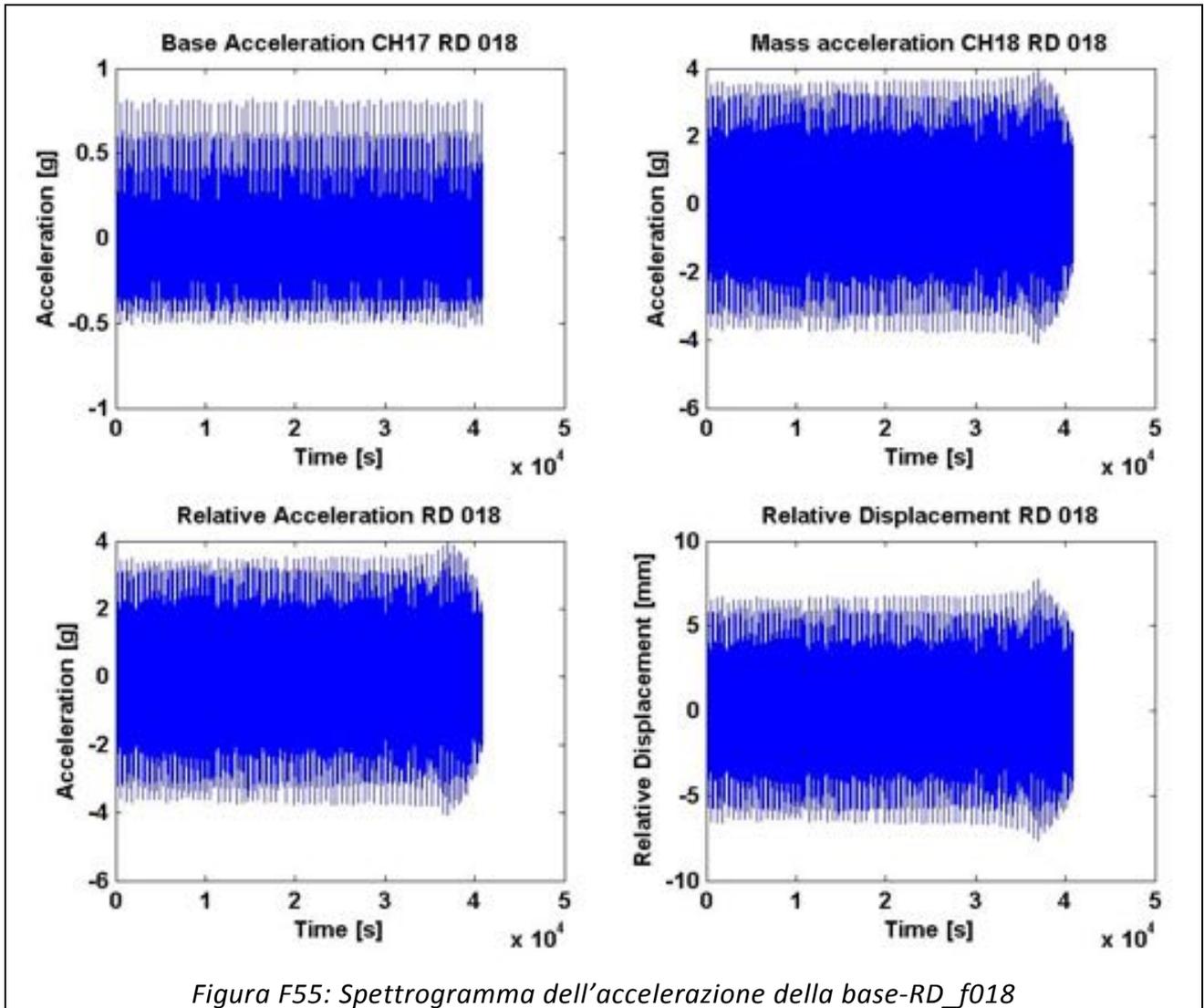
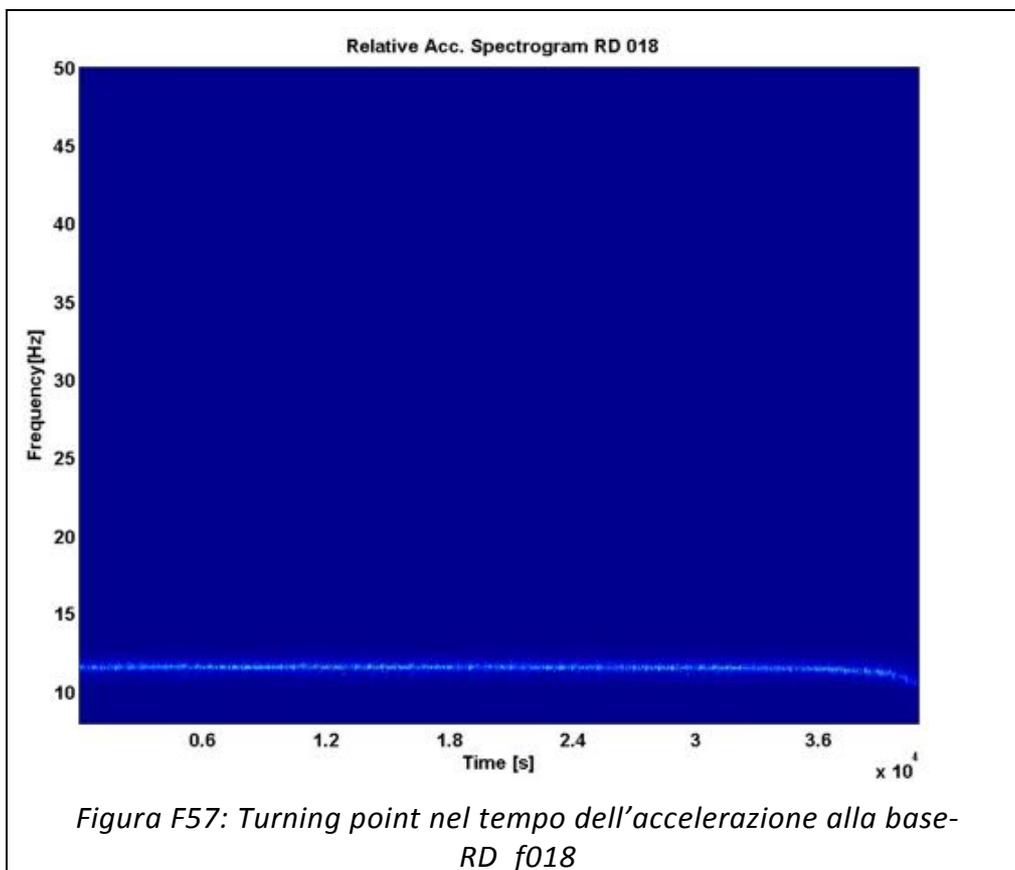
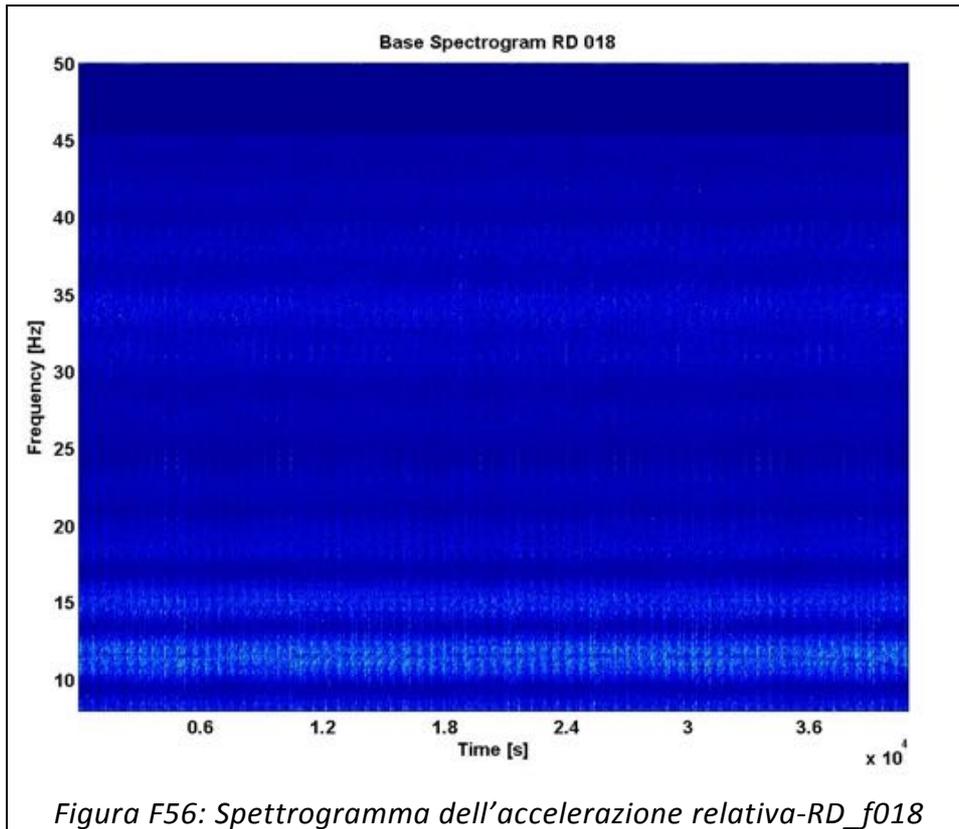
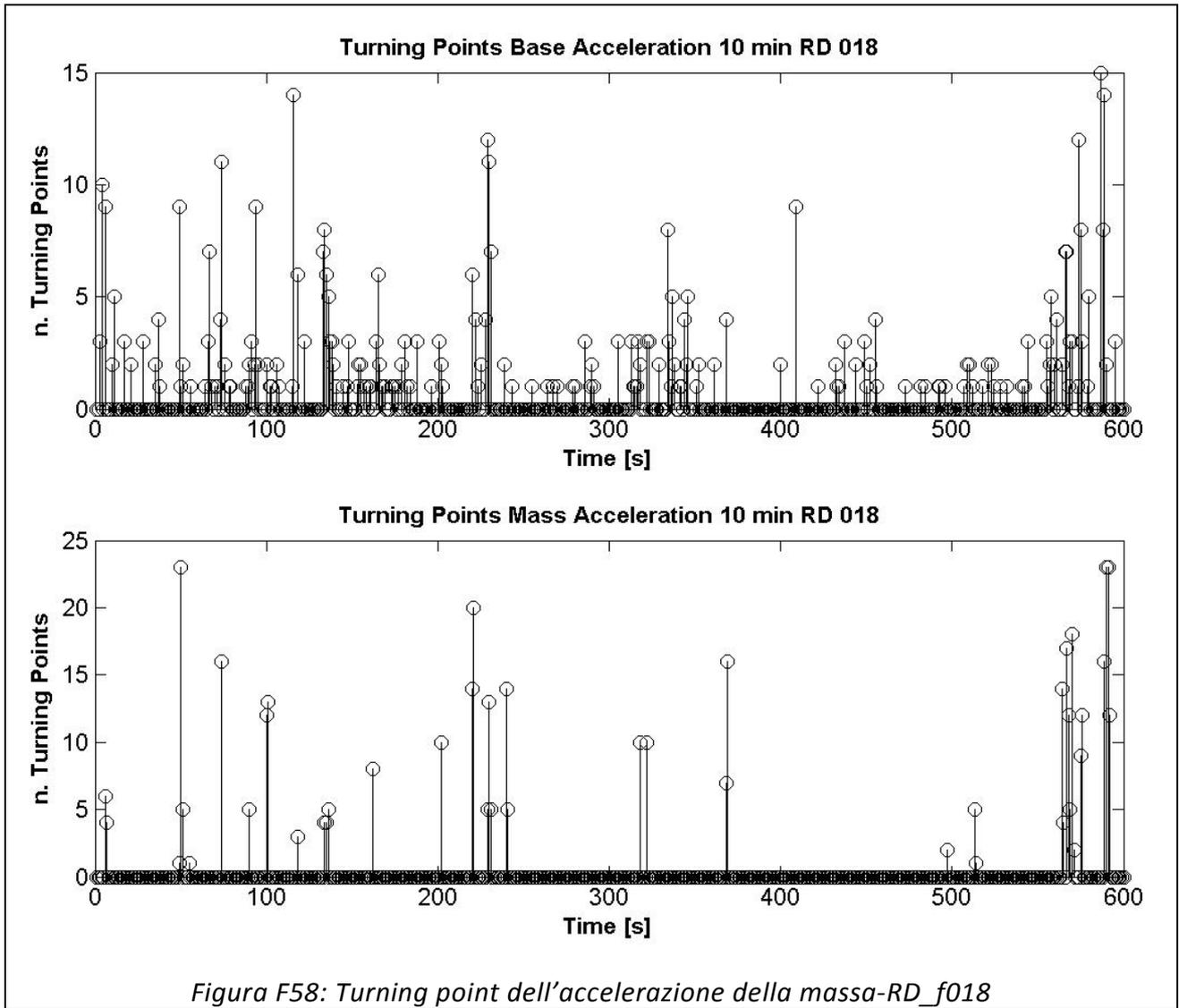
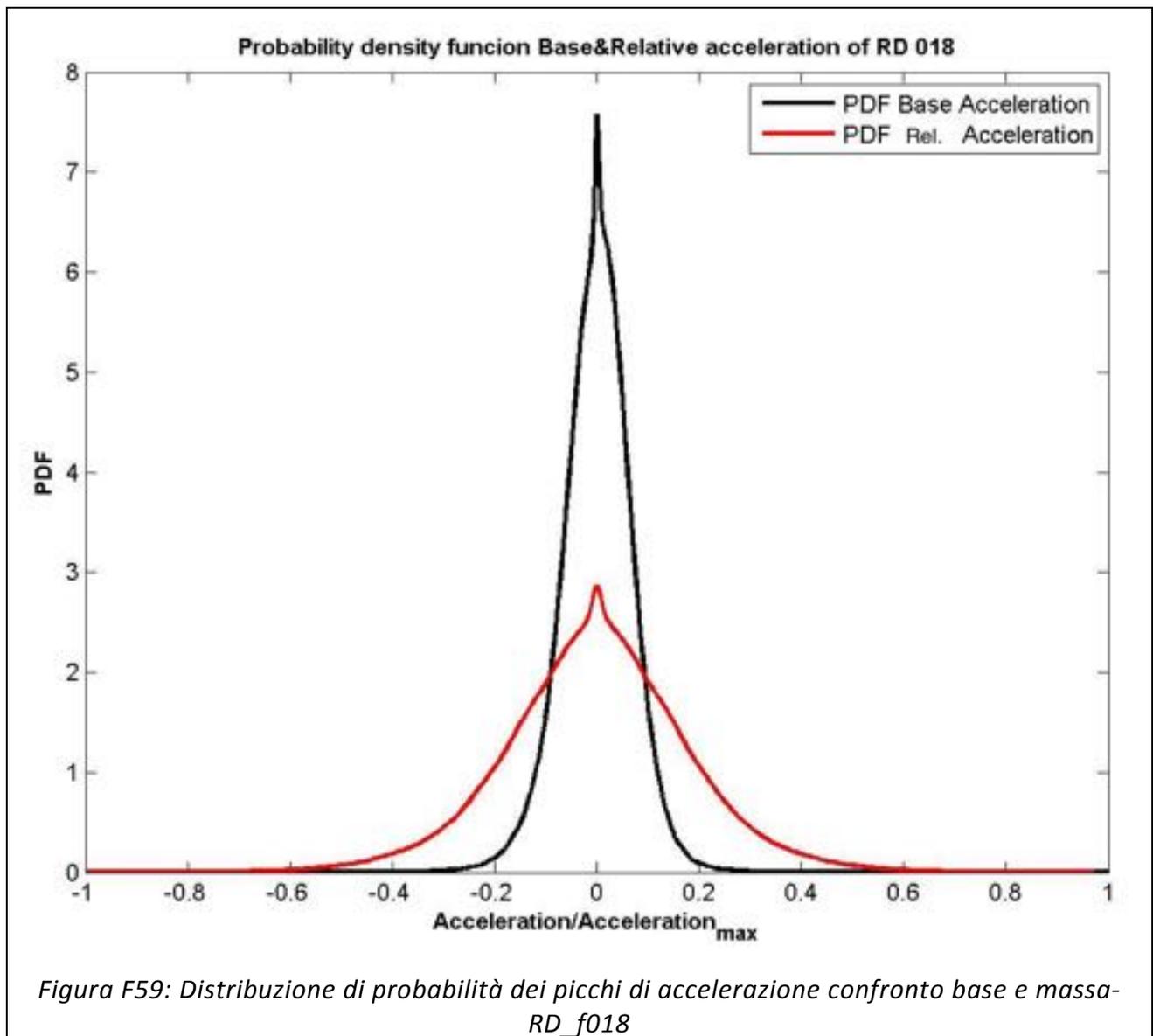


Figura F54: PSD dei segnali (scala logaritmica) -RD_f018









Provino GS_f071

	Media [g]	RMS [g]	Skewness	Kurtosis	Crest Factor	Frequenza media [Hz]
Accelerazione Base CH17	-3,56E-10	0,056	-1,73E-02	3,074	9,931	11,33
Accelerazione Massa CH18	3,39E-08	0,814	-3,29E-03	3,107	60,651	11,33
Accelerazione Trasversale CH22	-3,95E-08	0,145	-2,09E-03	4,974	16,019	34,77
Accelerazione Verticale CH23	2,49E-08	0,787	6,06E-02	3,102	60,536	11,33
Accelerazione Longitudinale CH24	1,91E-08	0,609	-5,43E-02	3,100	43,602	11,33
Accelerazione relativa CH17-CH18	3,42E-08	0,815	-3,88E-03	3,102	60,728	11,33

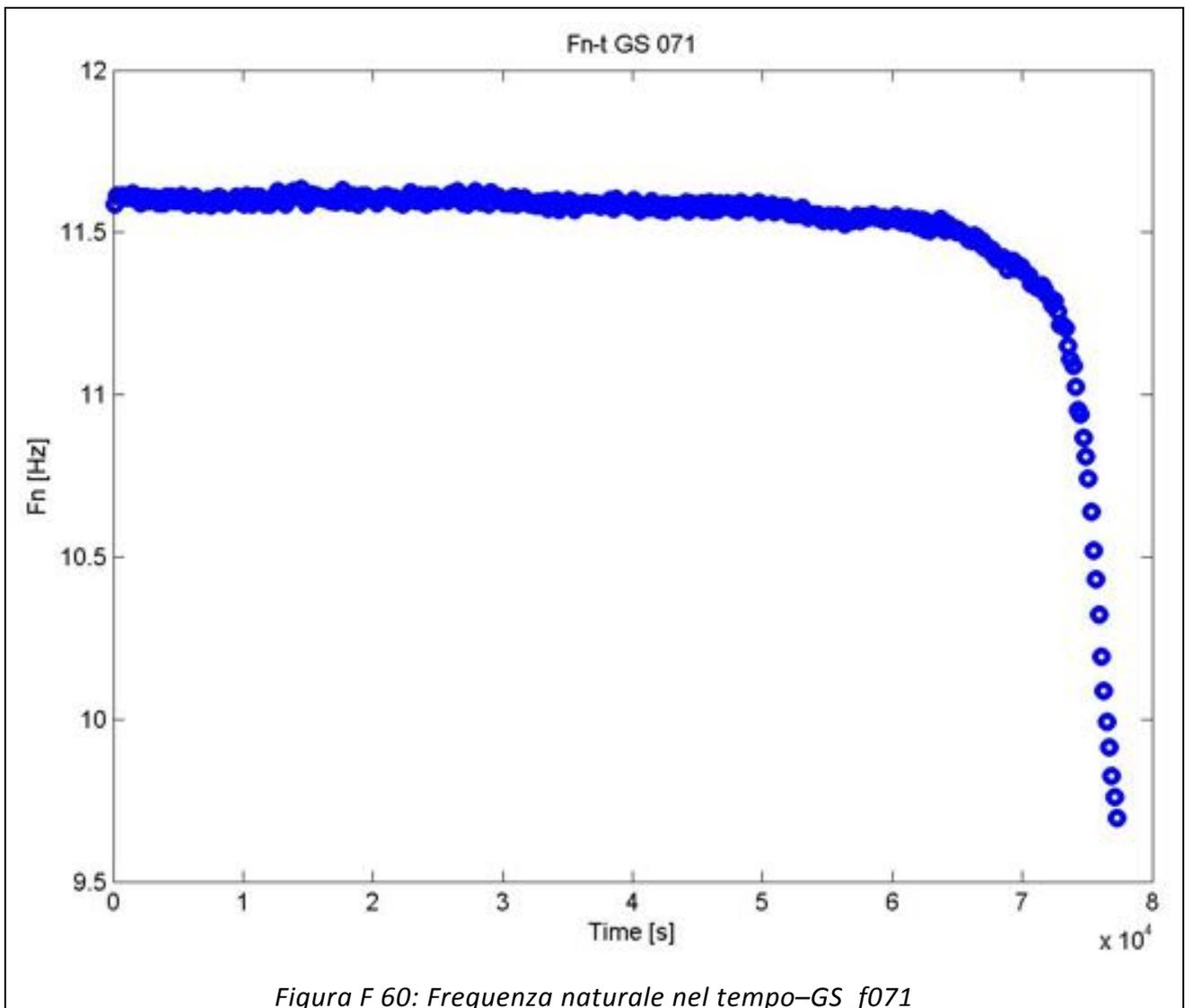
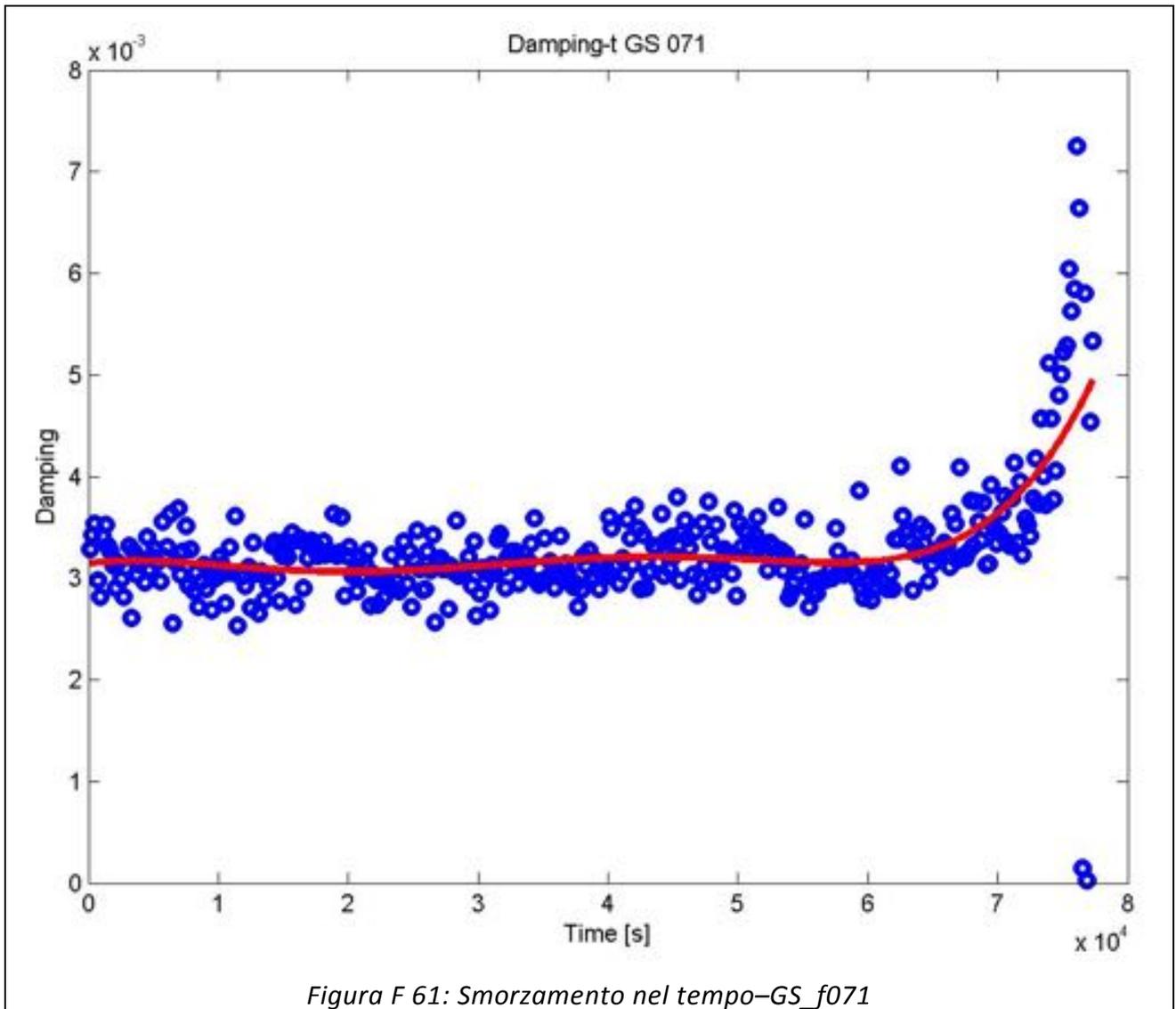
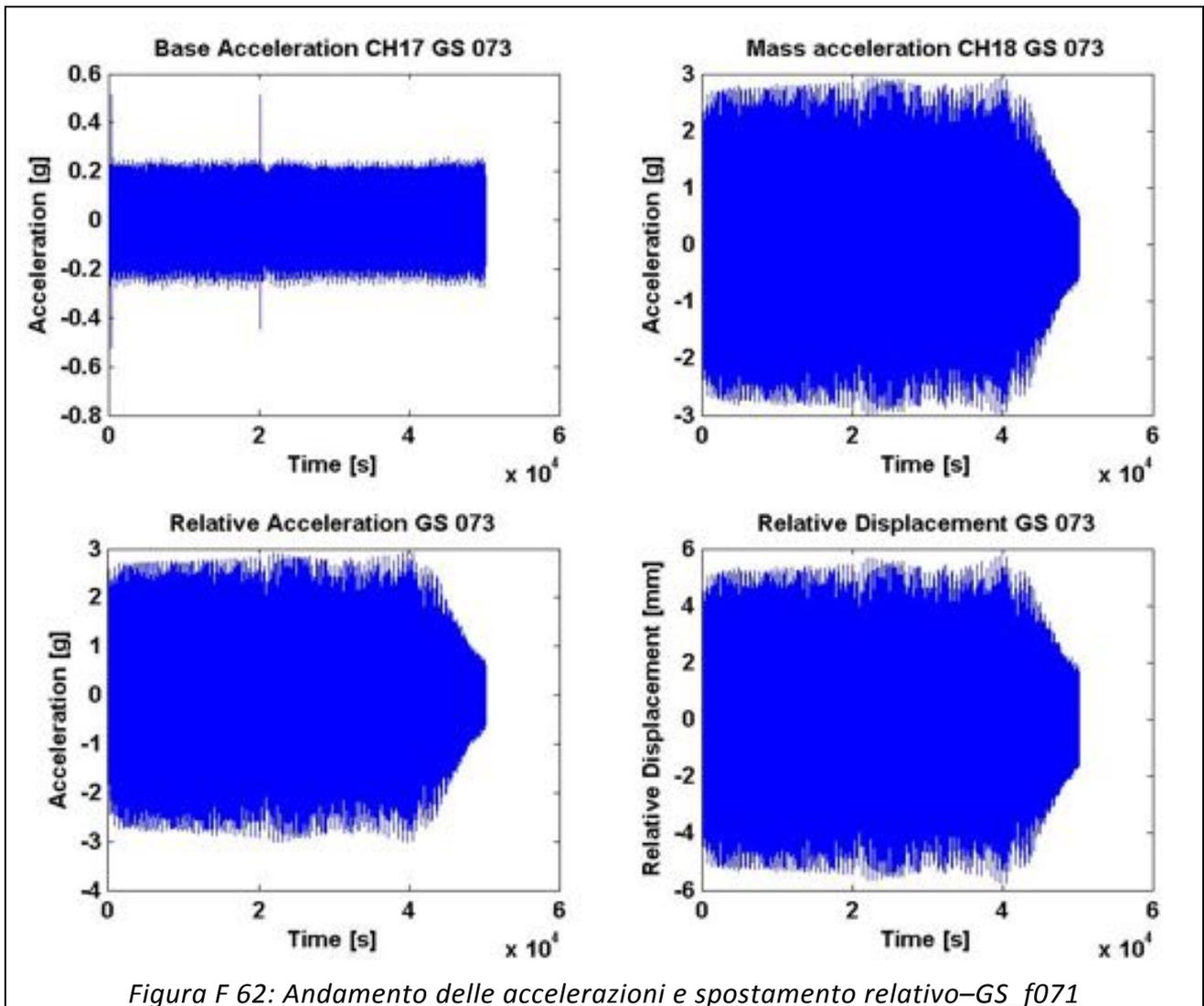


