

POLITECNICO DI MILANO

SCUOLA DI INGEGNERIA CIVILE, AMBIENTALE E TERRITORIALE



LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA CIVILE

CONFRONTO DEI METODI ACN-PCN E ACR-PCR
PER LA VALUTAZIONE DELLA RESISTENZA DELLE
PAVIMENTAZIONI AEROPORTUALI

Matilde MENEHINI

Matricola 259624

RELATORE:

Prof. Maurizio CRISPINO

CORRELATORE:

Ing. Stefano PARACCHINI

ANNO ACCADEMICO 2024-2025

Abstract

Per diversi decenni la dichiarazione della resistenza delle pavimentazioni aeroportuali flessibili e rigide è stata effettuata mediante il metodo ACN-PCN, adottato a livello internazionale per esprimere la compatibilità tra aeromobili e infrastrutture aeroportuali. L'evoluzione dei metodi di progettazione e valutazione delle pavimentazioni aeroportuali ha condotto allo sviluppo di modelli matematici più avanzati, basati sulla simulazione del comportamento meccanico degli strati che compongono la struttura della pavimentazione, rendendo necessaria una revisione delle tradizionali procedure di classificazione.

In tale contesto è stato introdotto da ICAO il nuovo metodo ACR-PCR, a partire dal 28 novembre 2024, che consente una valutazione della risposta strutturale delle pavimentazioni alle sollecitazioni indotte dagli aeromobili mediante modelli di analisi elastica multistrato. Uno degli obiettivi principali è la pubblicazione nelle Aeronautical Information Publications (AIP) dei valori PCR al fine di valutare la compatibilità tra aeromobile e pavimentazione in sostituzione del PCN.

Il presente lavoro si propone di analizzare il quadro normativo e metodologico relativo alla valutazione della resistenza delle pavimentazioni aeroportuali, esaminando in particolare la transizione dal metodo ACN-PCN al metodo ACR-PCR. L'analisi viene condotta attraverso lo studio comparato delle principali normative di riferimento emanate da EASA e ICAO, al fine di evidenziare analogie, differenze e sviluppi evolutivi tra i diversi metodi.

Lo studio è inoltre supportato dall'analisi di casi applicativi relativi a aeroporti tipo, utilizzati per valutare le implicazioni operative e progettuali derivanti dall'adozione del nuovo metodo e per evidenziare le principali novità nella sua implementazione.

I risultati consentono di identificare gli elementi innovativi introdotti dal metodo ACR-PCR e di valutarne l'impatto positivo sulla gestione e sulla progettazione delle infrastrutture aeroportuali, fornendo indicazioni sugli elementi introdotti dall'applicazione del nuovo sistema di classificazione.

Abstract in lingua inglese

For several decades, the strength classification of flexible and rigid airport pavements has been carried out using the ACN–PCN method, adopted internationally to express the compatibility between aircraft and airport infrastructure. The evolution of airport pavement design and evaluation methods has led to the development of more advanced mathematical models, based on the simulation of the mechanical behavior of the layers composing the pavement structure, making a revision of traditional classification procedures necessary.

In this context, ICAO introduced the new ACR–PCR method, effective from 28 November 2024, which enables the evaluation of the structural response of pavements to aircraft-induced loads through multilayer elastic analysis models. One of the main objectives is the publication of PCR values in the Aeronautical Information Publications (AIP) in order to assess aircraft–pavement compatibility, replacing the PCN.

This work aims to analyze the regulatory and methodological framework related to the evaluation of airport pavement strength, with particular focus on the transition from the ACN–PCN method to the ACR–PCR method. The analysis is conducted through a comparative study of the main reference regulations issued by EASA and ICAO, in order to highlight similarities, differences, and evolutionary developments among the different methods.

The study is further supported by the analysis of case studies involving representative airports, used to assess the operational and design implications arising from the adoption of the new method and to highlight the main innovations in its implementation.

The results make it possible to identify the innovative elements introduced by the ACR–PCR method and to assess its positive impact on the management and design of airport infrastructure, providing indications on the elements introduced by the application of the new classification system.

Indice

Abstract	i
Abstract in lingua inglese	ii
Elenco delle figure	vi
Elenco delle tabelle	x
Glossario	xii
Introduzione	1
1 La Normativa	3
1.1 Introduzione	3
1.2 La Normativa di EASA	4
1.3 ICAO: L'ANNEX 14	7
1.3.1 Metodo ACN-PCN	7
1.3.2 Metodo ACR-PCR	10
1.3.3 Aeromobili con massa statica inferiore ai 5700 kg	12
1.3.4 Limitazioni operative per le operazioni in sovraccarico delle pavimentazioni aeroportuali	12
1.3.4.1 Limitazioni operative nel metodo ACN-PCN	12
1.3.4.2 Limitazioni operative nel metodo ACR-PCR	13
2 Lo stato dell'arte: i metodi ACN-PCN e ACR-PCR	15
2.1 Classificazione delle pavimentazioni aeroportuali	15
2.2 Criteri operativi del metodo ACN-PCN	17
2.2.1 Metodo di calcolo dell'ACN	18
2.2.2 Metodi di calcolo del PCN	31
2.2.2.1 Criterio tecnico di valutazione del PCN	32
2.2.2.2 Criterio dell'aeromobile utilizzato per la valutazione del PCN	36
2.3 Criteri operativi del metodo ACR-PCR	38

2.3.1	Metodi di calcolo dell'ACR	41
2.3.1.1	Configurazione dei carrelli degli aeromobili	48
2.3.2	Metodi di calcolo del PCR	61
2.3.2.1	Procedura tecnica di valutazione del PCR	64
2.3.2.2	Criterio dell'aeromobile utilizzato per la determinazione del PCR	66
2.3.3	Confronto tra i due metodi	68
2.4	Federal Aviation Administration	72
2.4.1	Advisory Circular 150/5335-5C	73
2.4.1.1	Aircraft Classification Number (ACN) secondo FAA	75
2.4.1.2	Pavement Classification Number (PCN) secondo FAA	75
2.4.1.3	Fattori di conversione per l'individuazione dello spessore equivalente della pavimentazione	78
2.4.1.4	Il software COMFAA	81
2.4.2	Advisory Circular 150/5335-5D	84
2.4.2.1	Aircraft Classification Rating (ACR) secondo FAA	86
2.4.2.2	Pavement Classification Rating (PCR) secondo FAA	87
2.4.2.3	Il software FAARFIELD	91
3	Applicazione pratica alle pavimentazioni aeroportuali	92
3.1	Procedura per la valutazione stratigrafica e meccanica degli strati della pavimentazione	92
3.1.1	Linee guida ENAC LG-2015/03-APT	93
3.1.1.1	Pavement Condition Index PCI	96
3.1.2	Caratteristiche stratigrafiche	103
3.1.3	Caratteristiche meccaniche	106
3.1.4	Zone di campionamento	109
3.2	Casi Studio	114
3.2.1	Hub con rilevanza intercontinentale	115
3.2.1.1	Caratteristiche geometriche e aeronautiche della pista di volo	115
3.2.1.2	Caratteristiche stratigrafiche e meccaniche	117
3.2.1.3	Risultati dei software	118
3.2.2	Hub con rilevanza internazionale	125
3.2.2.1	Aeroporto A con rilevanza internazionale	125
3.2.2.2	Aeroporto B con rilevanza internazionale	136
3.2.3	Hub con rilevanza nazionale	146
3.2.3.1	Aeroporto C con rilevanza nazionale	146
3.2.3.2	Aeroporto D con rilevanza nazionale	154

3.3	Considerazioni sui risultati ottenuti	160
3.3.1	Valori di PCR per aeroporti considerati	161
3.3.2	Curve di danno cumulato sulle pavimentazioni	165
3.3.3	Variazione stagionale dei PCR	167
3.3.4	Confronto tra i risultati ACN-PCN e ACR-PCR	168
4	Conclusioni	170
	Bibliografia e Sitografia	173

Elenco delle figure

1.1	Codice alfa-numerico pubblicato secondo il metodo ACN-PCN	8
1.2	Codice alfa-numerico pubblicato secondo il metodo ACR-PCR	10
2.1	Sezioni tipo delle pavimentazioni aeroportuali. Fonte:[7]	16
2.2	Flusso di definizione dell'ACN Fonte:[5]	19
2.3	Determinazione dell'ACR in funzione del DSWL	21
2.4	Tabelle dei valori ACN da norma per le diverse classi di resistenza del sottofondo e del tipo di pavimentazione Fonte: [5]	22
2.5	Tabelle dei valori ACN da norma per le diverse classi di resistenza del sottofondo e del tipo di pavimentazione Fonte: [5]	23
2.6	Tabelle dei valori ACN da norma per le diverse classi di resistenza del sottofondo e del tipo di pavimentazione Fonte: [5]	24
2.7	Tabelle dei valori ACN da norma per le diverse classi di resistenza del sottofondo e del tipo di pavimentazione Fonte: [5]	25
2.8	Tabelle dei valori ACN da norma per le diverse classi di resistenza del sottofondo e del tipo di pavimentazione Fonte:[5]	26
2.9	Tabelle dei valori ACN da norma per le diverse classi di resistenza del sottofondo e del tipo di pavimentazione Fonte: [5]	27
2.10	Tabelle dei valori ACN da norma per le diverse classi di resistenza del sottofondo e del tipo di pavimentazione Fonte: [5]	28
2.11	Sezioni standard per il calcolo dello spessore equivalente degli strati della pavimentazione Fonte: [5]	28
2.12	Individuazione grafica ACN per pavimentazioni rigide Fonte:[5]	29
2.13	Individuazione grafica ACN per pavimentazioni flessibili Fonte:[5]	30
2.14	Grafico del rapporto logaritmico tra cicli a rottura e misura di deflessione Fonte: [5]	35
2.15	Misura di deflessione in funzione dei punti di campionamento e relazione tra carico e deflessione Fonte: [5]	35
2.16	Determinazione grafica del CBR e del modulo K Fonte: [5]	37
2.17	Processo per la determinazione dell'ACR	41

2.18	Grafico della variazione dei pesi scaricati dal carrello principale per un A330-300 Fonte:[6]	42
2.19	Grafico della variazione dei pesi scaricati dal carrello principale per un B787-8 Fonte:[6]	43
2.20	Configurazione dell'aeromobile Fonte:[6]	45
2.21	Configurazione griglia per carrelli dual o dual tandem Fonte:[6]	46
2.22	Configurazione griglia per carrelli complessi Fonte:[6]	46
2.23	Grafici associati alla formulazione integrale della legge di danno Fonte:[6]	47
2.24	Configurazione dei carrelli secondo ICAO Fonte: [6]	49
2.25	Configurazione dei carrelli secondo FAA Fonte: [8]	50
2.26	Configurazione dei carrelli secondo FAA [8]	51
2.27	Configurazione dei carrelli secondo FAA [8]	52
2.28	Spaziatura delle ruote secondo ICAO Fonte:[6]	53
2.29	Configurazione del carrello D Fonte:[9]	53
2.30	Configurazione carrelli D su un aeromobile Fonte: [10]	54
2.31	Configurazione del carrello 2D Fonte:[9]	56
2.32	Configurazione carrelli 2D su un aeromobile Fonte:[11]	56
2.33	Configurazione carrelli 2S su un aeromobile Fonte:[12]	58
2.34	Configurazione carrelli 2D-D1 su un aeromobile A340-200 Fonte:[13]	59
2.35	Configurazione carrelli 2D-2D1 su un aeromobile A340-500 Fonte:Web	59
2.36	Configurazione carrelli 3D su un aeromobile Fonte: [14]	60
2.37	Configurazione carrelli 2D-D2 su un aeromobile Fonte:Web	61
2.38	Rappresentazione grafica presa da un webinar EASA per la determinazione delle deformazioni verticali Fonte:[15]	63
2.39	Rappresentazione grafica presa da un webinar EASA per la determinazione del CDF Fonte:[15]	63
2.40	Diagramma di flusso per la determinazione del PCR secondo ICAO Fonte:[6]	66
2.41	Coefficienti di conversione per spessore equivalente pavimentazioni flessibili Fonte:[16]	79
2.42	Grafici di conversione per spessore equivalente pavimentazioni rigide Fonte:[16]	80
2.43	Grafici di conversione per spessore equivalente pavimentazioni rigide Fonte:[16]	81
2.44	Diagramma di flusso per la determinazione del PCR secondo FAA Fonte:[17]	90
3.1	Quadro sinottico della frequenza temporale minima dei controlli delle caratteristiche delle pavimentazioni aeroportuali (air side) espressa in mesi ENAC Fonte: [18]	94

3.2	Pavement Condition Index suddiviso in classi Fonte:[20]	96
3.3	Scheda per l'analisi dei dissesti per le pavimentazioni flessibili Fonte:[19]	97
3.4	Curva di correzione del CDV per pavimentazioni flessibili Fonte:[19]	99
3.5	Scheda per l'analisi dei dissesti per le pavimentazioni rigide Fonte:[19]	101
3.6	Curva di correzione del CDV per pavimentazioni rigide Fonte:[19]	101
3.7	Ground Penetrating Radar Fonte:Web	105
3.8	Macchinario di prova per HWD Fonte:Web	106
3.9	Distanza sensori prova FWD Fonte: [20]	107
3.10	Configurazione prova per FWD Fonte: [20]	107
3.11	Zona di influenza delle deflessioni Fonte:[20]	109
3.12	Esempi di bacini di deflessione Fonte:[20]	109
3.13	Punti di misura della deflessione in funzione del tipo di pavimentazione Fonte: [18]	111
3.14	Punti di misura della deflessione lastre Fonte:[20]	112
3.15	Offset di misura della deflessione in caso di piste o taxiway Fonte: [20]	112
3.16	Offset di misura della deflessione in caso di aprons Fonte:[20]	113
3.17	Stratigrafia della pista di volo hub intercontinentale da FAARFIELD	118
3.18	ACR e partenze annuali della pista di volo hub intercontinentale da FAAR- FIELD	118
3.19	CDF della pista di volo hub intercontinentale da FAARFIELD	119
3.20	Grafico PCR della pista di volo hub intercontinentale da FAARFIELD	121
3.21	Grafico della variazione stagionale del valore di PCR ottenuti con FAAR- FIELD	122
3.22	Output del PCN del software COOMFAA	123
3.23	Output degli ACN del software COOMFAA	123
3.24	Confronto dei valori di ACN e PCN ottenuti con COMFAA	124
3.25	Grafico CDF aeroporto A ottenuto da FAARFIELD	127
3.26	Grafico PCR aeroporto A per la pista di volo ottenuto da FAARFIELD	128
3.27	ACR aeroporto A per la pista di volo ottenuto da FAARFIELD	129
3.28	Variazione stagionale dei PCR aeroporto A per la pista di volo	130
3.29	Grafico PCN aeroporto A per la pista di volo ottenuto da COMFAA	131
3.30	Grafico ACN aeroporto A per la pista di volo ottenuto da COMFAA	131
3.31	Grafico ACN aeroporto A per la pista di volo ottenuto da COMFAA	132
3.32	Grafico PCR aeroporto A per lo stand ottenuto da FAARFIELD	135
3.33	Grafico ACN & PCN aeroporto A per lo stand	135
3.34	Valore di PCN aeroporto A per lo stand ottenuto da COMFAA	136
3.35	Grafico PCR aeroporto B per la pista di volo ottenuto da FAARFIELD	139
3.36	Grafico CDF aeroporto B ottenuto da FAARFIELD	139
3.37	ACR aeroporto B per la pista di volo ottenuto da FAARFIELD	140

3.38	Variazione stagionale dei PCR aeroporto B per la pista di volo	141
3.39	Grafico PCN aeroporto B per la pista di volo ottenuto da COMFAA	142
3.40	Grafico ACN aeroporto B per la pista di volo ottenuto da COMFAA	142
3.41	Grafico ACN PCN aeroporto B per la pista di volo	143
3.42	Stratigrafia aeroporto C per la pista di volo ottenuta da FAARFIELD . .	147
3.43	Grafico PCR aeroporto C per la pista di volo ottenuto da FAARFIELD . .	149
3.44	Grafico CDF aeroporto C per la pista di volo ottenuto da FAARFIELD . .	150
3.45	ACR aeroporto C per la pista di volo ottenuti da FAARFIELD	150
3.46	Grafico PCR aeroporto C per la pista di volo ottenuto da FAARFIELD senza lo strato di fondazione	151
3.47	Variazione stagionale del PCR aeroporto C per la pista di volo	152
3.48	PCN aeroporto C per la pista di volo ottenuti da COMFAA	153
3.49	ACN aeroporto C per la pista di volo ottenuti da COMFAA	153
3.50	Confronto ACN e PCN aeroporto C per la pista di volo	154
3.51	Stratigrafia aeroporto D per la pista di volo ottenuta da FAARFIELD . . .	155
3.52	PCR aeroporto D per la pista di volo ottenuti da FAARFIELD	156
3.53	CDF aeroporto D per la pista di volo ottenuti da FAARFIELD	157
3.54	ACR aeroporto D per la pista di volo ottenuti da FAARFIELD	157
3.55	PCN aeroporto D per la pista di volo ottenuti da COMFAA	158
3.56	ACN aeroporto D per la pista di volo ottenuti da COMFAA	158
3.57	Confronto dei valori di ACN PCN per l'aeroporto D per la pista di volo . .	159
3.58	Confronto dei grafici di confronto tra PCR e ACR per le piste di volo analizzate	161
3.59	Confronto dei grafici di confronto tra PCR e ACR per lo stand dell'aero- porto A	162
3.60	Confronto dei grafici di confronto tra PCR e ACR per lo stand dell'aero- porto D	163
3.61	Confronto dei grafici di CDF per le piste di volo analizzate	165
3.62	Confronto delle variazioni stagionali di PCR nelle pavimentazioni flessibili .	167
3.63	Confronto dei grafici di confronto tra ACR-PCR e ACN-PCN per l'hub intercontinentale	168
3.64	Confronto dei grafici di confronto tra ACR-PCR e ACN-PCN per la pista dell'aeroporto A intercontinentale	169
3.65	Confronto dei grafici di confronto tra ACR-PCR e ACN-PCN per l'aero- porto B intercontinentale	169
3.66	Confronto dei grafici di confronto tra ACR-PCR e ACN-PCN per lo stand dell'aeroporto A intercontinentale	169

Elenco delle tabelle

2.1	Classificazione della resistenza del sottofondo per pavimentazioni aeroportuali	19
2.2	Caratteristiche del carrello di atterraggio – Configurazione D Fonte: [6]	54
2.3	Caratteristiche del carrello di atterraggio – Configurazione D [6]	55
2.4	Caratteristiche carrello - configurazione 2D [6]	57
2.5	Caratteristiche del carrello di atterraggio – Configurazione 2S [6]	57
2.6	Caratteristiche carrello - configurazione 2D/D1 e 2D/2D1 [6]	58
2.7	Caratteristiche carrello - configurazione 3D [6]	60
2.8	Caratteristiche carrello - configurazione 2D-D2 [6]	61
2.9	Confronto ACN–PCN vs ACR–PCR	68
2.10	Elementi del codice alfa-numerico	68
2.11	Classificazione del sottofondo nei sistemi ACN–PCN e ACR–PCR	68
2.12	Modellazione strutturale	69
2.13	Criteri di valutazione	69
2.14	Determinazione del numero di aeromobile (ACN vs ACR)	70
2.15	Determinazione PCN vs PCR con metodo operativo (U)	70
2.16	Valutazione tecnica (T): logica di calcolo e CDF	71
2.17	Limitazioni operative	71
3.1	Spettro di traffico e numero di passaggi per input FAARFIELD	116
3.2	Stratigrafia e corrispondenza materiali in FAARFIELD	117
3.3	Caratteristiche meccaniche dei materiali per la pavimentazione	117
3.4	Stratigrafia della pavimentazione	126
3.5	Spettro di traffico aeroporto A	126
3.6	Caratteristiche meccaniche dei materiali con variazioni stagionali	130
3.7	Parametri di sottofondo e moduli elastici per le taxiway	132
3.8	Taxiway A Aeroporto A	133
3.9	Taxiway B Aeroporto A	133
3.10	Taxiway C Aeroporto A	133
3.11	Taxiway E Aeroporto A	133
3.12	Taxiway F Aeroporto A	133
3.13	Taxiway G Aeroporto A	134

3.14	Stratigrafia pavimentazione rigida	134
3.15	Stratigrafia della pavimentazione Aeroporto B	137
3.16	Flotta aeromobili e input FAARFIELD Aeroporto B	138
3.17	Caratteristiche meccaniche dei materiali con variazioni stagionali	140
3.18	Stratigrafia Taxiway BC e materiali FAARFIELD	143
3.19	Taxiway BC Aeroporto B	144
3.20	Stratigrafia Taxiway A, B, C, D e G e materiali FAARFIELD	144
3.21	Taxiway A Aeroporto B	144
3.22	Taxiway B Aeroporto B	144
3.23	Taxiway C Aeroporto B	144
3.24	Taxiway D Aeroporto B	145
3.25	Taxiway G Aeroporto B	145
3.26	Stratigrafia Taxiway E, F e L e materiali FAARFIELD	145
3.27	Taxiway E Aeroporto B	145
3.28	Taxiway F Aeroporto B	145
3.29	Taxiway L Aeroporto B	146
3.30	Stratigrafia della pavimentazione Aeroporto B	147
3.31	Flotta aeromobili e input FAARFIELD Aeroporto C	148
3.32	Flotta aeromobili e input FAARFIELD	155

Glossario

- ENAC** Ente Nazionale per l'Aviazione Civile
- EASA** European Union Aviation Safety Agency
- ICAO** International Civil Aviation Organization
- FAA** Federal Aviation Administration
- AIP** Aeronautical Information Publications
- ACN** Aircraft Classification Number
- ACR** Aircraft Classification Rating
- PCN** Pavement Classification Number
- PCR** Pavement Classification Rating
- PCI** Pavement Condition Index
- CBR** California bearing ratio
- CDF** Cumulative damage factor
- E** Modulo elastico
- K** Modulo di reazione del sottofondo
- MAGW** Maximum allowable gross weight
- MPa** Megapascal
- ν Coefficiente di Poisson
- CG** Center of Gravity (Baricentro)
- Runway** Pista di volo
- Taxiway** Raccordi

Apron Piazzali di sosta

COMFAA Computer program to compute FAA pavement classification numbers

FAARFIELD FAA Rigid and Flexible Iterative Elastic Layer Design

DSWL Derived Single Wheel Load

LEA Layered Elastic Analysis

Massa massima statica Massa massima di rampa

Introduzione

La presente tesi nasce dall'esigenza di valutare la resistenza delle pavimentazioni aeroportuali e di confrontare i metodi di classificazione ACN-PCN e ACR-PCR. Questo comporta l'analisi delle pavimentazioni, dello spettro e del volume di traffico che interessa la pavimentazione, e non meno importanti, le caratteristiche stratigrafiche e meccaniche.

Per la valutazione della resistenza delle pavimentazioni aeroportuali, da dichiarare all'interno delle Aeronautical Information Publication (AIP – Pubblicazione di Informazioni Aeronautiche), è stato utilizzato per decenni il metodo ACN-PCN. Dal punto di vista operativo, tale dichiarazione della resistenza era, ed è tuttora, necessaria ai gestori aeroportuali e agli operatori aerei al fine di verificare la compatibilità tra le pavimentazioni delle infrastrutture di volo e gli aeromobili destinati ad operarvi, garantendo così lo svolgimento delle operazioni in condizioni di sicurezza. Il costante incremento del traffico aereo, stimato anche da Eurocontrol, agenzia europea per la gestione del traffico aereo, unitamente all'evoluzione della flotta mondiale, ha indotto il legislatore a introdurre un nuovo metodo, denominato ACR-PCR, che, pur mantenendo la finalità di rappresentare le caratteristiche di resistenza delle pavimentazioni, si differenzia dal precedente per il modello matematico adottato.

A fronte dell'introduzione del nuovo metodo, ufficialmente entrato in vigore il 28 novembre 2024 in sostituzione del precedente, si è riscontrato che nei manuali tecnici dei principali aeromobili commerciali i costruttori hanno pubblicato i valori di ACR relativi ai rispettivi velivoli, mentre dalla consultazione delle informazioni AIP relative agli aeroporti italiani emerge che, per le pavimentazioni, risultano ancora pubblicati i valori di PCN, in luogo dei valori di PCR previsti dal nuovo metodo. Pertanto, all'interno del presente elaborato saranno riportate, tra le altre, le analisi condotte su casi studio relativi ad aeroporti tipo, finalizzate all'individuazione dei valori di PCR, ai fini del confronto con i valori di PCN.

Considerando la continua crescita del traffico aereo che si sta registrando e l'evoluzione della tecnica di costruzione degli aeromobili, si osserva come aeroporti di medie dimensioni stiano progressivamente incrementando il traffico intercontinentale attraverso l'introduzione di aeromobili di maggiori dimensioni e, conseguentemente, più pesanti. In tale

contesto, appare lecito interrogarsi se le pavimentazioni attualmente esistenti siano in grado di sostenere la variazione dello spettro di traffico e se, dal punto di vista delle resistenze, possano sopportare le nuove condizioni di carico. Inoltre, risulta necessario comprendere come il metodo ACR-PCR possa intervenire in questo scenario e se saranno sufficienti interventi di manutenzione delle pavimentazioni esistenti o se si renderanno necessari interventi di riqualifica.

Questi interrogativi precedono la trattazione della presente tesi, che è composta dall'analisi iniziale nel Capitolo 1 delle normative di riferimento all'interno dell'ambito italiano con un'analisi dei livelli gerarchici delle normative trattate, ENAC Ente Nazionale Aviazione Civile, EASA standard europeo a cui l'Italia fa riferimento e ICAO organizzazione internazionale di cui l'Italia è stato membro. Nel Capitolo 2 vengono analizzati e confrontati nel dettaglio i metodi ACN-PCN e ACR-PCR secondo la normativa ICAO e successivamente tramite la normativa di FAA, standard americano, che è alla base dei software comunemente utilizzati nelle pratiche di progettazione e valutazione delle pavimentazioni. Analizzati nel dettaglio dal punto di vista tecnico i metodi, nel Capitolo 3 vengono presentati i casi studio su pavimentazioni di infrastrutture di volo di aeroporti tipo e nel Capitolo 4 le conclusioni che derivano dall'analisi.

Capitolo 1

La Normativa

1.1 Introduzione

Nel contesto dell'aviazione civile, il quadro normativo è strutturato secondo un sistema gerarchico multilivello, in cui gli standard e le raccomandazioni internazionali definiti dall'Organizzazione Internazionale dell'Aviazione Civile (ICAO) vengono recepiti a livello europeo dall'Agenzia dell'Unione Europea per la Sicurezza Aerea (EASA) e successivamente implementati a livello nazionale dagli enti di vigilanza competenti. In Italia tale funzione è svolta dall'Ente Nazionale per l'Aviazione Civile (ENAC) [1], responsabile della regolazione tecnica, certificazione e supervisione delle infrastrutture aeroportuali.

In Italia l'Ente Nazionale Aviazione Civile (ENAC) svolge il ruolo di autorità unica per la regolazione tecnica, la certificazione, la vigilanza e il controllo nel settore dell'aviazione civile, in conformità con poteri derivanti dal Codice della Navigazione. Istituito con il D.Lgs 25 Luglio 1997 n. 250, ENAC è sottoposto all'indirizzo, vigilanza e controllo del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, avendo acquisito i compiti precedentemente attribuiti alla Direzione Generale dell'Aviazione Civile del Ministero dei Trasporti, al Registro Aeronautico Italiano e all'Ente Nazionale Gente dell'Aria. Le sue funzioni sono l'approvazione dei progetti in ambito aeroportuale, il controllo della sicurezza e qualità dei servizi, la vigilanza dell'attuazione della normativa del settore, la regolazione economica e la tutela dell'ambiente.

A livello Europeo, invece, il quadro normativo europeo di riferimento è definito dal Regolamento (UE) 2018/1139, noto come Nuovo Regolamento Basico (New Basic Regulation), che ha sostituito il Regolamento (CE) 216/2008. Tale regolamento stabilisce norme comuni nel settore dell'aviazione civile, istituisce l'Agenzia dell'Unione Europea per la Sicurezza Aerea (EASA) e obbliga gli stati membri dell'Unione Europea, tra cui l'Italia [2], ad adottare regole comuni nel settore dell'aviazione civile aventi come scopo il raggiungimento di elevati livelli di sicurezza, compatibilità ambientale e il libero scambio di merci, prodotti

e servizi. Il Regolamento definisce gli obiettivi da perseguire e demanda alla Commissione Europea che le modalità attuative vengano dettagliate in regolamenti di secondo livello, definiti atti delegati o di esecuzione (“delegated acts” o “implementing acts”). In ambito aeroportuale, la normativa europea di riferimento è “*Certification Specifications and Guidance Material for Aerodrome Design (CS-ADR-DSN) issue 7*”, ultima revisione presentata da EASA utilizzata nella presente tesi, necessaria per garantire la conformità agli standard europei di sicurezza.

L’area Airside di un aeroporto comprende le piste di volo (runway), le vie di rullaggio o di raccordo (taxiway) e i piazzali (apron). Tali superfici sono pavimentate, progettate con caratteristiche tecniche dal punto di vista geometrico, funzionale, come le caratteristiche di aderenza, e dal punto di vista meccanico; inoltre, devono essere progettate e realizzate in funzione del traffico presente o previsto, garantendo la sicurezza delle operazioni di movimento a terra. La normativa EASA definisce le caratteristiche geometriche, quali la lunghezza e la larghezza delle pavimentazioni in funzione della tipologia di aeromobili che vi possono operare e afferma che devono essere rispettate le caratteristiche funzionali, come ad esempio l’aderenza, mentre per quanto riguarda le caratteristiche meccaniche si rimanda alla normativa di ICAO.

A partire dalle caratteristiche geometriche, funzionali e meccaniche di progetto delle pavimentazioni, è necessario stabilire quali aeromobili possono operare su ciascuna di esse senza compromettere l’integrità strutturale dell’aeromobile o della pavimentazione stessa. La valutazione della resistenza delle pavimentazioni rappresenta quindi un passaggio fondamentale sia in fase di progettazione, sia in fase di gestione e manutenzione dell’infrastruttura.

1.2 La Normativa di EASA

In ambito europeo, la valutazione della resistenza delle pavimentazioni airside fa riferimento alle EASA Certification Specifications Issue 7 [3], le quali forniscono requisiti tecnici e linee guida necessari per garantire la conformità in materia di progettazione e resistenza delle superfici pavimentate.

Per la resistenza della pista, la §CS ADR-DSN.B.085 definisce che:

“The runway should be of sufficient strength to support normal operations of the most demanding aircraft without risk of damage either to the aeroplane or the runway.”

In termini operativi, ciò significa che la pista deve avere una resistenza adeguata a sopportare le operazioni normali dell’aeromobile più gravoso previsto sulla pista senza che si verifichino danni né alla pavimentazione né agli aeromobili. La normativa è carente sulla

definizione di operazioni normali, perchè queste potrebbero riferirsi sia alle operazioni che di consueto interessano la pavimentazione analizzata in funzione dello spettro di traffico e del volume di traffico operativo, sia alle operazioni che non eccedono la resistenza della pavimentazione.

Ulteriori indicazioni tecniche sono riportate nel Guidance Material §GM1 ADR-DSN.B.085, che rinvia al documento ICAO Doc 9157, *Aerodrome Design Manual, Part 3, Pavements*, testo di riferimento internazionale per la progettazione e la valutazione delle pavimentazioni aeroportuali che verrà trattato nel capitolo successivo.

Definiti i requisiti tecnici di resistenza della pista è necessario estendere l'analisi alle superfici pavimentate delle taxiway, che costituiscono l'infrastruttura di collegamento tra pista, piazzali e hangar e sono soggette a un traffico più frequente e a sollecitazioni differenti dovute alle basse velocità di attraversamento e ai carichi statici.

La §CS ADR-DSN.D.285 definisce che: “ *The strength of a taxiway should be suitable for the aircraft that the taxiway is intended to serve.*”

La resistenza di una taxiway deve essere adeguata agli aeromobili che essa è destinata a servire, ovvero la superficie pavimentata deve resistere ai carichi che la interessano.

Il Guidance Material §GM1 ADR-DSN.D.285 definisce ulteriori elementi riguardanti le condizioni di sollecitazione delle taxiway, evidenziando che sono generalmente sottoposte a condizioni di sollecitazione più gravose rispetto alla pista, dovute sia alla maggiore densità di traffico sia alla presenza di aeromobili che si muovono a basse velocità o che stazionano durante le operazioni di rullaggio, con conseguenti carichi statici più elevati e localizzati sulla pavimentazione. Nella pratica però le taxiway di accesso a una pista possono essere diverse, quindi la densità di traffico presente dovrebbe essere al massimo uguale al traffico che interessa la pista, mentre dal punto di vista delle sollecitazioni, i carichi statici, derivanti dallo stazionamento dell'aeromobile durante le operazioni di rullaggio, si possono definire maggiori poichè il peso che grava sulla pavimentazione è l'intero peso dell'aeromobile. Viene inoltre specificato che il metodo per dichiarare la resistenza delle pavimentazioni aeroportuali è definito nella “PARTE ADR.OPS del Regolamento (UE) n. 139/2014, che stabilisce le modalità operative di classificazione della resistenza. Come per la pista, per gli aspetti tecnici relativi alla progettazione, alla valutazione e alla determinazione della resistenza , il riferimento è il documento ICAO Doc 9157, *Aerodrome Design Manual, Part 3, Pavements*.

L'analisi delle superfici pavimentate deve estendersi necessariamente anche ai piazzali (aprons), che rappresentano le aree operative destinate alla sosta, movimentazione e as-

sistenza degli aeromobili. Queste superfici sono soggette a condizioni di carico statico particolarmente severe, in quanto sono caratterizzate da traffico lento, soste prolungate, operazioni di rifornimento e di prevenzione e rimozione del ghiaccio.

La *CS ADR-DSN.E.355* stabilisce che: “ *Each part of an apron should be capable of withstanding the traffic of the aircraft it is intended to serve, due consideration being given to the fact that some portions of the apron should be subjected to a higher density of traffic and, as a result of slow moving or stationary aircraft, to higher stresses than a runway.*”

La norma evidenzia che ogni parte del piazzale debba possedere una resistenza adeguata agli aeromobili che è destinato a servire, mettendo in evidenza che alcune porzioni del piazzale possono essere soggette a una densità di traffico superiore a quella della pista, dovuta ai tempi di stazionamento maggiori e, pertanto, a sollecitazioni più elevate.

Il §*GM1 ADR-DSN.E.355* evidenzia che le pavimentazioni dei piazzali sono soggette a condizioni particolarmente gravose, sia per la presenza di aeromobili in sosta, sia per le operazioni di rifornimento di carburante. Le superfici in conglomerato bituminoso solitamente utilizzate sulle piste e sulle taxiway risultano sensibili all'azione del carburante, che può provocare fenomeni di disgregazione del legante con conseguente perdita di integrità superficiale ma anche causare danni ambientali quando il carburante percola nel terreno sottostante. Se sono presenti pavimentazioni in conglomerato bituminoso, il GM prevede l'adozione di specifiche misure di protezione come rivestimenti superficiali resistenti agli idrocarburi o additivi incorporati nella miscela. A causa della combinazione di carichi statici elevati ed esposizione ai carburanti, i piazzali sono tendenzialmente realizzati con pavimentazioni in calcestruzzo. Ulteriore attenzione è necessaria per la protezione dei giunti tra le lastre, anch'essi suscettibili all'azione del carburante, per i quali devono essere impiegati materiali sigillanti specifici.

Come per la pista e per le taxiway, il GM precisa che il metodo di dichiarazione della resistenza è definito nella Parte ADR.OPS del Regolamento (UE) n. 139/2014, mentre gli aspetti tecnici relativi alla progettazione, al dimensionamento e alla valutazione delle pavimentazioni sono trattati nel documento *ICAO Doc 9157 – Aerodrome Design Manual, Part 3 – Pavements*.

Le Certification Specifications definiscono i requisiti prestazionali minimi che le pavimentazioni aeroportuali devono soddisfare, ma non stabiliscono il metodo con cui la resistenza della pavimentazione deve essere valutata. *ICAO* ha definito la direttiva per la valutazione delle pavimentazioni, introducendo nel 1983, con la seconda edizione dell'*Aerodrome Design Manual – Part 3*, il sistema *ACN/PCN (Aircraft Classification Number/Pavement Classification Number)*.

A seguito dell'evoluzione dei criteri di progettazione, dei modelli strutturali e delle esigenze operative degli aeroporti, ICAO ha sviluppato un nuovo sistema standard, denominato *ACR/PCR (Aircraft Classification Rating/Pavement Classification Rating)*, pubblicato nell'edizione 2022 dell'*Aerodrome Design Manual – Part 3*. Il nuovo metodo ha sostituito l'ACN-PCN e rappresenta l'attuale standard internazionale per la valutazione e la dichiarazione della resistenza delle pavimentazioni aeroportuali.

1.3 ICAO: L'ANNEX 14

Prima di procedere all'analisi dei documenti ICAO di carattere tecnico relativi alla valutazione della resistenza delle pavimentazioni aeroportuali, risulta necessario introdurre l'ICAO Annex 14 – Aerodromes [4], che rappresenta il riferimento normativo primario per la progettazione, la realizzazione e la certificazione degli aerodromi poichè la normativa di EASA non presenta nessuna specifica su come debba essere valutata la resistenza della pavimentazione.

L'*Annex 14* definisce le caratteristiche generali delle infrastrutture aeroportuali e stabilisce il quadro normativo entro il quale devono essere applicati i criteri e i metodi di valutazione della resistenza delle pavimentazioni. Tale inquadramento normativo precede l'analisi dei documenti di supporto successivi, tra cui il *Doc 9157 – Aerodrome Design Manual Part 3*, di carattere tecnico-operativo.

Nel documento di *ICAO ANNEX 14- VOLUME I* viene definito che la resistenza di una pavimentazione deve essere determinata tramite metodi standardizzati e vengono definiti i due orizzonti temporali dell'utilizzo dei metodi per la valutazione della resistenza delle pavimentazioni: il metodo ACN-PCN in uso fino al 27 novembre 2024 e il metodo ACR-PCR da utilizzare dal 28 novembre 2024.

1.3.1 Metodo ACN-PCN

Il metodo ACN-PCN veniva utilizzato per esprimere la resistenza di una pavimentazione per gli aeromobili che presentavano una massa statica superiore ai 5700 kg e per esprimere la resistenza tramite “aircraft classification number (ACN) - pavement classification number (PCN)”, concetti che verranno in seguito trattati, riportando un codice alfanumerico costituito da cinque componenti:

1. PCN
2. Tipo di pavimentazione (rigida o flessibile)
3. Classe di resistenza del sottofondo

4. Massima categoria di pressione degli pneumatici ammessa o massimo valore di pressione degli pneumatici ammesso
5. Criterio di valutazione della pavimentazione

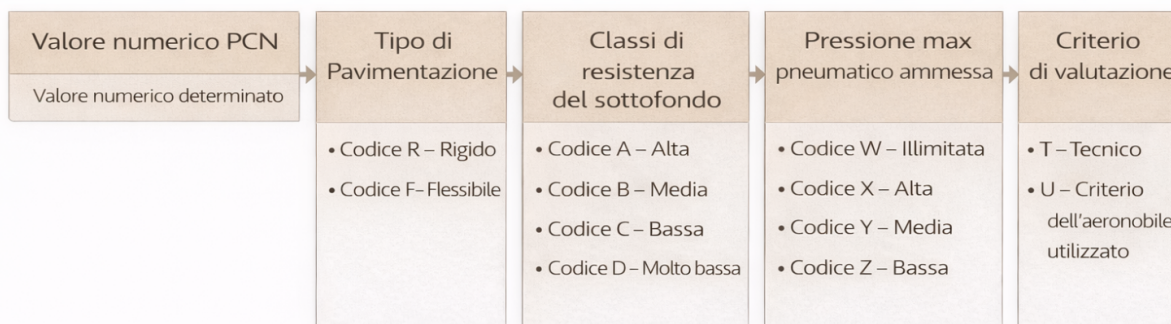


Figura 1.1: Codice alfa-numerico pubblicato secondo il metodo ACN-PCN

Il *Pavement Classification Number (PCN)* riportato indicava il valore di resistenza definito per la pavimentazione in esame e, preso in considerazione un aeromobile definito dal suo *Aircraft Classification Number (ACN)*, se l'ACN dell'aeromobile risultava minore o uguale al PCN riportato per la pavimentazione, allora l'aeromobile poteva operare sulla pavimentazione senza alcun tipo di limitazione per quanto riguarda la pressione di gonfiaggio degli pneumatici o la massa totale dell'aeromobile in analisi. L'ACN di un aeromobile doveva però essere determinato secondo le procedure standard specificate in un'apposita nota riferite al documento tecnico di ICAO “ *The standard procedures for determining the ACN of an aircraft are given in the Aerodrome Design Manual (Doc 9157), Part 3.[5]*”

L'*Annex 14 di ICAO*, in un apposita nota, definisce che la resistenza delle pavimentazioni aeroportuali può variare in funzione delle condizioni stagionali. In particolare, viene esplicitamente indicato che “*Different PCNs may be reported if the strength of the pavement is subject to significant seasonal variation*”. Qualora siano presenti variazioni stagionali significative è possibile pubblicare valori della resistenza della pavimentazione diversi, ma la norma non definisce cosa si intenda per significativa variazione stagionale, perchè potrebbe riferirsi sia a una variazione stagionale dello spettro di traffico sia alla variazione dovuta alla temperatura di analisi dei parametri meccanici delle pavimentazioni.

