Politecnico di Milano Scuola di Ingegneria Civile Ambientale e Territoriale Corso di Laurea Magistrale in Infrastrutture di Trasporto



Carichi Aeroportuali sulla pavimentazione:

studio della distribuzione delle traiettorie e

degli effetti della portanza alare

Relatore Ing.Federico Fiori Correlatore Ing. Sara Malvicini

Tesi di laurea di

Castellini Elena Casula Silvia Matr 784510 Matr 780655

Anno Accademico 2012/2013

"Il volo non e' semplicemente un vile processo meccanico ma un'arte raffinata, puramente estetica, poesia del movimento ed il miglior modo di imparare è la pratica ..." Il Gufo Anacleto in "La spada nella roccia"

ABSTRACT

Nel presente elaborato di tesi viene proposto un nuovo approccio per valutare quali siano i carichi gravanti sulla pavimentazione in aeroporto e come questi siano distribuiti, in modo da poter valutare precisamente quali siano le zone della pavimentazione aeroportuale maggiormente sollecitate.

I fattori determinanti che individuano l'utilizzo dell'infrastruttura sono la portanza alare e la dispersione trasversale delle traiettorie: la portanza è una forza di sostentazione che consente il volo ed in questo studio è stata utilizzata per definire quali sezioni della pavimentazione siano gravate dal massimo carico e dove invece il carico si riduca per effetto della portanza stessa; le dispersioni trasversali delle traiettorie sono invece un fenomeno statistico, che rappresenta come i percorsi degli aeromobili si distribuiscono rispetto all'asse di center line, definendo quindi una larghezza entro la quale si concentra la maggior parte dei passaggi dei velivoli. Questo studio ha portato alla definizione del comportamento dei velivoli in funzione della classe funzionale ICAO di appartenenza, ossia consente di poter assegnare ad ogni categoria ICAO la propria dispersione trasversale in pista.

L'utilizzo di un metodo come quello proposto, che abbina i carichi alle dispersioni, può portare forti vantaggi sia in fase progettuale sia in fase di gestione della manutenzione, in quanto riesce a fotografare molto più precisamente di quanto avviene ora il reale comportamento dei velivoli sull'infrastruttura aeroportuale.

In this thesis we propose a new approach to evaluate what are the loads imposed on the pavement of the airport and how they are distributed, in order to assess precisely what are the most stressed parts of the structure.

The determining factors are identifying by the use of the lift wing and the wander distribution of the trajectories: the lift is a force that allows the flight and in this study was used to define which sections of the pavement are burdened by the maximum load and where instead the load is reduced due to the lift itself; transverse wander distribution is a statistical phenomenon, that represent how the paths of the aircraft are distributed relative to the axis of the center line, thus defining a width within which concentrates most of the path of the aircraft. This study led to the definition of the behavior of the aircraft as a function of ICAO category, that allows to assign to each ICAO category their dispersion across the track.

The use of a method such as that proposed, which combines the loads to the dispersions, can bring strong advantages in the design phase, both the maintenance management, because it is able to represent the real behavior of the aircraft much more precisely than now, on the airport infrastructure .

Sommario

ABSTRAC	Τ	iii
Indice de	lle figure	vi
Indice de	lle tabelle	ix
Introduzi	one	1
1. Prog	ettazione e gestione delle piste aeroportuali	3
1.1	Introduzione	3
1.2	Dimensionamento	4
1.2.7	1 Dati di progetto	7
1.2.2	2 Metodi di calcolo delle pavimentazioni	8
1.2.3	3 Software di progettazione	14
1.3	Manutenzione	21
1.3.7	Approcci per individuare l'alternativa di manutenzione adatta	22
1.3.2	2 Livelli di management	25
1.3.3	3 Priorizzazione degli interventi	27
1.3.4	4 Stima della restante vita utile della pavimentazione	28
1.3.	5 Implementazione di un sistema di gestione	29
2 Dist	ribuzione dei carichi aeroportuali	42
2.1	Introduzione	42
2.2	Coefficiente di portanza	43
2.3	Manovra di decollo	47
2.3.7	1 Meccanica del volo – fase di decollo	47
2.3.2	2 Valutazione del carico su pista	48
2.3.3	3 Valutazione delle distanze percorse sulla pista in fase di decollo	53
2.4	Manovra di atterraggio	60
2.4.7	1 Meccanica del volo – fase di atterraggio	60
2.4.2	2 Valutazione del carico su pista	64
2.4.3	3 Valutazione delle distanze percorse sulla pista in fase di atterraggio	70
2.5	Conclusioni	73
3 Disp	ersioni delle traiettorie	75
3.1	Introduzione	75
3.2	Dispersioni Trasversali	76
3.2.7	1 Definizione di ricoprimento	79

	3.3 Dispersioni trasversali sulle piste di volo				
	3	3.3.1		Fase di Decollo	88
		3.3.2	2	Fase di Atterraggio	93
	3.4		Disp	ersioni Longitudinali sulle piste di volo	99
	3.5		Disp	ersioni trasversali sulle taxiway	100
		3.5.1		Vie Di Rullaggio	100
		3.5.2	2	Raccordi di entrata/uscita pista	110
	3.6)	Con	clusioni	116
	3	3.6.1		Radio assistenza al volo: stato dell'arte e sviluppi futuri	117
4	E 1	Effet 124	ti de	llo studio eseguito: applicazione alla progettazione ed alla ma	anutenzione
	4.1		Intro	oduzione	124
	4.2		Ottir	mizzazione della progettazione	125
	4.3		Ottir	mizzazione della manutenzione	150
5	(CON	CLUS	SIONI	162
6	E	Bibli	ograt	fia	165
7	Fonti internet				

Indice delle figure

Figura 1.1: Diagramma di dimensionamento della FAA per pavimentazioni flessibili,
caso di ruote gemelle. In rosso un esempio di utilizzo del diagramma12
Figura 1.2: Diagramma di dimensionamento della FAA per pavimentazioni rigide, caso di
ruote gemelle. In rosso un esempio di utilizzo del diagramma12
Figura 1.3: ciclo di vita e costi per la manutenzione di una pavimentazione tipo23
Figura 1.4: Schema a blocchi di un PMS
Figura 1.5: Sistema di valutazione delle conseguenze prodotte da soluzioni di M&R30
Figura 1.6: PCI e scala delle condizioni operative di una pavimentazione
Figura 1.7: Incertezza sulla positività del tasso di deterioramento
Figura 1.8: Andamento della distribuzione cumulata per la variabile PCI37
Figura 2.1: Variazione del coefficiente di portanza in funzione dell'angolo di attacco, al
picco si raggiunge la condizione di stallo da cui poi l'inversione della portanza43
Figura 2.2: Angolo di attacco
Figura 2.3: Schematizzazione dell'angolo di deriva
Figura 2.4: Variazione del coefficiente di portanza in funzione del numero di Mach47
Figura 2.5: Forze agenti sul velivolo
Figura 2.6: Organi mobili dell'ala
Figura 2.7: Riduzione del carico al decollo per consumo di carburante riferito
all'avanzamento lungo la pista
Figura 2.8: Riduzione del carico al decollo per consumo di carburante riferito
all'incremento di velocità
Figura 2.9: Schema manovra di decollo e relative velocità
Figura 2.10: Rappresentazione della riduzione del carico su pista in seguito all'aumento
della portanza, esempio di un Boeing 747 – 40053
Figura 2.11: Manovra di decollo, si noti la manovra di involo e salita alla quota di
crociera54
Figura 2.12: Rapporto di riduzione della forza di trazione sulla velocità, per un aereo a
getto
Figura 2.13: Variazione dell'accelerazione con la velocità in fase di rullaggio57
Figura 2.14: Accelerazione/velocità e spazio/velocità per un Boeing 747-40057
Figura 2.15: Schema del comportamento generico di un aeromobile in fase di
decollo_velocità [nodi]/spazio[piedi]58
Figura 2.16: Rappresentazione legame velocità [m/s] - spazio [m] per un Boeing 747-400
Figura 2.17: Riduzione carico al decollo in funzione dello spazio percorso su pista - caso
Boeing 747-400
Figura 2.18: Riduzione percentuale del carico con la corsa al decollo59
Figura 2.19: Riduzione del carico al decollo con peso del velivolo costante pari
all"MTOW60
Figura 2.20: Grafico della riduzione del carico su pista al decollo60
Figura 2.21: Approccio finale, flare, touch down, rullaggio in pista

Figura 2.22: Approccio e successiva cabrata Figura 2.23: Dettaglio della cabrata,	
richiamata o flare 62	
Figura 2.24: Apparato di inversione di spinta in fnzione - esempio di un Airbus A319	
della compagnia Easy Jet6	53
Figura 2.25: Flaps ed aerofreni alla toccata Figura 2.26: Aerofreni e flaps al rullaggio 6	54
Figura 2.27: Fasi dell'atterraggio con indicazione delle velocità	5
Figura 2.28: Andamento ipotizzato della portanza	57
Figura 2.29: rappresentazione della fase di rotazione6	8
Figura 2.30: Incremento progressivo del carico all'atterraggio	9
Figura 2.31: Rappresentazione della variazione del carico e della velocità in atterraggio	
con la distanza percorsa7	'2
Figura 2.32: Riduzione progressiva della velocità in atterraggio7	'3
Figura 3.1: Elementi caratterizzanti il fenomeno di dispersione trasversale delle	
traiettorie: sforzo, dispersione trasversale e danno7	'7
Figura 3.2: Legge uniforme per le coperture delle runway	30
Figura 3.3: Legge uniforme per le coperture delle taxiway	31
Figura 3.4: Confronto tra dati sperimentali e la distribuzione a campana	32
Figura 3.5: Carrello tandem con ruote lontane	34
Figura 3.6: Carrello tandem con ruote vicine	34
Figura 3.7: Variazione della larghezza della striscia di traffico, dovuta al cambiamento	
delle dispersioni trasversali lungo l'asse di una pista larga 45 m in fase di decollo9)0
Figura 3.8: Variazione media della larghezza della striscia di traffico, dovuta al	
cambiamento delle dispersioni trasversali lungo l'asse di una pista larga 60 m in fase di	
decollo9	0
Figura 3.9: Variazione della larghezza della striscia di traffico, dovuta al cambiamento	
delle dispersioni trasversali lungo l'asse di una pista larga 45 m in fase di decollo9)1
Figura 3.10: Variazione della larghezza della striscia di traffico, dovuta al cambiamento	
delle dispersioni trasversali lungo l'asse di una pista larga 60 m in fase di decollo9	12
Figura 3.11: Variazione media della larghezza della striscia di traffico, dovuta al	
cambiamento delle dispersioni trasversali lungo l'asse di una pista larga 45 m9	15
Figura 3.12: Variazione media della larghezza della striscia di traffico, dovuta al	
cambiamento delle dispersioni trasversali lungo l'asse di una pista larga 60 m9	15
Figura 3.13: Variazione della larghezza della striscia di traffico, dovuta al cambiamento	
delle dispersioni trasversali lungo l'asse di una pista larga 45 m9	16
Figura 3.14: Variazione della larghezza della striscia di traffico, dovuta al cambiamento	
delle dispersioni trasversali lungo l'asse di una pista larga 60 m9	17
Figura 3.15: Variazione della larghezza della striscia di traffico, dovuta al cambiamento	
delle dispersioni trasversali lungo l'asse di una pista larga 45 m fino al raggiungimento d	li
velocità di 40-50 km/h9	18
Figura 3.16: : Variazione della larghezza della striscia di traffico, dovuta al cambiamento)
delle dispersioni trasversali lungo l'asse di una pista larga 45 m fino al raggiungimento d	li
velocità di 40-50 km/h9	18
Figura 3.1/: Calcolo della posizione del punto di rotazione in fase di decollo, mediante i	
Sensori ad intrarosso	19
Figura 3.18: Calcolo della posizione del punto di toccata in fase di atterraggio, mediante	1
sensori ad infrarosso	19

aeroporti: JFK e ANC104
Figura 3.20: Andamento delle dispersioni trasversali e approssimazione dei risultati con
la legge di distribuzione normale (JFK)105
Figura 3.21: Andamento delle dispersioni trasversali e approssimazione dei risultati con
la legge di distribuzione normale (ANC)105
Figura 3.22: Striscia di traffico ottenuta per le taxiway dritte con larghezza di 23 m106
Figura 3.23: Schematizzazione delle osservazioni delle deviazioni del carrello principale
di un B747 [10]107
Figura 3.24: Striscia di traffico ottenuta per le taxiway dritte con larghezza di 30,5 m107
Figura 3.25: Correlazione tra spostamenti dalla centerline osservati per il ruotino (Nose
Gear) e per il carrello principale (Main Gear)108
Figura 3.26: Posizione "auspicabile" del carrello anteriore rispetto alla posizione delle
luci di centro via
Figura 3.27: Differenza di comportamento delle deviazioni dei due carrelli: andamento
sinusoidale del ruotino
Figura 3.28: Strisca di traffico definita di un raccordo che collega una taxi da 30,5 m e
una pista da 45 o 60 m112
Figura 3.29: Strisca di traffico definita di un raccordo che collega una taxi da 23 m e una
pista da 45 o 60 m
Figura 3.30: Comportamento di un B747-400 in curva, con approccio all' americana113
Figura 3.31: Dispersioni uscite ad alta velocità
Figura 4.1: Schema della riduzione dello spessore del pacchetto di pavimentazione
secondo la AC 150/5320_6D126
Figura 4.2. Schematizzazione della riduzione della pavimentazione sulla pista secondo la
rigura 4.2. Schematizzazione dena riduzione dena pavimentazione suna pista secondo la
AC 150/5320_6D
AC 150/5320_6D 126 Figura 4.3: Riduzione dello spessore della pavimentazione secondo la AC 150/5320_6E 127 Figura 4.4: Suddivisione trasversale della pista secondo la AC 150/5320-6E 127 Figura 4.4: Suddivisione trasversale della pista secondo la AC 150/5320-6E 127 Figura 4.5: Grafici delle medie pesate di offset e deviazione per il last point 134 Figura 4.6: Grafici delle medie pesate di offset e deviazione per l'intermediate point 135 Figura 4.7: Grafici delle medie pesate di offset e deviazione per il first point 135 Figura 4.8: Grafici delle medie pesate di offset e deviazione per l'intermediate point 137 Figura 4.9: Grafici delle medie pesate di offset e deviazione per l'intermediate point 137 Figura 4.10: Grafici delle medie pesate di offset e deviazione per l'intermediate point 137 Figura 4.10: Grafici delle medie pesate di offset e deviazione per il first point 138 Figura 4.11: Comportamento delle varie categorie di velivoli al decollo, pista da 45m 139 Figura 4.13: Comportamento delle varie categorie di velivoli al decollo, pista da 45m 145 Figura 4.14: Comportamento delle varie categorie di velivoli al decollo, pista da 60m 145 Figura 4.15: Stratificazione pavimentazione flessibile (FAARFIELD) 154 Figura 4.16: Danno cumulato in una pavimentazione fles
AC 150/5320_6D 126 Figura 4.3: Riduzione dello spessore della pavimentazione secondo la AC 150/5320_6E 127 Figura 4.4: Suddivisione trasversale della pista secondo la AC 150/5320-6E 127 Figura 4.4: Suddivisione trasversale della pista secondo la AC 150/5320-6E 127 Figura 4.5: Grafici delle medie pesate di offset e deviazione per il last point 134 Figura 4.6: Grafici delle medie pesate di offset e deviazione per l'intermediate point 135 Figura 4.7: Grafici delle medie pesate di offset e deviazione per il first point 135 Figura 4.9: Grafici delle medie pesate di offset e deviazione per l'intermediate point 137 Figura 4.10: Grafici delle medie pesate di offset e deviazione per l'intermediate point 138 Figura 4.11: Comportamento delle varie categorie di velivoli al decollo, pista da 45m 139 Figura 4.13: Comportamento delle varie categorie di velivoli al decollo, pista da 60m 140 Figura 4.14: Comportamento delle varie categorie di velivoli al decollo, pista da 60m 145 Figura 4.16: Danno cumulato in una pavimentazione flessibile sottoposta ad un specifico 154 Figura 4.17: Danno cumulato in una pavimentazione flessibile sottoposta ad un specifico 155
AC 150/5320_6D 126 Figura 4.3: Riduzione dello spessore della pavimentazione secondo la AC 150/5320_6E 127 Figura 4.4: Suddivisione trasversale della pista secondo la AC 150/5320-6E 127 Figura 4.5: Grafici delle medie pesate di offset e deviazione per il last point 134 Figura 4.6: Grafici delle medie pesate di offset e deviazione per l'intermediate point 135 Figura 4.7: Grafici delle medie pesate di offset e deviazione per l'intermediate point 135 Figura 4.8: Grafici delle medie pesate di offset e deviazione per l'intermediate point 137 Figura 4.9: Grafici delle medie pesate di offset e deviazione per l'intermediate point 137 Figura 4.10: Grafici delle medie pesate di offset e deviazione per l'intermediate point 138 Figura 4.10: Grafici delle medie pesate di offset e deviazione per l'intermediate point 138 Figura 4.11: Comportamento delle varie categorie di velivoli al decollo, pista da 45m.149 149 Figura 4.13: Comportamento delle varie categorie di velivoli al decollo, pista da 60m.140 145 Figura 4.16: Danno cumulato in una pavimentazione flessibile sottoposta ad un specifico 155 Figura 4.17: Danno cumulato in una pavimentazione flessibile sottoposta ad un specifico 155 Figura 4.17: Danno cumulato in una pavimentazione flessibile sottoposta ad un specifico 154
AC 150/5320_6D. 126 Figura 4.3: Riduzione dello spessore della pavimentazione secondo la AC 150/5320_6E 127 Figura 4.4: Suddivisione trasversale della pista secondo la AC 150/5320_6E 127 Figura 4.5: Grafici delle medie pesate di offset e deviazione per il last point 134 Figura 4.6: Grafici delle medie pesate di offset e deviazione per l'intermediate point 135 Figura 4.7: Grafici delle medie pesate di offset e deviazione per il first point 135 Figura 4.8: Grafici delle medie pesate di offset e deviazione per il last point 137 Figura 4.9: Grafici delle medie pesate di offset e deviazione per il first point 137 Figura 4.10: Grafici delle medie pesate di offset e deviazione per l'intermediate point 138 Figura 4.10: Grafici delle medie pesate di offset e deviazione per l'intermediate point 138 Figura 4.11: Comportamento delle varie categorie di velivoli al decollo, pista da 45m 139 Figura 4.13: Comportamento delle varie categorie di velivoli al decollo, pista da 45m 145 Figura 4.16: Danno cumulato in una pavimentazione flessibile sottoposta ad un specifico traffico, calcolato da FAARFIELD 155 Figura 4.17: Danno cumulato in una pavimentazione flessibile sottoposta ad un specifico traffico, calcolato da APSDS, considerando un valore di deviazione standard tipico delle runway (773 mm) 155

Figura 4.18: Danno cumulato in una pavimentazione flessibile sottoposta ad un specifico
traffico, calcolato da APSDS considerando un valore di deviazione standard tipico delle
runway (1576 mm)156

Indice delle tabelle

Tabella 1.1: classifica delle terre ASTM D2487
Tabella 1.2: Fattori di conversione dei carrelli 11
Tabella 2.1: Requisiti F.A.R. per le velocità in rullaggio
Tabella 2.2: Dati sulla velocità, caso Boeing 747-400
Tabella 2.3: Dati riguardo il coefficiente di portanza ed i carichi - caso Boeing 747-40052
Tabella 2.4: Dati sulle distanze percorse in pista in funzione delle velocità in decollo,
caso Boeing 747-400
Tabella 2.5: Velocità all'atterraggio - caso Boeing 747 - 400
Tabella 2.6: Valori tipici dei coefficienti di attrito in atterraggio con uso dei freni e senza
Tabella 2.7: Coefficienti di portanza all'atterraggio - caso Boeing 747 - 400
Tabella 2.8: Portanza e carico su pista in fase di atterraggio - caso Boeing 747 - 40069
Tabella 2.9: Dati sulle distanze percorse dall'aereo, in approccio e su pista72
Tabella 3.1: Offeset (X) e Deviazioni Standard (σ) per decolli su piste di larghezza 45 m
Tabella 3.2: Offset (X) e Deviazioni Standard per decolli su piste di larghezza 60 m89
Tabella 3.3: Valori che definiscono la dispersione trasversale nella fase di decollo su piste
larghe 45 m
Tabella 3.4: Valori medi che definiscono la dispersione trasversale nella fase di decollo su
piste larghe 60 m90
Tabella 3.5: Valori che definiscono la dispersione trasversale nella fase di decollo su piste
larghe 45 m
Tabella 3.6: Valori che definiscono la dispersione trasversale nella fase di decollo su piste
larghe 60 m92
Tabella 3.7: Offset (X) e Deviazioni Standard per atterraggi su piste di larghezza 45 m.93
Tabella 3.8: Offset (X) e Deviazioni Standard per atterraggi su piste di larghezza 45 m.94
Tabella 3.9: Valori medi che definiscono la dispersione trasversale nella fase di
atterraggio su piste larghe 45 m94
Tabella 3.10: Valori medi che definiscono la dispersione trasversale nella fase di
atterraggio su piste larghe 60 m95
Tabella 3.11: Valori che definiscono la dispersione trasversale nella fase di atterraggio su
piste larghe 45 m96
Tabella 3.12: Valori che definiscono la dispersione trasversale nella fase di atterraggio su
piste larghe 60 m
Tabella 3.13: Valori che definiscono la dispersione trasversale nella fase di atterraggio su
piste larghe 45 m, fino al raggiungimento di velocità di 40-50 km/h97
Tabella 3.14: Valori che definiscono la dispersione trasversale nella fase di atterraggio su
piste larghe 60 m, fino al raggiungimento di velocità di 40-50 km/h98

Tabella 3.15: Valori di offset e deviazioni per taxiway dritte	.106
Tabella 3.16: Valori di offset e deviazioni per taxiway dritte	.106
Tabella 3.17: Valori caratteristici per una taxiway curva	.111
Tabella 3.18: Definizione della striscia di traffico	.111
Tabella 3.19: Definizione delle strisce di traffico che si avrebbero nei due comportam	enti
	.112
Tabella 3.20: : Velocità, Offset (X) e Deviazioni Standard per uscite rapide	.114
Tabella 3.21: Definizione delle strisce di traffico che si avrebbero nelle uscite ad alta	
velocità	.115
Tabella 4.1: Occupazione pista per il caso di un Boeing 747 – 400	.128
Tabella 4.2: Criteri della classificazione funzionale ICAO basata sulle caratteristiche	
dell'aeromobile di progetto	.128
Tabella 4.3: Dati dei velivoli e relativa classificazione ICAO	.129
Tabella 4.4: Dati di offset e dispersione al decollo, pista da 45m	.130
Tabella 4.5: Classificazione aerei in base al distanziamento delle ruote esterne del	
carrello principale	.130
Tabella 4.6: Media pesata dell'offset e della dispersione del last point	.131
Tabella 4.7: Media pesata dell'offset e della dispersione dell'intermediate point	.131
Tabella 4.8: Media pesata dell'offset e della dispersione del first point	.131
Tabella 4.9: Valori dei paramentri in ascissa in funzione delle categorie ICAO	.132
Tabella 4.10: Dati di offset e dispersione al decollo, piste da 60m	.132
Tabella 4.11: Media pesata dell'offset e della dispersione del last point	.133
Tabella 4.12: Media pesata dell'offset e della dispersione dell'intermediate point	.133
Tabella 4.13: Media pesata dell'offset e della dispersione del first point	.133
Tabella 4.14: Offset e deviazione calcolati per la categoria A	.135
Tabella 4.15: Offset e deviazione calcolati per la categoria A	.136
Tabella 4.16: Offset e deviazione calcolati per la categoria F	.138
Tabella 4.17: Offset e deviazione calcolati per la categoria F	.139
Tabella 4.18: Valori medi per le categorie ICAO	.141
Tabella 4.19: Dati all'atterraggio, pista da 45m	.142
Tabella 4.20: Dati all'atterraggio, pista da 60m	.143
Tabella 4.21: Media pesata dell'offset e della dispersione del last point, pista da 45m.	.143
Tabella 4.22: Media pesata dell'offset e della dispersione dell'intermediate point, pista	a da
45m	.143
Tabella 4.23: Media pesata dell'offset e della dispersione del first point, pista da 45m	.143
Tabella 4.24: Media pesata dell'offset e della dispersione del last point, pista da 60m.	.144
Tabella 4.25: Media pesata dell'offset e della dispersione dell'intermediate point, pista	a da
60m	.144
Tabella 4.26: Media pesata dell'offset e della dispersione del first point, pista da 60m	.144
Tabella 4.27: Valori medi per le categorie ICAO	.147
Tabella 4.28: Proposta per valutare la zona più caricata su pista	.147
Tabella 4.29: Limiti della classificazione per apertura alare (ICAO)	.151
Tabella 4.30: Limiti della classificazione per apertura alare (ICAO)	.152
Tabella 4.31: traffico di progetto, inserito in input sia in FAARFIELD sia APSDS	.154

Tabella 4.32: Dispersione trasversale delle traiettorie in fase di decollo su piste la	rghe 45
m	157
Tabella 4.33: Dispersione trasversale delle traiettorie in fase di decollo su piste la	rghe 60
m	157
Tabella 4.34: Dispersione trasversale delle traiettorie in fase di atterraggio su piste	e larghe
45 m, con uscite di tipo normale	158
Tabella 4.35: Dispersione trasversale delle traiettorie in fase di atterraggio su piste	e larghe
60 m, con uscite di tipo normale	158
Tabella 4.36: Dispersione trasversale delle traiettorie in fase di atterraggio su piste	e larghe
45 m, con uscite veloci	158
Tabella 4.37: Dispersione trasversale delle traiettorie in fase di atterraggio su piste	e larghe
60 m, con uscite veloci	158
Tabella 4.38: Dispersione trasversale delle traiettorie nelle vie di rullaggio	159
Tabella 4.39: Dispersione trasversale delle traiettorie nei raccordi di entrata/uscita	ı159
Tabella 4.40: Dispersione trasversale delle traiettorie nelle uscite ad alta velocità .	159

Introduzione

Tra le molteplici componenti che concorrono ad assicurare l'operatività di un aeroporto in condizioni di piena sicurezza ed efficienza, le pavimentazioni delle infrastrutture di volo rivestono un ruolo primario, in quanto costituiscono l'elemento fisico su cui si svolge la movimentazione a terra del traffico aereo. In relazione alla notevole intensità delle azioni normali e tangenziali trasmesse dai velivoli, tali pavimentazioni sono soggette a condizioni di esercizio molto severe e tali da richiedere un elevato livello di prestazioni, sia in termini funzionali che di capacità portante.

Risulta evidente quindi quanto avere spessori di pavimentazioni adeguati con idonee caratteristiche meccaniche sia importante per garantire la sicurezza dei movimenti.

Data l'estensione delle superfici dell'airside, le sovrastrutture costituiscono un investimento economico importante nella costruzione o nella manutenzione dell'aeroporto e quindi errori di progettazione o di realizzazione che possano portare ad una fine prematura o comunque ad interventi di riparazione non previsti, possono avere pesanti ripercussioni sulla gestione funzionale e finanziaria dell'aeroporto.

Il fattore che più incide sia in fase di progetto sia in fase di verifica è il traffico, che si traduce nei carichi che gravano sulla sovrastruttura.

È proprio questo l' oggetto del nostro elaborato di tesi, che si occupa di dettagliare come i carichi aeroportuali si distribuiscono sull' infrastruttura di volo, considerando due fattori: l'effetto della portanza sull' entità delle sollecitazioni a cui è sottoposta la sovrastruttura e la dispersione trasversale delle traiettorie.

L' obiettivo è quindi fornire un nuovo approccio metodologico che tenga nella giusta considerazione i due elementi sopra citati, in entrambe le fasi di progettazione e manutenzione delle pavimentazioni aeroportuali, per migliorare e raffinare le tecniche ad oggi utilizzate.

Disponendo di queste informazioni il progettista è in grado di capire precisamente quali zone dell' aeroporto sono maggiormente sollecitate, e quindi prevedere degli spessori maggiori in fase di progettazione o interventi più consistenti in fase di manutenzione.

Questo è particolarmente importante perché avendo la pavimentazione un costo molto elevato ad essa è necessario associare un sistema di management che influenza in modo assai marcato le scelte dei materiali, gli intervalli di manutenzione e le fasi di progettazione e realizzazione.

Per poter meglio apprezzare e cogliere il lavoro prodotto, nel Capitolo 1 si descrive lo stato dell'arte, per quanto riguarda le tecniche ad oggi utilizzate per la progettazione e per la gestione di una sovrastruttura aeroportuale.

Il Capitolo 2 illustra il concetto di portanza alare, i fattori che la influenzano e come questa forza faccia variare il carico gravante sulla pista nelle fasi di decollo e atterraggio.

All' atterraggio infatti, si ha un carico inferiore rispetto al decollo in quanto si è consumata una notevole quantità di carburante e la distribuzione dei carichi su pista risulta opposta rispetto al decollo: alla toccata si ha un carico inferiore rispetto all'ingresso nella taxiway assegnata, a causa della progressiva riduzione della portanza con il decremento della velocità.

Uno studio di questo tipo permette di avere una maggiore conoscenza della distribuzione del carico, che è tanto minore quanto più il valore di portanza alare è elevato.

Si ottiene quindi una suddivisione che porta ad individuare delle sezioni trasversali, che distinguono parti di infrastruttura sottoposte a sollecitazioni di entità differente.

Quanto detto è molto significativo soprattutto se l'aeroporto preso in considerazione dispone di piste dedicate solo ai decolli o solo agli atterraggi, in quanto le zone individuate dall' analisi combinata di portanza alare & carichi, sono opposte.

Nel Capitolo 3, si definisce cosa è la dispersioni delle traiettorie, ovvero il fenomeno che rappresenta statisticamente la distribuzione dei percorsi che seguono gli aerei rispetto alla centerline. L' idea di studiare l'andamento delle dispersioni trasversali, nasce dalla semplice osservazione che una pavimentazione sottoposta a carichi concentrati subisce un danno unitario molto maggiore rispetto a quello di un'altra pavimentazione nella quale si osserva una dispersione delle traiettorie. Anche in questo caso l'informazione che si deduce è relativa all'individuazione di aree che sono più sollecitate di altre, e permette la localizzazione del traffico aereo all' interno di specifiche strisce di traffico, che dividono la pavimentazione longitudinalmente.

Considerare questo aspetto, significa da una parte prevedere interventi di manutenzione più mirati, dall'altra valutare in fase di costruzione ex novo quali tratti saranno maggiormente sollecitati e prevedere per questi spessori adeguati, con un conseguente risparmio economico.

Il capitolo 4, è il capitolo conclusivo nel quale si rappresenta l'insieme dei due fenomeni trattati ai Capitoli 2 e 3.

Si definisce dunque una suddivisione opportuna dell'airside, sia in senso longitudinale che traversale, valutando l' entità dei carichi che sollecitano le varie sezioni individuate, dimostrando quanto un' elaborazione di questo tipo è importante per effettuare un' efficiente progettazione e/o un' efficiente manutenzione.

1. Progettazione e gestione delle piste aeroportuali

1.1 Introduzione

Un' infrastruttura aeroportuale si configura, da un punto di vista meramente costruttivo, come una comune infrastruttura stradale ovvero costituito da una sovrastruttura dimensionata e realizzata con lo scopo di consentire in sicurezza la circolazione degli mezzi a terra, di resistere alle componenti di sollecitazione verticale (peso del velivolo) e tangenziale (azioni di accelerazione e frenatura) e di trasferire i carichi al piano di posa, in ovvia relazione alle sue capacità portanti.

E' evidente differenza di utenza tra la strada e il complesso di vie che contraddistinguono un aeroporto ma è proprio da questa diversità che si susseguono tutta una serie di differenze che impongono al progettista, al gestore e al manutentore di adottare prescrizioni specificamente concepite per l'ambito aeroportuale.

La maggiore differenza tra strada ed aeroporto è rappresentata dall'entità dei carichi, e da come questi vengono trasmessi a terra.

Di fatto le ruote costituenti i carrelli dei velivoli, oltre che essere di dimensioni inferiori rispetto alle corrispettive stradali, sono in numero e posizione differente a seconda del tipo di aeromobile preso in considerazione e per tanto vanno ad incidere in modo diverso sulla superficie pavimentata.

Se in ambito stradale il carico massimo per asse è pari a 12 tonnellate, ovvero 6 tonnellate per ruota singola, in campo aeronautico il carico su ruota singola è di molto superiore e pari, nel caso per esempio di un McDonnell Douglas MD 11, a ben 24 tonnellate. Assai diverse sono anche le pressioni di gonfiaggio degli pneumatici; se in campo stradale la pressione massima è pari a 0,8 MPa ovvero 8 kg/cm², questa diventa pari a 1,5-2,0 MPa in ambito aeronautico il che comporta una variazione piuttosto marcata dell'impronta esercitata dal contatto tra ruota e pavimentazione.

Un altro importante fattore è determinato dalla portanza alare, che è una forza di sostentamento opposta alla forza peso, che genera una differenza di massa trasmessa al suolo dal treno di atterraggio e di conseguenza si vengono ad avere zone non omogenee dal punto di vista dei carichi.

Ultimo fattore, non meno vincolante, è rappresentato dalle alte velocità con cui gli aeromobili affrontano la pista durante la fase di decollo (~ 300 km/h) che inducono ingenti azioni di tipo dinamico per la sovrastruttura.

Da tutti questi fattori si comprende bene l'esigenza di avere a disposizione una pavimentazione in grado di consentire le operazioni di manovra, decollo e atterraggio in piena sicurezza, che assolva i seguenti compiti:

- Formare una struttura stabile nel tempo e poco deformabile in grado di sopportare i carichi ripetuti applicati dai carrelli degli aeromobili.
- Garantire la sicurezza della circolazione in relazione ai problemi di aderenza pneumatico-pavimentazione in presenza di agenti inquinanti.
- Realizzare una superficie sufficientemente regolare, tale da escludere vibrazioni dannose o fenomeni di risonanza nei diversi elementi strutturali dell'aeromobile e tale da assicurare un adeguato comfort per i passeggeri.

Affinché la pavimentazione possa essere in grado di soddisfare tali richieste, gli spessori che la compongono devono essere progettati con cura ed attenzione. Data l'estensione delle superfici dell'airside, le sovrastrutture costituiscono un investimento economico importante nella costruzione dell'aeroporto e quindi errori di progettazione o di realizzazione che possano portare ad una fine prematura o comunque ad interventi di riparazione non previsti, possono avere pesanti ripercussioni sulla gestione funzionale e finanziaria dell'aeroporto.

A fronte di ciò si viene quasi automaticamente ad associare alla loro vita utile un sistema di management che influenza in modo assai marcato le scelte dei materiali, gli intervalli di manutenzione e le fasi di progettazione e realizzazione.

Sia nella fase di progetto, sia in quella di verifica il fattore dominante è il traffico, che si traduce nei carichi che gravano sulla sovrastruttura.

Una completa definizione delle caratteristiche del traffico costituisce dunque, una delle condizioni di riferimento necessarie per affrontare il progetto e la manutenzione delle pavimentazioni, e permette di effettuare la stima delle prestazioni di una sovrastruttura, contenendo l'errore massimo entro valori accettabili sotto prestabiliti livelli di confidenza.

Obiettivo di questo elaborato di tesi è fornire una nuova metodologia di approccio per entrambe le fasi di progettazione e manutenzione delle pavimentazioni aeroportuali, per migliorare e raffinare le tecniche ad oggi utilizzate.

Si procede quindi con un excursus dello stato dell'arte circa questi due macroargomenti che sono appunto la progettazione e la manutenzione, per poter meglio apprezzare e cogliere il lavoro prodotto.

1.2 Dimensionamento

Il dimensionamento è l'insieme di tutte le operazioni che concorrono alla definizione degli spessori degli strati costituenti la pavimentazione relativamente ad una determinata vita utile ed al traffico previsto.

In ambito aeroportuale, per garantire una corretta progettazione, vanno considerate alcune peculiarità, ovvero:

• la non omogeneità delle caratteristiche degli aerei, diversi nel peso, nella disposizione delle ruote e nella pressione di gonfiaggio;

- la diversità del carico in relazione alle condizioni operative: l'aereo è più pesante in decollo che in atterraggio;
- le differenze di sollecitazione della pavimentazione in funzione della velocità e della diversa canalizzazione del traffico;
- le diverse funzioni a cui le pavimentazioni in aeroporto devono assolvere e quindi la diversa struttura associata a queste.

Ai fini del dimensionamento, considerando la variabilità dei carichi applicati e delle ripetizioni delle sollecitazioni, è utile effettuare la distinzione tra le diverse zone pavimentate dell'aeroporto, separando le "zone critiche", da quelle "non critiche".

Le prime sono parti di airside nelle quali gli aerei si muovono secondo precisi itinerari (movimenti canalizzati) e a causa delle basse velocità, la portanza alare è nulla e il carico dell'aereo grava completamente sulla pavimentazione.

Le zone non critiche sono invece percorse con velocità più elevate e pertanto il contributo di portanza va considerato. Ciò porta ad avere dei carichi sulla pavimentazione minori.

Solo le piste sono da annoverarsi tra le zone non critiche. Vie di rullaggio, piazzali di sosta, aree di attesa e testate delle piste di volo sono tutte zone critiche.

Il primo passo dunque per affrontare la fase di progetto, è capire quale tipo di pavimentazione sia più adatto alla particolare zona dell'infrastruttura considerata.

Ogni zona del piano regolatore, infatti, deve essere dotata di una pavimentazione che, sia come tipo, sia come dimensionamento, risponda alle esigenze specifiche ed alle condizioni di sollecitazioni cui è sottoposta.

In campo aeroportuale vengono impiegati tutti i tipi di sovrastrutture previsti in campo stradale, che sono:

- Flessibili: costituite da una successione di strati (normalmente tre: usura, binder e base) in conglomerato bituminoso di diverse caratteristiche meccaniche variabili da strato a strato, poggianti su di una fondazione generalmente in materiali non legati (misto granulare) che a sua volta poggia su di un piano di sottofondo compattato.
- Pavimentazioni semirigide formate da una successione di strati identica a quelle delle pavimentazioni flessibili ma aventi uno strato di base legato a cemento sotto gli strati legati a bitume.
- Pavimentazioni rigide costituite da una lastra in calcestruzzo posata su di uno o più starti di fondazione in misto granulare e/o misto cementato o poggiante direttamente sul terreno di sottofondo.

Tra le rigide, è possibile fare un' ulteriore distinzione, in funzione della presenza di armatura in acciaio, all'interno della lastra in calcestruzzo. Le pavimentazioni ad armatura continua sono caratterizzate dall'assenza di giunti trasversali, ad eccezione di quelli di costruzione e dalla presenza di un'armatura longitudinale di acciaio relativamente pesante che ha il compito di tenere chiuse le fessure che si formano nella lastra per effetti igrotermici.

Se l'armatura presente è continua ma leggera, la lastra si dice armata. L'armatura ha ancora il compito di mantenere chiuse le fessure, ma non permette di avere dimensioni delle lastre molto grandi, sono necessari quindi alcuni giunti trasversali.

Le pavimentazioni precompresse, sono dotate di un'armatura di precompressione, continua per tutta la lunghezza della lastra.

Le pavimentazioni a lastre non armate, hanno molti giunti, con un interasse che varia tra 4,5-5 m, nel caso in cui non siano previste barre di compartecipazione, incrementabile fino a circa 7,5 m quando queste barre sono previste.

Le pavimentazioni composite sono costituite da una struttura rigida in calcestruzzo ricoperta da uno strato in conglomerato bituminoso.

In ultimo si citano le pavimentazioni in masselli autobloccanti in calcestruzzo, costituite da un insieme di elementi in calcestruzzo appunto di piccole dimensioni. A fronte della buona risposta che questo tipo di sovrastruttura dimostra, se sollecitata da carichi molto pesanti, i masselli autobloccanti vengono utilizzati in zone dell'aeroporto dove i carichi sono statici, quindi aree di parcheggio, racchette di inversione, vie di circolazione, aree di manovra e banchine.

La scelta del tipo di pavimentazione da assegnare alle varie zone dell'aeroporto deve essere fatta tenendo in considerazioni due particolari ordini di problemi:

- Funzionali: relativi soprattutto agli sversamenti di carburante da parte degli aeromobili. Il kerosene infatti, provoca la dissoluzione del bitume e porta ad avere sulla superficie del materiale sciolto che diventa pericoloso se risucchiato dai motori. Le zone interessate da questo fenomeno sono quelle in cui l'aereo fa rifornimento, dove viene effettuata la pulizia dei serbatoi, dove si fa uso di solventi per la pulizia dei motori ecc...
 In questi casi si utilizzano pavimentazioni rigide.
- Strutturali: connessi alle modalità di applicazione delle sollecitazioni da parte degli aerei, ciò significa che è fondamentale distinguere i tipi di pavimentazione in funzione dei carichi a cui è sottoposta, in quanto carichi dinamici producono effetti molto diversi da quelli statici.

Si può generalizzare dicendo che, dove sono presenti carichi statici, si preferisce utilizzare pavimentazioni rigide, in quanto la bassa velocità e l'entità del carico, provocano un danno di ormaiamento che nelle sovrastrutture in conglomerato bituminoso sarebbe molto maggiore rispetto a quanto si osserva utilizzando una pavimentazione in calcestruzzo.

Quindi piazzali di sosta, vie di circolazione e testate piste di solito sono realizzate in calcestruzzo.

Dove invece i carichi sono dinamici, in particolare nelle piste di volo, il danno più importane che si osserva è la rottura della pavimentazione e le sovrastrutture flessibili rappresentano la soluzione migliore in quanto, anche se si danneggiassero, non necessiterebbero del rifacimento completo dell'intero pacchetto di pavimentazione come invece avviene nel caso della rottura di lastre in calcestruzzo.

1.2.1 Dati di progetto

I dati di progetto necessari al dimensionamento strutturale della pavimentazione aeroportuale sono riconducibili a quattro fattori principali, che sono: le previsioni di traffico, terreno di sottofondo, i fattori climatici e i materiali costituenti la pavimentazione.

<u>Traffico</u>

La definizione del traffico di progetto deve comprendere la valutazione dei carichi effettivi e del numero di movimenti di ciascuno dei differenti aeromobili che utilizzeranno l'aeroporto nell' arco della sua vita utile.

È proprio l'analisi di questo dato, a fornire l'input per lo sviluppo di questo elaborato di tesi in quanto si vuole definire in maniera precisa, nelle varie zone dell'aeroporto, dove e con che entità sono distribuite le sollecitazioni, dovute appunto al traffico.

I fattori che definiscono questa grandezza sono:

- L'entità del carichi, ovvero la variazione del peso degli aeromobili in funzione delle operazioni che esso esegue. Si distinguono in particolare il peso al decollo e all'atterraggio.
- Il numero di ripetizioni di carico che è frutto dell'interazione del numero di movimenti che effettua ogni aereo previsto su una data pavimentazione e il grado di dispersione delle traiettorie che caratterizza i singoli velivoli quando percorrono una determinata zona dell'aeroporto.

Terreno di sottofondo

Con la dicitura terreno di sottofondo si fa riferimento alla porzione più superficiale del terreno su cui viene realizzata la pavimentazione.

Il suo studio è finalizzato alla definizione della capacità portante, che è una grandezza che può essere valutata in diversi modi.

Nelle pavimentazioni flessibili, solitamente si valuta tale grandezza utilizzando l'indice CBR, mentre nelle pavimentazioni rigide, l'indice scelto è la costante di reazione del terreno K.

Fattori climatici

I fattori climatici da tenere in considerazione nel progetto di un pavimentazione sono la temperatura e la piovosità. Il primo fattore permette di conoscere le variazioni di temperatura a cui i materiali dovranno resistere, e nel caso di possibilità di cicli di gelo e disgelo, di prevedere strati adeguati.

Il secondo definisce l'umidità dei terreni di sottofondo, importante da valutare perché incide negativamente sulla portanza.

Se presente è importante sapere il livello a cui si trova la falda freatica, per poter prevedere la posizione e le dimensioni di eventuali dreni.

Caratteristiche dei materiali costituenti la pavimentazione

Le caratteristiche necessarie per poter effettuare verifiche strutturali per giudicare l'idoneità dei dimensionamenti previsti sono essenzialmente i moduli elastici e i corrispondenti coefficienti di Poisson.

1.2.2 Metodi di calcolo delle pavimentazioni

Come questi input influenzano i risultati dipende dalle metodologie di progettazione utilizzate che possono essere classificate in due categorie: metodi empirici e metodi razionali.

La loro scelta dipende dalla fase progettuale in cui si opera, in quanto varia il grado di approfondimento da raggiungere e gli strumenti di calcolo da adottare.

Occorre inoltre distinguere se si tratta di un dimensionamento di pavimentazioni flessibili o rigide poiché ogni tipologia di sovrastruttura richiede metodi di dimensionamento specifici.

1.2.2.1 Metodi empirici

Sono metodi che si basano sull'osservazione del comportamento di pavimentazioni esistenti. Permettono, definendo le caratteristiche di portanza volute per la pavimentazione, di determinare lo spessore degli strati.