Figura F 60: Frequenza naturale nel tempo-GS_f071





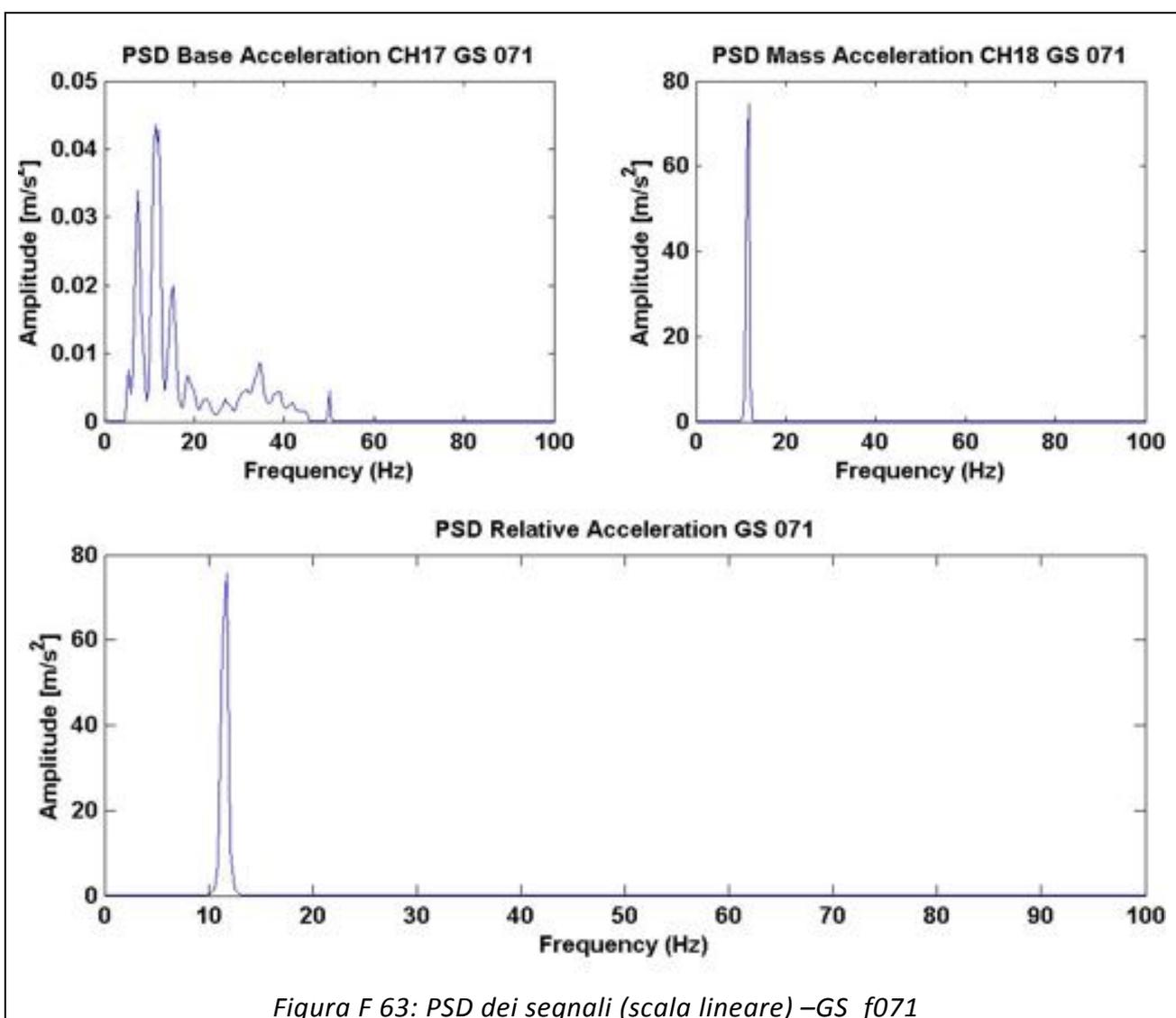


Figura F 63: PSD dei segnali (scala lineare) –GS_f071

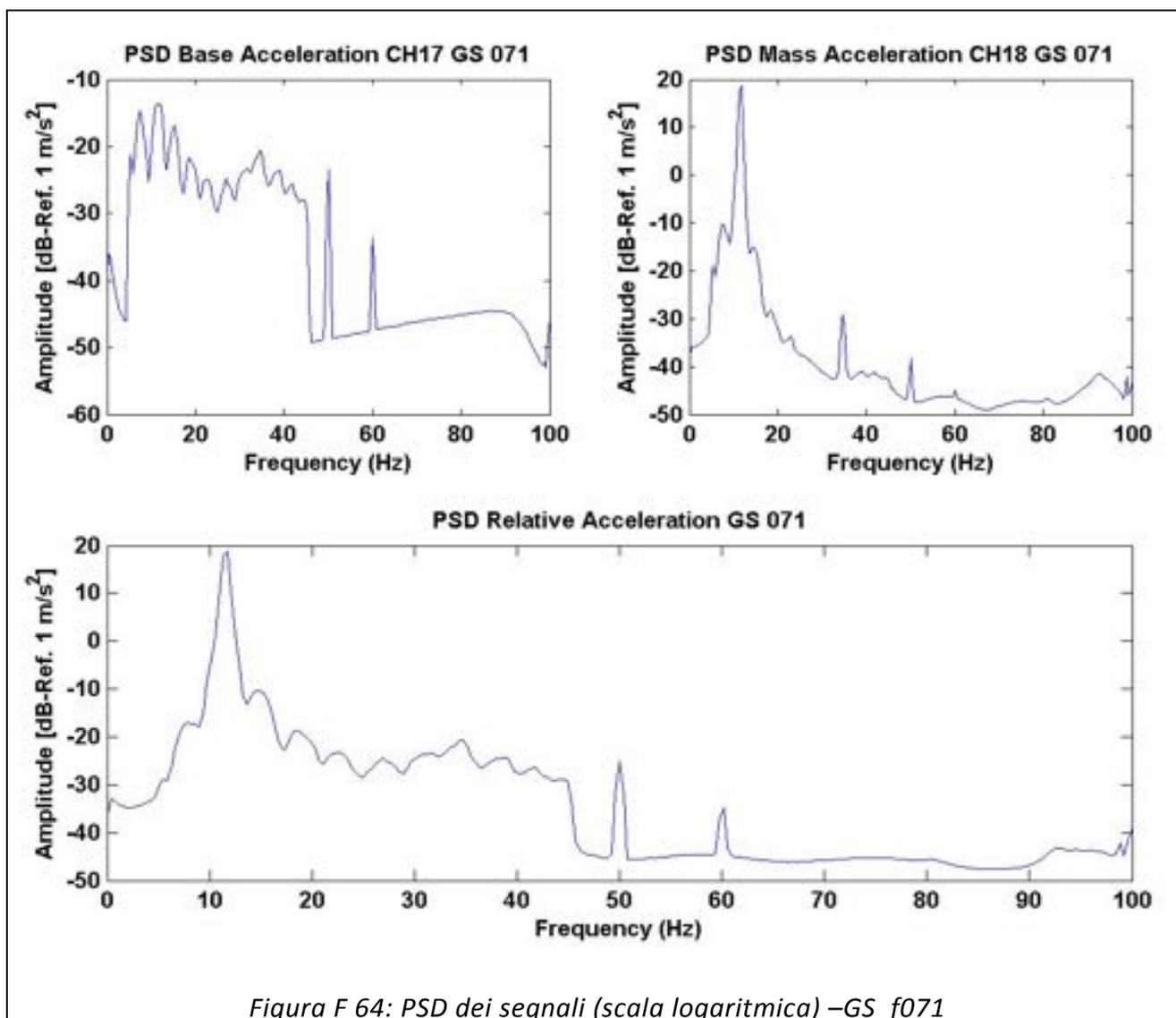
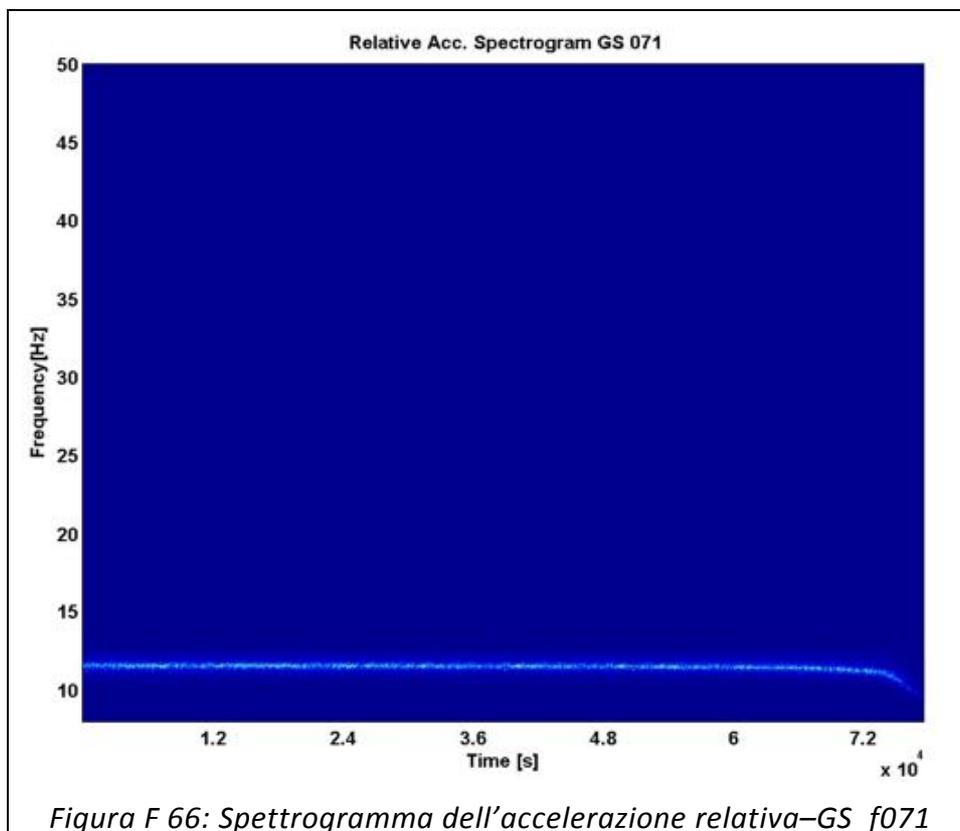
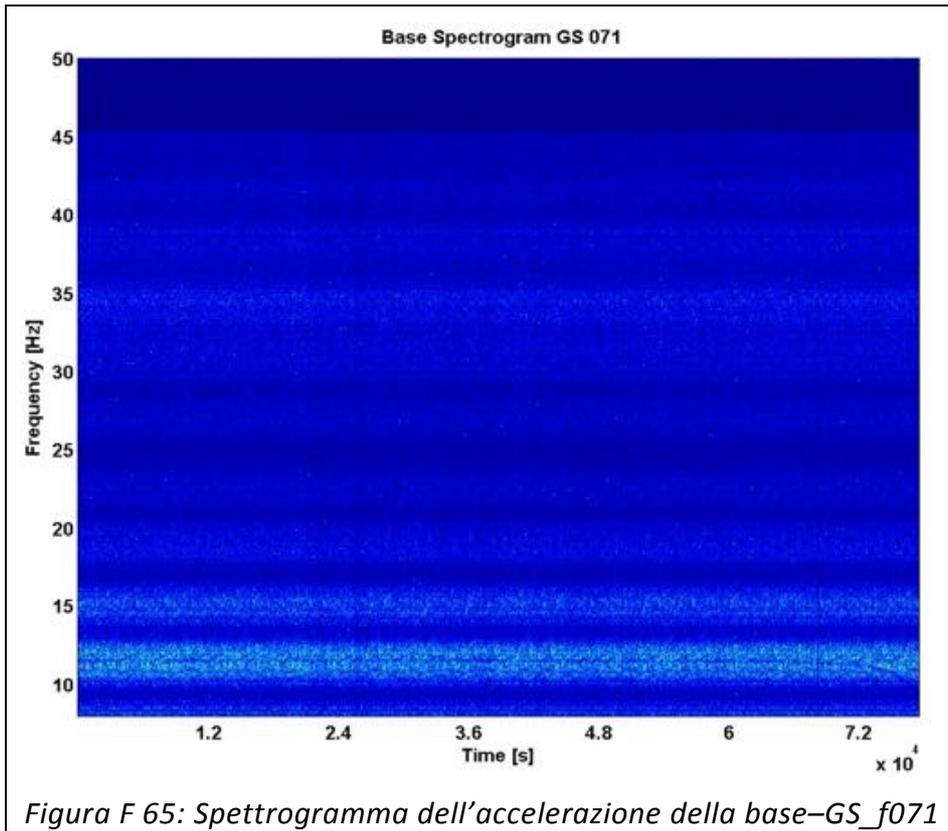
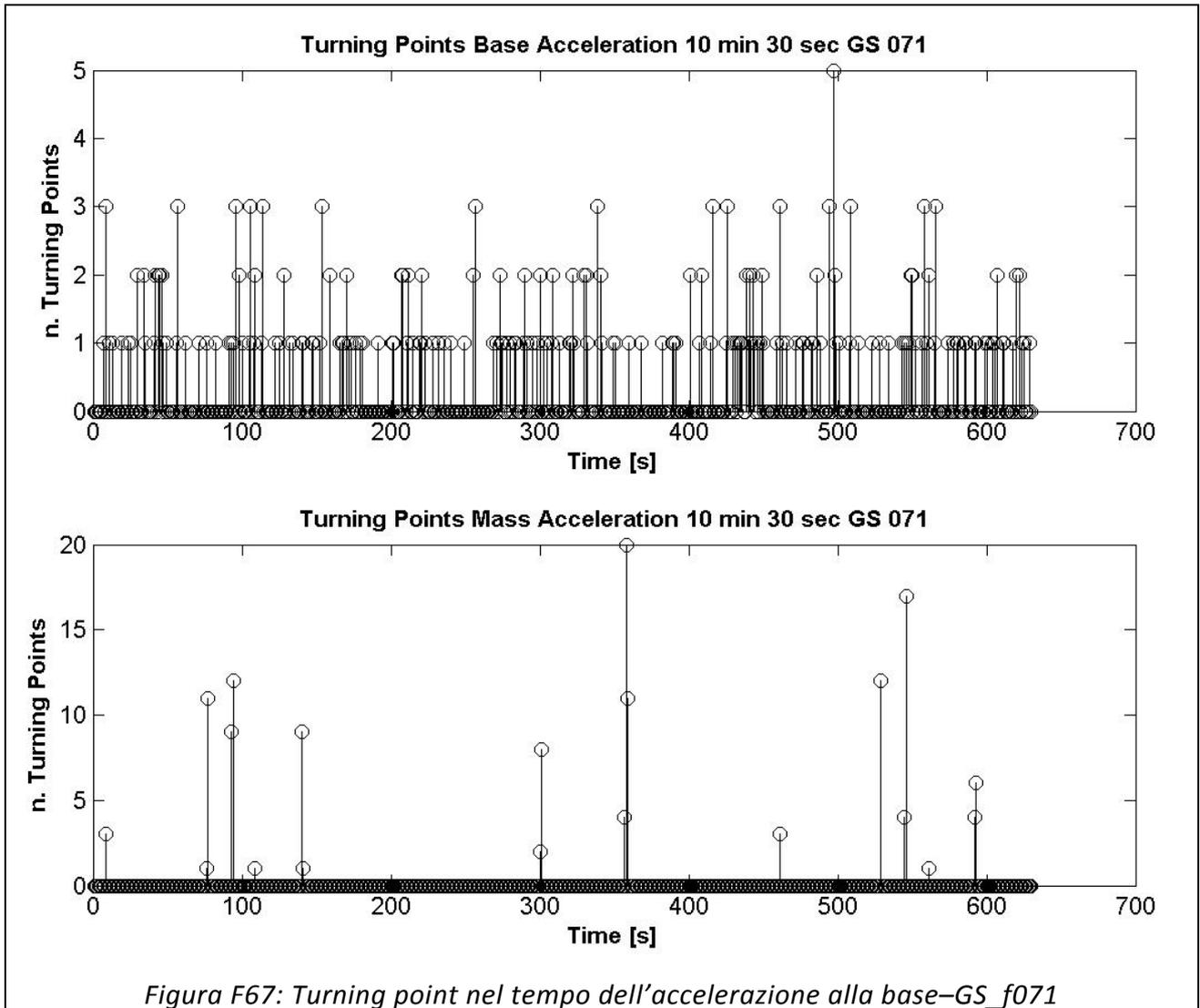
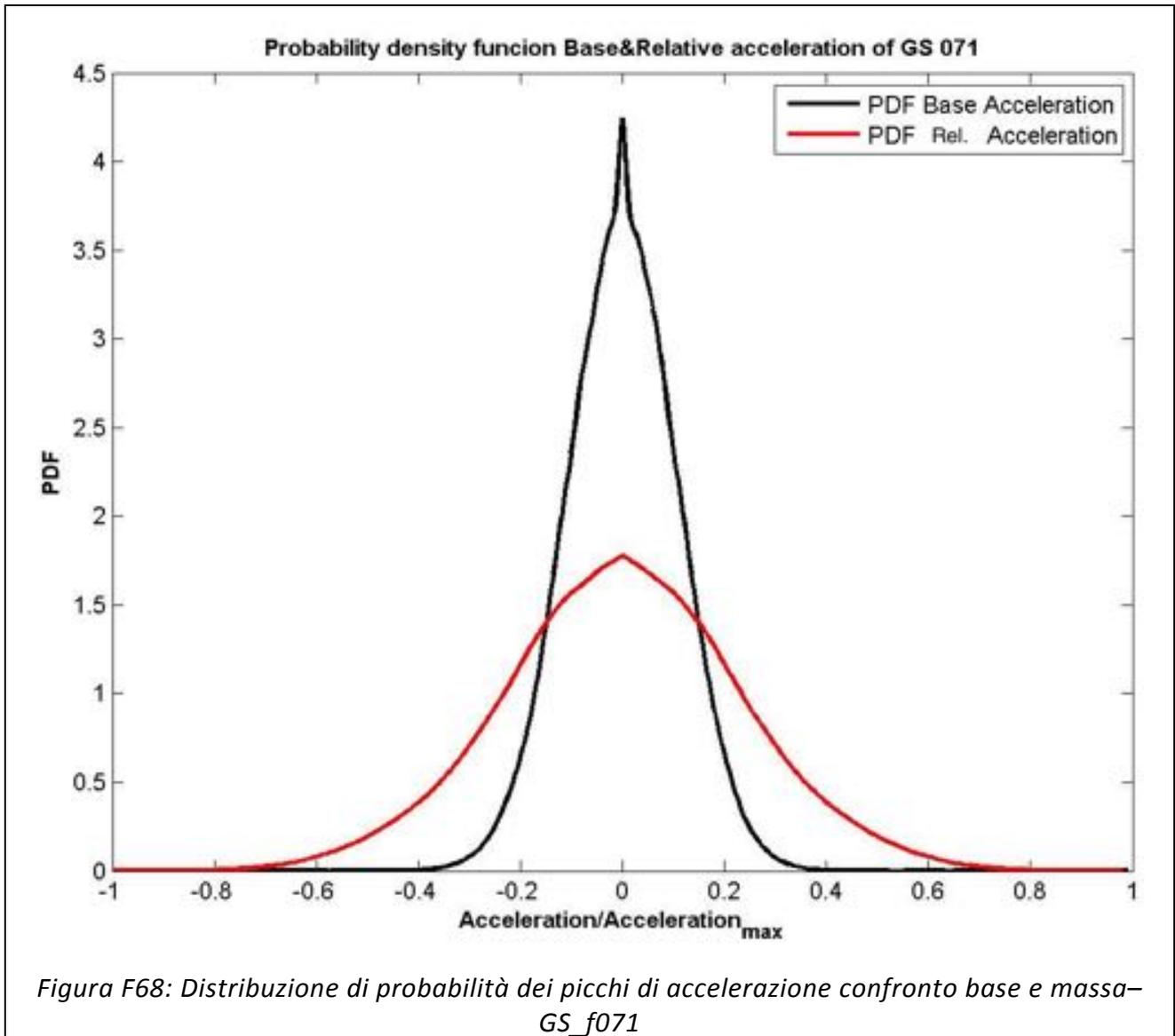


Figura F 64: PSD dei segnali (scala logaritmica) –GS_f071







Provino GS_f072

	Media [g]	RMS [g]	Skewness	Kurtosis	Crest Factor	Frequenza media [Hz]
Accelerazione Base CH17	-6,89E-08	0,058	-1,40E-02	3,063	4,726	11,72
Accelerazione Massa CH18	5,02E-08	1,008	-5,33E-02	2,900	228,130	11,33
Accelerazione Trasversale CH22	-4,90E-09	0,016	1,03E+00	5,258	2,433	11,72
Accelerazione Verticale CH23	4,31E-08	0,943	4,88E-02	2,827	61,466	11,33
Accelerazione Longitudinale CH24	8,88E-08	0,772	-1,59E-02	2,770	46,460	11,33
Accelerazione relativa CH17-CH18	1,19E-07	1,010	-5,35E-02	2,898	230,043	11,33