La pubblicazione della resistenza di una pavimentazione avviene con un codice alfa-numerico composto da cinque voci che il metodo ACN-PCN definisce nel seguente modo:

1. Il Pavement classification number (PCN) che verrà trattato in capitoli successivi;

2. Tipo di pavimentazione

- Pavimentazione rigida R
- Pavimentazione flessibile F

3. Classi di resistenza del sottofondo in funzione della tipologia di pavimentazione:

- Pavimentazioni Rigide:

- A- Classe di resistenza Alta $K \geq 120$ MN/m³
- B- Classe di resistenza Media $60 \leq K < 120$ MN/m³
- C- Classe di resistenza Bassa $25 \leq K < 60$ MN/m³
- D- Classe di resistenza Molto bassa $K < 25$ MN/m³

- Pavimentazioni flessibili:

- A- Classe di resistenza Alta $CBR \geq 13$
- B- Classe di resistenza Media $8 \leq CBR < 13$
- C- Classe di resistenza Bassa $4 \leq CBR < 8$
- D- Classe di resistenza Molto bassa $CBR < 4$

4. Categoria massima di pressione degli pneumatici:

- W- categoria illimitata, nessun limite di pressione
- X- categoria alta, limite di pressione a 1,75 MPa
- Y- categoria media, limite di pressione a 1,25 MPa
- Z- categoria bassa, limite di pressione a 0,50 MPa

5. Criterio di valutazione:

- T- Criterio tecnico di valutazione che rappresenta uno studio tecnico delle caratteristiche della pavimentazione e l'utilizzo di tecnologie specifiche per ottenere i valori
- U- Criterio dell'aeromobile utilizzato che definisce la necessità di conoscere le caratteristiche specifiche e la massa di un aeromobile in analisi di consueto utilizzato sulla pavimentazione stessa

1.3.2 Metodo ACR-PCR

Il metodo ACR-PCR, che sostituisce il precedente viene utilizzato anch'esso per esprimere la resistenza di una pavimentazione utilizzata da aeromobili con massa statica superiore ai 5700 kg. Per esprimere la resistenza si introducono due nuovi concetti “*Aircraft Classification Rating ACR-Pavement Classification Rating PCR*”, che verranno trattati in seguito, la pubblicazione della resistenza avviene nel medesimo modo del metodo precedente, riportando un codice alfa-numerico costituito da cinque componenti:

1. PCR
2. Tipo di pavimentazione (rigida o flessibile)
3. Classe di resistenza del sottofondo
4. Massima categoria di pressione degli pneumatici ammessa o massimo valore di pressione degli pneumatici ammesso
5. Criterio di valutazione della pavimentazione

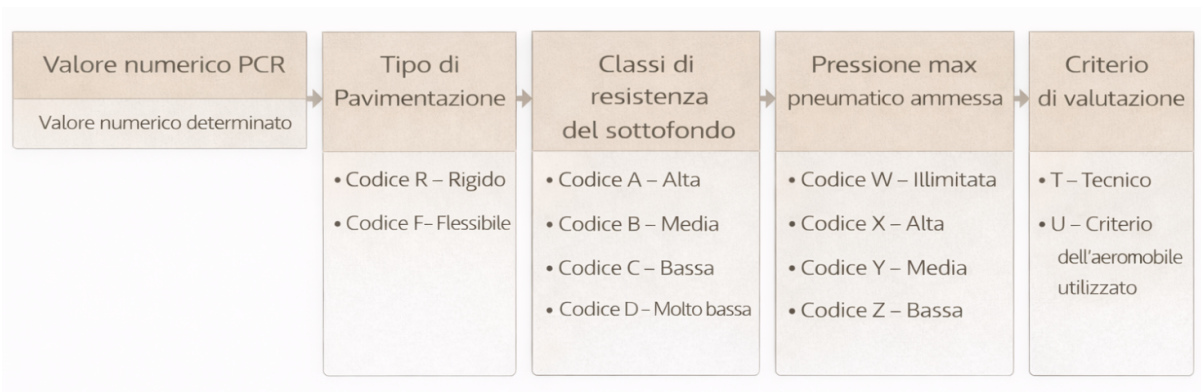


Figura 1.2: Codice alfa-numerico pubblicato secondo il metodo ACR-PCR

Il *Pavement Classification Rating (PCR)* definisce la resistenza della pavimentazione, come avveniva nel metodo precedente, prevede che, preso in considerazione un aeromobile definito dal suo ACR minore o uguale al PCR riportato per la pavimentazione, possa operare sulla pavimentazione senza nessuna limitazione per quanto riguarda la pressione di gonfiaggio degli pneumatici o la massa totale dell'aeromobile in analisi. L'ACR *Aircraft Classification Rating* di un aeromobile deve essere determinato secondo le procedure standard specificate da un'apposita nota “ *The standard procedures for determining the ACR of an aircraft are given in the Aerodrome Design Manual (Doc 9157), Part 3. [6]*”

Nel sistema ACR-PCR, qualora la pavimentazione risulti soggetta a variazioni stagionali significative, è ammessa la possibilità di riportare valori differenti di PCR. In tal senso,

viene specificato in un'apposita nota che *“Different PCR's may be reported if the strength of the pavement is subject to significant seasonal variation”*. Come avveniva per il metodo precedente, si fa riferimento a variazioni stagionali significative, senza però spiegarne il significato e nonostante l'introduzione del nuovo metodo questo interrogativo rimane aperto.

Per le pavimentazioni secondo il metodo ACR-PCR sono definiti i codici per ogni voce:

1. Il Pavement classification rating (PCR) che verrà trattato in capitoli successivi;
2. Tipo di pavimentazione
 - Pavimentazione rigida R
 - Pavimentazione flessibile F
3. Classi di resistenza del sottofondo uniche per pavimentazioni Rigide e Flessibili:
 - A- Classe di resistenza Alta $E \geq 150$ MPa
 - B- Classe di resistenza Media $100 \leq E < 150$ MPa
 - C- Classe di resistenza Bassa $60 \leq E < 100$ MPa
 - D- Classe di resistenza Molto bassa $E < 60$ MPa
4. Categoria massima di pressione degli pneumatici:
 - W- categoria illimitata, nessun limite di pressione
 - X- categoria alta, limite di pressione a 1,75 MPa
 - Y- categoria media, limite di pressione a 1,25 MPa
 - Z- categoria bassa, limite di pressione a 0,50 MPa
5. Criterio di valutazione:
 - T- Criterio tecnico di valutazione che rappresenta uno studio tecnico delle caratteristiche della pavimentazione e l'utilizzo di tecnologie specifiche per ottenere i valori - T;
 - U- Criterio dell'aeromobile utilizzato che definisce la necessità di conoscere le caratteristiche specifiche e la massa di un aeromobile in analisi di consueto utilizzato sulla pavimentazione stessa.

1.3.3 Aeromobili con massa statica inferiore ai 5700 kg

Entrambi i metodi introdotti parlano di pavimentazioni interessate da aeromobili con massa statica superiore ai 5700 kg, sia il metodo ACN-PCN che il metodo ACR-PCR per pavimentazioni interessate da aeromobili con massa statica inferiore ai 5700kg, non è prevista la classificazione della resistenza tramite codice alfanumerico, ma solo riportando due informazioni: la massa massima ammissibile per l'aeromobile e il massimo valore di pressione degli pneumatici.

1.3.4 Limitazioni operative per le operazioni in sovraccarico delle pavimentazioni aeroportuali

Le operazioni in sovraccarico nei sistemi ACN-PCN e ACR-PCR rappresentano le condizioni in cui un aeromobile opera su una pavimentazione aeroportuale con una richiesta di resistenza superiore a quella dichiarata. In entrambi i metodi, il confronto tra il parametro associato all'aeromobile (ACN o ACR) e quello della pavimentazione (PCN o PCR) consente di valutare la compatibilità strutturale, quando il valore dell'aeromobile supera quello della pavimentazione, si verifica una condizione di sovraccarico che può essere ammessa solo entro limiti operativi definiti. Tali operazioni sono generalmente consentite in modo occasionale o controllato, poiché possono comportare un incremento del danneggiamento della pavimentazione e una possibile riduzione della vita utile, richiedendo quindi valutazioni tecniche specifiche e restrizioni operative per garantire la sicurezza dell'infrastruttura.

In entrambi i metodi operazioni in sovraccarico non dovrebbero essere normalmente consentite su pavimentazioni che presentano segni di ammaloramento o di cedimento strutturale. Qualora vengano autorizzate operazioni in sovraccarico entro i limiti indicati, il Gestore Aeroportuale è tenuto a effettuare un monitoraggio periodico delle condizioni della pavimentazione e a riesaminare regolarmente i criteri adottati, poiché un'eccessiva ripetizione dei sovraccarichi può determinare una significativa riduzione della vita utile residua o rendere necessari interventi di riabilitazione strutturale di grande entità.

Come si vedrà nei paragrafi successivi, entrambi i metodi presentano limiti percentuali dell'utilizzo delle pavimentazioni in sovraccarico in funzione del traffico totale previsto sulla pavimentazione analizzata.

1.3.4.1 Limitazioni operative nel metodo ACN-PCN

Le operazioni in sovraccarico sulle pavimentazioni aeroportuali erano ammissibili esclusivamente entro limiti operativi definiti, finalizzati a contenere la riduzione della vita utile strutturale e a prevenire fenomeni di degrado accelerato. In assenza di un'analisi struttu-

rile dettagliata, la normativa ICAO individuava specifici valori in termini di rapporto tra Aircraft Classification Number (ACN) dell'aeromobile e Pavement Classification Number (PCN) dichiarato per la pavimentazione, nonché limiti alla frequenza totale dei movimenti in sovraccarico.

La normativa individuava i seguenti limiti in funzione del sovraccarico ammissibile:

- Per pavimentazioni flessibili, erano ammessi movimenti occasionali di aeromobili con $ACN \leq PCN + 10\% \cdot PCN$;
- Per pavimentazioni rigide o composite, nelle quali uno strato rigido costituisce l'elemento strutturale primario, erano ammessi movimenti occasionali di aeromobili con $ACN \leq PCN + 5\% \cdot PCN$;
- Nel caso in cui la struttura della pavimentazione non fosse nota, si applicava in via cautelativa il limite più restrittivo pari a $ACN \leq PCN + 5\% \cdot PCN$.

Dal punto di vista della ripetizione dei carichi, la normativa stabiliva inoltre che doveva esserci una limitazione anche sulla frequenza annua dei movimenti in sovraccarico, il numero annuo di movimenti in sovraccarico non doveva superare il 5% del totale dei movimenti annui degli aeromobili.

1.3.4.2 Limitazioni operative nel metodo ACR-PCR

In analogia a quanto previsto nel metodo ACN-PCN, il comportamento strutturale delle pavimentazioni non è caratterizzato, salvo casi di sovraccarico eccessivo, da un carico limite oltre il quale si verifica un collasso improvviso, ma da un meccanismo di danneggiamento progressivo legato alla fatica cumulata. Di conseguenza, un sovraccarico occasionale e di modesta entità può essere ammesso, quando giustificato da esigenze operative, con una possibile riduzione limitata della vita utile della pavimentazione.

In assenza di un'analisi strutturale dettagliata, la normativa ICAO relativa al metodo ACR-PCR stabilisce specifiche limitazioni operative, espresse in termini di rapporto tra Aircraft Classification Rating (ACR) dell'aeromobile e Pavement Classification Rating (PCR) dichiarato della pavimentazione, nonché in termini di frequenza dei movimenti in sovraccarico. In particolare:

- Per pavimentazioni flessibili e rigide, sono ammessi movimenti occasionali di aeromobili con $ACR \leq PCR + 10\% \cdot PCR$, senza che ciò comporti effetti negativi significativi sulla pavimentazione;
- Il numero annuo di movimenti in sovraccarico non deve superare approssimativamente il 5% del totale dei movimenti annui, escludendo gli aeromobili leggeri.

Con l'introduzione del nuovo metodo rimane immutato il limite secondo cui il numero totale di operazioni in sovraccarico deve essere inferiore al 5% del totale dei movimenti annui che interessano la pavimentazione, mentre a prescindere dal tipo di pavimentazione non c'è più distinzione nel limite del confronto tra ACR e PCR, che diventa per qualsiasi pavimentazione $ACR \leq PCR + 10\% \cdot PCR$. La normativa però non presenta spiegazioni del perché il limite del confronto, con l'introduzione del nuovo metodo, viene generalizzato per tutti i tipi di pavimentazione.

L'analisi delle limitazioni operative in condizioni di sovraccarico, così come definite da *ICAO nell'Annex 14* evidenzia come la compatibilità tra aeromobile e pavimentazione costituisca un requisito fondamentale per garantire la sicurezza e la durabilità delle infrastrutture aeroportuali. Tuttavia, tali documenti definiscono principalmente il quadro regolamentare e operativo entro cui devono essere gestite le operazioni eccedenti la resistenza dichiarata, senza entrare nel dettaglio delle procedure di valutazione della resistenza delle pavimentazioni. Per comprendere i criteri tecnici e le metodologie di determinazione della resistenza, è necessario fare riferimento al *ICAO Doc 9157 – Aerodrome Design Manual Part 3*, che fornisce le basi teoriche e applicative dei metodi ACN-PCN e ACR-PCR. Nel capitolo seguente si analizzano pertanto tali procedure, entrando nel merito dei modelli di calcolo e dei parametri che governano la valutazione strutturale delle pavimentazioni aeroportuali.

Capitolo 2

Lo stato dell'arte: i metodi ACN-PCN e ACR-PCR

2.1 Classificazione delle pavimentazioni aeroportuali

Prima di analizzare i metodi dal punto di vista tecnico, per capire come avviene la valutazione della resistenza delle pavimentazioni, bisogna analizzare come queste siano caratterizzate per comprendere la risposta strutturale in base alla loro tipologia. La normativa *ICAO DOC 9157, Part 3* classifica le pavimentazioni aeroportuali come rigide o flessibili in funzione della loro configurazione strutturale e in base a come i carichi applicati vengono trasmessi al sottofondo. Tale distinzione costituisce il riferimento comune sia del metodo ACN-PCN (Aircraft Classification Number – Pavement Classification Number) sia del metodo ACR-PCR (Aircraft Classification Rating – Pavement Classification Rating) per la valutazione e la dichiarazione della resistenza delle pavimentazioni aeroportuali.

La normativa definisce quindi che una pavimentazione rigida è costituita da una lastra in calcestruzzo cementizio (Portland Cement Concrete – PCC), semplice o armata, appoggiata direttamente sul sottofondo o su uno strato di fondazione granulare. Sotto l'azione dei carichi applicati, la pavimentazione rigida si comporta come una piastra, distribuendo i carichi verso il sottofondo mediante azione flessionale. La resistenza della pavimentazione rigida dipende dallo spessore e dalle caratteristiche meccaniche della lastra in calcestruzzo, nonché dalle condizioni di supporto fornite dagli strati sottostanti e dalla resistenza del sottofondo. Generalmente a causa delle condizioni gravose, come abbiamo visto nel paragrafo introduttivo, i piazzali sono caratterizzati da pavimentazioni rigide, ovvero di lastre in calcestruzzo poggiate su una fondazione che a sua volta poggia sul sottofondo, per la presenza di traffico statico dovuto allo stazionamento degli aeromobili e alle operazioni di rifornimento.

Una pavimentazione flessibile è costituita da una successione di strati sovrapposti; par-

tendo dal basso verso l'alto, troviamo sottofondo, sottobase o strato di fondazione, base, binder e strato di usura. In questo tipo di pavimentazione il carico applicato viene trasmesso progressivamente attraverso gli strati, con un cono di diffusione verso il basso. La prestazione strutturale della pavimentazione flessibile dipende dagli spessori e dalle caratteristiche meccaniche dei singoli strati, che devono garantire che le pressioni trasmesse al sottofondo siano compatibili con la sua resistenza caratteristica.

La normativa ICAO non presenta sezioni tipo delle pavimentazioni fin qui presentate, la norma però cita in parti successive un documento del *FAA Airport Pavement Design and Evaluation AC 150/5320-6G* [7] in cui è possibile individuare le sezioni delle due tipologie di pavimentazioni che vengono riportate in seguito.

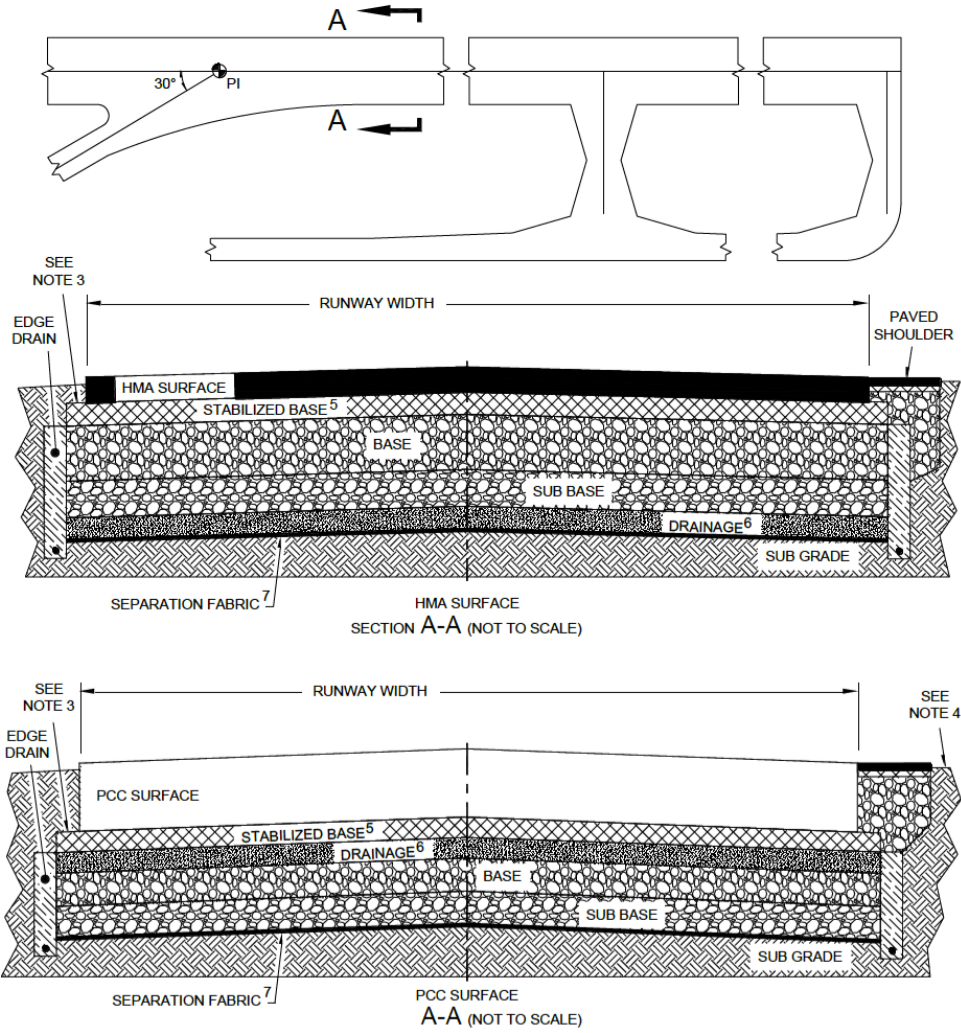


Figura 2.1: Sezioni tipo delle pavimentazioni aeroportuali. Fonte:[7]

In entrambi i casi, la resistenza della pavimentazione è influenzata dalle caratteristiche del carico applicato, dovuto al peso dell'aeromobile, alla configurazione del carrello, al numero e alla spaziatura delle ruote e alla pressione di gonfiaggio degli pneumatici. Nel metodo ACN-PCN, tuttavia, tali effetti non vengono valutati mediante un'analisi diretta del comportamento strutturale della pavimentazione esistente, ma sono rappresentati attraverso l'impiego di pavimentazioni di riferimento standardizzate e di categorie di resistenza del sottofondo, consentendo un confronto diretto tra il valore ACN dell'aeromobile e il valore PCN dichiarato per la pavimentazione. Il metodo ACR-PCR, pur mantenendo la distinzione tra pavimentazioni rigide e flessibili, si basa invece su una valutazione diretta della risposta strutturale della pavimentazione tramite un'analisi elastica multistrato in funzione delle caratteristiche reali dei carichi applicati sulla pavimentazione e sul sottofondo.

2.2 Criteri operativi del metodo ACN-PCN

La distinzione tra pavimentazioni flessibili e rigide non rappresenta soltanto una classificazione costruttiva, ma costituisce il presupposto fondamentale per la valutazione della resistenza delle pavimentazioni aeroportuali. Il diverso comportamento strutturale delle due tipologie nei confronti dei carichi applicati alle pavimentazioni viene infatti recepito nei metodi internazionali di classificazione della resistenza delle pavimentazioni, che adottano criteri e procedure di valutazione differenziati. In questo contesto si inseriva il metodo ACN-PCN, che forniva un approccio standardizzato per la determinazione e la pubblicazione della resistenza delle pavimentazioni aeroportuali.

Il documento *ICAO 9157 parte 3* [5] si riferisce in particolare ai criteri di design e di valutazione da utilizzare per le pavimentazioni. Il metodo ACN-PCN viene presentato con la seconda edizione del documento nel 1983. Innanzitutto, nel documento si fa riferimento all'*Annex 14* di ICAO e vengono presentate le stesse informazioni per individuare il codice alfanumerico che sono state presentate nel capitolo 2; inoltre, vengono definite le procedure per la valutazione della resistenza della pavimentazione.

Come precedentemente citato nell'*Annex 14*, la procedura del metodo fa riferimento a pavimentazioni utilizzate da aeromobili con massa statica superiore a 5700 kg. Il metodo ACN-PCN si basa sulla definizione di due concetti:

1. *“ACN: A number expressing the relative effect of an aircraft on a pavement for a specified standard subgrade strength”*
2. *“PCN: A number expressing the bearing strength of a pavement for unrestricted operations”*

Il primo indica che ogni aeromobile viene identificato da un numero che esprime l'effetto che questo aeromobile provoca sulla pavimentazione in funzione della classe di resistenza del sottofondo, standardizzata in 4 categorie specifiche come precedentemente riportato. Il secondo è un numero che esprime la resistenza della pavimentazione in esame per operazioni senza restrizioni. La norma non definisce cosa si intende con "operazioni senza restrizioni" questo potrebbe riferirsi sia al fatto che le operazioni siano infinite come numero, sia che in funzione dello spettro di traffico operativo sulla pavimentazione, non ci siano restrizioni sulle operazioni in sovraccarico degli aeromobili che possono operare.

La procedura presentata non è un metodo utilizzato per il design o la valutazione della pavimentazione, ma bensì un metodo utilizzato per la pubblicazione della resistenza della pavimentazione negli "Aeronautical Information Publications AIPs". È quindi un metodo operativo da utilizzare per verificare se un aeromobile può operare sulla pavimentazione o meno, la valutazione si basa sull'analisi dei pesi ammessi sulla pavimentazione, tramite il confronto con l'ACN proprio dell'aeromobile e il valore di resistenza PCN dichiarato per la pavimentazione in esame.

Il metodo definisce che: " *The PCN so reported would indicate that an aircraft with an ACN equal or less than that figure can operate on the pavement subject to any limitation on the tire pressure.*" Il metodo può essere definito quindi dalla seguente equazione:

$$ACN \leq PCN \quad (2.1)$$

Numericamente ACN e PCN utilizzano la stessa scala per la dichiarazione della resistenza espressa in migliaia di kg, la scala è continua, parte da 0 e non presenta massimi.

2.2.1 Metodo di calcolo dell'ACN

Definito il funzionamento generale del metodo ACN-PCN, risulta necessario analizzare le modalità con cui viene determinato il parametro ACN, che rappresenta l'effetto del carico dell'aeromobile sulla pavimentazione. Il *DOC ICAO 9157 edizione del 1983* introduce un processo di flusso, che viene riportato in seguito, per la determinazione dell'*Aircraft Classification Number (ACN)* che, a partire dalle caratteristiche geometriche e di carico dell'aeromobile, in funzione del tipo di pavimentazione su cui opera l'aeromobile e della categoria di sottofondo su cui poggia la pavimentazione, porta alla determinazione dell'ACN proprio dell'aeromobile.

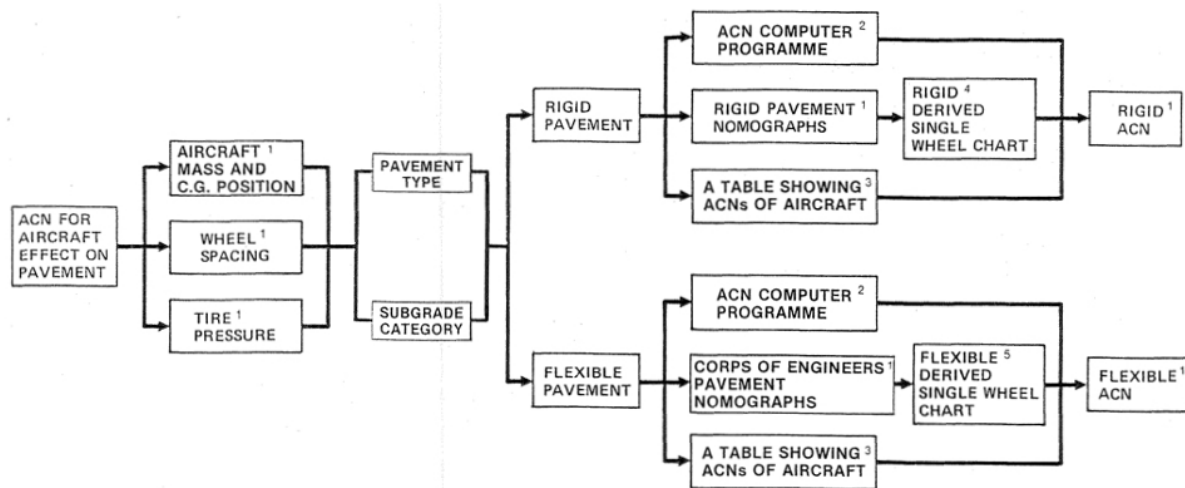


Figura 2.2: Flusso di definizione dell'ACN Fonte:[5]

Generalmente l'ACN è fornito dai costruttori degli aeromobili e il processo di determinazione del suo valore numerico si basa sulle caratteristiche principali del velivolo. In particolare, vengono considerate la massa dell'aeromobile, la posizione del baricentro, la configurazione e la spaziatura del carrello principale e la pressione di gonfiaggio degli pneumatici. Tali parametri consentono di determinare il valore di ACN in funzione della tipologia di pavimentazione e della classe di resistenza del sottofondo.

Le classi di resistenza del sottofondo sono quattro e si differenziano a seconda del tipo di pavimentazione che viene analizzata, rigida o flessibile. I parametri che le caratterizzano sono il modulo di reazione del sottofondo k per le pavimentazioni rigide e il CBR *California Bearing Ratio* per le pavimentazioni flessibili.

Tabella 2.1: Classificazione della resistenza del sottofondo per pavimentazioni aeroportuali

Classe di resistenza	Pavimentazioni rigide (modulo k)	Pavimentazioni flessibili (CBR)
Alta A	$k \geq 120 \text{ MN/m}^3$ $k^* = 150 \text{ MN/m}^3$	CBR ≥ 13 CBR = 15
Media B	$60 \leq k < 120 \text{ MN/m}^3$ $k^* = 80 \text{ MN/m}^3$	$8 \leq \text{CBR} < 13$ CBR = 10
Bassa C	$25 \leq k < 60 \text{ MN/m}^3$ $k^* = 40 \text{ MN/m}^3$	$4 \leq \text{CBR} < 8$ CBR = 6
Molto bassa D	$k < 25 \text{ MN/m}^3$ $k^* = 20 \text{ MN/m}^3$	CBR < 4 CBR = 3

Per le pavimentazioni rigide viene inoltre utilizzata una tensione standard σ di riferimento nel calcestruzzo pari a 2,75 MPa per determinare l'ACN.

Per quanto riguarda la pressione degli pneumatici sono state individuate 4 classi, le classi sono definite poiché la pressione ha un effetto secondario rispetto ai pesi scaricati sulle ruote e alla loro spaziatura. Le classi sono le stesse riportate dall'*Annex 14* edizione del 2022, ma nell'edizione del DOC 9157 del 1983 i valori si discostano leggermente da quelli riportati.

- W- categoria illimitata nessun limite di pressione
- X- categoria alta limite di pressione a 1,5 MPa
- Y- categoria media limite di pressione a 1,00 MPa
- Z- categoria bassa limite di pressione a 0,50 MPa

Nel metodo ACN-PCN, l'interazione tra aeromobile e pavimentazione viene espressa mediante un carico equivalente su ruota singola, determinato matematicamente. Il carico equivalente rappresenta l'interazione tra il carrello e la pavimentazione, senza specificare lo spessore della pavimentazione come parametro di input dell'ACN, l'ACN è definito esclusivamente in funzione del carrello, del peso dell'aeromobile e delle caratteristiche del sottofondo. Il calcolo è eseguito uguagliando lo spessore teorico calcolato dai modelli matematici per sostenere il carico del carrello di un aeromobile con lo spessore richiesto da un carico singolo equivalente (*Derived Single Wheel Load DSWL*) a una pressione standard di 1,25 MPa. Il carico equivalente singolo DSWL viene utilizzato per avere uno standard di riferimento nella valutazione della pavimentazione, poiché avere uno spessore equivalente significa avere lo stesso livello di sollecitazione applicato alla pavimentazione.

L'Aircraft Classification Number (ACN) di un aeromobile era definito numericamente come due volte il derived single wheel load DSWL, espresso in migliaia di chilogrammi. Il valore di ACN veniva determinato assumendo una pressione di gonfiaggio dei pneumatici pari a 1,25 MPa ed in funzione della resistenza del sottofondo. L'ACN veniva definito per ciascuna delle quattro categorie di sottofondo: alta, media, bassa e molto bassa con i valori riportati nella tabella 2.1.

La procedura descritta è schematizzata in Figura 2.3, che rappresenta graficamente le fasi di determinazione dell'Aircraft Classification Number(ACN). In particolare:

1. Si valuta l'interazione tra il carrello dell'aeromobile e la pavimentazione, in termini di effetto strutturale prodotto sulla pavimentazione;
2. Si determina il carico equivalente su ruota singola (Derived Single Wheel Load, DSWL) che produce lo stesso effetto strutturale sulla pavimentazione, assumendo una pressione standard di 1,25 MPa;

3. L'Aircraft Classification Number (ACN) è definito come due volte il carico equivalente DSWL.

La figura rappresenta quindi il concetto di equivalenza strutturale tra l'effetto del carico trasmesso dal carrello reale dell'aeromobile e quello generato dal carico singolo equivalente DSWL utilizzato come riferimento standard.

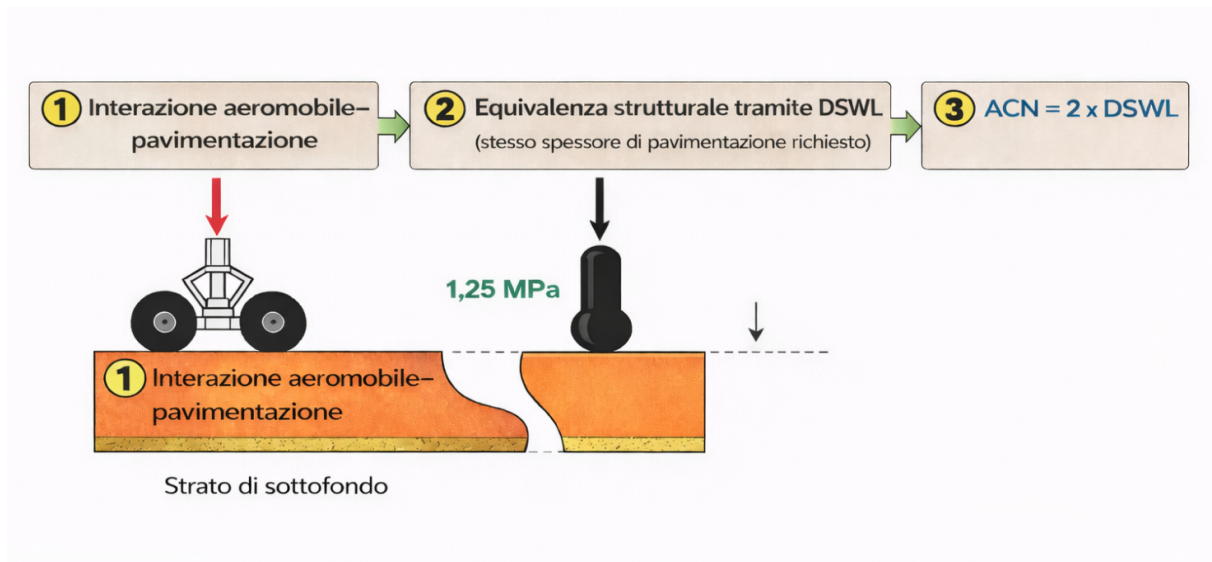


Figura 2.3: Determinazione dell'ACR in funzione del DSWL

Poiché un aeromobile può operare a differenti masse e posizioni del centro di gravità, il metodo ACN adotta specifiche convenzioni di calcolo. In particolare, il valore massimo di ACN è calcolato nelle condizioni di massa e centro di gravità che producono il massimo carico sul carrello principale, generalmente corrispondenti alla massa massima e alla posizione del centro di gravità più sfavorevole.

La norma presenta i valori di ACN sotto forma di tabelle che riportano l'andamento dell'ACN in funzione della massa totale dell'aeromobile nell'appendice 5 del documento ICAO, riportate in seguito, mentre valori di ACN per condizioni specifiche possono essere corretti per tenere conto di variazioni della pressione dei pneumatici e della posizione del centro di gravità.

Aircraft type	All-up mass (kg)	Load on one main gear leg (%)	Tire pressure (MPa)	ACN FOR RIGID PAVEMENT SUBGRADES - MN/m^3				ACN FOR FLEXIBLE PAVEMENT SUBGRADES - CBR			
				High 150	Medium 80	Low 40	Ultra-low 20	High 15	Medium 10	Low 6	Very low 3
				5	6	7	8	9	10	11	12
A300 B2 Airbus	137 000 85 910	47.0	1.2	35 18	42 21	50 25	58 29	39 20	43 22	53 24	68 34
A300 B2 Airbus	142 000 85 910	47.0	1.29	35 19	45 22	53 26	61 30	40 21	45 22	55 25	71 34
A300 B4 Airbus	150 000 88 180	47.0	1.39	41 20	49 22	57 26	65 31	43 21	49 22	59 25	76 35
A300 B4 Airbus	157 000 88 330	47.0	1.48	45 20	53 22	62 26	70 31	46 21	52 22	63 25	80 36
A300 B4 Airbus	165 000 88 505	47.0	1.29	46 17	55 20	64 25	73 29	49 20	56 21	68 25	84 36
A300-600 Airbus	165 000 87 100	47.0	1.29	46 17	55 19	64 24	73 28	49 19	56 21	68 24	84 35
A300-600R Airbus	170 000 85 033	47.4	1.35	49 17	58 19	68 23	78 28	52 19	58 20	71 23	89 34
A300-600R Airbus	171 700 85 033	47.4	1.35	50 17	59 19	69 23	79 28	52 19	59 20	72 23	90 34
A310-200 Airbus	132 000 76 616	46.7	1.23	33 15	39 18	46 21	54 24	36 18	40 19	48 20	64 27
A310-200 Airbus	138 600 76 747	46.7	1.3	35 16	42 18	51 21	58 25	39 18	43 19	52 20	68 28
A310-200 Airbus	142 000 75 961	46.7	1.33	37 15	44 17	52 20	60 23	40 17	44 18	54 20	70 27
A310-300 Airbus	150 000 77 037	47.0	1.42	42 13	49 14	58 17	66 20	44 15	49 15	59 16	76 24
A310-300 Airbus	157 000 78 900	47.4	1.49	45 14	54 15	63 18	71 22	47 15	53 15	64 16	81 25
A320-100 Airbus Dual	66 000 37 203	47.1	1.28	37 19	40 20	42 21	44 23	33 18	34 18	38 19	44 22
A320-100 Airbus Dual	68 000 39 700	47.1	1.34	39 20	41 22	43 23	45 24	35 19	36 19	40 20	46 23
A320-100 Airbus Dual Tender	68 000 40 243	47.1	1.12	18 9	21 10	24 12	28 14	18 9	19 10	23 11	32 14

Figura 2.4: Tabelle dei valori ACN da norma per le diverse classi di resistenza del sottofondo e del tipo di pavimentazione Fonte: [5]

Aircraft type	All-up mass (kg)	Load on one main gear leg (%)	Tire pressure (MPa)	ACN FOR RIGID PAVEMENT SUBGRADES - MN/m ³				ACN FOR FLEXIBLE PAVEMENT SUBGRADES - CBR			
				Ultra-				High 15	Medium 10	Low 6	Very low 3
				High 150	Medium 80	Low 40	low 20				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
A320-200 Airbus Dual	73 500 39 748	47.0	1.45	44 20	46 22	48 23	50 25	38 19	40 19	44 20	50 24
A320-200 Airbus Dual Tandem	73 500 40 291	47.0	1.21	18 9	22 10	26 11	30 13	19 9	21 10	26 11	35 14
BAC 1-11 Series 400	39 690 22 498	47.5	0.93	25 13	26 13	28 14	29 15	22 11	24 12	27 13	29 15
BAC 1-11 Series 475	44 679 23 451	47.5	0.57	22 10	25 11	27 12	28 13	19 9	24 10	28 12	31 15
BAC 1-11 Series 500	47 400 24 757	47.5	1.08	32 15	34 16	35 16	36 17	29 13	30 13	33 15	35 17
BAe 146 Series 100	37 308 23 000	46.0	0.80	18 10	20 11	22 12	23 13	17 10	18 10	20 11	24 13
BAe 146 Series 100	37 308 23 000	46.0	0.52	16 9	18 10	19 11	21 12	13 8	16 9	19 11	23 13
BAe 146 Series 200	40 600 23 000	47.1	0.88	22 11	23 12	25 13	26 14	19 10	21 10	23 11	27 13
BAe 146 Series 200	40 600 23 000	47.1	0.61	19 10	21 11	23 12	24 12	16 8	20 10	22 11	27 13
B707-120B	117 027 57 833	46.7	1.17	28 12	33 12	39 15	46 17	31 13	34 14	41 15	54 20
B707-320B	148 778 64 764	46.0	1.24	38 13	46 14	54 17	62 20	42 15	47 15	57 17	72 22
B707-320C (Freighter)	152 407 61 463	46.7	1.24	40 13	48 14	57 16	66 19	44 14	49 15	60 17	76 21
B707-320C (Convertible)	152 407 67 269	46.7	1.24	40 14	48 15	57 18	66 21	44 16	49 17	60 19	76 24
B707-320/420	143 335 64 682	46.0	1.24	36 13	43 14	52 17	59 20	40 15	44 15	54 17	69 22
B720	104 326 50 258	47.4	1.00	25 10	30 11	37 13	42 16	29 11	31 12	39 14	51 18
B720 B	106 594 52 163	46.4	1.00	25 10	30 11	37 13	42 16	29 11	31 12	39 14	51 18
B727-100	77 110 41 322	47.6	1.14	46 22	48 23	51 25	53 26	41 20	43 20	49 22	54 26
B727-100C	73 028 41 322	47.8	1.09	43 22	45 23	48 25	50 26	39 20	40 21	46 22	51 26

Figura 2.5: Tabelle dei valori ACN da norma per le diverse classi di resistenza del sottofondo e del tipo di pavimentazione Fonte: [5]

Aircraft type	All-up mass (kg)	Load on one main gear leg (%)	Tire pressure (MPa)	ACN FOR RIGID PAVEMENT SUBGRADES - MN/m ²				ACN FOR FLEXIBLE PAVEMENT SUBGRADES - CBR			
				Ultra-low 20				Ultra-low 20			
				High 150	Medium 80	Low 40	Ultra-low 20	High 15	Medium 10	Low 6	Very low 3
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
B727-200 (Standard)	78 471 44 293	48.5	1.15	48 24	50 26	53 27	56 29	43 22	45 23	51 25	56 29
B727-200 (Advanced)	84 005 44 270	48.0	1.02	49 23	52 24	55 26	58 28	45 21	48 22	55 24	60 29
B727-200 (Advanced)	86 636 44 347	47.7	1.06	51 23	54 25	58 26	60 28	47 22	50 22	56 24	61 28
B727-200 (Advanced)	89 675 44 470	46.9	1.15	54 23	57 25	60 27	62 28	49 21	51 22	58 24	63 28
B727-200 (Advanced)	95 254 45 677	46.5	1.19	58 24	61 25	64 27	67 29	52 22	55 22	62 25	66 29
B737-100	44 361 26 581	46.2	0.95	23 12	24 13	26 14	27 15	20 12	22 12	24 13	28 15
B737-200	45 722 27 170	46.4	0.97	24 13	25 14	27 15	29 16	22 12	23 12	26 14	30 16
B737-200	52 616 27 125	45.5	1.14	29 13	31 14	32 15	34 16	26 12	27 12	30 13	34 15
B737-200	52 616 27 125	45.5	0.66	24 11	26 12	28 13	30 14	21 10	25 11	29 13	34 15
B737-200/200C (Advanced)	53 297 29 257	46.4	1.16	30 15	32 16	34 17	35 18	27 14	28 14	31 15	36 17
B737-200/200C (Advanced)	56 699 28 985	46.3	1.23	33 15	34 16	36 17	38 18	29 14	30 14	34 15	38 17
B737-200 (Advanced)	58 332 29 620	46.0	1.25	34 15	36 16	38 17	39 18	30 14	31 14	35 15	39 17
B737-300	61 462 32 904	45.9	1.34	37 18	39 18	41 20	42 21	32 16	33 16	37 17	41 20
B737-300	61 462 32 904	45.9	1.14	35 17	37 18	39 19	41 20	31 15	33 16	37 17	41 20
B737-400	64 864 33 643	46.9	1.44	41 19	43 20	45 21	47 22	35 16	37 17	41 18	45 21
B737-500*	60 781 31 312	46.1	1.34	37 17	38 17	40 19	42 19	32 15	33 15	37 16	41 19
B747-100	323 410 162 385	23.4	1.50	41 17	48 19	57 22	65 25	44 19	48 20	58 22	77 28
B747-100B	334 749 173 036	23.1	1.56	43 18	50 20	59 24	68 28	46 20	50 21	60 24	80 30

Figura 2.6: Tabelle dei valori ACN da norma per le diverse classi di resistenza del sottofondo e del tipo di pavimentazione Fonte: [5]

Aircraft type	All-up mass (kg)	Load on one main gear leg (%)	Tire pressure (MPa)	ACN FOR RIGID PAVEMENT SUBGRADES - MN/m ³				ACN FOR FLEXIBLE PAVEMENT SUBGRADES - CBR			
				High 150	Medium 80	Low 40	Ultra-low 20	High 15	Medium 10	Low 6	Very low 3
				5	6	7	8	9	10	11	12
B747-100B	<u>341 553</u> 171 870	23.1	1.32	<u>41</u> 17	<u>49</u> 19	<u>58</u> 22	<u>68</u> 26	<u>46</u> 20	<u>51</u> 21	<u>62</u> 23	<u>82</u> 30
B747-100B SR	<u>260 362</u> 164 543	24.1	1.04	<u>27</u> 16	<u>32</u> 17	<u>40</u> 21	<u>47</u> 25	<u>33</u> 19	<u>36</u> 20	<u>43</u> 23	<u>59</u> 30
B747SP	<u>302 093</u> 147 716	22.9	1.30	<u>35</u> 14	<u>42</u> 16	<u>51</u> 19	<u>59</u> 22	<u>40</u> 17	<u>44</u> 17	<u>52</u> 19	<u>71</u> 25
B747SP	<u>318 881</u> 147 996	21.9	1.40	<u>37</u> 14	<u>44</u> 15	<u>52</u> 18	<u>60</u> 21	<u>41</u> 16	<u>45</u> 17	<u>54</u> 18	<u>72</u> 23
B747-200B	<u>352 893</u> 172 886	23.6	1.37	<u>45</u> 18	<u>53</u> 20	<u>64</u> 24	<u>73</u> 28	<u>50</u> 21	<u>55</u> 22	<u>67</u> 24	<u>88</u> 31
B747-200C	<u>373 305</u> 166 749	23.1	1.30	<u>46</u> 16	<u>55</u> 18	<u>66</u> 21	<u>76</u> 25	<u>52</u> 19	<u>57</u> 20	<u>70</u> 22	<u>92</u> 29
B747-200F/300	<u>379 201</u> 156 642	23.2	1.39	<u>47</u> 16	<u>57</u> 17	<u>68</u> 20	<u>78</u> 24	<u>53</u> 18	<u>59</u> 19	<u>73</u> 21	<u>94</u> 26
B747-400	<u>395 987</u> 178 459	23.4	1.41	<u>53</u> 19	<u>63</u> 21	<u>75</u> 25	<u>85</u> 29	<u>57</u> 21	<u>64</u> 22	<u>79</u> 25	<u>101</u> 32
B757-200	<u>109 316</u> 60 260	45.2	1.17	<u>27</u> 12	<u>32</u> 14	<u>38</u> 17	<u>44</u> 19	<u>29</u> 14	<u>32</u> 14	<u>39</u> 17	<u>52</u> 22
B767-200	<u>143 789</u> 78 976	46.2	1.31	<u>33</u> 15	<u>38</u> 17	<u>46</u> 20	<u>54</u> 24	<u>37</u> 18	<u>40</u> 19	<u>47</u> 21	<u>65</u> 26
B767-200-ER	<u>159 755</u> 80 853	46.9	1.21	<u>37</u> 16	<u>44</u> 18	<u>54</u> 21	<u>63</u> 25	<u>43</u> 19	<u>47</u> 19	<u>57</u> 22	<u>77</u> 28
B767-300	<u>159 665</u> 86 070	47.5	1.21	<u>38</u> 17	<u>45</u> 19	<u>54</u> 23	<u>63</u> 27	<u>43</u> 20	<u>48</u> 21	<u>58</u> 24	<u>78</u> 32
B767-300-ER	<u>172 819</u> 87 926	46.9	1.31	<u>43</u> 18	<u>51</u> 20	<u>61</u> 24	<u>71</u> 28	<u>48</u> 21	<u>53</u> 22	<u>65</u> 24	<u>86</u> 32
B767-300-ER	<u>185 520</u> 88 470	46.0	1.38	<u>47</u> 18	<u>56</u> 20	<u>66</u> 24	<u>76</u> 28	<u>51</u> 21	<u>57</u> 22	<u>70</u> 24	<u>92</u> 31
Caravelle Series 10	<u>52 000</u> 29 034	46.1	0.75	<u>15</u> 7	<u>17</u> 8	<u>20</u> 9	<u>22</u> 10	<u>15</u> 7	<u>17</u> 7	<u>19</u> 9	<u>23</u> 11
Caravelle Series 12	<u>55 960</u> 31 800	46.0	0.88	<u>16</u> 8	<u>19</u> 9	<u>22</u> 10	<u>25</u> 12	<u>17</u> 8	<u>19</u> 9	<u>21</u> 10	<u>26</u> 12
Concorde	<u>185 066</u> 78 698	48.0	1.26	<u>61</u> 21	<u>71</u> 22	<u>82</u> 25	<u>91</u> 29	<u>65</u> 21	<u>72</u> 22	<u>81</u> 26	<u>98</u> 32
Canadair CL 44	<u>95 708</u> 40 370	47.5	1.12	<u>25</u> 9	<u>30</u> 10	<u>35</u> 11	<u>40</u> 13	<u>27</u> 9	<u>30</u> 10	<u>36</u> 11	<u>47</u> 14