Lo svantaggio dei metodi empirici è quello di poter essere applicati solo per uno specifico insieme di condizioni ambientali, di carico e di materiali utilizzati. Se queste condizioni cambiano, possono essere usati dei coefficienti di regressione, ma il progetto perde la propria affidabilità ed un nuovo metodo deve essere messo a punto attraverso sperimentazioni da commisurare con nuove condizioni di riferimento.

Compresi in questa categoria, ci sono tutti quei metodi che si basano sull' utilizzo di diagrammi di dimensionamento, diversi per pavimentazioni rigide e flessibili.

Tutti definiscono lo spessore necessario da assegnare alla pavimentazione in funzione di diversi parametri di input.

Il più semplice è il Metodo CBR, proposto dall'U.S.Army Corps of Engineers, che definisce lo spessore, semplicemente correlando il carico gravante sulla pavimentazione con la portanza del sottofondo, individuata appunto dal valore di CBR. È un metodo molto semplice che è applicabile esclusivamente alle pavimentazioni flessibili.

Limitato alle pavimentazioni rigide è il Metodo PCA (Portland Cement Assossiation) che in funzione del carico agente sulla gamba di forza, della tensione di rottura a trazione per flessione del calcestruzzo e della portanza del sottofondo (K), attraverso semplici monogrammi permette di determinare lo spessore delle lastre di calcestruzzo per un dato tipo di aereo.

Anche la FAA fornisce dei diagrammi, distinti per pavimentazioni rigide e flessibili, che assolvono alla stessa funzione.

Si cita in ultimo il Metodo LCN, anch'esso valido per entrambe le tipologie di pavimentazione. Si basa sulle caratteristiche di portanza del sottofondo e con un procedimento iterativo, fornisce gli spessori necessari ad ottenere un determinato Load Classification Number (LCN).

Si illustrerà in questo capitolo esclusivamente il metodo proposto dalla FAA, basato sulla corrispondente Advisory Circular 150/5320-6D [3], in quanto è quello che è stato più utilizzato nel mondo fino a 2009, anno in cui è entrata in vigore una nuova versione della AC, (AC/5320-6E) [4], che ha sostituito completamente la vecchia versione proponendo un approccio che ha rivoluzionato le modalità di progettazione.

1.2.2.1.1 II metodo FAA (Federal Aviation Administration) secondo la A.C. 150/5320-6D

Il metodo di dimensionamento delle sovrastrutture aeroportuali fa uso di diagrammi per la definizione dello spessore dei vari strati a cui è sottoposta la pavimentazione in funzione della capacità portante del sottofondo, dei carichi di progetto e del traffico di progetto [3].

La capacità portante viene indicata per le pavimentazioni flessibili dall'indice CBR, per quelle rigide dal modulo di reazione K.

In entrambi i casi, i valori possono essere calcolati mediante specifiche prove, oppure, nel caso in cui non ci sia la possibilità di eseguirle, si possono usare dei valori approssimati, indicati nella Tab. 1.1 basati sulla classifica unificata delle terre (ASTM D 2487), adottata dalla FAA.

	CLASSIFICAZIONE	CBR (in sito)	K [MN/m3]
ghiaia o ghiaia sabbiosa ben graduata	GW	60-80	>85
ghiaia sabbiosa mal graduata	GP	35-60	>85
ghiaia o ghiaia sabbiosa uniforme	GU	25-50	>85
ghiaia limosa o sabbio-limosa	GM	40-80	>85
ghiaia argillosa o sabbio-argillosa	GC	20-40	55-85
sabbia o sabbia ghiaiosa ben graduata	SW	20-40	55-85
sabbia o sabbia ghiaiosa mal graduata	SP	15-25	55-85
sabbia o sabbia ghiaiosa uniforme	SU	10-20	55-85
sabbia limosa o ghiaia-limosa	SM	20-40	55-85
sabbia argillosa o ghiaia argillosa	SC	10-20	55-85
limi, limi sabbiosi ghiaiosi	ML	5-15	28-55
argille magre, argille sabbiose o ghiaiose	CL	5-15	28-55
limi organici o argille magre e organiche	OL	4-8	28-55
argille	MH	4-8	28-55
argille grasse	СН	3-5	14-28
argille grasse organiche	OH	3-5	14-28

Tabella 1.1: classifica delle terre ASTM D2487

Si precisa che il K preso come input, per il progetto di pavimentazioni rigide, non è esattamente quello che deriva dalle prove di carico su piastra, ma è un modulo detto "composito", maggiore di quello trovato in sito.

Il modulo composito tiene conto della presenza di uno o più strati si fondazione e per calcolarlo la FAA fornisce dei diagrammi specifici, che distinguono il caso in cui la fondazione sia in misto granulare stabilizzato o in misto cementato.

I diagrammi di dimensionamento proposti dalla FAA, sono tre per entrambi i tipi di pavimentazione, uno per ogni configurazione del carrello principale, che può essere, a ruote singole, a tandem o a doppio tandem.

Questa semplificazione è giustificata dall'osservazione che la configurazione del carrello principale, all'interno delle categorie definite, e i valori di pressione di gonfiaggio delle ruote, non variano significativamente.

Rimangono esclusi da questo metodo, tutti quegli aerei con una configurazione dei carrelli complessa come ad esempio il B-777, il B-747 o A-380, per i quali è consigliabile l'utilizzo di altri metodi di progettazione.

Per utilizzare i diagrammi occorre conoscere i carichi massimi al decollo.

L'ipotesi fondamentale di questo metodo di dimensionamento è la presenza di un unico carico di progetto, ovvero di un aereo, tra quelli che serviranno lo scalo, che singolarmente o con riferimento al numero delle sue operazioni, richiede lo spessore totale di pavimentazione maggiore.

Una volta definito l'aereo di critico o di progetto, occorrerà esprimere il numero di passaggi dell'aereo i-esimo in termini di passaggi dell'aereo critico, in modo da poter definire, nell'arco della vita utile della pavimentazione, pari a 20 anni, quanto vale il traffico omogeneizzato.

La formula utilizzata per convertire il traffico reale in numero di passaggi dell'aereo di progetto è:

$$log N_c = log \alpha N_i \sqrt{\frac{Q_i}{Q_c}}$$

(1.1)

Con il seguente significato dei simboli:

- Q_i: carico su ruota singola dell' aereo i-esimo.
- Q_c: carico su ruota singola dell' aereo di riferimento.
- N_i: numero di partenze annue equivalenti dell'aereo di progetto.
- N_c: numero delle partenze annue dell'aereo i-esimo.
- α: coefficiente di equivalenza proposto dalla FAA (Tab.1.2) per tenere conto del diverso effetto di danno prodotto nella pavimentazione dal tipo di carrello dell'aereo di progetto.

Q_i e Q_c sono riferiti al carrello principale, che nella maggior parte dei casi è quello posteriore e il loro valore dipende da come il peso totale si distribuisce sui carrelli,

quindi dalla posizione del baricentro dell'aereo e dalla configurazione dei carrelli stessi.

In assenza di tali dati si assume che il carico massimo al decollo si distribuisca per il 95% sulle gambe di forza posteriori e per il restante 5 % sulla gamba anteriore.

Convertire da	а	Fattore di conversione
ruota singola	ruote gemelle	0,8
ruota singola	doppio tandem	0,5
ruote gemelle	doppio tandem	0,6
doppio tandem a ruote gemelle	doppio tandem	1,0
doppio tandem	ruota singola	2,0
doppio tandem	ruote gemelle	1,7
ruote gemelle	ruota singola	1,3
doppio tandem a ruote gemelle	ruote gemelle	1,7

Tabella 1.2: Fattori di conversione dei carrelli

Le Fig 1.1 e Fig 1.2 rappresentano rispettivamente un diagramma di dimensionamento della FAA per pavimentazioni flessibili e rigide, entrambi riferiti ad un carrello con ruote gemelle.

Nel primo si entra conoscendo il valore del CBR di progetto del sottofondo e seguendo il percorso indicato in rosso, si definisce lo spessore totale (H_{tot}) della pavimentazione per le zone critiche e non critiche.

 H_m è l'altezza da assegnare agli strati in conglomerato bituminoso, la cui altezza è indicata sempre nella stessa tabella in basso.

Lo strato di fondazione si definisce, rientrando nel diagramma con un altro valore di CBR, quello dello strato di fondazione e procedendo ancora secondo un percorso analogo a quello indicato in rosso nella Fig. 1.1, si ricava lo spessore degli strati sovrastanti (di base e manto bituminoso).

Lo spessore della fondazione H_f quindi risulta definito da: H_{tot} - (H_b+H_m) .

Per la definizione dello spessore da assegnare alla lastra, il parametro utilizzato per entrare nel diagramma è la resistenza a flessione del calcestruzzo a 90 giorni di stagionatura, che in mancanza di misure dirette, viene assunta pari alla resistenza a flessione a 28 giorni, aumentata del 10%.

Seguendo il percorso rosso indicato nella Fig 1.2 si ricava lo spessore da assegnare alla lastra, per garantire una vita utile della stessa pari a 20 anni.



Figura 1.1: Diagramma di dimensionamento della FAA per pavimentazioni flessibili, caso di ruote gemelle. In rosso un esempio di utilizzo del diagramma



Figura 1.2: Diagramma di dimensionamento della FAA per pavimentazioni rigide, caso di ruote gemelle. In rosso un esempio di utilizzo del diagramma

Si osserva che questi grafici sono di immediato utilizzo, ma il loro impiego non è universale, per esempio per le pavimentazioni flessibili gli strati di base e fondazione possono essere composti rispettivamente solo da materiale di frantumazione e da misto granulare tondeggiante, mentre per quanto riguarda le pavimentazioni rigide si considera solo la tipologia di lastre non armate.

A tale proposito la FAA fornisce dei coefficienti di equivalenza per ampliare l'utilizzo di questo metodo a situazioni differenti da quelle standard, tuttavia è superfluo analizzarle in quanto questo metodo è stato del tutto soppiantato dall'aggiornamento dello stesso proposto ancora dalla FAA e descritto nella AC 150/5320-6E [4].

1.2.2.2 Metodi razionali

I metodi razionali basano il dimensionamento ed i criteri di verifica su modelli matematici che schematizzano opportunamente la pavimentazione e la risposta alle sollecitazioni. Sono solitamente distinti secondo le caratteristiche dell'algoritmo di calcolo in metodi basati sulle equazioni indefinite di equilibrio e metodi agli elementi finiti, dipendendo l'adozione di uno o l'altro dei due algoritmi dal maggiore o minore grado di rispondenza del modello teorico di calcolo della realtà. Le pavimentazioni flessibili e semirigide, per esempio, potendo essere assimilate in genere a schemi indefinitamente estesi in piano si prestano ad essere studiate con le equazioni indefinite di equilibrio, mentre le pavimentazioni rigide, essendo schematizzabili in lastre di dimensioni finite, si calcolano meglio con il metodo agli elementi finiti.

In entrambi i casi vi è la possibilità di una modellazione precisa dei carichi che possono essere supposti verticali o inclinati, distribuiti su una o più aree di forma variabile. In generale, l'utilizzo sempre più diffuso dei metodi di calcolo razionali nasce dalla consapevolezza dei vantaggi che essi offrono rispetto a quelli basati su risultanze sperimentali, legati alla possibilità di previsione della rottura, dell'ormaiamento, alla possibilità di dimensionare le pavimentazioni anche in casi diversi da quelli sperimentati. L'applicazione di tali metodi ha evidenziato che:

- un elevato numero di passaggi di assi di carico leggeri produce un danno trascurabile;
- una significativa percentuale del danno è causata da pochi passaggi di assi di carico molto pesanti;
- lo spessore degli strati indiscutibilmente incide sull'accumulo del danno.

Ad oggi la modalità di progettazione per pavimentazioni sia stradali che aeroportuali più utilizzata, prevede l'impiego di software che fanno delle analisi di tipo razionale, mentre i metodi empirici, che presentano evidenti limiti di approssimazione, possono risultare utili soprattutto nelle prime fasi della progettazione. L' introduzione nel mercato di nuovi aeromobili molto grandi, detti NGA (New Generation Aircraft), come per esempio il B777 nel 1995, ha fatto nascere la necessità di sviluppare una nuova procedura di progetto, in modo da poter considerare l'effetto dei nuovi carrelli di cui sono dotati gli Wide Bodies, sulla pavimentazione.

Tali velivoli infatti, avendo una maggiore capacità, se da una parte diminuiscono considerevolmente il costo "passeggero al chilometro", dall'altra producono delle sollecitazioni molto più intense sulla pavimentazione, dovute ai differenti carrelli di atterraggio. Ciò è dovuto all'utilizzo di ruote di dimensioni inferiori con pressioni di gonfiaggio maggiori e ridotto spazio tra le ruote accoppiate.

La guida al progetto delle sovrastrutture proposta dalla FAA (AC 150/5320-6E) [4] è un aggiornamento, che sostituisce completamente la vecchia metodologia e prevede l'utilizzo della teoria del "multistrato elastico", per le sovrastrutture flessibili, e degli elementi finiti per le rigide, per prevedere la risposta tenso-deformativa della pavimentazione.

Il cuore pulsate della nuova metodologia di progetto è l'utilizzo di un software, il FAARFIED (FAA Rigid and Flexible Iterative Elastic Layer Design), che implementa al suo interno tutto ciò che viene definito all' interno della AC 150/5320-6E [4], per il progetto e la verifica di pavimentazioni aeroportuali.

1.2.3 Software di progettazione

È importante parlare dei software perché ad oggi le pavimentazioni aeroportuali sono per la maggior parte progettate attraverso il loro utilizzo.

Tra i vari programmi disponibili, quello che viene più utilizzato, è il già citato FAARFIELD, in quanto è stato non solo approvato dalle autorità americane, ma il suo impiego è esplicitamente richiesto ed è parte integrante delle nuove procedure di progetto e verifica della FAA.

Accanto al FAARFIELD si considera un altro software, australiano, in grado di provvedere al progetto e alla verifica della pavimentazione. Rispetto a quello proposto della FAA, APSDS presenta delle migliorie notevoli, soprattutto per quanto riguarda la computazione del contributo della dispersione trasversale delle traiettorie, di cui si parlerà ampiamente nel Capitolo 3.

In questa sede si definirà cosa è l'indice CDF, per poter affrontare il tema della progettazione attraverso i due software.

1.2.3.1 Cumulative Damage Factor (CDF)

Il Cumulative Damage Factor è un indice globale che definisce il livello di deterioramento della pavimentazione.

L'utilizzo di questo nuovo fattore sia in fase di progetto, sia in fase di verifica delle condizioni della sovrastruttura, è preso in considerazione nell' ultima Advisory Circular (AC 150-5335-5B [5]).

Questo fattore permette di rappresentare le condizioni di sollecitazione della pavimentazione in maniera più precisa, evitando il procedimento visto sopra che fa a capo all' aereo critico.

Il CDF deriva dall' applicazione della legge di accumulo lineare di Miner, secondo cui il danno prodotto in un elemento strutturale da un dato aeromobile risulta direttamente proporzionale al numero di applicazioni effettive del carico da parte del dato aeromobile rapportato al numero di applicazioni che conducono alla rottura a fatica dell'elemento considerato.

In altre parole indica l'ammontare della vita utile della sovrastruttura che è stata "consumata" al termine di un certo intervallo di tempo.

Matematicamente è dato dal rapporto tra il numero di applicazioni di carico e il numero di ripetizioni di carico a rottura. È computato per ciascun aereo presente nella flotta e il suo valore è ottenuto sommando i contributi di tutti gli aeromobili dello spettro di traffico.

$$\mathsf{CDF} = \frac{\mathsf{N}_{r}}{\mathsf{N}_{f}} = \sum_{i=1}^{K} \mathsf{CDF}_{i}$$

(1.2)

- CDF_i rappresenta il contributo al fattore di danno dell'aereo i-esimo e K il numero di aerei presenti nel mix di traffico.
- N_r = numero di ricoprimenti equivalenti dell'aereo di riferimento, dato dalla somma dei ricoprimenti equivalenti di tutti gli aeromobili della flotta.
- N_f = numero di ricoprimenti equivalenti dell'aereo di riferimento, che porta alla rottura della pavimentazione.

Per ricoprimento si intende l'applicazione effettiva del carico su un dato punto della sezione ed è ed dunque concettualmente distinto dal passaggio dell'aeromobile sulla sezione stessa, in relazione alla distribuzione trasversale delle traiettorie dei velivoli e alle modalità di diffusione del carico agente in superficie. Generalmente il numero di ricoprimenti si ricava dal numero di passaggi attraverso opportuni coefficienti correttivi calcolati su base statistica. Il significato del CDF è:

- CDF=1: la pavimentazione ha esaurito completamente la sua vita utile.
- CDF>1: il fallimento della pavimentazione è già stato superato.
- 0<CDF<1: la sovrastruttura possiede ancora una certa frazione di vita utile. In questo caso, la quantità di vita consumata è proprio uguale al cumulative damage factor computato.

Esempio: se il numero critico di ripetizioni per un dato aereo è 10.000 e sono avvenuti 300 passaggi, il CDF è 0,30. Per un aereo più piccolo si possono avere fino a 50.000 passaggi prima della rottura della pavimentazione, ciò comporta che se ce ne sono stati 10.000, il CDF è 0,20.

I software, sulla base di questo indice, sono in grado di verificare quanto può ancora resistere la pavimentazione oppure, di calcolare gli spessori necessari per ottenere un CDF=1 dopo 20 anni di vita della sovrastruttura.

1.2.3.2 FAARFIELD

FAA Rigid and Flexible Iterative Elastic Layer Design, contiene al suo interno due programmi LEAF (Layered Elastic analysis for Flexible pavements and flexible overlay design) e NIKE 3D.

Il primo è utilizzato per l'analisi delle pavimentazioni flessibili e sviluppa la teoria del multistrato elastico, il secondo è impiegato per le rigide, ed è un programma di analisi a elementi finiti tridimensionali.

Sia LEAF che NIKE 3D sono caricati ed eseguiti da FAARFIELD quando richiesto e non sono visibili dall'utente. L'interfaccia grafica di input è essenzialmente costituita da due finestre: la "structure window" che contiene i dati relativi alla sovrastruttura (moduli elastici dei materiali, spessori, coefficienti Poisson, nonché il tipo di pavimentazione prescelta) e l'altra "airplane window" riguardante traffico aereo che interesserà la pavimentazione in esame.

Sia per definire gli spessori da assegnare agli strati, sia per verificare la restante vita utile di una pavimentazione esistente, occorre capire l'entità dei carichi che gravano sulla sovrastruttura e come tali carichi si distribuiscono.

Questo è uno dei punti focali della nuova AC 150-5320/6E [4], in quanto, mentre prima si procedeva con un analisi basata sull'aereo critico, ora si considera il mix di traffico nella sua totalità, che viene immesso nel programma utilizzando la finestra "Airplan Window".

Quest' ultima contiene una libreria nella quale sono memorizzati i dati relativi ai principali aerei commerciali e militari in circolazione suddivisi in sei classi: Generic, Airbus, Boeing, Other, Commercial, General Aviation, e Military, per i quali sono note e non modificabili alcune caratteristiche fondamentali per la computazione del danno, che sono per lo più legate alla geometria dell'aereo, ovvero la configurazione dei carrelli, la pressione di gonfiaggio dei pneumatici, la percentuale del peso totale trasmesso al carrello principale e i dati relativi all'area d'impronta delle ruote.

Per ogni modello di aereo aggiunto nella lista costituente la flotta di progetto, occorre specificare il numero di partenze annue con il rispettivo tasso di crescita annuale.

Nel caso in cui alcuni aerei da inserire nel mix, non siano presenti nella libreria, si può utilizzare la sezione "Generic", che include i tipi di aerei fittizi aventi carrelli generici, le cui caratteristiche sono modificabili dall'utente in modo tale da poter inserire nel mix anche aerei non presenti nella libreria.

Ogni aereo costituisce un' entità singola che produce un determinato danno, che dipende da tutti i fattori elencati sopra, definiti nella "Airplane Windows" e concorrono alla definizione dell' indice CDF definito al paragrafo 1.2.3.1.

Oltre al traffico, occorre immettere in input anche i dati riguardanti la struttura della pavimentazione, che sono i moduli elastici del materiale, i coefficienti di Poisson e gli spessori, nel caso di verifica della pavimentazione, utilizzando l'apposita finestra chiamata appunto "Stucture Window".

Il primo passo è la decisione della tipologia di sovrastruttura da utilizzare e il programma fornisce sette alternative:

- AC Aggregate: Asphatl Concrete, per pavimentazioni nuove flessibili.
- New Flexible: simili alle AC, varia lo strato di base;
- New Rigid: per le nuove pavimentazioni rigide;
- PCC on Flexible: per strati in conglomerato cementizio disposto sopra a una pavimentazione flessibile esistente;
- AC on Rigid: per strati in conglomerato bituminoso disposto sopra una pavimentazione rigida esistente;
- PCC on Rigid: per strati in conglomerato cementizio disposto sopra una pavimentazione rigida esistente;
- AC on Flexible: per strati in conglomerato bituminoso disposto sopra una pavimentazione flessibile esistente;

Gli strati presenti nella libreria del programma sono 18 e a sua volta questi sono composti da materiali distinti.

Le caratteristiche meccaniche di tali materiali, la loro collocazione e il loro spessore non possono essere sempre modificate dall'operatore, in quanto per determinati materiali il programma impone delle limitazioni relative agli standard di valori su cui si basa il programma, che sono definiti nell' Advisory Circular 150/5370-10E dal titolo "Standard For Specifying Construction of Airports"[7].

Va ricordato che tra le varie restrizioni presenti all'interno del programma ve ne sono alcune che riguardano l'impiego di certi materiali in funzione del peso massimo degli aeromobili che utilizzeranno l'infrastruttura, ad esempio una fondazione granulare del tipo P-208 Cr Agg, non può essere utilizzata se sé prevista la presenza di aeromobili con peso lordo massimo superiore o uguale a 60.000 libre (27.0000 Kg).

Tra questi diciotto tipi di materiali ne esiste uno di particolare importanza chiamato Undefined, libero da qualsiasi vincolo che permette, variando il suo modulo elastico incondizionatamente, di sperimentare materiali che non sono presenti negli standard FAA.

Conoscendo la sollecitazione e la struttura della pavimentazione, FAARFIEL calcola la risposta degli strati e prevede degli spessori tali da garantire una vita utile di 20 anni, utilizzando delle leggi di rottura, specifiche per la tipologia di pavimentazione selezionata.

Per le flessibili i modelli di degrado disponibili, sono relativi a due fenomeni: l' ormaiamento superficiale dovuto ad un accumulo di deformazioni verticali plastiche del sottofondo a seguito del ripetuto passaggio di aeromobili, e la fessurazione per fatica dello strato superficiale di conglomerato bituminoso. Per quanto riguarda le pavimentazioni rigide, il criterio che determina il fallimento della pavimentazione e quindi il raggiungimento della condizione CDF=1 è la rottura della lastra. Non si considera ciò che succede al di sotto di essa.

1.2.3.3 APSDS (Airport Pavement Structural Design System)

Come FAARFIELD, anche APSDS consente di progettare e verificare pavimentazioni aeroportuali sottoposte ai carichi molto pesanti degli aerei Wide Bodies, che vengono computati singolarmente e associati al danno che producono tramite l'indice CDF.

La struttura del programma è molto simile a quello di FAARFIELD, in quanto richiede per il suo funzionamento, la definizione della corpo della pavimentazione e del traffico.

Per quanto riguarda il primo fattore, si nota che i materiali non sono vincolati nei loro valori di modulo elastico e coefficiente di Poisson.

Questa è una grande differenza tra i due programmi in quanto APSDS, lascia la libertà al progettista di sperimentare nuovi materiali non compresi nella norma FAA, senza scegliere la generalità dello strato "undefined".

Le modalità con cui viene valutato il traffico analoghe a quelle viste per FAARFIELD, tranne per il fatto che APSDS consente all'utilizzatore di specificare la distribuzione del peso al decollo, che quindi non è più forfettariamente disposta per il 95% sul carrello posteriore e per il 5 % sull'anteriore, ma può essere adattata allo specifico caso trattato.

Un' importante novità introdotta da questo programma è la valutazione della dispersione trasversale delle traiettorie, ovvero quel fenomeno che distribuisce il danno prodotto dai carichi su un' area più grande diminuendone l'intensità, in considerazione del fatto che tutti gli aerei non percorrono le stesse traiettorie.

Il parametro fondamentale che definisce questo comportamento è la deviazione standard e come si dimostrerà nel Capitolo 3, varia da zona a zona dell'aeroporto, secondo diversi paramentri. In APSDS questa grandezza può essere variata caso per caso, in FAARFIELD invece è sempre uguale e non modificabile.

Ciò porta ad avere dei risultati più accurati utilizzando il primo software.

APSDS consente inoltre di combinare valutazioni di progetto e di manutenzione, in quanto contiene al suo interno anche una funzione per il calcolo dei costi dei singoli interventi.

APSDS ha ancora molte altre prerogative, tra cui si citano:

- La possibilità di simulare l'anisotropia dei materiali,
- La possibilità di variare l'interfaccia degli strati distinguendo se le due superfici a contatto sono ruvide oppure lisce: ciò cambia l'interazione che i materiali sovrapposti hanno, in risposta ai carichi.
- La schematizzazione dei carichi in diverse configurazioni: orizzontali, verticali, torsionali ecc..

I modelli di degrado su cui si basa sono anche in questo caso riferiti alla deformazione permanente del sottofondo e alla rottura degli strati in conglomerato bituminoso.

Le leggi utilizzate per descrivere questi comportamenti, sono valide anche per i carrelli della nuova generazione di aerei pesanti, in quanto nella calibrazione sono stati utilizzati i risultati della campagna di misura fatta proprio per studiare l'effetto di questi carichi sulle pavimentazioni aeroportuali.

Se in una precedente versione del programma, si è utilizzata la serie di test MWHGLT (Multiple Wheel Heavy Gear Load Test), condotta alla Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi, tra la fine degli anni '60 e gli inizi degli anni '70 [11], nella versione aggiornata APSDS 5.0, il riferimento sperimentale sono i 37 test delle NAPTF (US National Airport Pavement Test Facility) nelle quali si considerano anche gli ultimissimi aeromobili introdotti nel mercato, il B777 e il A380, caratterizzati da una configurazione del carrelli a sei ruote [12].

Con l'analisi elastica per gli strati delle pavimentazioni flessibili è possibile tener conto degli sforzi subiti dalla sovrastruttura, a seguito dei suddetti dati empirici ricavati dalle sperimentazioni sul campo, con dati reali di traffico e di carico e da questi ricavare le equazioni che descrivono il comportamento della pavimentazione nel tempo, in particolare il fenomeno dell' ormaiamento e la vita a fatica della pavimentazione stessa.

Si ottiene in questo modo una valutazione degli sforzi più precisa con una conseguente riduzione dello spessore della pavimentazione di progetto.

Per la computazione dell' andamento degli sforzi e la conseguente valutazione della vita utile della pavimentazione APSDS si basa sul software CIRCLY.

Il modello di sforzo, prodotto dal passaggio di un carrello di atterraggio, dipende principalmente dalla profondità della pavimentazione e ha una determinata forma, compresa tra due estremi, che sono relativi appunto alla sollecitazione che la sovrastruttura sente in funzione del suo spessore: gli strati sottili subiscono più impulsi distinti e brevi appartenenti ai diversi assi, gli strati spessi sono sottoposti invece un unico impulso lungo che ingloba l'effetto di tutti gli assi che compongono il carrello.

Per valutare i danni alla pavimentazione, si fa uso dell'indice CDF (cumulative damage factor). APSDS calcola questo indice per ogni aereo dello spettro di traffico, ciò appunto permette di considerare tutti i contributi di sollecitazione. Si presuppone che la pavimentazione abbia raggiunto il termine della vita utile quando per tutti i punti si arriva ad CDF pari a 1.

L'introduzione dei software ha portato delle migliorie notevoli rispetto alla situazione definita nella ormai dismessa AC 150/5320-6D [3], che si basava essenzialmente sull'omogeneizzazione del traffico e quindi su un unico aereo di progetto.

Utilizzando il calcolatore è possibile, in un tempo molto breve, estendere i calcoli fatti per un unico aereo a tutto il mix di traffico e stimare la risposta della pavimentazione tramite dei modelli molto più precisi in grado di rappresentare il comportamento della stessa.

Nonostante quanto detto, i software presentano una limitazione, ovvero non sono indipendenti dal giudizio ingegneristico, che deve comunque essere presente per poter valutare dove e come applicare gli spessori forniti dai programmi.

FAARFIELD e APSDS, infatti non distinguono le zone della pavimentazione più o meno caricate, forniscono piuttosto una stima, utilizzando appunto il CDF, dello spazio sottoposto a determinati carichi, ma non prevedono per questa fascia nessuna variazione di spessore.

Questo concetto di differenziare trasversalmente gli spessori, era già presente nei diagrammi della AC 150/5320-6D [3], e nelle prescrizioni della nuova versione AC 150/5320-6E [4], tuttavia le fasce sulle quali adottare gli spessori massimi sono fornite sottoforma valori minimi, non in modo univoco, lasciano quindi al progettista l'onere di capire quanto devono essere grandi per resistere a determinati carichi di traffico.

Quindi se da una parte i software permettono una maggior precisione nel valutare l'influenza di ogni aereo, la dispersione delle traiettorie ad esso associata viene trattata nella globalità, considerando un unico valore di deviazione standard.

FAARFIELD, in particolare, nega la possibilità all' operatore di modificare il valore di deviazione standard e ciò rappresenta un problema non trascurabile, in quanto proprio il valore di deviazione standard definisce l'andamento delle dispersioni delle traiettorie: tanto più è grande, tanto più le traiettorie saranno disperse. Dunque non è corretto imporre uno stesso valore di deviazione standard a zone dell'aeroporto percorse da velocità estremamente diverse tra loro.

In questo elaborato di tesi quindi si proporranno gli andamenti delle dispersioni trasversali, distinguendo quanto avviene nelle runway, nelle taxiway e nei raccordi di entrata/uscita pista.

Per quanto riguarda le runway, si tratteranno separatamente i decolli e gli atterraggi, notando che non tutte le zone della fascia centrale individuata dallo studio delle dispersioni trasversali sarà sollecitata dai vari carichi, per la presenza della portanza.

Questo aspetto assume un' importanza ancora maggiore se le piste sono utilizzate solo in fase di atterraggio o solo in fase di decollo, perché saranno definite precisamente delle aree che per la specifica manovra non sono utilizzate, se non per eventi incidentali.

Anche questo aspetto non viene in alcun modo preso in considerazione dai software, dunque un'elaborazione come quella proposta in questa tesi, pur rispettando quanto detto dalla AC 150/5320-6E [4] va a migliorare la fase di progetto della pavimentazione, definendo con maggior precisione dove disporre gli spessori maggiori.

1.3 Manutenzione

Il project management è la disciplina utilizzata per la gestione efficace ed efficiente dei progetti. Questo concetto è stato applicato anche in ambito aeroportuale, dove garantire la sicurezza dell'infrastruttura significa mantenere costantemente in buono stato la pavimentazione.

Negli ultimi anni sono state sviluppate diverse ricerche volte a fornire un metodo sistematico per costruire un sistema di gestione della manutenzione che permetta di avere un controllo strutturale e funzionale delle pavimentazioni.

Mantenere in buono stato, rispetto ad eseguire periodiche riabilitazioni su strutture già rovinate, risulta fino a quattro o cinque volte meno costoso (FAA Advisory Circular 150/5380-7A Airport Management System [14]).

Per questo motivo si vuole fornire un metodo completo che riesca ad individuare l'istante ottimale per applicare la riabilitazione ottimale ed aiutare i decisori nel concentrare le risorse a loro disposizione.

In questo contesto si inserisce l'A-PMS, strumento che trova le strategie economicamente più vantaggiose per mantenere la pavimentazione aeroportuale sopra una soglia limite di accettabilità, per un determinato periodo di tempo, fornendo una procedura obiettiva e sistematica nella determinazione delle priorità di intervento e allocazione delle risorse.

Oltre ad avere una rilevanza pratica a livello progettuale e organizzativo, l' A-PMS è ulteriormente importante perché ora fa parte anche del panorama legislativo: per esempio la legge 103-305 del 1995 sezione 107 titolo 49 del codice degli Stati Uniti [15], stabilisce che un ente di gestione aeroportuale, per usufruire del finanziamento federale, deve dimostrare di essersi dotato di un efficace sistema di gestione della manutenzione.

In Italia invece ancora ad oggi è assente una vera e propria norma che permetta ai gestori di seguire delle linee guida nell'uso di tali sistemi, tuttavia anche il nostro paese si sta adattando alla tendenza mondiale e il nostro lavoro di tesi ne è la prova.

Tra gli esempi di aeroporti italiani che hanno adottato l'A-PMS spicca il caso di Aeroporti di Roma S.p.a., Concessionaria esclusiva per la gestione e lo sviluppo del sistema aeroportuale della Capitale che ha implementato un sistema di gestione ad hoc denominato A.I.R.P.O.R.T.S (Airport Information Retrival for Pavement Optimization Rehabilitation Treatment System), in grado di archiviare su base informatica tutte le indagini necessarie alla caratterizzazione del degrado e la loro successiva elaborazione e modellazione [16].

I vantaggi relativi all'uso di un A-PMS riguardano:

- la capacità di fornire una valutazione oggettiva sulle condizioni della pavimentazione studiata,
- individuare e rispettare i limiti di budget in funzione alle caratteristiche prestazionali richieste,

• conservare i risultati in un database facilmente accessibile utile sia per altri interventi riguardanti situazioni simili, sia per facilitare le attività di monitoraggio di quella analizzata.

Gli svantaggi invece sono relativi essenzialmente alla necessità di avere a disposizione molti dati per poter effettuare delle previsioni corrette.

Per la realizzazione di un sistema di gestione della pavimentazione occorre prima identificare e definire la rete da coordinare e successivamente procedere con le seguenti operazioni:

- Rilevamento dei dati;
- Analisi delle informazioni rilevate;
- Costruzione di un data base;
- Elaborazione dei dati;
- Analisi delle possibili strategie;
- Programmazione interventi;

Gli ultimi due punti possono essere sviluppati mediante l'uso di software commerciali o mediante programmi (essenzialmente fogli di lavoro Excel) fatti appositamente per il caso studiato. La scelta dipende dal numero di parametri in gioco e dall'accuratezza del risultato che si vuole ottenere.

1.3.1 Approcci per individuare l'alternativa di manutenzione adatta

Nel passato, le pavimentazioni venivano manutenute ma non amministrate; di fatto i tecnici si avvicinavano al problema del mantenimento in esercizio ricorrendo alla sola esperienza accumulata negli anni di attività e con essa definivano le tecniche di manutenzione e riabilitazione (M&R).

Se da un lato le infrastrutture erano mantenute in buon esercizio, dall'altro non si consideravano per nulla i costi correlati al ciclo di vita né tanto meno venivano fissate delle priorità strettamente connesse alle esigenze della rete viaria oggetto di manutenzione. Tuttavia, in un sistema economico come quello attuale ove le risorse a disposizione sono sempre più limitate, occorre definire un approccio di gran lunga più sistematico e deterministico utile a fissare gli obiettivi a cui convergere con le classiche

e consolidate tecnologie di M&R.

Esistono tre modalità di approccio al problema della manutenzione, che guidano il gestore nella scelta dei trattamenti da predisporre che sono:

• L' intervento ad hoc, che seleziona la soluzione migliore basandosi esclusivamente sull'esperienza passata.

- L'intervento basato sulla condizione presente, ovvero si studia la situazione attuale della pavimentazione, nelle sue caratteristiche di aderenza, rugosità e deformazione e sulla base di queste si pianificano gli interventi per migliorare gli aspetti più carenti.
- L' intervento basato sul costo del ciclo della vita, che studia la pavimentazione sia nella situazione attuale, sia nella situazione futura, utilizzando dei modelli di previsione.

L'ultima soluzione è quella economicamente più vantaggiosa in quanto riesce a calcolare il costo a vita intera di un' opera, ad individuare quale siano i trattamenti da fare e quale sia il momento migliore per effettuarli, trattando l'infrastruttura con un vero processo di gestione che deve essere modellato appositamente per lo specifico caso studiato.

Un approccio del genere è ancor più giustificato, se si considera il fatto che i costi di manutenzione aumentano notevolmente quanto più la pavimentazione è danneggiata.

La Fig 1.3 riporta un tipico modello di degrado in cui si nota come dopo uno specifico punto, i costi di manutenzione aumentino di 4-6 volte, rispetto a quanto si spenderebbe applicando i trattamenti prima del raggiungimento della condizione limite.



Figura 1.3: ciclo di vita e costi per la manutenzione di una pavimentazione tipo

Il Pavement Management System (PMS) è lo strumento di gestione delle pavimentazioni che definisce gli interventi e le priorità di manutenzione e riabilitazione, grazie al suo utilizzo diventa possibile fornire tutte le indicazioni utili a definire in piena oggettività le possibili procedure per una corretta strategia manutentiva, che si attua nel pieno rispetto dei vincoli economici e/o prestazionali. Infine, associando le informazioni ottenute dal sistema di gestione all'esperienza e alla sensibilità dei tecnici, si convergerà ad un certo risultato in termini di durabilità e sicurezza in grado di dare nuovo slancio al sistema.

La logica che sta alla base di un programma di PMS (Fig. 1.4) è basata su un principio di ottimizzazione di tipo "disaggregato" volto a prevedere una strategia di intervento standard per ogni elemento tipo (sezione omogenea) di cui si compone l'infrastruttura.

La disponibilità di dati sperimentali derivanti da prove e rilievi effettuati sul campo e reperiti nel corso del tempo consente di definire le curve di comportamento, e quindi, di effettuare e generare proiezioni su cui tarare e bilanciare, anche da un punto di vista economico, le azioni future di M&R.



Figura 1.4: Schema a blocchi di un PMS

Il risultato finale che si ottiene applicando un sistema di gestione, è la redazione del piano manutentivo delle aree di movimento, che di fatto rappresenta quello strumento utile per pianificare e programmare le strategie di M&R, volte a risolvere le criticità emerse dal sistema e in grado di offrire il raggiungimento di standard operativi tali da garantire livelli di servizio sempre più alti ed in linea con le previsioni economiche e di traffico.

Seguendo le periodicità di prove impostate e partendo dall'analisi dei risultati ottenuti dall'elaborazione del programma di gestione è possibile definire in modo accurato le modalità degli interventi da eseguire, le scadenze entro le quali realizzarli ma, soprattutto, la consistenza economica necessaria per sostenerli.

Tuttavia la manutenzione di un'infrastruttura complessa, quale è l'area di movimento di un aeroporto, è costituita anche da continue ispezioni e prove empiriche che spesso mettono in luce anomalie non programmate alle quali occorre porre immediato rimedio, sia in termini pratici sia di aggiornamento del sistema di gestione.

Pertanto un buon piano di manutenzione deve necessariamente prevedere che esperienza e tecnologia si affianchino, concretizzandosi nella necessità di disporre di tecnici ed operatori esperti, visto che, per quanto sia sofisticato un programma, senza un apporto umano competente, la sua opera sarebbe del tutto inutile o addirittura fuorviante.

L'osservazione diretta in campo da parte dei tecnici e l'osservazione continua dei flussi di traffico sono delle prerogative imprescindibili per realizzare una corretta pianificazione della manutenzione.

1.3.2 Livelli di management

Esistono tre livelli di management, il livello di strategia, il livello di rete e il livello di progetto.

Il primo definisce la politica manutentiva da adottare, il secondo fa un'analisi della rete al fine di capire in che condizioni di degrado si trova e di quali interventi avrebbe bisogno, il terzo studia specificatamente l'effetto di ogni intervento.

E' nella fase di "rete"che che si considerano nell'insieme le problematiche rilevate sull' infrastruttura aeroporto e si propongono soluzioni globali, non allo specifico problema.

Per avere una visione d'insieme si parte facendo un inventario delle pavimentazioni e delle loro condizioni, con riferimento a parametri come l'utilizzo delle stesse (piazzali, piste,ecc..), il materiale costituente, la sua classificazione funzionale, l'età, lo stato rilevato al tempo dell'ultima ispezione.

In genere le valutazioni fatte a questo livello si fondano principalmente su osservazioni visive mentre a livello di progetto si effettuano anche delle misure, controllando i carichi, la regolarità, la resistenza al rotolamento, a cui
eventualmente si aggiungono anche prove distruttive come ad esempio i carotaggi.

Per prendere decisioni a livello di network si utilizzano due metodologie, che sono il **metodo Rankine** e il **metodo dell' ottimizzazione**.

Il primo è quello che viene utilizzato normalmente e si sviluppa andando a definire per tutte le sezioni della pavimentazione le M&R necessarie, sfruttando sempre la tecnica del minore Life Cicle Cost (LCC).

Usare l'ottimizzazione significa invece trattare il problema decisionale come un modello matematico caratterizzato da variabili e condizioni al contorno, che possono essere: budget annuale, limite minimo di qualità che si vuole sempre garantire, massimo numero di sezioni che è in un stato di "non accettabilità". Si cerca quindi una relazione matematica che possa descrivere il processo e si massimizza con i vari metodi disponibili.

A livello di progetto si studiano specificatamente le alternative di M&R individuate nell'analisi di rete che verranno poi sviluppate adeguatamente. Anche in questo caso si predilige, per la scelta tra le alternative possibili di manutenzione, l'analisi life-cycle cost (LCC) che permette di stimare l'impatto economico dei diversi trattamenti in modo da scegliere i più convenienti.

Questo metodo di scelta tra le diverse alternative di M&R per una sezione o per l'intera pavimentazione è il più comunemente utilizzato. Per ogni tipo di degrado, il sistema è in grado di individuare l'alternativa migliore facendo un compromesso tra i benefici ottenibili e il costo dell'intervento.

I costi che rientrano in questo tipo di analisi sono: quello iniziale, il valore attualizzato, che tiene conto anche dei costi che è previsto debbano essere sostenuti in futuro, costo equivalente di ciascuna alternativa, che rappresenta il costo complessivo espresso in valuta attuale ripartito uniformemente in tutta la vita utile, e infine il costo unitario equivalente, dato dal rapporto del costo unitario diviso per lo sviluppo delle superfici di pavimentazione interessate dall'intervento.

Il Life Cicle Cost, non è l'unico metodo di scelta disponibile, esistono infatti anche il "Giudizio ingegneristico", e la "Programmazione dinamica":

- **Giudizio Ingegneristico**: E' una metodologia che è stata molto utilizzata in passato, ora tendenzialmente si preferiscono metodi più oggettivi. Questa modalità di decisione è molto facile da implementare si basa su considerazioni che possono essere espresse per esempio da un albero decisionale oppure da linee guida. Lo svantaggio invece è che i risultati forniti da questo tipo di approccio non individuano chiaramente la soluzione migliore e necessitano quindi di ulteriori valutazioni ingegneristiche.
- **Programmazione Dinamica**: Anche se la programmazione dinamica è utilizzata principalmente come tecnica di ottimizzazione, essa ha un ruolo rilevante anche a livello di pianificazione di progetto. In particolare è il metodo che si abbina alla tecnica Markoviana.

Il processo di degrado viene trattato per step e per ognuno di questi step si trova la tecnica che ne ottimizza la manutenzione. Il risultato di ogni decisione probabilmente non sarà completamente individuato grazie a questa metodologia, tuttavia sarà possibile capire quali conseguenze si avranno per ogni fase studiata e come l'intervento proposto vada ad influire, prima dell'inizio della fase successiva.

Il principale problema legato all'uso della programmazione dinamica è che non si riesce a fornire la soluzione che minimizzi il costo dell'opera a lungo termine, in quanto il metodo considera una situazione per volta e ottimizza basandosi sul minor costo presente.

Le due tipologie di approccio, di rete e di progetto, sono del tutto indipendenti e pertanto possono essere usate singolarmente in diversi contesti, ad esempio nelle realtà in cui vige ancora la politica curativa, tipicamente l'analisi viene svolta a livello di progetto. Ma come già sottolineato tale politica e quindi tale analisi richiedono uno sperpero di risorse ingenti. Ecco perché, nella politica preventiva, con i sistemi di gestione, l'analisi di rete e di dettaglio si trovano a coesistere nell'iter procedurale, seppur a livelli differenti.

1.3.3 Priorizzazione degli interventi

Ci sono due possibilità di intervento, definite dalla disponibilità di denaro da utilizzare a fini manutentivi.

Se il budget è illimitato, stilata una lista di interventi necessari per ogni sezione in cui è stata suddivisa la pavimentazione, si procede alla scelta dell'alternativa che presenta un maggiore rapporto benefici/costi.

Se invece il budget è limitato e i trattamenti necessari lo superano, occorre fare una lista delle priorità in modo da individuare gli interventi più urgenti e organizzare i rimanenti negli anni successivi. Questa metodologia di organizzazione ha il vantaggio di essere semplice da capire, semplice e veloce da implementare.

Il metodo di priorizzazione della manutenzione è stato attentamente studiato [21], si riportano qui di seguito tre modalità di approccio al problema.

