

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II



Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale

Dottorato di ricerca in **Ingegneria dei Sistemi Civili**

XXIX ciclo

Tesi

**Modelli empirico - meccanicistici e sistemi inferenziali adattivi
neuro - fuzzy per la valutazione del decadimento dell'aderenza
delle piste di volo aeroportuali**

Relatore

Prof. Ing. Gianluca Dell'Acqua

Coordinatore di dottorato

Prof. Ing. Andrea Papola

Controrelatore

Prof. Ing. Mario De Luca

Candidato

Dott. Ing. Francesco Abbondati

ANNO ACCADEMICO 2016/17

*L'uomo è la misura di tutte le cose,
di quelle che sono in quanto sono,
e di quelle che non sono in quanto non sono.*

PROTAGORA

*I nostri ragionamenti sono fondati su due grandi principi:
quello della contraddizione,
per cui ti richiamo falso ciò che implica contraddizione vero ciò che è opposto al
falso,
e quello della ragion sufficiente,
in virtù del quale giudichiamo impossibile che alcun fatto sia vero od esiste se
non v'è ragione sufficiente perché sia così e non altrimenti.*

GOTTFRIED WILHELM VON LEIBNIZ

Sommario

La ricerca è inquadrata nel settore scientifico disciplinare ICAR/04 "Strade, Ferrovie ed Aeroporti", settore ERC principale PE - Physical Sciences and Engineering, sottosectori ERC 1. PE8_3 Civil engineering, architecture, maritime/hydraulic engineering, geotechnics, waste treatment; 3. PE8_8 Materials engineering (metals, ceramics, polymers, composites, etc.).

Uno dei temi più rilevanti della sicurezza in campo aeroportuale, è la pericolosità associata alle manovre "a terra" dei velivoli (decollo e atterraggio). In tale ambito, il rilievo dell'aderenza assume particolare importanza per il controllo ed il monitoraggio delle caratteristiche superficiali delle piste in uso per gli aeromobili. In particolare, l'azione frenante dei velivoli, in atterraggio o in decollo, è strettamente legata all'aderenza.

Dall'analisi delle serie storiche degli incidenti si evince che a fronte di tempi per le operazioni di decollo e atterraggio pari al 2% della durata dell'intera fase di volo si riscontra un

tasso di incidenti mortali pari al 37%; di contro, alla fase di crociera che, temporalmente, rappresenta il 57% delle operazioni di volo, è associata una percentuale di incidenti mortali pari solo all'8%.

Le manovre "a terra" presentano tre criticità: 1) decelerazione dei velivoli in atterraggio o in decollo fallito; 2) controllo dell'assetto direzionale durante la corsa di decollo o di atterraggio; 3) innesco dello spin-up (rotazione) dei carrelli al touch down. In queste situazioni determinanti per il controllo dell'assetto direzionale, le forze aerodinamiche, innescandosi, possono ridurre l'azione frenante o generare momenti imbardanti. Le condizioni dello strato superficiale della pista influenzano l'entità delle sollecitazioni sugli aeromobili. Le azioni di frenatura in atterraggio o nella manovra di rinuncia al decollo possono essere compromesse da valori insufficienti del coefficiente di aderenza μ .

L'innescio della rotazione dei carrelli (spin-up) dopo la toccata (touch down) è fondamentale per il funzionamento corretto del sistema anti-skid. Ad esempio il controllo

della traiettoria può essere invalidato se un carrello non raggiunge l'idoneo spin-up inibendo l'anti-skid. Anche l'azione sterzante del carrello anteriore (steering) può essere inficiata da scarsa aderenza della pista.

Il Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale dell'Università degli Studi di Napoli Federico II conduce da anni, nell'ottica dello studio di base dei fenomeni nonché di un perfezionamento delle Normative di settore italiane, campagne di sperimentazione su aeroporti tra cui l'Aeroporto Internazionale Civile di Lamezia Terme. Le campagne sono rivolte al rilievo e monitoraggio del traffico aereo, delle caratteristiche geometriche infrastrutturali, delle caratteristiche tipologiche e fisico/meccaniche degli strati delle sovrastrutture, delle caratteristiche superficiali delle pavimentazioni, ed alla programmazione della manutenzione in particolare delle piste di volo.

L'analisi della bibliografia internazionale rivela l'interesse diffuso dei ricercatori nei confronti dei temi inerenti la gestione delle

condizioni delle superfici delle piste. Numerosi sono in tal senso i temi da approfondire, e tra questi di particolare interesse è la perdita di aderenza della pista per gommatura da pneumatici.

Le raccomandazioni operative della Normativa di settore, quali ad esempio quelle contenute nella Circolare ENAC APT-10A del 30/10/2014, forniscono eccessiva discrezionalità al Gestore aeroportuale sulle procedure di rilievo ed elaborazione dati.

L'obiettivo principale della tesi di dottorato è l'analisi teorico-sperimentale del decadimento dell'aderenza di pavimentazioni per piste di volo, con particolare riferimento alla calibrazione di modelli rappresentativi del comportamento evolutivo dell'aderenza in funzione dei carichi di traffico (fenomeno cumulativo).

La validazione delle variabili predittive dei modelli, la significatività dei dati di traffico, l'affidabilità e la sensitività delle misure di aderenza al variare delle caratteristiche prestazionali e di configurazione geometrica degli aeromobili, sono criteri indicatori

utilizzati per la verifica dei risultati conseguiti.

Ulteriore misura della attendibilità dei risultati consisterà nell'implementazione dei modelli nei sistemi di gestione delle pavimentazioni delle piste aeroportuali.

I modelli elaborati infatti possono essere direttamente impiegati dagli operatori aeroportuali nella pratica tecnica per: predire il degrado dell'aderenza delle piste, con riferimento ai carichi effettivi degli aeromobili nel corso della vita utile degli strati superficiali della pavimentazione; e di conseguenza programmare le attività di manutenzione necessarie per garantire la sicurezza delle manovre a terra degli aeromobili.

Ringraziamenti

Ringrazio il mio tutor Prof. Ing. Gianluca Dell'Acqua, per la guida e la cura nei tre anni di formazione. Guida costante sin dalle primissime istruzioni, stimolante nell'assegnazione di molteplici compiti di ricerca, rigorosa nel trasferirmi il senso di rispetto verso l'impegno accademico. E cura nel percorso di crescita scientifica ed umana, attenta alle competenze individuali.

Ringrazio il Prof. Ing. Mario De Luca, per avermi introdotto nell'ambito di studio sperimentale, ed avermi proposto continui spunti riflessivi. Il confronto con la Sua viva intelligenza ha agito, maieuticamente, nel sollevare metodologie e contenuti della mia ricerca.

Ringrazio la Prof.ssa Ing. Francesca Russo, per la Sua gentile disponibilità ad estemporanee spiegazioni. E viepiù per essermi stata l'esempio dell'ottimismo della volontà, non meno importante nella ricerca scientifica degli attributi della ragione.

Ringrazio il Prof. Ing. Renato Lamberti già Decano dell'ex Dipartimento di Ingegneria dei Trasporti, sempre presente nonostante la conclusione delle Sue attività didattiche, per non aver mai mancato di offrirmi una Sua considerazione su qualsivoglia tema anche di vita, favorendomi del Suo magistrale ingegno.

Ringrazio i colleghi Ingg. Mariarosaria Busiello e Salvatore Antonio Biancardo, per aver sostanziato la Loro amicizia oltre che con la forma anche con generosa compartecipazione alle attività durante i periodi spesi in Dipartimento.

Infine sono grato all'Istituzione, l'Università degli Studi di Napoli Federico II, nella quale sono migliorato.

Indice

1	CAPITOLO	16
1.1	PREMESSA	16
1.2	LA CARATTERISTICA SUPERFICIALE ADERENZA	18
1.2.1	LO SPECIFICO CONTAMINANTE: I DEPOSITI DI GOMMA	28
1.3	LO STATO DELL'ARTE	30
1.4	MOTIVAZIONI ED OBIETTIVI DELLA RICERCA	38
2	CAPITOLO	40
2.1	IL CAMPO DI ANALISI SPERIMENTALE: L'AEROPORTO CIVILE INTERNAZIONALE DI LAMEZIA TERME "SANT'EUFEMIA"	41
2.2	IL MONITORAGGIO E LO STRUMENTO DI MISURA	47
2.3	I RILIEVI	54
3	CAPITOLO	56
3.1	L'INDIVIDUAZIONE DEL VALORE SIGNIFICATIVO, E DELLA LOCALIZZAZIONE ED ESTENSIONE DELLE ZONE DI CONSUMO	56
3.1.1	L'ALGORITMO CART	57
3.1.1.1	APPLICAZIONE DELL'ALGORITMO CART	59
3.1.2	L'ALGORITMO GCHAID	64
3.1.2.1	APPLICAZIONE DELL'ALGORITMO GCHAID	64
3.1.3	L'ALGORITMO K-MEANS OTTIMIZZATO	68
3.1.3.1	APPLICAZIONE DELL'ALGORITMO K-MEANS OTTIMIZZATO	68
3.1.4	L'ALGORITMO SUBTRACTIVE CLUSTERING	72
3.1.4.1	APPLICAZIONE DELL'ALGORITMO SUBTRACTIVE CLUSTERING	72
3.1.5	LA MEDIA DEL TERZO DI PISTA	77
3.1.6	IL M100MRA	77
3.2	ANALISI DEI RISULTATI, COSTRUZIONE DELLE CURVE DI DECADIMENTO, CONFRONTO E SCELTA DELL'ALGORITMO	77
4	CAPITOLO	100
4.1	ANALISI DEI CARICHI	100
4.1.1	STIMA DEL PESO EFFETTIVO DEGLI AEROMOBILI	100
4.1.2	SERIE STORICHE DEI CARICHI CUMULATI ED INDIVIDUAZIONE DELLA VARIABILE REGRESSIVA	104
4.1.3	CONFRONTO DELLE STIME DEI PESI EFFETTIVI LW CON I PESI DI TARGA MLW	105
4.2	IL MODELLO MECCANICISTICO DEI CARICHI CON LE STIME DEI PESI EFFETTIVI	108
4.2.1	CALIBRAZIONE DEL PARAMETRO SIGMA	109
4.3	IL MODELLO EMPIRICO - MECCANICISTICO DEL DECADIMENTO DELL'ADERENZA CON LE STIME DEI PESI EFFETTIVI	110
4.3.1	RINTRACCIAMENTO DEI TRUE RESTARTING POINTS	115
4.3.2	VALIDAZIONE DEL MODELLO	115
4.3.3	APPLICAZIONI DEL MODELLO: ALLINEAMENTO DI MASSIMO CUMULO E PROGRAMMAZIONE SECONDO I LIMITI DI NORMATIVA	118
4.4	IL MODELLO MECCANICISTICO DEI CARICHI CON I PESI DI TARGA	123
4.5	IL MODELLO EMPIRICO - MECCANICISTICO DEL DECADIMENTO DELL'ADERENZA CON I PESI DI TARGA	124
4.5.1	VALIDAZIONE DEL MODELLO	127

5	CAPITOLO.....	131
5.1	LA LOGICA FUZZY	131
5.1.1	GENERALITÀ	131
5.1.2	SISTEMI INFERENZIALI FUZZY	133
5.1.2.1	FUZZYFICAZIONE	133
5.1.2.2	APPLICAZIONE DELLE REGOLE	134
5.1.2.3	SOMMA LOGICA E DEFUZZYFICAZIONE	135
5.1.2.4	TARATURA DELLE FUNZIONI DI APPARTENENZA ATTRAVERSO UN CAMPIONE DI DATI.....	137
5.1.3	FUZZY CLUSTERING	139
5.1.4	COSTRUZIONE DI UN SISTEMA INFERENZIALE FUZZY ATTRAVERSO UN CAMPIONE DI DATI.....	141
5.2	IL MODELLO ANFIS DEL DECADIMENTO DELL'ADERENZA BASATO SULLE CAMPAGNE DI RILIEVO	149
5.2.1	LE VARIABILI DI INPUT E DI OUTPUT	149
5.2.2	IL CARICAMENTO DEI DATI: TRAINING E CHECKING / TESTING	150
5.2.3	LA GENERAZIONE DEL FIS	153
5.2.4	L'OTTIMIZZAZIONE DEL FIS	155
5.2.5	IL TEST DEL SISTEMA	157
5.2.6	LE FUNZIONI DI APPARTENENZA	158
5.2.7	LE REGOLE FUZZY IN FORMA OPERATIVA	159
5.3	IL MODELLO ANFIS DEL DECADIMENTO DELL'ADERENZA DUALE DEL MODELLO EMPIRICO – MECCANICISTICO	161
5.3.1	LE VARIABILI DI INPUT E DI OUTPUT	161
5.3.2	IL CARICAMENTO DEI DATI: TRAINING E CHECKING / TESTING	161
5.3.3	LA GENERAZIONE DEL FIS	163
5.3.4	L'OTTIMIZZAZIONE DEL FIS	163
5.3.5	IL TEST DEL SISTEMA	165
5.3.6	LE FUNZIONI DI APPARTENENZA	166
5.3.7	LE REGOLE FUZZY IN FORMA OPERATIVA	167
	CONCLUSIONI.....	169
	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	171
	APPENDICE A	176
	STRALCIO DALLE SERIE DEI DATI DELLE CAMPAGNE DI RILIEVO 29/4/2011, 27/5/2011, 11/10/2011, 15/11/2011	176
	APPENDICE B	187
	STATISTICHE DI OUTPUT DEL K-MEANS OTTIMIZZATO DELLE SERIE DEI DATI DELLE CAMPAGNE DI RILIEVO 29/4/2011, 27/5/2011, 11/10/2011, 15/11/2011	187
	APPENDICE C	196
	SPETTRO AEROMOBILI: DATI DI TARGA, CONFIGURAZIONI, PRESTAZIONI	196
	APPENDICE D	198
	STRALCIO DEI DATI DI TRAFFICO CON LE STIME DEI PESI EFFETTIVI PERIODO 24/10/2012-21/12/2012.....	198
	APPENDICE E	212

STRALCIO DELLE SERIE STORICHE DEI CARICHI CUMULATI PERIODO 24/10/2012-
21/12/2012.....212

APPENDICE F..... 223

MATRICI DI TRAINING E DI CHECKING E/O TESTING ANFIS DUALE DEL MODELLO EMPIRICO -
MECCANICISTICO.....223

Lista delle Tabele

Tabella 1 Classi di tessitura superficiale	27
Tabella 2 Classi Funzionali ICAO.....	41
Tabella 3 Bitume modificato dello strato di usura	44
Tabella 4 Composizione granulometrica inerti dello strato di usura	45
Tabella 5 Caratteristiche del conglomerato bituminoso	46
Tabella 6 Informazioni sull'azione frenante	49
Tabella 7 Programma di manutenzione in base alle operazioni turbo-jet per fine pista	51
Tabella 8 Valori di riferimento del coefficiente di aderenza della pista	52
Tabella 9 Campagne di rilievo	54
Tabella 10a Clusters K-means ottimali del rilievo 29/4/2011 allineamento ± 6 , Progressiva	69
Tabella 10b Clusters K-means ottimali del rilievo 29/4/2011 allineamento ± 6 , GN.....	69
Tabella 11a Clusters K-means ottimali del rilievo 27/5/2011 allineamento ± 6 , Progressiva	69
Tabella 11b Clusters K-means ottimali del rilievo 27/5/2011 allineamento ± 6 , GN.....	70
Tabella 12a Clusters K-means ottimali del rilievo 11/10/2011 allineamento ± 6 , Progressiva ..	70
Tabella 12b Clusters K-means ottimali del rilievo 11/10/2011 allineamento ± 6 , GN.....	70
Tabella 13a Clusters K-means ottimali del rilievo 15/11/2011 allineamento ± 6 , Progressiva ..	70
Tabella 13b Clusters K-means ottimali del rilievo 15/11/2011 allineamento ± 6 , GN.....	70
Tabella 14 Parametri adoperati nel Subtractive Clustering	73
Tabella 15 Centroidi Subtractive Clustering del rilievo 24/4/2011 allineamento ± 6	73
Tabella 16 Centroidi Subtractive Clustering del rilievo 27/5/2011 allineamento ± 6	73
Tabella 17 Centroidi Subtractive Clustering del rilievo 11/10/2011 allineamento ± 6	73
Tabella 18 Centroidi Subtractive Clustering del rilievo 15/11/2011 allineamento ± 6	73
Tabella 19a Numero medio di nodi terminali CART e GCHAID	78
Tabella 19b Nodi CART e GCHAID con etichetta GN minima	78
Tabella 20a Numero medio di clusters K-means e Subtractive Clustering	79
Tabella 20b Centroidi K-means e Subtractive Clustering con GN minimo.....	79
Tabella 21 Medie minime dei Terzi di Pista e M100MRA.....	80
Tabella 22 Statistiche di regressione non lineare curva CART allineamento ± 3	81
Tabella 23 Statistiche di regressione non lineare curva GCHAID allineamento ± 3	82
Tabella 24 Statistiche di regressione non lineare curva K-means allineamento ± 3	83
Tabella 25 Statistiche di regressione non lineare curva Subtractive Clustering allineam. ± 3	84
Tabella 26 Statistiche di regressione non lineare curva Terzo di Pista allineamento ± 3	85
Tabella 27 Statistiche di regressione non lineare curva M100MRA allineamento ± 3	86

Tabella 28	Statistiche di regressione non lineare curva CART allineamento ± 6	87
Tabella 29	Statistiche di regressione non lineare curva GCHAID allineamento ± 6	88
Tabella 30	Statistiche di regressione non lineare curva K-means allineamento ± 6	89
Tabella 31	Statistiche di regressione non lineare curva Subtractive Clustering allineam. ± 6	90
Tabella 32	Statistiche di regressione non lineare curva Terzo di Pista allineamento ± 6	91
Tabella 33	Statistiche di regressione non lineare curva M100MRA allineamento ± 6	92
Tabella 34	Deviazioni Standard GN allineamento ± 3	93
Tabella 35	Deviazioni Standard GN allineamento ± 6	94
Tabella 36	Analisi Multicriteria allineamento ± 3	98
Tabella 37	Analisi Multicriteria allineamento ± 6	98
Tabella 38	Statistiche Pesi Stimati e di Targa 2004-2015	107
Tabella 39	CLW _y - GN 2004-2014	110
Tabella 40	Statistiche di regressione non lineare curva CLW _y -GN allineamento ± 3	111
Tabella 41	Statistiche di regressione non lineare curva CLW _y -GN allineamento ± 6	111
Tabella 42	Residuals_vs_Predicted modello CLW _y - GN	116
Tabella 43	Accuratezze MAD e MAPE modello CLW _y - GN.....	118
Tabella 44	Serie storica Carichi Cumulati allineamenti $\pm 1.78, \pm 2.30, \pm 2.37$	119
Tabella 45	Serie storica Carichi Cumulati allineamenti 0, 1.50m, 2.37m, 3.00m, 4.50m, 6.00m, 7.50m, 9.00m, 12m, 15m	120
Tabella 46	CMLW _y - GN 2004-2014.....	123
Tabella 47	Statistiche di regressione non lineare curva CMLW _y -GN allineamento ± 3	124
Tabella 48	Statistiche di regressione non lineare curva CMLW _y -GN allineamento ± 6	125
Tabella 49	Residuals_vs_Predicted modello CMLW _y - GN	128
Tabella 50	Accuratezze MAD e MAPE modello CMLW _y - GN.....	130
Tabella 51	Matrice di Training ANFIS da campagne di rilievo	151
Tabella 52	Matrice di Checking e/o Testing ANFIS da campagne di rilievo	151

Lista delle Figure

Figura 1	Numero di incidenti aerei mortali per anno dal 1950 al 2014	16
Figura 2	Numero di decessi per anno dal 1950 al 2014.....	17
Figura 3	Statistiche suddivise per fase di volo	17
Figura 4	Relazione tra la percentuale di pattinamento ed il coefficiente di aderenza su runway bagnata.....	20
Figura 5	Aree dell'interfaccia pneumatico/superficie	21
Figura 6	Resistenza di uno pneumatico al variare del numero di giri della ruota e della velocità.....	23
Figura 7	Numero di giri della ruota al variare della velocità e del carico	24
Figura 8	Altezza di uno pneumatico su una runway in differenti profondità di acqua, tessiture superficiali e pressioni degli pneumatici al di sopra della velocità di acquaplaning.....	25
Figura 9	Curve aderenza/velocità per diverse tessiture superficiali	26
Figura 10	Depositi di gomma sulla runway	28
Figura 11	Localizzazione dell'Aeroporto "Sant'Eufemia"	40
Figura 12	Una vista dell'Aeroporto "Sant'Eufemia"	41
Figura 13	Infrastruttura air-side	42
Figura 14	Radargramma di un tratto della runway	43
Figura 15	Fuso granulometrico degli inerti dello strato di usura	46
Figura 16	Grip Tester trailer	53
Figura 17	Interfaccia software al pc del Grip Tester.....	53
Figura 18	Layout degli allineamenti dei rilievi	54
Figura 19	Albero CART ottimale del rilievo 29/4/2011 allineamento ± 6	61
Figura 20	Albero CART ottimale del rilievo 27/5/2011 allineamento ± 6	61
Figura 21	Albero CART ottimale del rilievo 11/10/2011 allineamento ± 6	62
Figura 22	Albero CART ottimale del rilievo 15/11/2011 allineamento ± 6	62
Figura 23	Zone CART di consumo dell'aderenza: rilievi del 29/4/2011, 27/5/2011, 11/10/2011 e 15/11/2011 allineamento ± 6	63
Figura 24	Albero GCHAID ottimale del rilievo 29/4/2011 allineamento ± 6	65
Figura 25	Albero GCHAID ottimale del rilievo 27/5/2011 allineamento ± 6	65
Figura 26	Albero GCHAID ottimale del rilievo 11/10/2011 allineamento ± 6	66
Figura 27	Albero GCHAID ottimale del rilievo 15/11/2011 allineamento ± 6	66
Figura 28	Zone GCHAID di consumo dell'aderenza: rilievi del 29/4/2011, 27/5/2011, 11/10/2011 e 15/11/2011 allineamento ± 6	67

Figura 29 Zone K-means ottimali di consumo dell'aderenza: rilievi del 29/4/2011, 27/5/2011, 11/10/2011 e 15/11/2011 allineamento ± 6	71
Figura 30 Centroidi Subtractive Clustering del rilievo 29/4/2011 allineamento ± 6	74
Figura 31 Centroidi Subtractive Clustering del rilievo 27/5/2011 allineamento ± 6	74
Figura 32 Centroidi Subtractive Clustering del rilievo 11/10/2011 allineamento ± 6 ...	75
Figura 33 Centroidi Subtractive Clustering del rilievo 15/11/2011 allineamento ± 6 ...	75
Figura 34 Centroidi Subtractive Clustering delle zone di consumo dell'aderenza: rilievi del 29/4/2011, 27/5/2011, 11/10/2011 e 15/11/2011 allineamento ± 6	76
Figura 35 Curva di decadimento CART rami 2008-2011 e 2012-2014 allineamento ± 3	81
Figura 36 Curva di decadimento GCHAID rami 2008-2011 e 2012-2014 allineamento ± 3	82
Figura 37 Curva di decadimento K-means rami 2008-2011 e 2012-2014 allineamento ± 3	83
Figura 38 Curva di decadimento Subtractive Clustering rami 2008-2011 e 2012-2014 allineamento ± 3	84
Figura 39 Curva di decadimento Terzo di pista rami 2008-2011 e 2012-2014 allineamento ± 3	85
Figura 40 Curva di decadimento M100MRA rami 2008-2011 e 2012-2014 allineamento ± 3	86
Figura 41 Curva di decadimento CART rami 2004-2007, 2008-2011 e 2012-2014 allineamento ± 6	87
Figura 42 Curva di decadimento GCHAID rami 2004-2007, 2008-2011 e 2012-2014 allineamento ± 6	88
Figura 43 Curva di decadimento K-means rami 2004-2007, 2008-2011 e 2012-2014 allineamento ± 6	89
Figura 44 Curva di decadimento Subtractive Clustering rami 2004-2007, 2008-2011 e 2012-2014 allineamento ± 6	90
Figura 45 Curva di decadimento Terzo di pista rami 2004-2007, 2008-2011 e 2012-2014 allineamento ± 6	91
Figura 46 Curva di decadimento M100MRA rami 2004-2007, 2008-2011 e 2012-2014 allineamento ± 6	92
Figura 47 Distribuzione delle DevSt del GN nel tempo, allineamento ± 3	94
Figura 48 Distribuzione delle DevSt del GN nel tempo, allineamento ± 6	95
Figura 49 Ranking Analisi Multicriteria allineamento ± 3	99
Figura 50 Ranking Analisi Multicriteria allineamento ± 6	99

Figura 51 LW e MLW dell'aeromobile Airbus 319 2004-2015	106
Figura 52 MM21LW e MLW dell'aeromobile Airbus 319 2004-2015	106
Figura 53 Differenze percentuali tra i MLW ed i LW_{medio} 2004-2015	107
Figura 54 Differenze assolute tra i MLW ed i LW_{medio} 2004-2015	108
Figura 55 Calibrazione s nel piano CLW_y -GN	109
Figura 56 Curve di decadimento CLW_y -GN 2004-2014	112
Figura 57 Leggi di variabilità dei parametri a_1 , a_2 , a_3 modello CLW_y - GN	113
Figura 58 Schema GN' – GN''	114
Figura 59 Abaco graduato CLW_y - GN del modello di decadimento dell'aderenza...	114
Figura 60 Rintracciamento dei True Restarting Points post-sgommatura	115
Figura 61 Observed_vs_Predicted modello CLW_y - GN	116
Figura 62 Residuals_vs_Predicted modello CLW_y - GN	117
Figura 63 Carta di Controllo modello CLW_y - GN	117
Figura 64 Istogramma della distribuzione (Aa-Sa)	119
Figura 65 Serie storica Carichi Cumulati allineamenti 0, 1.50m, 2.37m, 3.00m, 4.50m, 6.00m, 7.50m, 9.00m, 12m, 15m	121
Figura 66 Rami isocroni delle curve di decadimento ± 3 e ± 6	122
Figura 67 Relazione Tempo - $CLW_{\pm 2,37}$	122
Figura 68 Curve di decadimento $CMLW_y$ -GN 2004-2014	126
Figura 69 Leggi di variabilità dei parametri a_1 , a_2 , a_3 modello $CMLW_y$ - GN	126
Figura 70 Abaco graduato $CMLW_y$ - GN del modello di decadimento dell'aderenza	127
Figura 71 Observed_vs_Predicted modello $CMLW_y$ – GN	128
Figura 72 Residuals_vs_Predicted modello CLW_y – GN	129
Figura 73 Carta di Controllo modello $CMLW_y$ – GN	129
Figura 74 Gradi e funzioni di appartenenza fuzzy	134
Figura 75 Attivazione delle regole fuzzy	135
Figura 76 Somma logica e defuzzyficazione	136
Figura 77 Sistema inferenziale fuzzy Modello Sugeno	137
Figura 78 Archi, pesi e nodo neurale	146
Figura 79 Percettrone multistrato ad 1 strato nascosto	147
Figura 80 Percettrone ANFIS	148
Figura 81 Dati di Training ANFIS da campagne di rilievo	152
Figura 82 Dati di Checking ANFIS da campagne di rilievo	152
Figura 83 Dati di Testing ANFIS da campagne di rilievo	153

Figura 84 Struttura del FIS ANFIS da campagne di rilievo	154
Figura 85 Training Error Training Data + Checking Data ANFIS da campagne di rilievo.....	156
Figura 86 Training Error Training Data ANFIS da campagne di rilievo	156
Figura 87 Fis Output vs Training Data ANFIS da campagne di rilievo	157
Figura 88 Fis Output vs Testing Data ANFIS da campagne di rilievo	157
Figura 89 Funzioni di Appartenenza della variabile $GN_{restart}$ ANFIS da campagne di rilievo.....	159
Figura 90 Funzioni di Appartenenza della variabile $CMLW_y$ ANFIS da campagne di rilievo.....	159
Figura 91 Regole fuzzy in forma operativa ANFIS da campagne di rilievo	160
Figura 92 Dati di Training ANFIS duale del modello empirico – meccanicistico.....	162
Figura 93 Dati di Testing ANFIS duale del modello empirico – meccanicistico.....	162
Figura 94 Dati di Checking ANFIS duale del modello empirico – meccanicistico.....	162
Figura 95 Struttura del FIS ANFIS duale del modello empirico – meccanicistico.....	163
Figura 96 Training Error Training Data + Checking Data ANFIS duale del modello empirico – meccanicistico...	164
Figura 97 Training Error Training Data ANFIS duale del modello empirico – meccanicistico.....	164
Figura 98 Fis Output vs Training Data ANFIS duale del modello empirico – meccanicistico.....	165
Figura 99 Fis Output vs Testing Data ANFIS duale del modello empirico – meccanicistico.....	165
Figura 100 Funzioni di Appartenenza della variabile $GN_{restart}$ ANFIS duale del modello empirico – meccanicistico	166
Figura 101 Funzioni di Appartenenza della variabile $CMLW_y$ ANFIS duale del modello empirico - meccanicistico	166
Figura 102 Regole fuzzy in forma operativa ANFIS duale del modello empirico – meccanicistico.....	168

CAPITOLO 1

1.1 PREMESSA

Il fenomeno della incidentalità nel trasporto aereo lo si può definire, dal punto di vista strettamente statistico, come un evento raro. Relativamente alle altre modalità di trasporto è quella connotata dal minore numero di vittime, come è immediatamente valutabile dagli ordini di grandezza su scala mondiale del numero annuo di incidenti mortali e dal numero annuo di morti (entrambi riferiti agli aerei civili con più di 19 passeggeri a bordo) [1], e dal tasso medio di incidenti non necessariamente mortali [2]. Il range di variazione del primo indice dagli anni '50 agli odierni è stato tra 41 e 6 incidenti mortali all'anno (Figura 1); quello del secondo indice è stato tra 500 e 2000 morti all'anno (Figura 2); quello del terzo indice è stato a settembre 2014 di 2,1 per milione di voli.

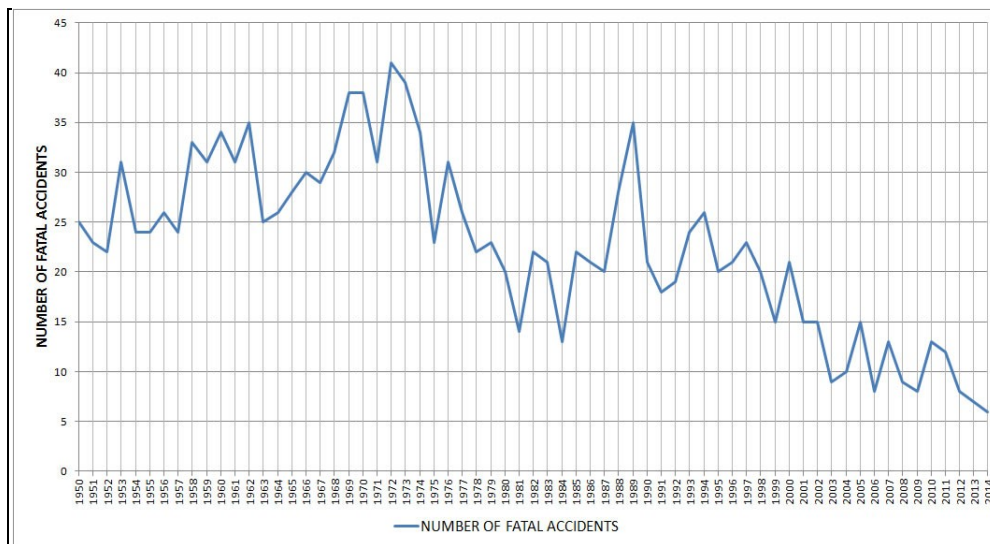


Figura 1 Numero di incidenti aerei mortali per anno dal 1950 al 2014

Esso rappresenta comunque un costo sociale molto elevato, non solo per l'aspetto psicologico di percezione del rischio che attiene a questo particolare ambito. In qualunque contesto progredito il danno conseguente, oltre che in termini propriamente economici quando l'incidente abbia prodotto solo danni alle cose o limitati infortuni alle persone, ma principalmente in termini di vite umane che inevitabilmente si accompagna ad una quota parte, fortunatamente piccola, di questi eventi incidentali, è giustamente considerato inaccettabile. ◻

I dati statistici suddivisi per fase di volo indicano che durante l'atterraggio ed il decollo, molto più brevi rispetto all'intero volo, si concentra la maggioranza degli incidenti [3]: a fronte di una durata complessiva delle operazioni di decollo e di atterraggio pari al $1\%+1\%= 2\%$ della durata dell'intera fase di volo si riscontra un tasso di incidenti mortali pari al $12\%+25\%= 37\%$; per contro, alla fase di crociera che, temporalmente, rappresenta il 57% delle operazioni di volo, è associata una percentuale di incidenti mortali pari solo all'8%.

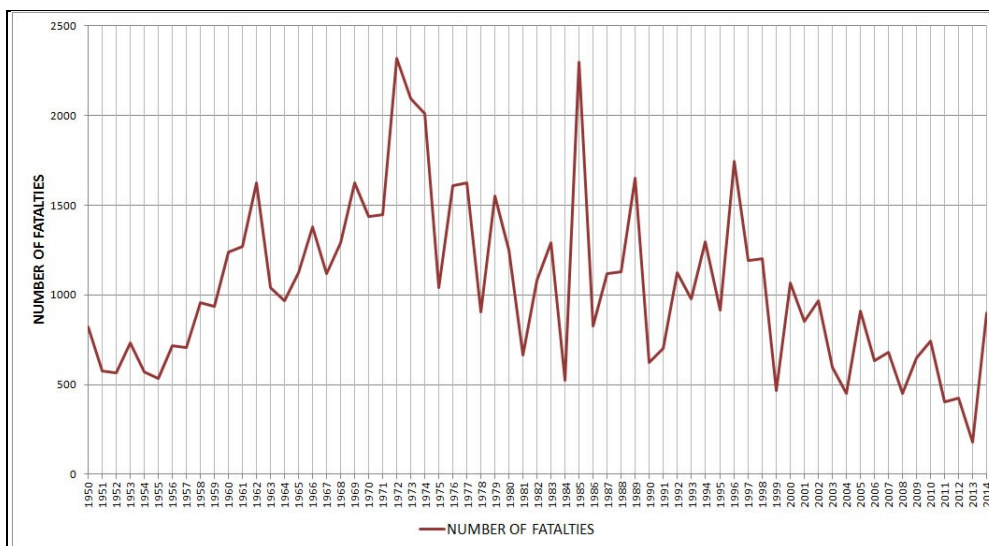


Figura 2 Numero di decessi per anno dal 1950 al 2014

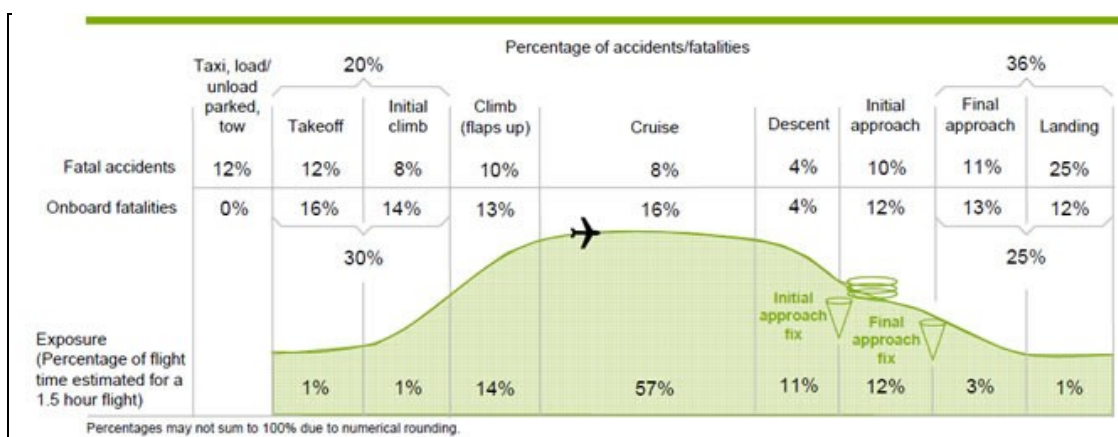


Figura 3 Statistiche suddivise per fase di volo

La rilevazione del coefficiente di aderenza rappresenta in campo aeroportuale una delle attività specificamente mirate alla sicurezza all'interno del rilievo e monitoraggio delle condizioni relative alle piste. In particolare, l'azione frenante e di controllo direzionale dei velivoli in atterraggio o in decollo è strettamente legata a tale parametro, da cui l'enorme importanza del fenomeno dell'aderenza.

Oltre alle operazioni di decollo e di atterraggio sulla *runway* (o sulle *runways* per gli aeroporti maggiori dotati di più piste di volo), il velivolo si muove sull'area di manovra delle cosiddette *taxiways* per raggiungere i piazzali di imbarco/sbarco, parcheggio e manutenzione, che insieme alle piste di volo ed all'area di manovra formano l'area di movimento *airside*. Anche in questi movimenti il velivolo interagisce con le sovrastrutture, che, per questo motivo, devono essere oggetto di un apposito piano di gestione e manutenzione (*Airport Pavement Management System – APMS*) al fine di monitorare con continuità ed efficienza le caratteristiche prestazionali necessarie per garantire un adeguato livello di sicurezza oltre che di funzionalità.

1.2 LA CARATTERISTICA SUPERFICIALE ADERENZA

Durante le operazioni di decollo e atterraggio il velivolo è soggetto, oltre alle forze peso, spinta, portanza e resistenza agenti durante il volo, anche alle componenti verticale ed orizzontale della reazione che la sovrastruttura della pista di volo trasferisce al velivolo tramite il carrello principale (*Main Landing Gear*) ed il carrello anteriore (*Nose Landing Gear*).

Le fasi durante le quali la componente orizzontale della reazione della sovrastruttura, con particolare riferimento all'utilizzo della *runway*, esplica i suoi effetti sono le seguenti:

1. Decelerazione dei velivoli dopo l'atterraggio o il mancato decollo;

nel caso dell'atterraggio, esaurito l'effetto dei freni aerodinamici, che diminuisce con la velocità, il velivolo viene rallentato, fino all'eventuale arresto, mediante la frenatura delle ruote, così come avviene nei veicoli terrestri.

2. Mantenimento del controllo direzionale durante la corsa a terra nella fase di decollo o in atterraggio, in particolare in presenza di vento al traverso, spinta asimmetrica dei propulsori o altri problemi tecnici; la componente orizzontale della reazione della sovrastruttura può essere ulteriormente scomposta lungo le direzioni parallela e perpendicolare all'asse del velivolo. Mentre la prima è responsabile della resistenza all'avanzamento e, adeguatamente incrementata, della frenatura del velivolo, la seconda si oppone alle forze laterali che, per motivi diversi, interessano il velivolo.

3. Rotolamento delle ruote del carrello al momento della toccata;

la resistenza all'avanzamento, che, come sarà in seguito descritto, si genera ed agisce all'interfaccia pneumatico/pavimentazione, produce, in virtù del braccio rispetto all'asse della ruota, un momento sulla stessa che ne causa il rotolamento mentre il velivolo avanza con la sua velocità di traslazione.

Inoltre, l'innescò della rotazione dei carrelli (*spin-up*) dopo la toccata (*touch down*) è fondamentale per il funzionamento corretto del sistema *anti-skid*. Il funzionamento dei sistemi *anti-skid*, di cui è dotata la maggior parte dei velivoli commerciali, avviene solo quando la portanza e la velocità sono sotto determinati valori; questo è necessario perché il pneumatico necessita di determinate condizioni di velocità e peso supportato (che si traduce in forza normale alla superficie di contatto). Ad esempio il controllo della traiettoria può essere compromesso se un carrello non raggiunge l'idoneo *spin-up* inibendo l'*anti-skid*. Anche l'azione sterzante del carrello anteriore (*steering*) può essere inficiata da scarsa aderenza della pista.

L'interazione tra la sovrastruttura e il velivolo si esplica all'interfaccia tra pneumatico e pavimentazione. Il fenomeno attraverso il quale si trasmettono forze da una ruota in moto di rotolamento al supporto prende il nome di aderenza. Allo stato attuale, l'aderenza è considerata un fenomeno al quale non si è ancora data una spiegazione sufficiente (i primi studi sistematici sono quelli di Blockett del 1813). La funzione dell'aderenza è, dunque, quella di trasmettere forze nel piano della pavimentazione tra questa e la ruota. Le forze possono appartenere al piano della ruota o a quello

perpendicolare ad essa. Si parlerà, nei due casi rispettivamente, di aderenza longitudinale e di aderenza trasversale.

L'aderenza longitudinale interessa le ruote che si trovano sotto l'azione del Peso e di una forza tangenziale nel piano della ruota stessa (positiva se di trazione, negativa se di frenatura). Si verificano le condizioni di aderenza se la ruota soggetta alle due forze rotola anziché slittare. L'aderenza trasversale interessa le ruote che sono sotto l'azione del Peso e di una forza tangenziale perpendicolare al piano della ruota stessa (e, quindi, alla direzione del moto). Si verificano le condizioni di aderenza trasversale se la ruota continua ad avanzare nel suo piano anziché slittare lateralmente.

A differenza del fenomeno dell'attrito, nell'aderenza manca il moto relativo tra le superfici a contatto; poiché il suo valore, alle basse velocità, coincide con quello dell'attrito di primo distacco, essa può considerarsi un attrito potenziale.

Volendo misurare quantitativamente il fenomeno è possibile definire un coefficiente di aderenza: date due superfici in moto relativo, il coefficiente di aderenza è pari al rapporto tra la forza tangenziale che mantiene tale moto uniforme e la forza, perpendicolare alle superfici, che ne determina il contatto.

Con riferimento ad una terna di assi cartesiani avente origine nel centro dell'area d'impronta, è possibile scomporre il sistema di forze nelle componenti: normale F_z , motrice (o frenante) F_x e di guida laterale F_y . Alla forza di trazione F_x , per motivi di equilibrio corrisponde una reazione applicata in corrispondenza della superficie di contatto. Indicando con F_{ax} il valore massimo della forza tangenziale che può essere trasmessa, e con P il peso gravante sulla ruota detto peso aderente, è possibile definire il coefficiente di aderenza longitudinale μ , nel seguente modo:

$$\mu = F_{ax}/P.$$

La ruota rotola senza slittare se:

$$F_x/\mu \leq P.$$

La condizione di puro rotolamento è ideale, poiché lo sviluppo del fenomeno di attrito, che origina l'aderenza, implica uno scorrimento relativo tra ruota e strada. Nelle fasi del moto caratterizzate da $a \geq 0$ lo spazio percorso dalla ruota dedotto dal numero di giri è maggiore di quello percorso dal veicolo, e alla quantità:

$$\psi = \frac{\omega \cdot r - v}{\omega \cdot r}$$

dove ω , r e v sono rispettivamente la velocità angolare della ruota, il raggio della ruota e la velocità di traslazione del veicolo, si dà il nome di scorrimento. I suoi valori limiti sono:

$$\psi = 0 \rightarrow \text{rotolamento puro};$$

$$\psi = 1 \rightarrow \text{rotazione intorno all'asse.}$$

Quando $a \leq 0$ lo scorrimento si scrive:

$$\psi = \frac{v - \omega \cdot r}{v}$$

con valori limite:

$\psi = 0 \rightarrow$ rotolamento puro;

$\psi = 1 \rightarrow$ ruota bloccata.

Dunque la rottura del legame di aderenza nel caso $a \geq 0$ comporta lo slittamento della ruota, quando $a \leq 0$ si ha il pattinamento.

Il coefficiente di aderenza μ varia da 0 (in corrispondenza di $\psi = 0$) ad un valore μ_{skid} (in corrispondenza di $\psi = 1$) raggiungendo il massimo in un intervallo di $\psi = 0,10 \div 0,20$ [4].

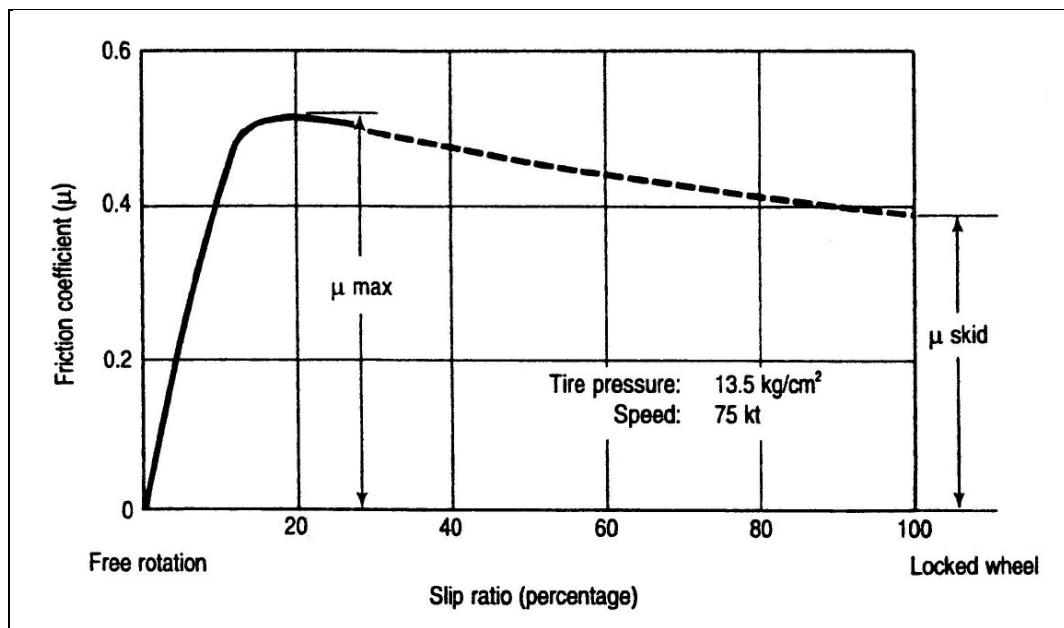


Figura 4 Relazione tra la percentuale di pattinamento ed il coefficiente di aderenza su runway bagnata

Quando si considera una *runway* bagnata o ricoperta d'acqua, ci sono alcuni aspetti della frenatura differenti ma collegati.

In primo luogo, l'aderenza "normalmente" bagnata è la condizione in cui, a causa della presenza di acqua su una runway, il coefficiente di aderenza disponibile è ridotto al di sotto di quello disponibile quando essa è asciutta. Ciò perché l'acqua tra pneumatico e runway non può essere completamente espulsa, e come risultato, c'è contatto solo parziale dello pneumatico con la runway. Conseguentemente c'è una marcata riduzione nella forza che si oppone al moto relativo di pneumatico e runway perché il resto dei contatti sono tra pneumatico ed acqua. Per ottenere un alto coefficiente di aderenza su una runway bagnata o ricoperta d'acqua è perciò necessario che il sopravvenuto film d'acqua sia allontanato o penetrato durante il tempo in cui ciascun elemento dello pneumatico è in

contatto con la runway. Al crescere della velocità, il tempo di contatto è ridotto e c'è meno tempo perché il processo sia completato; così, i coefficienti di aderenza su superfici bagnate tendono a decrescere al crescere della velocità, cioè le condizioni diventano più scivolose.

In secondo luogo, uno dei fattori di maggior preoccupazione in queste condizioni è il fenomeno dell'acquaplaning per cui gli pneumatici dell'aeromobile sono per una larga misura separati dalla superficie della runway da un sottile film fluido. Sotto queste condizioni, il coefficiente di aderenza diviene quasi trascurabile, e l'azione frenante e quella sterzante sono potenzialmente inefficaci. Una descrizione dei tre principali tipi di acquaplaning noti è la seguente.

La riduzione tipica di aderenza quando una superficie è bagnata e la riduzione di aderenza quando la velocità dell'aeromobile cresce sono spiegate dall'effetto combinato delle pressioni idriche visco/dinamiche a cui l'interfaccia pneumatico/superficie è soggetta. Questa pressione causa perdita parziale di contatto "asciutto", che tende ad aumentare con la velocità. Ci sono condizioni in cui la perdita è praticamente totale e l'aderenza cade a valori trascurabili. Ciò è identificato come acquaplaning sia viscoso, che dinamico, che da vulcanizzazione. La maniera in cui questi fenomeni interessano aree differenti dell'interfaccia pneumatico/superficie e come essi cambiano di misura con la velocità è illustrato in Figura 5.

Nella Zona 1 dove c'è pressione dinamica e nella Zona 2 dove c'è pressione viscosa, l'aderenza è potenzialmente nulla, mentre si può considerare aderenza asciutta nella Zona 3. La Zona 3 diminuirà gradualmente di misura al crescere della velocità ed il coefficiente di aderenza μ sarà ridotto in proporzione alla riduzione di misura della Zona 3. Si può assumere che il rapporto tra le zone sarà lo stesso se due ruote si stanno muovendo alla stessa percentuale della loro velocità di acquaplaning.

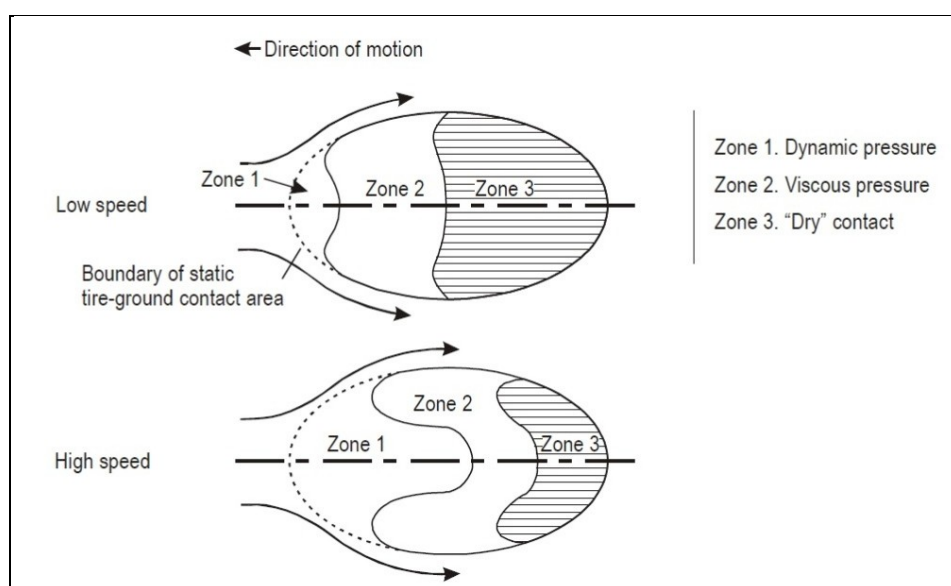


Figura 5 Aree dell'interfaccia pneumatico/superficie

- Nel caso di acquaplaning viscoso, la perdita di trazione può verificarsi a velocità relativamente basse a causa dell'effetto della viscosità nell'ostacolare l'allontanamento dell'acqua dall'impronta dello pneumatico. Comunque, è necessaria una superficie della runway molto liscia; una tale superficie può incontrarsi in aree divenute fortemente ricoperte di gomma depositata dagli pneumatici durante lo spin-up delle ruote al touchdown o che sono state soggette a levigatura da traffico. L'acquaplaning viscoso è associato a runways umide/bagnate o ricoperte di ghiaccio e, una volta innescatosi, può persistere fino a velocità molto basse. L'acquaplaning viscoso può verificarsi durante la fase di frenatura sia di un decollo abortito che di un atterraggio.
- L'acquaplaning dinamico si verifica oltre una velocità critica che è funzione della pressione di gonfiaggio degli pneumatici. La condizione è il risultato di un effetto inerziale dell'acqua in cui la pressione verso il basso (pressione di gonfiaggio) dello pneumatico è insufficiente ad allontanare l'acqua dall'impronta nel breve tempo di contatto. L'acquaplaning dinamico può verificarsi su una runway con inadeguata macrotessitura a velocità oltre la velocità critica di acquaplaning a condizione che il fluido sia abbastanza profondo. Esso è associato con un ricoprimento fluido di profondità apprezzabile sulla runway e si verifica ad una velocità critica che è diretta funzione della pressione degli pneumatici. Più alta è la pressione degli pneumatici, più alta è la velocità alla quale l'acquaplaning dinamico si verificherà. Comunque, il compromesso sarà che al crescere della pressione di gonfiaggio degli pneumatici, l'aderenza bagnata raggiungibile generalmente diminuirà nella gamma di velocità fino all'acquaplaning. L'acquaplaning dinamico viene sperimentato durante le velocità più alte dell'atterraggio e del decollo. Appena 0,5 mm di acqua stagnante è stato trovato essere sufficiente a sostenere l'acquaplaning dinamico. Questa profondità relativamente piccola può verificarsi con piogge pesanti o con pozzanghere d'acqua dovute ad irregolarità nella superficie.
- C'è ancora molto da imparare riguardo all'acquaplaning da vulcanizzazione, ma il pensiero corrente indica che ad una temperatura di circa 200°C viene generato del vapore surriscaldato tra l'impronta dello pneumatico e la superficie, che provoca la fusione dell'area interessata del battistrada. Una teoria è che la gomma fusa agisce come sigillante ostacolando la fuga del vapore ad alta pressione. A seguito di incidenti dove è noto essersi verificata la vulcanizzazione, sono state osservate tracce bianche sulla superficie della runway caratteristica dell'azione di "pulizia a vapore". L'acquaplaning da vulcanizzazione può svilupparsi in qualunque situazione ed a qualunque velocità quando uno pneumatico è non rotante (frenato o meno) per un prolungato periodo di tempo. Di conseguenza, l'importante misura preventiva in questo caso sembra essere evitare il bloccaggio delle ruote [4].

Se la velocità di aquaplaning è definita come quel punto in cui la curva, che rappresenta l'andamento della resistenza offerta dal fluido rispetto alla velocità, attinge il suo massimo, questa non coinciderà con la velocità attinta la quale il pneumatico cessa di rotolare. Aldilà degli aspetti formali, ai fini pratici ciò che interessa al pilota è sapere quando il grip tra pneumatico e pavimentazione è insufficiente a garantire l'innesco al rotolamento della ruota, poiché da questo punto in poi non è possibile effettuare alcun tipo di frenata. E' probabile che vi sia ancora un contatto residuo con la pavimentazione, ma insufficiente, alla velocità in esame, a garantire il rotolamento della ruota. Quando nessuna parte del pneumatico è in contatto con la pavimentazione, la velocità si avvicina di più al punto in cui la resistenza del fluido cessa di aumentare cioè al picco della curva continua in Figura 6.

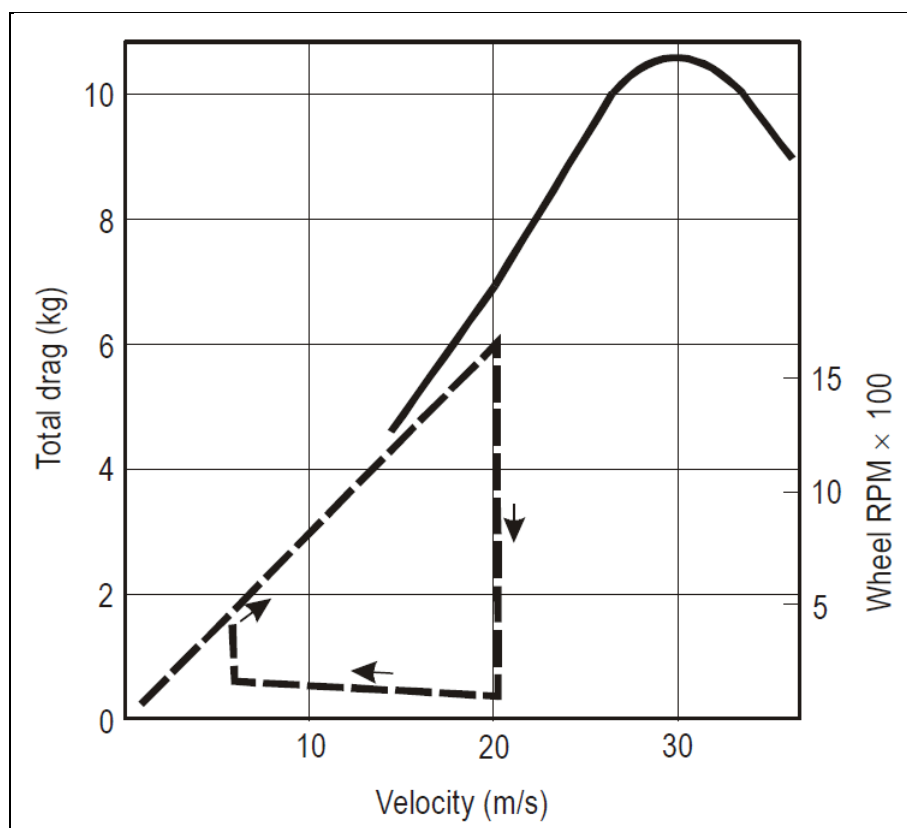


Figura 6 Resistenza di uno pneumatico al variare del numero di giri della ruota e della velocità

E' stato stabilito sperimentalmente che la situazione di aquaplaning dinamico può ritenersi instaurata ad una velocità in km/h (o in knots) circa uguale a 624 volte (356 volte) la radice quadrata della pressione di gonfiaggio dello pneumatico in kPa.

Un altro punto importante è che, una volta attinto l'acquaplaning, la velocità al suolo deve essere rallentata ben al di sotto della velocità di aquaplaning prima che le ruote inneschino di nuovo il rotolamento. Questo fenomeno è chiaramente mostrato in tests con una ruota di 23 cm condotti dall'Università di Bristol come mostrato in Figura 7.

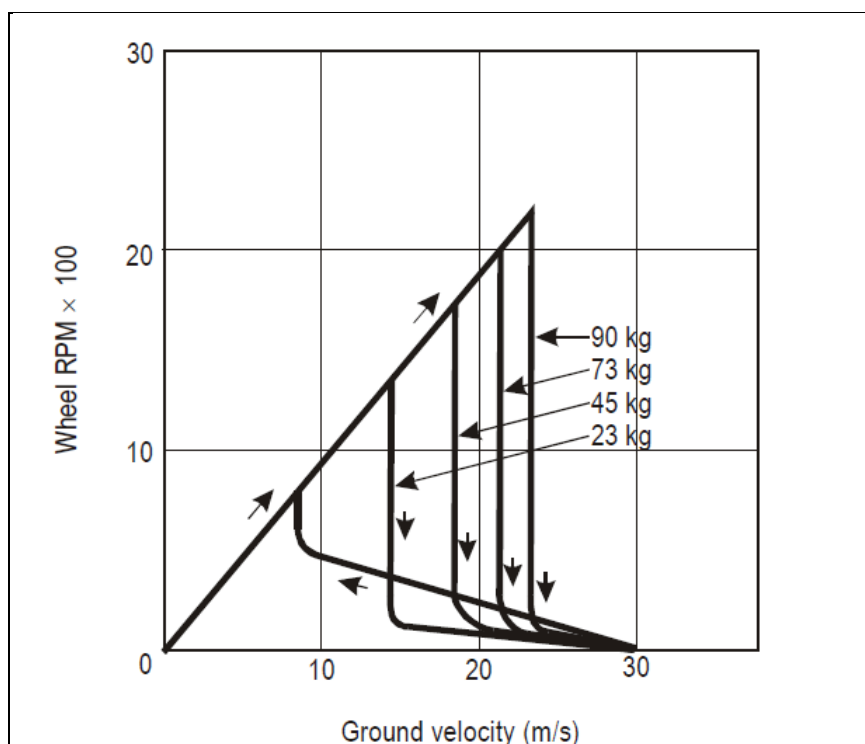


Figura 7 Numero di giri della ruota al variare della velocità e del carico

Si noterà che, ad una pressione di 206,8 kPa ed un carico di 90 Kg, il pneumatico attinge l'aquaplaning a circa 23 m/s ma non riprende velocità al suolo finché la velocità non viene ridotta a 9 m/s. Una variazione del carico sulla ruota fa variare anche la sua velocità di aquaplaning se si assume che quest'ultima sia la velocità a cui la ruota cessa di rotolare. L'aspetto pratico dimostrato è che uno pneumatico di aeromobile non riprenderà contatto con il suolo sufficiente a dare adeguata frenatura fino a che non viene raggiunta una velocità ben al di sotto di quella richiesta per innescare l'aquaplaning.

Al fine di determinare come lo spessore d'acqua necessario per l'insorgere del fenomeno di aquaplaning varia con la tessitura delle superfici, lo "United Kingdom College of Aeronautics" ha condotto una serie di test per le loro caratteristiche di aquaplaning su pavimentazioni in calcestruzzo spazzolate (non rigate a filo) e su superfici in calcestruzzo rigato. Creando delle pozzanghere d'acqua su ciascuna superficie in corrispondenza delle wheel track e con uno strumento di misura applicato nella runway, è stato possibile determinare l'altezza sulla runway di uno pneumatico in aquaplaning. La Figura 8 è stata ottenuta diagrammando lo spessore dello strato di acqua contro l'altezza dello pneumatico sulla runway.

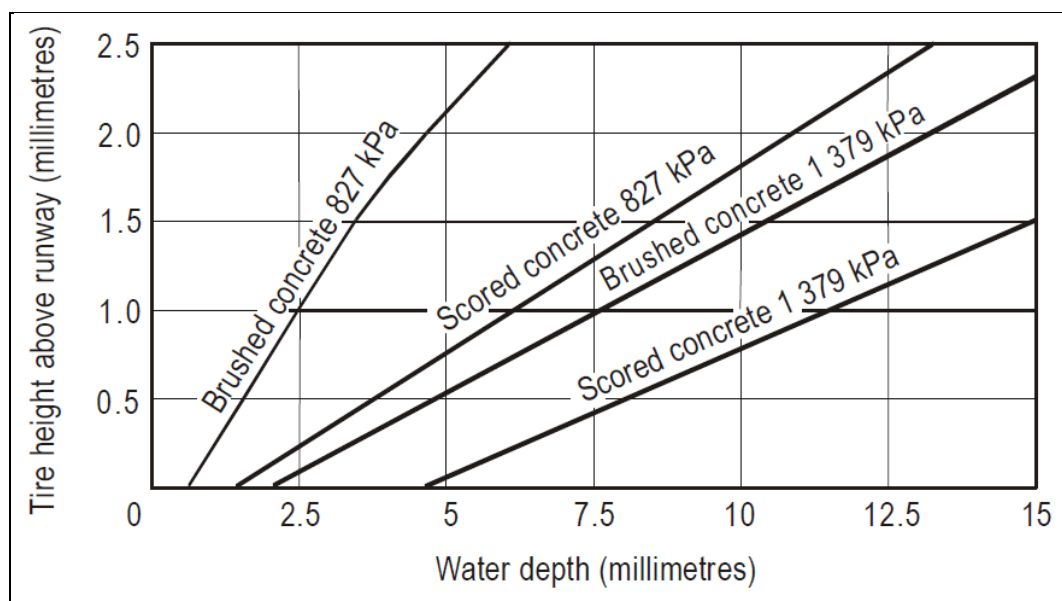


Figura 8 Altezza di uno pneumatico su una runway in differenti profondità di acqua, tessiture superficiali e pressioni degli pneumatici al di sopra della velocità di acquaplaning

Si è visto che, una volta instauratosi l'aquaplaning, per esempio in corrispondenza di una pozzanghera, lo pneumatico non riprende contatto con la runway in presenza di più di 0,6 mm di acqua se la superficie è in calcestruzzo spazzolato e la pressione dello pneumatico è 827 kPa. Maggiore è la pressione, maggiore è lo spessore dello strato d'acqua necessario per mantenere l'aquaplaning. Inoltre, più grossolana è la macrotestitura superficiale, più grande è lo spessore d'acqua richiesto. Queste prove hanno anche rivelato che il fenomeno può iniziare in millisecondi dal momento in cui lo spessore critico di acqua viene incontrato. La predisposizione di un buon drenaggio superficiale e di adeguata tessitura sono i requisiti essenziali per minimizzare il rischio di aquaplaning e per migliorare globalmente le caratteristiche di aderenza [5].

Poiché lo spessore d'acqua iniziale varia con la scabrezza superficiale, è importante monitorare questa caratteristica con metodi standardizzati. L'Airport Service Manual, in tal senso, considera il metodo dell'altezza equivalente in sabbia o grasso. Dall'Annesso 14, invece, ricaviamo la prescrizione che la profondità della macrotestitura misurata per una superficie nuova o ripavimentata non deve essere inferiore ad 1 mm [6].

I moderni sistemi frenanti anti-skid sono progettati per operare il più vicino possibile al valore di picco dell'aderenza (μ_{max}). L'efficienza dei sistemi frenanti degli aeromobili, comunque, di solito fornisce solo una percentuale di questo valore di picco. L'efficienza tende ad aumentare con la velocità; test su un tipo di sistema più vecchio su una superficie bagnata diedero valori del 70% a 56 km/h (30 kt), salendo a 80% a 222 km/h (120 kt). Valori ancora più alti sono stati dichiarati per sistemi più moderni. Per sistemi anti-skid in uso su molti aeromobili da trasporto, il coefficiente di frenatura efficace, μ_{eff} , è stato valutato empiricamente come:

$$\mu_{\text{eff}} = 0,2 \mu_{\text{max}} + 0,7 \mu_{\text{max}}^2 \quad \text{per } \mu_{\text{max}} < 0,7;$$

$$\mu_{\text{eff}} = 0,7 \mu_{\text{max}} \quad \text{per } \mu_{\text{max}} \geq 0,7 \text{ [4].}$$

L'acqua è uno dei migliori lubrificanti per la gomma, e l'allontanamento dell'acqua e la penetrazione del sottile film fluido nell'impronta dello pneumatico prendono un certo tempo. Ci sono numerosi parametri della superficie della runway che influenzano la capacità di drenaggio nell'area di contatto dello pneumatico. Se una runway ha una buona macrotestitura che permette l'espulsione dell'acqua sotto lo pneumatico, allora il valore dell'aderenza sarà meno influenzato dalla velocità. Al contrario, una scarsa macrotestitura produrrà un calo maggiore nell'aderenza al crescere della velocità. Un altro parametro è l'asperità della tessitura (microtestitura), che determina sostanzialmente il livello di aderenza di una superficie, come illustrato in Figura 9.

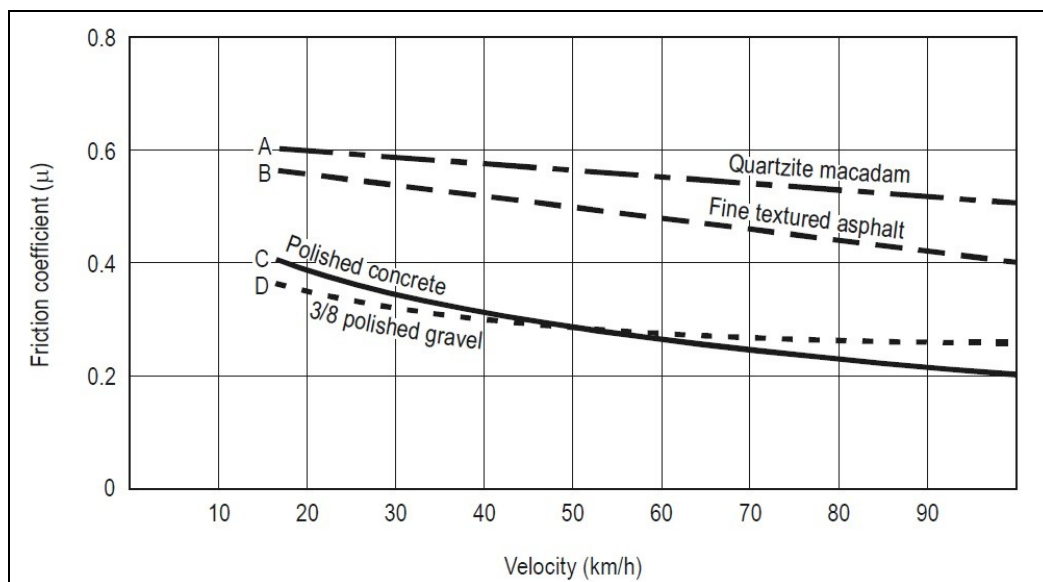


Figura 9 Curve aderenza/velocità per diverse tessiture superficiali

Al crescere della velocità, i coefficienti di aderenza delle due superfici con tessitura aperta A e D decrescono leggermente, mentre i coefficienti per le superfici B e C decrescono più sensibilmente. Ciò suggerisce che la pendenza della curva aderenza/velocità è in primo luogo influenzata dalla macrotestitura fornita. L'entità del coefficiente di aderenza è prevalentemente influenzata dalla rugosità delle asperità, A e B avendo una marcata microtestitura, C e D essendo levigate. Dal punto di vista dell'aderenza, quindi, le superfici delle runway dovrebbero sempre fornire una combinazione di tessiture rugose ed aperte. Una curva aderenza/velocità è, dunque, indicativa dell'effetto della velocità sul coefficiente di aderenza su superficie bagnata, in particolare se essa contempla velocità più alte, approssimativamente 130 km/h (70 kt) ed oltre [4].

La tessitura superficiale può essere quantificata e raggruppata in tre classi di lunghezze d'onda e ampiezze, vedi Tabella 1.

Tabella 1 Classi di tessitura superficiale

	λ (mm)	h (mm)
Microtessitura	< 0.5	0.001 ÷ 0.5
Macrotessitura	0.5 ÷ 50	0.01 ÷ 20
Megatessitura	50 ÷ 500	1 ÷ 50

La microtessitura é dovuta alla scabrezza degli elementi lapidei granulari impiegati nello strato superficiale della pavimentazione. La macrotessitura é dovuta alle asperità superficiali intergranulari della pavimentazione. La megatessitura é una irregolarità di “ampia scala” legata alla cattiva esecuzione delle tecniche di posa degli strati che compongono la sovrastruttura aeroportuale.

La micro e la macrotessitura influiscono essenzialmente sull’aderenza sviluppata all’interfaccia pneumatico-superficie viabile, mentre le irregolarità imputabili alla megatessitura hanno effetti negativi sul comfort di marcia, sul rumore da rotolamento e sui sovraccarichi dinamici trasmessi dai veicoli alla pavimentazione.

Il valore dell’aderenza fra due superfici può essere espresso come somma di due termini: 1) adesione molecolare; 2) isteresi.

La componente adesiva si sviluppa con il processo di attacco e stacco a livello molecolare (stick-slip process), tra gomma e strato superficiale. Essa è pertanto causata dalla microtessitura.

La componente di isteresi é dovuta invece al fatto che la gomma, ricoprendo le asperità superficiali, crea, in virtù dell’isteresi, una distribuzione asimmetrica di pressioni, la cui componente orizzontale si oppone allo slittamento. Le deformazioni per isteresi sono pertanto causate dalle irregolarità della macrotessitura e, proprio per questo, possono avvenire anche in presenza d’acqua senza che si venga a stabilire un effettivo contatto asciutto tra le due superfici.

Alle basse velocità l’area di contatto effettiva tra pneumatico e pavimentazione risulta più estesa e si riscontra l’azione sia della micro che della macrotessitura. Alle alte velocità risultano più estese le zone in cui il velo di acqua è discontinuo, per cui si sviluppa l’azione della sola macrorugosità, o addirittura continuo.

L’interazione aeromobile/runway dipende sensibilmente dalla presenza di materiale di diversa natura che, interponendosi tra pneumatico e sovrastruttura, influenza il comportamento all’interfaccia. La prima classificazione relativa ai diversi materiali estranei presenti su una runway distingue contaminanti e detriti; i primi sono depositi (come neve, neve sciolta, ghiaccio, acqua stagnante, fango, polvere, sabbia, olio e gomma) su una pavimentazione aeroportuale, il cui effetto è dannoso per le caratteristiche di aderenza di quest’ultima; un detrito è un frammento di materiale sciolto (come sabbia, pietre, carta, legno, metalli e frammenti della pavimentazione), che è dannoso per le strutture o i motori

del velivolo, ovvero può compromettere l'efficienza dei sistemi dell'aeroplano se impatta contro parti strutturali o se è risucchiato nei motori. Il danno causato dai detriti è anche conosciuto come F.O.D. (Foreign Object Damage). In questa sede ci si limita alla trattazione delle problematiche relative ai contaminanti. Gli effetti di questi ultimi afferiscono sia la fase di decollo sia la fase di atterraggio. Nella prima, la presenza di contaminanti determina un effetto frenante per la corsa del velivolo, che nei casi estremi potrebbe essere incompatibile con la lunghezza della pista disponibile. In questa ipotesi si potrebbe intervenire limitando il carico pagante e, conseguentemente, la distanza di decollo richiesta. Nel secondo caso, in modo più evidente, la distanza di atterraggio viene sensibilmente incrementata per via dell'abbattimento dei valori di aderenza di una pista interessata da contaminanti. In presenza di acqua o nevischio, inoltre, diventa consistente il pericolo di flame out dei motori conseguente all'ingestione del contaminante che viene sollevato per effetto spray durante la corsa del velivolo. Tali considerazioni inducono a preferire procedure volte ad eliminare i contaminanti presenti sulla pista, piuttosto che impiegare risorse nella determinazione accurata dei valori di aderenza della pista di volo.

1.2.1 LO SPECIFICO CONTAMINANTE: I DEPOSITI DI GOMMA

La gomma depositata nelle zone in cui avvengono i touchdown dagli pneumatici degli aeromobili in atterraggio cancella la segnaletica di pista e, quando bagnata, crea un'area estremamente scivolosa sulla superficie della runway, vedi Figura 10.

La rimozione della gomma viene effettuata mediante:

- a) Solventi chimici;
- b) Idrogetto ad alta pressione;
- c) Aria calda compressa.



Figura 10 Depositi di gomma sulla runway

Nel valutare l'efficacia di qualsiasi sistema di rimozione della gomma, deve essere chiaramente compreso l'obiettivo, cioè il ripristinare un buon coefficiente di aderenza in condizioni bagnate in modo da garantire condizioni operative sicure per tutti gli aeromobili. Un cambiamento di colore nella superficie, per esempio, dal nero al grigio calcestruzzo cementizio Portland può essere molto fuorviante, perché anche una piccola quantità di gomma residua nei pori della pavimentazione può produrre bassi valori di aderenza, pur dando nel complesso un aspetto pulito. È quindi essenziale quantificare il coefficiente di aderenza mediante un affidabile dispositivo di misura dell'aderenza.

Nella maggior parte dei casi, l'idrogetto ad alta pressione è ragionevolmente efficace su aree leggermente contaminate, ma la sua efficacia diminuisce l'aumento della profondità di contaminazione.

Per determinare la quantità di gomma che deve essere rimossa dalla pavimentazione per fornire una condizione superficiale accettabile, si raccomanda di utilizzare un'area di test per predeterminare la pressione dell'acqua e la velocità di spostamento richieste per rendere questa superficie accettabile. Una produttività osservata dell'idrogetto ad alta pressione durante normali condizioni lavorative indica un tasso di 278 m² all'ora per unità durante la pulizia. Riempire un serbatoio d'acqua tipico incide per circa due ore per ogni turno di otto ore. Pertanto, una zona touchdown di 900 m × 24 m richiederebbe circa 100 ore per unità.

La tecnica dell'aria calda compressa utilizza gas ad alta temperatura per bruciare i depositi di gomma lasciati dagli pneumatici e può essere utilizzata sia su calcestruzzo cementizio Portland che su runway in conglomerato bituminoso. È stato dichiarato che siccome nessuna azione meccanica viene effettuata sulla superficie della runway, c'è scarso pericolo che il materiale della superficie si allenti causando (ai motori) ingestione da corpo estraneo. Tuttavia, si deve prestare attenzione e la condizione della pavimentazione deve essere attentamente monitorata quando si utilizza questa tecnica su runway in conglomerato bituminoso.

Solventi chimici sono stati utilizzati con successo per la rimozione dei depositi di gomma sia su calcestruzzi cementizi Portland che su runway in conglomerato bituminoso. Sostanze chimiche a base di acido cresilico (un derivato del creosoto) e una miscela di benzene, con un detergente sintetico come agente bagnante, sono usate per la rimozione della gomma su runway in calcestruzzo. Per la rimozione della gomma su piste in conglomerato bituminoso, sono adoperate sostanze chimiche alcaline.

La natura volatile e tossica del composto di pulizia impone estrema cura durante e dopo l'applicazione. Se si consente alla sostanza chimica di rimanere sulla superficie per troppo tempo, la vernice e probabilmente la superficie della pavimentazione potrebbero essere danneggiate. Quando si lava via il composto di pulizia dalla superficie della pavimentazione, esso deve essere diluito in modo

da non danneggiare la vegetazione circostante, il sistema di drenaggio o la fauna selvatica, o inquinare corsi d'acqua circostanti.

Poiché il processo di applicazione consiste nello spruzzare il solvente sulla zona contaminata, attendere un periodo fino ad un'ora, poi lavare e spazzare, è probabile che una zona touchdown 900 m x 24 m potrebbe essere trattata in un turno di otto ore. Una pratica moderna per la rimozione di gomma dalle superfici delle pavimentazioni è di sciogliere depositi gomma con solventi chimici seguito da abbondante risciacquo con idrogetto ad alta pressione.

L'equipaggiamento dell'idrogetto ad alta pressione varia da un unico ugello (o pistola) azionato manualmente alimentato dalla pompa e riserva d'acqua, ad un sofisticato, semovente semirimorchio incorporante una pompa, un serbatoio d'acqua dalla capacità di 22700 L e barra spruzzo ad alta pressione oscillante. Pressioni tra i 350 kg/cm² e 700 kg/cm² sono comuni [4].

1.3 LO STATO DELL'ARTE

In uno studio recente condotto da Boeing [7], è emerso che le situazioni che generano il più alto numero di morti sono le seguenti: la perdita di controllo dell'aeromobile (sia landings che takeoffs fuori pista) ed incomprensioni (talvolta dovuti ad una imperfetta conoscenza dell'inglese da una delle parti) tra torre di controllo e pilota.

Čokorilo et al. [8], riportano che studi contemporanei e recensioni di statistica mostrano che la maggior parte degli incidenti aerei si verificano durante la fase di takeoff e landing, per cui sarebbero ragionevoli miglioramenti tecnici e legislativi per mitigare e ridurre gli incidenti durante le fasi menzionate. I rischi potrebbero dividersi in diversi gruppi, di cui uno è rappresentato dall'acquaplaning/fuoripista.

Anche Oriola and Adekunle [9], in uno studio di valutazione dei rischi di incidente sulla runway nel settore aereo nigeriano, modellando 6 categorie di pericoli di incidente attraverso il metodo della fault tree analysis, identificano le condizioni superficiali come una delle sei categorie.

Thenoux et al. [10] studiarono un incidente aereo legato all'aderenza (misurata tramite la skid resistance) della superficie in conglomerato bituminoso della runway. L'aereo in atterraggio ebbe un fuoripista scivolando per oltre 1000 m, e si trovò la causa in un errato intervento di manutenzione della pavimentazione a cui era stato applicato un eccesso di sigillante superficiale. Ciò a conferma di quanto già evidenziato da Leland et al. [11] sull'effetto della tessitura della pavimentazione sull'efficacia della frenatura su runways bagnate.

Anche Home et al. [12] nella loro review delle cause e mitigazione della scarsa trazione degli pneumatici aerei su runway bagnate, incentrano l'attenzione sulla tessitura superficiale della pavimentazione e sulla tecnica del grooving (scanalature) quale mezzo per mitigare tutte le forme di scarsa trazione degli pneumatici su runways bagnate.

G.W.H. van Es [13], in un report in cui analizza 400 incidenti per overrun in atterraggio in 35 anni (dal 1970 al 2004), afferma che c'è un significativo incremento nel rischio di overrun quando durante l'atterraggio, tra altri fattori, vi è la runway bagnata/allagata, e/o ricoperta di neve/ghiaccio/fango. Inoltre afferma che essendosi ridotto il tasso di incidenti per overrunning nei 35 anni di un fattore o tre, ciò è stato il risultato di un numero di fattori che hanno incluso miglioramenti anche nella comprensione del problema dell'aderenza.

Il miglioramento del livello di sicurezza garantito agli aeromobili durante le loro operazioni a terra è oggetto di ricerche in tutto il mondo, potendo contemplare sia l'ambito dell'infrastruttura aeroportuale, che quello di tecnologie e sistemi aggiuntivi alla sovrastruttura.

Heymsfield and Halsey [14] hanno eseguito una analisi di sensitività su engineered material arrestor system (EMAS), detti anche arrestor beds, una soluzione impiegabile in alternativa alla riduzione della lunghezza della runway (e quindi limitazione dei tipi di aeromobili ammessi all'atterraggio) laddove l'airfield ha spazio limitato. La decelerazione dell'aeromobile si verifica a causa delle forze resistenti incontrate dal carrello di atterraggio quando il veicolo passa attraverso l'EMAS e schiaccia il materiale. Vengono esaminati cinque parametri che influenzano significativamente la distanza di arresto del B727 e del B747, due tipi di materiale (cls alleggerito e schiuma fenolica), e tre geometrie degli arrestor bed.

Anche Santagata et al. [15], individuando nella fase di frenata post landing uno dei momenti più critici nei riguardi della sicurezza potendo dar luogo a degli overrun in caso di frenata insufficiente o manovra sbagliata, hanno descritto un'indagine sperimentale svolta su nuovi materiali per arrestor beds impiegando protocolli di sperimentazione innovative. Sono stati considerati quattro materiali di bassa densità e bassa resistenza alla compressione, come malta cellulare, malta cellulare con polistirolo espanso, argilla espansa legata con bitume e con cemento; e sono stati eseguiti test quasi statici per definire i punti di transizione elasto-plastica, e considerate prove di impatto per valutare la quantità di energia che può essere assorbita sotto i carrelli durante la fase di collasso. Sono stati evidenziati indicatori di prestazione di questi nuovi materiali e confrontati con gli indici tradizionali normalmente utilizzati per la caratterizzazione di arrestor beds esistenti.

Benedetto et al. [16] hanno presentato un metodo, alternativo a quelli basati sui Multibody System (MSM) e sui Finite Element Method (FEM), per predire la profondità dei solchi nelle Runway End Safety Areas indotti dagli overrunning degli aeromobili. Il metodo è basato su un modello numerico semplificato integrato con misurazioni tramite il Light Falling Weight Deflectometer, per definire sezione per sezione le proprietà meccaniche dei suoli nelle Cleared and Graded Areas. Il metodo, validato tramite prove in situ, ha mostrato efficacia ed efficienza.

Il monitoraggio delle caratteristiche superficiali della runway è uno dei compiti complessi del post holder maintenance aeroportuale.

Dall'analisi della letteratura internazionale nel campo della gestione delle infrastrutture, si evince una copiosa produzione di studi nel campo più specifico delle strade, dove il monitoraggio delle caratteristiche superficiali e delle azioni del traffico costituiscono la base di indirizzo per la manutenzione oltre che per la progettazione [17].

In tutte le nazioni infrastrutturalmente avanzate, dagli USA [18] alla Finlandia [19] gli interventi di manutenzione riabilitativa delle pavimentazioni a seguito di analisi dello stato di distress superficiale o profondo, vengono valutati in relazione a parametri di sicurezza e funzionali quali l'aderenza e la velocità.

Lee et al. [20] hanno sviluppato uno strumento di misura automatico equipaggiando uno scooter con un sensore laser ed un accelerometro, per valutare il grooving (tecnica di irruvidimento superficiale) di una pavimentazione aeroportuale diversamente dal campionamento casuale manuale. Con errori medi percentuali di 2,27%, 4,45% e 3,14% nel misurare profondità, ampiezza e spaziatura, furono misurate la configurazione del grooving e la capacità di resistenza allo slittamento di due aeroporti, ed il risultato ottenuto da esperimenti sul campo hanno mostrato che la qualità del grooving è cruciale per la resistenza allo slittamento della pavimentazione.

Parallelamente si sono sviluppati, in diverse parti del mondo dei veri e propri programmi di gestione e manutenzione delle pavimentazioni stradali, che sono andate sotto il nome di PMS (Pavement Management Systems, letteralmente Sistemi di Gestione delle Pavimentazioni), [21, 22].

I criteri posti a base delle strategie di intervento hanno visto una evoluzione, a partire dalla pianificazione tradizionale impostata sulla massima efficienza degli interventi ovvero sul contenimento dei costi economici, per arrivare più recentemente ad una pianificazione ispirata a criteri di controllo della sicurezza ovvero prevedendo l'attuazione degli interventi anche in considerazione dell'evoluzione delle condizioni di rischio, [23, 24].

Per individuare, tra i degradi strutturali delle pavimentazioni, quelli che più di altri incidono sulla sicurezza o che meritano interventi prioritari, si sono imposte delle procedure di rilevamento rapide e sistematiche e, quindi, strumenti immediatamente consultabili capaci di fornire importanti informazioni al riguardo, i cosiddetti Cataloghi degli Ammaloramenti. Tra essi si riportano i più significativi presenti in letteratura quale l'italiano del CNR [25], lo statunitense dell'S.H.R.P. [26], il francese S.E.T.R.A. [27], lo svizzero V.S.S. [28], e l'R.D.D.H.D. di Hong Kong [29]. Veri e propri documenti descrittivi atti alla quantificazione del degrado stradale, di impostazione generale pressoché coerente sia negli obiettivi, che negli strumenti e spesso anche nelle nomenclature.

Nello specifico campo aeroportuale Greene et al. [30] hanno suggerito come eseguire un Airfield Pavement Condition Assessment sulla base su indicatori di condizione della pavimentazione che vengono determinati dalla misura di distress, capacità strutturale, aderenza, e regolarità. I fattori coinvolti nei ratings includono il pavement condition index (PCI), l'indice strutturale (rapporto tra

l'aircraft classification number (ACN) e il pavement condition number (NCP) e le caratteristiche di aderenza determinate attraverso l'utilizzo di strumenti di misura.

In anni recenti molti ricercatori, come Yager [31, 32], hanno proposto diverse soluzioni per il controllo e la gestione in particolare della caratteristica superficiale aderenza della pavimentazione della runway.

Najafi et al. [33] hanno valutato le caratteristiche operative dei continuous friction measuring equipment (CFME) a percentuale di slittamento fissata, che misurano l'aderenza sotto condizioni simili a quelle prodotte dai sistemi frenanti anti-lock. L'esperimento, attraverso la raccolta di dati utilizzando un Grip Tester, ha mostrato la sensibilità delle misure alla classe (del legante della pavimetazione), allo spessore del film d'acqua, ed alla velocità di esecuzione della prova.

Yager et al. [34] riportarono il Joint Winter Runway Friction Measurement Program tra National Aeronautics & Space Administration (NASA), Transport Canada (TC), e la Federal Aviation Administration (FAA): il programma ha testato aerei e veicoli terrestri strumentati volti ad individuare un numero comune che tutti i diversi dispositivi veicoli terrestri (di misura) avrebbero dovuto riportare. Questo numero, denominato International Runway Friction Index (IRFI), sarebbe stato relativo alle capacità di arresto di tutti gli aeromobili.

Radò and Wambold [35] svilupparono e analizzarono un modello fisico per determinare l'effettiva aderenza in frenatura basato su un registratore di dati del volo raccolti durante atterraggi di voli commerciali su superfici invernali contaminate. Furono prese misure di aderenza a terra dopo ogni atterraggio per fornire dati di confronto dell'attrito degli aeromobili con quelli misurati con strumentazione. I risultati indicano che, oltre alla possibilità di prevedere la massima efficienza di frenatura su piste invernali contaminate con strumentazione di misura dell'aderenza a terra, l'armonizzazione e la normalizzazione di tali previsioni attraverso differenti tecniche di misura è fattibile.

Klein-Paste et al. [36] hanno studiato la relazione tra le informazioni descrittive della superficie della runway (in una scala che va da "poor" a "good") e le prestazioni di frenata di aeromobili commerciali in due aeroporti norvegesi nelle stagioni invernali 2008/2009 e 2009/2010. Dei 24928 atterraggi analizzati, 885 (3,6%) avvennero dove la capacità di arresto degli aeromobili era limitata dalle condizioni di aderenza della runway. Per questi atterraggi fu determinato l'effettivo coefficiente di aderenza in frenatura: la media del coefficiente risultò chiaramente sensibile al tipo di contaminante ed alla sua copertura spaziale; in misura minore risultò sensibile all'ammontare di precipitato (neve) accumulato dall'ultima ispezione con rimozione.

L'International Federation of Air Line Pilots' Associations [37], sulla possibilità di determinare i coefficienti di aderenza della pista attraverso la trasmissione in tempo reale dei dati di efficienza di frenatura da aeromobili in atterraggio, ritiene che tra i requisiti da soddisfare debba restare

la disponibilità di misure e strumentazioni a terra dell'azione frenante. Ciò per una serie di motivi come: una possibile mancanza di dati regolari e recenti basati sugli aeromobili negli aeroporti dove la densità di traffico è bassa o il traffico è vietato di notte; la necessità di una misura dell'azione frenante dopo manutenzioni alla runway e prima del successivo atterraggio; le misurazioni a terra forniscono backup e mantengono ridondanza; un sistema aereo-based può misurare l'azione frenante solo della parte di utilizzata dall'aeromobile dal touchdown al rullaggio, lasciando alcune zone senza misurazioni: l'area della pista prima della zona di contatto, quella oltre l'arresto (gli aeromobili usano raramente tutta la pista) e le altre parti della pista non utilizzati durante il rullaggio; il costo di installazione di un dispositivo di misurazione dell'azione frenante su un aeromobile può limitare il numero di aeromobili dotati, in particolare se non è un requisito di certificazione.

Uno dei più importanti e ricorrenti problemi è il fenomeno della contaminazione da depositi gommosi. Se non propriamente gestito, questo fenomeno può avere serie conseguenze sulle operazioni di landing e takeoff, compromettendo significativamente la loro sicurezza.

Chen et al. [38], hanno focalizzato sull'importante fattore che incide sull'aderenza disponibile su una runway: l'ammontare dei depositi di gomma sulla superficie della pavimentazione. I depositi che si verificano nelle zone touchdown possono essere molto estesi. Grandi depositi di gomma possono completamente coprire la tessitura della superficie della pavimentazione e causare perdita di capacità frenante dell'aeromobile e controllo direzionale quando le runway sono bagnate.

Toan [39], presenta osservazioni e dati di attrito raccolti in 10 anni da un certo numero di aeroporti internazionali e regionali in Nuova Zelanda. Il tipo di pavimentazione e l'età variano dal calcestruzzo al conglomerato bituminoso, scanalato e non, vecchio e nuovo, miscele stradali standard, miscele FAA e miscele Superpave. Le analisi considerano gli effetti dell'invecchiamento e del deposito di gomma. Toan offre commenti su vari metodi per la rimozione di gomma ed il miglioramento delle caratteristiche di attrito, e mostra valori tipici di attrito misurati negli aeroporti della Nuova Zelanda su una varietà di superfici.

De Paiva et al. [40], a seguito dell'avvenuto ampliamento degli edifici Terminal degli aeroporti del Brasile per far fronte ad una accresciuta domanda di trasporto aereo, mostrano la necessità che l'area movimento (runway, taxiway e apron) sia adeguata ai nuovi livelli di traffico. In particolare l'amministrazione degli aeroporti dovrà preoccuparsi della sicurezza nelle operazioni di landings e takeoffs influenzate dall'aderenza e dall'accumulo dei depositi gommosi, impegnando moderne attrezzature e tecnologie, e riducendo gli intervalli di osservazione e monitoraggio della runway per evitare gli interventi correttivi in favore di quelli preventivi.

Anche per i modelli di degrado presenti in letteratura, si evince una copiosa produzione di essi nel campo infrastrutturale delle strade.

Un comune denominatore è quello di avere una matrice empirica, cioè frutto di relazioni funzionali ricavate tra parametri misurati sperimentalmente. In passato diversi studiosi hanno cercato di sviluppare modelli di degrado dell'aderenza in funzione del traffico, anche se non sempre si è tenuto conto dei problemi di variabilità delle misure e di omogeneizzazione del traffico. Nella maggior parte dei casi si è riscontrato che, per un dato manto stradale, l'aderenza dopo un periodo iniziale ad andamento crescente per la graduale rimozione della pellicola di bitume (ciò contribuisce a scoprire la tessitura degli inerti), subisce ad opera del traffico una progressiva diminuzione fino al raggiungimento di un valore terminale dopo un periodo di circa 1-2 anni o 1-2 milioni di veicoli.

Sulla natura del valore limite di aderenza non esiste pieno accordo tra gli studiosi. Alcune esperienze hanno evidenziato che il valore finale di aderenza è funzione soltanto delle caratteristiche e dei componenti della miscela messa in opera. Mentre altre hanno mostrato che tale valore è dipendente anche dal volume di traffico giornaliero; cioè si è riscontrato che al termine del processo di usura svolto dal traffico viene raggiunta una condizione di equilibrio più che uno stato limite. Tale valore di equilibrio sembra essere inversamente proporzionale all'intensità del traffico giornaliero e sperimentalmente è stato osservato un aumento di aderenza al diminuire del TGM (traffico giornaliero medio).

Da un punto di vista analitico, i modelli di degrado disponibili in letteratura si possono distinguere preliminarmente in funzione del tipo di parametro descrittivo impiegato:

Aderenza misurata con ruota bloccata;

Aderenza misurata con ruota in deriva;

Macrotessitura;

Dimensione frattale del profilo.

Inoltre tali modelli si possono ulteriormente distinguere in funzione dello strumento matematico utilizzato per sviluppare il legame tra il parametro aderenza e quello del traffico:

Regressioni statistiche;

Regressioni fuzzy;

Reti neurali [41].

Il monitoraggio del livello di aderenza della rete autostradale tramite apparecchiature ad alto rendimento ha permesso, negli anni passati, di creare un esteso database di misure oggetto di analisi. Il parametro descrittivo di aderenza è il CAT (Coefficiente di Aderenza Trasversale) misurato con l'apparecchiatura SCRIMM ad una velocità di 60 km/h in ottemperanza alle relative normative emanate dal CNR, mentre per il traffico è stato considerato quello cumulato relativo ai soli veicoli commerciali.

Inizialmente da Camomilla et al. [42] è stata proposta una forma funzionale del tipo:

$$CAT_{attuale} = CAT_{iniziale} - \alpha T^{\beta}$$

dove:

$CAT_{attuale}$ = Coefficiente di Aderenza Trasversale allo stato attuale;

$CAT_{iniziale}$ = Coefficiente di Aderenza Trasversale iniziale;

α, β = coefficienti dipendenti dal tipo di miscela e dalle condizioni meteorologiche;

T = traffico cumulato di veicoli pesanti equivalenti;

che però di fatto non appare rispettata dagli andamenti desunti dall'esame degli abachi riportati dagli estensori del modello.

In seguito Camomilla and Marchionna [43] hanno cercato di portare in conto anche l'influenza delle diverse cause di variabilità nella misura dell'aderenza e si è deciso di impiegare una tecnica di trattamento dei dati basata su logica fuzzy che consentisse di "filtrare" le misura effettuate attraverso il giudizio ingegneristico, attesa la complessa interazione tra tali cause di variazione. La regressione fuzzy che meglio approssima i dati sperimentali (per altro molto dispersi) rilevati su di una serie di manti stradali realizzati con un conglomerato bituminoso convenzionale di tipo semi-grenue, è stata la seguente (valida per un traffico cumulato di veicoli pesanti maggiore di 100000):

$$CAT_{attuale} = 11,3 - 11,21 \text{ Log}(TCVP)$$

dove:

$CAT_{attuale}$ = Coefficiente di Aderenza Trasversale allo stato attuale;

TCVP = Traffico Cumulato di Veicoli Pesanti.

Una successiva rielaborazione di Marchionna and Paoloni [44] a seguito di un'integrazione di informazione che ha previsto contemporanee misure di temperatura, ha permesso di pervenire, sempre a valle di tecniche di trattamento fuzzy, alla seguente espressione, ricavata per un manto di usura convenzionale messa in opera sulla A14, VII tronco (valida per un traffico cumulato di veicoli pesanti maggiore di 100000):

$$CAT_{attuale} = 57,8 - 1,1 \text{ Log}(TCVP)$$

In questo caso, per ridurre la dispersione osservata si è preferito ricavare delle leggi di degrado per ogni singolo tronco e per ogni categoria di manto superficiale, scontando una maggiore esiguità dei dati sperimentali e quindi una ridotta applicabilità delle relazioni proposte.

Colonna [45] ha condotto diverse misure di micro tessitura, in maniera indiretta attraverso il Pendolo Britannico, e di macrotessitura, mediante il metodo dell'altezza in sabbia, lungo diverse sezioni trasversali di un tratto stradale su cui era stato realizzato, da diversi anni, un conglomerato bituminoso drenante. Lo studio della variabilità delle caratteristiche di tessitura lungo la sezione trasversale accanto all'analisi delle traiettorie dei veicoli ed al rilievo del traffico ha permesso di pervenire alla seguente relazione di tipo logaritmico tra aderenza, espressa attraverso lo Skid Number misurato a ruota bloccata a 64 km/h secondo le norme ASTM, ed il Numero di Pneumatici

Omogeneizzati (NPO), parametro descrittivo del traffico, funzione della effettiva distribuzione trasversale dei veicoli, e del numero di Pneumatici Equivalenti Leggeri complessivi, neq:

$$SN_{\text{attuale}} = 61 - 2,45 \ln(\text{NPO})$$

dove:

SN_{attuale} = Skid Number allo stato attuale;

NPO = Numero di Pneumatici Omogeneizzati, funzione della distribuzione trasversale dei veicoli e del Numero di Pneumatici Equivalenti Leggeri complessivi, neq, legato a sua volta al Traffico Giornaliero Medio, TGM ed alla percentuale di veicoli pesanti, p, mediante la relazione: $neq = 365TGM(4+0,3p)$.

Sempre Colonna [46], sulla base di successive misure eseguite su di uno strato in conglomerato bituminoso convenzionale, ha evidenziato che una migliore descrizione del legame funzionale tra i due parametri poteva essere ottenuta impiegando una regressione caratterizzata da una somma di funzioni esponenziali, espressa attraverso al seguente relazione:

$$SN_{\text{attuale}} = Ae^{-B \cdot \text{NPO}} + Ce^{-D \cdot \text{NPO}}$$

dove:

$$A = 45,44;$$

$$B = 2,144 \times 10^{-7};$$

$$C = 9,656;$$

$$D = 1,974 \times 10^{-6}.$$

Hosking del Transport Research Laboratory [47] informa il suo modello sul principio che, dopo un periodo iniziale di 1 anno, il livello di aderenza esplicito da una superficie stradale, misurato come Coefficiente di Aderenza Trasversale con apparecchiatura SCRIM secondo le normative inglesi ad una velocità di 50 km/h, raggiunge un valore di equilibrio dipendente dall'intensità del traffico giornaliero medio di veicoli pesanti e dalle caratteristiche di levigabilità degli inerti quantificate attraverso il Polished Stone Value (PSV) fornito dalla prova di levigatura accelerata inglese. La relazione ($R = 0,91$) ricavata è la seguente:

$$\text{CAT50} = 0,024 - 0,0000633 \text{ CVD} + 0,01 \text{ PSV}$$

dove:

CAT50 = Coefficiente di Aderenza Trasversale terminale;

CVD = Traffico Giornaliero Medio di Veicoli Pesanti (con peso scarico $\geq 1,5$ t);

PSV = Polished Stone Value.