Figura 2.7: Tabelle dei valori ACN da norma per le diverse classi di resistenza del sottofondo e del tipo di pavimentazione Fonte: [5]

Aircraft type	All-up mass (kg)	Load on one main gear leg (%)	Tire pressure (MPa)	ACN FOR RIGID PAVEMENT SUBGRADES - MN/m ³ Ultra-low				ACN FOR FLEXIBLE PAVEMENT SUBGRADES - CBR			
				High 150	Medium 80	Low 40	Ultra-low 20	High 15	Medium 10	Low 6	Very low 3
				5	6	7	8	9	10	11	12
Convair 880 M	87 770	46.6	1.03	26	31	36	41	27	31	36	44
	40 195			9	10	12	14	10	10	12	15
Convair 990	115 666	48.5	1.28	41	48	54	60	40	45	53	64
	54 685			15	17	19	22	15	16	19	24
DC-3	11 430	46.8	0.31	6	7	7	7	4	6	8	9
	7 767			4	5	5	5	3	4	5	6
DC-4	33 113	46.8	0.53	13	15	17	18	11	14	16	20
	22 075			8	9	10	11	7	9	10	12
DC-8-43	144 242	46.5	1.22	41	49	57	65	43	49	59	74
	61 919			15	16	18	21	15	16	18	23
DC-8-55	148 778	47.0	1.30	45	53	62	69	46	53	63	78
	62 716			15	16	19	22	15	16	18	24
DC-8-61/71	148 778	48.0	1.30	46	54	63	71	48	54	64	80
	68 992			17	19	22	25	18	19	21	28
DC-8-62/72	160 121	46.5	1.29	47	56	65	73	49	56	67	83
	65 025			15	16	19	22	16	16	18	24
DC-8-63/73	162 386	47.6	1.34	50	60	69	78	52	59	71	87
	72 002			17	19	23	26	18	19	22	29
DC-9-15	41 504	46.2	0.90	23	25	26	28	21	22	26	28
	22 300			11	12	13	14	10	11	12	14
DC-9-21	45 813	47.2	0.98	27	29	30	32	24	26	29	32
	23 879			12	13	14	15	11	12	13	15
DC-9-32	49 442	46.2	1.07	29	31	33	34	26	28	31	34
	25 789			14	15	15	16	12	13	14	16
DC-9-41	52 163	46.7	1.10	32	34	35	37	28	30	33	37
	27 821			15	16	17	18	13	14	15	18
DC-9-51	55 338	47.0	1.17	35	37	39	40	31	32	36	39
	29 336			17	17	18	19	15	15	16	19
MD-81	63 957	47.8	1.17	41	43	45	46	36	38	43	46
	35 571			20	21	23	24	18	19	21	24
MD-82/88	68 266	47.6	1.27	45	47	49	50	39	42	46	50
	35 629			21	22	24	25	18	19	20	24
MD-83	73 023	47.4	1.34	49	51	53	55	42	46	50	54
	36 230			21	22	24	25	18	19	21	24
MD-87	68 266	47.4	1.27	45	47	49	50	39	42	46	50
	33 965			19	21	22	23	17	18	19	22

Figura 2.8: Tabelle dei valori ACN da norma per le diverse classi di resistenza del sottofondo e del tipo di pavimentazione Fonte:[5]

Aircraft type	All-up mass (kg)	Load on one main gear leg (%)	Tire pressure (MPa)	ACN FOR RIGID PAVEMENT SUBGRADES - MN/m ²				ACN FOR FLEXIBLE PAVEMENT SUBGRADES - CBR			
				High 150	Medium 80	Low 40	Ultra-low 20	High 15	Medium 10	Low 6	Very low 3
				5	6	7	8	9	10	11	12
DC-10-10	<u>196 406</u> 108 940	47.2	1.28	<u>45</u> 23	<u>52</u> 25	<u>63</u> 28	<u>73</u> 33	<u>52</u> 26	<u>57</u> 27	<u>68</u> 30	<u>93</u> 38
DC-10-10	<u>200 942</u> 105 279	46.9	1.31	<u>46</u> 22	<u>54</u> 24	<u>64</u> 27	<u>75</u> 31	<u>54</u> 24	<u>58</u> 25	<u>69</u> 28	<u>96</u> 36
DC-10-15	<u>207 746</u> 105 279	46.7	1.34	<u>48</u> 22	<u>56</u> 24	<u>67</u> 27	<u>74</u> 31	<u>55</u> 24	<u>61</u> 25	<u>72</u> 28	<u>100</u> 36
DC-10-30/40	<u>253 105</u> 120 742	37.7	1.17	<u>44</u> 20	<u>53</u> 21	<u>64</u> 24	<u>75</u> 28	<u>53</u> 22	<u>59</u> 23	<u>70</u> 25	<u>97</u> 32
DC-10-30/40	<u>260 816</u> 124 058	37.6	1.21	<u>46</u> 20	<u>55</u> 21	<u>67</u> 25	<u>78</u> 29	<u>56</u> 23	<u>61</u> 23	<u>74</u> 26	<u>101</u> 33
DC-10-30/40	<u>268 981</u> 124 058	37.9	1.24	<u>49</u> 20	<u>59</u> 21	<u>71</u> 25	<u>83</u> 29	<u>59</u> 23	<u>64</u> 23	<u>78</u> 26	<u>106</u> 33
MD-11	<u>274 650</u> 127 000	39.2	1.41	<u>56</u> 23	<u>66</u> 25	<u>79</u> 28	<u>92</u> 32	<u>64</u> 25	<u>70</u> 26	<u>85</u> 29	<u>114</u> 37
DCH 7 DASH 7	<u>19 867</u> 11 793	46.8	0.74	<u>11</u> 6	<u>12</u> 6	<u>13</u> 7	<u>13</u> 7	<u>10</u> 5	<u>11</u> 6	<u>12</u> 6	<u>14</u> 8
FOKKER 27 Mk500	<u>19 777</u> 11 879	47.5	0.54	<u>10</u> 5	<u>11</u> 6	<u>12</u> 6	<u>12</u> 7	<u>8</u> 4	<u>10</u> 5	<u>12</u> 6	<u>13</u> 7
FOKKER 50 HTP	<u>20 820</u> 12 649	47.8	0.59/ 0.55	<u>10</u> 6	<u>11</u> 6	<u>12</u> 7	<u>13</u> 7	<u>8</u> 5	<u>10</u> 5	<u>12</u> 6	<u>14</u> 8
FOKKER 50 LTP	<u>20 820</u> 12 649	47.8	0.41	<u>9</u> 5	<u>10</u> 5	<u>11</u> 6	<u>12</u> 7	<u>6</u> 4	<u>9</u> 5	<u>11</u> 6	<u>14</u> 8
FOKKER 28 Mk1000LTP	<u>29 484</u> 15 650	46.3	0.58	<u>14</u> 6	<u>15</u> 7	<u>17</u> 8	<u>18</u> 9	<u>11</u> 5	<u>14</u> 6	<u>16</u> 7	<u>19</u> 9
FOKKER 28 Mk1000HTP	<u>29 484</u> 16 550	46.3	0.69	<u>15</u> 8	<u>16</u> 8	<u>18</u> 9	<u>18</u> 10	<u>13</u> 6	<u>15</u> 7	<u>17</u> 8	<u>20</u> 10
FOKKER 100	<u>44 680</u> 24 375	47.8	0.98	<u>28</u> 13	<u>29</u> 14	<u>31</u> 15	<u>32</u> 16	<u>25</u> 12	<u>27</u> 13	<u>30</u> 14	<u>32</u> 16
HS125-400A -400B	<u>10 600</u> 5 683	45.5	0.77	<u>6</u> 3	<u>6</u> 3	<u>7</u> 6	<u>7</u> 3	<u>5</u> 2	<u>5</u> 3	<u>6</u> 3	<u>7</u> 3
HS125-600A -600B	<u>11 340</u> 5 683	45.5	0.83	<u>7</u> 3	<u>7</u> 3	<u>7</u> 3	<u>8</u> 3	<u>5</u> 2	<u>6</u> 3	<u>7</u> 3	<u>8</u> 3
HS748	<u>21 092</u> 12 183	43.6	0.59	<u>10</u> 5	<u>11</u> 5	<u>11</u> 6	<u>12</u> 6	<u>8</u> 4	<u>9</u> 5	<u>11</u> 6	<u>13</u> 7
IL-62	<u>162 600</u> 66 400	47.0	1.08	<u>42</u> 14	<u>50</u> 15	<u>60</u> 18	<u>69</u> 20	<u>47</u> 16	<u>54</u> 17	<u>64</u> 18	<u>79</u> 24

Figura 2.9: Tabelle dei valori ACN da norma per le diverse classi di resistenza del sottofondo e del tipo di pavimentazione Fonte: [5]

Aircraft type	All-up mass (kg)	Load on one main gear leg (%)	Tire pressure (MPa)	ACN FOR RIGID PAVEMENT SUBGRADES - MN/m^3				ACN FOR FLEXIBLE PAVEMENT SUBGRADES - CBR			
				High 150	Medium 80	Low 40	Ultra-low 20	High 15	Medium 10	Low 6	Very low 3
				5	6	7	8	9	10	11	12
IL-62M	168 000 71 400	47.0	1.08	43 16	52 17	62 19	71 22	50 17	57 18	67 20	83 26
IL-76T	171 000 83 800	23.5	0.64	38 11	38 14	38 16	39 16	37 15	40 16	45 18	53 22
IL-86	209 500 111 000	31.2	0.88	25 13	31 14	38 16	46 19	34 16	36 17	43 19	61 23
L-100-20	70 670 34 205	48.2	0.72	30 14	33 15	36 16	38 17	27 12	31 14	33 15	38 16
L-100-30	70 670 34 701	48.4	0.72	30 14	33 15	36 16	38 17	27 12	31 14	33 15	39 17
L-1011-1	195 952 108 862	47.4	1.33	45 24	52 25	62 28	73 33	52 25	56 27	66 29	91 38
L-1011 -100/200	212 281 110 986	46.8	1.21	46 23	55 24	66 28	78 32	56 25	61 26	73 30	100 38
L-1011 -500	225 889 108 924	46.2	1.27	50 23	59 24	72 27	84 31	60 25	65 26	79 28	107 36
Trident 1E	61 160 33 203	46.0	1.03	32 15	34 16	37 17	39 18	23 10	24 11	27 12	32 15
Trident 2E	65 998 33 980	47.0	1.07	37 16	39 17	42 18	44 19	26 11	28 12	31 13	36 16
Trident 3	68 266 39 060	45.5	1.14	37 18	40 19	42 21	44 22	26 13	28 14	31 15	36 18
TU-134A	47 600 29 350	45.6	0.83	11 7	13 8	16 9	19 10	12 7	13 8	16 9	21 12
TU-154B	98 000 53 500	45.1	0.93	19 8	25 10	32 13	38 17	20 10	24 11	30 13	38 18
VC10-1150	151 953 71 940	48.3	1.01	38 16	46 17	56 20	65 23	44 17	50 18	61 21	77 27

Figura 2.10: Tabelle dei valori ACN da norma per le diverse classi di resistenza del sottofondo e del tipo di pavimentazione Fonte: [5]

Nel metodo ACN-PCN sono definite configurazioni di pavimentazione standard alle quali la pavimentazione reale deve essere ricondotta. La stratigrafia esistente non viene quindi valutata nella sua configurazione effettiva, ma utilizzata per determinare uno spessore equivalente, espresso in funzione delle pavimentazioni standard previste dalla normativa.

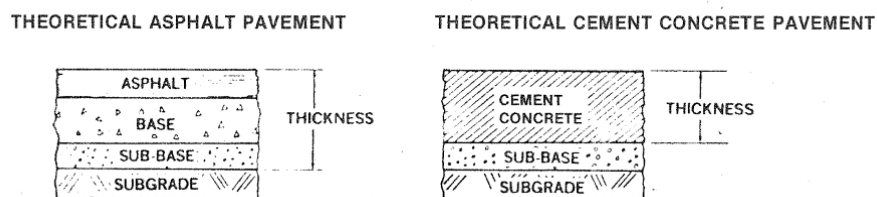


Figura 2.11: Sezioni standard per il calcolo dello spessore equivalente degli strati della pavimentazione Fonte: [5]

Per la modellazione matematica nel metodo ACN-PCN a seconda del tipo di pavimentazione si faceva riferimento a due modelli analitici di risposta elastica della pavimentazione ai carichi: per quanto riguarda le pavimentazioni rigide, si trattava di utilizzare la soluzione di Westergaard per un carico elastico applicato tramite una piastra su fondazione di Winkler, mentre per quanto riguarda le pavimentazioni flessibili, si trattava di utilizzare la soluzione di Boussinesq per tensioni e deformazioni in uno semi spazio elastico, isotropo o omogeneo sotto la superficie della pavimentazione.

Il metodo ACN-PCN prevedeva anche la possibilità di determinare l'ACN mediante una procedura grafica. Per le pavimentazioni rigide, la normativa fornisce appositi diagrammi che consentono di individuare il valore di ACN sulla base del carico su ruota singola equivalente, assumendo una pressione standard di gonfiaggio degli pneumatici pari a 1,25 MPa. La procedura richiede inoltre di considerare lo spessore equivalente della pavimentazione di riferimento, definito dal costruttore in funzione della massa dell'aeromobile, e una tensione standard del calcestruzzo pari a 2,75 MPa. In corrispondenza delle quattro categorie di resistenza del sottofondo, tali parametri permettono di determinare graficamente il valore dell'ACN.

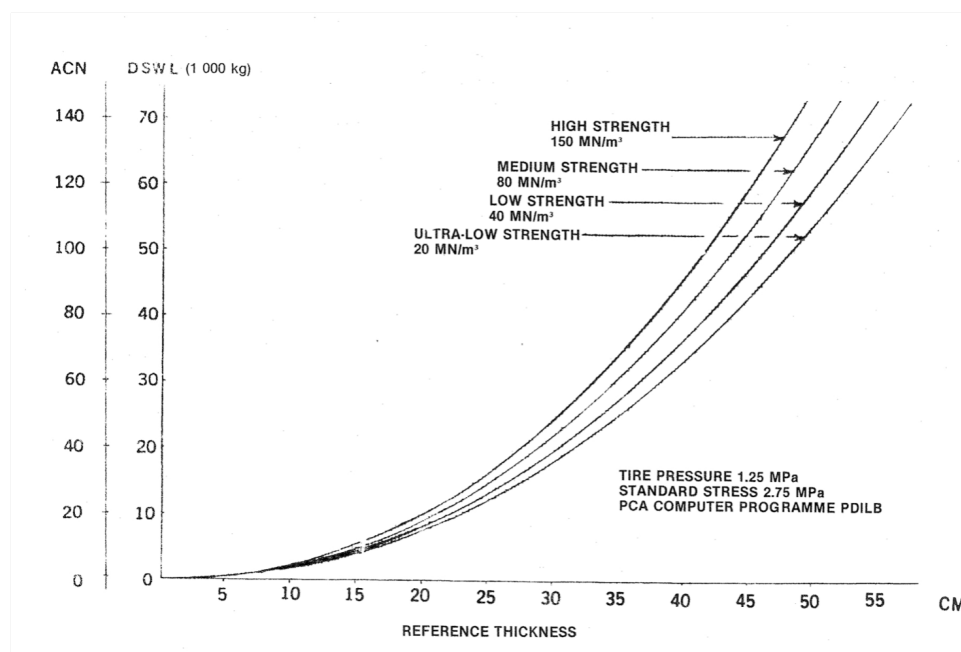


Figura 2.12: Individuazione grafica ACN per pavimentazioni rigide Fonte:[5]

Nel caso delle pavimentazioni flessibili, l'applicazione del metodo grafico prevede la determinazione preliminare dello spessore equivalente della pavimentazione, calcolato mediante un'apposita formula di conversione, riportata in seguito.

$$t = \sqrt{\frac{DSWL}{C_1 \cdot CBR} - \frac{DSWL}{C_2 \cdot P_s}} \quad (2.2)$$

dove:

- t = spessore di riferimento, espresso in centimetri (cm);
- DSWL (*Design Single Wheel Load*) = carico di progetto su ruota singola, riferito a una pressione di gonfiaggio del pneumatico pari a 1,25 MPa;
- P_s = pressione di gonfiaggio del pneumatico:

$$P_s = 1,25 \text{ MPa}$$

- CBR = valore del California Bearing Ratio del sottofondo standard (si noti che il diagramma di riferimento utilizza quattro valori standard di CBR: 3, 6, 10 e 15);
- $C_1 = 0,5695$;
- $C_2 = 32,035$.

La determinazione dell'ACN di un aeromobile mediante il metodo grafico avveniva a partire dallo spessore di riferimento associato al velivolo, definito in funzione della sua massa, della categoria del sottofondo e di un numero di passaggi equivalenti pari a 10.000. Individuato lo spessore equivalente della pavimentazione attraverso il grafico, sulla base del valore di CBR del sottofondo, era possibile determinare il Derived Single Wheel Load (DSWL) e, di conseguenza, il valore di ACN, pari al doppio del DSWL.

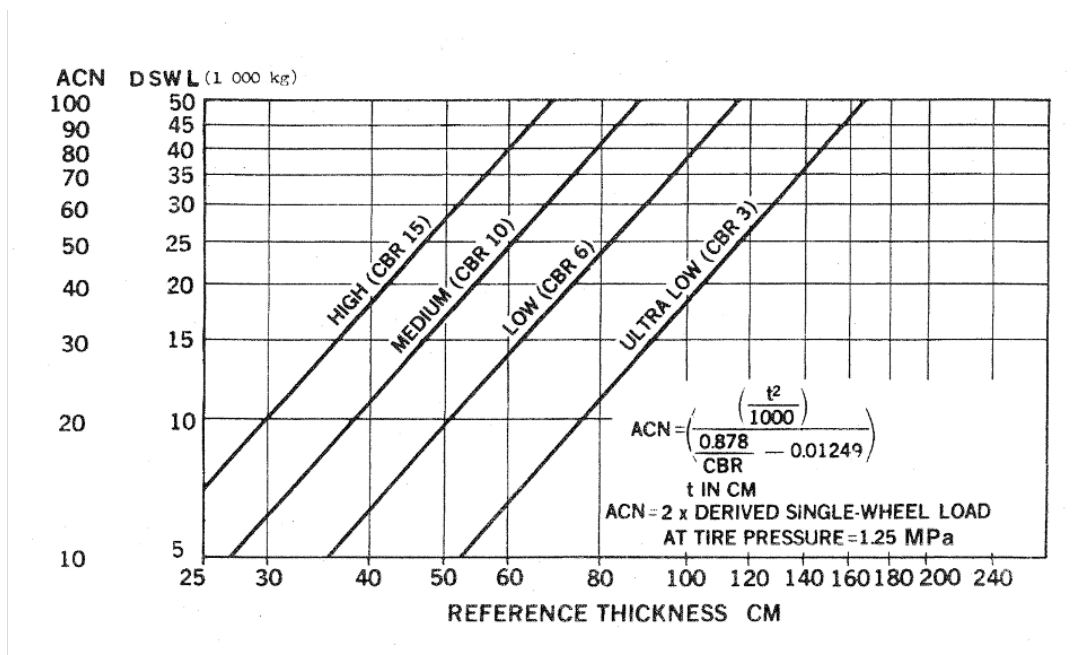


Figura 2.13: Individuazione grafica ACN per pavimentazioni flessibili Fonte:[5]

2.2.2 Metodi di calcolo del PCN

Una volta determinato il valore di ACN, che rappresenta l'effetto del carico dell'aeromobile sulla pavimentazione, è necessario analizzare le modalità di determinazione del Pavement Classification Number (PCN), che esprime la resistenza della pavimentazione e costituisce l'altro parametro fondamentale del metodo ACN-PCN.

Il Pavement Classification Number (PCN) era il numero che identificava la resistenza della pavimentazione in esame. La normativa definisce il PCN come “ *rating established for the pavement indicates that the pavement is capable of supporting aircraft having an ACN equal or lower magnitude*”. Questo significa che, nella comparazione tra il numero trovato per la pavimentazione PCN e l'ACN proprio dell'aeromobile che opera sulla pavimentazione, il valore di ACN non può superare il PCN, perché questo implicherebbe che la pavimentazione non supporta l'aeromobile analizzato.

La determinazione del PCN prevedeva a monte l'analisi del tipo di pavimentazione, dello stato del sottofondo su cui poggia la pavimentazione e delle categorie di pressione degli pneumatici, solo successivamente era possibile determinare il valore di PCN finale. La determinazione del PCN avveniva seguendo due criteri: il criterio dell'aeromobile utilizzato e il criterio tecnico di valutazione.

Le pavimentazioni possono essere classificate, come precedentemente citato nel capitolo 1, come rigide o flessibili, la pavimentazione rigida è costituita da lastre in calcestruzzo (PCC) con possibili strati intermedi tra le lastre e il sottofondo, mentre la pavimentazione flessibile è costituita da strati sottofondo, fondazione, base, binder e usura la cui resistenza cresce salendo di strato. Nella realtà è possibile che ci siano pavimentazioni composite dovute a un overload di uno strato in calcestruzzo su una pavimentazione flessibile o a un overload in conglomerato bituminoso su una pavimentazione rigida, in ogni caso per la determinazione della resistenza della pavimentazione è necessario classificare la pavimentazione in funzione delle due tipologie standard, cioè rigide o flessibili. Nel caso di pavimentazioni composite se l'elemento strutturale predominante è lo strato rigido allora la pavimentazione deve essere classificata come rigida, al contrario deve essere classificata flessibile. La norma definisce che qualora la classificazione sia dubbia, la designazione come pavimentazione flessibile è da attribuire alla pavimentazione in esame.

La risposta strutturale della pavimentazione non dipende esclusivamente dagli strati da cui è composta, ma è influenzata anche dalle proprietà meccaniche del sottofondo. Nel metodo ACN-PCN, infatti, la determinazione dell'interazione tra aeromobile e pavimentazione veniva eseguita considerando sia il tipo di pavimentazione sia la resistenza del sottofondo, che condiziona la distribuzione delle tensioni e delle deformazioni indotte dal carico del

carrello. Per tale motivo, la valutazione della resistenza è espressa in funzione della categoria di resistenza del sottofondo, come descritto nel paragrafo seguente.

L'analisi del sottofondo è necessaria per valutare la classe di resistenza del sottofondo, poiché l'effetto del carico che grava sulla pavimentazione, dovuto a un aeromobile, varia a seconda del tipo di sottofondo presente. Le informazioni sulla classe di resistenza del sottofondo devono essere valutate in fase di progetto della pavimentazione o durante le successive riabilitazioni. Se non sono presenti dati, la normativa affermava che la resistenza del sottofondo deve essere parte integrante della valutazione basata su prove in sito quando possibile, se la valutazione in sito non è possibile, è necessario definire una categoria di resistenza del sottofondo rappresentativa in base alle caratteristiche del terreno, alla classificazione del suolo o al giudizio tecnico.

Il sottofondo di una pavimentazione aeroportuale può essere influenzato da fenomeni climatici e ambientali che ne modificano la resistenza meccanica. In presenza di superfici fortemente fessurate, pavimentazioni porose, falda superficiale o condizioni di drenaggio inadeguate, la resistenza del sottofondo può ridursi sensibilmente a causa dell'aumento del contenuto d'acqua. Durante i periodi umidi, materiali granulari quali ghiaie o terreni compattati risultano particolarmente suscettibili a variazioni di umidità. Inoltre, nelle aree soggette a gelo stagionale, la resistenza del sottofondo può subire ulteriori riduzioni durante la fase di disgelo, soprattutto in presenza di materiali sensibili al gelo.

Le caratteristiche della pavimentazione e la resistenza del sottofondo influenzano direttamente la risposta strutturale del sistema e, di conseguenza, la resistenza della pavimentazione. Come introdotto inizialmente, la resistenza deve essere valutata e comunicata in modo standardizzato per consentire la verifica della compatibilità tra aeromobile e infrastruttura. A questo scopo, l'ICAO ha introdotto il Pavement Classification Number (PCN), determinato secondo specifici criteri tecnici di valutazione, descritti nel capitolo successivo.

2.2.2.1 Criterio tecnico di valutazione del PCN

La normativa definisce la valutazione tecnica come il processo di definizione della resistenza di una pavimentazione mediante la misurazione e lo studio delle caratteristiche della pavimentazione e del suo comportamento sotto carico. Ciò può essere fatto mediante un'inversione del processo di progettazione, utilizzando parametri e metodi di progetto, ma invertendo il processo per determinare il carico ammissibile a partire dalle caratteristiche della pavimentazione esistente, oppure mediante una determinazione diretta della risposta della pavimentazione al carico.

Il metodo ACN-PCN, adottato da ICAO per la classificazione della resistenza delle pavimentazioni aeroportuali, si basa su modelli di calcolo analitici secondo la soluzione di Westergaard per le pavimentazioni rigide e la soluzione di Boussinesq per le pavimentazioni flessibili. Per le pavimentazioni flessibili, il metodo assume una caratterizzazione del sottofondo mediante l'indice CBR, utilizzato per definire la risposta strutturale della pavimentazione di riferimento sotto l'azione dei carichi. Per le pavimentazioni rigide, il metodo si basa sul modello di Westergaard di una lastra su fondazione di Winkler, considerando condizioni di carico al centro o al bordo della lastra. In entrambi i casi, la valutazione si basa su strutture di riferimento standardizzate introdotte con la Figura 2.11.

In fase di progettazione è necessario selezionare un metodo per definire gli spessori e le caratteristiche meccaniche che caratterizzano ciascuno strato della pavimentazione, in funzione dei materiali che la costituiscono, delle caratteristiche del sottofondo e dello spettro di traffico che opera sulla pavimentazione. In fase di valutazione della pavimentazione per la determinazione della resistenza, a partire dalle caratteristiche meccaniche e stratigrafiche dei singoli strati l'obiettivo è la valutazione del carico ammissibile che la pavimentazione può sostenere.

La normativa precisa che il metodo adottato per la valutazione non deve necessariamente coincidere con quello utilizzato in fase di progetto; tuttavia, i parametri fondamentali che descrivono il comportamento meccanico dei materiali e degli strati devono essere coerenti con quelli richiesti dal metodo di progettazione prescelto, al fine di garantire la validità dei risultati della valutazione.

È necessario quindi valutare tutti i parametri che caratterizzano la fase di valutazione, in modo da poter comprendere il comportamento della pavimentazione in funzione dei carichi applicati. La normativa quindi elenca, come riportato in seguito, gli elementi che caratterizzano la valutazione:

- Lo spessore di ciascuno strato deve essere determinato tramite i registri di costruzione o sarà necessario richiedere indagini in sito, quali carotaggi, l'apertura di trincee per consentire la misurazione degli spessori.
- Le caratteristiche meccaniche del sottofondo devono essere determinate come per lo spessore, o con i registri di costruzione, o se non ci fossero informazioni a riguardo, sarà necessario ottenere le informazioni tramite indagini in sito.
- Devono essere determinate anche le caratteristiche meccaniche degli strati intermedi che costituiscono la pavimentazione.

Le trincee di prova possono essere necessarie per consentire l'esecuzione di prove di penetrazione, prove di carico su piastra o il campionamento del materiale di sottofondo per le prove in laboratorio. In alternativa, il campionamento o le prove di penetrazione possono essere eseguiti mediante carotaggi. Possono inoltre essere richieste prove di carico per misurare le deflessioni, di tipo statico o dinamico, nonché prove basate sulla propagazione delle onde per la caratterizzazione strutturale della pavimentazione. Le tipologie di indagini e di prova da eseguire devono essere definite in funzione dei requisiti specifici del metodo di progettazione selezionato per la valutazione.

Secondo ICAO, le condizioni ambientali e climatiche influenzano significativamente il comportamento strutturale delle pavimentazioni aeroportuali. In particolare, la temperatura degli strati bituminosi può modificare le proprietà meccaniche del materiale e la risposta tensioni-deformazioni sotto carico, mentre gli effetti del gelo e delle condizioni climatiche locali devono essere considerati nella valutazione della resistenza e nella progettazione della pavimentazione. Le ripetizioni di carico a cui la pavimentazione è sottoposta costituiscono un elemento importante della valutazione e quindi, quando si analizza una pavimentazione, è necessario analizzare il traffico passato, futuro o previsto.

La valutazione della risposta della pavimentazione si effettua tramite prove di carico sulla pavimentazione, la misurazione della sua risposta in termini di deflessione sotto carico viene effettuata non solo al centro ma anche in punti spostati rispetto al carico per determinare la forma del bacino di deflessione. I metodi statici prevedono l'applicazione di un carico mediante piastre rigide o ruote, seguita dalla misurazione delle deflessioni indotte. Le prove di carico su piastra richiedono la presenza di un sistema di reazione per l'applicazione del carico, mentre nel caso di carichi applicati tramite ruota, il carico può essere imposto posizionando e successivamente rimuovendo il veicolo.

Questi metodi diretti si basano su una correlazione empirica tra la prestazione strutturale della pavimentazione e la deflessione indotta dal carico. In particolare, come illustrato in figura 2.15, la deflessione misurata sotto carico è messa in relazione con il numero di ripetizioni di carico fino al raggiungimento della rottura della pavimentazione. La relazione, generalmente espressa in forma logaritmica, evidenzia che a valori maggiori di deflessione corrisponde un numero inferiore di cicli di carico ammissibili, mentre deflessioni più contenute sono associate ad un numero superiore di cicli di carico e quindi a una maggiore vita utile. Sulla base di tale correlazione, la resistenza della pavimentazione può essere valutata direttamente a partire dalle deflessioni misurate in sito.

La procedura per la valutazione della risposta della pavimentazione è definita da normativa nel seguente modo:

- Misurare innanzitutto la deflessione sotto un carico significativo in una posizione

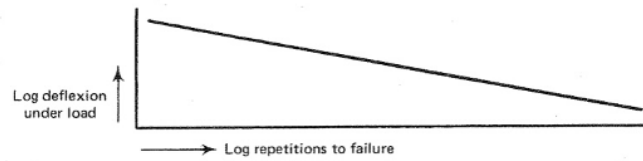


Figura 2.14: Grafico del rapporto logaritmico tra cicli a rottura e misura di deflessione
Fonte: [5]

critica selezionata della pavimentazione. Possono essere considerate configurazioni del carrello dell'aeromobile a ruota singola o multipla. Per determinare la deflessione sotto carico la normativa definisce la seguente procedura:

1. Posizionare la ruota dell'aeromobile nell'area critica;
2. Segnare i punti lungo la pavimentazione per la misurazione come indicato in Figura 17a;
3. Utilizzando il metodo della "linea di vista", effettuare le letture delle aste in ciascun punto;
4. Allontanare l'aeromobile e ripetere le letture delle aste;
5. Rappresentare la differenza nelle letture delle aste come deflessioni Figura 7b);
6. Collegare i punti per ottenere una stima della deflessione massima sotto il pneumatico.

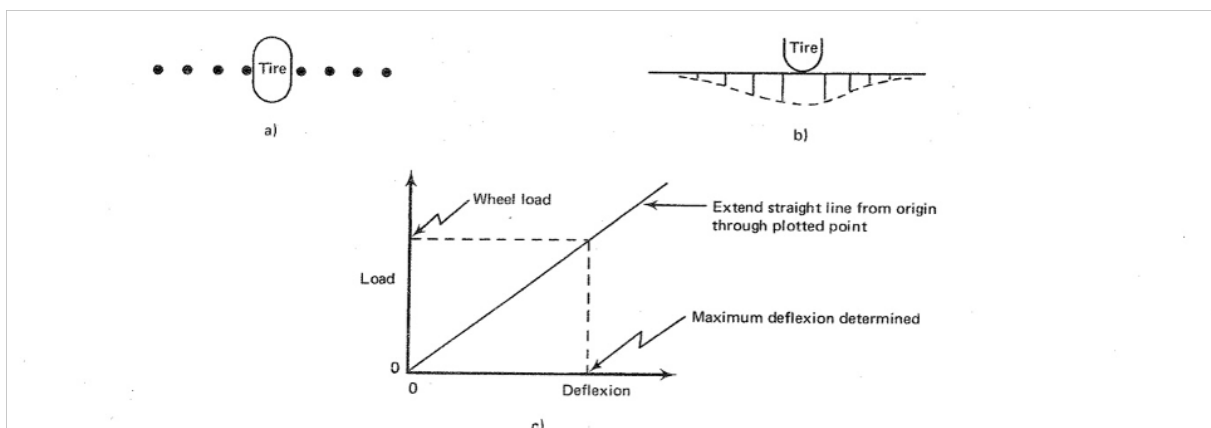


Figura 2.15: Misura di deflessione in funzione dei punti di campionamento e relazione tra carico e deflessione
Fonte: [5]

- Rappresentare il carico in funzione della deflessione massima come illustrato in Figura 17c.

- Combinare la curva deflessione–ripetizioni a rottura con la curva definita nella figura 2.15 per fornire una valutazione della resistenza della pavimentazione in funzione del carrello utilizzato per determinare le deflessioni:
1. Determinare le ripetizioni di carico o le ripetizioni equivalenti per le quali si intende che la pavimentazione debba essere utilizzata prima del cedimento;
 2. Da una correlazione del tipo mostrato in Figura 2.14, determinare la deflessione per le ripetizioni fino a rottura;
 3. Dalla relazione stabilita tra carico e deflessione del tipo mostrato in Figura 2.15c , determinare la resistenza della pavimentazione in termini di carico ammissibile sulla ruota utilizzata per le misurazioni di deflessione.

Una volta determinata la resistenza ammissibile della pavimentazione, è necessario esprimere tale risultato in termini di PCN, al fine di consentire il confronto con i valori ACN degli aeromobili. A tal fine, come previsto dalla procedura descritta precedentemente nel paragrafo "*Criteri operativi del metodo ACR-PCR*" in accordo con la normativa ICAO, la resistenza valutata viene correlata ai valori di ACN in funzione della massa dell'aeromobile, consentendo l'individuazione del valore di PCN corrispondente. Il confronto operativo risulta quindi espresso nella forma $ACN \leq PCN$, condizione che garantisce l'utilizzo della pavimentazione senza sovraccarico strutturale.

La procedura di valutazione tecnica descritta rappresenta il metodo più rigoroso per la determinazione della resistenza della pavimentazione e per l'assegnazione del Pavement Classification Number (PCN), in quanto basata sulle caratteristiche strutturali della pavimentazione e sulla resistenza del sottofondo. Tuttavia, tale approccio richiede la disponibilità di informazioni dettagliate sulle proprietà dei materiali, sulla configurazione degli strati e sulle condizioni strutturali della pavimentazione. Qualora tali informazioni non siano disponibili o risultino insufficienti, l'ICAO prevede una procedura alternativa per la determinazione del PCN, nota come criterio dell'aeromobile utilizzato, che si basa sull'esperienza operativa degli aeromobili che utilizzano regolarmente la pavimentazione come viene descritto nel capitolo successivo.

2.2.2.2 Criterio dell'aeromobile utilizzato per la valutazione del PCN

Il criterio di valutazione dell'aeromobile utilizzato viene adottato quando non è possibile applicare il metodo tecnico di valutazione. L'analisi prevede che l'aeromobile più pesante che utilizza regolarmente la pavimentazione venga considerato come l'aereo critico per valutare la resistenza della pavimentazione. Vengono quindi analizzati tutti gli aeromobili che operano sulla pavimentazione, tra questi viene individuato l'aeromobile che ha condizioni di carico più gravose. Durante l'analisi è necessario considerare anche le condizioni

della pavimentazione, poiché potrebbero esserci fessurazioni, deformazioni o segni di danneggiamento che potrebbero compromettere la resistenza della pavimentazione. L'analisi delle condizioni della pavimentazione è necessaria per comprendere il comportamento della pavimentazione in funzione del suo utilizzo, dello stato dello strato superficiale e delle condizioni di utilizzo in aree come all'interno o all'esterno delle tracce di rotolamento delle ruote, nelle taxiway più utilizzate, nelle zone soggette a frenatura massima o nelle aree di uscita rapida.

Questo criterio prevedeva la classificazione del tipo di pavimentazione in rigida o flessibile, la determinazione della classe di resistenza del sottofondo in funzione dei dati disponibili o tramite una determinazione diretta della resistenza del sottofondo, che può essere effettuata dalla classificazione dei materiali di sottofondo e dal riferimento a dati pubblicati dell'area o approssimata, perchè la norma prevede una tabella di riferimento, di seguito riportata, per determinare la resistenza del sottofondo tramite il California bearing ratio (CBR) per le pavimentazioni flessibili e il modulo di reazione di sottofondo K per le pavimentazioni rigide.

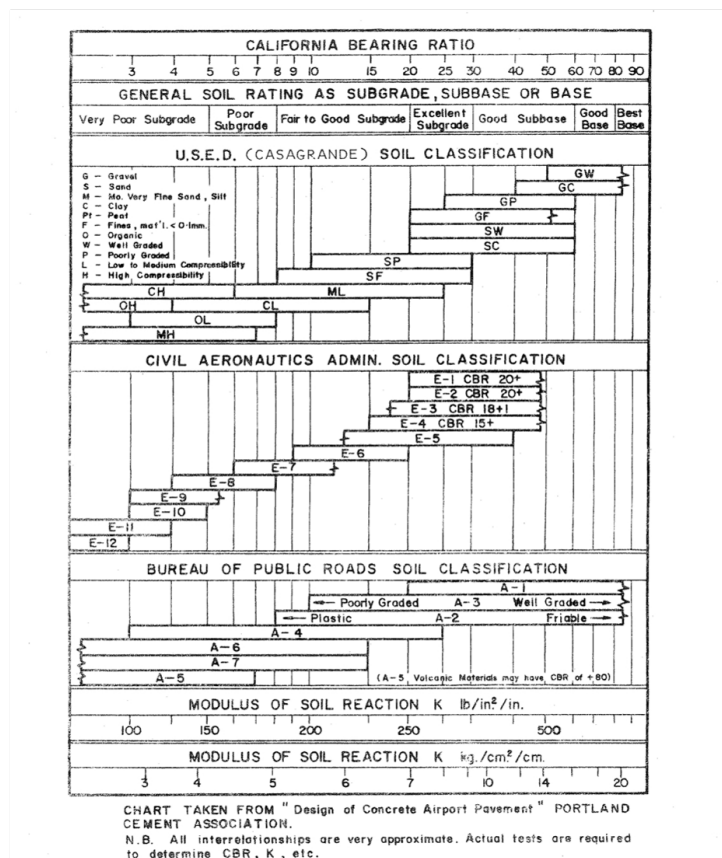


Figura 2.16: Determinazione grafica del CBR e del modulo K Fonte: [5]

Una volta determinata la classe di resistenza del sottofondo per il tipo di pavimentazione in esame, era necessario definire la categoria di pressione degli pneumatici in funzione di

quattro classi:alta, media bassa o molto bassa. La normativa afferma che per le pavimentazioni composite e flessibili con strato di usura in eccellente qualità sostengono la pressione degli pneumatici senza limiti di pressione e quindi è da considerare una classe alta, quando la qualità della pavimentazione scende allora saranno necessarie limitazioni alla pressione degli pneumatici.

Analizzate le caratteristiche della pavimentazione, è necessario individuare gli ACN degli aeromobili che utilizzano una pavimentazione tramite i valori tabellati da norma. Tra gli aeromobili che utilizzano la pavimentazione viene individuato l'aeromobile critico cioè quello che presenta l'ACN più alto in funzione della propria massa e della categoria del sottofondo. Definito l'aeromobile critico, il suo ACN veniva dichiarato come PCN della pavimentazione.

Il metodo ACN-PCN ha rappresentato per lungo tempo il riferimento per la valutazione della resistenza delle pavimentazioni aeroportuali. Tuttavia, l'evoluzione delle esigenze operative e delle metodologie di analisi ha portato all'introduzione di un nuovo sistema di classificazione *il metodo ACR-PCR*, oggi adottato come riferimento normativo. Per tale motivo, nel paragrafo successivo si analizzano i criteri operativi del nuovo metodo.

2.3 Criteri operativi del metodo ACR-PCR

L'*Annex 14* introduce il metodo ACR-PCR che viene poi analizzato dal punto di vista tecnico con il *DOC ICAO 9157* del 2022 [6], fonte utilizzata in questo capitolo, la normativa specifica che il metodo ha valenza per pavimentazioni utilizzate da aeromobili con massa statica superiore ai 5700 kg, così come avveniva per il metodo ACN-PCN, mentre per pavimentazioni su cui operano aeromobili con peso inferiore a 5700kg rimane immutato il fatto che bisogna dichiarare solo la massa massima ammissibile e la pressione massima di gonfiaggio.