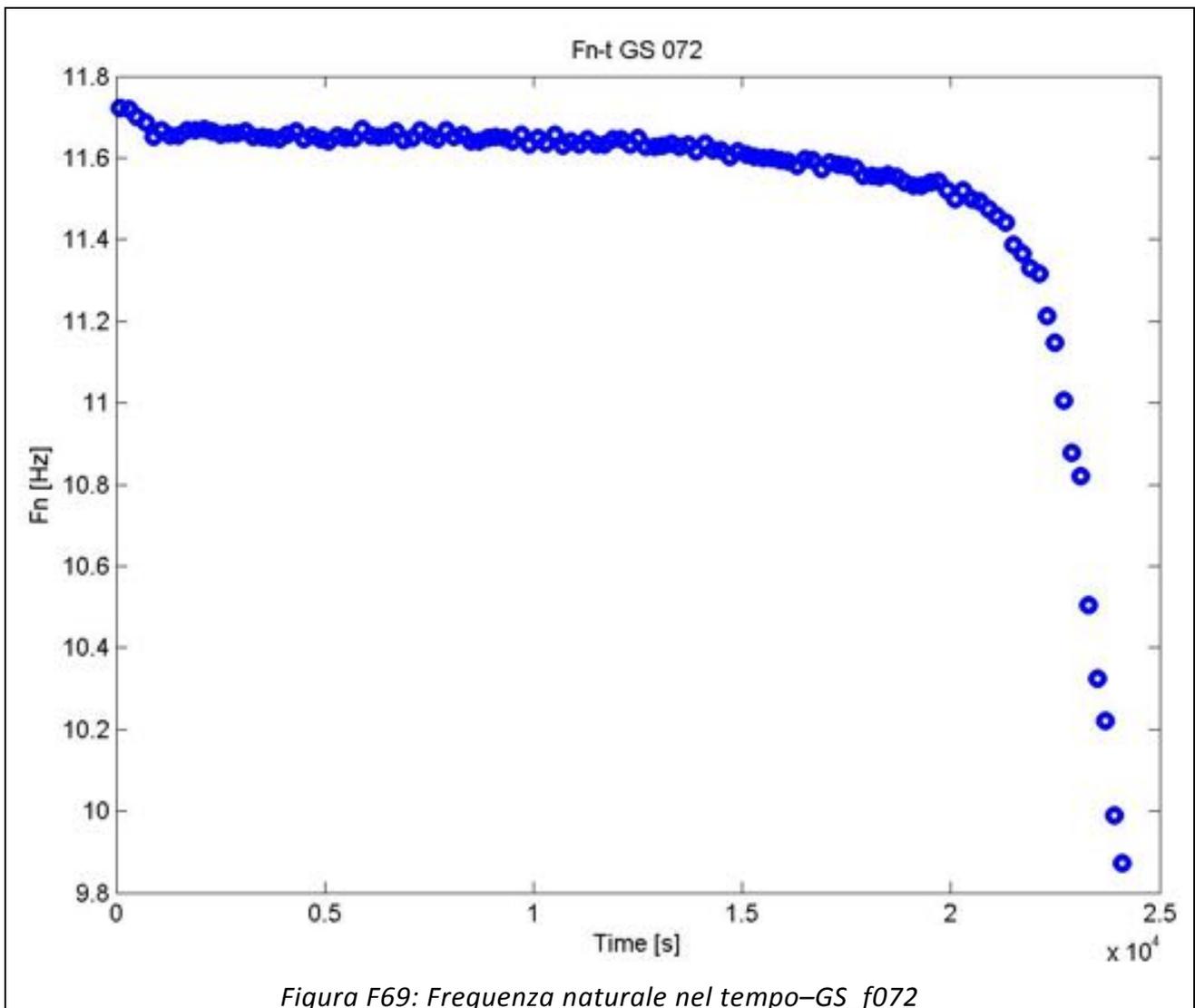
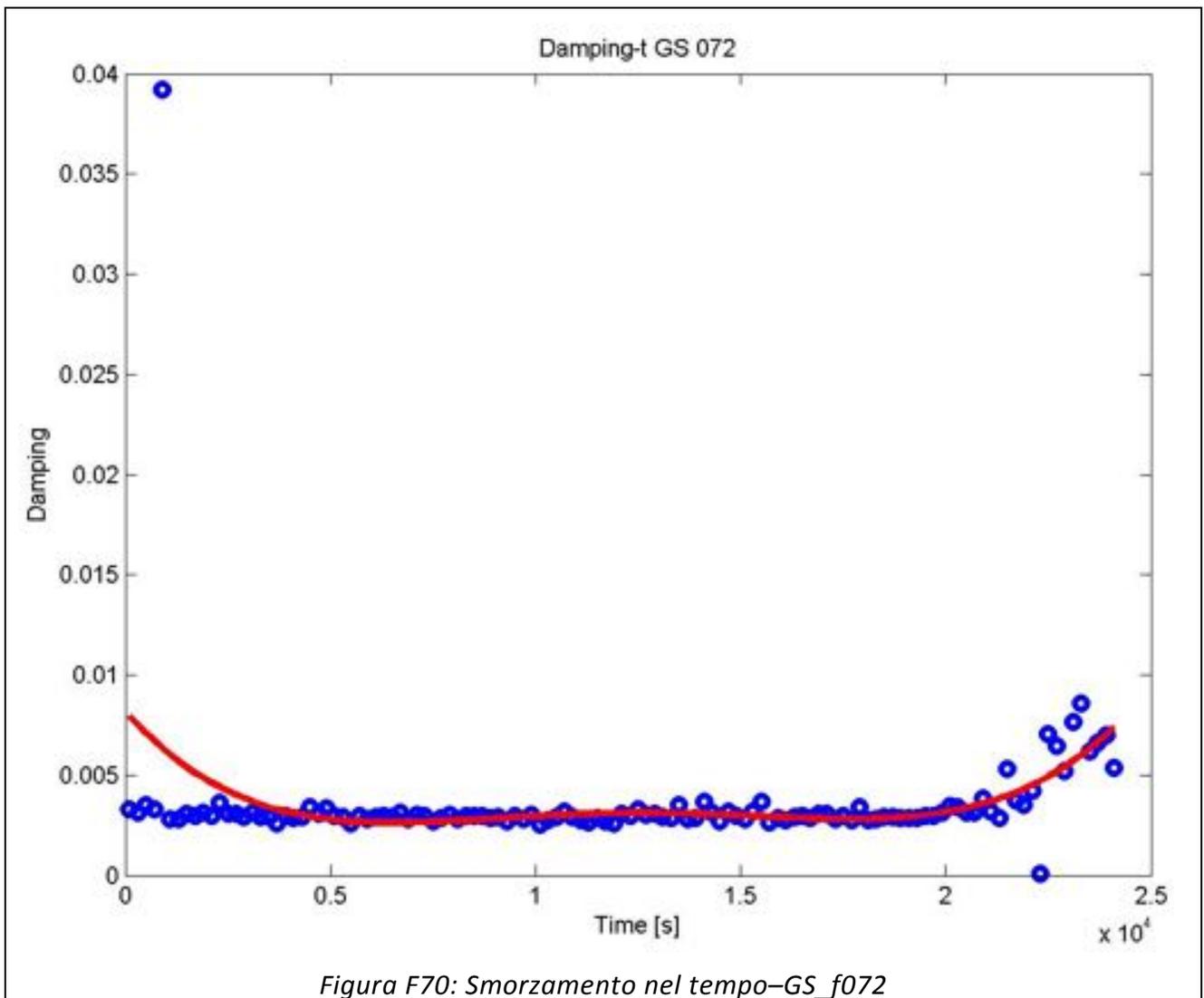
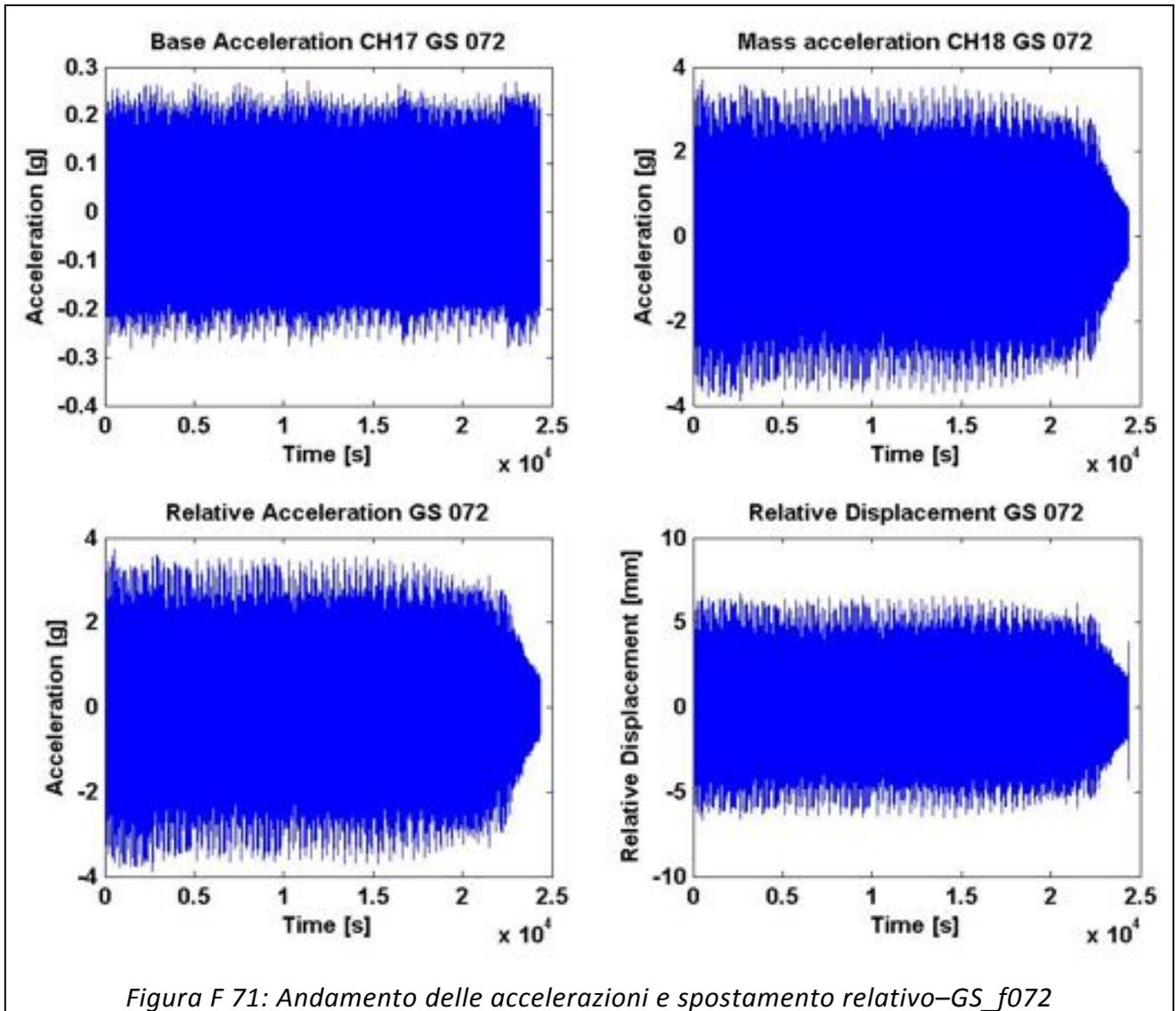


Figura F69: Frequenza naturale nel tempo-GS_f072





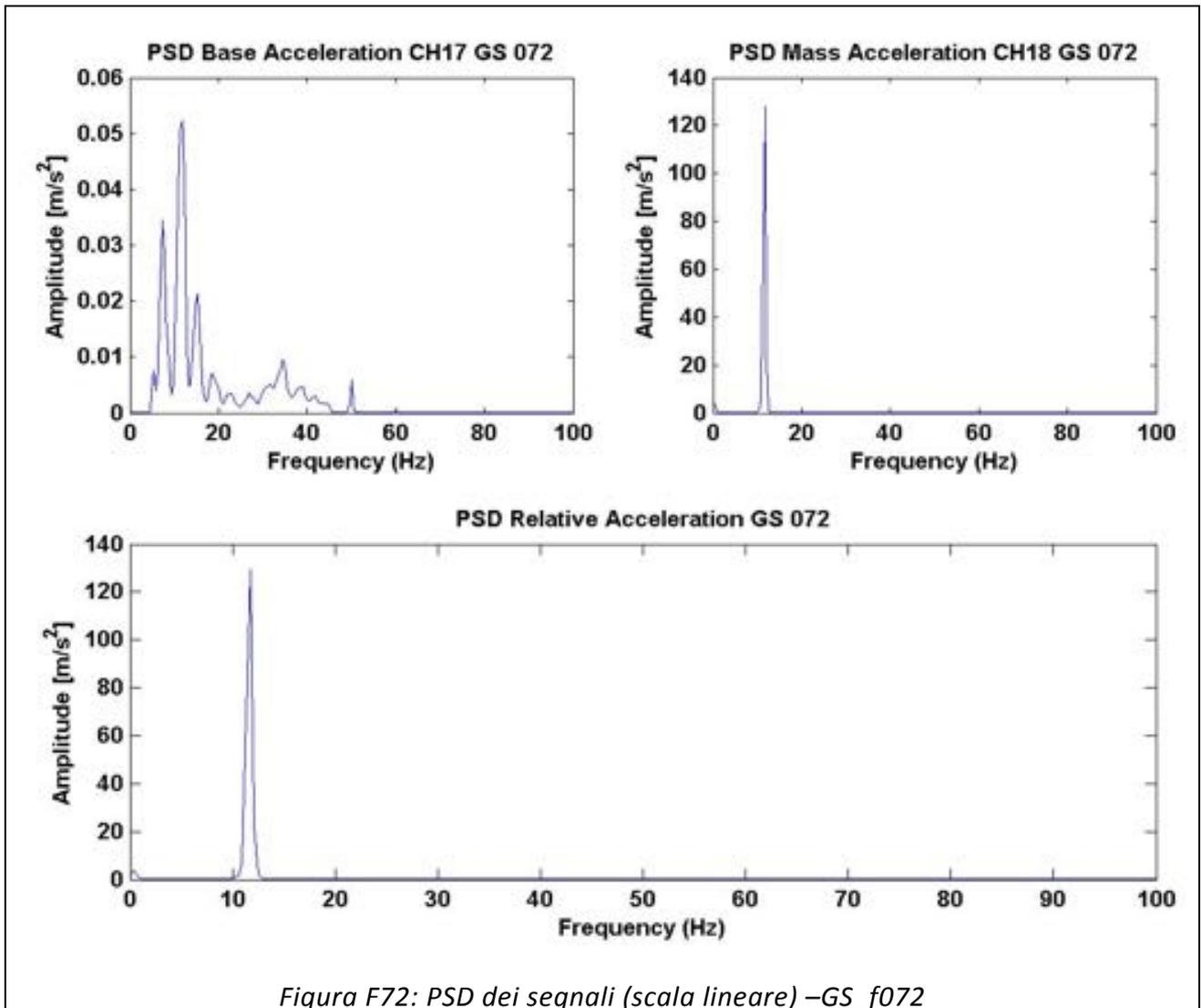
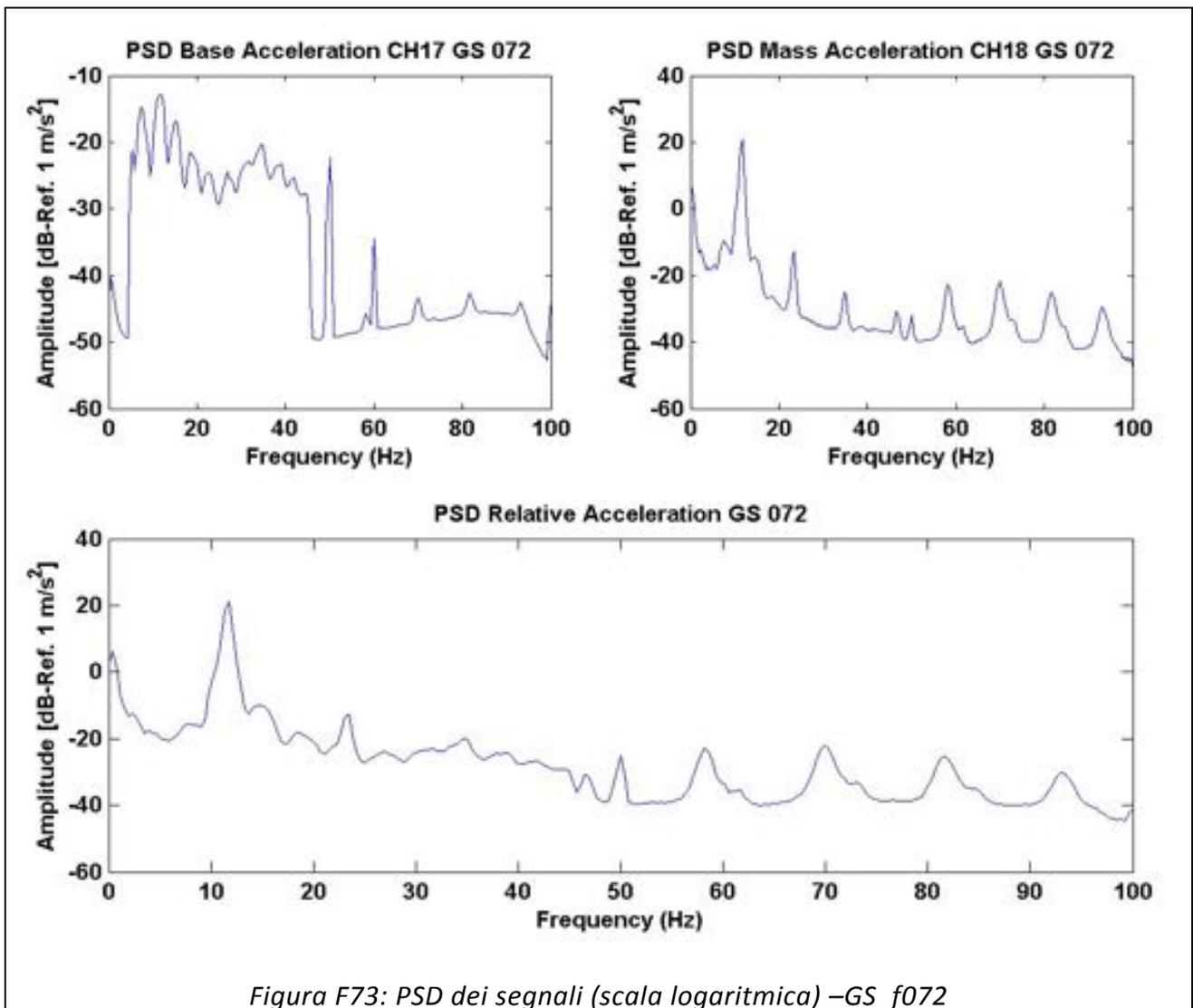


Figura F72: PSD dei segnali (scala lineare) -GS_f072



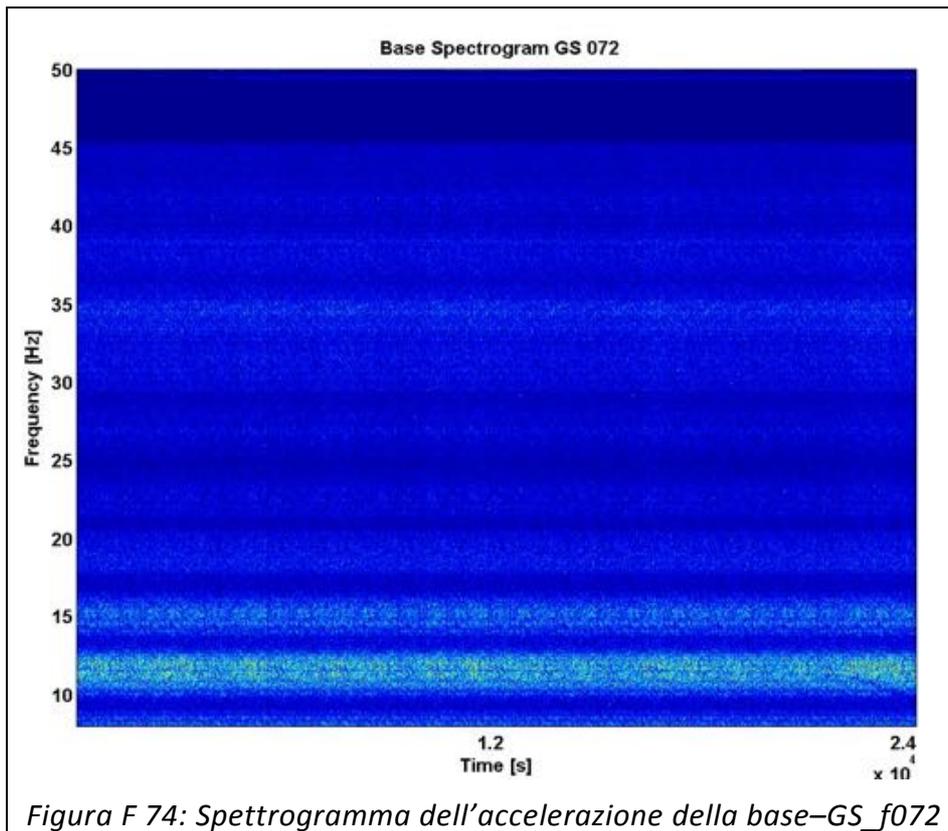


Figura F 74: Spettrogramma dell'accelerazione della base-GS_f072

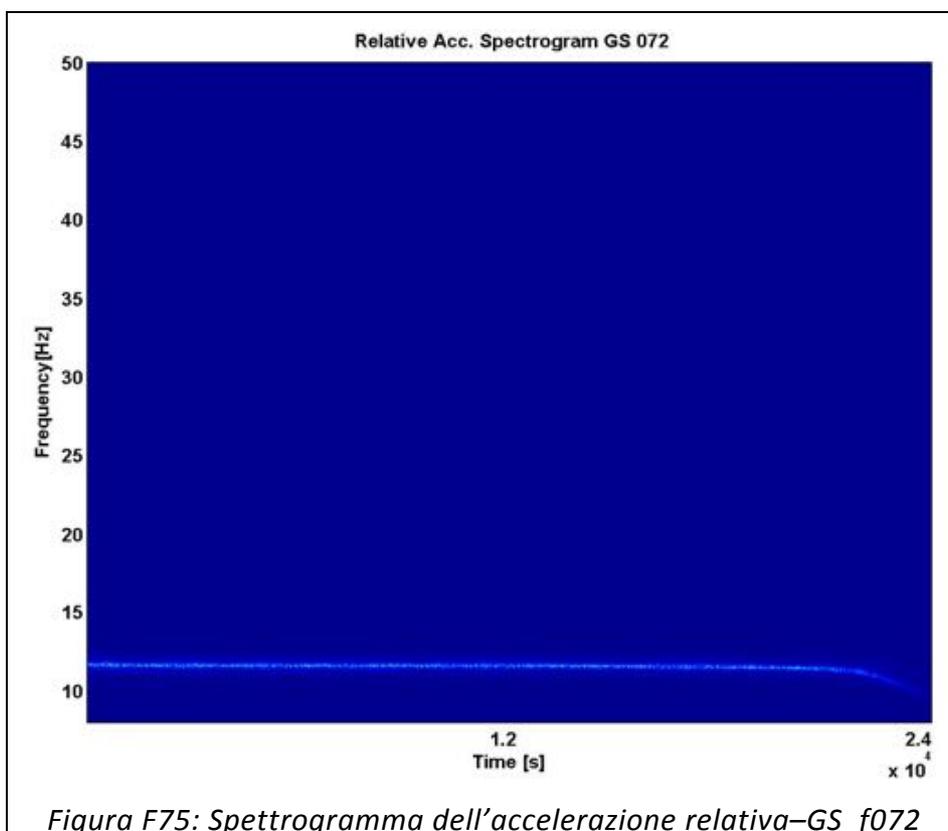
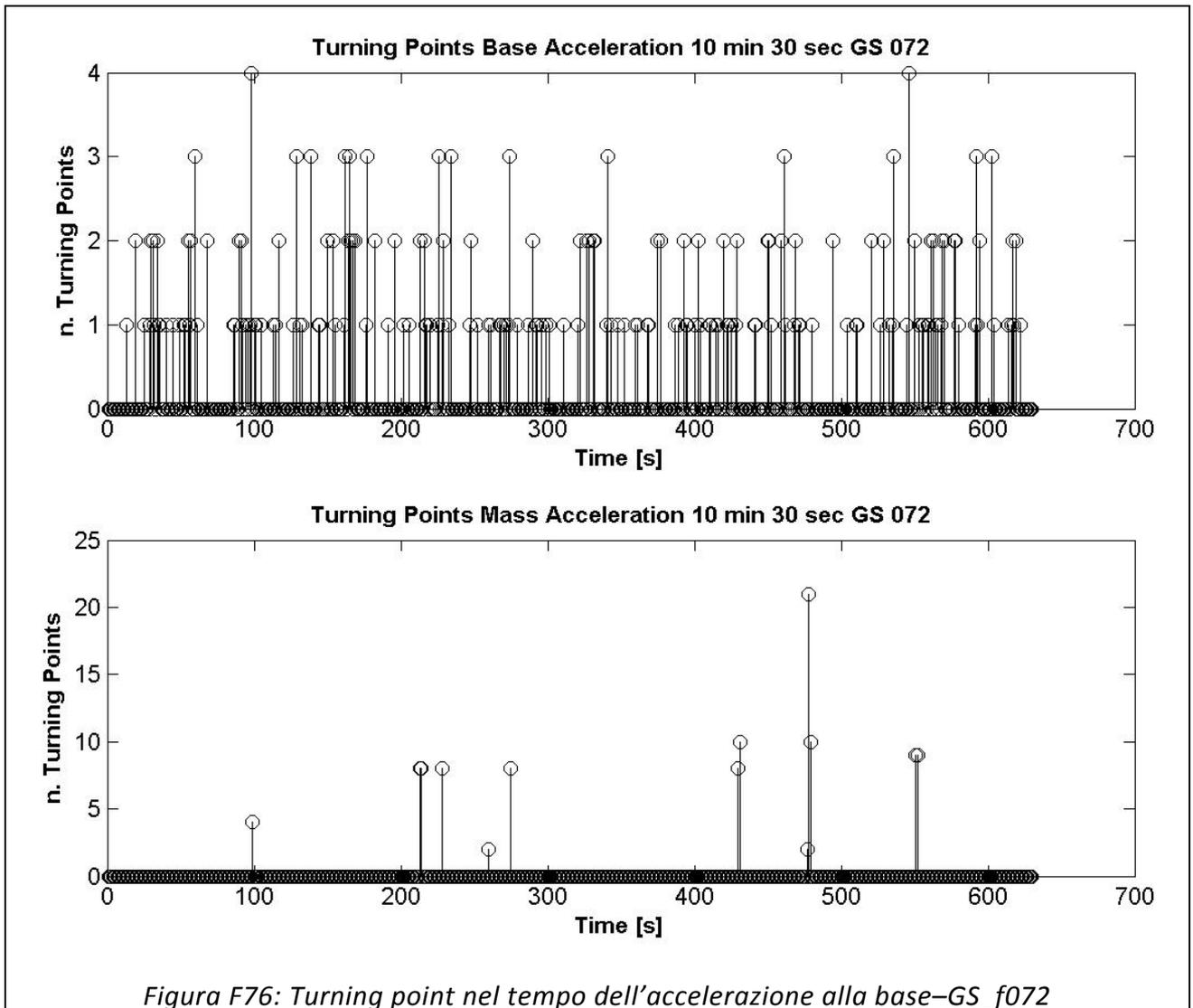
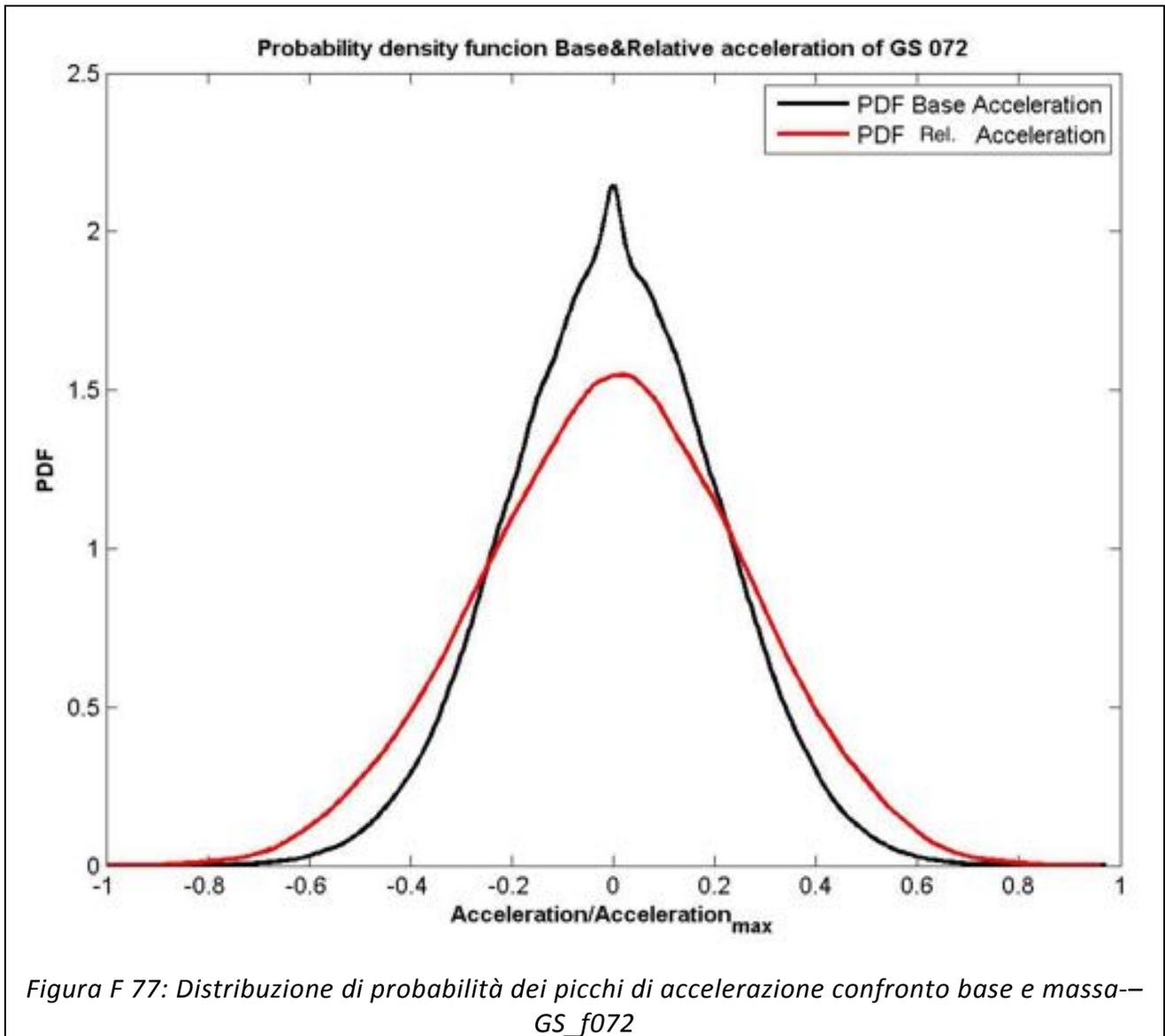