La prima si basa essenzialmente sul concetto che si devono prediligere gli interventi su le parti della rete più importanti, caratterizzate dal maggior dissesto. È una procedura che si sviluppa in sei step che sono:

- Selezione del valore limite di PCI: oltre tale valore si devono necessariamente prendere provvedimenti;
- Assegnazione di un valore di "importanza" a tutte le parti pavimentate dell'airside;
- Costruzione di una matrice che contenga le due informazioni di cui sopra;
- Formazione della scala di priorità;

- Controllo delle condizioni strutturali della pavimentazione: si fa per evitare di tralasciare zone strutturalmente danneggia che in superficie però non presentano evidenti danni;
- Scelta finale e redazione di un piano di manutenzione che spalmi gli interventi negli anni successivi.

In questo modo si riescono a combinare informazioni riguardanti il piano economico, funzionale ed ingegneristico.

Gli ingegneri impegnati nell' A-PMS del Department of Trasportation del Canada [22] propongono un altro metodo. Partendo da una suddivisione della pavimentazione in sezioni, si individua il trattamento necessario. Nel caso particolare si sono presi in considerazioni cinque tipi di manutenzione che vengono classificati non solo con il valore di costo relativo all'intero ciclo della vita (C), ma anche con i valori di PCI attuali e ottenibili con una futura applicazione di tali trattamenti.

Si passa poi al calcolo dell'effettività (E) che per un aeroporto è data dalla moltiplicazione di tre fattori, l'area sottesa alla curva delle performance, volume di traffico (in termini di partenze) e l'area della sezione.

Facendo il rapporto tra le grandezze E e C si ottiene il coefficiente CE (Cost-Effectivness) che rappresenta l'alternativa di costo più conveniente e da questa valutazione segue la priorizzazione degli interventi.

Esiste ancora un altro metodo per scegliere gli interventi da fare che si basa solamente sull'indice PCI, ed è in funzione di questo che si stabilisce dove fare e non fare manutenzione. Questo approccio negli anni è stato abbandonato in quanto non considera in alcun modo il rango e l'uso della pavimentazione in esame.

Tra i metodi sopra presentati in ambito aeroportuale si fa spesso riferimento al primo perché risulta più oggettivo, infatti Cost-Effective Method dipende dalla costruzione della curva delle performance (appare nel calcolo di E) che a sua volta dipende da un'analisi delle alternative di intervento.

Questa procedura inoltre dipende in maniera diretta dalla scelta delle sezioni, dalle quali discendono tutte le scelte successive.

1.3.4 Stima della restante vita utile della pavimentazione

Obiettivo della stesura di un A-PMS, come abbiamo già detto sopra, è quello di fornire al decisore gli elementi per poter definire i giusti interventi nei giusti momenti.

Riabilitare una pavimentazione troppo presto infatti comporta uno sperpero di denaro, farlo troppo tardi comporta costi di ripristino molto elevati.

Per completare il discorso e individuare quindi anche il momento ottimale di ogni intervento di manutenzione occorre introdurre un altro concetto che è quello di "vita utile rimanente" [23]. È una grandezza che esprime in termini di tempo o di carichi ancora sopportabili, quanto la pavimentazione è ancora in grado di mantenere la sue caratteristiche di comfort e sicurezza al di sopra di un determinato valore stabilito dal gestore aeroportuale.

È possibile determinare questa grandezza in diversi modi:

- Con un approccio legato ai carichi di traffico. La pavimentazione è progettata per sopportare, in un determinato lasso di tempo, determinati carichi. Conoscendo lo spettro di traffico e omogeneizzando i vari dati, si trovano quanti passaggi possono ancora effettuarsi sopra quella sovrastruttura senza provocare il danneggiamento della stessa.
- Con un approccio legato alle misure di PCI. Dopo aver stabilito un valore di PCI limite, con i modelli predittivi si riescono a calcolare i tempi prima del raggiungimento della condizione critica.
- Con un approccio empirico meccanicistico. In questo caso si associa il danneggiamento della pavimentazioni a particolari misure meccanicistiche, come per esempio valori di sforzo e deformazione. Si usano successivamente delle formule empiriche per correlare le misure fatte con il comportamento previsto della sovrastruttura.

La prima soluzione è la più semplice ed ha il vantaggio di poter essere implementata con dati relativamente facili da reperire, il difetto sta nel fatto che dà una valutazione indipendentemente dalle condizioni superficiali che non vengono in alcun modo rilevate.

Questo aspetto viene risolto se si utilizza l'indice PCI che per sua natura è un indice globale che tiene conto del dissesto superficiale.

Il terzo approccio è quello che sicuramente ha più caratteristiche scientifiche ma ha bisogno di molti dati in ingresso che derivano da misurazioni su campo.

È chiaro che usare un metodo piuttosto che un altro porta a dei risultati diversi. È importante quindi scegliere il metodo più adatto all'analisi da fare. La scelta sarà guidata principalmente dai dati di input disponibili.

1.3.5 Implementazione di un sistema di gestione

Le principali fasi di cui si compone un programma di gestione delle pavimentazione, valido in campo aeroportuale, sono le seguenti:

- raccolta dei dati della pavimentazione ed elaborazione delle condizioni effettive;
- accertamento delle necessità di interventi manutentivi che consistono nell'individuazione dell'aeromobile critico, nella stima dei futuri flussi di traffico e nella creazione di un modello ad hoc con cui simulare i fenomeni di decadimento prestazionale;
- valutazione dell'effetto degli interventi di manutenzione e di riabilitazione effettuati sulla singola sezione in rapporto al comportamento strutturale dell'intera sovrastruttura;

• ottimizzazione del processo che si concretizza nella definizione di una strategia univoca di manutenzione valida per ogni sezione mediante un sistema di specifici algoritmi.



Figura 1.5: Sistema di valutazione delle conseguenze prodotte da soluzioni di M&R

Il primo step , dunque per implementare un sistema di gestione è quello di suddividere le infrastrutture di volo in gruppi omogenei che saranno manutenuti con gli stessi trattamenti.

Si crea con questi dati un database che mette a disposizione tutte le informazioni inerenti una determinata sezione, a cui verrà attribuito un valore di portanza, di spessore, di regolarità, di grado di ammaloramento superficiale e di traffico.

Il PMS utilizza metodi di calcolo prestazionali (meccanicistici), sia strutturali che funzionali, in grado di quantificare le condizioni attuali, prevederne potenziali futuri problemi e suggerire la migliore strategia di manutenzione a breve, medio e lungo termine nel periodo più opportuno.

In questo capitolo dunque si tratteranno le varie fasi appena citate facendo anche un breve cenno ai modelli che sono stati sviluppati per la previsione del degrado, per finire con una panoramica dei trattamenti da poter analizzare nella successiva fase di valutazione degli scenari di intervento.

1.3.5.1 Divisione delle aree

La suddivisione delle aree è progressiva, ovvero partendo dal sistema aeroporto, che viene identificato con il termine "rete", si creano sottounità ulteriori per arrivare ad avere le sezioni che sono gli enti che ai fini manutentivi vengono trattate con le stesse modalità di intervento. In particolare:

• La rete è l'unità più grande all'interno dell'A-PMS che verrà gestita e manutenuta nel suo insieme. Di solito un aeroporto fa parte di un'unica rete.

- **I rami** comprendono le parti di pavimentazione con stessa funzione (per esempio runway, taxiway, apron);
- Le sezioni raggruppano parti con stesse caratteristiche costruttive e di traffico. Sono le unità di gestione per la selezione dei potenziali progetti di M&R.
- Le unità di campionamento identificano le parti per le quali vengono fatte le misurazioni, atte a fornire le informazioni necessarie all'implementazione.

Criteri per la divisione in sezioni

Si distinguono in funzione di:

- Tipo di pavimentazione (flessibili, rigide, semirigide).
- Struttura della pavimentazione (spessori e materiali): può essere ricavata da prelievo di carote e/o esecuzione di prove deflettometriche non distruttive.
- Caratteristiche e proprietà del sottofondo.
- Condizioni superficiali di degrado (tipologia, estensione e causa).
- Presenza di strutture di drenaggio.
- Volume e intensità del traffico.
- Carichi ammissibili e sforzo massimo ammissibile.
- Età della pavimentazione: a causa delle diverse modalità di costruzione e dei materiali, l'età della pavimentazione non indica accuratamente la prestazione della stessa. Può comunque essere usata come indice per catalogare i vari gruppi.
- Storico delle attività manutentive.

I dati sono conservati in banche dati e si distinguono in due categorie che sono, i dati di inventario e i gli altri dati relativi allo stato e alle prestazioni della sovrastruttura.

La principale differenza risiede nel fatto che i primi forniscono report che risultano essere praticamente permanenti, i secondi invece vengono periodicamente aggiornati.

La caratteristica principale dell'elemento sezione è l'omogeneità e una divisione corretta della pavimentazione è fondamentale per ottenere risultati attendibili, nasce quindi il problema di capire quante sezioni fare e quanto grandi.

Queste infatti non devono essere troppo poche al fine di riuscire a modellare tutti gli aspetti influenti, ma neanche troppe, perché dato che ad ogni sezione corrisponde un trattamento diverso di manutenzione, si avrebbero delle difficoltà nella realizzazione dei lavori. Criteri per la divisione in unita' di campionamento

Le unità di campionamento vengono utilizzate per caratterizzare la zona analizzata e definire quante volte e dove è necessario fare le indagini di campionamento. Sono i sottoinsiemi che costituiscono ogni sezione.

La scelta di queste entità ha molta importanza perché influisce in maniera diretta sulla precisione dei risultati.

La norma D5340 dell'ASTM indica le dimensioni delle unità di campionamento usate in ambito aeroportuale che sono:

- Per sovrastrutture in conglomerato bituminoso: $5000 \pm 2000 \text{ ft}^2$;
- Per sovrastrutture in calcestruzzo con spazio tra i giunti minore di 25 ft : 20 ±8 lastre;
- Per sovrastrutture in calcestruzzo con spazio tra le lastre maggiore di 25 ft: si immagina che ci sia stato un distanziamento, ma che in origine questo fosse adeguato (25 ft o meno). Si ritiene per ipotesi che le lastre siano state in condizioni perfette. La dimensione quindi dell'unità di campionamento deve essere tale che ci sia uniformità di IRI.

Questi campionamenti servono per avere una descrizione veritiera della condizione attuale della pavimentazione sia negli aspetti riguardanti la struttura, sia in quelli riguardanti la funzionalità.

1.3.5.2 Acquisizione dati

Per ogni sezione individuata, occorre conoscere tutto ciò che la caratterizza: dimensioni, traffico, condizioni climatiche dell'infrastruttura a cui appartengono, caratteristiche meccaniche degli strati e loro successione ecc, ricavabili con prove specifiche o consultabili dai dati di archivio dell'aeroporto.

I risultati che si ottengono dalle attività di monitoraggio di queste entità spaziali, devono essere sintetizzati in valori numerici, ovvero in indici che possano rendere più semplice un confronto tra le varie sezioni. Questi indici riguardano due aspetti, quello strutturale e quello funzionale.

I primi misurano tutti quei dissesti che hanno una causa profonda, nel senso che sono legati ad un'inadeguatezza della pavimentazione a sopportare carichi di traffico per un determinato periodo di tempo.

• Gli indicatori utilizzati per misurare e classificare questo tipo di problemi riguardano la valutazione della capacità portante.

Questa grandezza si valuta in aeroporto essenzialmente con l'indice SAI di adeguatezza strutturale che fa uso della classificazione ACN/PCN. L'ACN (Aircraft Classification Number) esprime l'effetto prodotto da un aeromobile su una pavimentazione con un determinato PCN (Pavement Classification Number) indicante il carico che può essere sopportato dalla pavimentazione senza limitazioni operative. Riguardo la portanza del sottofondo occorre invece far riferimento ad altri indici che sono il modulo di deformazione (E), il CBR e il modulo di reazione (K) di Westergaard.

Gli indici relativi alla funzionalità si riferiscono alla capacità della sovrastruttura di fornire ai veicoli transitanti le caratteristiche di comfort e sicurezza in relazione alla velocità di percorrenza prevista. Gli indicatori che si utilizzano in questo caso sono relativi a grandezze come la regolarità superficiale e l'aderenza. A tale proposito si citano tra gli indici di regolarità l'IRI (International Roughness Index), il RMSVA (Root Mean Square of Vertical Acceleration), il PSD (Power Spectral Density) e la SV (Slope Variance), per l'aderenza lo SN (Skid Number).

È opportuno suddividere ancora questi indici in "**specifici**" o "**sintetici**", in modo da distinguere tutti quelli che indagano una sola caratteristica e quelli che invece forniscono un quadro più globale della situazione della sovrastruttura.

Gli indici citati sopra sono tutti specifici; tra gli indici sintetici invece troviamo il PSI (Present Serviceability Index), il PCI (Pavement Condition Index) e il CDF (Cumulative Damage Factor).

Gli indici più importanti (PCN, PCI, IRI e CDF) per la nostra trattazione sono descritti dettagliatamente nell'Allegato A. Si rimanda per il CDF, al paragrafo 1.2.3.1.

In questa sede si accenna solo brevemente a cosa è il PCI, per rendere più chiara la trattazione del processo manutentivo.

1.3.5.2.1 PCI (Pavement Condition Index)

È l' indice maggiormente utilizzato in ambito aeroportuale, esso infatti dà una valutazione globale dello stato di salute della pavimentazione.

L'Army Corps Of Engeneers nella seconda metà degli anni 70, ha elaborato un metodo di valutazione del PCI che è stato poi adottato dalla maggior parte degli istituzioni internazionali aeroportuali quali ICAO e FAA. In particolare nella norma ASTM 5340 viene descritta dettagliatamente la procedura di calcolo.

Il PCI è un indice numerico di valore compreso tra 0 e 100 che definisce le condizioni operative della pavimentazione, ove lo stato 0 rappresenta uno stato di "failure" e lo stato 100 la "good condition" (Fig. 1.6).

La procedura che porta alla definizione dell'indice PCI si basa su un'indagine visiva della pavimentazione attraverso la quale vengono identificate essenzialmente tre caratteristiche principali degli ammaloramenti ovvero: la loro caratterizzazione tipologica, il loro grado di severità e la loro quantità rapportata al sistema. Tale indagine deriva dalla determinazione delle unità campione (sample units), ovvero delle porzioni definite di pavimentazione entro le quali svolgere la successiva fase di analisi e di rilevazione degli ammaloramenti e caratterizzate da analogie di tipo strutturale e di distribuzione dei carichi.

Le informazioni ottenute sono volte a determinare le cause che hanno portato ad uno stato degenerativo della sovrastruttura; esse in linea generale si possono mettere in stretta relazione alle condizioni di carico, ovvero ad una situazione di fatica del sistema e/o alle condizioni climatiche che caratterizzano il sito oggetto di analisi.

Appare quindi necessario definire un'attenta classificazione dei vari tipi di degrado individuabili e, per ognuna di queste classi, assegnare un valore numerico strettamente e contemporaneamente legato sia al grado di severità sia alla densità sulla superficie. Di fatto ognuna delle caratteristiche sopra definite diventa una unità del giudizio che ne deriva dalla loro analisi, vengono introdotti dei valori così detti "dedotti" ovvero dei valori pesati che vanno ad indicare l'effetto indotto dalle tre variabili sulla pavimentazione.

I valori dedotti o *deduct value*, sono frutto di studi molto ampi ed approfonditi circa il comportamento delle pavimentazioni ed essi derivano dalle sperimentazioni, dalle prove effettuate in campo ma soprattutto dall'esperienza dell'ingegneria stradale che ha portato ad una classificazione dei vari fenomeni di degrado e, di conseguenza, alla realizzazione delle procedure per la rilevazione e la definizione dei valori dedotti ad essi associati in base alla gravità.



Figura 1.6: PCI e scala delle condizioni operative di una pavimentazione

In conclusione il valore dell'indice PCI relativo ad uno specifico insieme di sezioni omogenee sarà pari alla media algebrica degli indici delle singole sezioni. Se da un lato l'indice PCI garantisce la possibilità di ottenere, anche in modo automatizzato, riscontri oggettivi e precisi con campi di validità molto ampi visto il riconoscimento ufficiale da parte delle convenzioni internazionali, i limiti propri di questo indice si riassumono nella necessità di delegare ad aziende terze l'esecuzione dei rilievi in quanto occorrono tecnici dotati di esperienza. Questo limite, che essenzialmente è di natura economica, presuppone la necessità di

svolgere le campagne di rilievo con periodi superiori all'anno e quindi non consente di effettuare con continuità ed attenzione la valutazione dello stato di degrado delle infrastrutture. A tutto questo si devono necessariamente affiancare anche una serie di procedure volte a condurre un'attenta ed efficace gestione ed analisi delle infrastrutture nel quotidiano.

Al contempo, tali metodologie devono essere in grado di fornire una valutazione preliminare dello stato di servizio del sistema pavimentato che verrà poi suffragato dalle successive e programmate campagne di prove ufficialmente riconosciute dal programma pluriennale di controllo e manutenzione.

1.3.5.3 Modelli di degrado

Come già citato, per implementare un sistema di gestione delle pavimentazioni è necessario disporre di informazioni molto precise al fine di ottenere dei risultati attendibili. Le indagini da fare tuttavia non vengono fatte tutte nello stesso momento, occorre quindi avere a disposizione dei modelli di previsione che siano in grado di proiettare le condizioni misurate in passato, alla situazione presente o futura, prevedendone il comportamento.

Questi modelli devono quindi consentire di valutare le conseguenza che ciascuna delle alternative di M&R individuate ha sul comportamento futuro della pavimentazione; deve inoltre fornire dati di valutazione anche nel caso in cui sia previsto che lo scalo venga impegnato nel futuro da carichi e traffici diversi da quelli attuali.

L'evoluzione degli ammaloramenti, è sempre descritta dall'evoluzione di indici, che rappresentano le condizioni strutturali e operative della sovrastruttura, di cui il più utilizzato è il già citato PCI.

Modelli di questo tipo si prestano bene non soltanto per le previsioni sull'evoluzione del degrado della pavimentazione, ma anche per le previsioni di budget di spesa, aiutando significativamente il decisore nelle scelte di manutenzione, in funzione delle condizioni climatiche e di traffico previsto, basandosi su analisi di tipo Life-Cycle Cost per confrontare le diverse alternative di M&R.

Sono state sviluppate diverse tecniche per la modellazione del degrado, presenti nei software utilizzati nel Pavement Management System, quali:

• Estrapolazione di linee rette: è il metodo più semplice finora proposto. Si basa sul tracciamento di una retta collegante due "punti di misura". Il Primo rappresenta la condizione iniziale della pavimentazione al momento della fine della costruzione, il secondo è riferito al momento dell'ispezione.

La caratteristica principale del metodo è quella di considerare sia il traffico sia la manutenzione precedente perduranti come nel passato.

Solitamente viene usato questo sistema quando non è noto se il tasso di deterioramento è destinato ad aumentare o diminuire (Fig. 1.7).



Figura 1.7: Incertezza sulla positività del tasso di deterioramento

L'estrapolazione di linee rette sebbene fornisca risultati piuttosto accurati per previsioni a breve termine, risulta scadente a lungo termine. Questo metodo può essere applicato ad una sola sezione e non può essere preso a riferimento come modello da utilizzare per tutte le sezioni di pavimentazione.

- Regressioni: è un modello che fa uso delle variabili statistiche media e varianza e crea una relazione matematica in cui compare una variabile dipendente Y, che indica la condizione di interesse, e una variabile indipendente X che di solito rappresenta il tempo dall' ultima riabilitazione della pavimentazione. La funzione trovata è frutto di un'approssimazione che si fonda sull'utilizzo del metodo dei minimi quadrati.
- Sistemi Empirico Meccanicistici: Sono modelli di previsione che combinano le tecniche di regressione (empiriche) con la risposta della pavimentazione che è calcolata in termini di sforzi, deformazioni e deflessioni, con un approccio prettamente meccanicistico.
- Polinomio dei minimi quadrati vincolati: Questa è una delle più potenti tecniche per predire il cambiamento di una variabile Y (PCI, IRI,...) in funzione della variazione della variabile indipendente X (Età, Traffico,...). Dato un polinomio di grado 'n' nel caso ad esempio dello studio dell'andamento del 'PCI vs. Age' bisogna imporre che la pendenza della funzione non sia mai positiva. Pertanto sarà necessario imporre dei vincoli sugli 'n' coefficienti del polinomio seguente:

$$P(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots + a_n x^n$$
(1.3)

In particolare i coefficienti verranno determinati imponendo che l'errore sia minimizzato. I vincoli che vanno imposti invece riguardano: il valore iniziale del PCI (100), pertanto $a_0=100$ e la pendenza quindi $P'(x) \leq 0$.

- Curve ad S: Sono curve utilizzate per la pianificazione delle varie alternative di M&R. I dati necessari alla definizione di queste curve fanno riferimento alla costruzione, alla manutenzione e riabilitazione già effettuata sulla pavimentazione in esame. Di solito rappresentano una relazione tra la probabilità di degrado della sovrastruttura e il tempo. Esprimono la percentuale di pavimentazione che rimane in servizio in un particolare momento, senza adottare ulteriori provvedimenti manutentivi o riabilitativi.
- Distribuzione delle probabilità: Particolari condizioni della pavimentazione, come per esempio l'IRI o il PCI possono essere trattate come variabili casuali che seguano una legge di distribuzione di probabilità. Quest'ultima associa ad ogni valore della variabile X la corrispondente probabilità di accadimento Y.

Per esempio se la variabile casuale fosse il PCI la sua distribuzione di probabilità può essere descritta dalla sua funzione di distribuzione cumulata, come mostrato in Fig. 1.8.



Figura 1.8: Andamento della distribuzione cumulata per la variabile PCI

L'utilizzo di tale metodo tuttavia è funzione della disponibilità della curva di distribuzione, senza la quale non è possibile fare previsioni.

È un modello particolarmente adatto alla previsione di singoli tipi di degrado.

Tecnica Markoviana: Si fonda su una scala di misura del degrado, in cui ogni scalino rappresenta uno "stato di salute" della pavimentazione. Si associa ad ogni stato la probabilità che la pavimentazione in un determinato periodo della sua vita si trovi proprio in quello stato. In altre parole occorre determinare la probabilità, associata ad una sovrastruttura in una certa condizione, di permanere in quello stato o di deteriorare verso lo stato successivo dopo un ciclo di utilizzo.

Questo procedimento prevede la costruzione di una matrice di transizione in cui si raccolgono tutte le probabilità, grazie a questa è possibile trovare i vettori di stato che descrivono l'evoluzione della pavimentazione ciclo per ciclo di utilizzo che di solito è assunto pari ad un anno.

1.3.5.4 Tipi di sistemi di gestione

Ci sono in commercio svariati sistemi di gestione, creati principalmente per la gestione di reti stradali. Nell' ambito aeroportuale lo sviluppo è piuttosto scarso e questo principalmente è dovuto a diversi fattori quali: l'uso preponderante della manutenzione curativa nel passato che quindi non richiedeva l'analisi fornita dall'A-PMS, la mancanza di consenso tra gli esperti del settore e le procedure e strumenti in parte inadeguati a rappresentare la vasta conoscenza ed esperienza degli esperti.

Sebbene sistemi computerizzati per la manutenzione delle pavimentazioni esistano e si usino già dagli anni '80 questi sono stati principalmente rivolti alla rete stradale, solo negli ultimi tempi si è sentita la necessità di applicare gli stessi concetti anche all'ambito aeroportuale.

Con i metodi descritti sopra questi software sono in grado di ridurre il problema ad un modello di cui si può avere l'ottimo. Hanno il vantaggio di essere ripetibili, poco costosi e aggiornabili, mentre i criteri di giudizio utilizzati senza un programma di questo tipo, sono deperibili, difficili da trasferire e documentare, imprevedibili e costosi.

In sostanza sono stati concepiti per affiancare la figura dell'ingegnere nell'identificare il dissesto con le cause che lo hanno determinato, vagliare le diverse alternative di intervento, fornire informazioni sul budget e infine scegliere l'alternativa migliore.

I principali software utilizzati in ambito aeroportuale per la gestione della manutenzione sono il PAVER e l'AIRPACS.

AIRPACS (Airfield Pavement Consultant System):

E' stato sviluppato per la progettazione di pavimentazioni aeroportuali in calcestruzzo. Si basa sulla conoscenza e l'esperienza di progettisti, costruttori ed enti di gestione. Tale approccio concentra la propria attenzione sugli aspetti funzionali, strutturali, operativi e di sicurezza legati all' infrastruttura.

Le varie parti dell'aeroporto vengono studiate singolarmente, separando dunque, la pista dalle vie di rullaggio e dai piazzali e proponendo per ognuna di queste l'intervento più adatto da confrontare infine con il metodo del LCC.

Il sistema ricorre all'uso di teorie meccanicistiche, euristiche o empiriche per selezionare gli spessori di trattamento, mentre la valutazione della superficie pavimentata viene fatta considerando 15 tipi di dissesti

PAVER:

Il sistema PAVER ottimizza l'utilizzo dei fondi stanziati per la manutenzione e la riabilitazione delle sovrastrutture di opere come strade, parcheggi e aeroporti.

Viene utilizzato sia per le pavimentazioni flessibili sia per le rigide. Si basa sull'indice PCI ed è in funzione di questo dato che si classifica lo stato della pavimentazione prima e dopo gli eventuali interventi possibili.

Per le flessibili, il PAVER considera 16 tipi di dissesti di superficie, mentre per le rigide ne considera 15. Sono tre i tipi di strategie manutentive (manutenzione di routine, manutenzione estesa e ricostruzione).

In considerazione dell'aumento di utilizzo di questo software, sembra opportuno dare qualche informazione in più sullo sviluppo che ha subito negli anni, che lo ha portato ad imporsi praticamente come unico software per l'implementazione dei PMS.

Creato dall' Army Corps of Engeeners alla fine degli anni '70, ha l'obiettivo di ottimizzare l'allocazione dei fondi per le varie attività manutentive, utilizzando come indice di "salute" il PCI, che nel 1999 diventa un indice riconosciuto a livello mondiale, perché adottato dall'ASTM.

Dopo l'introduzione nel mercato della prima versione 1.0, il MicroPaver, versione commerciale del PAVER, ha subito numerosi aggiornamenti, si citano di seguito alcune delle modifiche principali: nella versione 3.0 si è introdotto un nuovo metodo per il calcolo del PCI, nella versione 3.2 si è reso compatibile il software con il nuovo sistema operativo Windows abbandonando il DOS.

Il MicroPaver 4.2 mette a disposizione una banca dati più grande, per rappresentare al meglio le ispezioni e quantificare le condizioni della pavimentazione.

La versione 5.0 è quella che però ha portato le maggiori modifiche, con miglioramenti sostanziali che prevedono per esempio la possibilità per l'utente di scegliere quali condizioni analizzare e in quali periodi, in modo da visualizzare nei report solo le informazioni volute.

Sebbene l'indice maggiormente usato per rappresentare il dissesto della pavimentazione era e rimane il PCI, questa versione del software permette di definire altri indici per le sezioni dell'area studiata. A questo si aggiunge anche la migliore interfaccia grafica che permette una più semplice comprensione del programma.

Riguardo a questo argomento, si introduce la nuova tecnologia che integra il MicroPaver con il sistema GIS. Ciò permette di visualizzare su un disegno georeferenziato, non solo le condizioni assegnate per le diverse sezioni in cui è stata divisa la pavimentazione ma anche i risultati che si vogliono vedere rappresentati.

Un' applicazione di quanto detto sopra è stata fatta al Washington Dulles International Airport [26], per il quale si è fatto un piano di manutenzione sia a breve che a lungo raggio.

L'aeroporto infatti ha un traffico in continua crescita e gli ingegneri impegnati nella manutenzione hanno voluto avere in ogni momento sotto controllo gli effetti di tali sollecitazioni, in modo da poter dare delle previsioni di costo più precise possibili.

Ciò è stato possibile grazie all'uso del GIS, che ha fornito in tempo reale le condizioni della pavimentazioni in termini di PCI, rappresentandole sulla carta dell'aeroporto con diversi colori.

- Verde: (PCI 71-100) pavimentazione in buona salute, si effettua solo la manutenzione di routine e i lavori vengono programmati durante la notte, in modo da tenere più bassi i costi.
- Giallo: (PCI 41-70) pavimentazione ammalorata, si deve intervenire con provvedimenti che fermino il degrado, si prevedono lavori di notte per il 90%, e lavori di giorno con fermo del traffico per il 10%.
- Rosso: (PCI 0-40) pavimentazione fortemente ammalo rata, si prevede la ricostruzione.

Questo studio si è dimostrato effettivamente utile perché ha permesso di fare un programma di manutenzione basato su costi e tempi realistici.

Un altro esempio di questo tipo di gestione è lo SHAPMS [27] che è l'A-PMS dell'aeroporto di Shanghai, che citiamo qui, per sottolineare l'aspetto legato all'uso del GIS (Geographical Information Systems) e del GPS (Global-Positioning-System).

Nella fase di raccolta dati, il GIS e il GPS lavorano insieme, con l'ausilio di un palmare o pc portatile, si possono infatti realizzare cartografie GIS, attraverso l'uso della tecnologia GPS.

È possibile quindi effettuare rilievi sul dissesto in tempo reale laddove necessario. Il ricevitore GPS comunica con il PC tramite Bluetooth le informazioni relative alle condizioni della pavimentazione con un limite di precisione di \pm 50 cm, questo comporta una disponibilità di informazioni immediata, che permette di sapere quali dissesti interessano l'area studiata e in che misura.

Questo studio ha dimostrato come si possano ridurre i tempi dedicati alle ispezioni, le quali non possono essere del tutto eliminate, ma diventano parte di un processo automatizzato. Ciò porta non soltanto ad un risparmio economico, ma anche ad un minor impatto sulle operazioni aeroportuali che vengono chiaramente disturbate dalle attività legate alla manutenzione.

1.3.5.5 Trattamenti

Le strategie manutentive a disposizione del gestore aeroportuale sono molteplici, diverse sia come risultati ottenibili, sia come costi da sostenere. Una classificazione molto semplice divide i tipi di manutenzione in due grosse branche: quella correttiva e quella preventiva.

I trattamenti correttivi sono in genere dei trattamenti localizzati che vanno ad eliminare un danno che già c'è, con un dispendio di risorse molto elevato, quelli preventivi invece cercano di tenere ad un buon livello la pavimentazione applicando costantemente degli "accorgimenti" in grado di aumentare la vita utile della pavimentazione.

I fattori che determinano la scelta di ricorrere ad un tipo di manutenzione piuttosto che all'altra riguardano l'urgenza della riparazione, la possibilità di ricorrere in un primo tempo a misure preventive in grado di arrestare il progredire del dissesto e secondariamente ad interventi definitivi, il budget economico di cui si dispone e l'impatto di un'eventuale chiusura al traffico.

E' possibile dividere gli interventi di manutenzione e riabilitazione delle pavimentazioni in tre macrocategorie: localizzati, estesi e radicali.

Per la trattazione completa dei trattamenti da applicare in fase di manutenzione si rimanda all' Allegato B.

Per ogni intervento il programma di A-PMS definisce il relativo costo unitario e specifica l'elenco dei difetti che l'intervento risolve nonché l'eventuale difetto residuo a seguito della lavorazione, così da poter avere un quadro economico tale da trovare l'alternativa economicamente più vantaggiosa.

"Prevenire è meglio che curare", è una frase che si adatta bene al caso della manutenzione di una pavimentazione aeroportuale.

Si è visto in questo capitolo come negli anni l' approccio a questa problematica sia cambiato, e come la gestione di una sovrastruttura possa essere affrontata in diversi modi, soprattutto considerando che i costi sono alti e il budget è quasi sempre limitato.

Una divisione in sezioni capace di rappresentare le varie condizioni di carico a cui la pavimentazione è sottoposta è dunque la maniera migliore per concentrare gli interventi di manutenzione in zone specifiche.

Si vuole quindi avere un' immagine della sollecitazione dei carichi, per poter distinguere sia in senso longitudinale sia in senso trasversale quali sono le parti di pavimentazione sottoposte a maggiori sforzi.

Anche nel caso della manutenzione, come nella progettazione, l'analisi dell'andamento dei carichi e delle dispersioni trasversali fornirà un nuovo approccio per un miglioramento delle tecniche esistenti, concentrato soprattutto nella fase della divisione in sezioni.

2 Distribuzione dei carichi aeroportuali

<< Le piste di volo sono gli elementi infrastrutturali dell'aeroporto sui quali si svolgono le operazioni di decollo e di atterraggio degli aeromobili. >>

2.1 Introduzione

Sulle infrastrutture aeroportuali si trovano diversi tipi di carichi, quelli degli aeromobili e quelli stradali dei mezzi di handling. I carichi maggiori sono sicuramente quelli degli aeromobili, in particolare nella fase di decollo.

La distribuzione dei carichi sulla pavimentazione varia a seconda della manovra eseguita dagli aeromobili: se questi sono sulla piazzola di sosta (docking bay) il carico è massimo e statico, pertanto risulta più gravoso per la pavimentazione, allo stesso modo quando l'aeromobile giace in attesa in testa pista o sulle taxi way a seguito di uno stop ricevuto dalla torre di controllo. Negli altri casi l'aeromobile è in movimento, per tanto il carico viene ripartito lungo il percorso seguito dall'aeromobile sulle taxi way o sulla pista e permane per un tempo più breve in uno stesso punto. Lungo la pista, per la fase di decollo, il velivolo incrementando la velocità aumenta anche la forza di portanza che consente di ridurre il carico sull'infrastruttura.

Per la fase di atterraggio, si ha un carico inferiore rispetto al decollo in quanto si è consumata una notevole quantità di carburante e la distribuzione dei carichi su pista risulta opposta rispetto al decollo: alla toccata si ha un carico inferiore rispetto all'ingresso nella taxi way assegnata, a causa della progressiva riduzione della portanza con il decremento della velocità.

In questo capitolo si vuole studiare la distribuzione dei carichi sulle pavimentazioni aeroportuali, variabili in relazione alle condizioni di moto del velivolo, per poter meglio individuare le zone della pavimentazione più caricate e quindi più sollecitate, per poter migliorare la progettazione delle infrastrutture ed anche la loro manutenzione, in quanto si potranno concentrare le energie e le risorse disponibili (in genere limitate) su zone ben precise della pavimentazione aeroportuale più soggetta a danni per ripetizioni di carico.

<u>Nota</u>: i dati che verranno riportati come esempio fanno riferimento ad un Boeing 747-400 in quanto è uno dei velivoli più presenti ad oggi nelle compagnie aeree mondiali e si ritiene possa essere sufficientemente rappresentativo per tutti gli aerei di grosse dimensioni.

2.2 Coefficiente di portanza

Si definisce portanza (spesso abbreviata con la lettera L, dalla parola inglese *Lift*) la componente della forza aerodinamica globale calcolata in direzione perpendicolare alla direzione della velocità. Non è una forza reale ma un'espressione matematica utilizzata per semplificare i calcoli essendo la forza aerodinamica l'unica forza reale risultante dalle azioni aerodinamiche.

Comunemente associata all'ala di un aeroplano, la portanza è generata anche dal moto delle pale del rotore principale di un elicottero, dalle vele e dalla chiglia di una barca a vela, dagli aliscafi o dagli alettoni di un'automobile da corsa. Nella meccanica del volo è la forza che permette il sostentamento in volo di un velivolo o un uccello, quando questa risulta maggiore o uguale alla forza di gravità.

Il valore della portanza dipende da numerose caratteristiche: profilo alare, superficie complessiva delle ali, inclinazione delle ali rispetto alla direzione del moto ossia l'angolo d'attacco (in inglese *angle of attack*, abbreviato AoA, chiamato anche α) in fluidodinamica indica l'angolo con cui un profilo alare fende un fluido, è l'angolo tra l'ala e il vento relativo. In particolare si definiscono:

- angolo d'attacco geometrico: angolo formato dalla corda del profilo alare, con la direzione del flusso incidente;
- angolo d'attacco aerodinamico: angolo formato dalla linea di portanza nulla del profilo alare, con la direzione del flusso incidente.

L'angolo d'attacco è fondamentale nello sviluppo delle forze dinamiche di portanza e resistenza. Quando questo angolo non supera un certo valore, un aumento dell' AoA dà luogo a un aumento di portanza. Questo aumento continua fino a che subentra lo "stallo" cioè fino quando l'aumento dell'AoA causa una inversione di portanza.



Figura 2.1: Variazione del coefficiente di portanza in funzione dell'angolo di attacco, al picco si raggiunge la condizione di stallo da cui poi l'inversione della portanza

Il termine in italiano è sinonimo di angolo di incidenza e non va scambiato con l'angolo di calettamento, (in inglese chiamato *Angle of incidence*, fatto che dà luogo a non rara confusione), che definisce invece l'angolo geometrico di giunzione tra il profilo alare e l'asse geometrico di riferimento (l'asse longitudinale di un velivolo, l'asse di un'elica) e perciò indipendente dalla direzione di provenienza del flusso.



Figura 2.2: Angolo di attacco

La forza di sostentazione, ossia la portanza, viene calcolata come:

$$L = P[N] = \frac{1}{2} \cdot C_L \cdot \rho \cdot S \cdot V^2$$
(2.1)

In cui si considera

 ρ [kg/m³]= 1,225 pari alla densità dell'atmosfera standard;

 $S[m^2]$ = superficie alare dichiarata dal costruttore, variabile per tipologia di aereo;

V [m/] = velocità considerata su pista;

 C_L [/] = coefficiente di portanza (lift coefficient)

Si può esprimere lo stesso concetto con la formula:

$$C_L = \frac{F}{q_d \cdot S}$$

(2.2)

In cui q_d è la pressione dinamica di volo:

$$q_d = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \tag{2.3}$$

Il coefficiente di portanza cambia a seconda dell'angolo di attacco dell'ala, il quale può essere variato utilizzando le parti mobili dell'ala (flap, alettoni,... vedi capitolo 1.3). Per questo motivo, è complesso stabilire a priori un valore del coefficiente che potrà essere utilizzato nella fase di decollo, in quanto si ha

comunque una stretta dipendenza dalle condizioni ambientali, meteo e di altitudine.

Il coefficiente di portanza dipende dall'angolo di attacco e di deriva (imbardata), dai numeri di Mach e Reynolds e dalla forma del velivolo.

<u>Nota 1:</u> L'angolo di deriva è l'angolo tra la fusoliera dell'aeroplano e il vento relativo mentre l'aeroplano è visto da sopra. Imbardata è il termine che il pilota usa per descrivere l'aereo che gira a sinistra o a destra, è quindi un movimento laterale dell'aereo. Normalmente un aeroplano vola senza imbardata.

<u>Nota 2</u>: Il numero di Mach è un parametro adimensionale che indica l'importanza della comprimibilità di un fluido nei fenomeni fluidodinamici; viene espresso come il rapporto tra una velocità di flusso di riferimento ed una velocità di suono di riferimento (tipicamente quello udibile dall'uomo). Da qui la definizione di tre regimi di moto: subsonico (M < 1), sonico (M = 1), supersonico (M > 1).

<u>Nota 3</u>: il numero di Reynolds è un parametro adimensionale, che indica l'importanza della viscosità di un fluido nei fenomeni fluidodinamici; definito dal rapporto tra il prodotto di una densità di riferimento per una velocità di flusso di riferimento per una lunghezza di riferimento, ed una viscosità di riferimento. Da qui la definizione di due regimi di moto: laminare e turbolento. Il valore critico Re_{cr} per la transizione da regime laminare a turbolento dipende dal problema specifico e dalla scelta della lunghezza caratteristica. Si aggira normalmente nell'intervallo $10^2 - 10^4$. Và detto che la transizione tra i due regimi non è necessariamente brusca e può comportare un intervallo di valori a cavallo di Re_{cr}. Il valore del numero di Reynolds di volo normalmente si aggira tra 10^6 e 10^8 , che corrispondono a condizioni di regime turbolento. Per numeri di Reynolds bassi $(10^0 - 10^2)$ il flusso nello strato limite è governato dalle forze d'attrito viscoso che sostanzialmente dissipano l'energia connessa alle piccole perturbazioni di velocità e pressione, impedendo a queste perturbazioni di diffondersi.



Figura 2.3: Schematizzazione dell'angolo di deriva

L'entità delle forze aerodinamiche cresce linearmente con la pressione dinamica e con le dimensioni superficiali del velivolo, a parità di valori assunti dagli angoli di incidenza e deriva, dai numeri di Mach e Reynolds e a parità di forme.

Una conseguenza fondamentale di tali considerazioni consiste nel fatto che due velivoli identici nelle forme, ma non nelle dimensioni (esempio due modelli in scala) immersi, a parità di angoli aerodinamici, in flussi diversi per velocità, densità, temperatura e viscosità, ma tali da fornire stessi valori dei numeri di Mach e Reynolds, sviluppano coefficienti di forza (C_L) identici.

In definitiva si può schematizzare la dipendenza del coefficiente di portanza come:

$$C_L = C_L(\alpha, \beta, M, Re, forma)$$

(2.4)

Una formula che definisce la portanza è la seguente:

$$C_{L/\alpha} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda}{2 + \sqrt{4 \cdot \frac{\lambda^2}{k^2} \beta^2 \left(1 + \frac{(tg\Lambda c_{/2})^2}{\beta^2}\right)}}$$

(2.5)

Nella quale:

- λ è l'allungamento alare, una delle caratteristiche geometriche di un'ala aeronautica, definito come il rapporto tra l'apertura alare e la corda alare media o tra il quadrato dell'apertura alare e la superficie alare;
- $\beta = \sqrt{1 M_{\infty}^2}$ in cui M_{∞} indica il numero di Mach asintotico della corrente:
- $k = \frac{C_{L/\alpha}^{MACH}}{2\pi}$ in cui C^{MACH}_{L/\alpha} indica la pendenza della curva del profilo;
- Λ indica l'angolo di freccia, in questo caso a metà corda (c/2).



Fig. 12.5 Lift curve slope vs Mach number.

Figura 2.4: Variazione del coefficiente di portanza in funzione del numero di Mach

2.3 Manovra di decollo

2.3.1 Meccanica del volo – fase di decollo

L'operazione di decollo si può riassumere nelle seguenti fasi:

- uscita dalla taxi way e seguente allineamento su pista,
- corsa al decollo (rullaggio),
- fase di rotazione,
- fase di involo. Quest'ultima procedura vede l'aereo staccato dalla pista ed intento ad effettuare la fase di salita.

Per definizione il decollo comprende tutte le procedure di rullaggio su pista, quindi incremento di velocità, salita fino ad un'altezza di 35 ft (10,668 m) per gli aerei commerciali, 50ft (15,24 m) per quelli militari.

Durante la procedura di decollo l'aereo incrementa la propria velocità fino ad un valore tale per cui possa avere una adeguata portanza e quindi realizzare l'involo. Quando l'aereo è a terra infatti, le forze a cui è soggetto sono: il peso proprio, la forza di spinta fornita dalle eliche o dai reattori (aerei a getto), le resistenze di attrito a cui l'aeromobile deve far fronte (rotolamento su pista dipendente dalle condizioni e dal tipo della pavimentazione, resistenza aerodinamica, resistenza del vento traverso o contrario all'avanzamento dell'aereo,...)e la portanza, fondamentale per consentire la fase finale di decollo.



Figura 2.5: Forze agenti sul velivolo

Nella fase di corsa a terra si considera costante l'angolo di attacco (predisposto dal pilota nella fase di allineamento alla pista e rullaggio), mentre varierà dopo la fase di stacco dalla pista con la salita (*climb*) dove verranno movimentati gli apparati mobili dell'ala (flap e slat) che sono in grado di modificare il profilo in modo tale che si incrementi la portanza molto rapidamente per raggiungere la quota altimetrica (flight level) di crociera, anche a velocità relativamente basse.



Figura 2.6: Organi mobili dell'ala

LEGENDA: Superfici di controllo su un'ala:

- 1. Aletta d'estremità;
- 2. Alettone di bassa velocità;
- 3. Alettone di alta velocità;
- 4. Carenatura dell'attuatore dell'ipersostentatore;
- 5. Flap Krüger;
- 6. Ipersostentatore di bordo d'attacco (*slat*);
- 7. Ipersostentatore a spacco triplo;
- 8. Ipersostentatore a spacco triplo;
- 9. Diruttori;
- 10. Diruttori-freni aerodinamici.

2.3.2 Valutazione del carico su pista

In questa sede si vuole stimare la variazione di carico in fase di decollo, per questo motivo l'attenzione verrà focalizzata sulle componenti verticali delle forze in gioco (Figura 2.5: Forze agenti sul velivolo).

Il carico nella fase di manovra di allineamento alla pista è pari all'MTOW (maximum takeoff weight). Durante la fase di corsa per il decollo si ha un notevole consumo di carburante a seguito dell'utilizzo alla massima potenza degli organi di propulsione per dare la spinta richiesta al decollo, tanto che alla fine del rullaggio, nel momento del lift off, si ha un decremento del peso di circa il 4,40%. Di seguito si terrà conto di questo decremento, valutato per semplicità proporzionale all'incremento della velocità.