Il nuovo metodo introduce due concetti:l' *Aircraft Classification Rating* ACR e il *Pavement Classification Rating* PCR, definiti da normativa:

- *Aircraft classification rating (ACR): A number expressing the relative effect of an aircraft on a pavement for a specified standard subgrade strength.*
- *Pavement classification rating (PCR): A number expressing the bearing strength of a pavement for unrestricted operations.*

L'ACR definisce il valore caratteristico di un aeromobile in funzione della sua massa, del centro di gravità e della pressione di gonfiaggio degli pneumatici, mentre il PCR identifica la resistenza della pavimentazione e definisce quali aeromobili possono operare

senza restrizioni confrontando l'ACR proprio dell'aeromobile e il PCR definito per la pavimentazione, nonostante l'introduzione del nuovo metodo non è chiaro cosa si intenda per aeromobili che possono operare senza restrizioni.

Come introdotto con l'Annex 14 di ICAO, l'obiettivo è dichiarare la resistenza della pavimentazione attraverso un codice alfa-numerico in funzione del tipo di pavimentazione, della classe di resistenza del sottofondo, della pressione di gonfiaggio degli pneumatici e valutata tramite criterio tecnico o dell'aeromobile utilizzato.

Il metodo ACR-PCR viene utilizzato esclusivamente per la pubblicazione della resistenza delle pavimentazioni negli AIP (Pubblicazioni Informative Aeronautiche), come avveniva con il metodo precedente, e non per progettare o valutare strutturalmente le pavimentazioni. Così come avveniva per il metodo precedente, se l'ACR è uguale o inferiore al PCR, l'aeromobile può operare senza limitazioni legate alla pressione degli pneumatici.

$$ACR \leq PCR \quad (2.3)$$

A prescindere dal limite qui sopra imposto, la normativa prevede che qualora il traffico aumenti o cambi, per esempio, aumenta considerevolmente il volume di traffico o si aggiunge allo spettro di traffico un nuovo tipo di aereo, il PCR deve essere rivalutato. I Gestori Aeroportuali devono, per calcolare il carico ammissibile dell'aeromobile, attenersi all'uso del concetto di CDF (Cumulative Damage Factor) elemento introdotto dal nuovo metodo.

Come per il vecchio metodo, il metodo ACR-PCR utilizza una scala continua per rappresentare la resistenza delle pavimentazioni e dei carichi degli aeromobili, ma l'unità di misura cambia e la resistenza viene espressa in centinaia di kg. La scala inizia da zero e non ha un limite massimo, il che permette di rappresentare anche pavimentazioni e aeromobili molto pesanti con lo stesso sistema di classificazione.

Per rendere il metodo ACR-PCR facilmente utilizzabile, i costruttori di aeromobili forniscono nei manuali tecnici i valori di ACR calcolati per diverse masse operative, come la massa massima statica sull'apron e una massa operativa rappresentativa, e per entrambi i tipi di pavimentazione rigida e flessibile riferiti a quattro categorie standard di sottofondo.

Qualora non fossero presenti manuali tecnici degli aeromobili, l'ICAO mette a disposizione un software accessibile che consente di calcolare l'ACR per qualunque aeromobile, in funzione della massa e della posizione del baricentro, la massa usata per questi calcoli è una massa statica e non tiene conto di eventuali sovraccarichi.

Le componenti del codice alfa numerico quali: tipo di pavimentazione, categoria del sotto-

fondo, pressione massima degli pneumatici e il criterio con cui viene valutata la pavimentazione, servono per determinare la compatibilità tra le caratteristiche delle pavimentazioni e quelle degli aeromobili, attuali o in fase di sviluppo. La normativa prevede che la resistenza della pavimentazione dovrebbe essere determinata tramite una valutazione tecnica, qualora non fosse possibile, è accettabile usare il metodo basato sull'aeromobile utilizzato, ovvero quell'aeromobile che riporta il valore di ACR maggiore rispetto agli aeromobili che utilizzano la pavimentazione in funzione della categoria del sottofondo in esame. Il principio del criterio dell'aeromobile utilizzato, come si vedrà in seguito, rimane immutato rispetto al metodo precedente.

A prescindere dal tipo di pavimentazione oggetto di analisi, come per il metodo precedente, bisogna analizzare il sottofondo su cui poggia e le categorie di sottofondo sono classificate, come avveniva per il metodo precedente, in quattro livelli: alta, media, bassa e molto bassa. A differenza del metodo ACN-PCN, il nuovo metodo ACR-PCR introduce una classificazione unica delle categorie di sottofondo sia per le pavimentazioni rigide e flessibili. A ciascuna è assegnata una lettera (A, B, C, D) e un valore di riferimento di modulo elastico (E), espresso in MPa

- Codice A – Alta resistenza: Caratterizzata da un $E = 200$ MPa. Comprende tutti i valori di E pari o superiori a 150 MPa.
- Codice B – Resistenza media: Caratterizzata da un $E = 120$ MPa. Comprende valori di E pari o superiori a 100 MPa ma inferiori a 150 MPa.
- Codice C – Bassa resistenza: Caratterizzata da un $E = 80$ MPa. Comprende valori di E pari o superiori a 60 MPa ma inferiori a 100 MPa.
- Codice D – Resistenza molto bassa: Caratterizzata da un $E = 50$ MPa. Include tutti i valori di E inferiori a 60 MPa.

Nel caso in cui siano disponibili valori di CBR o di modulo di reazione del sottofondo K in funzione del tipo di pavimentazione analizzata, flessibile o rigida, è possibile ricondurli al modulo elastico del sottofondo E, che è il parametro richiesto per le verifiche strutturali e per la determinazione del PCR.

Per pavimentazioni flessibili progettate secondo il metodo CBR, il valore del CBR viene convertito in modulo elastico E utilizzando la relazione empirica (2.4) data da normativa, garantendo così la compatibilità con le procedure di progetto usate nel passato basate sul CBR:

$$E = 1500 \cdot \text{CBR (psi)} \quad \text{oppure} \quad E = 10 \cdot \text{CBR (MPa)} \quad (2.4)$$

Nel caso di pavimentazioni rigide, qualora il sottofondo sia caratterizzato dal modulo di reazione del sottofondo K , questo viene trasformato nel modulo elastico equivalente mediante la relazione(2.5):

$$E_{SG} = 20.15 \cdot k^{1.284} \quad (2.5)$$

dove (k) è espresso in pci ed (E_{sg}) in psi. In entrambi i casi, le conversioni consentono di utilizzare un unico parametro meccanico, Modulo Elastico (E) all'interno dei modelli strutturali adottati per il calcolo del CDF e del PCR.

2.3.1 Metodi di calcolo dell'ACR

Definita la struttura generale del sistema ACR-PCR, si procede alla descrizione delle modalità di determinazione dell'Aircraft Classification Rating (ACR). Come avveniva per il metodo precedente, l'ACR di un aeromobile è definito numericamente come due volte il carico ruota derivato singolo DSWL, dove il DSWL è espresso in centinaia di chilogrammi e non più in migliaia di kg come per il metodo ACN-PCN, facendo riferimento a una pressione standard degli pneumatici, che varia rispetto al metodo precedente, pari a 1,50 MPa rimanendo invariato il fatto che il DSWL dipende dalla categoria di sottofondo. Il valore di classificazione degli aeromobili (ACR) è definito per le quattro categorie standard di sottofondo, alta, media, bassa e molto bassa. La procedura descritta è schematizzata in Figura 2.17, che rappresenta graficamente le fasi di determinazione dell'Aircraft Classification Rating. In particolare, la figura mostra l'analisi dell'interazione tra il carrello dell'aeromobile e la pavimentazione, la determinazione del carico equivalente su ruota singola (DSWL) a pressione standard e la successiva definizione dell'ACR come doppio del valore di DSWL.

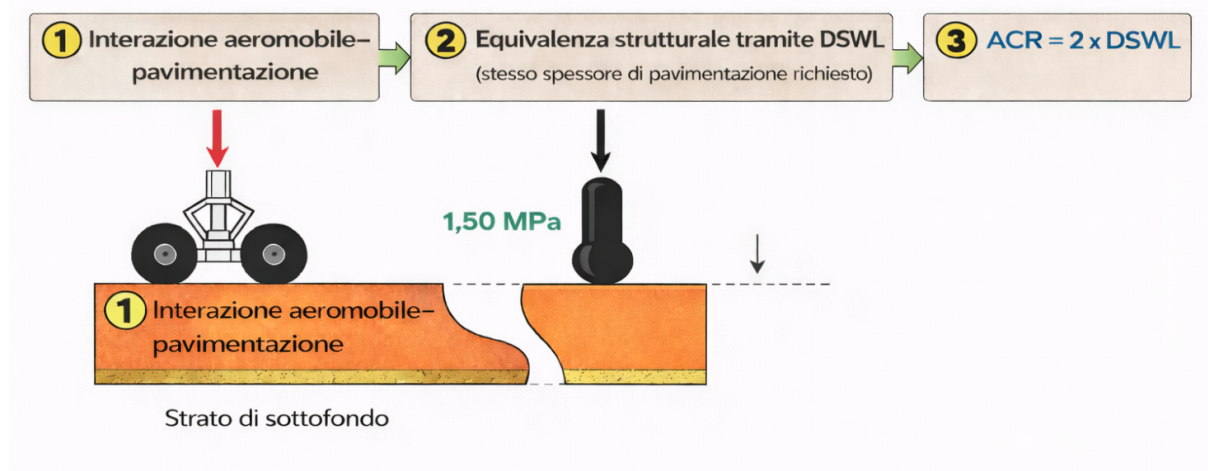


Figura 2.17: Processo per la determinazione dell'ACR

Poiché un aeromobile opera a diverse masse e condizioni del baricentro (CG), la normativa prevede che vengano adottate nei calcoli dell'ACR le seguenti convenzioni, che vengono riportate direttamente dalla norma:

1. L'ACR massimo di un aeromobile è calcolato in base alla massa e posizione del CG che produce il carico massimo sulla pavimentazione, cioè di solito alla massa massima sull'apron e con il CG corrispondente. Gli pneumatici dell'aeromobile si considerano gonfiati secondo le raccomandazioni del costruttore.
2. L'ACR varia in funzione della massa dell'aeromobile, mantenendo il CG come valore costante corrispondente all'ACR massimo, cioè di solito il CG per la massa massima sull'apron e la pressione degli pneumatici massima raccomandata per quella massa.
3. I valori ACR per condizioni specifiche sono quelli ACR che sono stati corretti per gli effetti della pressione degli pneumatici e/o della posizione del CG a una data massa dell'aeromobile.

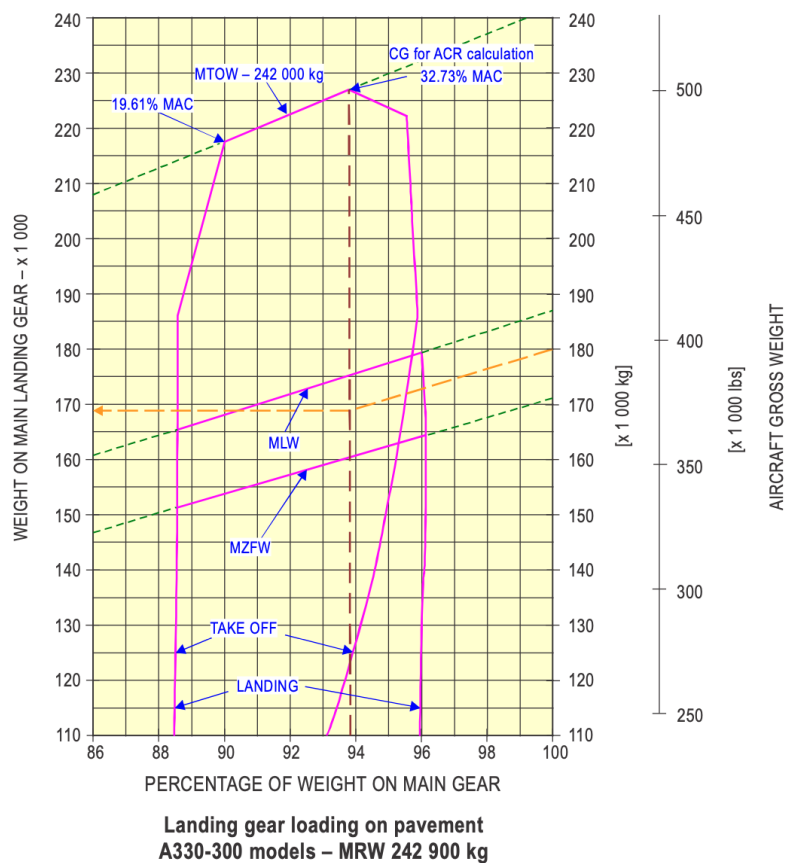


Figura 2.18: Grafico della variazione dei pesi scaricati dal carrello principale per un A330-300 Fonte:[6]

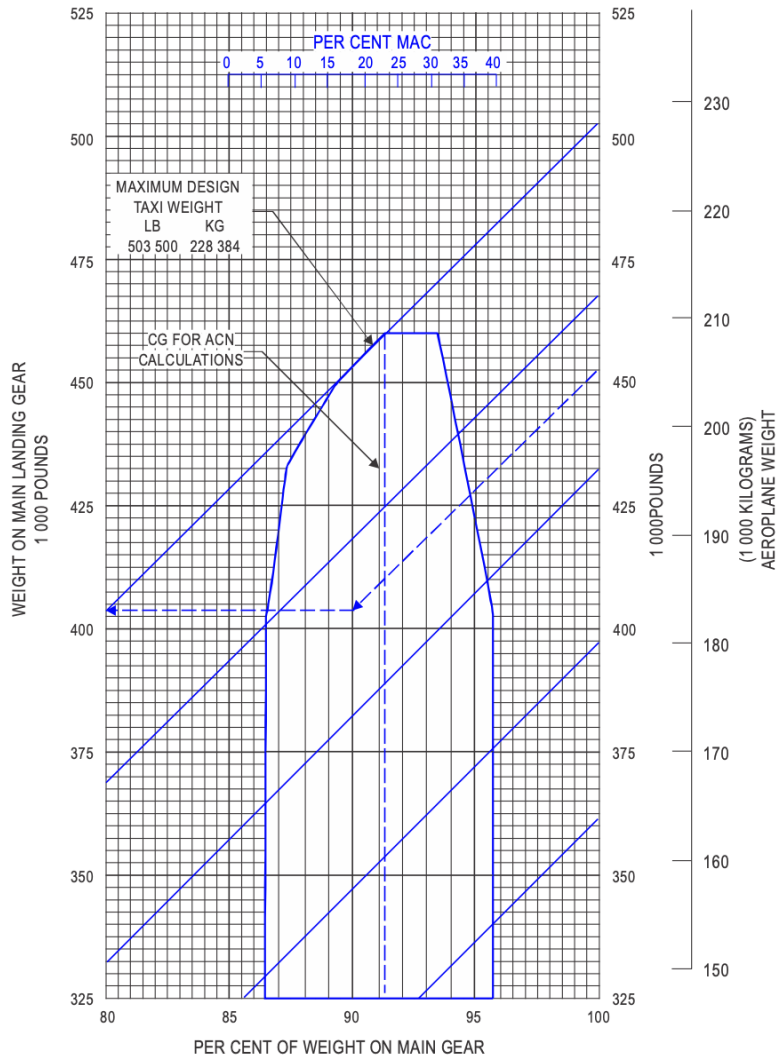


Figura 2.19: Grafico della variazione dei pesi scaricati dal carrello principale per un B787-8 Fonte:[6]

Il metodo ACR-PCR introduce un nuovo modello matematico, il modello elastico a strati (*Layered Elastic Analysis LEA*) ed è unico sia per la valutazione delle pavimentazioni rigide sia per quelle flessibili. Questo modello presuppone che diversi strati omogenei, elastici e isotropi siano disposti in fila, sia in pavimentazioni rigide che flessibili, per rappresentare la struttura della pavimentazione. Ogni strato è caratterizzato da modulo elastico E , coefficiente di Poisson ν e spessore uniforme. Gli strati sono considerati a estensione infinita orizzontalmente e il sottofondo è assunto ad estensione verticale infinita, modellato come un semi-spazio elastico infinito. Secondo quanto previsto dall'ICAO Doc 9157 – Aerodrome Design Manual Part 3 (2022), il modello LEA costituisce la base teorica anche per la determinazione dell'Aircraft Classification Rating (ACR). In particolare, la determinazione dell'ACR per pavimentazioni flessibili si basa sulla definizione dei parametri meccanici degli strati (modulo elastico, coefficiente di Poisson e spessori), assumendo

inoltre interfacce completamente aderenti tra gli strati, coerentemente con le ipotesi del modello elastico multistrato.

Per le pavimentazioni rigide si fa riferimento, oltre a una pressione standard degli pneumatici, anche a un sigma standard σ di 2,75 Mpa che fa riferimento allo stress standard del calcestruzzo, che rimane invariato rispetto al metodo precedente. La normativa definisce che in una pavimentazione rigida il primo strato generalmente PCC ha uno spessore minimo di 50,8 mm e devono valere le seguenti ipotesi: tra lo strato in calcestruzzo e la fondazione deve esserci scorrimento completo, mentre tra la fondazione e il sottofondo deve esserci adesione completa.

Per le pavimentazioni flessibili per valutare ACR si mette in relazione il DSWL a una pressione costante degli pneumatici di 1,50 Mpa con uno spessore t di riferimento calcolato per 36.500 passaggi dell'aeromobile. Lo strato in conglomerato bituminoso ha uno spessore minimo a seconda delle configurazioni dei carrelli presi in considerazione:

- Aeromobili con due o meno ruote su tutte le gambe del carrello principale $t = 76mm$
- Aeromobili con due o più ruote su tutte le gambe del carrello principale $t = 127mm$

La valutazione delle sollecitazioni nella pavimentazione è condotta mediante analisi elastica stratificata (LEA). La normativa definisce che il numero di punti di valutazione delle tensioni è pari al numero di ruote del carrello in esame, tali punti sono localizzati alla base dello strato superficiale, in corrispondenza del centro di ciascuna ruota. Lo spessore dello strato viene progressivamente modificato fino a quando la massima tensione orizzontale valutata tra tutti i punti di controllo risulta pari a 2,75 MPa, lo spessore così determinato rappresenta lo spessore di riferimento per il calcolo dell'ACR.

A partire dallo spessore di riferimento ottenuto, e utilizzando il modello LEA, viene determinato il Derived Single Wheel Load (DSWL) per il sottofondo considerato. Assumendo una pressione di gonfiaggio costante pari a 1,50 MPa, il carico della ruota singola viene regolato fino a raggiungere una tensione orizzontale massima alla base dello strato superficiale pari a 2,75 MPa.

Nel metodo ACR-PCR la valutazione della resistenza della pavimentazione è riferita esclusivamente al carrello principale di atterraggio, escludendo il contributo del carrello anteriore, in quanto su di esso grava la porzione prevalente del peso dell'aeromobile. L'analisi considera l'insieme delle ruote del carrello principale nella configurazione di massa e posizione del baricentro che determina il massimo trasferimento di carico alla pavimentazione. Nei casi in cui il carrello principale sia composto da più truck, ovvero gruppi di ruote montati su uno stesso supporto collegato alla gamba del carrello, il valore rappre-

sentativo di ACR per l'aeromobile è assunto pari a quello associato al truck che risulta più gravoso in termini di sollecitazioni indotte.

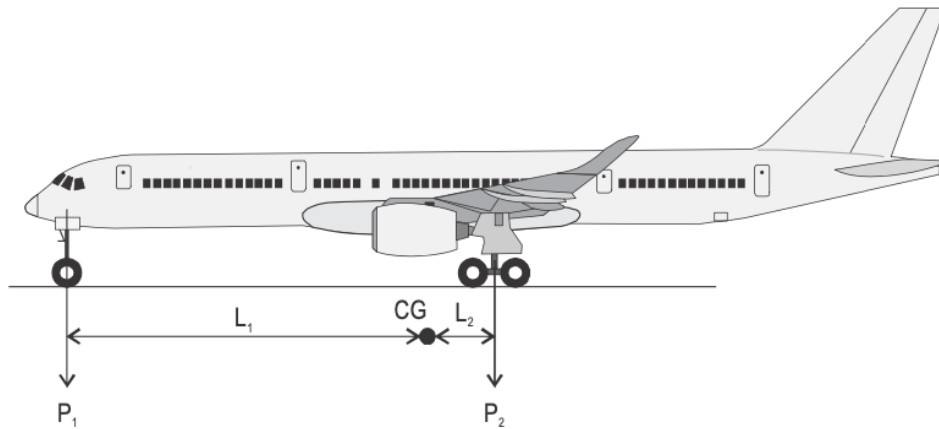


Figura 2.20: Configurazione dell'aeromobile Fonte:[6]

La risposta strutturale della pavimentazione viene analizzata mediante analisi elastica multistrato (LEA), con particolare attenzione alle tensioni e deformazioni indotte nei livelli inferiori della struttura. Le deformazioni verticali vengono valutate sulla superficie superiore dello strato di sottofondo, considerato come lo strato strutturalmente più critico. A tal fine, il modello di calcolo prevede una serie di punti di controllo, la cui distribuzione dipende dalla geometria del carrello analizzato: tali punti sono collocati in corrispondenza del centro di ciascuna ruota e all'interno di una griglia rettangolare regolare con passo di 10 cm, orientata secondo gli assi principali del carrello, figura 2.21.

Per configurazioni di carrello principale semplici, costituite da due truck, come nel caso di configurazioni dual o dual-tandem che verranno in seguito trattate, la griglia di valutazione è centrata sul baricentro geometrico di uno dei truck e si estende oltre l'ingombro delle ruote, in modo da includere anche le aree circostanti maggiormente sollecitate.

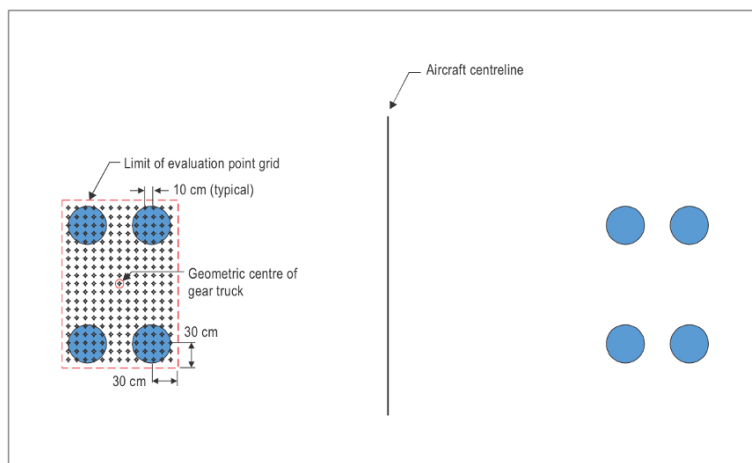


Figura 2.21: Configurazione griglia per carrelli dual o dual tandem Fonte:[6]

Per configurazioni di carrello più complesse, costituite da più di due truck che compongono l'insieme del carrello principale di atterraggio (ossia tutti gli aeromobili la cui designazione del carrello è definita complessa, secondo l'*FAA Order 5300.7 – "Standard Naming Convention for Aircraft Landing Gear Configurations"* [8]) che verrà analizzata nel capitolo successivo, l'origine della griglia di valutazione è posta nel centro geometrico dell'intero insieme del carrello di atterraggio. I limiti della griglia si estendono per 30 cm oltre le coordinate massime delle ruote su tutti i lati. Ai fini del calcolo delle coordinate del centro geometrico, tutte le ruote incluse devono essere pesate in modo uguale, indipendentemente da eventuali differenze nei carichi sulle ruote o nelle pressioni di gonfiaggio dei pneumatici, figura 2.22.

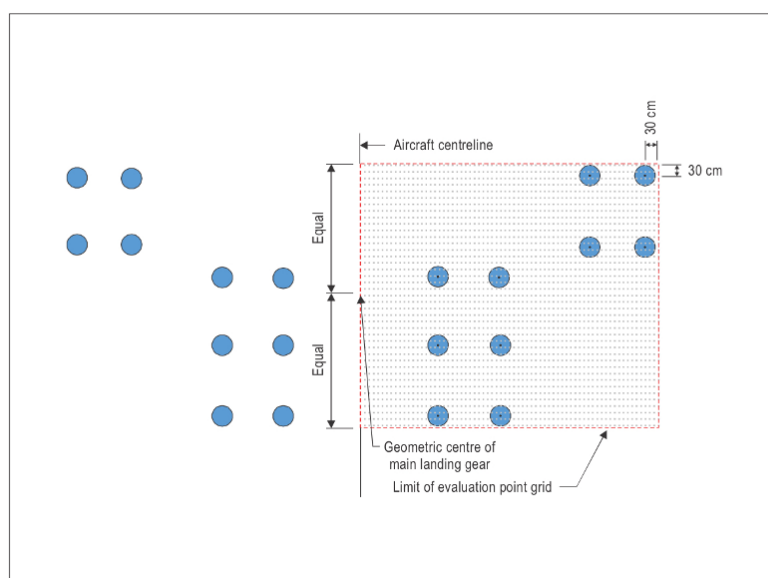


Figura 2.22: Configurazione griglia per carrelli complessi Fonte:[6]

La procedura ACR per pavimentazioni flessibili si basa sul criterio di rottura del sottofondo associato alla legge elementare di danno:

$$D_e(\varepsilon) = \frac{1}{C_e(\varepsilon)} \quad (2.6)$$

Questa legge elementare di danno è basata sul concetto di ciclo di carico, assumendo un profilo di deformazione caratterizzato da un singolo picco di deformazione massima ε . Tale ipotesi non risulta applicabile alle configurazioni con assi in tandem che producono profili di deformazione complessi, caratterizzati da possibili picchi multipli e dall'assenza di ritorno a deformazione nulla tra i picchi.

Pertanto, la legge elementare di danno viene estesa ad una formulazione integrale continua:

$$D = \int_{x=-\infty}^{x=+\infty} \left\langle \frac{dD_e(x)}{dx} \right\rangle dx \quad (2.7)$$

dove x rappresenta la posizione longitudinale lungo il carrello di atterraggio e $\langle y \rangle$ indica la parte positiva di y .

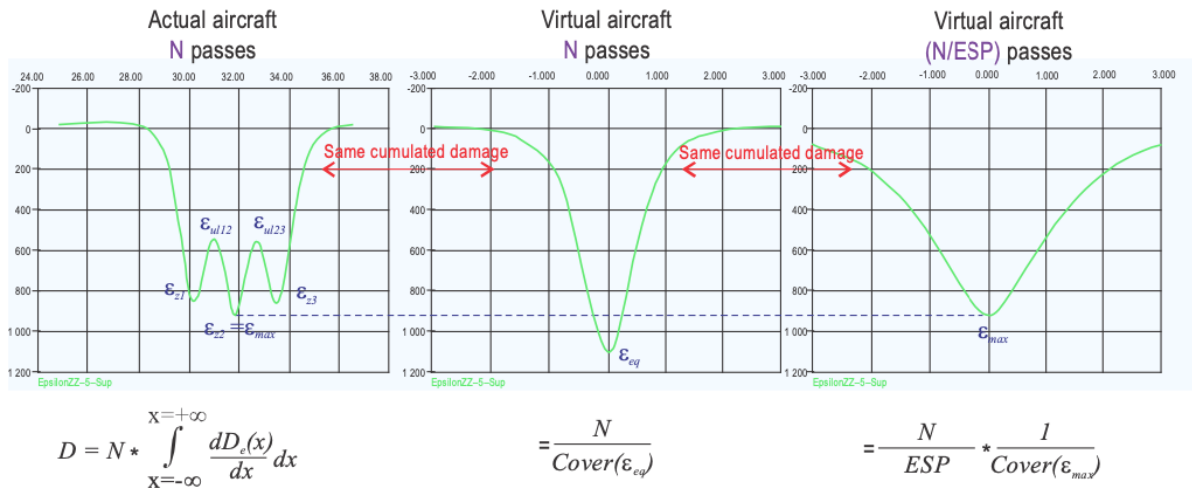


Figura 2.23: Grafici associati alla formulazione integrale della legge di danno Fonte:[6]

L'estensione della legge elementare alla formulazione integrale deriva dal fatto che il danneggiamento della pavimentazione dipende dall'intero profilo longitudinale della deformazione indotta dal passaggio del carrello. Tale profilo è influenzato dalla configurazione del carrello dell'aeromobile, in termini di numero di assi, spaziatura tra le ruote e distribuzione dei carichi. Configurazioni di carrello multi-asse producono infatti profili di deformazione caratterizzati da più picchi e da fenomeni di interazione tra carichi successivi, modificando la distribuzione spaziale della deformazione nel sottofondo e il danno accumulato nella pavimentazione.

Ne consegue che aeromobili caratterizzati da configurazioni di carrello differenti possono generare livelli di danneggiamento diversi anche a parità di carico totale applicato. Per

tale motivo, l'analisi della configurazione dei carrelli degli aeromobili assume un ruolo fondamentale nella valutazione della resistenza della pavimentazione nel sistema ACR-PCR, pertanto nel paragrafo successivo sono state analizzate tutte le configurazioni del carrello principali.

2.3.1.1 Configurazione dei carrelli degli aeromobili

Nel nuovo metodo l'interazione aeromobile-pavimentazione è valutata considerando l'aeromobile nel suo insieme e, in particolare, le modalità con cui il peso viene trasmesso alla pavimentazione attraverso il sistema di atterraggio. A tal fine, la configurazione del carrello principale consente di descrivere la distribuzione delle ruote e la modalità di trasferimento dei carichi al suolo.

Nel modello di analisi elastica stratificata (Layered Elastic Analysis, LEA), tale distribuzione è rappresentata mediante specifiche griglie di carico, definite in funzione della configurazione del carrello e della complessità del truck, distinguendo tra configurazioni semplici e complesse.

Di seguito verranno descritte le principali configurazioni del carrello, secondo la classificazione ICAO, al fine di definire la distribuzione dei carichi applicati alla pavimentazione. Nella classificazione *ICAO* la configurazione del carrello di atterraggio è definita dal numero di ruote per unità e dal numero di unità disposte in tandem lungo l'asse longitudinale. Le configurazioni elementari sono identificate come Single (S), Dual (D), Triple (T) e Quadruple (Q), corrispondenti rispettivamente a una, due, tre e quattro ruote affiancate sullo stesso asse. La ripetizione longitudinale di tali unità è indicata mediante un prefisso numerico che specifica il numero di unità in tandem (ad esempio 2S, 2D, 3D, 3Q). Questa notazione è utilizzata ai fini della definizione geometrica del carrello e della valutazione della distribuzione dei carichi applicati alla pavimentazione. Le configurazioni sono definite da ICAO nella figura 2.24.

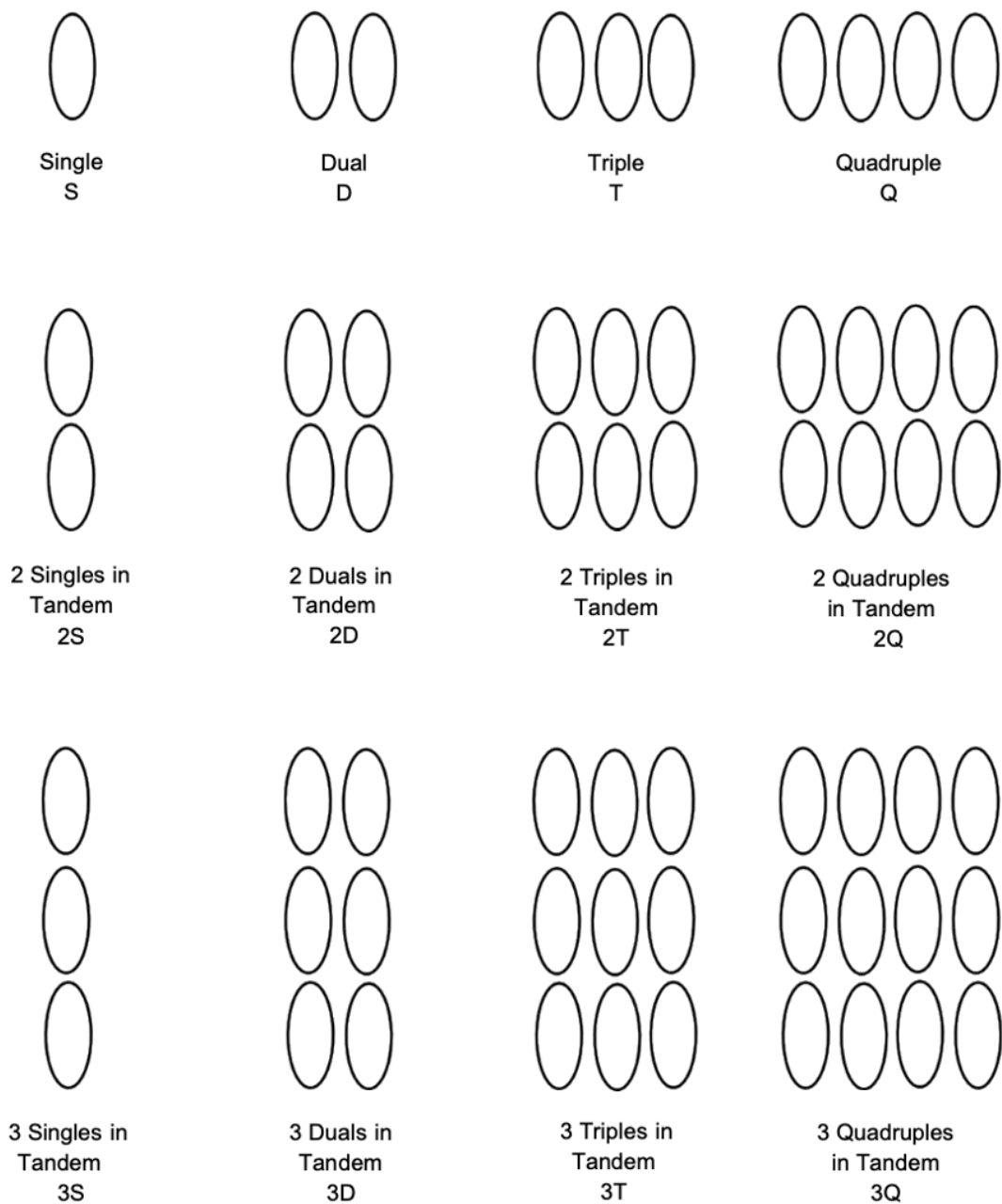


Figura 2.24: Configurazione dei carrelli secondo ICAO Fonte: [6]

Il documento *FAA Order 5300.7 – “Standard Naming Convention for Aircraft Landing Gear Configurations”*, introdotto precedentemente, definisce le configurazioni dei carrelli nel loro insieme, considerando il carrello anteriore e il carrello principale.

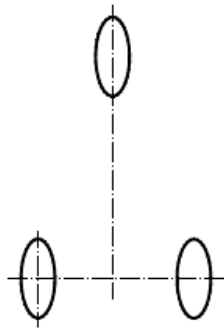


Figure 3. S - Single Wheel Main Gear with Single Wheel Nose Gear

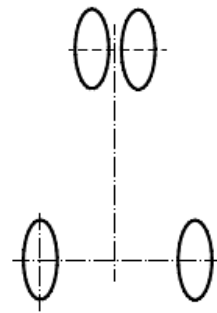


Figure 4. S - Single Wheel Main Gear with Dual Wheel Nose Gear

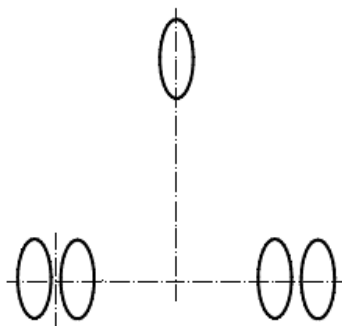


Figure 5. D - Dual Wheel Main Gear with Single Wheel Nose Gear

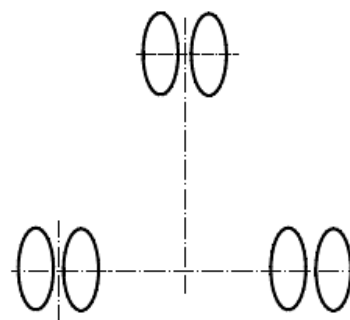


Figure 6. D - Dual Wheel Main Gear with Dual Wheel Nose Gear

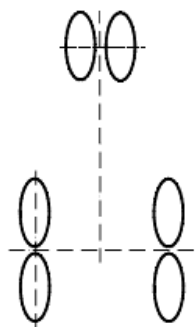


Figure 7. 2S - Two Single Wheels in Tandem Main Gear with Dual Wheel Nose Gear, Lockheed C-130

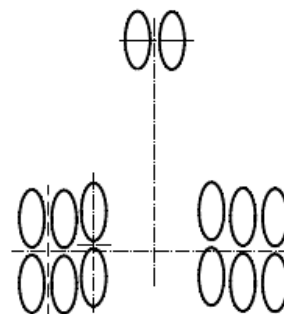


Figure 8. 2T - Two Triple wheels in Tandem Main Gear with Dual Wheel Nose Gear, Boeing C-17

Figura 2.25: Configurazione dei carrelli secondo FAA Fonte: [8]

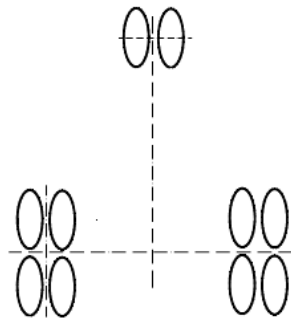


Figure 9. 2D - Two Dual Wheels in Tandem Main Gear with Dual Wheel Nose Gear

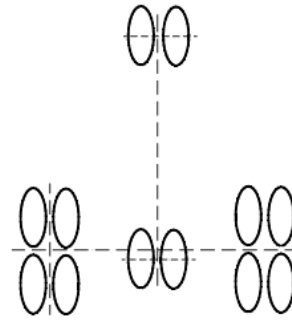


Figure 10. 2D/D1 - Two Dual Wheels in Tandem Main Gear/Dual Wheel Body Gear with Dual Wheel Nose Gear, McDonnell Douglas DC-10, Lockheed L-1011

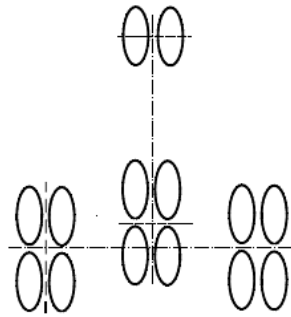


Figure 11. 2D/2D1 Two Dual Wheels in Tandem Main Gear/Two Dual Wheels in Tandem Body Gear with Dual Wheel Nose Gear, Airbus A340-600

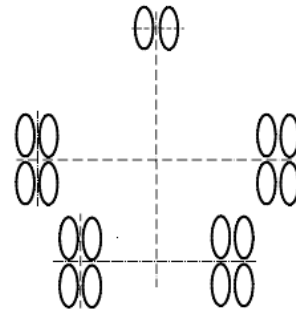


Figure 12. 2D/2D2 - Two Dual Wheels in Tandem Main Gear/Two Dual Wheels in Tandem Body Gear with Dual Wheel Nose Gear, Boeing B-747

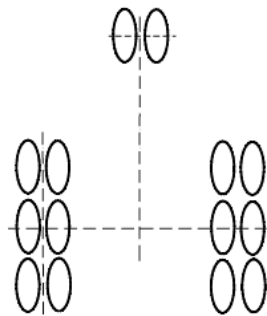


Figure 13. 3D - Three Dual Wheels in Tandem Main Gear with Dual Wheel Nose Gear, Boeing B-777

Figura 2.26: Configurazione dei carrelli secondo FAA [8]

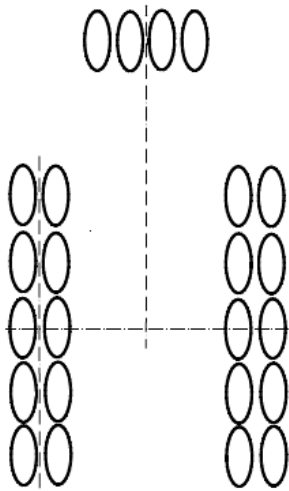


Figure 14. 5D - Five Dual Wheels in Tandem Main Gear with Quadruple Nose Gear, Antonov AN-124

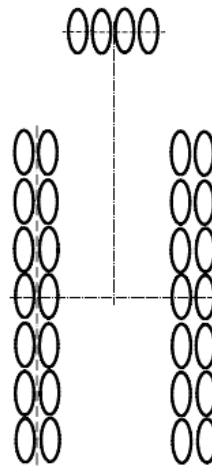


Figure 15. 7D - Seven Dual Wheels in Tandem Main Gear with Quadruple Nose Gear, Antonov AN-225

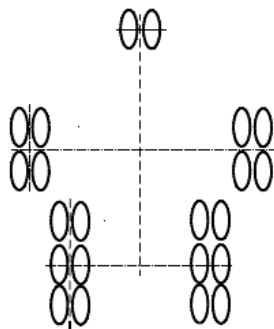


Figure 16. 2D/3D2 - Two Dual Wheels in Tandem Main Gear/Three Dual Wheels in Tandem Body Gear with Dual wheel Nose Gear, Airbus A380

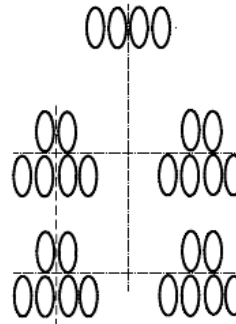


Figure 17. C5 - Complex Gear Comprised of Dual Wheel and Quadruple Wheel Combination with Quadruple Wheel Nose Gear, Lockheed C5 Galaxy

Figura 2.27: Configurazione dei carrelli secondo FAA [8]

Il documento *ICAO 9517* edizione 2022 fornisce delle tabelle, che sono state rielaborate e riportate in seguito, delle caratteristiche degli aeromobili in funzione del tipo di aeromobile, della loro massa, la percentuale di peso che grava sul carrello principale, la configurazione del carrello, il peso per ciascuna gamba, la pressione di gonfiaggio degli pneumatici e la spaziatura delle ruote. Ai fini della progettazione e della valutazione delle pavimentazioni, i seguenti interassi tra le ruote sono considerati significativi e pertanto riportati nelle tabelle ICAO:

- S — distanza tra i centri delle aree di contatto delle ruote gemellate (dual wheels);
- S_T — distanza tra gli assi delle ruote in configurazione tandem;

- S_D — distanza tra i centri delle aree di contatto delle ruote disposte diagonalmente, definita dalla seguente espressione:

$$S_D = \sqrt{S^2 + S_T^2} \quad (2.8)$$

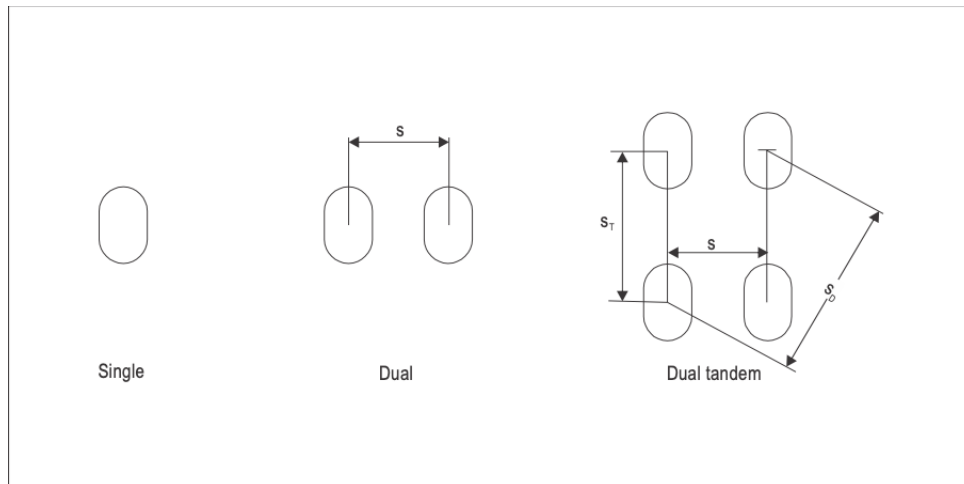


Figura 2.28: Spaziatura delle ruote secondo ICAO Fonte:[6]

Poiché la distribuzione del carico sulla pavimentazione dipende dalla configurazione del carrello e dalla disposizione geometrica delle ruote, risulta necessario descrivere le diverse tipologie di carrello e la relativa spaziatura tra le ruote. A tal fine, nel seguito sono illustrate le principali configurazioni del carrello secondo la classificazione ICAO.