I modelli di degrado dell'aderenza proposti dall'Highway Development and Management (HDM-4) [48, 49], non derivano da indagini sperimentali eseguite ad hoc ma da un'analisi bibliografica della letteratura in materia. Nell'ottica di fornire uno strumento previsionale estremamente flessibile, tali modelli prevedono l'impiego di coefficienti di calibrazione per adattarli ai diversi contesti nazionali, scontando una maggiore semplicità funzionale ed imprecisione. Il parametro descrittivo

dell'aderenza è il CAT misurato con ruota in deriva ad una velocità di 50 km/h. L'espressione del degrado del CAT in funzione del traffico è la seguente:

$$\text{CAT50}_i = \text{MAX}((\text{CAT50}_{i-1} + \Delta\text{CAT50}_i), 0,35)$$

$$\Delta\text{CAT50}_i = -0,663 \times 10^4 K_{\text{cat}} \text{MAX}[0, \Delta\text{QCV}_i]$$

dove:

CAT50_i = valore dell'indice CAT alla fine dell'i-esimo anno;

ΔCAT50_i = variazione dell'indice CAT nell'anno i-esimo;

ΔQCV_i = volume giornaliero di traffico pesante nell'anno i-esimo [veic/corsia/g];

K_{cat} = fattore di calibrazione.

1.4 MOTIVAZIONI ED OBIETTIVI DELLA RICERCA

Come si desume dallo stato dell'arte, la ricerca si inserisce in un campo di studi ampio, i cui aspetti specifici, presentando un elevato grado di complessità, sono meritevoli di essere studiati con rigore a partire dall'analisi sperimentale di tutti i fattori contributivi del fenomeno.

L'analisi della bibliografia internazionale rivela l'interesse diffuso dei ricercatori nei confronti dei temi inerenti la gestione delle condizioni delle superfici delle piste. Numerosi sono in tal senso i temi da approfondire, e tra questi di particolare interesse è la perdita di aderenza della pista di volo per gommatura da pneumatici.

Il minor numero di infrastrutture aeroportuali rispetto a quelle stradali, e la necessaria disponibilità di dati di misura che coprissero una parte consistente della vita utile dell'infrastruttura stessa, quindi pluriennale, si sono riflessi in una mancanza di modelli di decadimento specifici per il settore.

Altro spunto di induzione alla ricerca, discende poi dalla lettura critica delle raccomandazioni operative della Normativa di settore, quali quella internazionale dell'I.C.A.O. – “Airport Services Manual - Part 2 - Pavement Surface Conditions” - Fourth Edition – 2002 e quella italiana della Circolare ENAC APT-10A [61], quest'ultima sostanzialmente di recepimento della prima.

Il richiamato documento ENAC chiaramente stabilisce la necessità di fornire informazioni sull'aderenza per ciascun terzo di una runway. I terzi di pista sono chiamati A, B e C. Allo scopo di riportare le informazioni al personale di volo, il segmento A è sempre quello associato con il numero di designazione pista più basso (numero di testata/soglia più basso):

<< A tal fine le rilevazioni del coefficiente di aderenza sono riferite a ciascun terzo di pista, identificando le tre zone con le lettere A, B e C rispettivamente per il primo terzo, il tratto centrale e l'ultimo terzo, riferendo la lettera A al tratto associato al numero di designazione pista più basso;>>.

Assegnando a ciascuno un valore di aderenza ottenuto mediando le misure raccolte nella parte, l'intera runway viene caratterizzata dal valore più basso.

Il criterio alternativo espresso dall'APT-10A, lascia l'analista libero di giudicare significative parti di soli 100 m allo scopo di localizzare le aree con deficit funzionale:

<< tuttavia al fine di individuare le aree che presentino un deficit funzionale si ritengono significativi tratti di soli 100 m.>>.

Ma non viene espressa nessuna scala di valutazione sul deficit funzionale.

L'enunciato originale del documento ICAO lascia irrisolte alcune determinazioni:

<< The friction value should be obtained by averaging the results of measurements made with the test device. If the friction characteristics differs significantly along major portions of runway, the friction value should be obtained for each portion of the runway. A portion of runway approximately 100 m long may be considered sufficient for the determination of the friction value.>>.

Infatti:

- l'ottenimento del valore di aderenza come media delle misure è indicato come una possibilità;
- non è quantificata la differenza significativa;
- non sono quantificate le grandi porzioni di pista;
- i 100 m sono approssimativi;
- considerare questi ultimi come sufficienti è una possibilità.

Tale ampio margine decisionale lasciato al Gestore aeroportuale sulla procedura di elaborazione delle misure, si riflette sull'individuazione del valore da assumere come significativo in un certo momento della vita utile della pavimentazione. E quindi comportare, sulla base di esso, azioni diverse in riferimento ai valori limite di Normativa.

Si denota quindi la necessità di approfondire le conoscenze su metodi preliminari di trattamento dati.

Sulla base di tali valori significativi potranno essere successivamente elaborati dei modelli di decadimento dell'aderenza.

La finalità dei modelli matematici ottenuti potrà essere duale.

In primis, più immediatamente, potrà rappresentare un contributo utile all'accertamento del carattere evolutivo dell'aderenza aeroportuale con particolare riferimento alla dipendenza di essa dai carichi di traffico, ed accertarne e quantificarne, o meno, il carattere cumulativo.

Secondariamente, potranno essere impiegati nella pratica tecnica degli operatori aeroportuali per predire il degrado dell'aderenza delle piste di volo, e quindi programmare le attività di manutenzione necessarie a garantire la sicurezza delle manovre a terra degli aeromobili.

CAPITOLO 2

2.1 IL CAMPO DI ANALISI SPERIMENTALE: L'AEROPORTO CIVILE INTERNAZIONALE DI LAMEZIA TERME "SANT'EUFEMIA"

L'Aeroporto Internazionale di Lamezia Terme (CZ), Figure 11 e 12, è denotato con i codici:

- LICA (ICAO);
- SUF (IATA).

Sulla base del traffico può essere definito un aeroporto di medie dimensioni, avendo supportato nel 2015 un numero di passeggeri di 2.332.126 ed un numero di voli di 16.892.

L'ente gestore è la S.A.CAL. S.p.A..



Figura 11 Localizzazione dell'Aeroporto "Sant'Eufemia"



Figura 12 Una vista dell'Aeroporto "Sant'Eufemia"

La runway è denotata, sulla base del criterio di orientamento magnetico, $10/28$. La sua classe funzionale ICAO, secondo l'aeromobile critico di progetto, è 4D. Ciò significa che rientra tra quelle maggiori di 1800 m, con apertura alare dell'aeromobile critico compresa tra 36 e 52 m, e con wheel track del carrello di atterraggio compresa tra 9 e 14 m, vedi la Tabella 2. Il tipo di traffico consentito è IFR/VFR (strumentale/a vista).

Tabella 2 Classi Funzionali ICAO

Primo elemento del codice		Secondo elemento del codice		
Numero del codice	Lunghezza di riferimento per l'aeromobile di progetto	Lettera del codice	Apertura alare	Wheel track del MLG
1	<800 m	A	<15 m	<4,5 m
2	≥ 800 m e <1200 m	B	≥ 15 m e <24 m	$\geq 4,5$ m e <6 m
3	≥ 1200 m e <1800 m	C	≥ 24 m e <36 m	≥ 6 m e <9 m
4	≥ 1800 m	D	≥ 36 m e <52 m	≥ 9 m e <14 m
		E	≥ 52 m e <65 m	≥ 9 m e <14 m
		F	≥ 65 m e <80 m	≥ 14 m e <16 m

Le coordinate geografiche e l'altitudine sono:

- Latitudine: $38^{\circ}54'30''$ Nord
- Longitudine: $16^{\circ}14'30''$ Est
- Altitudine: 12.31 m sul l.m.m.

Nella Figura 13 si riporta la planimetria dell'infrastruttura air-side.

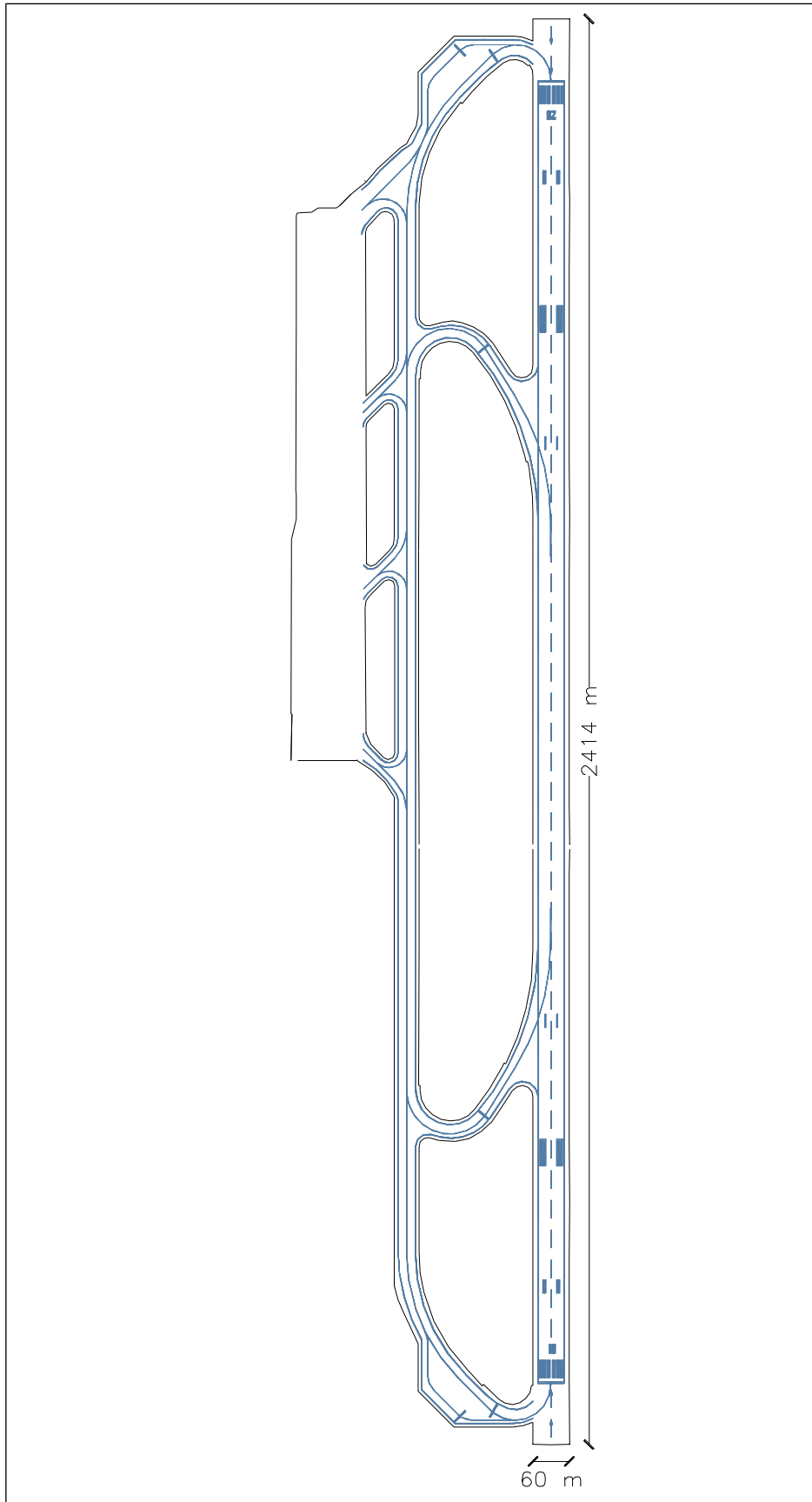


Figura 13 Infrastruttura air-side

La runway ha una dimensione pavimentata complessiva di $60\text{m} \times 2414\text{m} = 144840 \text{ m}^2$; la parte delimitata dalle strisce segnaletiche orizzontali misura 45 m di larghezza per 2200 m di lunghezza dalla soglia 10 a quella 28.

La pavimentazione è di tipo flessibile, le caratteristiche strutturali sono identificate dal codice: PCN 95/F/B/W/T.

Gli strati superficiali della pavimentazione sono stati ricostruiti nel 2004 in occasione di lavori generali di rifunionalizzazione di gran parte dell'infrastruttura air-side. I differenti strati della pavimentazione esistente furono indagati mediante Ground Penetrating Radar, integrandone i risultati mediante carotaggi. Essa risultò composta da:

- primo strato (usura e binder in c.b.): 20 cm;
- secondo strato (base in c.b.): 25 cm;
- terzo strato (sub-base in cls): 50 cm;
- quarto strato (misto granulare): 75 cm.

La Figura 14 mostra i grafici delle due antenne radar: il superiore dell'antenna a 1200 MHz e l'inferiore dell'antenna 600 MHz:

- sull'asse x, superiormente, le distanze [m] dalla Soglia 10 della runway;
- sull'asse y, lato sinistro, il tempo [ns] di ritorno alla superficie del segnale da convertirsi in distanze;
- con una linea nera continua, la separazione tra due strati successivi.
-

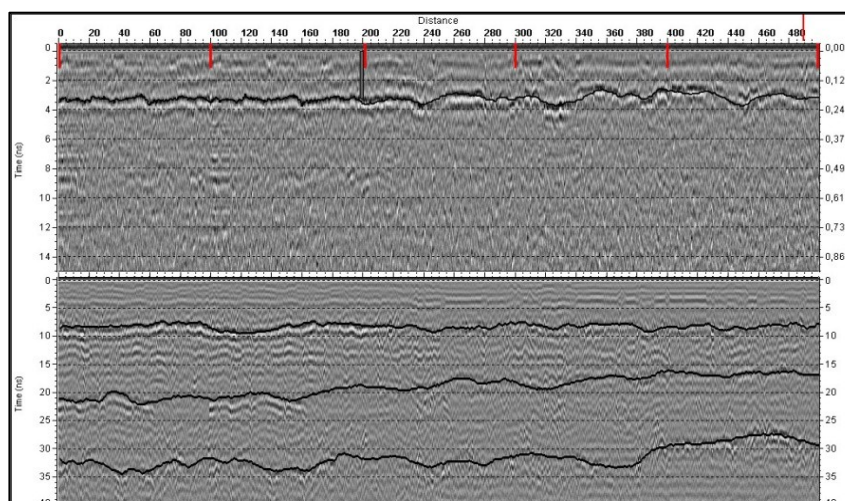


Figura 14 Radargramma di un tratto della runway

A seguito degli interventi sulle pavimentazioni, su una fascia di 25 metri a cavallo della linea d'asse della runway si effettuò:

- scarifica di 12 cm;

- ricarica di 12 cm con un conglomerato bituminoso tipo binder;
- stesa di uno strato di conglomerato bituminoso tipo usura confezionato con bitume modificato dello spessore medio di 5 cm.

Sulle fasce di 10 metri adiacenti:

- scarifica di 5 cm;
- ricarica di 5 cm con un conglomerato bituminoso tipo binder;
- stesa di uno strato di conglomerato bituminoso tipo usura confezionato con bitume modificato dello spessore medio di 5 cm.

Risultando quindi per l'intera larghezza della runway uno strato di binder di 20 cm e uno di usura di 5 cm.

Le caratteristiche del bitume modificato per lo strato di usura sono specificate in Tabella 3.

Tabella 3 Bitume modificato dello strato di usura

Prove specifiche per bitumi modificati	Metodo di prova	Valori richiesti
Penetrazione a 25° (dmm)	CNR 24/71	60-80
Punto di rammollimento P.A. (°C)	CNR 35/73	> 90
Punto di rottura frass (°C)	CNR 43/74	≤ -18
Viscosità dinamica a 160° (mPa s)	ASTM D4402	> 400
Ritorno elastico a 25° (%)	DIN 52013	> 90
Stabilità allo stoccaggio (°C)	CNR 35/73	≤ 5
Punto di infiammabilità (°C)	CNR 72/79	> 270
Invecchiamento RTFOT (*)		
Variazione del punto di rammoll. °C	CNR 35/73	< 5
Invecchiamento penet. res.	CNR 24/71	> 60

(*) Rolling Thin Film Oven Test (prEN 12607-01:1999)

Le caratteristiche degli aggregati sono definite dalle seguenti prove:

LOS ANGELES (CNR 34/73)

La perdita in peso alla prova Los Angeles deve essere:

- aggregato grosso (frazione > 4 mm) LA < 21%
- aggregato fine (frazione < 4 mm) LA < 23%

SENSIBILITA' AL GELO (CNR 80/80)

Per gli inerti dello strato di usura la sensibilità al gelo deve risultare:

- < 20%.

COEFFICIENTE DI FORMA E DI APPIATTIMENTO (CNR 95/84)

L'indice di appianamento "I_a" devono risultare:

- aggregato grosso (frazione > 4 mm) I_a < 20%

EQUIVALENTE IN SABBIA (CNR 27/72)

L'equivalente in sabbia deve essere:

- aggregato fine (frazione < 4 mm) ES > 60%

SPOGLIAMENTO IN ACQUA (CNR 138/92)

Lo spogliamento in acqua a 40 °C deve essere pari a:

- 0 %.

Gli additivi (filler) provenienti dalla macinazione di rocce preferibilmente calcaree o costituiti da cemento, calce idrata, calce idraulica, soddisfano i seguenti requisiti relativamente alla prova CNR-BU n. 139/92:

risultano compresi nei seguenti limiti minimi:

- setaccio UNI n. 0,18 passante in peso a secco 100%
- setaccio UNI n. 0,075 passante in peso a secco 80%

Più del 60% della quantità di additivo minerale passante per via umida al setaccio n. 0,075 passa a tale setaccio anche secco.

L'indice di plasticità risulta non plastico (NP) (CNR-UNI 10014).

La composizione granulometrica risponde a quanto riportato nella Tabella 4 e, secondo le variazioni % ammesse, nel fuso granulometrico in Figura 15.

Tabella 4 Composizione granulometrica inerti dello strato di usura

Serie crivelli e setacci	Passante totale % in peso
	Strato di usura
UNI	
Crivello 40	
Crivello 30	
Crivello 20	100
Crivello 15	100

Crivello 10	85
Crivello 5	65
Setaccio 2	45
Setaccio 0,4	24

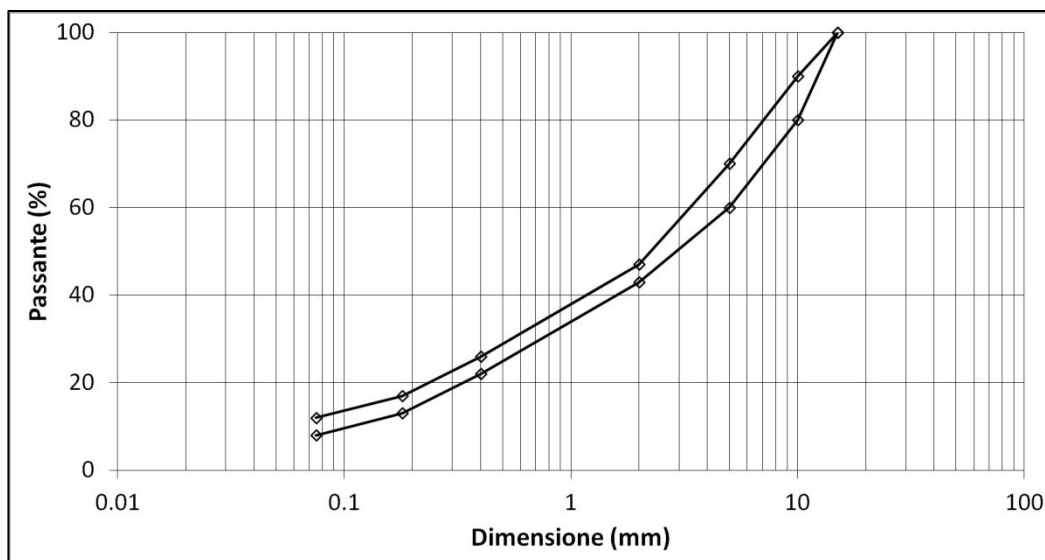


Figura 15 Fuso granulometrico degli inerti dello strato di usura

Le caratteristiche del conglomerato bituminoso sono specificate nella Tabella 5.

Tabella 5 Caratteristiche del conglomerato bituminoso

Caratteristiche	Metodo di prova	CB bitume modificato
Provini Marshall	CNR B.U. 30/73	
Temperatura di miscelazione (°C)		170 - 180
Temperatura di costipamento (°C)		160 - 170
Massa vol. bitume a 25°C kg/dmc	CNR B.U. 67/78	1,01 - 1,05
Vuoti residui Marshall (% in vol.)	CNR B.U. 39/73	2 - 4
Vuoti riempiti in bitume (%)	calcolo	72 - 82
Prova Marshall a 60°:		
Stabilità (daN)	CNR B.U. 30/73	1600

Scorrimento (mm)		2 - 4
Rigidità (daN/mm)		≥ 475
Res. a traz. ind, a 25°C (daN/cm ²)	CNR B.U. 134/91	>11
Caratteristiche in opera		
M vol. app. carote (%den Marshall)	CNR B.U. 40/73	> 97
Vuoti residui carote (% in volume)	CNR B.U. 39/73	3 – 5,5
Temperature di lavorazione		
Produzione (°C)		170 – 180
Stesa (°C)		160 – 170
Rullatura immediata (°C)		> 155

2.2 IL MONITORAGGIO E LO STRUMENTO DI MISURA

L'I.C.A.O., ha dedicato l'intera parte 2 dell'Airport Service Manual [4] al monitoraggio e alla gestione delle condizioni superficiali delle piste di volo. In particolare, in relazione al monitoraggio delle caratteristiche di aderenza, vengono definite prescrizioni operative connesse con limiti di valori. In base ai valori riscontrati, l'I.C.A.O. prevede la segnalazione delle scarse caratteristiche di aderenza ai naviganti attraverso appositi NOTAM (Notice To AirMen), la programmazione della manutenzione delle superfici di volo, ovvero l'immediato intervento volto al ripristino delle caratteristiche di aderenza. Altra importante indicazione fornita dall'Airport Service Manual è relativa alla correlazione esistente tra i vari strumenti di misura presenti sul mercato. Ne deriva che per la valutazione dell'aderenza può essere utilizzato uno degli strumenti segnalati dall'I.C.A.O. oppure sarà cura dell'Autorità Aeroportuale effettuare e mettere a disposizione degli utenti uno studio atto a correlare lo strumento utilizzato con quelli già approvati.

La Federal Aviation Administration [62] tratta il problema dell'aderenza nella Advisory Circular 150/5320-12C. Tra i vari aspetti trattati, che recepiscono nell'ambito della regolamentazione U.S.A. le raccomandazioni I.C.A.O., viene specificata una frequenza delle operazioni di monitoraggio che viene presa a riferimento anche in ambito internazionale.

Dall'analisi delle prescrizioni contenute nell'Airport Service Manual e nell'AC 150/5320-12C è stata redatta la Circolare E.N.A.C. APT-10A [61]. In particolare del primo documento sono state recepite le prescrizioni operative, i valori di soglia per i vari provvedimenti che ne conseguono e la

correlazione tra i vari strumenti; del secondo è stata recepita la tabella che fornisce la frequenza con cui devono essere effettuati i monitoraggi in funzione del traffico presente sull'aeroporto.

La valutazione della sicurezza relativa all'effetto frenante su una pista di volo si effettua mediante il confronto tra un valore sperimentale ricavato da campagne prova e un valore di riferimento, per distinguere vari livelli di sicurezza in funzione dei quali adottare una serie di provvedimenti via via più restrittivi con il deteriorarsi delle caratteristiche superficiali della pista. Tali provvedimenti variano dalla pubblicazione dei valori di aderenza in condizioni "wet", all'emissione di NOTAM, alla programmazione di interventi manutentivi, all'esecuzione immediata di questi ultimi, alla chiusura della pista in condizioni critiche per l'aderenza.

Sono definiti tre valori:

a) Un valore di progetto che stabilisce il minimo livello di aderenza per una pista nuova o ripavimentata;

b) Un livello di manutenzione, al di sotto del quale devono essere programmate azioni manutentive;

c) Un livello minimo di aderenza al di sotto del quale deve essere reso noto che la pista bagnata può essere sdruciolevole e devono effettuarsi gli opportuni interventi manutentivi.

La definizione dei "planning levels" è attualmente affidata all'I.C.A.O., in modo che ogni aeroporto possa fornire informazioni standardizzate sulle condizioni della pista di volo agli utilizzatori delle infrastrutture. Ai fini delle informazioni ai naviganti, il format dell'informazione prevede che la pista sia divisa in tre tratti, rispettivamente A, B e C. Allo scopo di segnalare le informazioni alle unità di servizio aeronautico, il segmento A è sempre associato con il numero identificativo di pista più basso. Nel fornire, invece, indicazioni al pilota prima dell'atterraggio, ci si riferisce ai segmenti come alla prima, seconda o terza parte della pista. La prima parte indica sempre il primo terzo della pista che l'aeroplano incontra in atterraggio.

In considerazione dell'influenza sulle condizioni di sicurezza, l'I.C.A.O. stabilisce che c'è l'esigenza di segnalare la presenza di neve, neve sciolta o ghiaccio su una pista o su una taxiway. Per riuscire a segnalare contaminanti meteorologici con un certo grado di affidabilità e coerenza, si deve stabilire un metodo uniforme per descriverli. Le definizioni di neve sciolta e neve sono inserite nell'Annesso 14, Volume 1 [6], e richiamate nella Circolare E.N.A.C. APT-10A.

C'è anche l'esigenza di segnalare le caratteristiche di aderenza di una runway ricoperta di neve compatta e/o ghiaccio. Le condizioni di aderenza di una runway dovrebbero essere espresse come "braking action information" in termini di un coefficiente di aderenza μ misurato/calcolato oppure di azione frenante stimata. Specifici valori numerici di μ sono necessariamente correlati al progetto e costruzione dello strumento di misura dell'aderenza, così come alle condizioni della superficie da misurare e, in misura minore, alla velocità di esecuzione della prova. Un esempio è riportato nella

Tabella 6 sviluppata da dati di aderenza raccolti in condizioni di neve compatta, e quindi i valori assoluti μ non dovrebbero essere considerati validi per tutte le condizioni contaminanti.

Tabella 6 Informazioni sull'azione frenante

Coefficiente misurato	Azione frenante stimata	Codice
$\geq 0,4$	Buona	5
0,36 - 0,39	Media-Buona	4
0,30 - 0,35	Media	3
0,26 - 0,29	Media-Povera	2
$\leq 0,25$	Povera	1

Se la pavimentazione è interessata da neve e/o ghiaccio e l'azione frenante è riportata come "buona", i piloti dovrebbero attendersi di trovare condizioni non buone come quelle relative ad una pista con la superficie della pavimentazione asciutta e pulita (su cui l'aderenza è ben maggiore in ogni caso). Il valore "buona" è un valore comparativo e indica che gli aeroplani non dovrebbero presentare difficoltà di controllo direzionale o di frenata durante l'atterraggio.

Di seguito si riportano le procedure di diffusione delle informazioni sullo stato della pista previste dall'APT 10-A dell'ENAC, capitolo 9:

In caso di contaminazione, al Gestore spetta il compito di rilevare le condizioni della superficie della pista e delle altre infrastrutture dell'area di movimento.

Il Gestore trasmette le relative informazioni all'ATS (Air Traffic Services) per la diffusione in frequenza e via ATIS (Automated Terminal Information Service) ed alla Stazione Meteorologica (MET); trasmette inoltre all'ARO competente le richieste di emissione degli SNOWTAM.

A tal fine i report del Gestore contengono l'indicazione del tipo, dello spessore (se applicabile) e della diffusione della contaminazione nonché, tenuto conto delle limitazioni indicate in precedenza, le informazioni disponibili sulle condizioni di aderenza della superficie; si riporterà inoltre la lunghezza e larghezza pulite della pista, se inferiori a quelle totali, le condizioni delle aree più esterne, la presenza di eventuali cumuli di neve e la loro altezza.

E' essenziale che tali dati siano diffusi con immediatezza e mantenuti costantemente aggiornati; a tal fine è necessario che le verifiche siano ripetute regolarmente per rilevare cambiamenti significativi della contaminazione e, in ogni caso, dopo le operazioni di pulizia.

I cambiamenti significativi ai fini dell'emissione dello SNOWTAM sono definiti nell'Appendix 2 del Regolamento ENAC "Servizio Informazioni Aeronautiche"¹¹; tra questi rientrano, ad esempio, la variazione dello spessore dei depositi, la variazione della lunghezza o della larghezza disponibili di una pista, la variazione del tipo di contaminazione o dell'estensione della sua copertura, ovvero dell'altezza o della distanza dall'asse della pista dei banchi di neve critici, le limitazioni alla fruibilità delle luci di pista dovute alla copertura dei segnali.

Oltre alle suddette informazioni sulle condizioni della pista, sul Modello SNOWTAM devono essere riportate le condizioni di fruibilità delle vie di rullaggio (inclusa la presenza di eventuali accumuli laterali di neve) e dei piazzali.

Per quanto sopra è necessario che il Gestore assicuri un monitoraggio costante dei parametri che descrivono le condizioni della pista in caso di contaminazione, mediante verifiche da ripetere ad intervalli tali da consentire l'aggiornamento costante dell'informazione aeronautica.

A tal fine, per prevedere la possibile evoluzione delle condizioni della superficie della pista, può risultare utile monitorare la temperatura della stessa (o in alternativa la temperatura dell'aria) in quanto la variazione di tale parametro influisce sullo stato (solido/liquido) dei contaminanti come la neve o il ghiaccio modificandone in modo significativo l'influenza sulle condizioni di aderenza.^{12 13}

Si rimanda infine al Regolamento Servizio Informazioni Aeronautiche nonché al Regolamento Meteorologia per la Navigazione Aerea di ENAC per i dettagli sulle modalità di diffusione delle informazioni inerenti le condizioni della pista in caso di contaminazione, ivi comprese le modalità di compilazione del modello SNOWTAM e la codifica delle informazioni sullo stato della pista in termini di Runway State Group (RSG) da inserire nei messaggi METAR/SPECI.

¹¹ L'emendamento n. 37 all'Annesso 15 ha apportato modifiche sostanziali al Format dello SNOWTAM, ci si riferisce in particolare all'item H in cui compare esclusivamente la "Estimated Surface Friction", in luogo del coefficiente di aderenza μ (Appendix 2 SNOWTAM Format) richiesto nelle precedenti versioni.

¹² infatti, nel caso di temperature prossime a 0°C, oscillazioni anche modeste delle temperature – in aumento o in diminuzione – possono comportare un cambio di stato del fluido tale da determinare un cambiamento significativo delle condizioni di aderenza (es.: da acqua a slush o da neve compatta a slush, etc.).

¹³ Per la rilevazione delle condizioni della superficie della pista, in aggiunta alle ispezioni sul campo, possono essere utilizzati sensori – integrati nelle pavimentazioni – (runway surface condition sensors) per rilevare alcuni dei dati necessari in modo automatico e continuativo.

I rilievi possono essere utilizzati per:

- pianificare gli interventi manutentivi;
- oppure per fornire ai piloti informazioni sulle condizioni che troveranno durante l'atterraggio.

Nel primo caso il rilievo sarà effettuato in condizioni standard di velocità e con uno spessore del film d'acqua controllato. La frequenza di tali misurazioni si stabilisce così come descritto in seguito. Quando, invece, si osservano condizioni atmosferiche particolari, come intense precipitazioni, specialmente dopo lunghi periodi senza piogge significative, oppure temperature basse e/o precipitazioni nevose è necessario effettuare rilievi in condizioni reali. Questa tipologia di rilievo mette in evidenza problematiche altrimenti non rilevabili, quali, ad esempio, la presenza di avvallamenti ovvero l'impossibilità della pista di smaltire altezze di pioggia particolarmente rilevanti. Tali misurazioni possono essere effettuate anche in seguito alle segnalazioni di difficoltà legate alla frenatura degli aeromobili fornite dagli utenti dell'aeroporto.

Le misure di aderenza sono effettuate lungo almeno due tracce parallele alla pista, una traccia da ogni parte della mezzeria a circa 3 m dalla stessa o alla distanza interessata dal maggior numero di operazioni. Lo scopo della prova è di determinare il valore del coefficiente di aderenza μ per i segmenti A, B e C. Nei casi in cui si utilizza uno strumento a misurazione continua, i valori significativi di μ sono ottenuti dai valori di aderenza registrati per ogni segmento. Se si utilizza uno strumento di misura di tipo locale, la distanza tra ciascun punto della prova non deve essere superiore approssimativamente al 10% della lunghezza utilizzabile della pista. Se si è stabilito che una singola linea di prova su ogni lato della pista fornisce un'adeguata copertura della stessa, ne segue che si ricaveranno tre valori per ogni lato.

Nell'ipotesi in cui si avessero dati a sufficienza, sarebbe possibile costruire curve di degrado dell'aderenza per ogni aeroporto. Queste, in quanto desunte da rilievi su uno specifico aeroporto, terrebbero conto del traffico presente e di tutte le condizioni ambientali che contribuiscono al degrado delle caratteristiche rilevate.

Dalla conoscenza delle curve di degrado sarebbe possibile pianificare con efficienza gli interventi manutentivi, ovvero intensificare i monitoraggi con l'approssimarsi dei valori rilevati ai valori di soglia.

Quando non fossero disponibili le curve di degrado cui si è fatto riferimento, è possibile rifarsi alla Table 3-1 dell'AC 150/5320-12C dell'F.A.A. basata sul numero di atterraggi di velivoli turbo-jet per ogni testata, successivamente ripresa dal Doc 9137 ICAO nella Table A5-3 con il traffico espresso in peso annuale dei velivoli transitati per ogni testata e completata con la frequenza minima di rimozione dei depositi di gomma. Tale ultimo schema è stato integralmente recepito dalla Circolare ENAC APT-10A nella Tab. 2, qui riportata nella Tabella 7.

Tabella 7 Programma di manutenzione in base alle operazioni turbo-jet per fine pista ^(3,4)

Atterraggi giornalieri aerei turbo-jet per fine pista (H)	Peso annuo aa/mm per fine pista (10 ⁶ kg) (K)	Frequenza minima verifica aderenza (M)	Frequenza minima rimozione gomma (N)
meno di 15	meno di 447	1 volta / anno	1 volta / 2 anni
da 16 a 30	da 448 a 838	1 volta / 6 mesi	1 volta / anno
da 31 a 90	da 839 a 2.404	1 volta / 3 mesi	1 volta / 6 mesi
da 91 a 150	da 2.405 a 3.969	1 volta / mese	1 volta / 4 mesi
da 150 a 210	da 3.970 a 5.535	1 volta / 2 settimane	1 volta / 3 mesi
più di 210	Più 5.535	1 volta / settimana	1 volta / 2 mesi

3) Oltre agli arrivi giornalieri di aa/mm turbo-jet per ciascun fine pista, nel determinare la rimozione della gomma, dovrebbero essere considerati altri fattori come tipo ed età della pavimentazione, condizioni climatiche, periodo dell'anno, numero di widebody che operano sulla pista e sua lunghezza.

4) Determinati (H) e (K), si dovrà selezionare la colonna che presenta il valore più alto e selezionare i corrispondenti (M) ed (N).

Gli strumenti attualmente più idonei all'effettuazione dei rilievi sono i cosiddetti Continuous Friction Measurement Equipment (CFME). I vantaggi che offrono rispetto agli strumenti di tipo locale sono diversi. In primo luogo essi permettono di raccogliere dati lungo tutta la pista percorrendo quest'ultima con un veicolo strumentato con notevole risparmio di tempo.

Il tipo di apparecchiatura consente di fissare opportunamente ed in maniera univoca la percentuale di slittamento, in modo da interpretare al meglio il significato dei valori registrati. Le prove possono condursi a velocità differenti, così che possono essere analizzate problematiche che si manifestano con la variazione della velocità, come i problemi di macrotessitura. La strumentazione inoltre è completata da un sistema idraulico in grado di bagnare la pista in maniera opportuna, così da creare il velo idrico di 1 mm così come richiesto dalla Norma. Normalmente questi strumenti registrano un valore mediato ogni 10 m e restituiscono i dati su interfacce software.

L'Allegato A alla Circolare ENAC APT-10A, di recepimento delle indicazioni del Doc 9137 ICAO, fornisce indicazioni sugli strumenti e sui relativi valori di riferimento (target di progetto, soglia di manutenzione, livello minimo accettabile). I livelli di aderenza, qui riportati in Tabella 8, sono definiti in relazione al tipo di strumento utilizzato ed alla velocità d'uso, nonché al tipo ed alla pressione di gonfiaggio del ruotino di prova.

Tabella 8 Valori di riferimento del coefficiente di aderenza della pista ⁽¹⁾

Strumento di misura	Ruotino di misura ⁽²⁾				Obiettivo di progetto (DOL)	Livello di manutenzione (MPL)	Livello minimo di aderenza (MFL)
	Tipo	Pressione (kPa)	Velocità del test (km/h)	Spessore acqua test (mm)			
(1)	(2)		(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Mu-meter	A	70	65	1,0	0,72	0,52	0,42
Trailer	A	70	95	1,0	0,66	0,38	0,26
Skiddometer	B	210	65	1,0	0,82	0,60	0,50
Trailer	B	210	95	1,0	0,74	0,47	0,34
Surface Friction	B	210	65	1,0	0,82	0,60	0,50
Tester Vehicle	B	210	95	1,0	0,74	0,47	0,34
Runway Friction	B	210	65	1,0	0,82	0,60	0,50
Tester Vehicle	B	210	95	1,0	0,74	0,47	0,41
TATRA Friction	B	210	65	1,0	0,76	0,57	0,48
Tester Vehicle	B	210	95	1,0	0,67	0,52	0,42
GRIPTESTER	C	140	65	1,0	0,74	0,53	0,43
Trailer	C	140	95	1,0	0,64	0,36	0,24

1) Aeroporti con più di 31 arrivi quotidiani di aa/mm turbo-jet sono più critici per quanto riguarda il deterioramento dell'aderenza a causa dei depositi di gomma dovuti alla notevole attività degli aeromobili.

2) Al fine di rispondere all'esigenza di effettuare misure di carattere operativo in presenza di contaminazione, è consentito anche l'uso di ruotini di misura ad alta pressione (tipicamente 700 kPa).

Il Grip Tester è, da qualche decennio, il più diffuso strumento di misura continuo in ambito aeroportuale in tutte le regioni del mondo: artiche, equatoriali e temperate.

È un carrello tri-ruotato, 1 ruota di misura e 2 ruote guida, dal peso di 83 Kg che necessita di un mezzo di traino. Lo pneumatico della ruota di misura, a battistrada liscio, segue l'ASTM Specification 1844. Il metodo prevede la ruota di misura mantenuta ad una percentuale di slittamento del 14,5% rispetto alla velocità di avanzamento tramite una catena che trasmette il moto dall'asse delle due ruote principali. I sensori sono sistemati sull'asse della ruota di misura e forniscono in continuo i dati su carico e forza di trazione sulla ruota. Il coefficiente di aderenza (forza di trazione/carico), denominato Grip Number, è trasmesso ad un computer tenuto nell'abitacolo del mezzo di traino. Il computer può mostrare i valori di aderenza come letture istantanee, come media tra due punti, come media su ogni terzo di pista, o come media sull'intera lunghezza di pista. Può, inoltre, mostrare il diagramma delle letture dell'aderenza rispetto alla distanza percorsa. Tale diagramma può essere stampato per una archiviazione o può essere memorizzato in un PC.

Il Grip Tester è illustrato in Figura 16. In Figura 17 è riportata una schermata dell'interfaccia software al pc.



Figura 16 Grip Tester trailer

Si evidenzia che il Grip Tester, come tutti i CFME, necessita di un controllo periodico della calibrazione al fine di garantirne la necessaria affidabilità, in particolare per quanto concerne i componenti per la misura delle forze, della velocità e del flusso d'acqua.

A tal fine, è indispensabile prevedere controlli periodici di calibrazione e di taratura secondo le indicazioni del costruttore dello strumento.

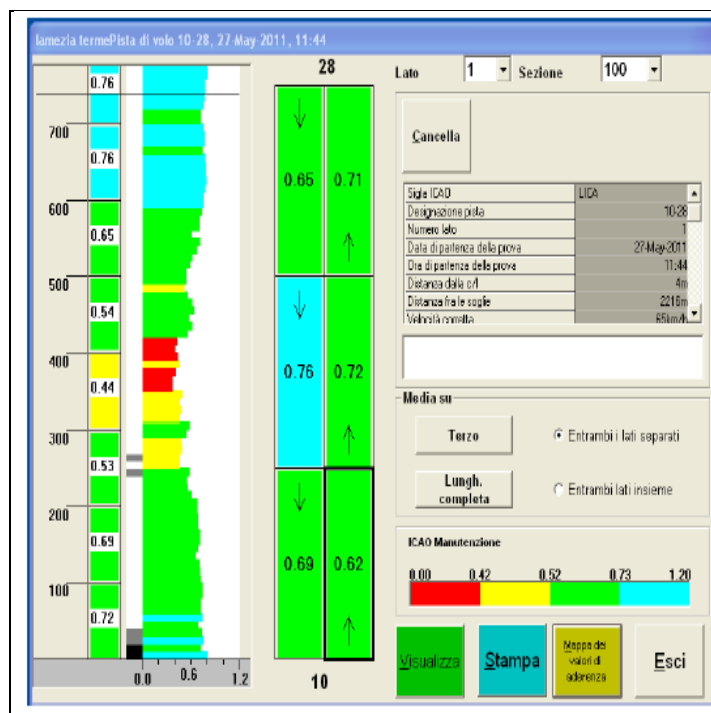


Figura 17 Interfaccia software al pc del Grip Tester

2.3 I RILIEVI

Le misurazioni del Grip Number sulla runway dell'Aeroporto di Lamezia Terme, si riferiscono agli anni dal 2004, in cui lo strato superficiale della pavimentazione venne ricostruito, al 2015.

Sono stati analizzati, tra quelli effettuati e disponibili, i rilievi lungo gli allineamenti +3 m, -3 m, +6 m, -6 m rispetto alla centerline, che corrispondono alle distanze più interessate dai Main Landing Gears della mix di traffico aeromobile, e per l'intera lunghezza della pista di volo. Vedi layout in Figura 18.

L'output dello strumento è fornito ogni 10 m.

Il database finale consiste di 92 serie di dati grezzi, che si riferiscono a 23 campagne di rilievo, riportate in Tabella 9.

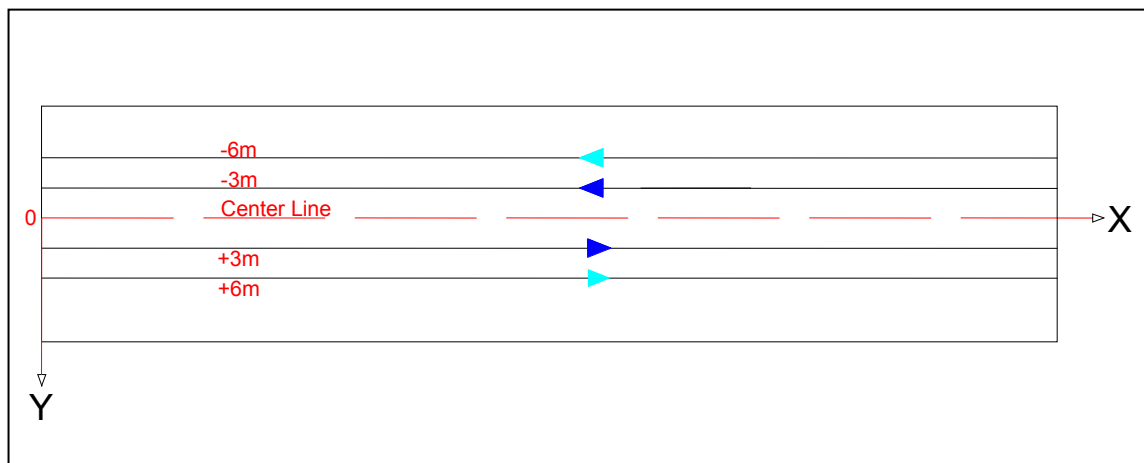


Figura 18 Layout degli allineamenti dei rilievi

Tabella 9 Campagne di rilievo

Data	Allineamenti misurati			
8 marzo 2004	+3	-3	+6	-6
31 agosto 2004	+3	-3	+6	-6
16 giugno 2005	+3	-3	+6	-6
21 dicembre 2005	+3	-3	+6	-6
31 maggio 2006	+3	-3	+6	-6
3 luglio 2007	+3	-3	+6	-6
24 ottobre 2008	+3	-3	+6	-6
22 luglio 2009	+3	-3	+6	-6
14 ottobre 2009	+3	-3	+6	-6
28 ottobre 2010	+3	-3	+6	-6
29 aprile 2011	+3	-3	+6	-6
27 maggio 2011	+3	-3	+6	-6
11 ottobre 2011	+3	-3	+6	-6

15 novembre 2011	+3	-3	+6	-6
15 febbraio 2012	+3	-3	+6	-6
17 maggio 2012	+3	-3	+6	-6
24 ottobre 2012	+3	-3	+6	-6
21 dicembre 2012	+3	-3	+6	-6
18 aprile 2013	+3	-3	+6	-6
16 maggio 2013	+3	-3	+6	-6
16 dicembre 2013	+3	-3	+6	-6
28 maggio 2014	+3	-3	+6	-6
11 febbraio 2015	+3	-3	+6	-6

Le 16 serie degli allineamenti +3 e -3 dell'8/3/2004, 31/8/2004, 16/6/2005, 21/12/2005, 31/5/2006, 3/7/2007 e degli allineamenti +3, -3, +6, e -6 dell'11/2/2015 sono state utilizzate a scopi di validazione dei modelli ottenuti con tutte le altre 76 rimanenti serie.

Nel luglio 2007 e nel novembre 2011 furono eseguite operazioni manutentive alla superficie della pavimentazione, per la rimozione dei depositi di gomma tramite macchina idrogetto ad alta pressione TrackJet.

In Appendice A si riporta uno stralcio dalle serie di dati grezzi organizzati in foglio di calcolo: 29/4/2011, 27/5/2011, 11/10/2011 e 15/11/2011.

Per i tratti terminali della pista oltre le soglie 10 e 28 si sono assegnati dei valori del GN costanti ed uguali al primo valore sulla relativa soglia; ciò allo scopo di eliminare gli effetti del transitorio di velocità del Grip Tester in partenza (prima della soglia) ed in arresto (dopo la soglia). Saranno quindi elaborati solo i valori della zona di runway delimitata dalla segnaletica orizzontale delle due testate, lunga 2200 m.

CAPITOLO 3

3.1 L'INDIVIDUAZIONE DEL VALORE SIGNIFICATIVO, E DELLA LOCALIZZAZIONE ED ESTENSIONE DELLE ZONE DI CONSUMO

Nei successivi passi di elaborazione i valori di aderenza di ciascuno dei due allineamenti simmetrici, +3 e -3, +6 e -6, sono stati mediati e d'ora in avanti ci si riferirà ad essi con ± 3 e ± 6 .

I dati provenienti dalle misure non sono utili per un Airport Pavement Management System (APMS) se non vengono correttamente analizzati per restituire risultati affidabili sull'avanzamento del fenomeno.

Infatti, i principali strumenti analitici per la rappresentazione del fenomeno di decadimento, sono le curve di decadimento Grip Number - Tempo (GN - T), le quali richiedono che ad ogni data di rilievo un valore sia fissato come rappresentativo.

Come illustrato nel Capitolo 2, l'impiego della strumentazione Grip Tester Trailer consente di rilevare un valore medio riferibile a tratti di 10 m, lungo ciascun allineamento.

Nel Capitolo 1 § 1.4 si è invece illustrato come dagli standard di riferimento non si evincono univocamente le lunghezze significative delle "zone di consumo" ovvero dei tratti di pista cui riferirsi per la valutazione dell'aderenza. Inoltre dall'analisi della normativa di riferimento non scaturiscono le modalità di scelta della misura cui riferire il controllo dei livelli di degrado.

Per valutare il metodo migliore per fissare questo valore di misura, si è proceduto alla selezione di metodi di *data mining*, ovvero di quei processi computazionali volti al *pattern recognition* nei grandi insiemi di dati.

Sono stati applicati due metodi di *classificazione supervisionata*:

- Classification and Regression (CART) Trees;
- General Chi-squared Automatic Interaction Detection (GCHAID) Trees;

e due metodi di *classificazione non supervisionata*:

- K-Means;
- Subtractive Clustering.

I risultati delle elaborazioni numeriche sono stati confrontati con quanto ottenibile mediante l'applicazione dei metodi comunemente utilizzati nella pratica tecnica per il medesimo scopo, o suggeriti da altri organismi tecnici. I metodi adoperati per il confronto sono:

- Media del Terzo di pista: terzo della lunghezza della pista più utilizzata;
- Minimum 100 Meters Rolling Averages (M100MRA).

L'obiettivo è quello di dividere longitudinalmente la pista in parti che riflettono le diverse zone di consumo ad ogni data di rilievo, al fine di individuare quella che presenta il maggior degrado.

Il valore medio del GN della zona con il maggior degrado, è fissato come rappresentativo del fenomeno di decadimento dell'intera runway e utilizzato per implementare la curva di decadimento.

3.1.1 L'ALGORITMO CART

Gli Alberi di Classificazione e Regressione sono chiamati algoritmi di apprendimento supervisionato, poiché la variabile di interesse è nota a priori e supervisiona il processo. Sono metodi di partizione gerarchica per costruire modelli previsionali dai dati stessi, ottenuti partizionando ricorsivamente lo spazio dei dati in un certo numero di nodi tramite un indice di impurità, ed impostando un semplice modello previsionale con una serie di logiche if-then all'interno di ciascuna partizione, finché viene attivata una regola di stop. Dopodiché una regola di potatura fornisce il numero di nodi ottimale. Come risultato, la partizione è rappresentata graficamente come un albero decisionale, il cui errore di previsione è misurato in termini di costo di misclassificazione. Gli ultimi nodi della sequenza, detti nodi terminali, sono le parti in cui il data set originale è stato diviso.

L'algoritmo Classification and Regression Trees (CART) fu reso celebre da Breiman et al. [63], ed è applicabile sia a variabili quantitative (Albero di Regressione), cui ci si riferirà nel seguito; che categoriche (Albero di Classificazione).

Esso divide i dati iniziali attraverso uno splitting dicotomico (solo due nodi sono generati a ciascuno split) considerando la misura di impurità del nodo t (Equazione 1):

$$i_Y(t) = \sum_{x_n \in t} (y_n - \bar{y}(t))^2 \quad (1)$$

e la misura di impurità dell'albero T (Equazione 2):

$$I_Y(T) = \sum_{t \in \tilde{T}} I_Y(t) = \sum_{t \in \tilde{T}} i_Y(t) p(t) \quad (2)$$

dove:

Y è la variabile di risposta;

$p(t) = \frac{N(t)}{N}$ è il rapporto tra il numero di unità che cadono nel nodo t e quelle del nodo radice;

\tilde{T} è l'insieme dei nodi terminali.

La miglior partizione in ciascun nodo è ottenuta massimizzando il decremento di impurità nel passaggio dal nodo padre t ai k nodi figli (Equazione 3):

$$\max_{p \in P} \Delta i_Y(t, p) = \max_p \{i_Y(t) - \sum_k i_Y(t_k) p(t_k|t)\} \quad (3)$$

dove:

P è l'insieme di tutte le partizioni possibili;

$K=2$;

$\omega_{Y|p}(t) = \sum_k i_Y(t_k) p(t_k|t)$ è il fattore locale di riduzione dell'impurità al nodo t .

È possibile ridurre il costo computazionale della segmentazione attraverso criteri alternativi di partizione.

Il criterio two-stage determina prima un sottoinsieme di migliori predittori minimizzando il fattore globale di riduzione dell'impurità di un predittore X_m (Equazione 4):

$$\omega_{Y|X_m}(t) = \sum_{g \in G_m} i_{Y|g}(t)p(g|t) \quad (4)$$

poi per i migliori predittori selezionati minimizza il fattore locale.

L'algoritmo accelerato FAST, invece, applica iterativamente il criterio two-stage selezionando ad ogni passo un predittore alla volta ed eliminando quelli selezionati nei passi precedenti, fino a che per il migliore predittore corrente $X_{(v)}$ selezionato alla iterazione (v) si verifica che (Equazione 5):

$$\omega_{Y|X_{(v)}}(t) \leq \omega_{Y|p_{(v-1)}^*} \quad (5)$$

dove:

$p_{(v-1)}^*$ è la migliore partizione alla iterazione $(v-1)$.

I criteri di arresto stabiliscono che un nodo è terminale se:

- una ulteriore riduzione di impurità < una soglia prefissata;

oppure:

- la numerosità del nodo < una soglia prefissata.

L'assegnazione della risposta ai nodi terminali avviene etichettando ciascun nodo terminale con il valor medio.

Per passare da un albero esplorativo (per un dato campione) ad uno decisionale (per nuove unità) è necessaria una procedura di induzione dell'albero, che ha l'obiettivo di definire la parte strutturale dell'albero semplificando un albero troppo espanso, pur considerando l'accuratezza per nuove unità. Si opera una distinzione tra campione di apprendimento e campione test.

Per la validazione della struttura ad albero si considera la sua accuratezza con delle possibili stime del tasso di errata classificazione ovvero di errata previsione.

Stima di ricostituzione (Equazione 6):

$$R(T) = \sum_{h \in H_T} r(h)p(h) \quad (6)$$

dove:

$r(h)$ è la misura dell'errore al nodo terminale h (varianza della variabile Y) calcolata sulle unità del campione di apprendimento; tale metodo fornisce una rappresentazione ottimistica della accuratezza.

Stima test set (Equazione 7):

$$R^{ts}(T) = \sum_{h \in H_T} R^{ts}(h) \quad (7)$$

dove la:

$R^{ts}(h) = r^{ts}(h)p^{ts}(h)$ è calcolata analogamente al caso precedente ma sulle unità del campione test; si può ricorrere a tale metodo quando il campione è di cardinalità elevata.

Stima cross validation (Equazione 8):

$$R^{cv}(T) = \frac{1}{V} \sum_{v=1}^V R^{ts}(T_v) \quad (8)$$

ottenuta dalla media di V stime test set; questo metodo è parsimonioso con i dati: quando il campione non è di cardinalità sufficientemente elevata lo si divide in V sottoinsiemi di uguale numerosità.

La semplificazione della struttura ad albero, o pruning, genera una sequenza ottimale nidificata di sottoalberi potati tra i quali ne viene selezionato uno finale quale regola di decisione per nuove unità.

Data la misura di costo complessità (Equazione 9):

$$R_{\alpha}(T) = R(T) + \alpha|\tilde{T}| = \sum_{h \in H_T} r(h)p(h) + \alpha|\tilde{T}| \quad (9)$$

dove:

$|\tilde{T}|$ è il numero di nodi terminali dell'albero T ;

$\alpha \geq 0$ è il parametro di complessità;

si ricerca per ogni nodo interno quel valore critico di α che individua la branca con il legame più debole.

La sequenza di sottoalberi potati viene generata dall'albero massimo e procedendo di volta in volta tagliando la branca che si diparte dal nodo che presenta il legame più debole.

La scelta dell'albero ottimale da utilizzare come modello avviene individuando il sottoalbero che presenta il più piccolo tasso di errata classificazione (0-SE rule) o meglio, nell'intorno del minimo dato l'appiattimento della curva e l'instabilità di tale minimo; l'intorno viene fissato dall'errore standard di tale minimo (1-SE rule). Si ricorre alla stima test set o cross validation, dal momento che con la stima per risostituzione verrebbe selezionato banalmente il sottoalbero più grande.

3.1.1.1 APPLICAZIONE DELL'ALGORITMO CART

Per l'elaborazione dei dati grezzi delle serie secondo l'algoritmo illustrato è stato utilizzato l'ambiente software Statistica 8.0 – StatSoft.

Si è impostato:

- il GN come variabile dipendente;
- la progressiva metrica longitudinale della pista dalla soglia 10 come predittore;
- come regola di stop la “minimum n cases” pari a 22. Quest'ultimo valore, dopo molti di tentativo, si è rivelato il più soddisfacente nei risultati (come si vedranno nel seguito) e rende conto del criterio di lasciare, o meno, che l'algoritmo esegua una ulteriore partizione o si fermi una volta che sia arrivato ad una dimensione di 220 m pari a circa il doppio dei 100 m richiamati nelle Normative. Potendo quindi l'eventuale successiva partizione comportare zone di pista inferiori ai 100 m, oppure superiori. Il fissare un “minimum n cases” pari a 10 corrispondenti ai 100 m avrebbe comportato sempre una partizione finale in zone inferiori o al più uguali a 100;
- come validazione si è optato per la V-fold cross validation, dove $v=10$ ovvero si è diviso il campione della serie in 10 parti;
- come regola di pruning la 1-SE rule.

Il principale output a conclusione dell'implementazione è il grafico della struttura dell'albero ottimale, con i nodi terminali etichettati con la media dei valori del GN degli elementi compresi nel nodo.

All'interno di ciascun nodo è leggibile anche la varianza degli elementi del nodo ed il numero degli elementi.

In testa a ciascun nodo vi è anche il valore di split della progressiva metrica, ovvero la regola decisionale che partiziona gli elementi del nodo in base al valore della distanza dalla soglia 10 .

Quest'ultima informazione di output ha valenza esplicativa sul fenomeno evolutivo di consumo dell'aderenza: essa infatti localizza le varie aree di consumo lungo la pista, e ne indica la rispettiva estensione.

La zona di consumo caratterizzata, in ciascuna data di rilievo, dall'etichetta con il valore minore di GN, sarà presa a riferimento per caratterizzare l'intera pista.

Si riportano nelle Figure 19, 20, 21 e 22 gli alberi ottimali relativi alle serie delle campagne di rilievo 29/4/2011, 27/5/2011, 11/10/2011 e 15/11/2011 sull'allineamento ± 6 .

Si rileva che il nodo con il valore minore di GN, e quindi la relativa area di consumo, si trova sempre in prossimità della soglia 10 della runway, che risulta essere nei fatti quella interessata dal maggior numero di atterraggi e decolli dell'Aeroporto di Lamezia Terme.

Nella planimetria in Figura 23 si sono riportate le zone di consumo dell'aderenza nelle date di rilievo menzionate; per quelle di massimo consumo si è indicato il valore del GN, l'estensione e la localizzazione.

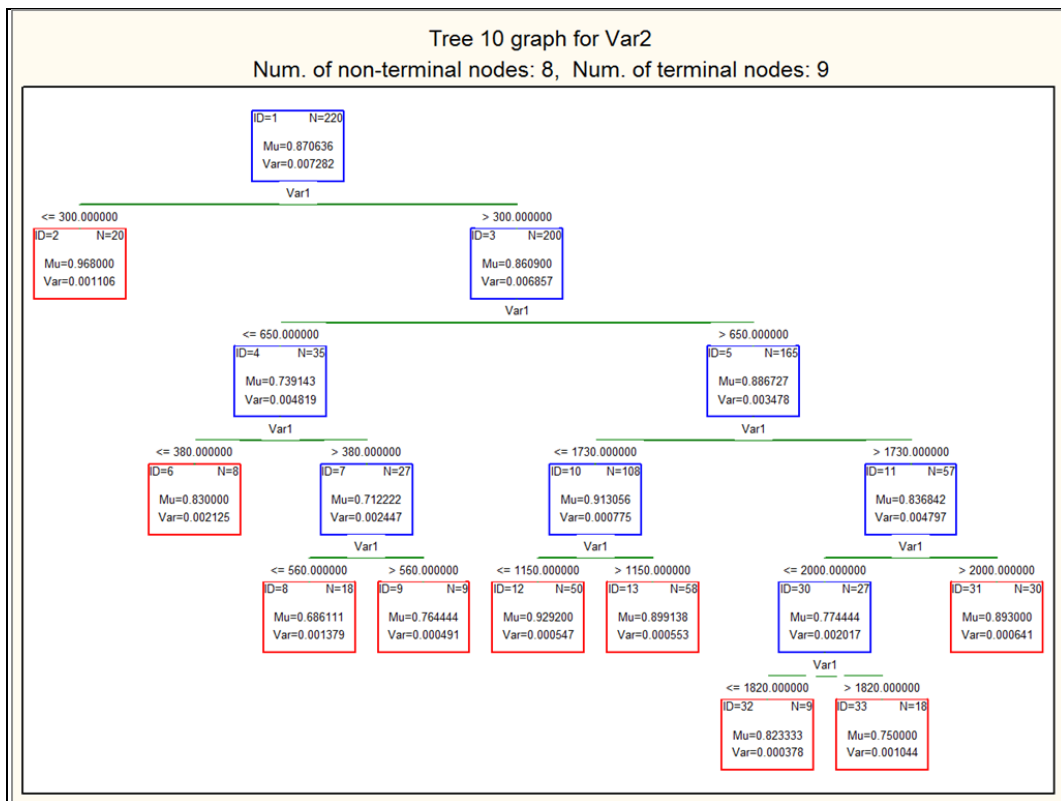


Figura 19 Albero CART ottimale del rilievo 29/4/2011 allineamento ± 6

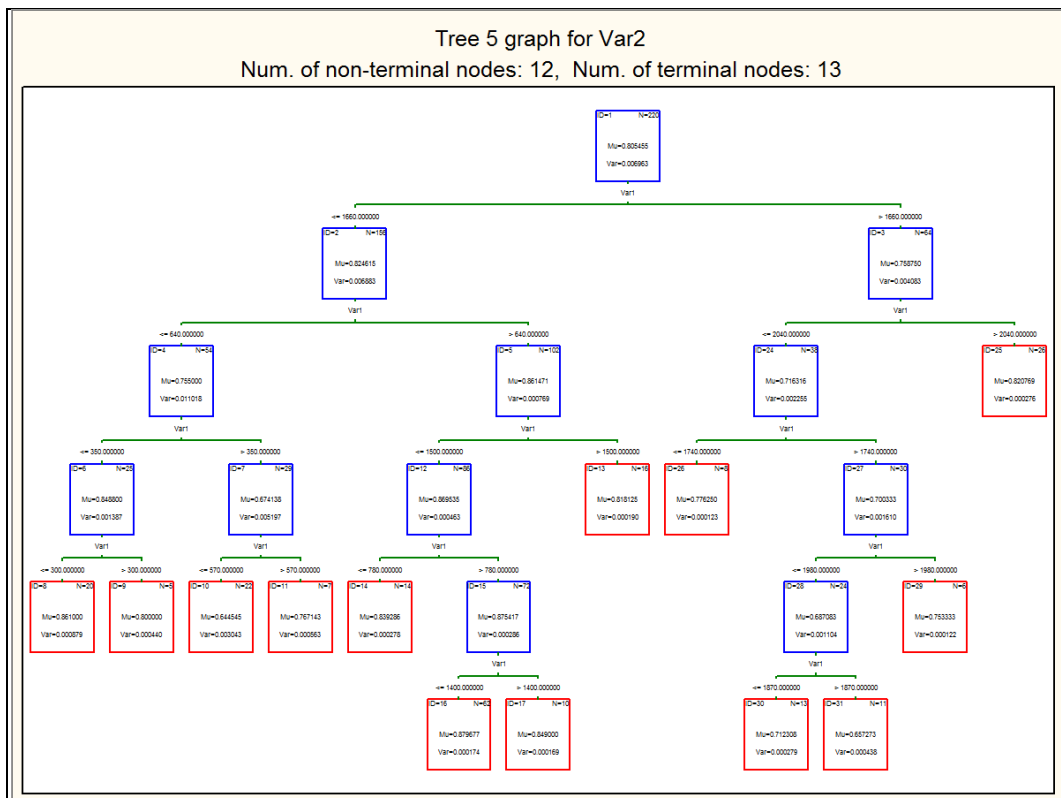


Figura 20 Albero CART ottimale del rilievo 27/5/2011 allineamento ± 6

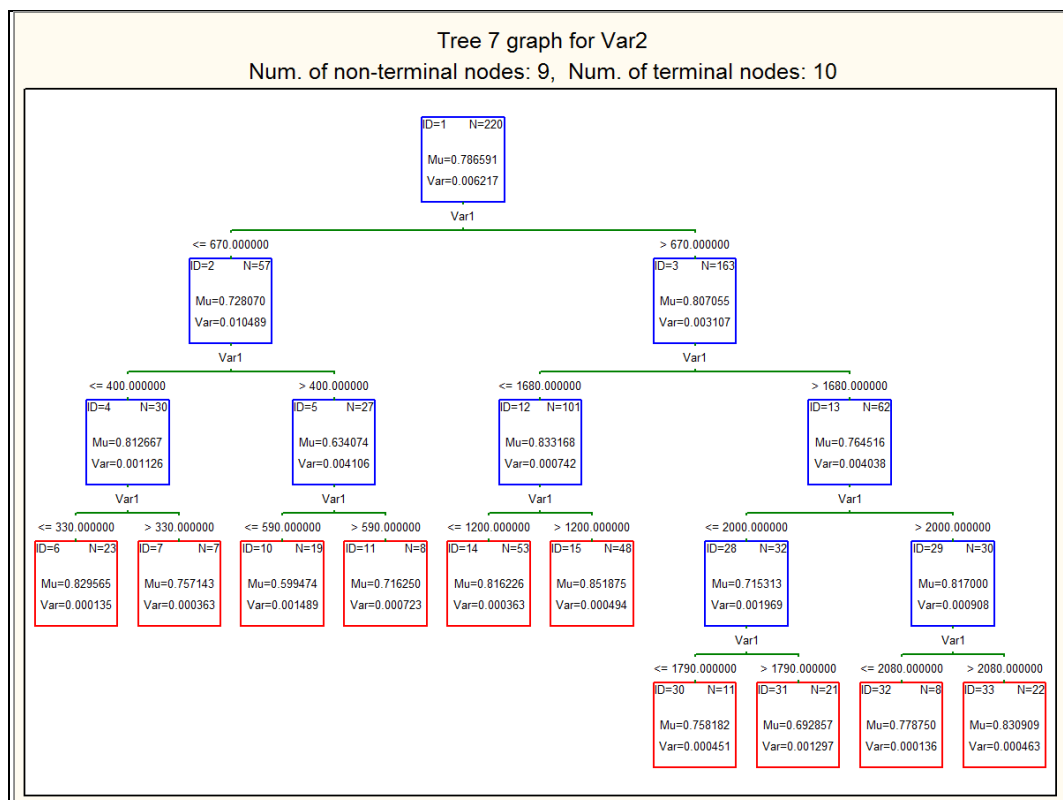


Figura 21 Albero CART ottimale del rilievo 11/10/2011 allineamento ± 6

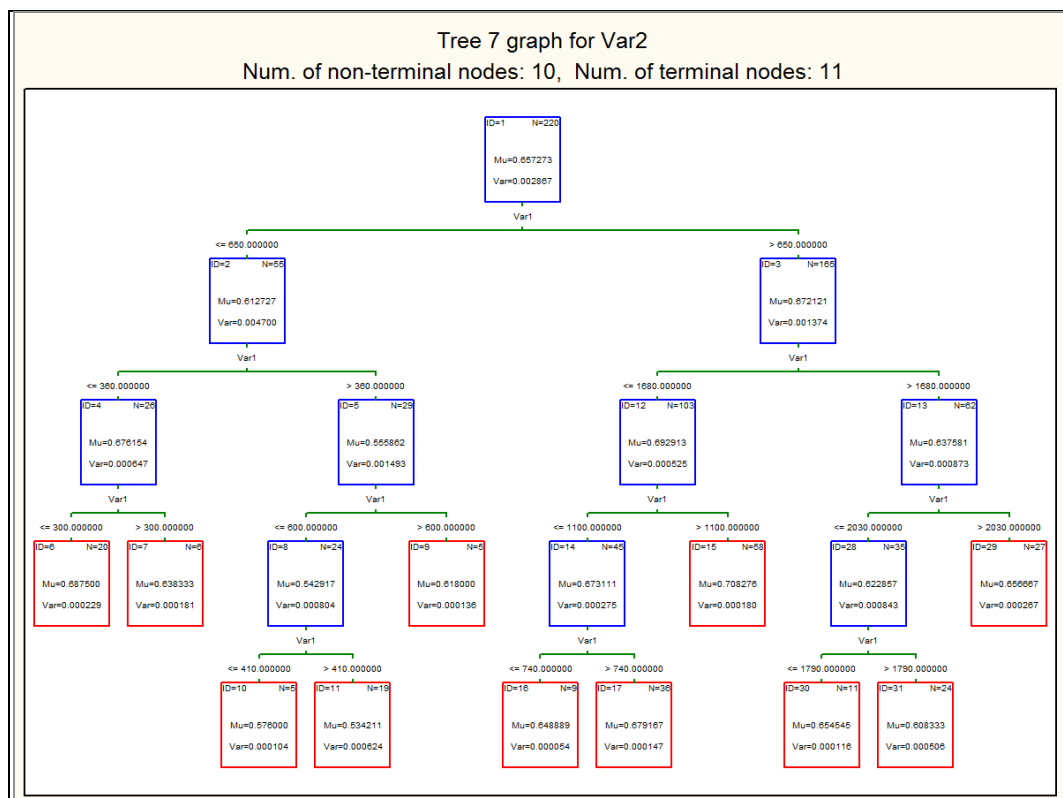


Figura 22 Albero CART ottimale del rilievo 15/11/2011 allineamento ± 6

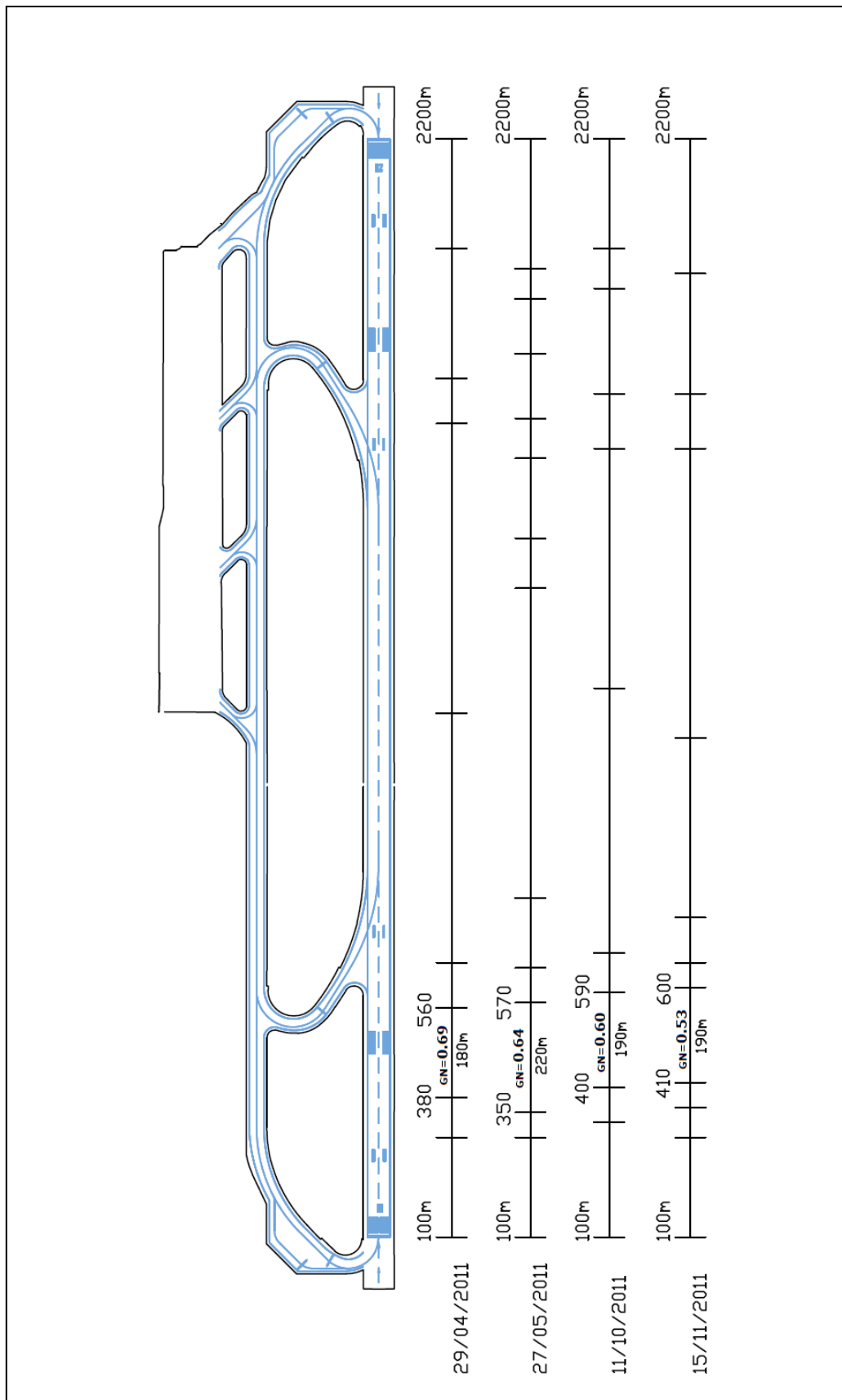


Figura 23 Zone CART di consumo dell'aderenza: rilievi del 29/4/2011, 27/5/2011, 11/10/2011 e 15/11/2011
allineamento ± 6

3.1.2 L'ALGORITMO GCHAID

L'algoritmo General Chi-Squared Automatic Interaction Detector (GCHAID) è basato su uno dei primi metodi di classificazione proposto in origine da Kass [64]. L'algoritmo CHAID fornisce una condizione di splitting sia dicotomica che multipla attraverso un test Chi-quadro; ciascun nodo dell'albero genera due o più nodi.

L'algoritmo GCHAID è una versione del CHAID originario proposto da Kass in grado di trattare variabili dipendenti di tipo quantitativo, come il GN, invece che solo categoriche. Esso fornisce condizioni di splitting sia dicotomiche che multiple attraverso una statistica F-test: se il test eseguito sui valori delle variabili predittive in un nodo è significativo (cioè è minore di un alpha value) l'algoritmo calcolerà un p-value corretto e sceglierà per lo split la variabile predittiva con il più piccolo p-value corretto; altrimenti il nodo è terminale.

3.1.2.1 APPLICAZIONE DELL'ALGORITMO GCHAID

Anche per l'implementazione del GCHAID è stato utilizzato l'ambiente software Statistica 8.0 – StatSoft.

Le regole di stop, validazione e pruning sono state impostate come per il CART, anche al fine di maggior comparabilità dei risultati.

Si riportano nelle Figure 24, 25, 26 e 27 gli alberi ottimali relativi alle serie delle campagne di rilievo 29/4/2011, 27/5/2011, 11/10/2011 e 15/11/2011 sull'allineamento ± 6 .

Si rileva che il numero di nodi terminali, e quindi il numero delle zone di consumo dell'aderenza rappresentate, risulta decisamente minore del caso CART precedente, comportando una minore capacità di discriminazione delle singole zone in termini di estensione e localizzazione nella stessa data di rilievo, ed in termini di evoluzione delle stesse da un rilievo al successivo. I valori di etichetta del GN risultano mediamente più elevati che nel caso CART precedente.

Nella planimetria in Figura 28 si sono riportate le zone di consumo dell'aderenza nelle date di rilievo menzionate; per quelle di massimo consumo si è indicato il valore del GN, l'estensione e la localizzazione.

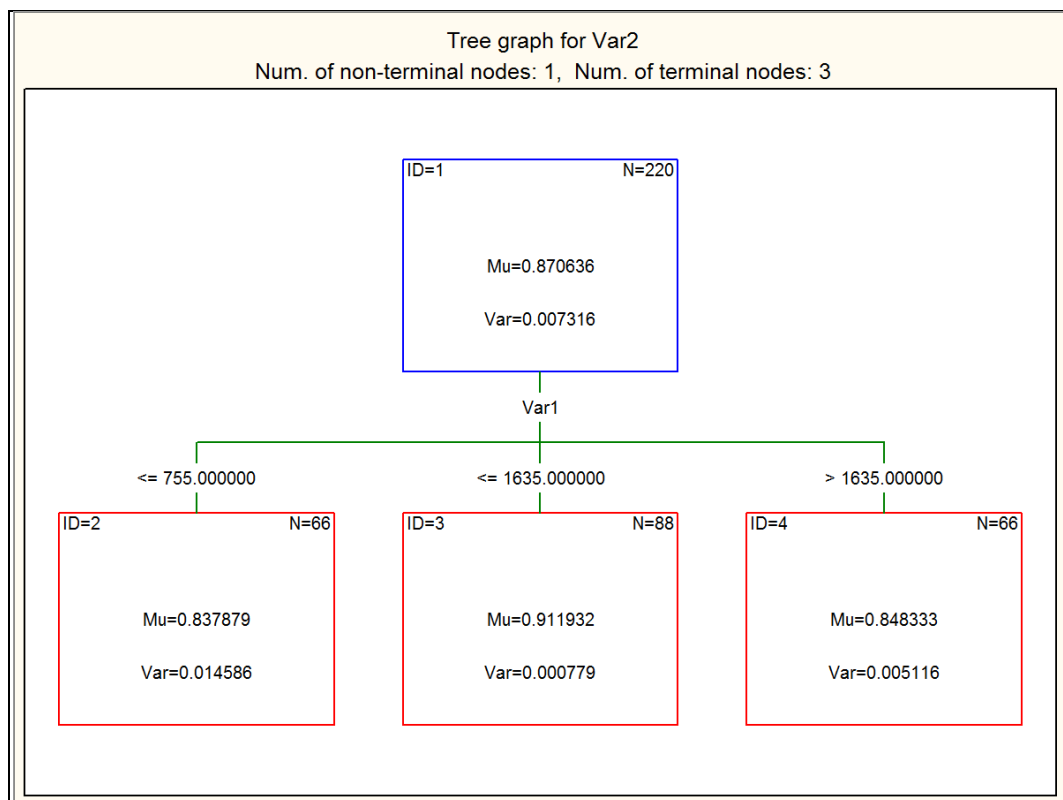


Figura 24 Albero GCHAID ottimale del rilievo 29/4/2011 allineamento ± 6

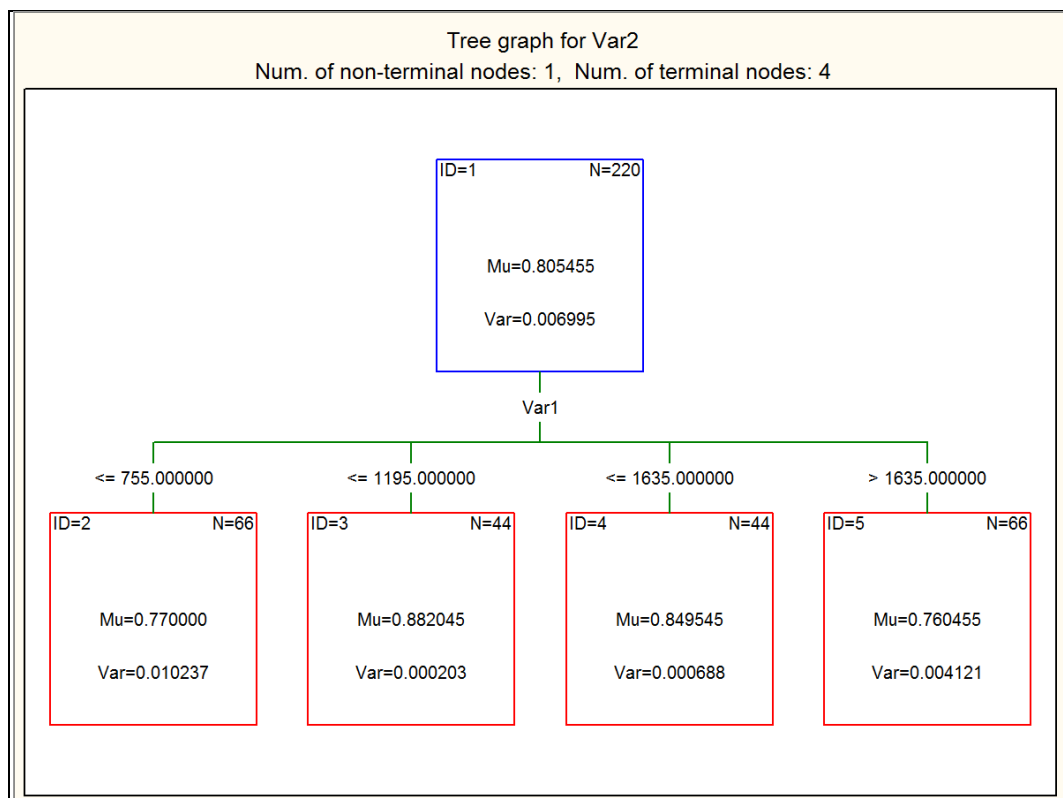


Figura 25 Albero GCHAID ottimale del rilievo 27/5/2011 allineamento ± 6

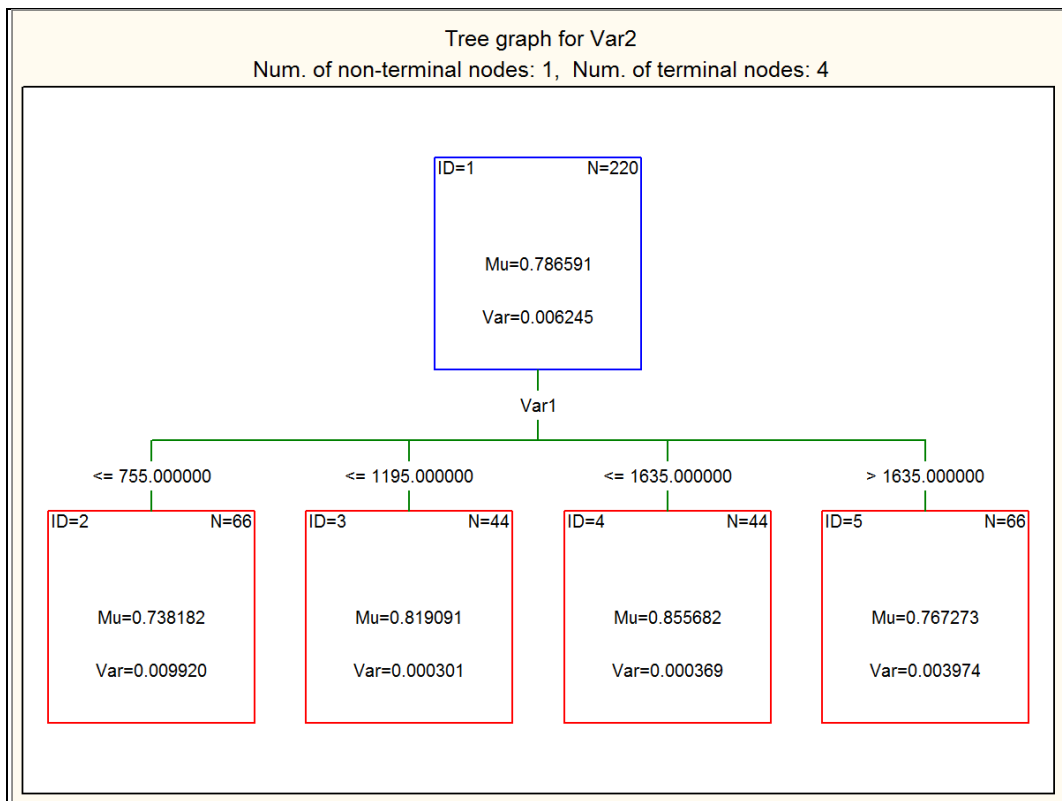


Figura 26 Albero GCHAID ottimale del rilievo 11/10/2011 allineamento ± 6

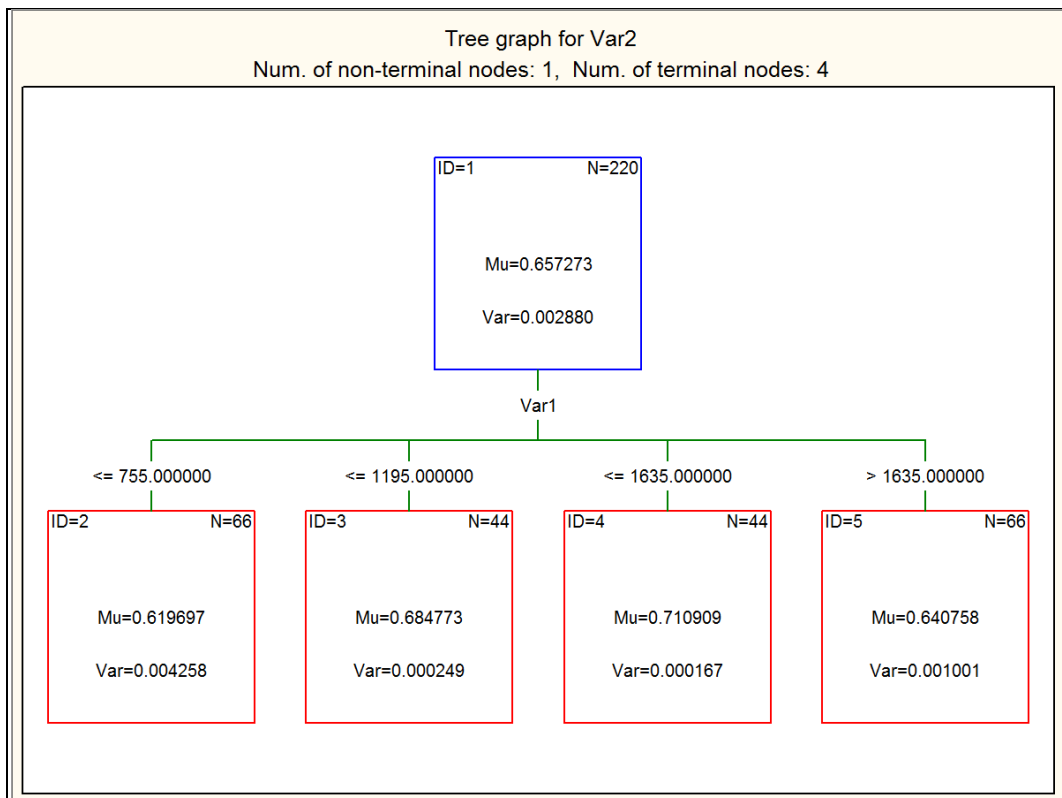


Figura 27 Albero GCHAID ottimale del rilievo 15/11/2011 allineamento ± 6

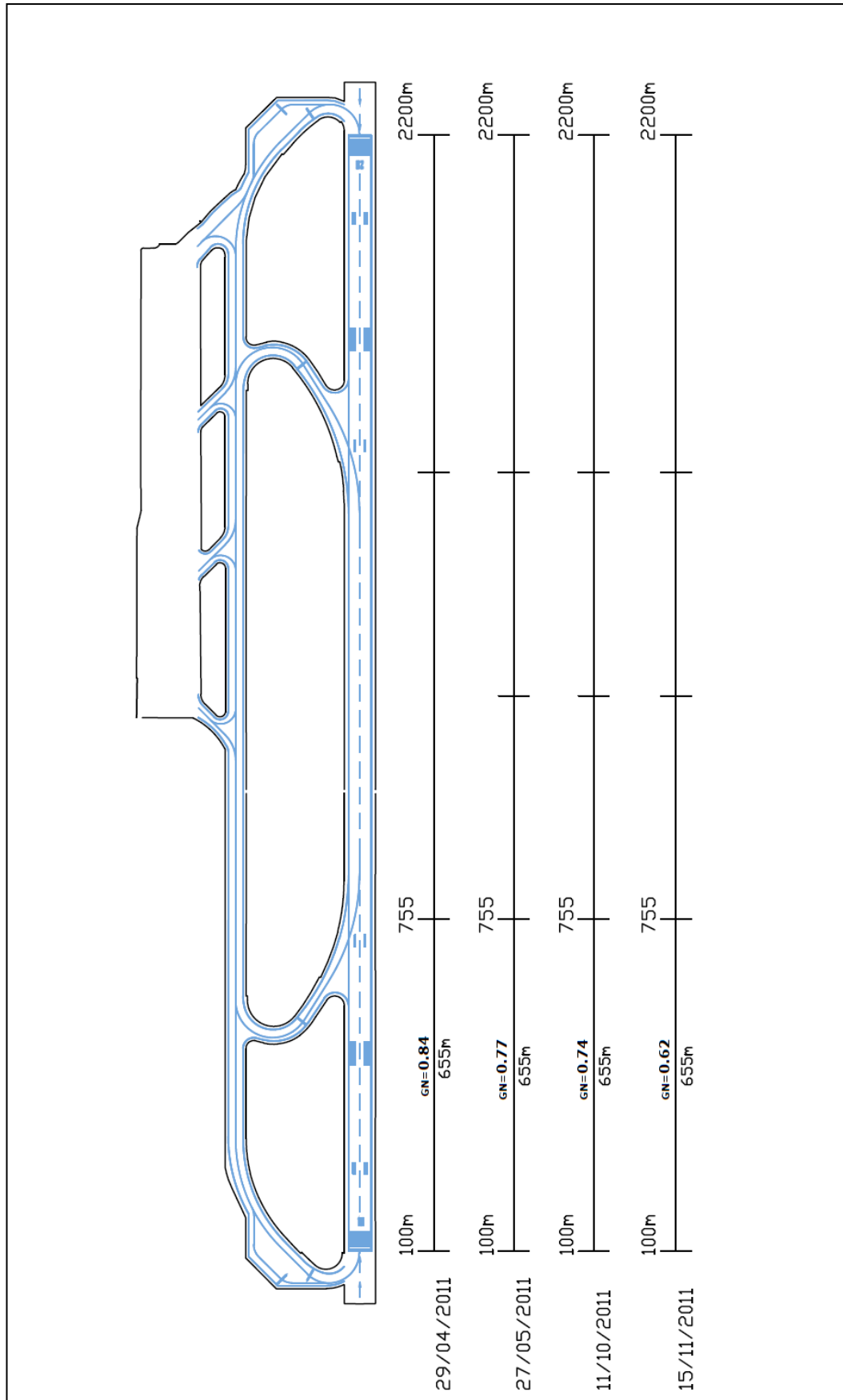


Figura 28 Zone GCHAD di consumo dell'aderenza: rilievi del 29/4/2011, 27/5/2011, 11/10/2011 e 15/11/2011

allineamento ± 6

3.1.3 L'ALGORITMO K-MEANS OTTIMIZZATO

La Cluster Analysis è un processo di apprendimento non supervisionato di raggruppamento delle osservazioni in classi o clusters, così che le osservazioni nella stessa classe condividano più caratteristiche comuni di quelle nelle altre classi. Vari algoritmi eseguono questo processo, K-means di Hartigan [65] è uno dei più popolari. Una efficiente versione dell'algoritmo è presentata da Hartigan and Wong [66].

L'algoritmo K-means è un metodo di clusterizzazione crisp (o hard), dove i termini crisp/hard si riferiscono al caso della logica classica. Esso fu pubblicato per la prima volta da Hartigan [65], l'obiettivo è dividere le osservazioni $X_i = (Progressiva, GN)$ in un assegnato numero di gruppi (k) minimizzando la distanza di ciascun punto dal suo cluster center (Equazione 10):

$$V(U, C) = \sum_{i=1}^k \sum_{X_j \in P_i} \|X_j - C_i\|^2 \quad (10)$$

dove:

C_i sono i cluster centers;

P_i sono i clusters;

U è una matrice di partizione degli oggetti j tra i clusters i .

Il punto debole dell'algoritmo è che esso richiede di fissare il numero di clusters da definire.

Per questa ragione esso è stato associato con un algoritmo ausiliario per trovare il numero ottimale di clusters, scelto similmente a quello impostato per eseguire i passi di validazione e pruning negli algoritmi CART e GCHAID, anche al fine di maggior comparabilità dei risultati. L'idea generale della V-fold cross validation è di dividere il totale delle osservazioni in un numero (v) di parti. La stessa analisi viene successivamente applicata alle osservazioni appartenenti alle $v-1$ parti, ed i risultati dell'analisi sono applicati al campione v per calcolare un indice di validità predittiva, cioè quanto bene le osservazioni del campione v vengono assegnate ai clusters omogenei utilizzando la soluzione-clusters corrente calcolata dai $v-1$ campioni di apprendimento. Il numero ottimale di clusters è dato, come nei casi precedenti, dalla stabilizzazione nei pressi del minimo di una funzione di costo (calcolata sulla base della distanza media degli elementi dai cluster centers).

3.1.3.1 APPLICAZIONE DELL'ALGORITMO K-MEANS OTTIMIZZATO

Anche per l'implementazione del K-means con algoritmo ausiliario è stato utilizzato l'ambiente software Statistica 8.0 – StatSoft.

Si è impostato:

- le due variabili (Progressiva metrica; GN) come entrambe continue, senza distinzione, dato il tipo di processo non supervisionato, tra predittore e dipendente;
- come misura di distanza quella Euclidea;
- per la V-fold cross validation $v=10$;

- limiti minimo e massimo per l'intervallo di appartenenza del numero ottimale di clusters: 2 e 25.

La zona di consumo caratterizzata, in ciascuna data di rilievo, dal cluster con il minore valor medio di GN, sarà presa a riferimento per caratterizzare l'intera pista.

Si riportano nelle Tabelle 10a, 10b, 11a, 11b, 12a, 12b, 13a e 13b gli output in forma di tabelle relativi alle serie delle campagne di rilievo 29/4/2011, 27/5/2011, 11/10/2011 e 15/11/2011 sull'allineamento ± 6 .

In Appendice B si riportano le altre statistiche di output relative alle stesse serie.

Nella planimetria in Figura 29 si sono riportate le zone di consumo dell'aderenza nelle date di rilievo menzionate; per quelle di massimo consumo si è indicato il valore del GN, l'estensione e la localizzazione. Si rileva come alcune zone di consumo si compenetrino con altre, o le comprendano. Ciò è da attribuire al tipo di classificazione non supervisionata in cui, non avendo una variabile fissata come predittore che supervisiona il processo, i clusters vengono costruiti per similarità tra le coordinate Progressiva-GN di ciascun punto senza tenere in conto la continuità spaziale, come invece accade implicitamente nel processo di partizione del CART e del GCHAID.