Figura 2.7: Riduzione del carico al decollo per consumo di carburante riferito all'avanzamento lungo la pista



Figura 2.8: Riduzione del carico al decollo per consumo di carburante riferito all'incremento di velocità

Complessivamente viene considerata la variazione (riduzione) del carico gravante sulla pista a seguito dell'incremento della portanza:

$$Q[N] = MTOW - Portanza$$

(2.6)

In cui la portanza viene calcolata come precedentemente espresso (2.1). Per valutare il valore delle velocità si fa riferimento alla manovra di decollo dell'aereo:



Figura 2.9: Schema manovra di decollo e relative velocità

LEGENDA: Velocità in decollo

- 1. V = 0 in testa pista, dopo l'allineamento
- 2. Vstall: velocità di stallo in configurazione di decollo
- 3. Vmcg: minima velocità di controllo al suolo con un motore non operativo
- 4. Vmca: minima velocità di controllo in aria
- 5. V₁: velocità di decisione con un motore non operativo
- 6. V_R: velocità di rotazione (la cosa può toccare terra)
- 7. Vmu: minima velocità di distacco
- 8. V_{LO} : velocità di decollo (lift off)

I valori di tali velocità non sono reperibili dalle schede tecniche dei velivoli in quanto variano di volta in volta a causa delle condizioni meteorologiche e di pista. Tuttavia, se si riesce a reperirne almeno una (o anche più valori per avere un riscontro) delle sopra citate velocità, per condizioni standard di funzionamento, le normative F.A.R. (federal aviation regulations) al paragrafo 25.107 indicano delle correlazioni tra le velocità, utilizzate dai progettisti per dimensionare l'apparato di propulsione, i carrelli e l'impianto frenante, come riferimenti minimi:

- V stallo = velocità determinata in funzione del carico alare (pressione di carico) e del massimo coefficiente di portanza nessuna specifica F.A.R.
- Vmcg = non ci sono indicazioni F.A.R.
- V₁ = uguale o maggiore di Vmcg
- $V_R = 5\%$ superiore a Vmcg
- Vmu = uguale o superiore a Vstall
- $V_{LO} = 10\%$ maggiore di Vmu e 5% maggiore di Vmu con un motore non operativo
- V_2 takeoff climb speed a 35ft (10,67m) = 20% maggiore di Vs e 10% maggiore di Vmcg

Speed	Description	FAR 25 Requirement
Vs	stall speed in takeoff configuration	-
V _{mc}	minimum control speed with one engine inoperative (OEI)	17
V ₁	OEI decision speed	= or > \bigvee_{mc}
Vr	rotation speed	5% > ∨ _{mc}
V _{mu}	minimum unstick speed for safe flight	= or > V_s
V _{lof}	liftoff speed	10% > V _{mu} 5% > V _{mu} (OEI)
V ₂	takeoff climb speed at 35 ft	20% > V _s 10% > V _{mc}

Tabella 2.1: Requisiti F.A.R. per le velocità in rullaggio

Si nota come la velocità di stallo sia fondamentale per poter valutare le altre velocità che interesseranno l'aereo, non solo per il decollo, ma come si vedrà in seguito, anche per l'atterraggio. Per alcuni velivoli, sia militari che civili, la velocità di stallo è stabilita a priori da alcune regolamentazioni, come la FAR 23. Se non indicata in alcuna specifica, la velocità di stallo si mantiene attorno ai 50 nodi per aerei civili di corto raggio.

Per stabilire la velocità di stallo, si può invertire la formula della portanza:

$$W[N] = P[N] = \frac{1}{2} \cdot C_{L max} \cdot \rho \cdot S \cdot V_{stall}^{2}$$
(2.7)

Dove W è il peso dell'aereo e P è la portanza, come già espresso.

In questa sede si sono trovati dei valori di velocità standard per il funzionamento del velivolo che sono V_1 , V_r e V_2 . In questo modo si sono potuti individuare anche gli altri valori di velocità e si sono realizzati dei raffronti in modo tale da rispettare i parametri F.A.R.

DATI AL DECOLLO – CASO BOEING 747-400 Velocità [m/s]					
Vmc minimum control speed with one engine inoperative (OEI)	83,00				
V ₁ OEI decision speed	84,90				
V _r rotation speed	90,00				
V _{mu} minimum unstick speed for safe flight	82,01				
V _{lof} liftoff sped	94,31				
V ₂ takeoff climb speed	95,20				

Tabella 2.2: Dati sulla velocità, caso Boeing 747-400

Per ricavare la portanza dalla formula sopra esposta, rimane da determinare il valore del C_{Lmax} , il coefficiente di portanza, di difficile definizione.

Data la complessità della formula per risalire alla costruzione della curva del coefficiente di portanza in funzione della variazione dell'angolo di attacco (esempio riportato nella Figura 2.1: Variazione del coefficiente di portanza in funzione dell'angolo di attacco, al picco si raggiunge la condizione di stallo da cui poi l'inversione della portanza), e dato che non si è pienamente in grado di conoscere il valore dell'angolo di attacco nelle fasi di manovra del velivolo, si considerano in seguito dei valori medi di coefficiente di portanza per la fase di decollo:

- Procedura di uscita dal piazzale ed allineamento asse pista: non si ha portanza;
- Corsa di decollo fino al punto di minima velocità per il distacco in sicurezza: dai dati sperimentali acquisiti negli anni si vede che il C_L assume valori compresi tra 0,6 e 0,8 per aerei facenti parte dell'aviazione commerciale
- Per la fase di decollo (dallo stacco) si ricava il coefficiente C_L dall' equazione (2.7), considerando il carico ridotto al 95,6% nella fase di lift off.

Dato che tale risultato fornisce una portanza che uguaglia esattamente il peso dell'aereo, si considera indicativamente un incremento del 10% della portanza in decollo rispetto al peso dell'aereo in decollo, per meglio evidenziare il fatto che l'aereo è completamente staccato dalla pista, in quanto inizierà la manovra di involo, per la quale non si sono rinvenuti dati a sufficienza per stimare in maniera più dettagliata la variazione di portanza. Inoltre non risulterebbe rilevante un studio riguardante tale variazione in questo contesto, in quanto in quella fase di manovra la pista non risulta più caricata dal peso dell'aeromobile.

DATI AL DECOLLO – CASO BOEING 747-400									
Coefficienti di portanza		Portanza [N]		Carico [N]					
C _L rullaggio	0,80	Portanza fase Vstallo	1.572.299,65	Carico fase Vstallo	2.476.974,05				
C _L decollo	1,30	Portanza fase Vmcg	1.826.880,13	Carico fase Vmcg	2.065.585,02				
C _L decollo effettivo	1,31	Portanza fase V ₁	1.911.477,76	Carico fase V ₁	1.977.397,80				
C _L max	2,10	Portanza fase V _r	2.148.022,80	Carico fase V _r	1.731.217,54				
S [m ²]	541,20	Portanza fase Vmu	2.897.930,06	Carico fase Vmu	996.414,91				
ρ [kg/m ³]	1,23	Portanza fase V lift off	3.874.976,76	Carico fase V lift off	- 3.871,11				

Tabella 2.3: Dati riguardo il coefficiente di portanza ed i carichi - caso Boeing 747-400



Figura 2.10: Rappresentazione della riduzione del carico su pista in seguito all'aumento della portanza, esempio di un Boeing 747 – 400

2.3.3 Valutazione delle distanze percorse sulla pista in fase di decollo

Si procede ora al calcolo della distanza percorsa al decollo dall'aeromobile su pista, dalla fase di allineamento alla center line (velocità nulla) fino alla fine del decollo (35ft per i velivoli commerciali).

In questa sede si considera come spazio di decollo la lunghezza necessaria per la manovra di allineamento in pista L_0 , rullaggio L_1 , rotazione Lr, involo e raggiungimento dell'altezza di 35ft L_2 .

$$L \ tot = L_0 + L_1 + L_r + L_2 \tag{2.8}$$

Si procede al calcolo di L_1 , Lr, L_2 e per differenza al calcolo di L_0 , in quanto la lunghezza necessaria al decollo è reperibile dalle schede tecniche dei produttori consultabili on-line o su appositi siti nei quali vengono riportati i dati tecnici (vedi bibliografia).

Per il calcolo dello spazio di rullaggio si considera la seguente formula:

$$L_1 = \frac{1}{2g} \cdot \frac{W}{T_{max}} \cdot V_{lof}^2$$

(2.9)

In cui

- g è l'accelerazione di gravità
- *W* è il peso al decollo, si considera la condizione più sfavorevole, quindi MTOW all'inizio della fase di decollo
- Vlof è la volocità di lift-off discussa precedentemente
- *T max* è la trazione massima sviluppabile dai motori (a getto o elica) nella manovra di decolo

Per valutare T max si fa riferimento alle schede tecniche dei velivoli, reperibili on-line: viene indicata la propulsione massima sviluppabile da ogni motore ed il numero dei motori. In questo modo si può ricavare la forza di propulsione totale. Il moto di rotazione avviene in un tempo di circa 3 secondi, per tanto lo spazio percorso durante tale manovra risulta:

$$L_r = V_r \cdot 3sec$$

(2.10)

Per la valutazione di L_2 si studia il moto del velivolo nella fase di involo, ossia la fase di salita semi parabolica, di raccordo, che consente al velivolo di poter raggiungere prima la quota di 10,70m di fine decollo, per proseguire successivamente con una manovra tale che possa pervenire alla quota di crociera prestabilita.



Figura 2.11: Manovra di decollo, si noti la manovra di involo e salita alla quota di crociera

La fase di involo si compone di un primo tratto a curvatura costante, assimilabile ad un arco di circonferenza o ad una parabola, ed una secondo tratto che porta alla quota di crociera rettilineo. Il nostro scopo è quello di trovare lo spazio percorso per raggiungere i 35ft (10,70m circa) che concludono la manovra di decollo. Come si vedrà in seguito questa quota è raggiunta già con la fase di volo manovrato (iniziale a curvatura costante).

Durante la transizione (manovra di beccheggio) l'aereo accelera dalla velocità di decollo alla velocità V_2 di salita, si considera una velocità media tra queste, pari a 1,15 Vstall. Il coefficiente di portanza può essere assunto pari al 90% di quello massimo, con i flap disposti per la fase di involo. Da qui l'accelerazione verticale:

$$n = \frac{L}{W} = \frac{\frac{1}{2}\rho S(0.9C_{Lmax})(1.15V_{stall})^2}{\frac{1}{2}\rho SC_{Lmax}V_{stall}^2} = 1.2$$

$$n = 1 + \frac{V_{TR}^{2}}{R \cdot g} = 1.2$$
(2.11)

Da cui si può ricavare il raggio della traiettoria di involo:

$$R = \frac{V_{TR}^{2}}{g(n-1)} \cong 0.205 \cdot V_{stall}^{2}$$
(2.12)

L'angolo di incidenza formato dalla manovra si attesta tra i 4° ed i 5° (nel nostro caso si è considerato un valore medio di 4,5°). In maniera più esatta lo si potrebbe trovare con la seguente formula:

$$\sin \gamma = \frac{T - D}{W}$$
(2.13)

La quota a cui arriva l'aereo alla fine della manovra di beccheggio risulta essere:

$$h_{TR} = R(1 - \cos\gamma) \tag{2.14}$$

La distanza orizzontale (proiezione) percorsa in questo frangente risulta essere:

$$S_T = \sqrt{R^2 - (R - h_{TR})^2}$$
(2.15)

In fine, la distanza orizzontale percorsa durante la fase di salita fino al raggiungimento dei 35ft (10,70m) risulta:

$$S_C = \frac{h_{ostacolo} - h_T}{\tan \gamma}$$
(2.16)

Se l'altezza dell'ostacolo è stata raggiunta già nella prima fase, il valore di Sc risulta zero.

Il valore dello spazio necessario dal takeoff alla fine del decollo è di

$$L_2 = S_T + S_C (2.17)$$

È possibile quindi ricavare L_0 , lo spazio disponibile per l'allineamento alla pista di decollo, per differenza tra lo spazio totale necessario al decollo e la somma delle altre lunghezze appena calcolate:

$$L_0 = TOD - (L_1 + L_r + L_2)$$
(2.18)

Per ricavare le distanze percorse dal velivolo durante le varie fasi del moto (raggiungimento della Vs, V_1 , ecc ...) si fa riferimento alla seguente formula:

$$L = \frac{1}{2} \cdot \frac{(V_x^2 - V_0^2)}{a_1}$$
(2.19)

In cui V_x è la velocità in una determinata fase del moto, V_0 è la velocità all'inizio del rullaggio (nulla), a₁ è l'accelerazione che si ha in fase di rullaggio in pista.

Per determinare tale valore si è considerato il comportamento del velivolo in pista: nella prima fase del rullaggio si hanno i motori alla massima potenza, quindi si ottiene la maggiore accelerazione disponibile per contrastare le forze di rotolamento ed aerodinamiche. Nel frattempo si iniziano a raggiungere velocità sempre più elevate e inizia ad instaurarsi una portanza via via maggiore a mano a mano che aumenta la velocità. In questo contesto si vede quindi un' incremento della velocità, una riduzione dell'accelerazione e della forza di trazione.

La trazione considerata è quella massima ricavabile dalle schede tecniche dei velivoli e la trazione $T_{0,7}$ ossia alla velocità di 0,7 V lift-off.

Sull'asse delle ordinate si ha $\frac{T_{0,7}}{T_{max}}$ mentre sull'asse delle ascisse si trova l'avanzamento della velocità.



Figura 2.12: Rapporto di riduzione della forza di trazione sulla velocità, per un aereo a getto



Figura 2.13: Variazione dell'accelerazione con la velocità in fase di rullaggio

Noti i valori della trazione massima e peso massimo al decollo e la riduzione nella fase di rotazione (MTOW ridotto al 95,6% e $T_{0,7}$), è possibile ricavare la stessa curva per il caso di un Boeing 747-400. Si è considerata la curva superiore, T/W, in quanto al lordo delle forze resistenti incontrate in fase di rullaggio. Nel seguente grafico l'accelerazione è quella effettiva e non un'aliquota dell'accelerazione di gravità come riportato nel grafico campione.



Figura 2.14: Accelerazione/velocità e spazio/velocità per un Boeing 747-400

Per lo spazio si è considerata un'approssimazione per la quale lo si può considerare crescente in maniera lineare con la velocità.

In questo modo è possibile valutare l'accelerazione alle varie velocità su pista e determinare la distanza dal punto di fine allineamento alla center line ed inizio decollo.

DATI AL DECOLLO – CASO BOEING 747-400						
Distanze percorse su pista [m]						
L Vstallo	1.180,44					
L Vmc	1.415,81					
L V1	1.505,66					
L Vr	1.749,34					
L Vloff	1.988,12					
L 2	183,71					
L minima al decollo	2.171,83					

Tabella 2.4: Dati sulle distanze percorse in pista in funzione delle velocità in decollo, caso Boeing 747-400



Figura 2.15: Schema del comportamento generico di un aeromobile in fase di decollo_velocità [nodi]/spazio[piedi]



Figura 2.16: Rappresentazione legame velocità [m/s] - spazio [m] per un Boeing 747-400

Come si può notare dal confronto dei due grafici sopra riportati, si può stabilire che le raffigurazioni riportano uno stesso comportamento dell'aeromobile su pista in quanto le curve sono simili; questo porta alla conclusione che le ipotesi e le approssimazioni fatte si sono rivelate accettabili.



Figura 2.17: Riduzione carico al decollo in funzione dello spazio percorso su pista - caso Boeing 747-400

Si riporta di seguito lo stesso risultato espresso in percentuale sull'MTOW: nel primo grafico si raffigura il carico considerando la progressiva riduzione del peso del velivolo per il consumo del carburante; nel secondo non si tiene conto di questa riduzione con la corsa al decollo, per poi poter fare un raffronto con i dati reperiti dai testi di bibliografia.



Figura 2.18: Riduzione percentuale del carico con la corsa al decollo



Figura 2.19: Riduzione del carico al decollo con peso del velivolo costante pari all''MTOW

Confrontando tale risultato con i dati storici si vede come ci sia una discreta correlazione nel comportamento al decollo:



Figura 2.20: Grafico della riduzione del carico su pista al decollo

2.4 Manovra di atterraggio

2.4.1 Meccanica del volo – fase di atterraggio

Con il termine *atterraggio* in aeronautica si intende l'insieme delle fasi del volo che consentono, in condizioni di sicurezza, di portare il velivolo da una condizione di volo sostentato in aria alla condizione di contatto con il suolo a velocità nulla

In particolare, per la normativa CS-23 (JAR 23) e CS-25 (JAR25) (Certification Specifications della EASA – European Aviation Safety Agency) la manovra di atterraggio inizia quando << il velivolo si trova ad una quota posta convenzionalmente a 50ft (15,24m) al di sopra della pista di atterraggio, per terminare con l'aereo fermo sulla pista >>.

Di solito gli aerei atterrano negli aeroporti dove le piste sono appositamente progettate per rendere il più sicura possibile questa delicata fase. Quando si atterra su una portaerei si parla di appontaggio; quando invece si atterra sull'acqua si parla di ammaraggio.

Ci sono diverse fasi all'atterraggio:

- 1° fase discesa libera: per atterrare, bisogna perdere gradualmente velocità e quota, con il minimo consumo di carburante, impostando una discesa ad angolo costante che conduce alla soglia pista, con il minimo disturbo per i viaggiatori. La velocità si mantiene costante e se la quota di tangenza è elevata l'aereo può percorrere anche centinaia di chilometri prima di approcciare la soglia.
- 2° fase discesa di avvicinamento (avvicinamento finale): l'angolo di discesa è simile a quello a cui planerebbe l'aereo a motore spento, in modo da poter atterrare anche in caso di problemi al motore, in realtà è anche possibile tenere un po' di potenza per rendere la planata meno ripida, ma questa manovra è più pericolosa. Per mantenere velocità minori senza andare in stallo, si usano i flaps. In questa fase si esegue l'allineamento e la discesa per l'atterraggio,
- 3° fase avvicinamento al suolo: presentandosi in soglia (sulla quale l'aereo con la parte più bassa si trova a 50ft da terra – circa 15,24m – il pilota effettua la richiamata, ossia provoca il rialzarsi del muso per ridurre l'angolo della traiettoria di discesa, e lentamente toglie potenza. L'aereo con il carrello abbassato si presenta alla quota di 10,70 m (35ft) in prossimità del punto di contatto ideale in pista con gli ipersostentatori completamente azionati in modo da aver raggiunto la velocità di stallo in posizione cabrata. Superato il punto di contatto (touch down) a circa 300m dalla soglia, avviene il rullaggio di strisciamento che interessa solamente i carrelli principali; successivamente l'uscita rapida dalla pista oppure il rullaggio con l'aereo avente tutte le ruote poggianti su pista per procedere con l'uscita a velocità più basse.

Per i velivoli da trasporto si considera un angolo di approccio non più piccolo di circa 3° sull'orizzontale, in quanto si potrebbe richiedere più della spinta minima. Per altre tipologie di velivoli (più leggeri in genere) si hanno angoli attorno ai 7°. La velocità di presentazione in soglia deve essere ottimale in relazione al peso dell'aeromobile. Superando tale velocità di qualche nodo l'atterraggio potrà risultare più dolce ma richiederà una maggiore lunghezza di pista. In base ai regolamenti ICAO ogni aeromobile che atterra su una determinata pista, attraversando la soglia a 50ft ed alla velocità ottimale prevista, deve essere in grado di arrestarsi nell'ambito del 60% della lunghezza disponibile per l'atterraggio (LDA – Landing Distance Available).


Figura 2.21: Approccio finale, flare, touch down, rullaggio in pista

La manovra di flare è quella in cui il velivolo si presenta su pista in posizione cabrata, ossia dove il pilota tirando la cloche (barra di comando) solleva il muso dell'aeromobile per incrementare la resistenza aerodinamica opposta dalla superficie alare e dagli organi mobili dell'ala appositamente deflessi, in moda tale da ridurre la velocità per un atterraggio più morbido. Tale fase viene realizzata compiendo un arco di circonferenza, che raccorda di fatto il tratto rettilineo della discesa di avvicinamento e la toccata su pista.



Figura 2.22: Approccio e successiva cabrata

Figura 2.23: Dettaglio della cabrata, richiamata o flare

Terminata la fase di flare, l'aereo tocca la pista nei pressi dell'aiming point (punto di ideale contatto). Di fatto la zona in cui può avere inizio la toccata è situata tra la soglia di pista (thereshold) ed il punto di contatto ideale, indicativamente lo si

pone a 300m dalla soglia interessata all'atterraggio. La fase di toccata ha una durata di circa 3 secondi, durante i quali l'aeromobile subisce un decremento di velocità mentre realizza la rotazione sui carrelli principali per finire con il ruotino anteriore a contatto con la pista. In questo frangente l'aereo grava tutto il peso sui carrelli principali, i quali dovranno sopportare sia il peso del velivolo che l'urto della toccata al suolo. Le ruote del carrello passano dall'avere una velocità nulla nella fase aerea di approccio ad una velocità diversa da zero che in breve tempo sarà pari alla velocità del mezzo: per questo motivo per la pavimentazione la zona del touch down è ostica, in quanto si realizza l'abrasione degli pneumatici su pista per la variazione di velocità e l'impatto del velivolo sull'infrastruttura. Di contro il carico verticale è minimo in questa fase per la presenza della portanza, come verrà discusso nel seguito del capitolo.

Appena l'aereo tocca la pista, il pilota appronta il mezzo per l'apertura dei freni aerodinamici (vedi Figura 2.6: Organi mobili dell'ala) e se disponibile, prepara l'inversione di spinta dei propulsori. Questa impiega pochi istanti per attivarsi dal momento dell'azionamento del comando, in modo tale che alla fine del rullaggio di contatto l'inversione di spinta sia funzionante. Questa è presente generalmente sia nei velivoli dotati di turboreattori, sia agli aerei ad elica, e in special modo a quelli con propulsione a turboelica di dimensioni medio/grandi per ridurre lo spazio necessario alla decelerazione in pista. Gli inversori di spinta costituiscono un meccanismo di frenata impiegato sugli aerei caratterizzati da grandi dimensioni o da elevate velocità di atterraggio. Gli inversori di spinta svolgono, insieme agli aerofreni ed ai freni meccanici, un ruolo determinante nell'arresto di un velivolo durante l'atterraggio.



Figura 2.24: Apparato di inversione di spinta in fnzione - esempio di un Airbus A319 della compagnia Easy Jet

<u>Breve storia dell'inversione di spinta</u>: l'idea di sfruttare parte della potenza del motore per abbreviare la corsa d'atterraggio degli aerei invertendo la direzione di eiezione dei gas di scarico risale ai primi anni di vita della propulsione a getto, già nel corso della seconda guerra mondiale. Nel 1942-43, in Inghilterra, fu sperimentata per la prima l'installazione a bordo di un bombardiere bimotore Vickers Wellington, un motore a reazione (uno dei primi costruiti da Frank Whittle) dotato di inversori di spinta. Altre sperimentazioni inglesi con aerei come il Gloster Meteor e l'Hawker Hunter furono seguite negli anni cinquanta da prove analoghe portate avanti con successo negli Stati Uniti; qui, tra il 1955 e il 1960, vennero realizzati i primi aviogetti commerciali dotati di inversori di spinta compresi nell'equipaggiamento standard. Negli anni successivi l'adozione di questi dispositivi si è generalizzata, tanto nell'ambito civile che in quello militare.

Successivamente il velivolo prosegue nel rullaggio su pista, con una decelerazione che si può ritenere costante, finché arriva a velocità tale per cui:

- si disattiva l'inversione di spinta, per evitare di risucchiare all'interno dei reattori i gas di scarico, avendo raggiunto velocità troppo basse per un tale accorgimento,
- si possono sfruttare, oltre agli aerofreni, anche i freni meccanici dell'aeromobile in quanto la velocità raggiunta è tale per cui questi non vengano usurati per consentire l'arresto dell'aeromobile,
- la velocità finale raggiunta su pista deve comunque essere tale per cui l'aeromobile possa essere in grado di prendere le taxi way di uscita, siano ad alta velocità o normali.



Figura 2.25: Flaps ed aerofreni alla toccata



Figura 2.26: Aerofreni e flaps al rullaggio

2.4.2 Valutazione del carico su pista

Si vogliono individuare i carichi gravanti sulla pista a seguito della manovra di atterraggio.

Come per la manovra di decollo, anche per l'atterraggio risulta fondamentale la portanza sviluppata dall'aeromobile con l'utilizzo degli organi mobili dell'ala ed in funzione delle velocità acquisite dall'aereo.

I dati sulle velocità caratteristiche dell'aeromobile nelle fasi del volo, sono date in parte dalle schede tecniche dei velivoli ed in parte si possono ricavare grazie alle indicazioni F.A.R., le quali forniscono delle correlazioni tra le diverse velocità e la velocità di stallo, nella configurazione di atterraggio.



Figura 2.27: Fasi dell'atterraggio con indicazione delle velocità

L'approccio inizia alla quota di 50ft alla velocità consigliata V_a di 1,3 V_{stall} (1,2 V_{stall} per i voli militari, in cui V_{stall} è la velocità di stallo nella configurazione di atterraggio) l'angolo di approccio più stretto viene calcolato come di seguito, con il motore al minimo e la resistenza aerodinamica con i flap estesi:

$$\sin \gamma = \frac{T-D}{W}$$

(2.20)

Come già visto per la fase di salita nel decollo.

Alla toccata (touch down) la velocità ideale V_{TD} è 1,15 volte la velocità di stallo V_{stall}. L'aereo decelera dalla velocità di approccio alla velocità di touch down durante la manovra cabrata nella fase di flare, in cui si può assumere una velocità di circa 1,23 V_{stall} (coefficiente di 1,15 per i voli militari). Nonostante la decelerazione da V_a a V_{TD} potrebbe implicare un incremento di energia e così un ulteriore distanza prima della toccata, questo è trascurabile, in quanto il pilota abitualmente riduce al minimo la potenza nella fase iniziale di flare (tanto che qualora fosse disponibile, nella fase di toccata il pilota deve inserire l'inversione di spinta, e quindi i motori devono girare al minimo). La fase iniziale di toccata, detta "free roll" in quanto le ruote toccando il suolo prendono la velocità del velivolo, dura circa 3 secondi. In questo frangente viene applicata, se è disponibile, l'inversione di spinta, con un valore di circa il 40% - 50% rispetto alla spinta data dai motori durante la fase di volo. Successivamente il pilota applica i freni. Lo spegnimento dell'inversione di getto è solitamente attorno ai 50 knot (50 nodi - 93 km/h), variabili a seconda dei velivoli e delle case costruttrici, in quanto, come già citato, si avrebbe a velocità troppo basse un'aspirazione dei gas di scarico.

I valori delle velocità calcolate come sopra per il caso del Boeing 747 sono riportati nella tabella seguente:

DATI ALL' ATTERRAGGIO – CASO BOEING 747-400							
Velocità in atterraggio [m/s]							
V [m/s] approccio (avvicinamento per il libro)	82,3						
Vf [m/s] flare speed	77,87						
Vtd [m/s] touch down speed	72,80						
V [m/s] inizio inversione di getto	72,80						
V [m/s] fine inversione di getto	30,90						
V [m/s] uscita alla taxi	10,30						
Vst [m/s] stall speed	63,31						

Tabella 2.5: Velocità all'atterraggio - caso Boeing 747 - 400

Con l'incremento dell'utilizzo dei freni si ha un aumento della resistenza al rotolamento. Tipicamente il valore di rugosità per una pista dura è di circa 0,5 per gli aerei civili e 0,3 per quelli militari. Si riporta di seguito una tabella con i valori dei coefficienti di attrito su pista con utilizzo dei freni meccanici e senza.

Surface	μ – Typical Values					
	Rolling, Brakes Off Ground Resistance Coefficient	Brakes On Wheel Braking Coefficient				
Dry Concrete/Asphalt	0.02 - 0.05	0.3 - 0.5				
Wet Concrete/Asphalt	0.05	0.15 - 0.3				
Icy Concrete/Asphalt	0.02	0.06 - 0.1				
Hard Turf	0.05	0.4				
Firm Dirt	0.04	0.3				
Soft Turf	0.07	0.2				
Wet Grass	0.08	0.2				

Tabella 2.6: Valori tipici dei coefficienti di attrito in atterraggio con uso dei freni e senza

Nella fase di atterraggio la portanza viene ridotta progressivamente dalla fase in volo fino al rullaggio su pista. Per il calcolo del coefficiente di portanza nei vari stadi in volo dell'atterraggio, si sfrutta l'equazione proposta di seguito in quanto, avendo una continua variazione della geometria del profilo alare per la movimentazione degli organi mobili dell'ala, si considera per semplicità di calcolo il coefficiente di portanza alla velocità di stallo con il peso all'atterraggio:

$$C_{L max} = \frac{2 \cdot MLW}{\rho \cdot S \cdot V_{STALL}^2}$$
(2.21)

Il coefficiente di portanza in fase di contatto con la pista (touch down) viene valutato considerando la velocità di toccata:

$$C_{L T.D.} = \frac{2 \cdot MLW}{\rho \cdot S \cdot V_{T.D.}^{2}}$$
(2.22)

In seguito alla toccata, il velivolo prosegue per un tratto il rullaggio su pista strisciando solamente gli pneumatici del carrello principale. In questo contesto si vede come al momento dell'inizio del contatto, la portanza ed il peso del velivolo si equilibrano ed in questa fase si ha un notevole schiacciamento delle sospensioni e degli ammortizzatori del carrello principale. La variazione del coefficiente di portanza viene così stimato in funzione dello schiacciamento (δ = abbassamento dello spostamento relativo tra cilindro e pistone dell'ammortizzatore del carrello principale. In prima approssimazione, mancando ulteriori informazioni, è ragionevole supporre che la portanza si riduca di un terzo rispetto al valore iniziale, e che tale variazione avvenga con legge lineare.



Figura 2.28: Andamento ipotizzato della portanza

$$C_{L\,fine\,strisciamento} = \frac{C_{L\,T.D.}}{3}$$
(2.23)

<u>Nota:</u> la riduzione di cui sopra e mostrata anche in figura è riferita al carico della portanza, si considera la stessa riduzione per il coefficiente di portanza in quanto si ha una proporzionalità diretta tra i due parametri, in quanto i valori del carico, superficie alare, densità dell'aria e velocità rimangono costanti.

Per questo motivo il tratto di "free roll", tipicamente della durata di tre secondi, verrà suddiviso in tre aree, per meglio evidenziare la variazione della portanza all'atterraggio, in funzione delle fasi della frenata: alla toccata il pilota attiva la disposizione all'inversione di getto (indicativamente si è lasciato trascorrere un secondo dalla toccata all'invio del comando); questo richiede pochi secondi per attivarsi, in moto tale che, finita la rotazione, l'inversione di spinta sia attiva.



Figura 2.29: rappresentazione della fase di rotazione

Finita la fase di strisciamento, l'aereo completa la rotazione sul carrello principale e appoggia alla pista il ruotino anteriore; la portanza viene in questo modo quasi istantaneamente annullata e tutto il carico dell'aereo all'atterraggio (indicativamente pari al 85% dell'MTOW) grava sulla pavimentazione.

DATI ALL' ATTERRAGGIO – CASO BOEING 747-400						
Coefficienti di portanza						
C _L stallo	2,184					
C _L inizio touch down	1,651					
C _L 1/3 touch down	1,284					
$C_L 2/3$ touch down	0,917					
C _L fine touch down	0,550					
C_L in rullaggio, dopo la rotazione	0,000					

Tabella 2.7: Coefficienti di portanza all'atterraggio - caso Boeing 747 - 400

Noti i parametri necessari al calcolo della portanza come alla (2.1), si procede al calcolo della sostentazione. Per differenza con il peso del velivolo, si individua il carico su pista,(2.6). Di seguito i risultati numerici:

DATI ALL' ATTERRAGGIO – CASO BOEING 747-400							
Portanza [k]	N]	Carico [kN]					
Portanza fase Vstallo	2.901,24	Carico fase Vstallo	-				
Portanza fase Va	4.903,09	Carico fase Va	-				
Portanza fase Vf	4.389,28	Carico fase Vf	-				
Portanza inizio fase Vtd	2.901,24	Carico fase touch down	0,00				
Portanza 1/3 fase t.d.	2.256,52	Carico 1/3 touch down - avvio inversione getto	644,72				
Portanza 2/3 fase t.d.	1.611,80	Carico 2/3 touch down	1.289,44				
Portanza fine fase rotazione	967,08	Carico fine touch down - attivazione inversione getto	1.934,16				
Portanza fase rullaggio	0,00	Carico fase rullaggio	2.901,24				

Tabella 2.8: Portanza e carico su pista in fase di atterraggio - caso Boeing 747 - 400

Di seguito si riporta la rappresentazione dell'aumento del carico su pista in seguito alla riduzione progressiva della portanza.



Figura 2.30: Incremento progressivo del carico all'atterraggio

2.4.3 Valutazione delle distanze percorse sulla pista in fase di atterraggio

La lunghezza necessaria all'atterraggio viene valutata dalla fase di approccio finale fino a quando l'aereo avrà velocità nulla, ipotizzata la fermata su pista.

Si inizia quindi col calcolare la distanza necessaria all'approccio. Come si è detto, per un aereo commerciale si usa generalmente un angolo di 3° sull'orizzontale, quindi la lunghezza è pari a:

$$L_{app} = h_0 \cdot \cot \beta$$

(2.24)

In cui h_0 è l'altezza di presentazione in soglia di 50ft (circa 15,25m) e β è l'angolo di inclinazione.

Successivamente il pilota solleva il muso dell'aeromobile per la fase di flare, di raccordo tra la discesa ed il successivo tratto di rotazione in pista.

Lo spazio viene calcolato ipotizzando che l'aereo percorra un arco di circonferenza, con l'angolo al centro piuttosto piccolo che solitamente si attesta tra i 4° ed i 5° .

$$r_C = \frac{V_{app}^2}{g \cdot (n-1)}$$
(2.25)

In cui V_{app} è la velocità di approccio, g è l'accelerazione di gravità, n è il fattore di contingenza, posto pari a 1,2 per una toccata più morbida. Quindi la lunghezza di flare è pari a:

$$L_{flare} = r_C \cdot \sin\beta \tag{2.26}$$

La lunghezza del tratto di rotazione, ossia la fase iniziale di rullaggio in cui il velivolo poggia solo sul carrello principale, viene calcolata considerando che il tempo di rotazione è pari a circa 3 secondi, come raffigurato in Figura 2.29: rappresentazione della fase di rotazione.

$$L_{rotazione} = V_{T.D.} \cdot 3sec$$
(2.27)

In cui si considera la velocità di touch down, in quanto entro un periodo di tre secondi non si riscontra una sensibile riduzione di velocità.Il tempo complessivo di manovra a terra dal touch down all'apertura dei freni aerodinamici, viene stimato su un tempo di:

$$t_m = t_r + t_p + t_i$$

In cui:

- t_r è il tempo di rotazione;
- t_pè il tempo di reazione del pilota posto pari ad un secondo;
- t_i è il tempo per l'attivazione dell'inversione di spinta, che si attesta tra 2 e 3 secondi.

In seguito si può valutare lo spazio su pista per tale manovra, posto pari a:

$$L_{manovra} = V_{flare} \cdot t_m \tag{2.29}$$

La distanza rimanente per poter frenare in sicurezza su pista viene calcolata considerando una decelerazione (d) costante pari a $1,5 \text{ m/s}^2$.

$$L_{tot} = \frac{1}{2} \frac{V_{ST}^2}{d}$$
(2.30)

Per valutare le distanze dal touch down al raggiungimento di determinate velocità (ad esempio i 60 nodi per lo spegnimento dell'inversione di spinta) si è utilizzata la seguente equazione:

$$L = \frac{1}{2} \frac{\left(V_{T.D.}^{2} - V_{x}^{2}\right)}{d}$$

(2.31)

In cui per l'arresto del velivolo si ha V_X pari a zero.

Si riportano di seguito i risultati numerici per il caso di un Boeing 747:

(2.28)

DATI ALL' ATTERRAGGIO – CASO BOEING 747-400											
Distanze percorse su pista [m]											
Spazio di avvicinamento	290,99	Progressiva -	471.66								
Spazio di flare	180,68	manovra aerea [m]	4/1,00								
Spazio di rotazione-sgommata	218,41										
Spazio da toccata ad attivaione inversione di getto	436,82										
Spazio da toccata a spegnimento inversione di getto	566,80	Progressiva - manovra a terra [m]	1335,95								
Spazio da toccata a ragiungimento 20nodi - velocità consigliata per ingresso in taxiway	1633,47										
Spazio da toccata a fine corsa	1335,95										

Tabella 2.9: Dati sulle distanze percorse dall'aereo, in approccio e su pista



Figura 2.31: Rappresentazione della variazione del carico e della velocità in atterraggio con la distanza percorsa

In questo schema si è voluto evidenziare il comportamento del velivolo nel progressivo incremento del carico gravante sulla struttura (ipotizzato lineare nel primo tratto per via della riduzione, sempre lineare, della portanza) con l'avanzare in pista, fino a gravare completamente sulla struttura.



Figura 2.32: Riduzione progressiva della velocità in atterraggio

In questo schema si nota la progressiva riduzione della velocità, teoricamente fino al valore nullo, di fatto arrestata ad un valore di 20 nodi, velocità suggerita per l'uscita dalla pista dalle taxi way a basse velocità.

Il primo tratto a velocità costante è quello di rotazione e strisciamento delle ruote del carrello principale del velivolo in seguito al touch down; successivamente si ha il contributo dell'inversione di spinta e dei freni aerodinamici che abbattono in una distanza (e in un tempo) relativamente breve la velocità di atterraggio.

2.5 Conclusioni

I carichi su pista sono fortemente influenzati dalla variazione della portanza (in aumento al decollo, in progressiva riduzione all'atterraggio), variabile con il quadrato della velocità.

Da quanto sopra esposto si può quindi avere una maggiore conoscenza della distribuzione del carico, in modo tale che si possa progettare in maniera più efficiente e mirata la pavimentazione, in tipologia e spessore, in funzione dei carichi gravanti sulla stessa: ad esempio lungo le taxi way si ha il carico completamente gravante sulla pavimentazione per assenza di portanza, così anche nelle piazzole di sosta.

Lungo la runway si può fare la distinzione per tipo di carico e localizzazione dello stesso:

- In fase di decollo si avrà il carico massimo trasportabile dal velivolo (MTOW) che grava completamente sulla testata della pista fino all'allineamento, per poi, incrementando la velocità, ridursi e "liberare" la pista dal peso dello stesso;
- In fase di atterraggio il carico in gioco è inferiore rispetto al decollo (circa l'85% del valore al decollo); questo viene scaricato completamente sulla pista in seguito alla rotazione.

Da queste considerazioni, sono quindi note le zone più critiche in termini di carico su pista, e, nel caso in cui ci fossero piste dedicate al decollo ed all'atterraggio, sarebbe più semplice dimensionare gli spessori degli strati della pavimentazione una volta noti i carichi.

Si ricorda che è stato utilizzato come esempio un Boeing 747-400 proprio per il fatto che ad oggi è uno dei velivoli più impegnativi per dimensione e carico.

Per la manutenzione si ha in questo modo un maggior dettaglio delle aree soggette ai carichi aerei (si intendono sempre carichi verticali, quindi forza – peso). Pertanto si potranno concentrare le risorse e le attenzioni alle zone in cui il carico è interamente gravante sulla pista per carenza di portanza, come la zona di testa pista per i decolli o le zone precedenti la taxi di uscita in caso di atterraggio; mentre la zona del touch down sarà soggetta ad un basso impatto in termini di carico verticale e una maggiore usura dovuta alla forza trasversale di taglio.

Questo capitolo prende in esame solamente i carichi su pista, nel seguito verrà definita l'occupazione trasversale e longitudinale della pista. In questo modo si avrà una migliore visione d'insieme dell'utilizzo delle piste aeroportuali.

3.1 Introduzione

L' obiettivo di questo capitolo è quello di spiegare come la pista aeroportuale e le taxi a cui essa è collegata, sono sollecitate dagli aeromobili che usano lo scalo.

Lo studio delle dispersioni nasce dall'esigenza di garantire una suddivisione delle aree opportuna, fase fondamentale nella costruzione di un A-PMS.

Le traiettorie seguite dagli aeromobili, infatti non sono uguali ogni volta. Ciò dipende principalmente dal tipo di operazione. Per esempio in fase di landing è facile immaginare che la toccata non avverrà sempre nello stesso punto, si osservano delle variazioni dalla traiettoria ideale sia in senso trasversale sia in senso longitudinale.

Tali scostamenti sono frutto dell' interazione di più fattori, come per esempio la velocità, la larghezza della fascia pavimentata, la visibilità ecc.

Tuttavia anche dove le velocità sono più basse, nei raccordi di entrata e uscita, le dispersioni sono ancora presenti, anche se più lievi e dovute ad altri fattori, di cui il principale è la distanza tra il carrello anteriore e posteriore, che determina l'iscrizione in curva dell'aereo.

In questo capitolo si darà un'immagine del fenomeno al fine poi di proporre una suddivisione in sezioni congrua al traffico reale sopportato dalle sezioni stesse.

Considerare questo aspetto, significa da una parte prevedere interventi di manutenzione più mirati, dall'altra valutare in fase di costruzione ex novo quali tratti saranno maggiormente sollecitati e prevedere per questi spessori adeguati, con un conseguente risparmio economico.

Il fenomeno della dispersione delle traiettorie è stato oggetto di molti studi, che partono da campagne di misura fatte in diversi anni, e in diversi paesi del mondo,ma non si è ancora riusciti a descrivere il fenomeno in maniera generale.

I primi studi avevano proprio lo scopo di capire l'andamento delle dispersioni laterali delle traiettorie, mentre quelli più recenti sono stati portati avanti dalle compagnie aeree, per calcolare il rischio di collisione tra due aerei o tra un aereo e altri oggetti, conseguenti all'introduzione nel mercato di aeromobili più grandi.

La nuova frontiera ora è rappresentata dall' utilizzo di software in grado di calcolare il danno della pavimentazione, in funzione delle dispersioni delle traiettorie in maniera molto più precisa.

Si riesce infatti a superare la pesantezza dei calcoli, che pur essendo semplici richiedono una grande quantità di dati, a cui si aggiunge la capacità che questi programmi hanno, di non considerare un aereo di progetto, ma il mix nella sua totalità.

3.2 Dispersioni Trasversali

L' idea di studiare l'andamento delle dispersioni trasversali, nasce dalla semplice osservazione che una pavimentazione sottoposta a carichi concentrati subisce un danno unitario molto maggiore rispetto a quello di un'altra pavimentazione nella quale si osserva una dispersione delle traiettorie.

Tale fenomeno di degrado è dovuto al fatto, che un materiale sottoposto ad un carico di compressione subisce uno schiacciamento nell'area sottostante il punto di applicazione del carico e una deformazione congruente di "rigonfiamento" nella zona adiacente. Se in prossimità del punto sollecitato viene applicato un secondo carico puntuale, l'effetto di quest'ultimo andrà a sovrapporsi, con effetto uguale ed opposto al primo carico, comprimendo l'area che aveva subito un'innalzamento e diminuendo lo schiacciamento dovuto al primo carico.

Questa dispersione dei carichi ai quali viene sottoposta la pavimentazione causa una minimizzazione delle deformazioni.

La pavimentazione aeroportuale è sottoposta ad un fenomeno simile a quello descritto schematicamente nel paragrafo precedente in quanto le traiettorie che percorrono gli aeromobili non sono sempre le stesse e di conseguenza i carichi non hanno una distribuzione temporale e spaziale costante.

A dimostrazione di quanto detto, si cita uno studio fatto presso il Technical Center "William J. Hughes" all'aeroporto internazionale di Atlantic City [35], in cui sono stati condotti i "full scale test" per rappresentare l' effetto dell'applicazioni di carichi di nuova generazione (NLA) valutando anche il contributo fornito dalla dispersione laterale delle traiettorie.

La dispersione trasversale è stata ottenuta facendo transitare la macchina di prova su dei percorsi adiacenti con una larghezza stabilita, il risultato osservato conferma che le deformazioni di compressione vengono equilibrate dalle deformazioni residue verso l'alto dovute ad un altro carico, identico al primo ma applicato con uno specifico offset (distribuzione trasversale).

E' chiaro come un simile comportamento non possa essere descritto dai classici metodi di analisi, come gli elementi finiti o il multistrato elastico o, dal momento che esse si basano sulla ipotesi di layer omogeneo; occorre quindi utilizzare un DEM (Discrete Element Modeling) in quanto solo modellando il comportamento delle singole particelle si riesce a descrivere completamente il fenomeno.

Sono stati proposti dunque due modelli; il primo considera un'unica piastra di carico, il secondo tre adiacenti, per poter visualizzare e quantificare gli effetti dovuti a questo fenomeno in uno strato non legato.

Un DEM permette di studiare il comportamento degli aggregati sotto carico; anche queste analisi hanno dimostrato come la pavimentazione sottoposta a carichi distribuiti nel tempo in vari punti di applicazione subisca una deformazione inferiore al caso in cui non ci sia dispersione.