La configurazione **D (Dual)** presenta, nel carrello principale, due ruote allineate trasversalmente con un determinato interasse, montate su ciascuna gamba di forza.

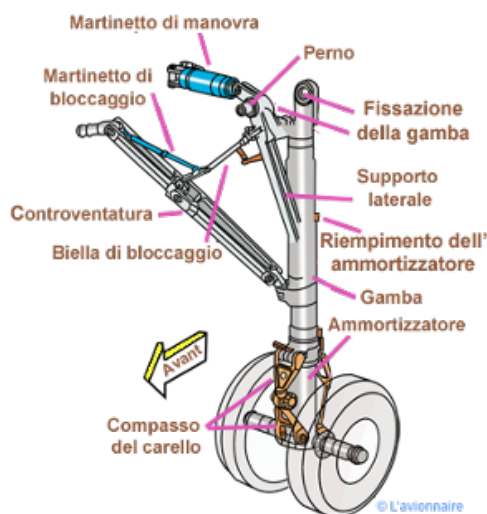


Figura 2.29: Configurazione del carrello D Fonte:[9]



Figura 2.30: Configurazione carrelli D su un aeromobile Fonte: [10]

Tabella 2.2: Caratteristiche del carrello di atterraggio – Configurazione D Fonte: [6]

Tipo	Massa (kg)	MG (%)	Cfg	Peso/gamba (kg)	Press. (MPa)	S
A318-100	68800	44.5	D	30431	1.24	93
A319-100	75900	45.8	D	34746	1.38	93
A319 CJ	76900	45.8	D	35181	1.38	93
A319neo	75900	45.8	D	34746	1.38	93
A320-100	68400	47.1	D	32215	1.28	93
A320-200	78400	46.4	D	36405	1.44	93
A320neo	79400	46.3	D	36757	1.44	93
A321-100	89400	47.5	D	42432	1.46	93
A321-200	93900	47.6	D	44717	1.50	93
A321neo	93900	47.6	D	44717	1.50	93
An-24	21000	46.6	D	9786	0.49	50
An-148-100E	43850	43.8	D	19184	1.13	58
An-158	43850	44.3	D	19404	1.13	58
B727-100	77110	47.6	D	36704	1.14	86
B727-200	78471	48.5	D	38058	1.14	86
B727-200 (Std.)	78471	48.5	D	38058	1.14	86
B727-200 (Adv.)	95254	46.5	D	44293	1.19	86
B737-100	50349	45.9	D	23110	1.08	77
B737-200/200C	58332	46.0	D	26833	1.25	77
B737-300	63503	45.4	D	28830	1.39	77

Tabella 2.3: Caratteristiche del carrello di atterraggio – Configurazione D [6]

Tipo	Massa (kg)	MG (%)	Cfg	Peso/gamba (kg)	Press. (MPa)	S
B737-400	68266	46.9	D	32016	1.28	77
B737-500	61915	46.1	D	28540	1.36	77
B737-600	66224	45.3	D	30000	1.25	86
B737-700	77791	45.8	D	35628	1.35	86
B737-800	79333	46.6	D	37001	1.41	86
B737-900	79243	46.7	D	37006	1.41	86
B737-900ER	85366	47.2	D	40293	1.52	86
BAe146-200	40600	47.1	D	19123	0.90	71
CRJ-700	34132	47.0	D	16042	0.90	62
CRJ-900/LR	38555	46.3	D	17851	1.15	62
CRJ-1000	41867	46.4	D	19426	1.37	69
Dash 8-400	29347	47.0	D	13793	1.57	50
DC-9-32	49442	46.2	D	22842	1.07	64
DC-9-51	55338	47.0	D	26009	1.19	66
E170	38790	45.6	D	17688	0.94	71
E175	40550	46.0	D	18653	0.97	71
E190	51960	46.1	D	23954	1.08	87
E195	52450	46.8	D	24547	1.06	87
Fokker 50	20820	47.8	D	9952	0.59	52
Fokker 100	44680	47.8	D	21357	0.98	59
MD-83	73028	47.4	D	34615	1.34	71
MD-87	63956	47.4	D	30315	1.17	71
MD-90-30	76430	47.0	D	35922	1.33	71

La configurazione **2D (Dual Tandem)** presenta, nel carrello principale, quattro ruote per ciascuna gamba di forza, disposte in due coppie di ruote gemellate (dual) allineate trasversalmente e organizzate longitudinalmente in configurazione tandem, con un definito interasse sia trasversale sia longitudinale.

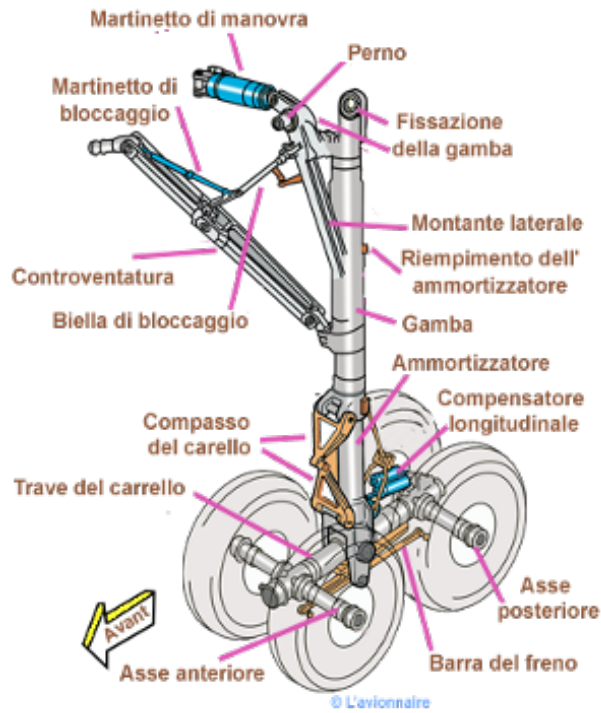


Figura 2.31: Configurazione del carrello 2D Fonte:[9]



Figura 2.32: Configurazione carrelli 2D su un aeromobile Fonte:[11]

Tabella 2.4: Caratteristiche carrello - configurazione 2D [6]

Tipo di aeromobile	Massa (kg)	MG (%)	Cfg	Peso/gamba (kg)	Press. (MPa)	S	Si	So
A300 B2	142900	47,0	2D	67118	1,28	89	140	165,6
A300 B4	165900	47,0	2D	77921	1,46	93	140	167,7
A300-600 B4	165900	47,1	2D	78216	1,28	93	140	167,7
A300-600R B4F	172600	47,5	2D	81988	1,34	93	140	167,7
A300-600R F4	171400	47,5	2D	81418	1,34	93	140	167,7
A310-200	144900	46,6	2D	66243	1,33	93	140	167,7
A310-200F	142900	46,6	2D	66662	1,33	93	140	167,7
A310-300	164900	47,2	2D	77873	1,29	93	140	167,7
A310-300F	164900	47,2	2D	77873	1,29	93	140	167,7
A320-200 (2D)	73900	47,0	2D	34969	1,22	78	101	127,5
A330-200	242900	46,3	2D	112515	1,47	140	198	242,4
A330-200F	233900	47,3	2D	110674	1,42	140	198	242,4
A330-800neo	242900	46,3	2D	112515	1,47	140	198	242,4
A330-300	242900	46,9	2D	113896	1,49	140	198	242,4
A330-900neo	242900	46,9	2D	113896	1,49	140	198	242,4
A350-900	275900	46,9	2D	129326	1,68	173,5	204	267,8
An-12	64000	46,3	2D	29651	0,83	123	49,2	132,5
B707-320C	152407	46,7	2D	71174	1,24	88	142	167,1
B720B	106594	46,4	2D	49460	1,00	81	124	148,1
B757-200	116120	45,6	2D	52951	1,26	86		142,8
B757-300	124058	46,4	2D	57563	1,38	86		142,8
B767-200/200ER	179623	45,4	2D	81549	1,31	114	142	182,1
B767-300/300ER	187334	46,2	2D	86548	1,38	114	142	182,1
B767-400ER	204570	47,0	2D	96148	1,47	116	137	179,5
B787-8	228383	45,6	2D	104143	1,57	130	146	195,5
B787-9	254692	46,2	2D	117772	1,56	152	151	214,0
DC-10-10	207745	46,7	2D	97017	1,34	137	163	212,9
IL-62M	168000	47,0	2D	78960	1,08	80	165	183,4
L-1011-500	225889	46,2	2D	104361	1,27	132	178	221,6
Tu-134A	49000	47,1	2D	23079	0,88	56	99	113,7
Tu-204CE	107500	46,3	2D	49719	1,37	80	127	150,1
Tu-204-100C	110750	46,3	2D	51277	1,37	80	127	150,1
Tu-214	110750	46,3	2D	51277	1,37	80	127	150,1
Yak-42	57500	47,0	2D	27025	0,88	62,2	98	116,0

La configurazione **2S (Twin Single)** presenta, nel carrello principale, due ruote singole montate su ciascuna gamba di forza, disposte longitudinalmente in configurazione tandem e separate da un determinato interasse.

Tabella 2.5: Caratteristiche del carrello di atterraggio – Configurazione 2S [6]

Tipo	Massa (kg)	MG (%)	Cfg	Peso/gamba (kg)	Press. (MPa)	S
An-72-100	35150	47,2	2S	16591	0,59	126
An-74TK-300	37850	46,5	2S	17600	0,69	126
L-100-30	70670	48,4	2S	17102	0,72	154



Figura 2.33: Configurazione carrelli 2S su un aeromobile Fonte:[12]

La configurazione **2D/D1** presenta, nel carrello principale, due gambe di forza: una equipaggiata con una configurazione *Dual Tandem* (2D), costituita da quattro ruote disposte in due coppie gemellate in configurazione tandem, e l'altra equipaggiata con una configurazione *Dual* (D), costituita da una singola coppia di ruote gemellate. La configurazione **2D/2D1** presenta, nel carrello principale, due gambe di forza entrambe equipaggiate con configurazione *Dual Tandem* (2D), ciascuna costituita da quattro ruote disposte da due coppie gemellate in configurazione tandem.

Tabella 2.6: Caratteristiche carrello - configurazione 2D/D1 e 2D/2D1 [6]

Tipo di aeromobile	Massa (kg)	MG (%)	Cfg	Peso/gamba (kg)	Press. (MPa)	S	Si	So
A340-200	275900	39,2	2D/D1	108219	1,49	140	198	242,4
A340-300	277400	39,4	2D/D1	109190	1,49	140	198	242,4
A340-500	375200	31,9	2D/2D1	119675	1,61	140	198	242,4
A340-500 HGW	381200	31,6	2D/2D1	120592	1,61	140	198	242,4
A340-600	369200	32,2	2D/2D1	118930	1,61	140	198	242,4
A340-600 HGW	381200	31,7	2D/2D1	121016	1,61	140	198	242,4
DC-10-30	264444	37,5	2D/D1	99167	1,22	137	163	212,9
MD-11ER	287124	38,8	2D/D1	111404	1,42	137	163	212,9
IL-96-400T	271000	31,7	2D/2D1	85907	1,23	110	140	178



Figura 2.34: Configurazione carrelli 2D-D1 su un aeromobile A340-200 Fonte:[13]



Figura 2.35: Configurazione carrelli 2D-2D1 su un aeromobile A340-500 Fonte:Web

La configurazione **3D (Triple Dual)** presenta, nel carrello principale, tre coppie di ruote gemellate per ciascuna gamba di forza, disposte longitudinalmente in configurazione tandem, per un totale di sei ruote per gamba, con definiti interassi tra le coppie di ruote.

Tabella 2.7: Caratteristiche carrello - configurazione 3D [6]

Tipo di aeromobile	Massa (kg)	MG (%)	Cfg	Peso/gamba (kg)	Press. (MPa)	S	Si	So
A350-1000	308900	47,1	3D	145427	1,52	140	140	313,0
A380-800 (Body gear)	577000	28,3	3D	163271	1,50	153 F	155 C 153 R /	372,8
A400M	141400	46,9	3D	66368	0,95	86	157 F	156 R
An-22	227500	43,6	3D	99076	0,49	115	250	275,2
B777-200/200ER	298464	45,9	3D	136995	1,41	140	145	322
B777-200LR	348722	45,9	3D	160063	1,50	140	145,3F	324
B777-300	300278	47,4	3D	142332	1,48	140	145	322
B777-300ER	352442	46,2	3D	162828	1,52	140	145,3F	324
Tu-154M	100000	42,4	3D	42400	0,98	62	F103	R98



Figura 2.36: Configurazione carrelli 3D su un aeromobile Fonte: [14]

La configurazione **2D–D2** presenta, nel carrello principale, due gambe di forza: una equipaggiata con una configurazione *Dual Tandem* (2D), costituita da quattro ruote disposte in due coppie gemellate in configurazione tandem, e l'altra equipaggiata con una configurazione *Dual* (D2), costituita da due coppie di ruote gemellate.

Tabella 2.8: Caratteristiche carrello - configurazione 2D-D2 [6]

Tipo di aeromobile	Massa (kg)	MG (%)	Cfg	Peso/gamba (kg)	Press. (MPa)	S	Si	So
B747-SP	318875	21,9	2D/2D2	69834	1,41	110	137	175,7
B747-100/100B	341555	23,1	2D/2D2	78899	1,32	112	147	184,8
B747-200B/300	379204	22,7	2D/2D2	86079	1,31	112	147	184,8
B747-400/400ER	414130	23,4	2D/2D2	96906	1,57	112	147	184,8
B747-8	449056	23,7	2D/2D2	106426	1,52	119	144	186,8



Figura 2.37: Configurazione carrelli 2D-D2 su un aeromobile Fonte:Web

2.3.2 Metodi di calcolo del PCR

Definite le configurazioni del carrello, è possibile valutare il danno strutturale indotto dalle operazioni degli aeromobili. A tal fine, il metodo ACR-PCR introduce il concetto di *Cumulative Damage Factor (CDF)*, che rappresenta la quota di vita a fatica consumata dalla pavimentazione.

Il CDF è definito come il rapporto tra il numero di ripetizioni di carico applicate e il numero di ripetizioni di carico ammissibili fino a rottura. Nel caso di un singolo aeromobile con partenze annue costanti, esso esprime il livello di sollecitazione cumulativa indotto sulla pavimentazione nel tempo.

Il numero di ripetizioni di carico ammissibili fino a rottura è determinato in funzione della massima deformazione o tensione generata dal carico in un determinato punto della struttura della pavimentazione.

$$CDF = \frac{\text{numero di ripetizioni di carico applicate}}{\text{numero di ripetizioni di carico ammissibili fino al cedimento}} \quad (2.9)$$

- $CDF = 1$: la pavimentazione ha raggiunto il limite della vita utile;
- $CDF < 1$: la pavimentazione presenta vita residua; il valore di CDF rappresenta la frazione di vita utile consumata;
- $CDF > 1$: la pavimentazione ha superato il limite di vita utile e può presentare condizioni di danneggiamento.

Nel caso in cui la pavimentazione abbia raggiunto il limite di vita utile non significa che la rottura sia effettiva, ma bensì che la pavimentazione potrebbe aver raggiunto la condizione di rottura definita dal CDF in fase di progettazione, il dimensionamento degli spessori della pavimentazione si basa sull'assunzione che la rottura avvenga per CDF uguale a uno. Poiché sulla pavimentazione è possibile che operino più aeromobili di diversa tipologia viene calcolato il CDF tramite la regola di miner che implica che il CDF è la somma totale di ogni CDF associato a ciascun aeromobile nel mix di traffico. Quindi, il CDF totale sarà uguale alla sommatoria dei CDF con indice I che va da uno a N , dove N è il numero di aeromobili presenti nello spettro di traffico.

Il grafico del danno dovuto al traffico aereo è definito a partire dal calcolo del danno cumulativo CDF nella sezione trasversale della pavimentazione, tenendo conto sia dello scostamento laterale degli aeromobili sia del mix di traffico.

Per ciascun aeromobile, il danno elementare senza scostamento laterale $D_{\text{wander}}(y, z)$ viene distribuito lateralmente mediante una legge di probabilità (gaussiana) e calcolato numericamente con il metodo a griglia, ottenendo il danno effettivo prodotto dagli aeromobili sulla pavimentazione, tenendo conto dello scostamento laterale delle traiettorie di passaggio rispetto alla linea di mezzzeria:

$$D_{\text{wander}}(y, z) = \sum_{w=1}^{n_w} P_w, D_{\text{no wander}}(y - y_w, z) \quad (2.10)$$

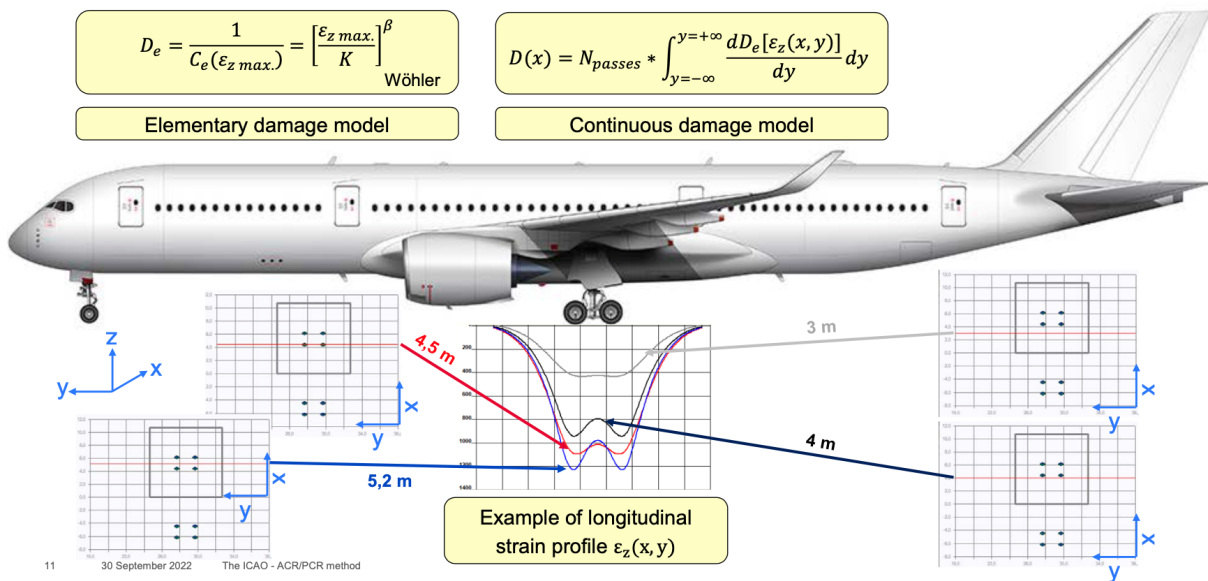


Figura 2.38: Rappresentazione grafica presa da un webinar EASA per la determinazione delle deformazioni verticali Fonte:[15]

Successivamente, il contributo di tutti gli aeromobili dello spettro di traffico viene combinato secondo la regola di Miner, sommando i danni ponderati per il numero di passaggi (N_i):

$$CDF(y_j, z) = \sum_{i=1}^m N_i, (D_{\text{wander}})_i(y_j, z) \quad (2.11)$$

HOW IS CDF CURVE CALCULATED?

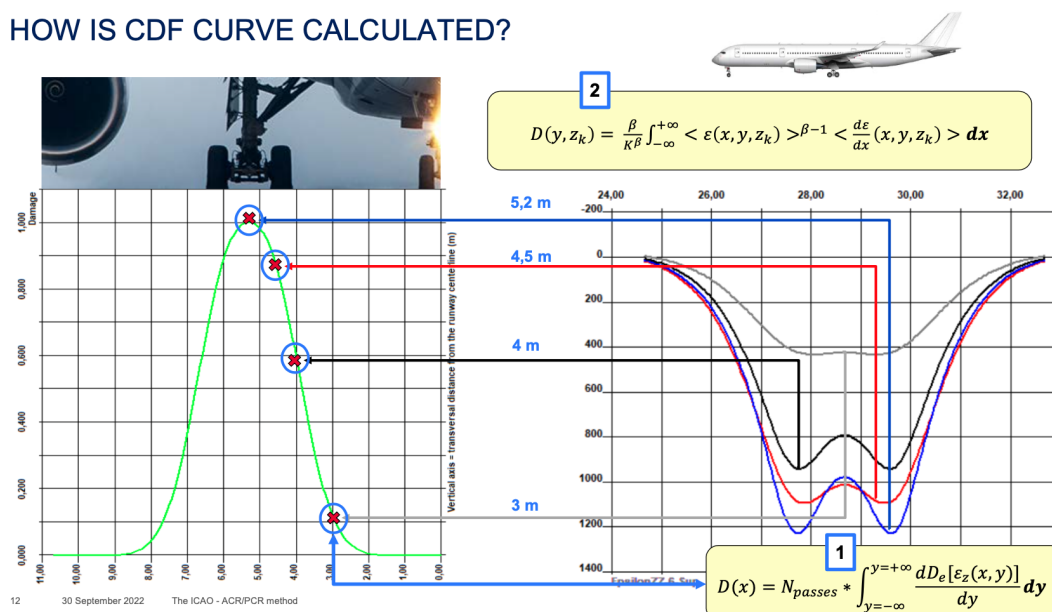


Figura 2.39: Rappresentazione grafica presa da un webinar EASA per la determinazione del CDF Fonte:[15]

Il risultato è una curva di CDF in funzione della coordinata trasversale (y) a una profondità strutturale (z) assegnata al sottofondo, che rappresenta il grafico del danno prodotto dal traffico aereo. Il massimo della curva individua la traiettoria critica e la zona maggiormente sollecitata della pavimentazione; la condizione di progetto è soddisfatta quando il valore massimo del CDF risulta minore o uguale a 1, corrispondente al raggiungimento della vita utile.

2.3.2.1 Procedura tecnica di valutazione del PCR

La procedura PCR considera le effettive caratteristiche della pavimentazione al momento della valutazione, prendendo in considerazione la reale stratigrafia della sovrstruttura esistente, lo spettro di traffico previsto per l'uso della pavimentazione nel suo ciclo di vita per nuova costruzione o per la vita residua stimata per pavimentazioni già in uso. La normativa afferma che in caso di importanti lavori di riabilitazione o cambiamenti significativi nello spettro traffico, è necessario eseguire una nuova valutazione.

I passaggi della procedura tecnica per la valutazione del PCR definiti dalla normativa sono i seguenti :

1. Raccogliere tutti i dati rilevanti relativi alla pavimentazione: spessore degli strati, moduli elastici, modulo di Poisson, ecc.
2. Definire il mix di aeromobili: per tipo, numero di movimenti o partenze, peso operativo previsto, ecc. Se il traffico avviene in più aree (pista, rullaggio, piazzale), assegnare un indice di carico laterale .
3. Calcolare gli ACR per ciascun aeromobile nel mix, con il proprio peso operativo, e registrare l'ACR massimo.
4. Calcolare il CDF massimo del mix di aeromobili e registrare il valore. Il CDF si calcola usando un modello di danneggiamento coerente con i criteri di progettazione.
5. Selezionare l'aeromobile con il contributo maggiore al CDF massimo e designarlo come aeromobile critico $A(i)$. Assegnare un indice $i = 1$.
6. Rimuovere dal traffico tutti gli aeromobili con ACR superiore a quello dell'aeromobile critico $A(i)$.
7. Regolare il numero di partenze dell'aeromobile critico fino a ottenere un CDF massimo pari a 1.0. Registrare il numero equivalente di partenze.
8. Regolare il peso dell'aeromobile critico fino a ottenere un CDF massimo pari a 1.0 con il numero di partenze calcolato sopra. Questo peso è il peso massimo totale dell'aeromobile MAGW (Maximum All-Up Gross Weight).

9. Calcolare l'ACR dell'aeromobile critico a MAGW, che sarà il valore $PCR(i)$. Se $A(i)$ è anche l'aeromobile con l'ACR massimo dal punto 3, la procedura termina.
10. Rimuovere $A(i)$ dal traffico e reintrodurre gli altri aeromobili precedentemente esclusi. Il nuovo mix di traffico si chiama lista ridotta. Incrementare l'indice $i \rightarrow i+1$.
11. Calcolare il nuovo CDF massimo per la lista ridotta e identificare il nuovo aeromobile critico $A(i)$.
12. Ripetere i passaggi da 5 a 9 per il nuovo $A(i)$. Nel passaggio 6 si usa lo stesso CDF massimo calcolato in precedenza per calcolare il numero equivalente di partenze.
13. Il PCR finale è il massimo valore tra tutti i $PCR(i)$ calcolati. L'aeromobile critico è quello associato a tale valore massimo.

I passaggi 10-13 servono per gestire situazioni dove, ad esempio, vi siano molti voli di aeromobili a corto raggio, ad esempio la norma cita il Boeing 737 e pochi voli di aeromobili a lungo raggio ma che presentano masse considerevoli ad esempio, come cita la norma, l'Airbus 350. Senza questi passaggi, l'aeromobile più piccolo verrebbe identificato come critico, e si otterrebbero restrizioni operative ingiustificate sugli aerei più grandi, che però erano già inclusi nel traffico di progetto. Se l'aeromobile critico iniziale con ACR massimo è anche quello con il valore PCR massimo, la procedura si completa in una sola iterazione. La procedura restituisce un unico valore PCR numerico, determinato in base all'aeromobile critico identificato. Di seguito si riporta il processo di flusso, presentato in normativa, per mezzo del quale si determina il PCR.

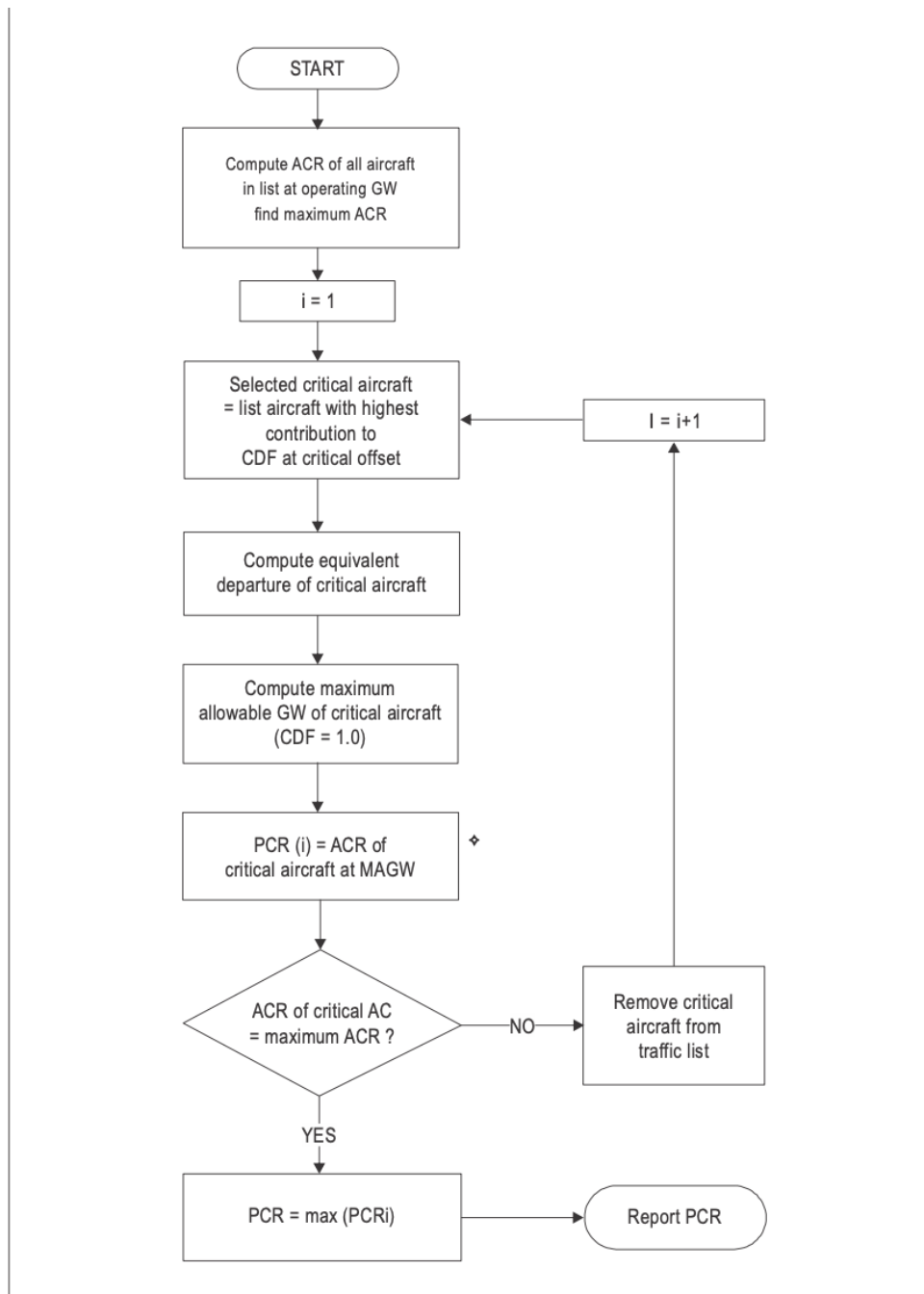


Figura 2.40: Diagramma di flusso per la determinazione del PCR secondo ICAO Fonte:[6]

2.3.2.2 Criterio dell'aeromobile utilizzato per la determinazione del PCR

Come previsto dalla normativa, qualora non fosse possibile effettuare una valutazione tecnica per la determinazione del PCR, sarà possibile adottare il criterio dell'aeromobile utilizzato, il cui uso è strettamente legato a vincoli finanziari e tecnici che impediscono di utilizzare il criterio tecnico. Il criterio dell'aeromobile utilizzato si basa sulla considerazione dello spettro di traffico che opera sulla pavimentazione e tra gli aeromobili che operano si individua l'aeromobile più pesante che utilizza regolarmente la pavimentazione, individuando la massa massima statica e il numero di operazioni effettuate. Poiché il

criterio si basa sulla valutazione degli aeromobili che operano sulla pavimentazione stessa, la normativa afferma che a monte è necessario valutare la condizione della pavimentazione nel caso in cui siano presenti fessurazioni, deformazioni o segni di usura che potrebbero indicare necessità di manutenzione. A fronte di questo sarà necessario anche considerare l'età della pavimentazione poiché gli effetti del sovraccarico su una pavimentazione nuova potrebbero non essere ancora evidenti, mentre su una pavimentazione molto vecchia potrebbero essersi già manifestati segni di degrado.

L'analisi della pavimentazione nel caso di adozione del criterio dell'aeromobile utilizzato deve anche comprendere la valutazione di aree ad uso intenso, rispetto a quelle a uso ridotto, come ad esempio all'interno all'esterno delle tracce di passaggio delle ruote. La valutazione della pavimentazione deve quindi comprendere un'analisi visiva delle aree deboli o critiche e queste zone devono essere analizzate per definire il tasso di deterioramento sotto il traffico esistente, per individuare il grado di sovraccarico è necessario definire il danno dovuto alla pressione di gonfiaggio dei pneumatici e se necessario individuare le limitazioni da attuare.

Come per il criterio tecnico di valutazione, è necessario definire la tipologia di pavimentazione, la classe di resistenza del sottofondo e la pressione di gonfiaggio degli pneumatici perché per definire il PCR secondo il criterio dell'aeromobile utilizzato bisogna individuare gli ACR degli aeromobili che operano sulla pavimentazione in funzione delle caratteristiche della pavimentazione. Gli ACR possono essere definiti tramite l'utilizzo di software di simulazione. Definiti gli ACR propri degli aeromobili, si individua l'aeromobile operativo più pesante che utilizza in modo continuativo la pavimentazione, che viene assunto come aeromobile critico per il criterio dell'aeromobile utilizzato. L'ACR dell'aeromobile critico viene riportato come PCR della pavimentazione.

Sulla pavimentazione potranno operare quindi aeromobili con ACR inferiore o uguale al PCR definito. Qualora nel futuro le condizioni di traffico dovessero cambiare, allora per questo criterio, come dice la normativa, sarà assolutamente necessario rivalutare il PCR poiché questo criterio presuppone che l'intensità di utilizzo della pavimentazione sia simile a quella utilizzata nel momento della valutazione della resistenza della pavimentazione.

2.3.3 Confronto tra i due metodi

Tabella 2.9: Confronto ACN-PCN vs ACR-PCR

ACN-PCN	ACR-PCR
ACN = Aircraft Classification Number	ACR = Aircraft Classification Rating
PCN = Pavement Classification Number	PCR = Pavement Classification Rating
Applicabile fino al 27 novembre 2024	Applicabile dal 28 novembre 2024

Analogie: Entrambi i metodi sono da adottare nel caso di pavimentazioni utilizzate da aeromobili con massa statica superiore a 5700kg.

Differenze: Viene introdotta una nuova terminologia.

Tabella 2.10: Elementi del codice alfa-numerico

ACN-PCN	ACR-PCR
Applicazione per aeromobili con massa statica > 5700 kg	Applicazione per aeromobili con massa statica > 5700 kg
Pavimentazioni flessibili e rigide (composite da specificare)	Pavimentazioni flessibili e rigide (composite da specificare)
Classi sottofondo: A, B, C, D	Classi sottofondo: A, B, C, D
Pressione pneumatici: W, X, Y, Z	Pressione pneumatici: W, X, Y, Z

Analogie: Struttura del codice alfanumerico identica (tipologia di pavimentazioni analizzate, classi di sottofondo, classi di pressione degli pneumatici).

Differenze: La differenza principale risiede nella classificazione delle classi del sottofondo, in funzione del parametro k per le rigide e CBR per le flessibili nel caso del metodo ACN-PCN e unica per entrambe le tipologia delle pavimentazione tramite il Modulo elastico E per il metodo ACR-PCR.

Tabella 2.11: Classificazione del sottofondo nei sistemi ACN-PCN e ACR-PCR

Resistenza sottofondo	ACN-PCN		ACR-PCR
	Rigide k [MN/m ³]	Flessibili CBR [%]	Modulo elastico E [MPa]
Alta (A)	$k \geq 120$	CBR ≥ 13	$E \geq 150$
Media (B)	$60 \leq k < 120$	$8 \leq \text{CBR} < 13$	$100 \leq E < 150$
Bassa (C)	$25 \leq k < 60$	$4 \leq \text{CBR} < 8$	$60 \leq E < 100$
Molto bassa (D)	$k < 25$	CBR < 4	$E < 60$

Tabella 2.12: Modellazione strutturale

ACN-PCN	ACR-PCR
Rigide: teoria di Westergaard (fondazione di Winkler), $\sigma_{std} = 2.75$ MPa	Unico modello: LEA (Layered Elastic Analysis)
Flessibili: metodo CBR basato su soluzione di Boussinesq	Strati omogenei, elastici, isotropi, spessore finito; sottofondo semi-infinito
Pavimentazioni “standard” e parametri semplificati	Modello fisico reale della pavimentazione (spessori e parametri meccanici reali)

Analogie: Entrambi sono metodi analitici di classificazione.

Differenze: ACN-PCN semplifica tramite strutture standard con spessori equivalenti; ACR-PCR si basa sulla risposta multistrato reale degli strati definiti da stratigrafia e parametri meccanici.

Tabella 2.13: Criteri di valutazione

ACN-PCN	ACR-PCR
Valutazione Tecnica (T)	Valutazione Tecnica (T)
Valutazione Operativa / Using Aircraft Method (U)	Valutazione Operativa / Using Aircraft Method (U)

Analogie: Entrambi prevedono due metodi di valutazione: tecnica (T) e operativa (U) e la valutazione si basa sulla valutazione delle operazioni ammesse per gli aeromobili sulle pavimentazioni.

Differenze: La differenza principale si basa sul fatto che il nuovo metodo utilizza lo stesso modello matematico moderno usato anche nelle fasi di design cosa che non avveniva per il vecchio metodo.

Tabella 2.14: Determinazione del numero di aeromobile (ACN vs ACR)

ACN	ACR
$ACN = 2 \cdot DSWL$	$ACR = 2 \cdot DSWL$
Unità di misura migliaia di kg	Unità di misura centinaia di kg
Pressione standard pneumatico: 1.25MPa	Pressione standard pneumatico: 1.50MPa
Riferimento a 10.000 passaggi	Riferimento a 36.500 passaggi
Equivalenza con carico su ruota singola a pressione standard	Equivalenza con carico su ruota singola a pressione standard

Analogie: Stessa forma concettuale basata su *DSWL* e confronto con ruota singola standard.

Differenze: Unità/scala, pressione standard e numero di passaggi di riferimento diversi.

Tabella 2.15: Determinazione PCN vs PCR con metodo operativo (U)

PCN (U)	PCR (U)
PCN = max ACN degli aeromobili autorizzati	PCR = max ACR degli aeromobili autorizzati
Categoria sottofondo non critica; se ignota si raccomanda B	Categoria sottofondo non critica; se ignota si raccomanda B
Frequenza consigliata: 10000 passaggi equivalenti	Frequenza consigliata: 36000 passaggi equivalenti

Analogie: In entrambi (U) si riporta il massimo valore di ACN o ACR dell'aeromobile critico individuato nella mix di traffico operativa; la classe di sottofondo individuata o B se ignota.

Differenze: Soglie di frequenza consigliate diverse (10000 passaggi eq. vs 36000 passaggi).

Tabella 2.16: Valutazione tecnica (T): logica di calcolo e CDF

PCN (T)	PCR (T)
Valutazione semplificata: spessore totale equivalente	Analisi strutturale con parametri meccanici reali (spessori, E , ν)
Sottofondo k (rigide) o CBR (flessibili)	Sottofondo tramite modulo elastico E
CDF usato per individuare aeromobile gravoso nel mix	CDF usato per ricavare l'aeromobile equivalente critico e MAGW con $CDF = 1$
PCN finale eguagliando carico massimo con ACN aeromobile critico	PCR tecnico = ACR dell'aeromobile critico al MAGW

Analogie: Entrambi usano il mix di traffico e individuano un aeromobile critico.

Differenze: Nel sistema nuovo il CDF guida MAGW e capacità; nel vecchio sistema è legato a procedure semplificate e spessore equivalente.

Tabella 2.17: Limitazioni operative

ACN-PCN	ACR-PCR
Ammesso sovraccarico: PCN+10% (flessibili), PCN+5% (rigide)	Ammesso sovraccarico: PCR+10% (flessibili e rigide)
Operazioni in sovraccarico < 5% dei movimenti annui	Operazioni in sovraccarico < 5% dei movimenti annui

Analogie: Soglia sulle operazioni in sovraccarico: 5% annuo.

Differenze: Percentuali sovraccarico ammissibili differiscono per rigide

2.4 Federal Aviation Administration

Il sistema ACN-PCN così come il metodo ACR-PCR sono stati sviluppati dall'International Civil Aviation Organization (ICAO) come metodi internazionali standardizzati per esprimere la compatibilità strutturale tra aeromobili e pavimentazioni aeroportuali. La Federal Aviation Administration (FAA) adotta integralmente tali sistemi, senza modificarne i principi fondanti, fornendo tuttavia procedure applicative, criteri di valutazione e strumenti di calcolo finalizzati alla determinazione della resistenza delle pavimentazioni.

In questo contesto, le differenze tra l'impostazione ICAO e quella FAA non riguardano la definizione concettuale dei metodi, bensì il livello di dettaglio con cui vengono trattati alcuni aspetti applicativi, in particolare la valutazione strutturale della pavimentazione e la rappresentazione del traffico aereo. L'ICAO definisce il quadro normativo e concettuale di riferimento, mentre la FAA sviluppa modalità operative che consentono di applicare tale quadro a pavimentazioni reali caratterizzate da stratigrafie complesse, materiali eterogenei e traffico non uniforme.

Nelle pratiche correnti di progettazione e verifica della resistenza delle pavimentazioni aeroportuali, l'utilizzo di software sviluppati dalla Federal Aviation Administration (FAA) costituisce un riferimento tecnico di primaria importanza a livello internazionale. In particolare, nella presente tesi verranno impiegati, sia FAARFIELD, strumento attualmente adottato dalla FAA per il dimensionamento e la valutazione strutturale delle pavimentazioni aeroportuali, sia COMFAA, software storico utilizzato per l'applicazione del metodo Aircraft Classification Number – Pavement Classification Number (ACN-PCN).

Poiché verranno utilizzati i software COMFAA e FAARFIELD è necessario un approfondimento normativo di quanto è riportato da FAA. COMFAA è il software che attraverso l'utilizzo del metodo ACN-PCN permette di determinare la resistenza dichiarata delle pavimentazioni a fini operativi, mentre FAARFIELD è il software che recepisce modelli di calcolo più avanzati, fondati sull'Analisi Elastico-Multistrato (Layered Elastic Analysis – LEA) e sul concetto di danno cumulativo che sono la base concettuale dell'attuale metodo ACR-PCR.

In tale contesto, l'analisi delle *Advisory Circular FAA 150/5335-5C* [16] e *150/5335-5D* [17] è necessario per comprendere i dati di input utilizzati dai software. La AC 150/5335-5C fornisce le linee guida per la determinazione e la pubblicazione del Pavement Classification Number (PCN) secondo il metodo ICAO, così come recepito e applicato dalla FAA, costituendo il riferimento normativo diretto per l'utilizzo di COMFAA. La successiva AC 150/5335-5D rappresenta invece l'evoluzione del documento, recependo l'aggiornamento dei modelli teorici e delle procedure di calcolo alla base dei software FAA

di nuova generazione, tra cui FAARFIELD.

L'analisi congiunta di tali Advisory Circular consente pertanto di:

- ricostruire l'evoluzione storica e metodologica dei metodi recepiti da FAA;
- comprendere le differenze concettuali e operative tra COMFAA e FAARFIELD;
- interpretare in modo corretto i risultati relativi alla resistenza delle pavimentazioni ottenuti con entrambi gli strumenti;

Di conseguenza, lo studio approfondito delle *Advisory Circular FAA 150/5335-5C e 150/5335-5D* non costituisce un semplice inquadramento normativo, ma rappresenta la base per comprendere i casi studio che verranno affrontati successivamente fondati sui risultati ottenuti dai due software COMFAA e FAARFIELD.

2.4.1 Advisory Circular 150/5335-5C

In conformità ai requisiti dell'Organizzazione Internazionale dell'Aviazione Civile (ICAO) relativi alla comunicazione della resistenza delle pavimentazioni aeroportuali, la Federal Aviation Administration (FAA) ha sviluppato l'Advisory Circular 150/5335-5C e strumenti di calcolo finalizzati all'applicazione del metodo Aircraft Classification Number – Pavement Classification Number (ACN-PCN).