Figura F75: Spettrogramma dell'accelerazione relativa-GS_f072





Provino GS_f073

	Media [g]	RMS [g]	Skewness	Kurtosis	Crest Factor	Frequenza media [Hz]
Accelerazione Base CH17	-3,42E-08	0,056	-1,03E-02	3,045	4,479	11,33
Accelerazione Massa CH18	-1,38E-07	0,658	1,02E-03	3,103	48,397	11,33
Accelerazione Trasversale CH22	-6,28E-10	0,023	-1,46E-03	6,647	4,704	34,38
Accelerazione Verticale CH23	-1,35E-07	0,613	5,07E-02	3,103	46,143	11,33
Accelerazione Longitudinale CH24	-7,32E-08	0,482	-3,38E-02	3,057	34,119	11,33
Accelerazione relativa CH17-CH18	-1,04E-07	0,657	1,80E-04	3,098	48,326	11,33

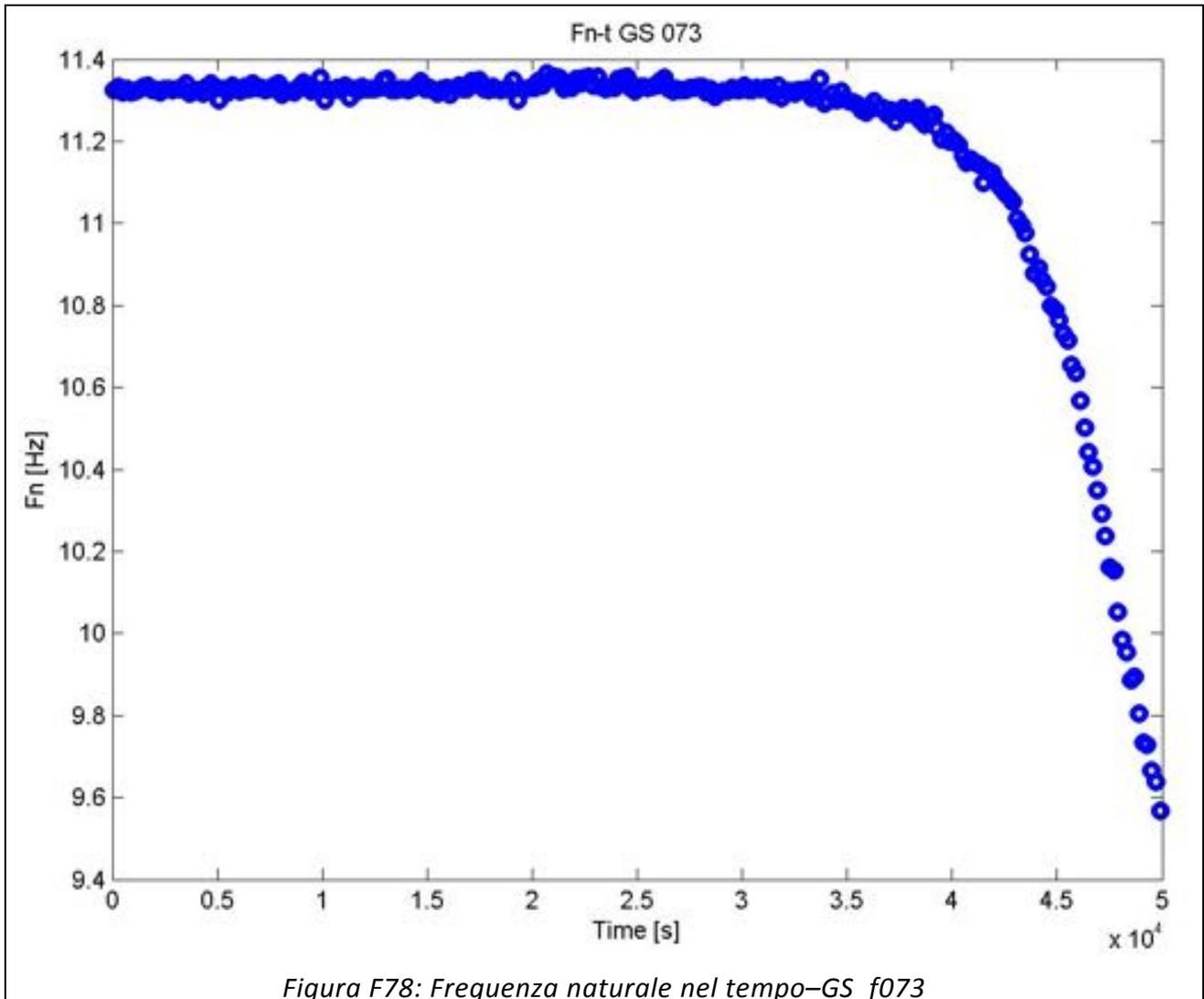


Figura F78: Frequenza naturale nel tempo-GS_f073

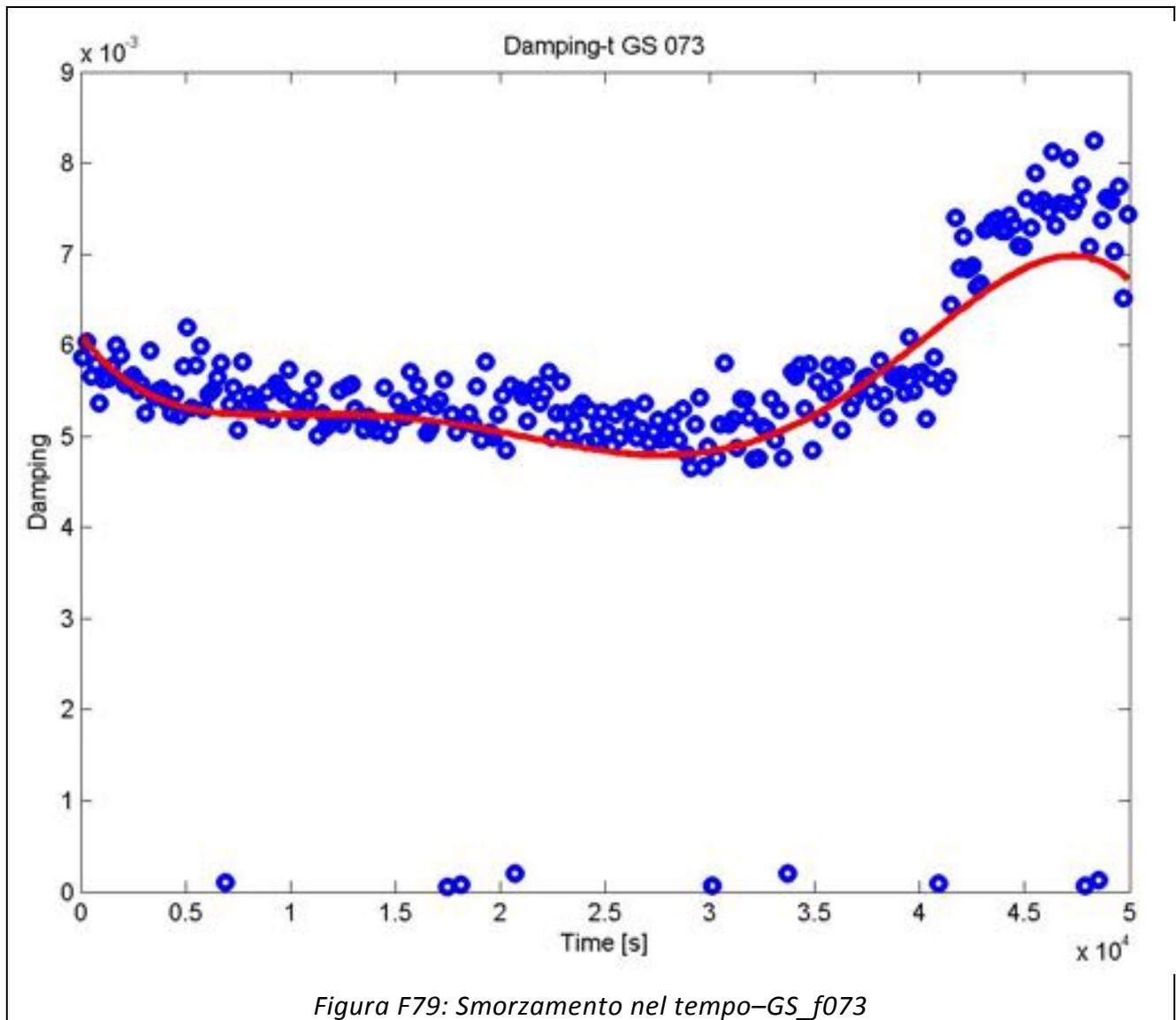


Figura F79: Smorzamento nel tempo-GS_f073

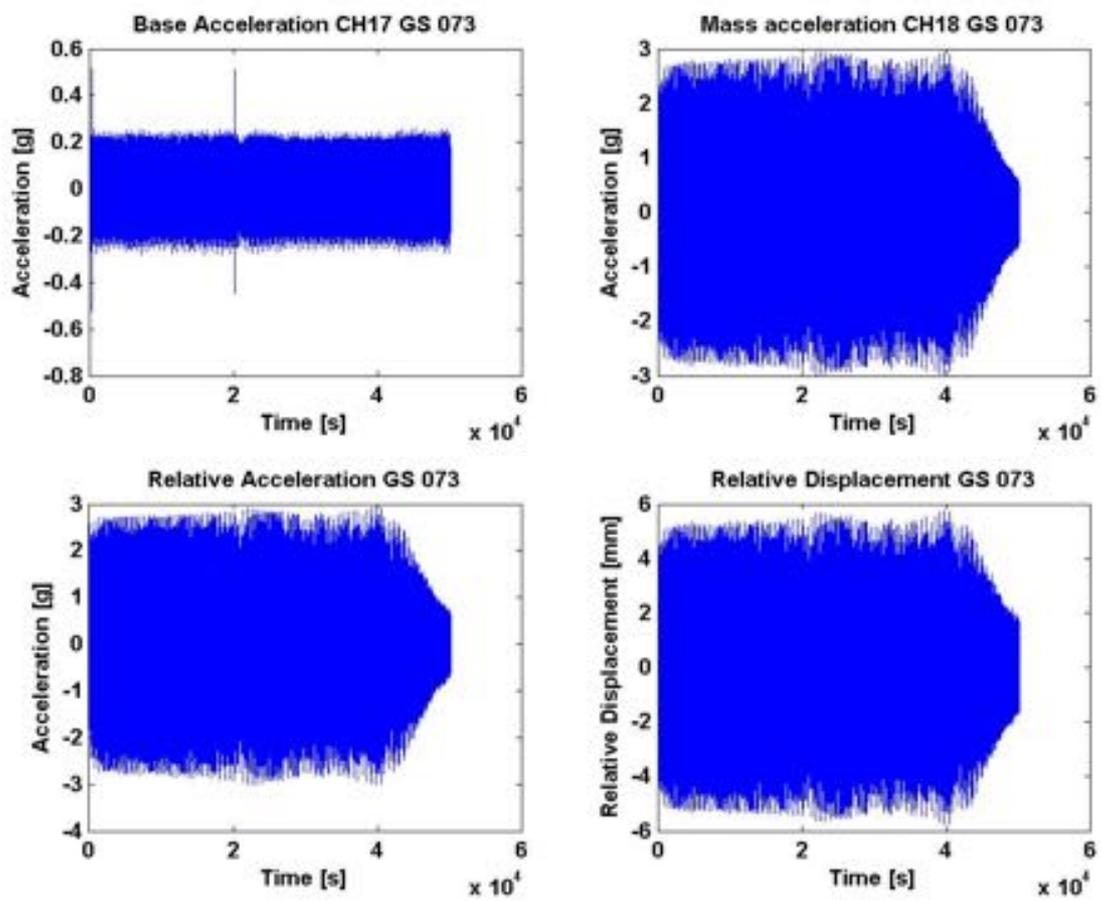


Figura F80: Andamento delle accelerazioni e spostamento relativo-GS_f073

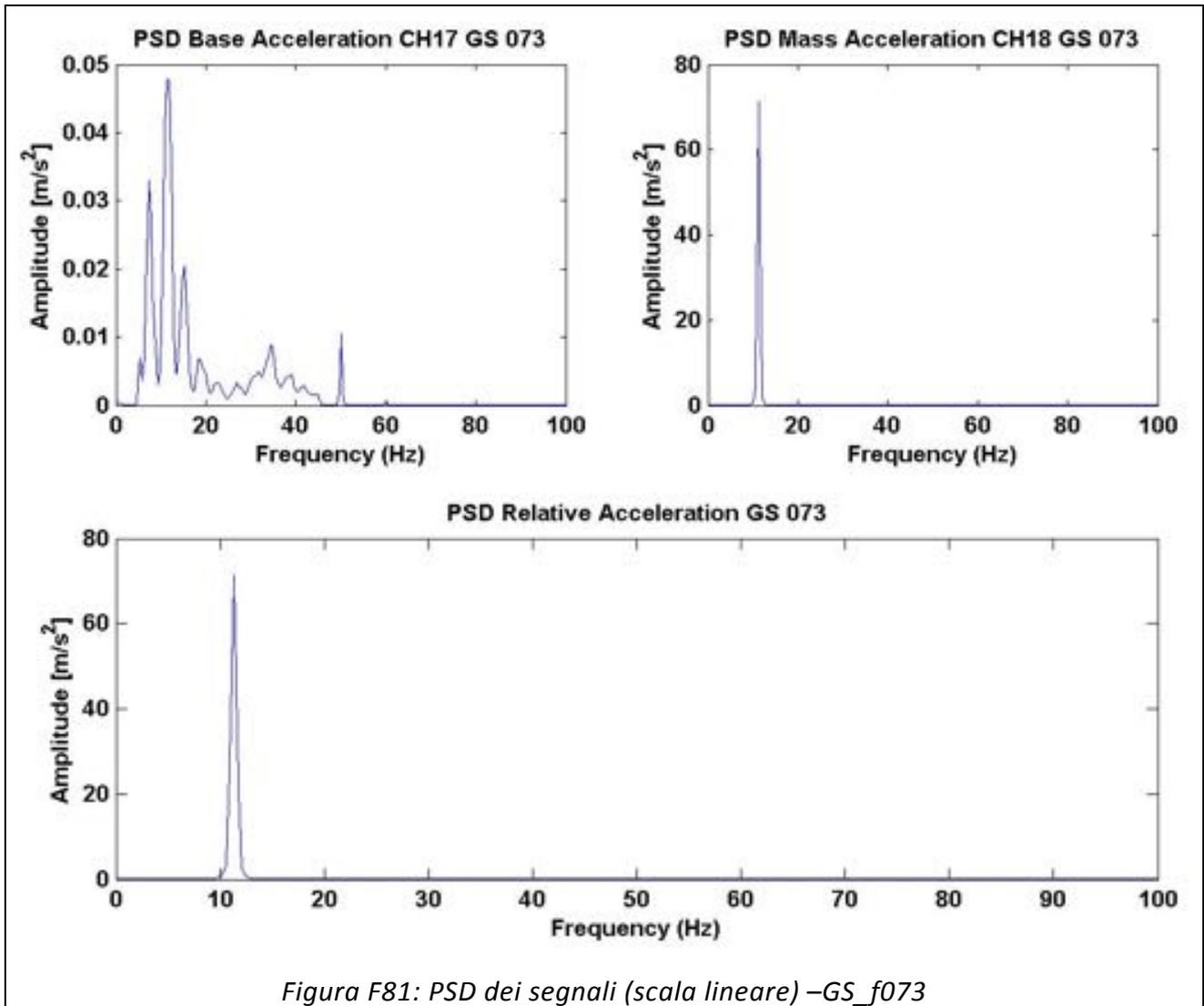


Figura F81: PSD dei segnali (scala lineare) –GS_f073

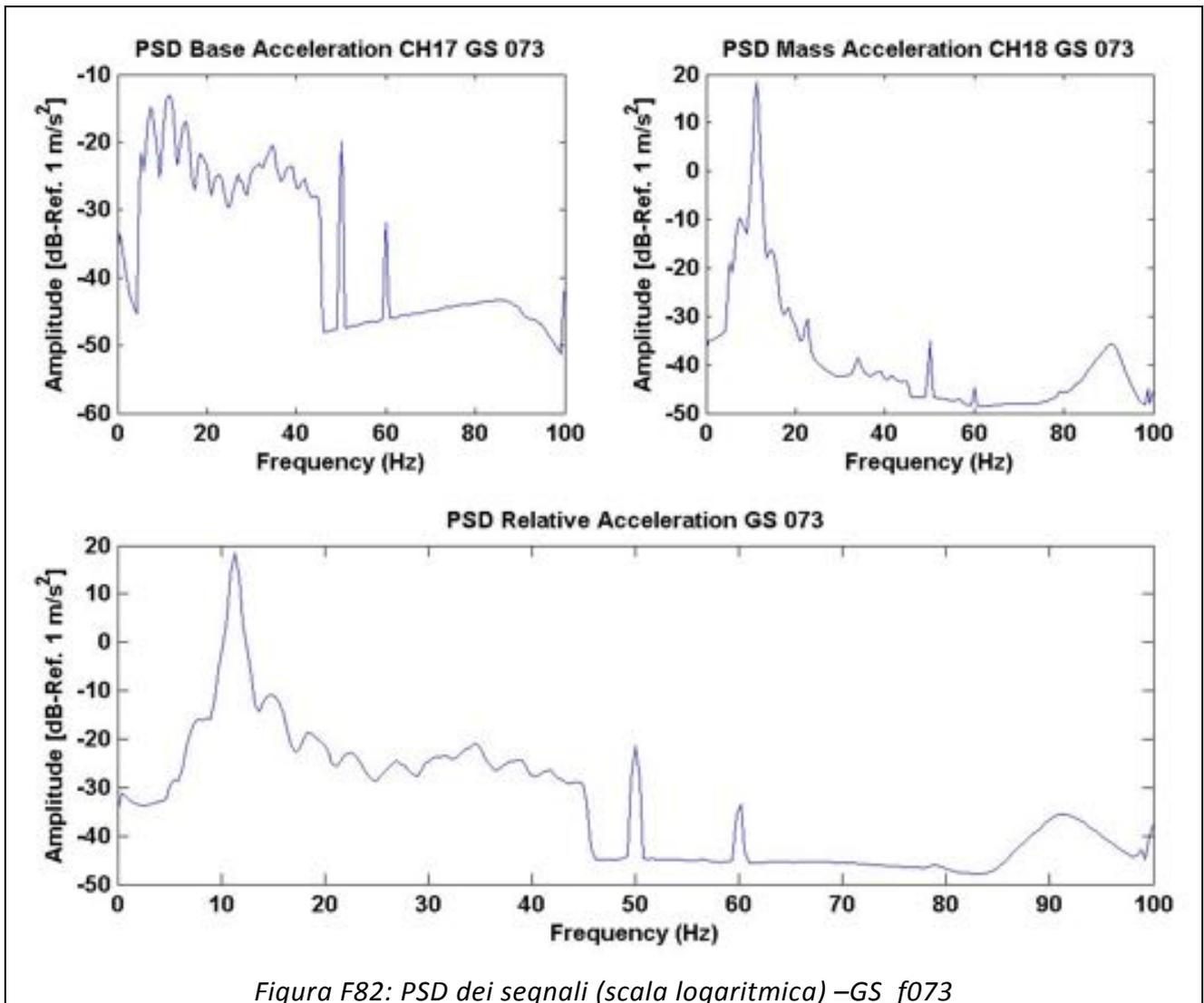
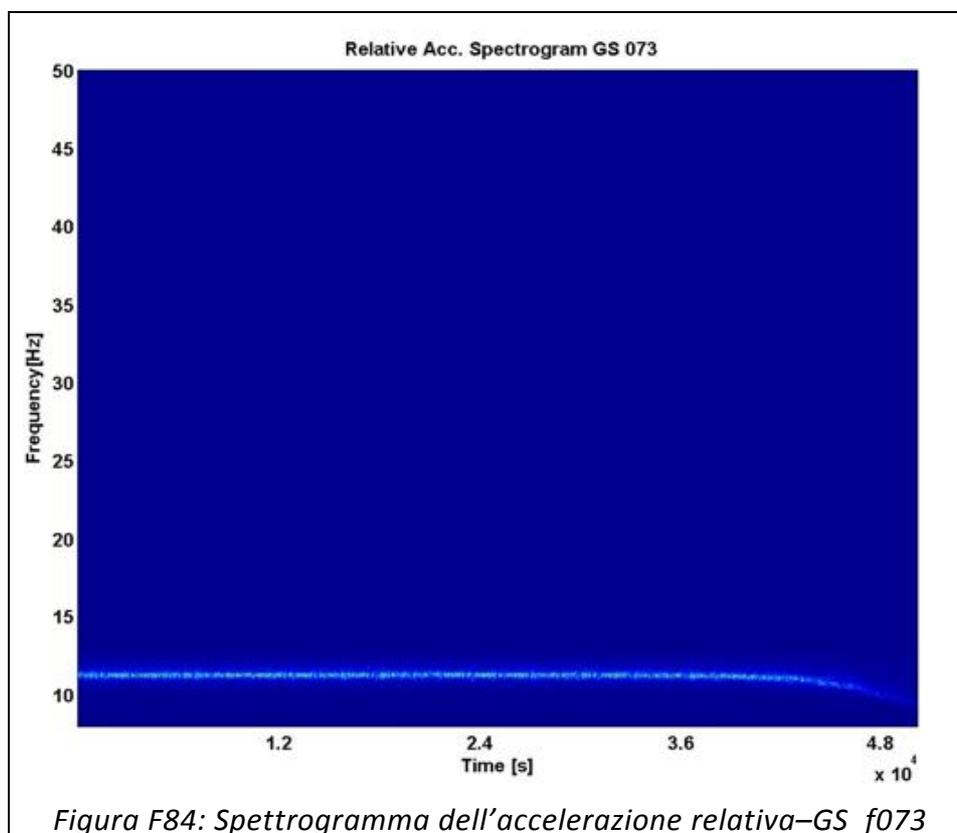
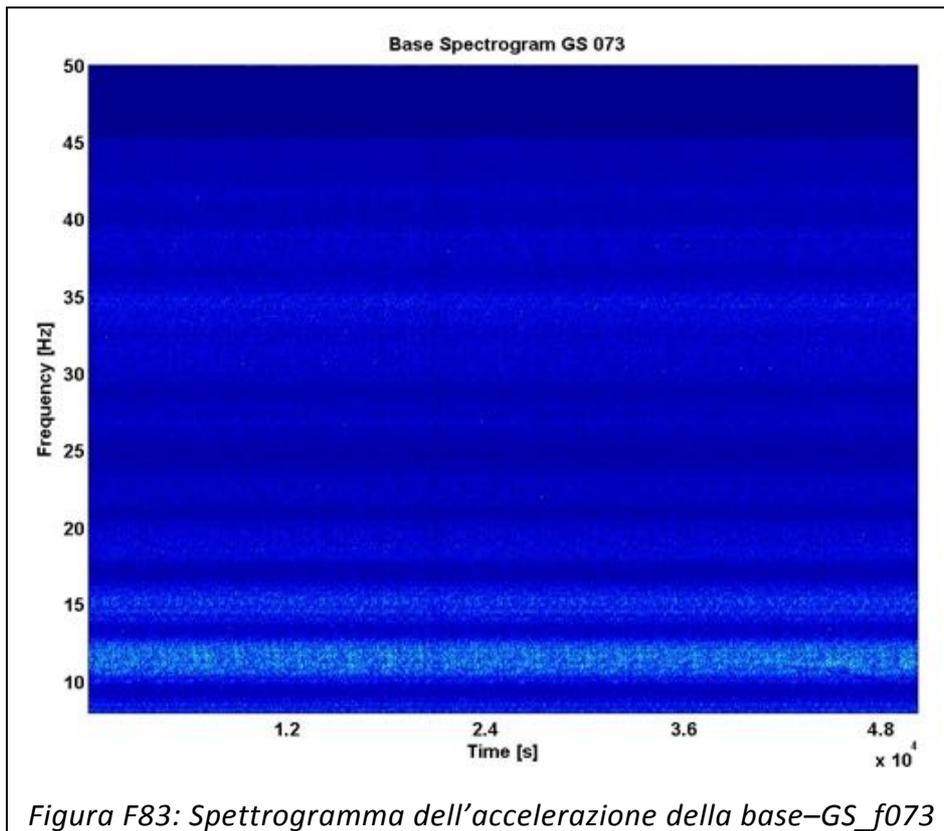
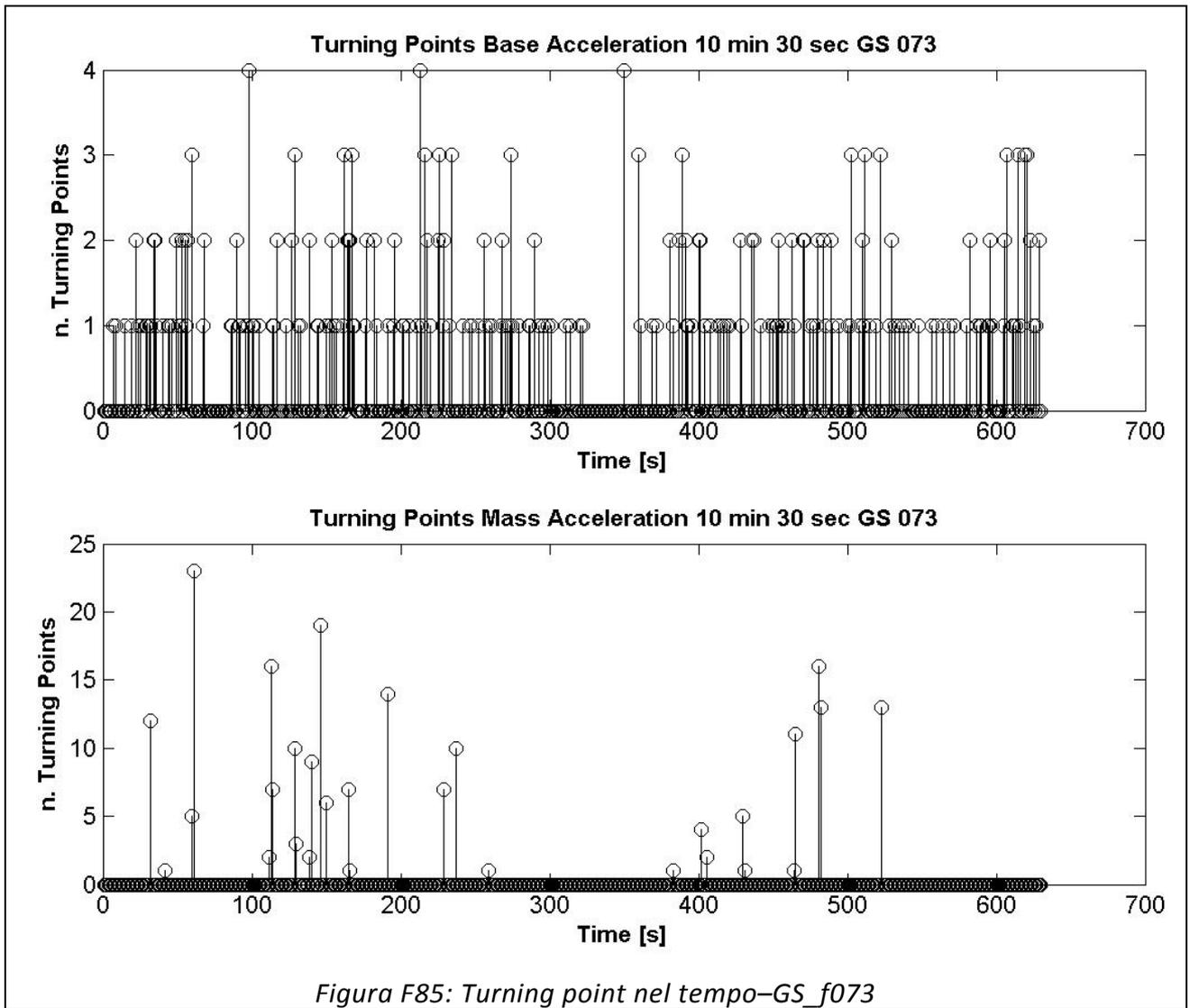
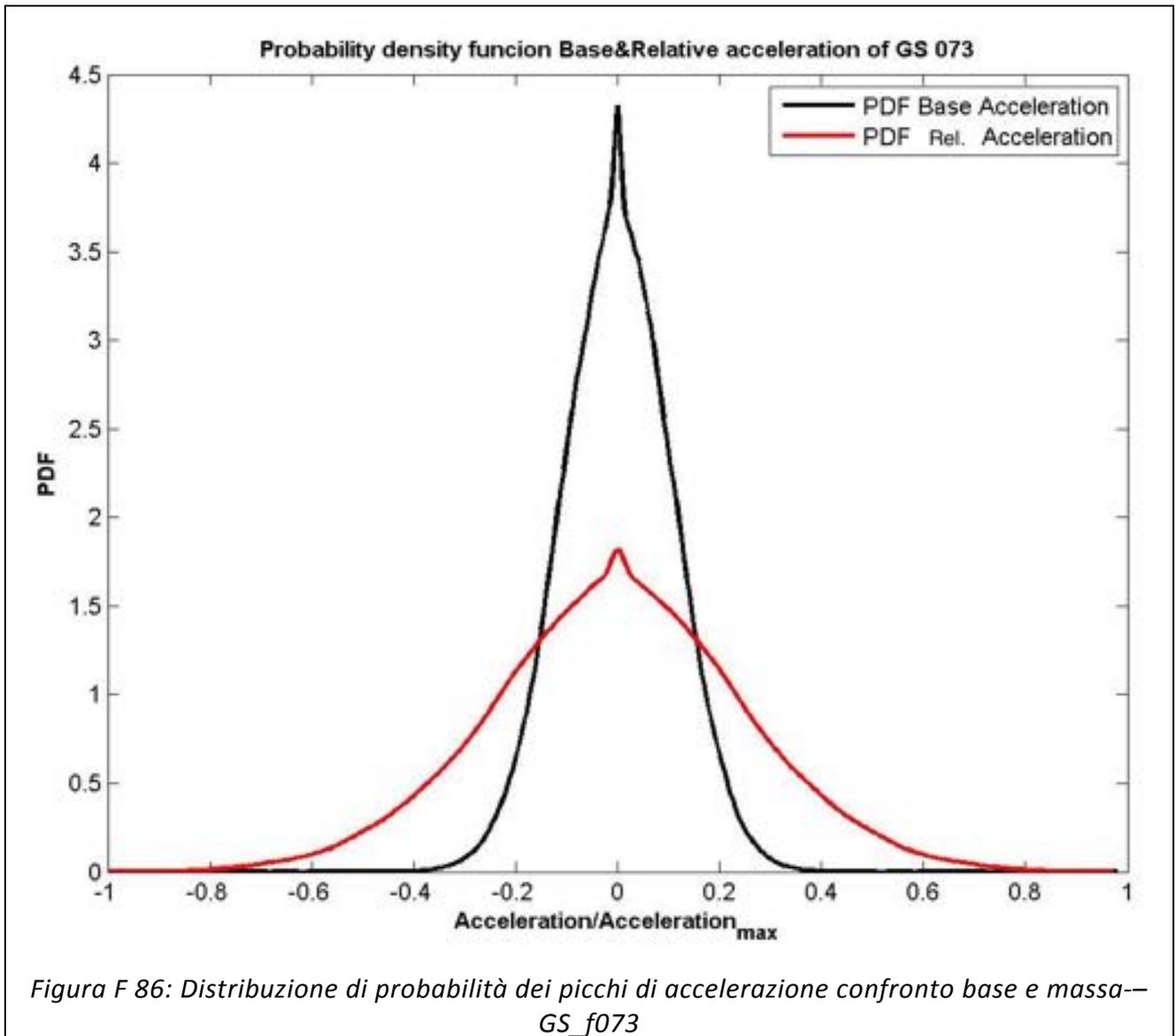