Il grafico 3.1 riassume l'andamento trasversale dei tre elementi che caratterizzano il comportamento della pavimentazione sottoposta ai carichi aeroportuali (sforzo,

dispersione delle traiettorie e danno) per studiarne l'interazione. La situazione rappresentata, si riferisce al caso di ruote gemelle appartenenti ad un unico carrello.

- Fig. 3.1 a: andamento trasversale dello sforzo verticale conseguente ad una sollecitazione dovuta al passaggio di un aereomobile; si noti come in corrispondenza dei baricentri delle ruote ci sia il picco di sforzo.
- Fig. 3.1 b: in funzione della posizione del carrello rispetto alla centerline che costituisce l'origine del sistema di riferimento considerato, si stabiliscono le parti di pavimentazione che saranno più probabilmente interessate da tale carico.
- Fig. 3.1 c: distribuzione trasversale del danno unitario relativo, prodotto dal passaggio di un aereo. Minore è la dispersione delle traiettorie, maggiore è il carico gravante.

La figura 3.1 illustra qualitativamente gli effetti prodotti da una maggiore o minore dispersione delle traiettorie. Le zone di pavimentazione in cui si manifestano con maggiore probabilità fenomeni di ammaloramento sono quelle interessate con maggiore frequenza dalle ripetizioni dei carichi massimi.

La figura 3.1 c mostra come le sovrastrutture subiscano un danno maggiore nel caso di traffico canalizzato.



Figura 3.1: Elementi caratterizzanti il fenomeno di dispersione trasversale delle traiettorie: sforzo, dispersione trasversale e danno

In sostanza la dispersione delle traiettorie è una lunghezza, utilizzata per delimitare una striscia di traffico, ovvero una porzione di pavimentazione che statisticamente è interessata da un maggior numero di passaggi di ogni singolo aereo.

Occorre dunque trovare una correlazione matematica che approssimi al meglio, i dati osservati. Proprio questo è stato oggetto di campagne di monitoraggio che hanno misurato l'andamento delle dispersioni trasversali in diversi aeroporti e hanno proposto una rielaborazione statistica dei dati.

Parlando di statistica è chiaro che i parametri più importanti che definiscono il comportamento delle dispersioni sono la media e la deviazione standard.

Per spiegare meglio il concetto, si consideri un set di dati, tutti rilevati in uno stesso aeroporto e riguardanti un'unica tipologia di aereo.

Questi dati sono le misure dello scostamento dell'asse del carrello principale dalla center line. Se non ci sono dispersioni, lo scostamento osservato coincide perfettamente con la posizione che assumerebbe il carrello posteriore se fosse precisamente posizionato sull'asse di centro-via, in questo caso la striscia di traffico sarebbe definita dalla larghezza del carrello principale.

La media di queste misurazioni, fornisce uno scostamento medio che rappresenta quindi l'asse che l'aereo tende a seguire, che non coincide più con la center line.

La deviazione standard invece stima quanti dati si discostano dal valore medio e quindi definisce la variabilità delle traiettorie, operativamente questo si traduce in una larghezza da aggiungere nella costruzione della striscia di traffico.

È proprio la deviazione standard che ad oggi permette di definire il livello di dispersione delle traiettorie. Infatti si assumono valori diversi di deviazione standard, per le diverse zone dell'aeroporto e in funzione di questi, utilizzando una curva di distribuzione di tipo normale (Fig. 3.4), si definiscono le fasce di traffico.

I valori utilizzati sono 773 mm per le vie di circolazione e 1546 mm per le pista di volo. Questi valori tuttavia non sono universali e in questo elaborato di tesi si vuole fornire una spiegazione del perché si sono scelti proprio questi valori numerici e se sia possibile ottimizzare ulteriormente i risultati ottenuti.

Considerare la distribuzione trasversale delle traiettorie è fondamentale, sia in fase di progetto che in fase di verifica in quanto permette di valutare in maniera ponderata e sicuramente più precisa i carichi di traffico che risultano molto influenzati da questo fenomeno, che è sempre presente. Ciò che varia è la sua entità.

Come detto in precedenza, le dispersioni variano notevolmente in funzione del tipo di operazione di movimento e in funzione della zona dell' infrastruttura che si considera.

Nel seguente capitolo verranno presentati concetti di copertura e P/C (Pass-To-Coverage-Ratio), che caratterizzano l'intera trattazione, per poi passare all'analisi dei singoli rami dello scalo con diverso comportamento (piste, taxi rettilinee e curve, uscite ad alta velocità). All'interno di questa prima classificazione verranno considerati anche gli aspetti che influenzano i valori rilevati.

Questo studio propone un'elaborazione e una sintesi degli studi tecnicosperimentali ad oggi disponibili circa l'argomento di deviazione trasversale e longitudinale delle traiettorie.

3.2.1 Definizione di ricoprimento

Con il termine "Coverage" si intende il numero di ricoprimenti di una pavimentazione. E' un parametro che nasce dall'esigenza di quantificare il danno prodotto da un carrello, tenendo in considerazione tutti i fattori che concorrono a generarlo, ovvero il numero di ruote e la loro distanza, la pressione di gonfiaggio, il carico per ciascuna ruota, la tipologia di aereo e il numero di passaggi. I ricoprimenti permettono di quantificare il carico che effettivamente grava su uno specifico punto di una sezione ed è dunque concettualmente distinto dal passaggio dell'aeromobile sulla sezione stessa, ciò in relazione alla distribuzione trasversale delle traiettorie dei velivoli e alle modalità di diffusione del carico agente in superficie. Generalmente il numero di ricoprimenti si ricava dal numero di passaggi (o movimenti) attraverso opportuni coefficienti correttivi (pass to coverage ratio) calcolati in base ad un'analisi statistica.

Il calcolo delle coperture è fondamentale per quantificare il "traffico reale" a cui è sottoposta la pavimentazione, sia in fase di progetto che di verifica; proprio per l'importanza che ricopre all' interno dello studio della pavimentazione aeroportuale, la valutazione del numero di coperture è stata oggetto di numerosi studi matematici [38] che hanno l'obiettivo, attraverso una funzione analitica, di riuscire a rappresentare al meglio i dati osservati sperimentalmente.

Naturalmente il risultato di tali studi, dipende fortemente dalle misurazioni, ovvero dalle condizioni, che devono essere più generali possibile, soprattutto per quanto riguarda gli aeromobili considerati.

Già prima che fossero effettuate le indagini necessarie alla costruzione di una teoria della dispersione trasversale delle traiettorie, attorno al 1942 [48], già si pensava di suddividere la pavimentazione in una parte centrale maggiormente sollecitata, dalle fasce laterali. L'ipotesi di base era quella di considerare la sollecitazione sulla pavimentazione uguale al carico per ruota. Il traffico risultante si trovava così interamente canalizzato all'interno di una fascia centrale, che si considerava "coperta", ovvero caricata in ogni suo punto, dopo tre passaggi di una ruota.

Successivamente, il numero di coperture non viene più considerato noto a priori ma diventa un parametro da calcolare,attraverso un'approssimazione matematica dei dati osservati.

Inizialmente le coperture venivano rappresentate da funzioni ad andamento costante, come mostrato nelle Fig 3.2 e 3.3 [38].

Le equazioni di questo tipo di coperture sono:

per la runway:
$$C(x) = \frac{0.75 \cdot (2B) \cdot N \cdot W_t}{25 \cdot 12}$$

(3.1)

per la taxiway:
$$C(x) = \frac{0.75 \cdot B \cdot N \cdot W_t}{12.5 \cdot 12}$$

(3.2)

Con il seguete significato dei simboli:

- C: coperture;
- B: numero totale di movimenti;
- N: numero di ruote del carrello principale;
- W_t: larghezza della ruota in pollici.
- 12,5 e 25 pollici sono misure standard caratteristiche per runway e taxiway. [15].



Figura 3.2: Legge uniforme per le coperture delle runway



Figura 3.3: Legge uniforme per le coperture delle taxiway

Nel 1956 al fine di trovare dei dati di distribuzione reali, è stato fatto uno studio dei movimenti degli aerei B-74 e KC-97, dal quale è emerso che il traffico risulta essere piuttosto canalizzato, [50]. In particolare nelle taxi si nota che il 75% dei carrelli, si concentra in una striscia larga 7,5 ft (2,3 m), nelle runway per i movimenti di decollo tale striscia è più larga, pari a 38 ft (11,6 m).

Per migliorare i risultati ottenuti, sono stati sviluppati altri studi al fine di considerare una più ampia gamma di aerei con i loro relativi comportamenti.

Uno di questi, condotto dall'Air Force [36], raccogliendo le distribuzioni laterali degli aerei B-U7, B-52, KC97 e KC-135 giunge alle seguenti conclusioni:

- nelle runway il traffico è molto più canalizzato nella fase di decollo che rispetto alla fase di atterraggio.
- Per il B-U7, la larghezza della striscia di runway, dove il traffico si concentra, è circa 3 volte più larga rispetto a quella osservata nelle taxi (7,5 ft).
- La striscia risultante dall' analisi del B-52 è la stessa sia per i raccordi sia per la pista.
- Gli aerei KC-135 e KC-97, data la loro configurazione dei carrelli più stretta degli altri, danno origine ad una striscia leggermente più sottile delle altre.
- Il contributo dei fattori meteorologici non è particolarmente significativo nel difinire queste larghezze nelle fasi di landing e takeoff.

Dagli due studi appena descritti [50] [36], nasce il concetto di dispersione delle traiettorie; ovvero non si considera più una larghezza della striscia centrale fissa,

entro la quale si concentra il 75% dei passaggi dei carrelli posteriori, ma si parla invece di una distribuzione probabilistica della distanza laterale massima che si osserva tra l'asse dell'aereo e l'asse della pista o delle taxiway.

Considerare la distribuzione dei carichi di traffico, con una legge uniforme (Fig. 3.2, 3.3), non permette di cogliere con precisione sufficiente la distribuzione dei dati osservati, che risultano meglio rappresentati da una funzione gaussiana (Fig. 3.4).

A titolo di esempio si riportano nella figura seguente, i dati delle dispersioni laterali di due aerei, il B-47 e il KC-97, in una tratto di raccordo rettilineo,confrontate con la curva teorica di distribuzione normale.



Figura 3.4: Confronto tra dati sperimentali e la distribuzione a campana

L' andamento della curva in Fig 3.4 dipende dal valore di deviazione standard, più è larga, ovvero più i valori osservati sono distanti fra loro, più il fenomeno di dispersione delle traiettorie sarà importante.

All' interno della campana, la larghezza presa come riferimento per definire la fascia più caricata è quella all' interno della quale si concentrano il 75% delle traiettorie dei carrelli posteriori.

L' equazione matematica che descrive questo andamento è quella caratteristica della distribuzione normale.

Con la dicitura SND si intende la Standard Normal Distribution, curva tabulata in tutti i manuali di statistica, avente media (μ) uguale a zero, deviazione standard (σ) pari all'unità e ordinata massima (C_z) uguale a 0,399, x è la distanza dalla center line alla quale si misura la dispersione.

$$C(x)[SND] = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} * e^{-\frac{1}{2} * x^2}$$

(3.3)

La GND è invece la General Standard Distribution, curva con la stessa forma della SND ma riferita al caso in esame, quindi caratterizzata da propri valori di μ e σ .

$$C(x)[GND] = \frac{1}{\sigma * \sqrt{2\pi}} * e^{-\frac{1}{2} * [\frac{x-\mu}{\sigma}]^2}$$
(3.4)

Le GND sono costruite appunto per rappresentare attraverso una formula matematica l'insieme delle osservazioni in modo tale da minimizzare la distanza tra la formula analitica e i dati sperimentali.

Per quanto la distribuzione normale, rappresenti in maniera sufficientemente adeguata la situazione, si nota che l'accuratezza dell'approssimazione diminuisce nelle code.

Ciò non è particolarmente significativo, in quanto le code rappresentano misure che vengono rilevate molto di rado, tuttavia per studi di maggior precisione, che non riguardano gli spessori opportuni da dare alla pavimentazione, ma la valutazione della sicurezza del movimento, si adotta la distribuzione Logistica, anche essa appartenente alla famiglia delle esponenziali.

I parametri che la caratterizzano sono ancora media e deviazione standard, presente nel parametro β , definito da:

$$\beta = \frac{\sqrt{3}}{\pi}\sigma$$

(3.5)

Le coperture sono in questo caso date da:

$$C(x) = \frac{1}{4\beta} sech^2(\frac{x-\mu}{2\beta})$$

(3.6)

Parallelamente alle coperture va citato il P/C, ovvero il Pass to Coverage Ratio che rappresenta il numero di passaggi necessari di un particolare tipo di carrello necessari per ottenere una copertura completa.

Conoscendo la distribuzione del numero di passaggi C(x), e la larghezza dell'impronta della ruota, è possibile calcolare i P/C con la seguente formula:

$$\frac{P}{C} = \frac{1}{C(x) * W(X)}$$
(3.7)

Ovviamente la maggior parte dei carrelli posteriori degli aeromobili è composta dall'insieme di varie ruote e può quindi risultare che il numero di ricoprimenti di un punto per passaggio sia superiore a uno (si pensi al caso di assi disposti in tandem). Questo fa si che il numero di passaggi necessari per un ricoprimento ovvero il valore di Pass-to-coverage ratio sia inferiore a uno.

A questo proposito si noti che se il carrello principale è composto da più di una ruota, entra in gioco un' altra variabile, che è la distanza tra le ruote stesse. Se questa è sufficientemente larga le due ruote vengono trattate separatamente, quindi ognuna darà il suo contributo di carico indipendentemente dall' altra, se invece l'interasse ha una dimensione tale per cui le aree su cui viene distribuito il carico si intersecano gli effetti vanno sommati. Questi due fenomeni sono rappresentati nelle figure 3.5 e 3.6 e naturalmente vanno ad influire sui valori di P/C.



Figura 3.5: Carrello tandem con ruote lontane



LATERAL PLACEMENT OF WHEEL CENTER LINE, IN.

Figura 3.6: Carrello tandem con ruote vicine

La valutazione corretta delle funzioni di distribuzione, porta ad un corretto calcolo dei P/C. In questa condizione siamo in grado di determinare il danno subito dalla pavimentazione in modo accurato.

Tuttavia per avere delle correlazioni reali, occorre avere un grande numero di osservazioni.

3.3 Dispersioni trasversali sulle piste di volo

Le piste di volo sono gli elementi infrastrutturali dell'aeroporto sui quali si svolgono le operazioni di decollo e atterraggio degli aeromobili.

Le due manovre, come detto anche sopra, sono caratterizzate da valori di dispersione trasversale differenti, in particolare in decollo il traffico risulterà più canalizzato in confronto a quanto avviene in atterraggio, dunque nel seguito si tratteranno i due casi separatamente.

In considerazione del fatto che le manovre di decollo e atterraggio sono influenzate dalla posizione e dalla geometrizzazione dell'aeroporto, per avere dei risultati generali si sono raccolti dati provenienti da 9 scali americani, molto diversi per le loro caratteristiche di altitudine, di metereologia, di temperature e vento, di lunghezze e raggi dei rami considerati, in modo da poter rappresentare, in maniera completa, il comportamento di uno spettro di aeromobili abbastanza ampio.

I nove aeroporti sono:

- ATL: William B.Hartsfield Atalanta International Airport,
- ORD: Chicago O'Hare International Airport,
- DEN: Denver Stapleton International Airport,
- SEA: Seattle-Tacoma International Airport,
- CLE: Cleveland Hopkins International Airport,
- BUF: Greater Buffalo International Airport,
- MIA: Miami International Airport,
- MSY: New Orleans International Airport,
- DFW: Dallas-Fort-Worth Regionl Airport.

Le misurazioni sono state eseguite utilizzando un sistema di laser, collegato ad un pc con il compito di elaborarle.

Il sensore a infrarossi proietta dei raggi, all'altezza delle ruote degli aerei, che vengono interrotti al passaggio del velivolo. Da ciò si riesce a ricavare sia l'informazione dell'avvenuto passaggio, sia la velocità a cui questo è avvenuto.

I dati raccolti sono stati analizzati e schematizzati in curve di tipo normale, caratterizzate appunto dai valori di media e deviazione standard. Il primo valore è l'offset che l'asse dell'aereo ha rispetto alla center line, mentre il secondo rappresenta l'apertura della campana, grazie alla quale si riesce a definire la striscia in cui sarà concentrato il 75% del traffico che interessa lo scalo.

Per le piste ogni movimento (decollo o atterraggio) fornisce 3 misure, che sono quelle che permettono di dividere la pista in senso trasversale, e sono:

- First Point: appena dopo la zona di toccata,
- Last Point: appena prima della zona di lift off,
- Intermediate Point: punto intermedio tra i due precedenti.

Elaborando dunque i risultati sperimentali, si nota come le dispersioni trasversali si differenzino lungo la pista, in funzione dell' operazione compiuta e delle velocità che ha l'aereo in quel particolare tratto.

La pista risulta quindi suddivisa longitudinalmente in tre parti, che separano la fascia maggiormente caricata da quelle laterali e trasversalmente pure in tre parti, a distinguere i diversi valori di dispersioni osservati [37].

L'idea di separare la zona centrale della pista dalle fasce laterali non è nuova, in vari studi [38] infatti, la larghezza della parte più caricata viene definita, ma rimane uniforme lungo tutta la lunghezza ed uguale sia in fase di decollo che di atterraggio.

L'unica differenza nei valori proposti si nota tra le dispersioni laterali osservate in pista e quelle osservate nelle vie di rullaggio, naturalmente più piccole [38].

Lo studio del comportamento statistico inoltre, porta a dire che la direzione seguita dall'asse degli aerei lungo la runway, è spostato sulla sinistra rispetto alla center line e che il valore di questo spostamento varia, come avviene per la dispersione, in funzione del tipo di operazione e della velocità sostenuta dall'aereo.

Naturalmente anche la presenza di vento, o in generale di condizioni meteo avverse, influisce sul comportamento di dispersione delle traiettorie dei velivoli, tuttavia questi fenomeni non hanno un' importanza tale da far nascere l'esigenza di condurre una campagna di monitoraggio volta a scoprire gli effetti dei singoli fattori.

In particolare il comportamento delle dispersioni rilevato in presenza di particolari situazioni può essere così sintetizzato:

• Vento al traverso: influenza sia le operazioni di decollo sia, quelle di atterraggio. Si considera l' effetto del vento se quest'ultimo ha un'intensità maggiore di 5 kn.

Si osserva che la presenza di vento, fa aumentare la dispersione, sia nei valori di offset, sia di deviazione laterale, in particolare, gli scostamenti dall' asse sono spostanti più a sinistra, se il vento proviene da destra e più a destra, se il vento proviene da sinistra, rispetto agli stessi movimenti misurati in assenza di vento, o con vento debole.

• Operazioni notturne: dal confronto con quanto accade di giorno, non si notano grandi differenze nei valori di offset e deviazioni standard osservate, in quanto le piste sono illuminate e spesso sono strumentate, in modo da consentire un corretto allineamento in fase di atterraggio anche in condizioni meteorologiche avverse o durante la notte.

• Pavimentazione bagnata: la presenza di umidità sulla superficie pavimentata, diminuisce la sicurezza del trasporto in generale, in quanto riduce le condizioni di aderenza, quindi chiaramente determina anche un comportamento dispersivo più variabile, talmente variabile che non si è riusciti a trovare alcuna correlazione per descrivere il fenomeno.

Dal punto di vista longitudinale invece si riesce a definire un comportamento, ovvero sia in decollo che in atterraggio gli spazi necessari sono tendenzialmente più elevati.

• Vento contrario: va ad influenzare la lunghezze di pista necessarie alle manovre, sopratutto nel decollo. La presenza di vento contrario, infatti, permette di accorciare lo spazio dedicato alla partenza, in quanto, in presenza di una maggiore resistenza aerodinamica, il velivolo ha una velocità più bassa nel movimento a terra e ciò permette di aumentare la velocità di rotazione dei motori.

Più i venti sono forti, più la manovra di decollo avverrà in posizioni più avanzate ma utilizzando uno spazio più breve.

Il vento contrario è una resistenza pertanto in fase di atterraggio essa andrà a contribuire alla frenatura "naturale" del velivolo, con un conseguente accorciamento della distanza necessaria all'aereo per assumere velocità consone alle uscite.

La larghezza di pista o più in generale della fascia pavimentata, non viene inserita nei fattori che influenzano la dispersione, in quanto è una grandezza che rimane costante durante la vita utile dell'aeroporto, tuttavia si osserva che più è grande, maggiore sarà la dispersione delle traiettorie osservate, sia nei valori di offset, sia in quelli di deviazione standard.

Si osserva in ultimo che aerei più pesanti hanno delle dispersioni maggiori, dovute soprattutto ad uno spostamento più pronunciato dell' offset [47].

Questo comportamento risalta chiaramente dall' analisi di diversi set di dati [38], [40], [45], ma ancora non si è riusciti a definire una funzione che leghi il peso dell'aereo con la dispersione trasversale che lo caratterizza.

Per descrivere il fenomeno verranno utilizzati dei semplici schemi, rappresentanti la center line dell'elemento considerato, e in funzione di questa, considerando un carrello di larghezza 11 m e il suo scostamento dall'asse, si costruiranno le strisce di traffico aggiungendo il contributo delle dispersioni trasversali.

Si nota che nonostante sia abbastanza facile intuire che la striscia di traffico aumenta con la larghezza dei carrelli di atterraggio e quindi con l'evoluzione degli aeromobili, in tutti gli schemi proposti si usa la larghezza di 11 m propria del B747-400.

Una semplificazione del genere, aiuta ad individuare solo la distribuzione laterale delle traiettorie, in quanto se varia la larghezza della striscia di traffico, l'entità della variazione è solamente frutto di un diverso comportamento dispersivo, che è l'oggetto della nostra indagine. E' stato scelto proprio il B747-400 perché è stato fino al 2006 il velivolo per trasporto passeggeri più grande e più pesante in circolazione.

3.3.1 Fase di Decollo

Le operazioni di decollo iniziano dopo che l'aereo si è allineato con l'asse di pista, e finiscono quando l'aereo si trova ad un' altezza di 35 ft da terra.

I dati disponibili sono relativi alle misurazioni già citate sopra, avvenute in America nel 1975, [37].

Si considera l'insieme di tutti i movimenti di decollo, suddivisi per tipologia di aereo, indipendentemente dagli aeroporti in cui transitano. Nella tabella seguente si riporta la composizione del traffico e i valori di offset e di deviazione standard.

Tutte le misure sono in metri e il segno indica dove è spostato l'offset rispetto alla center line di pista, il segno meno indica che si trova sulla sinistra, il segno più che si trova sulla destra.

		DECOLLI									
					INT	INTERMEDIATE					
		L	LAST POINT			POINT		FI	RST POI	NT	
		n	Х	σ	n	Х	σ	n	Х	Σ	
707		198	-0,10	2,19	198	-0,34	1,69	198	-0,44	1,77	
727-100		680	-0,32	2,08	680	-0,39	1,75	680	-0,38	1,79	
727-200		560	-0,19	2,10	560	-0,14	1,63	560	0,03	1,80	
737		327	-0,12	2,82	327	-0,12	1,94	327	-0,19	2,19	
747		49	-1,24	1,66	49	-0,61	1,42	49	-0,37	1,76	
DC-8-40,-50		116	-0,17	1,73	116	-0,33	1,66	116	-0,35	2,01	
DC-8-60	45 m	108	-0,54	1,76	108	-0,54	1,62	108	-0,49	1,74	
DC-9-10,-20	45 11	127	-0,98	2,63	127	-0,47	1,83	127	-0,28	1,66	
DC-9-30,-40		744	-0,41	2,72	744	-0,15	1,79	744	0,08	2,02	
DC-10-10		108	-0,07	1,91	108	-0,03	1,58	108	0,10	2,24	
C-580		44	-0,85	2,44	44	-0,59	2,11	44	-0,28	1,76	
L-1011		107	-0,13	1,83	107	-0,09	1,72	107	-0,29	1,95	
YS-11		52	-0,48	2,66	52	0,89	2,69	52	0,11	2,91	
BAC-111		194	0,84	4,42	194	-0,42	2,32	194	-0,02	1,94	

Tabella 3.1: Offeset (X) e Deviazioni Standard (σ) per decolli su piste di larghezza 45 m

					INTERMEDIATE					
		L	AST POI	ΝT	POINT			FIRST POINT		
		n	Х	σ	n	Х	σ	n	Х	σ
707		95	-1,28	2,28	95	-1,36	2,16	95	-1,47	2,21
727-100		222	-0,49	2,38	222	-0,60	2,13	222	-0,60	2,23
727-200		179	-0,69	2,49	179	-0,67	2,29	179	-0,60	2,29
737		15	0,48	2,76	15	0,22	1,66	15	-0,04	1,10
747		17	-1,07	2,06	17	-1,01	2,21	17	-0,98	2,43
DC-8-40,-50		42	-0,34	1,84	42	-0,33	1,83	42	-0,28	1,89
DC-8-60	60 m	7	0,26	2,36	7	-0,44	1,16	7	-0,48	0,88
DC-9-10,-20	00111	54	-1,71	2,89	54	-1,69	2,90	54	-1,66	2,92
DC-9-30,-40		197	-0,71	2,60	197	-0,54	2,31	197	-0,45	2,33
DC-10-10		13	-2,59	1,89	13	-2,57	1,88	13	-2,44	1,86
C-580		62	-0,61	2,35	62	-0,54	2,09	62	-0,41	2,04
L-1011		37	-0,59	2,33	37	-0,57	2,30	37	-0,55	2,27
YS-11		1	0,78	0,00	1	0,78	0,00	1	0,78	0,00
BAC-111		4	-2,88	2,15	4	-2,70	2,07	4	-0,55	2,11

Tabella 3.2: Offset (X) e Deviazioni Standard per decolli su piste di larghezza 60 m

Come detto sopra, i valori di dispersione delle traiettorie non sono costanti lungo l'intero sviluppo della pista, infatti essendo un fenomeno che aumenta con la velocità, è chiaro che assume dei valori più grandi quando l'aereo accelera per decollare.

Per avere un'idea del fenomeno i dati sono stati semplicemente analizzati, mediando le quantità di offset e di deviazione standard.

Ciò che si è ottenuto è riassunto nelle tabelle e nei disegni seguenti. Per poter apprezzare la variabilità del fenomeno, è stato realizzato un disegno fuori scala, in quanto le differenze riscontrate, sono dell'ordine dei centimetri su lunghezze di qualche chilometro.

DECOLLI 45 m COMPORTAMENTO MEDIO										
	OFFSET MEDIO		BORDO	BORDO						
	[m]	STANDARD	SINISTRO	DESTRO						
	[]	MEDIE [m]	[m]	[m]	IOTALE					
allineamento	-0,16	2,0	-7,61	7,45	15,06					
corsa al decollo	al decollo -0,21		-7,53	7,31	14,84					
zona di rotazione	-0,35	2,5	-8,38	8,02	16,40					

Tabella 3.3: Valori che definiscono la dispersione trasversale nella fase di decollo su piste larghe 45 m



Figura 3.7: Variazione della larghezza della striscia di traffico, dovuta al cambiamento delle dispersioni trasversali lungo l'asse di una pista larga 45 m in fase di decollo

DECOLLI 60 m COMPORTAMENTO MEDIO										
OFFSET MEDIO [m] DEVIAZIONI BORDO BORDO STANDARD SINISTRO DESTRO LARGHEZ MEDIE [m] [m] [m] TOTALE										
allineamento	-0,707136	2,3	-8,51	7,80	16,32					
corsa al decollo	-0,749808	2,3	-8,52	7,77	16,30					
zona di rotazione	-0,755904	2,5	-8,74	7,98	16,72					

Tabella 3.4: Valori medi che definiscono la dispersione trasversale nella fase di decollo su piste larghe 60 m



Figura 3.8: Variazione media della larghezza della striscia di traffico, dovuta al cambiamento delle dispersioni trasversali lungo l'asse di una pista larga 60 m in fase di decollo

Si nota che l'andamento delle dispersioni è qualitativamente lo stesso, considerando le due larghezze di piste, ma quantitativamente si osservano valori più grandi dove la fascia pavimentata è più larga.

I valori più grandi si hanno nella zona vicina al lift-off, i più piccoli nella zona centrale, questo potrebbe apparire in disaccordo con quanto detto sopra, ovvero che le dispersioni aumentano con la velocità, tuttavia la spiegazione sta nel fatto che all' inizio del secondo tratto l'aereo inizia la vera e propria manovra di decollo, dopo essersi allineato, quindi dopo essersi avvicinato il più possibile alla traiettoria ideale, indicata dalla segnaletica orizzontale.

Dato che la larghezza della striscia di traffico è funzione diretta della larghezza dei carrelli, e che i dati disponibili sono relativi a misurazioni fatte nel 1975 su un traffico tipico di quel periodo, per definire una larghezza a favore di sicurezza si è ripetuta l'analisi, andando a considerare anche valori estremi di offset e deviazione standard.

Per fare questo, il primo passo è stato calcolare la media ponderata, in modo da assegnare una maggiore importanza ai dati con maggior numero di passaggi.

Sulla base di questa si è calcolata la deviazione standard, che sommata e sottratta al valor medio, ha permesso di definire un range di variazione entro il quale si sono ricavati i massimi e i minimi, per quanto riguarda i valori di offset, e solo i massimi, per quanto riguarda la deviazione standard, in quanto si è scelto di considerare sempre per la definizione della fascia maggiormente caricata i valori che ne determinano la larghezza massima.

DECOLLI 45 m										
	OFFEET		DEVIAZIONI	BORDO	BORDO					
		OFFSET	STANDARD	SINISTRO	DESTRO	LARGHEZZA				
		MAX [m]	max [m]	[m]	[m]	TOTALE				
allineamento	-0,35	0,03	2,2	-8,05	7,73	15,78				
corsa al decollo	rsa al decollo -0,59 -0,03		2,1	-8,19	7,57	15,76				
zona di rotazione	-0,54	-0,07	2,8	-8,85	8,25	17,10				

Le tabelle seguenti, riassumono i risultati ottenuti:

Tabella 3.5: Valori che definiscono la dispersione trasversale nella fase di decollo su piste larghe 45 m



Figura 3.9: Variazione della larghezza della striscia di traffico, dovuta al cambiamento delle dispersioni trasversali lungo l'asse di una pista larga 45 m in fase di decollo

DECOLLI 60 m											
	OFFERET		DEVIAZIONI	BORDO	BORDO						
		OFFSET	STANDARD	SINISTRO	DESTRO	LARGHEZZA					
		MAX [m]	max [m]	[m]	[m]	TOTALE					
allineamento	-0,98	-0,04	2,4	-8,91	7,89	16,80					
corsa al decollo	-1,36	-0,33	2,3	-9,17	7,48	16,65					
zona di rotazione	-1,71	-0,34	2,8	-9,97	7,92	17,89					

Tabella 3.6: Valori che definiscono la dispersione trasversale nella fase di decollo su piste larghe 60 m



Figura 3.10: Variazione della larghezza della striscia di traffico, dovuta al cambiamento delle dispersioni trasversali lungo l'asse di una pista larga 60 m in fase di decollo

Si osserva che il comportamento delineato dall'analisi precedente è anche in questo caso confermato: l'aereo infatti ha una certa dispersione prima di allinearsi che diminuisce fino ad assumere i valori, più bassi, che si notano all'inizio della seconda sezione.

Come ci si aspettava, le fasce risultanti sono più grandi, in quanto la dispersione non è più un valore medio, ma si considera il massimo, e l'offset non è più unico, ma si considera una sua variazione tra un valore minimo e uno massimo, in base ai quali si calcola la larghezza totale della fascia più caricata.

E' chiaro infatti che un offset minimo quindi spostato più a sinistra, genera una striscia di traffico spostata anch'essa sulla sinistra, scaricando così quella adiacente sulla destra, che risulterebbe caricata nel caso in cui l'offset fosse massimo quindi più spostato a destra, considerare entrambi gli scostamenti dall' asse permette di evitare questo errore.

Se si volesse progettare una pista o prevedere una manutenzione, non considerando questo aspetto, il valore di dispersione da prendere dovrebbe essere il massimo, che si ha solamente in uno spazio piuttosto breve, nell'intorno del punto di rotazione. E' chiaro quindi che si avrebbe una fascia caricata più grande di quella reale, in particolare:

- per le piste da 45 m si ha una riduzione nel primo tratto 17,10-15,78= 1,32 m, e nel secondo tratto 17,10-15,76=1,34 m;
- per le piste da 60 m si ha una riduzione nel primo tratto17,89-16,80=1,09 m, e nel secondo tratto 17,89-16,65=1,24 m.

3.3.2 Fase di Atterraggio

In generale le operazioni di atterraggio presentano una maggiore variabilità rispetto ai decolli e ciò si esplicita in più alti valori di deviazione standard, che originano campane più larghe rispetto alla situazione delle partenze.

I dati disponibili per quantificare questo fenomeno, sono come per i decolli quelli americani relativi ai 9 aeroporti [37].

Nella tabella seguente si riporta la composizione del traffico e i valori di offset e di deviazione standard relativi ad ogni tipologia di aereo.

Tutte le misure sono in metri e il segno indica dove è spostato l'offset rispetto alla center line di pista, meno, se si trova sulla sinistra, più, se si trova sulla destra.

					A	TTERRAC	GGI			
					INTERMEDIATE					
		L	AST POII	NT		POINT		FI	RST POI	NT
		n	Х	σ	n	Х	σ	n	Х	σ
707		95	-0,43	2,87	95	-0,36	2,20	95	-0,31	2,35
727-100		222	-0,32	2,90	222	-0,39	1,88	222	-0,45	1,97
727-200		179	-0,37	2,65	179	-0,46	2,12	179	-0,43	2,07
737		15	-0,56	3,85	15	-0,34	2,22	15	-0,35	2,21
747		17	-0,62	2,65	17	-0,97	2,29	17	-1,67	2,59
DC-8-40,-50		42	-0,17	3,12	42	-0,51	2,43	42	-0,59	2,47
DC-8-60	45 m	7	-0,54	2,70	7	-0,41	2,31	7	-0,32	2,46
DC-9-10,-20	4511	54	-0,12	3,50	54	-0,28	2,28	54	-0,56	2,47
DC-9-30,-40		197	0,14	3,65	197	-0,29	2,17	197	-0,20	2,16
DC-10-10		13	-0,72	2,71	13	-0,39	2,23	13	-1,10	2,49
C-580		62	0,21	3,34	62	0,71	2,94	62	-0,34	2,66
L-1011		37	0,23	2,62	37	-0,11	2,18	37	-0,33	2,15
YS-11		1	1,54	2,88	1	0,82	2,04	1	0,99	2,53
BAC-111		4	-0,57	2,94	4	-0,38	1,93	4	-0,81	2,24

Tabella 3.7: Offset (X) e Deviazioni Standard per atterraggi su piste di larghezza 45 m

		ATTERRAGGI					GGI			
					INTERMEDIATE					
		LAST POINT		POINT			FIRST POINT			
		n	Х	σ	n	Х	σ	n	Х	Σ
707		95	0,28	3,29	95	-0,31	2,66	95	-1,12	2,87
727-100	1	222	0,41	3,62	222	-0,04	2,82	222	-0,69	2,90
727-200		179	-0,09	3,00	179	-0,09	2,45	179	-0,54	2,50
737	(0 m	15	0,61	3,85	15	-0,50	1,44	15	-0,51	1,61
747		17	0,73	2,97	17	0,85	2,59	17	0,09	3,44
DC-8-40,-50		42	0,95	2,90	42	-0,22	2,48	42	-0,92	2,68
DC-8-60		7	0,42	2,25	7	-0,70	1,78	7	-1,71	2,16
DC-9-10,-20	00111	54	-0,83	3,21	54	-1,09	2,96	54	-1,13	2,54
DC-9-30,-40		197	0,40	3,56	197	-0,12	2,78	197	-0,52	2,69
DC-10-10		13	-0,18	1,87	13	-0,85	2,04	13	-2,22	2,33
C-580		62	-0,29	3,32	62	-0,66	2,42	62	-0,30	2,46
L-1011		37	-0,12	2,63	37	-0,19	2,62	37	-0,27	2,64
YS-11		1	0,00	0,00	1	0,00	0,00	1	0,00	0,00
BAC-111		4	-0,52	2,16	4	-2,91	5,43	4	0,12	1,02

Tabella 3.8: Offset (X) e Deviazioni Standard per atterraggi su piste di larghezza 45 m

Anche per gli atterraggi si ripete l'analisi fatta per i decolli.

Si parte dunque proponendo una situazione media. Anche in questo caso i disegni sono fuori scala per poter apprezzare meglio il fenomeno, e tale scala non è uguale in ogni caso, ma è adattata caso per caso.

ATTERRAGGI 45 m COMPORTAMENTO MEDIO								
	OFFSET MEDIO [m]	DEVIAZIONI STANDARD	BORDO SINISTRO	BORDO DESTRO	LARGHEZZA			
		Medie [m]	[m]	[m]	TOTALE			
toccata	-0,45	2,21	-8,17	7,71	15,88			
rullaggio	-0,36	2,15	-8,01	7,65	15,66			
uscita pista	-0,27	3,12	-8,90	8,62	17,52			

Tabella 3.9: Valori medi che definiscono la dispersione trasversale nella fase di atterraggio su piste larghe 45 m



Figura 3.11: Variazione media della larghezza della striscia di traffico, dovuta al cambiamento delle dispersioni trasversali lungo l'asse di una pista larga 45 m

ATTERRAGGI 60 m COMPORTAMENTO MEDIO							
	OFFSET MEDIO [m] DEVIAZIONI BORDO BO STANDARD SINISTRO DES MEDIE [m] [m] [i				LARGHEZZA TOTALE		
toccata	-0,704088	2,76	-8,96	8,26	17,21		
rullaggio	-0,207264	2,73	-8,44	8,23	16,67		
uscita pista	-0,231648	3,41	-9,15	8,91	18,06		

Tabella 3.10: Valori medi che definiscono la dispersione trasversale nella fase di atterraggio su piste larghe 60 m



Figura 3.12: Variazione media della larghezza della striscia di traffico, dovuta al cambiamento delle dispersioni trasversali lungo l'asse di una pista larga 60 m

Già da questa analisi sommaria, emerge una problematica, ovvero l'ultima sezione, che sarebbe quella nella quale l'aereo si appresta ad uscire dalla pista, ha dei valori di dispersione molto alti.

Un comportamento del genere non sembrerebbe essere giustificato in quanto, l'aereo prima affrontare l'uscita riduce notevolmente la sua velocità e quindi ci si aspetterebbe che si riducesse anche la dispersione trasversale delle traiettorie, come avviene tra la prima e la seconda sezione. La spiegazione sta nel fatto che non c'è un comportamento ben definito, in quanto le uscite con le relative velocità, dipendono molto dalla geometria dell'aeroporto. In particolare si noterà un comportamento molto diverso se l'aereo utilizzerà un' uscita ad alta velocità o una normale.

Nel secondo caso è corretto non considerare più i valori sopra riportati, ma utilizzare i quelli propri delle taxiway in quanto prima di curvare l'aereo ha già concluso la manovra di atterraggio e procede rullando con velocità molto basse, comparabili con quelle che si hanno appunto nei raccordi.

Le uscite ad alta velocità verranno trattate nel paragrafo 3.5.2.

Per permettere un confronto, con la situazione media appena delineate, si riportano i dati di partenza rielaborati nello stesso modo descritto per i decolli, per entrambe le larghezze di pista.

ATTERRAGGI 45 m							
	OFFSET MIN [m]	OFFSET MAX [m]	DEVIAZIONI STANDARD max [m]	BORDO SINISTRO [m]	BORDO DESTRO [m]	LARGHEZZA TOTALE	
toccata	-0,81	-0,20	2,35	-8,66	7,65	16,31	
rullaggio	-0,51	-0,11	2,31	-8,32	7,69	16,01	
uscita pista	-0,72	0,23	3,50	-9,72	9,24	18,96	

Tabella 3.11: Valori che definiscono la dispersione trasversale nella fase di atterraggio su piste larghe 45 m



Figura 3.13: Variazione della larghezza della striscia di traffico, dovuta al cambiamento delle dispersioni trasversali lungo l'asse di una pista larga 45 m

ATTERRAGGI 60 m								
	OFFOFT		DEVIAZIONI	BORDO	BORDO			
		OFFSET	STANDARD	SINISTRO	DESTRO	LARGHEZZA		
	iviin [m]	MAX [m]	max [m]	[m]	[m]	TOTALE		
toccata	-1,13	-0,27	3,44	-10,07	8,67	18,74		
rullaggio	-0,85	0,00	2,96	-9,31	8,46	17,77		
uscita pista	-0,29	0,61	3,85	-9,64	9,96	19,59		

Tabella 3.12: Valori che definiscono la dispersione trasversale nella fase di atterraggio su piste larghe 60 m



Figura 3.14: Variazione della larghezza della striscia di traffico, dovuta al cambiamento delle dispersioni trasversali lungo l'asse di una pista larga 60 m

Anche in questo caso si conferma quanto detto sopra: si nota una dispersione più elevata intorno alla zona di toccata che si riduce nel rullaggio dell'aereo. In prossimità delle uscite come già spiegato, il comportamento è molto variabile. Si nota che la fascia che si ottiene è anche in questi casi maggiore rispetto alla situazione mediata vista sopra.

Come per i decolli, anche gli atterraggi presentano maggiori dispersioni nel caso in cui la pista è più larga.

Per presentare una situazione riscontrabile in fase di atterraggio con uscita normale, si propongono altri due schemi, uno per le piste da 45 m e uno per quelle da 60, in cui la terza fascia viene sostituita, con un'altra di dimensioni più ridotte, proprie appunto delle taxiway.

ATTERRAGGI 45 m - USCITE NORMALI							
	оггогт		DEVIAZIONI	BORDO	BORDO		
		OFFSET	STANDARD	SINISTRO	DESTRO	LARGHEZZA	
		MAX [m]	max [m]	[m]	[m]	TOTALE	
toccata	-0,81	-0,20	2,35	-8,66	7,65	16,31	
rullaggio	-0,51	-0,11	2,31	-8,32	7,69	16,01	
uscita pista	0,59	0,91	1,90	-6,81	8,31	15,12	

Tabella 3.13: Valori che definiscono la dispersione trasversale nella fase di atterraggio supiste larghe 45 m, fino al raggiungimento di velocità di 40-50 km/h


Figura 3.15: Variazione della larghezza della striscia di traffico, dovuta al cambiamento delle dispersioni trasversali lungo l'asse di una pista larga 45 m fino al raggiungimento di velocità di 40-50 km/h

ATTERRAGGI 60 m - USCITE NORMALI									
	OFFRET		DEVIAZIONI	BORDO	BORDO				
		OFFSET	STANDARD	SINISTRO	DESTRO	LARGHEZZA			
		MAX [m]	max [m]	[m]	[m]	TOTALE			
toccata	-1,13	-0,27	3,44	-10,07	8,67	18,74			
rullaggio	-0,85	0,00	2,96	-9,31	8,46	17,77			
uscita pista	0,59	0,91	1,90	-6,81	8,31	15,12			





Figura 3.16: : Variazione della larghezza della striscia di traffico, dovuta al cambiamento delle dispersioni trasversali lungo l'asse di una pista larga 45 m fino al raggiungimento di velocità di 40-50 km/h

In questo caso si ha un restringimento progressivo, che porta ad un risparmio in m nel secondo tratto di:

- per le piste da 45 m si ha una riduzione nell'ultimo tratto 16,31-15,12=1,19 m, e nel secondo tratto 16,31-16,01=0,30 m;
- per le piste da 60 m si ha una riduzione nel primo tratto 18,74-15,12=3,62 m, e nel secondo tratto 18,74-17,77=0,97 m.

3.4 Dispersioni Longitudinali sulle piste di volo

La valutazione dell'andamento delle dispersioni longitudinali è molto interessante, in quanto permette di capire quali carichi e dove questi gravano sulla diverse zone della pista.

Dato che argomento "carichi" è stato ampiamente trattato nel capitolo 2, si cita ora solamente come si distribuiscono statisticamente i punti di toccata, in fase di atterraggio e di rotazione, in fase di decollo [37].

I dati sui quali sono state fatte queste considerazioni, sono ancora quelli americani, grazie ai quali si è potuto studiare l'andamento trasversale delle dispersioni.

Le posizioni individuate non vengono misurate in maniera precisa, in quanto il sistema di monitoraggio non è continuo, ma è costituito da 5 sensori a infrarossi per pista.

Il punto di rotazione viene individuato dalla distanza tra la testata di "fine pista"e il punto di mezzo tra la posizione dell'ultimo sensore interrotto e la posizione del sensore che lo segue, contrariamente il punto di touchdow viene dalla distanza tra la testata di "inizio pista"e il punto centrale tra la posizione dell'primo sensore interrotto e la posizione del sensore che lo precede, come esemplificato nelle Fig 3.17, 3.18.



Figura 3.17: Calcolo della posizione del punto di rotazione in fase di decollo, mediante i sensori ad infrarosso



Figura 3.18: Calcolo della posizione del punto di toccata in fase di atterraggio, mediante i sensori ad infrarosso

Per i decolli si è osservato, che la rotazione avviene sempre all'interno di una fascia compresa tra i 3000 e i 7000 ft (914-2134 m) dal punto in cui inizia la corsa al decollo.