Tabella 10a Clusters K-means ottimali del rilievo 29/4/2011 allineamento ± 6 , Progressiva

Statistics for continuous variable: Var1 (16_29.04.2011_6) Number of clusters: 7 Total number of training cases: 220								
	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3	Cluster 4	Cluster 5	Cluster 6	Cluster 7	Overall
Minimum	105.0000	335.0000	385.0000	655.000	145.0000	1155.000	1735.000	105.0
Maximum	355.0000	645.0000	555.0000	1145.000	285.0000	1725.000	2295.000	2295.0
Mean	242.0000	532.3333	466.3333	900.000	215.0000	1440.000	2015.000	1200.0
Standard deviation	106.6719	107.5352	50.9715	145.774	44.7214	168.869	165.982	405166.7

Tabella 10b Clusters K-means ottimali del rilievo 29/4/2011 allineamento ± 6 , GN

Statistics for continuous variable: Var2 (16_29.04.2011_6) Number of clusters: 7 Total number of training cases: 220								
	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3	Cluster 4	Cluster 5	Cluster 6	Cluster 7	Overall
Minimum	0.840000	0.730000	0.600000	0.870000	0.950000	0.840000	0.700000	0.600000
Maximum	0.930000	0.810000	0.720000	0.990000	1.010000	0.960000	0.930000	1.010000
Mean	0.890000	0.761333	0.676000	0.929200	0.984667	0.899138	0.836842	0.870636
Standard deviation	0.033993	0.024456	0.033338	0.023633	0.018848	0.023715	0.069876	0.007316

Tabella 11a Clusters K-means ottimali del rilievo 27/5/2011 allineamento ± 6 , Progressiva

Statistics for continuous variable: Var1 (17_27.05.2011_6) Number of clusters: 10 Total number of training cases: 220											
	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3	Cluster 4	Cluster 5	Cluster 6	Cluster 7	Cluster 8	Cluster 9	Cluster 10	Overall
Minimum	395.0000	105.0000	355.0000	615.0000	145.0000	1745.0000	2015.0000	115.0000	805.0000	1405.0000	105.0
Maximum	545.0000	345.0000	625.0000	795.0000	285.0000	2005.0000	2295.0000	315.0000	1395.0000	1735.0000	2295.0
Mean	465.6667	247.8571	510.0000	709.4444	220.0000	1875.0000	2155.0000	213.0000	1100.0000	1570.0000	1200.0
Standard	45.898	101.77	106.13	54.365	52.098	79.373	85.147	69.570	174.64	99.582	405166

deviation	4	00	03	0	8			1	2		.7
-----------	---	----	----	---	---	--	--	---	---	--	----

Tabella 11b Clusters K-means ottimali del rilievo 27/5/2011 allineamento ± 6 , GN

Statistics for continuous variable: Var2 (17_27.05.2011_6) Number of clusters: 10 Total number of training cases: 220											
	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3	Cluster 4	Cluster 5	Cluster 6	Cluster 7	Cluster 8	Cluster 9	Cluster 10	Overall
Minimum	0.530000	0.780000	0.680000	0.800000	0.880000	0.630000	0.760000	0.840000	0.840000	0.760000	0.530000
Maximum	0.660000	0.820000	0.770000	0.890000	0.910000	0.750000	0.840000	0.870000	0.910000	0.880000	0.910000
Mean	0.614667	0.797143	0.727500	0.840000	0.887500	0.693333	0.814828	0.854000	0.879500	0.817353	0.805455
Standard deviation	0.039255	0.013801	0.030488	0.025668	0.011650	0.036690	0.023997	0.013499	0.013457	0.029778	0.006995

Tabella 12a Clusters K-means ottimali del rilievo 11/10/2011 allineamento ± 6 , Progressiva

Statistics for continuous variable: Var1 (18_11.10.2011_6) Number of clusters: 6 Total number of training cases: 220							
	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3	Cluster 4	Cluster 5	Cluster 6	Overall
Minimum	405.0000	105.0000	675.0000	1205.0000	335.0000	1685.0000	105.0
Maximum	595.0000	385.0000	1195.0000	1675.0000	705.0000	2295.0000	2295.0
Mean	500.0000	222.0833	944.216	1440.0000	534.3333	1990.0000	1200.0
Standard deviation	59.1608	74.8610	150.025	140.0000	148.7792	180.416	405166.7

Tabella 12b Clusters K-means ottimali del rilievo 11/10/2011 allineamento ± 6 , GN

Statistics for continuous variable: Var2 (18_11.10.2011_6) Number of clusters: 6 Total number of training cases: 220							
	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3	Cluster 4	Cluster 5	Cluster 6	Overall
Minimum	0.530000	0.790000	0.780000	0.800000	0.690000	0.610000	0.530000
Maximum	0.670000	0.850000	0.850000	0.890000	0.780000	0.880000	0.890000
Mean	0.603000	0.827917	0.818039	0.851875	0.740667	0.764516	0.786591
Standard deviation	0.041688	0.014136	0.017090	0.022470	0.026040	0.064061	0.006245

Tabella 13a Clusters K-means ottimali del rilievo 15/11/2011 allineamento ± 6 , Progressiva

Statistics for continuous variable: Var1 (19_15.11.2011_6) Number of clusters: 6 Total number of training cases: 220							
	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3	Cluster 4	Cluster 5	Cluster 6	Overall
Minimum	365.0000	705.0000	105.0000	1105.0000	305.0000	1675.0000	105.0
Maximum	595.0000	1165.0000	335.0000	1665.0000	735.0000	2295.0000	2295.0
Mean	480.0000	926.795	206.4286	1393.182	564.0000	1985.0000	1200.0
Standard deviation	70.2885	120.107	64.7523	163.176	156.1679	183.303	405166.7

Tabella 13b Clusters K-means ottimali del rilievo 15/11/2011 allineamento ± 6 , GN

Statistics for continuous variable: Var2 (19_15.11.2011_6) Number of clusters: 6 Total number of training cases: 220							
	Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3	Cluster 4	Cluster 5	Cluster 6	Overall
Minimum	0.490000	0.650000	0.650000	0.680000	0.590000	0.560000	0.490000
Maximum	0.580000	0.700000	0.710000	0.730000	0.660000	0.680000	0.730000
Mean	0.538636	0.679231	0.686190	0.709636	0.631000	0.638095	0.657273
Standard deviation	0.026240	0.012436	0.016272	0.012317	0.020494	0.029831	0.002880

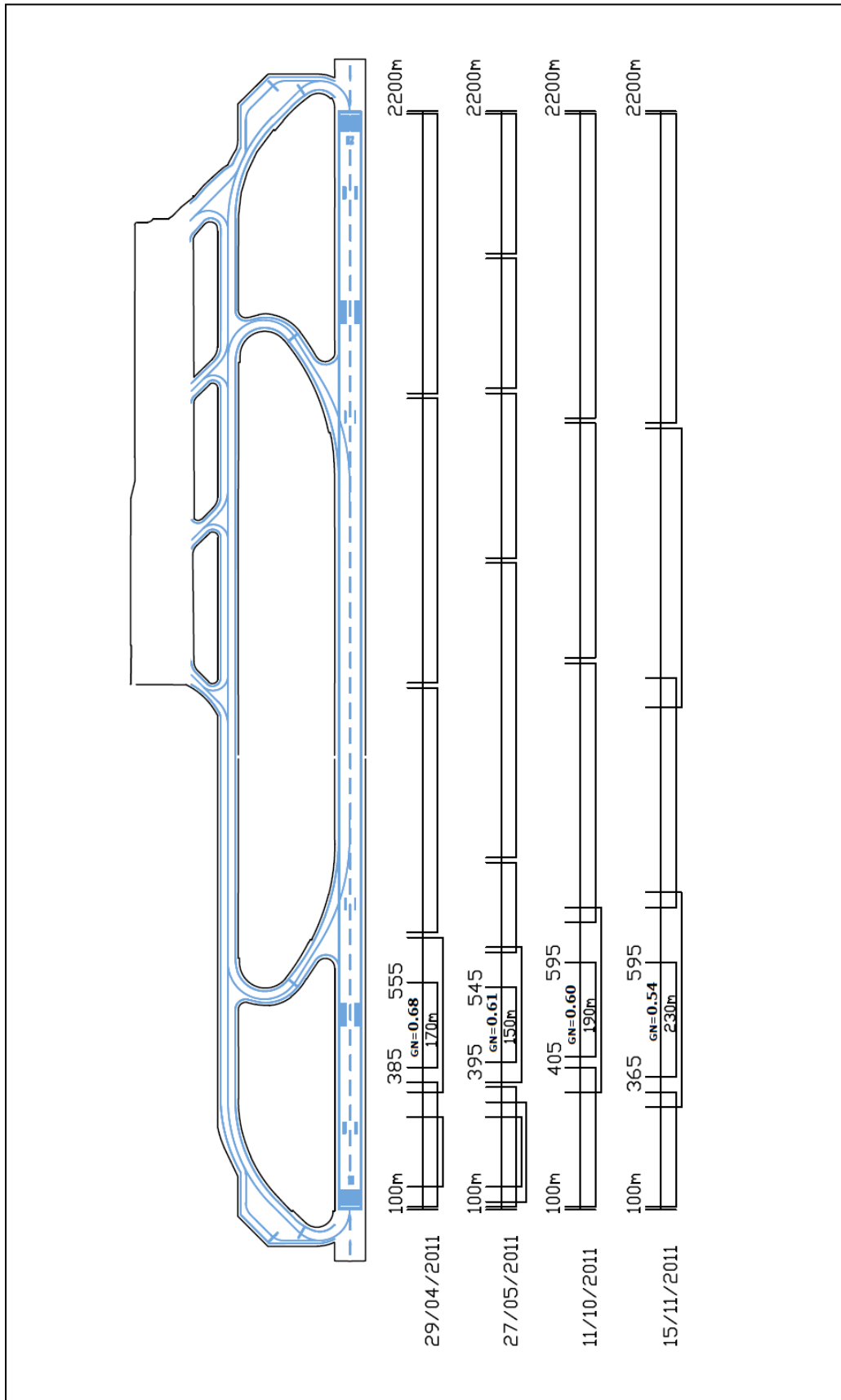


Figura 29 Zone K-means ottimali di consumo dell'aderenza: rilievi del 29/4/2011, 27/5/2011, 11/10/2011 e 15/11/2011 allineamento ± 6

3.1.4 L'ALGORITMO SUBTRACTIVE CLUSTERING

L'algoritmo Subtractive Clustering proposto da Chiu [67] è un metodo di clusterizzazione appartenente alla logica fuzzy, indicata per gestire più opportunamente le osservazioni caratterizzate da imprecisione (la logica fuzzy verrà più compiutamente trattata nel successivo Capitolo 5). Come notano Bataineh et al. [68], esso genera modelli più accurati di quelli generati utilizzando altri algoritmi fuzzy; e soprattutto stima implicitamente il numero ottimale dei cluster centers (centroidi).

L'algoritmo è basato sul calcolo di un potenziale per ciascun punto sulla base delle sue distanze dai punti circostanti e sull'idea che ciascuno di loro è un potenziale centroide. Un punto con molti altri punti nelle vicinanze avrà un alto valore del potenziale. La misura del più alto potenziale fornirà il primo centroide. L'idea chiave è che una volta che il primo centroide viene scelto, il potenziale di tutti gli altri punti viene ridotto secondo la loro distanza dal centroide. I punti vicini al primo centroide avranno riduzione di potenziale molto grande. Il successivo centroide viene poi localizzato nei punti con il più alto potenziale residuo. Questa procedura di acquisire un nuovo centroide e ridurre il potenziale dei punti circostanti si ripete finché il potenziale di tutti questi ultimi scende sotto una soglia.

La procedura viene effettuata dalle Equazioni (11) e (12):

$$P_i = \sum_{j=1}^n e^{-\frac{\|x_i - x_j\|^2}{\left(\frac{r_a}{2}\right)^2}} \quad (11)$$

$$P_i = P_i - P_1^* \sum_{j=1}^n e^{-\frac{\|x_i - x_1\|^2}{\left(\frac{r_b}{2}\right)^2}} \quad (12)$$

L'Equazione (11) rappresenta il potenziale di ciascun punto x_i , dove il simbolo $\| \cdot \|$ denota la distanza Euclidea, e la costante positiva r_a (*Accept ratio*) è il rapporto di accettazione. Il rapporto di accettazione è il raggio che definisce un intorno; i punti oltre questo raggio hanno poca influenza sul potenziale. Viene selezionato il potenziale più alto.

Quindi il potenziale di ciascun punto viene ridotto secondo l'Equazione (12) che dipende dalla distanza tra il punto considerato ed il centroide precedentemente individuato, e da una costante positiva r_b (*Reject ratio*) che è il rapporto di scarto. Essa riduce il potenziale dei punti vicini al primo centroide scelto allo scopo di cercarne un altro in una posizione differente, lontano dal primo.

In aggiunta vi sono criteri per l'arresto della ricerca di clusters e per evitare centroidi periferici, nei quali sono coinvolti gli altri due parametri: l'*Influence range* e lo *Squash*.

3.1.4.1 APPLICAZIONE DELL'ALGORITMO SUBTRACTIVE CLUSTERING

Per l'implementazione del Subtractive Clustering è stato utilizzato l'ambiente software MATLAB R2014a – MathWorks.

I valori dei parametri si sono impostati come riportato Tabella 14.

Tabella 14 Parametri adoperati nel Subtractive Clustering

Parametri	Valori
Influence range	0.33
Squash	1.25
Accept ratio (r_a)	0.50
Reject ratio (r_b)	0.15

La zona di consumo caratterizzata, in ciascuna data di rilievo, dal centroide con il minor valore di GN, sarà presa a riferimento per caratterizzare l'intera pista.

Si riportano nelle Tabelle 15, 16, 17, 18 e nelle Figure 30, 31, 32, 33 gli output relativi alle serie delle campagne di rilievo 29/4/2011, 27/5/2011, 11/10/2011 e 15/11/2011 sull'allineamento ± 6 .

Si rileva che il numero di centroidi, e quindi il numero delle zone di consumo dell'aderenza rappresentate, risulta decisamente minore dei casi CART e K-means precedenti.

Nella planimetria in Figura 34 si sono riportati i centroidi rappresentativi delle zone di consumo dell'aderenza nelle date di rilievo menzionate; per i centroidi rappresentativi di quelle di massimo consumo si è indicato il valore del GN. In questo tipo di analisi manca l'identificazione della localizzazione ed estensione delle singole zone; ciò è proprio della logica fuzzy sottostante, la quale definisce insiemi dagli intervalli non precisamente definiti, ai quali un elemento si rapporta con un grado di appartenenza piuttosto che con l'appartenenza o meno della logica classica (vedi Capitolo 5 successivo).

Tabella 15 Centroidi Subtractive Clustering del rilievo 24/4/2011 allineamento ± 6

Progressiva metrica	GN
1.2250000000000000e+03	9.1000000000000003e-01
2.0450000000000000e+03	8.7000000000000000e-01
2.6500000000000000e+02	9.499999999999996e-01
5.0500000000000000e+02	7.099999999999996e-01

Tabella 16 Centroidi Subtractive Clustering del rilievo 27/5/2011 allineamento ± 6

Progressiva metrica	GN
1.1650000000000000e+03	8.599999999999999e-01
2.0250000000000000e+03	7.7000000000000002e-01
2.5500000000000000e+02	8.399999999999997e-01
4.3500000000000000e+02	6.5000000000000002e-01

Tabella 17 Centroidi Subtractive Clustering del rilievo 11/10/2011 allineamento ± 6

Progressiva metrica	GN
1.1950000000000000e+03	8.299999999999996e-01
2.0450000000000000e+03	7.8000000000000003e-01
3.2500000000000000e+02	8.0000000000000004e-01
4.7500000000000000e+02	5.999999999999998e-01

Tabella 18 Centroidi Subtractive Clustering del rilievo 15/11/2011 allineamento ± 6

Progressiva metrica	GN
1.1650000000000000e+03	6.899999999999995e-01
2.0450000000000000e+03	6.4000000000000001e-01
3.3500000000000000e+02	6.6000000000000003e-01
4.2500000000000000e+02	5.4000000000000004e-01

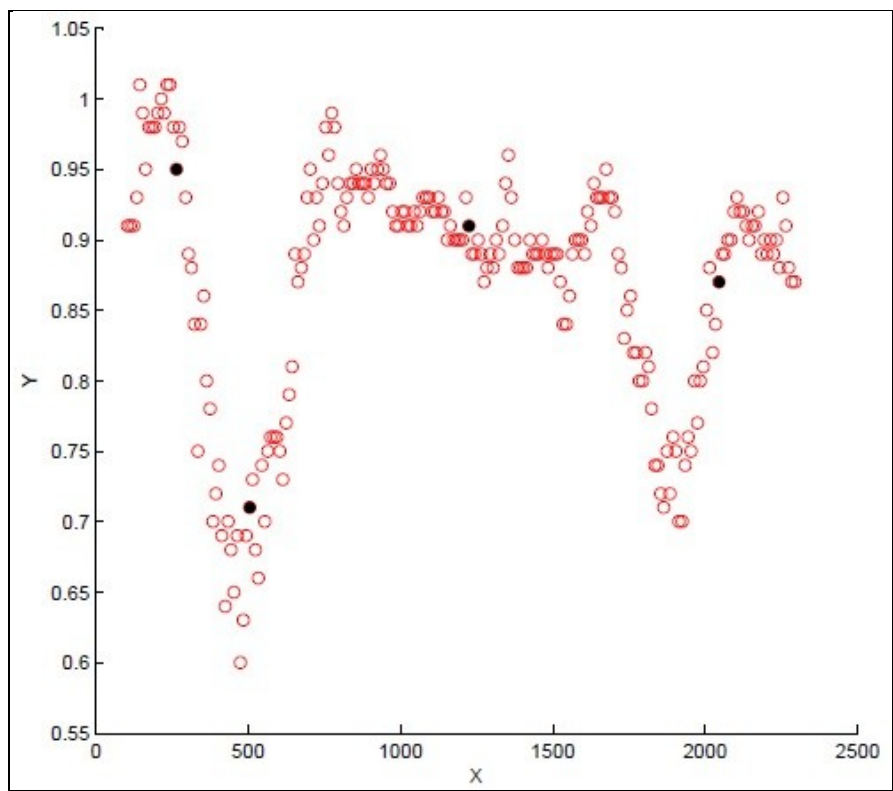


Figura 30 Centroidi Subtractive Clustering del rilievo 29/4/2011 allineamento ± 6

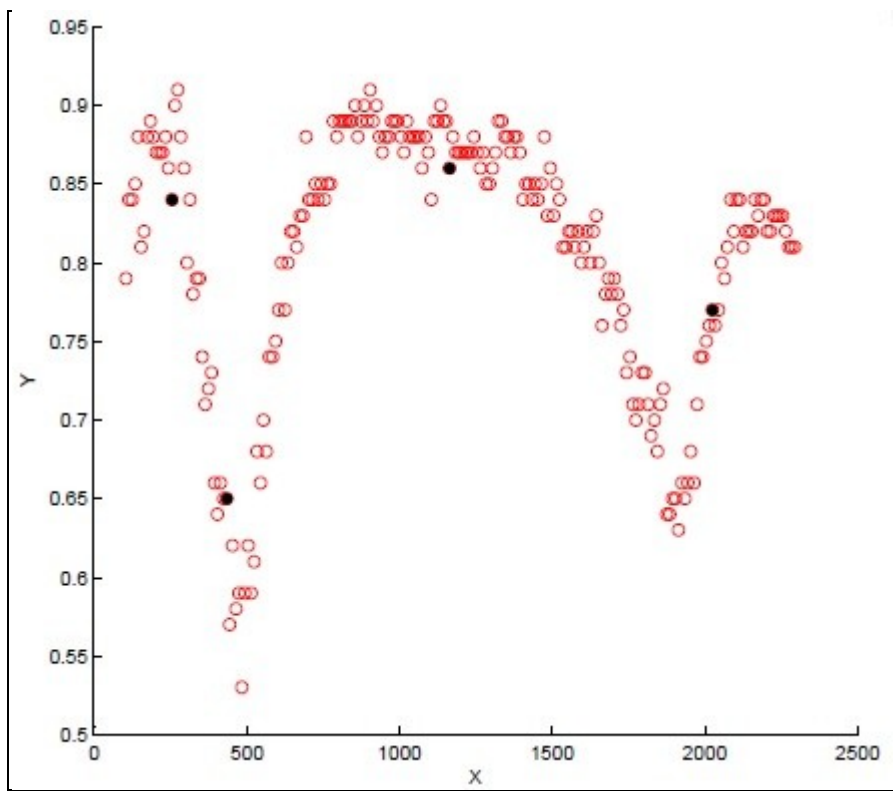


Figura 31 Centroidi Subtractive Clustering del rilievo 27/5/2011 allineamento ± 6

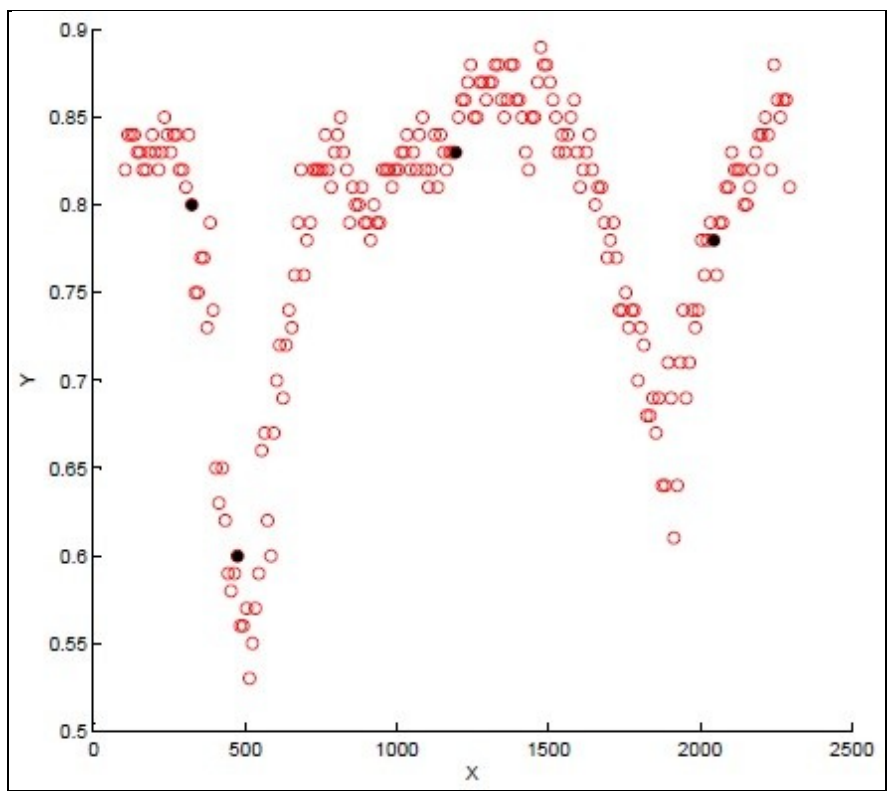


Figura 32 Centroidi Subtractive Clustering del rilievo 11/10/2011 allineamento ± 6

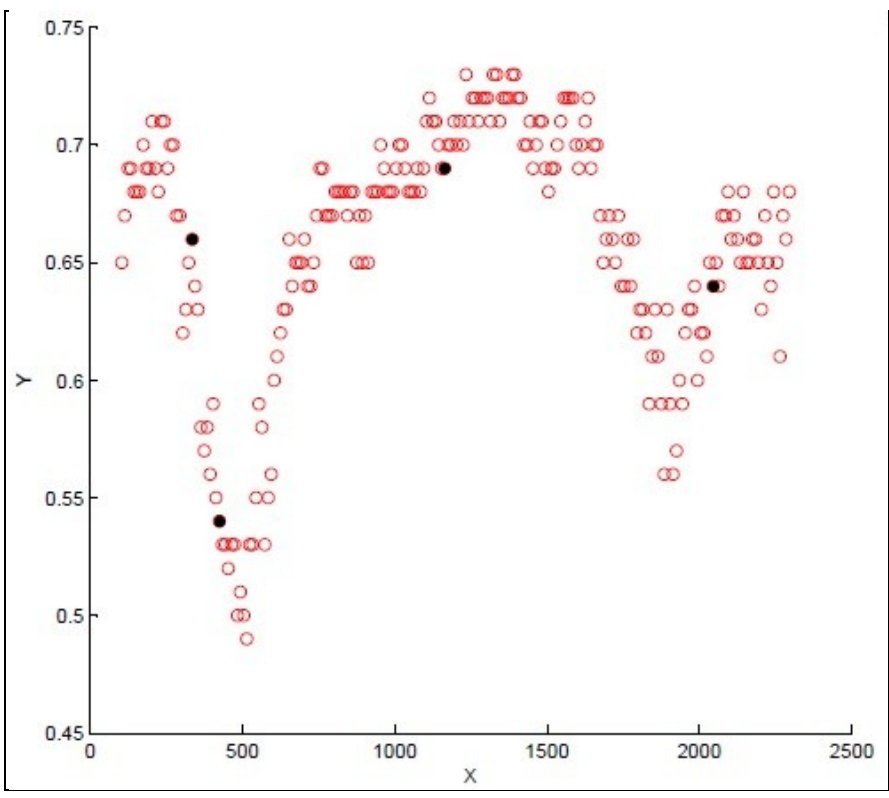


Figura 33 Centroidi Subtractive Clustering del rilievo 15/11/2011 allineamento ± 6

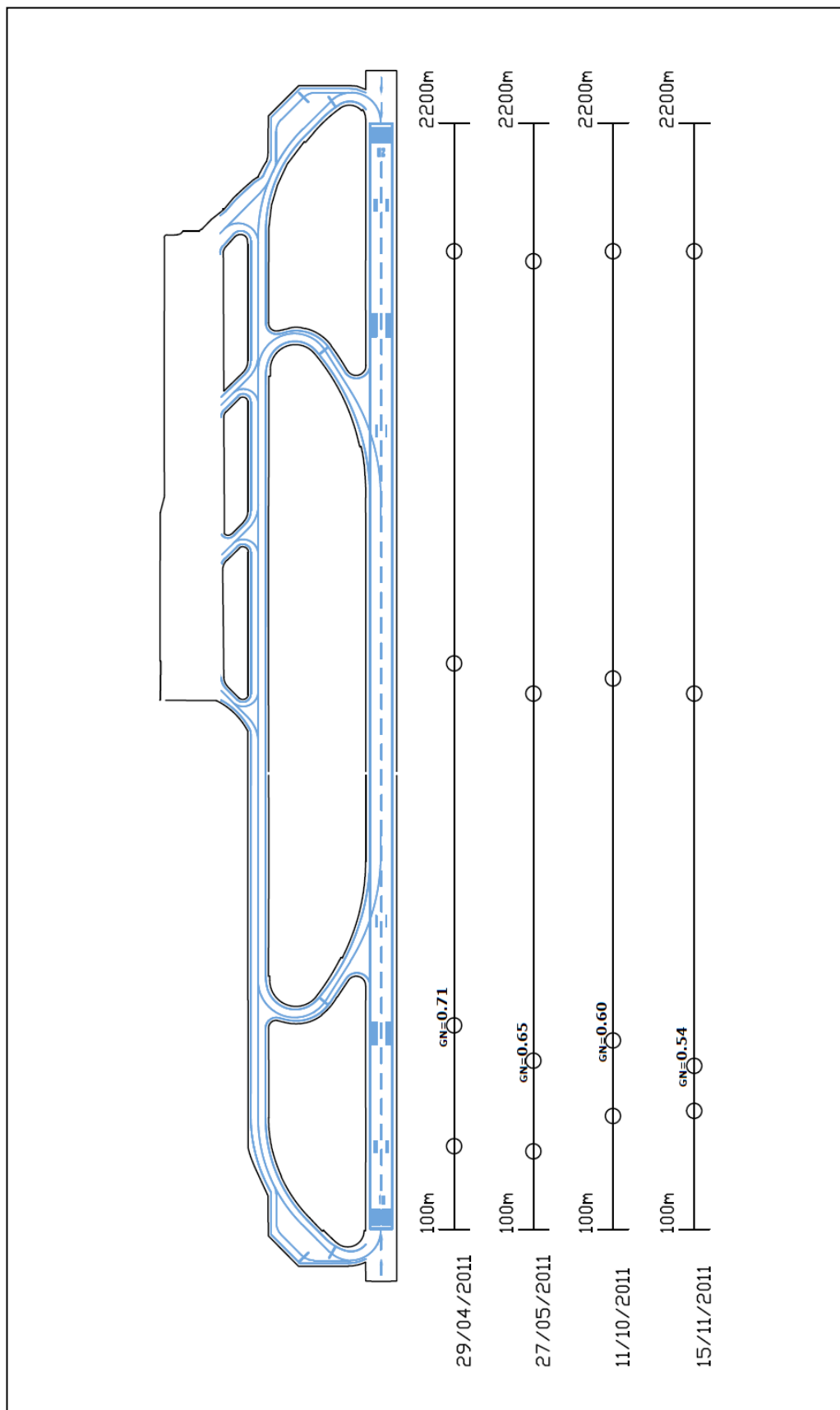


Figura 34 Centroidi Subtractive Clustering delle zone di consumo dell'aderenza: rilievi del 29/4/2011, 27/5/2011, 11/10/2011 e 15/11/2011 allineamento ± 6

3.1.5 LA MEDIA DEL TERZO DI PISTA

La Circolare ENAC APT-10A afferma che è necessario fornire informazione sull'aderenza superficiale per ciascun terzo di pista di una runway. I terzi di pista sono denominati A, B e C. Per scopi di trasmissione delle informazioni al personale di servizio aeronautico, il segmento A è sempre quello associato con il numero di designazione runway più basso. Assegnando a ciascuno un valore di aderenza ottenuto, come da pratica tecnica, mediando le misure raccolte nel terzo, l'intera runway è caratterizzata dal valore più basso dei tre.

Il criterio alternativo espresso dall'APT-10A, lascia l'analista libero di giudicare come significative parti di soli 100 m per localizzare le aree con deficit funzionale. Ma non viene espressa una scala di valutazione.

3.1.6 IL M100MRA

La Civil Aviation Authority (CAA) inglese nella CAP 683 [69], suggerisce un metodo per localizzare la parte di 100 m e fissare il valore di aderenza.

I valori raccolti dal Continuous Friction Measurement Equipment sono riorganizzati utilizzando quello che la CAA chiama il metodo Minimum 100 Meters Rolling Averages.

Il Grip Tester Trailer fornisce valori ogni 10 m di incremento lungo la corsa così che, su una distanza di 100 m, si calcola una media. La prima media mobile è la somma delle prime 10 letture divisa per 10 (RA1). La seconda media mobile è la somma delle letture da 2 ad 11 divisa per 10 (RA2) e così via fino al termine della corsa. Una media mobile può essere meglio figurata come un cursore lungo 100 m che scorre sulla superficie della runway. Esso può essere mosso di 10 differenti posizioni ma che ancora includono uno specifico incremento di 10 m considerato. Dopo che è stato attribuito un valore a tutti gli incrementi di 10 m, viene selezionato il più basso di essi. Così il processo viene ripetuto attraverso la corsa allo scopo di localizzare la minima media mobile di 100 m per qualunque segmento di 10 m.

3.2 ANALISI DEI RISULTATI, COSTRUZIONE DELLE CURVE DI DECADIMENTO, CONFRONTO E SCELTA DELL'ALGORITMO

I valori di GN ottenuti applicando i 6 metodi illustrati nel § 3.1 per processare le 76 serie di dati scelte per l'elaborazione dei modelli (vedi § 2.3 e Tabella 9 Campagne di rilievo), sono stati utilizzati per la costruzione di curve di decadimento Tempo-GN.

La Tabella 19a mostra i numeri medi di nodi terminali ottenuti con l'applicazione degli algoritmi CART e GCHAID. Il CART appare aver determinato sempre più nodi del GCHAID.

Tabella 19a Numero medio di nodi terminali CART e GCHAID

Algoritmo	N° medio di nodi terminali 2008-2011 ± 3	N° medio di nodi terminali 2012-2014 ± 3	N° medio di nodi terminali 2004-2007 ± 6	N° medio di nodi terminali 2008-2011 ± 6	N° medio di nodi terminali 2012-2014 ± 6
CART	9,4	9,9	8,8	10,3	8,8
CHAID	3,4	3,9	3,7	3,9	3,6

In ciascuna campagna di rilievo e per ciascun allineamento (± 3 ; ± 6) l'intera runway viene caratterizzata dal nodo con il più basso valore di GN, vedi Tabella 19b.

Tabella 19b Nodi CART e GCHAID con etichetta GN minima

Data	CART		GCHAID	
	allineamento ± 3	allineamento ± 6	allineamento ± 3	allineamento ± 6
8/3/2004		0.90		0.91
31/08/2004		0.88		0.94
16/06/2005		0.86		0.89
21/12/2005		0.85		0.91
31/05/2006		0.81		0.83
3/7/2007		0.72		0.74
24/10/2008	0.82	0.85	0.93	0.99
22/07/2009	0.71	0.81	0.85	0.94
14/10/2009	0.66	0.75	0.80	0.90
28/10/2010	0.61	0.72	0.74	0.87
29/04/2011	0.50	0.69	0.62	0.84
27/05/2011	0.40	0.64	0.58	0.77
11/10/2011	0.38	0.60	0.47	0.74
15/11/2011	0.31	0.53	0.40	0.62
15/02/2012	0.73	0.81	0.71	0.83
17/05/2012	0.72	0.80	0.73	0.84
24/10/2012	0.69	0.79	0.70	0.82
21/12/2012	0.68	0.78	0.72	0.80
18/04/2013	0.67	0.77	0.72	0.80
16/05/2013	0.64	0.73	0.68	0.79
16/12/2013	0.59	0.70	0.71	0.78
28/05/2014	0.51	0.63	0.61	0.72

Al termine delle due clustering analysis sono stati ottenuti differenti numeri di clusters, vedi Tabella 20a. L'algoritmo K-means appare aver determinato sempre più clusters del Subtractive Clustering.

Tabella 20a Numero medio di clusters K-means e Subtractive Clustering

Algoritmo	N° medio di clusters 2008-2011 ± 3	N° medio di clusters 2012-2014 ± 3	N° medio di clusters 2004-2007 ± 6	N° medio di clusters 2008-2011 ± 6	N° medio di clusters 2012-2014 ± 6
K-means	6,0	5,8	7,2	6,8	4,9
Subtractive Clustering	4,1	3,1	4,0	4,0	3,25

In ciascuna campagna di rilievo e per ciascun allineamento (± 3 ; ± 6) l'intera runway viene caratterizzata dal centroide con il più basso valore di GN, vedi Tabella 20b.

Tabella 20b Centroidi K-means e Subtractive Clustering con GN minimo

Data	K-means		Subtractive Clustering	
	allineamento ± 3	allineamento ± 6	allineamento ± 3	allineamento ± 6
8/3/2004		0.90		0.90
31/08/2004		0.87		0.93
16/06/2005		0.81		0.90
21/12/2005		0.85		0.90
31/05/2006		0.79		0.85
3/7/2007		0.71		0.68
24/10/2008	0.81	0.86	0.84	0.87
22/07/2009	0.71	0.80	0.69	0.82
14/10/2009	0.66	0.76	0.66	0.77
28/10/2010	0.60	0.72	0.63	0.74
29/04/2011	0.45	0.68	0.51	0.71
27/05/2011	0.43	0.61	0.46	0.65
11/10/2011	0.38	0.60	0.35	0.60
15/11/2011	0.32	0.54	0.29	0.54
15/02/2012	0.73	0.82	0.77	0.85
17/05/2012	0.75	0.84	0.74	0.87
24/10/2012	0.70	0.78	0.73	0.83
21/12/2012	0.69	0.77	0.70	0.83
18/04/2013	0.71	0.77	0.72	0.79
16/05/2013	0.61	0.73	0.71	0.72
16/12/2013	0.57	0.69	0.60	0.69
28/05/2014	0.51	0.64	0.64	0.64

Il metodo del Terzo di pista ha sempre dato il segmento A, che corrisponde alla soglia 10, come il più interessato dal fenomeno di decadimento.

Per il metodo della CAA, l'intera runway in ciascuna campagna di rilievo e per ciascun allineamento (± 3 ; ± 6) è stata caratterizzata dalla minima media mobile di 100 m, che rappresenta una zona di 100 m che cambia localizzazione nel tempo.

Nella Tabella 21 i valori minimi del GN come da Terzo di pista e da M100MRA.

Tabella 21 Medie minime dei Terzi di Pista e M100MRA

Data	Terzi di pista		M100MRA	
	allineamento ± 3	allineamento ± 6	allineamento ± 3	allineamento ± 6
8/3/2004		0.17		0.89
31/08/2004		0.67		0.87
16/06/2005		1.46		0.84
21/12/2005		2.00		0.81
31/05/2006		2.42		0.78
3/7/2007		3.50		0.69
24/10/2008	0.94	4.83	0.78	0.82
22/07/2009	0.86	5.58	0.68	0.77
14/10/2009	0.81	5.83	0.63	0.72
28/10/2010	0.75	6.83	0.57	0.69
29/04/2011	0.64	7.33	0.44	0.66
27/05/2011	0.58	7.41	0.38	0.60
11/10/2011	0.47	7.83	0.36	0.57
15/11/2011	0.41	7.91	0.29	0.52
15/02/2012	0.76	8.16	0.71	0.80
17/05/2012	0.74	8.41	0.70	0.79
24/10/2012	0.73	8.83	0.68	0.78
21/12/2012	0.72	9.00	0.67	0.77
18/04/2013	0.71	9.33	0.66	0.76
16/05/2013	0.69	9.41	0.61	0.71
16/12/2013	0.68	10.00	0.56	0.68
28/05/2014	0.62	10.42	0.48	0.59

Utilizzando i risultati di ciascun metodo per i due allineamenti ± 3 e ± 6 , sono stati impostati 12 grafici a dispersione *Tempo-GN*.

Allo scopo di rappresentare meglio il fenomeno fisico, per ciascuno dei grafici a dispersione è stata ottenuta una curva di decadimento mediante tecniche statistiche di regressione non lineare pervenendo a funzioni statisticamente significative. La funzione polinomiale di secondo grado è stata verificata la più adatta per tutti i diagrammi, generando coefficienti di determinazione, R^2 , più alti di altre funzioni lineari o non lineari.

Una forma generale mostrata da tutte le curve è dovuta alle operazioni di manutenzione fatte nel luglio 2007 e nel novembre 2011. Alla rimozione dei depositi gommosi c'è un netto incremento del GN che divide ciascuna curva in più rami separati; riferendoci all'allineamento ± 6 :

- il primo ramo inizia dalla pavimentazione ricostruita nei lavori generali del 2004;
- il secondo ramo si trova tra la prima operazione di manutenzione del 2007 e la seconda del 2011;
- il terzo ramo arriva ai periodi più recenti.

Le curve dell'allineamento ± 3 presentano solo 2 rami poiché le relative serie 2004-2007, come detto in precedenza, sono state riservate a scopi di validazione insieme alle serie 2015 ± 3 e ± 6 .

Si riportano le curve di decadimento nelle Figure 35, 36, 37, 38, 39 e 40 per l'allineamento ± 3 , e nelle Figure 41, 42, 43, 44, 45 e 46 per l'allineamento ± 6 .

Nelle Tabelle da 22 a 33 si riportano le rispettive statistiche di regressione non lineare.

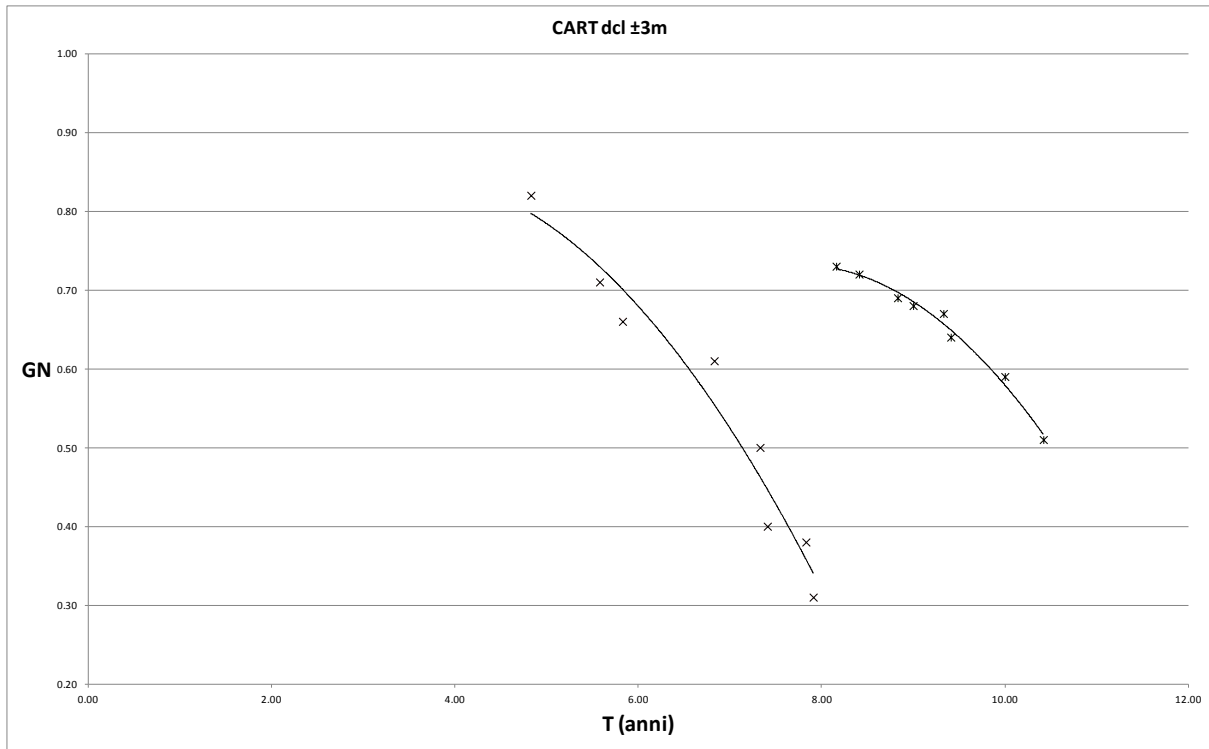


Figura 35 Curva di decadimento CART rami 2008-2011 e 2012-2014 allineamento ± 3

Tabella 22 Statistiche di regressione non lineare curva CART allineamento ± 3

Model is: $v_2=a_1*v_1^2+a_2*v_1+a_3$ (CART 2008-2011 ± 3)						
Dep. Var. : Var2						
Level of confidence: 95.0% (alpha=0.050)						
	Estimate	Standard	t-value	p-level	Lo. Conf	Up. Conf
a1	-0.024970	0.019441	-1.28440	0.255291	-0.07495	0.025005
a2	0.169829	0.250963	0.67671	0.528626	-0.47529	0.814951
a3	0.559397	0.790196	0.70792	0.510620	-1.47187	2.590660
Model is: $v_2=a_1*v_1^2+a_2*v_1+a_3$ (CART 2012-2014 ± 3)						
Dep. Var. : Var2						
Level of confidence: 95.0% (alpha=0.050)						
	Estimate	Standard	t-value	p-level	Lo. Conf	Up. Conf
a1	-0.03067	0.007030	-4.36204	0.007276	-0.04874	-0.012595
a2	0.47671	0.130632	3.64928	0.014759	0.14091	0.812510
a3	-1.12120	0.604043	-1.85617	0.122573	-2.67395	0.431538

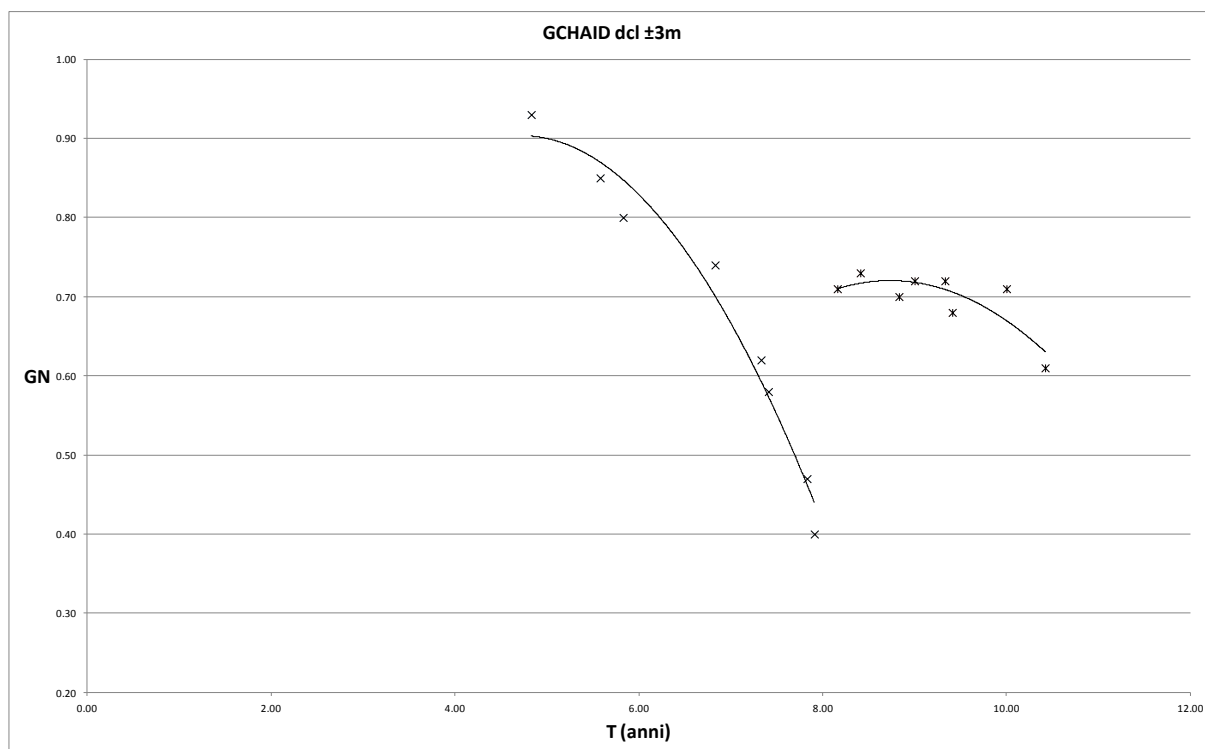


Figura 36 Curva di decadimento GCHAID rami 2008-2011 e 2012-2014 allineamento ± 3

Tabella 23 Statistiche di regressione non lineare curva GCHAID allineamento ± 3

Model is: $v2=a1*v1^2+a2*v1+a3$ (GCHAID 2008-2011 ± 3)						
Dep. Var. : Var2						
Level of confidence: 95.0% (alpha=0.050)						
	Estimate	Standard	t-value	p-level	Lo. Conf	Up. Conf
a1	-0.045712	0.016128	-2.83436	0.036487	-0.08717	-0.004254
a2	0.431941	0.208190	2.07474	0.092679	-0.10323	0.967111
a3	-0.116996	0.655519	-0.17848	0.865354	-1.80206	1.568069
Model is: $v2=a1*v1^2+a2*v1+a3$ (GCHAID 2012-2014 ± 3)						
Dep. Var. : Var2						
Level of confidence: 95.0% (alpha=0.050)						
	Estimate	Standard	t-value	p-level	Lo. Conf	Up. Conf
a1	-0.03160	0.018373	-1.72008	0.146046	-0.07883	0.015626
a2	0.55202	0.341387	1.61698	0.166805	-0.32555	1.429578
a3	-1.69025	1.578578	-1.07074	0.333225	-5.74812	2.367612

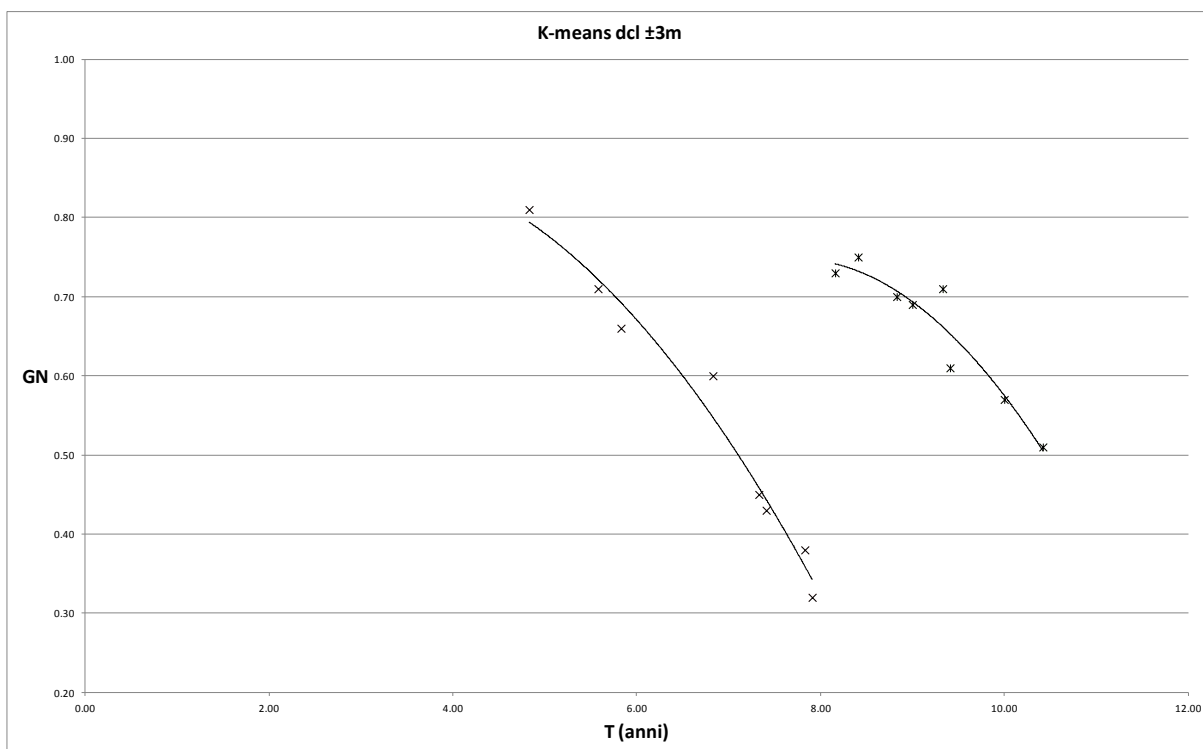


Figura 37 Curva di decadimento K-means rami 2008-2011 e 2012-2014 allineamento ± 3

Tabella 24 Statistiche di regressione non lineare curva K-means allineamento ± 3

Model is: $v_2 = a_1 \cdot v_1^2 + a_2 \cdot v_1 + a_3$ (K-means 2008-2011 ± 3)						
Dep. Var. : Var2						
Level of confidence: 95.0% (alpha=0.050)						
	Estimate	Standard	t-value	p-level	Lo. Conf	Up. Conf
a1	-0.021593	0.013849	-1.55909	0.179718	-0.057194	0.014009
a2	0.128392	0.178780	0.71815	0.504810	-0.331178	0.587962
a3	0.677802	0.562917	1.20409	0.282442	-0.769223	2.124827
Model is: $v_2 = a_1 \cdot v_1^2 + a_2 \cdot v_1 + a_3$ (K-means 2012-2014 ± 3)						
Dep. Var. : Var2						
Level of confidence: 95.0% (alpha=0.050)						
	Estimate	Standard	t-value	p-level	Lo. Conf	Up. Conf
a1	-0.03341	0.021650	-1.54333	0.183398	-0.08907	0.022240
a2	0.51634	0.402284	1.28353	0.255572	-0.51776	1.550445
a3	-1.24697	1.860168	-0.67036	0.532343	-6.02869	3.534739

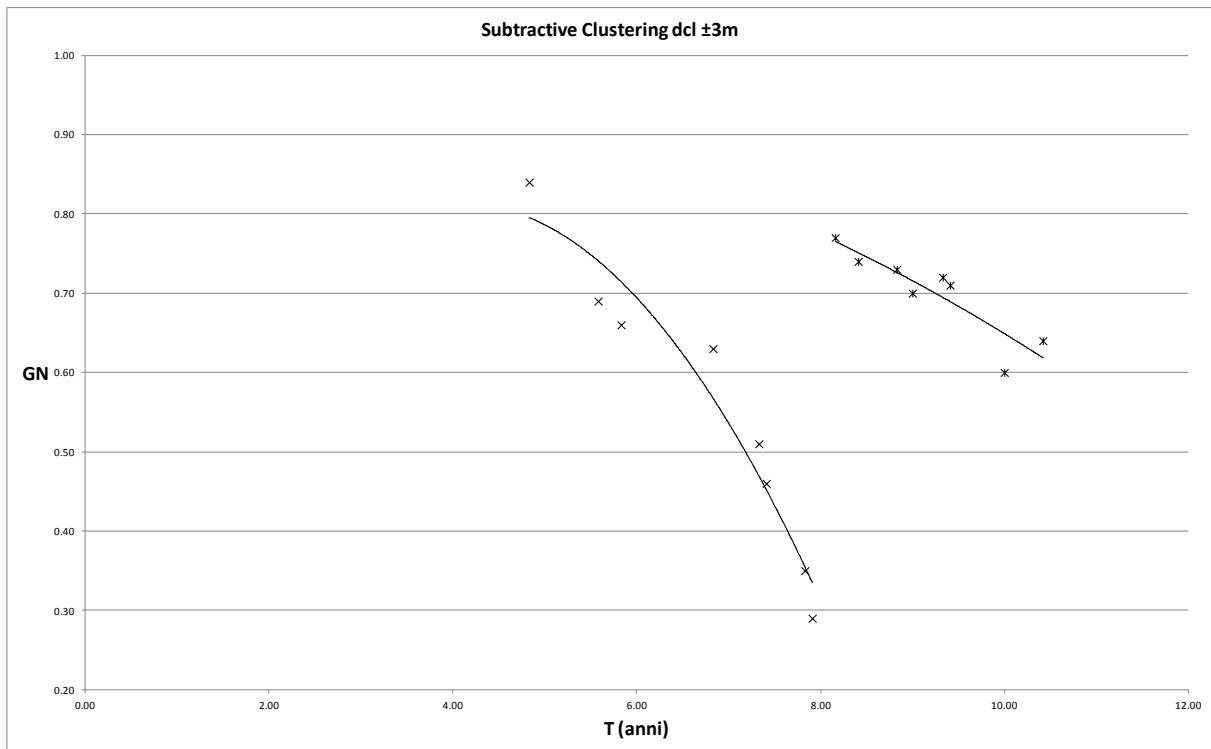


Figura 38 Curva di decadimento Subtractive Clustering rami 2008-2011 e 2012-2014 allineamento ± 3

Tabella 25 Statistiche di regressione non lineare curva Subtractive Clustering allineam. ± 3

Model is: $v_2 = a_1 \cdot v_1^2 + a_2 \cdot v_1 + a_3$ (Subtractive Clustering 2008-2011 ± 3)						
Dep. Var. : Var2						
Level of confidence: 95.0% (alpha=0.050)						
	Estimate	Standard	t-value	p-level	Lo. Conf	Up. Conf
a1	-0.032973	0.023236	-1.41904	0.215107	-0.09270	0.026757
a2	0.270614	0.299951	0.90219	0.408310	-0.50043	1.041663
a3	0.257503	0.944441	0.27265	0.796023	-2.17026	2.685268
Model is: $v_2 = a_1 \cdot v_1^2 + a_2 \cdot v_1 + a_3$ (Subtractive Clustering 2012-2014 ± 3)						
Dep. Var. : Var2						
Level of confidence: 95.0% (alpha=0.050)						
	Estimate	Standard	t-value	p-level	Lo. Conf	Up. Conf
a1	-0.004233	0.020734	-0.204179	0.846264	-0.05753	0.049064
a2	0.013781	0.385254	0.035770	0.972850	-0.97655	1.004107
a3	0.934617	1.781423	0.524646	0.622250	-3.64468	5.513910

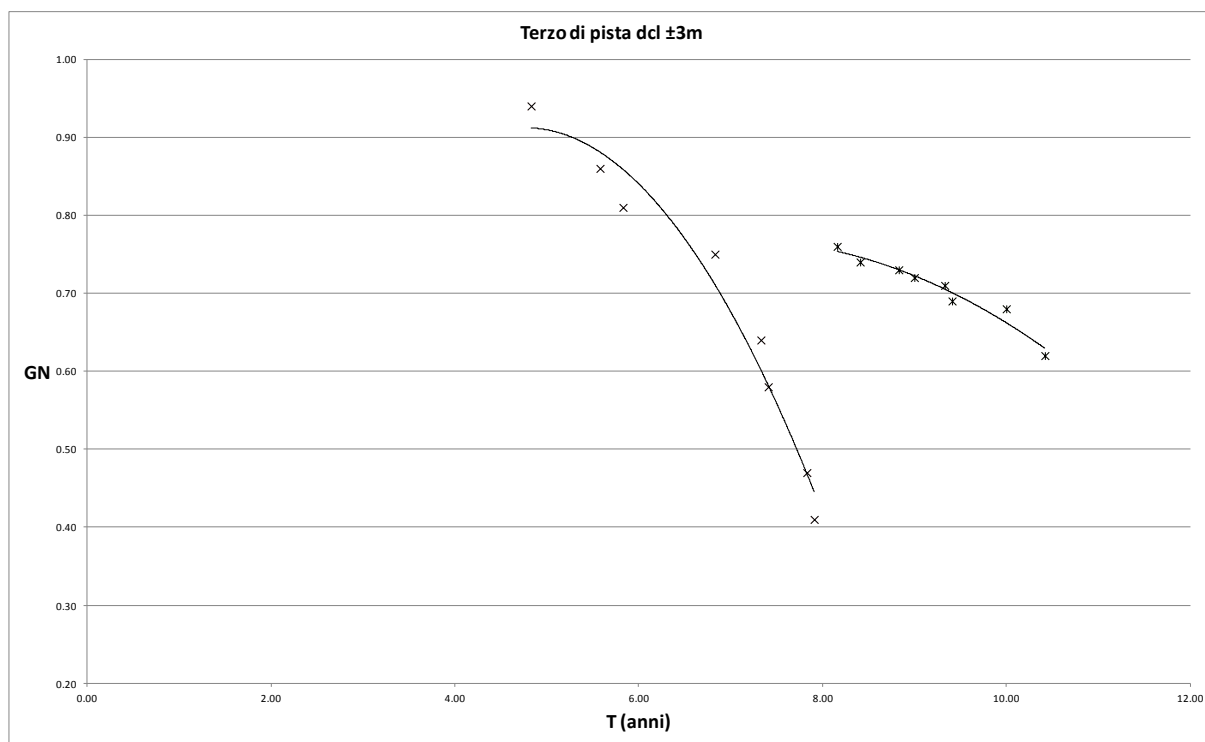


Figura 39 Curva di decadimento Terzo di pista rami 2008-2011 e 2012-2014
allineamento ± 3

Tabella 26 Statistiche di regressione non lineare curva Terzo di Pista allineamento ± 3

Model is: $v2=a1*v1^2+a2*v1+a3$ (Terzo di pista 2008-2011 ± 3)						
Dep. Var. : Var2						
Level of confidence: 95.0% (alpha=0.050)						
	Estimate	Standard	t-value	p-level	Lo. Conf	Up. Conf
a1	-0.047249	0.016693	-2.83037	0.036659	-0.09016	-0.004337
a2	0.450418	0.215493	2.09017	0.090880	-0.10353	1.004361
a3	-0.161299	0.678513	-0.23772	0.821529	-1.90547	1.582873
Model is: $v2=a1*v1^2+a2*v1+a3$ (Terzo di pista 2012-2014 ± 3)						
Dep. Var. : Var2						
Level of confidence: 95.0% (alpha=0.050)						
	Estimate	Standard	t-value	p-level	Lo. Conf	Up. Conf
a1	-0.012563	0.007888	-1.59273	0.172100	-0.03284	0.007713
a2	0.178446	0.146567	1.21750	0.277733	-0.19832	0.555209
a3	0.134046	0.677730	0.19779	0.851002	-1.60811	1.876206

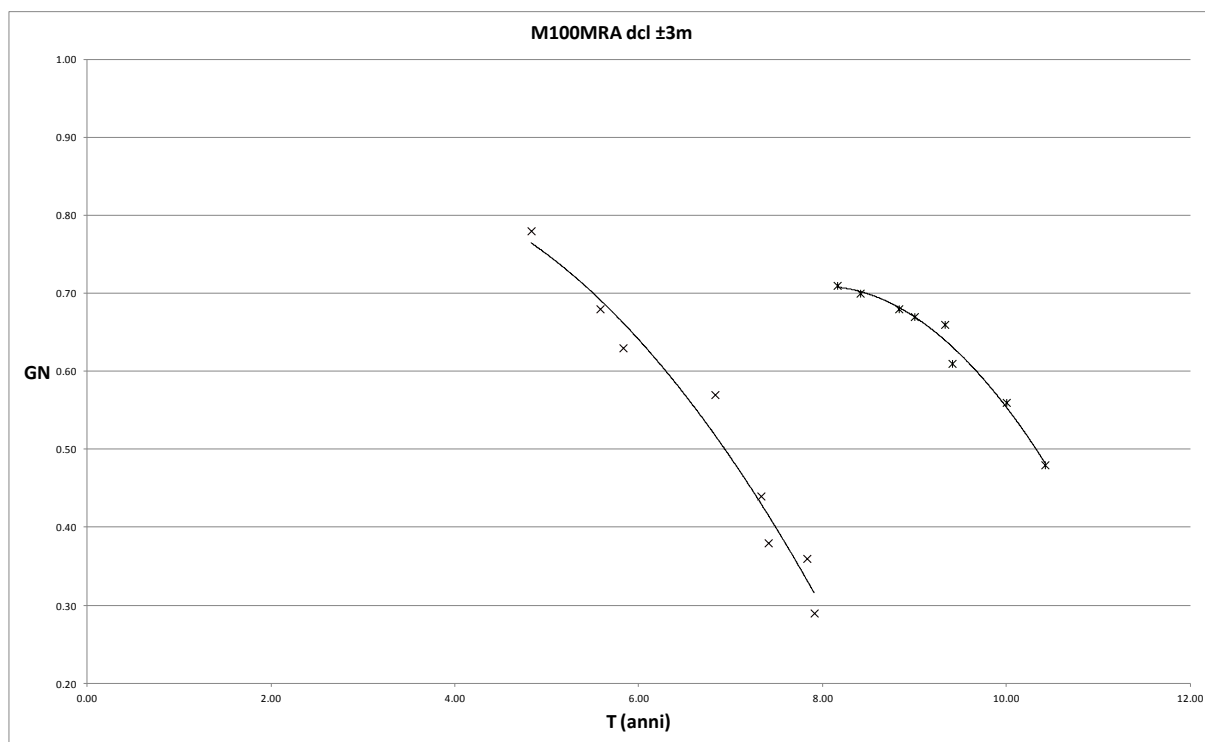


Figura 40 Curva di decadimento M100MRA rami 2008-2011 e 2012-2014
allineamento ± 3

Tabella 27 Statistiche di regressione non lineare curva M100MRA allineamento ± 3

Model is: $v2=a1*v1^2+a2*v1+a3$ (M100MRA 2008-2011 ± 3)						
Dep. Var. : Var2						
Level of confidence: 95.0% (alpha=0.050)						
	Estimate	Standard	t-value	p-level	Lo. Conf	Up. Conf
a1	-0.020847	0.015635	-1.33338	0.239926	-0.061038	0.019343
a2	0.119851	0.201827	0.59383	0.578469	-0.398961	0.638663
a3	0.671965	0.635481	1.05741	0.338712	-0.961591	2.305521
Model is: $v2=a1*v1^2+a2*v1+a3$ (M100MRA 2012-2014 ± 3)						
Dep. Var. : Var2						
Level of confidence: 95.0% (alpha=0.050)						
	Estimate	Standard	t-value	p-level	Lo. Conf	Up. Conf
a1	-0.03825	0.009540	-4.00905	0.010231	-0.06277	-0.013723
a2	0.61089	0.177263	3.44623	0.018312	0.15522	1.066556
a3	-1.73027	0.819666	-2.11094	0.088516	-3.83729	0.376749

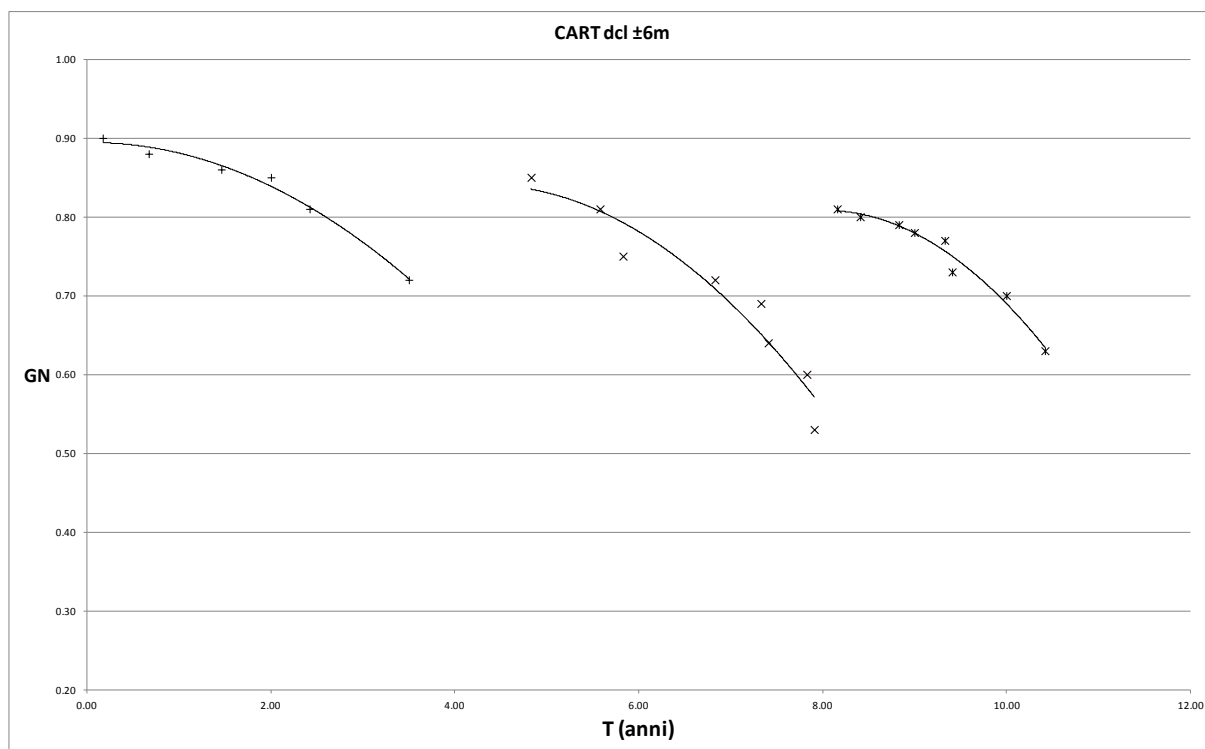


Figura 41 Curva di decadimento CART rami 2004-2007, 2008-2011 e 2012-2014
allineamento ± 6

Tabella 28 Statistiche di regressione non lineare curva CART allineamento ± 6

Model is: $v_2 = a_1 \cdot v_1^2 + a_2 \cdot v_1 + a_3$ (CART 2004-2007 ± 6)						
Dep. Var. : Var2						
Level of confidence: 95.0% (alpha=0.050)						
	Estimate	Standard	t-value	p-level	Lo. Conf	Up. Conf
a1	-0.014403	0.003312	-4.34894	0.022453	-0.024942	-0.003863
a2	0.001014	0.012451	0.08144	0.940223	-0.038611	0.040639
a3	0.894269	0.009773	91.49942	0.000003	0.863165	0.925372
Model is: $v_2 = a_1 \cdot v_1^2 + a_2 \cdot v_1 + a_3$ (CART 2008-2011 ± 6)						
Dep. Var. : Var2						
Level of confidence: 95.0% (alpha=0.050)						
	Estimate	Standard	t-value	p-level	Lo. Conf	Up. Conf
a1	-0.020789	0.014214	-1.46258	0.203442	-0.05733	0.015749
a2	0.179257	0.183485	0.97696	0.373458	-0.29241	0.650919
a3	0.454147	0.577729	0.78609	0.467416	-1.03095	1.939247
Model is: $v_2 = a_1 \cdot v_1^2 + a_2 \cdot v_1 + a_3$ (CART 2012-2014 ± 6)						
Dep. Var. : Var2						
Level of confidence: 95.0% (alpha=0.050)						
	Estimate	Standard	t-value	p-level	Lo. Conf	Up. Conf
a1	-0.03038	0.008465	-3.58862	0.015731	-0.05214	-0.008617
a2	0.48773	0.157282	3.10097	0.026824	0.08342	0.892035
a3	-1.14969	0.727277	-1.58081	0.174762	-3.01921	0.719838

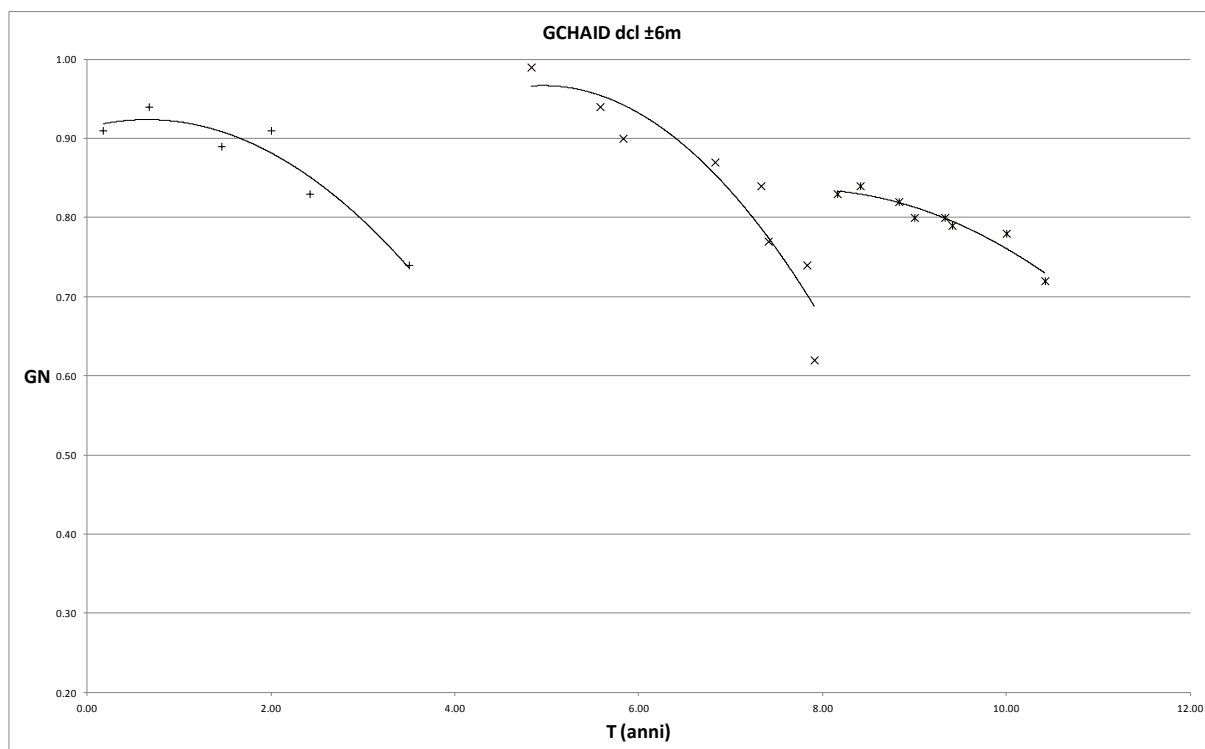


Figura 42 Curva di decadimento GCHAID rami 2004-2007, 2008-2011 e 2012-2014
allineamento ± 6

Tabella 29 Statistiche di regressione non lineare curva GCHAID allineamento ± 6

Model is: $v_2=a_1*v_1^2+a_2*v_1+a_3$ (GCHAID 2004-2007 ± 6)						
Dep. Var. : Var2						
Level of confidence: 95.0% (alpha=0.050)						
	Estimate	Standard	t-value	p-level	Lo. Conf	Up. Conf
a1	-0.023071	0.008937	-2.58141	0.081680	-0.051514	0.005372
a2	0.030022	0.033601	0.89348	0.437433	-0.076913	0.136957
a3	0.913899	0.026375	34.64982	0.000053	0.829961	0.997837
Model is: $v_2=a_1*v_1^2+a_2*v_1+a_3$ (GCHAID 2008-2011 ± 6)						
Dep. Var. : Var2						
Level of confidence: 95.0% (alpha=0.050)						
	Estimate	Standard	t-value	p-level	Lo. Conf	Up. Conf
a1	-0.031986	0.020361	-1.57097	0.176989	-0.08433	0.020353
a2	0.317237	0.262835	1.20698	0.281420	-0.35840	0.992875
a3	0.180093	0.827575	0.21761	0.836331	-1.94726	2.307442
Model is: $v_2=a_1*v_1^2+a_2*v_1+a_3$ (GCHAID 2012-2014 ± 6)						
Dep. Var. : Var2						
Level of confidence: 95.0% (alpha=0.050)						
	Estimate	Standard	t-value	p-level	Lo. Conf	Up. Conf
a1	-0.015240	0.008814	-1.72907	0.144364	-0.03790	0.007417
a2	0.237289	0.163771	1.44891	0.207038	-0.18370	0.658275
a3	-0.088119	0.757280	-0.11636	0.911895	-2.03477	1.858532

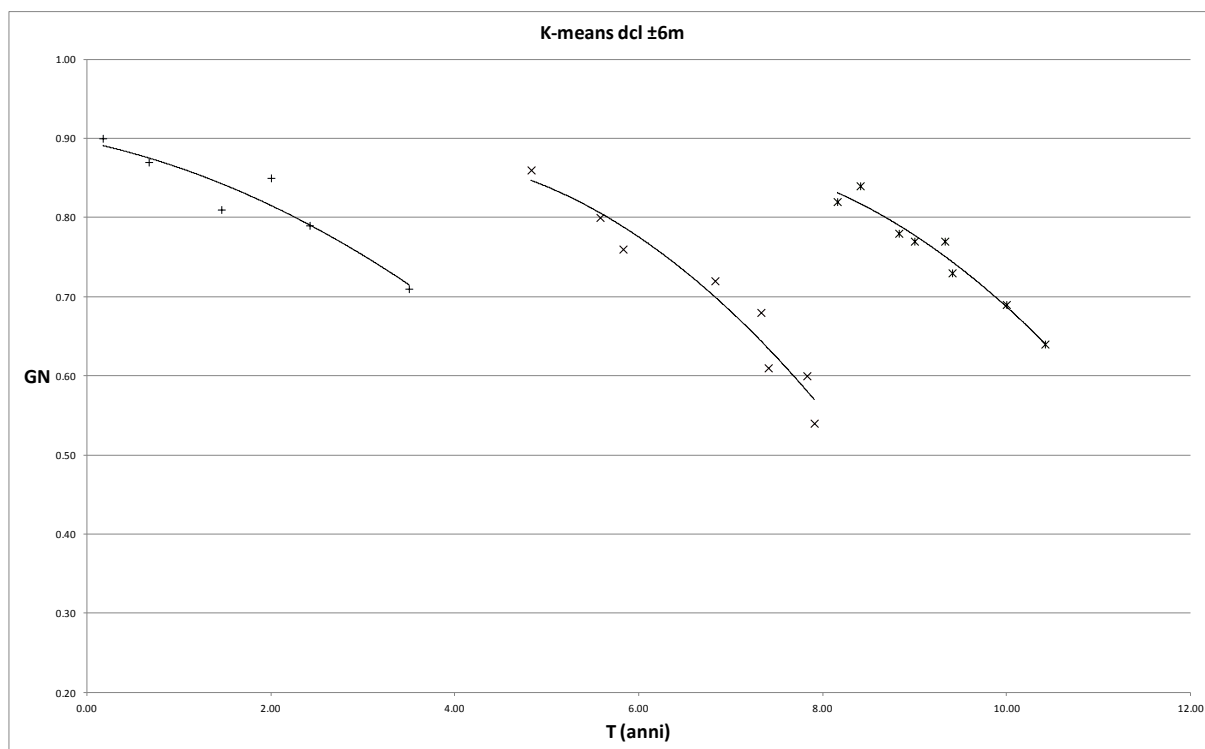


Figura 43 Curva di decadimento K-means rami 2004-2007, 2008-2011 e 2012-2014
allineamento ± 6

Tabella 30 Statistiche di regressione non lineare curva K-means allineamento ± 6

Model is: $v_2=a_1*v_1^2+a_2*v_1+a_3$ (K-means 2004-2007 ± 6)						
Dep. Var. : Var2						
Level of confidence: 95.0% (alpha=0.050)						
	Estimate	Standard	t-value	p-level	Lo. Conf	Up. Conf
a1	-0.007619	0.009953	-0.76551	0.499683	-0.039294	0.024056
a2	-0.024802	0.037419	-0.66282	0.554822	-0.143888	0.094283
a3	0.895299	0.029372	30.48113	0.000078	0.801823	0.988774
Model is: $v_2=a_1*v_1^2+a_2*v_1+a_3$ (K-means 2008-2011 ± 6)						
Dep. Var. : Var2						
Level of confidence: 95.0% (alpha=0.050)						
	Estimate	Standard	t-value	p-level	Lo. Conf	Up. Conf
a1	-0.015088	0.012764	-1.18200	0.290352	-0.047899	0.017724
a2	0.102322	0.164773	0.62099	0.561818	-0.321241	0.525885
a3	0.704636	0.518814	1.35817	0.232480	-0.629017	2.038289
Model is: $v_2=a_1*v_1^2+a_2*v_1+a_3$ (K-means 2012-2014 ± 6)						
Dep. Var. : Var2						
Level of confidence: 95.0% (alpha=0.050)						
	Estimate	Standard	t-value	p-level	Lo. Conf	Up. Conf
a1	-0.014242	0.011623	-1.22537	0.275004	-0.04412	0.015635
a2	0.180302	0.215961	0.83488	0.441836	-0.37484	0.735446
a3	0.308504	0.998607	0.30893	0.769830	-2.25850	2.875504

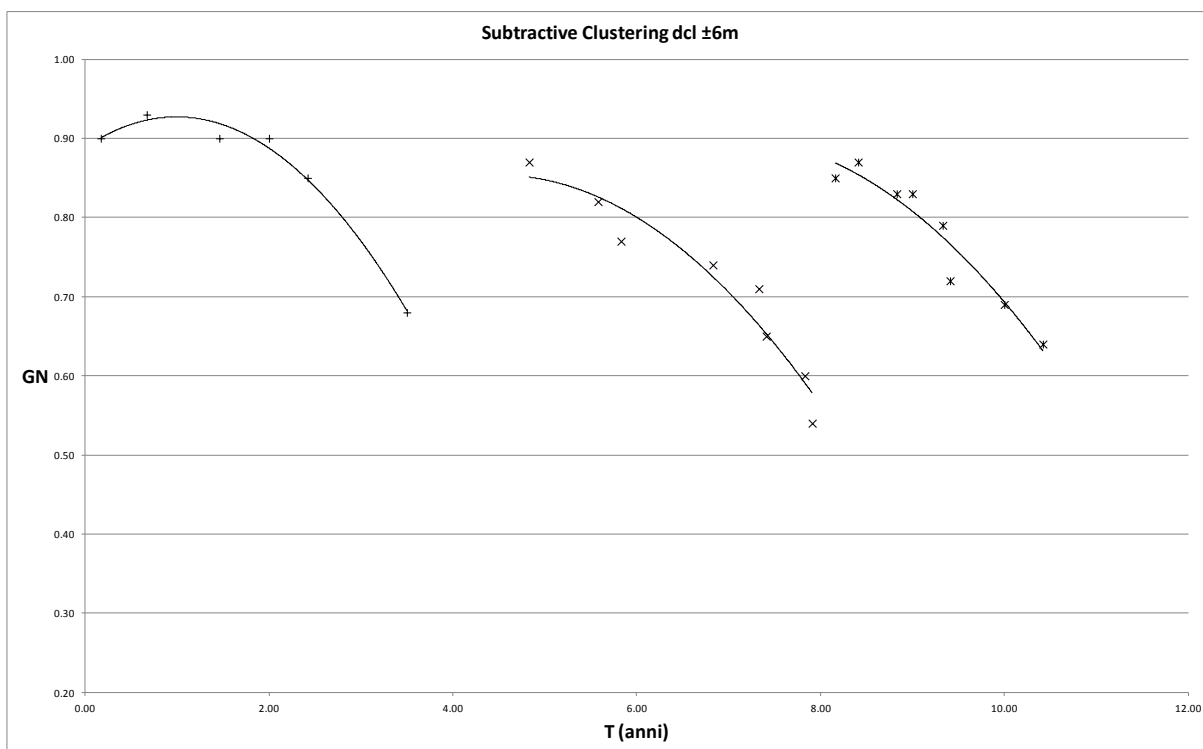


Figura 44 Curva di decadimento Subtractive Clustering rami 2004-2007, 2008-2011 e 2012-2014 allineamento ±6

Tabella 31 Statistiche di regressione non lineare curva Subtractive Clustering allineam. ±6

Model is: $v_2=a_1*v_1^2+a_2*v_1+a_3$ (Subtractive Clustering 2004-2007 ±6)						
Dep. Var. : Var2						
Level of confidence: 95.0% (alpha=0.050)						
	Estimate	Standard	t-value	p-level	Lo. Conf	Up. Conf
a1	-0.038999	0.004777	-8.16437	0.003844	-0.054201	-0.023797
a2	0.077473	0.017959	4.31391	0.022942	0.020320	0.134626
a3	0.888687	0.014097	63.04233	0.000009	0.843825	0.933549
Model is: $v_2=a_1*v_1^2+a_2*v_1+a_3$ (Subtractive Clustering 2008-2011 ±6)						
Dep. Var. : Var2						
Level of confidence: 95.0% (alpha=0.050)						
	Estimate	Standard	t-value	p-level	Lo. Conf	Up. Conf
a1	-0.023702	0.014646	-1.61835	0.166512	-0.06135	0.013947
a2	0.213425	0.189064	1.12885	0.310192	-0.27258	0.699429
a3	0.373064	0.595296	0.62669	0.558362	-1.15719	1.903321
Model is: $v_2=a_1*v_1^2+a_2*v_1+a_3$ (Subtractive Clustering 2012-2014 ±6)						
Dep. Var. : Var2						
Level of confidence: 95.0% (alpha=0.050)						
	Estimate	Standard	t-value	p-level	Lo. Conf	Up. Conf
a1	-0.022766	0.018904	-1.20428	0.282374	-0.07136	0.025829
a2	0.317939	0.351257	0.90515	0.406887	-0.58500	1.220874
a3	-0.209566	1.624220	-0.12903	0.902367	-4.38476	3.965624

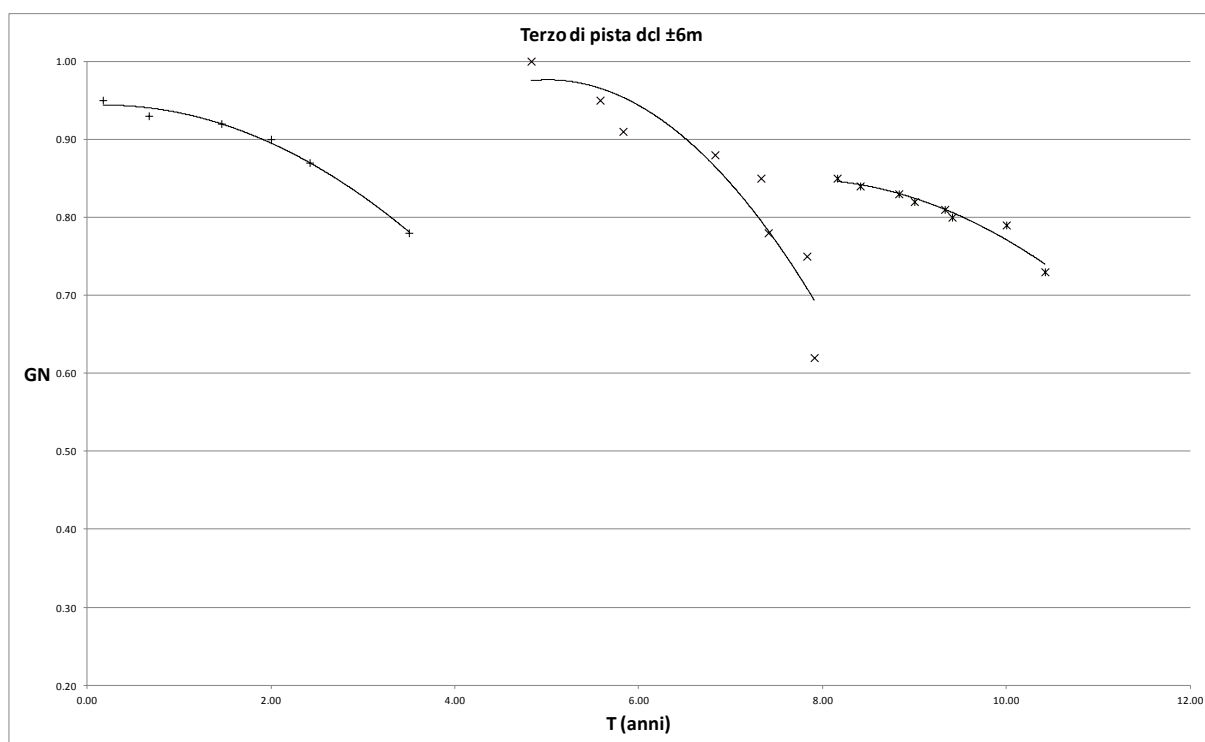


Figura 45 Curva di decadimento Terzo di pista rami 2004-2007, 2008-2011 e 2012-2014
allineamento ± 6

Tabella 32 Statistiche di regressione non lineare curva Terzo di Pista allineamento ± 6

Model is: $v_2=a_1*v_1^2+a_2*v_1+a_3$ (Terzo di pista 2004-2007 ± 6)						
Dep. Var. : Var2						
Level of confidence: 95.0% (alpha=0.050)						
	Estimate	Standard	t-value	p-level	Lo. Conf	Up. Conf
a1	-0.014782	0.002641	-5.5971	0.011267	-0.023187	-0.006377
a2	0.005490	0.009929	0.5529	0.618872	-0.026110	0.037090
a3	0.943208	0.007794	121.0168	0.000001	0.918404	0.968013
Model is: $v_2=a_1*v_1^2+a_2*v_1+a_3$ (Terzo di pista 2008-2011 ± 6)						
Dep. Var. : Var2						
Level of confidence: 95.0% (alpha=0.050)						
	Estimate	Standard	t-value	p-level	Lo. Conf	Up. Conf
a1	-0.033666	0.021563	-1.56126	0.179216	-0.08910	0.021764
a2	0.337546	0.278354	1.21265	0.279428	-0.37799	1.053077
a3	0.130059	0.876439	0.14839	0.887831	-2.12290	2.383018
Model is: $v_2=a_1*v_1^2+a_2*v_1+a_3$ (Terzo di pista 2012-2014 ± 6)						
Dep. Var. : Var2						
Level of confidence: 95.0% (alpha=0.050)						
	Estimate	Standard	t-value	p-level	Lo. Conf	Up. Conf
a1	-0.014927	0.007242	-2.06122	0.094286	-0.03354	0.003689
a2	0.230390	0.134562	1.71215	0.147548	-0.11551	0.576292
a3	-0.040030	0.622217	-0.06433	0.951197	-1.63949	1.559429

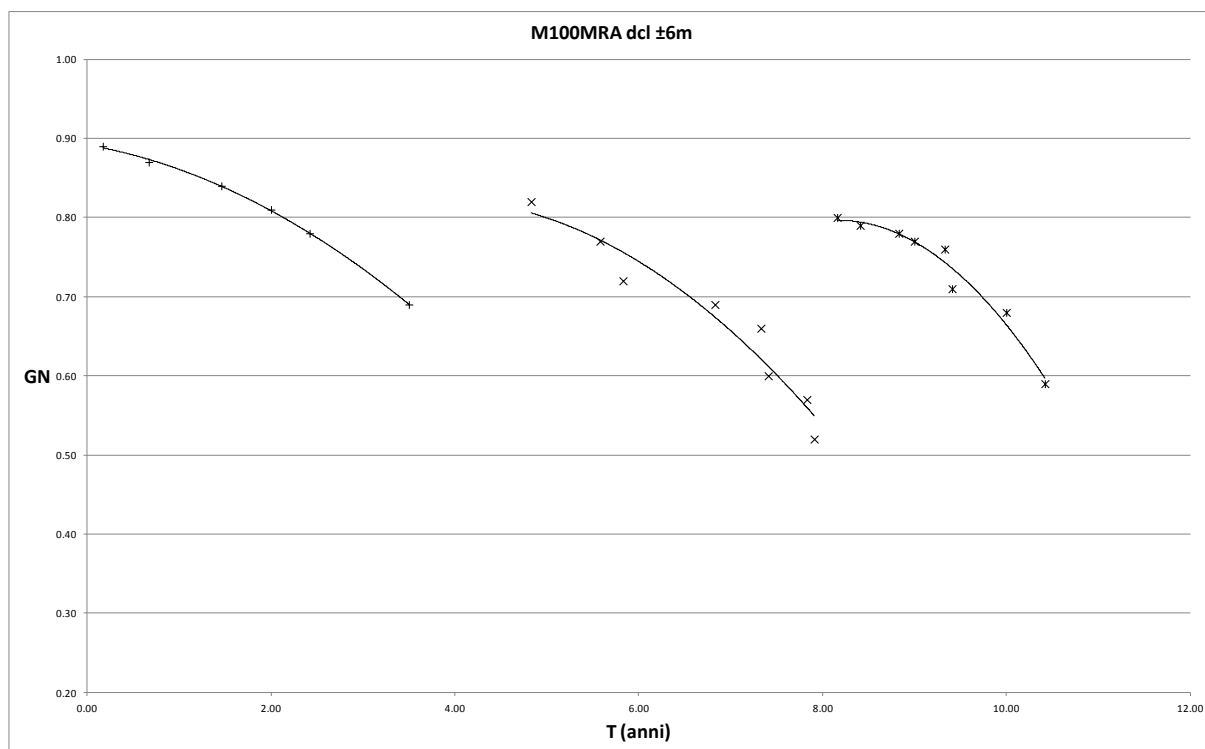


Figura 46 Curva di decadimento M100MRA rami 2004-2007, 2008-2011 e 2012-2014
allineamento ±6

Tabella 33 Statistiche di regressione non lineare curva M100MRA allineamento ±6

Model is: $v_2=a_1*v_1^2+a_2*v_1+a_3$ (M100MRA 2004-2007 ±6)						
Dep. Var. : Var2						
Level of confidence: 95.0% (alpha=0.050)						
	Estimate	Standard	t-value	p-level	Lo. Conf	Up. Conf
a1	-0.010632	0.000856	-12.4242	0.001124	-0.013356	-0.007909
a2	-0.020354	0.003217	-6.3262	0.007985	-0.030593	-0.010115
a3	0.891799	0.002525	353.1256	0.000000	0.883762	0.899836
Model is: $v_2=a_1*v_1^2+a_2*v_1+a_3$ (M100MRA 2008-2011 ±6)						
Dep. Var. : Var2						
Level of confidence: 95.0% (alpha=0.050)						
	Estimate	Standard	t-value	p-level	Lo. Conf	Up. Conf
a1	-0.016119	0.012479	-1.29166	0.252956	-0.048197	0.015960
a2	0.122168	0.161089	0.75838	0.482417	-0.291926	0.536261
a3	0.591679	0.507214	1.16653	0.296009	-0.712157	1.895514
Model is: $v_2=a_1*v_1^2+a_2*v_1+a_3$ (M100MRA 2012-2014 ±6)						
Dep. Var. : Var2						
Level of confidence: 95.0% (alpha=0.050)						
	Estimate	Standard	t-value	p-level	Lo. Conf	Up. Conf
a1	-0.03937	0.011187	-3.51948	0.016928	-0.06813	-0.010615
a2	0.64321	0.207861	3.09444	0.027023	0.10889	1.177537
a3	-1.83054	0.961153	-1.90453	0.115192	-4.30126	0.640181

Comparando le curve ottenute con i differenti metodi si possono assegnare, già sulla base dell'*intuitu phaenomeni* di tipo progressivo e cumulativo, differenti gradi di affidabilità ai risultati.

Infatti:

- le curve CART mostrano risultati molto simili in entrambe le curve ± 3 e ± 6 ; i loro rami presentano un andamento regolare e comparabile nelle pendenze, così come nei punti iniziali e finali; inoltre esse presentano sempre valori cautelativi del GN e progressivi;
- le curve GCHAID presentano andamenti molto meno regolari: il ramo 2008-2011 ± 6 inizia più in alto dei due adiacenti, ed i rami 2012-2014 ± 3 e ± 6 hanno pendenze decisamente più basse dei rami precedenti; i valori sono meno cautelativi, ed in qualche caso stazionari e retrocedenti;
- le curve K-means hanno un andamento più simile a quelle CART, e valori cautelativi; in qualche caso stazionari e retrocedenti; inoltre si ricorda qui quanto osservato nel § 3.1.3.1 in merito alla non continuità spaziale di alcune zone di consumo;
- anche le curve Subtractive Clustering appaiono, al confronto con quelle CART e K-means, meno regolari: il ramo 2012-2014 ± 3 presenta una pendenza quasi costante (andamento lineare), ed il ramo 2012-2014 ± 6 appare traslato verso l'alto; i valori sono in qualche caso stazionari o retrocedenti; inoltre si ricorda qui quanto osservato nel § 3.1.4.1 sulla non identificabilità delle singole zone di consumo;
- le curve Terzo di pista presentano irregolarità come quelle GCHAID e K-means; i valori sono sempre progressivi ma sono i meno cautelativi, essendo il risultato di medie su parti molto ampie della runway;
- le curve M100MRA appaiono abbastanza regolari, anche se meno di quelle CART e K-means soprattutto per l'allineamento ± 6 ; e con valori progressivi.

Per valutare la precisione delle partizioni, è stato fatto un confronto tra le Deviazioni Standard dei valori di output dei 6 metodi. In Tabella 34 e Figura 47 le Deviazioni Standard delle misure di GN le cui medie hanno costituito i valori significativi in ogni data di rilievo per i diagrammi a dispersione, per l'allineamento ± 3 . In Tabella 35 e Figura 48 analogamente per l'allineamento ± 6 .

Tabella 34 Deviazioni Standard GN allineamento ± 3

	DevSt CART	DevSt K-means	DevSt GCHAID	DevSt Sub. Clust.	DevSt Terzo di pista	DevSt M100MRA
24/10/2008	0.046379	0.044520	0.091575	0.089725	0.091663	0.073881
22/07/2009	0.051556	0.044529	0.111472	0.106794	0.112149	0.090308
14/10/2009	0.051118	0.048384	0.108485	0.103395	0.108200	0.088215
28/10/2010	0.054717	0.051335	0.056551	0.097169	0.100793	0.071238
29/04/2011	0.068315	0.036555	0.111081	0.107167	0.108700	0.075244
27/05/2011	0.028231	0.044299	0.113490	0.114071	0.114012	0.087024
11/10/2011	0.038872	0.032498	0.072732	0.070623	0.070368	0.057683

15/11/2011	0.031417	0.034704	0.066910	0.049925	0.068263	0.058482
15/02/2012	0.019774	0.030368	0.056613	0.033380	0.075560	0.038604
17/05/2012	0.017776	0.026608	0.047476	0.042237	0.041711	0.028082
24/10/2012	0.014697	0.022481	0.040200	0.022719	0.040938	0.026605
21/12/2012	0.016371	0.013950	0.025846	0.034569	0.028449	0.020353
18/04/2013	0.027622	0.025190	0.041833	0.043132	0.041711	0.032264
16/05/2013	0.032757	0.015239	0.048969	0.052642	0.051876	0.037836
16/12/2013	0.044889	0.026444	0.097985	0.095962	0.097299	0.068771
28/05/2014	0.039192	0.040160	0.080598	0.086466	0.082327	0.074371

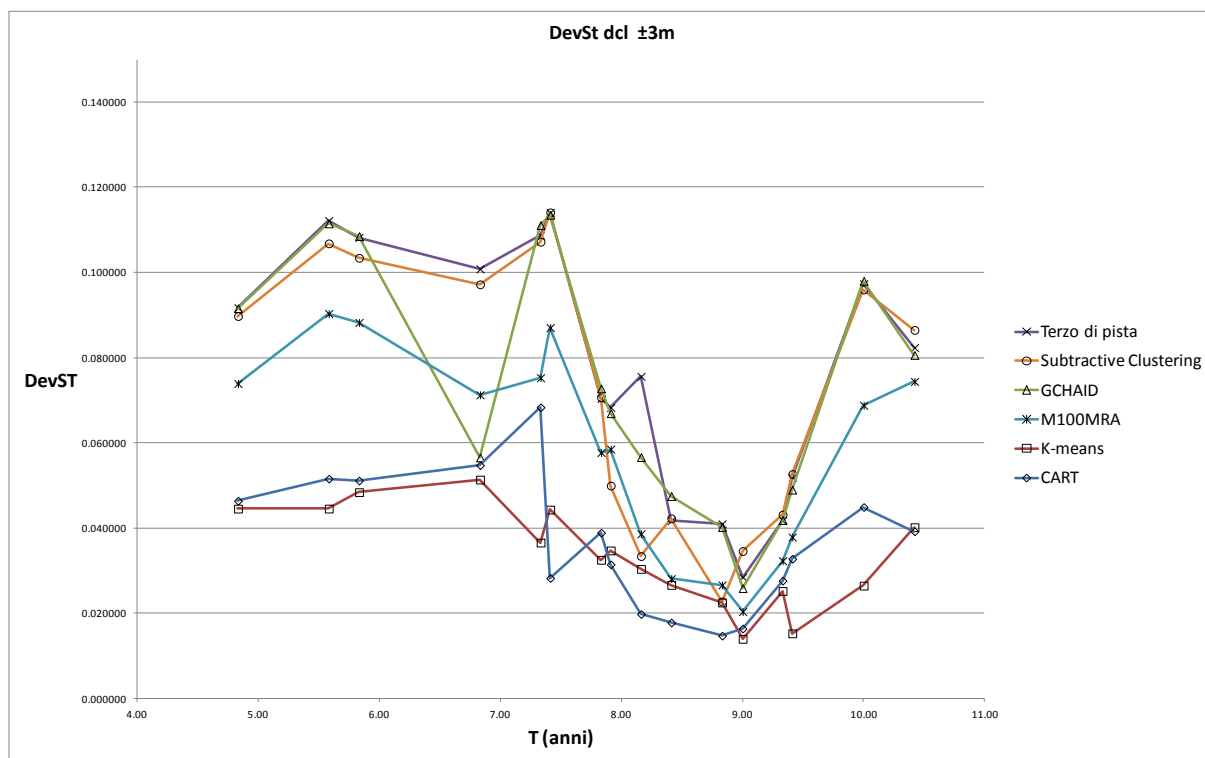


Figura 47 Distribuzione delle DevSt del GN nel tempo, allineamento ± 3

Tabella 35 Deviazioni Standard GN allineamento ± 6

	DevSt CART	DevSt K-means	DevSt GCHAID	DevSt Sub. Clust.	DevSt Terzo di pista	DevSt M100MRA
8/3/2004	0.016523	0.016699	0.022738	0.040347	0.046379	0.031455
31/08/2004	0.027055	0.019735	0.039472	0.057571	0.062068	0.046812
16/06/2005	0.040927	0.024518	0.054102	0.052349	0.053662	0.046608
21/12/2005	0.023812	0.020215	0.037550	0.056001	0.061610	0.047256
31/05/2006	0.044621	0.033233	0.043359	0.057851	0.060232	0.039036
3/7/2007	0.025475	0.021661	0.037921	0.048075	0.053334	0.034581
24/10/2008	0.052943	0.052973	0.106972	0.099884	0.105493	0.075680
22/07/2009	0.055462	0.052244	0.056400	0.097169	0.100793	0.071238
14/10/2009	0.050160	0.051492	0.118579	0.115869	0.117663	0.087041
28/10/2010	0.054166	0.055938	0.118317	0.109342	0.116699	0.081937
29/04/2011	0.037135	0.033338	0.120773	0.110454	0.119555	0.079813

27/05/2011	0.055163	0.039255	0.101178	0.100925	0.101291	0.081939
11/10/2011	0.038588	0.041688	0.099599	0.090838	0.098582	0.075889
15/11/2011	0.024980	0.026240	0.065253	0.061747	0.064589	0.052249
15/02/2012	0.019105	0.026218	0.036469	0.021197	0.032131	0.020003
17/05/2012	0.031528	0.033765	0.034828	0.048172	0.042996	0.032120
24/10/2012	0.022494	0.019262	0.033257	0.041389	0.034776	0.035352
21/12/2012	0.021471	0.014367	0.030000	0.032983	0.033255	0.023354
18/04/2013	0.019105	0.017800	0.027911	0.030992	0.027952	0.030320
16/05/2013	0.029833	0.029411	0.050010	0.052148	0.051595	0.040465
16/12/2013	0.036742	0.032016	0.065115	0.059815	0.061588	0.040577
28/05/2014	0.050646	0.052721	0.080951	0.077007	0.079986	0.051818

Le distribuzioni delle Deviazioni Standard nel tempo, per entrambi gli allineamenti ± 3 e ± 6 , mostra che i due algoritmi K-means e CART sono comparabili in quanto sottendono aree quasi uguali, ed entrambe nettamente inferiori a quelle sottese dai restanti metodi. I due algoritmi appaiono quindi ugualmente in grado di rappresentare con precisione nel tempo i valori significativi del GN.