Figura F82: PSD dei segnali (scala logaritmica) –GS_f073







Provino GS_f074 (strumentato con estensimetri)

	Media [g]	RMS [g]	Skewness	Kurtosis	Crest Factor	Frequenza media [Hz]
Accelerazione Base CH17	-3,42E-08	0,056	-1,03E-02	3,045	4,479	11,33
Accelerazione Massa CH18	-1,38E-07	0,658	1,02E-03	3,103	48,397	11,33
Accelerazione Trasversale CH22	-6,28E-10	0,023	-1,46E-03	6,647	4,704	34,38
Accelerazione Verticale CH23	-1,35E-07	0,613	5,07E-02	3,103	46,143	11,33
Accelerazione Longitudinale CH24	-7,32E-08	0,482	-3,38E-02	3,057	34,119	11,33
Accelerazione relativa CH17-CH18	-1,04E-07	0,657	1,80E-04	3,098	48,326	11,33

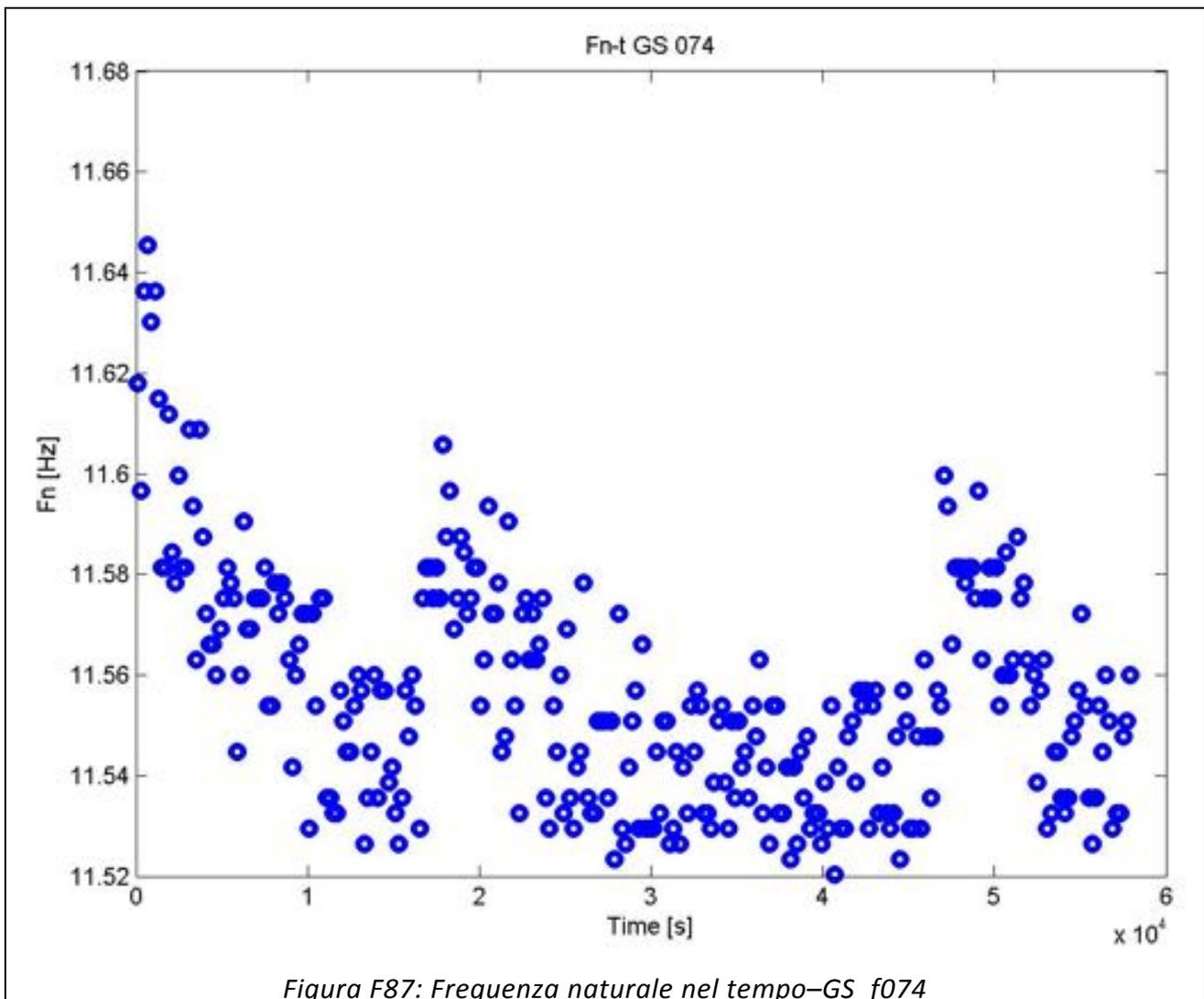


Figura F87: Frequenza naturale nel tempo-GS_f074

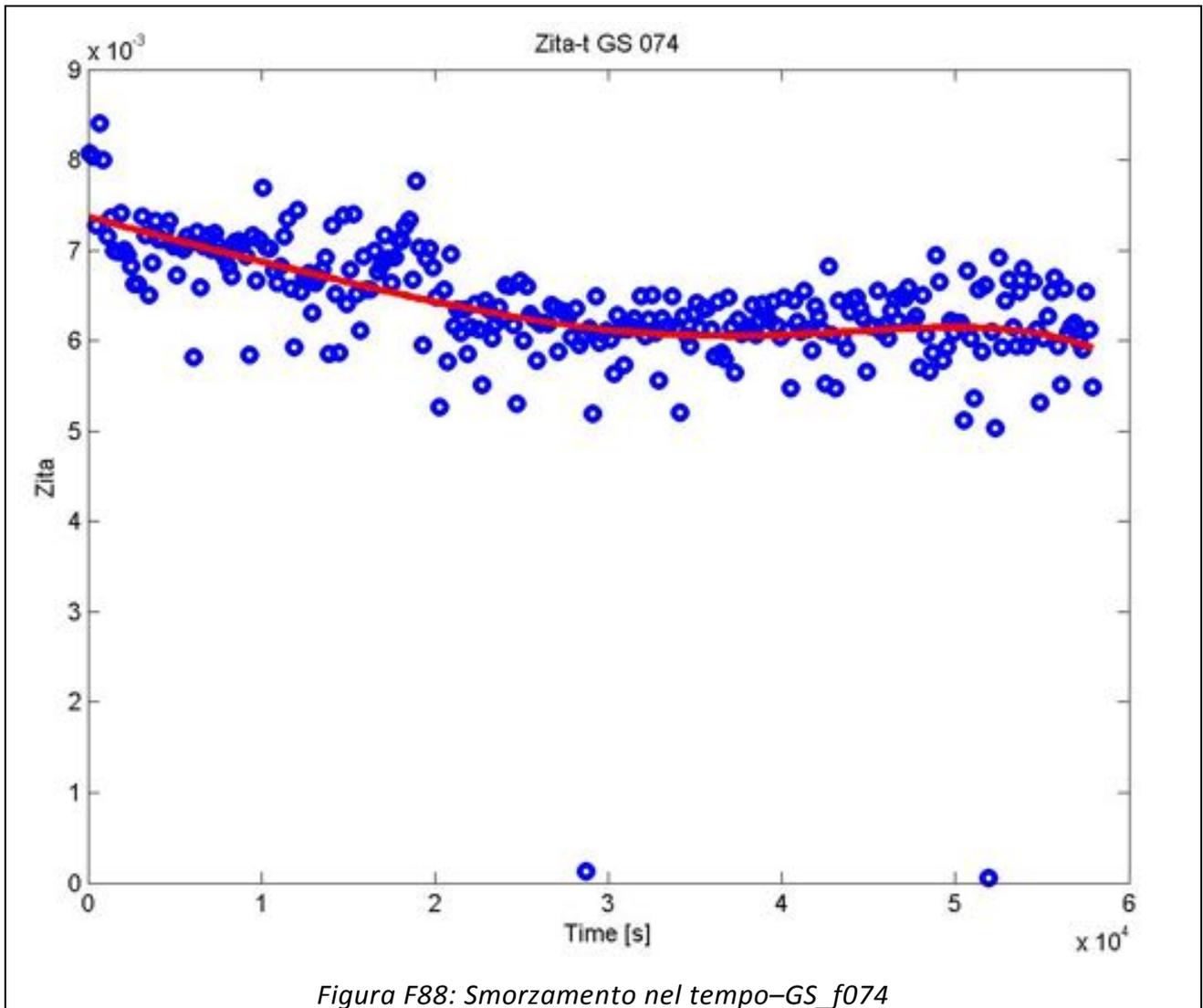
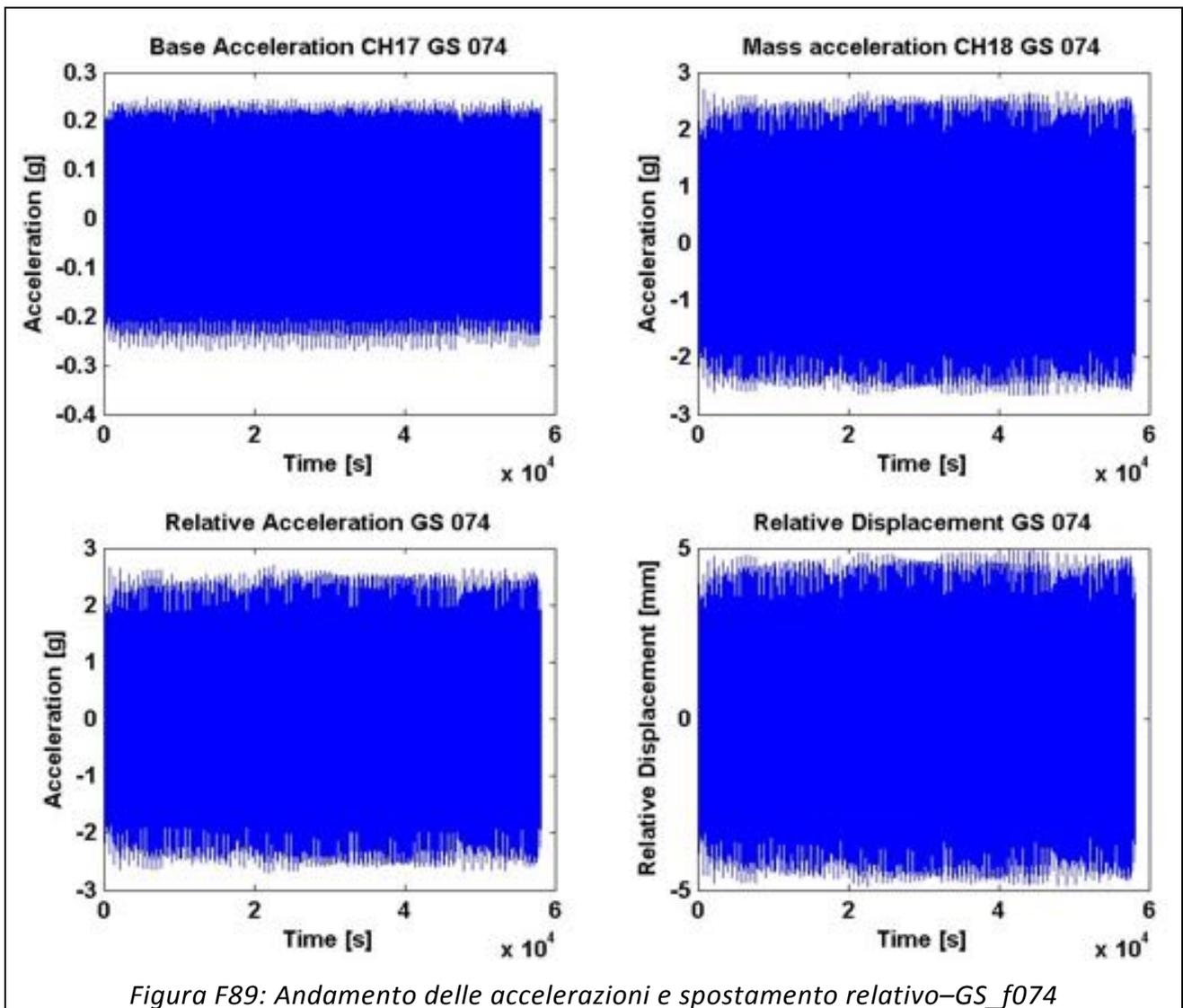