Per mettere un po' di ordine in tutti i dati disponibili circa gli atterraggi si è scelto di dividere la pista in segmenti di 1000 piedi e calcolare la percentuale degli arrivi che avvengono all' interno di ogni sezione.

Ciò che si osserva è che il 90-95% delle toccate avvengono entro i primi 3000 ft (914 m) dalla soglia, il 70-85% entro i primi 2000 ft (610 m), il 15-25% entro i primi 1000 ft (305 m).

Da notare che gli aerei con due motori atterrano più vicini alla soglia, rispetto a quelli più grandi a tre o quatto motori.

Tra i fattori che vanno ad influire nella manovra, oltre alle prestazioni dell'aeromobile, si citano il peso dello stesso, temperatura e altitudine, la visibilità e la posizione spostata della soglia, a cui si aggiunge, come detto sopra, la presenza di venti contrari e le condizioni di umidità della pavimentazione.

Come è facile immaginare, grande importanza ha l'esperienza del pilota nel portare l'aereo a ad eseguire la taccata in prossimità del punto di ottimo contatto.

È curioso che proprio questo argomento sia stato trattato in un progetto di ricerca dell' università dell'Ohio, che rilevando e mettendo a paragone il comportamento tenuto da piloti esperti e da piloti inesperti, conclude che questi ultimi tendono nella maggior parte dei casi ad atterrare prima dell' Aiming Point [46], con deviazioni trasversali di solito maggiori, rispetto a quelle prodotte dagli atterraggi dei piloti esperti. Questi inoltre, con rarità atterrano prima del punto di ottimo contatto, che viene rispettato quasi sempre o al massimo superato.

3.5 Dispersioni trasversali sulle taxiway

Sono gli elementi dell'aeroporto che collegano i punti di ingresso o uscita dalla pista con l'area di parcheggio degli aeromobili.

Sono caratterizzate da velocità di percorrenza più basse rispetto alle runway. Geometricamente possono essere o dei segmenti rettilinei o delle curve e dato che le dispersioni osservate sono diverse, si tratteranno separatamente i due casi, distinguendo anche quello che avviene nelle uscite ad alta velocità, caratterizzate come detto anche sopra da valori di deviazione standard e offset molto più elevati e variabili di ogni altro elemento visto finora.

3.5.1 Vie Di Rullaggio

Le vie di rullaggio sono le vie rettilinee che portano ai piazzali di sosta, hanno dimensioni ridotte rispetto alla runway, definite nell' "Airports Design Manual, Part 2- Taxiways, Aprons and Holding Bays" (ICAO DOC 9157-AN/901, 1991 [39].

Le larghezze minime consentite per taxiways di aeroporti in catogoria D ed E sono pari a 23 m, quelle necessarie nelle strutture classificate come F la larghezza è maggiore, pari a 25 m.

Dimensioni minori sono dovute al fatto che i raccordi sono percorsi a velocità molto ridotta e permettono quindi di ottenere una maggiore precisione di guida che provoca minori dispersioni laterali.

Quest'ultime tuttavia, aumentano con la grandezza degli aeromobili che percorrono il raccordo dato che l'altezza della cabina di pilotaggio sul piano viabile aumenta all'aumentare delle dimensioni dell'aereo: ciò induce maggiori imprecisioni nella guida ottica dell'aeromobile a terra e comporta maggiori dispersioni delle traiettorie.

Per questo motivo, è di fondamentale importanza ai fini della sicurezza, studiare le probabilità di rischio di collisione tra le punte delle ali, nelle varie situazioni riscontrabili in aeroporto, funzioni dirette delle dispersioni.

L'idea di base è anche in questo caso suddividere la fascia pavimentata longitudinalmente in tre parti, di cui la centrale è quella nella quale si concentrano la maggior parte delle traiettorie.

A differenza di quanto avviene per le piste, questa suddivisione non varia trasversalmente, ma rimane costante lungo tutta la lunghezza del rullaggio.

Si osserva anche in questo caso un diverso comportamento in funzione delle larghezze delle taxiways, che presentano valori di dispersioni più grandi in presenza di maggiori spazi a disposizione.

Le strisce di traffico si individuano, considerando il contributo degli offset osservati e delle deviazioni standard sommati agli 11 m di carrello posteriore del B747-400.

Come detto sopra, questo aeromobile è molto grande, ed è stato il più grande a transitare nei cieli del mondo fino al 2006, anno in cui è stato immesso nel mercato l'Airbus A380.

La costruzione di un nuovo aeroporto o l'adeguamento di uno esistente, infatti, deve basarsi sul principio della compatibilità aeromobile-aeroporto, in modo da consentire lo svolgersi di tutte le operazioni in sicurezza. Un grande impegno è richiesto dunque alle case costruttrici dei velivoli per dimostrare che tale compatibilità esiste, senza apportare sostanziali modifiche alle infrastrutture. Quando infatti viene posto allo studio un nuovo aeromobile di prestazioni più elevate, le proprietà di questo vengono definite con riferimento alla distribuzione statistica delle caratteristiche geometriche delle infrastrutture esistenti, sulle quali il nuovo aeromobile dovrà operare.

Per tale motivo da una parte troviamo le compagnie aeree che si impegnano nello sviluppo di progetti di ricerca volti all'individuazione delle probabilità di superamento di determinati valori di deviazione standard, dall'altra gli enti regolatori come FAA e ICAO che gestiscono le nuove norme in funzione delle categorie di aeromobili presenti, prescrivendo quali aerei sono ammessi in quali aeroporti, in funzione delle distanze di separazione disponibili e delle grandezze tipiche dei velivoli, in particolare larghezza dei carrelli di atterraggio, apertura alare e distanza tra i due carrelli.

Si è scelto quindi di utilizzare gli 11 m del B747 come base per la striscia di traffico, proprio perché essendo stato il più grande aereo fino al 2006, sono disponibili diverse campagne di misura volte a valutare il corretto inserimento dello stesso negli aeroporti esistenti, anche se sono per lo più riferiti alle zone di taxi.

Il comportamento delle dispersioni, rilevato nelle vie di rullaggio, è anch' esso caratterizzato da uno spostamento tra l'asse dell'aeromobile e l'asse della centerline, che a differenza di quanto accade nelle piste è traslato sulla destra. Il valore di tale scostamento dipende da due i parametri che sono:

- la posizione del guidatore (senso di percorrenza del raccordo)
- la posizione delle luci di centro-via.

L'offset viene espresso tramite la formula:

$$e = \mu_0 \pm \mu_p$$

Con il seguente significato dei simboli:

- μ_p : errore di parallasse, cambia segno con il verso di percorrenza;
- μ_0 : errore dovuto allo scostamento delle luci di pista.

Le luci di taxi, infatti, non vengono posizionate al centro della fascia pavimentata, in quanto, avendo una leggera sporgenza, si preferisce evitare che gli aerei ci transitino sopra, soprattutto per limitare i moti verticali dei velivoli. Il centro reale dei raccordi è indicato dalla segnaletica orizzontale. Questo fattore influisce sulle traiettorie, causando uno spostamento dell'asse seguito che non coincide più con la centerline.

Questo aspetto risulta evidente, da due campagne di misure eseguite presso J.F.Kennedy International Airport (JFK) [41] e Ancorage International Airport (ANC) [42], in due aeroporti in cui le luci di pista sono posizionate in maniera differente.

Dove queste luci sono prossime all' asse pista, gli offset rilevati sono minori. Inoltre percorrendo da ambo le parti i raccordi, si nota come il comportamento cambi in funzione delle stesse luci, che naturalmente rimangono sempre dallo stesso lato influenzando il pilota nella percezione della linea centrale.

Andando a considerare in maniera ponderata le misure ottenute, parallelamente a quanto fatto per le runway, si rilevano due valori di offset, un minimo, che definisce il bordo sinistro maggiormente spostato dalla center line, e un massimo che determina invece il bordo destro.

I valori individuati sono:

(3.8)

- $\mu_{max} = 0.23 \text{ m} (0.73 \text{ ft}).$
- $\mu_{min} = 0.06 \text{ m} (0,21 \text{ ft}).$

Di cui il primo si ritrova in entrambe le campagne di misura, fatte presso gli aeroporti JFK e ANC, il secondo invece è proprio di ANC.

Seguendo la filosofia di voler generalizzare l'andamento delle dispersioni trasversali delle traiettorie, si è scelto anche in questo caso di avere una striscia di traffico più grande possibile, che ha portato dunque ad individuare il range di variazione degli scostamenti laterali dalla center line, grazie all'interazione di due set di dati differenti.

Come detto sopra, questi scostamenti sono somma di due contributi, di cui il maggiore è sempre quello dovuto alla posizione delle luci di pista, l'errore di parallasse esiste ma produce effetti quasi trascurabili.

Queste due quantità, possono essere considerate rappresentative di una situazione generale in quanto sono frutto dell'elaborazione di dati provenienti da due aeroporti differenti, geograficamente lontani e quindi soggetti a vari regimi di temperature e di meteorologia.

Quanto detto è avvalorato dal fatto che le dispersioni ottenute sono in entrambi i casi comprese tra i valori di $\pm 1,5$ m dal punto in cui si troverebbe l'asse delle ruote del carrello se non ci fosse dispersione delle traiettorie.

I valori di $\pm 1,5$ m, non rappresentano le misure massime rilevate di deviazione dalla center line, in quanto si osservano comportamenti più dispersi contenuti entro la fascia compresa tra -2,63 m e +2,7 m, tuttavia deviazioni di questa entità sono molto rare.

Questo comportamento è visibile nel grafico sotto riportato, dove è chiaro che già dispersioni maggiori di $\pm 1,5$ m (5 ft) sono molto rare.

A questo proposito si sono calcolate le percentuali delle misure che eccedono il suddetto limite e sono, su un totale di 12314, 37 in sinistra e 56 in destra, che corrispondono ad delle percentuali rispettivamente di 0,3 % e di 0,45 %.

La semplificazione che si è fatta è dunque giustificata, dato che per striscia di traffico si intende lo spazio entro il quale è compreso il 75% delle traiettorie.



Figura 3.19: Andamento delle dispersioni trasversali, derivanti dalle analisi fatte in due aeroporti: JFK e ANC

Si nota inoltre che per probabilità di accadimento molto basse non è neanche corretto utilizzare la distribuzione normale, in quanto i dati risultano meglio approssimati da una Distribuzione Logistica.

Rappresentando infatti mediante grafico, le dispersioni osservate, sulle ascisse, e quelle teoriche ottenute con una distribuzione normale con precisi valori di media e deviazione standard, sulle ordinate, si nota che si ha una buona rispondenza nei valori centrali, comunque compresi nel range definito da $\pm 1,5$ m, come illustrato nelle figure seguenti, inerenti alle misure dei due aeroporti sopra citati.



Figura 3.20: Andamento delle dispersioni trasversali e approssimazione dei risultati con la legge di distribuzione normale (JFK)



Figura 3.21: Andamento delle dispersioni trasversali e approssimazione dei risultati con la legge di distribuzione normale (ANC)

I valori di estremità non possono essere trascurati nella valutazione del rischio di collisione, in quanto da ciò dipende il livello di sicurezza dell'aereo e la possibilità che quest'ultimo possa transitare in un determinato aeroporto.

Tuttavia questa analisi ha un altro obiettivo, ovvero valutare quali parti della pavimentazione sono soggette maggiormente a carico, per poter applicare una corretta manutenzione e progettare spessori opportuni di pavimentazione, dunque è sufficiente considerare una situazione a favore di sicurezza, ma comunque caratterizzata da probabilità di accadimento abbastanza alte, in quanto premunirsi da tutte le possibili evenienze farebbe perdere il risparmio che invece si sta cercando.

Si propone dunque lo schema della striscia di traffico individuata per le vie di rullaggio larghe 23 m.

TAXIWAY DRITTE 23 m									
OFFSET OFFSET DEVIAZIONI BORDO BORDO Ia									
	MIN [m] MAX [m] STAND				DESTRO	totale			
max [m] [m] [m]									
2003: JFK	0,06	0,23	2,63	-8,07	8,36	16,43			
2003: ANC	0,19	0,23	2,7	-8,01	8,43	16,44			
TAXIWAY DRITTE	0,06	0,23	1,5	-6,94	7,23	14,17			

Tabella 3.15: Valori di offset e deviazioni per taxiway dritte



Figura 3.22: Striscia di traffico ottenuta per le taxiway dritte con larghezza di 23 m

Come detto sopra, più il pilota ha spazio a disposizione, più le dispersioni rilevate saranno maggiori.

Si ripete dunque l'analisi su osservazioni fatte in piste larghe 30,5 m.

Gli offset riscontrati anche in questo caso sono due e anche in questo caso provengono da due campagne di misura differenti, riportate in bibliografia [37], [40].

Si riportano i valori utilizzati:

TAXIWAY DRITTE 30,5 m									
	OFFSET	OFFSET	DEVIAZIONI	BORDO	BORDO	larghezza			
	MIN [m]	MAX [m]	STANDARD	SINISTRO	DESTRO	totale			
			max [m]	[m]	[m]				
1975: HoSang	0,	91	1,8	-6,39	8,21	14,6			
1987 : LONDRA	0,59		4,1	-6,81	7,99	14,8			
TAXIWAY DRITTE 0,59 0,91 1,9 -6,81 8,31 15,12									

Tabella 3.16: Valori di offset e deviazioni per taxiway dritte

Si nota che il valore massimo di deviazione standard rilevato nelle misurazioni di Londra è molto alto, ma viene raggiunto solamente nel 5% dei casi, dunque si preferisce utilizzare per gli stessi motivi elencati sopra, una deviazione standard di 1,9 m che si riscontra nel restante 95% delle osservazioni ed è comunque più alta rispetto a quella propria della campagna di misura del 1975.

A dimostrazione di quanto detto, si riporta un grafico che riassume le osservazioni del comportamento dei B747-400 transitanti a Londra, che ha sulle ascisse le deviazioni in m del carrello principale e sulle ordinate il numero di osservazioni.

Dal grafico risulta chiaramente come la maggior parte degli aerei subiscano variazioni di percorso generalmente minori di 1,9 m.



Figura 3.23: Schematizzazione delle osservazioni delle deviazioni del carrello principale di un B747 [10]



Figura 3.24: Striscia di traffico ottenuta per le taxiway dritte con larghezza di 30,5 m

Occorre a questo punto fare una precisazione circa l'andamento del ruotino, finora infatti si è supposto che questo assuma lo stesso comportamento del carrello posteriore, ma non è così.

Di solito, nei tratti rettilinei, il carrello di naso si dispone più vicino alla centerline e presenta valori sia di offset sia di deviazione standard più bassi rispetto a quanto avviene nel carrello principale.

In ogni caso c'è una forte correlazione in quanto si osserva nei due carrelli, tanto da permettere di trascurare quanto accade davanti.

Per dimostrare questa correlazione, si rappresentano i punti relativi alle osservazioni delle dispersioni dei due carrelli main (MG) e nose gear (NG) in un grafico come quello sotto riportato, a titolo di esempio, costruito sui dati relativi all' aeroporto di JFK, nel raccordo ALPHA.

Si nota che la retta di interpolazione è molto prossima alla diagonale, che corrisponde alla situazione di perfetta coincidenza delle misure, ovvero un comportamento identico dei due.

Il numero r, è un indice che dà informazioni circa la bontà dell'approssimazione, e più si avvicina al valore 1, minore è l'errore che si commette utilizzando tale approssimazione.

Si nota come i valori di r trovati siano molto vicini all'unità, circa r= 0,97 [41].



Figura 3.25: Correlazione tra spostamenti dalla centerline osservati per il ruotino (Nose Gear) e per il carrello principale (Main Gear)

Trascurare quanto avviene al carrello anteriore, se da una parte non fa perdere di significato le analisi sul comportamento delle dispersioni fatte finora, dato che la striscia di traffico complessiva per le vie di rullaggio è comunque individuata dai valori suddetti, occorre precisare che la semplificazione derivante dalla considerazione di un' uguale traiettoria del ruotino e del carrello principale non è veritiera.

Come specificato precedentemente, l'asse di pista e le luci di centro via sono distanziate di qualche centimetro, in modo da evitare che l'aereo ci transiti sopra, causando un usura accelerata dell'apparecchiatura e delle sollecitazioni verticali che sarebbe meglio evitare.

La posizione che si auspica venga mantenuta nel rullaggio è indicata nella Fig.3.26.



Figura 3.26: Posizione "auspicabile" del carrello anteriore rispetto alla posizione delle luci di centro via

Si nota dalle misure indicate in Fig.3.26 che il margine di errore è molto piccolo, quindi facilmente accade che l'aereo transiti sopra le centerlights, iniziando un movimento oscillatorio, schematizzabile con due sinusoidi [51], una relativa al ruotino anteriore, una al carrello posteriore di equazione:

$$Y_{ng} = \Delta + Asen(\frac{2\pi t}{T} + \vartheta)$$

$$Y_{mg} = \Delta + A^* sen(\frac{2\pi t}{T} + \vartheta + \varphi)$$
(3.9)

(3.10)

Dove Y_{ng} e Y_{mg} indicano gli spostamenti dalla center line rispettivamente del carrello anteriore e del carrello posteriore, A e A*, sono le ampiezze delle sinusoidi e Δ rappresenta lo scostamento dall'asse di centro via dell'asse della funzione. Il significato dei simboli è chiaramente visibile nella Fig. 3.27.

Dato che in questo caso l'oscillazione massima è dovuta al carrello anteriore Fig. 3.27, la striscia di traffico sarà definita partendo da questo valore, che però risulta più piccola di quella individuata dal nostro studio che invece si riferisce ad un insieme più ampio di osservazioni.



Figura 3.27: Differenza di comportamento delle deviazioni dei due carrelli: andamento sinusoidale del ruotino

3.5.2 Raccordi di entrata/uscita pista

I raccordi di entrata/uscita pista sono elementi funzionali di collegamento tra le vie di rullaggio e le piste.

L' elemento discriminante nel progetto delle stesse è la velocità con cui questi raccordi verranno percorsi, in quanto è la velocità che limita i raggi da poter adottare.

Si vuole anche in questo caso fotografare il fenomeno dispersivo, operazione più complessa rispetto a quanto fatto per i segmenti rettilinei in quanto in curva tutto dipende da come il pilota si approccia alla manovra.

Le procedure adottate sono infatti due:

- Cockpit Over Line Steering, prevista dall'ICAO e prevalentemente adottata in Europa, è la manovra nella quale il pilota segue con la verticale per la cabina di pilotaggio l'asse di pista individuato dalla segnaletica orizzontale.
- Judgemental Oversteering: procedura adottata principalmente negli USA, manovra nella quale il pilota sterza dopo che il ruotino anteriore ha superato il punto di tangenza tra rettifilo e arco di cerchio.

Nel primo caso la zona più sollecitata risulta tutta spostata sul lato interno della curva, nel secondo caso rimane distribuita attorno all'asse centrale.

In questo caso dunque è fondamentale conoscere dettagliatamente le posizioni assunte dai due carrelli, in quanto la striscia di traffico sarà una corona circolare la cui larghezza sarà definita da due punti estremi: sul lato interno della curva sarà sempre limitata dalle dispersioni del carrello principale, sul lato esterno, da quelle del carrello anteriore.

Un comportamento del genere è giustificato dal fatto che l'aereo non riesce a seguire una traiettoria perfettamente circolare, ma deve sopperire al problema dell' iscrizione in curva, che è tanto più elevato quanto più i due carrelli sono distanti tra loro.

Dai dati disponibili, si deduce che l'approccio che definisce una maggiore larghezza della striscia di traffico è quella a comportamento tendenzialmente americano, che dà origine una fascia sollecitata piuttosto centrale: il ruotino infatti, supera la centerline, tanto da permettere una pseudo-simmetria tra gli scostamenti riscontrati nei due carrelli.

Naturalmente anche nelle taxi curve la dispersione è influenzata dalla larghezza della fascia pavimentata.

Nella tabella seguente si riporta il sunto delle misurazioni fatte su taxi da 30,5 m [45], percorse da una rosa di aeromobili, di cui si è considerato solamente il contributo del B 747, in tutte le sue versioni. Il segno meno indica la parte interna della curva e il segno più la parte esterna.

B 747 Tutti i modelli							
n campione offset [m] Dev. St. [m]							
	Nose Gear	1351	4,0	2,38			
TAXICURVE	Main Gear	1351	-2,0	2,36			

Tabella 3.17: Valori caratteristici per una taxiway curva

I valori sono stati appunto utilizzati per costruire la strisca di traffico le cui dimensioni sono visibili nella tabella seguente.

TAXIWAY CURVE 30,5 m									
	OFFSET OFFSET DEV. ST. DEV. ST. BORDO BORDO largh								
	Nose	Main	Interno	esterno	SINISTRO	DESTRO	totale		
	Gear	Gear	curva	curva[m]	[m]	[m]	[m]		
[m] [m] [m] [m]									
TAXI CURVE	4	-2	2,36	2,38	-9,86	6,38	16,24		

Tabella 3.18: Definizione della striscia di traffico

Si precisa che queste misure sono riferite al centro curva.

I disegni sono stati costruiti raccordando i vari elementi taxi e piste caratterizzati dalle strisce di traffico con le larghezze definite finora.

Si nota che il comportamento osservato in ingresso e in uscita dalla runway è lo stesso, inoltre raccordando una taxiway da 30,5 m, prima con una pista da 45 m e poi con una da 60 m, le dispersioni osservate in curva sono le stesse, si deduce quindi che in curva, queste sono indipendenti dalla larghezza della pista a cui è collegata.

Per definire la striscia di traffico, occorre raccordare, i valori sopra indicati, validi in centro curva, con i valori caratteristici degli elementi da collegare che sono in ogni caso quelli compresi nella fascia larga 15,12 m, trovata per le taxiway larghe dritte, in quanto sia in entrata che in uscita l'aereo ha delle velocità molto basse tali da poter considerare l'andamento delle dispersioni trasversali paragonabile a quello osservato nelle taxiway, da notare che si sceglie per la pista sempre il valore di 15,12 m perché anche le piste strette sono comunque più grandi delle vie di rullaggio larghe.





Figura 3.28: Strisca di traffico definita di un raccordo che collega una taxi da 30,5 m e una pista da 45 o 60 m

Per le taxi di larghezza minore (23m), si riscontrano entrambi i comportamenti [40], [45] e ancora una volta l'approccio alla curva all'americana definisce la striscia di traffico maggiore, come illustra la tabella seguente.

TAXIWAY CURVE									
	OFFSET	OFFSET	DEV. ST.	DEV. ST.	BORDO	BORDO	larghezza		
	Nose	Main	Interno	esterno	SINISTRO	DESTRO	totale		
	Gear	Gear	curva	curva[m]	[m]	[m]	[m]		
	[m]	[m]	[m]						
23 m all' americana	3,01	-1,50	1,77	1,79	-7,41	4,80	12,21		
23 m all'europea	-0,04	-3,31	0,5	2,6	-9,31	2,69	12		

Tabella 3.19: Definizione delle strisce di traffico che si avrebbero nei due comportamenti

Si rappresenta dunque la striscia di traffico relativa al comportamento all'americana, per taxi larghe 23 m.



Figura 3.29: Strisca di traffico definita di un raccordo che collega una taxi da 23 m e una pista da 45 o 60 m

Per confermare il comportamento delineato finora studiando i dati statistici di distribuzione dell'asse dell'aereo rispetto alla centerline, si sono consultate le schede tecniche degli aerei, in particolare del B 747-400, in quanto è stato l'aereo utilizzato per definire tutte le larghezze delle strisce di traffico, comprese quelle delle taxi curve.

Il comportamento riscontrato è rappresentato Fig 3.30:



Figura 3.30: Comportamento di un B747-400 in curva, con approccio all' americana

Si nota che il franco dei 5 m, tra il bordo esterno delle ruote e la fine della fascia pavimentata è rispettato.

Le considerazioni fatte anche sopra, sulla variazione tra le larghezze di pista da collegare alle taxiway larghe 23 m, sono le stesse, ovvero il comportamento che si rileva è lo stesso.

Quanto detto vale chiaramente per i raccordi di entrata in pista e per le uscite cosiddette normali, ovvero quelle che possono essere percorse dagli aerei ad una velocità variabile tra i 40 e i 50 km/h.

Le uscite normali, raccordano pista e vie di rullaggio con un angolo da 90° e sono usate di solito in tutti gli aeroporti che hanno meno di 25 operazioni all' ora, in quanto un maggiore traffico richiede la liberazione della pista in tempi più rapidi e quindi l'utilizzo di uscite rapide.

Gli angoli utilizzati sono in questo caso o di 45° o di 30° e permettono velocità di percorrenza maggiori, intorno ai 90-95 km/h.

I dati disponibili riguardano 6 uscite ad alta velocità, appartenenti a sei aeroporti americani [37], sottoposte a diverse condizioni di traffico, tuttavia in nessun caso si sono rilevate velocità così alte.

La tabella seguente riassume le misurazioni fatte, separando le velocità più alte, intorno ai 60 km/h dalle le più basse, intorno ai 40 km/h.

AIRPORT- RUNWAY	USCITE ALTA VELOCITA'	AEREI	n	V media [km/h]	disp vel [km/h]	offset [m]	deviazione standard [m]
ATL-27L	W	DC-9-10,-20	36	61,5	11	0	3,1
		DC-9-30,-40	169	62,5	12,1	0,82	3,2
		727-100	37	59,3	15,4	1,1	3,4
		727-200	40	62,5	13,2	-0,53	2,8
		ALL	334	61,5	13,2	0,46	3,3
DEN-26L	S	727-100	40	65,8	28,5	-0,17	2,4
		737	29	61,5	15,4	-0,26	2,7
		ALL	112	62,5	20,9	-0,22	2,5
SEA-16R	B-5	ALL	11	45	11	-0,36	1,5
ATL-9R	Y	DC-9-30,-40	37	46,1	8,8	-0,73	3,3
		727-200	20	46,1	6,6	-0,72	3
		ALL	88	47,2	7,7	-0,84	3,2
ORD-9R	NE	727-100	19	43,9	8,8	4,57	2,5
		727-200	33	43,9	7,7	3	2,1
		ALL	109	42,8	9,9	4,2	2,5
DFW	Α	ALL	29	48,3	9,9	-3,2	2,6

Tabella 3.20: : Velocità, Offset (X) e Deviazioni Standard per uscite rapide

Il quadro che deriva da queste misure è molto complesso, ci sono numeri molto discordanti tra loro, soprattutto nei valori offset, che assumono segno sia positivo che negativo.

Ciò è dovuto al fatto che questi dati non distinguono quanto avviene al carrello posteriore e al carrello anteriore.

Le deviazioni standard, hanno anch'esse valori molto variabili, ma si mantengono comunque abbastanza alte, comprese nel range 1,5 - 3,4 m, da osservare che tali valori sono decisamente più grandi rispetto a quelli trovati finora.

Per rappresentare in un grafico, quanto avviene nelle uscite rapide si è proceduto andando ad analizzare statisticamente i risultati inerenti unicamente alle velocità più alte, in quanto per le velocità minori si dispone di dati più recenti e accurati.

I valori medi sia di offset che di deviazione laterali, sono ponderati, ovvero maggiore rilievo è dato a quelli misurati in un numero maggiore di osservazioni.

Si è dunque calcolato un range attorno ai valori medi, aggiungendo e togliendo le rispettive deviazioni standard, in modo da escludere i valori troppo grandi o troppo piccoli.

Dalle misurazioni "depurate", si sono calcolati:

- Il valore medio ponderato "nuovo" degli offset, che indica il baricentro della striscia di traffico;
- Il minimo degli offset, che indica il maggiore spostamento dell'asse seguito dall'aereo, rispetto alla centerline sul lato interno della curva;
- Il massimo degli offset, che indica il maggiore spostamento dell'asse seguito dall'aereo, rispetto alla centerline sul lato esterno della curva;
- Il massimo delle deviazioni standard, che indica la situazione peggiore di dispersione delle traiettorie.

Nella tabella seguente si riportano le misure utilizzate per definire l'ingombro in centro curva.

USCITE RAPIDE								
OFFSET MIN [m]	OFFSET MAX [m]	DEVIAZIONI STANDARD max [m]	BORDO SINISTRO [m]	BORDO DESTRO [m]	larghezza totale			
-0,53 0,82 3,4 -9,43 9,72 19,15								

Tabella 3.21: Definizione delle strisce di traffico che si avrebbero nelle uscite ad alta velocità

Si riporta lo schema di un'uscita ad alta velocità con un' inclinazione di 30°, collegata ad un pista larga 60 m.



Figura 3.31: Dispersioni uscite ad alta velocità

In questo caso l'inscrizione in curva risulta più semplice, soprattutto se l'inclinazione è di 30° . La striscia di traffico che ne deriva è definita esclusivamente dal comportamento del carrello posteriore.

Si nota come la larghezza della striscia in prossimità della curva aumenta e poi, si ristabilisca su valori di dispersione più bassi.

3.6 Conclusioni

Lo studio delle dispersioni trasversali è stato oggetto di diverse campagne di misura, dislocate in ordine sparso sia spazialmente che temporalmente.

In ogni caso sono state prodotte delle elaborazioni che hanno portato a valutare l'andamento dei due fattori che determinano il fenomeno delle distribuzioni trasversali delle traiettorie: l'offset rispetto alla center line e le deviazioni standard.

I risultati trovati tuttavia, hanno validità solamente se confinati a quella particolare situazione analizzata, ovvero solo se riferiti ad un particolare aeroporto, sottoposto ad un particolare regime di traffico.

Il comportamento delle dispersioni delle traiettorie, dipende fortemente sia da fattori legati all'aeroporto, come la sua geometria, o la sua posizione geografica, sia da fattori legati al tipo di traffico, che negli anni si è molto evoluto.

Si è sentita dunque la necessità di fornire un criterio generale, per poter definire l'andamento delle dispersioni in ogni zona di un aeroporto qualsiasi.

La dispersione delle traiettorie è un fenomeno che si verifica sempre, sia nella fase dei movimenti (decolli e atterraggi), sia negli spostamenti a terra, ciò che cambia è la sua entità.

Nel primo caso, come detto sopra, tutto dipende dal tipo di operazione, nel secondo caso invece i fattori che la provocano sono riconducibili a tre componenti, che sono:

- Le caratteristiche dinamiche degli aerei, ovvero la risposta dell'aereo ai comandi imposti dal pilota e alle condizioni esterne di temperatura, densità dell'aria, pressione, venti e condizioni meteorologiche.
- Caratteristiche fisiche degli aerei, di cui le più importanti sono la larghezza della carreggiata e la lunghezza di riferimento che intercorre tra il centro del carrello principale e il punto individuato dalla verticale passante per il posto di pilotaggio.
- Comportamento del pilota: come esso esegue le traiettorie previste , per esempio impostando le curve alla maniera americana o all' europea.
 Il primo approccio prevede il posizionamento del ruotino anteriore oltre la segnaletica di raccordo, in modo da cercare un allineamento del carrello principale alla traiettoria segnata, mentre il secondo cerca l'allineamento del ruotino.

Il primo approccio da origine ad una fascia sollecitata più centrata, confrontata con quella prodotta dal secondo approccio che invece risulta tutta spostata sul lato interno della curva.

Il fenomeno della dispersione è cambiato negli anni, in quanto la tecnologia meccanica, e aereonautica ha fatto passi enormi, se da una parte vediamo un aumento delle dispersioni in curva causate da aerei molto più ingombranti, dall'altra sono nate delle tecnologie di supporto alla condotta, che aiutano il pilota sia nelle manovre di terra, imponendo dei percorsi specifici, sia nella fase di landing, stabilendo la precisa rotta da seguire per far avvenire l'atterraggio allineato alla centerline e ad una determinata distanza dalla soglia.

3.6.1 Radio assistenza al volo: stato dell'arte e sviluppi futuri

Uno dei primi aiuti alla navigazione introdotti negli Stati Uniti (alla fine del 1920) era una luce dell'aeroporto per assistere i piloti nell'atterraggio in caso di maltempo o dopo il tramonto. Da questa, nel 1930, è stato sviluppato l' Approach Path Indicator, che indica al pilota l'angolo di discesa. Questo in seguito divenne adottato a livello internazionale attraverso l'Organizzazione internazionale dell'aviazione civile (ICAO). Con la diffusione della tecnologia radio, furono poi sviluppati, dal 1920 in poi, gli ILS (Instruments Landing Sistems), utilizzati per la prima volta su un volo di linea per farlo atterrare durante una tempesta di neve a Pittsburgh nel 1938. Alcune forme di ILS sono state adottate dall'ICAO nel 1949. Grazie all'invenzione di sistemi satellitari quali il Global Positioning System (GPS), è possibile conoscere la propria posizione con precisione in qualsiasi parte del mondo. Con l'arrivo di Wide Area Augmentation System (WAAS), la navigazione GPS è diventata sufficientemente accurata e viene utilizzata sempre più per avvicinamenti strumentali, nonché in navigazione. [Wikipedia]

Alla fine degli anni '80 si è utilizzato il GPS nell'aviazione commerciale per l'accuratezza nell'approccio di precisione. Era arduo credere che il sistema satellitare ILS potesse un giorno sostituire il sistema allora presente VORs e DME. Nel 2000 si è avuta una forte accelerazione nello sviluppo degli atterraggi di precisione, così la FAA da un lato ha sviluppato i sistemi di terra, e dall'altro i sistemi comunicanti in volo. La CAT I del GPS per navigazione in volo è diventata poi il WAAS, ed il progetto per le CAT II/III è diventato il LAAS. In genere la CAT I consente la discesa da 200 piedi, la CAT II da 100 piedi e la CAT III da qualunque quota in qualunque condizione meteo. Ad oggi i velivoli sono dotati di dispositivi in grado di approcciarsi con la CAT III. Nel WAAS un largo numero di monitor nel nord America trasmette dati alla postazione satellitare che in continuo invia i dati al satellite geostazionario; questo li ritrasmette per poi essere elaborati ed avere il segnale GPS. Nel LAAS, i dati vengono elaborati a terra, computati e corretti, e trasmessi tramite VHF agli aerei dove vengono ricevuti, elaborati e le correzioni sulle traiettorie sono apportate in automatico. Ad ogni modo, entrambi i metodi possono essere applicati in tutti gli aeroporti,

considerando gli ostacoli presenti ed altre condizioni proprie dell'aeroporto. Inoltre, le antenne ricevitrici del LAAS possono essere disposte lontano dalla pista, mentre WAAS non necessita né di antenne né di sistemi a bordo del velivolo.

Successivamente entrambi hanno cambiato nome, adottando quello ICAO anziché quello FAA:

- WAAS diventa SBAS
- LAAS diventa GBAS

Dal lato aerospaziale, le industrie costruttrici si stanno adoperando per installare ricevitori multi modali (MMR) oltre al VHF, con il pacchetto completo GBAS riferito al sistema GNSS Landing System (GLS).

La variante militare del GBAS è JPALS (Joint Precision Approach System) con cui sono equipaggiati elicotteri ed aerei.

<u>ILS</u>

L'instrument landing system (in italiano sistema di atterraggio strumentale) comunemente abbreviato come ILS, è un sistema di terra e di bordo ideato per guidare gli aeromobili nella fase finale di un avvicinamento strumentale di precisione verso la pista di un aeroporto. Il sistema è utilissimo (se non indispensabile) nello svolgimento di operazioni in bassa visibilità (soprattutto dovute a nebbia), consentendo di portare a termine atterraggi con una visibilità orizzontale ridotta anche a meno di 100 metri. Il sistema è composto da un apparato di terra e da un apparato di bordo.

L'ICAO definisce 3 categorie di visibilità per l'atterraggio di aerei civili con l'aiuto dell'ILS, esse sono definite tramite due parametri fondamentali: *DH* (Decision Height): altezza specifica, negli atterraggi di precisione, alla quale deve essere iniziata la procedura di riattaccata se non vengono stabiliti riferimenti visivi per l'atterraggio; *RVR* (Runway Visual Range): visibilità di pista misurata con apparecchiature apposite. Più precisamente, l'RVR è la distanza sopra la quale un pilota di un aereo sulla mezzeria di una pista può vedere i markings che delineano la superficie della pista o che identificano la sua linea centrale. L'RVR è normalmente espresso in m (metri) o ft (piedi).

Le categorie ILS sono quindi le seguenti:

- CAT I: DH \ge 200 ft, e RVR \ge 550 m o visibilità \ge 800 m
- CAT II: 100 ft \leq DH \leq 200 ft, e RVR \geq 300 m;

La CAT III, è suddivisa in tre sottocategorie (la CAT IIIC non è ancora utilizzata da nessun aeroporto):

• CAT IIIA: DH \leq 100 ft e RVR \geq 200 m;

- CAT IIIB: DH \leq 50 ft (o nessuna DH), e 75 m \leq RVR \leq 200 m;
- CAT IIIC: nessuna DH minima e nessuna RVR minima

La categoria IIIC non è stata approvata in tutto il mondo. Ad oggi, il migliore sistema di atterraggio disponibile è quello a CAT IIIB; la precisione a cui arriva tale sistema è dell'ordine delle decine di metri.

INNOVAZIONI

In questi ultimi tempi si stanno sviluppando nuove metodologie di assistenza al volo, definite tipicamente radar assistenze.

Una prima innovazione è arrivata dall'America con il la procedura di approccio LAAS (Local Area Augmentation System): i primi aeroporti ad utilizzare in via sperimentale tale sistema sono l'aeroporto di Memphis e Newark. Tale sistema è stato pubblicizzato come GLS: GNSS Landing System. LAAS vede la quota di decisione all'altezza di 200 piedi (60,96m, equivalente alla categoria I). è in via di sviluppo un sistema che possa provvedere ad un miglioramento dei sistemi di approcci anche per le categorie II e III.

LAAS offre delle caratteristiche che non si trovano negli altri sistemi di navigazione: in questo modo si elimina il bisogno di avere i dati per eseguire la manovra di approccio nel database aereo; oltre alla classica discesa rettilinea di approccio di circa 3°sull'orizzontale, LAAS offre la possibilità di:

- realizzare l'approcci con dei tratti curvilinei,
- segmentare il tratto in esame,
- fornire un angolo di approccio differente a seconda della necessità dell'aeroporto (ad esempio per ridurre le emissioni acustiche, per la regolazione del traffico, per le condizioni meteo avverse, ecc...).

Ad oggi ci sono diversi aerei attrezzati al fine di poter utilizzare la tecnologia LAAS, definiti "GLS capabile" (ad esempio: la compagnia *Quantas* ha equipaggiato i suoi A380; altre compagnie aeree sono Continental, Delta, Air Berlin, Thomsonfly, ecc...) per gli aeroporti di Sydney (Australia), Newark, New Jersey...

Il termine LAAS è stato introdotto con la prima sperimentazione in USA, successivamente in tutto il mondo è stata adottato il termine GBAS per definire questo tipo di navigazione. Per accordarsi a tale scelta, anche la FAA si è adattata all'utilizzo di questo acronimo, utilizzato anche nelle schede tecniche.

GBAS significa Ground Based Augmentation System, riferito all'utilizzo del GPS il cui servizio viene focalizzato sull' area aeroportuale in questione. Il raggio d'azione è di 20-30 miglia (32,20 km – 48,28 km) per un approccio di precisione, procedure di decollo, e operazioni di movimentazione a terra. Trasmette messaggi di correzione all'aereo in volo ad alte frequenze radio (VHF: very high frequency) tramite un trasmettitore posizionato a terra. GBAS garantirà estrema accuratezza, integrità e disponibilità per gli atterraggi di precisione di categoria I, II, III; si è

dimostrato che l'accuratezza è inferiore al metro per l'asse verticale ed orizzontale.

Come precedentemente citato, i primi aeroporti in cui si è installato tale sistema si trovano a New York e nel New Jersey, nel 2010, in quanto solo nel 2009 la FAA ha approvato l'utilizzo del GBAS per la categoria I. Successivamente la FAA si è movimentata per esportare in altri aeroporti l'uso sperimentale del GBAS per poter avere ulteriori dati di affidabilità: Airservices in Australia, DECEA in Brasile, DFS in Germania, AENA in Spagna stanno implementando il programma GBAS, in accordo con le indicazioni guida della FAA, e dei suoi standard per la valutazione dei test e per poter scambiare i dati rilevati per migliorare tale sistema.

Come per l'ILS si hanno diverse categorie, per il GBAS queste si chiamano GAST – GBAS Approach Service Type. GAST – C è l'equivalente della CAT I, mentre GAST – D lo è per le CAT II/III. Ad oggi è disponibile in commercio il GAST – C mentre per il D si stanno tuttora eseguendo prove sperimentali.

FUNZIONAMENTO DEL GBAS

Questo sistema di navigazione migliora la sicurezza aerea durante la fase di approccio e atterraggio. GBAS fornisce alta accuratezza, disponibilità ed affidabilità necessarie per le categorie I, II, III di avvicinamento di precisione. Ci si attende che nella configurazione finale del sistema, si possa garantire la localizzazione del velivolo con un'accuratezza inferiore al metro o meno, con un significante miglioramento nella flessibilità e nei costi operativi da parte dell'utente finale. Le strumentazioni necessarie sono aeree e a terra. Quest' ultima include 4 ricevitori, le strumentazioni per il GBAS, e un trasmettitore dati ad alta frequenza (VHF). Il tutto è complementare alle strumentazioni di bordo del velivolo che comunica con le strumentazioni al il suolo.

Si ricevono a terra i segnali GPS

I 4 ricevitori GBAS ricevono i segnali satellitari GPS a terra ed in questo modo calcolano il posizionamento degli aerei usando il GPS. I ricevitori GPS e le attrezzature GBAS a terra collaborano per misurare l'errore del posizionamento GPS; queste ultime inviano un messaggio correttivo basato sulla valutazione dell'errore tra la posizione attuale e quella calcolata. In questo messaggio è incluso il dato sull'integrità dei parametri ed informazioni sul sentiero di approccio. I messaggi sono trasmessi ad alta frequenza, il ricoprimento del segnale è progettato in modo tale che possa dare supporto all'aereo nella transizione dal passaggio in volo di crociera alla zona aeroportuale. L'equipaggiamento GBAS a bordo del velivolo utilizza i dati sulla posizione, velocità, e tempo di guida del mezzo alla runway in sicurezza. Questo segnale fornisce un tipo di guida simile all'ILS, a partire da 200 metri sopra touchdown. GBAS infine supporta tutti i tipi di atterraggi verso la superficie della pista.

In Europa si stanno attrezzando per l'utilizzo del GBAS gli aeroporti di Spagna (Malaga) e Germania. Ad oggi si stanno svolgendo i primi test su Airbus A 320, i quali stanno dando eccellenti risultati: da un test eseguito nel 2011 si è constatato che la guida del GBAS è molto più precisa dell'ILS. Infatti la differenza nell'errore dato dall'ILS è fino a **8m in verticale e 12m laterale**, mentre l'errore del GBAS rimane **inferiore al metro** in ogni circostanza. La possibilità di fornire una deviazione rettilinea nel "glide slope", genera grandi potenzialità per aeroporti con piste parallele, dal momento che ad oggi si possono definire delle deviazioni angolari che aumentano di valore quando si procede lungo la runway, ossia non verrebbe più utilizzata la forma conica per definire un'area disponibile per l'atterraggio di un velivolo così gli atterraggi sulle runway sarebbero indipendenti tra loro, o quanto meno i vincoli sarebbero ridotti.

Un recente studio (Germania, 2009) ha dimostrato che la deviazione standard all'atterraggio si riduce a 0,17m in laterale e 0,24m verticale; con un errore di distribuzione statistica per il computo dell'errore dovuto alla ionosfera di 0,24m laterale e 0,45m verticale. Ciò conferma la maggiore precisione del GBAS rispetto all'ILS. Per poter utilizzare questa nuova strumentazione anche per atterraggi di alta precisione occorrono tuttavia numerose altre sperimentazioni, in fase di esecuzione.

Uno studio effettuato su un Airbus A380 ha provato che, grazie alla migliore precisione di approccio, può essere sufficiente un OFZ (Obstacle Free Zone, un volume di spazio da 150ft - 46m - sopra l'aeroporto per proteggere l'aereo nella fase di transizione nella discesa alla toccata, esclude quindi la presenza di ogni possibile ostacolo nell'intorno della runway, tranne quelli frangibili) E anziché F, come solitamente previsto per un aereo simile.