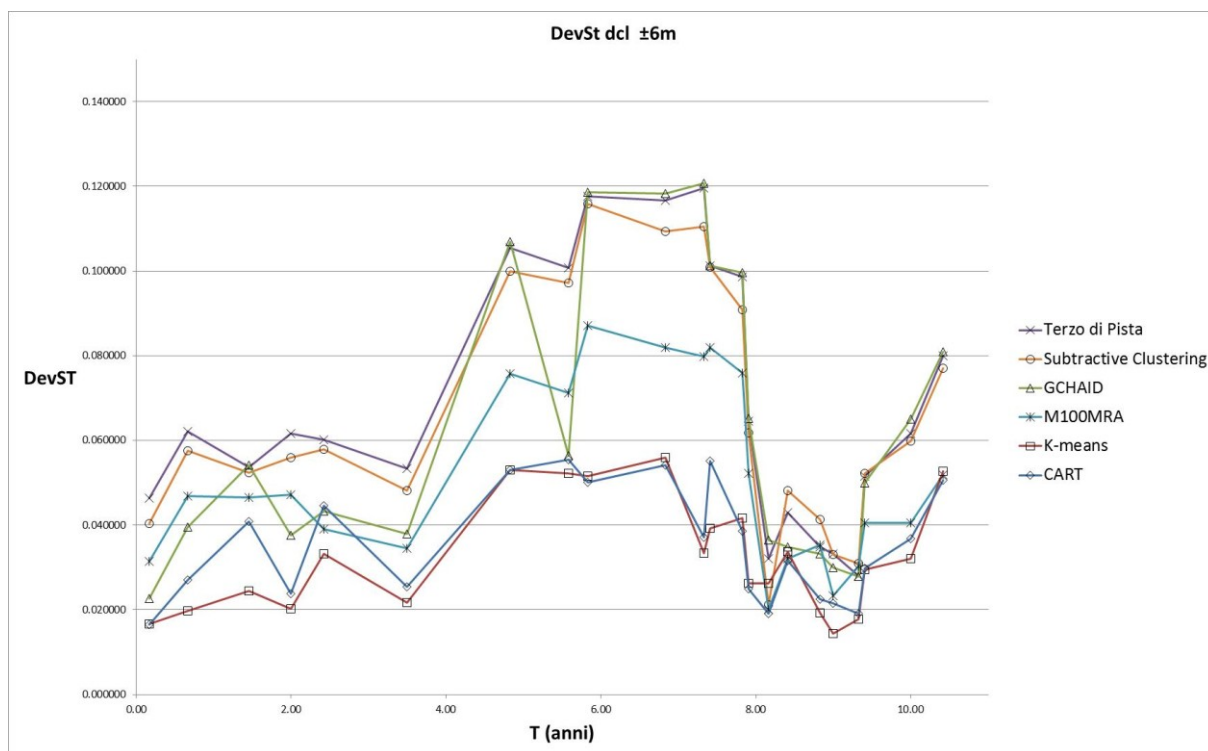


Figura 48 Distribuzione delle DevSt del GN nel tempo, allineamento ± 6

Per compendiare in una comparazione quantitativa le osservazioni precedenti, si sono fissati quattro criteri cui assegnare dei punteggi o voti in una scala da 0 a 10, e dei pesi che valutino i diversi criteri sull'importanza relativa degli stessi.

I criteri scelti sono:

- Cautelatività dei valori terminali: una curva è giudicata tanto più affidabile quanto più i valori del GN individuati dal relativo algoritmo/metodo sono bassi, ovvero si avvicinano prima ai livelli di manutenzione programmata fissati dalle Norme per lo specifico strumento di misura. Il punteggio di questo criterio è attribuito partendo dal massimo di 10 assegnato alla curva con il valore terminale medio dei rami più basso, e rapportando le altre secondo i rispettivi valori medi terminali; i valori terminali sono quelli che si riferiscono alle campagne di rilievo 3/7/2007, 15/11/2011 e 28/05/2014. Considerando i 6 metodi per ciascun allineamento si ha:

$$\text{CART } \pm 3 = 0.385/0.41 * 10 = 9.39$$

$$\text{GCHAID } \pm 3 = 0.385/0.505 * 10 = 7.62$$

$$\text{K-means } \pm 3 = 0.385/0.415 * 10 = 9.28$$

$$\text{Subtractive Clustering } \pm 3 = 0.385/0.465 * 10 = 8.28$$

$$\text{Terzo di pista } \pm 3 = 0.385/0.515 * 10 = 7.48$$

$$\text{M100MRA } \pm 3 = 0.385/0.385 * 10 = 10$$

$$\text{CART } \pm 6 = 0.6/0.627 * 10 = 9.57$$

$$\text{GCHAID } \pm 6 = 0.6/0.692 * 10 = 8.66$$

$$\text{K-means } \pm 6 = 0.6/0.63 * 10 = 9.52$$

$$\text{Subtractive Clustering } \pm 6 = 0.6/0.62 * 10 = 9.68$$

$$\text{Terzo di pista } \pm 6 = 0.6/0.71 * 10 = 8.45$$

$$\text{M100MRA } \pm 6 = 0.6/0.6 * 10 = 10.$$

- Layout dei rami delle curve: una curva è giudicata tanto più affidabile quanto più i suoi rami hanno un aspetto regolare, ovvero simil disposti e con simili pendenze. Il punteggio di questo criterio, di tipo sostanzialmente qualitativo, è attribuito partendo dal massimo di 10 assegnato alle curve CART e detraendo un punto per ogni irregolarità notata:

$$\text{CART } \pm 3 = 10$$

$$\text{GCHAID } \pm 3 = 9$$

$$\text{K-means } \pm 3 = 10$$

$$\text{Subtractive Clustering } \pm 3 = 0.385/0.465 * 10 = 9$$

$$\text{Terzo di pista } \pm 3 = 0.385/0.515 * 10 = 9$$

$$\text{M100MRA } \pm 3 = 10$$

$$\text{CART } \pm 6 = 10$$

$$\text{GCHAID } \pm 6 = 7$$

$$\text{K-means } \pm 6 = 10$$

$$\text{Subtractive Clustering } \pm 6 = 7$$

$$\text{Terzo di pista } \pm 6 = 8$$

$$\text{M100MRA } \pm 6 = 9.$$

- Progressività dei valori: una curva è giudicata tanto più affidabile quanto più presenta valori in progressione calante rispetto al tempo, ovvero senza valori stazionari o retrocedenti con il tempo. Il punteggio di questo criterio è attribuito partendo dal massimo di 10 assegnato alle curve con valori puntuali in sola progressione, e detraendo un punto per ogni stazionarietà e/o retrocessione:

CART $\pm 3 = 10$

GCHAID $\pm 3 = 6$

K-means $\pm 3 = 8$

Subtractive Clustering $\pm 3 = 0.385/0.465 * 10 = 8$

Terzo di pista $\pm 3 = 0.385/0.515 * 10 = 10$

M100MRA $\pm 3 = 10$

CART $\pm 6 = 10$

GCHAID $\pm 6 = 6$

K-means $\pm 6 = 7$

Subtractive Clustering $\pm 6 = 6$

Terzo di pista $\pm 6 = 10$

M100MRA $\pm 6 = 10$.

- Distribuzione delle Deviazioni Standard: una curva è giudicata tanto più affidabile quanto più i singoli valori puntuali dai quali deriva (per regressione non lineare) sono precisi, ovvero affetti da bassa deviazione standard. Il punteggio di questo criterio è attribuito partendo dal massimo di 10 assegnato alla curva (di ciascun allineamento) con la più bassa distribuzione di DevST e rapportando le altre (di ciascun allineamento) secondo le rispettive distribuzioni di DevSt, avendo scelto la media della distribuzione come parametro:

CART $\pm 3 = 0.0335790272740765/0.0364801177177209 * 10 = 9.20$

GCHAID $\pm 3 = 0.0335790272740765/0.0732384962046107 * 10 = 4.58$

K-means $\pm 3 = 0.0335790272740765/0.0335790272740765 * 10 = 10$

Subtractive Clustering $\pm 3 = 0.0335790272740765/0.07187362148553 * 10 = 4.67$

Terzo di pista $\pm 3 = 0.0335790272740765/0.0771262096275134 * 10 = 4.35$

M100MRA $\pm 3 = 0.0335790272740765/0.0580599730638028 * 10 = 5.78$

CART $\pm 6 = 0.0315270152836515/0.0353606365289422 * 10 = 8.92$

GCHAID $\pm 6 = 0.0315270152836515/0.06276150204458 * 10 = 5.02$

K-means $\pm 6 = 0.0315270152836515/0.0315270152836515 * 10 = 10$

Subtractive Clustering $\pm 6 = 0.0315270152836515/0.06646027767743 * 10 = 4.74$

Terzo di pista $\pm 6 = 0.0315270152836515/0.0693741773369808 * 10 = 4.54$

M100MRA $\pm 6 = 0.0315270152836515/0.0511609877019538 * 10 = 6.16$.

I pesi scelti per i diversi criteri, assegnati in base ad interviste di ricercatori e tecnici professionisti operanti nel campo delle infrastrutture aeroportuali, sono:

- Cautelatività dei valori terminali: P= 3;
- Layout dei rami delle curve: P=1;
- Progressività dei valori: P= 2;
- Distribuzione delle Deviazioni Standard: P= 2.

Assegnati punteggi e pesi, l'Analisi Multicriteria restituisce i punteggi normalizzati e l'ordinamento finale nella scala da 1 a 10 nella Tabella 36, per l'allineamento ± 3 , e nella Tabella 37 per l'allineamento ± 6 :

Tabella 36 Analisi Multicriteria allineamento ± 3

Algoritmo/metodo	Cautelatività valori	Layout rami	Progressività valori	Distribuzione DevSt	Punt. Norm.	Voto
CART	9.39	10	10	9.20	12.4388842	10.00
GCHAID	7.62	9	6	4.58	8.1600703	6.56
K-means	9.28	10	8	10.00	12.0934160	9.72
Subtractive Clustering	8.28	9	8	4.67	9.1336840	7.34
Terzo di pista	7.48	9	10	4.35	9.3333333	7.50
M100MRA	10.00	10	10	5.78	11.1103058	8.93

Tabella 37 Analisi Multicriteria allineamento ± 6

Algoritmo/metodo	Cautelatività valori	Layout rami	Progressività valori	Distribuzione DevSt	Punt. Norm.	Voto
CART	9.57	10	10	8.92	12.0890533	10.00
GCHAID	8.66	7	6	5.02	8.2860099	6.85
K-means	9.52	10	7	10.00	11.5470727	9.55
Subtractive Clustering	9.68	7	6	4.74	8.5247921	7.05
Terzo di pista	8.45	8	10	4.54	9.4761904	7.84
M100MRA	10.00	9	10	6.16	10.8829998	9.00

Nelle Figure 49 e 50 i ranking finali restituiti dall'analisi Multicriteria in forma di grafici, rispettivamente per l'allineamento ± 3 e ± 6 .

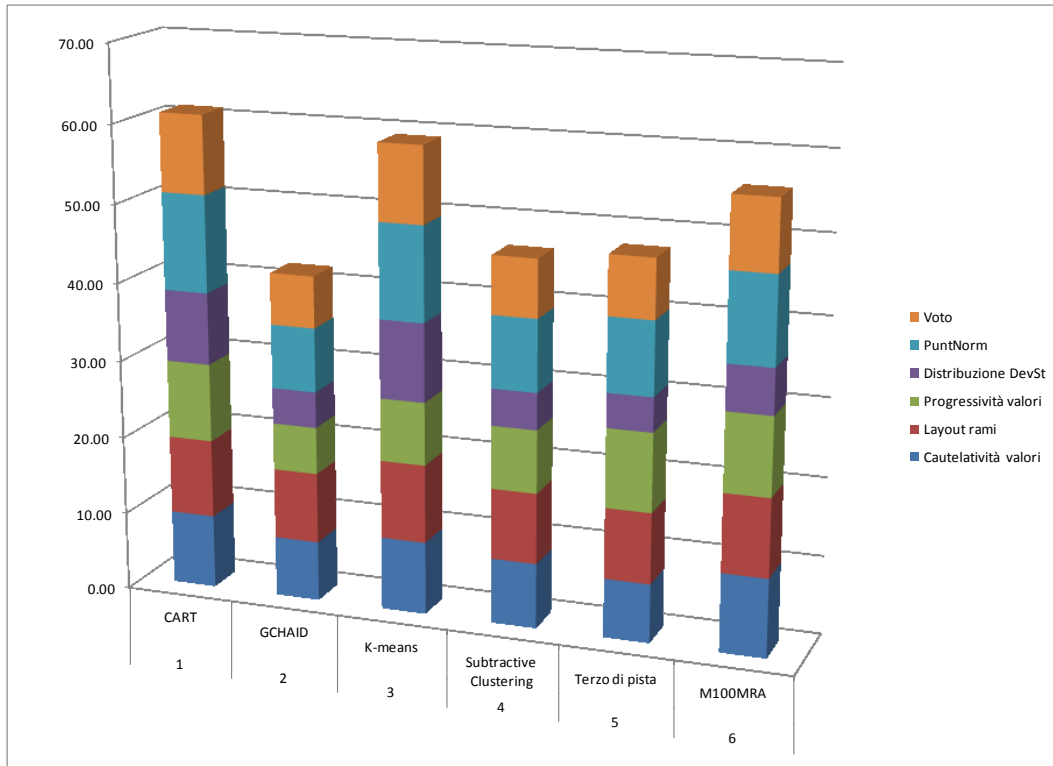


Figura 49 Ranking Analisi Multicriteria allineamento ±3

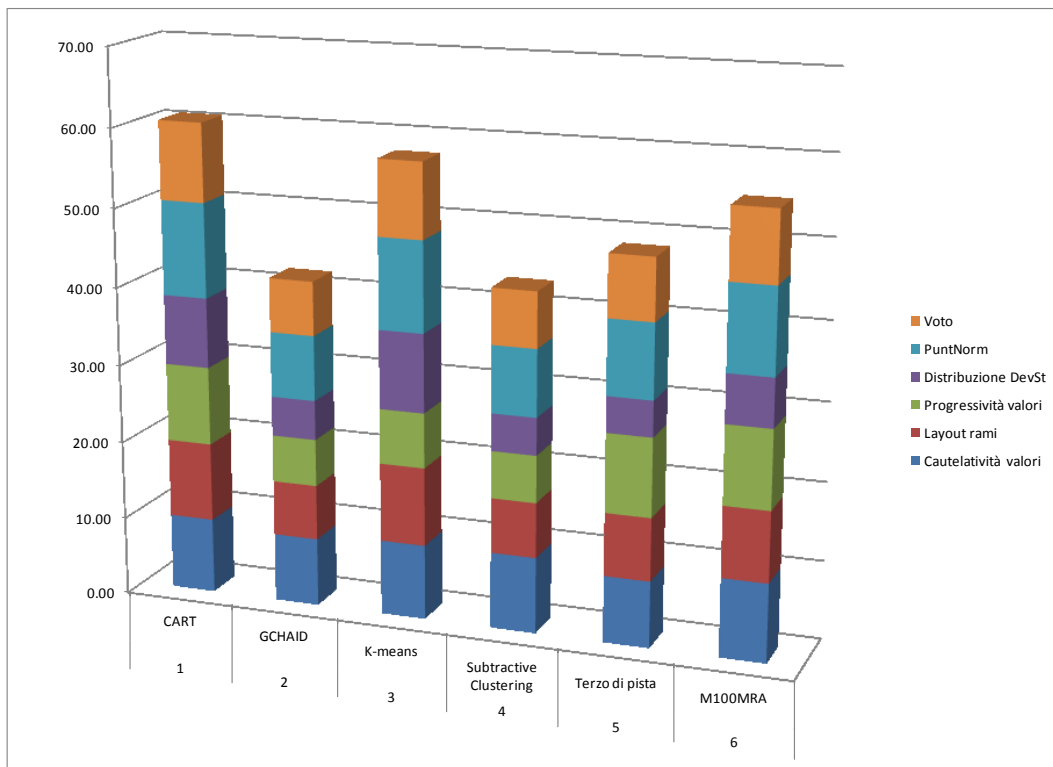


Figura 50 Ranking Analisi Multicriteria allineamento ±6

Per entrambi gli allineamenti ±3 e ±6 il metodo Classification and Regression Trees/CART si è rivelato più affidabile degli altri cinque e pertanto viene selezionato per il prosieguo delle analisi.

CAPITOLO 4

4.1 ANALISI DEI CARICHI

4.1.1 STIMA DEL PESO EFFETTIVO DEGLI AEROMOBILI

I dati di traffico nel periodo 2004-2015, forniti dalla Società Gestore dell'Aeroporto S.A.CAL. S.p.A., sono stati elaborati al fine di ricavare, per ciascuna manovra di atterraggio e decollo, una stima affidabile del peso effettivo degli aeromobili.

Questo non è un dato direttamente disponibile, a differenza dei dati di targa: i pesi di targa sono dei pesi limite fissi, di prassi impiegati nella progettazione e nell'esercizio aeroportuali per la loro immediata disponibilità. Al fine di ottenere un modello dei carichi meccanistico, si è deciso di introdurre una stima dei pesi effettivi.

Il parametro più flessibile per il calcolo di tali pesi è la quantità di carburante nei serbatoi. Questo è stato stimato sulla base dei piani di volo, in termini di consumo carburante, predisposti secondo le raccomandazioni normative sulle quantità di carburante da assicurare.

L'ICAO Annesso 6 Parte I [70] al 4.3.4 *Alternate Aerodromes* indica le condizioni per programmare un eventuale aeroporto alternativo a quello di destinazione:

<<4.3.4.3 Destination alternate aerodromes

For a flight to be conducted in accordance with the instrument flight rules, at least one destination alternate aerodrome shall be selected and specified in the operational and ATS flight plans, unless:

- a) the duration of the flight and the meteorological conditions prevailing are such that there is reasonable certainty that, at the estimated time of arrival at the aerodrome of intended landing, and for a reasonable period before and after such time, the approach and landing may be made under visual meteorological conditions; or*
- b) the aerodrome of intended landing is isolated and there is no suitable destination alternate aerodrome.>>.*

ed al 4.3.6 *Fuel and oil supply* sulla preparazione del volo detta:

<<4.3.6.1 All aeroplanes. A flight shall not be commenced unless, taking into account both the meteorological conditions and any delays that are expected in flight, the aeroplane carries sufficient fuel and oil to ensure that it can safely complete the flight. In addition, a reserve shall be carried to provide for contingencies.

4.3.6.2 *Piston-engined aeroplanes. The fuel and oil carried in order to comply with 4.3.6.1 shall, in the case of piston-engined aeroplanes, be at least the amount sufficient to allow the aeroplane:*

4.3.6.2.1 *When a destination alternate aerodrome is required, either:*

- a) to fly to the aerodrome to which the flight is planned thence to the most critical (in terms of fuel consumption) alternate aerodrome specified in the operational and ATS flight plans and thereafter for a period of 45 minutes; or*
- b) to fly to the alternate aerodrome via any predetermined point and thereafter for 45 minutes, provided that this shall not be less than the amount required to fly to the aerodrome to which the flight is planned and thereafter for:*
 - 1) 45 minutes plus 15 per cent of the flight time planned to be spent at the cruising level(s), or*
 - 2) two hours,**whichever is less.*

4.3.6.2.2 *When a destination alternate aerodrome is not required:*

- a) in terms of 4.3.4.3 a), to fly to the aerodrome to which the flight is planned and thereafter for a period of 45 minutes; or*
- b) in terms of 4.3.4.3 b), to fly to the aerodrome to which the flight is planned and thereafter for:*
 - 1) 45 minutes plus 15 per cent of the flight time planned to be spent at the cruising level(s), or*
 - 2) two hours,**whichever is less.*

4.3.6.3 *Turbine-engined aeroplanes. The fuel and oil carried in order to comply with 4.3.6.1 shall, in the case of turbine-engined aeroplanes, be at least the amount sufficient to allow the aeroplane:*

4.3.6.3.1 *When a destination alternate aerodrome is required, either:*

- a) to fly to and execute an approach, and a missed approach, at the aerodrome to which the flight is planned, and thereafter:*

- 1) to fly to the alternate aerodrome specified in the operational and ATS flight plans; and then
 - 2) to fly for 30 minutes at holding speed at 450 m (1 500 ft) above the alternate aerodrome under standard temperature conditions, and approach and land; and
 - 3) to have an additional amount of fuel sufficient to provide for the increased consumption on the occurrence of any of the potential contingencies specified by the operator to the satisfaction of the State of the Operator; or
 - b) to fly to the alternate aerodrome via any predetermined point and thereafter for 30 minutes at 450 m (1 500 ft) above the alternate aerodrome, due provision having been made for an additional amount of fuel sufficient to provide for the increased consumption on the occurrence of any of the potential contingencies specified by the operator to the satisfaction of the State of the Operator; provided that fuel shall not be less than the amount of fuel required to fly to the aerodrome to which the flight is planned and thereafter for two hours at normal cruise consumption.
- 4.3.6.3.2 When a destination alternate aerodrome is not required:
- a) in terms of 4.3.4.3 a), to fly to the aerodrome to which the flight is planned and additionally:
 - 1) to fly 30 minutes at holding speed at 450 m (1 500 ft) above the aerodrome to which the flight is planned under standard temperature conditions; and
 - 2) to have an additional amount of fuel, sufficient to provide for the increased consumption on the occurrence of any of the potential contingencies specified by the operator to the satisfaction of the State of the Operator; and
 - b) in terms of 4.3.4.3 b), to fly to the aerodrome to which the flight is planned and thereafter for a period of two hours at normal cruise consumption.>>

L'ICAO Annesso 6 Parte II [71] al 2.2.3.6 Fuel and oil supply:

- << A flight shall not be commenced unless, taking into account both the meteorological conditions and any delays that are expected in flight, the aeroplane carries sufficient fuel and oil to ensure that it can safely complete the flight. The amount of fuel to be carried must permit:
- a) when the flight is conducted in accordance with the instrument flight rules and a destination alternate aerodrome is not required in accordance with 2.2.3.5, flight to the aerodrome of intended landing, and after that, for at least 45 minutes at normal cruising altitude; or
 - b) when the flight is conducted in accordance with the instrument flight rules and a destination alternate aerodrome is required, flight from the aerodrome of intended landing to an alternate aerodrome, and after that, for at least 45 minutes at normal cruising altitude; or
 - c) when the flight is conducted in accordance with the visual flight rules by day, flight to the aerodrome of intended landing, and after that, for at least 30 minutes at normal cruising altitude; or
 - d) when the flight is conducted in accordance with the visual flight rules by night, flight to the aerodrome of intended landing and thereafter for at least 45 minutes at normal cruising altitude.>>

La Commission Regulation (EC) No 859/2008 [72] compendia i due documenti ICAO nella

Appendix 1 to OPS 1.255 Fuel policy:

<<An operator must base the company fuel policy, including calculation of the amount of fuel to be on board for departure, on the following planning criteria:

1. Basic procedure

The usable fuel to be on board for departure must be the amount of:

1.1. Taxi fuel, which shall not be less than the amount, expected to be used prior to take-off. Local conditions at the departure aerodrome and APU consumption shall be taken into account;

1.2. Trip fuel, which shall include:

(a) fuel for take-off and climb from aerodrome elevation to initial cruising level/altitude, taking into account the expected departure routing; and

(b) fuel from top of climb to top of descent, including any step climb/descent; and

(c) fuel from top of descent to the point where the approach is initiated, taking into account the expected arrival procedure; and

(d) fuel for approach and landing at the destination aerodrome;

1.3. Contingency fuel, except as provided for in Paragraph 2 "Reduced Contingency Fuel", which shall be the higher of a. or b. below:

(a) Either:

(i) 5 % of the planned trip fuel or, in the event of in-flight re-planning, 5 % of the trip fuel for the remainder of the flight; or

(ii) Not less than 3 % of the planned trip fuel or, in the event of in-flight re-planning, 3 % of the trip fuel for the remainder of the flight, provided that an en-route alternate aerodrome is available in accordance with Appendix 2 to OPS 1.255; or

(iii) An amount of fuel sufficient for 20 minutes flying time based upon the planned trip fuel consumption provided that the operator has established a fuel consumption monitoring programme for individual aeroplanes and uses valid data determined by means of such a programme for fuel calculation; or

(iv) An amount of fuel based on a statistical method approved by the Authority which ensures an appropriate statistical coverage of the deviation from the planned to the actual trip fuel. This method is used to monitor the fuel consumption on each city pair/aeroplane combination and the operator uses this data for a statistical analysis to calculate contingency fuel for that city pair/aeroplane combination.

(b) An amount to fly for five minutes at holding speed at 1 500 ft (450 m), above the destination aerodrome in standard conditions.

1.4. Alternate fuel which shall:

(a) include:

(i) fuel for a missed approach from the applicable MDA/DH at the destination aerodrome to missed approach altitude, taking into account the complete missed approach procedure; and

(ii) fuel for climb from missed approach altitude to cruising level/altitude, taking into account the expected departure routing; and

(iii) fuel for cruise from top of climb to top of descent, taking into account the expected routing; and

(iv) fuel for descent from top of descent to the point where the approach is initiated, taking into account the expected arrival procedure; and

(v) fuel for executing an approach and landing at the destination alternate aerodrome selected in accordance with OPS 1.295.

(b) where two destination alternate aerodromes are required in accordance with OPS 1.295(d), be sufficient to proceed to the alternate aerodrome which requires the greater amount of alternate fuel.

1.5. Final reserve fuel, which shall be:

(a) for aeroplanes with reciprocating engines, fuel to fly for 45 minutes; or

(b) for aeroplanes with turbine engines, fuel to fly for 30 minutes at holding speed at 1 500 ft (450 m) above aerodrome elevation in standard conditions, calculated with the estimated mass on arrival at the destination alternate aerodrome or the destination aerodrome, when no destination alternate aerodrome is required.

1.6. The minimum additional fuel, which shall permit:

(a) the aeroplane to descend as necessary and proceed to an adequate alternate aerodrome in the event of engine failure or loss of pressurisation, whichever requires the greater amount of fuel based on the assumption that such a failure occurs at the most critical point along the route, and

(i) hold there for 15 minutes at 1 500 ft (450 m) above aerodrome elevation in standard conditions; and

(ii) make an approach and landing,

except that additional fuel is only required, if the minimum amount of fuel calculated in accordance with subparagraphs 1.2. to 1.5. above is not sufficient for such an event, and

(b) Holding for 15 minutes at 1 500 ft (450 m) above destination aerodrome elevation in standard conditions, when a flight is operated without a destination alternate aerodrome;

1.7. Extra fuel, which shall be at the discretion of the commander.

2. Reduced Contingency Fuel (RCF) Procedure

If an operator's fuel policy includes pre-flight planning to a Destination 1 aerodrome (commercial destination) with a reduced contingency fuel procedure using a decision point along the route and a Destination 2 aerodrome (optional refuel destination), the amount of usable fuel, on board for departure, shall be the greater of 2.1. or 2.2. below:

2.1. the sum of:

(a) taxi fuel; and

(b) trip fuel to the Destination 1 aerodrome, via the decision point; and

(c) contingency fuel equal to not less than 5 % of the estimated fuel consumption from the decision point to the Destination 1 aerodrome; and

(d) alternate fuel or no alternate fuel if the decision point is at less than six hours from the Destination 1 aerodrome and the requirements of OPS 1.295(c)(1)(ii) are fulfilled; and

(e) final reserve fuel; and

(f) additional fuel; and

(g) extra fuel if required by the commander.

2.2. The sum of:

(a) taxi fuel; and

(b) trip fuel to the Destination 2 aerodrome, via the decision point; and

(c) contingency fuel equal to not less than the amount calculated in accordance with subparagraph 1.3 above from departure aerodrome to the Destination 2 aerodrome; and

(d) alternate fuel, if a Destination 2 alternate aerodrome is required; and

(e) final reserve fuel; and

(f) additional fuel; and

(g) extra fuel if required by the commander.

3. pre-determined point (PDP) procedure

If an operator's fuel policy includes planning to a destination alternate aerodrome where the distance between the destination aerodrome and the destination alternate aerodrome is such that a flight can only be routed via a predetermined point to one of these aerodromes, the amount of usable fuel, on board for departure, shall be the greater of 3.1 or 3.2 below:

3.1. the sum of:

(a) taxi fuel; and

(b) trip fuel from the departure aerodrome to the destination aerodrome, via the predetermined point; and

(c) contingency fuel calculated in accordance with subparagraph 1.3. above; and

(d) additional fuel if required, but not less than:

(i) for aeroplanes with reciprocating engines, fuel to fly for 45 minutes plus 15 % of the flight time planned to be spent at cruising level or two hours, whichever is less; or

(ii) for aeroplanes with turbine engines, fuel to fly for two hours at normal cruise consumption above the destination aerodrome.

This shall not be less than final reserve fuel; and

(e) extra fuel if required by the commander; or

3.2. the sum of:

(a) taxi fuel; and

(b) trip fuel from the departure aerodrome to the destination alternate aerodrome, via the predetermined point; and

(c) contingency fuel calculated in accordance with subparagraph 1.3 above; and

(d) additional fuel if required, but not less than:

(i) For aeroplanes with reciprocating engines: fuel to fly for 45 minutes; or

(ii) For aeroplanes with turbine engines: fuel to fly for 30 minutes at holding speed at 1 500 ft (450 m) above the destination alternate aerodrome elevation in standard conditions.

This shall not be less than final reserve fuel; and

(e) Extra fuel if required by the commander.

4. Isolated aerodrome procedure

If an operator's fuel policy includes planning to an isolated aerodrome, the last possible point of diversion to any available en-route alternate aerodrome shall be used as the pre-determined point. See paragraph 3 above.>>

Quindi per l'Aeroporto di Lamezia Terme, sulla base delle seguenti due condizioni:

- livello di traffico medio, e quindi impegno della pista di mediamente 3 voli/h per le 16 ore diurne, che implica praticamente assenza di "holding" alla prescritta quota di 1500 ft per infrastruttura occupata; ciò si riflette in un mancato consumo della quota di *final reserve fuel* + *additional fuel* degli aerei in atterraggio;

- localizzazione geografica, e quindi favorevoli condizioni meteorologiche prevalenti durante l'anno, che implicano una % scarsissima di reindirizzamenti (ipotizzabili nei vicini aeroporti di Reggio Calabria e Napoli); ciò si riflette in piani di volo senza necessità di *alternate aerodrome*;

si sono calcolati i Landing Weight (LW) come:

$LW = \text{Operational Empty Weight (OEW)} + \text{Pay Load (PL)} + \text{Landing Fuel (LF)}$;

dove:

- OEW= peso a vuoto operativo, ovvero peso dell'aeromobile in condizioni operative pronto al volo con fluidi ed equipaggio compreso, scarico solo del carburante e del carico pagante;

- PL= carico pagante, ovvero passeggeri + bagagli; stimati come da indicazioni della Commission Regulation (EC) No 859/2008 in *OPS 1.620 Mass values for passengers and baggage* per aeromobili da 30 posti e più:

- passeggeri= 76 kg;

e per aeromobili da 20 posti e più:

- massa standard bagagli voli all'interno delle regioni Europee: 13 kg;

- LF= reserve fuel= contingency fuel + final reserve fuel + additional fuel= 5% trip fuel + 45 min/30min fuel + 15min fuel;

dove:

- trip fuel= consumo orario di carburante [kg/h] x tempo di volo tra Aeroporto Origine e Aeroporto di Lamezia [h] alla velocità di crociera dell'aeromobile;
- 45min/30min fuel= carburante per un tempo aggiuntivo di volo di 45min/30min per aerei con motori a pistone/turbina.

I TakeOff Weight si sono calcolati come:

$$TOW = \text{Operational Empty Weight (OEW)} + \text{Pay Load (PL)} + \text{TakeOff Fuel (TOF)}.$$

Per il TOF a rigore non è possibile fare la stessa ipotesi fatta sui piani dei voli in atterraggio su Lamezia Terme, in quanto gli Aeroporti Destinazione potrebbero presentare, date le singole caratteristiche di traffico e di condizioni meteorologiche, la necessità di prevedere uno (o anche due) aeroporti alternativi. In questa sede si terrà l'ipotesi semplificativa:

- $TOF = \text{trip fuel} + \text{reserve fuel} = \text{trip fuel} + \text{contingency fuel} + \text{final reserve fuel} + \text{additional fuel} = \text{trip fuel} + 5\% \text{ trip fuel} + 45\text{min}/30\text{min fuel} + 15\text{min fuel};$

ma, come si vedrà nel prossimo § 4.2 sulla scelta della variabile predittore, tale indeterminazione sarà ininfluente sul modello dei carichi.

Si sono quindi ricavate le stime dei pesi effettivi all'atterraggio ed al decollo di 72572 voli, dove ogni volo = 1 atterraggio + 1 decollo, ovvero della totalità del traffico 2004-2015.

Per lo spettro dei 72 aeromobili che hanno interessato l'Aeroporto di Lamezia Terme dal 2004 a 2015, si riportano in appendice C: i dati di targa, le configurazioni, le prestazioni.

In Appendice D si riporta uno stralcio dei dati di traffico organizzati in foglio di calcolo, con le stime dei pesi anzidetti in [kg], che si riferiscono al periodo intercorrente tra i rilievi 24/10/2012-21/12/2012.

4.1.2 SERIE STORICHE DEI CARICHI CUMULATI ED INDIVIDUAZIONE DELLA VARIABILE REGRESSIVA

Per la totalità del traffico 2004-2015 si sono calcolati i Carichi Cumulati in Atterraggio (CLW) ed in Decollo (CTOW).

L'analisi statistica tramite il Coefficiente di Pearson, Equazione (13):

$$-1 \leq \rho_{xy} = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu_x)(y_i - \mu_y)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu_x)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \mu_y)^2}} \leq 1 \quad (13)$$

dove:

$x_i = CLW_i$ è il carico cumulato in atterraggio fino all'i-esimo volo;

$y_i = CTOW_i$ è il carico cumulato in decollo fino all'i-esimo volo;

ha confermato numericamente la correlazione tra i pesi cumulati in atterraggio e i pesi cumulati in decollo:

$$\rho_{xy}(\text{voli } 1-32000) = 1 \quad \rightarrow \text{ correlazione lineare positiva;}$$

$$\rho_{xy}(\text{voli } 32001-64000) = 0.99999 \quad \rightarrow \text{ correlazione lineare positiva;}$$

$\rho_{xy}(\text{voli } 64001-72572) = 0.99998 \rightarrow \text{correlazione lineare positiva.}$

In Appendice D si riporta uno stralcio delle serie storiche dei CLW e CTOW periodo 24/10/2012-21/12/2012.

La scelta tra LW e TOW quale variabile indipendente da considerare per lo studio del fenomeno di degrado è stata effettuata in base ai principi generali di meccanica della trazione.

Le condizioni di rotolamento delle ruote dei carrelli (Main Landing Gear) degli aeromobili sono di ruota trainata (in decollo) e frenata (in atterraggio). Quest'ultima condizione ricorre, durante l'atterraggio, già dal primo istante di impatto delle ruote sulla pavimentazione, istante nel quale si attivano i sistemi automatici di frenatura ed antiskid che provvedendo alla regolazione in continuo del tasso di scorrimento relativo tra pneumatico e pavimentazione, garantiscono l'ottimizzazione dell'aderenza e di conseguenza dello sforzo frenante.

La forza di aderenza A , che si esplica al contatto pneumatico-pavimentazione, e che può assumere un valore limite di:

$$A_{\text{lim}} = f_a \cdot P_a$$

pari al prodotto del coefficiente di aderenza per il peso gravante sulla ruota, nel caso di ruota trainata eguaglia in ogni istante:

$$A = M_a / r$$

in cui M_a è il momento di attrito ai perni dell'asse ruota ed r è il raggio della ruota.

Nel caso di ruota frenata si ha:

$$A = (M_a + M_f) / r$$

in cui M_f è il momento frenante ed essendo $M_f \gg M_a$ le forze di aderenza che contribuiscono in maniera significativa al degrado delle caratteristiche superficiali della pavimentazione sono esplicate in fase di atterraggio.

Dall'analisi consegue la scelta di LW quale variabile regressiva indipendente con esclusione della variabile correlata TOW.

4.1.3 CONFRONTO DELLE STIME DEI PESI EFFETTIVI LW CON I PESI DI TARGA MLW

Con riferimento alle dodici tipologie di aeromobili prevalenti nello scalo di studio, che hanno effettuato $67715/72572 = 93.3\%$ dei voli nel periodo di analisi:

- Boeing B737-700 (B 737);
- McDonnell Douglas MD82 (M 82);
- McDonnell Douglas MD80 (M 80);
- Airbus 320 (A 320);
- Boeing B737-800 (B 738);

- Airbus 319 (A 319);
- Fokker 100 (F 100);
- Airbus 321 (A 321);
- Boeing B737-400 (B 734);
- Bombardier CRJ900 (CRJ);
- Dornier 328 (D 328);
- Tupolev 154 B2 (TU 154);

si è effettuato il confronto tra i pesi effettivi stimati in atterraggio LW ed i pesi di targa Maximum Landing Weight (MLW).

Dal confronto si evince che i valori LW sono al di sotto di quelli di targa MLW per tutti i 12 aeromobili, con dei trend dai caratteri stagionali molto accentuati. Si riporta in Figura 51 la dispersione dei LW calcolati per l'Airbus 321 nella totalità dei voli effettuati su Lamezia Terme, ed in Figura 52 la media mobile a 21 periodi della stessa dispersione per meglio visualizzarne i trend.

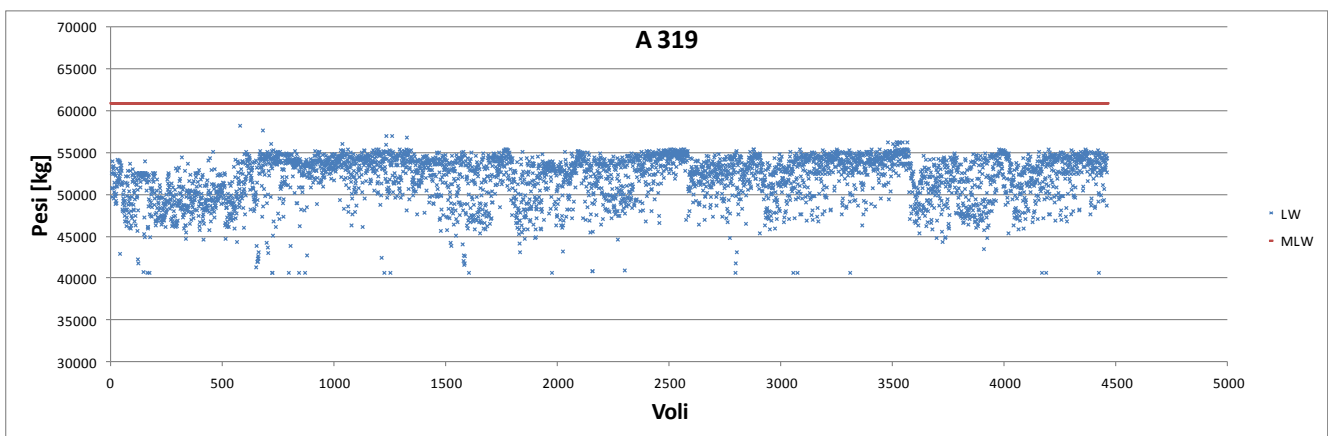


Figura 51 LW e MLW dell'aeromobile Airbus 319 2004-2015

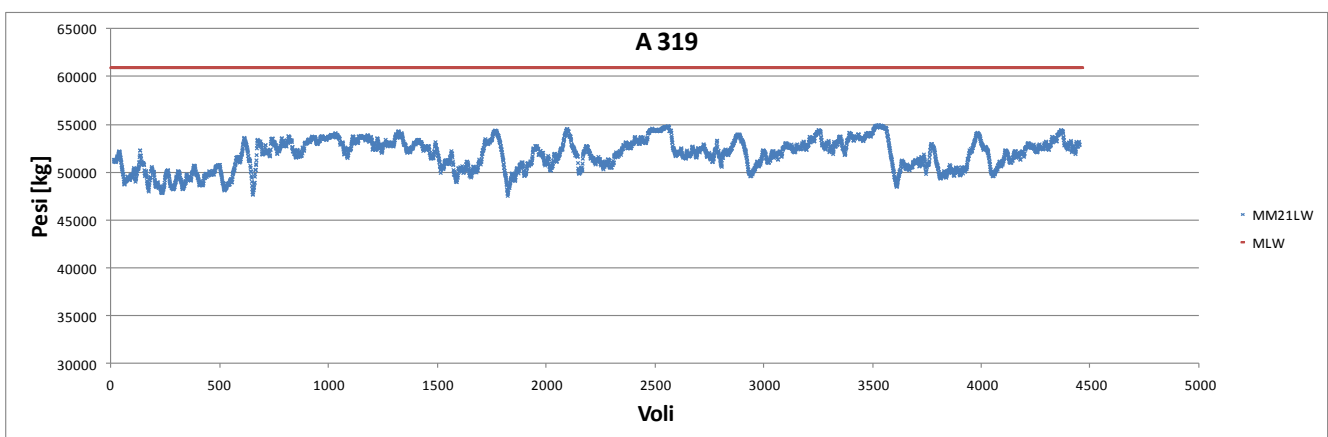


Figura 52 MM21LW e MLW dell'aeromobile Airbus 319 2004-2015

Sull'intero spettro dei 12 aeromobili considerati la seguente Tabella 38 riassume le principali statistiche:

Tabella 38 Statistiche Pesì Stimati e di Targa 2004-2015

	n° voli	LWmedio	DevSt	cv	MLW	MLW-LWmedio	(MLW-LWmedio)/LWmedio
B737	16652	48127	3970	0.082	58060	9933	0.206
M82	12637	47386	3692	0.078	58970	11584	0.244
M80	10811	45405	4891	0.108	58060	12655	0.279
A320	9655	53262	3685	0.069	64500	11238	0.211
B738	5891	57334	3416	0.060	65310	7976	0.139
A319	4460	51930	2729	0.053	61000	9070	0.175
F100	3023	33293	2540	0.076	38780	5487	0.165
A321	2343	62341	4366	0.070	75500	13159	0.211
B734	1257	45902	3889	0.085	54880	8978	0.196
CRJ	651	27733	1920	0.069	33339	5606	0.202
D328	272	11698	934	0.080	14390	2692	0.230
TU154	63	64790	6889	0.106	80000	15210	0.235

Si può ricavare che;

- la media delle differenze percentuali tra i MLW ed i LW_{medio} tra i vari aeromobili è del 20.8%; vedi la Figura 53;
- le differenze assolute ($MLW-LW_{medio}$) crescono al crescere della potenzialità di carico di atterraggio in termini di MLW; vedi la Figura 54.

Appare quindi motivato modellare con i carichi effettivi in luogo di quelli di targa.

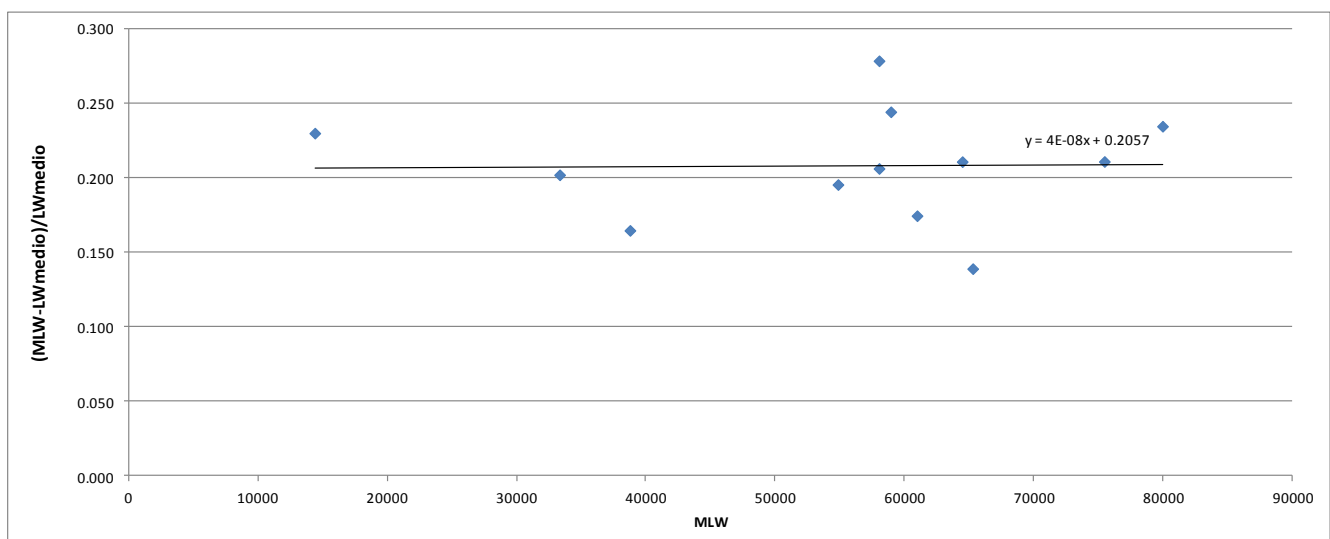


Figura 53 Differenze percentuali tra i MLW ed i LW_{medio} 2004-2015

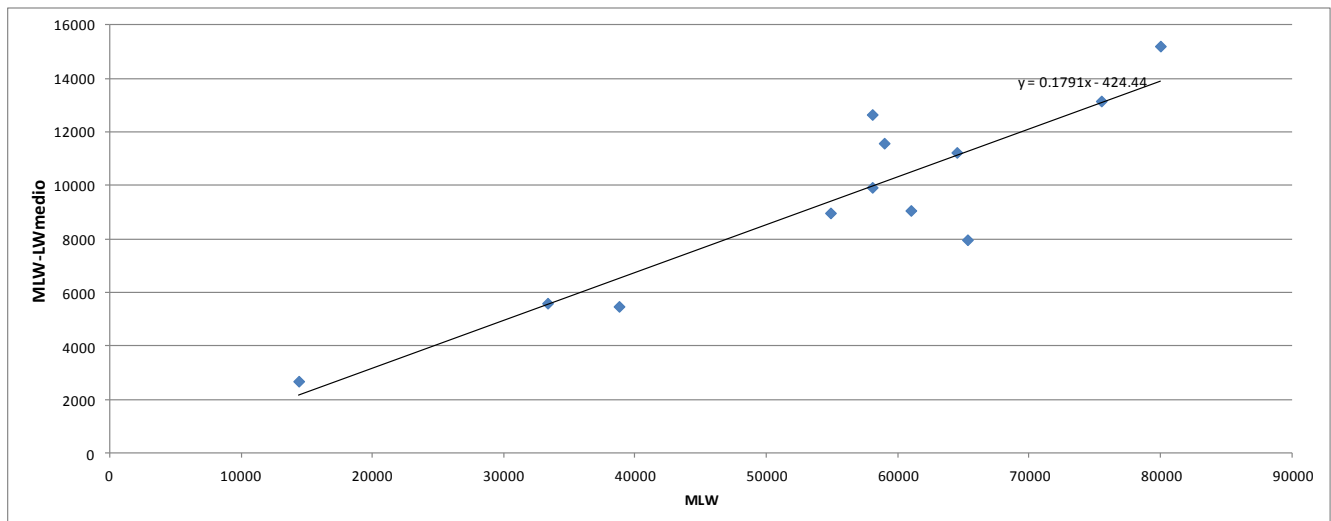


Figura 54 Differenze assolute tra i MLW ed i LW_{medio} 2004-2015

4.2 IL MODELLO MECCANICISTICO DEI CARICHI CON LE STIME DEI PESI EFFETTIVI

A partire dai pesi in atterraggio LW si è ricavato il modello meccanicistico dei carichi. Il carico cumulato da j aeromobili su ogni allineamento di misura y tiene conto della configurazione geometrica dei carrelli, della dispersione trasversale delle traiettorie, della distanza tra asse della runway ed allineamento di misura. Formalizzando, Equazione (14):

$$CLW_y = \sum_j LW_j \cdot 0.95 \cdot 0.5 \cdot \int_{y-\frac{d}{2}}^{y+\frac{d}{2}} pdf[\mu_j = (Aa_j - Sa_j); \sigma] \quad (14)$$

dove:

- LW_j = peso in atterraggio del singolo aeromobile;
- 0.95 = coefficiente di ripartizione del LW_j sul MLG;
- 0.5 = coefficiente di ripartizione sulla singola (dx o sx) gamba di forza del MLG;
- y = distanza dalla centerline dell'allineamento di misura = 3; 6;
- d = spessore della ruota di misura del Grip Tester trailer = 4" = 0.1016 m;
- $Aa_j - Sa_j$ = distanza asse aeromobile-asse gamba di forza del MLG;
- σ = deviazione standard gaussiana sull'intero spettro di traffico.

Il modello definisce come responsabile del consumo di aderenza il carico per gamba di forza del carrello.

Propedeutica è stata la ricerca delle configurazioni geometriche di tutti i 72 aeromobili dello spettro di traffico 2004-2015 (vedi Appendice C).

Fissati i pesi e le configurazioni degli aeromobili, la (14) restituisce dei CLW_y sugli allineamenti ± 3 e ± 6 variabili in funzione del parametro di dispersione σ .

4.2.1 CALIBRAZIONE DEL PARAMETRO SIGMA

Il parametro σ è stato calibrato massimizzando l'indice di determinazione della retta di regressione dei punti $CLW_y(\sigma)$ -GN iniziali di ognuno dei rami delle curve di decadimento ± 3 e ± 6 , vedi Figura 55. I punti iniziali dei rami rappresentano gli stati iniziali post-sgommatura.

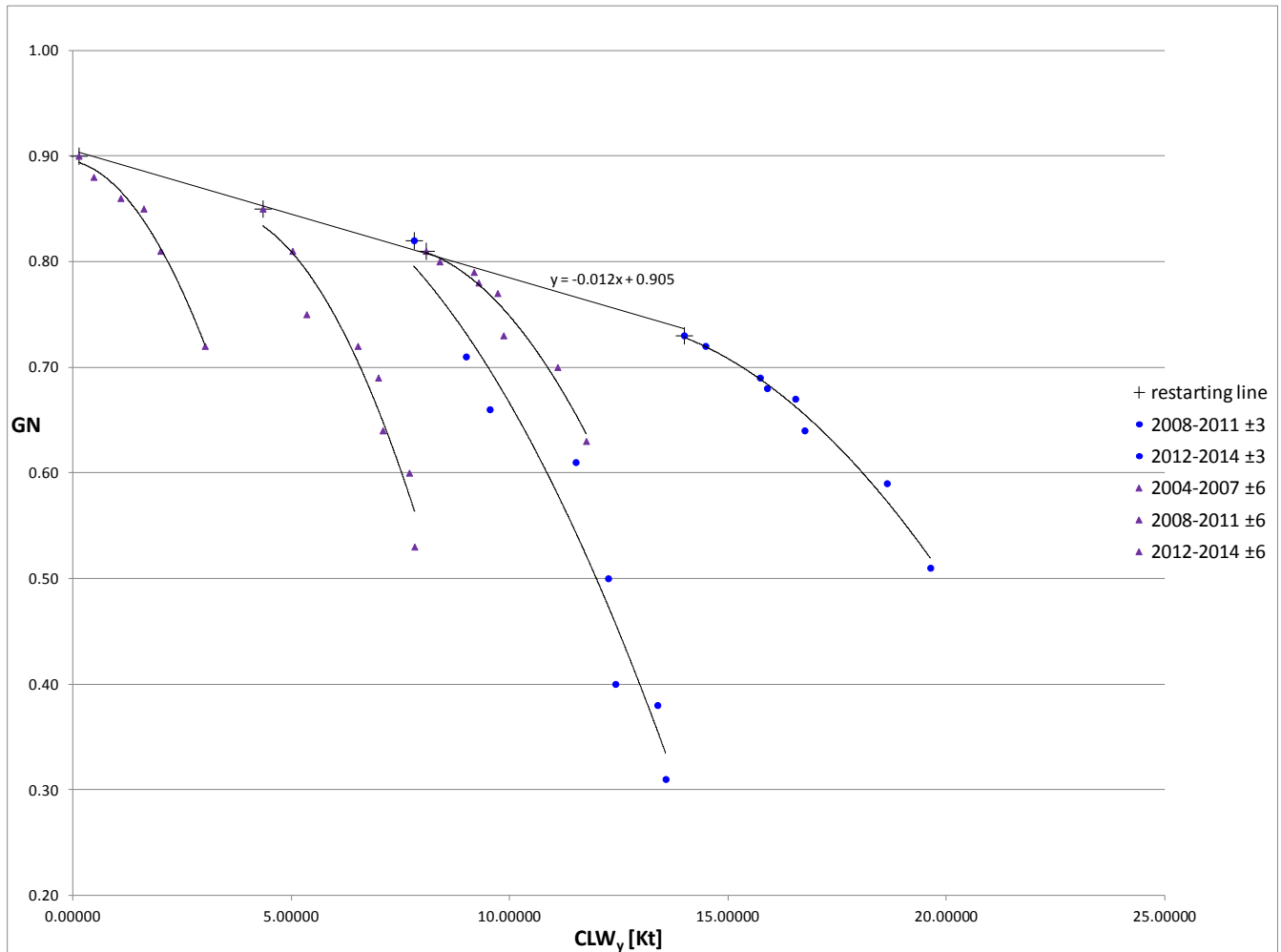


Figura 55 Calibrazione σ nel piano CLW_y -GN

Questo per il comportamento fisico del fenomeno, confermato dai dati: gli elementi di superficie tornano, post-sgommatura, ad uno stato “rinnovato” il cui livello, ovvero l’entità del recupero in GN, dipende dalla storia dei carichi e non dall’allineamento.

La regressione per i punti iniziali dei rami è stata quella lineare, essendo la più idonea anche per i 2 punti iniziali della curva di decadimento Tempo-GN ± 3 e per i 3 punti iniziali della curva di decadimento Tempo-GN ± 6 , vedi Figure 35 e 41 al Capitolo 3 (curve di decadimento CART).

Le curve di decadimento CLW_y -GN si possono quindi comporre su uno stesso diagramma senza distinzione di allineamento.

Si riportano nella Tabella 39 i carichi cumulati $CLW_{\pm 3}$ e $CLW_{\pm 6}$ in [kt] calcolati per ogni campagna di rilievo, insieme ai GN corrispondenti.

Tabella 39 CLW_y - GN 2004-2014

	Cum $LW_{\pm 3}$ [kt]	Cum $LW_{\pm 6}$ [kt]	GN ± 3	GN ± 6
8/3/2004		0.12524		0.90
31/8/2004		0.46706		0.88
16/6/2005		1.08498		0.86
21/12/2005		1.61202		0.85
31/5/2006		1.99744		0.81
3/7/2007		3.01626		0.72
SG				
24/10/2008	7.80350	4.34069	0.82	0.85
22/7/2009	8.99615	5.02071	0.71	0.81
14/10/2009	9.54027	5.34336	0.66	0.75
28/10/2010	11.50879	6.51660	0.61	0.72
29/4/2011	12.25255	6.98616	0.50	0.69
27/5/2011	12.41812	7.08840	0.40	0.64
11/10/2011	13.38060	7.69441	0.38	0.60
15/11/2011	13.56926	7.81581	0.31	0.53
SG				
15/2/2012	13.98970	8.07812	0.73	0.81
17/5/2012	14.48100	8.39054	0.72	0.80
24/10/2012	15.73002	9.17525	0.69	0.79
21/12/2012	15.89160	9.28322	0.68	0.78
18/4/2013	16.53914	9.71766	0.67	0.77
16/5/2013	16.75131	9.85352	0.64	0.73
16/12/2013	18.63703	11.09260	0.59	0.70
28/5/2014	19.63164	11.74784	0.51	0.63

Il valore ottimale di σ è risultato di 3.411 m, circa doppio di altri valori rinvenuti in letteratura, vedi Ho Sang [73].

4.3 IL MODELLO EMPIRICO - MECCANICISTICO DEL DECADIMENTO DELL'ADERENZA CON LE STIME DEI PESI EFFETTIVI

L'analisi di regressione non lineare ha consentito di esplicitare le forme funzionali dei rami delle curve di decadimento CLW_y -GN, vedi Tabelle 40 e 41 e Figura 56; risultando statisticamente

significative funzioni polinomiali di secondo grado con coefficienti di determinazione, R^2 , più alti di altre funzioni lineari o non lineari.

Tabella 40 Statistiche di regressione non lineare curva CLW_y -GN allineamento ± 3

Model is: $v_2=a_1*v_1^2+a_2*v_1+a_3$ (CLW-GN 2008-2011 ± 3)						
Dep. Var. : Var2						
Level of confidence: 95.0% (alpha=0.050)						
	Estimate	Standard	t-value	p-level	Lo. Conf	Up. Conf
a1	-0.005802	0.005905	-0.982683	0.370892	-0.020981	0.009376
a2	0.044055	0.127560	0.345365	0.743875	-0.283849	0.371959
a3	0.805149	0.668279	1.204809	0.282187	-0.912717	2.523015
Model is: $v_2=a_1*v_1^2+a_2*v_1+a_3$ (CLW-GN 2012-2014 ± 3)						
Dep. Var. : Var2						
Level of confidence: 95.0% (alpha=0.050)						
	Estimate	Standard	t-value	p-level	Lo. Conf	Up. Conf
a1	-0.003665	0.001301	-2.81636	0.037268	-0.007009	-0.000320
a2	0.086139	0.043851	1.96435	0.106693	-0.026584	0.198863
a3	0.240433	0.366050	0.65683	0.540314	-0.700529	1.181396

Tabella 41 Statistiche di regressione non lineare curva CLW_y -GN allineamento ± 6

Model is: $v_2=a_1*v_1^2+a_2*v_1+a_3$ (CLW-GN 2004-2007 ± 6)						
Dep. Var. : Var2						
Level of confidence: 95.0% (alpha=0.050)						
	Estimate	Standard	t-value	p-level	Lo. Conf	Up. Conf
a1	-0.016193	0.004411	-3.67070	0.034983	-0.030232	-0.002154
a2	-0.008864	0.014207	-0.62396	0.576879	-0.054077	0.036348
a3	0.895075	0.009247	96.79318	0.000002	0.865646	0.924504
Model is: $v_2=a_1*v_1^2+a_2*v_1+a_3$ (CLW-GN 2008-2011 ± 6)						
Dep. Var. : Var2						
Level of confidence: 95.0% (alpha=0.050)						
	Estimate	Standard	t-value	p-level	Lo. Conf	Up. Conf
a1	-0.014316	0.010196	-1.40410	0.219252	-0.040526	0.011894
a2	0.096381	0.125264	0.76942	0.476399	-0.225620	0.418382
a3	0.685101	0.371847	1.84243	0.124757	-0.270761	1.640963
Model is: $v_2=a_1*v_1^2+a_2*v_1+a_3$ (CLW-GN 2012-2014 ± 6)						
Dep. Var. : Var2						
Level of confidence: 95.0% (alpha=0.050)						
	Estimate	Standard	t-value	p-level	Lo. Conf	Up. Conf
a1	-0.008745	0.003878	-2.25500	0.073813	-0.018713	0.001224
a2	0.126601	0.077100	1.64203	0.161506	-0.071591	0.324794
a3	0.356558	0.378854	0.94115	0.389840	-0.617318	1.330434

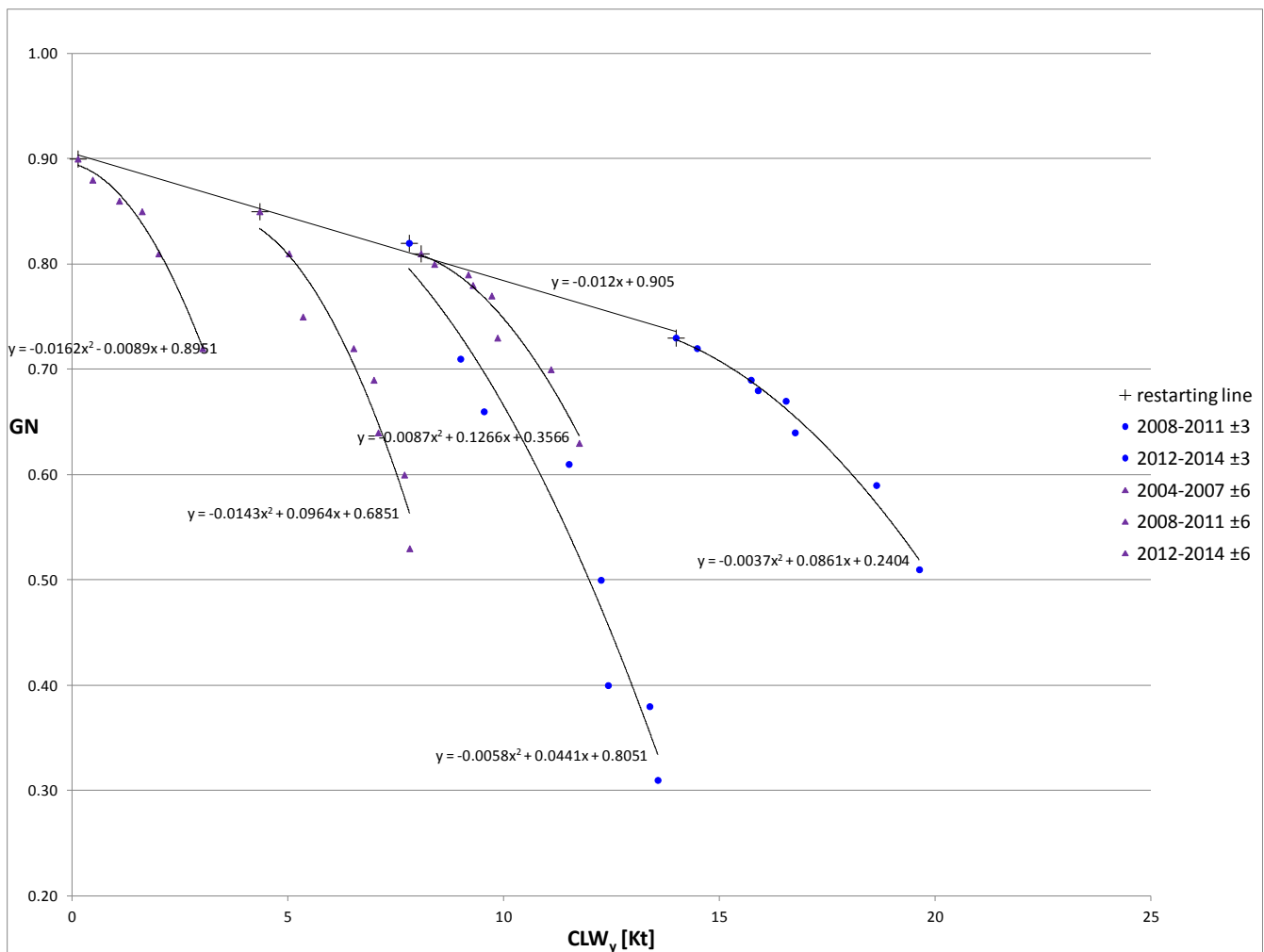


Figura 56 Curve di decadimento CLW_y -GN 2004-2014

Con successiva procedura di ottimizzazione euristica si sono ricavate le leggi di variabilità dei parametri a_1 , a_2 e a_3 delle funzioni polinomiali quadratiche nel piano CLW_y -GN.

Ne consegue il modello empirico - meccanicistico dell'aderenza, Equazione (15):

$$GN = GN_{new} - (\Delta GN' + \Delta GN'') = GN_{new} - [\Delta GN'(CLW_y) - \Delta GN''(GN_{restart}; CLW_y)] \quad (15)$$

in cui:

GN_{new} = valore del GN per la pavimentazione nuova;

$\Delta GN'$ = perdita di aderenza di fondo non recuperabile;

$\Delta GN''$ = perdita di aderenza temporanea recuperabile;

$$GN'(CLW_y) = GN_{restart} = -0.01CLW_y + 0.91;$$

$$GN''(GN_{restart}; CLW_y) = a_1 CLW_y^2 + a_2 CLW_y + a_3 CLW_y;$$

$$a_1 = -0.41905 GN_{restart}^2 + 0.6179 GN_{restart} - 0.2299;$$

$$a_2 = -82.445 GN_{restart}^3 + 196.49 GN_{restart}^2 - 155.64 GN_{restart} + 41.03;$$

$$a_3 = -4034 GN_{restart}^4 + 13281 GN_{restart}^3 - 16351 GN_{restart}^2 + 8923.8 GN_{restart} - 1821.35.$$

Si riportano nella Figura 57 i grafici delle leggi di variabilità dei parametri a_1 , a_2 ed a_3 .

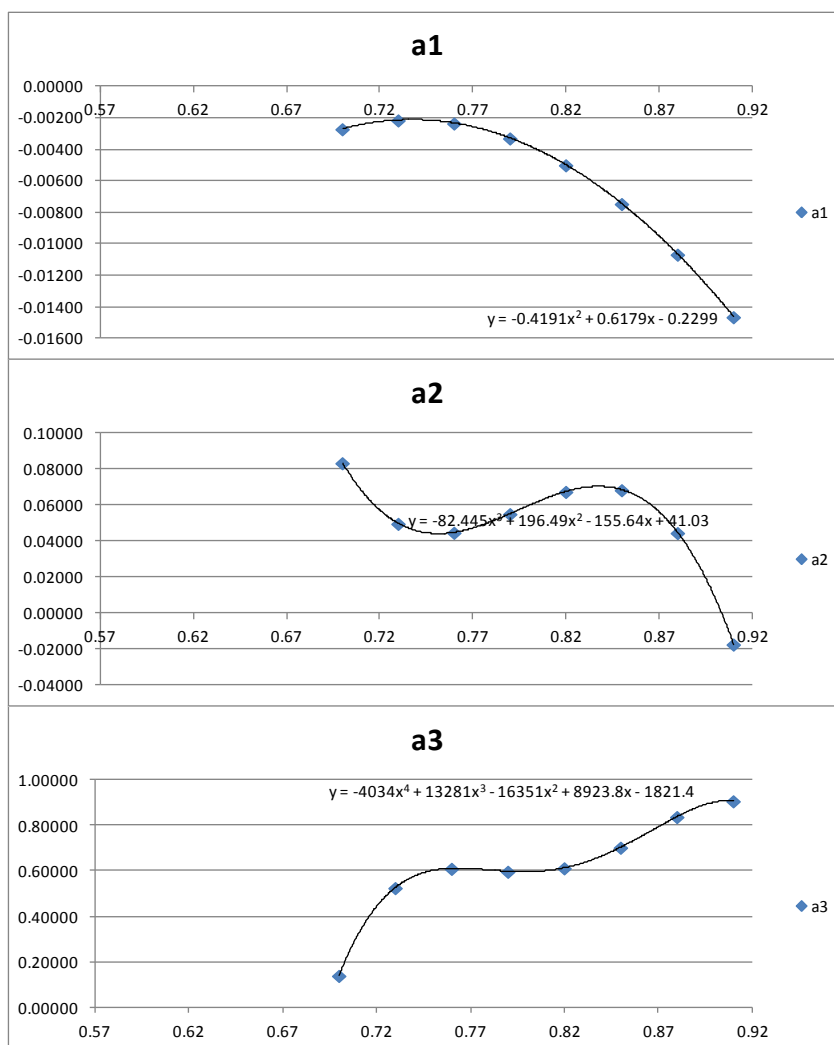


Figura 57 Leggi di variabilità dei parametri a1, a2, a3 modello CLW_y - GN

Nel modello possiamo distinguere tra perdita di aderenza *di fondo non recuperabile* con l'operazione manutentiva di sgommatura, imputabile ad un consumo di tessitura; e perdita di aderenza *temporanea recuperabile* con operazioni di sgommatura, imputabile al ricoprimento della tessitura da parte dei depositi gommosi.

La forma funzionale della seconda quota di aderenza evidenzia che essa dipende, oltre che dall'accumularsi dei carichi, anche dai punti iniziali delle curve cioè dagli stati iniziali post-sgommatura, vedi schema in Figura 58. Per uno stesso valore del CLW_y in ascissa si possono avere diversi valori del GN'' : ciò dipende in quali punti sulle curve precedenti si trovava l'elemento di superficie quando si sono effettuate le operazioni di manutenzione riguadagnando posizione sulla retta GN' . Ovvero dalla storia passata in termini di carichi accumulati ed operazioni manutentive eseguite.

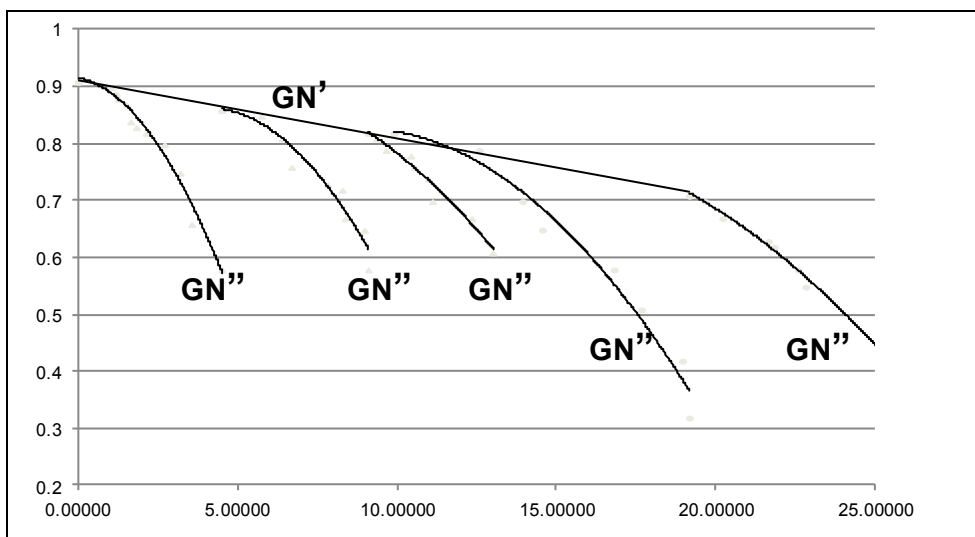


Figura 58 Schema GN' - GN''

Del modello empirico - meccanicistico è stato ricavato un abaco graduato nel piano CLW_y - GN, che può rendere conto visivamente del fenomeno, oltre che utilizzarsi per calcolo grafico, vedi Figura 59.

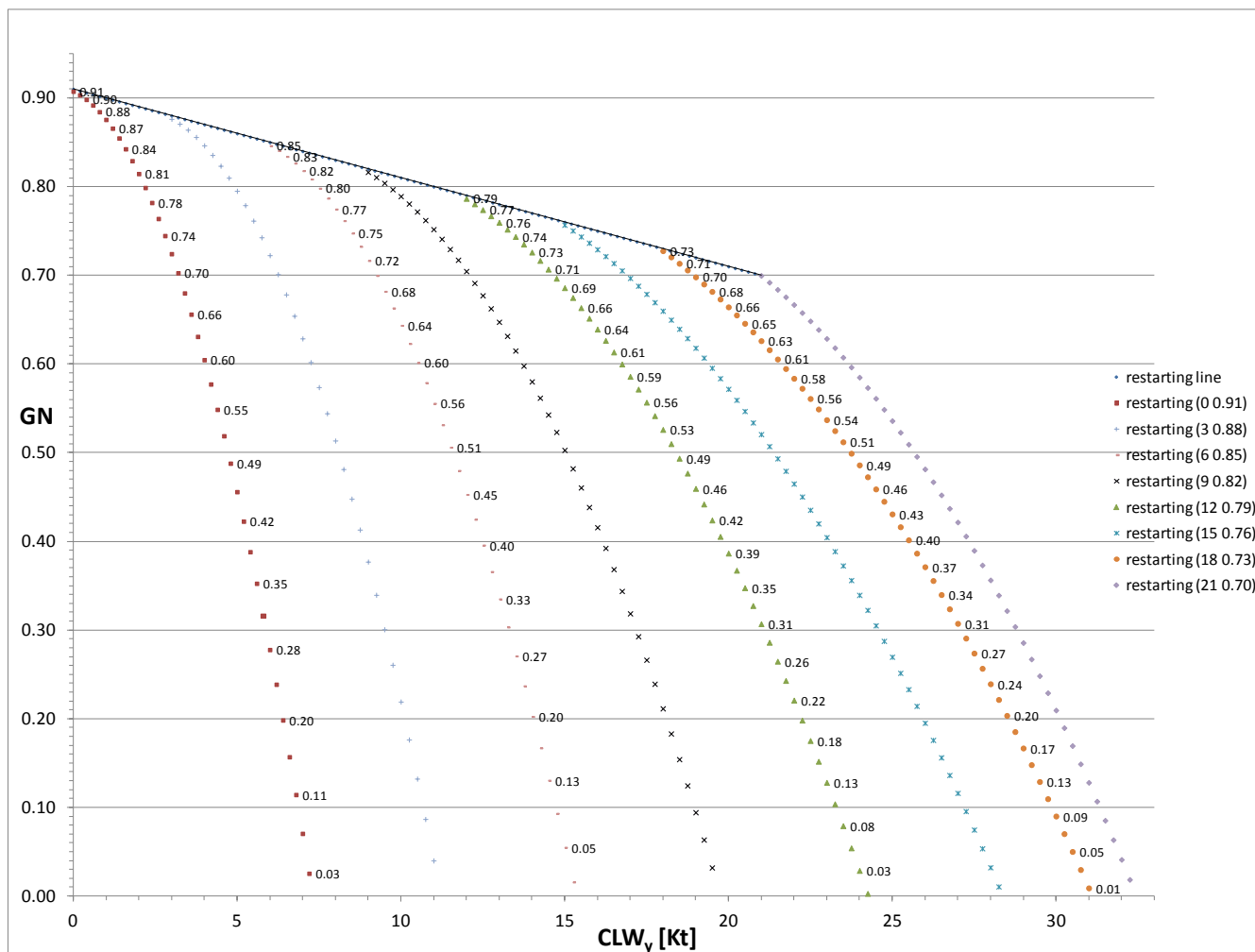


Figura 59 Abaco graduato CLW_y - GN del modello di decadimento dell'aderenza

4.3.1 RINTRACCIAMENTO DEI TRUE RESTARTING POINTS

La disposizione dei punti delle curve di decadimento CLW_y -GN (vedi Tabella 39) sull'abaco consente di rintracciare con procedimento di immediata intuizione (i.e.: estensione dei rami fino alla retta $GN_{restarting}$) anche i valori di GN quali sarebbero stati rilevati immediatamente dopo l'operazione di sgommatura (True Restarting Points), tenendo conto che ciò non si è a rigore verificato; vedi Figura 60.

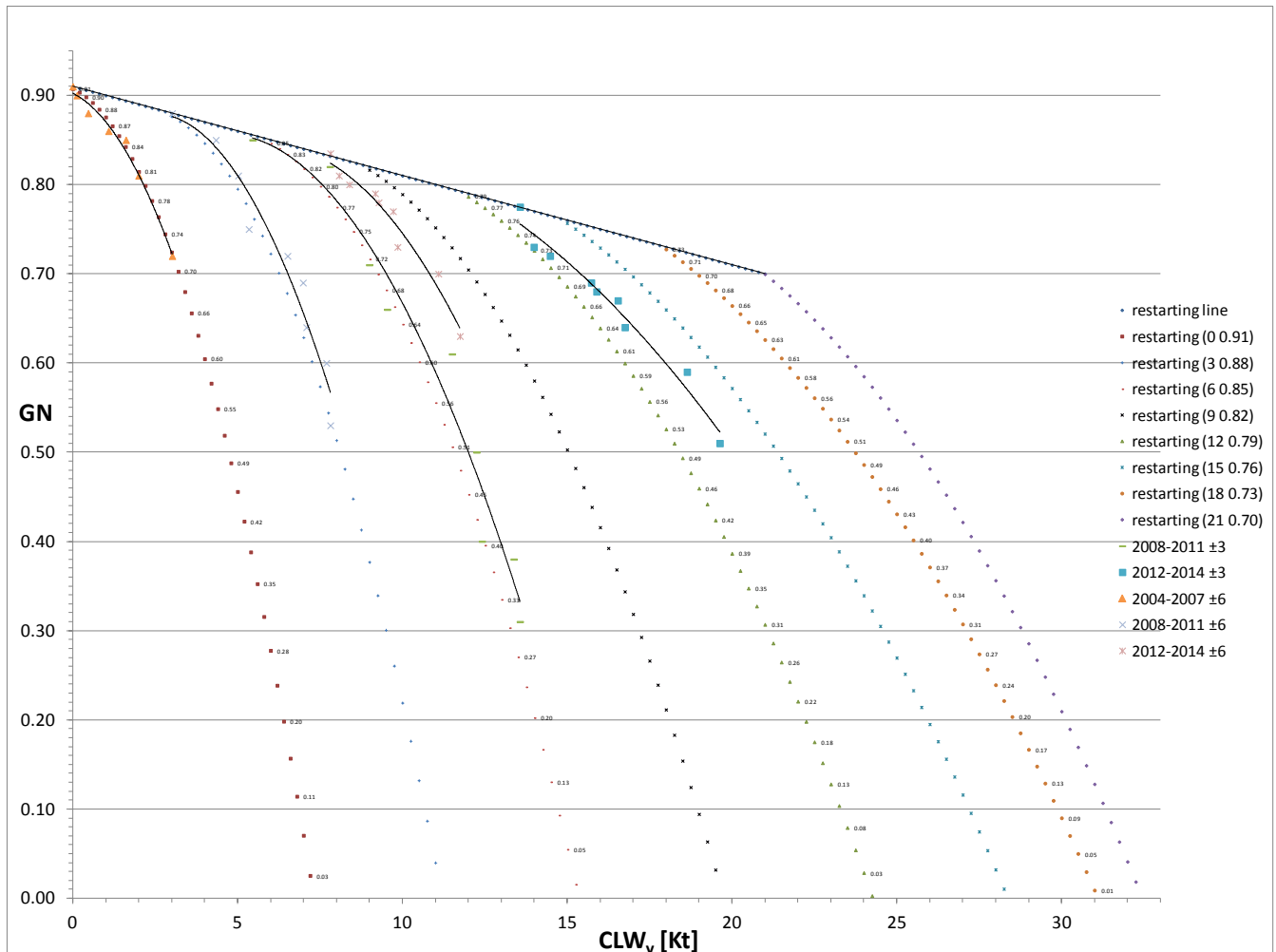


Figura 60 Rintracciamento dei True Restarting Points post-sgommatura

4.3.2 VALIDAZIONE DEL MODELLO

La validazione del modello empirico - meccanicistico è stata effettuata confrontando i risultati predetti dal modello con 8 punti sperimentali: 6 derivanti dai rilievi 2004-2007 sull'allineamento ± 3 e 2 dal rilievo 11/02/2015 su entrambi gli allineamenti ± 3 e ± 6 (vedi Tabella 9 § 2.3).

Il risultato sul grafico Observed_vs_Predicted restituisce una disposizione dei punti sperimentali alquanto ben allineati alla bisettrice, vedi Figura 61.

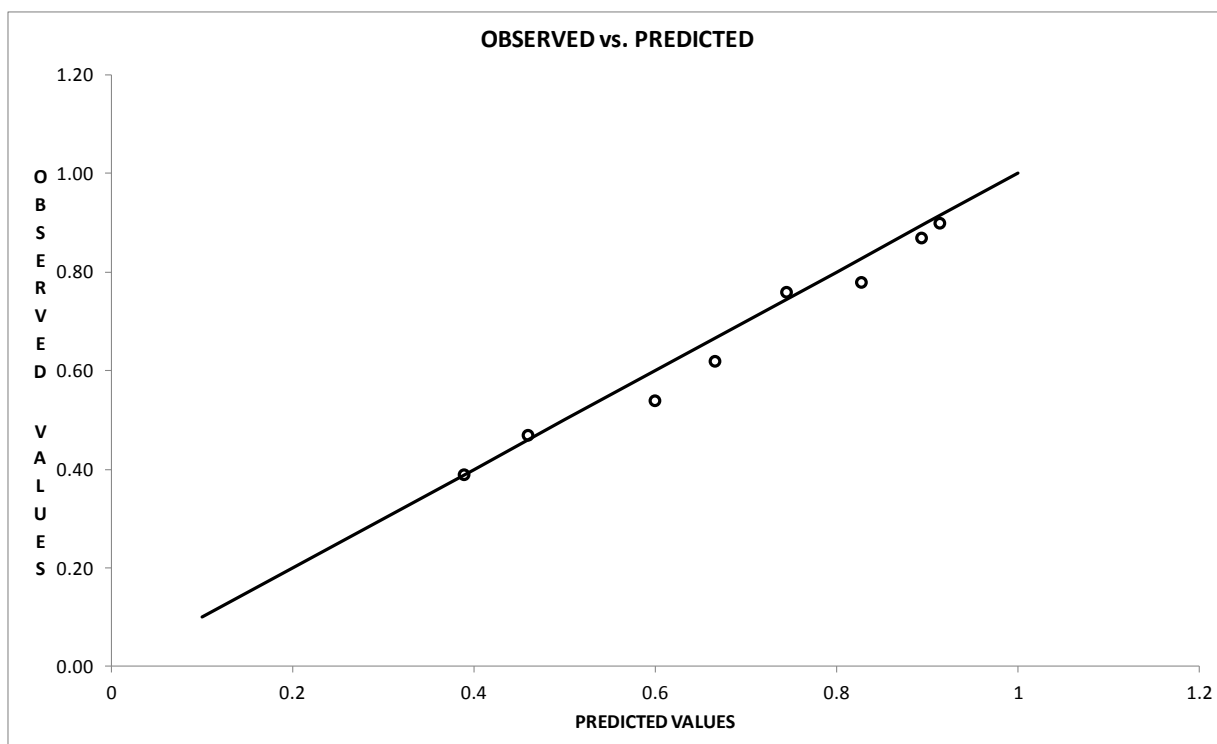


Figura 61 Observed_vs_Predicted modello CLW_y - GN

Il residuo medio ottenuto è di 0.0198 con deviazione standard di 0.0284, vedi Tabella 42 e Figura 62.

Tabella 42 Residuals_vs_Predicted modello CLW_y - GN

	predicted GN	observed GN	residual
8/3/2004 ±3	0.9131857	0.90	0.0132
31/8/2004 ±3	0.8930229	0.87	0.0230
16/6/2005 ±3	0.8266433	0.78	0.0466
21/12/2005 ±3	0.7440422	0.76	-0.0160
31/5/2006 ±3	0.6651261	0.62	0.0451
3/7/2007 ±3	0.3882947	0.39	-0.0017
11/2/2015 ±3	0.4588295	0.47	-0.0112
11/2/2015 ±6	0.5988707	0.54	0.0589
media			0.0198
dev.st			0.0284

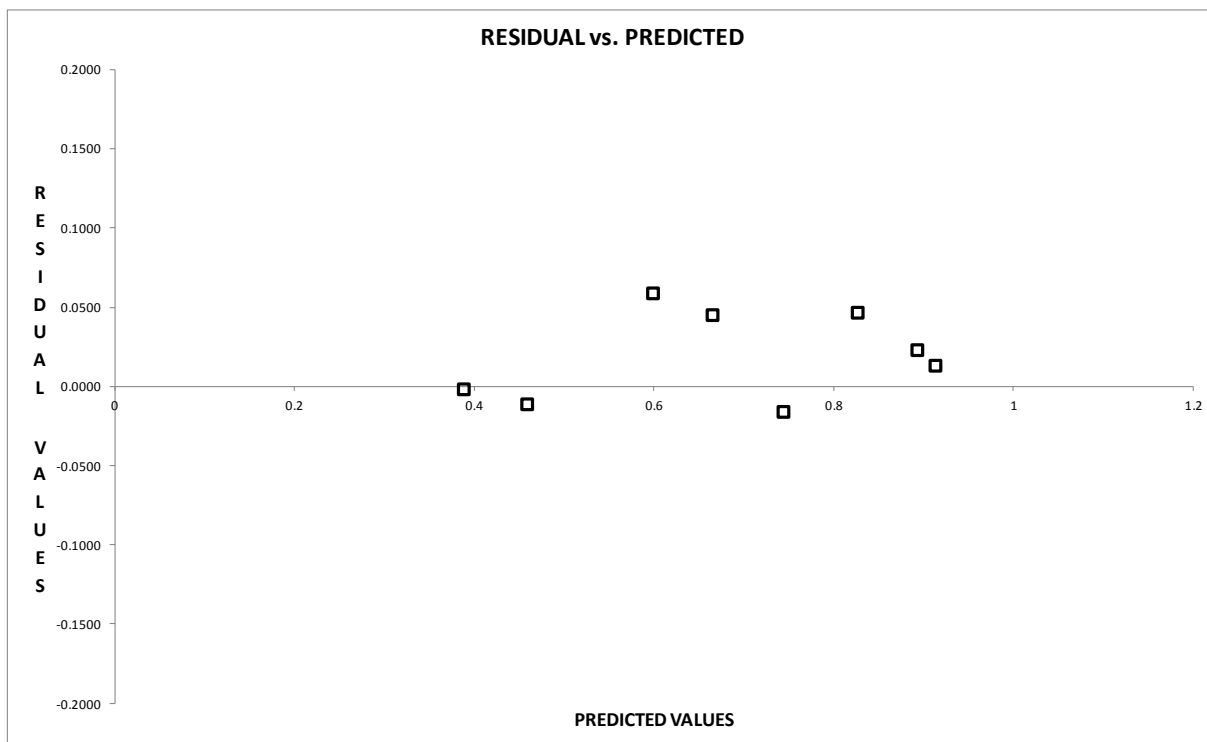


Figura 62 Residuals_vs_Predicted modello $CLW_y - GN$

Sulla Carta di Controllo tutti gli 8 residui sono contenuti nella fascia $[m-2s, m+2s]$, vedi Figura 63.

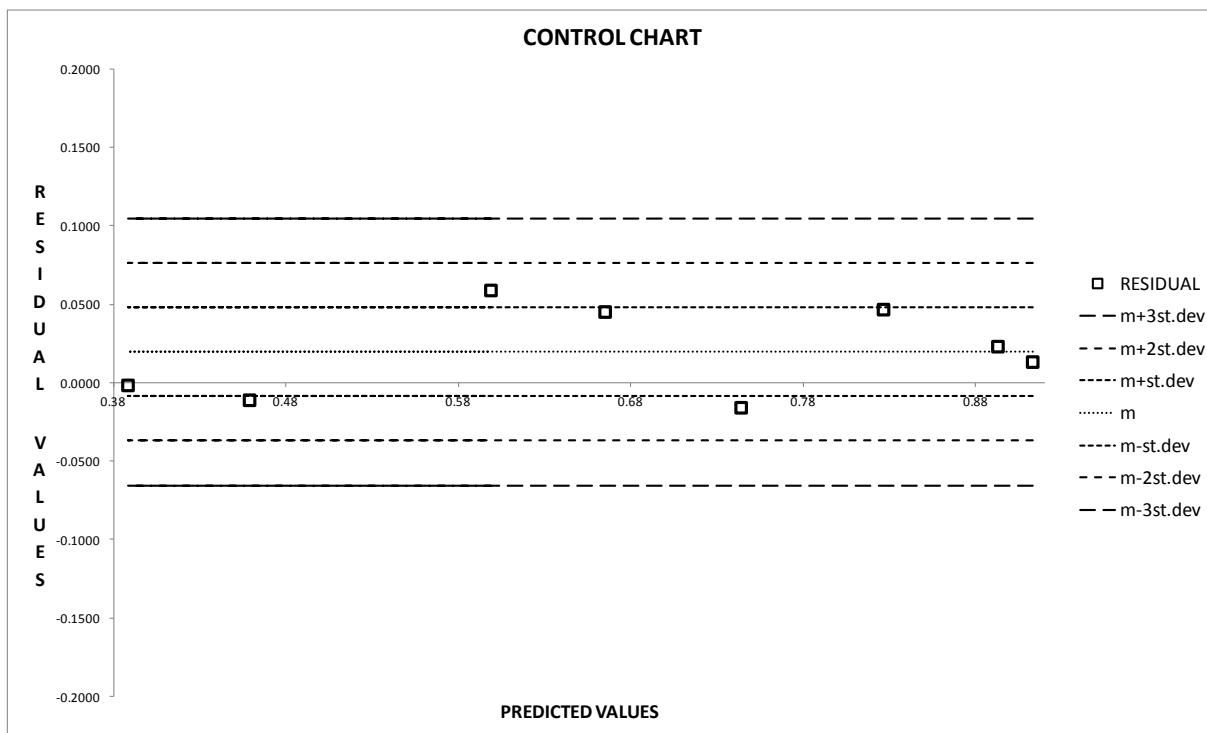


Figura 63 Carta di Controllo modello $CLW_y - GN$

I due indicatori statistici di accuratezza:

- MAD (Mean Absolute Deviation, esprime l'accuratezza nella stessa unità di misura dei dati);
 - MAPE (Mean Absolute Percentage Error, esprime l'accuratezza come una percentuale dell'errore);
- sono pari rispettivamente a 0.027 e 4.1482, indicando una buona accuratezza, vedi Tabella 43.

Tabella 43 Accuratezze MAD e MAPE modello CLW_y - GN

	observed GN	residual	absolute residual	absolute percentage residual
8/3/2004 ±3	0.90	0.0132	0.013186	0.014651
31/8/2004 ±3	0.87	0.0230	0.023023	0.026463
16/6/2005 ±3	0.78	0.0466	0.046643	0.059799
21/12/2005 ±3	0.76	-0.0160	0.015958	0.020997
31/5/2006 ±3	0.62	0.0451	0.045126	0.072784
3/7/2007 ±3	0.39	-0.0017	0.001705	0.004373
11/2/2015 ±3	0.47	-0.0112	0.011171	0.023767
11/2/2015 ±6	0.54	0.0589	0.058871	0.10902
	MAD		0.02696	
	MAPE			4.148169

4.3.3 APPLICAZIONI DEL MODELLO: ALLINEAMENTO DI MASSIMO CUMULO E PROGRAMMAZIONE SECONDO I LIMITI DI NORMATIVA

Per l'allineamento di massimo cumulo, è stata preliminarmente effettuata analisi statistica del parametro (Aa – Sa).

L'analisi ha mostrato ha mostrato picchi di frequenze assolute in corrispondenza dei MLG con Aa – Sa pari a:

- 1.78m (frequenza assoluta n= 23594);
- 2.30m (frequenza assoluta n= 22787);
- 3.19m (frequenza assoluta n= 16188);

restituendo nel complesso della distribuzione:

- media= 2.37m;
- moda= 1.78m;
- mediana= 2.30m.

In Figura 64 è riportato l'istogramma della distribuzione, con Var1 si intende il parametro (Aa - Sa).

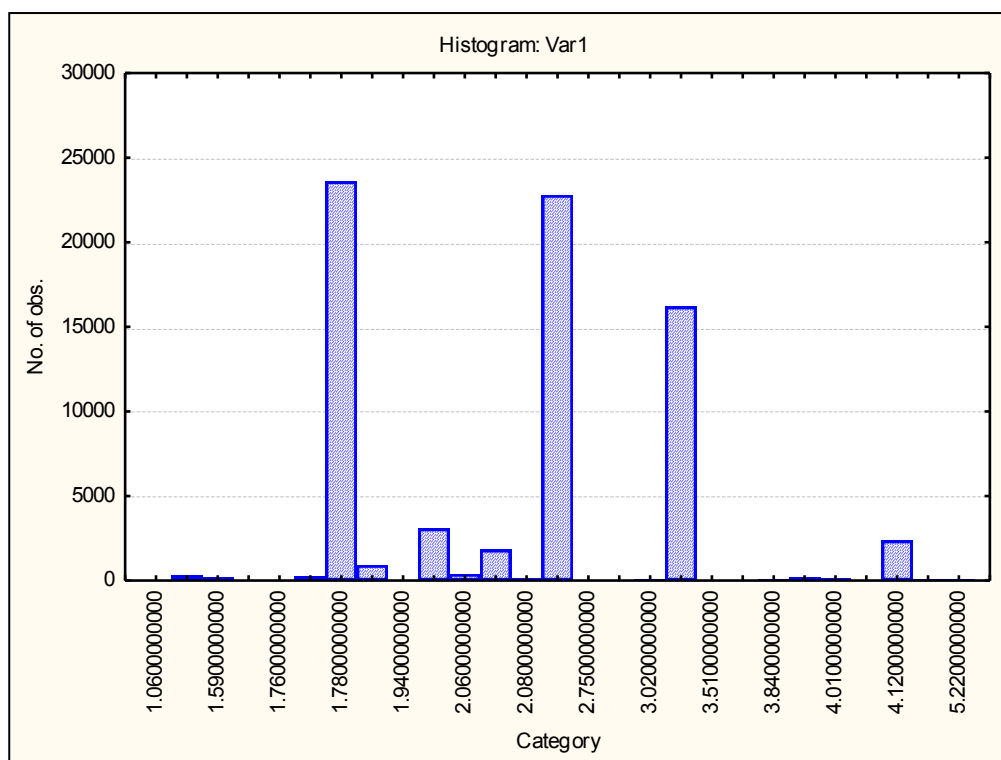


Figura 64 Istogramma della distribuzione (Aa-Sa)

L'applicazione del modello dei carichi, Equazione (14), agli allineamenti in corrispondenza dei valori di media, moda e mediana, consente di tracciare la serie storica della distribuzione dei carichi cumulati $CLW_{\pm 1.78}$, $CLW_{\pm 2.30}$ e $CLW_{\pm 2.37}$ trasversalmente alla pista.

I risultati del calcolo sono riportati in Tabella 44.

Tabella 44 Serie storica Carichi Cumulati allineamenti ± 1.78 , ± 2.30 , ± 2.37

	$CLW_{\pm 1.78}$ [Kt]	$CLW_{\pm 2.3}$ [Kt]	$CLW_{\pm 2.37}$ [Kt]
8/3/2004	0.20860	0.21208	0.21219
31/8/2004	0.84926	0.85444	0.85367
16/6/2005	2.02746	2.03448	2.03190
21/12/2005	2.97904	2.99249	2.98914
31/5/2006	3.70020	3.71638	3.71214
3/7/2007	5.59808	5.62210	5.61560
SG			
24/10/2008	7.98805	8.03048	8.02231
22/7/2009	9.19776	9.25130	9.24252
14/10/2009	9.74201	9.80375	9.79514
28/10/2010	11.70552	11.79927	11.79159
29/4/2011	12.42974	12.54290	12.53659

27/5/2011	12.59227	12.70923	12.70315
11/10/2011	13.53143	13.67266	13.66824
15/11/2011	13.71363	13.86041	13.85643
SG			
15/2/2012	14.12455	14.28170	14.27841
17/5/2012	14.60184	14.77226	14.76994
24/10/2012	15.82268	16.02366	16.02338
21/12/2012	15.97693	16.18335	16.18355
18/4/2013	16.59365	16.82249	16.82468
16/5/2013	16.79938	17.03410	17.03673
16/12/2013	18.60959	18.90392	18.91153
28/5/2014	19.56338	19.88955	19.89985
11/2/2015	20.72138	21.06685	21.07776

Risulta il carico cumulato maggiore sull'allineamento ± 2.37 , ovvero ad una distanza dalla centerline pari alla media degli (Aa – Sa) dei MLG degli aeromobili.

In Tabella 45 e Figura 65 la serie storica dei carichi cumulati trasversalmente alla pista calcolata per gli allineamenti:

0, 1.50m, 2.37m, 3.00m, 4.50m, 6.00m, 7.50m, 9.00m, 12m, 15m.