L'ICAO richiede infatti agli Stati membri di riportare, tra i dati aeronautici ufficiali dell'aerodromo, la resistenza delle pavimentazioni di piste, vie di rullaggio e piazzali, utilizzando il metodo ACN-PCN per le infrastrutture destinate ad aeromobili con massa superiore a 12.500 libbre (5.700 kg). In tale ambito, la FAA recepisce il metodo ICAO e ne disciplina l'applicazione attraverso specifiche linee guida tecniche, che definiscono le modalità di valutazione e di pubblicazione del Pavement Classification Number (PCN).

Le Advisory Circular FAA forniscono quindi indicazioni operative:

- Sulle procedure di determinazione del PCN, distinguendo tra valutazioni di tipo tecnico e valutazioni basate sull'esperienza operativa;
- La classificazione della pavimentazione deve essere in funzione della tipologia strutturale, della categoria di sottofondo e delle condizioni operative;
- le modalità di comunicazione della resistenza della pavimentazione, tramite il codice alfa-numerico definito da ICAO.

FAA ha storicamente sviluppato strumenti dedicati all'applicazione del metodo ACN-PCN, tra cui il software COMFAA, utilizzato per la determinazione della resistenza dichiarata della pavimentazione secondo il metodo ICAO. Tali strumenti consentono di

utilizzare i requisiti normativi di ICAO tramite una procedura di calcolo standardizzata, assicurando uniformità nella valutazione e nella comunicazione delle informazioni sulla resistenza delle pavimentazioni aeroportuali.

Per le pavimentazioni destinate ad aeromobili con massa inferiore a 12.500 libbre (5.700 kg), il metodo di comunicazione della resistenza rimane invariato, in accordo con quanto previsto dalla normativa ICAO e recepito dalla FAA.

In funzione delle definizioni alla base del sistema ACN-PCN, adottato dall'ICAO, risulta necessario analizzare le modalità con cui tale sistema viene recepito e applicato dalle Autorità Aeronautiche. In particolare, la Federal Aviation Administration (FAA) ha integrato il metodo ACN-PCN all'interno del proprio quadro normativo, definendo specifiche linee guida tecniche finalizzate alla determinazione e alla pubblicazione del Pavement Classification Number (PCN), in coerenza con gli standard ICAO e con le esigenze operative del sistema aeroportuale statunitense.

Ai fini della comprensione del metodo Aircraft Classification Number – Pavement Classification Number (ACN-PCN), si riportano di seguito le definizioni fondamentali adottate dall'ICAO e recepite dalla FAA. L' Aircraft Classification Number ACN è un indice numerico che esprime l'effetto relativo di un aeromobile operativo sulla pavimentazione, considerando una specifica configurazione operativa dell'aeromobile e una resistenza standard del sottofondo. Il valore di ACN dipende dal peso dell'aeromobile, dalla configurazione del carrello, dalla pressione di gonfiaggio degli pneumatici, dal tipo di pavimentazione e dalla categoria di sottofondo.

Il Pavement Classification Number PCN è un indice numerico che esprime la resistenza della pavimentazione per operazioni aeronautiche senza limitazioni operative. La normativa afferma che il PCN rappresenta una resistenza dichiarata ai fini operativi e non costituisce un valore di progetto strutturale della pavimentazione.

Il sistema ACN-PCN definiva, come riportato precedentemente da ICAO, che una pavimentazione caratterizzata da un determinato valore di PCN, possa supportare un aeromobile il cui ACN sia minore o uguale al valore di PCN della pavimentazione stessa.

Alla luce di quanto sopra, il sistema ACN-PCN era da intendersi esclusivamente come uno strumento di supporto alla gestione operativa delle pavimentazioni aeroportuali, finalizzato alla valutazione dell'accettabilità delle operazioni degli aeromobili. Il metodo non ha finalità né di progettazione né di valutazione strutturale delle pavimentazioni e non definisce le procedure o i criteri tecnici da adottare per il dimensionamento o l'analisi strutturale delle pavimentazioni, che restano demandati a metodologie specifiche e

indipendenti dal sistema ACN-PCN.

2.4.1.1 Aircraft Classification Number (ACN) secondo FAA

La classificazione, secondo FAA, del metodo ACN-PCN prevedeva quindi l'analisi dell'Aircraft Classification Number (ACN) che rappresentava una misura dell'effetto strutturale indotto da un aeromobile su una pavimentazione aeroportuale ed veniva determinato solitamente dal costruttore dell'aeromobile sulla base di condizioni operative standardizzate. Il calcolo dell'ACN richiedeva quindi una descrizione dettagliata delle caratteristiche operative dell'aeromobile, tra cui la massa massima operativa, la configurazione e la geometria del carrello di atterraggio, la distribuzione dei carichi sulle ruote, l'interasse tra le ruote e la pressione di gonfiaggio dei pneumatici.

Nel sistema ACN-PCN così come viene riportato da *ICAO nel DOC 9157 (1983)*, l'ACN viene valutato separatamente per pavimentazioni rigide e flessibili, assumendo quattro categorie standard di resistenza del sottofondo, definite rispettivamente in termini di modulo di reazione del sottofondo k per pavimentazioni rigide e di California Bearing Ratio (CBR) per pavimentazioni flessibili. Per le pavimentazioni rigide, il comportamento strutturale era modellato mediante la soluzione di Westergaard per una trave elastica su sottofondo di Winkler, considerando una tensione di progetto del calcestruzzo assunta pari a 2,75 MPa. Per le pavimentazioni flessibili, invece, il metodo CBR era basato sulla soluzione di Boussinesq per un mezzo elastico omogeneo, isotropo e semi-infinito.

Ai fini della determinazione dell'ACN, l'effetto del carrello reale dell'aeromobile veniva ricondotto a un carico equivalente a ruota singola (Derived Single Wheel Load, DSWL), tale da produrre nella pavimentazione lo stesso livello di sollecitazione del caso reale. L'ACN era quindi definito come il doppio del carico equivalente a ruota singola, espresso in migliaia di chilogrammi, calcolato per una pressione di riferimento dei pneumatici pari a 1,25 MPa.

Per garantire la confrontabilità dei valori, il sistema ACN-PCN adottava una frequenza operativa standard pari a 10.000 coverages. Il concetto di coverage non coincide con il numero di passaggi effettivi dell'aeromobile, ma rappresenta il numero di applicazioni di carico necessarie affinché un punto della pavimentazione sia sollecitato una volta con il carico completo, tenendo conto del fenomeno della dispersione laterale delle traiettorie.

2.4.1.2 Pavement Classification Number (PCN) secondo FAA

Per utilizzare il metodo ACN-PCN, come avveniva con ICAO, è necessario analizzare il Pavement Classification Number (PCN) che rappresentava l'indice numerico della resistenza di una pavimentazione ed è utilizzato esclusivamente per fini operativi. Il PCN

non costituiva un parametro di progetto, ma consentiva di stabilire se un aeromobile poteva operare su una determinata pavimentazione senza limitazioni operative. In base al sistema ACN-PCN, qualsiasi aeromobile caratterizzato da un valore di ACN minore o uguale al PCN pubblicato era considerato compatibile con la pavimentazione, eventuali restrizioni sulla pressione di gonfiaggio dei pneumatici dovevano essere pubblicate.

Secondo la guida FAA AC 150/5335-5C, la determinazione del PCN poteva essere effettuata mediante due procedure introdotte precedentemente con la trattazione di ICAO: l'Using Aircraft Method, criterio dell'aeromobile utilizzato e il Technical Evaluation Method, criterio tecnico di valutazione. Entrambi gli approcci conducevano a un valore di PCN conforme al sistema ICAO, ma differivano per il livello di analisi delle condizioni meccaniche.

Il criterio dell'aeromobile utilizzato, *Using Aircraft Method*, si basava sull'individuazione dell'aeromobile con il valore di ACN più elevato tra quelli che operavano regolarmente sulla pavimentazione, assumendo che il numero totale di operazioni fosse uguale a 10.000 passaggi dell'aeromobile individuato come critico, per assumere tale valore come PCN. Inoltre FAA affermava che questo approccio nella valutazione della resistenza poteva indurre a sovrastime della resistenza della pavimentazione qualora si utilizzasse un aeromobile molto pesante ma con basse frequenze di utilizzo, quindi la normativa raccomandava che la frequenza minima fosse uguale a 1000 passaggi dell'aeromobile che presentava il valore più alto di ACN. Questo metodo non richiedeva una conoscenza dettagliata della struttura della pavimentazione e si fondava sull'ipotesi che l'infrastruttura fosse in grado di sostenere l'intero traffico considerato senza restrizioni di peso.

Il criterio tecnico, *Technical Evaluation Method*, rappresentava il criterio attraverso cui la resistenza della pavimentazione veniva valutata mediante un'analisi strutturale esplicita, condotta con criteri analoghi a quelli utilizzati nella progettazione delle pavimentazioni aeroportuali. In questo approccio, il PCN non era assunto direttamente come il massimo ACN del traffico operativo, ma derivava dalla determinazione di un "*allowable load rating*", ossia del carico massimo ammissibile che la pavimentazione poteva sostenere per una frequenza operativa ritenuta rappresentativa della vita utile residua.

Per rendere confrontabili pavimentazioni caratterizzate da stratigrafie e materiali differenti, così come veniva introdotto da ICAO nel doc 9157 del 1983, il metodo tecnico introduceva il concetto di spessore equivalente, attraverso il quale la sezione reale viene ricondotta a una sezione strutturale di riferimento standardizzata. Nel caso delle pavimentazioni flessibili, la struttura reale viene trasformata in una sezione equivalente composta da uno strato superficiale in conglomerato bituminoso, uno strato di fondazione granulare di qualità elevata e uno strato di sottofondo caratterizzato da un valore CBR standardiz-

zato. Tale trasformazione avveniva mediante coefficienti di equivalenza strutturale, che consentivano di convertire gli spessori degli strati reali in uno spessore totale equivalente rappresentativo.

Per le pavimentazioni rigide, il concetto di spessore equivalente era applicato mediante la determinazione di uno spessore della lastra in calcestruzzo, tenendo conto sia dello spessore reale sia del contributo degli strati di fondazione e di sottofondo. Il modulo di reazione del sottofondo (k-value) veniva corretto per considerare la presenza di strati migliorati, mentre eventuali sovrastrutture bituminose venivano convertite in uno spessore equivalente di calcestruzzo secondo i criteri derivati dalla teoria di Westergaard. In questo modo, la pavimentazione reale veniva ricondotta a una configurazione strutturale equivalente.

Una volta definita la sezione equivalente, la valutazione del PCN procedeva mediante l'individuazione del carico massimo ammissibile associato a un aeromobile rappresentativo, a partire dalla configurazione del carrello, dalla pressione di gonfiaggio dei pneumatici e dalla frequenza operativa. Il concetto di coverage rappresenta il numero di applicazioni complete di carico necessarie affinché un punto della pavimentazione sia sollecitato una volta con il carico massimo, tenendo conto della dispersione laterale delle traiettorie degli aeromobili (aircraft wander). La verifica strutturale non è basata sul collasso immediato, ma sulla capacità della pavimentazione di sostenere il traffico previsto senza sviluppare livelli inaccettabili di danneggiamento nel tempo.

Nel metodo tecnico di determinazione del PCN, come definito nella FAA AC 150/5335-5C, il traffico aeronautico operante sulla pavimentazione veniva trattato attraverso il concetto di traffico equivalente, al fine di rendere confrontabili gli effetti strutturali prodotti da un mix di aeromobili caratterizzati da differenti carichi, configurazioni di carrello e frequenze operative. Poiché il sistema ACN/PCN consentiva la valutazione della resistenza della pavimentazione con riferimento a un singolo aeromobile alla volta, il traffico reale veniva preliminarmente espresso in termini di cicli di traffico e successivamente convertito in un numero equivalente di coperture (coverages), parametro che rappresenta il numero statisticamente atteso di applicazioni di carico su un'area unitaria della pavimentazione. Tale conversione avveniva mediante l'introduzione dei rapporti passes-to-traffic cycle (P/TC) e passes-to-coverage (P/C), che consentivano di tenere conto, rispettivamente, del numero di passaggi effettivamente agenti sulla pista per ciascun ciclo operativo e della distribuzione laterale dei carichi dovuta alla variabilità delle traiettorie.

I valori di P/TC dipendevano dalla configurazione delle taxiway e dalle condizioni operative degli aeromobili, in particolare dalla presenza o meno di rifornimento in aeroporto, mentre il rapporto P/C era funzione della geometria del carrello e delle caratteristiche di contatto pneumatico-pavimentazione. Una volta determinato il numero di coperture

associate a ciascun aeromobile del traffico, il contributo relativo di ciascun velivolo veniva espresso mediante il Cumulative Damage Factor (CDF), con la regola di Miner, definito come il rapporto tra il numero di coperture applicate e il numero di coperture che condurrebbero a collasso la pavimentazione sotto l'azione dello stesso aeromobile.

Nel contesto della determinazione del PCN, il CDF non assume il significato di misura del danneggiamento effettivo o della vita residua della pavimentazione, ma veniva utilizzato esclusivamente come parametro di equivalenza, finalizzato alla comparazione degli effetti prodotti dai diversi aeromobili del traffico. Attraverso l'imposizione dell'uguaglianza del CDF tra aeromobili reali ed aeromobile di riferimento, il traffico di ciascun velivolo veniva convertito in un numero equivalente di coperture dell'aeromobile critico, tenendo conto sia della configurazione del carrello principale sia del carico per ruota. L'aeromobile critico veniva pertanto individuato come quello che, a parità di struttura pavimentata, massimizzava il contributo cumulativo in termini di CDF equivalente, risultando rappresentativo dell'effetto complessivo del traffico ai fini della determinazione tecnica del PCN.

Stabilito l'allowable load rating, il valore di PCN veniva infine determinato calcolando l'ACN dell'aeromobile che rappresenta tale carico limite e riportando il valore risultante come PCN per la pavimentazione.

2.4.1.3 Fattori di conversione per l'individuazione dello spessore equivalente della pavimentazione

Nel Technical Evaluation Method adottato dalla Federal Aviation Administration, il concetto di spessore equivalente veniva definito come grandezza strutturale finalizzata all'analisi della pavimentazione reale ricondotta a una configurazione standardizzata di riferimento, per l'applicazione del sistema ACN-PCN. A tal fine, la FAA introduce in modo esplicito coefficienti, cosa che non avveniva per le normative introdotte da ICAO, di equivalenza strutturale che quantificano il contributo dei singoli strati in funzione della tipologia di materiale, del comportamento meccanico e della posizione all'interno della sezione.

Nel metodo ACN-PCN secondo FAA basato sul metodo del CBR per la valutazione delle pavimentazioni flessibili, la stratigrafia della pavimentazione esistente veniva determinata convertendo la sezione reale in una sezione standard di riferimento, secondo quanto previsto dalla FAA Advisory Circular AC 150/5335-5C, Appendix B. Tale sezione standard assume uno spessore minimo degli strati superficiali e di base, variabile in funzione della configurazione del carrello principale degli aeromobili operanti. In particolare, per aeromobili con meno di quattro ruote sul carrello principale la sezione di riferimento prevedeva uno strato superficiale in conglomerato bituminoso pari a 3 in (FAA Item P-401)

e uno strato di base granulare di alta qualità pari a 6 in (FAA Item P-209), mentre per aeromobili con quattro o più ruote sul carrello principale lo spessore minimo richiesto è pari rispettivamente a 5 in (FAA Item P-401) per lo strato in conglomerato bituminoso e 8 in (FAA Item P-209) per lo strato di base.

Eventuali spessori eccedenti rispetto a tali valori minimi, nonché la presenza di materiali con caratteristiche differenti, come strati stabilizzati con asfalto o trattati con cemento, venivano convertiti in spessore equivalente mediante fattori di equivalenza degli strati, come riportato nella Figura 2.37 della medesima Advisory Circular. In particolare, lo spessore in eccesso degli strati superiori veniva trasformato in uno spessore equivalente aggiuntivo, generalmente espresso in termini di materiale di sottofondazione. Lo spessore totale equivalente della pavimentazione era quindi ottenuto sommando lo spessore reale della sottofondazione e i contributi equivalenti derivanti dagli strati sovrastanti, consentendo di rappresentare la stratigrafia complessiva della pavimentazione mediante una sezione standardizzata da utilizzare nelle successive procedure di valutazione della resistenza.

Structural Item	Description	Range Convert to P-209	Recommended Convert to P-209	Range Convert to P-154	Recommended Convert to P-154
P-501	Portland Cement Concrete (PCC)	--	--	--	--
P-401	Plant Mix Bituminous Pavements (HMA)	1.2 to 1.6	1.6	1.7 to 2.3	2.3
P-403	Plant Mix Bituminous Pavements (HMA)	1.2 to 1.6	1.6	1.7 to 2.3	2.3
P-306	Econocrete Subbase Course (ESC)	1.2 to 1.6	1.2	1.6 to 2.3	1.6
P-304	Cement Treated Base Course (CTB)	1.2 to 1.6	1.2	1.6 to 2.3	1.6
P-212	Shell Base Course	--	--	--	--
P-213	Sand-Clay Base Course	--	--	--	--
P-220	Caliche Base Course	--	--	--	--
P-209	Crushed Aggregate Base Course	1.0	1.0	1.2 to 1.6	1.4
P-208	Aggregate Base Course	1.0	1.0	1.0 to 1.5	1.2
P-211	Lime Rock Base Course	1.0	1.0	1.0 to 1.5	1.2
P-301	Soil-Cement Base Course	n/a	--	1.0 to 1.5	1.2
P-154	Subbase Course	n/a	--	1.0	1.0
P-501	Portland Cement Concrete (PCC)	Range Convert to P-401 2.2 to 2.5, 2.5 Recommended			

Figura 2.41: Coefficienti di conversione per spessore equivalente pavimentazioni flessibili
Fonte:[16]

I coefficienti di equivalenza erano forniti sotto forma di intervalli, all'interno dei quali il progettista era chiamato a individuare il valore più rappresentativo delle condizioni reali, sulla base della qualità dei materiali, delle tecniche costruttive e dello stato di conservazione della pavimentazione. In tal senso, lo spessore equivalente risultante non rappresentava una grandezza fisica misurabile, bensì una grandezza strutturale finalizzata alla valutazione della resistenza nell'ambito del sistema ACN-PCN.

Nel criterio tecnico FAA per la determinazione del PCN anche per le pavimentazioni rigide

doveva essere individuato uno spessore equivalente corretto in funzione della presenza e dello spessore degli strati di sottofondazione interposti tra il sottofondo e la lastra in calcestruzzo, come viene riportata dalla Figura 2.42 tratta dall'AC 150/5335-5C, il valore del modulo di reazione del sottofondo (k) assegnato al terreno naturale veniva corretto tramite le curve presentate. Le relazioni di correzione, espresse attraverso i grafici, mostrano che, a parità di valore iniziale di k del sottofondo, l'incremento del modulo di reazione efficace cresce con lo spessore dello strato di sottofondazione e dipende in modo significativo dalla tipologia di materiale impiegato.

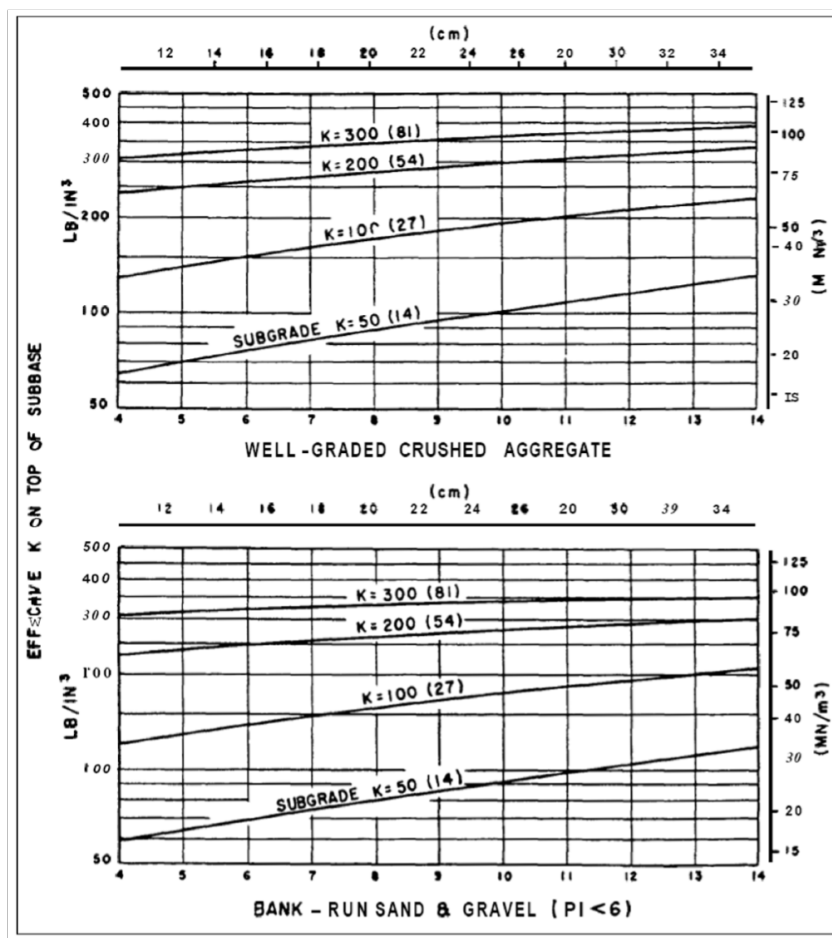


Figura 2.42: Grafici di conversione per spessore equivalente pavimentazioni rigide Fonte:[16]

Oltre alla correzione del modulo di reazione del sottofondo, il criterio tecnico FAA prevedeva l'incremento dello spessore della lastra in calcestruzzo in presenza di sovrastrutture bituminose applicate sulla pavimentazione rigida. Lo spessore dell'overlay in conglomerato bituminoso viene convertito in uno spessore equivalente di calcestruzzo assumendo un rapporto di equivalenza pari a 2.5 in CB:1 in PCC.

La valutazione della resistenza delle pavimentazioni rigide nel criterio tecnico FAA si

basa quindi sull'uso combinato di un valore corretto del modulo di reazione k , determinato in funzione della tipologia del sottofondo secondo relazioni derivate dal metodo di Westergaard.

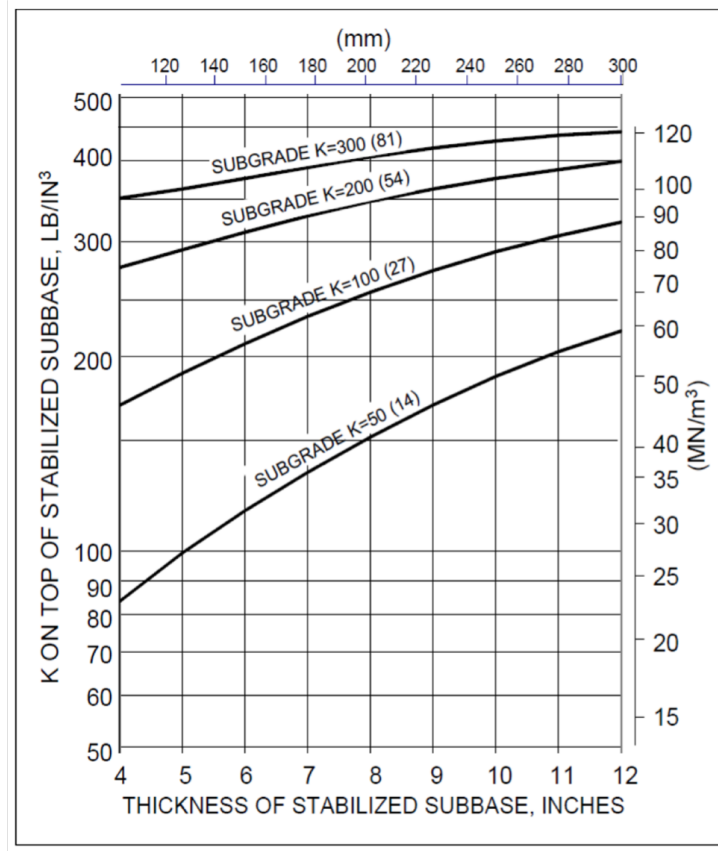


Figura 2.43: Grafici di conversione per spessore equivalente pavimentazioni rigide Fonte: [16]

La determinazione degli spessori equivalenti mediante coefficienti di equivalenza consente quindi di ricondurre la stratigrafia reale della pavimentazione a una sezione standard di riferimento, espressa in termini di spessore strutturale equivalente e rappresentativa della stratigrafia complessiva della pavimentazione stessa. Tale procedura risulta necessaria per l'applicazione del software COOMFAA che veniva utilizzato per valutazione della resistenza della pavimentazione utilizzato dalla Federal Aviation Administration.

2.4.1.4 Il software COMFAA

A partire dalla definizione della sezione standard equivalente, la valutazione operativa della resistenza della pavimentazione e della compatibilità aeromobile-pavimentazione veniva effettuata mediante il software *COMFAA* (*Computer Program to Compute Pavement Classification Numbers*), sviluppato dalla Federal Aviation Administration. Il software COMFAA costituiva lo strumento di supporto per l'applicazione operativa delle procedure ICAO relative alla determinazione dei valori di Aircraft Classification Number (ACN)

e Pavement Classification Number (PCN). Il suo utilizzo era disciplinato dall'Advisory Circular FAA AC 150/5335-5C, che ne definiva le modalità di impiego in coerenza con il sistema ACN-PCN adottato a livello internazionale. COMFAA consentiva il calcolo dell'ACN degli aeromobili per pavimentazioni flessibili e rigide sulla base delle condizioni standard ICAO, utilizzando rispettivamente il metodo CBR per le pavimentazioni flessibili e il metodo di Westgaard per le pavimentazioni rigide, con riferimento a valori delle caratteristiche del sottofondo suddivisi in classi.

Il software permetteva la determinazione del PCN di una pavimentazione aeroportuale mediante l'analisi dello spettro di traffico, espresso in termini di partenze annue, dello spessore totale equivalente e del valore di resistenza del sottofondo. Le caratteristiche degli aeromobili sono desunte da una libreria interna conforme agli standard ICAO, mentre eventuali modifiche potevano essere gestite tramite una libreria esterna, sotto la responsabilità dell'utente. La normativa specifica che l'utilizzo di COMFAA non era destinato al progetto di nuove pavimentazioni, in quanto gli spessori calcolati rispondono esclusivamente alle condizioni standard adottate per la classificazione ACN-PCN, ma rappresentava uno strumento di valutazione della resistenza finalizzato alla dichiarazione operativa per le infrastrutture aeroportuali.

Secondo quanto riportato nell'Appendix C dell'Advisory Circular FAA AC 150/5335-5C, il software COMFAA (Computerized Method for Aircraft ACN) costituiva lo strumento di supporto per l'applicazione operativa del metodo per determinare il Pavement Classification Number (PCN). La procedura prevedeva innanzitutto l'inserimento, in un file esterno, dell'elenco degli aeromobili che compongono lo spettro di traffico operativo sulla pavimentazione in esame e la verifica delle relative caratteristiche fisiche, in particolare massa operativa e pressione di gonfiaggio degli pneumatici.

Attraverso la modalità di calcolo batch di COMFAA, venivano quindi determinati i valori di Aircraft Classification Number (ACN) per ciascun aeromobile, in funzione del tipo di pavimentazione (flessibile o rigida) e della categoria di resistenza del sottofondo considerata. Questi passaggi verranno meglio esplicitati con i casi studio. I risultati venivano restituiti sotto forma di tabelle riepilogative, dalle quali veniva individuato il valore massimo di ACN corrispondente alla categoria di sottofondo adottata. Il PCN secondo il criterio dell'aeromobile utilizzato era individuato in funzione del valore più elevato di ACN tra gli aeromobili operativi. La normativa specifica che, nell'ambito di COMFAA, il PCN rappresenta una valutazione della resistenza coerente con le condizioni standard del sistema ACN-PCN e che l'eventuale adeguamento del valore numerico del PCN rimaneva sotto la responsabilità del Gestore Aeroportuale.

Il criterio tecnico di valutazione del PCN descritto nell'Appendix C dell'Advisory Circular

FAA AC 150/5335-5C prevede l'impiego del software COMFAA per la determinazione della resistenza della pavimentazione sulla base di un'analisi integrata del traffico aereo e delle caratteristiche meccaniche del sottofondo e lo spessore equivalente precedentemente determinato. La procedura richiede innanzitutto la definizione del volume di traffico in termini di aeromobili e partenze annue previste nel periodo di riferimento, comprensive del traffico che viene successivamente convertito in coperture equivalenti mediante rapporti pass-to-coverage (P/C) per ciascun aeromobile e per il tipo di pavimentazione considerata.

Per le pavimentazioni flessibili, era necessario ricavare il valore di CBR del sottofondo attraverso dati di progetto, prove in sito o prove di laboratorio, poiché variazioni anche limitate di tale parametro possono produrre differenze significative nei pesi massimi ammissibili e nei corrispondenti valori di PCN; la sezione strutturale esistente deve quindi essere convertita in uno spessore equivalente di riferimento.

Per le pavimentazioni rigide, la valutazione tecnica richiede la determinazione dello spessore della lastra in calcestruzzo, della resistenza a flessione del materiale e del modulo di reazione del sottofondo (k), che in COMFAA era assunto come valore medio efficace alla sommità degli strati.

Utilizzando i parametri strutturali definiti in precedenza e il volume di traffico espressi partenze annuali, COMFAA calcola per ciascun aeromobile il peso massimo ammissibile compatibile con il livello di danneggiamento cumulativo, valutato attraverso il Cumulative Damage Factor (CDF), assumendo come condizione limite il rispetto del criterio $CDF \leq 1$ per il periodo di riferimento. A partire dai pesi massimi ammissibili determinati, il software calcola il valore di ACN di ciascun aeromobile alla corrispondente categoria standard di sottofondo ICAO; per determinare il PCN veniva quindi selezionato dall'insieme dei valori di ACN risultanti, l'aeromobile critico. Il software poi in autonomia come si vedrà in seguito calcolava il PCN associato all'aeromobile critico inserito dall'utente.

Il software COMFAA consente quindi l'applicazione operativa del metodo ACN-PCN secondo l'approccio tradizionalmente adottato dalla Federal Aviation Administration per la valutazione della resistenza delle pavimentazioni aeroportuali. Tuttavia questo metodo ad oggi risulta superato e la FAA ha successivamente introdotto un nuovo approccio basato sul concetto di Aircraft Classification Rating–Pavement Classification Rating (ACR-PCR), formalizzato nella FAA Advisory Circular AC 150/5335-5D – Standardized Method of Reporting Airport Pavement Strength – ACR-PCR, che verrà ora in seguito analizzata.

2.4.2 Advisory Circular 150/5335-5D

Nel 2022 la Federal Aviation Administration (FAA) ha introdotto il nuovo metodo per la classificazione e la comunicazione della resistenza delle pavimentazioni aeroportuali, adottando il sistema ACR-PCR (Aircraft Classification Rating – Pavement Classification Rating) in luogo del precedente sistema ACN-PCN. Il riferimento normativo è l'Advisory Circular AC 150/5335-5D, intitolata “*Standardized Method of Reporting Airport Pavement Strength – PCR*”, pubblicata il 29 aprile 2022. Tale Advisory Circular annulla e sostituisce la precedente AC 150/5335-5C (2014), che disciplinava il metodo PCN, recependo le modifiche introdotte dall'Amendment 15 nell'Annex 14 ICAO – Aerodromes. Lo scopo dell'AC 150/5335-5D è fornire indicazioni per la determinazione e la comunicazione della resistenza delle pavimentazioni di piste, vie di rullaggio e piazzali, in conformità ai metodi standardizzati definiti dall'International Civil Aviation Organization (ICAO).

La FAA raccomanda l'uso del metodo ACR-PCR per la dichiarazione della resistenza delle pavimentazioni pavimentate e ne rende l'applicazione obbligatoria per i progetti finanziati tramite programmi federali di assistenza, quali l'Airport Improvement Program (AIP), nonché per quelli finanziati tramite il Passenger Facility Charge (PFC), secondo quanto previsto dalle relative Grant Assurances.

L'introduzione del metodo ACR-PCR segna il passaggio da un approccio empirico basato su un indice di resistenza in funzione di sezioni standard (PCN) a una valutazione coerente con il comportamento strutturale reale delle pavimentazioni (PCR), fondata sul concetto di analisi delle stratigrafie reali, sulla configurazione del carrello dell'aeromobile analizzato e sull'analisi del carico applicato, in linea con l'evoluzione dei criteri ICAO e con i moderni strumenti di analisi utilizzati in ambito FAA.

Il sistema ACR-PCR (Aircraft Classification Rating – Pavement Classification Rating), adottato dalla Federal Aviation Administration in conformità agli standard ICAO, consente di rappresentare l'effetto strutturale degli aeromobili e la resistenza delle pavimentazioni aeroportuali.

Secondo la definizione fornita dall'FAA, “*ACR is a number that expresses the relative effect of an aircraft at a given configuration on a pavement structure for a specified standard subgrade strength.*”

L'Aircraft Classification Rating (ACR) è quindi un indice numerico che quantifica l'effetto strutturale esercitato da uno specifico aeromobile su una pavimentazione, considerando una determinata configurazione del velivolo. Tale effetto dipende dal peso dell'aeromobile, dalla geometria e configurazione del carrello, dalla pressione di gonfiaggio dei pneumatici e dal tipo di pavimentazione, ed è riferito a una resistenza standard del sottofondo. L'ACR

non rappresenta una caratteristica della pavimentazione, bensì l'aeromobile che opera su di essa.

Per quanto riguarda la pavimentazione, l'FAA definisce: *“PCR is a number that expresses the load-carrying capacity of a pavement for unrestricted operations.”*

Il Pavement Classification Rating (PCR) è un valore numerico che esprime la capacità portante della pavimentazione per operazioni non soggette a limitazioni operative. Il PCR rappresenta quindi la resistenza della pavimentazione. Il principio fondamentale del sistema ACR-PCR è che una pavimentazione può supportare senza restrizioni tutti gli aeromobili il cui ACR sia minore o uguale al valore di PCR assegnato alla pavimentazione stessa, da qui deriva il termine "unrestricted operation", definizione che non è stata data da ICAO.

La normativa afferma che l'utilizzo del metodo ACR-PCR è limitato alle pavimentazioni situate in aeroporti ad uso pubblico che presentano una capacità portante pari o superiore a 12.500 lb (5.700 kg). Per pavimentazioni con capacità inferiore a tale soglia, il metodo ACR-PCR non è applicabile: in questi casi la FAA prevede esclusivamente la comunicazione del peso massimo al decollo e della configurazione del carrello degli aeromobili che possono operare sulla pavimentazione, senza l'attribuzione di un valore numerico di PCR.

Il sistema ACR-PCR è concepito come strumento operativo a disposizione dei Gestori Aeroportuali per valutare l'accettabilità delle operazioni degli aeromobili sulle pavimentazioni esistenti. Esso non costituisce una procedura di progetto, né una metodologia di valutazione strutturale delle pavimentazioni, e non impone vincoli sulle tecniche o sui modelli di calcolo utilizzati per il dimensionamento o la verifica delle strutture di pavimentazione.

È inoltre esplicitamente indicato nell'Advisory Circular che non esiste alcuna correlazione matematica tra il precedente sistema ICAO di classificazione ACN-PCN e il nuovo sistema ACR-PCR. Di conseguenza, i valori di PCN non possono essere convertiti in PCR mediante relazioni analitiche o fattori di conversione, rendendo necessario un approccio di valutazione nuovo e coerente con i principi strutturali alla base del metodo ACR-PCR.

Il metodo ACR-PCR si fonda sull'impiego di un unico modello matematico di riferimento, valido sia per pavimentazioni flessibili sia per pavimentazioni rigide.

Come specificato dall'FAA: *“The sole mathematical model used in the ACR-PCR method is Layered Elastic Analysis (LEA).”*

Il modello di analisi elastica multistrato (LEA) rappresenta la struttura della pavimen-

tazione come un sistema di strati omogenei, elastici e isotropi, disposti orizzontalmente e sovrapposti. Ciascuno strato i è caratterizzato da un modulo elastico E_i , da un coefficiente di Poisson ν_i e da uno spessore uniforme τ_i . Gli strati sono assunti di estensione orizzontale infinita, mentre lo strato inferiore, rappresentativo del sottofondo, è modellato come un mezzo elastico semi-infinito.

L'ipotesi di comportamento elastico lineare consente di applicare il principio di sovrapposizione degli effetti, rendendo possibile la combinazione dei contributi di carichi multipli generati da configurazioni di carrello complesse, tipiche degli aeromobili moderni. In questo modo, le tensioni e le deformazioni indotte da ciascuna ruota possono essere sommate per ottenere la risposta complessiva della pavimentazione.

L'adozione del modello LEA consente inoltre una coerenza metodologica con i principali approcci di dimensionamento e verifica delle pavimentazioni aeroportuali attualmente adottati a livello internazionale. Tale coerenza trova applicazione nella valutazione dell'Aircraft Classification Rating (ACR) oggetto del prossimo capitolo, il cui modello matematico alla base è proprio il modello LEA.

2.4.2.1 Aircraft Classification Rating (ACR) secondo FAA

Nel metodo ACR-PCR la determinazione dell'Aircraft Classification Rating (ACR) è basata su una procedura standardizzata definita dall'FAA, nella quale il valore di ACR è calcolato a partire dalle caratteristiche operative e geometriche dell'aeromobile. Come indicato nell'AC 150/5335-5D, il costruttore dell'aeromobile fornisce il calcolo ufficiale del valore di ACR, utilizzando informazioni quali il peso massimo, la posizione del baricentro, la configurazione e l'interasse del carrello principale e la pressione di gonfiaggio dei pneumatici.

Il metodo ACR-PCR adotta quattro categorie standard di resistenza del sottofondo, valide sia per pavimentazioni flessibili sia rigide, i cui valori numerici sono i medesimi di quelli riportati da ICAO. Tali categorie sono espresse in termini di modulo elastico del sottofondo e costituiscono una base comune per il confronto tra aeromobili e pavimentazioni. L'effetto del carrello dell'aeromobile sulla pavimentazione, per ciascuna categoria di sottofondo, è determinato mediante il modello di analisi elastica multistrato (Layered Elastic Analysis, LEA).

Il calcolo dell'ACR si fonda sulla determinazione di un carico equivalente su singola ruota (derived single wheel load DSWL). Tale carico equivalente è definito in modo da produrre lo stesso stato tensionale nella pavimentazione generato dal carrello reale dell'aeromobile, senza specificare lo spessore della pavimentazione. L'equivalenza è ottenuta eguagliando

lo spessore richiesto dalla configurazione reale del carrello a quello corrispondente a una singola ruota soggetta a una pressione standard di 218 psi (1,5 MPa).

Il valore di ACR è definito come il doppio del carico equivalente su singola ruota, espresso in centinaia di chilogrammi, che fornisce l'indice numerico dell'effetto strutturale dell'aeromobile sulla pavimentazione.

Nel caso delle pavimentazioni flessibili, come riporta la normativa, il carico equivalente su singola ruota è calcolato assumendo una pressione costante di 218 psi (1,5 MPa) e riferito a 36.500 passaggi dell'aeromobile. Per le pavimentazioni rigide, invece, la standardizzazione avviene imponendo una tensione di riferimento pari a 399 psi (2,75 MPa). È esplicitamente specificato che tale tensione standard, utilizzata per la dichiarazione della resistenza, non è correlata alla tensione di progetto impiegata nel dimensionamento strutturale delle pavimentazioni.

2.4.2.2 Pavement Classification Rating (PCR) secondo FAA

Nel sistema ACR-PCR, il Pavement Classification Rating (PCR) rappresenta l'indice numerico della resistenza strutturale di una pavimentazione aeroportuale, espresso in termini di confronto con il massimo Aircraft Classification Rating (ACR), proprio dell'aeromobile, che la pavimentazione è in grado di sostenere. La normativa, come avveniva con ICAO, definisce che *"PCR is a number that expresses the load-carrying capacity of a pavement for unrestricted operations"*. La normativa FAA, a differenza di ICAO in cui non veniva data una definizione, afferma che il concetto associato ad "operazioni senza restrizioni" non deve essere interpretato come assenza di limitazioni in termini di danneggiamento o vita utile, bensì come condizione di assenza di restrizioni di peso per aeromobili il cui ACR risulti minore o uguale al valore di PCR assegnato alla pavimentazione.

Il valore di PCR da riportare deve essere coerente con lo spettro di traffico e con il volume di traffico analizzato e risulta valido esclusivamente per il periodo di utilizzo considerato nell'analisi. La normativa impone che, per variazioni significative del traffico, quali l'introduzione di nuovi tipi di aeromobili o incrementi sostanziali nel volume di traffico, sia necessaria una nuova determinazione del valore di PCR, indipendentemente dal valore di PCR precedentemente determinato.

Secondo le procedure ICAO recepite dall'FAA, la determinazione del valore numerico di PCR può essere effettuata mediante due approcci distinti: il *Using Aircraft Method* e il *Technical Evaluation Method*. Entrambi i metodi sono ammessi, ma il procedimento adottato deve essere esplicitamente dichiarato nella pubblicazione del valore di PCR.

L' *Using Aircraft Method*, criterio dell'aeromobile utilizzato, consiste nella determinazione dei valori di ACR per tutti gli aeromobili autorizzati a operare sulla pavimentazione considerata, assumendo come valore di PCR il massimo ACR tra quelli calcolati. Tale metodo non richiede una definizione stratigrafica e meccanica della pavimentazione né una valutazione esplicita del CDF. La categoria di resistenza del sottofondo non costituisce un parametro critico, per questo criterio di valutazione e in assenza di informazioni sulla classe del sottofondo, è raccomandata l'adozione della categoria B.

L'approccio di questo criterio di valutazione si fonda, come dice la norma, sull'assunzione implicita che la pavimentazione possieda una capacità strutturale sufficiente a sostenere l'intero spettro di traffico considerato e che ciascun aeromobile operi senza restrizioni di peso. Tuttavia, la validità del risultato dipende dalla rappresentatività del traffico utilizzato per il calcolo: aeromobili strutturalmente gravosi, per il loro peso, ma caratterizzati da frequenze operative molto basse, possono condurre a una sovrastima della resistenza, mentre l'esclusione di aeromobili potenzialmente critici con pesi inferiori ma con frequenze operative elevate, può determinare una sottostima del PCR, per questo, la normativa definisce una frequenza minima di 250 partenze annuali per gli aeromobili analizzati. A fronte del fatto che questo approccio metodologico non è basato sulle condizioni meccaniche reali della pavimentazione, l'FAA scoraggia l'utilizzo del *Using Aircraft Method* come strumento di valutazione a lungo termine, mentre propende per l'uso di un approccio tecnico, *Technical Evaluation Method*, che permette di correlare le reali condizioni strutturali di una pavimentazione con i livelli di sollecitazione indotti dagli aeromobili che vi transitano.

Il *Technical Evaluation Method* rappresenta quindi la procedura di riferimento per la determinazione del valore numerico del *Pavement Classification Rating* (PCR), in quanto consente di integrare le caratteristiche strutturali della pavimentazione, la composizione e l'intensità del traffico aereo e l'effetto cumulativo dei carichi nel periodo di vita considerato. Come veniva presentato da ICAO il metodo si fonda su una valutazione meccanica-empirica del danneggiamento, espressa attraverso il Cumulative Damage Factor (CDF), ed è finalizzato all'identificazione di un aeromobile critico equivalente.