SVILUPPI FUTURI

La futura navigazione aerea vede incrementare l'uso dei sistemi satellitari (Global Navigation Satellite System – GNSS) insieme al progresso nelle comunicazioni e nella tecnologia di sorveglianza per la sicurezza per facilitare la richiesta di incremento della capacità, efficienza, e sicurezza senza impattare negativamente sull'ambiente. Questa è una sfida particolare per la fase di volo con stringenti prestazioni richieste per la navigazione. La richiesta più stringente per l'utilizzo del GBAS per la categoria III è la possibilità di non riuscire a realizzare una correlazione tra l'errore misurato con i sistemi a terra e l'utilizzatore in volo (aereo). La più grande limitazione nell'utilizzo del GBAS per la categoria III è quella legata alla correzione dell'errore tra la terra e l'aereo per la deviazione del segnale all'altezza dalla ionosfera. Per sopperire a tale problema si sono individuati degli algoritmi e dei sistemi di monitoraggio della ionosfera che consentono di fornire un'espressione dell'errore di deviazione del segnale. Nonostante ciò si è ancora molto lontani dai margini di errore imposti dalle normative vigenti per la categoria III. Per questo motivo si è evoluto il GBAS

nell'E-GBAS: al centro dell'aeroporto si inseriscono 4 ricevitori satellitari, che rappresentano il cuore del sistema e sono usati per computare la correzione differenziale che verrà trasmessa all'aereo usando il VHF Data Broadcast (VDB). In questo modo viene dato un piano di discesa, attraversa la soglia e atterra nel punto di contatto ideale. Le moderne tecniche di valutazione delle interferenze hanno portato all'utilizzo del D-Free (divergence free), che unito all'uso del GBAS ha mostrato di avere le potenzialità per fornire un significativo miglioramento sull'architettura dei monitoraggi attuale. Questi miglioramenti potrebbero soddisfare le richieste per la categoria III (EUROCAE CAT III - European Organisation for Civil Aviation Equipment) per l'atterraggio e potenzialmente per i requisiti di taxiing. Ad ogni modo, un potenziale inconveniente per questa architettura è che aumenta la complessità; ulteriori studi sono necessari per verificare questi risultati.

WAAS: Wide Area Augmentation System

Questo è un sistema di navigazione molto preciso che consente ulteriore accuratezza, affidabilità, continuità ed integrità necessaria alla pilota per permettergli di relazionarsi ogni volta al GPS per tutte le fasi del volo. Questo prevede un miglioramento del servizio per molto meno rispetto all'utilizzo di una navigazione convenzionale di terra. Anche questa come GBAS lavora con una base di satelliti a disposizione per il posizionamento e localizzazione dei velivoli; con una base a terra per la raccolta dei dati, elaborazione e correzione degli errori di misura ed assicurarne l'integrità. Le correzioni sono poi inviate agli aerei tramite 2 o più satelliti geostazionari connessi. L'aereo usa il segnale WAAS oltre al servizio GPS per la navigazione ed oltre al Localizer Performance with Vertical (LPV) strumentazione per l'approccio, equivalente al'ILS.

Nel 2003 la FAA ha approvato l'uso del WAAS in molti aeroporti americani e in Alaska, in quanto prima di allora non si aveva un altro genere di strumentazione che consentisse approcci di precisione (in senso verticale ed orizzontale) per altezze di 250 piedi, per qualunque condizione meteo. Successivamente, nel 2006, la FAA ha dato consenso affinché si potesse arrivare ad altezze di 200 piedi. Ad oggi è utilizzato negli aeroporti del nord America, successivamente verrà implementato con l'utilizzo dei nuovi sistemi satellitari GPS (2008 in poi).

SAT NAV NEWS

24 – 25 Gennaio 2013, primo meeting sul SBAS (Satellite Based Augmentation System) tra i 5 Paesi che hanno aderito alla sperimentazione (USA, Giappone, Europa, India, Russia). Di questi solo 3 hanno dei servizi certificanti SBAS: l'Europa con EGNOS dell'ESA (operativo dal 2009, dal 2011 per approccio di precisione), l'USA con WAAS della FAA (dal 2003), il Giappone con MSAS (dal 2007). Durante la conferenza si è arrivati all'accordo di adottare i 200 piedi per valutare la capacità del GBAS e per localizzare i mezzi su pista. Il 22 aprile 2013 si è avuto il primo volo in America con la United Airlines con il metodo GBAS.

Tale metodo può inoltre fornire il corretto tracciato fino a 50h di anticipo, in modo tale che si possa realizzare un intero piano di volo. L'obiettivo della FAA è quello di poter portare il GBAS ad un livello di affidabilità tale per cui si possa arrivare al GAST-D, l'equivalente del livello di CAT III dell'ILS. Lo scopo di realizzare il meeting e di avere più dati dalle varie nazioni è quello di poter scambiare tali informazioni per valutare al meglio la capacità del GBAS. Il sistema WAAS e GPS è stato adottato sugli elicotteri, dimostrando un notevole miglioramento della precisione nell'atterraggio e quindi una possibilità di incrementare il traffico in aeroporti in cui siano presenti anche eliporti.

4 Effetti dello studio eseguito: applicazione alla progettazione ed alla manutenzione

4.1 Introduzione

Come visto nel primo capitolo, ad oggi si hanno determinati metodi per la progettazione di una pavimentazione aeroportuale. Più specificamente, lo spessore della pavimentazione è determinato direttamente dal carico e delle sue ripetizioni, questi sono il fattori principali. Allo stesso modo anche per la manutenzione si ha un metodo consolidato di suddivisione dell'infrastruttura per aree omogenee, tali che abbiano le stesse caratteristiche, come: valori di traffico, PCI, struttura della pavimentazione, tipologia dell'infrastruttura, ecc ...

In questa sede si vogliono unire gli studi eseguiti sulla valutazione dei carichi e sulla dispersione delle traiettorie, trattati nei capitoli 2 e 3, per affinare i metodi di progettazione e manutenzione in modo da rendere più efficiente l'esecuzione di un opera realizzata ex - novo o, in caso di manutenzione, per ottimizzare le risorse disponibili, che purtroppo spesso sono scarse rispetto alle reali esigenze.

Si possono trovare in bibliografia degli studi che si pongono lo stesso obiettivo, in quanto fino a poco tempo fa si riteneva di poter equiparare il comportamento del traffico stradale a quello aeroportuale, fatto che non è assolutamente verificato in quanto il traffico stradale è più canalizzato e costante, mentre il traffico aeroportuale presenta maggiori dispersioni e variazioni a seguito della presenza della portanza.

Si riporta come esempio uno studio condotto dall'Istituto di ingegneria della Cina (CaiLiangcai, 2010). Il coefficiente di portanza nasconde le differenze della distribuzione del carico verticale causato da un differente layout dell'aeroporto, differente performance degli aerei nel decollo ed atterraggio, differente traffico e così via ... Il solo coefficiente non può riflettere in modo accurato l'influenza dello spessore della pavimentazione di progetto, guidato solo dalla distribuzione del carico verticale, quindi sono necessari ulteriori studi. In questo studio si è cercato di capire il comportamento dei velivoli al decollo e all'atterraggio, si è quindi scritto un programma in visual basic con i dati raccolti, facendo diverse semplificazioni:

- 1) L'aereo ha delle deviazioni trasversali in pista con una certa probabilità;
- 2) Decolla ed atterra da determinati punti casualmente;
- 3) La distanza delle taxi è presa casualmente.

Viene considerata una variazioni di carico lineare sia al decollo che all'atterraggio. Dai risultati ottenuti da questi presupposti si evince che il risultato

mostra che la distribuzione del carico verticale lungo pista è evidente e il coefficiente di portanza sotto traffico diverso non è la stessa. Il coefficiente di portanza non può riflettere adeguatamente la distribuzione del carico verticale lungo la pista, e ricerche sulla distribuzione dello stesso possono portare ad una più accurata progettazione dello spessore della pavimentazione.

Con lo studio eseguito nel presente elaborato di tesi, non solo si riesce a dare risposta all'atto sopra sintetizzato della conferenza avvenuta nel 2010, ma si può anche definire la zona di occupazione della pista da parte degli aeromobili.

4.2 Ottimizzazione della progettazione

Per progettare una pavimentazione, sia flessibile che rigida, si devono conoscere i dati sul sottofondo (materiali costituenti, portanza,ecc ...), i dati di traffico, ripetizioni di carico previste, ecc ...

Per un più immediato predimensionamento delle pavimentazioni sono stati realizzati, da enti come l'americana FAA, degli abachi sia per le pavimentazioni flessibili che rigide.

Oggi grazie agli sviluppi della tecnologia informatica sono stati messi a punto dei software che implementano le nuove teorie sulla valutazione dei carichi aeroportuali (non più utilizzato per esempio l'aereo critico di riferimento ma l'intero spettro di traffico previsto per l'aeroporto da realizzare) oppure sono basati sui metodi di dimensionamento razionali come il metodo del multistrato elastico per la definizione dei pacchetti di pavimentazione o metodo agli elementi finiti, che schematizzano il comportamento dei materiali come elastico lineare o elastico non lineare. Tra i più recenti si citano l'americano FAARFILED e l'australiano APSDS.

In tutti i casi rimane il fatto che tali software non sono in grado di rastremare adeguatamente la pavimentazione laddove non ci sia il transito ordinario dei velivoli, ma tele scelta spetta al progettista.

Per i vecchi abachi la FAA proponeva una riduzione dello spessore della pavimentazione del 90% rispetto al valore derivante dall'utilizzo degli stessi, per le aree non critiche individuate nella fase di atterraggio.

Per la pista di volo viene indicata come critica la zona centrale di 15m a cavallo della center line. Oltre tale zona, entro la fascia che va dai 7,5m ai 15m dall'asse, viene indicata una progressiva riduzione dello spessore fino al 70% di quello della zona critica. Oltre i 15m viene lasciato costante (bordo alleggerito). Tale suddivisione viene proposta nell'advisory circular AC 150-5320-6D del 1995, ad oggi cancellata in favore della AC 150_5320_ 6E pubblicata nel 30 settembre 2009.



Figura 4.1: Schema della riduzione dello spessore del pacchetto di pavimentazione secondo la AC 150/5320_6D



Figura 4.2: Schematizzazione della riduzione della pavimentazione sulla pista secondo la AC 150/5320_6D



Figura 4.3: Riduzione dello spessore della pavimentazione secondo la AC 150/5320_6E

Come riportato nella figura 2.3, nella nuova normativa la FAA propone una diversa riduzione dello spessore della pavimentazione in senso trasversale: per la striscia centrale completamente caricata si hanno 7,60m dalla center line; a seguire 7,60m di assottigliamento dello spessore del pacchetto; al bordo viene consigliato uno spessore minimo di 30cm e spessore massimo di 90cm.



Figura 4.4: Suddivisione trasversale della pista secondo la AC 150/5320-6E

La zona di assottigliamento non è valida per le lastre, dove si deve avere come spessore minimo quello di una lastra, ed in crescendo, multipli della stessa. Non è consentito assottigliare la lastra di progetto, il cui spessore è derivante dal mix di traffico complessivo al decollo.

Dai dati elaborati al capitolo tre si evince come non ci possa essere una larghezza predeterminata delle fasce critiche e non critiche della pavimentazione della pista, in quanto si deve tener conto delle dispersioni trasversali del velivolo, variabili in

Manovra	Pista	45 m	Pista 60 m			
DECOLLO	Offset sinistro	Offset destro	Offset sinistro	Offset destro		
Allineamento	8,00	7,70	8,90	7,90		
Corsa al decollo	8,20	7,60	9,20	7,50		
Rotazione	8,90	8,30	10,00	7,90		
ATTERRAGGIO	Offset sinistro	Offset destro	Offset sinistro	Offset destro		
Toccata	8,70	7,70	10,10	8,70		
Rullaggio	8,30	7,70	9,30	8,50		
Uscita pista	6,80	8,30	6,80	8,30		

base alla zona di pista che sta percorrendo, in funzione delle fasi di manovra che sta compiendo.

Tabella 4.1: Occupazione pista per il caso di un Boeing 747 – 400

La pista non viene inoltre percorsa in modo simmetrico rispetto alla center line, ma in genere si riscontra un offset sulla sinistra (capitolo 3). L'attuale normativa non tiene conto di questo comportamento dei velivoli, né durante la percorrenza su pista, né sulle vie di rullaggio. Per tanto si ritiene che le indicazioni fornite dall'ultima circolare FAA non siano esaustive.

Per quanto detto, si propone un'indicazione sulla larghezza di occupazione della fascia centrale della pista, ossia la zona più caricata, rispetto a quanto viene indicato dalla circolare FAA. si vuole ottenere una indicazione di massima sulla dispersione trasversale delle traiettorie su pista e dei relativi offset per poterli associare alla classifica funzionale ICAO basata sull'aeromobile di progetto.

Codice numerico	Lunghezza di pista caratteristica Lc [m]	Codice alfabetico	Apertura alare WS [m]	Distanza fra i bordi esterni delle ruote del carrello principale [m]
1	Lc < 800	А	WS < 15	D < 4,5
2	$800 \le Lc < 1200$	В	$15 \leq WS < 24$	$4,5 \le D < 6$
3	1200≤ Lc < 1800	С	24≤ WS < 36	$6 \le D < 9$
4	Lc > 1800	D	36≤ WS < 52	9≤ D < 14
		Е	52≤ WS < 65	9≤ D < 14
		F	65≤ WS < 80	$14 \le D < 16$

Tabella 4.2: Criteri della classificazione funzionale ICAO basata sulle caratteristiche dell'aeromobile di progetto

I dati a disposizione utilizzati già al capitolo 2 per lo studio sulla runway, sono riferiti a determinati aerei, quali:

- Boeing 707-320
- Boeing 727-100

- Boeing 727-200
- Boeing 737 900/900ER
- Boeing 747-400
- DC8 40/50
- DC 9 10/20
- DC 9 30/40
- DC 10 10
- C 580
- L1011
- YS11
- BAC 111 500

Per poter inserire un ulteriore colonna sulle dispersioni dei velivoli in base alla loro classificazione, si sono ricercati i dati sul distanziamento delle ruote esterne dei carrelli e sull'apertura alare dei velivoli di cui sopra. Si hanno dati differenziati in base alla larghezza della pista (45m o 60m).

Si procede con i dati relativi all'operazione di decollo.

DECOLLO – pista da 45m								
DA SC	CHEDA TECN	JICA	Categoria ICAO					
Tipologia di velivoli	MTOW [kg]	apetura alare [m]	larghezza carrelli [m]	apetura alare	larghezza carrelli			
707-320	141.700	44,42	6,73	D	С			
727-100	77.200	32,92	5,72	С	В			
727-200	95.300	32,92	5,72	C	В			
737-900/900ER	85.139	35,79	5,72	C	В			
747-400	412.770	59,63	11	Е	Е			
DC8-40-50	147.420	43,4	6,34	D	С			
DC8-60	161.028	45,23	6,34	D	С			
DC9-10-20	45.359	28,44	5	С	В			
DC9-30-40	51.710	28,45	4,88	C	В			
DC10-10	199.581	50,39	10,67	D	D			
C580	26.371	32,12	8,50	C	С			
L1011	195.045	47,35	12,70	D	D			
YS11	24.500	32	9	C	D			
BAC111 - 500	47.400	28,5	12,60	С	D			

Tabella 4.3: Dati dei velivoli e relativa classificazione ICAO

DECOLLO 60m								
Tipologia di	N°	last p	last point intermediate point		iate point	first point		
velivoli	ripetizioni di decolli	х	σ	х	σ	х	σ	
707-320	198	-0,10	2,19	-0,34	1,69	-0,44	1,77	
727-100	680	-0,32	2,08	-0,39	1,75	-0,38	1,79	
727-200	560	-0,19	2,10	-0,14	1,63	0,03	1,80	
737-900/900ER	327	-0,12	2,82	-0,12	1,94	-0,19	2,19	
747-400	49	-1,24	1,66	-0,61	1,42	-0,37	1,76	
DC8-40-50	116	-0,17	1,73	-0,33	1,66	-0,35	2,01	
DC8-60	108	-0,54	1,76	-0,54	1,62	-0,49	1,74	
DC9-10-20	127	-0,98	2,63	-0,47	1,83	-0,28	1,66	
DC9-30-40	744	-0,41	2,72	-0,15	1,79	0,08	2,02	
DC10-10	108	-0,07	1,91	-0,03	1,58	0,10	2,24	
C580	44	-0,85	2,44	-0,59	2,11	-0,28	1,76	
L1011	107	-0,13	1,83	-0,09	1,72	-0,29	1,95	
YS11	52	-0,48	2,66	0,89	2,69	0,11	2,91	
BAC111 - 500	194	0,84	4,42	-0,42	2,32	-0,02	1,94	

Tabella 4.4: Dati di offset e dispersione al decollo, pista da 45m

I dati riportati nella tabella 2.4 sono presi dalle osservazioni dalle quali si è realizzato lo studio del capitolo 3. Si ricorda che il *last point* è l'osservazione nell'istante della rotazione, *intermediate point* è il punto centrale ed il *first point* è l'osservazione realizzata all'atto dell'allineamento alla pista.

Come si nota osservando le classificazioni alla tabella 2.3 dell'apertura alare e del distanziamento dei carrelli, per molti velivoli non si ha la stessa categoria di appartenenza (es: Boeing 707-320 è di categoria D per l'apertura alare e C per il distanziamento dei carrelli). Si è scelto di considerare come classificazione il distanziamento delle ruote esterne dei carrelli in quanto la valutazione che verrà effettuata riguarda la dispersione trasversale delle traiettorie.

	727-100		707-320		DC10-10		
	727-200		DC8-40-50		L1011		
В	737-900/900ER	С	DC8-60	D	YS11	Е	747-400
	DC9-10-20		C580		BAC111 - 500		
	DC9-30-40						

 Tabella 4.5: Classificazione aerei in base al distanziamento delle ruote esterne del carrello principale

Si prosegue lo studio considerando il numero di decolli osservati come peso per realizzare la media pesata degli offset e delle dispersioni trasversali delle traiettorie, per ogni categoria. Viene realizzata una media pesata in quanto si ritiene che il dato acquisito da un maggior numero di osservazioni possa essere meno compromesso da errori di misura e quindi avere rilevanza maggiore. Non viene eseguita la deviazione standard sulle medie pesate per eliminare le misure di estremità in quanto si ritiene che le osservazioni reperite siano troppo poche.

Categoria ICAO	X offset	σ deviazione	pesi	Media pesata - Last point [m]	
	pesato p	pesata		X [m]	σ[m]
В	-793,40	5867,22	2438,00	-0,33	2,41
C	-135,89	932,71	466,00	-0,29	2,00
D	115,55	1397,61	461,00	0,25	3,03
Е	-60,64	81,55	49,00	-1,24	1,66

Tabella 4.6: Media pesata dell'offset e della dispersione del last point

Categoria ICAO	X offset	σ deviazione	Media pesata - intermediate point [m]		
	pesato	pesata	X [m]	σ[m]	
В	-557,70	4302,58	-0,23	1,76	
С	-190,27	795,40	-0,41	1,71	
D	-48,46	943,32	-0,11	2,05	
E	-29,87	69,45	-0,61	1,42	

Tabella 4.7: Media pesata dell'offset e della dispersione dell'intermediate point

Categoria ICAO	X offset	σ deviazione pesata	Media pesata - first point [m]		
	pesato		X [m]	σ [m]	
В	-284,11	4658,78	-0,12	1,91	
С	-192,74	850,10	-0,41	1,82	
D	-18,07	978,12	-0,04	2,12	
E	-17,92	86,18	-0,37	1,76	

Tabella 4.8: Media pesata dell'offset e della dispersione del first point

Da risultati sperimentali si vuole ricavare una relazione grazie alla quale si possano trovare i dati per le categorie mancanti: A ed F.

Si graficano i dati mediati in funzione delle rispettive classificazioni di apertura alare, in quanto la classificazione legata al distanziamento delle ruote esterne dei carrelli equipara la categoria D alla categoria E, e quindi non risulta possibile realizzare una qualche correlazione apprezzabile. Dell'apertura alare si considera il valore medio ricavato dal range della classificazione ICAO.

I valori massimi sono scalati di un centimetro rispetto alle indicazioni di normativa in quanto viene indicato un minore stretto.

Categoria	Apertura alare [m]					
ICAO	min max		Valore ascisse			
А	0	14,99	7,495			
В	15	23,99	19,495			
С	24	35,99	29,995			
D	36	51,99	43,995			
Е	52	64,99	58,5			
F	65	80	72,5			

Tabella 4.9: Valori dei parametri in ascissa in funzione delle categorie ICAO

Allo stesso modo si riportano i dati per la pista di larghezza 60m. I velivoli utilizzati sono gli stessi, quindi le loro informazioni tecniche verranno omesse.

DECOLLO 60m							
Tipologia di	N°	last point		intermediate point		first point	
velivoli	di decolli	Х	σ	Х	σ	х	σ
707-320	95	-1,28	2,28	-1,36	2,16	-1,47	2,21
727-100	222	-0,49	2,38	-0,60	2,13	-0,60	2,23
727-200	179	-0,69	2,49	-0,67	2,29	-0,60	2,29
737-900/900ER	15	0,48	2,76	0,22	1,66	-0,04	1,10
747-400	17	-1,07	2,06	-1,01	2,21	-0,98	2,43
DC8-40-50	42	-0,34	1,84	-0,33	1,83	-0,28	1,89
DC8-60	7	0,26	2,36	-0,44	1,16	-0,48	0,88
DC9-10-20	54	-1,71	2,89	-1,69	2,90	-1,66	2,92
DC9-30-40	197	-0,71	2,60	-0,54	2,31	-0,45	2,33
DC10-10	13	-2,59	1,89	-2,57	1,88	-2,44	1,86
C580	62	-0,61	2,35	-0,54	2,09	-0,41	2,04
L1011	37	-0,59	2,33	-0,57	2,30	-0,55	2,27
YS11	1	0,78	0,00	0,78	0,00	0,78	0,00
BAC111 - 500	4	-2,88	2,15	-2,70	2,07	-0,55	2,11

Tabella 4.10: Dati di offset e dispersione al decollo, piste da 60m

Catagoria ICAO	X offset	σ deviazione	nosi	Media pesata - Last point [m]	
Categoria ICAO	pesato pesata	pesi	X [m]	σ[m]	
В	-457,73	1683,73	667,00	-0,69	2,52
С	-171,67	456,04	206,00	-0,83	2,21
D	-66,03	119,20	55,00	-1,20	2,17
Е	-18,14	35,03	17,00	-1,07	2,06

Tabella 4.11: Media pesata dell'offset e della dispersione del last point

Categoria ICAO	X offset	σ deviazione pesata	Media pesata - Intermediate point [m]		
	pesato		X [m]	σ[m]	
В	-446,67	1519,19	-0,67	2,28	
С	-179,99	419,69	-0,87	2,04	
D	-64,49	117,65	-1,17	2,14	
Е	-17,10	37,51	-1,01	2,21	

 Tabella 4.12: Media pesata dell'offset e della dispersione dell'intermediate point

Categoria ICAO	X offset	σ deviazione	Media pesata - First point [m]		
	pesato	posutu	X [m]	σ[m]	
В	-418,73	1539,69	-0,63	2,31	
С	-180,66	421,77	-0,88	2,05	
D	-53,69	116,59	-0,98	2,12	
Е	-16,68	41,25	-0,98	2,43	

Tabella 4.13: Media pesata dell'offset e della dispersione del first point

Per individuare il probabile comportamento delle categorie mancanti si sono utilizzate le linee di tendenza derivanti dai dati posti nel grafico, tipicamente funzioni paraboliche o lineari che possano approssimare il comportamento cercato. Si sono realizzati due gruppi di dati: per individuare la categoria A i dati delle classificazioni B,C,D (a volte solamente B e C per la scarsa approssimazione della linea di tendenza, valutata col parametro R^2); per la categoria F i dati dalle classificazioni C,D,E (a volte solamente D ed E per scarsa approssimazione della linea di tendenza, valutata col parametro R^2).

Si riportano di seguito i grafici realizzati con le rispettive equazioni delle linee di tendenza, utilizzate per ricavare i dati delle classificazioni mancanti:


Figura 4.5: Grafici delle medie pesate di offset e deviazione per il last point





Figura 4.6: Grafici delle medie pesate di offset e deviazione per l'intermediate point



Figura 4.7: Grafici delle medie pesate di offset e deviazione per il first point

Utilizzando le equazioni derivanti dalle linee di tendenza, si può in questo modo ricavare il dato mancante per la categoria A:

Decollo - Pista da 45m								
Categoria ICAO	Media pesa point	ata - last [m]	Media intermedia	pesata - te point [m]	Media pesata – first point [m]			
	X [m]	σ[m]	X [m]	σ[m]	X [m]	σ[m]		
Α	0,02	3,17	0,40	1,83	0,22	2,01		

Tabella 4.14: Offset e deviazione calcolati per la categoria A

Dalle correlazioni risulta che il comportamento non è lineare nel passaggio dal first point (allineamento alla pista) al last point (lift off). In particolare:

- First point: l'offset si trova sulla destra della linea di pista, la deviazione standard è maggiore rispetto all'offset
- Intermeiate point: l'offset rimane sulla destra rispetto alla center line, in aumento rispetto al first point; mentre la deviazione standard si riduce
- Last point: l'offset si trova sulla destra della center line, in riduzione rispetto al punto precedente, di contro si nota un aumento del valore della deviazione standard

Decollo - Pista da 60m								
Categoria ICAO	Media pesa point	ata - last [m]	Media pesata - intermediate point [m]		Media pesata – first point [m]			
	X [m]	σ[m]	X [m]	X [m] σ [m]		σ[m]		
A -0,65 2,63 -0,46 2,14 -0,16 2,61								

Tabella 4.15: Offset e deviazione calcolati per la categoria A

Anche in questo caso non è lineare nel passaggio dal first point (allineamento alla pista) al last point (lift off) per la deviazione standard, mentre si ha una crescita del valore di offset sulla sinistra della center line di pista. In particolare:

- First point: l'offset si trova sulla sinistra della linea di pista, la deviazione standard è maggiore rispetto all'offset
- Intermeiate point: l'offset rimane sulla sinistra rispetto alla center line, in aumento rispetto al first point; mentre la deviazione standard si riduce
- Last point: l'offset si trova sulla sinistra della center line, in aumento costante dal first point, si nota un aumento del valore della deviazione standard

Allo stesso modo si sono eseguite le analisi per cercare un possibile collegamento tra gli offset e le deviazioni derivanti dalle osservazioni ed i dati non reperiti per la categoria F.









Figura 4.9: Grafici delle medie pesate di offset e deviazione per l'intermediate point



Figura 4.10: Grafici delle medie pesate di offset e deviazione per il first point

Utilizzando le equazioni derivanti dalle linee di tendenza, si può in questo modo ricavare il dato mancante per la categoria F:

Decollo - Pista da 45m							
Categoria ICAO	Media pesa point	ata - last [m]	Media intermedia	pesata - te point [m]	Media pesata – first point [m]		
	X [m]	σ[m]	X [m]	σ[m]	X [m]	σ[m]	
F	-2,67	0,34	-1,10	0,81	-0,68	1,41	

Tabella 4.16: Offset e deviazione calcolati per la categoria F

Risulta un incremento dell'offset dal first point al last point, e una progressiva riduzione della deviazione standard. In particolare:

- First point: l'offset si trova sulla sinistra della linea di pista, la deviazione standard è maggiore rispetto all'offset
- Intermeiate point: l'offset rimane sulla sinistra rispetto alla center line, in aumento rispetto al first point; mentre la deviazione standard si riduce
- Last point: l'offset si trova sulla sinistra della center line, in aumento rispetto al punto precedente, di contro si nota una riduzione del valore della deviazione standard

Decollo - Pista da 60m							
Categoria ICAO	Media pesa point	ata - last [m]	Media intermedia	pesata - te point [m]	Media pesata – first point [m]		
	X [m]	σ[m]	X [m]	σ[m]	X [m]	σ[m]	
F -0,94 2,12 -0,84 2,24 -0,38 3,15							

Tabella 4.17: Offset e deviazione calcolati per la categoria F

Come si può notare, si ha un incremento dell'offset dal first point al last point, e una progressiva riduzione della deviazione standard. In particolare:

- First point: l'offset si trova sulla sinistra della linea di pista, la deviazione standard è maggiore rispetto all'offset
- Intermeiate point: l'offset rimane sulla sinistra rispetto alla center line, in aumento rispetto al first point; mentre la deviazione standard si riduce
- Last point: l'offset si trova sulla sinistra della center line, in aumento rispetto al punto precedente, di contro si nota una riduzione del valore della deviazione standard

Si riportano i grafici delle categorie ICAO per dare una visione d'insieme del probabile comportamento dei velivoli su pista:



Figura 4.11: Comportamento delle varie categorie di velivoli al decollo, pista da 45m

Come si può osservare, si evidenzia un comportamento per il quale l'offset tende ad aumentare con la corsa al decollo, realizzano un progressivo distanziamento dell'asse del velivolo dalla center line di pista. La deviazione standard presenta nella maggior parte dei casi un valore pressoché costante, tendente ad incrementarsi per le categorie di velivoli minori (dalla A alla C), mentre tende a rimanere costante o a ridursi per le categorie maggiori (dalla D alla F).

Questo fatto può essere dovuto alla scelta di suddividere i dati di rilievo nei due blocchi (categorie maggiori e inferiori), oppure può essere motivato dal fatto che la maggior parte dei velivoli tende ad avere lo stesso comportamento (da qui la scarsa deviazione standard) e si apprestano tutti ad avere lo stesso distacco (offset) crescente dalla center line di pista.

Il comportamento generale dei velivoli derivante da questa elaborazione, rispecchia i risultati trovati nello studio al capitolo 3.



Figura 4.12: Comportamento delle varie categorie di velivoli al decollo, pista da 60m

Come si può notare, si evidenzia un comportamento per il quale l'offset tende ad aumentare con la corsa al decollo, realizzano un progressivo distanziamento dell'asse del velivolo dalla center line di pista. Un comportamento appena dissimile si presenta per la categoria F, dove l'offset tende a ridursi all'intermediate point per poi aumentare. L'ordine di grandezza comunque non varie e si può ritenere che questo rimanga costante.

La deviazione standard presenta nella maggior parte dei casi un valore pressoché costante, tendente ad incrementarsi con la corsa al decollo, ad eccezione delle categorie A ed F: per la prima si nota un lieve decremento nella zona dell'intermediate point per aumentare allo stacco con valori prossimi a quelli del punto di allineamento alla pista; per la categoria F si presenta il comportamento

opposto, ovvero dispersione maggiore nella zona di allineamento e riduzione progressiva fino al lift off.

Questo fatto in realtà non trova una solida teoria di fondo tale per cui possa essere giustificato un comportamento simile, nonostante anche la categoria E, per la quale si hanno i dati dei rilievi, presenta un atteggiamento simile. Per tanto si ritiene di non poter considerare valida la correlazione della dispersione trasversale delle traiettorie, per il fatto che le osservazioni per la categoria E sono troppo scarse per poterne trarre delle conclusioni.

Il comportamento generale dei velivoli derivante da questa elaborazione, rispecchia i risultati trovati nello studio al capitolo 3 per le categorie dalla A alla D.

	Pista da	45m		Pista da 60m				
Categoria ICAO	Punti di misurazione	Offset medio	Deviazion e standard media	Categoria ICAO	Punti di misurazione	Offset medio	Deviazione standard media	
	Last	0,02	3,17		Last	-0,65	2,63	
А	Intermediate	0,40	1,83	А	Intermediate	-0,46	2,14	
	First	0,22	2,01		First	-0,34	2,61	
	Last	-0,33	2,41		Last	-0,69	2,52	
В	Intermediate	-0,23	1,76	В	Intermediate	-0,67	2,28	
	First	-0,12	1,91		First	-0,63	2,31	
	Last	-0,29	2,00		Last	-0,83	2,21	
С	Intermediate	-0,41	1,71	С	Intermediate	-0,87	2,04	
	First	-0,41	1,82		First	-0,88	2,05	
	Last	0,25	3,03		Last	-1,20	2,17	
D	Intermediate	-0,11	2,05	D	Intermediate	-1,17	2,14	
	First	-0,04	2,12		First	-0,98	2,12	
	Last	-1,24	1,66		Last	-1,07	2,06	
Е	Intermediate	-0,61	1,42	Е	Intermediate	-1,01	2,21	
	First	-0,37	1,76		First	-0,98	2,43	
	Last	-2,67	0,34		Last	-0,94	-	
F	Intermediate	-1,10	0,81	F	Intermediate	-0,84	-	
	First	-0,68	1,41		First	-0,99	-	

Tabella 4.18: Valori medi per le categorie ICAO

ATTERRAGGI

Si valutano ora gli atterraggi. Di seguito si riportano i dati dei rilievi eseguiti su pista, le medie pesate divise per categoria ICAO ed i grafici risultanti.

ATTERRAGGIO 45m									
	N°	last p	oint	intermed	iate point	first	point		
Tipologia di velivoli	ripetizion i di decolli	х	σ	х	σ	X	σ		
707-320	95	-0,43	2,87	-0,36	2,20	-0,31	2,35		
727-100	222	-0,32	2,90	-0,39	1,88	-0,45	1,97		
727-200	179	-0,37	2,65	-0,46	2,12	-0,43	2,07		
737- 900/900ER	15	-0,56	3,85	-0,34	2,22	-0,35	2,21		
747-400	17	-0,62	2,65	-0,97	2,29	-1,67	2,59		
DC8-40-50	42	-0,17	3,12	-0,51	2,43	-0,59	2,47		
DC8-60	7	-0,54	2,70	-0,41	2,31	-0,32	2,46		
DC9-10-20	54	-0,12	3,50	-0,28	2,28	-0,56	2,47		
DC9-30-40	197	0,14	3,65	-0,29	2,17	-0,20	2,16		
DC10-10	13	-0,72	2,71	-0,39	2,23	-1,10	2,49		
C580	62	0,21	3,34	0,71	2,94	-0,34	2,66		
L1011	37	0,23	2,62	-0,11	2,18	-0,33	2,15		
YS11	1	1,54	2,88	0,82	2,04	0,99	2,53		
BAC111 - 500	4	-0,57	2,94	-0,38	1,93	-0,81	2,24		

Tabella 4.19: Dati all'atterraggio, pista da 45m

ATTERRAGGIO 60m									
Tipologia di	N°	last point		intermediate point		first point			
velivoli	di decolli	х	σ	х	σ	х	σ		
707-320	95	0,28	3,29	-0,31	2,66	-1,12	2,87		
727-100	222	0,41	3,62	-0,04	2,82	-0,69	2,90		
727-200	179	-0,09	3,00	-0,09	2,45	-0,54	2,50		
737-900/900ER	15	0,61	3,85	-0,50	1,44	-0,51	1,61		
747-400	17	0,73	2,97	0,85	2,59	0,09	3,44		
DC8-40-50	42	0,95	2,90	-0,22	2,48	-0,92	2,68		

DC8-60	7	0,42	2,25	-0,70	1,78	-1,71	2,16
DC9-10-20	54	-0,83	3,21	-1,09	2,96	-1,13	2,54
DC9-30-40	197	0,40	3,56	-0,12	2,78	-0,52	2,69
DC10-10	13	-0,18	1,87	-0,85	2,04	-2,22	2,33
C580	62	-0,29	3,32	-0,66	2,42	-0,30	2,46
L1011	37	-0,12	2,63	-0,19	2,62	-0,27	2,64
YS11	1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
BAC111 - 500	4	-0,52	2,16	-2,91	5,43	0,12	1,02

Tabella 4.20: Dati all'atterraggio, pista da 60m

Categoria ICAO	X offset	σ deviazione	pesi	Media pesata [m	- Last point]
	pesato pesata			X [m]	σ[m]
В	-123,82	2085,64	667,00	-0,19	3,13
С	-38,74	629,79	206,00	-0,19	3,06
D	-1,36	146,79	55,00	-0,02	2,67
Е	-10,57	45,08	17,00	-0,62	2,65

 Tabella 4.21: Media pesata dell'offset e della dispersione del last point, pista da 45m

Categoria ICAO	X offset	σ deviazione	Media pesata - intermediate point [m]		
	pesato	pesata	X [m]	σ[m]	
В	-246,68	1381,71	-0,37	2,07	
С	-14,42	508,81	-0,07	2,47	
D	-9,90	119,52	-0,18	2,17	
Е	-16,53	38,97	-0,97	2,29	

Tabella 4.22: Media pesata dell'offset e della dispersione dell'intermediate point, pista da
45m

Categoria ICAO	X offset	σ deviazione	Media pesata - first point [m]		
	pesato	pesata	X [m]	σ[m]	
В	-254,02	1400,23	-0,38	2,10	
С	-77,67	509,24	-0,38	2,47	
D	-28,79	123,53	-0,52	2,25	
Е	-28,34	43,99	-1,67	2,59	

Tabella 4.23: Media pesata dell'offset e della dispersione del first point, pista da 45m

Categoria ICAO	X offset	σ deviazione	pesi	Media pesata - Last point [m]	
	pesato pesata	X [m]	σ[m]		
В	116,36	2273,04	667,00	0,17	3,41
С	51,99	656,08	206,00	0,25	3,18
D	D -8,66 130,16		55,00	-0,16	2,37
Е	12,33	50,57	17,00	0,73	2,97

Tabella 4.24: Media pesata dell'offset e della dispersione del last point, pista da 60
--

Categoria ICAO	X offset	σ deviazione	Media pesata - int [m	ermediate point]
	pesato	pesata	X [m]	σ[m]
В	-116,06	1792,80	-0,17	2,69
С	-83,89	519,79	-0,41	2,52
D	-29,74	145,28	-0,54	2,64
Е	14,46	43,99	0,85	2,59

 Tabella 4.25: Media pesata dell'offset e della dispersione dell'intermediate point, pista da 60m

L

Categoria ICAO	X offset	σ deviazione	Media pesata - f	first point [m]
	posito	posutu	X [m]	σ [m]
В	-420,83	1781,78	-0,63	2,67
С	-176,15	552,32	-0,86	2,68
D	-38,21	131,98	-0,69	2,40
Е	1,55	58,45	0,09	3,44

 Tabella 4.26: Media pesata dell'offset e della dispersione del first point, pista da 60m

Per brevità si omettono i grafici dai quali si sono ricavate le linee di tendenza per realizzare le interpolazioni.



Figura 4.13: Comportamento delle varie categorie di velivoli al decollo, pista da 45m



Figura 4.14: Comportamento delle varie categorie di velivoli al decollo, pista da 60m

Nel caso degli atterraggi, il last point è influenzato dalle uscite ad alta velocità, e non è possibile distinguere il comportamento dei velivoli nel caso in cui utilizzino le uscite di pista a bassa od alta velocità. Per questo motivo i dati del last point verranno ignorati, in quanto il comportamento del velivolo nella fase terminale dell'atterraggio, ossia l'uscita dalla pista, è stato ampiamente trattato nel Capitolo 3.

Per la pista da 45m si nota come in fase di atterraggio ci sia un maggiore offset rispetto alla center line, poi questo si riduce nel tratto dell'intermediate point, tale offset si presenta sempre sul lato sinistro della pista. Le deviazioni standard sono pressoché costanti per i velivoli di categorie inferiori rispetto ai velivoli di categoria più alta (D, E, F) che presentano una riduzione del valore di deviazione. I risultati di questi dati sono coerenti con lo studio fatto al capitolo 3.

Per la pista da 60m invece non si può ricavare un comportamento ripetuto in modo apprezzabile per tutte le categorie ICAO; mentre per la deviazione standard si nota una riduzione dalla zona di toccata all'intermediate point, soprattutto per per le categorie maggiori, mentre le categorie minori hanno deviazione pressoché costante.

Pista da 45m				Pista da 60m				
Categori a ICAO	Punti di misurazion e	Offset medio	Deviazio ne standard media	Categori a ICAO	Punti di misurazion e	Offset medio	Deviazion e standard media	
	Last	-0,05	2,97		Last	0,09	3,25	
А	Intermediat e	-0,71	1,62	А	Intermediat e	0,23	3,14	
	First	-0,50	1,67		First	-0,37	2,43	
	Last	-0,19	3,13		Last	0,17	3,41	
В	Intermediat e	-0,37	2,07	В	Intermediat e	-0,17	2,69	
	First	-0,38	2,10		First	-0,63	2,67	
	Last	-0,19	3,06		Last	0,25	3,18	
С	Intermediat e	-0,07	2,47	С	Intermediat e	-0,41	2,52	
	First	-0,38	2,47		First	-0,86	2,68	
	Last	-0,02	2,67		Last	-0,16	2,37	
D	Intermediat e	-0,18	2,17	D	Intermediat e	-0,54	2,64	
	First	-0,52	2,25		First	-0,69	2,40	

Si riportano di seguito i dati riassuntivi per le categorie ICAO.

	Last	-0,62	2,65		Last	0,73	2,97
E	Intermediat e	-0,97	2,29	Е	Intermediat e	0,85	2,59
	First	-1,67	2,59		First	0,09	3,44
	Last	-1,20	2,84		Last	-	3,56
F	Intermediat e	-1,74	2,41	F	Intermediat e	-	2,54
	First	-2,77	2,92		First	-	4,44

Tabella 4.27: Valori medi per le categorie ICAO

Le larghezze da considerare in fase di progettazione riguardano: in fase di decollo l'intermediate point ed il last point, in quanto il first point (ossia la zona di allineamento alla pista) non ha una lunghezza sufficiente da giustificare una data larghezza trasversale in cui si possano definire degli spessori differenti rispetto alla pavimentazione lungo la runway; per l'atterraggio si considerano invece il first point ed l'intermediate point in quanto il tratto finale avrà le deviazioni delle taxi way di uscita pista di cui al capitolo 3.

Per quanto detto ed analizzato, si può proporre una larghezza massima di occupazione della fascia centrale della runway, in completamento alla AC 150/5320-6E.

		A B C D				E		F					
AC	150/5320- 6E		Larghezza dalla center line a pieno carico: 7,60 MINIMO Zona di assottigliamento di 7,60 m Spessore all'estremità dai 30cm ai 90cm										
<u>P</u>	<u>roposta</u>	offset	σ	offset	σ	offset	σ	offset	σ	offset	σ	offset	σ
OTTO	PISTA DA 45m	0,40	3,20	-0,30	2,40	-0,40	2,00	0,25	3,00	-1,25	1,70	-2,70	0,30
DEC	PISTA DA 60m	-0,65	2,60	-0,70	2,50	-0,90	2,20	-1,20	2,20	-1,10	2,20	-0,95	-
6610	PISTA DA 45m	-0,70	1,70	-0,40	2,10	-0,40	2,50	-0,50	2,25	-1,70	2,60	-2,80	2,90
ATTERRA	PISTA DA 60m	-0,40	3,14	-0,63	2,70	-0,90	2,70	-0,70	2,65	0,85	3,40	-	4,40

Tabella 4.28: Proposta per valutare la zona più caricata su pista

In aggiunta alla normativa attuale della FAA, viene proposta la valutazione della zona di pista più caricata sulla base della classificazione ICAO: vengono forniti i dati massimi di offset e deviazione trasversale, in modo tale che, sulla base dei velivoli effettivamente previsti per l'aeroporto in progettazione si possano stabilire le aree più caricate. Inoltre si riporta il valore di offset con relativo segno, in modo tale che si possa indicare la tendenza dei velivoli di una data categoria a portarsi sulla destra o sinistra della center line di pista.

Da questi dati si può quindi ricostruire l'occupazione su pista del velivolo, aggiungendo ai dati di offset e deviazione standard lo scartamento del carrello principale, dato dalle schede tecniche dei costruttori.

$$L tot = offset + larghezza \ carrello \ principale + 2 \cdot \sigma$$
(4.1)

Per i dati mancanti nella categoria F si può considerare in prima approssimazione la deviazione standard e l'offset della categoria E.

Dallo studio sui carichi effettuato al capitolo 2 si evince come questi non siano soggetti alla stessa distribuzione dei pesi, principalmente per via della portanza. Ne segue che, oltre alla suddivisione in fasce trasversali (sulla pista, sulle vie di circolazione ed in curva), si potrà realizzare una segmentazione della pavimentazione in base ai carichi: in questo modo sarà possibile ottimizzare lo spessore del pacchetto delle pavimentazioni.

In particolar modo, si potranno fare delle considerazioni in merito avendo delle piste dedicate al decollo ed all'atterraggio.

BREVE RICHIAMO DELLE FASI DI DECOLLO ED ATTERRAGGIO

Al decollo si ha il carico massimo sulla taxi way di collegamento tra la piazzola di sosta e la testata di pista. Qui è tipicamente prevista una lunghezza L_0 di allineamento del velivolo all'asse della runway per poi iniziare la procedura di decollo. Generalmente tale lunghezza non è sfruttata, ma l'allineamento avviene con una semplice rotazione sul posto del velivolo, il quale riesce ad allinearsi in uno spazio molto inferiore. In questo frangente il velivolo trasmette tutto il peso sulla pista. Iniziata la fase di decollo, il velivolo acquisisce sempre più velocità, e lungo la pista il carico si riduce progressivamente.

La lunghezza necessaria per rendere sensibile la progressiva riduzione del carico dipende dal tipo di velivolo, dal peso massimo al decollo che questo può avere e dai propulsori di cui è dotato. Nell'ultima fase, quella di rotazione, il carico su pista è ridotto al minimo, per poi annullarsi, chiaramente, con lo stacco e l'involo.

All'atterraggio si ha, al contrario, una zona iniziale di rotazione in cui la portanza è ancora piuttosto evidente, tanto che non è il carico verticale a destare problemi alla pavimentazione, ma lo sforzo tangenziale trasmesso sulla pista nella fase di impatto e strisciamento delle ruote del carrello principale. Alla fine della fase di rotazione (circa 3 secondi) il peso verrà completamente scaricato sulla pavimentazione in quanto la portanza va a zero quasi istantaneamente, nonostante le velocità ancora sostenute.