Figura F88: Smorzamento nel tempo-GS_f074



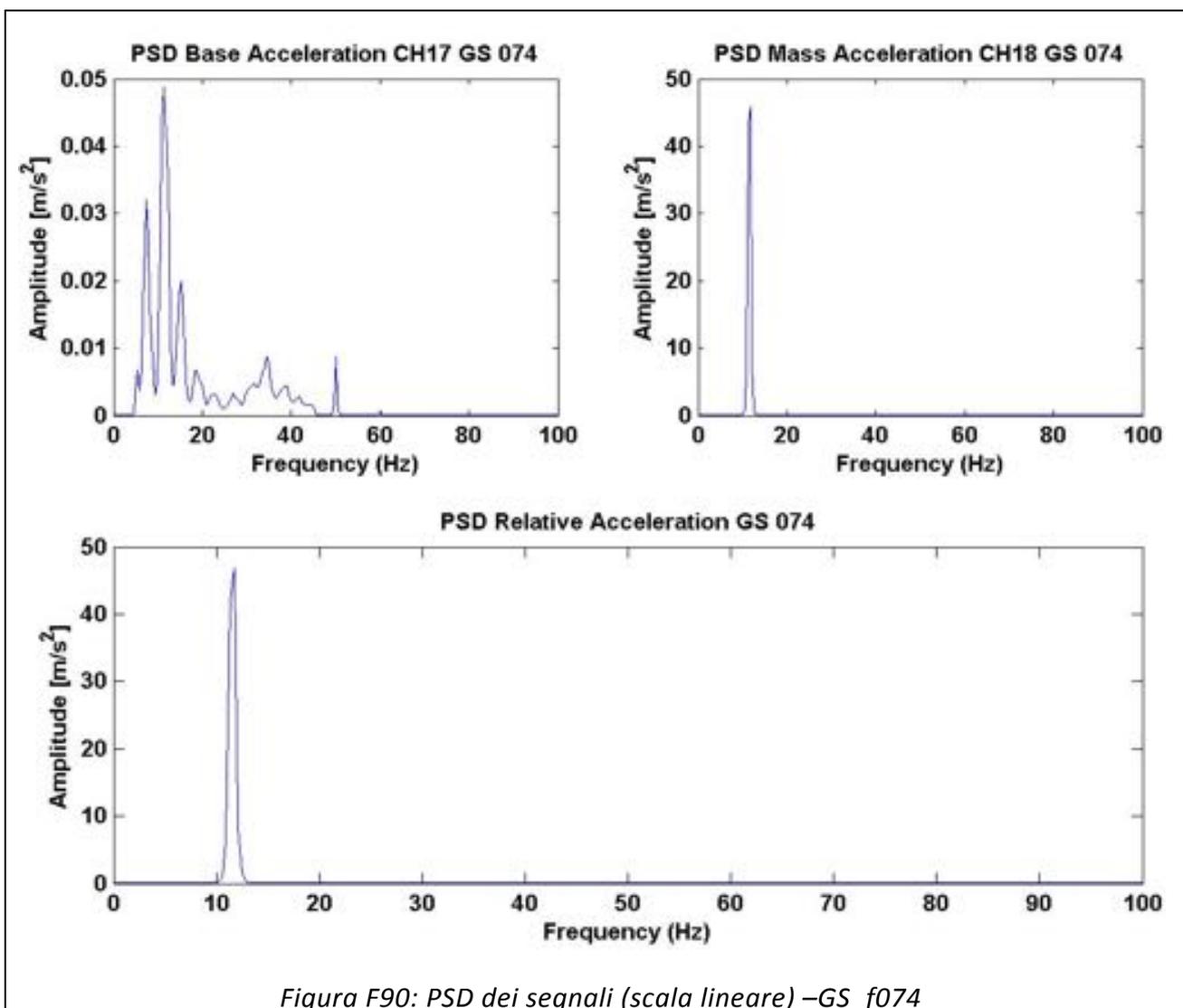
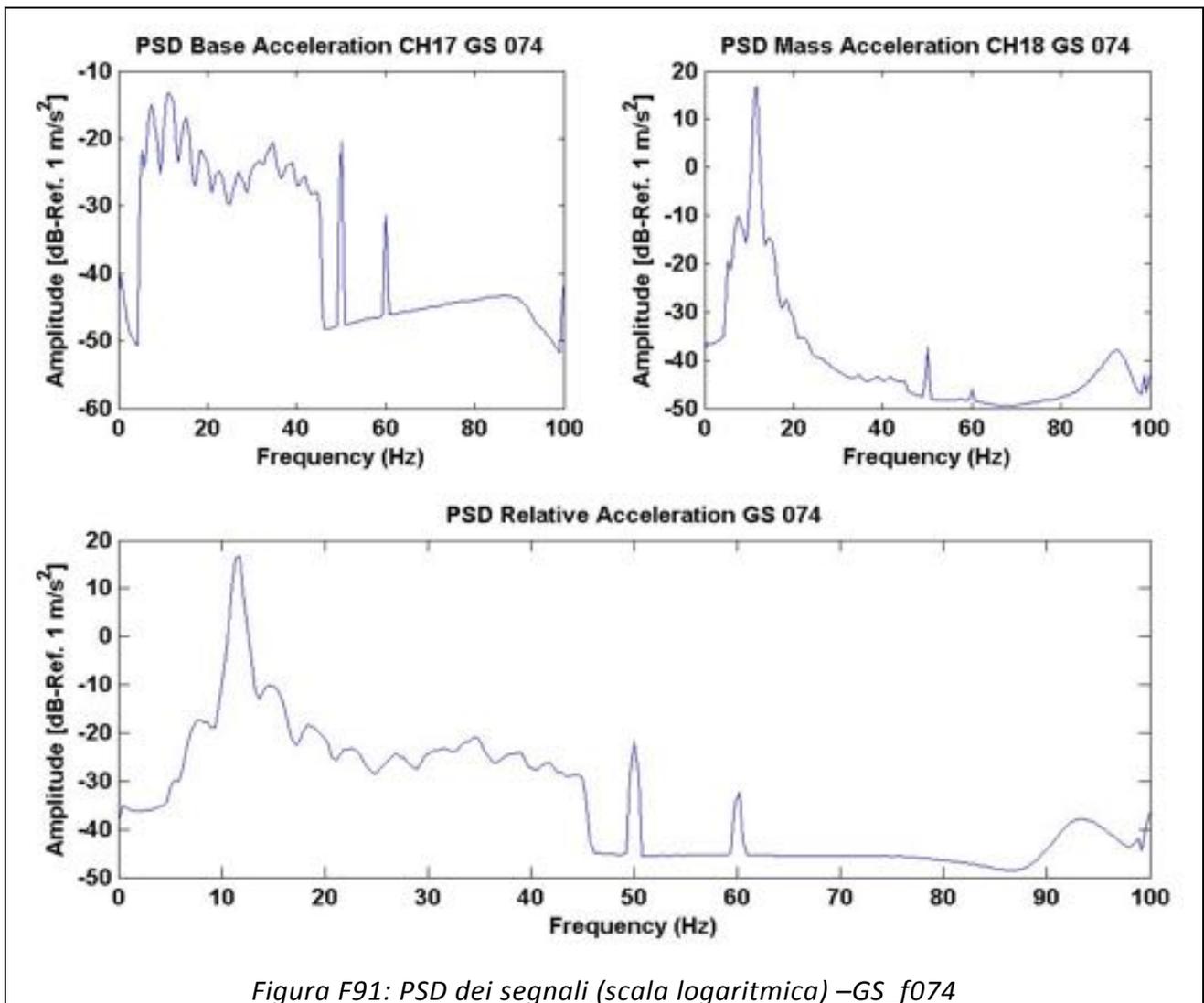
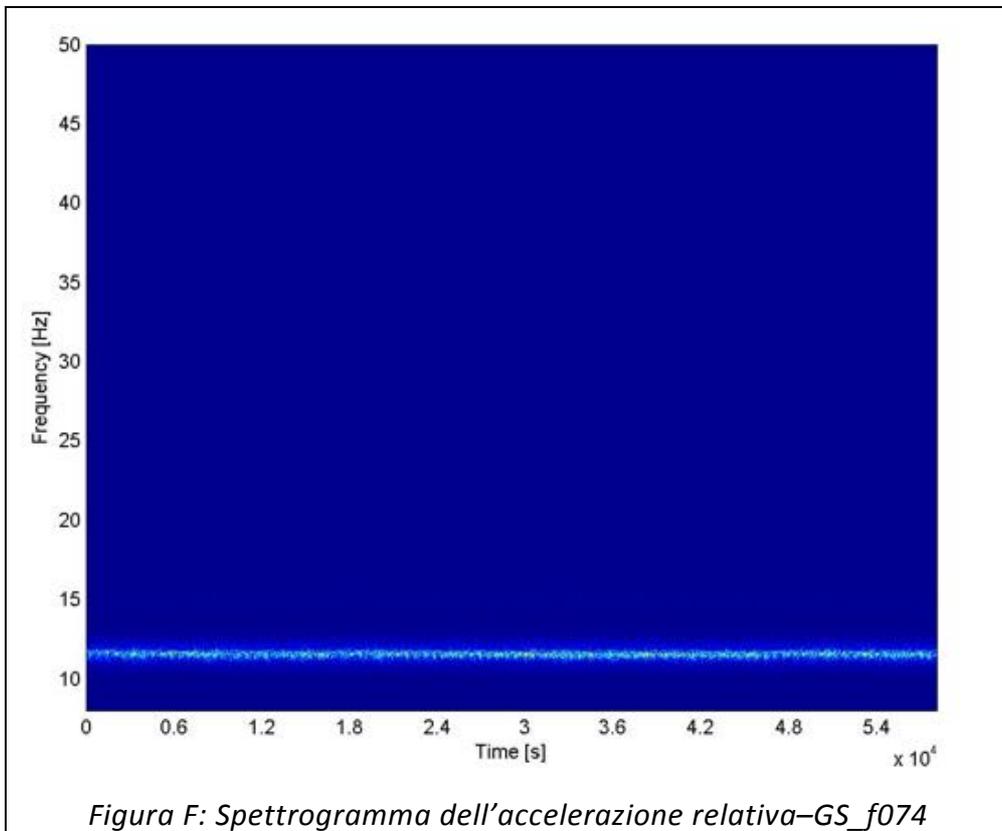
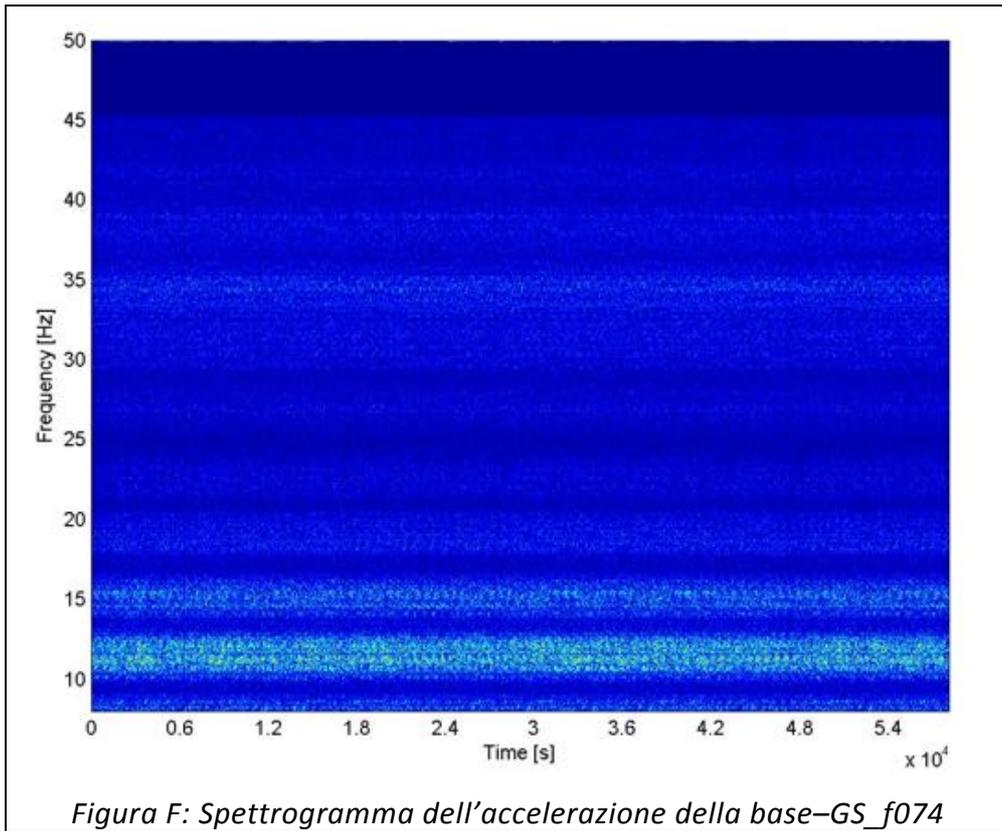
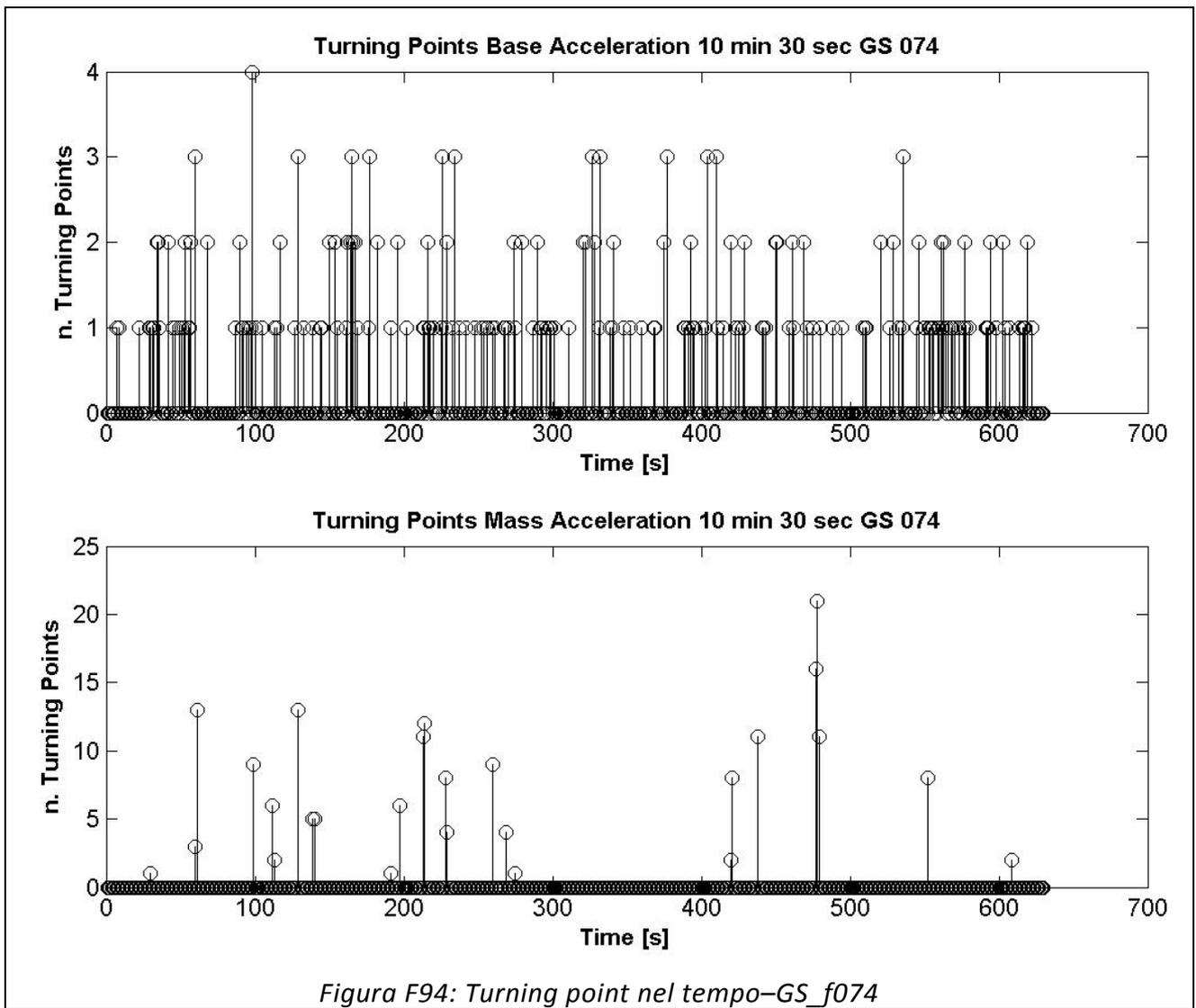
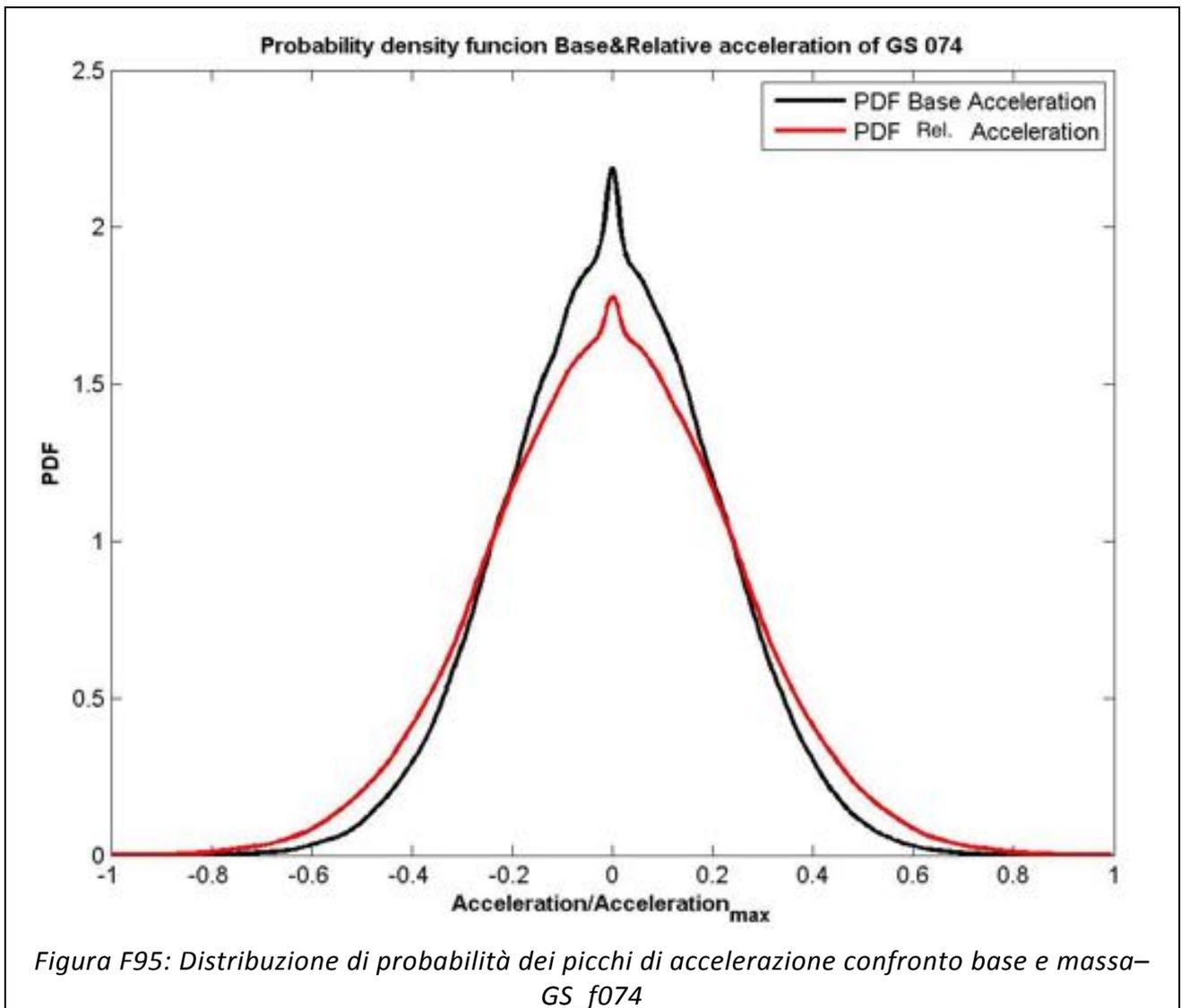


Figura F90: PSD dei segnali (scala lineare) –GS_f074









Provino GS_f075

	Media [g]	RMS [g]	Skewness	Kurtosis	Crest Factor	Frequenza media [Hz]
Accelerazione Base CH17	5,66E-09	0,054	-9,78E-03	3,063	4,547	11,33
Accelerazione Massa CH18	2,57E-07	0,847	-8,52E-03	2,987	62,622	11,72
Accelerazione Trasversale CH22	1,34E-09	0,021	-3,39E-01	12,572	6,909	33,98
Accelerazione Verticale CH23	2,42E-07	0,817	5,72E-02	2,986	62,861	11,72
Accelerazione Longitudinale CH24	1,91E-07	0,643	-5,82E-02	2,982	45,537	11,72
Accelerazione relativa CH17-CH18	2,52E-07	0,847	-8,61E-03	2,984	62,908	11,72