Tabella 45 Serie storica Carichi Cumulati

allineamenti 0, 1.50m, 2.37m, 3.00m, 4.50m, 6.00m, 7.50m, 9.00m, 12m, 15m

	CLW 0 [Kt]	CLW ± 1.50 [Kt]	CLW ± 2.37 [Kt]	CLW ± 3.00 [Kt]	CLW ± 4.50 [Kt]	CLW ± 6.00 [Kt]	CLW ± 7.50 [Kt]	CLW ± 9.00 [Kt]	CLW ± 12 [Kt]	CLW ± 15 [Kt]
8/3/2004	0.16633	0.20480	0.21219	0.20928	0.17760	0.12524	0.07342	0.03581	0.00496	0.00032
31/8/2004	0.70121	0.83859	0.85367	0.83135	0.68378	0.46706	0.26522	0.12535	0.01627	0.00102
16/6/2005	1.68682	2.00470	2.03190	1.97200	1.60664	1.08498	0.60785	0.28282	0.03529	0.00212
21/12/2005	2.47092	2.94404	2.98914	2.90507	2.37593	1.61202	0.90831	0.42556	0.05406	0.00333
31/5/2006	3.06990	3.65697	3.71214	3.60693	2.94762	1.99744	1.12346	0.52505	0.06618	0.00403
3/7/2007	4.64462	5.53286	5.61560	5.45563	4.45564	3.01626	1.69396	0.79006	0.09896	0.00598
SG										
24/10/2008	6.60502	7.89072	8.02231	7.80350	6.39240	4.34069	2.44540	1.14412	0.14418	0.00877
22/7/2009	7.59298	9.08329	9.24252	8.99615	7.38116	5.02071	2.83364	1.32827	0.16802	0.01025
14/10/2009	8.02935	9.61819	9.79514	9.54027	7.84080	5.34336	3.02200	1.41978	0.18050	0.01108
28/10/2010	9.59678	11.54667	11.79159	11.50879	9.50859	6.51660	3.70752	1.75259	0.22555	0.01399
29/4/2011	10.15498	12.25405	12.53659	12.25255	10.15740	6.98616	3.98943	1.89297	0.24539	0.01532
27/5/2011	10.28153	12.41307	12.70315	12.41812	10.30029	7.08840	4.05011	1.92285	0.24954	0.01559
11/10/2011	11.00795	13.33088	13.66824	13.38060	11.13831	7.69441	4.41418	2.10460	0.27554	0.01737
15/11/2011	11.14661	13.50849	13.85643	13.56926	11.30450	7.81581	4.48772	2.14154	0.28086	0.01773
SG										
15/2/2012	11.46466	13.91016	14.27841	13.98970	11.66928	8.07812	4.64405	2.21875	0.29157	0.01843

17/5/2012	11.83141	14.37611	14.76994	14.48100	12.09927	8.39054	4.83251	2.31313	0.30512	0.01935
24/10/2012	12.77874	15.56973	16.02338	15.73002	13.18518	9.17525	5.30398	2.54871	0.33897	0.02168
21/12/2012	12.89459	15.71974	16.18355	15.89160	13.32999	9.28322	5.37095	2.58327	0.34426	0.02207
18/4/2013	13.35602	16.31919	16.82468	16.53914	13.91162	9.71766	5.64076	2.72258	0.36558	0.02362
16/5/2013	13.51377	16.51996	17.03673	16.75131	14.09789	9.85352	5.72312	2.76408	0.37164	0.02404
16/12/2013	14.88244	18.28253	18.91153	18.63703	15.77447	11.09260	6.48446	3.15305	0.43001	0.02823
28/5/2014	15.60265	19.21100	19.89985	19.63164	16.65996	11.74784	6.88749	3.35910	0.46092	0.03044
11/2/2015	16.52226	20.34329	21.07776	20.78873	17.64189	12.44026	7.29344	3.55709	0.49242	0.03211

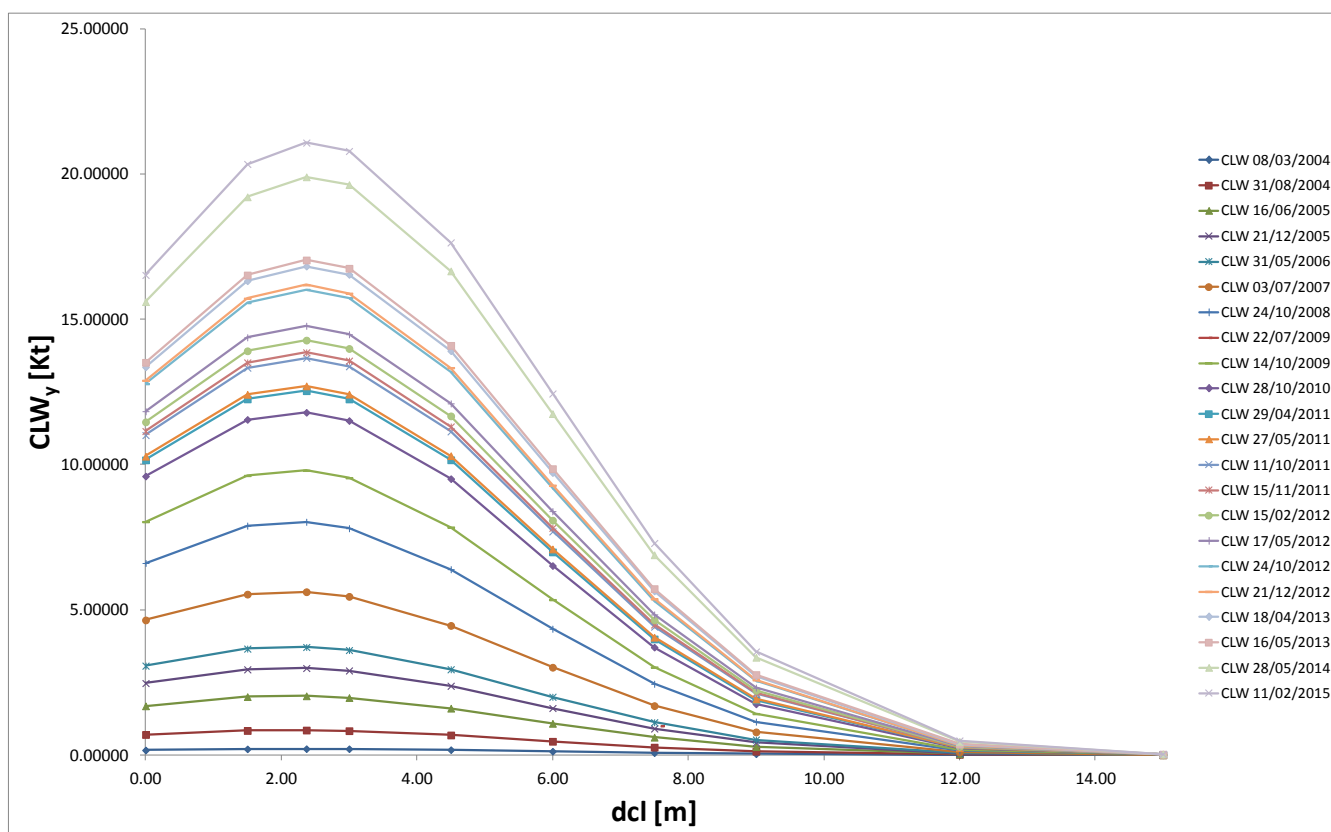


Figura 65 Serie storica Carichi Cumulati
allineamenti 0, 1.50m, 2.37m, 3.00m, 4.50m, 6.00m, 7.50m, 9.00m, 12m, 15m

Sull'abaco di Figura 59, duale del modello empirico - meccanistico Equazione (15), è possibile rintracciare i rami isocroni delle curve di decadimento ± 3 e ± 6 isocrone, cioè che descrivono il livello di aderenza nello stesso momento e con i rispettivi carichi cumulati.

Ipotizzando di eseguire l'operazione manutentiva di sgommatura quando il primo ramo della curva ± 3 arriva al livello minimo di aderenza Minimum Friction Level (MFL), fissato dalla Normativa per il Grip Tester trailer condotto alla velocità di 65 km/h in 0.43, viene determinata anche l'estensione del ramo della curva ± 6 , dopodiché entrambe le curve risalgono ad un livello GN_{restart} in corrispondenza dei propri carichi cumulati. Ugualmente per il successivo raggiungimento del MFL.

Riportando sull'abaco, Figura 66, si può agevolmente visualizzare:

- il primo ramo, che parte dalla condizione di pavimentazione nuova, comune per il primo tratto ad entrambi gli allineamenti: il ± 6 termina prima ed il ± 3 prosegue fino al MFL;
- i rami isocroni successivi con sfasamento crescente al crescere dei carichi.

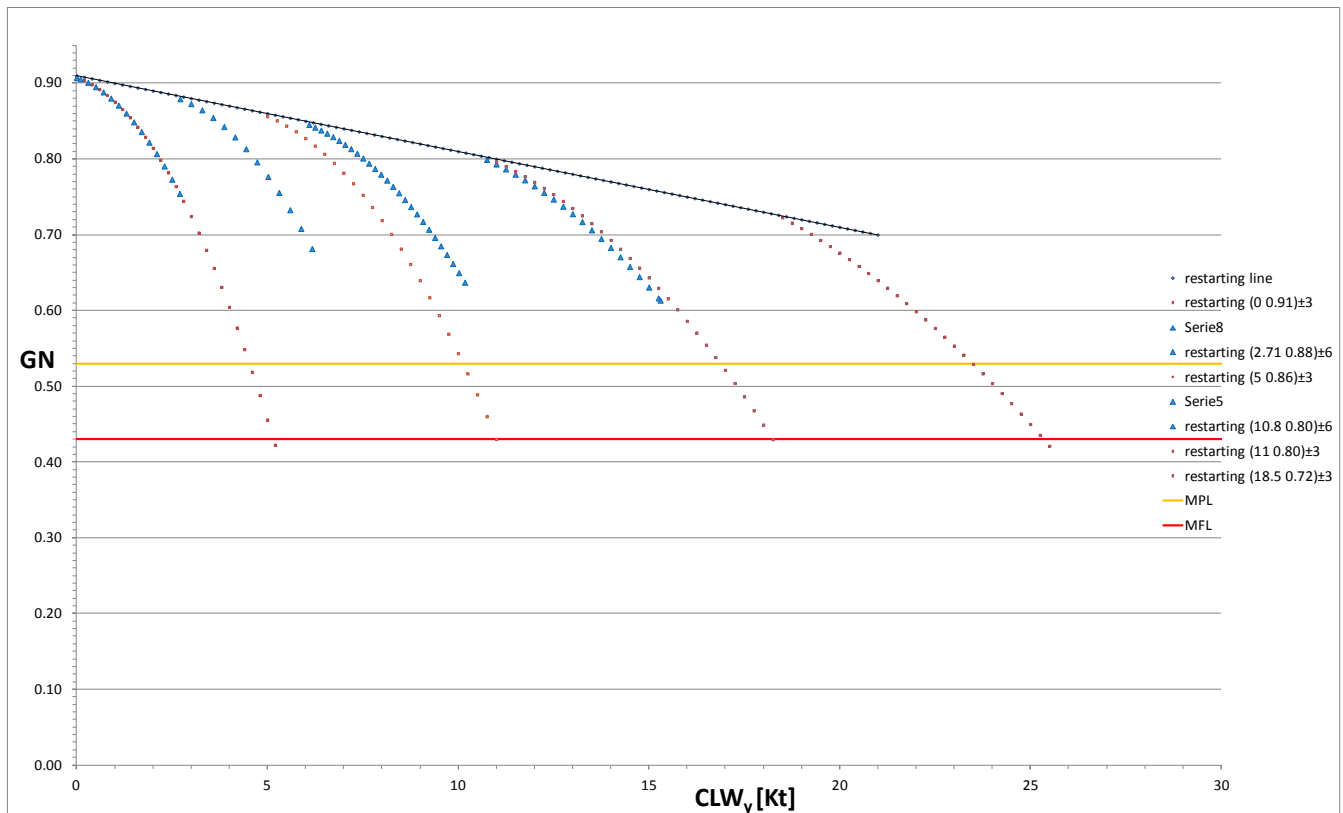


Figura 66 Rami isocroni delle curve di decadimento ± 3 e ± 6

Considerando invece di portare al livello minimo di Normativa la curva ± 2.37 di massimo cumulo, dalla serie storica dei carichi cumulati $CLW_{\pm 2.37}$ già riportata in Tabella 45, e diagrammata in Figura 67 verso il tempo (in anni):

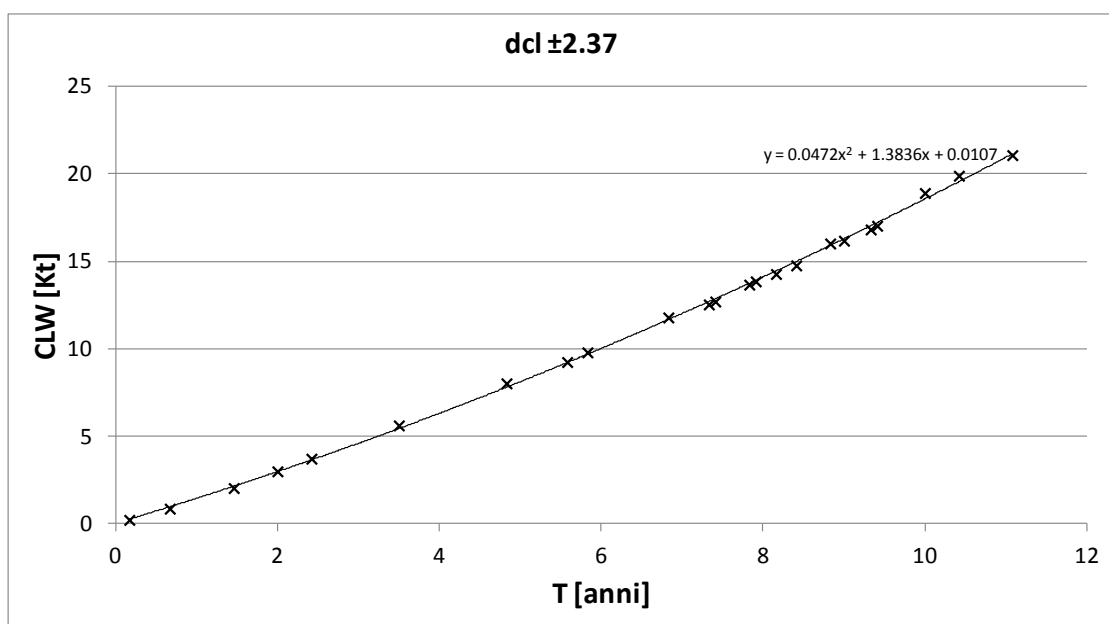


Figura 67 Relazione Tempo - $CLW_{\pm 2.37}$

si possono ricavare a ritroso quali dovevano essere le date di sgommatura, considerando l'allineamento ± 2.37 di massimo cumulo invece del ± 3 :

1^a sgommatura: $CLW_{\pm 2.37} = 5.2$ kt \rightarrow 3.35 anni, ovvero: aprile 2007 (in luogo di luglio 2007);

2^a sgommatura: $CLW_{\pm 2.37} = 11$ kt \rightarrow 6.5 anni, ovvero: giugno 2010 (in luogo di novembre 2011);

3^a sgommatura: $CLW_{\pm 2.37} = 18.4$ kt \rightarrow 9.95 anni, ovvero: dicembre 2013.

4^a sgommatura: $CLW_{\pm 2.37} = 25.4$ kt \rightarrow 12.8 anni, ovvero: ottobre 2016.

4.4 IL MODELLO MECCANICISTICO DEI CARICHI CON I PESI DI TARGA

Si è ricercato anche un modello empirico - meccanicistico che facesse riferimento ai pesi di targa, direttamente disponibili agli operatori aeroportuali.

Sulla base dei Maximum Landing Weight (MLW) di ciascun aeromobile j dello spettro di traffico, si è applicato un analogo modello dei carichi, Equazione (16):

$$CMLW_y = \sum_j MLW_j \cdot 0.95 \cdot 0.5 \cdot \int_{y-\frac{d}{2}}^{y+\frac{d}{2}} pdf[\mu_j = (Aa_j - Sa_j); \sigma] \quad (16)$$

nel quale il parametro σ (deviazione standard gaussiana della dispersione trasversale delle traiettorie sull'intero spettro) non è stato ri-calibrato, ma si è adoperato quello disponibile dalla modellazione con le stime dei pesi effettivi, aderente alla realtà del fenomeno.

Si riportano nella Tabella 46 i carichi di targa cumulati $CMLW_{\pm 3}$ e $CMLW_{\pm 6}$ in [kt] calcolati per ogni campagna di rilievo, insieme ai GN corrispondenti.

Tabella 46 $CMLW_y$ - GN 2004-2014

	$CMLW_{\pm 3}$ [kt]	$CMLW_{\pm 6}$ [kt]	GN ± 3	GN ± 6
8/3/2004		0.15104		0.90
31/8/2004		0.57098		0.88
16/6/2005		1.35934		0.86
21/12/2005		2.01693		0.85
31/5/2006		2.49780		0.81
3/7/2007		3.75859		0.72
SG				
24/10/2008	9.66899	5.37317	0.82	0.85
22/7/2009	11.11202	6.19560	0.71	0.81

14/10/2009	11.76773	6.58498	0.66	0.75
28/10/2010	14.16318	8.01514	0.61	0.72
29/4/2011	15.09163	8.60459	0.50	0.69
27/5/2011	15.29015	8.72735	0.40	0.64
11/10/2011	16.42117	9.43966	0.38	0.60
15/11/2011	16.65141	9.58786	0.31	0.53
SG				
15/2/2012	17.16472	9.90778	0.73	0.81
17/5/2012	17.75766	10.28474	0.72	0.80
24/10/2012	19.23214	11.21058	0.69	0.79
21/12/2012	19.42440	11.33881	0.68	0.78
18/4/2013	20.20207	11.85982	0.67	0.77
16/5/2013	20.45418	12.02100	0.64	0.73
16/12/2013	22.66975	13.47662	0.59	0.70
28/5/2014	23.85636	14.25736	0.51	0.63

4.5 IL MODELLO EMPIRICO - MECCANICISTICO DEL DECADIMENTO DELL'ADERENZA CON I PESI DI TARGA

L'analisi di regressione non lineare ha consentito di esplicitare le forme funzionali dei rami delle curve di decadimento $CMLW_y-GN$, vedi Tabelle 47 e 48 e Figura 68; risultando statisticamente significative funzioni polinomiali di secondo grado con coefficienti di determinazione, R^2 , più alti di altre funzioni lineari o non lineari.

Tabella 47 Statistiche di regressione non lineare curva $CMLW_y-GN$ allineamento ± 3

Model is: $v2=a1*v1^2+a2*v1+a3$ (CMLW-GN 2008-2011 ± 3)						
Dep. Var. : Var2						
Level of confidence: 95.0% (alpha=0.050)						
	Estimate	Standard	t-value	p-level	Lo. Conf	Up. Conf
a1	-0.004096	0.004036	-1.01474	0.356790	-0.01447	0.006280
a2	0.041970	0.107360	0.39092	0.711955	-0.23401	0.317946
a3	0.771752	0.693022	1.11360	0.316099	-1.00972	2.553222
Model is: $v2=a1*v1^2+a2*v1+a3$ (CMLW-GN 2012-2014 ± 3)						
Dep. Var. : Var2						
Level of confidence: 95.0% (alpha=0.050)						
	Estimate	Standard	t-value	p-level	Lo. Conf	Up. Conf
a1	-0.002634	0.000913	-2.88353	0.034446	-0.004981	-0.000286
a2	0.076741	0.037549	2.04377	0.096405	-0.019781	0.173263
a3	0.187007	0.382582	0.48880	0.645667	-0.796452	1.170466

Tabella 48 Statistiche di regressione non lineare curva $CMLW_y-GN$ allineamento ± 6

Model is: $v_2=a_1*v_1^2+a_2*v_1+a_3$ (CMLW-GN 2004-2007 ± 6)						
Dep. Var. : Var2						
Level of confidence: 95.0% (alpha=0.050)						
	Estimate	Standard	t-value	p-level	Lo. Conf	Up. Conf
a1	-0.010581	0.002860	-3.69916	0.034298	-0.019684	-0.001478
a2	-0.006433	0.011450	-0.56187	0.613447	-0.042871	0.030005
a3	0.894733	0.009266	96.55923	0.000002	0.865244	0.924222
Model is: $v_2=a_1*v_1^2+a_2*v_1+a_3$ (CMLW-GN 2008-2011 ± 6)						
Dep. Var. : Var2						
Level of confidence: 95.0% (alpha=0.050)						
	Estimate	Standard	t-value	p-level	Lo. Conf	Up. Conf
a1	-0.009907	0.007053	-1.40466	0.219096	-0.028038	0.008223
a2	0.084458	0.106621	0.79213	0.464191	-0.189621	0.358536
a3	0.665378	0.389687	1.70747	0.148441	-0.336344	1.667101
Model is: $v_2=a_1*v_1^2+a_2*v_1+a_3$ (CMLW-GN 2012-2014 ± 6)						
Dep. Var. : Var2						
Level of confidence: 95.0% (alpha=0.050)						
	Estimate	Standard	t-value	p-level	Lo. Conf	Up. Conf
a1	-0.006278	0.002738	-2.29293	0.070392	-0.013316	0.000760
a2	0.112202	0.066341	1.69129	0.151568	-0.058333	0.282736
a3	0.313251	0.397539	0.78797	0.466408	-0.708656	1.335158

Con successiva procedura di ottimizzazione euristica si sono ricavate le leggi di variabilità dei parametri a1, a2 e a3 delle funzioni polinomiali quadratiche nel piano CMLW_y-GN.

Ne consegue il modello in Equazione (17):

$$GN = GN_{new} - (\Delta GN' + \Delta GN'') = GN_{new} - [\Delta GN'(CMLW_y) - \Delta GN''(GN_{restart}; CMLW_y)] \quad (17)$$

in cui:

GN_{new} = valore del GN per la pavimentazione nuova;

$\Delta GN'$ = perdita di aderenza di fondo non recuperabile;

$\Delta GN''$ = perdita di aderenza temporanea recuperabile;

$$GN'(CMLW_y) = GN_{restart} = -0.009CMLW_y + 0.91;$$

$$GN''(GN_{restart}; CMLW_y) = a_1 CMLW_y^2 + a_2 CMLW_y + a_3 CMLW_y;$$

$$a_1 = -0.27715GN_{restart}^2 + 0.40842GN_{restart} - 0.15196;$$

$$a_2 = -67.02846GN_{restart}^3 + 159.74797GN_{restart}^2 - 126.53659GN_{restart} + 33.35772;$$

$$a_3 = -4034GN_{restart}^4 + 13281GN_{restart}^3 - 16351GN_{restart}^2 + 8923.8GN_{restart} - 1821.35.$$

Si riportano nella Figura 69 i grafici delle leggi di variabilità dei parametri a1, a2 ed a3.

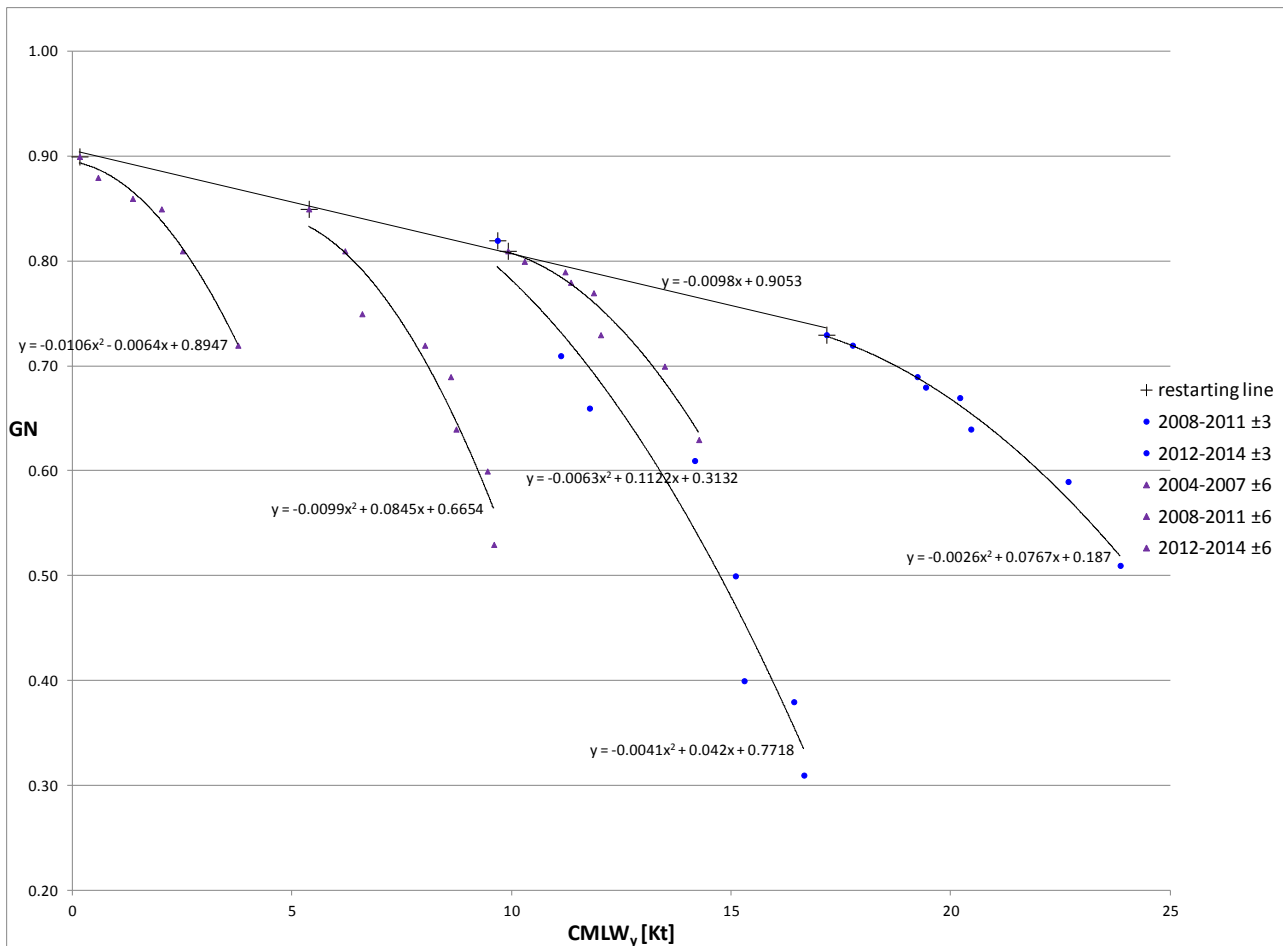


Figura 68 Curve di decadimento $CMLW_y$ -GN 2004-2014

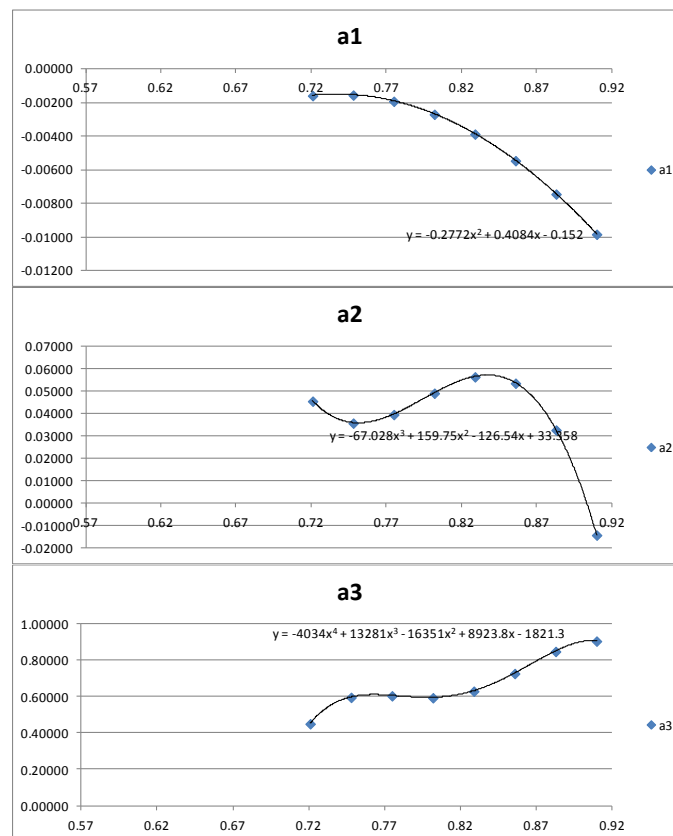


Figura 69 Leggi di variabilità dei parametri a_1 , a_2 , a_3 modello $CMLW_y$ - GN

Anche da questo modello è stato ricavato un abaco graduato, nel piano $CMLW_y$ - GN, vedi Figura 70.

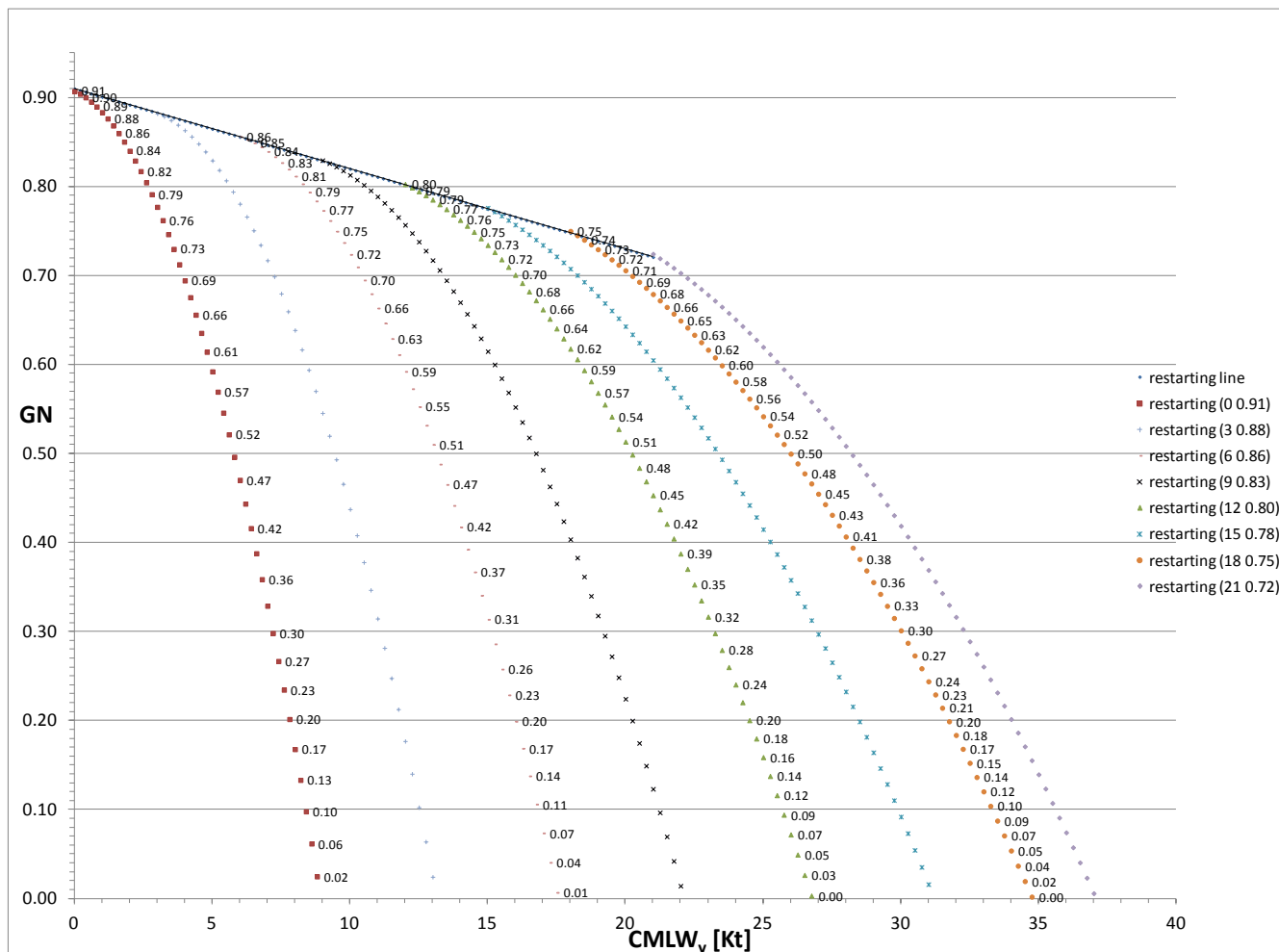


Figura 70 Abaco graduato $CMLW_y$ - GN del modello di decadimento dell'aderenza

4.5.1 VALIDAZIONE DEL MODELLO

La validazione del modello è stata effettuata confrontando i risultati predetti dal modello con 8 punti sperimentali: 6 derivanti dai rilievi 2004-2007 sull'allineamento ± 3 e 2 dal rilievo 11/02/2015 su entrambi gli allineamenti ± 3 e ± 6 (vedi Tabella 9 § 2.3).

Il risultato sul grafico Observed_vs_Predicted restituisce una disposizione dei punti sperimentali sufficientemente allineati alla bisettrice, vedi Figura 71.

Il residuo medio ottenuto è di 0.0223 con deviazione standard di 0.0462, vedi Tabella 49 e Figura 72.

Sulla Carta di Controllo 7 residui sono contenuti nella fascia $[m-2s \ m+2s]$ ed 1 residuo oltre ma comunque compreso nella fascia $[m-3s \ m+3s]$, vedi Figura 73.

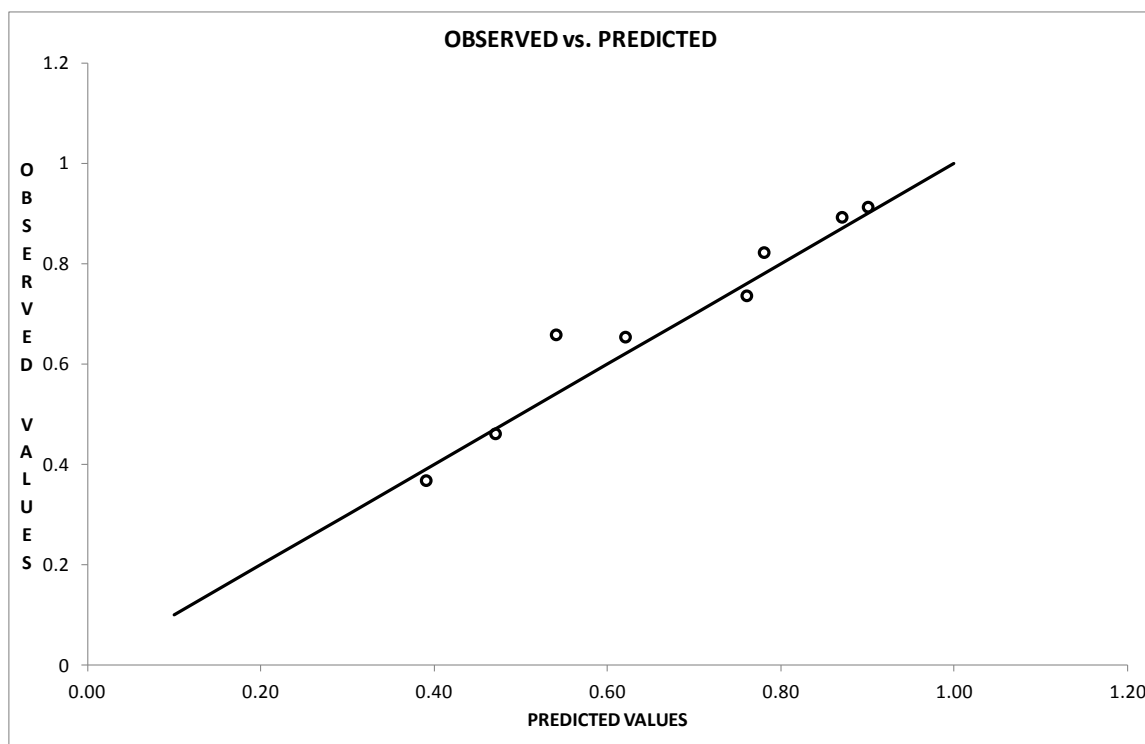


Figura 71 Observed_vs_Predicted modello CMLW_y - GN

Tabella 49 Residuals_vs_Predicted modello CMLW_y - GN

	predicted GN	observed GN	residual
8/3/2004 ±3	0.913268	0.90	0.0133
31/8/2004 ±3	0.893021	0.87	0.0230
16/6/2005 ±3	0.822744	0.78	0.0427
21/12/2005 ±3	0.73658	0.76	-0.0234
31/5/2006 ±3	0.654251	0.62	0.0343
3/7/2007 ±3	0.368311	0.39	-0.0217
11/2/2015 ±3	0.461562	0.47	-0.0084
11/2/2015 ±6	0.658814	0.54	0.1188
media			0.0223
dev.st			0.0462

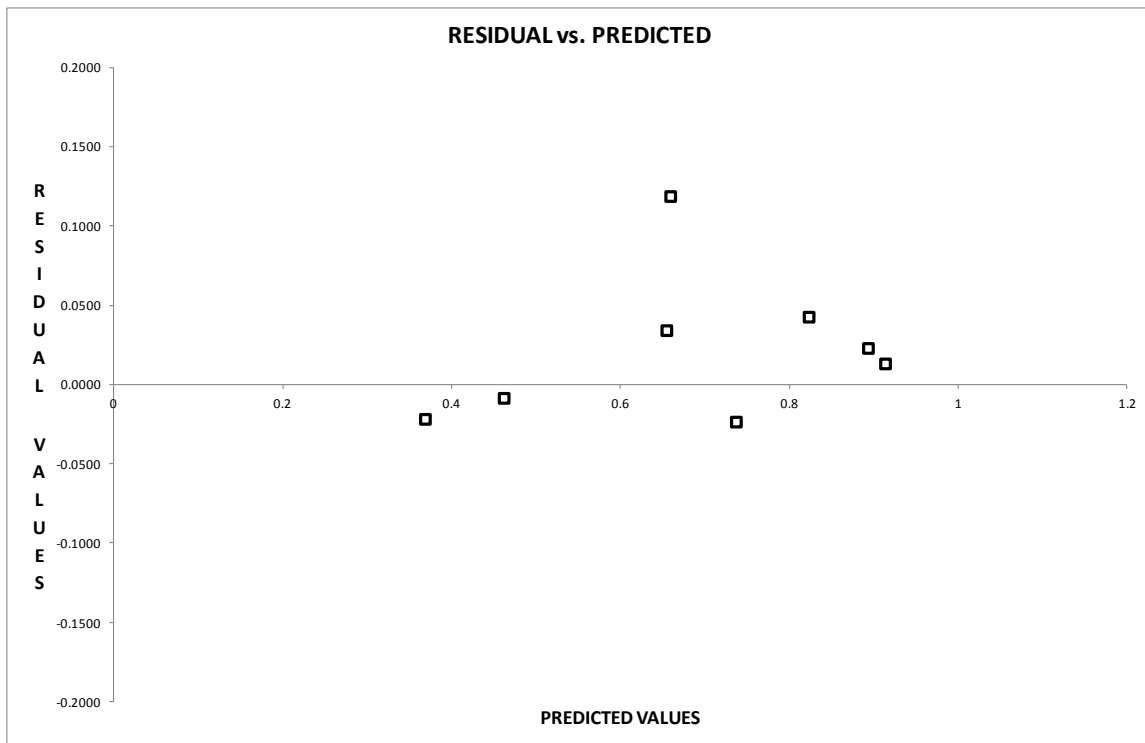


Figura 72 Residuals_vs_Predicted modello CLW_y - GN

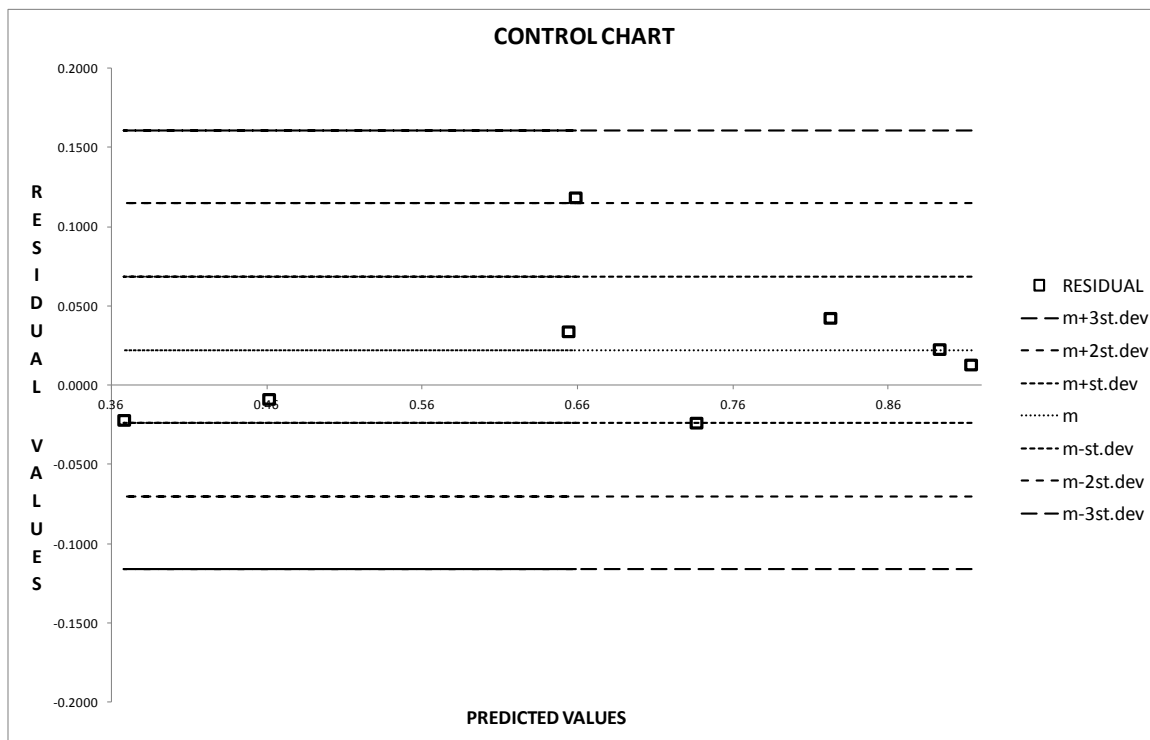


Figura 73 Carta di Controllo modello CMLW_y - GN

I due indicatori statistici di accuratezza:

- MAD (Mean Absolute Deviation, esprime l'accuratezza nella stessa unità di misura dei dati);
 - MAPE (Mean Absolute Percentage Error, esprime l'accuratezza come una percentuale dell'errore);
- sono pari rispettivamente a 0.035 e 5.9457, indicando una sufficiente accuratezza, vedi Tabella 50.

Tabella 50 Accuratezze MAD e MAPE modello CMLW_y - GN

	observed GN	residual	absolute residual	absolute percentage residual
8/3/2004 ±3	0.90	0.0133	0.013268	0.014742
31/8/2004 ±3	0.87	0.0230	0.023021	0.026461
16/6/2005 ±3	0.78	0.0427	0.042744	0.054800
21/12/2005 ±3	0.76	-0.0234	0.023420	0.030815
31/5/2006 ±3	0.62	0.0343	0.034251	0.055244
3/7/2007 ±3	0.39	-0.0217	0.021689	0.055613
11/2/2015 ±3	0.47	-0.0084	0.008438	0.017952
11/2/2015 ±6	0.54	0.1188	0.118814	0.220025
MAD			0.03571	
MAPE				5.945667

CAPITOLO 5

Scopo del presente lavoro è mostrare come sia possibile adoperare, nello studio del degrado dell'aderenza, degli strumenti matematici quali il sistema inferenziale fuzzy e la rete neurale per ottenere un modello che sia in grado di fornire una previsione sul livello di aderenza, a partire dalla combinazione dei valori di alcune variabili in ingresso.

Le caratteristiche principali del sistema inferenziale fuzzy risiedono nel fatto che esso è basato su logica fuzzy, la quale costituisce un approccio per la modellistica di fenomeni per i quali sono ben note conoscenze causali di tipo qualitativo, senza ricorso alle leggi matematiche che le esprimono. Tali leggi potrebbero non essere note, o comunque la loro utilizzazione potrebbe non essere agevole per tutti gli operatori.

Inoltre la forma linguistica in cui sono espresse le relazioni, più vicina al comune modo di ragionare umano, consente di correlare contemporaneamente più fattori con un altro.

La ricerca delle relazioni matematiche (non esplicite) tra le variabili in ingresso e quella in uscita, o per meglio dire della “mappatura” tra lo spazio degli ingressi e quello dell'uscita, viene effettuata con l'ausilio di un set di dati campionari; ogni dato campione ha come componenti le variabili di ingresso e quella di uscita. E' in tal senso che il sistema inferenziale fuzzy può essere definito adattivo, cioè basato su dati campionari. Il processo di apprendimento dai dati si compone, come si vedrà meglio in seguito, di due momenti; nel secondo di essi avviene il cosiddetto “allenamento” di una rete neurale. Dato che nella particolare architettura in forma di grafo con cui si può schematizzare tale rete neurale si può riconoscere proprio un sistema di tipo fuzzy, per il sistema inferenziale si usa l'ulteriore definizione neuro – fuzzy.

5.1 LA LOGICA FUZZY

5.1.1 GENERALITÀ

La logica fuzzy consiste in un approccio linguistico-matematico che prova a descrivere le variazioni delle grandezze analogiche con più efficacia di quanto la logica matematica tradizionale abbia potuto fino ad oggi.

Il nome con cui è designata, dovuto al matematico Lotfi Zadeh che per primo ne formalizzò la teoria negli anni 60, ha una traduzione letterale in peloso e sta a significare qualcosa di non precisamente definito, indistinto.

La logica tradizionale stabilisce la correttezza dei ragionamenti deduttivi attraverso il rispetto dei principi di non contraddizione e del terzo escluso.

Il primo afferma che un elemento x appartenente ad un insieme A non può contemporaneamente appartenere anche all'insieme \bar{A} (complemento di A).

Il secondo che l'unione di A con !A costituisce l'insieme universo, e che quindi se x non appartiene ad A esso deve appartenere a !A, essendo escluso un terzo insieme di appartenenza.

Il rispetto di questi due principi conduce ad esprimere, tramite un linguaggio formale di "operatori logici" che sostituisce il linguaggio corrente, delle proposizioni nelle quali, in ogni caso, si può riconoscere una struttura binaria del tipo vero/falso, si/no; da cui l'appellativo di logica bivalente.

La supposta precisione con cui la logica bivalente pretende di definire la realtà si scontra con la modalità nella quale il senso comune la può apprezzare, modalità quasi mai netta ma anzi quasi sempre sfumata ed incerta.

Di alcuni semplici quanto famosi paradossi non è possibile inoltre rendere conto secondo il paradigma tradizionale.

Già nel passato alcuni studiosi avevano fatto rilevare come per un'ampia classe di teorie formali (tra le quali l'aritmetica) fosse impossibile dimostrare all'interno di esse la loro coerenza, e che non tutti gli enunciati della fisica sono necessariamente veri o falsi.

Nel trattare con l'incertezza la scienza ha trovato un po' di riparo all'ombra della teoria della probabilità, ma la sostanza non cambia; difatti la probabilità di verificarsi di un evento è il grado di fiducia che si ripone nell'appartenenza di quell'evento alle categorie vero o falso, rimanendo quindi all'interno del ragionamento bivalente.

La logica fuzzy estende la tradizionale teoria degli insiemi rilasciandone i vincoli costituiti dai principi di non contraddizione e del terzo escluso.

Per essa un elemento può contemporaneamente appartenere e non ad un insieme, in quanto quest'ultimo non ha un confine nettamente definito; ogni elemento si rapporta ad un insieme tramite un grado di appartenenza ad esso, compreso nell'intervallo [0, 1]; da cui ogni elemento può appartenere contemporaneamente a più di un insieme.

E' evidente di come gli insiemi classici possano essere considerati un caso particolare di quelli fuzzy in quanto ammettenti solo i valori estremi 0 (completa non appartenenza) ed 1 (completa appartenenza) dell'intervallo.

Allora secondo l'approccio fuzzy gli eventi avvengono contemporaneamente in modo vero e falso, ma con diversi gradi di misura.

Un insieme fuzzy lo si può indicare con un insieme di coppie ordinate $A = \{x, \mu_A(x)\}$ dove $\mu_A(x)$ è una funzione di appartenenza che associa ad ogni elemento x un numero reale dell'intervallo [0, 1].

Le operazioni logiche di intersezione ed unione adoperate nella teoria classica degli insiemi, trovano una estensione fuzzy nei corrispondenti operatori and e or, la cui azione su due insiemi fuzzy A e B viene generalmente (ma non necessariamente) eseguita come:

$$\mu_{A \text{ and } B} = \min[\mu_A(x); \mu_B(x)]$$

$$\mu_{A \text{ or } B} = \max[\mu_A(x); \mu_B(x)].$$

Per cui considerando un insieme A ed il suo complemento !A, mentre nella teoria classica avremmo:

$$A \cap !A = \emptyset$$

$$A \cup !A = \{x\}$$

che corrispondono rispettivamente al principio di non contraddizione e del terzo escluso, nella teoria fuzzy si ha:

$$\mu_{A \text{ and } !A} = \min[\mu_A(x); \mu_{!A}(x)] \neq \emptyset$$

$$\mu_{A \text{ or } !A} = \max[\mu_A(x); \mu_{!A}(x)] \neq \{x\}$$

con cessazione di validità dei due principi.

Tramite l'assegnazione di variabili linguistiche agli insiemi fuzzy, con le quali si caratterizzano qualitativamente gli elementi ad essi appartenenti, situazioni troppo complesse od imprecise possono essere trattate con un approccio discorsivo utilizzando parole e struttura del linguaggio naturale al posto di numeri ed espressioni matematiche; è ancora più evidente quanto la logica fuzzy cerchi di simulare il pensiero umano.

Infatti si può dire che quest'ultimo, nel suo processo di apprendimento, tragga addirittura vantaggio da una certa tolleranza all'imprecisione che gli permette di mantenere le informazioni più rilevanti racchiudendole in categorie qualitative, sacrificando la precisione a favore del significato.

5.1.2 SISTEMI INFERENZIALI FUZZY

Uno degli ambiti nel quale la logica fuzzy si sta rivelando particolarmente vantaggiosa, ottenendo notevole successo in campo applicativo, è nella definizione del cosiddetto sistema inferenziale fuzzy.

In termini generali esso è inteso come un processo, basato sulla logica fuzzy, che a partire da dei dati di input fornisca un output (generalmente è uno solo: altrimenti ci si riconduce al caso unico).

Lo schema tipico prevede che in successione: le grandezze costituenti l'input vengano preventivamente fuzzificate attraverso l'ausilio di opportune funzioni di appartenenza, poi vengano elaborate da una serie di regole costituite del tipo IF-THEN ciascuna delle quali fornisce un valore in forma fuzzy della desiderata grandezza di output, ed una operazione di somma logica e defuzzificazione su quest'ultima per aggregarne i vari valori fuzzy e fornirne un unico valore deterministico.

5.1.2.1 FUZZYFICAZIONE

La fuzzyficazione è il primo passo col quale ci si distacca dalla logica classica per entrare in quella fuzzy; con essa i valori deterministici delle variabili di ingresso vengono convertiti in misure della loro appartenenza ad insiemi (classi) fuzzy.

Tali classi sono per lo più contraddistinte da valori linguistici di uso comune con i quali più spesso, nel linguaggio naturale, ci si riferisce ai valori assumibili da una determinata grandezza, invece che di specificare per essa un valore numerico la cui precisione potrebbe essere di difficile determinazione oltre che perdere di significato in alcuni contesti pratici.

La conversione anzidetta tra valori deterministici e valori linguistici viene effettuata attraverso le funzioni di appartenenza.

Predefinito per ciascuna classe il tipo di funzione, essa fa corrispondere a ciascun valore deterministico il grado di adesione ad uno o più valori linguistici scelti per quella grandezza, in una scala che va da 0 ad 1.

Ciascun valore deterministico x° può aderire a più di un valore linguistico con gradi differenti, cioè può intercettare più di una funzione di appartenenza; ecco quindi rispettato uno dei principi fondamentali della logica fuzzy che prevede come ogni elemento possa appartenere a più di un insieme (non validità dei tradizionali principi di non contraddizione e del terzo escluso), vedi Figura 74:

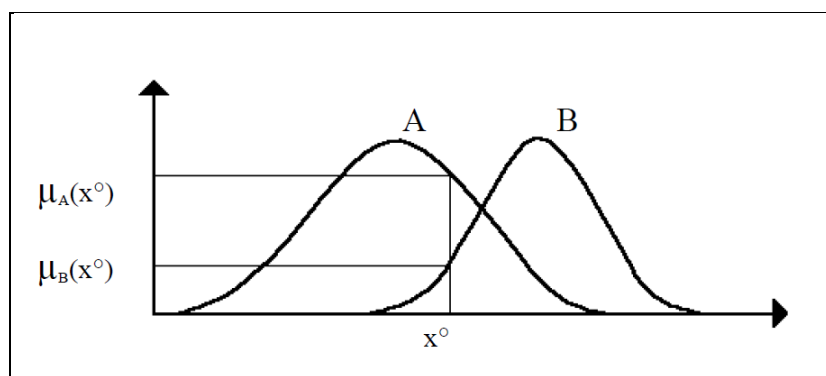


Figura 74 Gradi e funzioni di appartenenza fuzzy

Appare chiara quale sia l'importanza della determinazione del numero di tali funzioni di appartenenza per ogni grandezza di input, del loro tipo funzionale, e dei loro parametri caratteristici.

5.1.2.2 APPLICAZIONE DELLE REGOLE

Le regole costituiscono il momento centrale del sistema inferenziale.

Esse individuano delle relazioni di tipo semplice tra i valori linguistici che sono stati assegnati, con un certo grado di adesione, alle grandezze di input.

Ciò avviene costruendo delle affermazioni nelle quali si assume che se alcune condizioni sulle grandezze input saranno verificate (IF: parte antecedente della regola) allora la grandezza output assumerà o le dovrà essere fatto assumere un certo valore (THEN: parte conseguente della regola). Il grado di adesione a tale valore di output dipende dai gradi di adesione dei valori linguistici assegnati alle grandezze input e dalla forma logica della parte antecedente.

Difatti la parte antecedente tiene conto dei valori che le grandezze input assumono, tramite i cosiddetti operatori logici; nel caso dei due operatori elementari più diffusi, cioè l'unione e l'intersezione, i loro equivalenti fuzzy che più spesso vengono usati sono:

AND (unione)

$$\mu_{A \text{ AND } B}(x) = \min[\mu_A(x); \mu_B(x)];$$

OR (intersezione)

$$\mu_{A \text{ OR } B}(x) = \max[\mu_A(x); \mu_B(x)].$$

La parte antecedente della regola viene costruita semplicemente interponendo la congiunzione che più appare idonea (AND oppure OR) tra i valori linguistici delle grandezze input.

Risulta così immediato calcolare quale sia il grado di adesione vigente in quella regola, che costituisce così anche il grado di attivazione della regola stessa nei confronti del valore da far assumere all'output, vedi Figura 75:

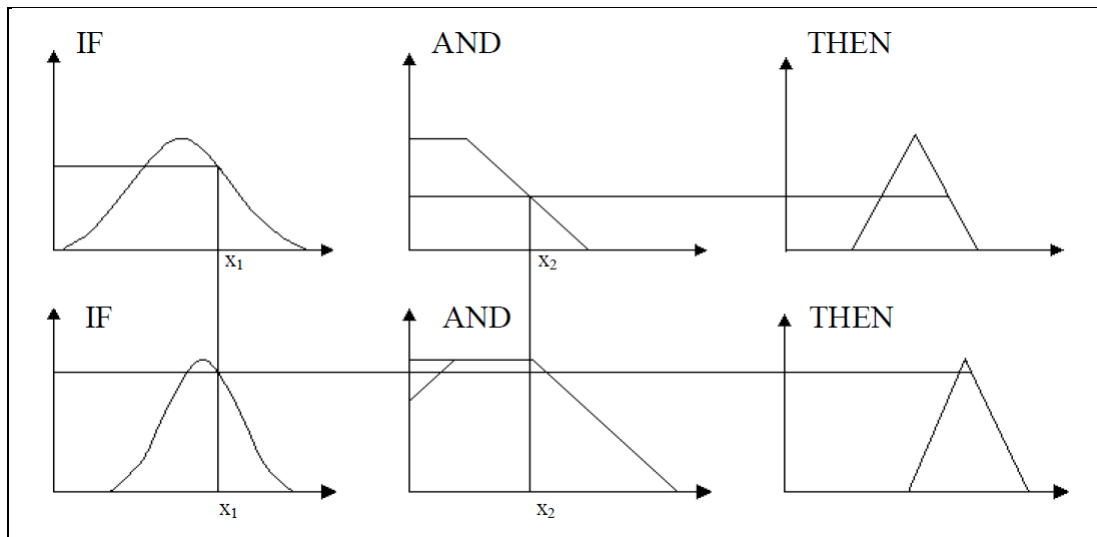


Figura 75 Attivazione delle regole fuzzy

5.1.2.3 SOMMA LOGICA E DEFUZZYFICAZIONE

Ciascuna regola produce un insieme (classe) fuzzy di valori della grandezza di output la cui funzione di appartenenza che la descrive risulta essere decurtata della parte superiore ad una altezza corrispondente al grado di attivazione della regola stessa.

Potendo ciascun valore deterministico x^o aderire a più di un valore linguistico, esso può attivare più di una regola contemporaneamente; come risultato si hanno una serie di classi fuzzy variamente decurtate i cui valori deterministici fanno tutti parte, con gradi di adesione differenti, del risultato inferenziale.

Ai fini della trattabilità di tale soluzione è quindi necessario estrarne un unico valore, il più significativo possibile delle varie classi.

Uno dei metodi più spesso impiegati è quello di fissare tale valore come ascissa del baricentro dell'area risultante dall'accostamento delle funzioni di appartenenza decurtate, vedi Figura 76:

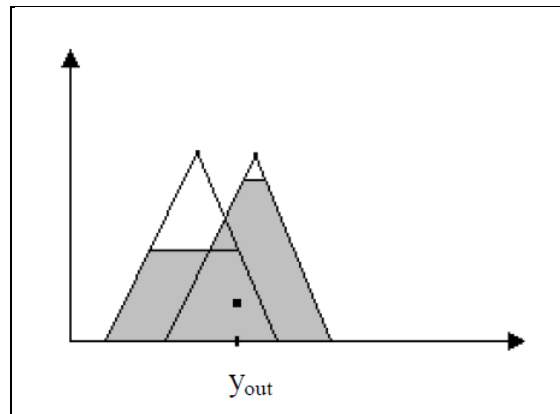


Figura 76 Somma logica e defuzzyficazione

In definitiva un sistema inferenziale fuzzy associa un valore della grandezza di output ad una certa combinazione di valori di quelle di input; costruisce così una “mappa” dello spazio dell'uscita in funzione dello spazio degli ingressi.

Il grande vantaggio che esso presenta rispetto ai sistemi tradizionali consiste nel non dover conoscere o determinare le precise relazioni matematiche (funzioni) tra le grandezze in gioco; nel caso tali relazioni fossero non lineari lo sforzo necessario alla loro individuazione potrebbe non essere ripagato in termini di significatività ed efficacia della soluzione (paradosso della logica tradizionale: quanto più una legge matematica cerca di aderire alla realtà tanto più essa è incerta).

D'altro canto le variabili linguistiche con cui costruire le regole consentono di modellizzare un fenomeno basandosi sulla conoscenza empirica dell'osservatore o di esplicitarne le decisioni a partire da semplici rilevazioni quali egli sarebbe in grado di fare.

E' evidente la similarità di tale logica con il pensiero umano.

Il teorema di approssimazione fuzzy afferma che è sempre possibile ricoprire una qualsiasi curva con un numero finito di regole. Ne segue che un sistema fuzzy è un approssimatore universale di funzioni, potendo esso riprodurre in modo sufficientemente preciso ogni relazione ingresso-uscita una volta che si sia formalizzata in un numero congruo di regole la conoscenza empirica sul fenomeno.

Si possono distinguere due modelli di sistema inferenziale fuzzy a seconda del tipo di output fornito da ciascuna regola:

-nel modello Mamdani il valore fornito è un insieme (classe) fuzzy di valori costanti con una propria funzione di appartenenza;

-nel modello Sugeno il valore fornito è una funzione lineare dei valori deterministici di ingresso del tipo $y_j = a_{j1}x_1 + a_{j2}x_2 + \dots + a_{jn}x_n + b_j = \mathbf{a}_j^T \mathbf{x} + b_j$ (dove spesso $\mathbf{a}_j^T = 0 \nabla_j$).

Questo secondo modello può essere utilizzato per approssimare funzioni non lineari con funzioni lineari a tratti.

Infatti per il valore finale defuzzyficato si può scrivere:

$$y_{out} = \frac{\sum_j \beta_j (\mathbf{a}_j^T \mathbf{x} + b_j)}{\sum_j \beta_j}$$

dove $\beta_j = \mu_{A_{j1}}(x_1) \wedge \mu_{A_{j2}}(x_2) \wedge \dots \wedge \mu_{A_{jn}}(x_n) = \beta_j(\mathbf{x})$ è il grado di attivazione della singola regola;

posto

$$\gamma_j(\mathbf{x}) = \beta_j(\mathbf{x}) / \sum_j \beta_j(\mathbf{x}); \quad \mathbf{a}(\mathbf{x}) = \sum_j \gamma_j(\mathbf{x}) \mathbf{a}_j; \quad b(\mathbf{x}) = \sum_j \gamma_j(\mathbf{x}) b_j$$

allora

$$y_{out} = \{ \sum_j \gamma_j(\mathbf{x}) \mathbf{a}_j \}^T \mathbf{x} + \sum_j \gamma_j(\mathbf{x}) b_j = \mathbf{a}^T(\mathbf{x}) \mathbf{x} + b(\mathbf{x}).$$

Pertanto il modello costituisce una mappa quasi-lineare dallo spazio degli ingressi (\mathbf{x}) a quello dell'uscita (y_{out}) secondo dei parametri (\mathbf{a}^T ; b) a loro volta dipendenti dagli ingressi.

Nel caso di una sola grandezza in ingresso, vedi Figura 77:

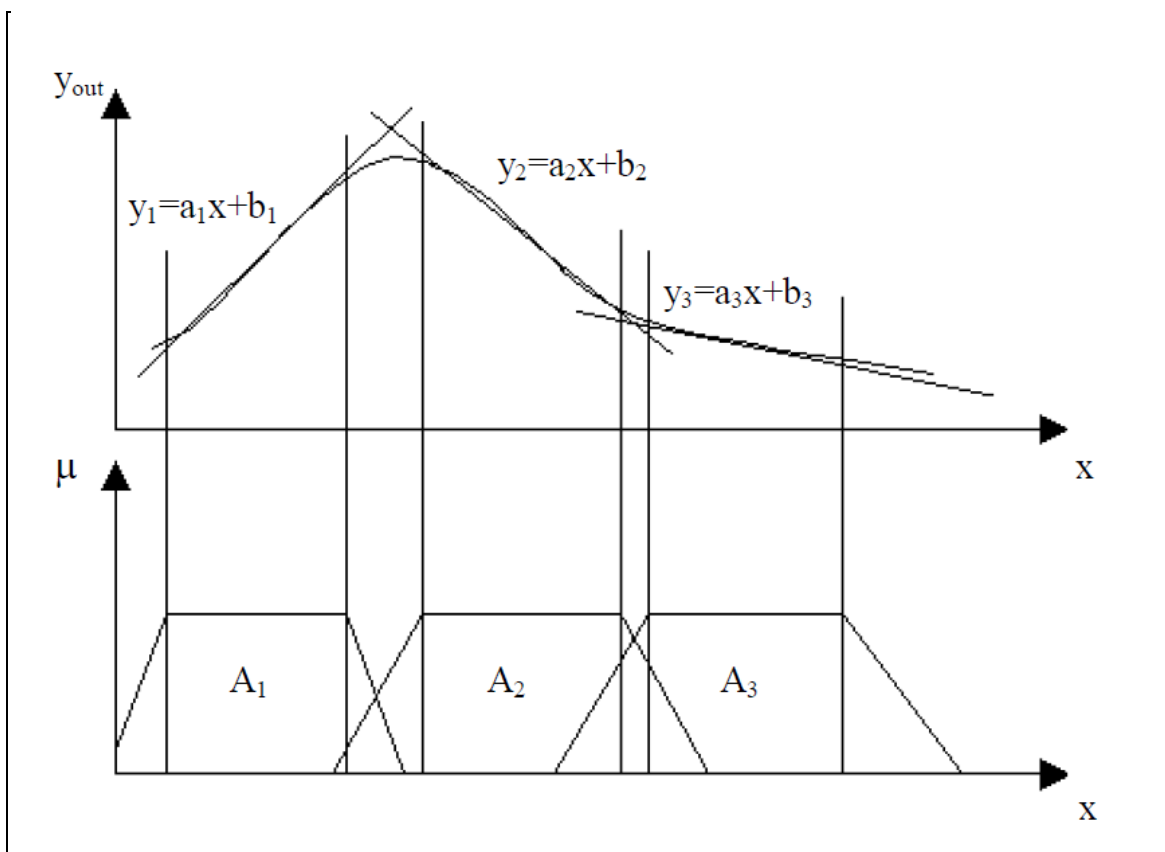


Figura 77 Sistema inferenziale fuzzy Modello Sugeno

5.1.2.4 TARATURA DELLE FUNZIONI DI APPARTENENZA ATTRAVERSO UN CAMPIONE DI DATI

Il buon senso e l'esperienza dell'operatore nella definizione delle funzioni di appartenenza può essere supportato, nel fissare i parametri caratteristici di esse, dalla disponibilità di un campione di dati sperimentali che l'operatore ritenga rappresentativi per il sistema in oggetto.

Si consideri un sistema fuzzy nel quale la regola j-esima è espressa da una relazione del tipo:
 IF x_1 is A_{j1} AND ... AND x_i is A_{ji} AND ... AND x_n is A_{jn} THEN y is B_j
 dove $x_{i=1...n}$ sono le grandezze input, y è la grandezza output, $A_{j,i=1...n}$ e B_j sono i corrispondenti insiemi fuzzy.

Se per esempio le funzioni di appartenenza sono di tipo gaussiano (così come è spesso), come operatore logico di inferenza si utilizza il prodotto e la defuzzyficazione viene fatta attraverso la media pesata dei massimi, allora l'uscita può essere calcolata come:

$$y=f(\mathbf{x})=\sum_j y_j^c (\prod_i \mu_{A_{ji}}(x_i)) / \sum_j (\prod_i \mu_{A_{ji}}(x_i))$$

dove

$$\mu_{A_{ji}}=e^{-(x_i-x_{ji}^c)^2/\sigma_{ji}^2}$$

è il grado di appartenenza della i-esima grandezza input all'insieme fuzzy A_{ji} .

Quindi fissati i valori delle i grandezze di input $x_{i=1...n}$ ciò che influenza il valore dell'output y sono i valori dei centri y_j^c delle funzioni di appartenenza output, e dei centri x_{ji}^c e dei parametri σ_{ji} delle funzioni di appartenenza input.

Disponendo di coppie di valori input-output (\mathbf{x}_k, y_k) , $k=(1, K)$ di un campione di dati sperimentale, si può imporre che i valori assunti dai parametri y_j^c , x_{ji}^c e σ_{ji} siano tali che la differenza tra i valori di output forniti dal sistema e quelli disponibili sia la minima possibile.

Ciò si può ottenere scegliendo come funzione da ottimizzare (al minimo) una opportuna funzione di tale differenza, o errore:

$$e_k=(f(\mathbf{x}_k)-y_k)^2/2.$$

Il metodo di ottimizzazione del gradiente indica che all'iterazione (k+1)-esima i valori dei parametri debbano essere fissati seguendo la regola:

$$y_j^c(k+1)= y_j^c(k)-\alpha \partial e_k / \partial y_j^c \big|_k$$

$$x_{ji}^c(k+1)= x_{ji}^c(k)-\alpha \partial e_k / \partial x_{ji}^c \big|_k$$

$$\sigma_{ji}(k+1)= \sigma_{ji}(k)-\alpha \partial e_k / \partial \sigma_{ji} \big|_k$$

dove α è il tasso di apprendimento che può essere fissato $\in [0, 1]$ (il valore più opportuno viene di norma determinato empiricamente mediante procedure di tipo "trial and error").

Da tenere presente che non sempre l'ottimo ottenuto col metodo del gradiente è quello globale, potendo l'algoritmo arrestarsi in un ottimo locale; la bontà della soluzione dipende molto dalla scelta dei valori iniziali dei parametri forniti all'algoritmo.

Un metodo di stima dei parametri di tale tipo viene detto anche di retropropagazione dell'errore e fu originariamente ricavato da Wang and Mendel [74].

5.1.3 FUZZY CLUSTERING

E' un metodo per la classificazione di dati campionari basato sull'idea secondo la quale il valore della funzione di appartenenza rappresenta la misura nella quale un dato è simile ad un altro preso a prototipo.

Sia $X=(x_1, x_2, \dots, x_n)$ un campione di punti m -dimensionali e normalizzati in ciascuna dimensione così da renderle omogenee tra loro.

L'obiettivo consiste nella ricerca di una partizione dei punti in c ($2 \leq c \leq n$) gruppi (clusters), in modo che i punti appartenenti ad un gruppo siano caratterizzati da un'affinità maggiore di quella tra punti appartenenti a gruppi diversi.

Considerato che ciascun punto ha m coordinate, come misura dell'affinità è naturale prendere la distanza tra le coppie di punti nello spazio campionario.

Il metodo di seguito illustrato, detto fuzzy c -means, è dovuto a Bezdek et al. [75] ed è una generalizzazione del metodo noto come hard c -means impiegato per la classificazione crisp (precisa) dei dati.

Bezdek ha suggerito un procedimento iterativo che tende alla costruzione di cluster, dotati di forma sferoidale ed un centro, ad ogni iterazione minimizzando le distanze tra i punti campionari ed i centri dei cluster e massimizzando le distanze tra i centri dei cluster.

Rappresentati i cluster come insiemi fuzzy $\{A_i, i=1, 2, \dots, c\}$, ciascun punto x_k appartiene a ciascun cluster con un grado:

$$\mu_{A_i}(x_k) \in [0, 1]$$

con i vincoli che per ciascun punto x_k :

$$\sum_i \mu_{A_i}(x_k) = 1 \quad \forall k \in [1, n]$$

e che per ogni cluster A_i :

$$0 < \sum_k \mu_{A_i}(x_k) < n \quad \forall i \in [1, c].$$

cioè ciascun punto appartiene parzialmente a più di un cluster e non possono esserci cluster vuoti o contenenti tutti i punti campione.

L'universo di tutte le possibili disposizioni degli n punti nei c cluster, detto spazio delle c -partizioni fuzzy di X , è un insieme di matrici di partizione U di c righe e n colonne composte dagli elementi $\mu_{A_i}(x_k)$:

$$M_{fc} = \{U \mid \mu_{A_i}(x_k) \in [0, 1]; \sum_i \mu_{A_i}(x_k) = 1 \forall k \in [1, n]; 0 < \sum_k \mu_{A_i}(x_k) < n \forall i \in [1, c]\}$$

la cui cardinalità in termini di dimensioni è ovviamente infinita.

Il valore assunto da una funzione obiettivo in corrispondenza di ciascuna determinazione della matrice U può guidare nella scelta della c -partizione fuzzy ottima, ovvero di una U^* ottima.

Bezdek ha proposto come funzione obiettivo:

$$J(\mathbf{U}; \mathbf{v}) = \sum_n \sum_c [\mu_{Ai}(x_k)]^{m'} (d_{ik})^2$$

dove:

$d_{ik} = [\sum_j (x_{kj} - v_{ij})^2]^{1/2}$ è la distanza tra il k-esimo punto e il centro $v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{im})$ dell'i-esimo cluster, di

coordinate $v_{ij} = \sum_k [\mu_{Ai}(x_k)]^{m'} x_{kj} / \sum_k [\mu_{Ai}(x_k)]^{m'}$;

$m' \in [1, \infty[$ pesa l'ammontare di fuzzyness ammessa nella classificazione; per $m'=1$ si avrebbe una classificazione hard (precisa) rappresentata da una matrice \mathbf{U} composta da elementi tutti pari a zero ed uno; si suggeriscono valori variabili da 1,25 a 2.

La c-partizione fuzzy ottima corrisponde al minimo di tale funzione obiettivo:

$$J(\mathbf{U}^*; \mathbf{v}^*) = \min_{\mathbf{U} \in \text{Mfc}} J(\mathbf{U}; \mathbf{v})$$

da ricercarsi applicando iterativamente i seguenti passi :

1-fissare il numero c ($2 \leq c \leq n$) dei cluster, un valore del peso m' , ed una configurazione iniziale $\mathbf{U}^{(0)}$ della matrice di partizione;

2-calcolare i centri $\mathbf{v}_i^{(0)}$ dei cluster;

3-aggiornare gli elementi della matrice di partizione secondo la:

$$\mu_{Ai}(x_k)^{(1)} = [\sum_j (d_{ik}^{(0)} / d_{jk}^{(0)})^{2/m'-1}]^{-1};$$

4-se $|\mathbf{U}^{(1)} - \mathbf{U}^{(0)}| < \varepsilon$ ci si arresta ; altrimenti si ritorna al passo 2.

Per valutare la distanza $|\mathbf{U}^{(r+1)} - \mathbf{U}^{(r)}|$ tra le matrici di due successive iterazioni da confrontare con il prefissato livello di accuratezza ε , si considera il massimo valore assoluto delle differenze tra elementi omologhi delle due matrici:

$$\max_{ik} [\mu_{Ai}(x_k)^{(r+1)} - \mu_{Ai}(x_k)^{(r)}].$$

A valle del processo di classificazione si può ottenere una stima del grado di incertezza complessivo, ovvero dell'estensione della sovrapposizione esistente tra i cluster, attraverso il coefficiente di partizione fuzzy:

$$F_c(\mathbf{U}) = \text{tr}(\mathbf{U}\mathbf{U}^T) / n$$

essendo:

$$1/c \leq F_c(\mathbf{U}) \leq 1$$

si ha che:

$F_c(\mathbf{U}) = 1/c$ se la partizione è caratterizzata da ambiguità completa ;

$F_c(\mathbf{U}) = 1$ se la partizione è crisp (precisa) ossia la matrice \mathbf{U} è composta da elementi tutti pari a zero ed uno.

Infatti gli elementi della diagonale principale della matrice $\mathbf{U}\mathbf{U}^T$ sono proporzionali all'appartenenza dei dati non condivisa tra i cluster, mentre quelli esterni sono proporzionali all'appartenenza dei dati condivisa tra coppie di cluster; in una partizione crisp (precisa) gli elementi della diagonale principale sono tutti pari ad uno mentre gli esterni sono tutti pari a zero.

Quindi al crescere del valore del coefficiente $F_c(U)$ la ripartizione dei dati fra le classi diviene più netta.

5.1.4 COSTRUZIONE DI UN SISTEMA INFERENZIALE FUZZY ATTRAVERSO UN CAMPIONE DI DATI

Un campione di dati sperimentali può supportare, oltre che nella calibrazione dei parametri delle funzioni di appartenenza di un sistema fuzzy già dato, cioè costruito secondo l'abilità e l'esperienza dell'operatore, anche nella fase ben più importante di generazione stessa delle regole, che costituiscono il nucleo centrale di un sistema inferenziale fuzzy.

In effetti la generazione delle regole appare come un processo che il pensiero umano è in grado di eseguire, ma secondo procedure che la nostra comprensione non è in grado di riprodurre immediatamente per automatizzarle.

I vari metodi proposti suggeriscono che nella formulazione delle regole debbano venire impiegate le informazioni disponibili dai dati circa la loro disposizione nello spazio multi-dimensionale delle caratteristiche, tramite clusterizzazione dei dati stessi.

Se infatti la j -esima regola del tipo IF-THEN è esprimibile nella forma:

IF x_1 is A_{j1} AND ... AND x_i is A_{ji} AND ... AND x_n is A_{jn} THEN y is B_j

può essere logico pensare ad essa come ad un cluster con un proprio centro, dal quale un dato è più o meno distante così come i valori delle sue variabili (x_1, \dots, x_n, y) sono più o meno aderenti ai valori linguistici degli insiemi fuzzy A_{ji}, B_j .

Yager and Filev [76] hanno proposto per la clusterizzazione dei dati disponibili il metodo *mountain*.

Restringendosi al caso bi-dimensionale, il primo passo consiste nel discretizzare il sottospazio $X \times Y$ contenente i punti-campione quadrettandolo con delle linee, più o meno fitte a seconda della disposizione dei punti. Le intersezioni di tali linee, dette nodi, rappresentano un insieme di potenziali cluster centers e si denotano con $N_i = (X_i, Y_i)$.

Il secondo passo è la costruzione della funzione montagna (cumulo) M per ciascun nodo N_i definita come la somma di quantità proporzionali alla distanza di quel nodo dai punti:

$$M(N_i) = \sum_k e^{-\alpha d(N_i, O_k)}$$

dove O_k è il k -esimo punto, α è una costante, e $d(N_i, O_k)$ è una misura di distanza.

Quanto più alto è il valore della funzione montagna (molti punti vicini) tanto più quel nodo è un potenziale cluster center.

Nel terzo passo si prende il nodo con il più alto valore della funzione montagna $M_1^* = \text{Max}_i [M(N_i)]$ e lo si fissa come il primo cluster center $N_1^* = (X_1^*, Y_1^*)$; per trovare il secondo occorre ridurre il valore della funzione montagna di tutti i nodi per tener conto dell'effetto del cluster center appena trovato; per assicurare che i nodi vicino ad esso avranno un valore della funzione ridotto

più fortemente rispetto a quelli più lontani (quelli più vicini devono avere meno probabilità di essere selezionati rispetto a quelli più lontani), si sottrae una quantità inversamente proporzionale alla distanza di ciascun nodo da quello appena fissato come cluster center, e contemporaneamente proporzionale al valore della funzione montagna del primo cluster center:

$$M_2(N_i) = M_1(N_i) - M_1^* e^{-\beta d(N_1^*, N_i)} \quad (\beta \text{ costante positiva})$$

e si fissa come secondo cluster center N_2^* il nodo con il più alto valore M_2^* della funzione montagna così revisionata; iterando il procedimento di revisione si fissano i successivi, e ci si fermerà quando il valore della funzione montagna revisionata dopo una m-esima iterazione M_{m+1}^* risulta più piccolo di una prefissata costante di arresto δ :

$$M_{m+1}^* \leq \delta$$

avendo così ottenuto m cluster centers.

La j-esima regola del tipo IF-THEN allora è esprimibile nella forma:

IF x è vicino ad X_j^* THEN y è vicino ad Y_j^* .

Nel caso più generale di più grandezze di input:

IF x_1 è vicino ad X_{j1}^* AND...AND x_i è vicino ad X_{ji}^* AND...AND x_n è vicino ad X_{jn}^* THEN y è vicino a Y_j^* .

I cluster center ottenuti forniscono con le loro coordinate anche una utile stima iniziale dei parametri delle funzioni di appartenenza.

Infatti se queste ultime sono del tipo gaussiano, è naturale pensare che per la successiva calibrazione dei loro parametri, adottando il già descritto metodo di retropropagazione dell'errore, si adottino come valori iniziali delle coordinate dei centri quelli delle coordinate dei cluster centers:

$$\mu_{A_{ji}} = e^{-(x_i - X_{ji}^*)^2 / \sigma_{ji}^2}$$

$$y = f(\mathbf{x}) = \sum_j Y_j^* (\prod_i \mu_{A_{ji}}(x_i)) / \sum_j (\prod_i \mu_{A_{ji}}(x_i))$$

mentre per σ_{ij} si può assumere come valore iniziale:

$$\sigma_{ji} = (1/2\beta)^{1/2}$$

dove β è la costante utilizzata nel metodo mountain.

Chiu [77] ha proposto una forma modificata del metodo mountain di Yager e Filev.

Egli considera come potenziali cluster centers non i nodi della griglia contenente i punti-campione, ma i punti stessi.

Ciò riduce significativamente lo sforzo computazionale, che nel primo caso cresce esponenzialmente con la dimensione del problema: con 4 variabili e 10 linee per ciascuna dimensione si avrebbero 10^4 nodi da valutare.

Siano allora (x_1, x_2, \dots, x_n) n punti-campione M -dimensionali e normalizzati in ciascuna dimensione così da essere limitati da un ipercubo (il campo di variazione di ciascuna coordinata è cioè lo stesso, ad esempio $[0, 1]$).

Come misura del potenziale di ciascun punto si utilizza:

$$P_i = \sum_j e^{-\alpha |x_i - x_j|^2}$$

dove $\alpha = 4/(r_a)^2$ con r_a costante positiva.

La costante r_a è il raggio che definisce una vicinanza oltre la quale i punti hanno scarsa influenza sul potenziale.

Da notare che con questa misura di potenziale l'influenza di un punto decade con il quadrato della distanza, mentre nel metodo di Yager e Filev decade con la distanza stessa.

Il punto x_1^* con il più alto potenziale P_1^* viene fissato come primo cluster center; per i successivi si revisiona il potenziale di ciascun punto secondo la:

$$P_i' = P_i - P_1^* e^{-\beta |x_i - x_1^*|^2}$$

dove $\beta = 4/(r_b)^2$ con r_b costante positiva.

La costante r_b è il raggio che definisce una vicinanza oltre la quale i punti hanno scarsa influenza sulla riduzione del potenziale.

Per evitare di ottenere cluster centers molto ravvicinati, è consigliabile che i due raggi stiano in un rapporto $r_b = 1,5 r_a$.

Per cercare di superare il carattere di arbitrarietà nel fissare la costante di arresto insito nel criterio di Yager e Filev, Chiu propone:

-se $P_k^* > \varepsilon' P_1^*$

si accetta x_k^* come k -esimo cluster center e si continua;

-se $P_k^* < \varepsilon'' P_1^*$

si rifiuta x_k^* come k -esimo cluster center e si termina;

-se $\varepsilon'' P_1^* \leq P_k^* \leq \varepsilon' P_1^*$ sia d_{\min} la più piccola delle distanze tra x_k^* ed i cluster center trovati, allora

$$-se \ d_{\min} / r_a + P_k^* / P_1^* \geq 1$$

si accetta x_k^* come k -esimo cluster center e si continua;

-altrimenti

si rifiuta x_k^* come k -esimo cluster center, si annulla il suo potenziale, e si seleziona il punto con il più alto potenziale sul quale ripetere il test.

Vengono suggeriti i valori $\varepsilon' = 0,5$ ed $\varepsilon'' = 0,15$.

La condizione $d_{\min} / r_a + P_k^* / P_1^* \geq 1$ vuole accertare se x_k^* ha un buon compromesso tra l'essere sufficientemente lontano dai cluster center esistenti e l'aver un sufficiente potenziale.

In tale modo il numero dei cluster center, che poi rappresenta il numero delle regole del sistema fuzzy, viene ad essere determinato automaticamente; anche se c'è da considerare che il risultato finale dipende fortemente dal parametro r_a : un valore elevato di esso si riflette in pochi cluster e quindi in un modello più grossolano, mentre un valore ridotto può produrre un numero eccessivo di cluster e quindi un modello che generalizzi poco perché super-aderente ai dati campione forniti.

Chiu propone una diversa via anche per quanto riguarda la successiva operazione di ottimizzazione dei parametri.

Egli assume come modello inferenziale il modello Sugeno, dove l'output è una funzione lineare dei valori di input, invece che un insieme fuzzy di valori costanti. I modelli Sugeno hanno dimostrato di essere in grado di rappresentare il comportamento complesso di un sistema con solo poche regole.

Siano $(\mathbf{x}_1^*, \mathbf{x}_2^*, \dots, \mathbf{x}_c^*)$ i cluster centers ottenuti, in uno spazio M-dimensionale.

Per maggior generalità, le prime N dimensioni corrispondano alle variabili di input e le rimanenti M-N corrispondano a quelle di output, invece che solo l'ultima come al solito.

Ciascun vettore $\mathbf{x}_j^* = (y_{j1}^*, \dots, y_{jN}^*, z_{j1}^*, \dots, z_{j,M-N}^*)$ può essere decomposto nei due vettori componenti \mathbf{y}_j^* e \mathbf{z}_j^* dove il primo comprende le coordinate nello spazio input e il secondo quelle nello spazio output.

La j-esima regola esprimibile nella forma:

IF y_{j1} è A_{j1} AND y_{j2} è A_{j2} AND THEN z_{j1} è B_{j1} AND z_{j2} è B_{j2} AND.....

può essere espressa con:

IF y_{j1} è vicino a y_{j1}^* AND y_{j2} è vicino a y_{j2}^* AND..... THEN z_{j1} è vicino a z_{j1}^* AND z_{j2} è vicino a z_{j2}^* AND.....

Il grado di appartenenza della i-esima grandezza input all'insieme fuzzy A_{ji} è:

$$\mu_{A_{ji}} = e^{-\alpha(y_i - y_{ji}^*)^2}$$

mentre il grado di attivazione della j-esima regola da far valere nei confronti dell'output è:

$$\mu_j = e^{-\alpha |y - y_j^*|^2} \quad (\text{dove } \alpha \text{ è la costante definita nell'espressione del potenziale})$$

e l'uscita, che qui è un vettore, può essere calcolata come:

$$\mathbf{z}_{out} = \sum_j \mu_j \mathbf{z}_j^* / \sum_j \mu_j$$

Allora il modello inferenziale Sugeno dice che l'output di ciascuna regola ha l'espressione:

$$\mathbf{z}_j^* = \mathbf{G}_j \mathbf{y} + \mathbf{h}_j$$

dove \mathbf{G}_j è una matrice di costanti di dimensione $(m-n) \times n$ ed \mathbf{h}_j è un vettore colonna con m-n elementi costanti.

Posto $\rho_j = \mu_j / \sum_j \mu_j$ si può scrivere $\mathbf{z}_{out} = \sum_j \rho_j \mathbf{z}_j^* = \sum_j \rho_j (\mathbf{G}_j \mathbf{y} + \mathbf{h}_j)$ che in forma matriciale è:

$$\mathbf{z}_{out}^T = [\rho_1 \mathbf{y}_1^T \quad \rho_1 \quad \dots \quad \rho_c \mathbf{y}_1^T \quad \rho_c] \quad :$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{G}_1^T \\ \mathbf{h}_1^T \\ : \\ \mathbf{G}_c^T \\ \mathbf{h}_c^T \end{bmatrix}$$

Dato un insieme di n punti campione $(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_n) = [(\mathbf{y}_1, \mathbf{z}_1), (\mathbf{y}_2, \mathbf{z}_2), \dots, (\mathbf{y}_n, \mathbf{z}_n)]$, imponendone i valori di input $(\mathbf{y}_1, \mathbf{y}_2, \dots, \mathbf{y}_n)$, il modello fornisce i seguenti valori di output:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{z}_{1out}^T \\ : \\ : \\ : \\ \mathbf{z}_{n,out}^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_{11} \mathbf{y}_1^T & \rho_{11} & \dots & \rho_{c1} \mathbf{y}_1^T & \rho_{c1} \\ : & : & & : & : \\ : & : & & : & : \\ : & : & & : & : \\ \rho_{1n} \mathbf{y}_n^T & \rho_{1n} & \dots & \rho_{cn} \mathbf{y}_n^T & \rho_{cn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{G}_1^T \\ \mathbf{h}_1^T \\ : \\ \mathbf{G}_c^T \\ \mathbf{h}_c^T \end{bmatrix}$$

Per un dato $(\mathbf{y}_1, \mathbf{y}_2, \dots, \mathbf{y}_n)$ la prima matrice a destra del segno di uguale risulta costante, mentre la seconda matrice contiene i parametri da ottimizzare.

Sostituendo nella matrice a sinistra dell'uguale i valori di output $(\mathbf{z}_1, \mathbf{z}_2, \dots, \mathbf{z}_n)$ del campione, l'equazione risultante rappresenta un problema di stima ai minimi quadrati lineare; la soluzione di un tale problema, possibile quando il numero dei dati campione è maggiore dei parametri da ottimizzare, è sempre un ottimo globale.

Utilizzando la notazione compatta, l'equazione ha la forma:

$$\mathbf{B} = \mathbf{A}\mathbf{X}$$

dove \mathbf{B} è la matrice dei valori di output, \mathbf{A} è la matrice costante, e \mathbf{X} è la matrice dei parametri da stimare.

La nota soluzione che minimizza $\|\mathbf{A}\mathbf{X} - \mathbf{B}\|^2$ è la:

$$\mathbf{X} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{B}$$

di cui risulta però gravoso il calcolo; si può allora utilizzare la procedura di stima ai minimi quadrati ricorsiva che determina la \mathbf{X} per mezzo delle formule iterative:

$$\mathbf{X}_{i+1} = \mathbf{X}_i + \mathbf{S}_{i+1} \mathbf{a}_{i+1} (\mathbf{b}_{i+1}^T - \mathbf{a}_{i+1}^T \mathbf{X}_i)$$

$$\mathbf{S}_{i+1} = \mathbf{S}_i - \mathbf{S}_i \mathbf{a}_{i+1} \mathbf{a}_{i+1}^T \mathbf{S}_i / (1 + \mathbf{a}_{i+1}^T \mathbf{S}_i \mathbf{a}_{i+1}) \quad i=0, 1, \dots, n-1$$

dove S_i è la matrice delle covarianze di dimensione $c(N+1) \times c(N+1)$, a_i^T è l' i -esimo vettore riga di A , e b_i^T è l' i -esimo vettore riga di B ; le condizioni iniziali sono $X_0=0$ e $S_0=\gamma I$ dove γ è un valore positivo grande ed I è la matrice identità.

Jang [78] ha proposto il metodo *ANFIS*.

Tale nome è l'acronimo di Adaptive Network-based Fuzzy Inference System, stante a significare un metodo basato su una rete neurale la cui struttura descrive un sistema fuzzy modello Sugeno.

Le reti neurali hanno la caratteristica di poter apprendere le relazioni tra i dati loro forniti attraverso la presentazione di numerosi esempi.

Esse possono risolvere complessi problemi di identificazione di un modello matematico a scatola nera non lineare, con un processo di messa a punto dei parametri che viene detto "addestramento" della rete neurale.

La si può rappresentare matematicamente con un grafo orientato i cui nodi rappresentano i neuroni artificiali, e gli archi le diramazioni con le quali i neuroni interagiscono.

Ad ogni arco in ingresso al neurone è associato un peso w_i che moltiplica la relativa variabile di ingresso x_i ; la somma dei segnali in ingresso ($\sum_i w_i x_i$) più una ulteriore soglia b_0 (costituente un ulteriore peso) diviene l'argomento di una funzione di attivazione (un blocco non lineare) che si immagina agisca all'interno del neurone; l'uscita $y=f(\sum_i w_i x_i + b_0)$ diviene una variabile di ingresso a successivi neuroni, vedi Figura 78:

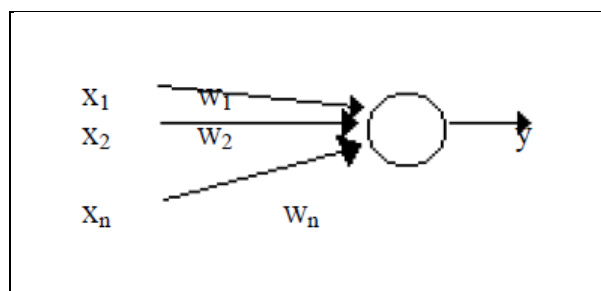


Figura 78 Archi, pesi e nodo neurale

La funzione di attivazione che più spesso viene utilizzata è di tipo sigmoideale:

$$f(\lambda)=1/(1+e^{-\lambda}).$$

Durante l'addestramento vengono fornite alla rete coppie input-output relative ad un set di dati campionari, in base alle quali vengono iterativamente aggiornati i valori dei pesi che attivano le connessioni tra i neuroni; un altro set di dati deve in genere essere disponibile a scopi di validazione per testare se la rete, dopo l'addestramento, è in grado di effettuare la necessaria generalizzazione.

Si usa schematizzare la rete neurale, il cui tipo più utilizzato nelle applicazioni è detto “perceptrone multistrato”, in più livelli: quello degli ingressi, quelli intermedi o nascosti, e quello delle uscite.

Considerando un solo strato nascosto, e con $i, j,$ e k gli indici rispettivamente dello strato di ingresso, nascosto e di uscita, vedi Figura 79:

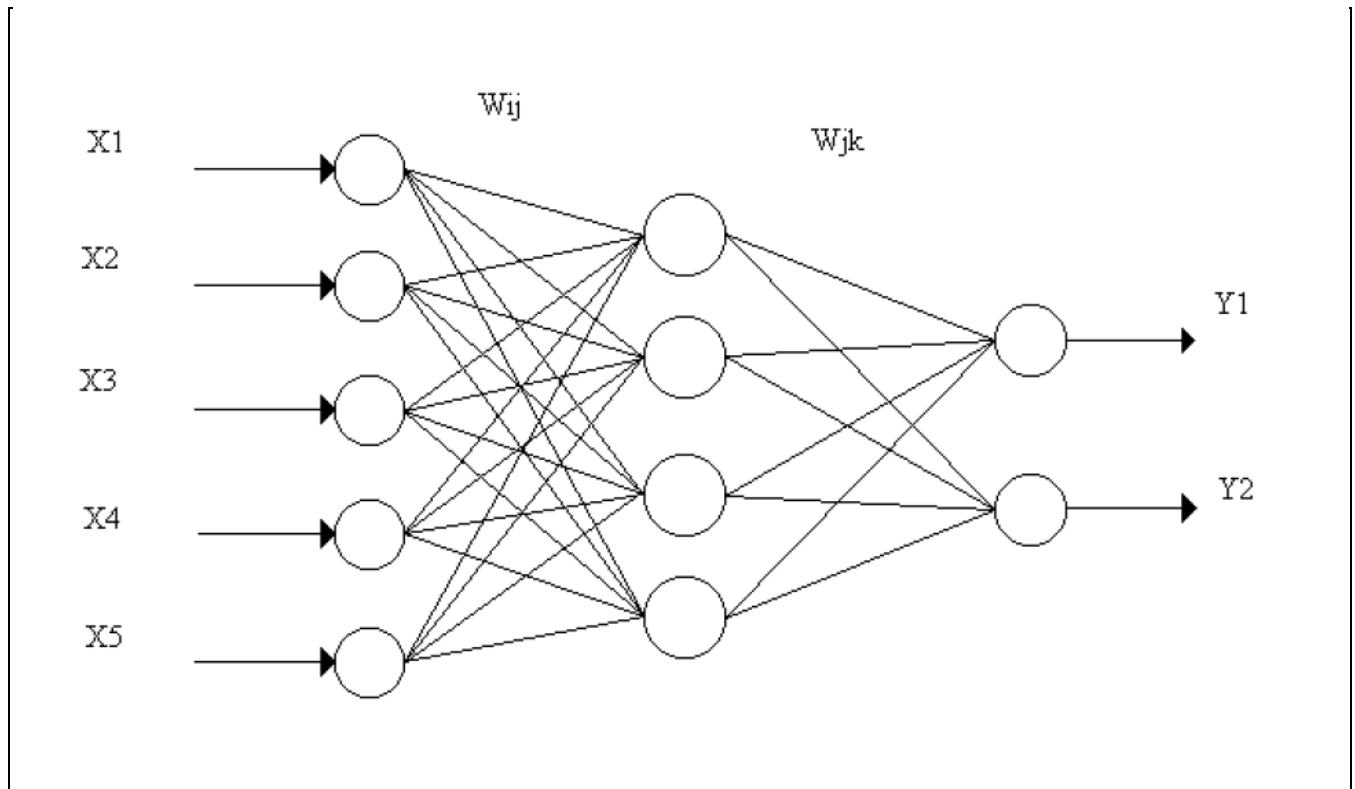


Figura 79 Perceptrone multistrato ad 1 strato nascosto

allora la k -esima uscita si calcola con:

$$y_k = \sum_j w_{jk} y_j + b_k$$

dove w_{jk} sono i pesi tra strato nascosto e di uscita, y_j è l'uscita del j -esimo neurone dello strato nascosto, e b_k è la soglia per il k -esimo neurone di uscita.

L'uscita del j -esimo neurone dello strato nascosto si calcola con:

$$y_j = 1 / [1 + e^{-(\sum_i w_{ij} x_i + b_j)}]$$

dove w_{ij} sono i pesi tra strato di ingresso e nascosto, x_i è l' i -esimo ingresso, e b_j è la soglia per il j -esimo neurone nascosto; per cui:

$$y_k = \sum_j w_{jk} \left\{ 1 / [1 + e^{-(\sum_i w_{ij} x_i + b_j)}] \right\} + b_k.$$

Se l, m, n sono rispettivamente il numero dei neuroni dello strato di ingresso, nascosto e di uscita, il numero di pesi della rete è $[(l+1)m + (m+1)n]$.

Il processo di apprendimento dei pesi è basato anche qui sulla comparazione tra il valore di output dato dalla rete e quello del dato campionario utilizzato per l'addestramento, quindi sul metodo della retropropagazione dell'errore con l'uso dell'algoritmo del gradiente.

Allora disponendo di coppie di valori input-output (x_p, y_p) , $p=(1,P)$ di un campione di dati sperimentale, e scegliendo come funzione da ottimizzare (al minimo):

$$J_p = \sum_k (y_k(x_p) - y_{kp})^2 / 2$$

all'iterazione $(p+1)$ -esima i valori dei pesi dovranno essere fissati seguendo le regole:

$$w_{jk}(p+1) = w_{jk}(p) - \eta \partial J_p / \partial w_{jk} \Big|_p$$

$$w_{ij}(p+1) = w_{ij}(p) - \eta \partial J_p / \partial w_{ij} \Big|_p .$$

Nell'ANFIS la rete è formata da cinque livelli, vedi Figura 80:

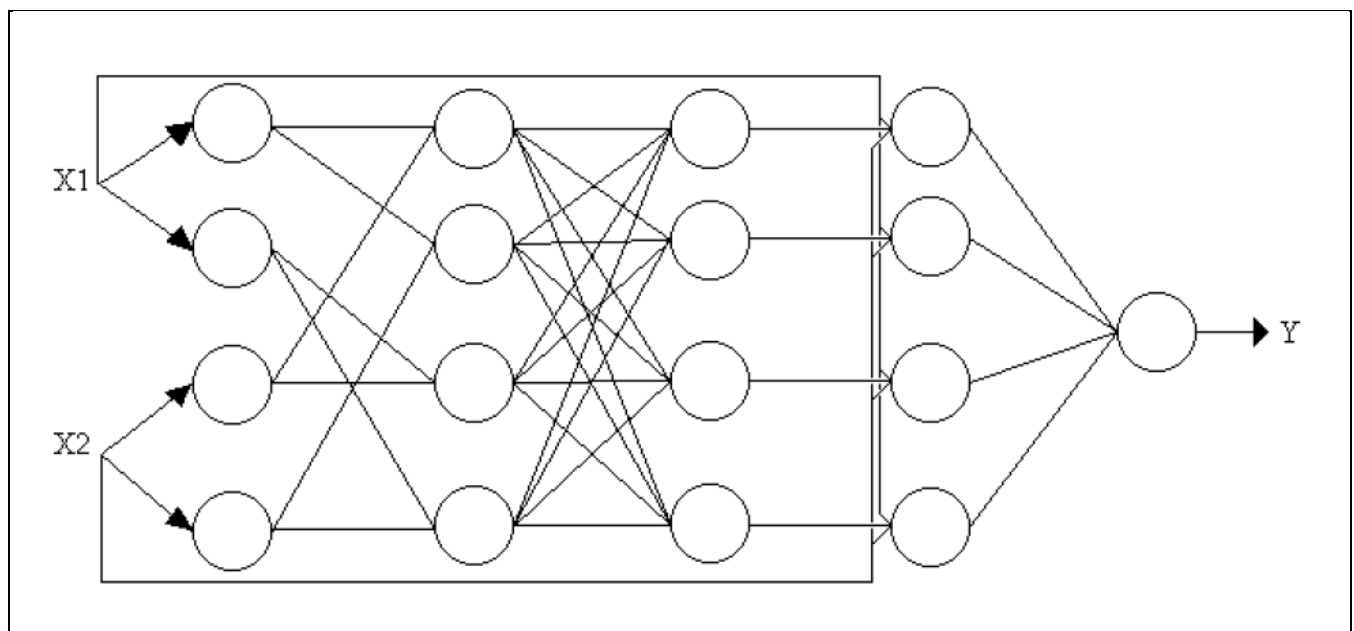


Figura 80 Percettrone ANFIS

L'uscita del generico neurone del primo livello è il grado di appartenenza della i -esima grandezza input all'insieme fuzzy A_{ji} ; la generica funzione di attivazione è:

$$\mu_{A_{ji}} = 1 / \{ 1 + \exp[-(x_i - w_{ji}) / w_{ji}^b] \}$$

dove i pesi di ingresso w_{ji} e w_{ji}^b rappresentano il centro e l'ampiezza della funzione di appartenenza all'insieme fuzzy A_{ji} .

Le funzioni di attivazione del secondo livello, con tanti nodi quante sono le regole fuzzy, costituiscono l'operatore logico AND; esso sceglie il minimo (od il prodotto) tra i segnali in ingresso:

$$\mu_j = \min_i \mu_{A_{ji}} .$$

Le funzioni di attivazione del terzo livello determinano il grado di attivazione relativo di ogni regola:

$$\mu_j^r = \mu_j / \sum_j \mu_j.$$

I nodi del quarto livello, ciascuno connesso con un nodo del livello precedente e con tutte le variabili di input, calcolano l'output relativo di ciascuna regola:

$$y_j = \mu_j^r (a_{j1}x_1 + a_{j2}x_2 + \dots + a_{jn}x_n + b_j).$$

Il nodo del quinto livello determina l'uscita defuzzyficata:

$$y = \sum_j y_j.$$

Il metodo per la clusterizzazione dei dati è qui detto *subtractive clustering*.