Da quanto visto si potrebbe pensare di realizzare degli spessori della pavimentazione in funzione di tale variazione del carico. Tuttavia non vanno dimenticate le condizioni di criticità. In particolare, per la condizione di decollo, fino al momento in cui viene raggiunta la V_1 il pilota ha facoltà di verificare il buono stato dell'apparecchio, per poter capire se il decollo potrà avvenire regolarmente, oppure se richiede uno spazio maggiore per il guasto di uno dei motori o se il decollo dovrà essere interrotto. Nel qual caso il pilota ha necessità di poter sfruttare un maggiore spazio su pista per poter fermare il mezzo, che percorrerà la via con pieno cario al decollo! Per questo motivo, nella pita dedicata al decollo, non si ritiene opportuno rastremare la pavimentazione in senso longitudinale.

Nella fase di atterraggio, si considera la prima tratta compresa tra la soglia e l'aiming point (punto di contatto ideale) come zona in cui più probabilmente potrà avvenire l'impatto del carrello principale. Si devono comunque considerare le criticità dell'atterraggio quali: la rottura di uno o entrambi i carrelli principali, il mancato funzionamento dei freni del velivolo, ecc...

Infatti al termine della pista aeroportuale si inseriscono tipicamente le zone di *clearway, stopway, RESA*, per garantire gli spazi necessari in caso di inidente.

Per questi motivi non si ritiene opportuna una rastremazione della pavimentazione lungo la pista.

4.3 Ottimizzazione della manutenzione

Il metodo utilizzato nella gestione della manutenzione in ambito aeroportuale, è strettamente legato alla suddivisione dell'area da manutenere in sezioni omogenee, caratterizzate da stesse caratteristiche di successione degli strati e stesso traffico.

Sezioni analoghe saranno sottoposte ad uguali strategie di M&R.

Nonostante i criteri per effettuare questa suddivisione, siano molti e molto variabili, quelli più comunemente utilizzati, per la facilità di reperimento delle informazioni necessarie sono e la tipologia di pavimentazione e il traffico.

Il primo fattore distingue le pavimentazioni flessibili dalle rigide, in quanto queste hanno una risposta ai carichi estremamente diversa, che comporta una diversa evoluzione del degrado, e diversi trattamenti manutentivi da applicare.

Se i dati sono disponibili, per avere un quadro chiaro della condizione generale dell' infrastruttura, è opportuno considerare anche le informazioni inerenti agli interventi di manutenzione e riabilitazione, nonché le ricostruzioni che sono avvenute nelle diverse zone dell'infrastruttura.

Il fattore inerente al traffico è più difficile da valutare, in quanto si deve scegliere un elemento da prediligere, tra apertura alare, larghezza dei carrelli, peso del velivolo e numero di passaggi effettuati.

Ognuno dei fattori citati sopra è importante, per capire quali zone dell' aeroporto siano maggiormente utilizzate.

Si nota che le informazioni inerenti all'apertura alare e alla larghezza dei carrelli, sono considerate insieme nella classificazione funzionale dell'aeroporto dell' ICAO e sono espresse da una lettera che definisce l'ingombro dell'aeromobile nelle manovre a terra. Tuttavia non sempre un velivolo appartenente ad una determinata classe di apertura alare, appartiene alla stessa classe della larghezza dei carrelli.

È per questo motivo che si propongono per questi due aspetti due classificazioni differenti.

Si riporta nel seguito una breve descrizione, con i pregi e i difetti delle classificazioni più utilizzate per la divisione in sezioni in funzione del traffico.

Classificazione WTC:

Con la sigla WTC si indica la Wake Turbolence Category, che permette una classificazione degli aeromobili secondo quanto indicato al punto 9 dell' "<u>Aircraft Type Designator</u>" documento 8643 dell' ICAO.

La Wake Turbolence è la turbolenza che si forma nell' aria, dietro l'aereo, dopo il suo passaggio.

Il fenomeno coinvolge molte componenti tra cui la principale è relativa ai vortici che si creano nell'area adiacente alle punte delle ali.

Questi vortici sono tanto più intensi quanto più l'aereo è pesante, dunque l'ICAO propone di dividere i velivoli in categorie di peso:

- **H** (Heavy) aeromobili da 136 000 kg (300 000 lb) o più;
- **M** (Medium) aeromobili di peso inferiore a 136 000 kg (300 000 lb) e più di 7 000 kg (15 500 lb);
- L (Light) aeromobili da 7 000 kg (15 500 lb) o meno.

Questo tipo di classificazione ha il pregio di essere immediata e di considerare il peso del velivolo, che è l'elemento principe su cui si deve basare la suddivisione in sezioni. Pur non essendo sufficientemente precisa, a differenza delle classificazioni basate sulla larghezza dei carrelli o dell'apertura alare, fornisce una prima idea dei carichi che utilizzano l' infrastruttura.

Nonostante quanto detto, non è particolarmente significativa, in quanto si possono assegnare alle zone dell' infrastruttura solamente tre categorie, (H,M,L), che oltre ad essere poche, hanno dei limiti molto ampi.

In particolare la categoria M contiene al suo interno tantissimi aeromobili, con pesi molto diversi che non è corretto porre sullo stesso piano ai fini della manutenzione, in quanto aerei più pesanti provocano un maggiore danno alla pavimentazione.

Avere a disposizione un' informazione sul WTC può essere in ogni caso utile per capire se lo scalo è usato prevalentemente da una determinata tipologia di aeromobili.

Classificazione in base all'apertura alare

Utilizzando la classificazione ICAO relativa all'apertura alare, gli aeromobili vengono divisi in sei categorie, delimitate dai valori riportati nella Tab. 4.29:

CODICE	APERTURA
ALFABETICO	ALARE (WS) [m]
А	WS<15
В	15≤WS<24
С	24≤WS<36
D	36≤WS<52
E	52≤WS<65
F	65≤WS<80

Tabella 4.29: Limiti della classificazione per apertura alare (ICAO)

Rispetto alla classificazione WTC, questa è più precisa, in quanto presenta sei possibili categorie.

L'apertura alare è una grandezza che definisce la distanza che c'è tra le estremità delle ali ed è importante conoscerla per poter valutare il rischio di collisione tra gli aeromobili e gli edifici dello scalo, tuttavia non da informazioni significative sull'utilizzo dell' infrastruttura, lato pavimentazione.

Classificazione in base alla larghezza dei carrelli

Utilizzando ancora le categorie definite dall'ICAO, nella classificazione funzionale dell'aeroporto, si riportano nella Tab ???, le grandezze tipiche per le sei classi di larghezza dei carrelli.

CODICE ALFABETICO	DISTANZA TRA I BORDI ESTERNI DEL CARRELLO PRINCIPALE D [m]
А	D<4,5
В	4,5≤WS<6
С	6≤WS<9
D	9≤WS<14
E	9≤WS<14
F	14≤WS<16

Tabella 4.30: Limiti della classificazione per apertura alare (ICAO)

Tra le classificazioni finora proposte, questa è senza dubbio quella che fornisce dati più importanti per manutenere la pavimentazione, in quanto definisce due fasce di sollecitazione, in corrispondenza delle ruote dei carrelli principali, che saranno tanto più grandi quanto più la categoria è elevata.

È l'unica classificazione,tra quelle citate che dà un informazione sull' occupazione trasversale della pista, anche se considerare meramente la larghezza dei carrelli non è corretto in quanto si trascura l'effetto dovuto alla dispersione laterale delle traiettorie, che come si è esposto nel Capitolo 3, gioca un ruolo fondamentale nel calcolo delle sollecitazioni.

Classificazione in base all' aereo critico

"L'aereo critico e' quell'aeromobile che utilizza o si ipotizza che utilizzerà lo scalo con maggiore frequenza. E' il velivolo che limita le caratteristiche da assegnare all'infrastruttura di volo, nella sua lunghezza e nelle sue caratteristiche di portanza."

In questa sede, si propone il suo utilizzo per classificare l'infrastruttura in base ai passaggi del suddetto aereo critico, per poter prevedere una divisione in sezioni che tenga conto di tutti i parametri visti sopra (peso, apertura alare e larghezza dei carrelli), in quanto concorrono nella trasformazione del traffico reale in traffico di progetto, tramite la formula e i coefficienti riportati al paragrafo 1.2.2.1.1.

In questo modo si ottiene un utilizzo dell' infrastruttura omogeneizzata secondo l'aereo critico.

Il dato principale che si ricava da questa elaborazione è l' utilizzo delle entrate/uscite di pista, in modo che in fase di priorizzazione degli interventi, si riesca ad assegnare un peso maggiore a quei raccordi caratterizzati da un maggior utilizzo.

Un' elaborazione basata sulle suddette classificazioni produce una divisione della struttura in blocchi definite appunto dall'andamento del traffico e dalla tipologia di pavimentazione utilizzata.

Anche combinando le informazioni inerenti al primo fattore, quindi riuscendo ad inserire in un' unica categoria apertura alare e larghezza del carrello principale, e considerando la distribuzione degli aerei nelle varie uscite in funzione dell'aereo critico, non si riesce comunque ad ottenere un utilizzo della pista longitudinale.

La metodologia proposta da Shahin [18] e ampiamente adottata ancora oggi prevede di considerare separatamente le fasce laterali dalla fascia centrale la cui larghezza viene assunta a priori.

Non essendoci un valore di riferimento, la decisione viene lasciata al progettista che o divide semplicemente la pavimentazione in tre strisce di uguali dimensioni, o sceglie una larghezza arbitrariamente superiore alla massima distanza tra i bordi esterni dei carrelli transitanti sulla pista.

È chiaro che questo porta a delle valutazioni piuttosto approssimative, soprattutto per quanto riguarda l'aspetto economico.

Progettare un intervento per sezioni molto sollecitate è sicuramente diverso e più costoso rispetto a quello che si prevedrebbe per sezioni poco transitate, quindi è importante sapere con precisione dove si concentreranno le traiettorie.

Sbagliare la divisione in sezioni porta in ogni caso ad una perdita economica, in quanto o si prevedono interventi non necessari o non sufficienti, in questo caso il costo aumenta ancora, in quanto si dovranno disporre ulteriori provvedimenti manutentivi prima della fine della vita utile del trattamento applicato.

Un passo in avanti rispetto alla situazione appena delineata, è stato compiuto introducendo i software, che sono in grado di calcolare in maniera ponderata l'effetto di tutti gli aeromobili transitanti sull' infrastruttura, considerando, seppur non in maniera precisa, la presenza della dispersione delle traiettorie.

Sia FAARFIELD sia APSDS conoscendo la struttura della pavimentazione e la composizione del traffico che ci transita, restituiscono un grafico del danno totale che la sovrastruttura presenta in quel particolare momento.

In funzione di questo è possibile individuare con specifiche considerazioni quale è la fascia maggiormente sollecitata per la quale si prevedono interventi di manutenzione più significativi. In questo modo la dimensione della fascia centrale non viene più definita in maniera arbitraria dal progettista ma c'è una valutazione che riassume sia la composizione di traffico, sia l'effetto della successione degli strati e delle proprietà dei materiali costituenti tali strati.

Si consideri uno spettro di traffico standard, uguale a quello analizzato anche per la fase di progetto e riportato nella Tab 4.31, a cui si associa una stratigrafia della pavimentazione tipica flessibile, con spessori e caratteristiche dei materiali di default di FAARFIELD Fig 4.15.

		GROSS	ANNUAL
AEREI	MOVIMENTI	WEIGHT	GROUTH
		[t]	[%]
707-320	198	152,407	0
727-100	680	77,111	0
727-200	560	84,005	0
737-900ER	327	85,366	0
747-400	49	414,13	0
DC8-40,-50	116	144,242	0
DC8-60	108	162,386	0
DC9-10,-20	127	49,442	0
DC9-30,-40	744	55,338	0
DC10-10	108	207,745	0
C-580	44	22,68	0
L-1011	107	225,889	0
YS-11	52	27,216	0
BAC-111-500	194	45,359	0

Tabella 4.31: traffico di progetto, inserito in input sia in FAARFIELD sia APSDS



Figura 4.15: Stratificazione pavimentazione flessibile (FAARFIELD)

Procedendo con la verifica della pavimentazione, FAARFIELD produce un grafico con i CDF degli aeromobili appartenenti allo spettro di traffico, e calcola il CDF totale dato dalla somma di tutti i contributi, visibile in nero nella Fig 4.16.



Figura 4.16: Danno cumulato in una pavimentazione flessibile sottoposta ad un specifico traffico, calcolato da FAARFIELD

Dal grafico si deduce che la fascia entro la quale si concentrano i carichi è larga 17,8 m ed è distribuita simmetricamente rispetto alla center line.

In questo caso il progettista può scegliere se considerare critica tutta la fascia compresa tra i due estremi della curva del CDF cumulato o limitarla escludendo i valori poco probabili delle code. In questo caso è sempre il progettista che stabilisce dove troncare le code e quindi la larghezza della striscia centrale da considerare.

Un procedimento analogo, può essere eseguito con il programma APSDS. Ricostruendo esattamente lo stesso esempio proposto per FAARFIELD, si riporta il grafico del CDF cumulato ottenuto in questo caso.



Figura 4.17: Danno cumulato in una pavimentazione flessibile sottoposta ad un specifico traffico, calcolato da APSDS, considerando un valore di deviazione standard tipico delle runway (773 mm)

Si osserva che la larghezza della fascia sollecitata è uguale o molto simile a quella che si è ottenuta utilizzando FAARFIELD, anche se APSDS rappresenta nel grafico esclusivamente quanto avviene a destra della center line, che si trova in corrispondenza dell'ascissa "0".

Il valore massimo di CDF osservato tuttavia è diverso, e ciò è dovuto ai diversi modelli di degrado implementati nei due programmi. Essi hanno una struttura simile ma i coefficienti moltiplicativi, addizionali ed esponenziali, utilizzate per esprimere il comportamento a fatica o ad ormaiamento, sono differenti poiché sono frutto di due calibrazioni distinte.

Si nota che il secondo software rappresenta meglio il comportamento degli aerei, in quanto lascia libero l'utente di inserire il valore di "wander", ovvero di dispersione trasversale delle traiettorie, che come si è ampiamente spiegato nel Capitolo 3, varia molto con la velocità e con la larghezza della fascia pavimentata. È opportuno quindi distinguere le parti dell'aeroporto, assegnando ad ognuna di queste lo specifico valore di dispersione delle traiettorie.

Se ad esempio di ripete l'analisi fatta con APSDS, utilizzando un valore di "wander", tipico delle runway di 1576 mm, si ottiene un danno alla pavimentazione molto diverso, minore in valore assoluto ma distribuito in una fascia più larga.



Figura 4.18: Danno cumulato in una pavimentazione flessibile sottoposta ad un specifico traffico, calcolato da APSDS considerando un valore di deviazione standard tipico delle runway (1576 mm)

Sia FAARFIELD sia APSDS rappresentano le dispersioni delle traiettorie unicamente con il valore di deviazione standard, mentre tralasciano completamente lo spostamento (offset) dell'asse dell' aereo rispetto alla center line, che invece esiste e va considerato.

Queste dispersioni sono un fenomeno statistico, che rappresenta il comportamento dei velivoli transitanti in aeroporto, dunque dovrebbero essere indipendenti dal tipo di struttura che viene caricata.

Il CDF computato dai software, per quanto dia un' informazione interessante, non è l'indicatore adatto per definire la fascia più sollecitata, in quanto il danno che viene calcolato, dipende direttamente da come la pavimentazione risponde alle sollecitazioni, ed è chiaro che questa risposta varia sostanzialmente al variare degli spessori, delle caratteristiche del materiale o della tipologia di pavimentazione.

Mettendo insieme risultati, provenienti da diversi paesi del mondo, fatti in diversi periodi, considerando una diversa composizione del traffico, oggi siamo in grado di descrivere il fenomeno delle dispersioni trasversali per le diverse zone dell'aeroporto. Questi valori permettono di individuare delle strisce di traffico, all'interno delle quali si concentreranno la maggior parte delle traiettorie degli aerei e che quindi andranno trattate con maggiore attenzione nella fase di manutenzione.

Sintetizzando i risultati ottenuti nel Capitolo 3, si riportano i valori di dispersione delle traiettorie da associare alle zone dell'infrastruttura in modo da definire le strisce di traffico.

DECOLLI 45 m									
	OFFSET	OFFSET	DEV. ST.	BORDO SX	BORDO DX	LARGHEZZ			
	MIN [m]	MAX [m]	max [m]	[m]	[m]	A TOTALE			
corsa al decollo	-0,59	-0,03	2,1	-8,19	7,57	15,76			
zona di rotazione	-0,54	-0,07	2,8	-8,85	8,25	17,10			

• Runway:

Tabella 4.32: Dispersione trasversale delle traiettorie in fase di decollo su piste larghe 45 m

DECOLLI 60 m									
	OFFSET	OFFSET	DEV. ST.	BORDO	BORDO DX	LARGHEZZA			
	MIN [m]	MAX [m]	max [m]	SX [m]	[m]	TOTALE			
corsa al decollo	-1,36	-0,33	2,3	-9,17	7,48	16,65			
zona di rotazione	-1,71	-0,34	2,8	-9,97	7,92	17,89			

Tabella 4.33: Dispersione trasversale delle traiettorie in fase di decollo su piste larghe 60 m

Si nota che a differenza di quanto detto al Capitolo 3, le zone della pista che si intende distinguere in fase di decollo sono due, non si considerano infatti i valori di offset e deviazione standard relativi all'allineamento dell'aeromobile in partenza.

Ciò è giustificato dall' osservazione del comportamento dei piloti in decollo, che per allinearsi alla center line, sono soliti effettuare una rotazione quasi sul posto che carica molto la pavimentazione in corrispondenza dell'area di manovra, ma non produce deviazioni utili al fine di caratterizzare il comportamento delle dispersioni nella prima sezione di pista.

In sostanza l'aereo, dopo aver ruotato su se stesso, si trova già allineato e si ferma in attesa dell'autorizzazione alla partenza da parte della torre di controllo, solo dopo averla ricevuta il velivolo parte iniziando la manovra di decollo, accelerando fino ad ottenere la velocità necessaria per il lift-off.

Le fasi considerate sono dunque due: la corsa al decollo e la rotazione poco prima del lift-off, in quanto dato che c'è una notevole variazione di velocità, le dispersioni osservate assumono valori maggiori nel secondo tratto.

Si nota inoltre che la lunghezza lungo la quale l'aereo compie la rotazione dei carrelli, pur variando da aereo ad aereo, è comunque piuttosto breve.

I valori quindi che interesseranno maggiormente la pista sono quelli rilevati per la corsa al decollo, che pur aumentando nel tratto dove l'aereo effettua la rotazione, si hanno in una zona piuttosto breve, di solito di lunghezza non superare i 300 m.

ATTERRAGGI 45 m- USCITE NORMALI									
	OFFSET OFFSET DEV. ST.max BORDO SX BORDO LARGHEZZA MIN [m] MAX [m] [m] [m] DX [m] TOTALE								
toccata	-0,81	-0,20	2,35	-8,66	7,65	16,31			
rullaggio	-0,51	-0,11	2,31	-8,32	7,69	16,01			
Uscite normali	0,59	0,91	1,9	-6,81	8,31	15,12			

Tabella 4.34: Dispersione trasversale delle traiettorie in fase di atterraggio su piste larghe 45
m, con uscite di tipo normale

ATTERRAGGI 60 m-USCITE NORMALI								
	OFFSET OFFSET DEV. ST. max BORDO SX BORDO LARGHEZZA MIN [m] MAX [m] [m] [m] DX [m] TOTALE							
toccata	-1,13	-0,27	3,44	-10,07	8,67	18,74		
rullaggio	-0,85	0,00	2,96	-9,31	8,46	17,77		
Uscite normali	0,59	0,91	1,9	-6,81	8,31	15,12		

Tabella 4.35: Dispersione trasversale delle traiettorie in fase di atterraggio su piste larghe 6
m, con uscite di tipo normale

ATTERRAGGI 45 m- USCITE VELOCI								
	OFFSET OFFSET DEV. ST.max BORDO SX BORDO LARGHEZZA MIN [m] MAX [m] [m] [m] DX [m] TOTALE							
toccata	-0,81	-0,20	2,35	-8,66	7,65	16,31		
rullaggio	-0,51	-0,11	2,31	-8,32	7,69	16,01		
Uscite veloci	-0,53	0,82	3,4	-9,43	9,72	19,15		

Tabella 4.36: Dispersione trasversale delle traiettorie in fase di atterraggio su piste larghe 45 m, con uscite veloci

ATTERRAGGI 60 m-USCITE VELOCI									
	OFFSET OFFSET DEV. ST. max BORDO SX BORDO LARGHEZZA MIN [m] MAX [m] [m] [m] DX [m] TOTALE								
toccata	-1,13	-0,27	3,44	-10,07	8,67	18,74			
rullaggio	-0,85	0,00	2,96	-9,31	8,46	17,77			
Uscite veloci	-0,53	0,82	3,4	-9,43	9,72	19,15			

Tabella 4.37: Dispersione trasversale delle traiettorie in fase di atterraggio su piste larghe 60m, con uscite veloci

Per gli atterraggi le divisioni da fare in pista sono tre, in quanto le dispersioni osservate in toccata sono molto grandi ma si restringono durante la frenatura dell'aeromobile che tende ad allinearsi alla center line.

Quanto detto vale sempre, passando dalla zona di toccata a quella di frenatura, per entrambe le larghezze di pista considerate.

Un comportamento diverso invece si nota, nel passaggio dalla zona di frenatura all' uscita di pista. Se l'aereo utilizza uscite normali, ovvero disposte ad angolo retto rispetto alla pista, prima di approcciarsi alla curva diminuisce molto la sua velocità e conseguentemente diminuisce anche la dispersione delle traiettorie ad esso associata, per cui si assumono i valori tipici delle vie di rullaggio di larghezza maggiore (30,5 m).

Un comportamento diverso si ha invece, nelle uscite ad alta velocità, in cui proprio le velocità alte causano un comportamento delle dispersioni molto vario, che risulta quindi anche difficile da classificare.

- TAXIWAY DRITTF OFFSET OFFSET DEV. ST BORDO SX BORDO LARGHEZZA MIN [m] MAX [m] max [m] DX [m] TOTALE [m] -6,94 7,23 14,17 TAXIWAY DRITTE 23 m 0,06 0,23 1,5 -6,81 8,31 15,12 TAXIWAY DRITTE 30,5 m 0,59 0.91 1.9
- Vie di rullaggio:

Tabella 4.38: Dispersione trasversale delle traiettori	e nelle	vie di	rullaggio
--	---------	--------	-----------

TAXIWAY DRITTE 30,5 m								
	OFFSET NG [m]	OFFSET MG [m]	DEV. ST. Int. curva[m]	DEV. ST. Est. curva[m]	BORD O SX [m]	BORDO DX [m]	LARGHEZZ A TOTALE [m]	
TAXI CURVE 30,5 m	4	-2	2,36	2,38	-9,86	6,38	16,24	
TAXI CURVE 23	3,01	-1,50	1,77	1,79	-7,41	4,80	12,21	

• Raccordi di entrata/uscita pista:

Tabella 4.39: Dispersione trasversale delle traiettorie nei raccordi di entrata/uscita

• Uscite ad alta velocità:

USCITE RAPIDE								
OFFSET MIN [m]	OFFSET MAX [m]	DEV. ST. max [m]	BORDO SX [m]	BORDO DX [m]	LARGHEZZ A TOTALE			
-0,53	0,82	3,4	-9,43	9,72	19,15			

Tabella 4.40: Dispersione trasversale delle traiettorie nelle uscite ad alta velocità

Naturalmente la grandezza delle strisce di traffico varia in funzione della massima distanza tra i carrelli di atterraggio, tanto più questa è piccola, tanto più la striscia risultante sarà piccola.

Dunque i valori presentati nelle colonne: bordo destro, bordo sinistro e larghezza totali, sono, come spiegato nel capitolo 3, riferite ad uno specifico aereo il B747-400.

Ciò che si è presentato in questo elaborato di tesi è un metodo, che può essere adattato alle varie situazioni di traffico riscontrate in aeroporto.

A conclusione di quanto detto finora, si osserva che questo studio affronta il problema della dispersione trasversale, abbinato alla valutazione dei carichi sollecitanti la pista aeroportuale.

Nel Capitolo 2 infatti si è illustrato l' effetto della portanza nella riduzione del carico gravante su pista in entrambe le fasi di decollo e atterraggio, che porta ad

individuare anche trasversalmente degli spazi non utilizzati, per i quali si potranno adottare provvedimenti di manutenzione più blandi, rispetto alle zone critiche.

Quanto detto assume una rilevanza ancora maggiore per quegli aeroporti che sono dotati di due piste, una dedicata ai decolli e una agli atterraggi, in quanto essendo caratterizzate da un comportamento delle dispersioni e della variazione di portanza opposto si hanno zone critiche differenti.

Naturalmente le vie di rullaggio e i piazzali sono esclusi da questo discorso in quanto, il carico che grava in quelle zone è sempre il massimo.

Per quanto riguarda i decolli, l'aereo accede alla pista con un carico pari all'MTOW (Maximum Take-Off Weight), che è il carico massimo relativo alla tipologia specifica di velivolo in partenza.

La zona di allineamento al decollo è dunque "critica" dal punto di vista del carico.

Accelerando progressivamente per raggiungere la velocità di lift-off, l'aeromobile sollecita la pavimentazione sempre di meno, per effetto della portanza, che aumenta con il quadrato della velocità.

Nella figura in Allegato C sono espressi (tramite colori) i diversi i pesi che sollecitano la pista per il decollo di un B747-400. Le sezioni longitudinali individuate, sono quelle ricavate al Capitolo 2, relative ai cambiamenti di velocità nella fase di decollo, per i quali si è calcolato il valore di portanza e conseguentemente, tramite la sottrazione di questa forza alla forza peso, si è ricavato il carico gravante su pista.

La suddivisione longitudinale invece, fa riferimento all'andamento delle dispersioni trasversali sulla pista, che risultano maggiori nell' ultima sezione, ovvero dove l'aereo ha la velocità maggiore.

Stesso discorso vale per gli atterraggi, che invece presentano un comportamento opposto a quanto avviene per i decollo, come mostrato in Allegato C.

La zona di toccata è infatti la meno sollecitata dai carichi verticali, che aumentano fino al valore di MLW (Maximum Landing Weight), comunque inferiore all'MTOW. Anche in questo caso nell'Allegato C si osserva una suddivisione longitudinale, dovuta alla variazione dei carichi sulle lunghezze individuate al Capitolo 2 per la fase di atterraggio; e una suddivisione trasversale rappresentante le dispersioni delle traiettorie, anche queste con andamento opposto rispetto ai decolli.

I percorsi infatti tendono ad essere piuttosto dispersi nella zona di toccata e ad allinearsi man mano che le velocità diminuiscono e l'aereo si approssima ad uscire dalla pista.

Viene riportato inoltre il comportamento sulle taxi way di ingresso pista per il decollo, in cui il carico è massimo, pari all'MTOW. Viene riportato sia il comportamento "standard", ossia uscita dalla taxi way e successiva curva di raccordo e percorrenza del tratto di allineamento alla pista; che il comportamento reale, ossia uscita rettilinea dalla taxi way, rotazione del velivolo sul posto, inizio della corsa al decollo molto prima della soglia di pista.

All'atterraggio si è evidenziata l'uscita dalla pista su taxi way a bassa velocità; mentre si è lasciato tratteggiato il comportamento che l'aereo avrebbe nel caso in cui dovesse frenare in pista.

Nel caso in cui la pista fosse utilizzata in entrambi i sensi di percorrenza, ossia decolli ed atterraggi da entrambe le testate di pista, si nota che il tratto terminale del decollo ed iniziale dell'atterraggio, sono soggette a carchi molto bassi. Infatti nella fase terminale del decollo si ha un elevato valore di portanza, per il fatto di essere prossimi allo stacco e seguente lift off. Nella fase iniziale dell'atterraggio si ha sempre un elevato valore di portanza, come già citato. Si sono riportati i carichi su pista in Allegato D, dove si sono affincati i comportamenti sulle due testate di una stessa pista.

5 CONCLUSIONI

Gli aeroporti sono infrastrutture che consentono alla popolazione di spostarsi tra i Paesi del Mondo, permettendo di realizzare scambi culturali e commerciali.

Si comprende quindi l'importanza di una buona realizzazione e gestione delle pavimentazioni, le quali devono garantire la sicurezza e l'affidabilità dei movimenti aerei, oltre ad un adeguato comfort per i passeggeri e l'integrità per le merci trasportate.

La conoscenza della zona dell'aerovia sulla quale si avrà un maggiore impatto dei velivoli, è quindi di fondamentale importanza, in quanto ciò consente di poter dimensionare la struttura in modo efficiente ed efficace, consentendo di poter ottimizzare la spesa e di gestire il budget a disposizione in modo oculato.

L'ottimizzazione della spesa può avvenire garantendo un adeguato spessore della pavimentazione laddove si sia certi del massimo carico e passaggio dei velivoli. Dallo studio eseguito nel presente elaborato, si è venuti a conoscenza dell'attitudine dei mezzi a disporsi in maniera asimmetrica rispetto alle center line di pista e di taxi way e si conoscono gli scartamenti dalla linea centrale di riferimento oltre alle deviazioni standard che caratterizzano determinati movimenti. In questo modo è stato possibile elaborare una tabella che riassume tali dati, applicabile alle varie tipologie di velivoli che possono servirsi dello scalo in esame. Tale tipologia fa riferimento alla classificazione funzionale ICAO per la suddivisione degli aeromobili in base alla larghezza alare e distanziamento del carrello principale. Solo in questo modo è possibile garantire il giusto spessore degli strati costituenti la pavimentazione nella giusta posizione, che siano in grado di rispondere alle esigenze date dalla circolazione dei velivoli sulla sovrastruttura.

Realizzata la pavimentazione, è possibile puntare alla pianificazione della manutenzione, che sia il più rispondente possibile alle necessità della struttura aeroportuale.

Per questo motivo si ritiene che non ci si possa limitare solamente alla mera suddivisione in macro aree per definire le unità di campionamento, ma occorra studiare il fenomeno più approfonditamente per meglio individuare le superfici veramente "colpite" dal passaggio dei velivoli.

In questo elaborato di tesi si sono quindi sfruttate le campagne di monitoraggio fatte in passato per valutare i comportamenti delle dispersioni delle traiettorie trasversali, e longitudinali al fine di fornire un quadro generale della situazione, per l' individuazione delle sezioni di pista in cui, con maggiore probabilità statistica, si concentrano la maggior parte dei passaggi dei velivoli.

È stata inoltre eseguita la valutazione del comportamento aerodinamico degli aeromobili, per studiarne l'impatto sulla pavimentazione: in funzione della variazione della portanza alare si hanno dei carichi più o meno alti sulla pista, il cui valore dipende chiaramente dal velivolo considerato e dalla tipologia di manovra compiuta. Per apprezzare al meglio il lavoro svolto, si propongono due grafici riassuntivi degli effetti dei due fattori che influenzano la distribuzione del carico, distinguendo quanto avviene in fase di decollo e atterraggio in riferimento ad un layout di un aeroporto esistente.

Si evidenziano quindi operativamente quali sono le zone più critiche, per carichi e passaggi, sulle pavimentazioni di pista e di raccordi, in riferimento all'aereo di progetto B474-400.

Quanto esposto in questo elaborato di tesi è un metodo, che in funzione dei dati geometrici dell'aeroporto e di un aereo di progetto fornisce l'utilizzo dell' infrastruttura, valutandone le zone che saranno maggiormente sollecitate, non si esclude quindi un'applicazione dello stesso ad un software di programmazione che possa valutare le strisce di traffico in maniera automatica e guidare quindi il progettista sia nella fase di progetto che nella fase di manutenzione, creando una continuità nei due momenti di vita della pavimentazione.

Si precisa che se da una parte si è ottenuta una valutazione rigorosa dell'effetto della portanza, dall' altra i dati ad oggi disponibili per la trattazione statistica delle dispersioni trasversali sono piuttosto carenti. Questo è dovuto principalmente al fatto che monitorare i movimenti dell'aeroporto, indagando non solo il numero di operazioni che vengono effettuate ma anche dove, longitudinalmente e trasversalmente, è piuttosto costoso, in quanto sono necessarie specifiche tecnologie, che hanno alti costi sia di istallazione che di manutenzione.

Con l'analisi proposta, dato che risultano definite quali sono le zone maggiormente sollecitate, siamo in grado di individuare la posizionare dei misuratori più efficiente, in modo da ottimizzarne il numero e quindi il costo.

Oltre ai classici sistemi laser utilizzati fino ad ora, posizionati esternamente alla fascia pavimentata, si cita la nuova frontiera della diagnosi delle sovrastrutture, che sono le fibre ottiche. Ad oggi sono ancora in fase di sperimentazione, in quanto le apparecchiature correlate alle misurazioni devono essere correttamente tarate .

Questa tecnologia si presterebbe molto bene alla misurazione precisa del comportamento dei velivoli, riuscendo a valutare sia le dispersioni longitudinali che quelle trasversali, anche se al momento l'apparecchiatura non è ancora pronta per la messa in opera negli aeroporti del mondo.

Una soluzione più semplice, che fornisce anche soluzioni più semplici è l'introduzione all' interno della pavimentazione non di fibre ma di sensori dinamici puntuali, in grado di captare il movimento che avviene sopra gli stessi.

Conoscendo qualitativamente l'andamento delle traiettorie si è in grado di progettare precisamente dove posizionarli con degli stendimenti trasversali alla pista.

Ultimo ma non meno importante, è il riferimento alle future tecniche per l'approccio alla pista nella fase di atterraggio, e per favorire una più sicura movimentazione su pista dei mezzi. Il riferimento và al GBAS, che vuole imporsi all'interno del panorama mondiale dei sistemi di radio navigazione di ultima generazione, come il successore dell'ILS, ad oggi ampiamente certificato anche per le categorie II e III. GBAS garantirà una maggiore precisione degli atterraggi in qualunque condizione meteo, realizzando in questo modo una maggiore canalizzazione anche per la fase di atterraggio con un conseguente aumento del carico localizzato in determinate sezioni nell'intorno della center line di pista, e maggiormente vicine all'aiming point. Questo potrà rivelarsi sfavorevole per la manutenzione in quanto ci sarà un'area molto più colpita dall'atterraggio e rullaggio dei velivoli, che si disporranno più ordinatamente sia in senso trasversale alla pista che longitudinale.

D'altro canto, avere un sistema di avvicinamento molto più preciso e flessibile, consente agli aerei di atterrare in aeroporti prima preclusi per motivi legati alla lunghezza di pista, oltre per ragioni legate al posizionamento dell'aeroporto stesso.

Per concludere, il metodo proposto in questo elaborato di tesi migliora le tecniche progettuali e manutentive; ma non solo: vuole essere un trampolino di lancio verso implementazioni e studi futuri e verso l'utilizzo mirato di applicazioni ai sistemi di monitoraggio in via di sviluppo.

6 Bibliografia

<u>Capitolo 1</u>

[1] *Giuseppe Tesoriere*. "Strade, Ferrovie, Aeroporti (vol. 3)- Infrastrutture aeroportuali"- Torino: UTET, (1993).

[2] *Di Mascio, Domenichini, Ranzo.* "Infrastrutture aeroportuali"- Roma: Ingegneria 2000, (2009).

[3] *Federal Aviation Administration:* "Advisory Circular No: 150/5320-6D."Airport Pavement Design and Evaluation" U.S.A.,(1995).

[4] *Federal Aviation Administration:* "Advisory Circular No: 150/5320-6E. Airport Pavement Design and Evaluation" U.S.A. (2009).

[5] *Federal Aviation Administration:* "Advisory Circular No: 150/5335-5B. Standardized Method of Reporting Airport Pavement Strength – PCN (2011).

[6] *E. Santagata, O. Baglier*: "Valutazione del PCN delle Pavimentazioni Aeroportuali. Strade e Autostrade (2013).

[7] *Federal Aviation Administration:* "Advisory Circular No: 150/5370-10E. "Standard For Specifying Construction of Airports" (2009).

[8] G.F. Hayhoe, I. Kawa, D.R. Brill: "New Developments in FAA Airport Pavement Thickness Design Software".

[9] *D.R. Brill, I. Kawa, G.F. Hayhoe* "Development of FAARFIELD Airport Pavement Design Software", Transportation Systems 2004 Workshop.

[10] FAARFIELD Help function. "Introduction to FAARFIELD"

[11] L. Wardle, B. Rodway, I Rickards: "Calibration of Advanced Flexible Aircraft Pavement Design Method to S77-1 Method". Published in Advancing Airfield Pavements, American Society of Civil Engineers, 2001 Airfield Pavement Specialty Conference, Chicago, Illinois, 5-8 August 2001.

[12] *L. Wardle, B. Rodway:* "Advanced Design Of Flexible Aircraft Pavements". 24th ARRB Conference – Building on 50 years of road and transport research, Melbourne, Australia 2010.

[13] APSDS 5.0: User Manual (2010).

[14] *Federal Aviation Administration* : "Advisory Circular No: 150/5380-7A: "Airport Pavement Management Program", (2006).

[15] Policy Engineering 99-01. Subject: Pavement Management/Management Policy. (1999).

[16] *M. Tamarozzi, A.Marradi:* "Un sistema di gestione delle pavimentazioni aeroportuali" Strade e Autostrade (2011).

[17] *Stefano Milanol:* "Daily management of airport-pavement damage". (Sagat Spa)

[18] *M.Y. Shain*: "Pavement Management for Airport, Roads and Parking Lots" (1994).

[19] *Federal Aviation Administration* : "Advisory Circular No: 150/5380-6B: "Guidelines and Procedures (2007).

[20] A. Johnson: "Best Practice Handbook on Asphalt Pavement Mantainance", Manual number 2000-04.

[21] *M. Wade, A. Wolters, D. Peshkin, M. Broten:* "Prioritization of Airfield Pavement Rehabilitation Project", Advancing Airfield Pavements (2001).

[22] *S.Tighe, M.Karim, A.Herring, K.Chee, M.Moughabghab*: "An Evaluation of various prioritization method for effective pavement management: a Canadian Airport case study", presented for the 2004 FAA Wordwide Airport Technology Transefer Conference.

[23] *M. Wade, D. Peshkin, K. Smith, H.T. Yu*: "Estimating Remainig Life of Airfield Pavement", Advancing Airfield Pavements (2001).

[24] *Airports Division Faa Central Region*: "Developing A Pavement Maintenance Program" (2012).

[25] N. Ismail, A. Ismail, R. Rahamat: "Development Of Expert System For Airport Pavement", European Journal of Scientific Research (2009).

[26] *G.K. Fuselier, B.J. Orandello, J.M. Arze:* "Customizing Work Planning with MicroPaver and Paver-Gis Washington Dulles International Airport Case Study", Advancing Airfield Pavements ,(2001).

[27] W. Chen, J. Yuan, M. Li : "Application of GIS/GPS in Shanghai Airport Pavement Management System", International Workshop on Information and Electronics Engineering 2012

Capitolo 2

[28] *Daniel P. Raymer*: "Aircraft Design: a Conceptual Approach", third edition AIAA Education Series.

[29] *Di Mascio, Domenichini, Ranzo.* "Infrastrutture aeroportuali"- Roma: Ingegneria 2000, (2009).

[30] *Prof. L.Trainelli*: "Meccanica del Volo – fase terminale: decolli e atterraggi", , Scuola di Ingegneria Aerospaziale, Dispense del corso, A.A.2009-2010.

[31] *Prof. L. Trainelli* : "Capitolo 8 – Organi d'atterraggio" ,Scuola di Ingegneria Aerospaziale, Dispense del corso, A.A.2009-2010.

[32] *Prof. L. Trainelli*: "Lezioni di Meccanica del Volo: 4 - Forze aerodinamiche" Scuola di Ingegneria Aerospaziale, Dispense del corso, A.A.2009-2010.

[33] Prof. F. Nicolosi / D. Coiro: "Meccanica del volo - Modulo Prestazioni CAP 10 – Prestazioni di Decollo, Atterraggio, Virata e Salita in accelerazione", Dispense del corso i Docenti del corso A.A.2009-2010.

Capitolo 3

[34] *Marinella Giunta* : "Manovre di decollo e di atterraggio", Dispensa del corso n°5, Università degli studi "Mediterranea" di Reggio Calabria – Facoltà di Ingegneria – Corso di Infrastrutture aeroportuali ed eliportuali .

[35] P. R. Donovan, E. Tutumluer, H. Huang: "Unbound Aggragate Deformation Behavior Due to Traffic Wander, Investigation Using Discrete Element Modeling",

[36] *Vedros, Miscellaneous*: "Study of Lateral Distribution of Aircraft Traffic on Runways", Paper No. U-369, Jan i960, U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station, CE, Vicksburg, Miss).

[37] *HoSang*: "Field Survey and Analysis of Aircraft Distribution on Airport Pavements, Final Report", (1975).

[38] D. N. Brown: "Lateral Distribution of Traffic", Army Engineer Waterways Experiment Station Vicksburg, Mississippi, (1973).

[39] *ICAO*: "Airports Design Manual, Part 2- Taxiways, Aprons and Holding Bays", ICAO DOC 9157-AN/901, (1991).

[40] British Airport Authority: "Taxiway Deviation Study", 1987:

[41] *Scholz*: "Statistical Extreme Value Analysis of JFK Taxiway Centerline Deviation for 747 Aircraft, FAA, Boeing company (2003).

[42] *Scholz*: "Statistical Extreme Value Analysis of ANC Taxiway Centerline Deviation for 747 Aircraft, FAA, Boeing company, (2003).

[43] *Scholz*: "Statistical Extreme Value Analysis Concerning risk of Wingtip to Wingtip or fixed object Collision for Taxing Large Aircraft", FAA, Boeing company (2003).

[44] 2003*D. Cohen-Nir and R. Marchi*: "Preliminary Analysis of Taxiway Deviation Data and Estimates of Airplane Wingtip Collision Probability" (2003).

[45] *Boeing*: "Statistical Analysis of Aircraft Deviations from Taxiway Centerline", Boeing Information and Support Services, (1995)

[46] *P. Kasarskis, J. Stehwien, J. Hickox, A. Aretz*": Comparison Of Expert And Novice Scan Behaviors During Vfr Flight", United States Air Force Academy Chris Wickens, University of Illinois, (2011).

[47] *D.Rufino, J.Roesler, E. Tutumluer, E. Baremberg*: "Wander Pattern for Commercial Aircraft at Denver International Airport".

[48] U. S. Army Engineer District, "Report of Stockten Runway Test Section," Sacramento, CE, Calif (1942).

[49] "Design Curves for Less than Capacity Operations," (18 Aprile 1949).

[50] U.3. Army Engineer Waterways Experiment J3tat ion: "Revised Coverage Criteria," CK, Letter to the Chief of Engineers -EAGER, (6 Jan 1956).

[51] *Federal Aviation Administration & Boing Company*: "Statistical Extreme Value Analysis of the SFO Taxiway Centerline for Boing 747 Aircraft", Cooperative Reserch Developmente Agreement, (2008).

[52] *Mary Ann Davis & Dieter Guenter:* "Operational Implementation Aspects of LAAS", FAA ATO-W/GPS TAC.

[53] *Dieter Guenter*: "FAA and Spain's aviation service provider participate in GBAS technical interchange meeting", FAA ATO-W/GPS TAC.

[54] FAA: "Navigation Program – Ground Based Augmentation System(GBAS)".

[55] FAA :"Navigation Programs – GBAS – How il works.

[56] FAA: "Wide Area Augmentation System (WAAS).

[57] FAA:"Navigation Program – GBAS - News",

[58] "Novel Integrity Concept for CAT III. Precision Approaches and Taxiing: Extended GBAS (E-GBAS)", Wolfgang Shuster and Washington Ochieng

[59] *Changdon Kee, Sungmin Park, Youngsun Yun* "Comparative Study between GBAS and Conventional Aircraft Precision Approach Guidance System", (2003)

[60] "GBAS approach guidance performance – A comparison to ILS", ITM 2013, *Abstract*

[61] "A statistical analysis of balked landing approaches for the airbus A380 under GBAS guidance", ION GNSS, 2006 *Abstract*

[62] "Precision Approaches", Avionics

[63] *FAA*: "FAA Representative Attend SBAS Interoperability Working Group (IWG) Meeting in Toulouse, France", SatNavNews – FAA Navigation Program, volume 47, spring 2013

[64] *Michael Felux, Thomas Dautermann*: "GBAS Landing System – Precision Approach Guidance After ILS",

[65] *Michael Felux, Thomas Dautermann, Anja Grosch*: "Approach service type D evaluation of the DLR GBAS testbed".

7 Fonti internet

contentzone.eurocontrol: aircraft data

flugzeuginfo.net: the aircraft encyclopedia

Boeing web site: schede tecniche velivoli

Airbus web site: schede tecniche velivoli

FAR: Federal Aviation Regulations

Flight simulator checklist

Angle of Attack Awareness and Angle of Attack Management

<u>Wikipedia</u>