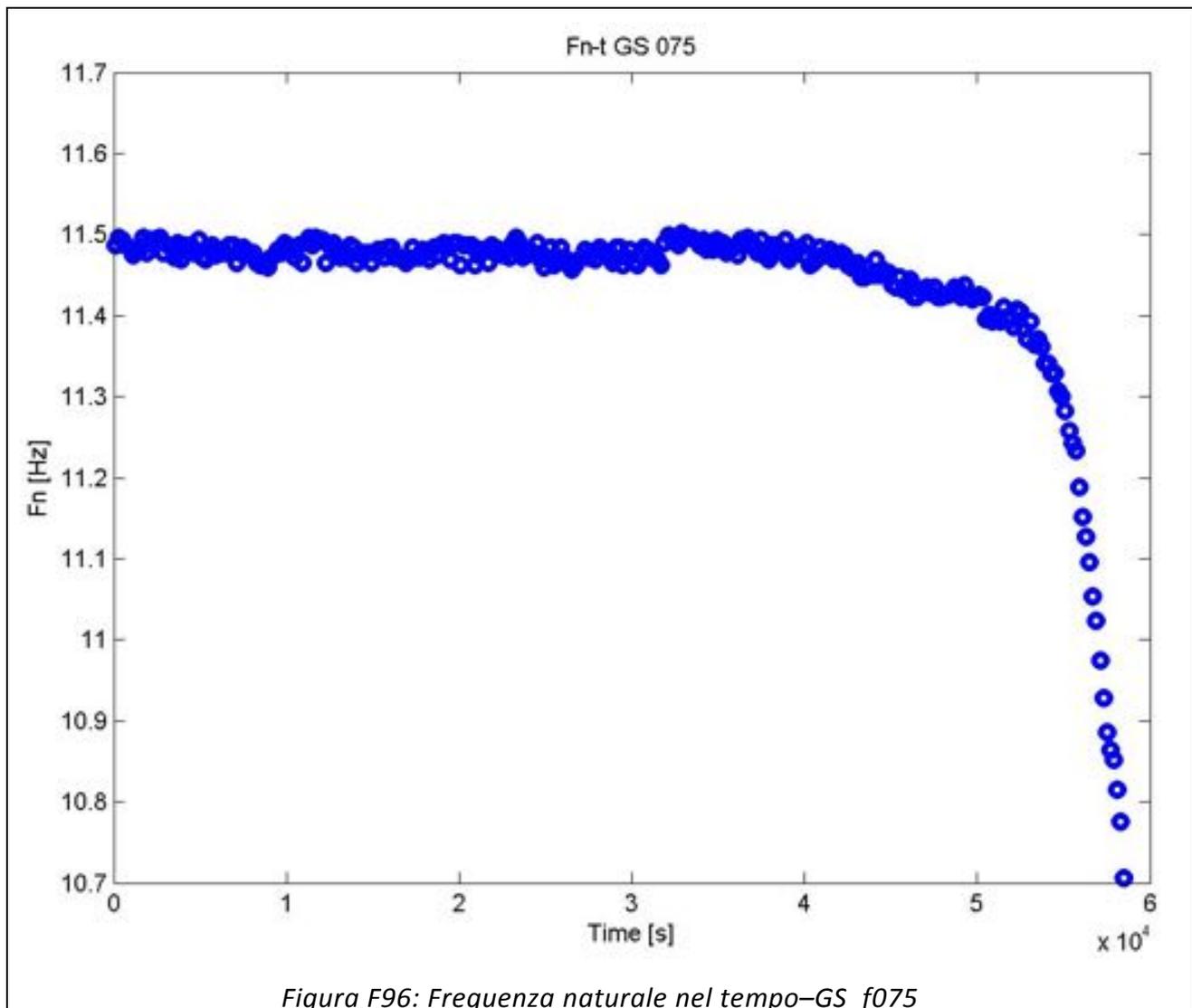


Figura F96: Frequenza naturale nel tempo-GS_f075

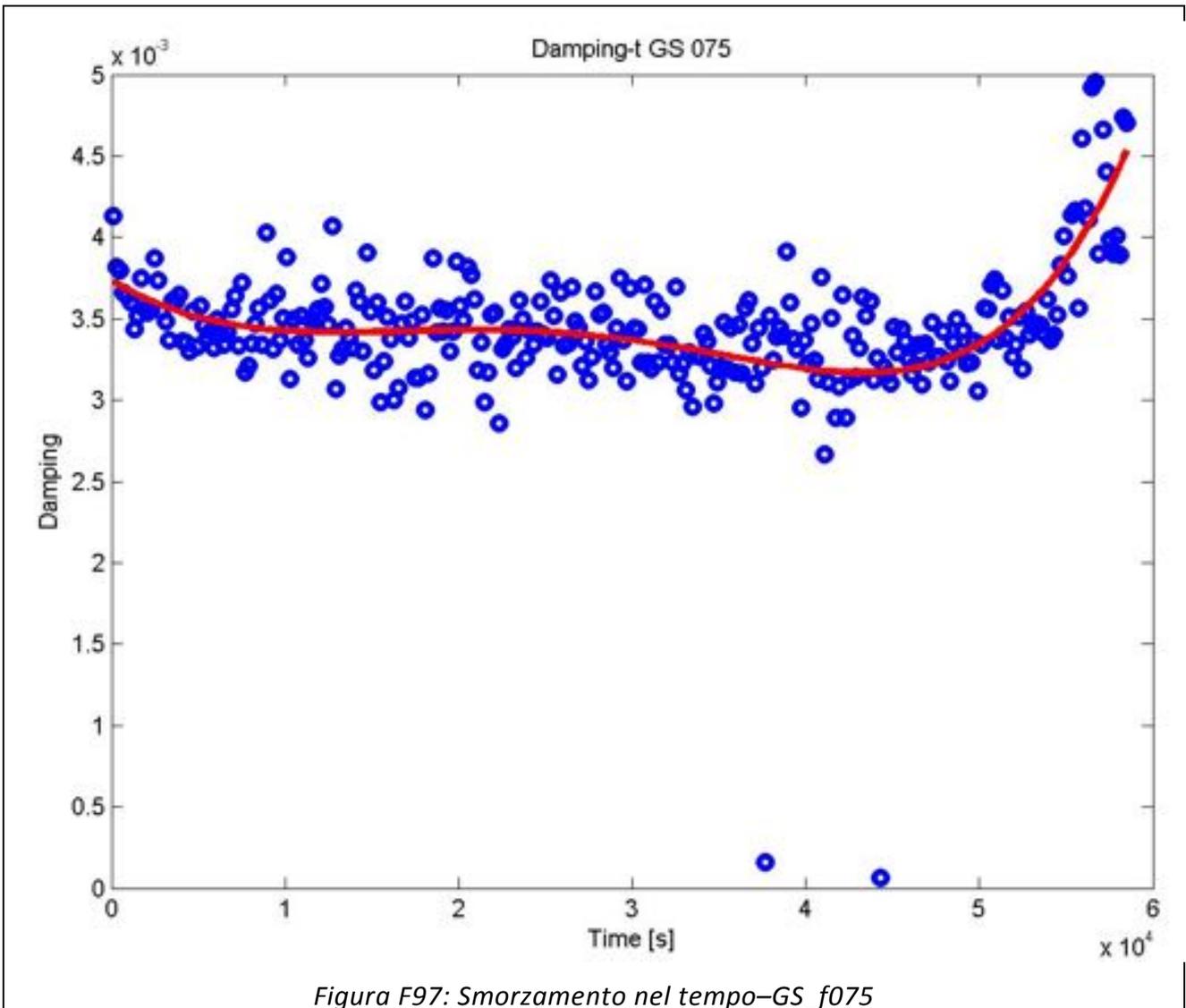


Figura F97: Smorzamento nel tempo-GS_f075

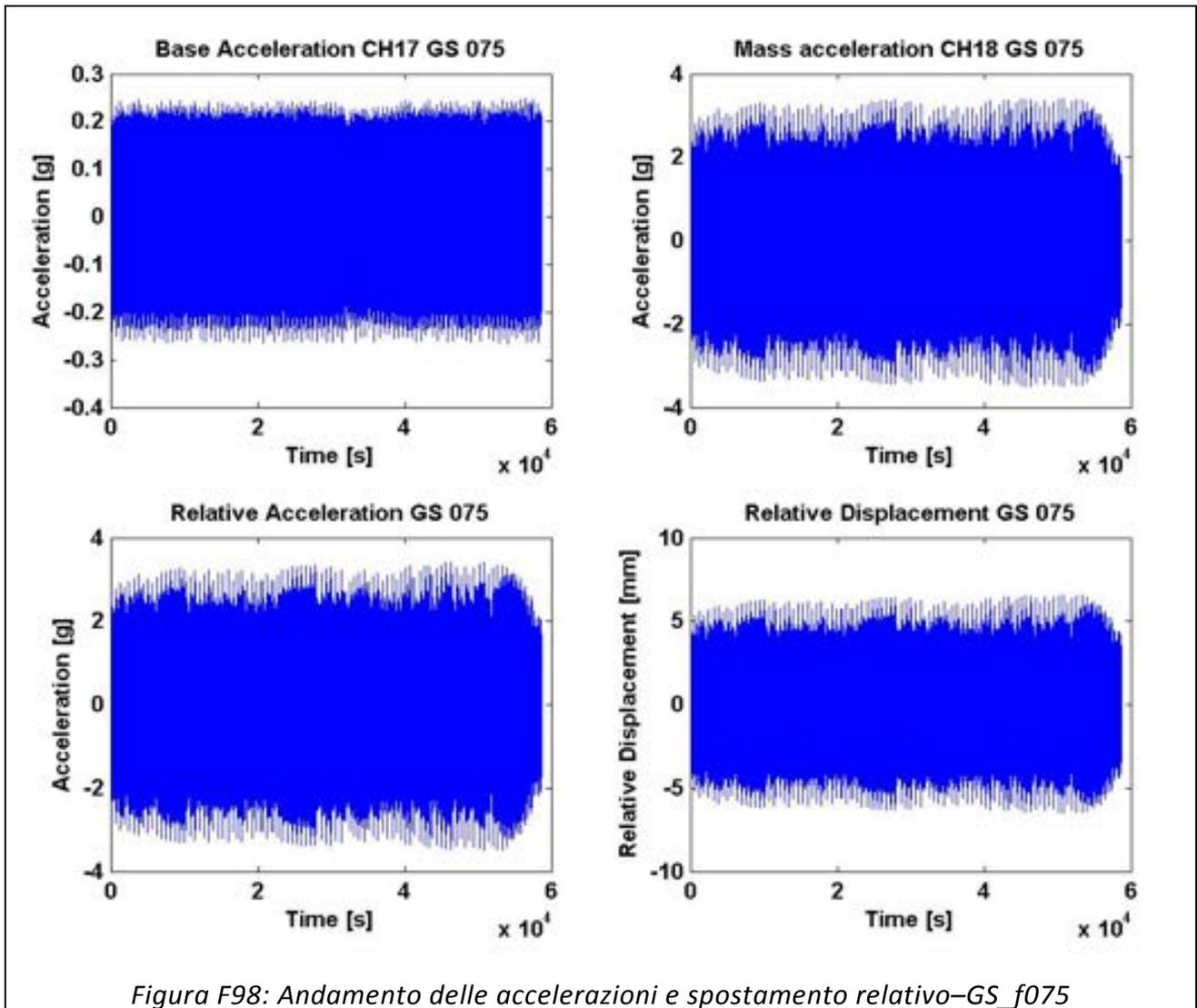


Figura F98: Andamento delle accelerazioni e spostamento relativo-GS_f075

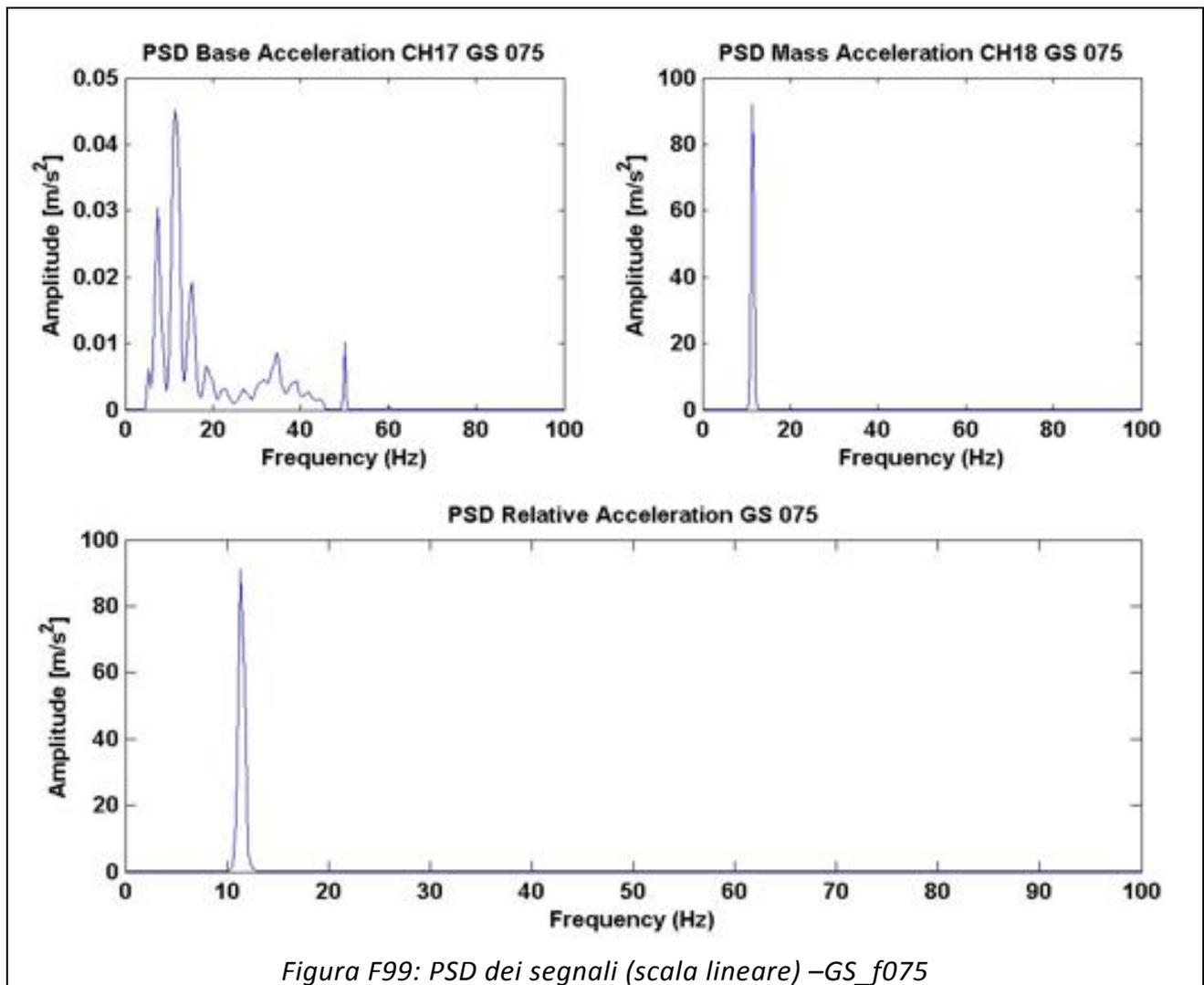
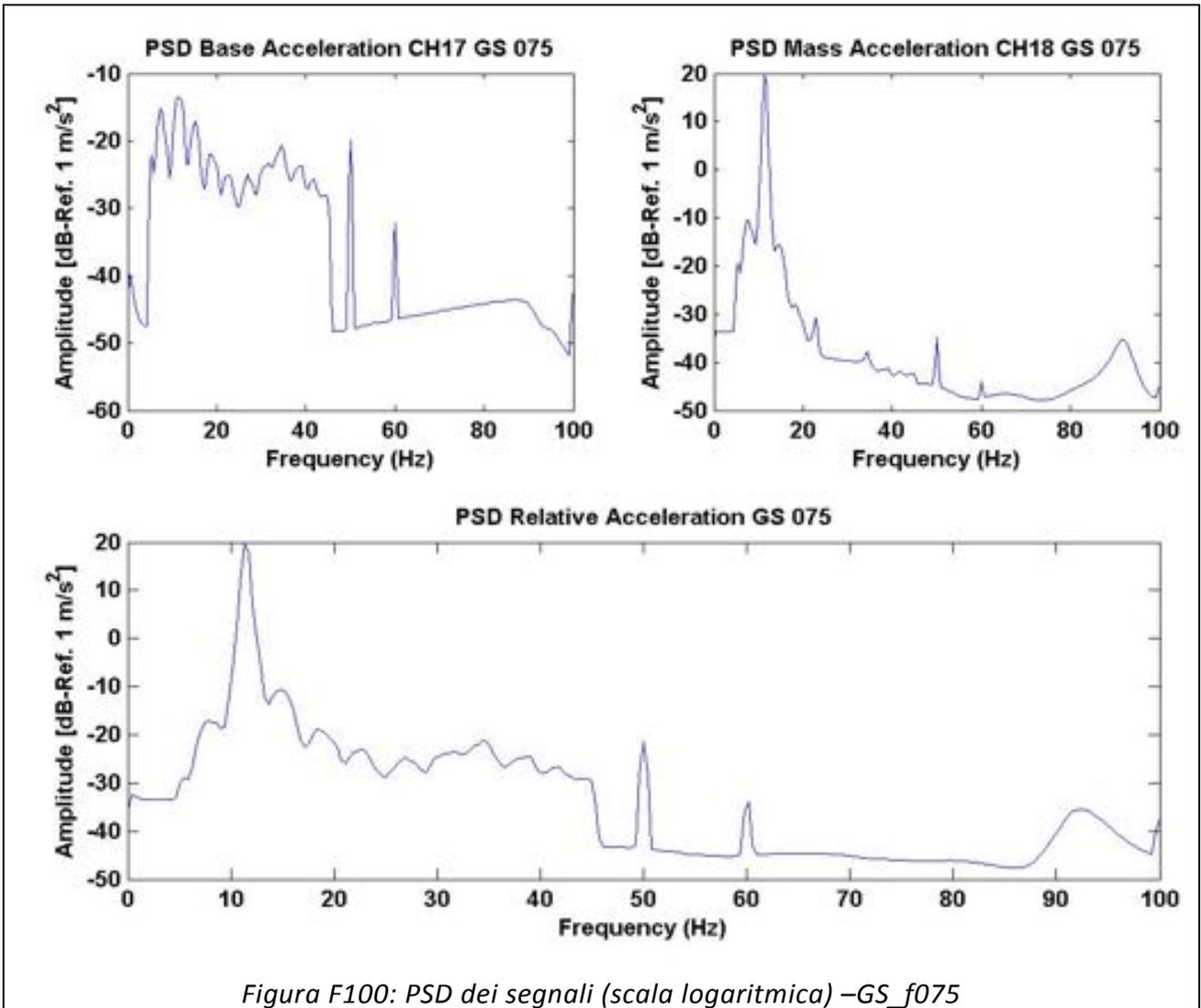
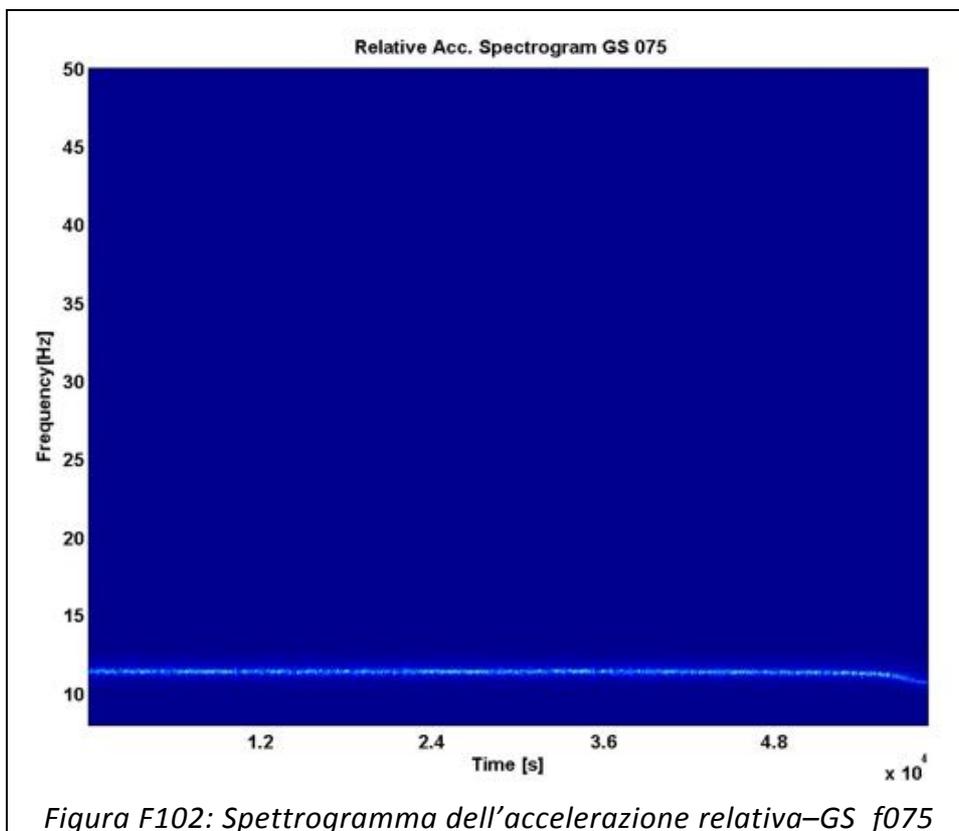
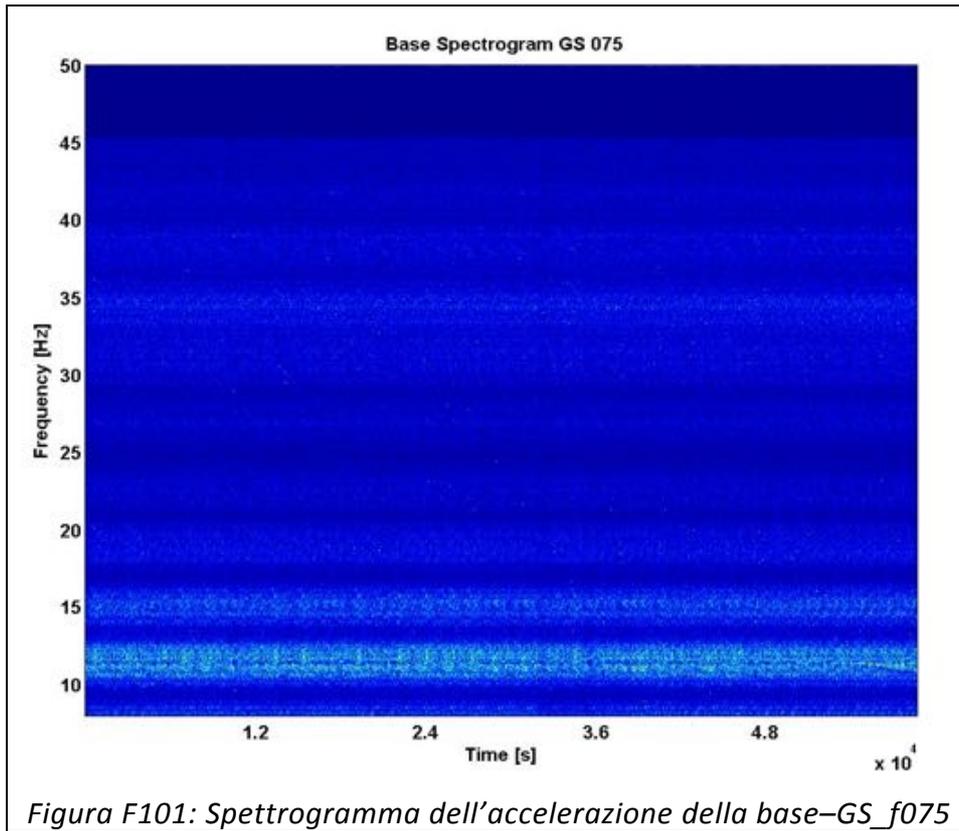
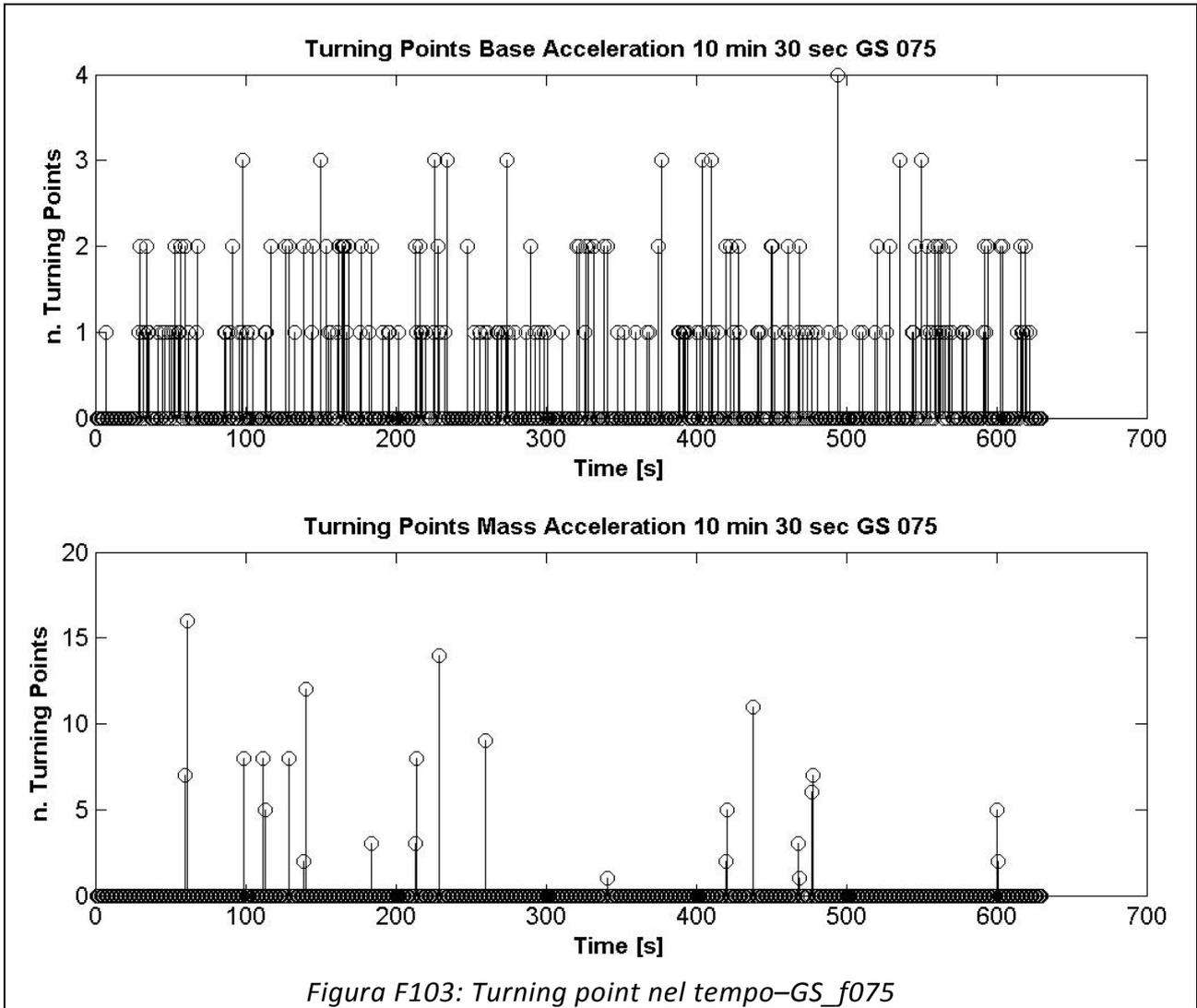
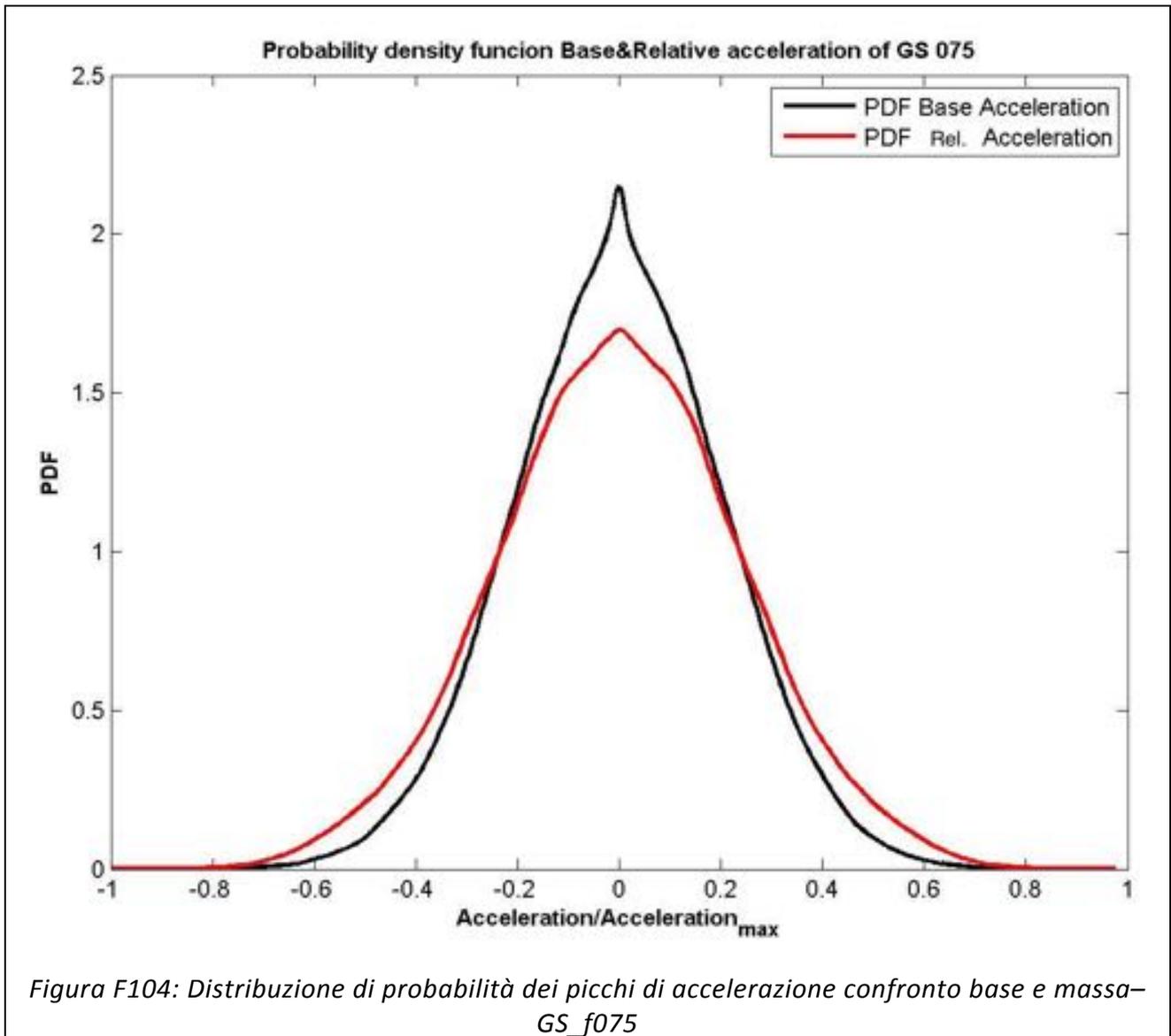


Figura F99: PSD dei segnali (scala lineare) –GS_f075



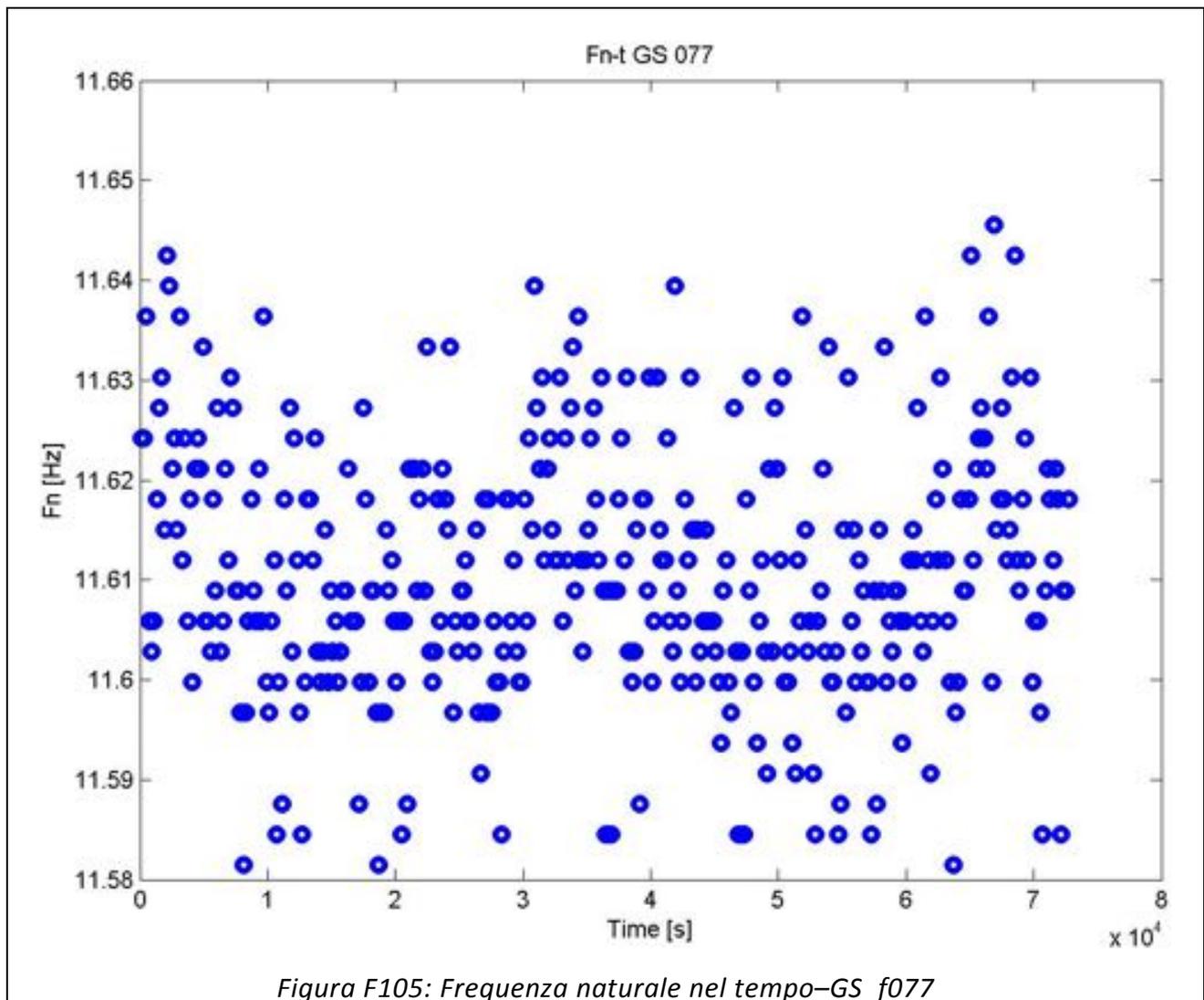






Provino GS_f077 (Fuori Trend)

	Media [g]	RMS [g]	Skewness	Kurtosis	Crest Factor	Frequenza media [Hz]
Accelerazione Base CH17	-1,17E-08	0,056	-8,99E-03	3,058	4,547	11,33
Accelerazione Massa CH18	-1,63E-07	0,722	-6,34E-03	3,155	62,622	11,33
Accelerazione Trasversale CH22	4,81E-09	0,027	9,48E-02	10,754	6,909	11,72
Accelerazione Verticale CH23	-1,57E-07	0,677	5,34E-02	3,147	62,861	11,33
Accelerazione Longitudinale CH24	-1,15E-07	0,531	-4,26E-02	3,140	45,537	11,33
Accelerazione relativa CH17-CH18	-1,52E-07	0,723	-7,04E-03	3,148	62,908	11,33