Anche questo è una forma modificata del metodo *mountain* di Yager e Filev, e come il metodo di Chiu considera come potenziale cluster center ciascun punto-campione.

Per evitare una esplosione del numero di regole, cioè di clusters, quando il numero delle grandezze di input diviene moderatamente grande, cioè più di quattro o cinque, il numero dei cluster center viene automaticamente determinato in modo che venga generato il numero minimo di regole necessario ad impiegare tutti gli insiemi fuzzy relativi a ciascuna grandezza di input.

Per l'ottimizzazione dei parametri si può scegliere tra la retropropagazione dell'errore ed un metodo ibrido che adotta la retropropagazione per i parametri della parte antecedente di ciascuna regola, e la stima ai minimi quadrati per i parametri della parte conseguente, visto che il modello inferenziale adottato è quello di Sugeno.

5.2 IL MODELLO ANFIS DEL DECADIMENTO DELL'ADERENZA BASATO SULLE CAMPAGNE DI RILIEVO

Ad un duplice scopo di:

- ulteriore indagine sulla modellabilità del fenomeno di decadimento dell'aderenza;
- set-up di un modello previsionale dall'utilizzo più immediato rispetto a quello analitico nell'ambito dell'esercizio aeroportuale;

si è ricercato un sistema inferenziale adattivo neuro - fuzzy (ANFIS). In tale modello, basato su logica fuzzy e privo di relazioni matematiche esplicite, si è scelto di fare riferimento ai pesi di targa.

Per l'implementazione dell'ANFIS è stato utilizzato l'ambiente software MATLAB R2014a – MathWorks.

5.2.1 LE VARIABILI DI INPUT E DI OUTPUT

Si sono considerate due variabili di input:

- (GN_{restart} ; $CMLW_y$)

ed una di output:

- (GN).

I valori di dette variabili si riferiscono alle 23 date delle campagne di rilievo 2004-2015 sugli allineamenti ± 3 e ± 6 (vedi Tabella 39 § 2.3), disponendo quindi complessivamente di 46 records (GN_{restart} ; $CMLW_y$; GN).

I valori dei GN_{restart} dovrebbero essere quelli rilevati sugli allineamenti immediatamente dopo l'operazione manutentiva di sgommatura; qui sono stati adoperati quelli rintracciati sull'abaco del modello empirico – meccanicistico come True Restarting Points.

I valori del $CMLW_y$ e del GN sono rispettivamente quelli calcolati con il modello dei carichi Equazione (16) e quelli misurati nelle 23 campagne di rilievo.

5.2.2 IL CARICAMENTO DEI DATI: TRAINING E CHECKING / TESTING

In questa fase occorre fornire all'algoritmo i dati campionari, disposti in forma di matrice nella quale le prime 2 colonne contengono i valori delle 2 variabili di input, e l'ultima colonna i valori della variabile di output.

E' degno di nota il fatto che non ha importanza l'unità di misura con cui le variabili vengono presentate; la caratteristica principale di un sistema fuzzy è proprio quella di definire una "mappatura" tra lo spazio degli ingressi e quello dell'uscita senza ricorso a relazioni matematiche che avrebbero comportato l'accordanza tra le unità di misura delle variabili.

Tali 46 records sono poi stati divisi in una matrice di 39 records ed in una di 7 pari al 18% dei precedenti. Infatti l'algoritmo prevede di poter fornire alla rete neuro - fuzzy un primo set di dati per "l'allenamento" della rete stessa, e che per questo vengono definiti dati di training, e, facoltativamente, un secondo set di dati che si ritengono, con un buon tasso di fiducia, esenti da errori casuali, e quindi maggiormente rappresentativi del fenomeno in oggetto ed in grado di generalizzarlo meglio. Tale secondo set di dati può venir utilizzato per calibrare i parametri del modello, come vedremo meglio in seguito, per evitare un super-adattamento sui dati di training, ed in tal caso i dati vengono detti di checking. Oppure per controllare, rispetto ad essi, la bontà del modello ottenuto in termini di output, ed in tal caso vengono detti di testing.

Tali due matrici sono riportate in Tabella 51 e Tabella 52. Sono stati scelti come records per il checking e/o testing le rilevazioni:

- 16/06/2005 ± 3 ;
- 16/06/2005 ± 6 ;
- 03/07/2007 ± 3 ;
- 14/10/2009 ± 6 ;
- 11/10/2011 ± 3 ;
- 17/05/2012 ± 3 ;
- 18/04/2013 ± 6 .

Tabella 51 Matrice di Training ANFIS da campagne di rilievo

0.91	0.15104	0.90
0.91	0.57098	0.88
0.91	2.01693	0.85
0.91	2.49780	0.81
0.91	3.75859	0.72
0.91	0.25247	0.90
0.91	1.01808	0.87
0.91	3.64013	0.76
0.91	4.51629	0.62
0.88	5.37317	0.85
0.88	6.19560	0.81
0.88	8.01514	0.72
0.88	8.60459	0.69
0.88	8.72735	0.64
0.88	9.43966	0.60
0.88	9.58786	0.53
0.85	9.66899	0.82
0.85	11.11202	0.71
0.85	11.76773	0.66
0.85	14.16318	0.61
0.85	15.09163	0.50
0.85	15.29015	0.40
0.85	16.65141	0.31
0.835	9.90778	0.81
0.835	10.28474	0.80
0.835	11.21058	0.79
0.835	11.33881	0.78
0.835	12.02100	0.73
0.835	13.47662	0.70
0.835	14.25736	0.63
0.835	14.55510	0.54
0.775	17.16472	0.73
0.775	19.23214	0.69
0.775	19.42440	0.68
0.775	20.20207	0.67
0.775	20.45418	0.64
0.775	22.66975	0.59
0.775	23.85636	0.51
0.775	24.32281	0.47

Tabella 52 Matrice di Checking e/o Testing ANFIS da campagne di rilievo

0.91	1.35934	0.86
0.91	2.47496	0.78
0.91	6.80399	0.39
0.88	6.58498	0.75
0.85	16.42117	0.38

0.835	11.85982	0.77
0.775	17.75766	0.72

Una volta caricati i dati, i primi come training ed i secondi come checking e/o testing, la loro distribuzione rispetto al valore della variabile di output, riportata in ordinata, è visibile nelle Figure 81, 82 e 83. In ascissa è indicato invece il numero di riga della matrice in cui si trova il singolo dato.



Figura 81 Dati di Training ANFIS da campagne di rilievo

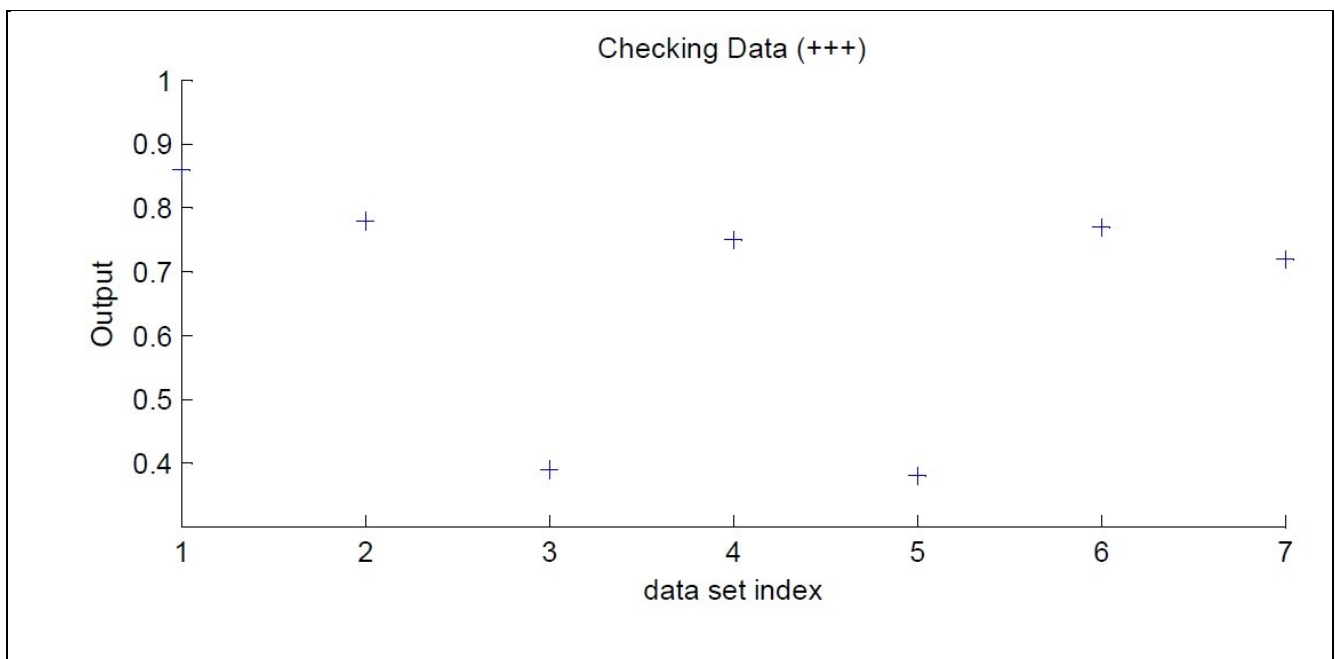


Figura 82 Dati di Checking ANFIS da campagne di rilievo

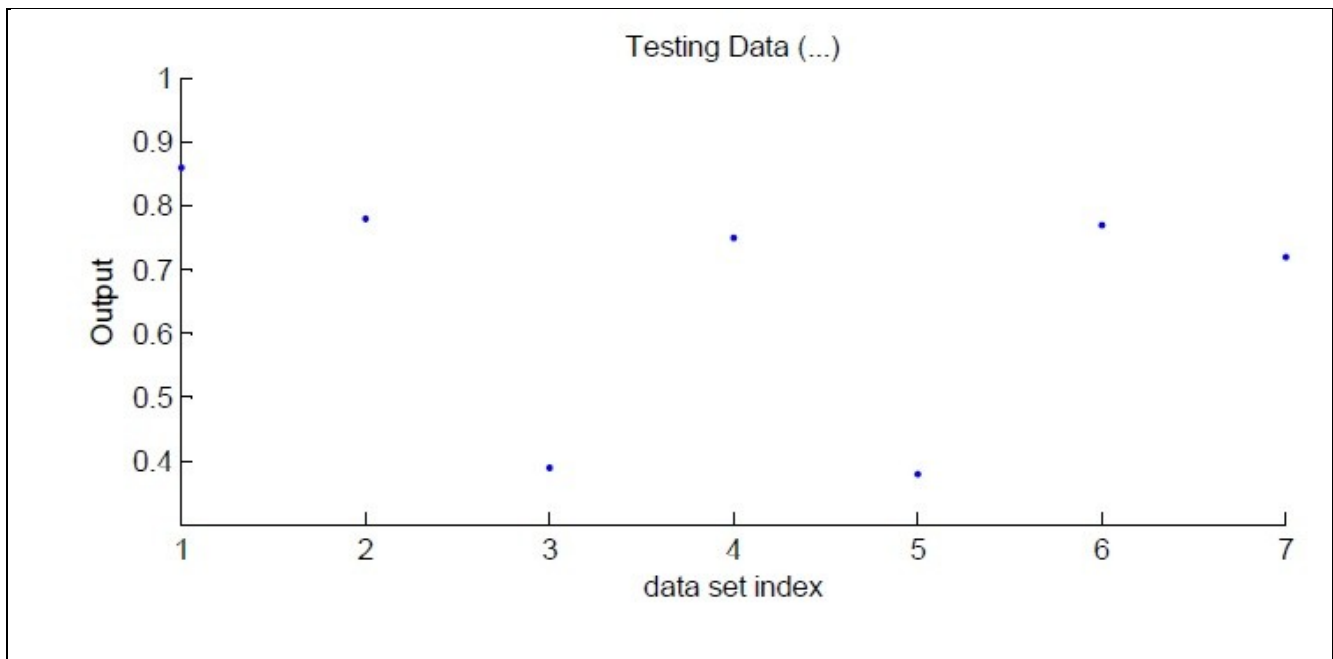


Figura 83 Dati di Testing ANFIS da campagne di rilievo

5.2.3 LA GENERAZIONE DEL FIS

In questa fase si definisce la struttura di base del sistema inferenziale fuzzy (FIS), cioè la definizione delle sue regole nel tipo e nel numero.

Come già illustrato nel § 5.1.4, questa operazione corrisponde alla clusterizzazione dei dati campionari, potendo individuare in ogni cluster ottenuto una regola del tipo:

IF x_1 is A_{j1} AND ... AND x_i is A_{ji} AND ... AND x_n is A_{jn} THEN y is B_j .

Le coordinate dei centri dei cluster così ottenuti costituiscono una stima iniziale dei parametri delle funzioni di appartenenza, che verranno poi ottimizzati nella fase successiva.

Dei due metodi di clusterizzazione proposti dal codice di calcolo utilizzato, grid partition e subtractive clustering, si è optato per il secondo. Il primo infatti, una forma modificata del metodo mountain di Yager e Filev (vedi § 5.1.4) produce una struttura basata su un numero di regole derivanti dal fissato numero di funzioni di appartenenza per ciascuna variabile di input. Il che causa una esplosione nel numero di regole: fissando 5 funzioni di appartenenza per ciascun input, sarebbero risultate $5^2=25$ regole.

Il secondo metodo invece genera un numero di cluster, e quindi di regole, che è quello minimo per impiegare tutti gli insiemi fuzzy (funzioni di appartenenza) relativi a ciascun input.

Occorre a questo punto precisare che, anche con tale metodo, il processo di generazione del FIS non è automatico, bensì guidato dall'operatore. Infatti il subtractive clustering è anche esso una forma modificata del metodo mountain di Yager e Filev, con un algoritmo di clusterizzazione corrispondente a quello di Chiu (vedi § 5.1.4). In questo algoritmo il risultato finale dipende dalla scelta dei valori da assegnare ai parametri r_a , r_b , ϵ' , ϵ'' , i primi due dei quali hanno influenza sulla grandezza e

sulla posizione reciproca dei clusters, gli altri due sul criterio di determinazione del numero totale di clusters (criterio di arresto). Variando tali parametri varia la aggregazione dei punti campionari nei vari clusters, potendo risultare più o meno clusters, e quindi un modello che sia super-aderente ai dati o che generalizzi di più; oppure potendo risultare, a parità di clusters ottenuti, diversa la disposizione dei punti in essi, e quindi delle correlazioni diverse. Ciò ha riflessi anche sulla successiva ottimizzazione del modello, che prende inizio dai valori delle coordinate dei cluster centers, e quindi sulla capacità finale del modello di rappresentare il fenomeno in esame.

Nella scelta di tali parametri l'operatore deve quindi farsi guidare da esperienza e giudizio critico nel valutare i risultati ottenuti in termini, come si vedrà meglio in seguito, di numero di funzioni di appartenenza ottenute, dell'indice complessivo di errore tra output campionari e output forniti dal modello, della sovrapposibilità tra i singoli output campionari e quelli forniti dal modello, dall'andamento dei vari input in funzione dell'output tramite la visualizzazione delle superfici. Occorre allora effettuare più prove, completando anche le fasi successive a questa della clusterizzazione, e fare una scelta supportata sia dai risultati obiettivi ottenuti sia dalle aspettative soggettive dell'operatore.

Per quanto riguarda la presente fase, la scelta finale dei valori da assegnare ai quattro parametri è stata la seguente:

$$r_a = 0.5; r_b = 0.15; \varepsilon' = 0.5; \varepsilon'' = 1.25.$$

Ciò ha comportato l'assegnazione di 5 funzioni di appartenenza, di tipo gaussiano, per ciascuna delle 2 variabili di input, e la creazione di 5 regole.

La Figura 84 mostra una rappresentazione, schematizzata in forma di grafo, della struttura del FIS così ottenuto.

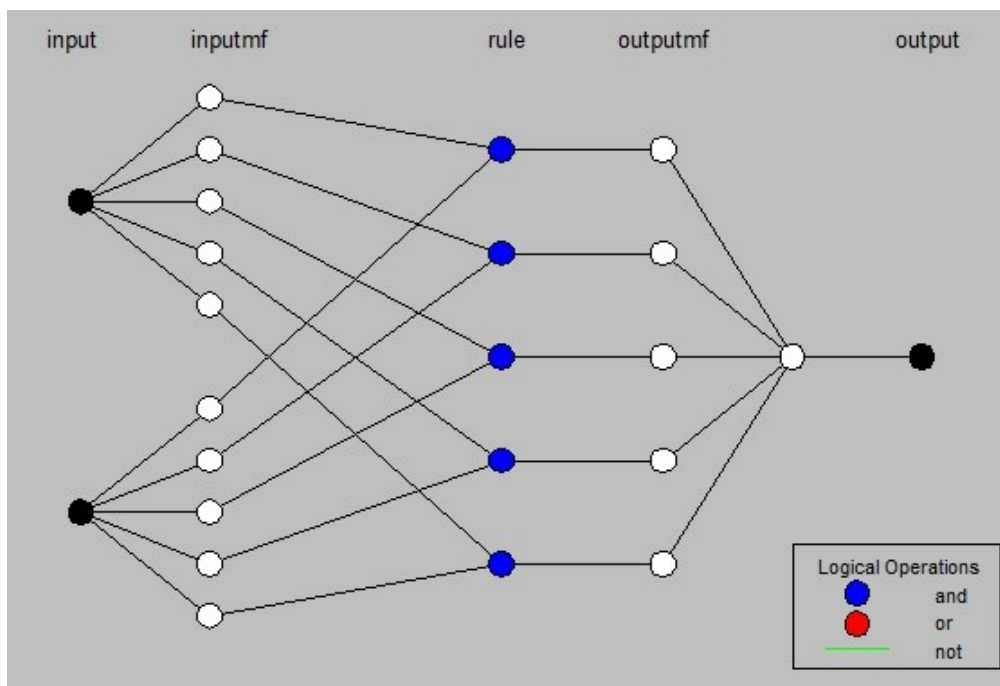


Figura 84 Struttura del FIS ANFIS da campagne di rilievo

Il nodo in rosso rappresenta un fattore di normalizzazione, da applicare se si è assegnato un peso differente alle varie regole; in tale caso esso non è attivo poiché si è assegnato un peso unitario a ciascuna delle due regole.

5.2.4 L'OTTIMIZZAZIONE DEL FIS

In questa fase avviene il cosiddetto “allenamento della rete neurale”, corrispondente alla taratura dei parametri caratteristici delle funzioni di appartenenza.

Il campione di dati sperimentale viene qui utilizzato per imporre ai parametri delle funzioni di appartenenza dei valori tali da minimizzare la differenza tra i valori di output forniti dal sistema e quelli dei dati stessi (vedi § 5.1.2.4).

Dei due metodi proposti dal programma, backpropagation e hybrid, si è optato per il secondo, che adotta la retropropagazione dell'errore per i parametri delle parte antecedente di ciascuna regola, e la stima ai minimi quadrati per la parte conseguente, e che si è dimostrato particolarmente efficiente per il modello inferenziale Sugeno, quello qui adottato (vedi § 5.1.4).

I due parametri richiesti per l'esecuzione di tale operazione, l'error tolerance e le epochs, sono due criteri di stop: quello dei due che viene soddisfatto per primo determina la fine dell'ottimizzazione.

L'error tolerance è un indice dell'errore complessivo che si intende accettare tra i valori di output forniti dal sistema inferenziale e quelli dei dati campionari: esso è pari alla radice quadrata della media degli errori quadratici, dove gli errori sono le singole differenze tra gli output campionari e quelli del sistema.

Le epochs sono i cosiddetti “giri di rete”, cioè le routine di ottimizzazione dell'algoritmo.

Si sono impostati i seguenti valori:

Error Tolerance= 0

Epochs= 15.

Nella Figura 85 è possibile osservare l'andamento dell'indice di errore durante l'ottimizzazione per entrambi i set di dati caricati, di training e checking. L'andamento dell'indice di errore dei dati di checking (curva superiore) ci rivela che tale set di dati non si è qui dimostrato utile allo scopo, che è quello di evitare che i parametri delle funzioni di appartenenza siano super-adattati ai soli dati di training, con perdita di generalità. Un andamento ottimale a questo scopo sarebbe invece quello in cui il checking error decrescesse inizialmente, fino ad un punto in cui esso improvvisamente aumentasse. Quello sarebbe il punto in cui inizierebbe il super-adattamento (model overfitting), e l'ottimizzazione sarebbe fissata in sua corrispondenza, cioè all'epoch (giro di rete) in corrispondenza del minimo del checking error. Come si può invece notare nel nostro caso tale minimo occorre all'inizio dell'ottimizzazione; questo ci fa propendere per la rinuncia al secondo set di dati come checking e la

sua considerazione come dati di testing, che cioè non influenzino la taratura dei parametri, ma costituiscano semplicemente un ulteriore set su cui controllare la bontà del modello ottenuto.

Ricaricando i dati come detto, la Figura 86 mostra l'andamento dell'indice di errore per i soli dati di training. Al termine dell'ottimizzazione, che si verifica alla 15-esima epoch, tale indice si attesta sul valore di 0.022506. Ciò significa che, fornendo al modello gli stessi valori di input sui quali è stato allenato, esso darebbe un GN che si discosterebbe, mediamente, di 0.022506 in più o in meno rispetto agli output campionari.



Figura 85 Training Error Training Data + Checking Data ANFIS da campagne di rilievo

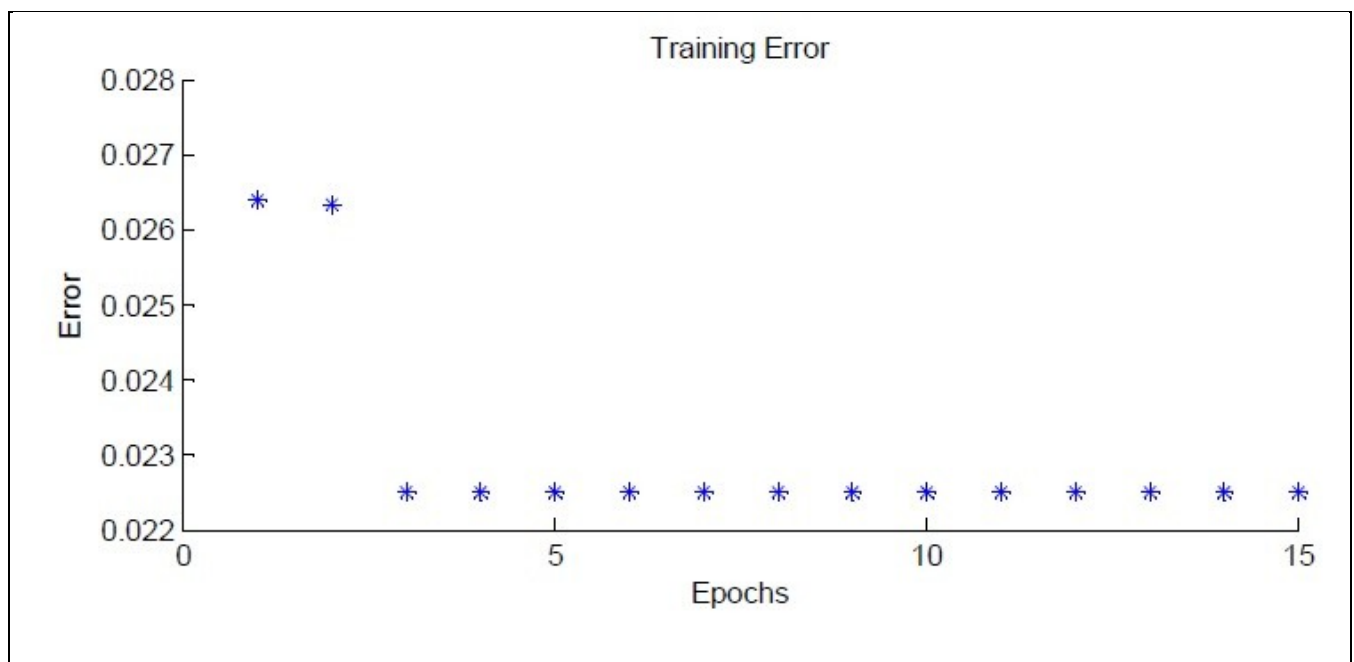


Figura 86 Training Error Training Data ANFIS da campagne di rilievo

5.2.5 IL TEST DEL SISTEMA

L'indice di errore di cui si è detto al paragrafo precedente fornisce una valutazione complessiva sulla prestazione del modello in termini di riproducibilità del fenomeno.

Con questo test è invece possibile osservare come i singoli output campionari vengano riprodotti, se cioè la disposizione degli output campionari e quelli previsti dal modello sia, se non coincidente, quanto meno contigua.

Le Figure 87 e 88 mostrano tale test per i due set di dati caricati, il primo di training ed il secondo di testing; lo scatterplot mostra che in entrambi i casi c'è, tranne qualche punto isolato, una sostanziale sovrapposibilità degli output, essendo i punti in rosso rappresentativi degli output previsti dal modello, e quelli in blu rappresentativi degli output campionari.

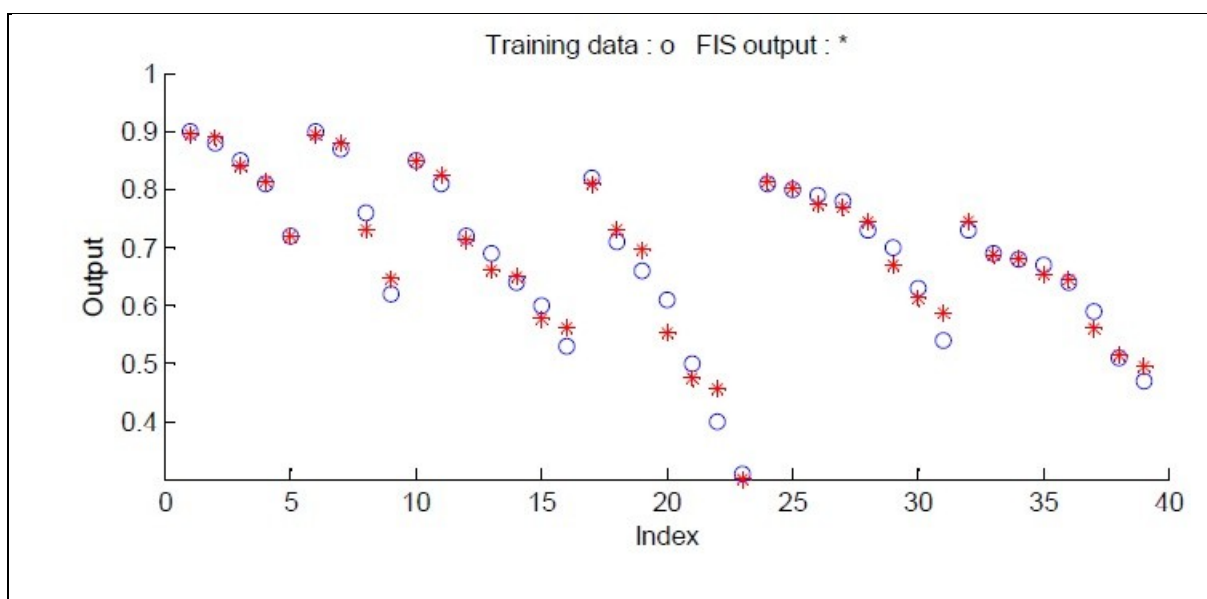


Figura 87 Fis Output vs Training Data ANFIS da campagne di rilievo

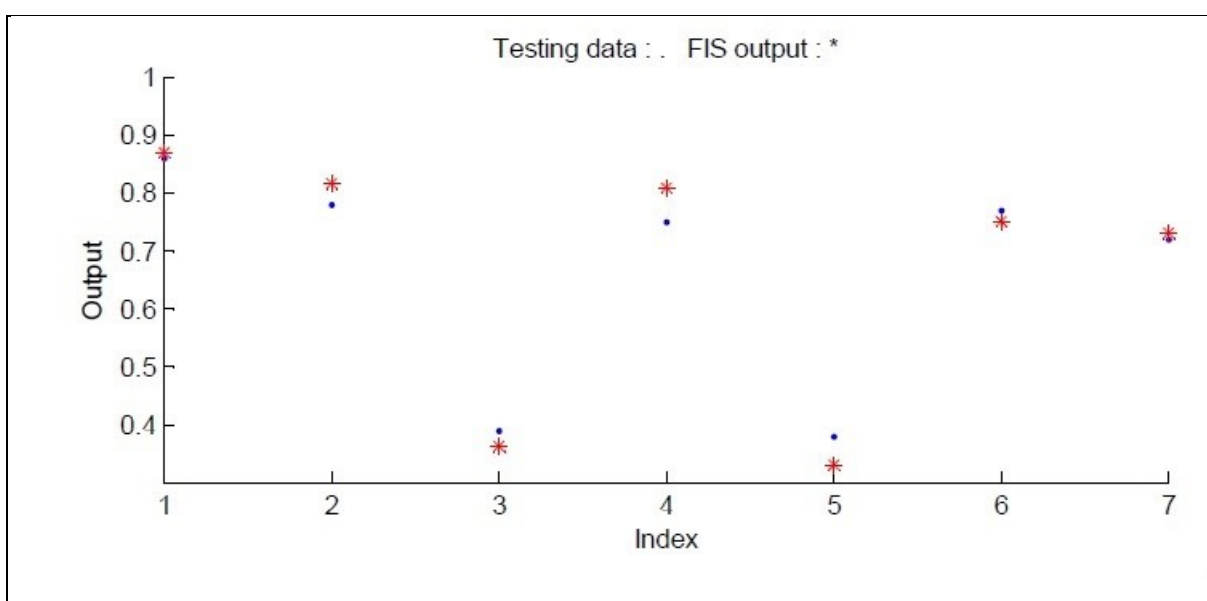


Figura 88 Fis Output vs Testing Data ANFIS da campagne di rilievo

5.2.6 LE FUNZIONI DI APPARTENENZA

L'utilità di poter disporre di un campione di dati per "settare" un sistema inferenziale, appare in maniera chiara quando, una volta "allenata" la rete, si osservano le funzioni di appartenenza delle variabili di input (quella di output non ha funzione di appartenenza nel modello Sugeno).

Dalle Figure 89 e 90, si rileva il lavoro effettuato dall'algoritmo di clusterizzazione prima e di ottimizzazione poi nel definire, per ogni variabile e nel relativo campo di variazione, la media e la varianza delle cinque gaussiane. Ben difficilmente un operatore avrebbe potuto effettuare una disposizione altrettanto aderente al fenomeno che i dati rappresentano, anche con una conoscenza approfondita di esso.

La netta separazione tra le cinque gaussiane per una variabile e, viceversa, la quasi sovrapposibilità per l'altra, è indice del ruolo svolto dalle varie componenti di ciascun dato campionario nella sua attribuzione ad un cluster o ad un altro; è evidente che le variabili che presentano le cinque gaussiane maggiormente distanziate hanno giocato un ruolo maggiore in tale attribuzione.

E' possibile attribuire a ciascuna funzione, in luogo della indicata e generica μ_{mf_i} , un qualunque aggettivo che descriva l'insieme fuzzy associato alla funzione di appartenenza.

E' importante ricordare quale sia l'importanza del numero delle funzioni di appartenenza. Ciascuna di esse descrive quanto un valore numerico sia aderente ad una qualità (classe, insieme) fuzzy della variabile in oggetto, quindi ciascuna funzione è relativa ad una qualità che si è voluto attribuire alla variabile. E' evidente allora che un maggiore o minor numero di funzioni di appartenenza si riflette in un maggiore o minor numero di classi in cui viene distinta la caratteristica descritta dalla variabile, risultandone una modellizzazione del fenomeno più spinta o più generalizzata. Come detto in precedenza nel paragrafo 2.5.1.2, sta all'esperienza e abilità dell'operatore trovare un compromesso soddisfacente, in quanto se da un lato una generalizzazione eccessiva potrebbe generare un modello scarsamente rappresentativo perché poco preciso, una modellizzazione troppo spinta sui dati campionari a disposizione potrebbe portare parimenti ad un modello scarsamente rappresentativo per due motivi: perché sarebbe super-aderente ai dati raccolti e molto poco ad altri di cui non si è avuta la disponibilità, e perché potrebbe leggere nei dati a disposizione anche alcune piccole fluttuazioni nelle caratteristiche che non sono descrittive del fenomeno ma casuali. In quest'ultima eventualità il modello potrebbe fornire degli output che spazino in un campo molto più vasto di quello fornito dai dati campionari.

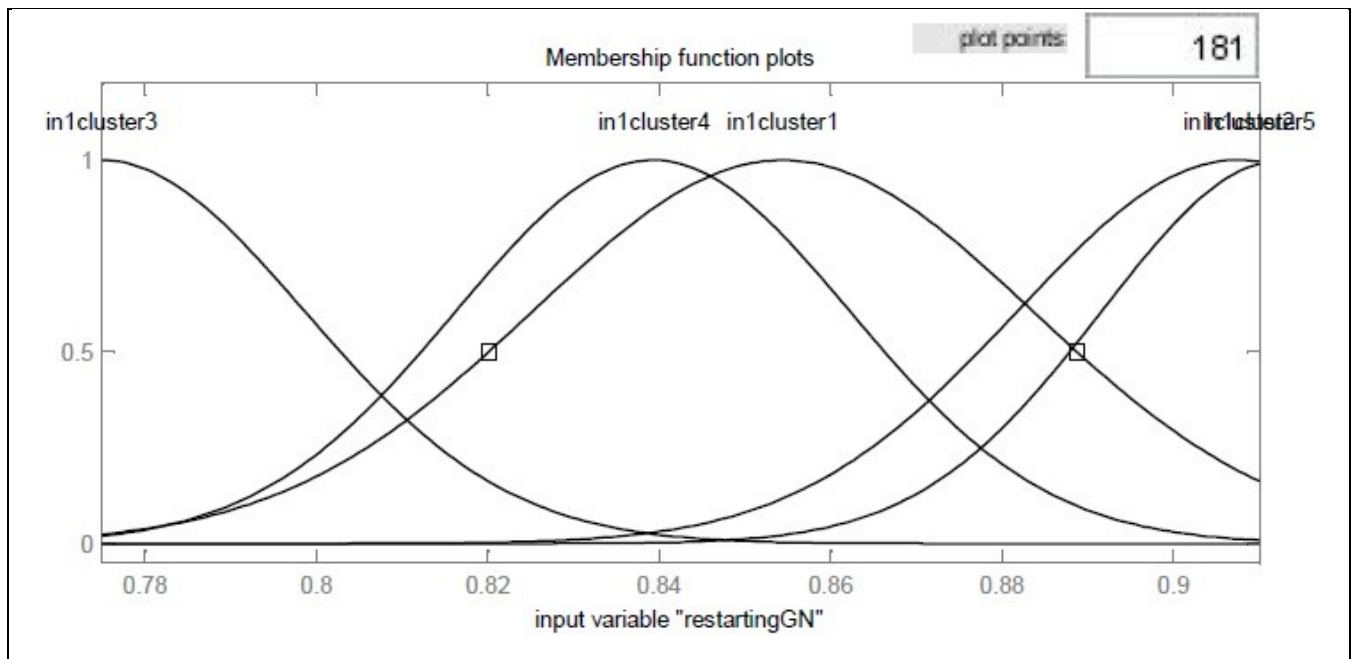


Figura 89 Funzioni di Appartenenza della variabile $GN_{restart}$ ANFIS da campagne di rilievo

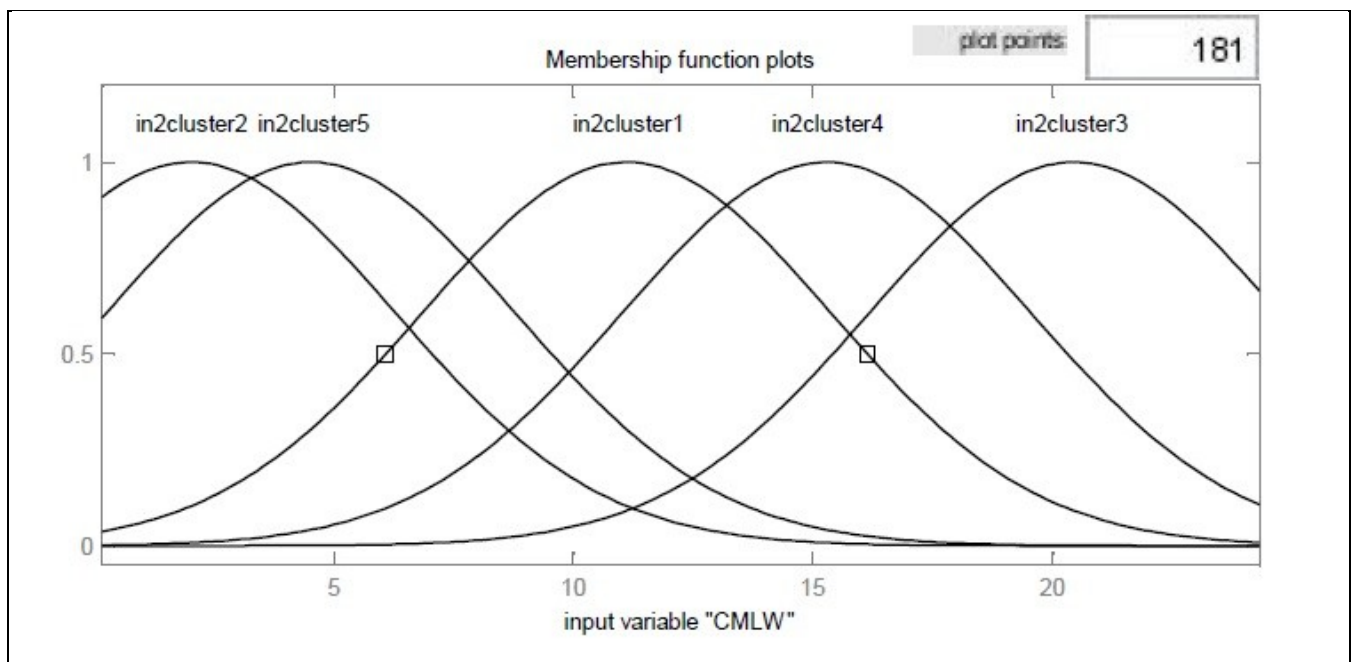


Figura 90 Funzioni di Appartenenza della variabile $CMLW_y$ ANFIS da campagne di rilievo

5.2.7 LE REGOLE FUZZY IN FORMA OPERATIVA

L'utilità di un sistema inferenziale fuzzy si concretizza nell'uso delle sue regole. Infatti è attraverso di esse che si esplica il meccanismo di tipo "black box" (scatola nera) per cui immettendo dei valori in ingresso se ne ottiene quello in uscita.

Come già detto prima al § 5.2.3, con la scelta dei parametri effettuata, si sono ottenute 5 funzioni di appartenenza gaussiane per ciascuna variabile di input e la creazione di 5 regole.

L'espressione verbale di tali cinque regole è la seguente:

SE il $GN_{restart}$ è in1mf1 E il $CMLW_y$ è in2mf1 ALLORA il GN è out1mf1;

SE il $GN_{restart}$ è in1mf2 E il $CMLW_y$ è in2mf2 ALLORA il GN è out1mf2;

SE il $GN_{restart}$ è in1mf3 E il $CMLW_y$ è in2mf3 ALLORA il GN è out1mf3;

SE il $GN_{restart}$ è in1mf4 E il $CMLW_y$ è in2mf4 ALLORA il GN è out1mf4;

SE il $GN_{restart}$ è in1mf5 E il $CMLW_y$ è in2mf5 ALLORA il GN è out1mf5;

dove in_jmf_i è l'aggettivo che descrive l'insieme fuzzy associato alla funzione di appartenenza i della variabile input j .

La Figura 91 mostra invece tali cinque regole in forma "operativa", cioè con il campo di variazione di ciascuna variabile, con le funzioni di appartenenza delle variabili di input, con gli output di ciascuna regola, e con l'output finale conseguente alle operazioni di somma logica e defuzzyficazione.

I gradi di appartenenza qui evidenziati per ciascuna funzione sono quelli relativi al valore centrale del campo di variazione di ciascuna variabile di input; l'immediatezza d'uso delle regole consiste proprio nella possibilità di variare a piacimento i valori di ingresso ottenendo il corrispondente valore di uscita.

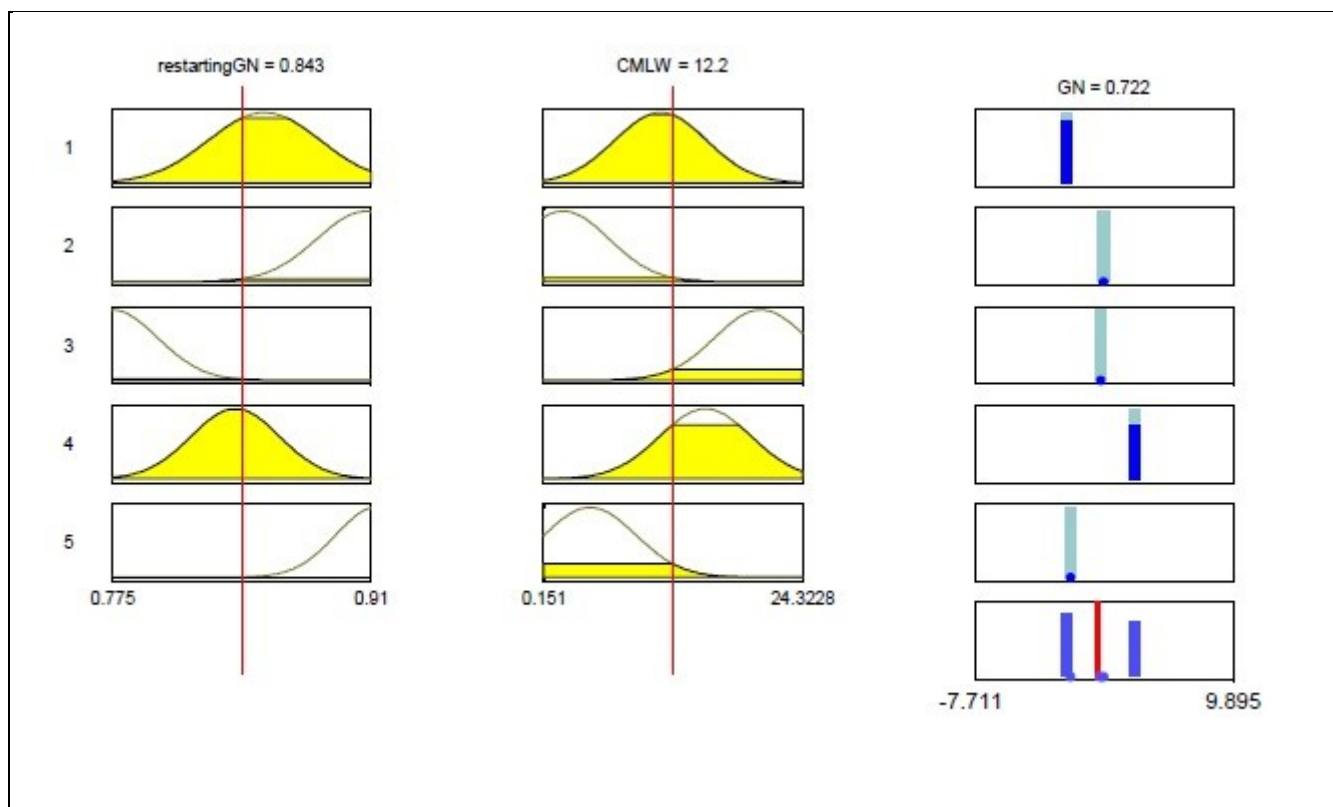


Figura 91 Regole fuzzy in forma operativa ANFIS da campagne di rilievo

5.3 IL MODELLO ANFIS DEL DECADIMENTO DELL'ADERENZA DUALE DEL MODELLO EMPIRICO – MECCANICISTICO

Esplorata la robustezza del modello ANFIS precedente basato sui dati delle campagne di rilievo, si è proceduto ad elaborare un secondo modello in cui:

- i punti costituenti il set di *training data* sono gli output del modello empirico – meccanicistico $CMLW_y - GN$, per un totale di 445 records;
- i punti costituenti il set di *checking e/o testing data* sono quelli relativi a tutte le 23 date di rilievo 2004-2015 sugli allineamenti ± 3 e ± 6 , per un totale di 46 records pari al 10% dei precedenti.

Tale secondo ANFIS può guardarsi come una ‘black-box’ coniugata al modello empirico – meccanicistico, adoperandolo in sua alternativa per l'immediatezza d'uso delle regole fuzzy in forma operativa, come illustrato al § 5.2.7.

5.3.1 LE VARIABILI DI INPUT E DI OUTPUT

Le due variabili di input:

- (GN_{restart} ; $CMLW_y$)

e quella di output:

- (GN)

sono le stesse del modello ANFIS precedente.

I valori dei GN_{restart} sono quelli del modello empirico – meccanicistico per i dati di training, e quelli rintracciati sull'abaco del modello come True Restarting Points per i dati di checking e/o testing.

I valori del $CMLW_y$ sono quelli calcolati con il modello dei carichi Equazione (16).

I valori del GN sono quelli del modello empirico – meccanicistico per i dati di training e quelli misurati nelle 23 campagne di rilievo per i dati di checking e/o testing.

5.3.2 IL CARICAMENTO DEI DATI: TRAINING E CHECKING / TESTING

Le due matrici per il training ed il checking e/o testing sono riportate in Appendice F.

Una volta caricati i dati, i primi come training ed i secondi come checking e/o testing, la loro distribuzione rispetto al valore della variabile di output, riportata in ordinata, è visibile nelle Figure 92, 93 e 94. In ascissa è indicato invece il numero di riga della matrice in cui si trova il singolo dato.

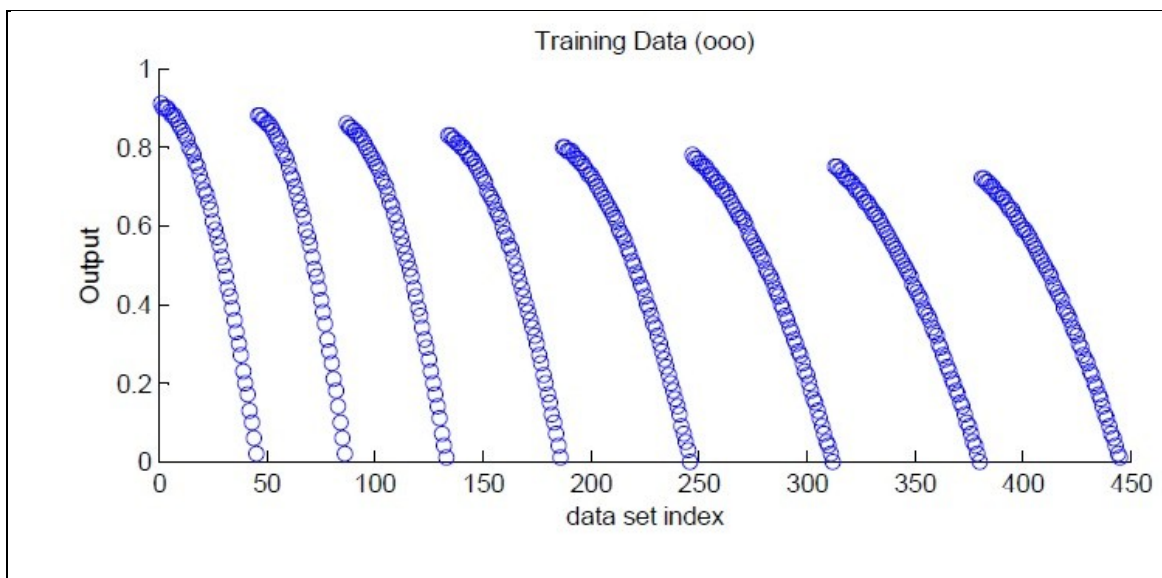


Figura 92 Dati di Training ANFIS duale del modello empirico – meccanicistico

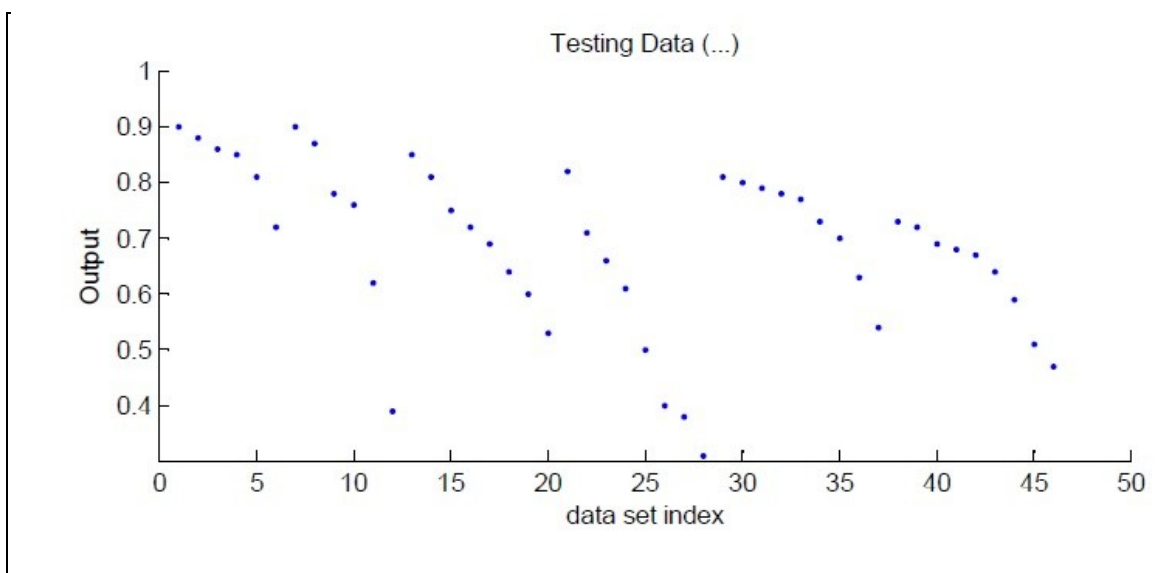


Figura 93 Dati di Testing ANFIS duale del modello empirico – meccanicistico

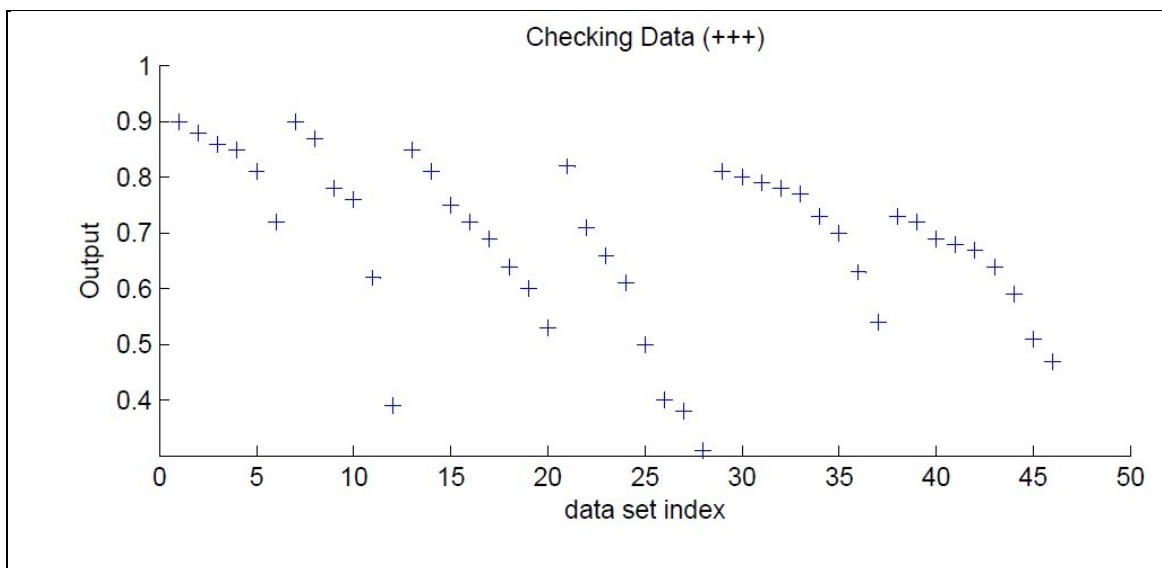


Figura 94 Dati di Checking ANFIS duale del modello empirico – meccanicistico

5.3.3 LA GENERAZIONE DEL FIS

Dei due metodi di clusterizzazione proposti dal codice di calcolo utilizzato, grid partition e subtractive clustering, si è optato ancora per il secondo (vedi § 5.2.3).

La scelta finale dei valori da assegnare ai quattro parametri è stata la seguente:

$r_a = 0.5$; $r_b = 0.15$; $\varepsilon' = 0.35$; $\varepsilon'' = 1.25$.

Ciò ha comportato l'assegnazione di 13 funzioni di appartenenza, di tipo gaussiano, per ciascuna delle 2 variabili di input, e la creazione di 13 regole.

La Figura 95 mostra una rappresentazione, schematizzata in forma di grafo, della struttura del FIS così ottenuto.

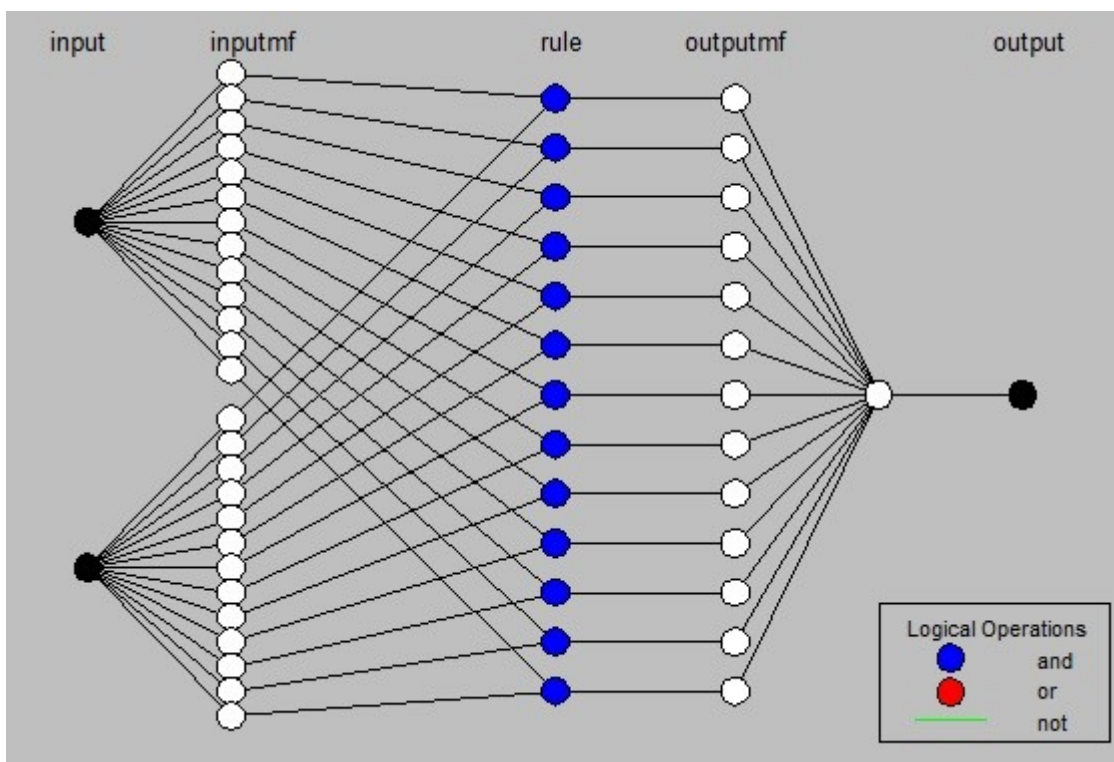


Figura 95 Struttura del FIS ANFIS duale del modello empirico - meccanicistico

5.3.4 L'OTTIMIZZAZIONE DEL FIS

Dei due metodi proposti dal programma, backpropagation e hybrid, si è optato ancora per il secondo (vedi § 5.2.4).

Si sono impostati i seguenti valori:

Error Tolerance= 0

Epochs= 15.

Nella Figura 96 è possibile osservare l'andamento dell'indice di errore durante l'ottimizzazione per entrambi i set di dati caricati, di training e checking. L'andamento dell'indice di

errore dei dati di checking (curva superiore) ci rivela che tale set di dati anche qui non si è dimostrato utile allo scopo (vedi § 5.2.4).

Ricaricando i dati come detto (vedi § 5.2.4), la Figura 97 mostra l'andamento dell'indice di errore per i soli dati di training. Al termine dell'ottimizzazione, che si verifica alla 15-esima epoch, tale indice si attesta sul valore di 0.0032547. Ciò significa che, fornendo al modello gli stessi valori di input sui quali è stato allenato, esso darebbe un GN che si discosterebbe, mediamente, di 0.0032547 in più o in meno rispetto agli output campionari.

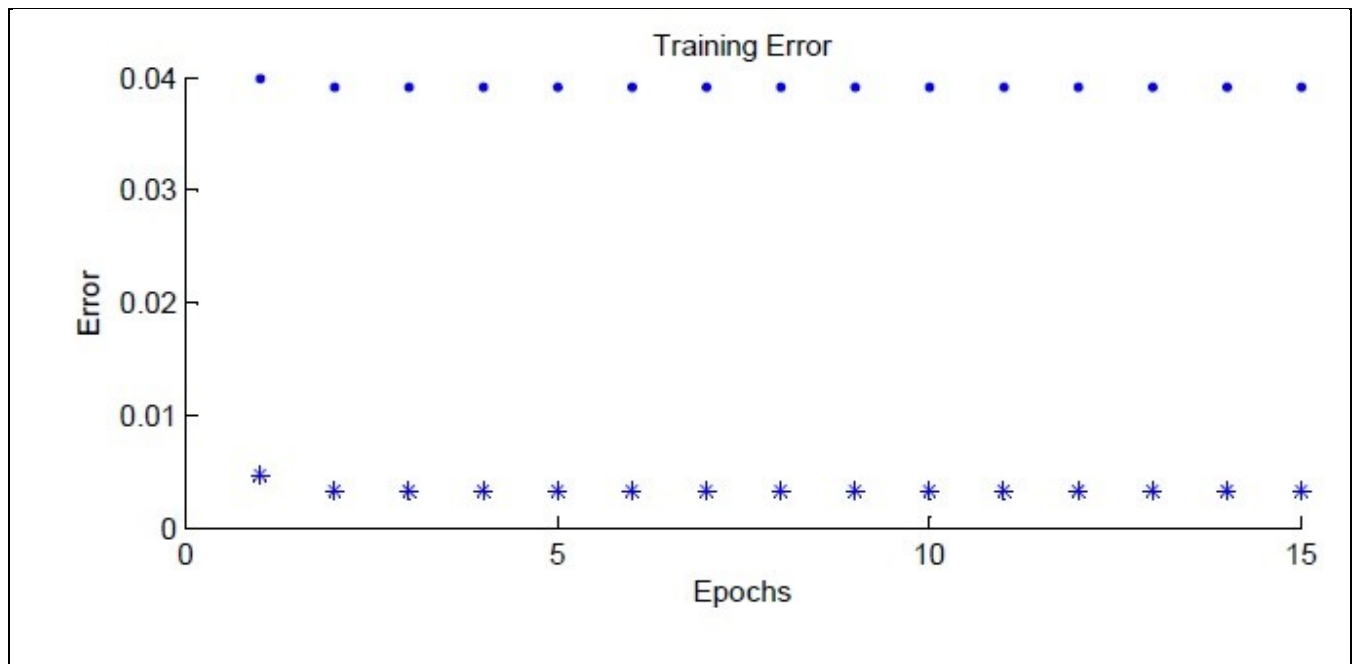


Figura 96 Training Error Training Data + Checking Data ANFIS duale del modello empirico – meccanicistico

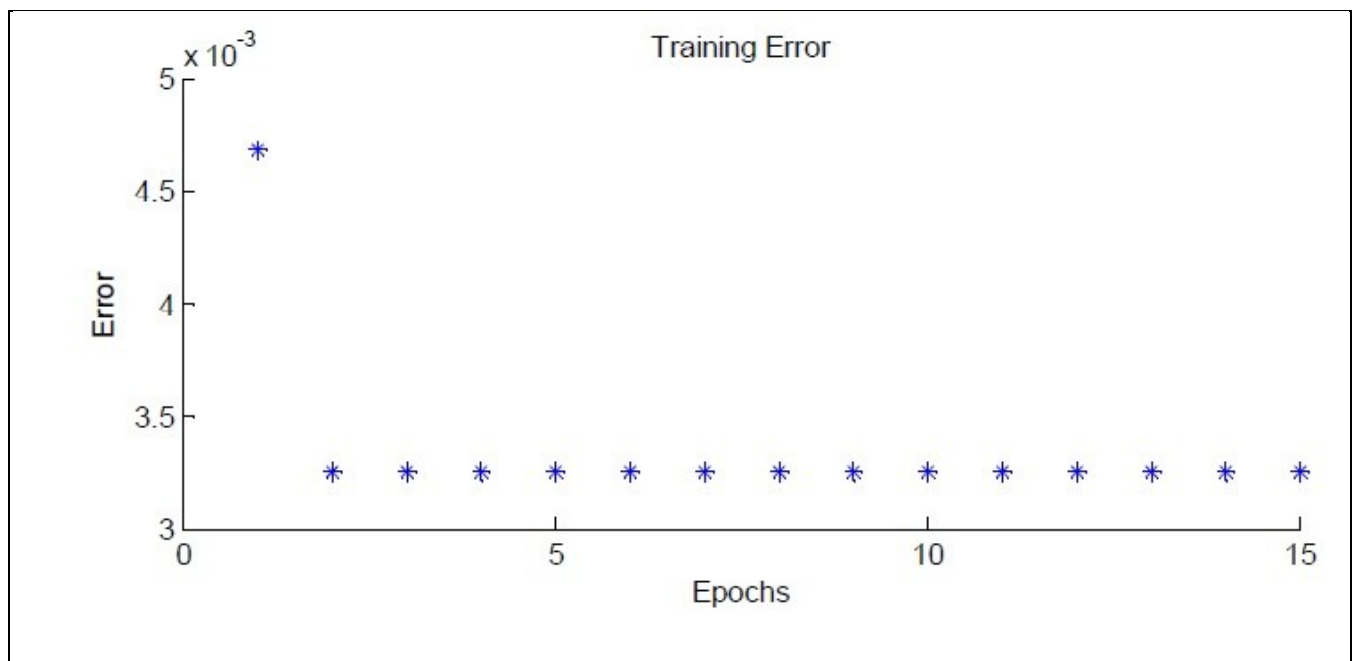


Figura 97 Training Error Training Data ANFIS duale del modello empirico – meccanicistico

5.3.5 IL TEST DEL SISTEMA

Le Figure 98 e 99 mostrano tale test per i due set di dati caricati, il primo di training ed il secondo di testing; lo scatterplot mostra un'ottima sovrapposibilità dei punti per i training data ed una buona sovrapposibilità per i testing data, essendo i punti in rosso rappresentativi degli output previsti dal modello, e quelli in blu rappresentativi degli output campionari.

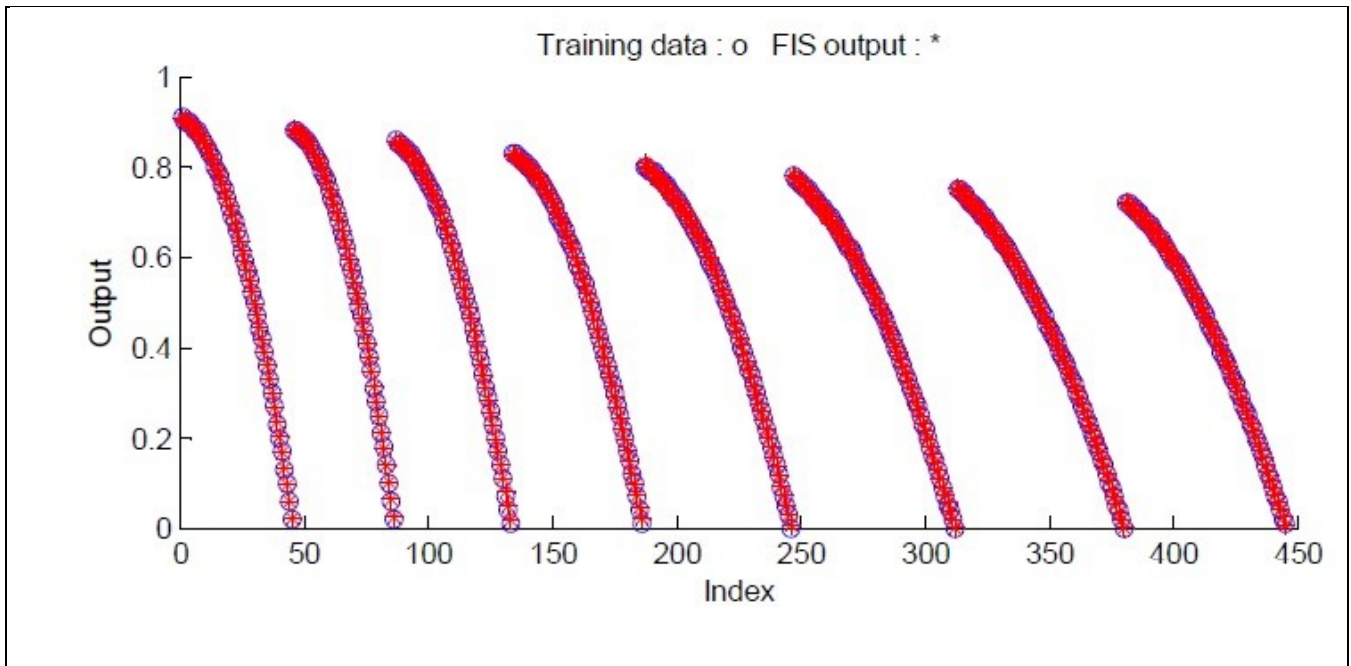


Figura 98 Fis Output vs Training Data ANFIS duale del modello empirico – meccanicistico

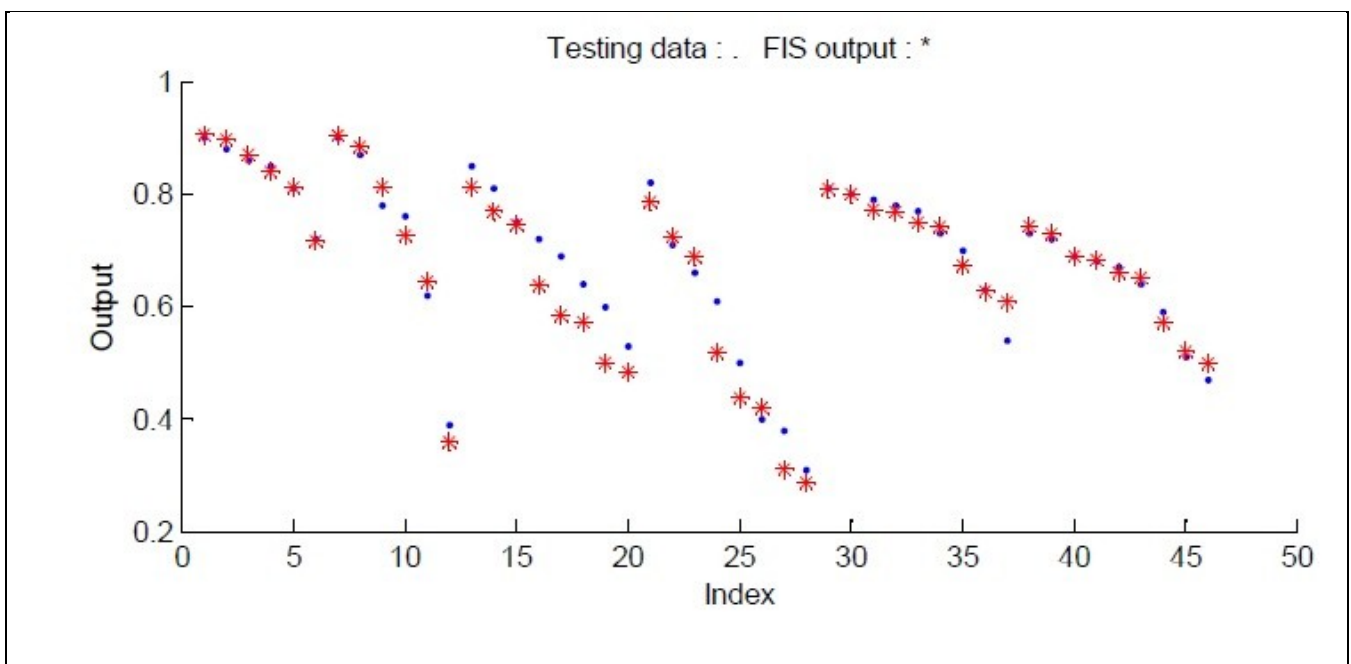


Figura 99 Fis Output vs Testing Data ANFIS duale del modello empirico – meccanicistico

5.3.6 LE FUNZIONI DI APPARTENENZA

Dalle Figure 100 e 101, si rileva il lavoro effettuato dall'algoritmo di clusterizzazione prima e di ottimizzazione poi nel definire, per ogni variabile e nel relativo campo di variazione, la media e la varianza delle tredici gaussiane.

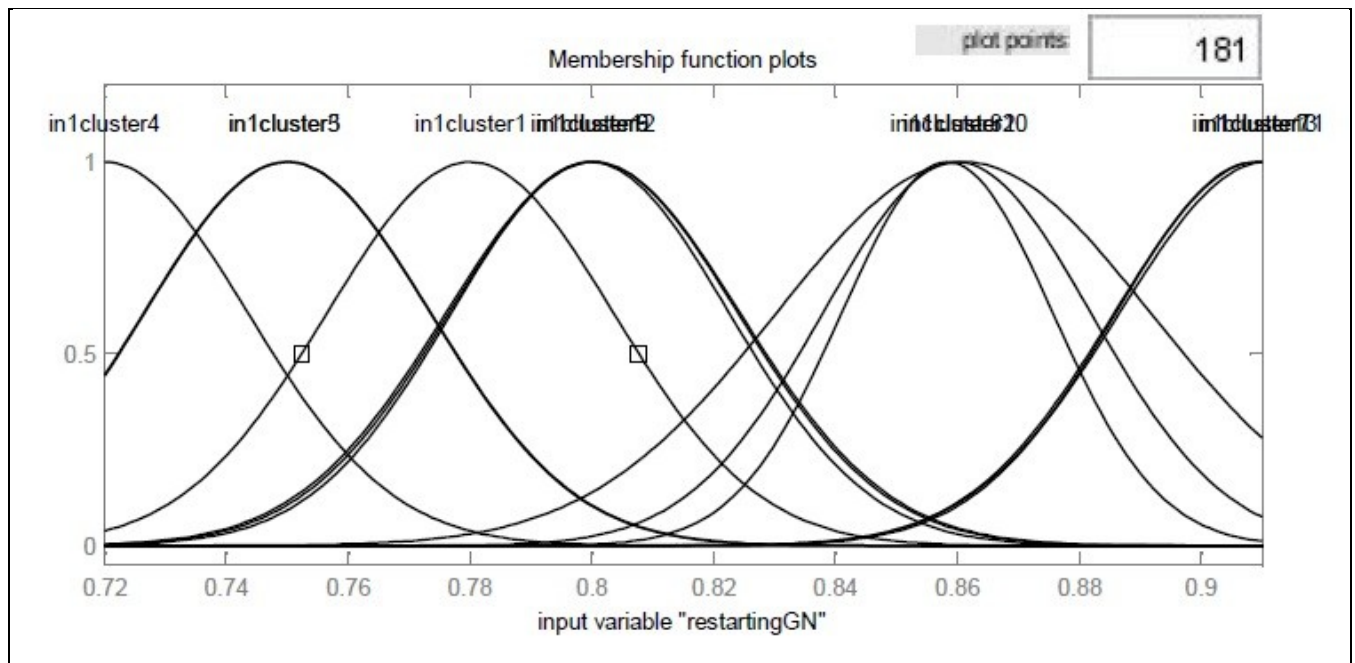


Figura 100 Funzioni di Appartenenza della variabile GN_{restart} ANFIS duale del modello empirico – meccanistico

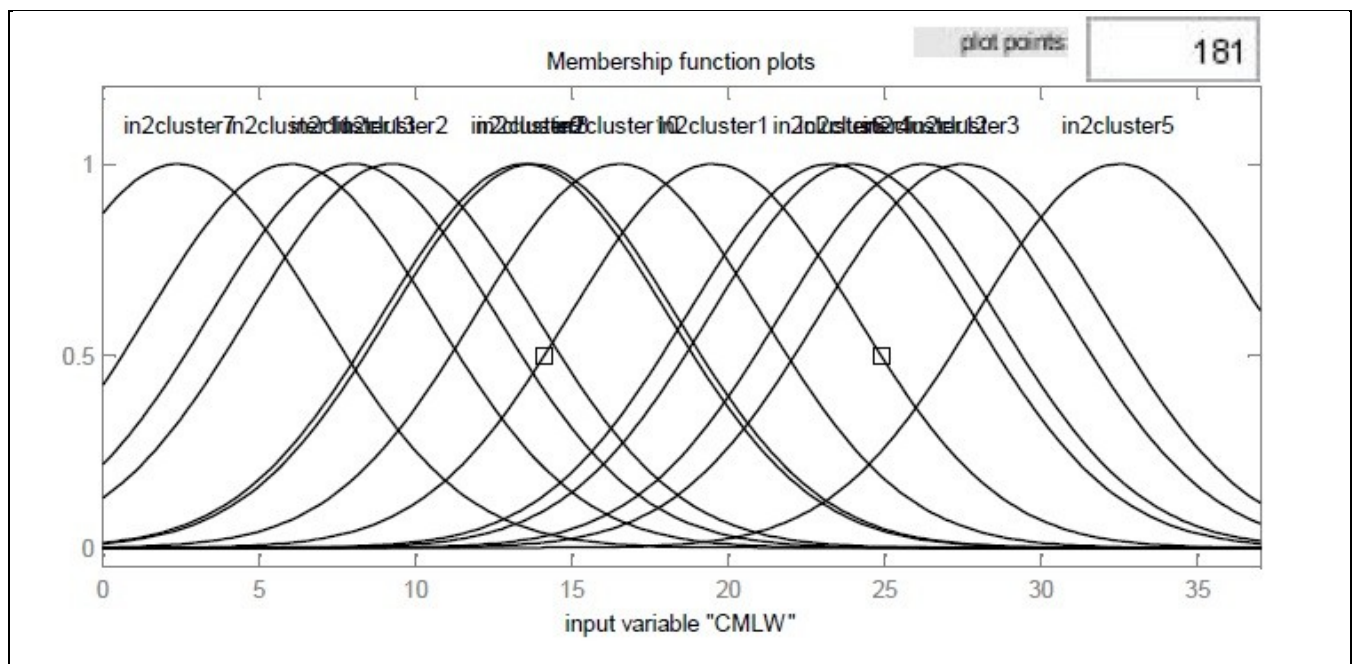


Figura 101 Funzioni di Appartenenza della variabile $CMLW_y$ ANFIS duale del modello empirico – meccanistico

5.3.7 LE REGOLE FUZZY IN FORMA OPERATIVA

Come già detto prima al § 5.3.3, con la scelta dei parametri effettuata, si sono ottenute 13 funzioni di appartenenza gaussiane per ciascuna variabile di input e la creazione di 13 regole.

L'espressione verbale di tali tredici regole è la seguente:

SE il $GN_{restart}$ è $in1mf1$ E il $CMLW_y$ è $in2mf1$ ALLORA il GN è $out1mf1$;

SE il $GN_{restart}$ è $in1mf2$ E il $CMLW_y$ è $in2mf2$ ALLORA il GN è $out1mf2$;

SE il $GN_{restart}$ è $in1mf3$ E il $CMLW_y$ è $in2mf3$ ALLORA il GN è $out1mf3$;

SE il $GN_{restart}$ è $in1mf4$ E il $CMLW_y$ è $in2mf4$ ALLORA il GN è $out1mf4$;

SE il $GN_{restart}$ è $in1mf5$ E il $CMLW_y$ è $in2mf5$ ALLORA il GN è $out1mf5$;

SE il $GN_{restart}$ è $in1mf6$ E il $CMLW_y$ è $in2mf6$ ALLORA il GN è $out1mf6$;

SE il $GN_{restart}$ è $in1mf7$ E il $CMLW_y$ è $in2mf7$ ALLORA il GN è $out1mf7$;

SE il $GN_{restart}$ è $in1mf8$ E il $CMLW_y$ è $in2mf8$ ALLORA il GN è $out1mf8$;

SE il $GN_{restart}$ è $in1mf9$ E il $CMLW_y$ è $in2mf9$ ALLORA il GN è $out1mf9$;

SE il $GN_{restart}$ è $in1mf10$ E il $CMLW_y$ è $in2mf10$ ALLORA il GN è $out1mf10$;

SE il $GN_{restart}$ è $in1mf11$ E il $CMLW_y$ è $in2mf11$ ALLORA il GN è $out1mf11$;

SE il $GN_{restart}$ è $in1mf12$ E il $CMLW_y$ è $in2mf12$ ALLORA il GN è $out1mf12$;

SE il $GN_{restart}$ è $in1mf13$ E il $CMLW_y$ è $in2mf13$ ALLORA il GN è $out1mf13$;

dove in_jmf_i è l'aggettivo che descrive l'insieme fuzzy associato alla funzione di appartenenza i della variabile input j .

La Figura 102 mostra invece tali tredici regole in forma "operativa", cioè con il campo di variazione di ciascuna variabile, con le funzioni di appartenenza delle variabili di input, con gli output di ciascuna regola, e con l'output finale conseguente alle operazioni di somma logica e defuzzyficazione.

I gradi di appartenenza qui evidenziati per ciascuna funzione sono quelli relativi al valore centrale del campo di variazione di ciascuna variabile di input; l'immediatezza d'uso delle regole consiste proprio nella possibilità di variare a piacimento i valori di ingresso ottenendo il corrispondente valore di uscita.

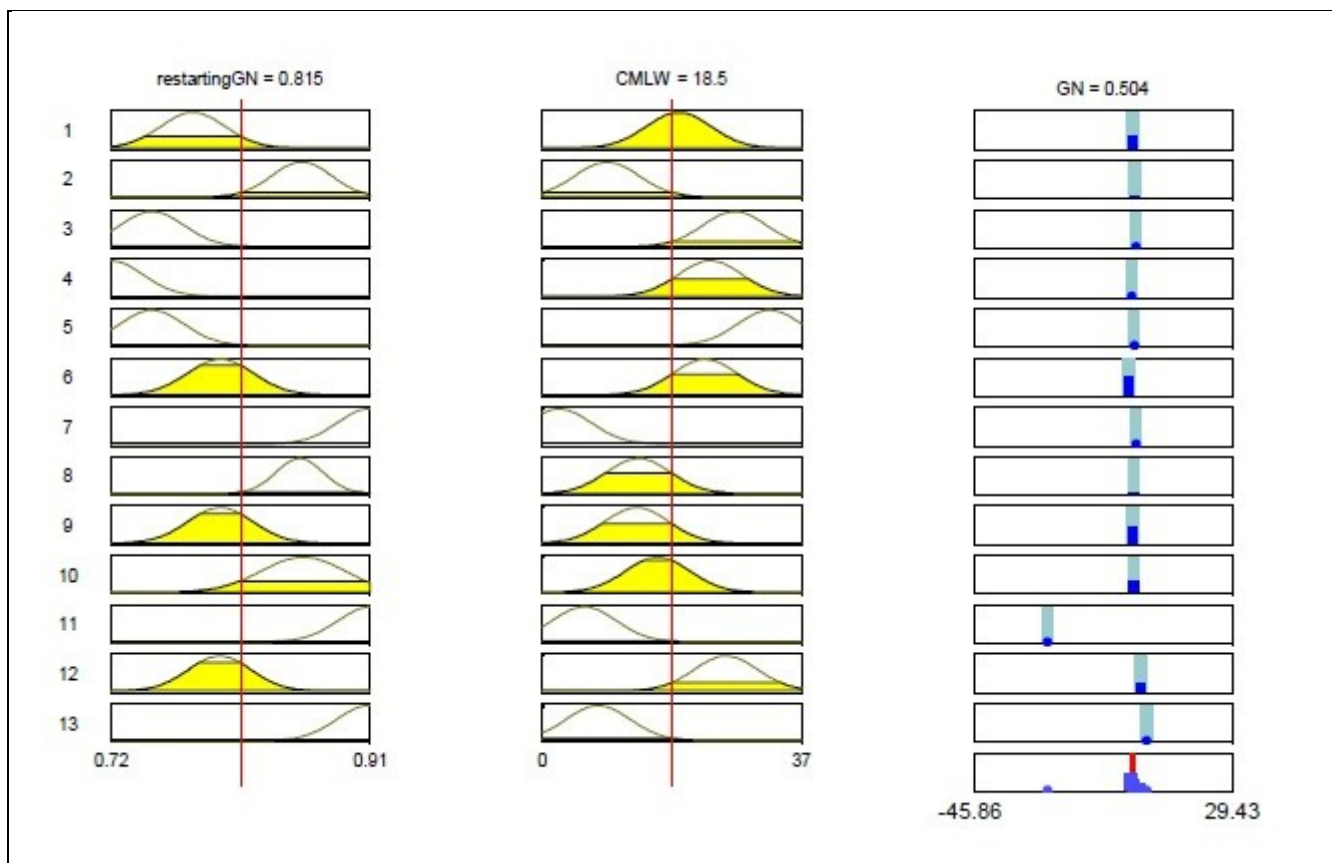


Figura 102 Regole fuzzy in forma operativa ANFIS duale del modello empirico – meccanicistico

CONCLUSIONI

L'obiettivo delle attività di ricerca è l'analisi teorico-sperimentale del decadimento dell'aderenza di pavimentazioni per piste di volo, focalizzandosi sulla messa a punto di procedure per l'analisi preliminare dei dati di rilievo del parametro di interesse, e sulla costruzione di modelli capaci di rappresentare il comportamento evolutivo della caratteristica superficiale aderenza.

I modelli di decadimento dell'aderenza erano finora stati studiati principalmente in campo stradale. Pertanto questa tesi porta un contributo effettivo alla conoscenza attuale, in quanto originale rispetto allo stato dell'arte.

Le raccomandazioni operative della Normativa di settore, quali ad esempio quelle contenute nella Circolare ENAC APT-10A del 30/10/2014, denotavano la necessità di approfondire le conoscenze sulle procedure preliminari di elaborazione dei dati grezzi di rilievo inerenti le caratteristiche superficiali delle piste di volo.

Il metodo proposto nell'elaborato di tesi consente di individuare la posizione e l'estensione della zona di massimo consumo dell'aderenza, e di riconoscere il valore di 'etichetta' di tale zona (vedi § 3.1.1.1) come l'aderenza minima di riferimento per tutta la pista, sulla base di esigenze e criteri quali: possibilità di individuare zone di consumo spazialmente continue e dalla localizzazione ed estensione variabili nel tempo, cautelatività dei valori di etichetta, affidabilità dei layout delle curve, progressività dei valori, precisione dei valori. Tale passo preliminare di analisi dei dati grezzi di rilievo, si è dimostrato necessario per rappresentare correttamente l'evoluzione del fenomeno nei diversi momenti della vita utile della pavimentazione.

Tramite l'analisi dei carichi effettivi, è stato tarato un modello empirico – meccanicistico, con restituzione del parametro σ (dispersione trasversale delle traiettorie in touch-down sull'intero spettro di traffico), anche esso innovativo per la considerazione del peso effettivo degli aeromobili al posto di quello di targa.

Un altro risultato di validità generale consiste nella validazione del carattere cumulativo del fenomeno di degrado dell'aderenza potendo distinguere tra diminuzione di aderenza temporanea recuperabile, dovuta al deposito dei contaminanti gommosi, e perdita di aderenza di fondo non recuperabile, causata dal degrado della tessitura.

Un ulteriore modello empirico – meccanicistico, è stato tarato impiegando il peso di targa quale variabile esplicativa; il modello si rivela utile per l'agevole reperibilità dei dati di ingresso.

Infine si propongono, a supporto dei modelli empirico – meccanicistici, due sistemi inferenziali adattivi neuro - fuzzy di agevole applicazione nella pratica tecnica in quanto senza ricorso a relazioni analitiche esplicite.

Un sistema inferenziale è stato calibrato su misure in sito dell'aderenza; l'altro sui valori di output del secondo modello empirico – meccanicistico, di cui ne costituisce strumento duale.

L'apporto ingegneristico di questi modelli ai sistemi di gestione delle pavimentazioni aeroportuali si sostanzia nel loro impiego nella programmazione delle attività di manutenzione, ordinarie e straordinarie, necessarie per garantire la sicurezza delle manovre a terra degli aeromobili. E ciò secondo diversi livelli di complessità analitica che si vorrà affrontare: ovvero sia con riferimento ai carichi effettivi degli aeromobili, sia con riferimento ai carichi di targa degli stessi. Questi ultimi sia con riferimento alla misure in sito dell'aderenza, sia con riferimento agli output del modello empirico – meccanicistico previa calibrazione del parametro σ .

A valle di tale tesi emerge la necessità di sviluppi futuri, ravvisabili nella validazione dei modelli su altri aeroporti; sia affini a quello di Lamezia Terme in quanto a tipologia di pavimentazione, livello di traffico, condizioni meteorologiche e strumento di misura dell'aderenza utilizzato; sia diversi per la calibrazione di modelli alternativi.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] Flight Safety Foundation <https://flightsafety.org/>
- [2] Bureau of Aircraft Accidents Archives (BAAA) <http://www.baaa-acro.com/>
- [3] Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents, 1959 - 2008, Boeing.
- [4] I.C.A.O. - "Airport Services Manual (Doc 9137 - AN/898) - Part 2 - Pavement Surface Conditions" - Fourth Edition - 2002.
- [5] I.C.A.O. - "Aerodrome Design Manual (Doc 9157) - Part 3 - Pavements" - Second Edition - 1983.
- [6] I.C.A.O. - "Annex 14 (to the Convention on International Civil Aviation)" - Volume 1 - Aerodrome Design and Operations - Sixth Edition - 2013.
- [7] Boeing. 2012. Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents Worldwide Operations (1959-2011), 27. Washington, DC: Aviation Safety Boeing Commercial Airplanes.
- [8] Čokorilo O et al. (2014) Aircraft safety analysis using clustering algorithms. Journal of Risk Research. doi: 10.1080/13669877.2013.879493
- [9] Oriola AO and Adekunle AK (2015). Assessment of Runway Accident Hazards in Nigeria Aviation Sector. International Journal for Traffic and Transport Engineering 5(2), 82-92.
- [10] Thenoux G et al. (1996) Study of Aircraft Accident Related to Asphalt Runway Skid Resistance. Journal of the Transportation Research Board 1536: 59-63. doi: 10.3141/1536-09
- [11] Leland TJW et al. (1968) Effects of Pavement Texture on Wet-Runway Braking Performance. NASA TN D-4323.
- [12] Horne WB et al. (1968) Review of Causes and Alleviation of Low Tire Traction on Wet Runways. NASA TN D-4406.
- [13] van Es G.W.H. (2005) Running out of runway - Analysis of 35 years of landing overrun accidents. NLR-TP-2005-498. National Aerospace Laboratory NAL.
- [14] Heymsfield E and Halsey TL (2008) Sensitivity Analysis of Engineered Material Arrestor Systems to Aircraft and Arrestor Material Characteristics. Journal of the Transportation Research Board 2052: 110-117. doi: 10.3141/2052-13
- [15] Santagata E et al. (2010) Performance of New Materials for Aircraft Arrestor Beds. Journal of the Transportation Research Board 2177: 124-131. doi: 10.3141/2177-15
- [16] Benedetto A et al. (2014) Improving safety of runway overrun through the correct numerical evaluation of rutting in Cleared and Graded Areas. Safety science, 62, 326-338.
- [17] Quaderni AIPCR Monitoraggio delle caratteristiche e delle azioni del traffico veicolare per il progetto e la manutenzione delle pavimentazioni stradali; XXV Convegno Nazionale Stradale; 2006, Napoli.

- [18] Wotring D et al. (1998) Pavement distress and selection of rehabilitation alternatives: Michigan practice. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1629: 214-225.
- [19] Leden L et al. (1998) The effect of resurfacing on friction, speeds and safety on main roads in Finland, *Accident Analysis and Prevention*, 30(1), 75-85.
- [20] Lee MH et al. (2009) Automatic measurement of runway grooving construction for pavement skid evaluation. *Automation in Construction*, 18(6), 856-863.
- [21] Tighe S et al. (2000) Incorporating road safety into pavement management. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1699: 1-10.
- [22] Noyce D et al. (2005) Incorporating road safety into pavement management: maximizing asphalt pavement surface friction for road safety improvements, Midwest Regional University Transportation Center Traffic Operations and Safety (TOPS) Laboratory.
- [23] Durango PL and Madanat SM (2002). Optimal maintenance and repair policies in infrastructure management under uncertain facility deterioration rates: an adaptive control approach. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 36(9), 763-778.
- [24] Loizos A (2007) Road Deterioration Modeling in PMSs: sensitivity and global applicability. *Advances in Transportation Studies*, 11.
- [25] CNR - Istruzioni sulla pianificazione della manutenzione stradale, 1986, Italia.
- [26] SHRP - National Research Council; Distress identification manual for the long-term pavement performance project, 1993, USA.
- [27] SETRA, LCPC - Entretien preventif du reseau routier national, 1979, Francia.
- [28] VSS Norme Suisse - Catalogue des degradations, 1991, Svizzera.
- [29] CORD - Catalogue of road defects, Research and Development Division, Highways Dpt., Pub. N. RD/GN/015, 1992, Hong Kong.
- [30] Greene J et al. (2004) Airfield Pavement Condition Assessment. *Journal of the Transportation Research Board* 1889: 63-70. doi: 10.3141/1889-08
- [31] Yager, TJ (1999) Aircraft and Ground Vehicle Winter Runway Friction Assessment. NASA/TM-1999-209142. Langley Research Center, Hampton, Virginia.
- [32] Yager, TJ (2009) Runway Friction Measurement Status. *International Airport Review magazine*, Issue 1
- [33] Najafi S et al. (2013) Assessment of operational characteristics of continuous friction measuring equipment (CFME). *International Journal of Pavement Engineering* 14: 706-714. doi: 10.1080/10298436.2012.667097

- [34] Yager TJ et al. (2002) Joint Winter Runway Friction Program Accomplishments. The Virginia Department of Transportation and Virginia Tech Pavement Evaluation 2002 Conference October 21-25, 2002 Roanoke, Virginia.
- [35] Radò Z and Wambold JC (2005) Correlation of ground friction measurements to aircraft braking friction calculated from flight data recorders. International Surface Friction Conference, Christchurch, New Zealand.
- [36] Klein-Paste A et al. (2012). Braking performance of commercial airplanes during operation on winter contaminated runways. *Cold Regions Science and Technology*, 79, 29-37.
- [37] IFALPA (2013) Aircraft as friction measuring device. Position of The International Federation of Air Line Pilots' Associations. 14POS09.
- [38] Chen JS et al. (2008) Effect of Rubber Deposits on Runway Pavement Friction Characteristics. *Journal of the Transportation Research Board* 2068: 119-125. doi: 10.3141/2068-13
- [39] Toan DV (2005) Runway Friction Performance in New Zealand. Proceedings of the International Surface Friction Conference, Christchurch, New Zealand.
- [40] De Paiva CEL et al. (2006) The Rubber Accumulation in the Touchdown Zone, the Friction and the Roughness in the Safety of the Landing and Take-Off Operations. Proceedings of the Second International Conference on Airports: Planning, Infrastructure & Environment, Sao Paulo, Brazil.
- [41] Quaderni AIPCR Aderenza dei manti bituminosi; XXIV Convegno Nazionale Stradale; 2002, Saint Vincent - AOSTA.
- [42] Camomilla G et al. (1990) High-Performance Measurements for Programming and Controlling Maintenance of Surface Characteristics: Operational Systems in Use on Italian Motorways. *Surface Characteristics of Roadways: International research and Technologies*, ASTM STP 1031, Papers of the First International Symposium on Surface Characteristic, American Society of Testing Materials, Philadelphia. doi: 10.1520/stp23371s
- [43] Camomilla G and Marchionna A (1992) Procedura per il controllo delle caratteristiche superficiali e la programmazione della manutenzione. *Rivista Autostrade*, Luglio Settembre.
- [44] Marchionna A and Paoloni G (1994) Decadimento dell'aderenza sulle pavimentazioni autostradali. *Rivista Autostrade*, Gennaio Marzo.
- [45] Colonna P (1996) L'influenza del traffico sulla rugosità delle pavimentazioni in conglomerato bituminoso. Convegno SIV I Materiali nella Sovrastruttura Stradale, Ancona.
- [46] Colonna P (1997) Studio delle traiettorie veicolari in corrispondenza di corsie di decelerazione, a partire da misurazioni di rugosità. Convegno SIV La Sicurezza Stradale, Pisa.
- [47] Hosking JR (1992) Road aggregate and skidding. Transport Research Laboratory, State-of-the-art Review n. 4, HMSO.

- [48] Cenek PD and Patrick JE (1995) Prediction of Pavement Texture. Modeling Road Deterioration and Maintenance Effects in HDM-4, Works Central Laboratories, New Zealand, RETA 5549-REG Highway Development and Management Research Final Report, Prepared for Asian Development Bank, October.
- [49] AA. VV. (2000) Pavement Surface Texture. Part C Road Deterioration Models, Analytical Framework and Model Descriptions, HDM-4 documentation, World Bank.
- [50] F.A.A. (1982) Guidelines and Procedures for Maintenance of Airport Pavements. U.S. Department of Transportation.
- [51] Alitalia (1984) Informazione Tecnico Operativa N. 40. Take-Off and landing on contaminated Runways. Direzione operativa volo.
- [52] Passatore R and D'Amico F (1994) La sicurezza nel trasporto aereo. Ministero dei Trasporti Direzione generale programmazione, organizzazione e coordinamento. Roma.
- [53] BMT Fleet Technology Limited (2010) Research Project EASA.2008/4 RuFAB. Runway friction characteristics measurement and aircraft braking. Volume 1 Summary of Findings and Recommendations, March.
- [54] Ashford N and Wright PH (1984) Airport Engineering. Ed. Wiley. Interscience Publication.
- [55] Giannini F et al. (1993) Appunti di Costruzione di Strade Ferrovie ed Aeroporti. Masson editoriale ESA.
- [56] Glushkov GI et al. (1988) Airport Engineering. Ed. Mir Publishers Moscow.
- [57] Iacopino G and Rossi Dal Fiume A (1981) Elementi di progettazione aeroportuale. Ed. Levrotto & Bella. Torino.
- [58] Tesoriere G (1993) Strade Ferrovie ed Aeroporti - Infrastrutture aeroportuali - vol. 3. Ed. UTET.
- [59] Fligh Safety Foundation (2009) Reducing the Risk of Runway Excursions. Report of the Runway Safety Initiative. May.
- [60] Marinelli R. (2006) FAA Runway Friction Program. Runway Condition Determination, Reporting, and Report Dissemination Workshop. June.
- [61] ENAC (2014) Criteri per la valutazione delle condizioni superficiali di una pista - Circolare - Serie Aeroporti - APT-10A.
- [62] FAA (1997) Measurement, construction and maintenance of skid-resistant airport pavement surfaces - Advisory Circular 150/5320-12C.
- [63] Breiman L et al. (1984) Classification and Regression Trees. Chapman and Hall/CRC, First edition, Boca Raton, London, New York, Washington D.C. pp. 368.
- [64] Kass GV (1980) An Exploratory Technique for Investigating Large Quantities of Categorical Data. Applied Statistics 29(2), 119–127.

- [65] Hartigan JA (1975) Clustering Algorithms. Probability & Mathematical Statistics, John Wiley & Sons Inc.
- [66] Hartigan JA and Wong MA (1979) Algorithm AS 136: a K-Means Clustering Algorithm. Applied Statistics 28(1), 100–108.
- [67] Chiu SL (1994) Fuzzy Model Identification Based on Cluster Estimation. Journal of Intelligent and Fuzzy Systems 2, 267–278.
- [68] Bataineh KM et al. (2011) A Comparison Study between Various Fuzzy Clustering Algorithms. Jordan Journal of Mechanical and Industrial Engineering 5(4), 335–343.
- [69] CAA (2010) The Assessment of Runway Surface Friction Characteristics - CAP 683.
- [70] I.C.A.O. - “Annex 6 (to the Convention on International Civil Aviation)” - Operation of Aircraft - Part I - International Commercial Air Transport - Aeroplanes - Ninth Edition - 2010.
- [71] I.C.A.O. - “Annex 6 (to the Convention on International Civil Aviation)” - Operation of Aircraft - Part I - International General Aviation - Aeroplanes – Seventh Edition - 2008.
- [72] Commission Regulation (EC) No 859/2008 - amending Council Regulation (EEC) No 3922/91.
- [73] HoSang VA (1975) Field survey and analysis of aircraft distribution on airport pavements - FAA-RD-74-36. Federal Aviation Administration.
- [74] Wang LX and Mendel JM (1992) Back-propagation fuzzy system as nonlinear dynamic system identifiers. In Fuzzy Systems, IEEE International Conference on (pp. 1409-1418).
- [75] Bezdek JC et al. (1981) Detection and characterization of cluster substructure i. linear structure: Fuzzy c-lines. SIAM Journal on Applied Mathematics, 40(2), 339-357.
- [76] Yager RR and Filev DP (1994) Generation of Fuzzy Rules by Mountain Clustering, Journal of Intelligent and Fuzzy Systems, Vol. 2, 209-219.
- [77] Chiu SL (1994) Fuzzy Model Identification Based on Cluster Estimation, Journal of Intelligent and Fuzzy Systems, Vol. 2, 267-278.
- [78] Jang JS (1993) ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system. IEEE transactions on systems, man, and cybernetics, 23(3), 665-685.