La procedura, così come viene presentata da ICAO, ha inizio con la raccolta e l'organizzazione di tutti i dati strutturali relativi alla pavimentazione, comprendenti lo spessore degli strati, i parametri meccanici degli strati, quali i moduli elastici e i coefficienti di Poisson, le condizioni di supporto del sottofondo, unitamente alla definizione del traffico aereo. La distribuzione trasversale dei passaggi degli aeromobili è modellata assumendo una distribuzione gaussiana, indipendente dal tipo di aeromobile, coerentemente con le ipotesi FAA. Per ciascun aeromobile incluso nello spettro di traffico, il valore di ACR è calcolato al peso operativo considerato. Sulla base dei valori di ACR e delle frequenze operative,

viene quindi determinato il CDF complessivo associato al traffico analizzato, utilizzando un modello di danno simile a quello adottato per il progetto della pavimentazione.

L'aeromobile che fornisce il contributo massimo al valore di CDF viene identificato come aeromobile critico. Per tale aeromobile viene determinato il numero equivalente di partenze annuali che consente di uguagliare il CDF complessivo del traffico analizzato. Successivamente, il peso operativo dell'aeromobile critico viene progressivamente adattato fino a ottenere una condizione di CDF pari a 1.0, che definisce il Maximum Allowable Gross Weight (MAGW) per l'aeromobile operativo sulla pavimentazione considerata.

Il valore di ACR calcolato per l'aeromobile critico al suo MAGW è assunto come $PCR(i)$. Qualora l'aeromobile critico individuato coincida con quello che presenta il massimo valore di ACR nello spettro di traffico iniziale, la procedura termina con una singola iterazione. In caso contrario, l'aeromobile critico viene rimosso dall'elenco del traffico e la procedura viene reiterata sullo spettro di traffico ridotto, mantenendo invariato il valore di CDF di riferimento, al fine di evitare che aeromobili strutturalmente meno gravosi, ma caratterizzati da elevate frequenze operative, vengano individuati come critici ai fini della dichiarazione della resistenza.

La procedura iterativa prosegue fino all'identificazione del valore massimo tra tutti i valori di $PCR(i)$ calcolati. Il PCR finale da riportare è il valore massimo calcolato ed è associato all'aeromobile critico identificato. Di seguito si riporta il processo di flusso per la valutazione tecnica secondo FAA, analogo a quanto riportato da ICAO.

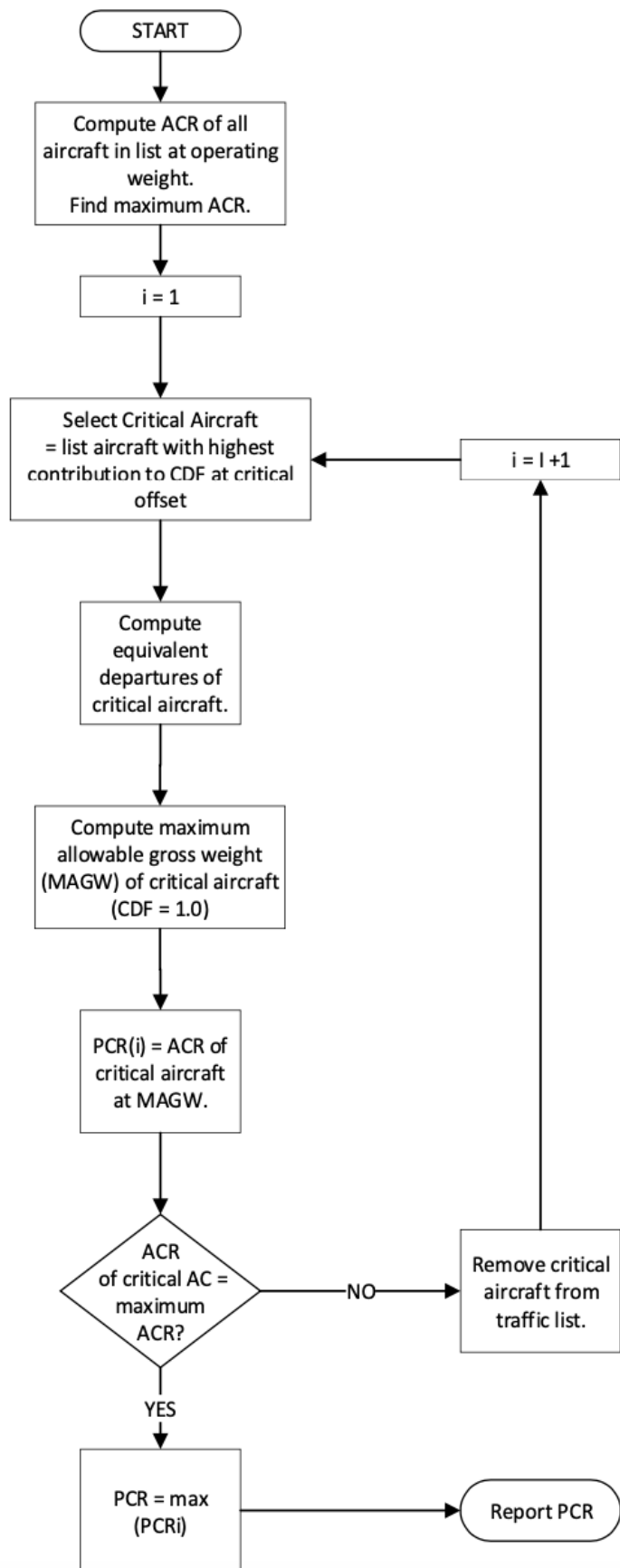


Figura 2.44: Diagramma di flusso per la determinazione del PCR secondo FAA Fonte: [17]

2.4.2.3 Il software FAARFIELD

L'applicazione del metodo di valutazione tecnica si basa sull'utilizzo di modelli di calcolo avanzati per la stima della resistenza della pavimentazione. A tal fine, la Federal Aviation Administration (FAA) ha sviluppato il software *FAARFIELD FAA Rigid and Flexible Iterative Elastic Layered Design*, utilizzato in conformità alle linee guida contenute nell'*Advisory Circular AC 150/5335-5D*, che disciplina la procedura per la valutazione della resistenza delle pavimentazioni aeroportuali mediante il sistema ACR-PCR.

Per le pavimentazioni flessibili, l'analisi richiede l'inserimento del traffico reale di aeromobili in termini di tipologia e numero annuale di decolli, la caratterizzazione del sottofondo mediante il modulo elastico derivato da prove sperimentali o da correlazioni con il CBR secondo la relazione $E = 1500 \cdot CBR$, e la definizione della stratigrafia mediante spessori e moduli elastici degli strati costituenti la sovrastruttura. FAARFIELD assegna automaticamente i valori di modulo elastico per materiali conformi alle specifiche FAA o consente la selezione di valori differenti all'interno di intervalli ammissibili per strati "user defined". Una volta eseguita la simulazione, il software calcola il PCR come ACR dell'aeromobile critico alla Maximum Allowable Gross Weight (MAGW) identificando automaticamente la categoria del sottofondo e assegnando come categoria di pressione di gonfiaggio di default la categoria X.

Per le pavimentazioni rigide, secondo quanto indicato nell'*AC 150/5335-5D*, l'utente deve definire lo spettro di traffico, le proprietà del sottofondo, lo spessore della lastra in calcestruzzo, la resistenza flessionale del materiale e il modulo elastico. Anche in questo caso, FAARFIELD consente la definizione degli strati sottostanti alla lastra tramite spessore e modulo elastico. Al termine dell'analisi, il software fornisce il valore di PCR tramite il codice alfa-numerico definito da ICAO, identificando automaticamente la categoria del sottofondo e assegnando come categoria di pressione di gonfiaggio di default la categoria W, questo perchè il software assume che le superfici in calcestruzzo siano in grado di tollerare pressioni elevate.

FAARFIELD genera inoltre grafici comparativi "PCR Graph", che verranno utilizzati nei casi studio, che mostrano come variano gli ACR degli aeromobili rispetto al PCR calcolato e un "PCR report", composto da tabelle contenenti i dati di traffico in ingresso, le caratteristiche dell'aeromobile critico MAGW, lo spessore equivalente e gli ACR di tutti gli aeromobili che utilizzano la pavimentazione. Questo approccio consente una valutazione quantitativa della resistenza basata sulle condizioni strutturali reali della pavimentazione e sul traffico effettivo. Inoltre, è possibile, come si vedrà in seguito, ricavare le curve di danno CDF associate allo spettro di traffico operativo sulla pavimentazione e stimare la vita utile della pavimentazione.

Capitolo 3

Applicazione pratica alle pavimentazioni aeroportuali

Definiti i criteri metodologici introdotti dai metodi attraverso le normative, risulta necessario, attraverso dei casi studio, capire i risultati che ne derivano. Per quanto visto dalla descrizione dei metodi, in particolare, per il criterio tecnico di valutazione, le caratteristiche stratigrafiche e meccaniche delle pavimentazioni sono uno dei parametri di input dei metodi e prevedono la determinazione di questi parametri in sito. Poichè la norma non prevede una procedura per la valutazione in sito delle caratteristiche stratigrafiche e meccaniche, prima di procedere all'analisi dei casi studio, nel paragrafo seguente si è cercato di adottare una metodologia per prove in sito basata sulla normativa.

3.1 Procedura per la valutazione stratigrafica e meccanica degli strati della pavimentazione

L'applicazione delle procedure di valutazione tecnica descritte nei paragrafi riguardanti il suddetto criterio di valutazione, richiede, a prescindere dal metodo analizzato, la conoscenza delle caratteristiche strutturali della pavimentazione esistente. In tale contesto, la determinazione delle proprietà stratigrafiche e meccaniche del sito costituisce una fase preliminare indispensabile per la valutazione della resistenza delle pavimentazioni aeroportuali.

Per valutare le caratteristiche del sito in ambito aeroportuale, è necessaria una campagna d'indagine che porti alla determinazione delle caratteristiche stratigrafiche generali del sito, in modo da poter valutare le caratteristiche meccaniche dei singoli strati. Questo passaggio è di fondamentale importanza per poter determinare la resistenza delle pavimentazioni, poiché nella procedura tecnica di valutazione, sia per il metodo ACN-PCN in parte che per il metodo ACR-PCR, uno dei dati di input da inserire nei software sono

proprio le caratteristiche stratigrafiche e meccaniche della pavimentazione. La normativa non fornisce una procedura standardizzata per determinare tali caratteristiche, definisce solo che devono essere determinate per poter procedere nell'analisi.

In ambito aeroportuale, condurre delle analisi in sito è un passaggio fondamentale, ma anche temporalmente complicato, poiché quando vengono condotte analisi di tipo distruttivo, come carotaggi o sondaggi, o di tipo non distruttivo, il sito non può essere aperto al traffico aereo e quindi nasce il problema di quando condurre queste prove. Generalmente, gli interventi manutentivi e le campagne di prova vengono eseguiti durante le ore notturne, in concomitanza con la chiusura dello scalo. Tuttavia, nel caso di aeroporti di grande rilevanza, nei quali il traffico non si interrompe neppure nelle ore notturne, si rendono necessarie valutazioni strategiche e pianificazioni operative complesse per consentire l'esecuzione delle prove in condizioni di sicurezza. Un'ulteriore criticità temporale nell'esecuzione delle prove è legata alla variabilità stagionale delle proprietà meccaniche della pavimentazione. In particolare, le proprietà degli strati in conglomerato bituminoso, come si vedrà nei casi studio, sono fortemente influenzate dalla temperatura, determinando una significativa variazione stagionale dei moduli elastici.

La normativa di riferimento dei due metodi non presenta una sequenza delle prove necessarie per determinare le caratteristiche stratigrafiche e meccaniche, quindi verranno di seguito analizzate alcune delle prove necessarie per definire le caratteristiche stratigrafiche e meccaniche e stipulata una possibile procedura per definire i dati di input dei metodi.

3.1.1 Linee guida ENAC LG-2015/03-APT

Il documento di ENAC *LG-2015/03-APT- Airport Pavement Management System-Linee guida sulla implementazione del sistema di gestione della manutenzione delle pavimentazioni* [18] definisce delle linee guida per la suddivisione dell'aeroporto in modo da definire le condizioni attuali del sito aeroportuale e definisce degli orizzonti temporali con cui devono essere effettuate le verifiche.

Il documento di ENAC presenta una frequenza temporale in funzione dei movimenti giornalieri/elemento dove l'elemento in considerazione sono piste, taxiway e aprons per la verifica delle caratteristiche di una pavimentazione, tra cui anche la sua portanza, ovvero la resistenza, in riferimento al metodo ACN-PCN. La norma fa riferimento solo al metodo ACN-PCN essendo l'ultima edizione del 1 ottobre 2015, al momento dell'analisi di questa tesi, non sono state presentate successive edizioni con aggiornamento al metodo ACR-PCR, quindi la sequenza temporale di verifica presente è solo in riferimento al metodo ACN-PCN, però presumibilmente anche nel nuovo metodo dovranno essere indicate. Di seguito è riportata la figura che definisce la periodicità delle verifiche per le pavimenta-

zioni flessibili; per le pavimentazioni rigide, invece, le frequenze indicate devono essere incrementate di 24 mesi.

	Movimenti di aerei (giornalieri per elemento)	Rilievo e verifica Aderenza su bagnato	Rilievo e verifica Macro-tessitura	Rilievo e verifica Regolarità Longitudinale e trasversale	Rilievo ottico e verifica PCI	Verifica portanza (ACN/PCN)
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Piste	<30	Vedi circolare ENAC APT10A	48	48	48	60
	30-60		36	36	36	
	61-180					
	181-300		24	24	24	36
	301-420					
	>420					
Taxiway e apron	<30	X	X	60	48	60
	30-60			48	36	
	61-180					
	181-300			24	24	36
	301-420					
	>420					

Figura 3.1: Quadro sinottico della frequenza temporale minima dei controlli delle caratteristiche delle pavimentazioni aeroportuali (air side) espressa in mesi ENAC Fonte: [18]

Per definire le caratteristiche stratigrafiche, innanzitutto, bisogna definire delle unità di analisi, cioè la suddivisione delle infrastrutture (runway, taxiway, apron) in tratti omogenei dal punto di vista costruttivo e gestionale. In ambito aeroportuale l'omogeneità non è da intendersi solo come "stessa pavimentazione", ma considerando anche l'età dell'opera, il pacchetto stratigrafico di progetto nel caso esistano carte tecniche che lo definiscono, eventuali sovrastrutture e la loro funzione operativa. Questa suddivisione è indispensabile perché la quantità di prove e la successiva elaborazione dei parametri meccanici hanno significato solo se riferite a porzioni con le stesse caratteristiche. Oltre a definire sezioni con stesse caratteristiche, sarà necessario eseguire parallelamente un sopralluogo tecnico dove si acquisiscono gli indicatori funzionali delle condizioni superficiali della pavimentazione, come il rilievo difetti e delle caratteristiche superficiali tramite l'indice PCI, che verrà trattato nella sezione successiva. Questi dati non sostituiscono la valutazione strutturale, ma servono a indirizzare la campagna prove verso aree potenzialmente più critiche e a separare le situazioni in cui un degrado funzionale non implica necessariamente una riduzione di capacità portante e viceversa.

La banca dati delle pavimentazioni aeroportuali riportata dal documento di *ENAC LG 2015/03 APT* deve essere organizzata secondo una struttura in cui la rete, che rappresenta l'intero patrimonio di sovrastrutture sotto il controllo del Gestore Aeroportuale, deve essere suddivisa nelle seguenti entità fisiche:

- I Rami (branch) che sono la parte della rete che svolge una specifica funzione, tipicamente i rami sono rappresentati dalle piste, dalle taxiway di collegamento e dai piazzali (aprons).
- Una Sezione (section) è una parte di un ramo che può essere considerata omogenea sotto il profilo stratigrafico, meccanico e funzionale (ad esempio stessa pavimentazione, modulo, spessore, traffico), e costituisce l'elemento minimo sulla quale programmare gli interventi di manutenzione e riabilitazione;
- Le unità di monitoraggio (sample unit) sono una parte della sezione considerata nelle attività di monitoraggio e sulla quale sono eseguiti i rilievi degli ammaloramenti.

Per la nostra analisi in riferimento ai metodi di valutazione della resistenza della pavimentazione, è necessario definire le sezioni in funzione del tipo di pavimentazione, della stratigrafia della pavimentazione, tramite la definizione degli spessori e dei materiali, che si possono trovare nelle carte tecniche del sito o, nel caso non siano disponibili, sarà necessario effettuare prove in sito per la valutazione della stratigrafia. La valutazione delle sezioni dovrà anche comprendere la valutazione delle caratteristiche del sottofondo, delle condizioni di degrado delle superfici, dei volumi e dell'intensità del traffico, non meno importante è l'età della pavimentazione che, pur non costituendo un indice diretto della prestazione strutturale, può risultare invariata rispetto alla configurazione iniziale; tuttavia, essa assume importanza in quanto diverse sezioni della pavimentazione possono presentare caratteristiche differenti rispetto a porzioni realizzate in fasi costruttive successive.

I dati stratigrafici sono generalmente archiviati in banche dati e comprendono informazioni di inventario e altri elementi 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 dovrebbero essere aggiornati periodicamente. La caratteristica principale delle sezioni 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, ma neanche troppe, perché siccome ad ogni sezione corrispondono caratteristiche stratigrafiche e meccaniche differenti, nel caso in cui si debbano fare lavori di manutenzione o riabilitazione, inevitabilmente aumenterebbero i tempi di lavoro.

3.1.1.1 Pavement Condition Index PCI

A fronte del fatto che per analizzare le pavimentazioni nel loro complesso è necessario valutare anche lo stato dello strato superficiale, a questo proposito viene analizzata la normativa di riferimento, l'ASTMD 5340 [19], in cui viene presentata la procedura per la determinazione del *Pavement Condition Index (PCI)*, parametro citato da ENAC ma che non trova una normativa a livello italiano ed europeo di riferimento. Il parametro PCI è associato a un metodo di classificazione numerica, che a fronte di analisi visiva superficiale in sito, individua i fenomeni di ammaloramento presenti sulla pavimentazione analizzata.

Il PCI è definito come l'indice numerico delle condizioni superficiali della pavimentazione, a cui si associa un range da 0 a 100 suddiviso in classi di condizione, dove 0 indica le condizioni peggiori e 100 le condizioni eccellenti. Gli ammaloramenti presenti sulla pavimentazione possono essere diversi e generalmente sono indicatori del deterioramento superficiale e non strutturale, ma possono essere causati dai carichi che gravano sulla pavimentazione, dai fattori ambientali, climatici, frutto di difetti costruttivi o dalla loro combinazione. Per la determinazione del PCI è necessario definire le aree con destinazione d'uso differenti come runway, taxiway e aprons, poi suddividere l'area complessiva di ogni area analizzata in sezioni, caratterizzate da stessa costruzione, manutenzione, età e condizioni di traffico e di carico. Definite le sezioni sarà necessario dividerle in unità semplici che differiscono a seconda del tipo di pavimentazione.

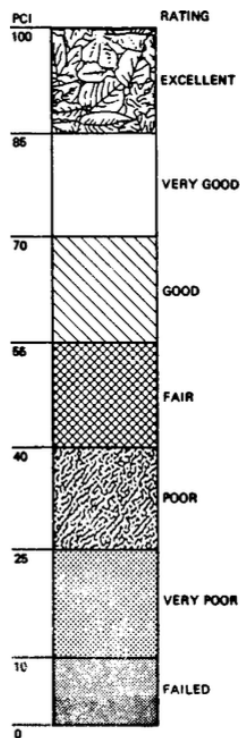


Figura 3.2: Pavement Condition Index suddiviso in classi Fonte:[20]

Trovata la densità sarà necessario utilizzare delle curve definite da normativa, per determinare il "deduct value DV" associato ad ogni ammaloramento. Se nessuno dei DV è più grande di 5, la somma totale dei DV è assunta come CVD. Se esistono DV maggiori di 5 allora per determinare il massimo CVD bisogna seguire la seguente procedura. Inanzitutto si determina il numero massimo ammissibile di detrazioni, indicato con m , che dipende dal valore di detrazione (DV) più elevato riscontrato tra le unità semplici.

Il parametro m , rappresenta il numero massimo ammissibile di dissesti, viene definito come segue:

$$m = 1 + 9/95(100 - HDV) \leq 10 \quad (3.1)$$

dove: HDV = valore di detrazione individuale più elevato tra i DV dei dissesti analizzati.

Il parametro m può assumere anche valori non interi, in tal caso, la sua parte intera rappresenta il numero di detrazioni considerate integralmente, mentre la parte frazionaria viene utilizzata per ridurre proporzionalmente l'ultima detrazione inclusa, cioè si sottrae a m la sua parte intera e la si moltiplica per l'ultimo DV rimasto. La somma di tali valori fornisce il valore totale di detrazione. Contestualmente, viene determinato il parametro q , che rappresenta il numero di valori di detrazione maggiori di 5.

Il Corrected Deduct Value (CDV) viene quindi determinato mediante le curve di correzione previste dalla normativa, che mettono in relazione il valore totale di detrazione e il parametro q . La procedura viene ripetuta in modo iterativo, riducendo progressivamente i valori di detrazione maggiori di 5, fino a individuare il valore massimo di CDV associato a $q=1$, che è quello utilizzato per il calcolo finale del PCI. Infine, il PCI della sample unit è calcolato sottraendo il CDV massimo a 100.

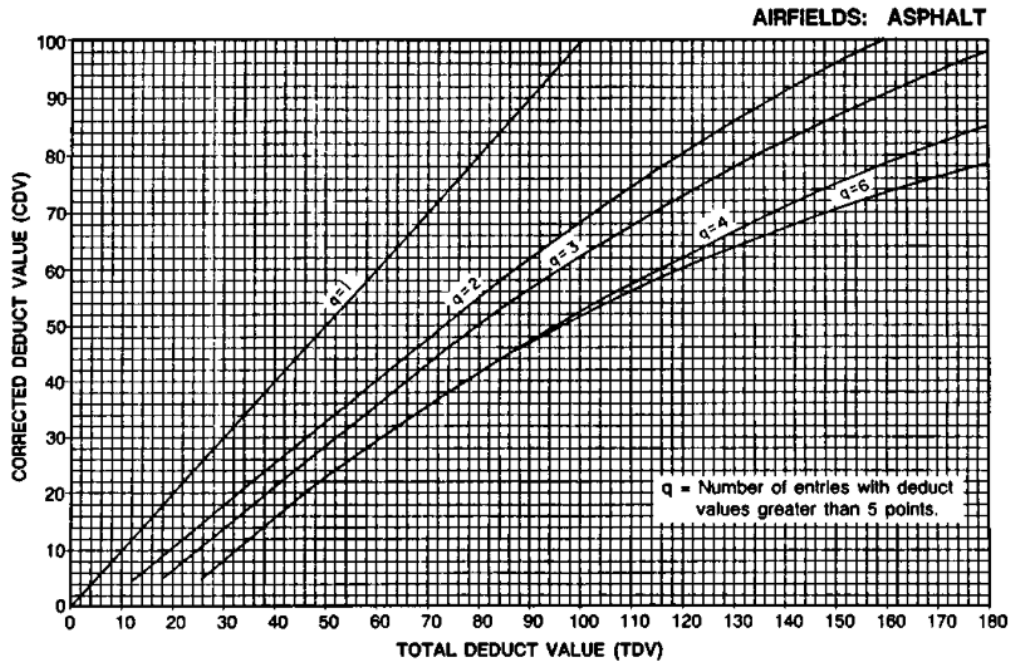


Figura 3.4: Curva di correzione del CDV per pavimentazioni flessibili Fonte:[19]

I dissesti tipici delle pavimentazioni flessibili [21] sono i seguenti:

- Alligator cracking: serie di fessure interconnesse causate da rottura a fatica dello strato bituminoso sotto carichi ripetuti, che formano elementi poligonali simili alla pelle di un alligatore, è un deterioramento di tipo strutturale.
- Bleeding: presenza di un film di legante bituminoso sulla superficie, che produce aspetto lucido e appiccicoso, dovuto a eccesso di bitume o basso contenuto di vuoti nella miscela.
- Block Cracking: rete di fessure che divide la pavimentazione in blocchi rettangolari, causata principalmente dal ritiro dell'asfalto e cicli termici, non associata ai carichi di traffico.
- Corrugation: serie di creste e avvallamenti ravvicinati e regolari, generalmente perpendicolari al traffico, causati da instabilità dello strato superficiale o della fondazione sotto l'azione del traffico.
- Depression: zona della pavimentazione con quota inferiore rispetto alle aree circostanti, dovuta a cedimenti del sottofondo o difetti costruttivi, che può causare ristagno d'acqua e hydroplaning.
- Jet Blast Erosion: degradazione superficiale dovuta al getto dei motori aeronautici, che provoca la combustione del legante bituminoso e lo scurimento della superficie.

- Joint Reflection Cracking: fessure che si manifestano in un rivestimento bituminoso sopra calcestruzzo, causate dal movimento dei giunti della lastra sottostante per variazioni termo-igrometriche.
- Longitudinal and Transverse Cracking: fessure parallele o perpendicolari all'asse della pavimentazione dovute al ritiro termico, a difetti di costruzione o alla riflessione di fessure sottostanti, generalmente non associate ai carichi.
- Oil Spillage: deterioramento o ammorbidimento della superficie causato dalla fuoriuscita di carburanti, oli o solventi che degradano il legante bituminoso.
- Patching and Utility Cut Patching: zona ripristinata o rattoppata della pavimentazione; è considerata un difetto indipendentemente dalla prestazione, poiché rappresenta una discontinuità strutturale o funzionale.
- Polished Aggregate: levigatura degli aggregati superficiali dovuta al traffico, con riduzione della macro-rugosità e della resistenza allo skid.
- Raveling and Weathering: perdita progressiva di aggregati e legante per azione ambientale o traffico, con usura e disgregazione dello strato superficiale.
- Rutting: depressione permanente lungo le traiettorie di traffico dovuta a deformazione plastica degli strati della pavimentazione o del sottofondo, potenzialmente indicativa di problemi strutturali.
- Shoving: rigonfiamenti e deformazioni della pavimentazione in conglomerato bituminoso causati da spinta o movimento degli strati sottostanti.
- Slippage Cracking: fessure a forma di mezzaluna prodotte dallo scorrimento dello strato superficiale sotto azioni di frenata o sterzata, spesso dovute a scarsa adesione tra strati.
- Swell: rigonfiamento verso l'alto della superficie causato generalmente da espansione del sottofondo (gelo o terreni espansivi) o da blow-up della lastra sottostante.

La procedura per le pavimentazioni rigide è la medesima presentata precedentemente per le pavimentazioni flessibili. Cambia il fatto che si considerano il numero di lastre e non l'area in metri quadrati, per ogni lastra interessata dallo stesso dissesto si fa la somma e per ogni dissesto si divide per il numero totale di lastre analizzate, la procedura è la medesima presentata precedentemente mentre cambia la curva finale di correzione del CVD.

AIRFIELD CONCRETE PAVEMENTS CONDITION SURVEY DATA SHEET FOR SAMPLE UNIT						
BRANCH _____		SECTION _____		SAMPLE UNIT _____		
SURVEYED BY _____		DATE _____		SAMPLE AREA _____		
Distress Types			SKETCH: 			
1. Blow up 2. Corner Break 3. Long/Trans/ Diagonal Crack 4. Durability Crack 5. Joint Seal Damage 6. Patching, 5 sf 7. Patching/Utility Cut 8. Popouts						
9. Pumping 10. Scaling/Map Crack/ 11. Cracking 12. Settlement/Fault 13. Shattered Slab 14. Shrinkage Crack 15. Spalling-Corner						
DIST TYPE	SEV	NO. SLABS			DENSITY %	DEDUCT VALUE

Figura 3.5: Scheda per l'analisi dei dissesti per le pavimentazioni rigide Fonte:[19]

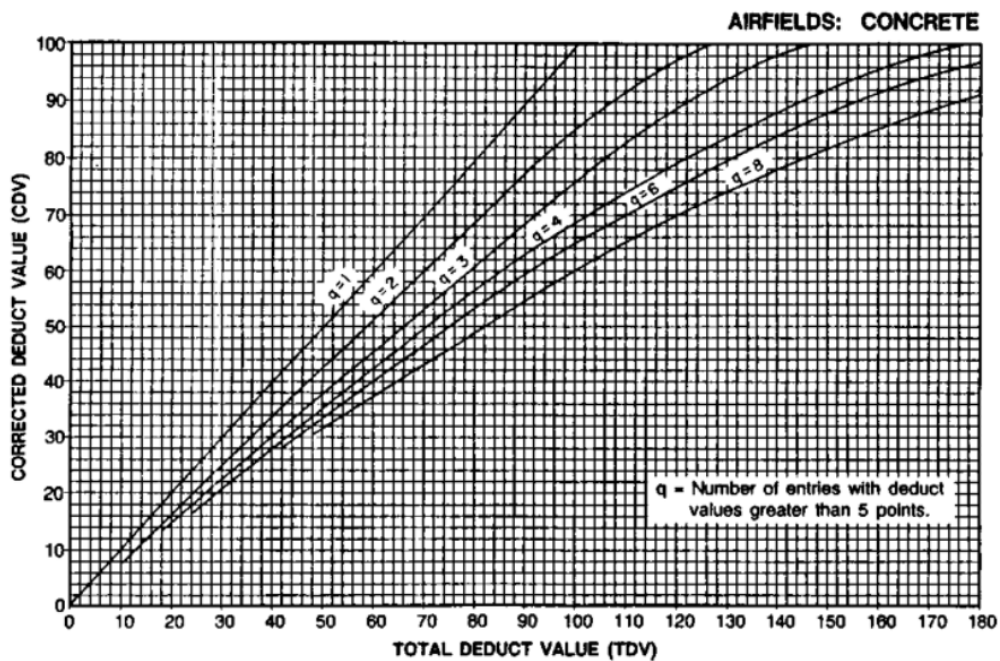


Figura 3.6: Curva di correzione del CDV per pavimentazioni rigide Fonte:[19]

I dissesti tipici delle pavimentazioni rigide [21] sono i seguenti:

- Blow up: sollevamento improvviso delle lastre in calcestruzzo dovuto all'espansione termica impedita, che provoca rigonfiamento localizzato e possibile frattura della pavimentazione.
- Corner Break: fessurazione che isola un frammento triangolare in corrispondenza dell'angolo della lastra, causata principalmente da carichi e perdita di supporto del sottofondo.
- Cracks Longitudinal, Transverse, and Diagonal: fessure che attraversano la lastra in direzione longitudinale, trasversale o diagonale, dovute a carichi, variazioni termiche o movimenti del sottofondo.
- Durability ("D") Cracking: fessurazione progressiva dovuta a scarsa durabilità del calcestruzzo, generalmente associata a cicli gelo-disgelo e ad aggregati suscettibili al deterioramento.
- Joint Seal Damage: deterioramento o perdita del materiale sigillante nei giunti che consente l'infiltrazione di acqua.
- Patching, Small: piccole aree ripristinate della pavimentazione in calcestruzzo considerate discontinuità della superficie indipendentemente dalla loro prestazione.
- Patching, Large and Utility Cuts: ripristini estesi o interventi dovuti a scavi per sottoservizi che comportano discontinuità strutturale e funzionale della lastra.
- Popouts: espulsione localizzata di piccoli frammenti superficiali del calcestruzzo causata da espansione di particelle interne o aggregati reattivi.
- Pumping: espulsione di acqua e materiali fini attraverso giunti o fessure sotto carico, dovuta a pressioni idrauliche e perdita di supporto del sottofondo.
- Scaling, Map Cracking, Crazing: degradazione superficiale con distacco di malta e fessurazione superficiale fine a rete, dovuta a azioni ambientali o bassa qualità del calcestruzzo superficiale.
- Settlement or Faulting: differenza di quota tra lastre adiacenti causata da cedimento differenziale o perdita di supporto della fondazione.
- Shattered Slab/Intersecting Cracks: lastra suddivisa in più parti da fessure intersecanti, generalmente dovuta a sovraccarichi o grave perdita di supporto strutturale.
- Shrinkage Cracks: fessure superficiali dovute al ritiro del calcestruzzo durante l'indurimento, generalmente non associate ai carichi.

- Spalling (Longitudinal and Transverse Joint): distacco o frammentazione del calcestruzzo lungo i bordi dei giunti longitudinali o trasversali per carichi, infiltrazioni o materiali incomprimibili.
- Spalling (Corner): distacco del calcestruzzo in corrispondenza dell'angolo della lastra con perdita di materiale e deterioramento locale.

Le principali normative e linee guida internazionali (ICAO) e nazionali (FAA, ASTM) utilizzano il Pavement Condition Index (PCI) come indicatore quantitativo dello stato superficiale delle pavimentazioni aeroportuali, ma non definiscono soglie normative vincolanti che impongano specifici interventi manutentivi al superamento di determinati valori di PCI. Il PCI è infatti concepito come uno strumento di supporto alla gestione e alla programmazione delle attività di manutenzione, e non come un limite di sicurezza o di esercizio.

In assenza di soglie prescrittive, la definizione dei criteri di intervento è demandata al gestore aeroportuale nell'ambito di un Pavement Management System (PMS), che integra il PCI con ulteriori indicatori prestazionali e strutturali. Nella buona pratica di gestione, tuttavia, è diffusa l'adozione di classi di attenzione associate a intervalli di PCI, utilizzate per orientare le decisioni manutentive e ottimizzare il ciclo di vita della pavimentazione. In tale approccio, valori elevati di PCI sono generalmente associati a interventi di manutenzione ordinaria o preventiva, valori intermedi a manutenzioni correttive programmate, mentre valori più bassi indicano la necessità di pianificare interventi di riabilitazione o ricostruzione. Queste classi non hanno carattere normativo, ma rappresentano criteri gestionali consolidati, finalizzati a prevenire il degrado accelerato, contenere i costi complessivi e garantire adeguati livelli di servizio e sicurezza operativa.

3.1.2 Caratteristiche stratigrafiche

Definite le caratteristiche superficiali delle pavimentazioni si deve procedere con l'analisi stratigrafica del sito. L'analisi stratigrafica può avvenire in sito tramite carotaggi e sondaggi, che rappresentano le indagini dirette più affidabili per la definizione della stratigrafia delle pavimentazioni aeroportuali e dei terreni di sottofondo. I carotaggi permettono il prelievo indisturbato dei materiali costituenti gli strati della sovrastruttura consentendo la caratterizzazione volumetrica e meccanica dei materiali mediante prove di laboratorio. I sondaggi forniscono informazioni essenziali sulla sequenza stratigrafica, sulle proprietà geotecniche del sottofondo e sull'eventuale presenza di strati deboli o anomalie strutturali.

La necessità di carotaggi e sondaggi sarà da valutare in punti specifici del sito, per valutare le condizioni reali della struttura. Presumibilmente saranno da effettuare in zone critiche d'uso della pavimentazione come la center line, nelle zone di passaggio delle ruote

e nei punti in cui sono presenti segni di ammaloramento sulla pavimentazione. Per la definizione del numero di carotaggi si potrebbe prendere in considerazione il *DM 471-1999*, decreto ministeriale che stabilisce i criteri, le procedure e le modalità per la messa in sicurezza, la bonifica, e il ripristino ambientale dei siti inquinati, ma che è l'unico a presentare in ambito ambientale il numero minimo di punti di campionamento in funzione dell'estensione dell'area:

- $< 10.000 \text{ m}^2$: almeno 5 punti
- $10.000 - 50.000 \text{ m}^2$: da 5 a 15 punti
- $50.000 - 250.000 \text{ m}^2$: da 15 a 60 punti
- $250.000 - 500.000 \text{ m}^2$: da 60 a 120 punti
- $> 500.000 \text{ m}^2$: almeno 2 punti ogni 10.000 m^2

Tuttavia, in ambito aeroportuale tali indagini presentano un limite operativo significativo, poiché comportano l'apertura della pavimentazione con conseguente necessità di ripristino immediato, al fine di garantire la continuità operativa delle infrastrutture airside. La realizzazione di un numero elevato di carotaggi risulta pertanto economicamente e logisticamente onerosa, oltre che incompatibile con le restrizioni operative di pista e piazzali.

Per questo motivo, le tecniche di indagine non distruttive con il Ground Penetrating Radar (GPR), costituiscono un'alternativa per la caratterizzazione stratigrafica delle pavimentazioni. Il Ground Penetrating Radar (GPR) è una tecnica geofisica utilizzata per l'indagine delle condizioni del sottosuolo e delle strutture, basata sulla propagazione di impulsi elettromagnetici ad alta frequenza. Durante il rilievo, l'antenna GPR emette onde elettromagnetiche che si propagano negli strati del terreno e vengono parzialmente riflesse alle interfacce tra materiali con diversa costante dielettrica. Il sistema registra il tempo di ritorno delle onde riflesse, che, conoscendo o stimando la velocità di propagazione nel mezzo, viene convertito in profondità. L'analisi dei radargrammi consente quindi di individuare le interfacce stratigrafiche, stimare lo spessore degli strati costituenti la pavimentazione e localizzare eventuali discontinuità. Il GPR quindi consente di ricostruire la stratigrafia degli strati senza interferire con l'operatività aeroportuale. L'impiego del GPR è previsto e normato dalla FAA nell'*Advisory Circular AC 150/5370-11B* [20], richiamata da ENAC nel Manuale per la Manutenzione delle Pavimentazioni Aeroportuali.

La soluzione per la valutazione della stratigrafia potrebbe prevedere di effettuare carotaggi e sondaggi solo in zone critiche del traffico, come center line e zone di passaggio delle ruote dei carrelli ed utilizzare il GPR per il resto del sito. Qualora con il GPR si presentassero

zone in cui sono presenti anomalie allora sarà necessario effettuare carotaggi in quelle specifiche.



Figura 3.7: Ground Penetrating Radar Fonte:Web

I test non distruttivi (NDT) condotti in periodi diversi dell'anno possono fornire risultati differenti a causa delle variazioni climatiche e idrologiche, che influenzano la risposta elettromagnetica e meccanica dei materiali costituenti la pavimentazione e il sottofondo. In particolare, prove eseguite durante il disgelo primaverile o in condizioni di saturazione del terreno possono evidenziare una riduzione temporanea della rigidità del sottofondo, portando a una possibile sovrastima delle criticità strutturali. Al contrario, misure effettuate in condizioni di siccità prolungata possono determinare un irrigidimento apparente dei materiali, con il rischio di sottostimare le condizioni di degrado o le carenze strutturali. Analogamente, rilievi condotti immediatamente dopo eventi piovosi persistenti, soprattutto in presenza di sistemi di drenaggio inefficienti, possono restituire risposte falsate, quali un aumento della costante dielettrica nei rilievi GPR e maggiori deflessioni nelle prove deflettometriche.

Per ridurre tali incertezze, i risultati delle indagini NDT vengono interpretati tenendo conto delle condizioni ambientali al contorno e integrati con indagini dirette, quali carotaggi e sondaggi geotecnici, e con rilievi GPR per la definizione della stratigrafia e degli spessori degli strati. L'integrazione di queste tecniche consente di ottenere una caratterizzazione affidabile della struttura della pavimentazione e del sottofondo, limitando l'influenza delle variazioni stagionali sulle valutazioni prestazionali. Definite le caratteristiche stratigrafiche della sezione analizzata sarà necessario individuare i parametri meccanici degli strati poiché nel caso del metodo ACR-PCR sono dati di input per la valutazione della resistenza della pavimentazione.

3.1.3 Caratteristiche meccaniche

Determinate le caratteristiche stratigrafiche entrambi i metodi prevedono l'utilizzo di dati input sulle caratteristiche meccaniche della pavimentazione analizzata. Per determinare le caratteristiche meccaniche una delle prove non distruttive più usate per la determinazione dei parametri meccanici è l'uso di un dispositivo a impulso, il Falling Weight Deflectometer (FWD) o Heavy Weight Deflectometer (HWD), che misura, tramite la caduta di un peso a condizioni di carico diverse, il bacino di deflessione. Il risultato del bacino di deflessione, tramite la backcalculation, permette di stimare il modulo elastico E degli strati.



Figura 3.8: Macchinario di prova per HWD Fonte:Web

L'apparecchiatura dei test NDT effettuati con il Falling Weight Deflectometer è così composta:

- La piastra di carico da 30 cm (12 pollici) viene normalmente utilizzata per i test su materiali con superficie legata. Se l'NDT deve essere eseguito su materiali di base, sottobase o sottofondo non legati, è necessario utilizzare una piastra di carico da 45 cm (18 pollici). Se il produttore non fornisce la piastra di carico più grande, il tecnico può utilizzare la piastra di carico più piccola, ma dovrebbe fare più affidamento sui sensori di deflessione lontani dalla piastra di carico.
- Il numero di sensori disponibili dipende dal produttore e dal modello dell'apparecchiatura. Di conseguenza, la spaziatura del sensore dipenderà dal numero di sensori disponibili e dalla lunghezza della barra del sensore. Sebbene la maggior parte delle apparecchiature NDT consenta di riposizionare i sensori per ogni studio della pavimentazione, è consigliabile condurre il lavoro NDT utilizzando la stessa configurazione, indipendentemente dal tipo di struttura della pavimentazione. In generale, i dispositivi NDT che dispongono di più sensori possono misurare in modo più accurato il bacino di deflessione prodotto da carichi statici o dinamici. La

maggior parte delle agenzie preferisce limitare la distanza tra i sensori a non più di 30 cm (12 pollici). L'eccezione è il settimo sensore nella configurazione SHRP (Strategic Highway Research Program), dove ci sono 60 cm (24 pollici) tra il sesto e il settimo sensore.