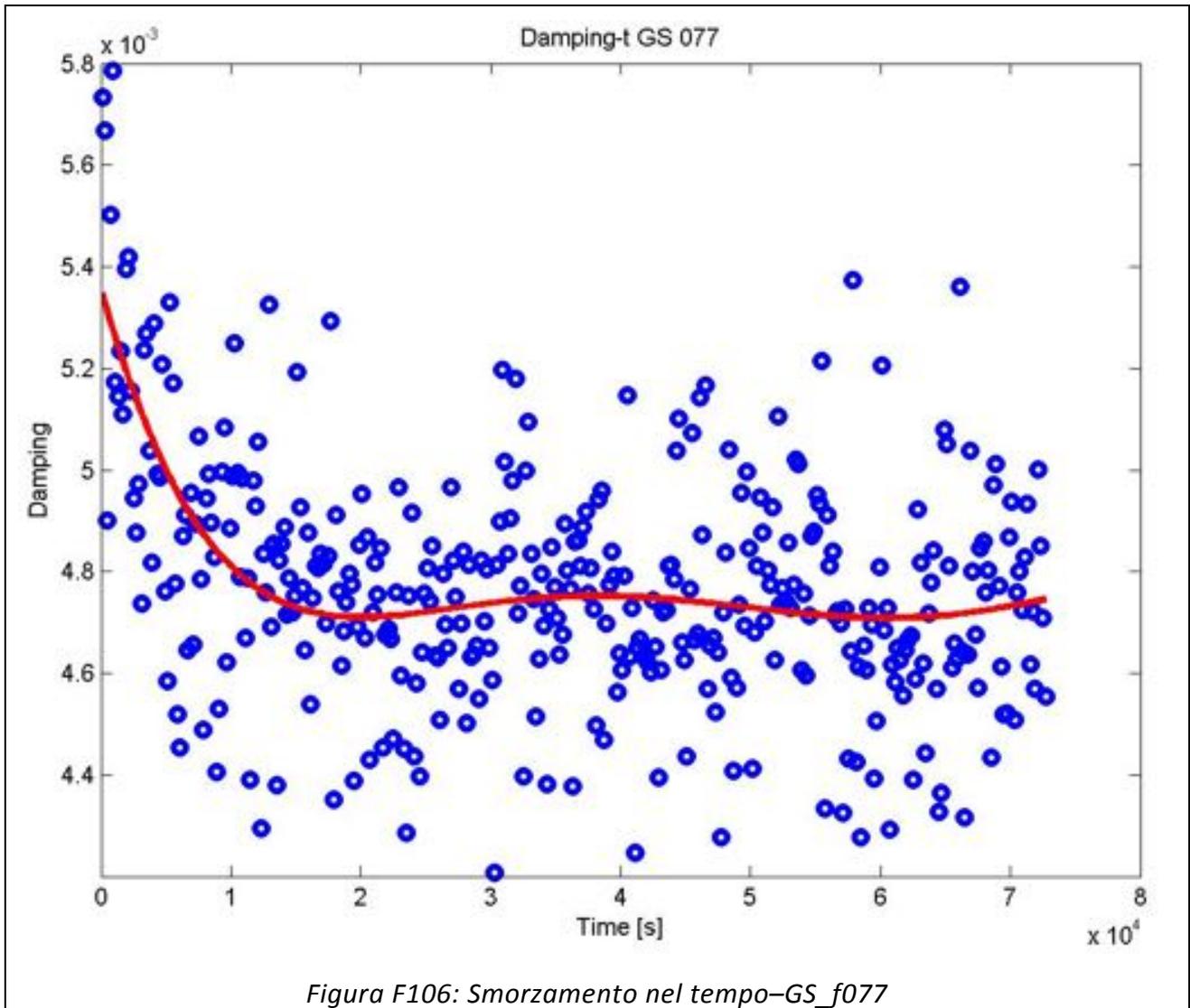
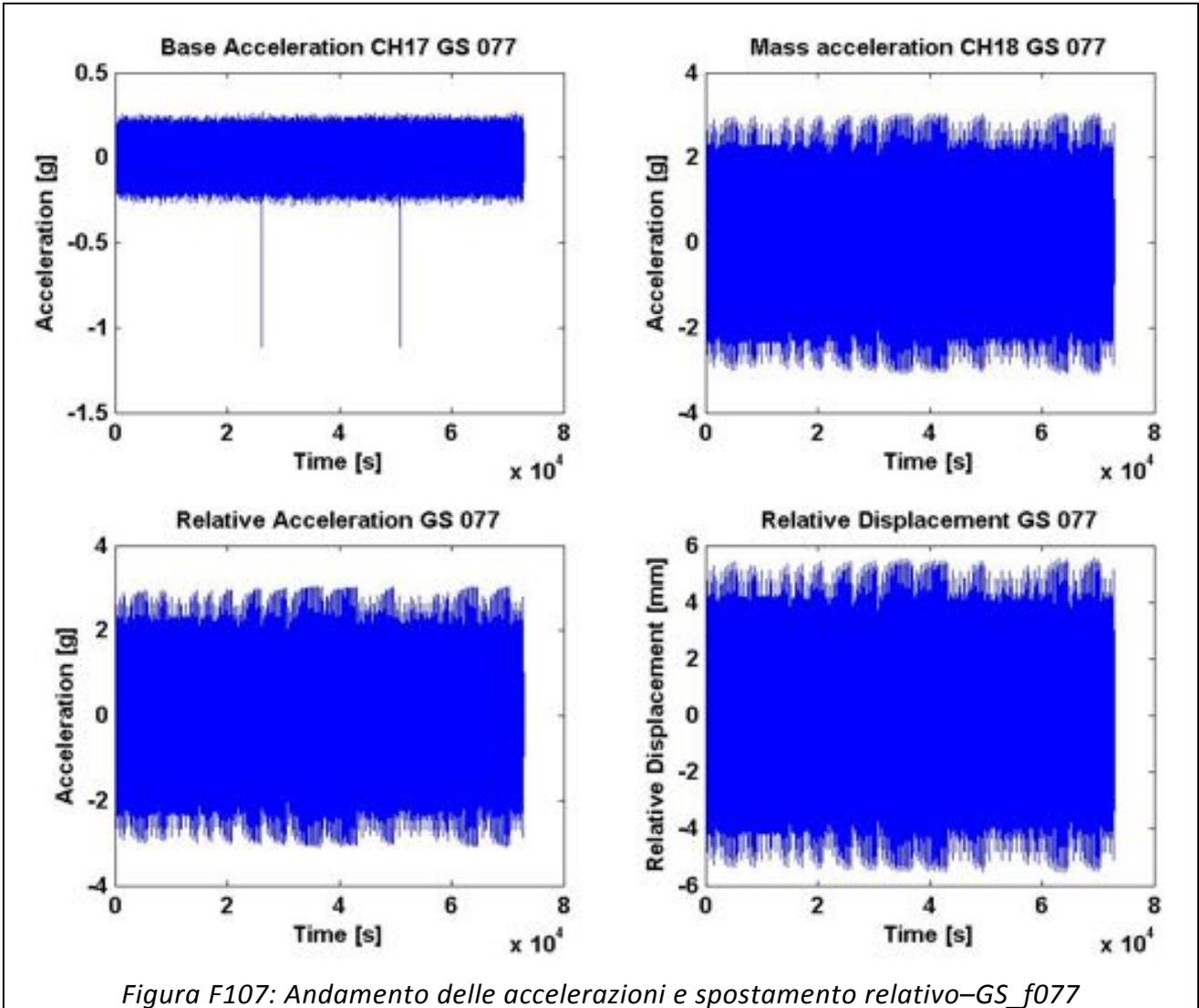


Figura F106: Smorzamento nel tempo-GS_f077



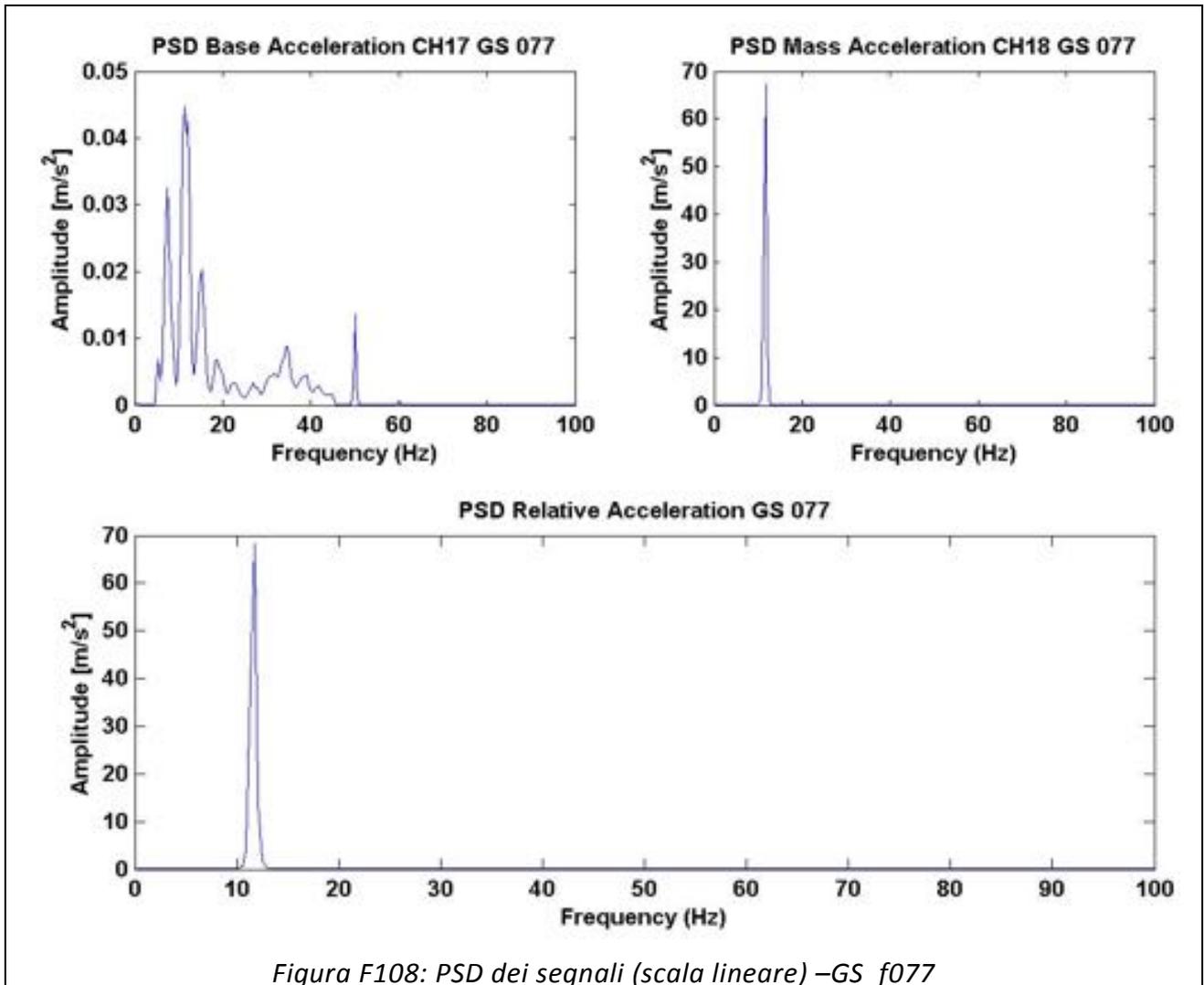
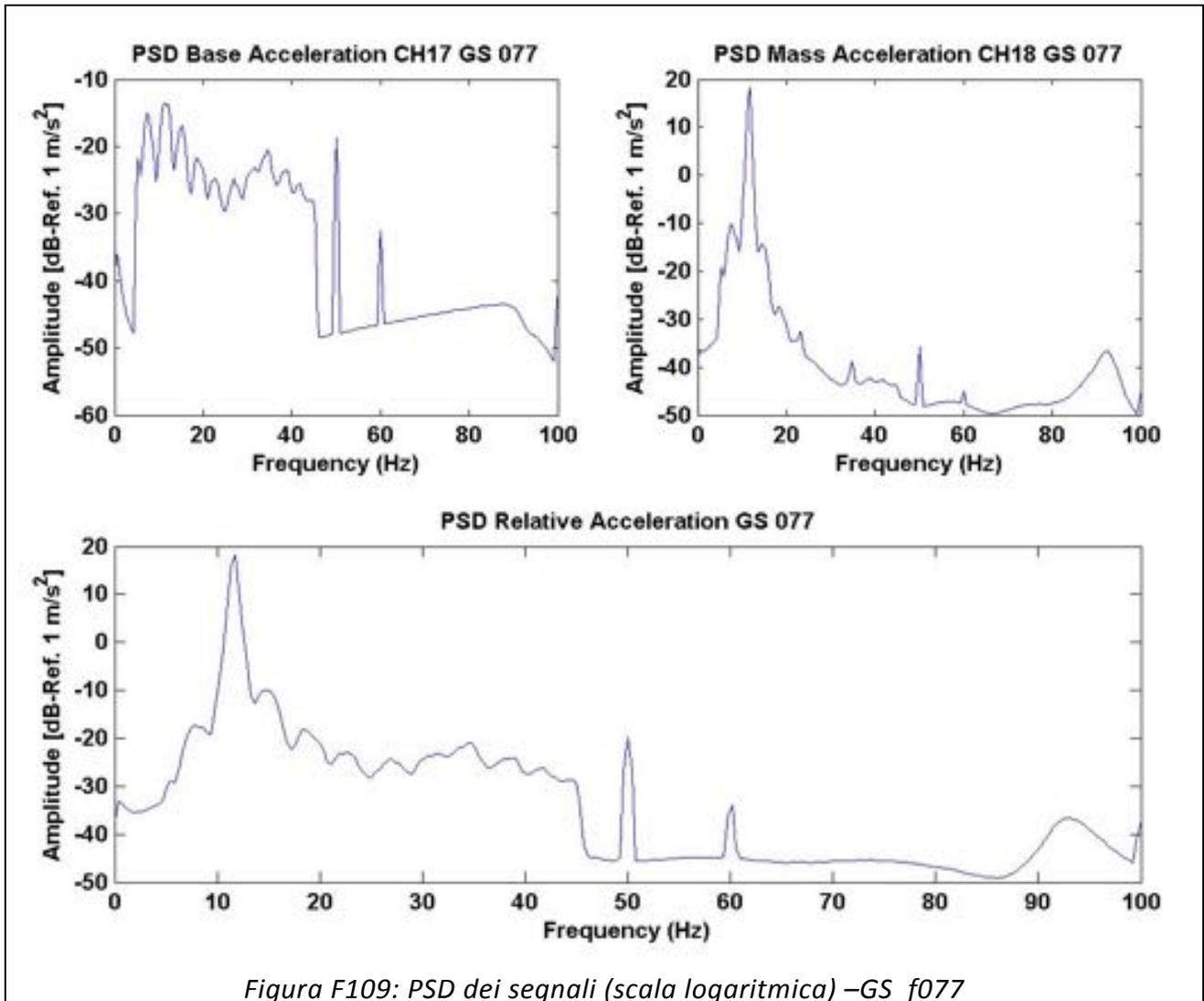


Figura F108: PSD dei segnali (scala lineare) -GS_f077



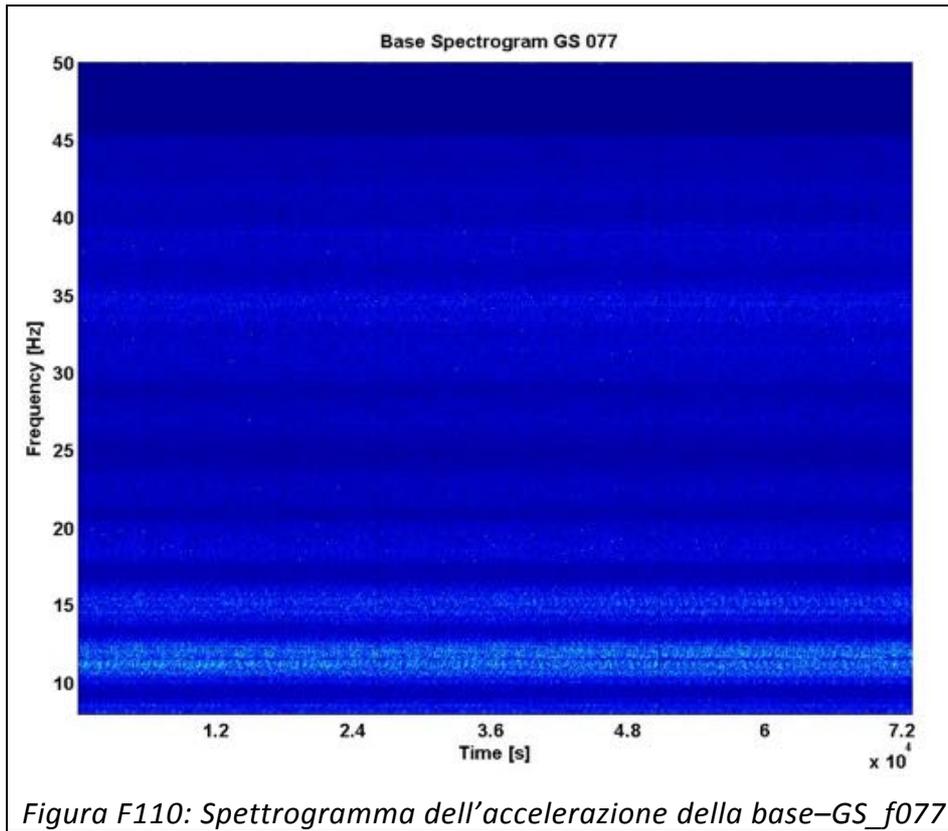


Figura F110: Spettrogramma dell'accelerazione della base-GS_f077

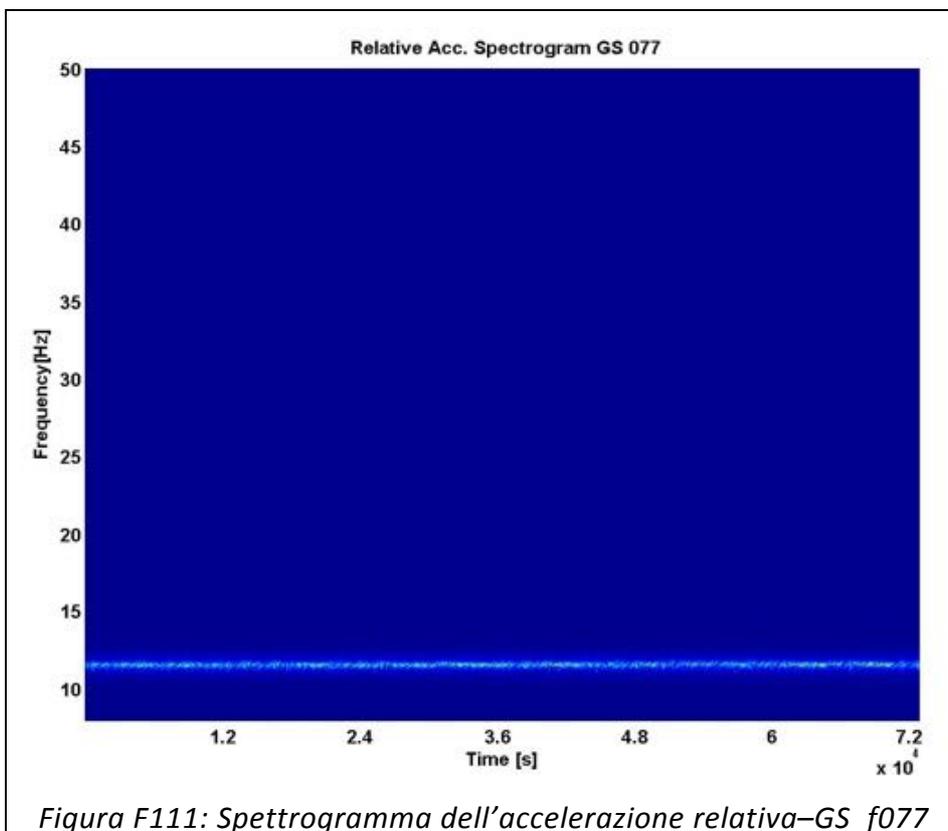
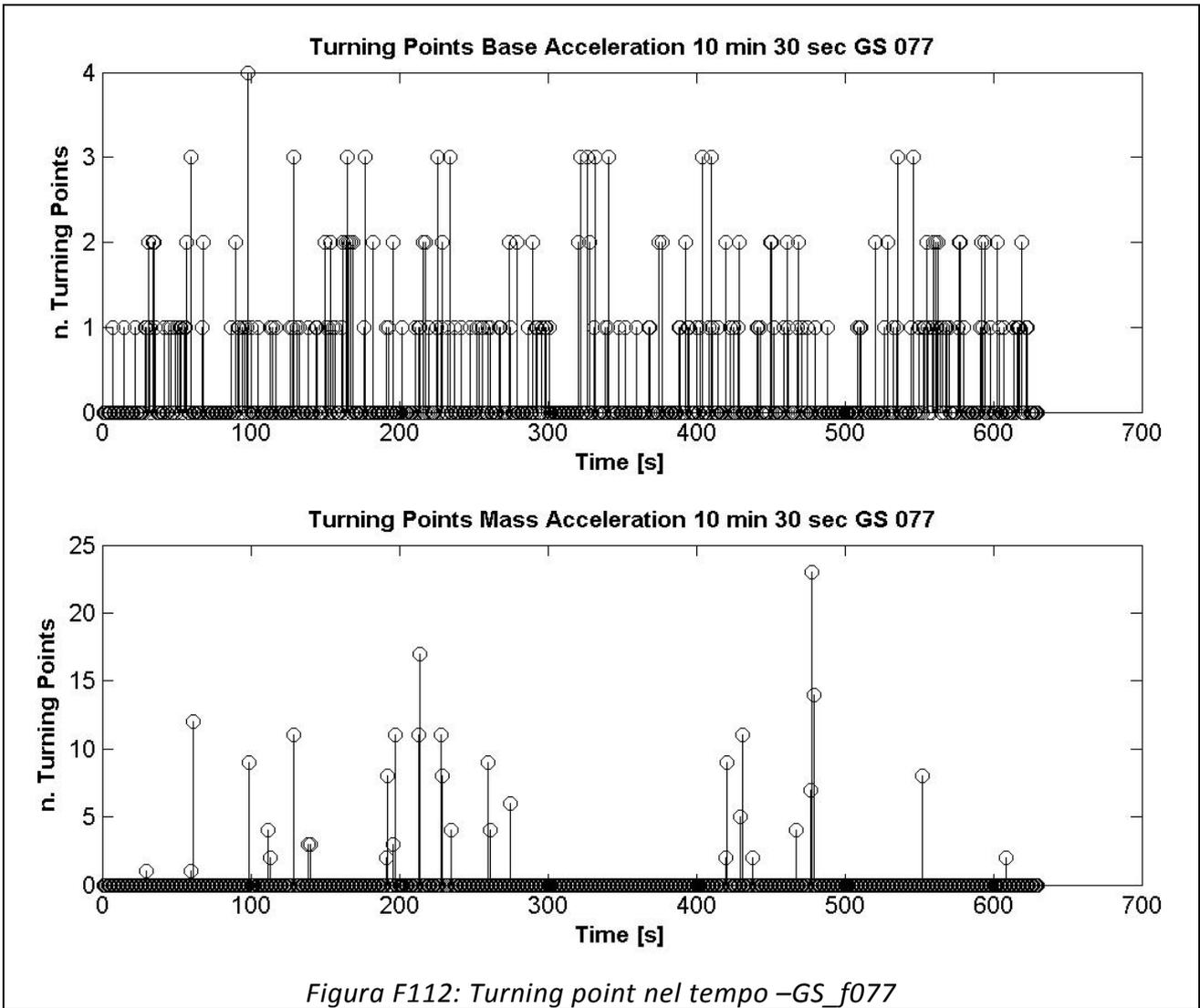
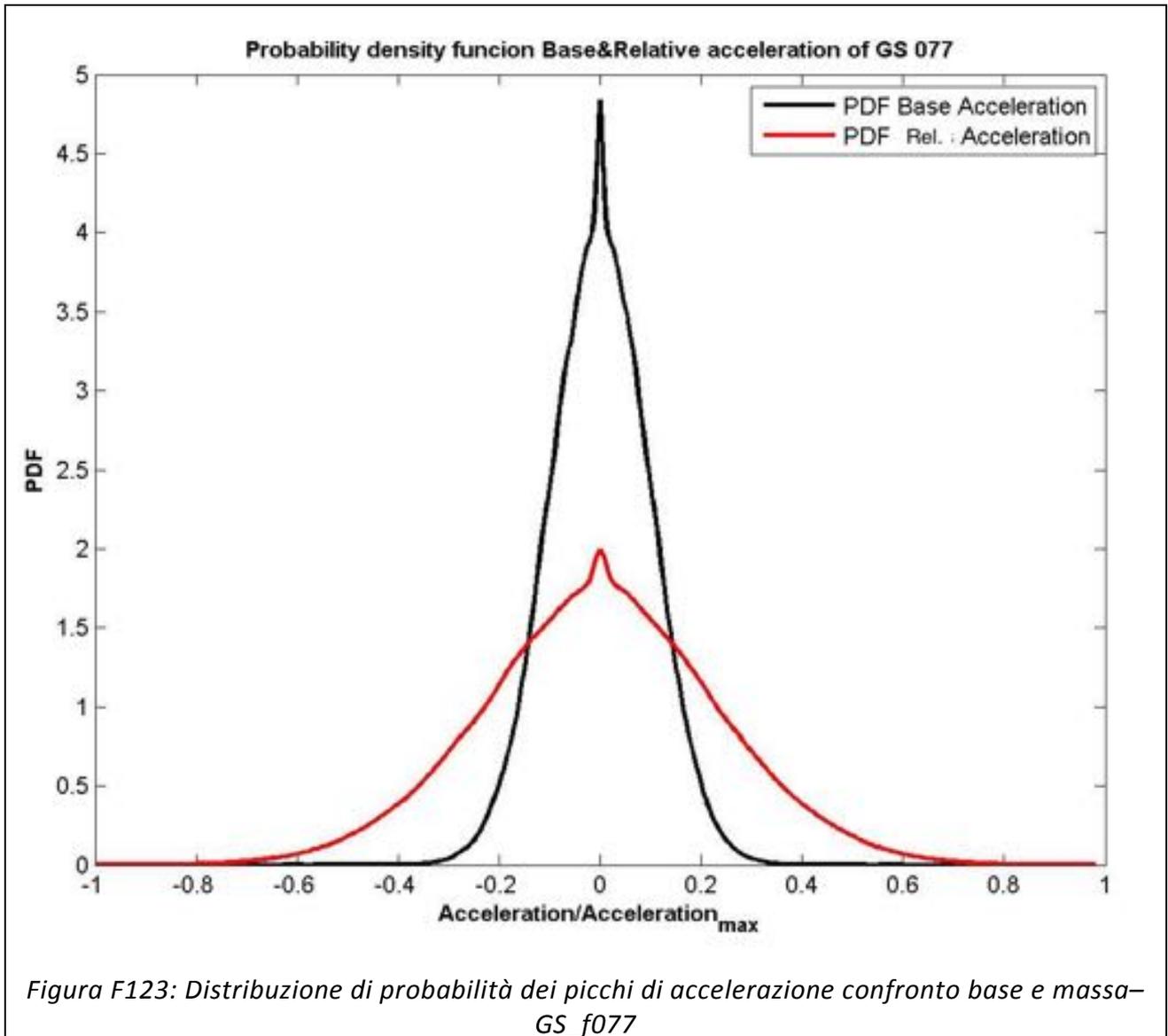


Figura F111: Spettrogramma dell'accelerazione relativa-GS_f077





Bibliografia

[1] Höhn Gustav Niemann, Hans Winter, Bernd-Robert: "Manuale degli organi delle macchine"

[2] Singiresu S. Rao: "Mechanical Vibrations" University of Miami

[3] Rivola Alessandro: "Analisi dei dati"

[4] Marco Troncossi, Rivola Alessandro: "Response analysis of specimens excited with non-Gaussian acceleration profiles".

[5] Roberto Cipollini. "Qualifica a Vibrazioni di Componenti Meccanici: Studio e Verifica di una Procedura di Test Tailoring." Dottorato di ricerca in Meccanica e Scienze avanzate dell'Ingegneria, 2013.

[6] Luca Mariani. "Indagine sperimentale sulla risposta vibratoria di provini sottoposti ad eccitazione non-Gaussiana". Tesi sperimentale in Ingegneria Meccanica, 2014.

[7] Martin Cesnik, Janko Slavic, Miha Boltezar: "Vibrational fatigue and structural dynamics at harmonic and random loads".

[8] Martin Cesnik, Janko Slavic, Miha Boltezar: "Uninterrupted and accelerated vibrational fatigue testing with simultaneous monitoring of the natural frequency and damping" Journal of Sound and Vibration DOI: 10.1016/j.jsv.2012.06.022.

[9] Joel Minderhoud and Philip Van Baren: "Using Kurtosion to Accelerate Structural Life Testing", Jenison, Michigan

[10] "Development of criteria for qualification vibration of mechanical components through software" LMS Test.Lab Mission Synthesis A.Lucifredi, P.Silvestri, F.Tripepi, G.Camauli

[11] "The missing Knob on Your Random Vibration Controller" Philip Van Baren, Vibration Research Corporation, Jenison Michigan

[12] J. Van Baren and P. Van Baren. Kurtosion "getting the kurtosis into the resonance". Vibration Research Corporation.

[13] "On the Response of a Nonlinear Structure to High Kurtosis Non-Gaussian Random Loadings" Stephen A. Rizzi, Adam Przekop, Travis Turner. Structural Acustics Branch, NASA Langley Research Center, Hampton, Virginia 23681, USA.