APPENDICE A

Stralcio dalle Serie dei Dati delle Campagne di Rilievo:

29/4/2011

27/5/2011

11/10/2011

15/11/2011

29/4/2011										
N°	Direction	Chainage	Distance from c/l (m)	Average GN	Distance from c/l (m)	Average GN	Distance from c/l (m)	Average GN	Distance from c/l (m)	Average GN
1	Runway 10/28	001-010	3	0.77	-3	0.54	6	1.02	-6	0.79
2	Runway 10/28	011-020	3	0.77	-3	0.54	6	1.02	-6	0.79
3	Runway 10/28	021-030	3	0.77	-3	0.54	6	1.02	-6	0.79
4	Runway 10/28	031-040	3	0.77	-3	0.54	6	1.02	-6	0.79
5	Runway 10/28	041-050	3	0.77	-3	0.54	6	1.02	-6	0.79
6	Runway 10/28	051-060	3	0.77	-3	0.54	6	1.02	-6	0.79
7	Runway 10/28	061-070	3	0.77	-3	0.54	6	1.02	-6	0.79
8	Runway 10/28	071-080	3	0.77	-3	0.54	6	1.02	-6	0.79
9	Runway 10/28	081-90	3	0.77	-3	0.54	6	1.02	-6	0.79
10	Runway 10/28	091-100	3	0.77	-3	0.54	6	1.02	-6	0.79
11	Runway 10/28	101-110	3	0.77	-3	0.54	6	1.02	-6	0.79
12	Runway 10/28	111-120	3	0.69	-3	0.72	6	1.02	-6	0.79
13	Runway 10/28	121-130	3	0.71	-3	0.78	6	1.02	-6	0.79
14	Runway 10/28	131-140	3	0.69	-3	0.81	6	1.03	-6	0.84
15	Runway 10/28	141-150	3	0.65	-3	0.80	6	1.02	-6	1.00
16	Runway 10/28	151-160	3	0.71	-3	0.80	6	1.02	-6	0.96
17	Runway 10/28	161-170	3	0.68	-3	0.80	6	1.00	-6	0.89
18	Runway 10/28	171-180	3	0.69	-3	0.79	6	1.02	-6	0.94
19	Runway 10/28	181-190	3	0.70	-3	0.79	6	1.02	-6	0.94
20	Runway 10/28	191-200	3	0.70	-3	0.81	6	1.01	-6	0.96
21	Runway 10/28	201-210	3	0.68	-3	0.81	6	1.02	-6	0.97
22	Runway 10/28	211-220	3	0.67	-3	0.80	6	1.02	-6	0.97
23	Runway 10/28	221-230	3	0.66	-3	0.79	6	1.03	-6	0.95
24	Runway 10/28	231-240	3	0.62	-3	0.77	6	1.03	-6	0.98
25	Runway 10/28	241-250	3	0.65	-3	0.77	6	1.03	-6	0.98
26	Runway 10/28	251-260	3	0.67	-3	0.83	6	1.01	-6	0.96
27	Runway 10/28	261-270	3	0.68	-3	0.81	6	0.99	-6	0.92
28	Runway 10/28	271-280	3	0.66	-3	0.80	6	1.00	-6	0.96
29	Runway 10/28	281-290	3	0.65	-3	0.81	6	1.03	-6	0.90
30	Runway 10/28	291-300	3	0.64	-3	0.80	6	0.99	-6	0.86
31	Runway 10/28	301-310	3	0.64	-3	0.78	6	0.97	-6	0.82
32	Runway 10/28	311-320	3	0.57	-3	0.78	6	0.86	-6	0.90
33	Runway 10/28	321-330	3	0.53	-3	0.68	6	0.85	-6	0.84
34	Runway 10/28	331-340	3	0.51	-3	0.68	6	0.72	-6	0.78
35	Runway 10/28	341-350	3	0.54	-3	0.72	6	0.87	-6	0.81
36	Runway 10/28	351-360	3	0.42	-3	0.75	6	0.90	-6	0.82
37	Runway 10/28	361-370	3	0.42	-3	0.67	6	0.80	-6	0.80
38	Runway 10/28	371-380	3	0.45	-3	0.67	6	0.83	-6	0.73
39	Runway 10/28	381-390	3	0.44	-3	0.66	6	0.70	-6	0.71
40	Runway 10/28	391-400	3	0.50	-3	0.51	6	0.72	-6	0.71
41	Runway 10/28	401-410	3	0.54	-3	0.56	6	0.73	-6	0.76
42	Runway 10/28	411-420	3	0.42	-3	0.48	6	0.74	-6	0.65
43	Runway 10/28	421-430	3	0.44	-3	0.49	6	0.65	-6	0.62
44	Runway 10/28	431-440	3	0.42	-3	0.42	6	0.73	-6	0.68
45	Runway 10/28	441-450	3	0.46	-3	0.55	6	0.70	-6	0.65
46	Runway 10/28	451-460	3	0.34	-3	0.51	6	0.67	-6	0.63
47	Runway 10/28	461-470	3	0.34	-3	0.51	6	0.71	-6	0.66
48	Runway 10/28	471-480	3	0.37	-3	0.49	6	0.71	-6	0.50
49	Runway 10/28	481-490	3	0.42	-3	0.48	6	0.68	-6	0.57
50	Runway 10/28	491-500	3	0.39	-3	0.49	6	0.73	-6	0.65
51	Runway 10/28	501-510	3	0.37	-3	0.45	6	0.72	-6	0.70
52	Runway 10/28	511-520	3	0.38	-3	0.43	6	0.73	-6	0.73
53	Runway 10/28	521-530	3	0.52	-3	0.43	6	0.70	-6	0.67
54	Runway 10/28	531-540	3	0.57	-3	0.45	6	0.70	-6	0.63
55	Runway 10/28	541-550	3	0.54	-3	0.57	6	0.77	-6	0.71
56	Runway 10/28	551-560	3	0.59	-3	0.51	6	0.70	-6	0.70
57	Runway 10/28	561-570	3	0.57	-3	0.58	6	0.81	-6	0.68
58	Runway 10/28	571-580	3	0.52	-3	0.63	6	0.78	-6	0.74
59	Runway 10/28	581-590	3	0.48	-3	0.62	6	0.74	-6	0.78
60	Runway 10/28	591-600	3	0.50	-3	0.60	6	0.80	-6	0.72
61	Runway 10/28	601-610	3	0.50	-3	0.63	6	0.77	-6	0.73
62	Runway 10/28	611-620	3	0.55	-3	0.55	6	0.74	-6	0.72
63	Runway 10/28	621-630	3	0.57	-3	0.57	6	0.80	-6	0.74
64	Runway 10/28	631-640	3	0.63	-3	0.66	6	0.82	-6	0.77
65	Runway 10/28	641-650	3	0.67	-3	0.57	6	0.81	-6	0.80
66	Runway 10/28	651-660	3	0.56	-3	0.64	6	0.91	-6	0.87
67	Runway 10/28	661-670	3	0.66	-3	0.66	6	0.89	-6	0.86
68	Runway 10/28	671-680	3	0.66	-3	0.64	6	0.92	-6	0.84
69	Runway 10/28	681-690	3	0.69	-3	0.57	6	0.91	-6	0.87
70	Runway 10/28	691-700	3	0.71	-3	0.64	6	0.92	-6	0.94
71	Runway 10/28	701-710	3	0.71	-3	0.66	6	0.92	-6	0.98
72	Runway 10/28	711-720	3	0.73	-3	0.68	6	0.91	-6	0.89
73	Runway 10/28	721-730	3	0.76	-3	0.70	6	0.93	-6	0.93
74	Runway 10/28	731-740	3	0.75	-3	0.72	6	0.93	-6	0.89
75	Runway 10/28	741-750	3	0.74	-3	0.71	6	0.97	-6	0.91
76	Runway 10/28	751-760	3	0.73	-3	0.76	6	1.00	-6	0.95
77	Runway 10/28	761-770	3	0.70	-3	0.73	6	0.95	-6	0.97
78	Runway 10/28	771-780	3	0.73	-3	0.70	6	0.98	-6	1.00
79	Runway 10/28	781-790	3	0.72	-3	0.70	6	0.99	-6	0.98
80	Runway 10/28	791-800	3	0.71	-3	0.68	6	0.96	-6	0.92
81	Runway 10/28	801-810	3	0.69	-3	0.73	6	0.92	-6	0.92
82	Runway 10/28	811-820	3	0.68	-3	0.72	6	0.95	-6	0.87
83	Runway 10/28	821-830	3	0.71	-3	0.70	6	0.94	-6	0.92
84	Runway 10/28	831-840	3	0.72	-3	0.70	6	0.94	-6	0.93
85	Runway 10/28	841-850	3	0.73	-3	0.72	6	0.97	-6	0.92
86	Runway 10/28	851-860	3	0.73	-3	0.75	6	0.98	-6	0.93
87	Runway 10/28	861-870	3	0.76	-3	0.73	6	0.94	-6	0.94
88	Runway 10/28	871-880	3	0.76	-3	0.72	6	0.96	-6	0.92
89	Runway 10/28	881-890	3	0.75	-3	0.72	6	0.96	-6	0.93
90	Runway 10/28	891-900	3	0.74	-3	0.73	6	0.92	-6	0.95
91	Runway 10/28	901-910	3	0.75	-3	0.72	6	0.95	-6	0.95
92	Runway 10/28	911-920	3	0.75	-3	0.71	6	0.95	-6	0.93
93	Runway 10/28	921-930	3	0.75	-3	0.71	6	0.94	-6	0.96
94	Runway 10/28	931-940	3	0.72	-3	0.70	6	0.96	-6	0.96
95	Runway 10/28	941-950	3	0.73	-3	0.71	6	0.99	-6	0.92
96	Runway 10/28	951-960	3	0.72	-3	0.74	6	0.96	-6	0.92
97	Runway 10/28	961-970	3	0.73	-3	0.74	6	0.95	-6	0.92
98	Runway 10/28	971-980	3	0.74	-3	0.73	6	0.94	-6	0.89

99	Runway 10/28	981-990	3	0.73	-3	0.74	6	0.93	-6	0.88
100	Runway 10/28	991-1000	3	0.74	-3	0.71	6	0.94	-6	0.88
101	Runway 10/28	1001-1010	3	0.74	-3	0.72	6	0.93	-6	0.90
102	Runway 10/28	1011-1020	3	0.72	-3	0.71	6	0.92	-6	0.92
103	Runway 10/28	1021-1030	3	0.72	-3	0.70	6	0.88	-6	0.93
104	Runway 10/28	1031-1040	3	0.71	-3	0.72	6	0.92	-6	0.90
105	Runway 10/28	1041-1050	3	0.71	-3	0.77	6	0.93	-6	0.90
106	Runway 10/28	1051-1060	3	0.72	-3	0.79	6	0.92	-6	0.91
107	Runway 10/28	1061-1070	3	0.72	-3	0.77	6	0.93	-6	0.91
108	Runway 10/28	1071-1080	3	0.72	-3	0.76	6	0.95	-6	0.92
109	Runway 10/28	1081-1090	3	0.72	-3	0.77	6	0.95	-6	0.91
110	Runway 10/28	1091-1100	3	0.71	-3	0.82	6	0.96	-6	0.91
111	Runway 10/28	1101-1110	3	0.73	-3	0.78	6	0.92	-6	0.93
112	Runway 10/28	1111-1120	3	0.74	-3	0.76	6	0.92	-6	0.93
113	Runway 10/28	1121-1130	3	0.74	-3	0.75	6	0.93	-6	0.92
114	Runway 10/28	1131-1140	3	0.74	-3	0.74	6	0.93	-6	0.90
115	Runway 10/28	1141-1150	3	0.71	-3	0.76	6	0.94	-6	0.90
116	Runway 10/28	1151-1160	3	0.71	-3	0.78	6	0.93	-6	0.86
117	Runway 10/28	1161-1170	3	0.68	-3	0.77	6	0.93	-6	0.88
118	Runway 10/28	1171-1180	3	0.68	-3	0.75	6	0.93	-6	0.88
119	Runway 10/28	1181-1190	3	0.68	-3	0.77	6	0.94	-6	0.86
120	Runway 10/28	1191-1200	3	0.68	-3	0.75	6	0.95	-6	0.85
121	Runway 10/28	1201-1210	3	0.69	-3	0.73	6	0.95	-6	0.86
122	Runway 10/28	1211-1220	3	0.66	-3	0.73	6	0.96	-6	0.91
123	Runway 10/28	1221-1230	3	0.65	-3	0.73	6	0.95	-6	0.87
124	Runway 10/28	1231-1240	3	0.65	-3	0.74	6	0.95	-6	0.83
125	Runway 10/28	1241-1250	3	0.66	-3	0.75	6	0.95	-6	0.84
126	Runway 10/28	1251-1260	3	0.66	-3	0.75	6	0.95	-6	0.85
127	Runway 10/28	1261-1270	3	0.64	-3	0.76	6	0.93	-6	0.84
128	Runway 10/28	1271-1280	3	0.65	-3	0.76	6	0.94	-6	0.81
129	Runway 10/28	1281-1290	3	0.65	-3	0.76	6	0.95	-6	0.82
130	Runway 10/28	1291-1300	3	0.65	-3	0.75	6	0.96	-6	0.82
131	Runway 10/28	1301-1310	3	0.69	-3	0.75	6	0.94	-6	0.83
132	Runway 10/28	1311-1320	3	0.68	-3	0.75	6	0.95	-6	0.84
133	Runway 10/28	1321-1330	3	0.69	-3	0.75	6	0.93	-6	0.86
134	Runway 10/28	1331-1340	3	0.69	-3	0.74	6	0.94	-6	0.88
135	Runway 10/28	1341-1350	3	0.69	-3	0.74	6	0.98	-6	0.90
136	Runway 10/28	1351-1360	3	0.70	-3	0.76	6	0.98	-6	0.93
137	Runway 10/28	1361-1370	3	0.69	-3	0.74	6	0.97	-6	0.88
138	Runway 10/28	1371-1380	3	0.67	-3	0.73	6	0.98	-6	0.83
139	Runway 10/28	1381-1390	3	0.65	-3	0.72	6	0.94	-6	0.83
140	Runway 10/28	1391-1400	3	0.66	-3	0.71	6	0.94	-6	0.83
141	Runway 10/28	1401-1410	3	0.68	-3	0.71	6	0.92	-6	0.83
142	Runway 10/28	1411-1420	3	0.69	-3	0.70	6	0.91	-6	0.85
143	Runway 10/28	1421-1430	3	0.66	-3	0.72	6	0.92	-6	0.87
144	Runway 10/28	1431-1440	3	0.65	-3	0.72	6	0.94	-6	0.84
145	Runway 10/28	1441-1450	3	0.65	-3	0.72	6	0.96	-6	0.82
146	Runway 10/28	1451-1460	3	0.68	-3	0.72	6	0.94	-6	0.84
147	Runway 10/28	1461-1470	3	0.65	-3	0.71	6	0.94	-6	0.87
148	Runway 10/28	1471-1480	3	0.67	-3	0.70	6	0.95	-6	0.84
149	Runway 10/28	1481-1490	3	0.63	-3	0.67	6	0.95	-6	0.81
150	Runway 10/28	1491-1500	3	0.62	-3	0.70	6	0.96	-6	0.82
151	Runway 10/28	1501-1510	3	0.63	-3	0.69	6	0.94	-6	0.83
152	Runway 10/28	1511-1520	3	0.63	-3	0.69	6	0.94	-6	0.84
153	Runway 10/28	1521-1530	3	0.64	-3	0.68	6	0.93	-6	0.81
154	Runway 10/28	1531-1540	3	0.63	-3	0.68	6	0.90	-6	0.79
155	Runway 10/28	1541-1550	3	0.63	-3	0.66	6	0.92	-6	0.77
156	Runway 10/28	1551-1560	3	0.66	-3	0.66	6	0.95	-6	0.77
157	Runway 10/28	1561-1570	3	0.67	-3	0.65	6	0.96	-6	0.83
158	Runway 10/28	1571-1580	3	0.69	-3	0.66	6	0.95	-6	0.84
159	Runway 10/28	1581-1590	3	0.70	-3	0.66	6	0.96	-6	0.85
160	Runway 10/28	1591-1600	3	0.69	-3	0.65	6	0.96	-6	0.85
161	Runway 10/28	1601-1610	3	0.67	-3	0.68	6	0.92	-6	0.86
162	Runway 10/28	1611-1620	3	0.66	-3	0.66	6	0.98	-6	0.87
163	Runway 10/28	1621-1630	3	0.70	-3	0.70	6	0.94	-6	0.89
164	Runway 10/28	1631-1640	3	0.72	-3	0.67	6	0.96	-6	0.91
165	Runway 10/28	1641-1650	3	0.70	-3	0.68	6	0.96	-6	0.90
166	Runway 10/28	1651-1660	3	0.70	-3	0.68	6	0.93	-6	0.92
167	Runway 10/28	1661-1670	3	0.71	-3	0.70	6	0.93	-6	0.93
168	Runway 10/28	1671-1680	3	0.73	-3	0.68	6	0.97	-6	0.94
169	Runway 10/28	1681-1690	3	0.73	-3	0.66	6	0.95	-6	0.90
170	Runway 10/28	1691-1700	3	0.73	-3	0.64	6	0.95	-6	0.91
171	Runway 10/28	1701-1710	3	0.69	-3	0.72	6	0.94	-6	0.91
172	Runway 10/28	1711-1720	3	0.68	-3	0.70	6	0.90	-6	0.89
173	Runway 10/28	1721-1730	3	0.68	-3	0.65	6	0.87	-6	0.88
174	Runway 10/28	1731-1740	3	0.69	-3	0.63	6	0.85	-6	0.81
175	Runway 10/28	1741-1750	3	0.68	-3	0.58	6	0.85	-6	0.84
176	Runway 10/28	1751-1760	3	0.74	-3	0.60	6	0.90	-6	0.83
177	Runway 10/28	1761-1770	3	0.74	-3	0.58	6	0.87	-6	0.78
178	Runway 10/28	1771-1780	3	0.69	-3	0.60	6	0.84	-6	0.79
179	Runway 10/28	1781-1790	3	0.67	-3	0.57	6	0.84	-6	0.76
180	Runway 10/28	1791-1800	3	0.71	-3	0.60	6	0.79	-6	0.81
181	Runway 10/28	1801-1810	3	0.76	-3	0.56	6	0.81	-6	0.83
182	Runway 10/28	1811-1820	3	0.72	-3	0.54	6	0.81	-6	0.81
183	Runway 10/28	1821-1830	3	0.65	-3	0.58	6	0.80	-6	0.77
184	Runway 10/28	1831-1840	3	0.64	-3	0.56	6	0.77	-6	0.70
185	Runway 10/28	1841-1850	3	0.63	-3	0.49	6	0.73	-6	0.75
186	Runway 10/28	1851-1860	3	0.63	-3	0.49	6	0.74	-6	0.69
187	Runway 10/28	1861-1870	3	0.62	-3	0.47	6	0.78	-6	0.65
188	Runway 10/28	1871-1880	3	0.60	-3	0.52	6	0.79	-6	0.70
189	Runway 10/28	1881-1890	3	0.60	-3	0.54	6	0.76	-6	0.68
190	Runway 10/28	1891-1900	3	0.62	-3	0.51	6	0.78	-6	0.75
191	Runway 10/28	1901-1910	3	0.69	-3	0.52	6	0.77	-6	0.74
192	Runway 10/28	1911-1920	3	0.62	-3	0.57	6	0.70	-6	0.69
193	Runway 10/28	1921-1930	3	0.63	-3	0.52	6	0.66	-6	0.74
194	Runway 10/28	1931-1940	3	0.68	-3	0.43	6	0.74	-6	0.73
195	Runway 10/28	1941-1950	3	0.67	-3	0.45	6	0.77	-6	0.75
196	Runway 10/28	1951-1960	3	0.66	-3	0.51	6	0.78	-6	0.71
197	Runway 10/28	1961-1970	3	0.67	-3	0.53	6	0.81	-6	0.78
198	Runway 10/28	1971-1980	3	0.66	-3	0.54	6	0.76	-6	0.78

199	Runway 10/28	1981-1990	3	0.67	-3	0.51	6	0.81	-6	0.79
200	Runway 10/28	1991-2000	3	0.73	-3	0.56	6	0.83	-6	0.80
201	Runway 10/28	2001-2010	3	0.71	-3	0.57	6	0.87	-6	0.83
202	Runway 10/28	2011-2020	3	0.68	-3	0.60	6	0.89	-6	0.87
203	Runway 10/28	2021-2030	3	0.67	-3	0.59	6	0.81	-6	0.83
204	Runway 10/28	2031-2040	3	0.67	-3	0.61	6	0.81	-6	0.87
205	Runway 10/28	2041-2050	3	0.72	-3	0.60	6	0.89	-6	0.86
206	Runway 10/28	2051-2060	3	0.67	-3	0.61	6	0.89	-6	0.90
207	Runway 10/28	2061-2070	3	0.69	-3	0.65	6	0.89	-6	0.88
208	Runway 10/28	2071-2080	3	0.68	-3	0.63	6	0.90	-6	0.90
209	Runway 10/28	2081-2090	3	0.70	-3	0.68	6	0.91	-6	0.89
210	Runway 10/28	2091-2100	3	0.72	-3	0.70	6	0.93	-6	0.92
211	Runway 10/28	2101-2110	3	0.71	-3	0.71	6	0.93	-6	0.93
212	Runway 10/28	2111-2120	3	0.71	-3	0.71	6	0.92	-6	0.91
213	Runway 10/28	2121-2130	3	0.74	-3	0.72	6	0.93	-6	0.92
214	Runway 10/28	2131-2140	3	0.73	-3	0.75	6	0.90	-6	0.93
215	Runway 10/28	2141-2150	3	0.72	-3	0.67	6	0.87	-6	0.93
216	Runway 10/28	2151-2160	3	0.71	-3	0.70	6	0.88	-6	0.95
217	Runway 10/28	2161-2170	3	0.69	-3	0.68	6	0.90	-6	0.92
218	Runway 10/28	2171-2180	3	0.69	-3	0.66	6	0.91	-6	0.92
219	Runway 10/28	2181-2190	3	0.68	-3	0.68	6	0.89	-6	0.89
220	Runway 10/28	2191-2200	3	0.67	-3	0.67	6	0.90	-6	0.91
221	Runway 10/28	2201-2210	3	0.63	-3	0.63	6	0.90	-6	0.88
222	Runway 10/28	2211-2220	3	0.62	-3	0.62	6	0.93	-6	0.88
223	Runway 10/28	2221-2230	3	0.61	-3	0.61	6	0.90	-6	0.88
224	Runway 10/28	2231-2240	3	0.64	-3	0.64	6	0.91	-6	0.88
225	Runway 10/28	2241-2250	3	0.68	-3	0.68	6	0.89	-6	0.86
226	Runway 10/28	2251-2260	3	0.66	-3	0.66	6	0.97	-6	0.88
227	Runway 10/28	2261-2270	3	0.62	-3	0.62	6	0.95	-6	0.86
228	Runway 10/28	2271-2280	3	0.61	-3	0.61	6	0.92	-6	0.83
229	Runway 10/28	2281-2290	3	0.59	-3	0.59	6	0.91	-6	0.83
230	Runway 10/28	2291-2300	3	0.61	-3	0.61	6	0.91	-6	0.83
231	Runway 10/28	2301-2310	3	0.61	-3	0.61	6	0.91	-6	0.83
232	Runway 10/28	2311-2320	3	0.61	-3	0.61	6	0.91	-6	0.83
233	Runway 10/28	2321-2330	3	0.61	-3	0.61	6	0.91	-6	0.83
234	Runway 10/28	2331-2340	3	0.61	-3	0.61	6	0.91	-6	0.83
235	Runway 10/28	2341-2350	3	0.61	-3	0.61	6	0.91	-6	0.83
236	Runway 10/28	2351-2360	3	0.61	-3	0.61	6	0.91	-6	0.83
237	Runway 10/28	2361-2370	3	0.61	-3	0.61	6	0.91	-6	0.83
238	Runway 10/28	2371-2380	3	0.61	-3	0.61	6	0.91	-6	0.83
239	Runway 10/28	2381-2390	3	0.61	-3	0.61	6	0.91	-6	0.83
240	Runway 10/28	2391-2400	3	0.61	-3	0.61	6	0.91	-6	0.83

27/5/2011

N°	Direction	Chainage	Distance from c/l (m)	Average GN	Distance from c/l (m)	Average GN	Distance from c/l (m)	Average GN	Distance from c/l (m)	Average GN
1	Runway 10/28	001-010	3	0.70	-3	0.71	6	0.82	-6	0.75
2	Runway 10/28	011-020	3	0.70	-3	0.71	6	0.82	-6	0.75
3	Runway 10/28	021-030	3	0.70	-3	0.71	6	0.82	-6	0.75
4	Runway 10/28	031-040	3	0.70	-3	0.71	6	0.82	-6	0.75
5	Runway 10/28	041-050	3	0.70	-3	0.71	6	0.82	-6	0.75
6	Runway 10/28	051-060	3	0.70	-3	0.71	6	0.82	-6	0.75
7	Runway 10/28	061-070	3	0.70	-3	0.71	6	0.82	-6	0.75
8	Runway 10/28	071-080	3	0.70	-3	0.71	6	0.82	-6	0.75
9	Runway 10/28	081-90	3	0.70	-3	0.71	6	0.82	-6	0.75
10	Runway 10/28	091-100	3	0.70	-3	0.71	6	0.82	-6	0.75
11	Runway 10/28	101-110	3	0.70	-3	0.71	6	0.82	-6	0.75
12	Runway 10/28	111-120	3	0.70	-3	0.71	6	0.95	-6	0.73
13	Runway 10/28	121-130	3	0.70	-3	0.71	6	0.97	-6	0.72
14	Runway 10/28	131-140	3	0.75	-3	0.72	6	0.90	-6	0.80
15	Runway 10/28	141-150	3	0.71	-3	0.71	6	0.90	-6	0.86
16	Runway 10/28	151-160	3	0.66	-3	0.64	6	0.89	-6	0.72
17	Runway 10/28	161-170	3	0.73	-3	0.67	6	0.89	-6	0.75
18	Runway 10/28	171-180	3	0.74	-3	0.66	6	0.90	-6	0.85
19	Runway 10/28	181-190	3	0.75	-3	0.67	6	0.90	-6	0.89
20	Runway 10/28	191-200	3	0.76	-3	0.68	6	0.89	-6	0.87
21	Runway 10/28	201-210	3	0.77	-3	0.67	6	0.88	-6	0.86
22	Runway 10/28	211-220	3	0.73	-3	0.67	6	0.86	-6	0.89
23	Runway 10/28	221-230	3	0.74	-3	0.64	6	0.87	-6	0.86
24	Runway 10/28	231-240	3	0.73	-3	0.64	6	0.88	-6	0.89
25	Runway 10/28	241-250	3	0.74	-3	0.66	6	0.84	-6	0.89
26	Runway 10/28	251-260	3	0.71	-3	0.65	6	0.82	-6	0.87
27	Runway 10/28	261-270	3	0.73	-3	0.64	6	0.91	-6	0.88
28	Runway 10/28	271-280	3	0.71	-3	0.64	6	0.94	-6	0.87
29	Runway 10/28	281-290	3	0.72	-3	0.61	6	0.89	-6	0.86
30	Runway 10/28	291-300	3	0.69	-3	0.60	6	0.85	-6	0.86
31	Runway 10/28	301-310	3	0.66	-3	0.61	6	0.79	-6	0.82
32	Runway 10/28	311-320	3	0.59	-3	0.58	6	0.85	-6	0.83
33	Runway 10/28	321-330	3	0.56	-3	0.54	6	0.70	-6	0.85
34	Runway 10/28	331-340	3	0.39	-3	0.58	6	0.73	-6	0.84
35	Runway 10/28	341-350	3	0.53	-3	0.60	6	0.75	-6	0.82
36	Runway 10/28	351-360	3	0.60	-3	0.59	6	0.74	-6	0.74
37	Runway 10/28	361-370	3	0.53	-3	0.44	6	0.67	-6	0.74
38	Runway 10/28	371-380	3	0.52	-3	0.51	6	0.65	-6	0.80
39	Runway 10/28	381-390	3	0.45	-3	0.49	6	0.69	-6	0.77
40	Runway 10/28	391-400	3	0.47	-3	0.48	6	0.56	-6	0.76
41	Runway 10/28	401-410	3	0.46	-3	0.52	6	0.60	-6	0.69
42	Runway 10/28	411-420	3	0.45	-3	0.52	6	0.64	-6	0.69
43	Runway 10/28	421-430	3	0.36	-3	0.44	6	0.62	-6	0.68
44	Runway 10/28	431-440	3	0.35	-3	0.38	6	0.61	-6	0.69
45	Runway 10/28	441-450	3	0.32	-3	0.44	6	0.55	-6	0.58
46	Runway 10/28	451-460	3	0.33	-3	0.46	6	0.62	-6	0.62
47	Runway 10/28	461-470	3	0.32	-3	0.41	6	0.58	-6	0.59
48	Runway 10/28	471-480	3	0.45	-3	0.33	6	0.61	-6	0.58
49	Runway 10/28	481-490	3	0.41	-3	0.50	6	0.56	-6	0.50
50	Runway 10/28	491-500	3	0.30	-3	0.52	6	0.56	-6	0.63
51	Runway 10/28	501-510	3	0.35	-3	0.42	6	0.60	-6	0.64
52	Runway 10/28	511-520	3	0.36	-3	0.44	6	0.55	-6	0.63
53	Runway 10/28	521-530	3	0.39	-3	0.48	6	0.61	-6	0.61
54	Runway 10/28	531-540	3	0.38	-3	0.47	6	0.69	-6	0.66
55	Runway 10/28	541-550	3	0.50	-3	0.62	6	0.67	-6	0.64
56	Runway 10/28	551-560	3	0.44	-3	0.57	6	0.72	-6	0.67

57	Runway 10/28	561-570	3	0.55	-3	0.60	6	0.68	-6	0.67
58	Runway 10/28	571-580	3	0.52	-3	0.55	6	0.71	-6	0.76
59	Runway 10/28	581-590	3	0.51	-3	0.51	6	0.70	-6	0.78
60	Runway 10/28	591-600	3	0.55	-3	0.58	6	0.71	-6	0.79
61	Runway 10/28	601-610	3	0.56	-3	0.54	6	0.76	-6	0.79
62	Runway 10/28	611-620	3	0.51	-3	0.54	6	0.81	-6	0.79
63	Runway 10/28	621-630	3	0.51	-3	0.52	6	0.75	-6	0.78
64	Runway 10/28	631-640	3	0.57	-3	0.57	6	0.81	-6	0.79
65	Runway 10/28	641-650	3	0.48	-3	0.66	6	0.82	-6	0.82
66	Runway 10/28	651-660	3	0.47	-3	0.69	6	0.81	-6	0.83
67	Runway 10/28	661-670	3	0.60	-3	0.66	6	0.80	-6	0.82
68	Runway 10/28	671-680	3	0.61	-3	0.63	6	0.81	-6	0.84
69	Runway 10/28	681-690	3	0.62	-3	0.67	6	0.81	-6	0.85
70	Runway 10/28	691-700	3	0.63	-3	0.66	6	0.86	-6	0.90
71	Runway 10/28	701-710	3	0.58	-3	0.74	6	0.82	-6	0.85
72	Runway 10/28	711-720	3	0.60	-3	0.74	6	0.83	-6	0.85
73	Runway 10/28	721-730	3	0.63	-3	0.74	6	0.86	-6	0.83
74	Runway 10/28	731-740	3	0.69	-3	0.73	6	0.84	-6	0.84
75	Runway 10/28	741-750	3	0.68	-3	0.74	6	0.83	-6	0.87
76	Runway 10/28	751-760	3	0.70	-3	0.73	6	0.80	-6	0.88
77	Runway 10/28	761-770	3	0.74	-3	0.68	6	0.82	-6	0.88
78	Runway 10/28	771-780	3	0.73	-3	0.70	6	0.83	-6	0.87
79	Runway 10/28	781-790	3	0.69	-3	0.67	6	0.86	-6	0.91
80	Runway 10/28	791-800	3	0.63	-3	0.70	6	0.86	-6	0.90
81	Runway 10/28	801-810	3	0.68	-3	0.73	6	0.89	-6	0.89
82	Runway 10/28	811-820	3	0.69	-3	0.71	6	0.88	-6	0.90
83	Runway 10/28	821-830	3	0.68	-3	0.74	6	0.86	-6	0.91
84	Runway 10/28	831-840	3	0.72	-3	0.71	6	0.87	-6	0.92
85	Runway 10/28	841-850	3	0.73	-3	0.76	6	0.86	-6	0.92
86	Runway 10/28	851-860	3	0.73	-3	0.75	6	0.86	-6	0.94
87	Runway 10/28	861-870	3	0.72	-3	0.75	6	0.86	-6	0.90
88	Runway 10/28	871-880	3	0.74	-3	0.74	6	0.88	-6	0.90
89	Runway 10/28	881-890	3	0.74	-3	0.75	6	0.90	-6	0.89
90	Runway 10/28	891-900	3	0.75	-3	0.76	6	0.90	-6	0.88
91	Runway 10/28	901-910	3	0.73	-3	0.75	6	0.89	-6	0.93
92	Runway 10/28	911-920	3	0.73	-3	0.72	6	0.88	-6	0.90
93	Runway 10/28	921-930	3	0.72	-3	0.73	6	0.88	-6	0.91
94	Runway 10/28	931-940	3	0.73	-3	0.73	6	0.87	-6	0.89
95	Runway 10/28	941-950	3	0.71	-3	0.73	6	0.87	-6	0.87
96	Runway 10/28	951-960	3	0.69	-3	0.73	6	0.86	-6	0.89
97	Runway 10/28	961-970	3	0.70	-3	0.71	6	0.86	-6	0.90
98	Runway 10/28	971-980	3	0.71	-3	0.68	6	0.87	-6	0.91
99	Runway 10/28	981-990	3	0.72	-3	0.70	6	0.86	-6	0.92
100	Runway 10/28	991-1000	3	0.73	-3	0.69	6	0.87	-6	0.90
101	Runway 10/28	1001-1010	3	0.69	-3	0.69	6	0.88	-6	0.87
102	Runway 10/28	1011-1020	3	0.70	-3	0.69	6	0.86	-6	0.89
103	Runway 10/28	1021-1030	3	0.68	-3	0.67	6	0.89	-6	0.90
104	Runway 10/28	1031-1040	3	0.69	-3	0.68	6	0.89	-6	0.87
105	Runway 10/28	1041-1050	3	0.73	-3	0.69	6	0.90	-6	0.86
106	Runway 10/28	1051-1060	3	0.71	-3	0.70	6	0.88	-6	0.88
107	Runway 10/28	1061-1070	3	0.70	-3	0.72	6	0.87	-6	0.89
108	Runway 10/28	1071-1080	3	0.71	-3	0.72	6	0.84	-6	0.89
109	Runway 10/28	1081-1090	3	0.69	-3	0.73	6	0.86	-6	0.90
110	Runway 10/28	1091-1100	3	0.71	-3	0.70	6	0.87	-6	0.87
111	Runway 10/28	1101-1110	3	0.71	-3	0.68	6	0.84	-6	0.83
112	Runway 10/28	1111-1120	3	0.70	-3	0.69	6	0.89	-6	0.89
113	Runway 10/28	1121-1130	3	0.71	-3	0.69	6	0.90	-6	0.88
114	Runway 10/28	1131-1140	3	0.75	-3	0.69	6	0.89	-6	0.92
115	Runway 10/28	1141-1150	3	0.76	-3	0.70	6	0.89	-6	0.90
116	Runway 10/28	1151-1160	3	0.75	-3	0.67	6	0.88	-6	0.91
117	Runway 10/28	1161-1170	3	0.73	-3	0.68	6	0.86	-6	0.86
118	Runway 10/28	1171-1180	3	0.72	-3	0.64	6	0.88	-6	0.88
119	Runway 10/28	1181-1190	3	0.71	-3	0.63	6	0.87	-6	0.87
120	Runway 10/28	1191-1200	3	0.69	-3	0.66	6	0.86	-6	0.87
121	Runway 10/28	1201-1210	3	0.69	-3	0.68	6	0.85	-6	0.88
122	Runway 10/28	1211-1220	3	0.76	-3	0.70	6	0.85	-6	0.89
123	Runway 10/28	1221-1230	3	0.76	-3	0.68	6	0.87	-6	0.86
124	Runway 10/28	1231-1240	3	0.72	-3	0.64	6	0.90	-6	0.85
125	Runway 10/28	1241-1250	3	0.71	-3	0.63	6	0.89	-6	0.86
126	Runway 10/28	1251-1260	3	0.73	-3	0.64	6	0.89	-6	0.86
127	Runway 10/28	1261-1270	3	0.72	-3	0.63	6	0.87	-6	0.85
128	Runway 10/28	1271-1280	3	0.70	-3	0.62	6	0.88	-6	0.85
129	Runway 10/28	1281-1290	3	0.70	-3	0.63	6	0.86	-6	0.84
130	Runway 10/28	1291-1300	3	0.72	-3	0.63	6	0.87	-6	0.83
131	Runway 10/28	1301-1310	3	0.71	-3	0.63	6	0.86	-6	0.85
132	Runway 10/28	1311-1320	3	0.70	-3	0.66	6	0.88	-6	0.86
133	Runway 10/28	1321-1330	3	0.71	-3	0.63	6	0.90	-6	0.87
134	Runway 10/28	1331-1340	3	0.69	-3	0.64	6	0.90	-6	0.87
135	Runway 10/28	1341-1350	3	0.71	-3	0.65	6	0.89	-6	0.87
136	Runway 10/28	1351-1360	3	0.73	-3	0.70	6	0.90	-6	0.86
137	Runway 10/28	1361-1370	3	0.71	-3	0.69	6	0.89	-6	0.86
138	Runway 10/28	1371-1380	3	0.71	-3	0.68	6	0.91	-6	0.85
139	Runway 10/28	1381-1390	3	0.69	-3	0.66	6	0.92	-6	0.85
140	Runway 10/28	1391-1400	3	0.69	-3	0.63	6	0.91	-6	0.83
141	Runway 10/28	1401-1410	3	0.69	-3	0.63	6	0.87	-6	0.81
142	Runway 10/28	1411-1420	3	0.69	-3	0.62	6	0.87	-6	0.82
143	Runway 10/28	1421-1430	3	0.68	-3	0.65	6	0.86	-6	0.83
144	Runway 10/28	1431-1440	3	0.68	-3	0.64	6	0.85	-6	0.84
145	Runway 10/28	1441-1450	3	0.70	-3	0.62	6	0.85	-6	0.84
146	Runway 10/28	1451-1460	3	0.72	-3	0.63	6	0.84	-6	0.84
147	Runway 10/28	1461-1470	3	0.69	-3	0.67	6	0.86	-6	0.85
148	Runway 10/28	1471-1480	3	0.68	-3	0.64	6	0.88	-6	0.89
149	Runway 10/28	1481-1490	3	0.70	-3	0.66	6	0.83	-6	0.84
150	Runway 10/28	1491-1500	3	0.70	-3	0.61	6	0.88	-6	0.84
151	Runway 10/28	1501-1510	3	0.72	-3	0.62	6	0.85	-6	0.82
152	Runway 10/28	1511-1520	3	0.69	-3	0.64	6	0.86	-6	0.83
153	Runway 10/28	1521-1530	3	0.67	-3	0.61	6	0.86	-6	0.81
154	Runway 10/28	1531-1540	3	0.68	-3	0.62	6	0.84	-6	0.78
155	Runway 10/28	1541-1550	3	0.67	-3	0.60	6	0.85	-6	0.78
156	Runway 10/28	1551-1560	3	0.67	-3	0.61	6	0.86	-6	0.79

157	Runway 10/28	1561-1570	3	0.66	-3	0.62	6	0.84	-6	0.81
158	Runway 10/28	1571-1580	3	0.70	-3	0.67	6	0.84	-6	0.79
159	Runway 10/28	1581-1590	3	0.68	-3	0.68	6	0.84	-6	0.80
160	Runway 10/28	1591-1600	3	0.69	-3	0.67	6	0.81	-6	0.79
161	Runway 10/28	1601-1610	3	0.71	-3	0.68	6	0.81	-6	0.80
162	Runway 10/28	1611-1620	3	0.68	-3	0.70	6	0.84	-6	0.80
163	Runway 10/28	1621-1630	3	0.68	-3	0.71	6	0.80	-6	0.80
164	Runway 10/28	1631-1640	3	0.69	-3	0.69	6	0.83	-6	0.80
165	Runway 10/28	1641-1650	3	0.69	-3	0.72	6	0.83	-6	0.82
166	Runway 10/28	1651-1660	3	0.70	-3	0.71	6	0.81	-6	0.79
167	Runway 10/28	1661-1670	3	0.66	-3	0.74	6	0.80	-6	0.73
168	Runway 10/28	1671-1680	3	0.68	-3	0.75	6	0.82	-6	0.74
169	Runway 10/28	1681-1690	3	0.66	-3	0.75	6	0.82	-6	0.76
170	Runway 10/28	1691-1700	3	0.66	-3	0.74	6	0.81	-6	0.76
171	Runway 10/28	1701-1710	3	0.66	-3	0.72	6	0.80	-6	0.78
172	Runway 10/28	1711-1720	3	0.66	-3	0.66	6	0.77	-6	0.79
173	Runway 10/28	1721-1730	3	0.62	-3	0.67	6	0.76	-6	0.75
174	Runway 10/28	1731-1740	3	0.55	-3	0.62	6	0.78	-6	0.76
175	Runway 10/28	1741-1750	3	0.56	-3	0.62	6	0.74	-6	0.71
176	Runway 10/28	1751-1760	3	0.62	-3	0.63	6	0.73	-6	0.74
177	Runway 10/28	1761-1770	3	0.58	-3	0.55	6	0.72	-6	0.71
178	Runway 10/28	1771-1780	3	0.56	-3	0.59	6	0.72	-6	0.67
179	Runway 10/28	1781-1790	3	0.59	-3	0.54	6	0.73	-6	0.70
180	Runway 10/28	1791-1800	3	0.49	-3	0.59	6	0.71	-6	0.75
181	Runway 10/28	1801-1810	3	0.48	-3	0.59	6	0.72	-6	0.74
182	Runway 10/28	1811-1820	3	0.55	-3	0.60	6	0.72	-6	0.71
183	Runway 10/28	1821-1830	3	0.50	-3	0.62	6	0.71	-6	0.68
184	Runway 10/28	1831-1840	3	0.46	-3	0.60	6	0.73	-6	0.67
185	Runway 10/28	1841-1850	3	0.47	-3	0.51	6	0.74	-6	0.63
186	Runway 10/28	1851-1860	3	0.44	-3	0.53	6	0.76	-6	0.65
187	Runway 10/28	1861-1870	3	0.45	-3	0.52	6	0.76	-6	0.69
188	Runway 10/28	1871-1880	3	0.46	-3	0.58	6	0.67	-6	0.62
189	Runway 10/28	1881-1890	3	0.38	-3	0.53	6	0.68	-6	0.60
190	Runway 10/28	1891-1900	3	0.33	-3	0.63	6	0.69	-6	0.60
191	Runway 10/28	1901-1910	3	0.43	-3	0.61	6	0.66	-6	0.64
192	Runway 10/28	1911-1920	3	0.38	-3	0.60	6	0.66	-6	0.59
193	Runway 10/28	1921-1930	3	0.40	-3	0.53	6	0.70	-6	0.62
194	Runway 10/28	1931-1940	3	0.35	-3	0.59	6	0.73	-6	0.57
195	Runway 10/28	1941-1950	3	0.42	-3	0.59	6	0.72	-6	0.61
196	Runway 10/28	1951-1960	3	0.42	-3	0.52	6	0.74	-6	0.61
197	Runway 10/28	1961-1970	3	0.46	-3	0.64	6	0.71	-6	0.61
198	Runway 10/28	1971-1980	3	0.49	-3	0.64	6	0.76	-6	0.67
199	Runway 10/28	1981-1990	3	0.47	-3	0.60	6	0.78	-6	0.70
200	Runway 10/28	1991-2000	3	0.55	-3	0.62	6	0.81	-6	0.67
201	Runway 10/28	2001-2010	3	0.58	-3	0.63	6	0.80	-6	0.69
202	Runway 10/28	2011-2020	3	0.60	-3	0.67	6	0.75	-6	0.77
203	Runway 10/28	2021-2030	3	0.57	-3	0.61	6	0.79	-6	0.75
204	Runway 10/28	2031-2040	3	0.60	-3	0.65	6	0.80	-6	0.73
205	Runway 10/28	2041-2050	3	0.60	-3	0.66	6	0.81	-6	0.74
206	Runway 10/28	2051-2060	3	0.61	-3	0.62	6	0.83	-6	0.78
207	Runway 10/28	2061-2070	3	0.65	-3	0.62	6	0.82	-6	0.77
208	Runway 10/28	2071-2080	3	0.67	-3	0.65	6	0.84	-6	0.78
209	Runway 10/28	2081-2090	3	0.65	-3	0.66	6	0.89	-6	0.79
210	Runway 10/28	2091-2100	3	0.63	-3	0.69	6	0.84	-6	0.79
211	Runway 10/28	2101-2110	3	0.66	-3	0.70	6	0.87	-6	0.80
212	Runway 10/28	2111-2120	3	0.65	-3	0.67	6	0.87	-6	0.80
213	Runway 10/28	2121-2130	3	0.61	-3	0.67	6	0.83	-6	0.79
214	Runway 10/28	2131-2140	3	0.62	-3	0.68	6	0.84	-6	0.81
215	Runway 10/28	2141-2150	3	0.62	-3	0.70	6	0.83	-6	0.82
216	Runway 10/28	2151-2160	3	0.61	-3	0.71	6	0.82	-6	0.81
217	Runway 10/28	2161-2170	3	0.65	-3	0.67	6	0.85	-6	0.83
218	Runway 10/28	2171-2180	3	0.64	-3	0.68	6	0.85	-6	0.80
219	Runway 10/28	2181-2190	3	0.64	-3	0.67	6	0.86	-6	0.82
220	Runway 10/28	2191-2200	3	0.62	-3	0.65	6	0.87	-6	0.81
221	Runway 10/28	2201-2210	3	0.46	-3	0.64	6	0.83	-6	0.80
222	Runway 10/28	2211-2220	3	0.45	-3	0.64	6	0.86	-6	0.79
223	Runway 10/28	2221-2230	3	0.39	-3	0.64	6	0.87	-6	0.79
224	Runway 10/28	2231-2240	3	0.60	-3	0.66	6	0.88	-6	0.78
225	Runway 10/28	2241-2250	3	0.66	-3	0.66	6	0.89	-6	0.78
226	Runway 10/28	2251-2260	3	0.66	-3	0.61	6	0.88	-6	0.78
227	Runway 10/28	2261-2270	3	0.64	-3	0.62	6	0.88	-6	0.76
228	Runway 10/28	2271-2280	3	0.61	-3	0.62	6	0.87	-6	0.75
229	Runway 10/28	2281-2290	3	0.56	-3	0.62	6	0.87	-6	0.76
230	Runway 10/28	2291-2300	3	0.56	-3	0.62	6	0.85	-6	0.76
231	Runway 10/28	2301-2310	3	0.56	-3	0.62	6	0.85	-6	0.76
232	Runway 10/28	2311-2320	3	0.56	-3	0.62	6	0.85	-6	0.76
233	Runway 10/28	2321-2330	3	0.56	-3	0.62	6	0.85	-6	0.76
234	Runway 10/28	2331-2340	3	0.56	-3	0.62	6	0.85	-6	0.76
235	Runway 10/28	2341-2350	3	0.56	-3	0.62	6	0.85	-6	0.76
236	Runway 10/28	2351-2360	3	0.56	-3	0.62	6	0.85	-6	0.76
237	Runway 10/28	2361-2370	3	0.56	-3	0.62	6	0.85	-6	0.76
238	Runway 10/28	2371-2380	3	0.56	-3	0.62	6	0.85	-6	0.76
239	Runway 10/28	2381-2390	3	0.56	-3	0.62	6	0.85	-6	0.76
240	Runway 10/28	2391-2400	3	0.56	-3	0.62	6	0.85	-6	0.76

11/10/2011

N°	Direction	Chainage	Distance from c/l (m)	Average GN	Distance from c/l (m)	Average GN	Distance from c/l (m)	Average GN	Distance from c/l (m)	Average GN
1	Runway 10/28	001-010	3	0.58	-3	0.52	6	0.85	-6	0.79
2	Runway 10/28	011-020	3	0.58	-3	0.52	6	0.85	-6	0.79
3	Runway 10/28	021-030	3	0.58	-3	0.52	6	0.85	-6	0.79
4	Runway 10/28	031-040	3	0.58	-3	0.52	6	0.85	-6	0.79
5	Runway 10/28	041-050	3	0.58	-3	0.52	6	0.85	-6	0.79
6	Runway 10/28	051-060	3	0.58	-3	0.52	6	0.85	-6	0.79
7	Runway 10/28	061-070	3	0.58	-3	0.52	6	0.85	-6	0.79
8	Runway 10/28	071-080	3	0.58	-3	0.52	6	0.85	-6	0.79
9	Runway 10/28	081-90	3	0.58	-3	0.52	6	0.85	-6	0.79
10	Runway 10/28	091-100	3	0.58	-3	0.52	6	0.85	-6	0.79
11	Runway 10/28	101-110	3	0.58	-3	0.52	6	0.85	-6	0.79
12	Runway 10/28	111-120	3	0.58	-3	0.52	6	0.88	-6	0.80
13	Runway 10/28	121-130	3	0.58	-3	0.52	6	0.89	-6	0.80
14	Runway 10/28	131-140	3	0.56	-3	0.52	6	0.90	-6	0.78

15	Runway 10/28	141-150	3	0.58	-3	0.52	6	0.89	-6	0.78
16	Runway 10/28	151-160	3	0.58	-3	0.53	6	0.88	-6	0.77
17	Runway 10/28	161-170	3	0.60	-3	0.53	6	0.88	-6	0.76
18	Runway 10/28	171-180	3	0.63	-3	0.55	6	0.87	-6	0.77
19	Runway 10/28	181-190	3	0.62	-3	0.53	6	0.88	-6	0.78
20	Runway 10/28	191-200	3	0.60	-3	0.56	6	0.88	-6	0.79
21	Runway 10/28	201-210	3	0.60	-3	0.55	6	0.87	-6	0.78
22	Runway 10/28	211-220	3	0.58	-3	0.55	6	0.87	-6	0.77
23	Runway 10/28	221-230	3	0.56	-3	0.55	6	0.88	-6	0.79
24	Runway 10/28	231-240	3	0.55	-3	0.58	6	0.91	-6	0.79
25	Runway 10/28	241-250	3	0.53	-3	0.56	6	0.88	-6	0.80
26	Runway 10/28	251-260	3	0.50	-3	0.54	6	0.85	-6	0.80
27	Runway 10/28	261-270	3	0.47	-3	0.54	6	0.88	-6	0.80
28	Runway 10/28	271-280	3	0.56	-3	0.55	6	0.88	-6	0.79
29	Runway 10/28	281-290	3	0.57	-3	0.51	6	0.86	-6	0.79
30	Runway 10/28	291-300	3	0.55	-3	0.49	6	0.84	-6	0.81
31	Runway 10/28	301-310	3	0.55	-3	0.48	6	0.82	-6	0.81
32	Runway 10/28	311-320	3	0.53	-3	0.45	6	0.88	-6	0.80
33	Runway 10/28	321-330	3	0.56	-3	0.38	6	0.84	-6	0.76
34	Runway 10/28	331-340	3	0.55	-3	0.35	6	0.77	-6	0.73
35	Runway 10/28	341-350	3	0.54	-3	0.41	6	0.75	-6	0.74
36	Runway 10/28	351-360	3	0.57	-3	0.42	6	0.76	-6	0.78
37	Runway 10/28	361-370	3	0.57	-3	0.41	6	0.75	-6	0.78
38	Runway 10/28	371-380	3	0.56	-3	0.43	6	0.69	-6	0.78
39	Runway 10/28	381-390	3	0.59	-3	0.43	6	0.77	-6	0.81
40	Runway 10/28	391-400	3	0.54	-3	0.40	6	0.74	-6	0.74
41	Runway 10/28	401-410	3	0.53	-3	0.37	6	0.60	-6	0.71
42	Runway 10/28	411-420	3	0.49	-3	0.33	6	0.57	-6	0.70
43	Runway 10/28	421-430	3	0.50	-3	0.33	6	0.62	-6	0.68
44	Runway 10/28	431-440	3	0.50	-3	0.35	6	0.59	-6	0.65
45	Runway 10/28	441-450	3	0.46	-3	0.29	6	0.53	-6	0.66
46	Runway 10/28	451-460	3	0.46	-3	0.29	6	0.51	-6	0.65
47	Runway 10/28	461-470	3	0.43	-3	0.27	6	0.55	-6	0.62
48	Runway 10/28	471-480	3	0.41	-3	0.28	6	0.58	-6	0.62
49	Runway 10/28	481-490	3	0.34	-3	0.28	6	0.47	-6	0.65
50	Runway 10/28	491-500	3	0.39	-3	0.27	6	0.46	-6	0.67
51	Runway 10/28	501-510	3	0.45	-3	0.29	6	0.49	-6	0.65
52	Runway 10/28	511-520	3	0.42	-3	0.29	6	0.45	-6	0.61
53	Runway 10/28	521-530	3	0.42	-3	0.27	6	0.51	-6	0.59
54	Runway 10/28	531-540	3	0.39	-3	0.36	6	0.52	-6	0.63
55	Runway 10/28	541-550	3	0.42	-3	0.33	6	0.57	-6	0.62
56	Runway 10/28	551-560	3	0.44	-3	0.40	6	0.68	-6	0.64
57	Runway 10/28	561-570	3	0.41	-3	0.37	6	0.69	-6	0.65
58	Runway 10/28	571-580	3	0.42	-3	0.38	6	0.61	-6	0.62
59	Runway 10/28	581-590	3	0.44	-3	0.35	6	0.57	-6	0.62
60	Runway 10/28	591-600	3	0.44	-3	0.38	6	0.66	-6	0.68
61	Runway 10/28	601-610	3	0.46	-3	0.42	6	0.69	-6	0.72
62	Runway 10/28	611-620	3	0.45	-3	0.44	6	0.72	-6	0.71
63	Runway 10/28	621-630	3	0.44	-3	0.44	6	0.68	-6	0.70
64	Runway 10/28	631-640	3	0.44	-3	0.43	6	0.70	-6	0.75
65	Runway 10/28	641-650	3	0.47	-3	0.41	6	0.75	-6	0.72
66	Runway 10/28	651-660	3	0.47	-3	0.44	6	0.74	-6	0.72
67	Runway 10/28	661-670	3	0.50	-3	0.47	6	0.77	-6	0.74
68	Runway 10/28	671-680	3	0.47	-3	0.44	6	0.78	-6	0.81
69	Runway 10/28	681-690	3	0.47	-3	0.45	6	0.84	-6	0.80
70	Runway 10/28	691-700	3	0.47	-3	0.45	6	0.74	-6	0.79
71	Runway 10/28	701-710	3	0.47	-3	0.45	6	0.77	-6	0.78
72	Runway 10/28	711-720	3	0.49	-3	0.48	6	0.80	-6	0.78
73	Runway 10/28	721-730	3	0.47	-3	0.49	6	0.85	-6	0.80
74	Runway 10/28	731-740	3	0.48	-3	0.50	6	0.85	-6	0.79
75	Runway 10/28	741-750	3	0.47	-3	0.47	6	0.87	-6	0.76
76	Runway 10/28	751-760	3	0.53	-3	0.49	6	0.88	-6	0.76
77	Runway 10/28	761-770	3	0.54	-3	0.49	6	0.88	-6	0.79
78	Runway 10/28	771-780	3	0.53	-3	0.52	6	0.88	-6	0.76
79	Runway 10/28	781-790	3	0.51	-3	0.47	6	0.84	-6	0.79
80	Runway 10/28	791-800	3	0.52	-3	0.48	6	0.85	-6	0.81
81	Runway 10/28	801-810	3	0.55	-3	0.50	6	0.88	-6	0.80
82	Runway 10/28	811-820	3	0.58	-3	0.49	6	0.86	-6	0.83
83	Runway 10/28	821-830	3	0.56	-3	0.50	6	0.87	-6	0.79
84	Runway 10/28	831-840	3	0.56	-3	0.51	6	0.85	-6	0.79
85	Runway 10/28	841-850	3	0.56	-3	0.53	6	0.82	-6	0.76
86	Runway 10/28	851-860	3	0.54	-3	0.50	6	0.84	-6	0.77
87	Runway 10/28	861-870	3	0.57	-3	0.52	6	0.84	-6	0.75
88	Runway 10/28	871-880	3	0.58	-3	0.51	6	0.84	-6	0.76
89	Runway 10/28	881-890	3	0.58	-3	0.49	6	0.85	-6	0.76
90	Runway 10/28	891-900	3	0.56	-3	0.54	6	0.86	-6	0.73
91	Runway 10/28	901-910	3	0.59	-3	0.56	6	0.87	-6	0.71
92	Runway 10/28	911-920	3	0.60	-3	0.54	6	0.88	-6	0.69
93	Runway 10/28	921-930	3	0.60	-3	0.53	6	0.87	-6	0.73
94	Runway 10/28	931-940	3	0.59	-3	0.53	6	0.83	-6	0.74
95	Runway 10/28	941-950	3	0.60	-3	0.54	6	0.84	-6	0.73
96	Runway 10/28	951-960	3	0.60	-3	0.54	6	0.84	-6	0.80
97	Runway 10/28	961-970	3	0.60	-3	0.50	6	0.81	-6	0.83
98	Runway 10/28	971-980	3	0.60	-3	0.54	6	0.83	-6	0.80
99	Runway 10/28	981-990	3	0.57	-3	0.54	6	0.85	-6	0.77
100	Runway 10/28	991-1000	3	0.57	-3	0.53	6	0.87	-6	0.78
101	Runway 10/28	1001-1010	3	0.56	-3	0.53	6	0.85	-6	0.79
102	Runway 10/28	1011-1020	3	0.57	-3	0.52	6	0.83	-6	0.83
103	Runway 10/28	1021-1030	3	0.59	-3	0.52	6	0.86	-6	0.81
104	Runway 10/28	1031-1040	3	0.58	-3	0.53	6	0.87	-6	0.81
105	Runway 10/28	1041-1050	3	0.58	-3	0.54	6	0.87	-6	0.78
106	Runway 10/28	1051-1060	3	0.58	-3	0.55	6	0.86	-6	0.79
107	Runway 10/28	1061-1070	3	0.57	-3	0.55	6	0.85	-6	0.79
108	Runway 10/28	1071-1080	3	0.58	-3	0.55	6	0.87	-6	0.82
109	Runway 10/28	1081-1090	3	0.59	-3	0.55	6	0.88	-6	0.82
110	Runway 10/28	1091-1100	3	0.58	-3	0.56	6	0.84	-6	0.81
111	Runway 10/28	1101-1110	3	0.55	-3	0.54	6	0.84	-6	0.79
112	Runway 10/28	1111-1120	3	0.56	-3	0.55	6	0.85	-6	0.79
113	Runway 10/28	1121-1130	3	0.56	-3	0.55	6	0.87	-6	0.81
114	Runway 10/28	1131-1140	3	0.58	-3	0.57	6	0.84	-6	0.78

115	Runway 10/28	1141-1150	3	0.56	-3	0.58	6	0.88	-6	0.80
116	Runway 10/28	1151-1160	3	0.56	-3	0.56	6	0.86	-6	0.80
117	Runway 10/28	1161-1170	3	0.56	-3	0.57	6	0.86	-6	0.78
118	Runway 10/28	1171-1180	3	0.55	-3	0.56	6	0.86	-6	0.80
119	Runway 10/28	1181-1190	3	0.54	-3	0.57	6	0.86	-6	0.80
120	Runway 10/28	1191-1200	3	0.54	-3	0.56	6	0.86	-6	0.81
121	Runway 10/28	1201-1210	3	0.53	-3	0.55	6	0.86	-6	0.84
122	Runway 10/28	1211-1220	3	0.52	-3	0.55	6	0.88	-6	0.84
123	Runway 10/28	1221-1230	3	0.54	-3	0.54	6	0.87	-6	0.84
124	Runway 10/28	1231-1240	3	0.55	-3	0.56	6	0.88	-6	0.86
125	Runway 10/28	1241-1250	3	0.54	-3	0.57	6	0.88	-6	0.88
126	Runway 10/28	1251-1260	3	0.54	-3	0.56	6	0.86	-6	0.85
127	Runway 10/28	1261-1270	3	0.53	-3	0.57	6	0.85	-6	0.84
128	Runway 10/28	1271-1280	3	0.52	-3	0.57	6	0.87	-6	0.87
129	Runway 10/28	1281-1290	3	0.53	-3	0.56	6	0.88	-6	0.86
130	Runway 10/28	1291-1300	3	0.52	-3	0.56	6	0.86	-6	0.87
131	Runway 10/28	1301-1310	3	0.53	-3	0.58	6	0.85	-6	0.88
132	Runway 10/28	1311-1320	3	0.53	-3	0.58	6	0.87	-6	0.88
133	Runway 10/28	1321-1330	3	0.54	-3	0.57	6	0.88	-6	0.88
134	Runway 10/28	1331-1340	3	0.53	-3	0.56	6	0.89	-6	0.86
135	Runway 10/28	1341-1350	3	0.52	-3	0.57	6	0.89	-6	0.83
136	Runway 10/28	1351-1360	3	0.52	-3	0.58	6	0.86	-6	0.85
137	Runway 10/28	1361-1370	3	0.53	-3	0.56	6	0.85	-6	0.87
138	Runway 10/28	1371-1380	3	0.52	-3	0.59	6	0.87	-6	0.89
139	Runway 10/28	1381-1390	3	0.54	-3	0.58	6	0.86	-6	0.89
140	Runway 10/28	1391-1400	3	0.54	-3	0.57	6	0.86	-6	0.86
141	Runway 10/28	1401-1410	3	0.52	-3	0.55	6	0.87	-6	0.84
142	Runway 10/28	1411-1420	3	0.50	-3	0.55	6	0.86	-6	0.85
143	Runway 10/28	1421-1430	3	0.49	-3	0.57	6	0.84	-6	0.83
144	Runway 10/28	1431-1440	3	0.52	-3	0.58	6	0.79	-6	0.84
145	Runway 10/28	1441-1450	3	0.50	-3	0.58	6	0.85	-6	0.84
146	Runway 10/28	1451-1460	3	0.51	-3	0.58	6	0.85	-6	0.85
147	Runway 10/28	1461-1470	3	0.51	-3	0.56	6	0.86	-6	0.88
148	Runway 10/28	1471-1480	3	0.50	-3	0.56	6	0.86	-6	0.92
149	Runway 10/28	1481-1490	3	0.48	-3	0.58	6	0.84	-6	0.93
150	Runway 10/28	1491-1500	3	0.48	-3	0.54	6	0.84	-6	0.93
151	Runway 10/28	1501-1510	3	0.47	-3	0.56	6	0.83	-6	0.91
152	Runway 10/28	1511-1520	3	0.46	-3	0.55	6	0.80	-6	0.91
153	Runway 10/28	1521-1530	3	0.50	-3	0.57	6	0.80	-6	0.90
154	Runway 10/28	1531-1540	3	0.48	-3	0.53	6	0.78	-6	0.88
155	Runway 10/28	1541-1550	3	0.49	-3	0.53	6	0.81	-6	0.87
156	Runway 10/28	1551-1560	3	0.47	-3	0.53	6	0.78	-6	0.87
157	Runway 10/28	1561-1570	3	0.47	-3	0.53	6	0.79	-6	0.89
158	Runway 10/28	1571-1580	3	0.48	-3	0.55	6	0.79	-6	0.91
159	Runway 10/28	1581-1590	3	0.51	-3	0.53	6	0.81	-6	0.91
160	Runway 10/28	1591-1600	3	0.51	-3	0.49	6	0.79	-6	0.88
161	Runway 10/28	1601-1610	3	0.54	-3	0.57	6	0.74	-6	0.87
162	Runway 10/28	1611-1620	3	0.53	-3	0.54	6	0.80	-6	0.84
163	Runway 10/28	1621-1630	3	0.53	-3	0.56	6	0.81	-6	0.86
164	Runway 10/28	1631-1640	3	0.53	-3	0.57	6	0.80	-6	0.89
165	Runway 10/28	1641-1650	3	0.50	-3	0.55	6	0.75	-6	0.90
166	Runway 10/28	1651-1660	3	0.49	-3	0.56	6	0.74	-6	0.86
167	Runway 10/28	1661-1670	3	0.46	-3	0.58	6	0.76	-6	0.86
168	Runway 10/28	1671-1680	3	0.47	-3	0.55	6	0.75	-6	0.86
169	Runway 10/28	1681-1690	3	0.49	-3	0.53	6	0.72	-6	0.85
170	Runway 10/28	1691-1700	3	0.49	-3	0.55	6	0.71	-6	0.83
171	Runway 10/28	1701-1710	3	0.48	-3	0.50	6	0.71	-6	0.84
172	Runway 10/28	1711-1720	3	0.48	-3	0.50	6	0.70	-6	0.87
173	Runway 10/28	1721-1730	3	0.45	-3	0.50	6	0.69	-6	0.85
174	Runway 10/28	1731-1740	3	0.46	-3	0.47	6	0.68	-6	0.79
175	Runway 10/28	1741-1750	3	0.45	-3	0.46	6	0.69	-6	0.79
176	Runway 10/28	1751-1760	3	0.50	-3	0.47	6	0.70	-6	0.80
177	Runway 10/28	1761-1770	3	0.48	-3	0.48	6	0.70	-6	0.76
178	Runway 10/28	1771-1780	3	0.47	-3	0.48	6	0.70	-6	0.78
179	Runway 10/28	1781-1790	3	0.47	-3	0.48	6	0.68	-6	0.79
180	Runway 10/28	1791-1800	3	0.45	-3	0.47	6	0.66	-6	0.73
181	Runway 10/28	1801-1810	3	0.49	-3	0.43	6	0.72	-6	0.74
182	Runway 10/28	1811-1820	3	0.44	-3	0.41	6	0.69	-6	0.75
183	Runway 10/28	1821-1830	3	0.44	-3	0.42	6	0.64	-6	0.72
184	Runway 10/28	1831-1840	3	0.46	-3	0.41	6	0.64	-6	0.73
185	Runway 10/28	1841-1850	3	0.44	-3	0.37	6	0.63	-6	0.74
186	Runway 10/28	1851-1860	3	0.45	-3	0.37	6	0.63	-6	0.72
187	Runway 10/28	1861-1870	3	0.45	-3	0.33	6	0.62	-6	0.75
188	Runway 10/28	1871-1880	3	0.42	-3	0.34	6	0.56	-6	0.72
189	Runway 10/28	1881-1890	3	0.44	-3	0.29	6	0.55	-6	0.74
190	Runway 10/28	1891-1900	3	0.50	-3	0.26	6	0.67	-6	0.75
191	Runway 10/28	1901-1910	3	0.43	-3	0.32	6	0.68	-6	0.71
192	Runway 10/28	1911-1920	3	0.43	-3	0.32	6	0.62	-6	0.60
193	Runway 10/28	1921-1930	3	0.46	-3	0.33	6	0.61	-6	0.67
194	Runway 10/28	1931-1940	3	0.43	-3	0.34	6	0.66	-6	0.77
195	Runway 10/28	1941-1950	3	0.44	-3	0.40	6	0.69	-6	0.79
196	Runway 10/28	1951-1960	3	0.46	-3	0.40	6	0.64	-6	0.74
197	Runway 10/28	1961-1970	3	0.47	-3	0.42	6	0.67	-6	0.76
198	Runway 10/28	1971-1980	3	0.47	-3	0.40	6	0.71	-6	0.77
199	Runway 10/28	1981-1990	3	0.48	-3	0.41	6	0.70	-6	0.76
200	Runway 10/28	1991-2000	3	0.48	-3	0.42	6	0.71	-6	0.77
201	Runway 10/28	2001-2010	3	0.51	-3	0.44	6	0.75	-6	0.80
202	Runway 10/28	2011-2020	3	0.52	-3	0.42	6	0.74	-6	0.78
203	Runway 10/28	2021-2030	3	0.51	-3	0.44	6	0.74	-6	0.82
204	Runway 10/28	2031-2040	3	0.49	-3	0.43	6	0.76	-6	0.82
205	Runway 10/28	2041-2050	3	0.50	-3	0.45	6	0.77	-6	0.80
206	Runway 10/28	2051-2060	3	0.50	-3	0.45	6	0.75	-6	0.77
207	Runway 10/28	2061-2070	3	0.50	-3	0.44	6	0.77	-6	0.80
208	Runway 10/28	2071-2080	3	0.51	-3	0.44	6	0.76	-6	0.82
209	Runway 10/28	2081-2090	3	0.51	-3	0.46	6	0.81	-6	0.82
210	Runway 10/28	2091-2100	3	0.51	-3	0.48	6	0.79	-6	0.83
211	Runway 10/28	2101-2110	3	0.53	-3	0.48	6	0.82	-6	0.85
212	Runway 10/28	2111-2120	3	0.54	-3	0.47	6	0.79	-6	0.86
213	Runway 10/28	2121-2130	3	0.56	-3	0.45	6	0.76	-6	0.87
214	Runway 10/28	2131-2140	3	0.55	-3	0.45	6	0.79	-6	0.85

215	Runway 10/28	2141-2150	3	0.54	-3	0.44	6	0.77	-6	0.82
216	Runway 10/28	2151-2160	3	0.54	-3	0.47	6	0.79	-6	0.82
217	Runway 10/28	2161-2170	3	0.54	-3	0.45	6	0.78	-6	0.84
218	Runway 10/28	2171-2180	3	0.55	-3	0.47	6	0.80	-6	0.85
219	Runway 10/28	2181-2190	3	0.52	-3	0.46	6	0.81	-6	0.85
220	Runway 10/28	2191-2200	3	0.55	-3	0.47	6	0.79	-6	0.89
221	Runway 10/28	2201-2210	3	0.55	-3	0.48	6	0.81	-6	0.87
222	Runway 10/28	2211-2220	3	0.55	-3	0.48	6	0.80	-6	0.89
223	Runway 10/28	2221-2230	3	0.58	-3	0.48	6	0.83	-6	0.85
224	Runway 10/28	2231-2240	3	0.56	-3	0.49	6	0.85	-6	0.78
225	Runway 10/28	2241-2250	3	0.57	-3	0.53	6	0.88	-6	0.88
226	Runway 10/28	2251-2260	3	0.55	-3	0.53	6	0.86	-6	0.86
227	Runway 10/28	2261-2270	3	0.57	-3	0.52	6	0.90	-6	0.79
228	Runway 10/28	2271-2280	3	0.57	-3	0.50	6	0.85	-6	0.87
229	Runway 10/28	2281-2290	3	0.57	-3	0.50	6	0.82	-6	0.90
230	Runway 10/28	2291-2300	3	0.57	-3	0.50	6	0.81	-6	0.81
231	Runway 10/28	2301-2310	3	0.57	-3	0.50	6	0.81	-6	0.81
232	Runway 10/28	2311-2320	3	0.57	-3	0.50	6	0.81	-6	0.81
233	Runway 10/28	2321-2330	3	0.57	-3	0.50	6	0.81	-6	0.81
234	Runway 10/28	2331-2340	3	0.57	-3	0.50	6	0.81	-6	0.81
235	Runway 10/28	2341-2350	3	0.57	-3	0.50	6	0.81	-6	0.81
236	Runway 10/28	2351-2360	3	0.57	-3	0.50	6	0.81	-6	0.81
237	Runway 10/28	2361-2370	3	0.57	-3	0.50	6	0.81	-6	0.81
238	Runway 10/28	2371-2380	3	0.57	-3	0.50	6	0.81	-6	0.81
239	Runway 10/28	2381-2390	3	0.57	-3	0.50	6	0.81	-6	0.81
240	Runway 10/28	2391-2400	3	0.57	-3	0.50	6	0.81	-6	0.81

15/11/2011

N°	Direction	Chainage	Distance from c/l (m)	Average GN	Distance from c/l (m)	Average GN	Distance from c/l (m)	Average GN	Distance from c/l (m)	Average GN
1	Runway 10/28	001-010	3	0.48	-3	0.48	6	0.73	-6	0.57
2	Runway 10/28	011-020	3	0.48	-3	0.48	6	0.73	-6	0.57
3	Runway 10/28	021-030	3	0.48	-3	0.48	6	0.73	-6	0.57
4	Runway 10/28	031-040	3	0.48	-3	0.48	6	0.73	-6	0.57
5	Runway 10/28	041-050	3	0.48	-3	0.48	6	0.73	-6	0.57
6	Runway 10/28	051-060	3	0.48	-3	0.48	6	0.73	-6	0.57
7	Runway 10/28	061-070	3	0.48	-3	0.48	6	0.73	-6	0.57
8	Runway 10/28	071-080	3	0.48	-3	0.48	6	0.73	-6	0.57
9	Runway 10/28	081-90	3	0.48	-3	0.48	6	0.73	-6	0.57
10	Runway 10/28	091-100	3	0.48	-3	0.48	6	0.73	-6	0.57
11	Runway 10/28	101-110	3	0.48	-3	0.48	6	0.73	-6	0.57
12	Runway 10/28	111-120	3	0.48	-3	0.51	6	0.71	-6	0.63
13	Runway 10/28	121-130	3	0.50	-3	0.48	6	0.75	-6	0.64
14	Runway 10/28	131-140	3	0.49	-3	0.46	6	0.71	-6	0.67
15	Runway 10/28	141-150	3	0.50	-3	0.45	6	0.71	-6	0.66
16	Runway 10/28	151-160	3	0.50	-3	0.44	6	0.70	-6	0.65
17	Runway 10/28	161-170	3	0.48	-3	0.43	6	0.70	-6	0.66
18	Runway 10/28	171-180	3	0.48	-3	0.45	6	0.72	-6	0.68
19	Runway 10/28	181-190	3	0.49	-3	0.45	6	0.70	-6	0.68
20	Runway 10/28	191-200	3	0.52	-3	0.44	6	0.71	-6	0.67
21	Runway 10/28	201-210	3	0.51	-3	0.41	6	0.71	-6	0.70
22	Runway 10/28	211-220	3	0.51	-3	0.39	6	0.72	-6	0.65
23	Runway 10/28	221-230	3	0.50	-3	0.41	6	0.67	-6	0.68
24	Runway 10/28	231-240	3	0.49	-3	0.44	6	0.72	-6	0.71
25	Runway 10/28	241-250	3	0.51	-3	0.40	6	0.72	-6	0.70
26	Runway 10/28	251-260	3	0.47	-3	0.42	6	0.70	-6	0.67
27	Runway 10/28	261-270	3	0.48	-3	0.40	6	0.71	-6	0.68
28	Runway 10/28	271-280	3	0.46	-3	0.42	6	0.73	-6	0.67
29	Runway 10/28	281-290	3	0.43	-3	0.41	6	0.68	-6	0.67
30	Runway 10/28	291-300	3	0.44	-3	0.44	6	0.69	-6	0.66
31	Runway 10/28	301-310	3	0.47	-3	0.41	6	0.63	-6	0.62
32	Runway 10/28	311-320	3	0.45	-3	0.47	6	0.61	-6	0.64
33	Runway 10/28	321-330	3	0.43	-3	0.43	6	0.65	-6	0.64
34	Runway 10/28	331-340	3	0.45	-3	0.38	6	0.65	-6	0.68
35	Runway 10/28	341-350	3	0.41	-3	0.36	6	0.61	-6	0.67
36	Runway 10/28	351-360	3	0.42	-3	0.38	6	0.60	-6	0.67
37	Runway 10/28	361-370	3	0.41	-3	0.38	6	0.52	-6	0.64
38	Runway 10/28	371-380	3	0.34	-3	0.41	6	0.50	-6	0.64
39	Runway 10/28	381-390	3	0.31	-3	0.39	6	0.51	-6	0.65
40	Runway 10/28	391-400	3	0.33	-3	0.37	6	0.49	-6	0.63
41	Runway 10/28	401-410	3	0.29	-3	0.36	6	0.52	-6	0.66
42	Runway 10/28	411-420	3	0.29	-3	0.35	6	0.47	-6	0.63
43	Runway 10/28	421-430	3	0.31	-3	0.37	6	0.46	-6	0.62
44	Runway 10/28	431-440	3	0.29	-3	0.37	6	0.47	-6	0.59
45	Runway 10/28	441-450	3	0.31	-3	0.33	6	0.46	-6	0.60
46	Runway 10/28	451-460	3	0.23	-3	0.32	6	0.42	-6	0.61
47	Runway 10/28	461-470	3	0.23	-3	0.31	6	0.48	-6	0.57
48	Runway 10/28	471-480	3	0.25	-3	0.30	6	0.49	-6	0.57
49	Runway 10/28	481-490	3	0.26	-3	0.25	6	0.44	-6	0.56
50	Runway 10/28	491-500	3	0.22	-3	0.36	6	0.48	-6	0.53
51	Runway 10/28	501-510	3	0.27	-3	0.35	6	0.47	-6	0.54
52	Runway 10/28	511-520	3	0.22	-3	0.36	6	0.44	-6	0.55
53	Runway 10/28	521-530	3	0.22	-3	0.32	6	0.51	-6	0.55
54	Runway 10/28	531-540	3	0.24	-3	0.36	6	0.51	-6	0.55
55	Runway 10/28	541-550	3	0.29	-3	0.40	6	0.52	-6	0.58
56	Runway 10/28	551-560	3	0.30	-3	0.41	6	0.61	-6	0.57
57	Runway 10/28	561-570	3	0.31	-3	0.38	6	0.61	-6	0.55
58	Runway 10/28	571-580	3	0.32	-3	0.43	6	0.54	-6	0.53
59	Runway 10/28	581-590	3	0.28	-3	0.42	6	0.51	-6	0.59
60	Runway 10/28	591-600	3	0.33	-3	0.41	6	0.51	-6	0.62
61	Runway 10/28	601-610	3	0.32	-3	0.44	6	0.58	-6	0.61
62	Runway 10/28	611-620	3	0.39	-3	0.45	6	0.60	-6	0.62
63	Runway 10/28	621-630	3	0.40	-3	0.45	6	0.66	-6	0.58
64	Runway 10/28	631-640	3	0.42	-3	0.46	6	0.65	-6	0.62
65	Runway 10/28	641-650	3	0.43	-3	0.46	6	0.62	-6	0.64
66	Runway 10/28	651-660	3	0.39	-3	0.49	6	0.69	-6	0.64
67	Runway 10/28	661-670	3	0.40	-3	0.44	6	0.66	-6	0.62
68	Runway 10/28	671-680	3	0.39	-3	0.46	6	0.65	-6	0.64
69	Runway 10/28	681-690	3	0.42	-3	0.43	6	0.64	-6	0.65
70	Runway 10/28	691-700	3	0.43	-3	0.47	6	0.65	-6	0.64
71	Runway 10/28	701-710	3	0.46	-3	0.48	6	0.66	-6	0.67
72	Runway 10/28	711-720	3	0.43	-3	0.44	6	0.65	-6	0.64

73	Runway 10/28	721-730	3	0.44	-3	0.45	6	0.66	-6	0.61
74	Runway 10/28	731-740	3	0.45	-3	0.45	6	0.67	-6	0.64
75	Runway 10/28	741-750	3	0.48	-3	0.48	6	0.66	-6	0.67
76	Runway 10/28	751-760	3	0.46	-3	0.49	6	0.68	-6	0.70
77	Runway 10/28	761-770	3	0.47	-3	0.52	6	0.68	-6	0.70
78	Runway 10/28	771-780	3	0.47	-3	0.49	6	0.66	-6	0.69
79	Runway 10/28	781-790	3	0.47	-3	0.51	6	0.67	-6	0.68
80	Runway 10/28	791-800	3	0.43	-3	0.50	6	0.64	-6	0.70
81	Runway 10/28	801-810	3	0.45	-3	0.50	6	0.69	-6	0.68
82	Runway 10/28	811-820	3	0.47	-3	0.51	6	0.70	-6	0.66
83	Runway 10/28	821-830	3	0.46	-3	0.50	6	0.69	-6	0.66
84	Runway 10/28	831-840	3	0.47	-3	0.52	6	0.71	-6	0.65
85	Runway 10/28	841-850	3	0.47	-3	0.49	6	0.70	-6	0.64
86	Runway 10/28	851-860	3	0.45	-3	0.52	6	0.70	-6	0.66
87	Runway 10/28	861-870	3	0.45	-3	0.47	6	0.71	-6	0.65
88	Runway 10/28	871-880	3	0.44	-3	0.48	6	0.67	-6	0.63
89	Runway 10/28	881-890	3	0.44	-3	0.49	6	0.69	-6	0.64
90	Runway 10/28	891-900	3	0.46	-3	0.50	6	0.68	-6	0.62
91	Runway 10/28	901-910	3	0.47	-3	0.50	6	0.71	-6	0.63
92	Runway 10/28	911-920	3	0.47	-3	0.50	6	0.70	-6	0.61
93	Runway 10/28	921-930	3	0.46	-3	0.51	6	0.71	-6	0.64
94	Runway 10/28	931-940	3	0.47	-3	0.52	6	0.70	-6	0.66
95	Runway 10/28	941-950	3	0.48	-3	0.51	6	0.68	-6	0.67
96	Runway 10/28	951-960	3	0.48	-3	0.49	6	0.72	-6	0.67
97	Runway 10/28	961-970	3	0.49	-3	0.49	6	0.71	-6	0.66
98	Runway 10/28	971-980	3	0.47	-3	0.49	6	0.71	-6	0.65
99	Runway 10/28	981-990	3	0.49	-3	0.50	6	0.70	-6	0.66
100	Runway 10/28	991-1000	3	0.46	-3	0.51	6	0.68	-6	0.68
101	Runway 10/28	1001-1010	3	0.47	-3	0.51	6	0.72	-6	0.67
102	Runway 10/28	1011-1020	3	0.48	-3	0.51	6	0.73	-6	0.68
103	Runway 10/28	1021-1030	3	0.46	-3	0.52	6	0.71	-6	0.68
104	Runway 10/28	1031-1040	3	0.49	-3	0.48	6	0.71	-6	0.67
105	Runway 10/28	1041-1050	3	0.47	-3	0.49	6	0.69	-6	0.67
106	Runway 10/28	1051-1060	3	0.46	-3	0.50	6	0.70	-6	0.66
107	Runway 10/28	1061-1070	3	0.47	-3	0.49	6	0.70	-6	0.65
108	Runway 10/28	1071-1080	3	0.48	-3	0.50	6	0.70	-6	0.67
109	Runway 10/28	1081-1090	3	0.48	-3	0.50	6	0.70	-6	0.66
110	Runway 10/28	1091-1100	3	0.47	-3	0.48	6	0.72	-6	0.67
111	Runway 10/28	1101-1110	3	0.50	-3	0.47	6	0.73	-6	0.69
112	Runway 10/28	1111-1120	3	0.48	-3	0.49	6	0.72	-6	0.72
113	Runway 10/28	1121-1130	3	0.47	-3	0.47	6	0.70	-6	0.71
114	Runway 10/28	1131-1140	3	0.48	-3	0.50	6	0.71	-6	0.71
115	Runway 10/28	1141-1150	3	0.48	-3	0.48	6	0.71	-6	0.69
116	Runway 10/28	1151-1160	3	0.47	-3	0.50	6	0.70	-6	0.67
117	Runway 10/28	1161-1170	3	0.47	-3	0.49	6	0.67	-6	0.70
118	Runway 10/28	1171-1180	3	0.46	-3	0.41	6	0.70	-6	0.69
119	Runway 10/28	1181-1190	3	0.46	-3	0.47	6	0.71	-6	0.70
120	Runway 10/28	1191-1200	3	0.47	-3	0.48	6	0.70	-6	0.72
121	Runway 10/28	1201-1210	3	0.47	-3	0.49	6	0.69	-6	0.71
122	Runway 10/28	1211-1220	3	0.46	-3	0.48	6	0.71	-6	0.70
123	Runway 10/28	1221-1230	3	0.46	-3	0.46	6	0.71	-6	0.69
124	Runway 10/28	1231-1240	3	0.47	-3	0.44	6	0.72	-6	0.74
125	Runway 10/28	1241-1250	3	0.47	-3	0.45	6	0.67	-6	0.75
126	Runway 10/28	1251-1260	3	0.49	-3	0.46	6	0.71	-6	0.74
127	Runway 10/28	1261-1270	3	0.48	-3	0.46	6	0.69	-6	0.75
128	Runway 10/28	1271-1280	3	0.50	-3	0.42	6	0.71	-6	0.70
129	Runway 10/28	1281-1290	3	0.49	-3	0.42	6	0.71	-6	0.72
130	Runway 10/28	1291-1300	3	0.49	-3	0.45	6	0.71	-6	0.72
131	Runway 10/28	1301-1310	3	0.50	-3	0.42	6	0.71	-6	0.73
132	Runway 10/28	1311-1320	3	0.50	-3	0.43	6	0.69	-6	0.74
133	Runway 10/28	1321-1330	3	0.49	-3	0.48	6	0.71	-6	0.75
134	Runway 10/28	1331-1340	3	0.49	-3	0.44	6	0.72	-6	0.73
135	Runway 10/28	1341-1350	3	0.50	-3	0.44	6	0.70	-6	0.73
136	Runway 10/28	1351-1360	3	0.47	-3	0.45	6	0.71	-6	0.73
137	Runway 10/28	1361-1370	3	0.47	-3	0.44	6	0.70	-6	0.73
138	Runway 10/28	1371-1380	3	0.48	-3	0.47	6	0.70	-6	0.74
139	Runway 10/28	1381-1390	3	0.48	-3	0.46	6	0.71	-6	0.74
140	Runway 10/28	1391-1400	3	0.47	-3	0.47	6	0.73	-6	0.73
141	Runway 10/28	1401-1410	3	0.46	-3	0.45	6	0.70	-6	0.74
142	Runway 10/28	1411-1420	3	0.45	-3	0.43	6	0.70	-6	0.73
143	Runway 10/28	1421-1430	3	0.45	-3	0.45	6	0.67	-6	0.72
144	Runway 10/28	1431-1440	3	0.46	-3	0.46	6	0.69	-6	0.71
145	Runway 10/28	1441-1450	3	0.44	-3	0.44	6	0.68	-6	0.74
146	Runway 10/28	1451-1460	3	0.44	-3	0.46	6	0.66	-6	0.72
147	Runway 10/28	1461-1470	3	0.43	-3	0.47	6	0.67	-6	0.73
148	Runway 10/28	1471-1480	3	0.45	-3	0.45	6	0.69	-6	0.73
149	Runway 10/28	1481-1490	3	0.41	-3	0.45	6	0.69	-6	0.73
150	Runway 10/28	1491-1500	3	0.43	-3	0.43	6	0.66	-6	0.72
151	Runway 10/28	1501-1510	3	0.43	-3	0.43	6	0.64	-6	0.72
152	Runway 10/28	1511-1520	3	0.43	-3	0.44	6	0.66	-6	0.72
153	Runway 10/28	1521-1530	3	0.44	-3	0.40	6	0.67	-6	0.71
154	Runway 10/28	1531-1540	3	0.45	-3	0.46	6	0.65	-6	0.75
155	Runway 10/28	1541-1550	3	0.46	-3	0.46	6	0.67	-6	0.75
156	Runway 10/28	1551-1560	3	0.45	-3	0.45	6	0.67	-6	0.76
157	Runway 10/28	1561-1570	3	0.44	-3	0.45	6	0.68	-6	0.77
158	Runway 10/28	1571-1580	3	0.42	-3	0.47	6	0.66	-6	0.77
159	Runway 10/28	1581-1590	3	0.43	-3	0.48	6	0.67	-6	0.78
160	Runway 10/28	1591-1600	3	0.42	-3	0.49	6	0.65	-6	0.76
161	Runway 10/28	1601-1610	3	0.40	-3	0.50	6	0.65	-6	0.73
162	Runway 10/28	1611-1620	3	0.38	-3	0.48	6	0.65	-6	0.75
163	Runway 10/28	1621-1630	3	0.43	-3	0.45	6	0.66	-6	0.76
164	Runway 10/28	1631-1640	3	0.43	-3	0.46	6	0.66	-6	0.77
165	Runway 10/28	1641-1650	3	0.40	-3	0.47	6	0.61	-6	0.77
166	Runway 10/28	1651-1660	3	0.38	-3	0.46	6	0.66	-6	0.75
167	Runway 10/28	1661-1670	3	0.38	-3	0.45	6	0.66	-6	0.75
168	Runway 10/28	1671-1680	3	0.42	-3	0.43	6	0.65	-6	0.69
169	Runway 10/28	1681-1690	3	0.40	-3	0.45	6	0.60	-6	0.69
170	Runway 10/28	1691-1700	3	0.38	-3	0.45	6	0.62	-6	0.70
171	Runway 10/28	1701-1710	3	0.36	-3	0.45	6	0.62	-6	0.72
172	Runway 10/28	1711-1720	3	0.36	-3	0.46	6	0.63	-6	0.70

173	Runway 10/28	1721-1730	3	0.36	-3	0.43	6	0.60	-6	0.70
174	Runway 10/28	1731-1740	3	0.37	-3	0.40	6	0.62	-6	0.71
175	Runway 10/28	1741-1750	3	0.39	-3	0.40	6	0.61	-6	0.68
176	Runway 10/28	1751-1760	3	0.36	-3	0.44	6	0.61	-6	0.67
177	Runway 10/28	1761-1770	3	0.35	-3	0.44	6	0.61	-6	0.70
178	Runway 10/28	1771-1780	3	0.33	-3	0.43	6	0.61	-6	0.68
179	Runway 10/28	1781-1790	3	0.35	-3	0.43	6	0.61	-6	0.72
180	Runway 10/28	1791-1800	3	0.35	-3	0.40	6	0.57	-6	0.67
181	Runway 10/28	1801-1810	3	0.34	-3	0.40	6	0.58	-6	0.68
182	Runway 10/28	1811-1820	3	0.33	-3	0.35	6	0.58	-6	0.67
183	Runway 10/28	1821-1830	3	0.31	-3	0.31	6	0.57	-6	0.67
184	Runway 10/28	1831-1840	3	0.31	-3	0.35	6	0.53	-6	0.66
185	Runway 10/28	1841-1850	3	0.29	-3	0.36	6	0.53	-6	0.70
186	Runway 10/28	1851-1860	3	0.28	-3	0.37	6	0.54	-6	0.71
187	Runway 10/28	1861-1870	3	0.26	-3	0.36	6	0.56	-6	0.66
188	Runway 10/28	1871-1880	3	0.25	-3	0.34	6	0.54	-6	0.64
189	Runway 10/28	1881-1890	3	0.19	-3	0.34	6	0.50	-6	0.63
190	Runway 10/28	1891-1900	3	0.22	-3	0.35	6	0.60	-6	0.66
191	Runway 10/28	1901-1910	3	0.23	-3	0.35	6	0.56	-6	0.62
192	Runway 10/28	1911-1920	3	0.23	-3	0.39	6	0.54	-6	0.58
193	Runway 10/28	1921-1930	3	0.25	-3	0.38	6	0.50	-6	0.63
194	Runway 10/28	1931-1940	3	0.25	-3	0.36	6	0.56	-6	0.64
195	Runway 10/28	1941-1950	3	0.26	-3	0.39	6	0.55	-6	0.63
196	Runway 10/28	1951-1960	3	0.25	-3	0.34	6	0.58	-6	0.66
197	Runway 10/28	1961-1970	3	0.31	-3	0.36	6	0.56	-6	0.71
198	Runway 10/28	1971-1980	3	0.29	-3	0.36	6	0.55	-6	0.70
199	Runway 10/28	1981-1990	3	0.31	-3	0.40	6	0.60	-6	0.67
200	Runway 10/28	1991-2000	3	0.31	-3	0.36	6	0.59	-6	0.62
201	Runway 10/28	2001-2010	3	0.36	-3	0.42	6	0.59	-6	0.64
202	Runway 10/28	2011-2020	3	0.34	-3	0.43	6	0.61	-6	0.62
203	Runway 10/28	2021-2030	3	0.36	-3	0.43	6	0.58	-6	0.65
204	Runway 10/28	2031-2040	3	0.34	-3	0.40	6	0.61	-6	0.69
205	Runway 10/28	2041-2050	3	0.35	-3	0.41	6	0.61	-6	0.66
206	Runway 10/28	2051-2060	3	0.36	-3	0.41	6	0.63	-6	0.66
207	Runway 10/28	2061-2070	3	0.38	-3	0.40	6	0.64	-6	0.64
208	Runway 10/28	2071-2080	3	0.40	-3	0.42	6	0.65	-6	0.70
209	Runway 10/28	2081-2090	3	0.40	-3	0.46	6	0.67	-6	0.68
210	Runway 10/28	2091-2100	3	0.42	-3	0.43	6	0.66	-6	0.70
211	Runway 10/28	2101-2110	3	0.41	-3	0.45	6	0.64	-6	0.67
212	Runway 10/28	2111-2120	3	0.39	-3	0.43	6	0.64	-6	0.69
213	Runway 10/28	2121-2130	3	0.39	-3	0.45	6	0.64	-6	0.69
214	Runway 10/28	2131-2140	3	0.38	-3	0.45	6	0.64	-6	0.65
215	Runway 10/28	2141-2150	3	0.37	-3	0.44	6	0.65	-6	0.70
216	Runway 10/28	2151-2160	3	0.38	-3	0.47	6	0.65	-6	0.64
217	Runway 10/28	2161-2170	3	0.38	-3	0.46	6	0.63	-6	0.68
218	Runway 10/28	2171-2180	3	0.40	-3	0.46	6	0.65	-6	0.67
219	Runway 10/28	2181-2190	3	0.40	-3	0.44	6	0.62	-6	0.71
220	Runway 10/28	2191-2200	3	0.40	-3	0.43	6	0.64	-6	0.67
221	Runway 10/28	2201-2210	3	0.38	-3	0.43	6	0.62	-6	0.65
222	Runway 10/28	2211-2220	3	0.35	-3	0.42	6	0.61	-6	0.73
223	Runway 10/28	2221-2230	3	0.37	-3	0.41	6	0.61	-6	0.68
224	Runway 10/28	2231-2240	3	0.36	-3	0.41	6	0.62	-6	0.65
225	Runway 10/28	2241-2250	3	0.40	-3	0.42	6	0.64	-6	0.72
226	Runway 10/28	2251-2260	3	0.41	-3	0.42	6	0.64	-6	0.65
227	Runway 10/28	2261-2270	3	0.43	-3	0.43	6	0.63	-6	0.59
228	Runway 10/28	2271-2280	3	0.41	-3	0.42	6	0.62	-6	0.71
229	Runway 10/28	2281-2290	3	0.40	-3	0.42	6	0.65	-6	0.68
230	Runway 10/28	2291-2300	3	0.38	-3	0.42	6	0.63	-6	0.72
231	Runway 10/28	2301-2310	3	0.38	-3	0.42	6	0.63	-6	0.72
232	Runway 10/28	2311-2320	3	0.38	-3	0.42	6	0.63	-6	0.72
233	Runway 10/28	2321-2330	3	0.38	-3	0.42	6	0.63	-6	0.72
234	Runway 10/28	2331-2340	3	0.38	-3	0.42	6	0.63	-6	0.72
235	Runway 10/28	2341-2350	3	0.38	-3	0.42	6	0.63	-6	0.72
236	Runway 10/28	2351-2360	3	0.38	-3	0.42	6	0.63	-6	0.72
237	Runway 10/28	2361-2370	3	0.38	-3	0.42	6	0.63	-6	0.72
238	Runway 10/28	2371-2380	3	0.38	-3	0.42	6	0.63	-6	0.72
239	Runway 10/28	2381-2390	3	0.38	-3	0.42	6	0.63	-6	0.72
240	Runway 10/28	2391-2400	3	0.38	-3	0.42	6	0.63	-6	0.72

APPENDICE B

Statistiche di Output del K-means ottimizzato delle Serie dei Dati delle Campagne di Rilievo:

29/4/2011

27/5/2011

11/10/2011

15/11/2011

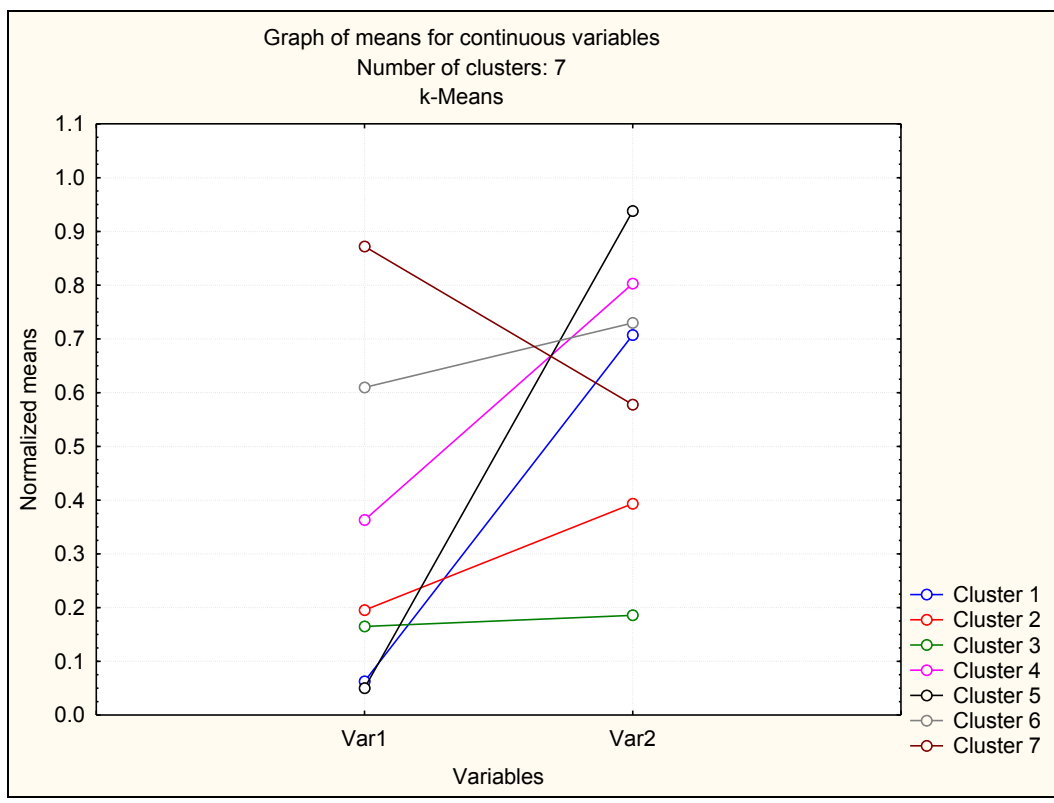


Grafico delle medie normalizzate delle variabili Progressiva metrica e GN, rilievo 29/4/2011 allineamento ± 6

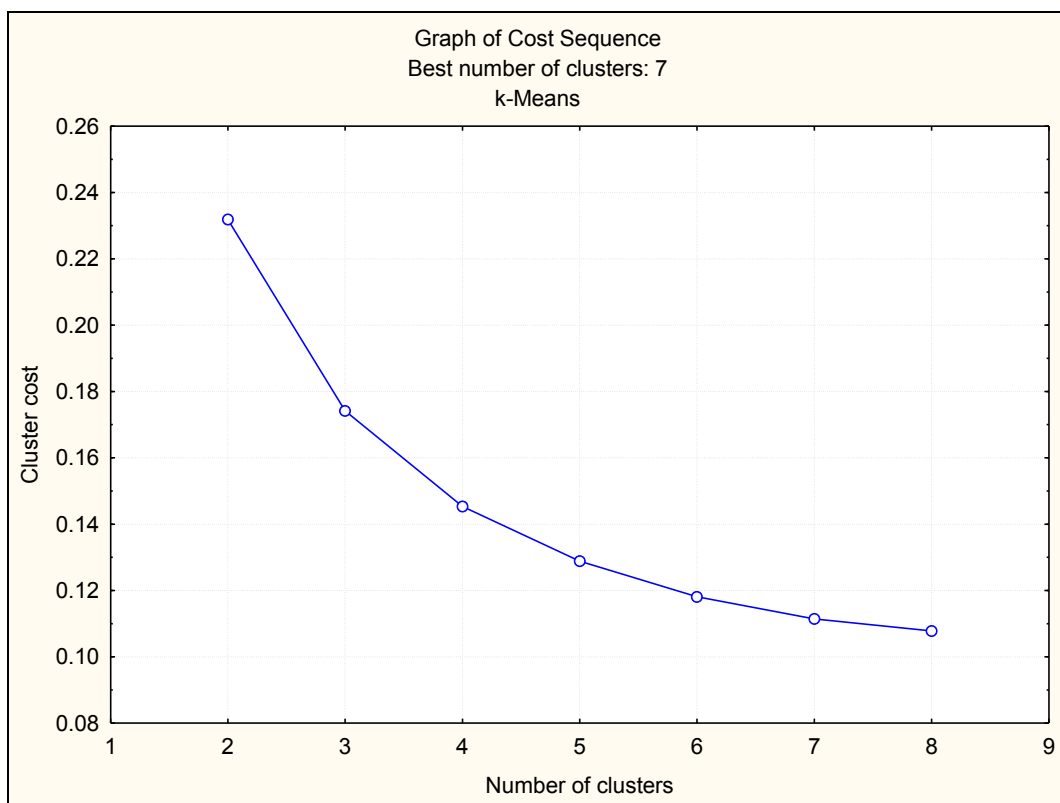


Grafico della funzione di costo, rilievo 29/4/2011 allineamento ± 6

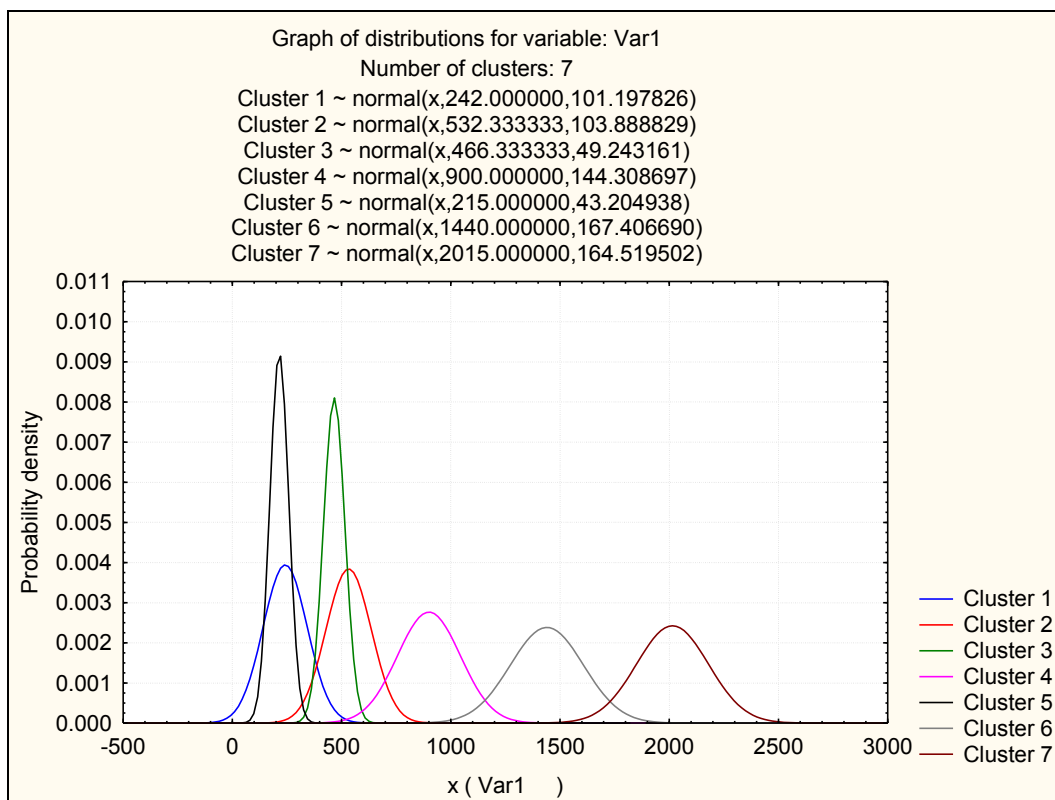


Grafico delle pdf della variabile Progressiva metrica, rilievo 29/4/2011 allineamento ±6

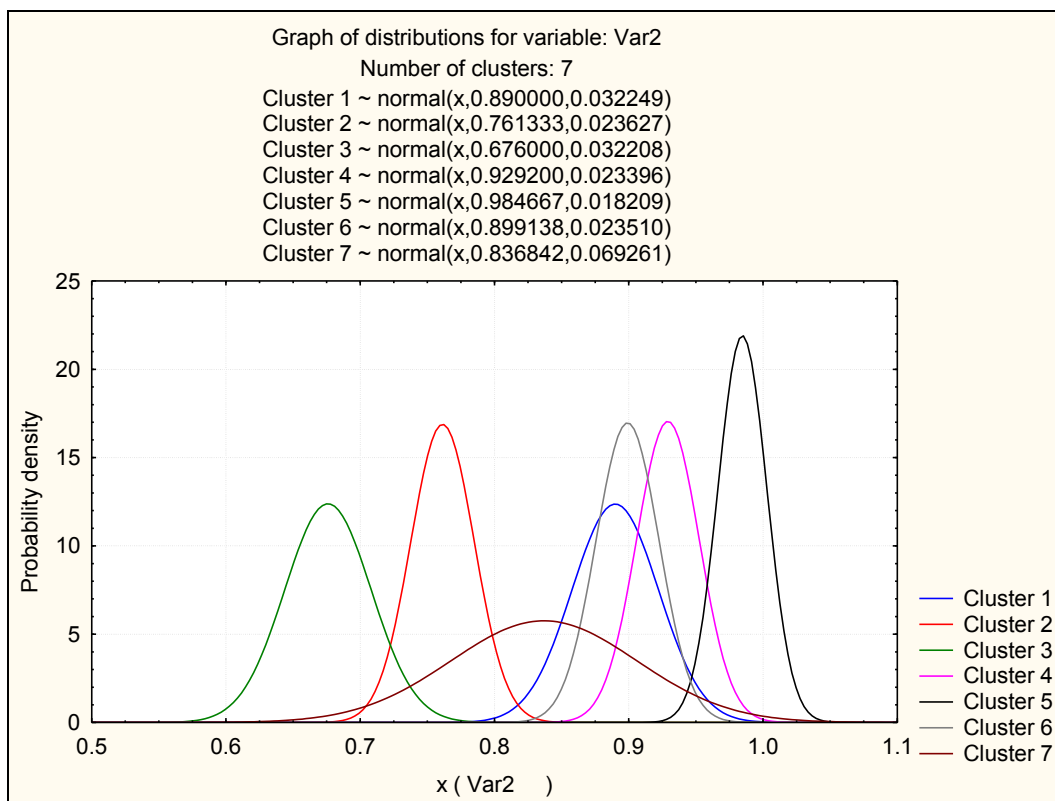


Grafico delle pdf della variabile GN, rilievo 29/4/2011 allineamento ±6

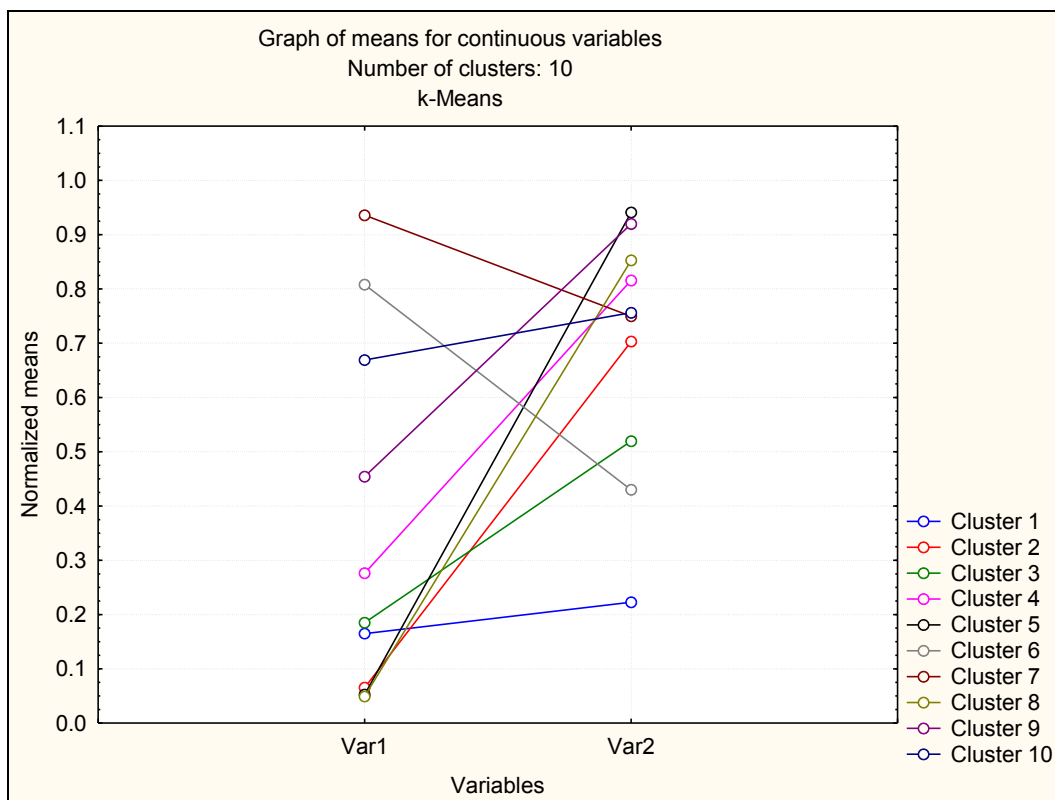


Grafico delle medie normalizzate delle variabili Progressiva metrica e GN, rilievo 27/5/2011 allineamento ± 6

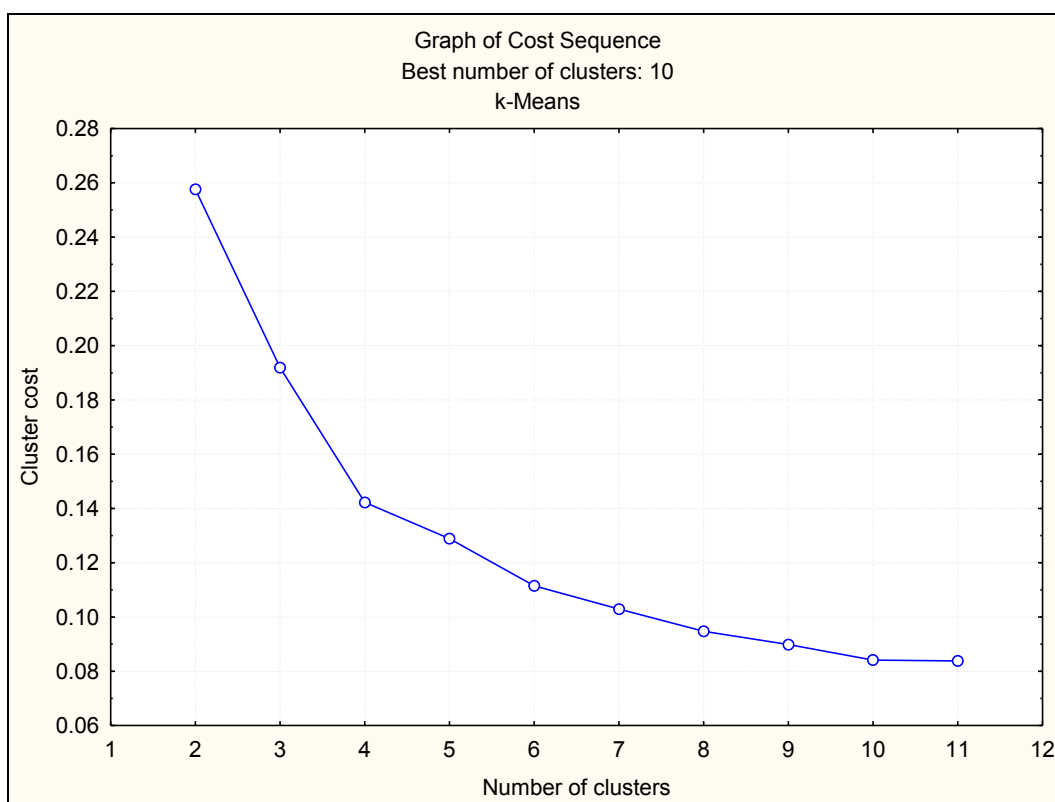


Grafico della funzione di costo, rilievo 27/5/2011 allineamento ± 6

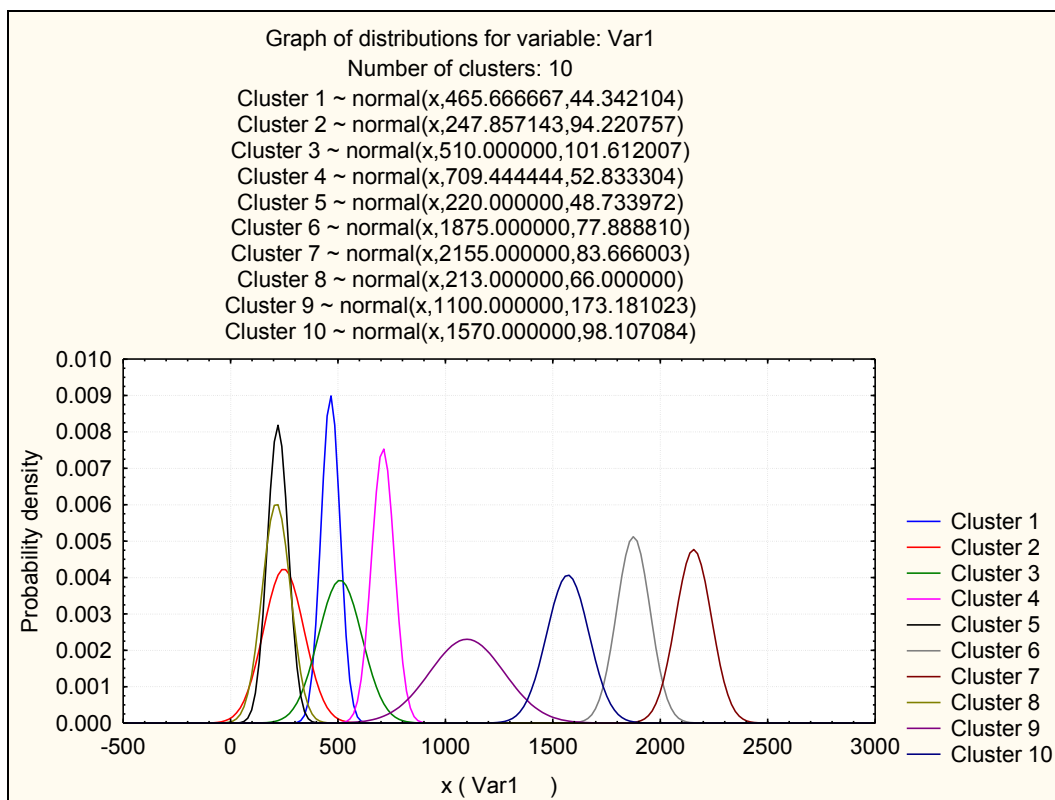


Grafico delle pdf della variabile Progressiva metrica, rilievo 27/5/2011 allineamento ± 6

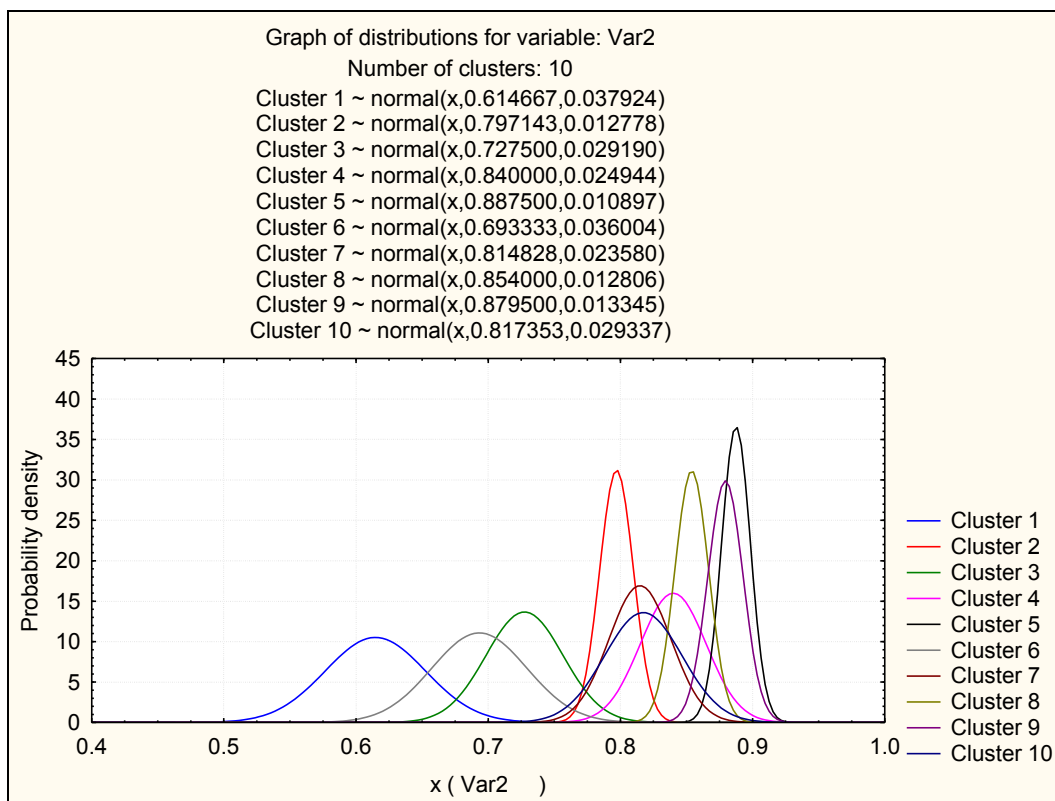


Grafico delle pdf della variabile GN, rilievo 27/5/2011 allineamento ± 6

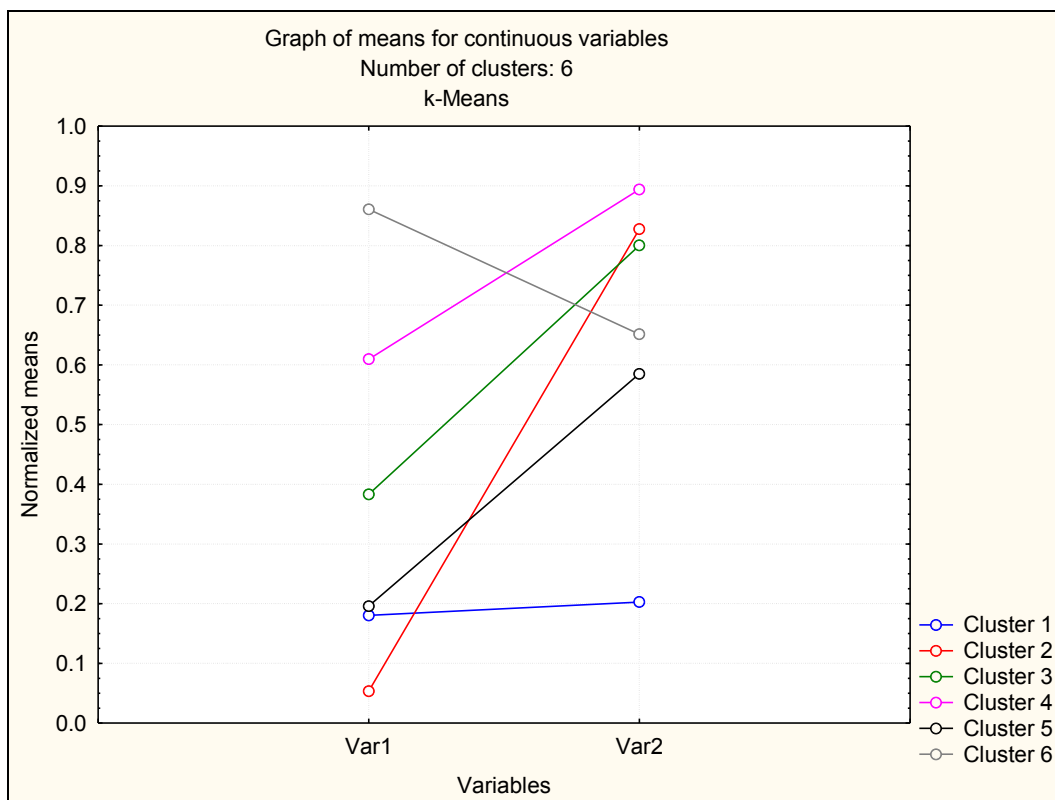


Grafico delle medie normalizzate delle variabili Progressiva metrica e GN, rilievo 11/10/2011 allineamento ± 6

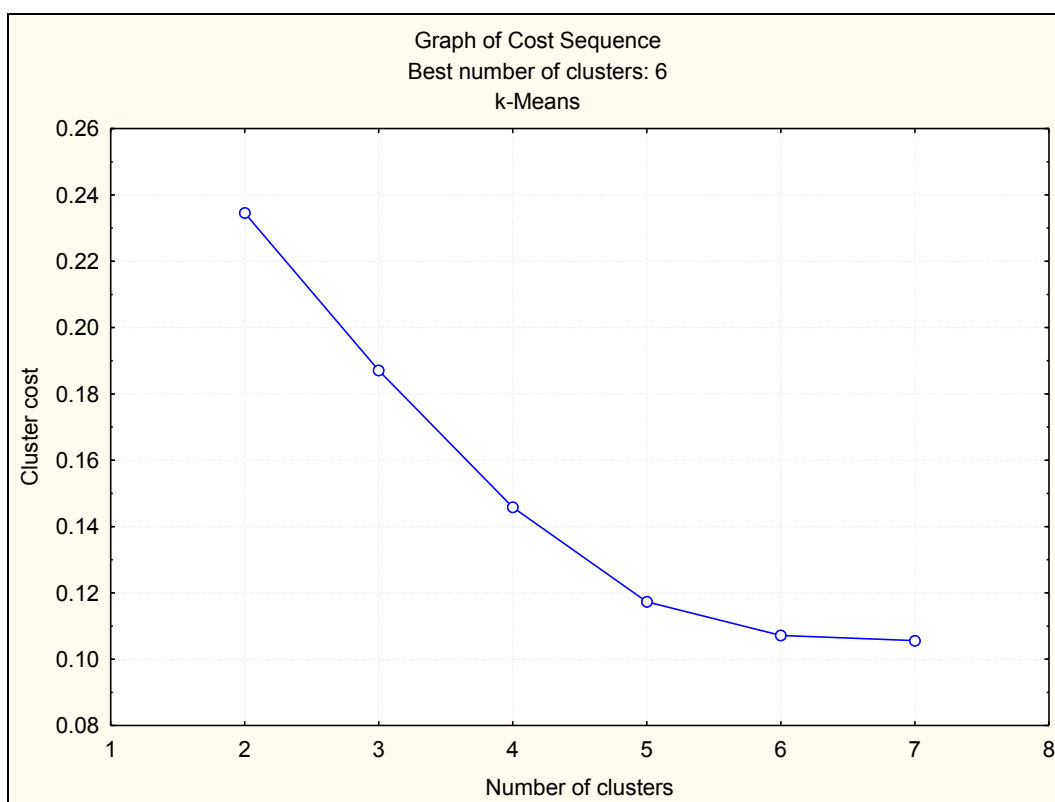


Grafico della funzione di costo, rilievo 11/10/2011 allineamento ± 6

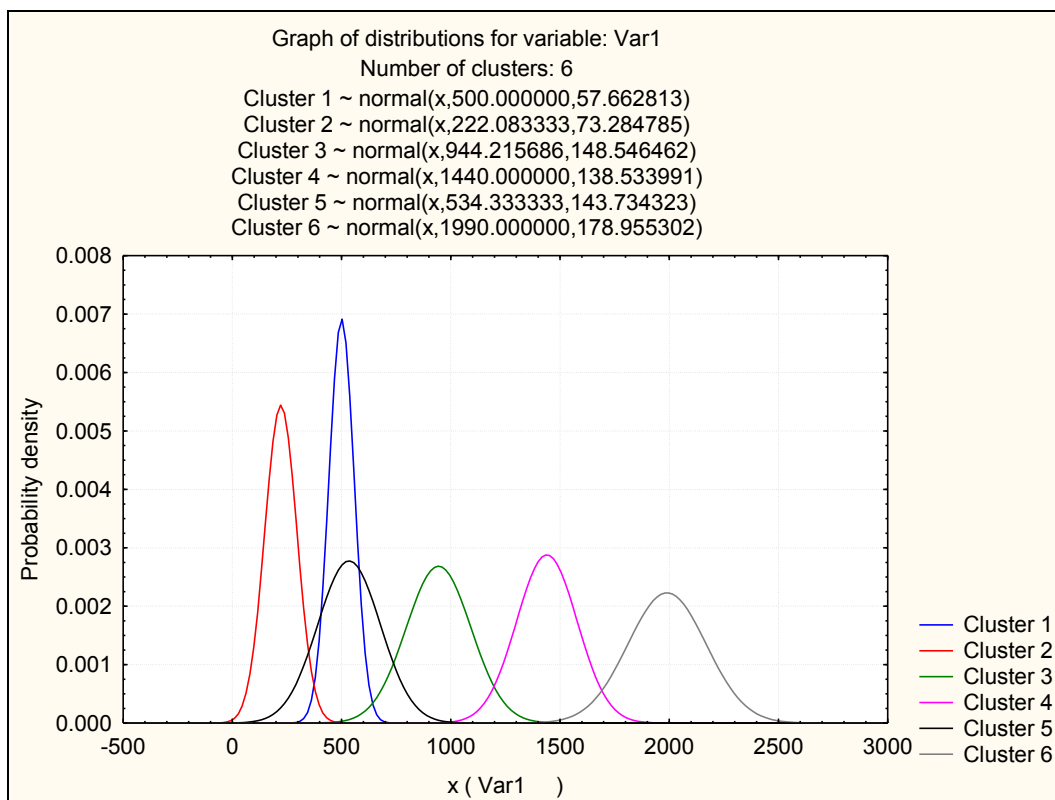


Grafico delle pdf della variabile Progressiva metrica, rilievo 11/10/2011 allineamento ± 6

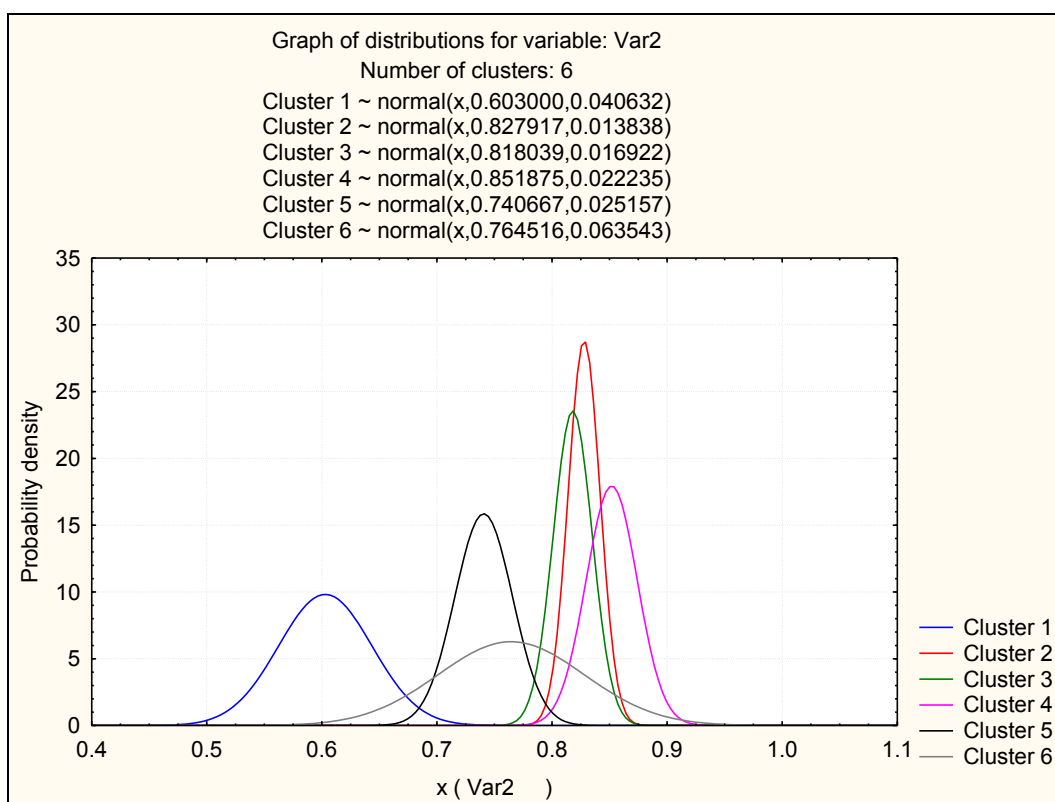


Grafico delle pdf della variabile GN, rilievo 11/10/2011 allineamento ± 6

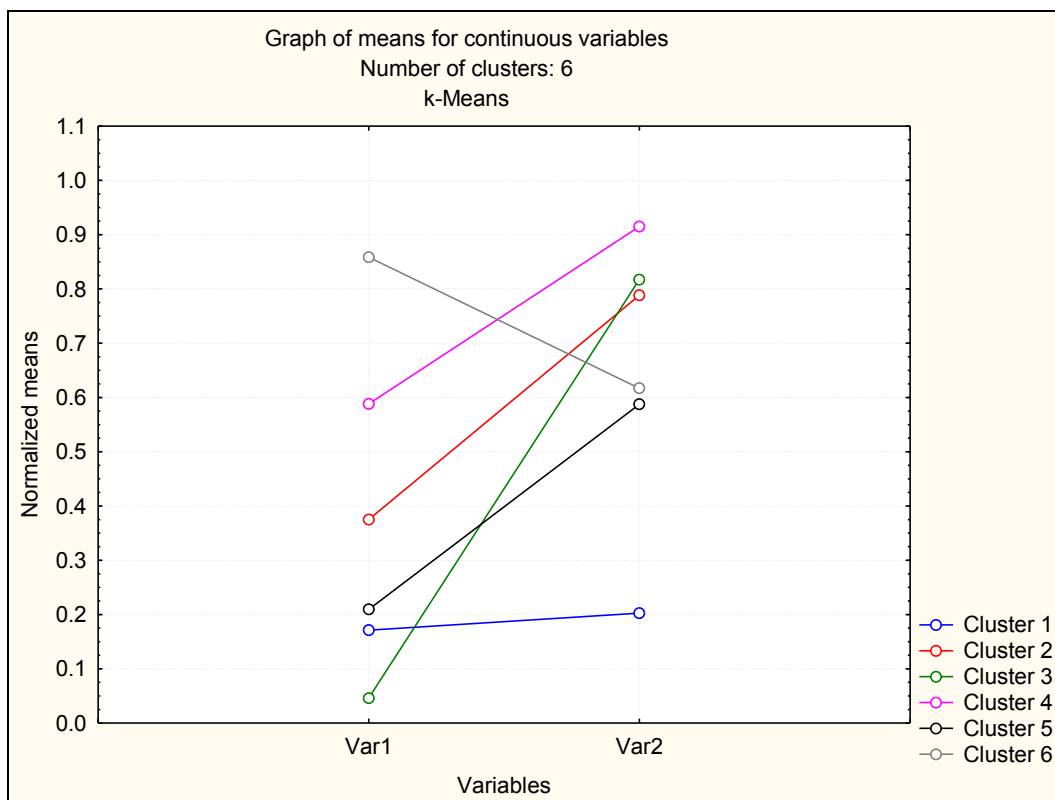


Grafico delle medie normalizzate delle variabili Progressiva metrica e GN, rilievo 15/11/2011 allineamento ± 6

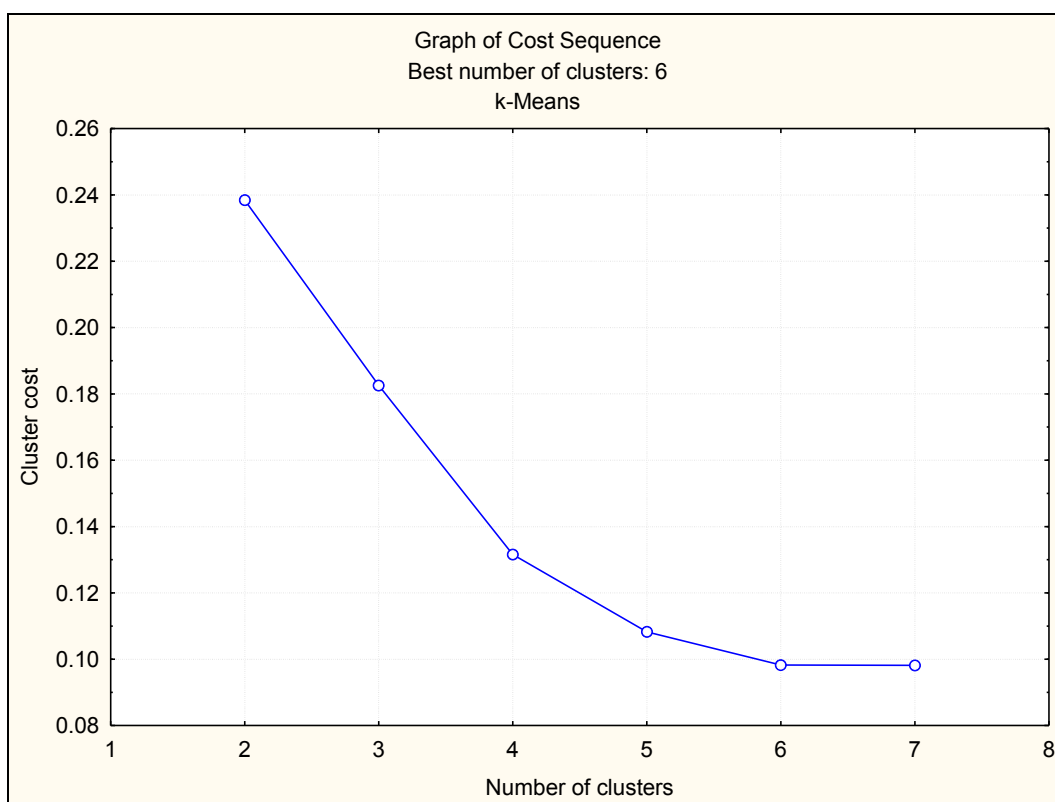


Grafico della funzione di costo, rilievo 15/11/2011 allineamento ± 6

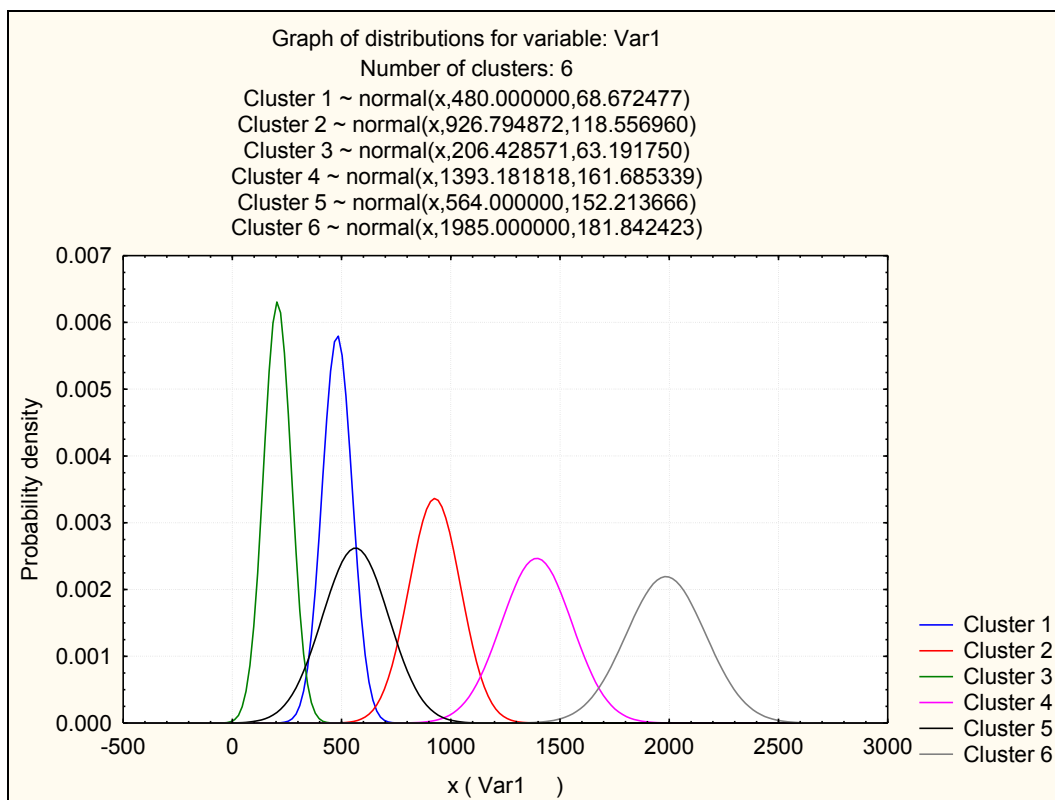


Grafico delle pdf della variabile Progressiva metrica, rilievo 15/11/2011 allineamento ±6

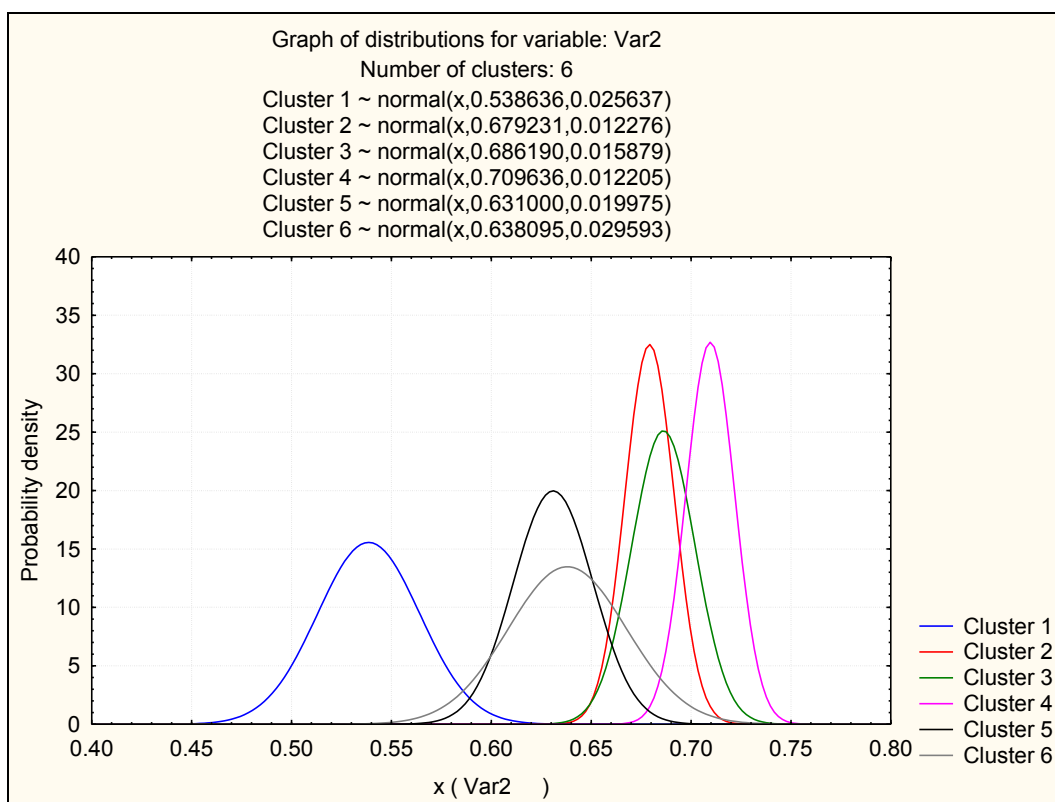


Grafico delle pdf della variabile GN, rilievo 15/11/2011 allineamento ±6

APPENDICE C

Spettro aeromobili: dati di targa, configurazioni, prestazioni

AA/MM Type	Max. seats (single class)	Crew	Operational empty weight	Max. take-off weight	Max. landing weight	Max zero-fuel weight	Max. payload weight	Max. fuel weight	Configuration landing gear	No. rear landing gear	Track (m)	Wheelbase (m)	Turning radius (m)	No. of wheels (nose/main)	Type of wheels	Main Wheel diameter (m)	Main Wheel width (m)	Fuel consumption	
Airbus 310 (A310)	280	7	79666 kg	150000 kg	123000 kg	113000 kg	32388 kg	49039 kg/ 61100 l	a triclido	2	9,60 m	15,21 m	31,40 m	2,8	twin	1,168 m	0,4064 m	3730 kg/h	
Airbus 318 (A318)	132	7	39000 kg	59000 kg	56000 kg	53000 kg	13965 kg	24210 l	a triclido	2	7,60 m	10,25 m		2,4	twin		0,4064 m	2799 l/h	
Airbus 319 (A319)	153	7	39200 kg	64000 kg	61000 kg	57000 kg	16653 kg	23860 l	a triclido	2	7,60 m	11,05 m	20,60 m	2,4	twin	1,143 m	0,4064 m	1980 kg/h	
Airbus 320 (A320)	179	7	41310 kg	73500 kg	64500 kg	61000 kg	18633 kg	19159 kg/ 23860 l	a triclido	2	7,59 m	12,65 m	21,9 m	2,4	twin	1,143 m	0,4064 m	2100 kg/h	
Airbus 321 (A321)	220	7	48000 kg	89000 kg	80000 kg	75500 kg	21200 kg	18960 kg/ 23700 l	a triclido	2	9,60 m	16,92 m	29,00 m	2,4	twin	1,270 m	0,4550 m	2100 kg/h	
Airbus 320-200 (A322)	179	4	41310 kg	73500 kg	64500 kg	60500 kg	19190 kg	23860 l	a triclido	2	7,60 m	12,63 m	21,90 m	2,4	twin	1,143 m	0,4064 m	2100 kg/h	
Airbus A330-100 (A331)	335	7	122200 kg	230000 kg	202000 kg	182000 kg	45900 kg	97170 l	a triclido	2	9,60 m	16,92 m	29,00 m	2,8	twin-tandem			0,455 m	4700 kg/h
Airbus A330-200 (A332)	380		120200 kg	230000 kg	180000 kg	168000 kg	47500 kg	139090 l	a triclido	2	9,60 m	16,90 m	29,00 m	2,8	twin-tandem			0,455 m	4700 kg/h
Airbus A330-300 (A333)	440		124500 kg	233000 kg	185000 kg	173000 kg	48500 kg	98250 l	a triclido	2	10,70 m	25,40 m	41,40 m	2,8	twin-tandem			0,455 m	4700 kg/h
Antonov AN 124 (Condor)	88	4 o 6	175000 kg	405000 kg	330000 kg	325000 kg	150000 kg	214000 kg	a triclido	10	8,00 m	22,90 m		4,20	twin			0,190 m	12500 kg/h
Antonov AN 72			21820 kg	34500 kg	33000 kg		7500 kg	13200 kg	a triclido	4	4,09 m	8,68 m		2,4	single			0,190 m	1700 kg/h
ATP	72	4	13595 kg	22930 kg	21900 kg	9707 kg	4082,33 kg	2654,42 kg	a triclido	2	4,10 m			2,4	twin			0,190 m	1230 kg/h
ATR 42-500			10980 kg	18500 kg	18300 kg	16700 kg	5620 kg	4500 kg	a triclido	2	4,10 m	8,78 m		2,4	twin			0,190 m	500 kg/h
ATR42 (Collibri)	50	5	11250 kg	18600 kg	18300 kg	16700 kg	5450 kg	4500 kg	a triclido	2	4,10 m	8,78 m		2,4	twin			0,190 m	600 kg/h
ATR72	74	4	12950 kg	22500 kg	22350 kg	20300 kg	7350 kg	5000 kg	a triclido	2	4,10 m	10,77 m		2,4	twin			0,190 m	600 kg/h
Avro AR J900	150	7	26270 kg	43616 kg	40563 kg	37516 kg	11246 kg	10386 kg	a triclido	2	4,68 m	16,80 m		2,4	twin			0,190 m	2310 kg/h
Avro RJ 100 - Bae 146-300	112	5	24993 kg	44225 kg	40143 kg	37421 kg	12429 kg	8982 kg/11728 l	a triclido	2	4,72 m	12,52 m	18,67 m	2,4	twin			0,190 m	1944 kg/h
Avro RJ 85 - Bae 146-200	112	5	24086 kg	42184 kg	38555 kg	35834 kg	11749 kg	7848 kg/ 11728 l	a triclido	2	4,72 m	11,20 m	18,03 m	2,4	twin			0,190 m	1744 kg/h
Avro RJ70	94	4	23360 kg	40823 kg	37875 kg	32432 kg	9072 kg	7213 kg/11728 l	a triclido	2	4,72 m	10,09 m	18,03 m	2,4	twin			0,190 m	1635 kg/h
Avro RJ85	112	4	24086 kg	42184 kg	38555 kg	35834 kg	11749 kg	7848 kg/ 11728 l	a triclido	2	4,72 m	11,20 m	18,03 m	2,4	twin			0,190 m	1744 kg/h
Beech 1900D	19	2	4831 kg	7688 kg	7530 kg	6804 kg	939 kg	2022 kg	a triclido	2	5,23 m	7,25 m		2,4	twin			0,190 m	500 l/h
Boeing B727-200 (B727)	189	3	46700 kg	95000 kg	85500 kg		19500 kg	30600 l	a triclido	2	5,23 m			2,4	twin			0,368 m	4309 kg/h
Boeing B737-200 (B732)	130	4	27646 kg	52390 kg	46720 kg	43091 kg	15445 kg	9118,4 kg/ 19532 l	a triclido	2	5,23 m	11,38 m		2,4	twin			0,368 m	2827 kg/h
Boeing B737-300 (B733)	149	2	31869 kg	56470 kg	51710 kg	47630 kg	16030 kg	8705 kg/ 20105 l	a triclido	2	5,25 m	12,40 m		2,4	twin	1,016 m	0,368 m	2250 kg/h	
Boeing B737-400 (B734)	170	2	33370 kg	62820 kg	54880 kg	51250 kg	17740 kg	13366 kg/ 20105 l	a triclido	2	5,25 m	14,30 m		2,4	twin	1,016 m	0,368 m	2377 kg/h	
Boeing B737-500 (B735)	130	2	30960 kg	52390 kg	49900 kg	46490 kg	15530 kg	5280 kg/ 20105 l	a triclido	2	5,25 m	11,0 m		2,4	twin	1,016 m	0,368 m	2100 kg/h	
Boeing B737-600 (B736)	132	2	36440 kg	65090 kg	54650 kg	51480 kg	9800 kg	7830,8 kg/ 26024 l	a triclido	2	5,7 m			2,4	twin	1,016 m	0,368 m	1932 kg/h	
Boeing B737-700 (B737)	149	2	37585 kg	69400 kg	58060 kg	54650 kg	11610 kg	10995,8 kg/ 26024 l	a triclido	2	5,7 m	12,4 m	19,5 m	2,4	twin	1,016 m	0,368 m	2070 kg/h	
Boeing B737-800 (B738)	189	5	41480 kg	78220 kg	65310 kg	61680 kg	14690 kg	15920,8 kg/ 26024 l	a triclido	2	5,7 m	15,60 m		2,4	twin	1,016 m	0,368 m	2186,84 kg/h	
Boeing B757-200 (B752)	200	7	59170 kg	99790 kg	89815 kg	83460 kg	25229 kg	34269 kg	a triclido	2	7,32 m	18,29 m		2,8	twin-tandem			0,368 m	5039 kg/h
Boeing B757-300 (B753)	295	7	64270 kg	122470 kg	101605 kg	95255 kg	7303 kg	34918 kg	a triclido	2	7,32 m	22,35 m		2,8	twin-tandem			0,368 m	5039 kg/h
Boeing B767-200 (B767)	290	7	84960 kg	156490 kg	126100 kg	114755 kg	9798 kg	51130 kg	a triclido	2	9,30 m	19,69 m		2,8	twin-tandem			0,368 m	5015 kg/h
Boeing B767-300 (B763)	269	7	90810 kg	185065 kg	147871 kg	140160 kg	12065 kg	51130 kg	a triclido	2	9,30 m	22,76 m		2,8	twin-tandem			0,368 m	5395 kg/h
Bombardier CL-600	19	3	12240 kg	21863 kg	17236 kg	14515 kg	2275 kg	9072 kg	a triclido	2	3,18 m	7,99 m		2,4	twin			0,310 m	1982 kg/h
Bombardier CRJ200	50	4	13730 kg	21523 kg	20275 kg	19141 kg	5411 kg	4254 kg	a triclido	2	3,17 m	11,41 m		2,4	twin			0,310 m	1230 l/h
Bombardier CRJ700	70	2	19731 kg	32999 kg	30390 kg	28259 kg	8528 kg	9017 kg	a triclido	2	4,70 m	13,67 m		2,4	twin			0,368 m	1680 l/h
Bombardier CRJ900	90	2	21546 kg	36514 kg	33339 kg	31751 kg	10206 kg	8822 kg	a triclido	2	4,70 m	14,73 m		2,4	twin			0,368 m	1700 l/h
Bombardier CRJ1000	104		23188 kg	40488 kg	36968 kg			470 m	a triclido	2	4,70 m			2,4	twin			0,368 m	1700 l/h
Cessna 208 (C500)	8	2	2233 kg	3447 kg	3538 kg	3311 kg	147 kg	1009 kg	a triclido	2	3,56 m	3,54 m		1,2	single			0,310 m	213 l/h
Dash 8 Q 400 (DH4H)	78	4	17186 kg	29256 kg	28009 kg	25855 kg	8670 kg	6616 l	a triclido	2	8,79 m	13,94 m		2,4	twin			0,368 m	907 kg/h
Dash 8 Q100	37	3	10433 kg	15649 kg	15377 kg	14515 kg	4082 kg	2,576 kg	a triclido	2	7,87 m	7,95 m		2,4	twin			0,368 m	816 kg/h
Dassault Falcon 20	30	2	9405 kg	16238 kg	14970 kg	13000 kg	3202 kg	5513 kg	a triclido	2	4,45 m	7,90 m		2,4	twin			0,310 m	1273 l/h
Dornier 328 (D328 o D38)	33	2	9420 kg	15200 kg	14390 kg	12610 kg	3650 kg	3646 kg	a triclido	2	3,22 m	7,42 m		2,4	twin			0,310 m	1046 l/h
Embraer E-120 (ERJ-120)	30	3	7560 kg	11990 kg	11700 kg	10900 kg	3340 kg	2660 kg	a triclido	2	6,58 m	6,97 m		2,4	twin			0,310 m	390 kg/h
Embraer E-140 (ERJ-140)	44		11700 kg	20600 kg	18700 kg	17100 kg	5400 kg	4173 kg	a triclido	2	4,10 m	14,45 m		2,4	twin	0,980 m	0,310 m	1022 kg/h	
Embraer E-145 (ERJ-145)	50		11700 kg	20600 kg	18700 kg	17100 kg	5400 kg	4173 kg	a triclido	2	4,10 m	14,45 m		2,4	twin	0,980 m	0,310 m	1022 kg/h	
Embraer E-170 (ERJ-170)	80	2	20700 kg	35990 kg	32800 kg		8900 kg	9470 kg	a triclido	2	4,10 m			2,4	twin			0,310 m	1381 kg/h
Embraer E-175 (E75)	88	3	21150 kg	35990 kg	33350 kg		10550 kg	9470 kg	a triclido	2	4,10 m			2,4	twin			0,310 m	1381 kg/h
Embraer E-190 (E90)	114	4	26200 kg	45990 kg	42500 kg		12400 kg	13000 kg	a triclido	2	4,70 m			2,4	twin			0,368 m	1381 kg/h
Embraer E-95 (E95)	122	5	27100 kg	46990 kg	44500 kg		12700 kg	13000 kg	a triclido	2	4,70 m			2,4	twin			0,368 m	2146 kg/h
Embraer jet ERJ-135	34	2	11200 kg	19000 kg	18500 kg	15600 kg	4400 kg	4173 kg	a triclido	2	4,10 m	12,43 m		2,4	twin			0,310 m	450 kg/h
F20 (Tigershark)	1		5115 kg	11975 kg	10775 kg		2290 kg	2290 kg	a triclido	2	2,30 m			2,2	single			0,190 m	400 kg/h
Fokker 100 (F 100)	119	4	24593 kg	43090 kg	38780 kg	35830 kg	11108 kg	7805 kg/13365 l	a triclido	2	5,04 m	14,01 m	20,07 m	2,4	twin	1,016 m	0,356 m	2565 kg/h	
Fokker F27	56	2o3	10398 kg	19730 kg	17760 kg		5080 kg		a triclido	2	5,04 m			2,4	twin			0,356 m	500 kg/h
Fokker 70 (F 70)	80	2	22673 kg	36740 kg	34020 kg	31975 kg	9302 kg	6355 kg	a triclido	2	5,04 m	11,54 m	17,78 m	2,4	twin	1,016 m	0,356 m	2391 kg/h	
GLEX	19	4	22566 kg	44452 kg	40000 kg		2041 kg	20400 kg	a triclido	2	3,22 m			2,4	twin			0,310 m	1560 kg/h
Gulfstream G-IV (GLF4)	19	2	19912 kg	33838 kg	29937 kg	22226 kg	2313 kg	13429 kg	a triclido	2	4,17 m	11,61 m		2,4	twin			0,310 m	2250 kg/h
Hercules (Lockheed Martin) C130J	92	3	34274 kg	79380 kg	70305 kg	53230 kg	18955 kg	int. 20819 kg/ ext. 8506 kg	a triclido	2	4,34 m			2,4	tandem			0,310 m	2458 kg/h
Jetstream 32 (J32)	19	2	4360 kg	6952 kg	6258 kg				a triclido	2	3,22 m			2,2	single			0,310 m	255 kg/h

APPENDICE D

**Stralcio dei dati di traffico
con le stime dei pesi effettivi
periodo 24/10/2012-21/12/2012**

APPENDICE E

Stralcio delle serie storiche dei carichi cumulati periodo 24/10/2012-21/12/2012

Data rilievo	LW [kg]	TOW [kg]	Peso totale kg	CLW [MM]	CTOW [MM]
24/10/2012	58343	61663	120006	2.849171	2.987399
	47753	59073	106826	2.849219	2.987458
	50022	62058	112080	2.849269	2.987520
	45648	50083	95731	2.849314	2.987570
	54893	52937	107830	2.849369	2.987623
	51773	57180	108953	2.849421	2.987680
	52245	55607	107852	2.849473	2.987736
	64419	66303	130722	2.849538	2.987802
	55177	52617	107794	2.849593	2.987855
	44813	46109	90922	2.849638	2.987901
	56878	55478	112356	2.849695	2.987956
	49842	49708	99550	2.849744	2.988006
	46420	50447	96868	2.849791	2.988057
	48234	48607	96842	2.849839	2.988105
	50013	51015	101028	2.849889	2.988156
	48687	51452	100139	2.849938	2.988208
	53733	55562	109295	2.849992	2.988263
	49951	55279	105230	2.850042	2.988319
	53260	52148	105408	2.850095	2.988371
	59383	61663	121046	2.850154	2.988432
	59572	61024	120596	2.850214	2.988493
	59005	61049	120054	2.850273	2.988554
	58532	61379	119911	2.850331	2.988616
	45175	48476	93651	2.850376	2.988664
	52529	52370	104899	2.850429	2.988717
	50922	56329	107251	2.850480	2.988773
	49504	54377	103881	2.850529	2.988827
	63474	64317	127791	2.850593	2.988892
	54042	52806	106848	2.850647	2.988944
	52340	57936	110276	2.850699	2.989002
	50409	52072	102481	2.850750	2.989054
	48500	51393	99893	2.850798	2.989106
	50220	47095	97314	2.850848	2.989153
	51260	52167	103426	2.850900	2.989205
	37249	40005	77254	2.850937	2.989245
	45661	48994	94655	2.850983	2.989294
	27840	31149	58989	2.851010	2.989325
	54206	53388	107593	2.851065	2.989379
	51180	54522	105702	2.851116	2.989433
	52504	49690	102194	2.851168	2.989483
	59288	60812	120100	2.851228	2.989544
	59005	60434	119438	2.851287	2.989604
	44728	58859	103586	2.851331	2.989663
	45106	59370	104476	2.851376	2.989722
	41974	53234	95208	2.851418	2.989776
	39138	57744	96882	2.851458	2.989833
	43120	62248	105368	2.851501	2.989896
	45364	50461	95825	2.851546	2.989946
	54042	53221	107263	2.851600	2.989999
	49882	54344	104226	2.851650	2.990054
	50260	54945	105205	2.851700	2.990109
	63001	64317	127319	2.851763	2.990173
	54326	53184	107510	2.851817	2.990226
	42717	50948	93665	2.851860	2.990277
	50409	53301	103710	2.851911	2.990330
	49446	50069	99515	2.851960	2.990380
	50503	49269	99773	2.852011	2.990430

Data rilievo	LW [kg]	TOW [kg]	Peso totale kg	CLW [MM]	CTOW [MM]
50581	50826	101406	2.852061	2.990480	
37249	40005	77254	2.852098	2.990520	
93036	98238	191274	2.852191	2.990619	
53638	55373	109012	2.852245	2.990674	
52977	56130	109106	2.852298	2.990730	
53544	54134	107678	2.852352	2.990784	
58910	61474	120384	2.852411	2.990846	
59005	61024	120029	2.852470	2.990907	
58532	60860	119392	2.852528	2.990968	
59761	62230	121991	2.852588	2.991030	
46688	50840	97527	2.852634	2.991081	
54893	56436	111328	2.852689	2.991137	
53191	57086	110277	2.852743	2.991194	
52435	56174	108608	2.852795	2.991250	
63285	66019	129304	2.852858	2.991316	
52907	53090	105997	2.852911	2.991370	
54609	57558	112167	2.852966	2.991427	
49463	49236	98699	2.853015	2.991476	
52962	50843	103805	2.853068	2.991527	
52867	49080	101947	2.853121	2.991576	
49730	51298	101028	2.853171	2.991628	
51733	51127	102859	2.853223	2.991679	
37249	40005	77254	2.853260	2.991719	
50862	49561	100423	2.853311	2.991768	
54489	55184	109673	2.853365	2.991823	
54773	53567	108340	2.853420	2.991877	
52693	54995	107688	2.853473	2.991932	
58532	61474	120006	2.853531	2.991993	
59477	62041	121519	2.853591	2.992056	
50873	63003	113876	2.853642	2.992119	
57162	60017	117179	2.853699	2.992179	
58391	55206	113598	2.853757	2.992234	
55271	57464	112735	2.853812	2.992291	
53191	57403	110594	2.853866	2.992349	
67350	68667	136017	2.853933	2.992417	
48311	49797	98108	2.853981	2.992467	
57257	56116	113372	2.854038	2.992523	
57351	58882	116233	2.854096	2.992582	
52867	54530	107397	2.854149	2.992637	
53056	49236	102292	2.854202	2.992686	
50581	50164	100744	2.854252	2.992736	
57824	58410	116233	2.854310	2.992794	
52962	50181	103143	2.854363	2.992845	
37249	40005	77254	2.854400	2.992885	
45189	50034	95223	2.854446	2.992935	
28219	32000	60218	2.854474	2.992967	
54489	56130	110619	2.854528	2.993023	
54773	57075	111848	2.854583	2.993080	
54773	55930	110703	2.854638	2.993136	
59572	62419	121991	2.854697	2.993198	
59667	61591	121258	2.854757	2.993260	
59950	61522	121472	2.854817	2.993321	
60423	62230	122653	2.854877	2.993384	
54515	57440	111955	2.854932	2.993441	
45200	57872	103072	2.854977	2.993499	
40685	54262	94947	2.855018	2.993553	
41820	53574	95394	2.855060	2.993607	

Data rilievo	LW [kg]	TOW [kg]	Peso totale kg	CLW [MM]	CTOW [MM]
49856	54438	104295	2.855109	2.993661	
49619	51218	100837	2.855159	2.993712	
59526	58799	118325	2.855219	2.993771	
55933	57464	113397	2.855275	2.993829	
58450	60227	118678	2.855333	2.993889	
67918	67248	135166	2.855401	2.993956	
58923	58244	117167	2.855460	2.994014	
57824	55762	113586	2.855518	2.994070	
52016	47534	99550	2.855570	2.994118	
51733	43373	95106	2.855621	2.994161	
52583	50498	103082	2.855674	2.994211	
50692	49236	99928	2.855725	2.994261	
37249	40005	77254	2.855762	2.994301	
33608	33134	66742	2.855796	2.994334	
55057	56981	112037	2.855851	2.994391	
54206	55373	109579	2.855905	2.994446	
55246	54418	109663	2.855960	2.994501	
60517	63081	123599	2.856021	2.994564	
43143	56910	100053	2.856064	2.994621	
43782	58978	102760	2.856107	2.994680	
47375	62480	109855	2.856155	2.994742	
17866	25463	43330	2.856173	2.994768	
55695	58459	114155	2.856228	2.994826	
46430	62641	109070	2.856275	2.994889	
42885	60286	103171	2.856318	2.994949	
49455	56065	105520	2.856367	2.995005	
45673	59748	105422	2.856413	2.995065	
29459	40011	69470	2.856442	2.995105	
47707	59774	107481	2.856490	2.995165	
28609	39345	67953	2.856519	2.995204	
55082	53788	108870	2.856574	2.995258	
55425	58242	113666	2.856629	2.995316	
50896	52439	103335	2.856680	2.995368	
65932	60346	126278	2.856746	2.995429	
54515	57464	111979	2.856800	2.995486	
57032	57488	114520	2.856858	2.995544	
45587	46977	92564	2.856903	2.995591	
47177	45720	92897	2.856950	2.995636	
56311	51885	108196	2.857007	2.995688	
50707	48279	98986	2.857057	2.995737	
55838	56991	112829	2.857113	2.995793	
46891	44739	91630	2.857160	2.995838	
53827	55184	109012	2.857214	2.995893	
52693	53472	106165	2.857267	2.995947	
53544	55279	108822	2.857320	2.996002	
59856	61780	121636	2.857380	2.996064	
59856	61379	121235	2.857440	2.996125	
58626	57740	116366	2.857498	2.996183	
53286	53788	107074	2.857552	2.996237	
51359	57958	109317	2.857603	2.996295	
62623	62710	125333	2.857666	2.996358	
52494	56732	109225	2.857718	2.996414	
56086	62513	118599	2.857774	2.996477	
45097	51960	97057	2.857819	2.996529	
66216	63845	130060	2.857886	2.996593	
47650	49313	96962	2.857933	2.996642	
54101	55516	109617	2.857987	2.996697	

Data rilievo	LW [kg]	TOW [kg]	Peso totale kg	CLW [MM]	CTOW [MM]
44527	47954	92481	2.858032	2.996745	
48911	53860	102771	2.858081	2.996799	
47682	52148	99830	2.858128	2.996851	
50045	49984	100029	2.858179	2.996901	
55885	61995	117879	2.858234	2.996963	
55034	61285	116318	2.858289	2.997025	
58532	60835	119367	2.858348	2.997085	
37249	40005	77254	2.858385	2.997125	
53286	55679	108965	2.858439	2.997181	
56194	60063	116256	2.858495	2.997241	
45114	52106	97220	2.858540	2.997293	
51643	59660	111303	2.858591	2.997353	
66027	65925	131951	2.858657	2.997419	
52683	57110	109792	2.858710	2.997476	
50202	50920	101122	2.858760	2.997527	
54195	62891	117086	2.858815	2.997590	
62812	68289	131101	2.858877	2.997658	
48784	49313	98097	2.858926	2.997707	
50235	50453	100688	2.858976	2.997758	
62812	60157	122969	2.859039	2.997818	
53922	55279	109201	2.859093	2.997873	
49478	54134	103612	2.859143	2.997927	
54206	55184	109390	2.859197	2.997983	
57019	59772	116791	2.859254	2.998042	
58343	60528	118871	2.859312	2.998103	
59288	61852	121140	2.859371	2.998165	
37249	40005	77254	2.859409	2.998205	
55271	56152	111423	2.859464	2.998261	
46060	51066	97125	2.859510	2.998312	
52210	58336	110546	2.859562	2.998370	
57706	65074	122780	2.859620	2.998435	
56181	57961	114142	2.859676	2.998493	
46154	52178	98332	2.859722	2.998546	
56086	63931	120017	2.859778	2.998609	
49068	52055	101122	2.859827	2.998662	
66310	68856	135166	2.859894	2.998730	
48690	47894	96584	2.859942	2.998778	
59490	59298	118788	2.860002	2.998838	
65176	58834	124009	2.860067	2.998896	
47931	48427	96357	2.860115	2.998945	
54678	54806	109484	2.860170	2.999000	
51842	56214	108056	2.860222	2.999056	
54584	54900	109484	2.860276	2.999111	
57303	61144	118447	2.860333	2.999172	
59477	61568	121046	2.860393	2.999233	
59383	61497	120880	2.860452	2.999295	
58910	62514	121424	2.860511	2.999357	
37249	40005	77254	2.860548	2.999397	
55555	54450	110005	2.860604	2.999452	
55803	59565	115368	2.860660	2.999512	
59125	65074	124198	2.860719	2.999577	
49936	50877	100813	2.860769	2.999627	
56086	59001	115087	2.860825	2.999686	
55803	60716	116519	2.860881	2.999747	
47555	50069	97624	2.860928	2.999797	
62907	58644	121551	2.860991	2.999856	
57127	58447	115573	2.861048	2.999914	

Data rilievo	LW [kg]	TOW [kg]	Peso totale kg	CLW [ME]	CTOW [ME]
63474	61481	124955	2.861112	2.999976	
54489	55657	110146	2.861166	3.000031	
52882	55268	108150	2.861219	3.000087	
59383	61285	120668	2.861279	3.000148	
37249	40005	77254	2.861316	3.000188	
55366	54734	110099	2.861371	3.000243	
53912	59282	113194	2.861425	3.000302	
57612	65168	122780	2.861483	3.000367	
49478	50359	99837	2.861532	3.000418	
52966	58244	111211	2.861585	3.000476	
46438	48774	95212	2.861632	3.000525	
56559	59298	115857	2.861688	3.000584	
45475	44585	90060	2.861734	3.000628	
59692	62143	121835	2.861793	3.000691	
50518	49413	99931	2.861844	3.000740	
45948	48273	94220	2.861890	3.000788	
59219	60725	119944	2.861949	3.000849	
46985	46725	93710	2.861996	3.000896	
54489	56035	110524	2.862050	3.000952	
52220	55552	107772	2.862103	3.001007	
53827	53388	107215	2.862157	3.001061	
58910	61308	120218	2.862215	3.001122	
58721	61379	120100	2.862274	3.001183	
57681	57267	114948	2.862332	3.001241	
51962	54450	106412	2.862384	3.001295	
61299	61386	122686	2.862445	3.001357	
52588	55878	108466	2.862498	3.001412	
55236	60527	115763	2.862553	3.001473	
43223	47167	90390	2.862596	3.001520	
45209	47061	92269	2.862641	3.001567	
52588	58528	111116	2.862694	3.001626	
60448	61386	121835	2.862754	3.001687	
44908	45247	90155	2.862799	3.001732	
54195	54854	109050	2.862854	3.001787	
61583	55430	117013	2.862915	3.001843	
44905	48048	92953	2.862960	3.001891	
53071	56130	109201	2.863013	3.001947	
48344	52148	100492	2.863061	3.001999	
52977	54428	107404	2.863114	3.002053	
55034	60671	115705	2.863169	3.002114	
57870	61591	119461	2.863227	3.002176	
58437	61001	119438	2.863286	3.002237	
58721	59772	118493	2.863344	3.002296	
52813	55112	107925	2.863397	3.002351	
54195	58242	112437	2.863451	3.002410	
60543	57604	118147	2.863512	3.002467	
53817	59298	113115	2.863566	3.002527	
53817	58339	112156	2.863620	3.002585	
43395	50069	93464	2.863663	3.002635	
63947	66776	130722	2.863727	3.002702	
53817	57974	111791	2.863781	3.002760	
65270	59684	124955	2.863846	3.002819	
45567	46063	91630	2.863892	3.002866	
52409	54428	106837	2.863944	3.002920	
50329	53377	103707	2.863994	3.002973	
51464	54239	105702	2.864046	3.003028	
57208	61001	118209	2.864103	3.003089	

Data rilievo	LW [kg]	TOW [kg]	Peso totale kg	CLW [MM]	CTOW [MM]
57870	61757	119628	2.864161	3.003150	
37249	40005	77254	2.864198	3.003190	
31823	28254	60078	2.864230	3.003219	
56217	53221	109437	2.864286	3.003272	
42278	51444	93721	2.864328	3.003323	
53345	59944	113288	2.864382	3.003383	
56194	61197	117391	2.864438	3.003444	
55330	59095	114425	2.864493	3.003504	
54101	62229	116330	2.864547	3.003566	
46988	43734	90722	2.864594	3.003609	
61961	59779	121740	2.864656	3.003669	
54857	59203	114061	2.864711	3.003728	
45759	48178	93937	2.864757	3.003777	
60921	61197	122118	2.864818	3.003838	
47458	46441	93899	2.864865	3.003884	
51842	55751	107593	2.864917	3.003940	
52598	52243	104841	2.864970	3.003992	
51086	56319	107404	2.865021	3.004049	
56925	60955	117879	2.865078	3.004110	
57397	61285	118682	2.865135	3.004171	
58910	61497	120407	2.865194	3.004232	
56925	61568	118493	2.865251	3.004294	
54326	55679	110005	2.865305	3.004350	
45303	53051	98354	2.865351	3.004403	
53723	59282	113005	2.865404	3.004462	
67634	62616	130250	2.865472	3.004525	
53628	57772	111400	2.865526	3.004582	
48612	51444	100056	2.865574	3.004634	
46042	45909	91951	2.865620	3.004680	
61299	62805	124104	2.865682	3.004742	
55897	56083	111981	2.865738	3.004799	
47289	48195	95484	2.865785	3.004847	
61299	61954	123253	2.865846	3.004909	
47363	48899	96263	2.865893	3.004958	
53638	55373	109012	2.865947	3.005013	
51653	53472	105125	2.865999	3.005066	
52126	55468	107593	2.866051	3.005122	
57965	61096	119060	2.866109	3.005183	
57965	62041	120006	2.866167	3.005245	
53286	55301	108586	2.866220	3.005300	
43034	49648	92681	2.866263	3.005350	
52588	58715	111303	2.866316	3.005409	
55343	61103	116445	2.866371	3.005470	
54385	57961	112345	2.866425	3.005528	
45492	49341	94833	2.866471	3.005577	
52115	62513	114628	2.866523	3.005640	
43773	50636	94409	2.866567	3.005690	
64608	66492	131101	2.866631	3.005757	
46609	49407	96017	2.866678	3.005806	
54101	57501	111602	2.866732	3.005864	
61299	58172	119471	2.866793	3.005922	
45283	48427	93710	2.866839	3.005970	
52882	54995	107877	2.866892	3.006025	
51275	54607	105881	2.866943	3.006080	
52409	55184	107593	2.866995	3.006135	
56357	60387	116745	2.867052	3.006195	
57681	60812	118493	2.867109	3.006256	

Data rilievo	LW [kg]	TOW [kg]	Peso totale kg	CLW [ME]	CTOW [ME]
59477	60740	120218	2.867169	3.006317	
57114	61947	119060	2.867226	3.006379	
37550	40306	77856	2.867263	3.006419	
52718	55868	108586	2.867316	3.006475	
52494	57391	109884	2.867369	3.006532	
59125	59306	118431	2.867428	3.006592	
45114	49837	94951	2.867473	3.006642	
54101	57961	112062	2.867527	3.006700	
46721	48418	95140	2.867574	3.006748	
47555	47516	95071	2.867621	3.006796	
63758	61954	125711	2.867685	3.006857	
52872	56745	109617	2.867738	3.006914	
61867	62994	124860	2.867800	3.006977	
53638	55184	108822	2.867853	3.007032	
53544	53756	107299	2.867907	3.007086	
53638	55090	108728	2.867961	3.007141	
58626	60812	119438	2.868019	3.007202	
37249	40005	77254	2.868057	3.007242	
54798	56436	111234	2.868111	3.007298	
52304	59660	111964	2.868164	3.007358	
54019	62521	116540	2.868218	3.007421	
46547	51493	98040	2.868264	3.007472	
55141	59474	114615	2.868319	3.007532	
50314	51728	102042	2.868370	3.007583	
45492	48301	93793	2.868415	3.007632	
47555	48935	96489	2.868463	3.007681	
62717	65830	128548	2.868525	3.007746	
49951	50926	100877	2.868575	3.007797	
56181	58420	114601	2.868632	3.007856	
62907	62616	125522	2.868694	3.007918	
47080	49467	96546	2.868742	3.007968	
53071	55940	109012	2.868795	3.008024	
53260	54418	107678	2.868848	3.008078	
52598	56602	109201	2.868900	3.008135	
59288	61497	120785	2.868960	3.008196	
59194	62041	121235	2.869019	3.008258	
59099	58496	117596	2.869078	3.008317	
53380	54545	107925	2.869131	3.008371	
44830	52106	96936	2.869176	3.008424	
53534	57391	110924	2.869230	3.008481	
63096	62710	125806	2.869293	3.008544	
54101	56826	110927	2.869347	3.008600	
47572	48207	95779	2.869395	3.008649	
55897	60054	115952	2.869450	3.008709	
49446	47705	97151	2.869500	3.008756	
63852	62332	126184	2.869564	3.008819	
45664	47705	93369	2.869609	3.008866	
57316	55705	113021	2.869667	3.008922	
62528	64317	126846	2.869729	3.008986	
48687	49277	97965	2.869778	3.009036	
52977	55279	108255	2.869831	3.009091	
51653	52621	104274	2.869883	3.009144	
53355	54806	108161	2.869936	3.009198	
58626	58591	117217	2.869995	3.009257	
58532	61190	119722	2.870053	3.009318	
59572	60457	120029	2.870113	3.009379	
57776	59961	117737	2.870170	3.009439	

Data rilievo	LW [kg]	TOW [kg]	Peso totale kg	CLW [ME]	CTOW [ME]
54704	55112	109816	2.870225	3.009494	
43318	50309	93627	2.870268	3.009544	
54290	56634	110924	2.870323	3.009601	
65176	61103	126278	2.870388	3.009662	
55708	57110	112818	2.870444	3.009719	
52588	59487	112075	2.870496	3.009778	
47271	48462	95733	2.870543	3.009827	
61677	64790	126468	2.870605	3.009892	
54857	55138	109995	2.870660	3.009947	
47839	50542	98380	2.870708	3.009997	
61677	64317	125995	2.870770	3.010062	
53260	53766	107026	2.870823	3.010115	
50613	53094	103707	2.870873	3.010169	
53260	49606	102866	2.870927	3.010218	
59667	60623	120289	2.870986	3.010279	
58910	59205	118115	2.871045	3.010338	
37249	40005	77254	2.871082	3.010378	
54420	53315	107736	2.871137	3.010431	
53345	56540	109884	2.871190	3.010488	
44452	50026	94478	2.871235	3.010538	
63852	65263	129115	2.871299	3.010603	
54952	59095	114047	2.871354	3.010662	
54574	59487	114061	2.871408	3.010722	
49635	48273	97908	2.871458	3.010770	
64608	66776	131384	2.871522	3.010837	
56748	54760	111508	2.871579	3.010891	
48595	47516	96111	2.871628	3.010939	
64798	61765	126562	2.871692	3.011001	
48687	46914	95601	2.871741	3.011048	
53922	52348	106270	2.871795	3.011100	
51842	53094	104936	2.871847	3.011153	
54489	49700	104189	2.871901	3.011203	
58248	58969	117217	2.871960	3.011262	
58626	60434	119060	2.872018	3.011322	
58626	58944	117570	2.872077	3.011381	
59761	56746	116507	2.872137	3.011438	
37249	40005	77254	2.872174	3.011478	
56689	53221	109910	2.872231	3.011531	
45870	50688	96558	2.872276	3.011582	
54006	56918	110924	2.872330	3.011639	
62245	64317	126562	2.872393	3.011703	
55046	57299	112345	2.872448	3.011760	
55708	61473	117181	2.872503	3.011822	
48784	48840	97624	2.872552	3.011871	
66689	66019	132708	2.872619	3.011937	
46799	47516	94315	2.872666	3.011984	
56748	54760	111508	2.872723	3.012039	
57694	56907	114601	2.872780	3.012096	
53071	55184	108255	2.872833	3.012151	
51369	55458	106827	2.872885	3.012207	
54395	51024	105419	2.872939	3.012258	
59288	58543	117831	2.872998	3.012316	
59761	57219	116980	2.873058	3.012373	
37249	40005	77254	2.873095	3.012413	
54798	55963	110761	2.873150	3.012469	
47005	47284	94289	2.873197	3.012517	
56181	53798	109979	2.873253	3.012570	

Data rilievo	LW [kg]	TOW [kg]	Peso totale kg	CLW [ME]	CTOW [ME]
60354	63183	123537	2.873314	3.012634	
57127	57204	114331	2.873371	3.012691	
47856	48585	96441	2.873419	3.012739	
58167	60716	118883	2.873477	3.012800	
50108	49502	99610	2.873527	3.012850	
63474	62048	125522	2.873590	3.012912	
58261	58352	116614	2.873649	3.012970	
48687	47197	95884	2.873697	3.013017	
53733	54144	107877	2.873751	3.013071	
51558	53661	105219	2.873803	3.013125	
59194	54809	114003	2.873862	3.013180	
58910	57503	116413	2.873921	3.013237	
59667	57715	117381	2.873980	3.013295	
37249	40005	77254	2.874018	3.013335	
37249	40005	77254	2.874055	3.013375	
52753	43823	96576	2.874108	3.013419	
31528	32556	64084	2.874139	3.013451	
59431	56436	115867	2.874199	3.013508	
49257	46382	95639	2.874248	3.013554	
61488	58550	120038	2.874309	3.013613	
58356	57485	115841	2.874368	3.013670	
67256	59306	126562	2.874435	3.013730	
49369	48797	98165	2.874484	3.013778	
57505	56448	113953	2.874542	3.013835	
58923	57407	116330	2.874601	3.013892	
50297	44869	95166	2.874651	3.013937	
64892	55619	120511	2.874716	3.013993	
49903	42330	92233	2.874766	3.014035	
64514	64034	128548	2.874830	3.014099	
55151	56697	111848	2.874886	3.014156	
53355	52243	105598	2.874939	3.014208	
54111	55940	110052	2.874993	3.014264	
59572	62136	121708	2.875053	3.014326	
37249	37584	74833	2.875090	3.014364	
58202	56341	114543	2.875148	3.014420	
57977	57296	115274	2.875206	3.014477	
62812	61765	124577	2.875269	3.014539	
50991	50642	101633	2.875320	3.014590	
48423	50098	98521	2.875368	3.014640	
57316	59095	116411	2.875426	3.014699	
56937	60527	117464	2.875482	3.014759	
47744	45153	92897	2.875530	3.014805	
50802	49791	100593	2.875581	3.014854	
62623	54768	117391	2.875644	3.014909	
46532	49708	96241	2.875690	3.014959	
60732	62710	123442	2.875751	3.015022	
49538	46914	96452	2.875800	3.015068	
54678	56319	110997	2.875855	3.015125	
52598	51865	104463	2.875908	3.015177	
54300	54333	108633	2.875962	3.015231	
59950	58471	118421	2.876022	3.015289	
59288	59772	119060	2.876081	3.015349	
59667	54336	114003	2.876141	3.015404	
57918	54355	112274	2.876199	3.015458	
51354	49837	101191	2.876250	3.015508	
58261	55973	114234	2.876308	3.015564	
68107	61765	129871	2.876377	3.015625	

Data rilievo	LW [kg]	TOW [kg]	Peso totale kg	CLW [MM]	CTOW [MM]
	56843	57299	114142	2.876433	3.015683
	47667	48396	96063	2.876481	3.015731
	57599	60338	117937	2.876539	3.015791
	49541	44963	94504	2.876588	3.015836
	63852	60441	124293	2.876652	3.015897
	49824	46949	96773	2.876702	3.015944
	59396	54760	114155	2.876761	3.015999
	64608	57983	122591	2.876826	3.016057
	50767	48237	99005	2.876877	3.016105
	54489	54617	109106	2.876931	3.016159
	53166	50352	103517	2.876984	3.016210
	54017	52537	106553	2.877038	3.016262
	60045	56038	116083	2.877098	3.016318
	60045	61190	121235	2.877158	3.016380
	59950	57148	117098	2.877218	3.016437
	59288	56368	115656	2.877278	3.016493
	33949	27354	61303	2.877312	3.016520
	59761	45495	105256	2.877371	3.016566
	58816	43768	102583	2.877430	3.016610
	59809	55490	115300	2.877490	3.016665
	49180	48891	98071	2.877539	3.016714
	58639	55216	113855	2.877598	3.016769
	67729	60914	128642	2.877666	3.016830
	57977	57299	115276	2.877724	3.016887
	57599	59014	116614	2.877781	3.016947
	50581	46571	97151	2.877832	3.016993
	66594	59023	125617	2.877898	3.017052
	50391	46476	96868	2.877949	3.017099
	59963	56461	116424	2.878009	3.017155
	66310	60819	127129	2.878075	3.017216
	50200	46157	96357	2.878125	3.017262
	53733	54239	107971	2.878179	3.017316
	54111	47232	101343	2.878233	3.017363
	53827	52064	105891	2.878287	3.017416
	33608	30582	64190	2.878320	3.017446
	60612	58921	119533	2.878381	3.017505
	59950	57219	117169	2.878441	3.017562
	60423	53838	114261	2.878501	3.017616
21/12/2012	37249	40005	77254	2.878539	3.017656

APPENDICE F

Matrici di Training e di Checking e/o Testing ANFIS duale del modello empirico - meccanicistico

Matrice di Training

0.91	0.00000	0.91
0.91	0.20000	0.90
0.91	0.40000	0.90
0.91	0.60000	0.90
0.91	0.80000	0.89
0.91	1.00000	0.88
0.91	1.20000	0.88
0.91	1.40000	0.87
0.91	1.60000	0.86
0.91	1.80000	0.85
0.91	2.00000	0.84
0.91	2.20000	0.83
0.91	2.40000	0.82
0.91	2.60000	0.80
0.91	2.80000	0.79
0.91	3.00000	0.78
0.91	3.20000	0.76
0.91	3.40000	0.75
0.91	3.60000	0.73
0.91	3.80000	0.71
0.91	4.00000	0.69
0.91	4.20000	0.68
0.91	4.40000	0.66
0.91	4.60000	0.64
0.91	4.80000	0.61
0.91	5.00000	0.59
0.91	5.20000	0.57
0.91	5.40000	0.55
0.91	5.60000	0.52
0.91	5.80000	0.50
0.91	6.00000	0.47
0.91	6.20000	0.44
0.91	6.40000	0.42
0.91	6.60000	0.39
0.91	6.80000	0.36
0.91	7.00000	0.33
0.91	7.20000	0.30
0.91	7.40000	0.27
0.91	7.60000	0.23
0.91	7.80000	0.20
0.91	8.00000	0.17
0.91	8.20000	0.13

0.91	8.40000	0.10
0.91	8.60000	0.06
0.91	8.80000	0.02
0.88	3.00000	0.88
0.88	3.25000	0.88
0.88	3.50000	0.87
0.88	3.75000	0.87
0.88	4.00000	0.86
0.88	4.25000	0.86
0.88	4.50000	0.85
0.88	4.75000	0.84
0.88	5.00000	0.83
0.88	5.25000	0.82
0.88	5.50000	0.81
0.88	5.75000	0.79
0.88	6.00000	0.78
0.88	6.25000	0.77
0.88	6.50000	0.75
0.88	6.75000	0.73
0.88	7.00000	0.72
0.88	7.25000	0.70
0.88	7.50000	0.68
0.88	7.75000	0.66
0.88	8.00000	0.64
0.88	8.25000	0.62
0.88	8.50000	0.59
0.88	8.75000	0.57
0.88	9.00000	0.55
0.88	9.25000	0.52
0.88	9.50000	0.49
0.88	9.75000	0.47
0.88	10.00000	0.44
0.88	10.25000	0.41
0.88	10.50000	0.38
0.88	10.75000	0.35
0.88	11.00000	0.31
0.88	11.25000	0.28
0.88	11.50000	0.25
0.88	11.75000	0.21
0.88	12.00000	0.18
0.88	12.25000	0.14
0.88	12.50000	0.10
0.88	12.75000	0.06
0.88	13.00000	0.02

0.86	6.00000	0.86
0.86	6.25000	0.85
0.86	6.50000	0.85
0.86	6.75000	0.84
0.86	7.00000	0.84
0.86	7.25000	0.83
0.86	7.50000	0.83
0.86	7.75000	0.82
0.86	8.00000	0.81
0.86	8.25000	0.80
0.86	8.50000	0.79
0.86	8.75000	0.78
0.86	9.00000	0.77
0.86	9.25000	0.76
0.86	9.50000	0.75
0.86	9.75000	0.74
0.86	10.00000	0.72
0.86	10.25000	0.71
0.86	10.50000	0.70
0.86	10.75000	0.68
0.86	11.00000	0.66
0.86	11.25000	0.65
0.86	11.50000	0.63
0.86	11.75000	0.61
0.86	12.00000	0.59
0.86	12.25000	0.57
0.86	12.50000	0.55
0.86	12.75000	0.53
0.86	13.00000	0.51
0.86	13.25000	0.49
0.86	13.50000	0.47
0.86	13.75000	0.44
0.86	14.00000	0.42
0.86	14.25000	0.39
0.86	14.50000	0.37
0.86	14.75000	0.34
0.86	15.00000	0.31
0.86	15.25000	0.29
0.86	15.50000	0.26
0.86	15.75000	0.23
0.86	16.00000	0.20
0.86	16.25000	0.17
0.86	16.50000	0.14
0.86	16.75000	0.11

0.86	17.00000	0.07
0.86	17.25000	0.04
0.86	17.50000	0.01
0.83	9.00000	0.83
0.83	9.25000	0.83
0.83	9.50000	0.82
0.83	9.75000	0.82
0.83	10.00000	0.81
0.83	10.25000	0.81
0.83	10.50000	0.80
0.83	10.75000	0.80
0.83	11.00000	0.79
0.83	11.25000	0.78
0.83	11.50000	0.77
0.83	11.75000	0.77
0.83	12.00000	0.76
0.83	12.25000	0.75
0.83	12.50000	0.74
0.83	12.75000	0.73
0.83	13.00000	0.72
0.83	13.25000	0.71
0.83	13.50000	0.69
0.83	13.75000	0.68
0.83	14.00000	0.67
0.83	14.25000	0.66
0.83	14.50000	0.64
0.83	14.75000	0.63
0.83	15.00000	0.62
0.83	15.25000	0.60
0.83	15.50000	0.58
0.83	15.75000	0.57
0.83	16.00000	0.55
0.83	16.25000	0.54
0.83	16.50000	0.52
0.83	16.75000	0.50
0.83	17.00000	0.48
0.83	17.25000	0.46
0.83	17.50000	0.44
0.83	17.75000	0.42
0.83	18.00000	0.40
0.83	18.25000	0.38
0.83	18.50000	0.36
0.83	18.75000	0.34
0.83	19.00000	0.32

0.83	19.25000	0.30
0.83	19.50000	0.27
0.83	19.75000	0.25
0.83	20.00000	0.22
0.83	20.25000	0.20
0.83	20.50000	0.17
0.83	20.75000	0.15
0.83	21.00000	0.12
0.83	21.25000	0.10
0.83	21.50000	0.07
0.83	21.75000	0.04
0.83	22.00000	0.01
0.80	12.00000	0.80
0.80	12.25000	0.80
0.80	12.50000	0.79
0.80	12.75000	0.79
0.80	13.00000	0.79
0.80	13.25000	0.78
0.80	13.50000	0.77
0.80	13.75000	0.77
0.80	14.00000	0.76
0.80	14.25000	0.76
0.80	14.50000	0.75
0.80	14.75000	0.74
0.80	15.00000	0.73
0.80	15.25000	0.73
0.80	15.50000	0.72
0.80	15.75000	0.71
0.80	16.00000	0.70
0.80	16.25000	0.69
0.80	16.50000	0.68
0.80	16.75000	0.67
0.80	17.00000	0.66
0.80	17.25000	0.65
0.80	17.50000	0.64
0.80	17.75000	0.63
0.80	18.00000	0.62
0.80	18.25000	0.61
0.80	18.50000	0.59
0.80	18.75000	0.58
0.80	19.00000	0.57
0.80	19.25000	0.56
0.80	19.50000	0.54
0.80	19.75000	0.53

0.80	20.00000	0.51
0.80	20.25000	0.50
0.80	20.50000	0.48
0.80	20.75000	0.47
0.80	21.00000	0.45
0.80	21.25000	0.44
0.80	21.50000	0.42
0.80	21.75000	0.40
0.80	22.00000	0.39
0.80	22.25000	0.37
0.80	22.50000	0.35
0.80	22.75000	0.34
0.80	23.00000	0.32
0.80	23.25000	0.30
0.80	23.50000	0.28
0.80	23.75000	0.26
0.80	24.00000	0.24
0.80	24.25000	0.22
0.80	24.50000	0.20
0.80	24.75000	0.18
0.80	25.00000	0.16
0.80	25.25000	0.14
0.80	25.50000	0.12
0.80	25.75000	0.09
0.80	26.00000	0.07
0.80	26.25000	0.05
0.80	26.50000	0.03
0.80	26.75000	0.00
0.78	15.00000	0.78
0.78	15.25000	0.77
0.78	15.50000	0.77
0.78	15.75000	0.76
0.78	16.00000	0.76
0.78	16.25000	0.75
0.78	16.50000	0.75
0.78	16.75000	0.74
0.78	17.00000	0.73
0.78	17.25000	0.73
0.78	17.50000	0.72
0.78	17.75000	0.71
0.78	18.00000	0.71
0.78	18.25000	0.70
0.78	18.50000	0.69
0.78	18.75000	0.69

0.78	19.00000	0.68
0.78	19.25000	0.67
0.78	19.50000	0.66
0.78	19.75000	0.65
0.78	20.00000	0.64
0.78	20.25000	0.63
0.78	20.50000	0.62
0.78	20.75000	0.62
0.78	21.00000	0.61
0.78	21.25000	0.60
0.78	21.50000	0.58
0.78	21.75000	0.57
0.78	22.00000	0.56
0.78	22.25000	0.55
0.78	22.50000	0.54
0.78	22.75000	0.53
0.78	23.00000	0.52
0.78	23.25000	0.51
0.78	23.50000	0.49
0.78	23.75000	0.48
0.78	24.00000	0.47
0.78	24.25000	0.46
0.78	24.50000	0.44
0.78	24.75000	0.43
0.78	25.00000	0.42
0.78	25.25000	0.40
0.78	25.50000	0.39
0.78	25.75000	0.37
0.78	26.00000	0.36
0.78	26.25000	0.34
0.78	26.50000	0.33
0.78	26.75000	0.31
0.78	27.00000	0.30
0.78	27.25000	0.28
0.78	27.50000	0.27
0.78	27.75000	0.25
0.78	28.00000	0.23
0.78	28.25000	0.22
0.78	28.50000	0.20
0.78	28.75000	0.18
0.78	29.00000	0.16
0.78	29.25000	0.15
0.78	29.50000	0.13
0.78	29.75000	0.11

0.78	30.00000	0.09
0.78	30.25000	0.07
0.78	30.50000	0.05
0.78	30.75000	0.04
0.78	31.00000	0.02
0.78	31.25000	0.00
0.75	18.00000	0.75
0.75	18.25000	0.75
0.75	18.50000	0.74
0.75	18.75000	0.74
0.75	19.00000	0.73
0.75	19.25000	0.72
0.75	19.50000	0.72
0.75	19.75000	0.71
0.75	20.00000	0.71
0.75	20.25000	0.70
0.75	20.50000	0.69
0.75	20.75000	0.69
0.75	21.00000	0.68
0.75	21.25000	0.67
0.75	21.50000	0.66
0.75	21.75000	0.66
0.75	22.00000	0.65
0.75	22.25000	0.64
0.75	22.50000	0.63
0.75	22.75000	0.63
0.75	23.00000	0.62
0.75	23.25000	0.61
0.75	23.50000	0.60
0.75	23.75000	0.59
0.75	24.00000	0.58
0.75	24.25000	0.57
0.75	24.50000	0.56
0.75	24.75000	0.55
0.75	25.00000	0.54
0.75	25.25000	0.53
0.75	25.50000	0.52
0.75	25.75000	0.51
0.75	26.00000	0.50
0.75	26.25000	0.49
0.75	26.50000	0.48
0.75	26.75000	0.47
0.75	27.00000	0.45
0.75	27.25000	0.44

0.75	27.50000	0.43
0.75	27.75000	0.42
0.75	28.00000	0.41
0.75	28.25000	0.39
0.75	28.50000	0.38
0.75	28.75000	0.37
0.75	29.00000	0.36
0.75	29.25000	0.34
0.75	29.50000	0.33
0.75	29.75000	0.32
0.75	30.00000	0.30
0.75	30.25000	0.29
0.75	30.50000	0.27
0.75	30.75000	0.26
0.75	31.00000	0.24
0.75	31.25000	0.23
0.75	31.50000	0.21
0.75	31.75000	0.20
0.75	32.00000	0.18
0.75	32.25000	0.17
0.75	32.50000	0.15
0.75	32.75000	0.14
0.75	33.00000	0.12
0.75	33.25000	0.10
0.75	33.50000	0.09
0.75	33.75000	0.07
0.75	34.00000	0.05
0.75	34.25000	0.04
0.75	34.50000	0.02
0.75	34.75000	0.00
0.72	21.00000	0.72
0.72	21.25000	0.72
0.72	21.50000	0.71
0.72	21.75000	0.71
0.72	22.00000	0.70
0.72	22.25000	0.70
0.72	22.50000	0.69
0.72	22.75000	0.68
0.72	23.00000	0.68
0.72	23.25000	0.67
0.72	23.50000	0.67
0.72	23.75000	0.66
0.72	24.00000	0.65
0.72	24.25000	0.64

0.72	24.50000	0.64
0.72	24.75000	0.63
0.72	25.00000	0.62
0.72	25.25000	0.61
0.72	25.50000	0.60
0.72	25.75000	0.59
0.72	26.00000	0.59
0.72	26.25000	0.58
0.72	26.50000	0.57
0.72	26.75000	0.56
0.72	27.00000	0.55
0.72	27.25000	0.54
0.72	27.50000	0.53
0.72	27.75000	0.52
0.72	28.00000	0.51
0.72	28.25000	0.50
0.72	28.50000	0.49
0.72	28.75000	0.48
0.72	29.00000	0.47
0.72	29.25000	0.45
0.72	29.50000	0.44
0.72	29.75000	0.43
0.72	30.00000	0.42
0.72	30.25000	0.41
0.72	30.50000	0.39
0.72	30.75000	0.38
0.72	31.00000	0.37
0.72	31.25000	0.36
0.72	31.50000	0.34
0.72	31.75000	0.33
0.72	32.00000	0.32
0.72	32.25000	0.30
0.72	32.50000	0.29
0.72	32.75000	0.27
0.72	33.00000	0.26
0.72	33.25000	0.25
0.72	33.50000	0.23
0.72	33.75000	0.22
0.72	34.00000	0.20
0.72	34.25000	0.19
0.72	34.50000	0.17
0.72	34.75000	0.16
0.72	35.00000	0.14
0.72	35.25000	0.12

0.72	35.50000	0.11
0.72	35.75000	0.09
0.72	36.00000	0.07
0.72	36.25000	0.06
0.72	36.50000	0.04
0.72	36.75000	0.02
0.72	37.00000	0.01

Matrice di Checking e/o Testing

0.91	0.15104	0.90
0.91	0.57098	0.88
0.91	1.35934	0.86
0.91	2.01693	0.85
0.91	2.49780	0.81
0.91	3.75859	0.72
0.91	0.25247	0.90
0.91	1.01808	0.87
0.91	2.47496	0.78
0.91	3.64013	0.76
0.91	4.51629	0.62
0.91	6.80399	0.39
0.88	5.37317	0.85
0.88	6.19560	0.81
0.88	6.58498	0.75
0.88	8.01514	0.72
0.88	8.60459	0.69
0.88	8.72735	0.64
0.88	9.43966	0.60
0.88	9.58786	0.53
0.85	9.66899	0.82
0.85	11.11202	0.71
0.85	11.76773	0.66
0.85	14.16318	0.61
0.85	15.09163	0.50
0.85	15.29015	0.40
0.85	16.42117	0.38
0.85	16.65141	0.31
0.835	9.90778	0.81
0.835	10.28474	0.80
0.835	11.21058	0.79
0.835	11.33881	0.78
0.835	11.85982	0.77

0.835	12.02100	0.73
0.835	13.47662	0.70
0.835	14.25736	0.63
0.835	14.55510	0.54
0.775	17.16472	0.73
0.775	17.75766	0.72
0.775	19.23214	0.69
0.775	19.42440	0.68
0.775	20.20207	0.67
0.775	20.45418	0.64
0.775	22.66975	0.59
0.775	23.85636	0.51
0.775	24.32281	0.47