Agency	Configuration Name	Sensor Distance from Center of Load Plate, in (cm)						
		Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4	Sensor 5	Sensor 6	Sensor 7
U.S. Air Force	AF 7-Sensor	0	12 (30)	24 (60)	36 (90)	48 (120)	60 (150)	72 (180)
FHWA and State DOT	SHRP 4-Sensor	0	12 (30)	24 (60)	36 (90)			
	SHRP 7-Sensor	0	6 (15)	12 (30)	18 (45)	24 (60)	36 (90)	60 (150)

Figura 3.9: Distanza sensori prova FWD Fonte: [20]

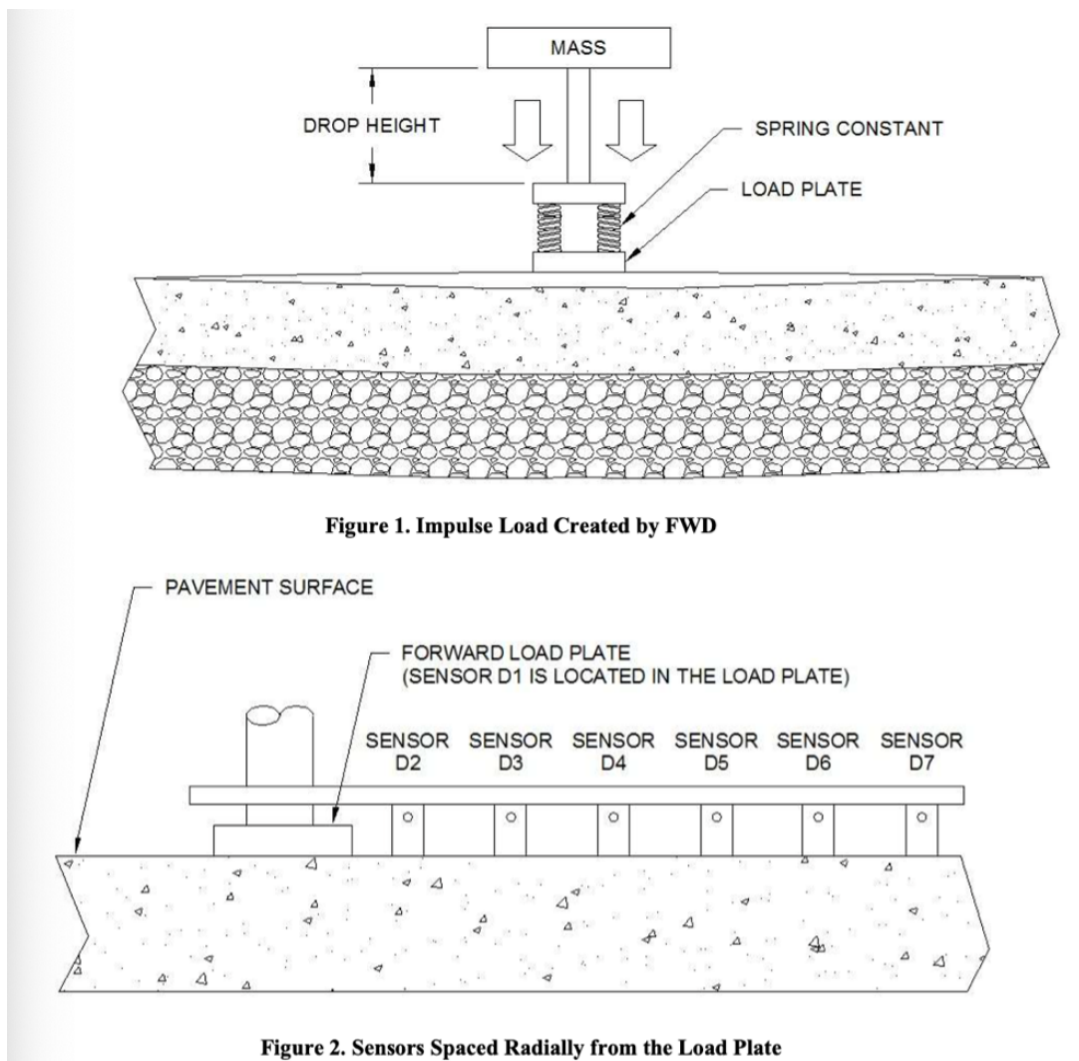


Figura 3.10: Configurazione prova per FWD Fonte: [20]

L'analisi iniziale considera la deflessione misurata sotto la piastra di carico e quella rilevata dal sensore più esterno, corrispondenti rispettivamente ai sensori D1 e D7. Sebbene queste informazioni non forniscano informazioni sulla resistenza di ogni strato di pavimentazione, forniscono una rapida valutazione del bacino di deflessione associato all'imposizione del carico. La rigidezza della pavimentazione è definita come la forza dinamica divisa per la deflessione della pavimentazione al centro della piastra di carico. La rigidità è definita come il carico diviso per la deflessione massima sotto la piastra di carico. Il modulo di rigidità a impulsi (ISM) e il modulo di rigidezza dinamica (DSM) sono definiti come segue per i dispositivi NDT a impulsi:

$$I(D)SM = L/do \quad (3.2)$$

Dove:

- $I(D)SM$ = Modulo di rigidità dinamica e impulso (kips/in)
- L = Carico applicato (kips)
- do = Deflessione massima della piastra di carico (in)

Dopo che il carico è stato applicato sulla superficie della pavimentazione, i sensori vengono utilizzati per misurare le deflessioni, o meglio il bacino di deflessione. L'area del bacino di deflessione può quindi essere utilizzata per ottenere informazioni aggiuntive sui singoli strati della struttura della pavimentazione che non possono essere ottenute utilizzando i dati di deflessione di un singolo sensore.

La forma del bacino è determinata dalla risposta della pavimentazione al carico applicato. La deflessione della pavimentazione è la più grande direttamente sotto il carico e poi diminuisce all'aumentare della distanza dal carico. Oltre alle proprietà del materiale di ogni strato, altri fattori possono contribuire alle differenze nei bacini di deflessione, come li strati rigidi o apparentemente rigidi sottostanti, la temperatura dello strato HMA durante il test, il contenuto di umidità in ciascuno strato e la deformazione e l'arricciamento della lastra PCC. Le variazioni della resistenza della pavimentazione sono in genere il risultato delle variazioni di spessore e della resistenza degli strati, della suscettibilità alla temperatura dei materiali della pavimentazione, degli effetti stagionali, delle altezze delle falde acquifere, delle profondità del gelo e delle stesse attrezzature utilizzate per le proven NDT.

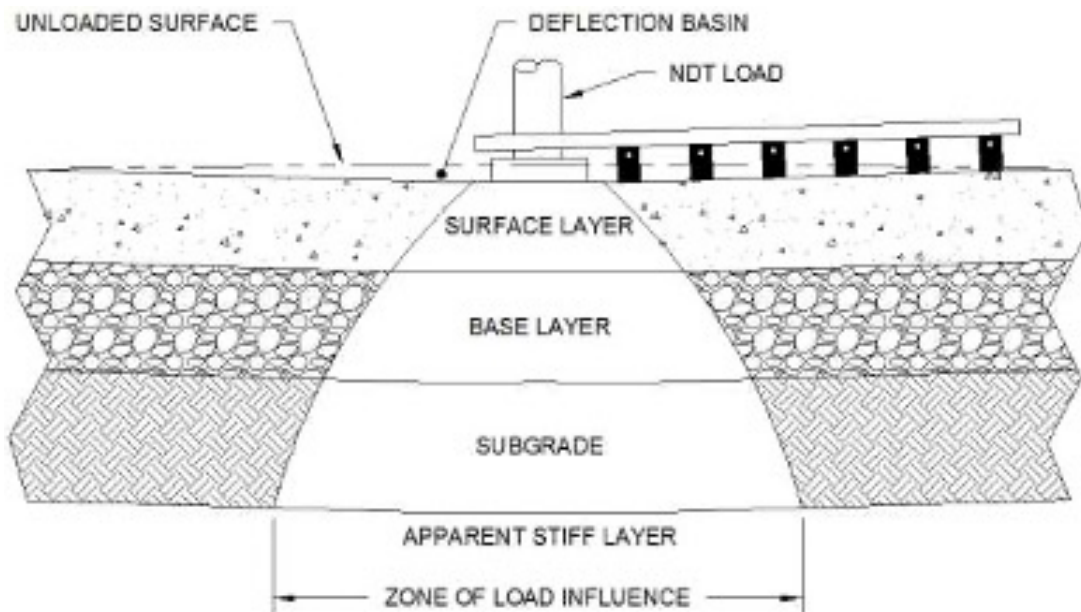


Figura 3.11: Zona di influenza delle deflessioni Fonte:[20]

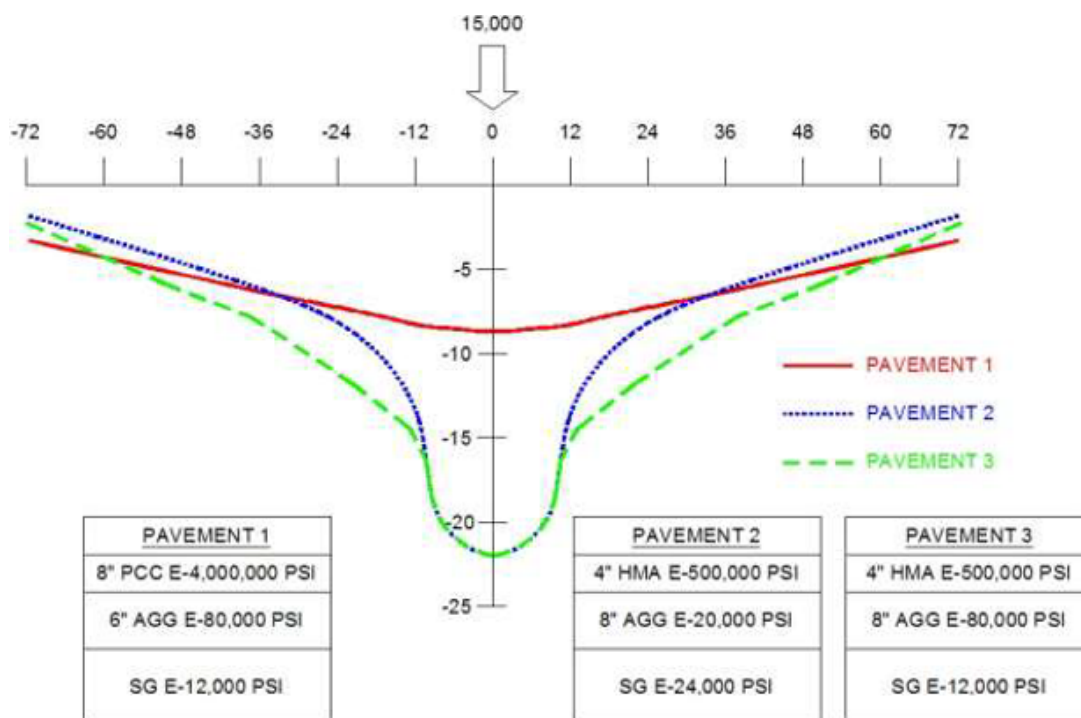


Figura 3.12: Esempi di bacini di deflessione Fonte:[20]

3.1.4 Zone di campionamento

Il documento di *ENAC LG-2015/03-APT* definisce le caratteristiche specifiche per le prove da effettuare con test HWD o FWD. Si cita in seguito integralmente quanto riportato nel documento: “Per quanto concerne le apparecchiature impulsive (HWD e FWD) si consiglia l’uso di dispositivi:

- *dotati di almeno 7 sensori di misura posti ad una distanza non superiore ai 30 cm, fatta eccezione per l'ultimo sensore che può essere posto a 60 cm,*
- *in grado di trasmettere carichi impulsivi compresi tra 90 e 120 kN.*

Per quanto concerne la localizzazione e necessario fissare, in sede di implementazione del sistema di gestione:

- *la posizione degli allineamenti di misura, la frequenza spaziale da utilizzare nel monitoraggio strutturale a livello di rete.*
- *Sulle piste di volo, le vie di rullaggio le misure devono essere eseguite su almeno tre allineamenti mentre nei piazzali la scelta della localizzazione delle prove è lasciata al gestore.*
- *Per le piste di volo e le vie di rullaggio si consiglia di eseguire le misure sugli allineamenti coincidenti con le traiettorie prevalenti percorse dai carrelli degli aeromobili (ad esempio traiettorie su cui si verificano il numero più elevato di ricoprimenti).*

In assenza di analisi specifiche, volte ad individuare le traiettorie su cui si verificano il numero più elevato di ricoprimenti, si può fare riferimento a quanto suggerito nella norma FAA AC-150/5370-11B. Per le pavimentazioni rigide con o senza ricoprimenti in conglomerato bituminoso è consigliabile inoltre effettuare prove di portanza, oltre che sulle traiettorie prevalenti dei carrelli degli aeromobili, anche in corrispondenza dei giunti longitudinali e trasversali prossimi alle traiettorie stesse. Per quanto concerne il numero di prove da eseguire si suggerisce di utilizzare le frequenze spaziali indicate nella norma FAA AC-150/5370-11B. È inoltre consigliato di sfalsare la posizione dei siti di prova lungo gli allineamenti di sinistra e di destra seguendo quanto riportato nell'immagine per le pavimentazioni flessibili, semirigide e per le pavimentazioni rigide."

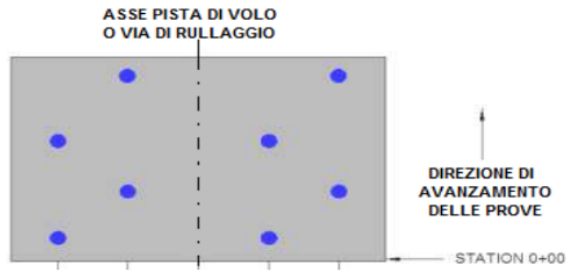


Figura B-1 - Posizionamento indicativo dei punti di misura delle deflessioni nelle pavimentazioni flessibili e semi-rigide di piste di volo e vie di rullaggio

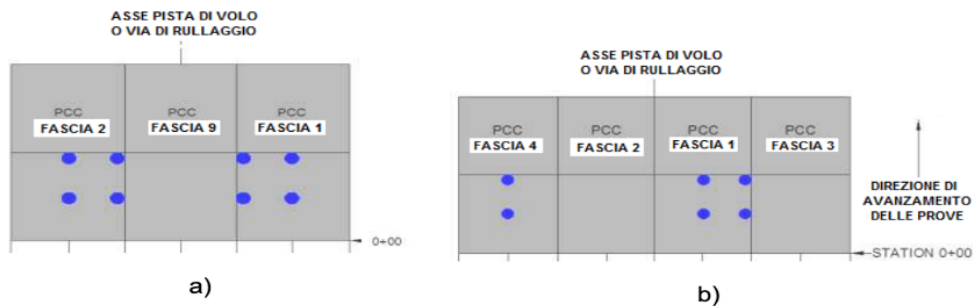


Figura B-2 – Posizionamento indicativo dei punti di misura delle deflessioni nelle pavimentazioni rigide di piste di volo e vie di rullaggio: a) con asse non coincidente a) e coincidente b) con giunti longitudinali

Figura 3.13: Punti di misura della deflessione in funzione del tipo di pavimentazione
Fonte: [18]

Siccome il documento di *ENAC* fa riferimento all' *AC 150/5370-11B FAA* si riporta di seguito la procedura attuata dalla normativa Americana. Per tutte le tipologie di pavimentazioni, la prova più comune è il test al centro (center test).

- Per le pavimentazioni in calcestruzzo cementizio giuntato (PCC) e per quelle in HMA su PCC (HMA overlaid PCC), il test viene eseguito al centro della lastra in PCC.
- Per le pavimentazioni in HMA, il test viene condotto al centro dell'impronta di ruota, lontano da eventuali fessurazioni.

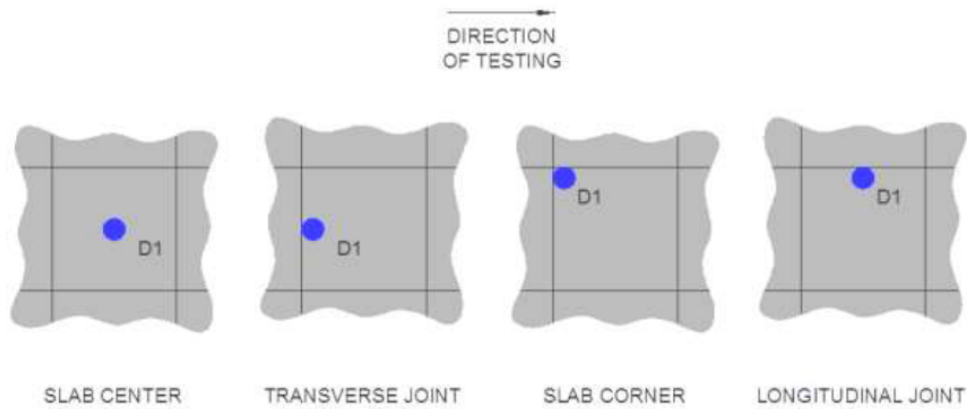


Figura 3.14: Punti di misura della deflessione lastre Fonte:[20]

In base alle condizioni operative e al tipo di test, un operatore NDT può generalmente raccogliere dati di deflessione in 150–250 punti per turno di 8 ore. Sebbene le prove NDT consentano una copertura della pavimentazione molto più ampia rispetto alle indagini distruttive (ad esempio carotaggi e sondaggi), è comunque necessario trovare un equilibrio tra copertura, costi e tempi. L'immagine fornisce linee guida generali per la spaziatura e la localizzazione dei test su taxiway e piste.

Test Type	Jointed PCC and HMA Overlaid PCC				HMA			
	Project Level		Network Level		Project Level		Network Level	
	Offset ft (m)	Spacing ft (m)	Offset ft (m)	Spacing ft (m)	Offset ft (m)	Spacing ft (m)	Offset ft (m)	Spacing ft (m)
Center	10 (3) 30 (9) 65 (20)	100 (30) 100 - 200 (30 - 60) 400 (120)	10 (3)	200 - 400 (60 - 120)	200 - 400 (60 - 120)	100 (30) 100 - 200 (30 - 60) 200 - 400 (60 - 120)	10 (3)	200 - 400 (60 - 120)
Tran. Joint	10 (3) 30 (9) 65 (20)	100 - 200 (30 - 60) 200 - 400 (60 - 120) 400 (120)	10 (3)					
Long. Joint	20 (6) 40 (12) 60 (18)	200 (60) 400 (120) 400 (120)						
Corner	20 (6) 40 (12) 60 (18)	200 (60) 400 (120) 400 (120)						

For each centerline offset, there are two NDT passes, one to the left and one to the right; spacing is staggered between adjacent NDT passes; and a minimum of two NDT tests should be conducted per pavement section.

Figura 3.15: Offset di misura della deflessione in caso di piste o taxiway Fonte: [20]

Test Type	Jointed PCC and HMA Overlaid PCC		HMA, Sq Ft (Sq M)	
	Project Level	Network Level	Project Level	Network Level
Center	1 test for every 10 - 20 slabs	1 test for every 30 - 60 slabs	1 test for every 1,970 - 4,000 (600 - 1200)	1 test for every 5,750 - 11,490 (1750 to 3,500)
Transverse Joint	1 test for every 10 - 40 slabs	1 test for every 60 slabs		
Longitudinal Joint	1 test for every 20 - 40 slabs	1 test for every 60 slabs		
Corner	1 test for every 20 - 40 slabs			

Figura 3.16: Offset di misura della deflessione in caso di aprons Fonte:[20]

In termini operativi le analisi dovranno essere condotte a seguito di un'attenta analisi superficiale di degrado, per individuare le zone maggiormente deteriorate presentando zone deboli dovute alla penetrazione dei fenomeni climatici, che potrebbero far variare i parametri meccanici rispetto al resto del sito, saranno quindi necessarie analisi stratigrafiche quali carotaggi e sondaggi specifici per individuare eventuali anomalie, mentre per il resto del sito, potranno essere usate prove non distruttive come il GPR per individuare le stratigrafie correlate da almeno un carotaggio per sezioni omogenee, per poter correlare i dati delle prove non distruttive e i carotaggi.

Dal punto di vista meccanico, invece, dovrebbero essere condotte prove non distruttive FWD per determinare le deflessioni sulla pavimentazione e i parametri meccanici associati, a fronte dell'unità di campionamento presentata da FAA, poichè come si vedrà dai risultati di FAARFIELD, i danni maggiori si registrano al di sotto della traccia delle ruote. Si andranno quindi ad effettuare su pavimentazioni flessibili analisi FWD ogni 3 metri a destra e sinistra della center line, fino a circa 9 metri, questo permetterà di analizzare la pavimentazione dove è maggiormente sollecitata dagli aeromobili che vi transitano. Inoltre per evitare di trascurare zone al di fuori delle tracce delle ruote si arriverà ad analizzare al massimo a 20 metri rispetto alla centerline considerando che pochi passaggi degli aeromobili deviano effettivamente dalla centerline. Per pavimentazioni rigide si seguirà la procedura di analisi al livello del project level per i diversi tipi di test presentati nella figura 3.16.

3.2 Casi Studio

Per meglio comprendere quanto visto nei capitoli relativi alla normativa, è necessario addentrarsi nei metodi attraverso casi studio rappresentativi della tipologia di aeroporti tipo italiani per comprendere meglio la transizione tra i metodi, il metodo attualmente da utilizzare per la dichiarazione della resistenza delle pavimentazioni è il metodo ACR-PCR, che sostituisce il metodo ACN-PCN. Nonostante l'entrata in vigore del nuovo metodo, attualmente nella pubblicazione negli AIP delle resistenze i valori riportati si riferiscono ancora al metodo ACN-PCN, quindi per comprendere il funzionamento dei metodi è necessario addentrarsi attraverso dei casi studio; in particolare, si andrà a determinare, attraverso l'uso dei software precedentemente introdotti, i valori numerici di PCR e PCN in funzione delle caratteristiche stratigrafiche e meccaniche e dello spettro di traffico operativo sulla pavimentazioni per interventi di riqualifica. Di seguito verranno analizzati cinque casi studio così di seguito composti:

1. Confronto PCR e PCN di una pista di volo di un aeroporto con rilevanza intercontinentale;
2. Confronto PCR e PCN per l'Aeroporto A con rilevanza internazionale degli interventi delle sue componenti:
 - una pista di volo;
 - diverse taxiway di collegamento tra pista e aprons;
 - un apron di sosta per aeromobili pesanti.
3. Confronto PCR e PCN per l'Aeroporto B con rilevanza internazionale analizzato nelle sue componenti:
 - una pista di volo;
 - diverse taxiway di collegamento tra pista e aprons.
4. Confronto PCR e PCN di una pista di volo dell'aeroporto C con rilevanza nazionale;
5. Confronto PCR e PCN di un apron dell'aeroporto D con rilevanza nazionale;

Per ogni pavimentazione analizzata si riporta quanto segue:

- Caratteristiche geometriche e aeronautiche della pista di volo;
- Caratteristiche stratigrafiche e meccaniche;
- I risultati ottenuti dai software per determinare i valori di PCR e PCN.

3.2.1 Hub con rilevanza intercontinentale

L'Aeroporto considerato nel presente studio come hub con rilevanza intercontinentale, è caratterizzato da elevati volumi di traffico e dalla presenza di aeromobili di grandi dimensioni e molto pesanti destinati all'aviazione commerciale. L'infrastruttura è pertanto soggetta a livelli di sollecitazione particolarmente elevati, dovuti alla frequenza dei movimenti e alle configurazioni di carico associate agli aeromobili wide-body impiegati su rotte a lungo raggio.

L'analisi del caso studio è finalizzata alla valutazione della resistenza delle pavimentazioni della pista mediante l'applicazione dei metodi ACN-PCN e ACR-PCR, con particolare attenzione alle differenze nei criteri di classificazione strutturale e nelle implicazioni operative derivanti dai due sistemi di codifica. La scelta di un hub di tale tipologia consente di analizzare condizioni operative particolarmente gravose per la verifica delle prestazioni dei metodi di valutazione della resistenza.

3.2.1.1 Caratteristiche geometriche e aeronautiche della pista di volo

Secondo le indicazioni dell'Annesso 14 di ICAO e delle CS-ADR-DSN di EASA, l'Aeroporto di tipo analizzato per il caso di hub con rilevanza intercontinentale ha codice di riferimento (Aerodrome Reference Code - ARC) "4F":

- codice numerico 4: "Aeroplane reference field length" Lunghezza del campo di riferimento dell'aeroplano superiore a 1.800 m;
- codice alfabetico F: idoneo per aeromobili con apertura alare fino a 80 m.

La pista presenta una lunghezza di 3.800 m e una larghezza della fascia portante pari a 60 m. A quest'ultima si aggiungono due banchine laterali (shoulders) di 10 m ciascuna, per una larghezza complessiva della superficie pavimentata pari a 80 m. Lo spettro di traffico operativo sulla pista è riportato nella tabella seguente:

Tabella 3.1: Spettro di traffico e numero di passaggi per input FAARFIELD

Aereomobili	Code	MTOW [ton]	N° passaggi 20 anni	N°input FAARFIELD
Airbus A380-800	F	575.0	46249	2313
Boeing 747-8	F	447.7	14765	739
Antonov AN-124 Ruslan	F	405.7	137	7
Airbus A350-900	E	280.0	105550	5278
Boeing 787-9	E	254.0	102056	5103
Boeing 777-200LR	E	347.5	63241	3163
Airbus A330-300	E	242.0	54300	2715
Boeing 747-400	E	396.9	40391	2020
Airbus A330-200	E	240.0	31758	1588
Boeing 777-200	E	247.2	28263	1414
Boeing 787-8	E	227.9	23536	1177
Boeing 777-300ER	E	351.5	23124	1157
Airbus A330-900 Neo	E	251.0	3289	165
Boeing 787-10	E	254.1	3186	160
Airbus A340-300	E	271.0	2364	119
Airbus A330-800 Neo	E	251.0	2090	105
Airbus A350-1000	E	322.0	856	43
Airbus A340-200	E	270.0	137	7
Boeing 747-200	E	377.8	69	4
Boeing 757-200	D	115.7	63960	3198
Airbus A300-600	D	171.7	57533	2877
Boeing 767-300	D	186.9	61413	3071
Boeing 767-400	D	204.1	16889	845
McDonnellDouglas MD11	D	273.3	377	19
Ilyushin IL76	D	190.0	103	6
Boeing C-17	D	265.4	34	2
AirbusA320-100/200 Ceo	C	78.0	977760	48888
Boeing 737-800	C	79.2	697104	34856
Airbus A321-200 Neo	C	97.0	555353	27768
Boeing 737 MAX 8	C	83.0	82220	4112
Boeing 737 MAX 9	C	88.5	308	16
Embraer 195	C	52.3	185958	9298
ATR 72-600	C	23.0	136492	6825

3.2.1.2 Caratteristiche stratigrafiche e meccaniche

La pavimentazione analizzata è di tipo flessibile e, come visto tramite l'analisi della normativa, le caratteristiche stratigrafiche e meccaniche sono uno dei parametri di input dei programmi utilizzati per le simulazioni. Per poter utilizzare correttamente i software, si riporta la stratigrafia dell'infrastruttura, composta da uno strato di usura di 6 cm, uno strato di binder di 9 cm, uno strato di base di 15 cm, uno strato di fondazione in misto cementato di 30 cm e il sottofondo assunto seminfinito caratterizzato da un modulo elastico di 120 MPa ($CBR = 11,6\%$)

Tabella 3.2: Stratigrafia e corrispondenza materiali in FAARFIELD

Strato	Spessore [cm]	"Materiale" in FAARFIELD
Usura in CB a tessitura ottimizzata	6	P-401/P-403 HMA Surface
Binder in CB ad elevate prestazioni	9	P-401/P-403 HMA Stabilized
Base in CB ad elevate prestazioni	15	P-401/P-403 HMA Stabilized
Fondazione in misto cementato	30	Variable (flexible) – $E = 1,300$ MPa
Sottofondo portanza del piano di posa	120 MPa	Subgrade (CBR 11,6%)

Gli strati in conglomerato bituminoso sono soggetti a variazioni significative dei parametri meccanici in funzione delle temperature; per questo motivo, sono stati correlati i dati di modulo elastico alle variazioni stagionali. Questi dati verranno poi utilizzati come parametri di input per il software FAARFIELD per capire come la variazione stagionale dei moduli influisca sul valore di PCR.

Tabella 3.3: Caratteristiche meccaniche dei materiali per la pavimentazione

Strato	Caratteristiche meccaniche dei materiali				
	E [MPa] inverno	E [MPa] primavera	E [MPa] estate	E [MPa] autunno	Coeff Poisson [-]
Usura in CB a tessitura ottimizzata	14.333	6.870	1.540	6.456	0,35
Binder in CB ad elevate prestazioni	16.280	8.474	2.197	8.019	0,35
Base in CB ad elevate prestazioni	16.601	10.075	2.790	9.633	0,35

3.2.1.3 Risultati dei software

Inserendo i dati stratigrafici in FAARFIELD il software restituisce la stratigrafia rappresentata in Figura 3.17. Inoltre, il programma a partire dallo spettro di traffico inserito, associa i valori di ACR per la categoria di sottofondo della pista di volo Figura 3.18.

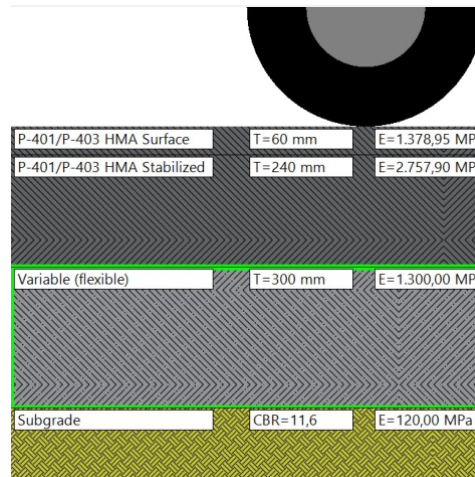


Figura 3.17: Stratigrafia della pista di volo hub intercontinentale da FAARFIELD

No.	Aircraft Name	Aircraft ACR	Calculated PCR	Annual Departure
1	A350-900	693,3	-	5.278
2	B787-10	662,2	-	160
3	B787-9	657,5	-	5.103
4	A330-800 WW820	645,2	-	105
5	A330-900 WW920	645,2	-	165
6	B777-300 ER	629,2	-	1.157
7	B747-8	616,7	-	739
8	B777-200 LR	611,7	-	3.163
9	MD-11	608,6	-	19
10	A330-300 WW054	597,5	-	2.715
11	B787-8	592,2	-	1.177
12	A330-200 WW058	589,7	-	1.588
13	A340-300 std	581,9	-	119
14	A350-1000	556,3	-	43
15	B767-400 ER	554	-	845
16	A321neo	523,8	-	27.768
17	A340-200 std	523,7	-	7
18	B747-400	518,3	-	2.020
19	A380-800 WW007	491,5	-	2.313
20	B737-9 MAX	481,2	-	16
21	B767-300 ER	477,2	-	3.071
22	B747-200/300	469,8	-	4
23	A300-600 LGA Bogle	462,6	-	2.877
24	C-17A	450,5	-	2
25	B737-8/8-200/BBJ MAX 8	434,1	-	4.112
26	An-124	427,7	-	7
27	B737-800	410	-	34.856
28	B777-200	407,4	-	1.414
29	A320-200 opt	391,5	1246,9	48.888
30	B757-200	289,4	-	3.198
31	EMB-195 STD	227,7	-	9.298
32	IL-76T	187,1	-	6
33	ATR 72-500	115,6	-	6.825

Figura 3.18: ACR e partenze annuali della pista di volo hub intercontinentale da FAARFIELD

Il Cumulative Damage Factor (CDF) è direttamente influenzato dalla configurazione dei carrelli degli aeromobili, poiché questa determina la distribuzione dei carichi sulla pavimentazione e quindi il livello di sollecitazione indotto negli strati. Nel caso dell'hub intercontinentale, la valutazione del Cumulative Damage Factor (CDF) è fortemente influenzata dalla presenza di aeromobili wide-body di nuova generazione, come l'Airbus A350-900, caratterizzati da configurazioni del carrello principale complesse. L'A350-900 è dotato di due carrelli principali a doppio tandem o triplo tandem, che consentono una ripartizione del carico e una riduzione delle tensioni trasmesse ai diversi strati della pavimentazione rispetto a configurazioni con minore numero di ruote. Tale distribuzione comporta un minore danno per singolo passaggio, ma negli hub intercontinentali, l'elevata frequenza operativa di aeromobili di grande massa, associata a pressioni di gonfiaggio elevate e carichi ripetuti, determina comunque un accumulo progressivo di danno strutturale nel tempo in termini di fatica degli strati bituminosi e deformazioni permanenti nel sottofondo. Di conseguenza, la configurazione del carrello e l'intensità del traffico rappresentano parametri fondamentali nella stima del CDF e nella valutazione della vita utile delle pavimentazioni aeroportuali.

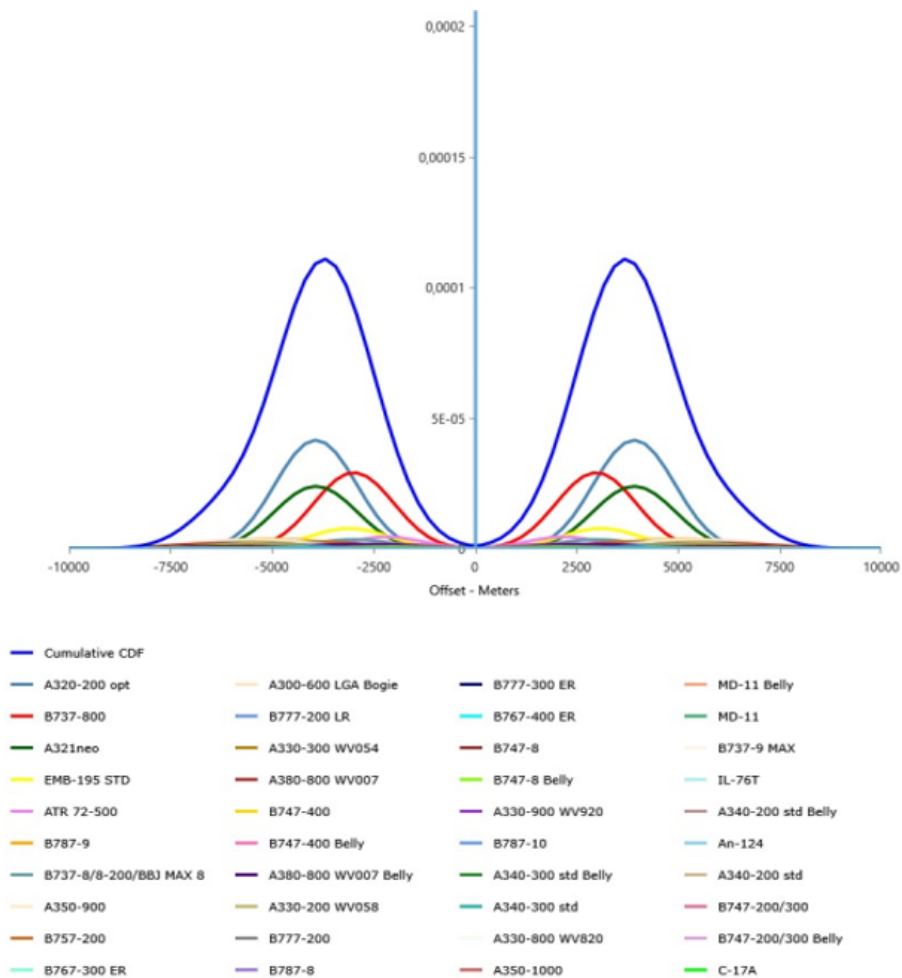


Figura 3.19: CDF della pista di volo hub intercontinentale da FAARFIELD

Determinato il CDF, FAARFIELD permette di valutare la vita utile della pavimentazione associata al danno cumulato prodotto dagli aeromobili operativi sulla pavimentazione valutata per un progetto di 20 anni, il valore che in questo caso restituisce il software è di 180000 anni. Come è logico pensare, difficilmente la pavimentazione resiste il periodo trovato perchè i fenomeni di deterioramento variano nel tempo. Il software permette di modificare gli spessori della pavimentazione e si è visto che, a fronte di una loro riduzione, ad esempio degli spessori degli strati di 1 cm per lo strato di usura e di 10 cm per strato di base e binder in conglomerato bituminoso la vita utile si riduce a 164 anni, anche per lo strato a cui il software punta come strato di riferimento, che di solito si trova al di sotto degli strati in conglomerato bituminoso, una sua riduzione di 10 cm a fronte degli stessi strati in CB utilizzati inizialmente porta a una vita utile di 600 anni, in definitiva con la variazione degli spessori, la vita utile si riduce e aumenta il CDF. Quindi lo strumento a sostegno del nuovo metodo permette di integrare la valutazione della resistenza della pavimentazione con una più attenta valutazione dei pacchetti stratigrafici utilizzati, ma tenendo conto che a fronte di una riduzione della vita utile, il CDF aumenta e il PCR diminuisce.

Il metodo prevede quindi il confronto tra i valori di ACR propri degli aeromobili operativi individuati nello spettro di traffico e il valore di PCR pari a 1247 ricavato per la pavimentazione a partire dalla stratigrafia presentata nella figura 3.17. La Figura 3.20 permette di verificare che sia rispettato il limite imposto dalla normativa $ACR \leq PCR$, che in questo caso viene ampiamente verificato, l'aeromobile critico con cui verificare tale limite è quello dell'A350-900 che presenta un valore di ACR pari a 693. Inoltre il software restituisce il codice alfa-numerico che è da utilizzare per la dichiarazione della resistenza 1250/F/B/X/T.

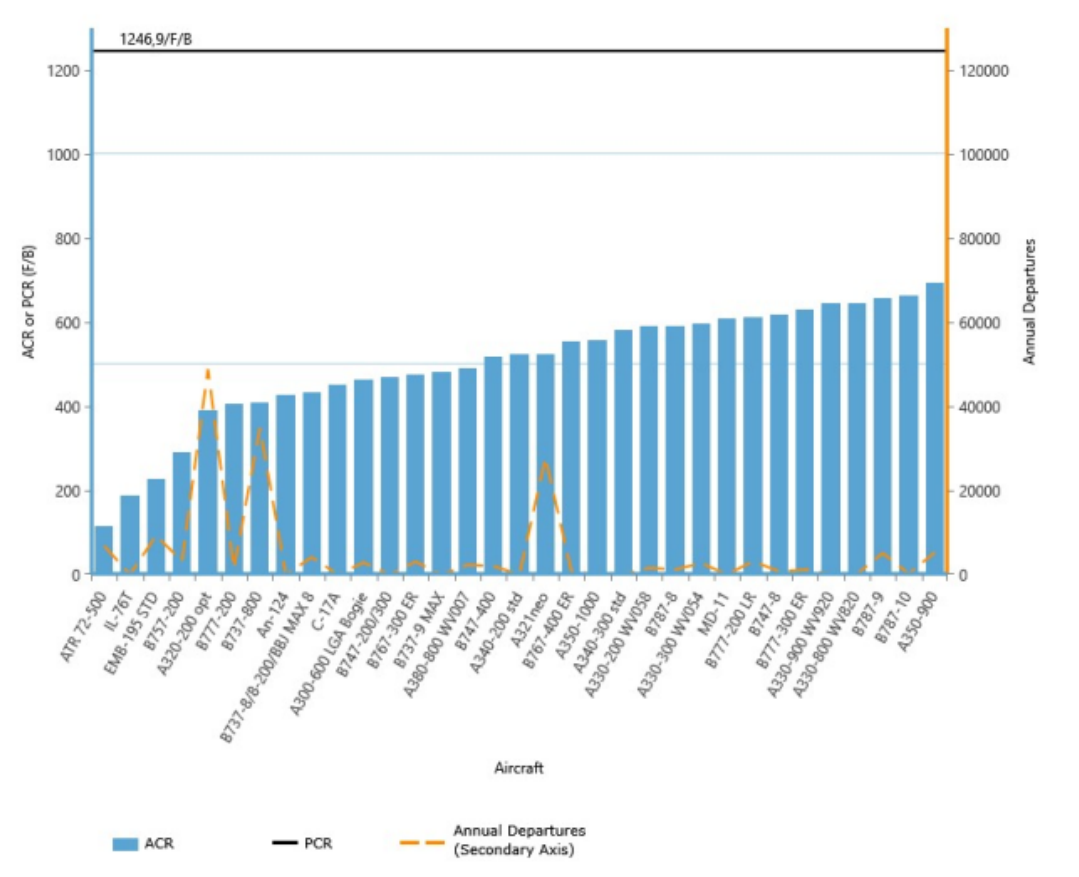


Figura 3.20: Grafico PCR della pista di volo hub intercontinentale da FAARFIELD

Il valore di PCR precedentemente ricavato è frutto dei moduli elastici che il software associa ai materiali selezionati per rappresentare la pavimentazione. Per poter modificare i moduli associati ai singoli strati è stato necessario trasformare la stratigrafia assegnata da FAARFIELD per gli strati in conglomerato bituminoso in strati "user defined" a cui è possibile associare il modulo elastico legato alle variazioni stagionali.

La Figura 3.21 rappresenta i valori di PCR ricavati da FAARFIELD che variano in funzione delle variazioni stagionali dei moduli elastici, rispetto al valore ricavato precedentemente tramite i parametri associati ai materiali degli strati presenti nella pavimentazione, i valori variano a seconda del fatto che in inverno le temperature più rigide portano a valori di modulo elastico molto grandi mentre con l'alzarsi delle temperature i moduli elastici diminuiscono.

Dal confronto con i valori di ACR ricavati tramite FAARFIELD, i PCR delle variazioni stagionali risultano comunque verificati ma differenti tra loro, per questo si riporta nel grafico anche la variazione percentuale del PCR. L'Annex 14 riporta in un'apposita nota che qualora si verifici una variazione stagionale significativa è possibile riportare valori differenti di PCR, per variazione stagionale significativa non è data definizione ma per quanto analizzato il PCR varia con la variazione stagionale dei moduli elastici, nonostante

il limite $ACR \leq PCR$ venga sempre verificato. Negli AIP consultabili online, però, viene generalmente pubblicato un unico valore di resistenza per la pavimentazione che viene ancora dichiarata con il vecchio metodo, presumibilmente dovrebbe avvenire la stessa cosa con il nuovo metodo, quindi a favore di sicurezza si dovrebbe prendere il più basso per evitare sovrastime del valore di PCR.

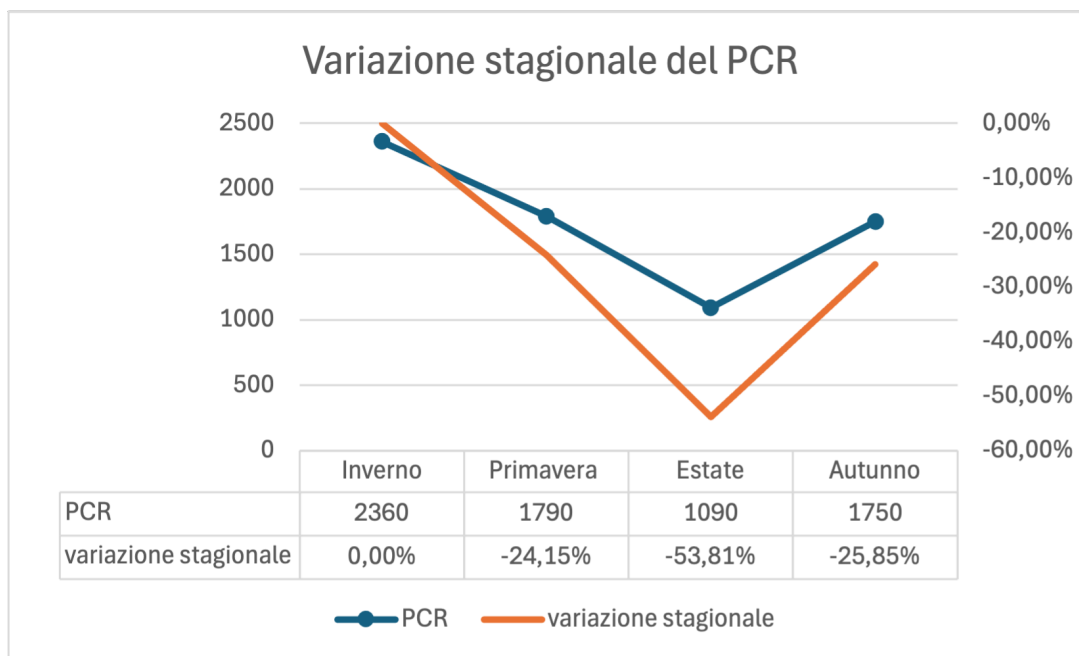


Figura 3.21: Grafico della variazione stagionale del valore di PCR ottenuti con FAARFIELD

La normativa afferma come visto in precedenza che non c'è una correlazione matematica tra i due metodi, ma per poter comprendere meglio le differenze tra i metodi è stata analizzata la pista anche con il metodo ACN-PCN attraverso l'utilizzo del software COMFAA. I parametri di input richiesti dal programma sono lo spessore totale equivalente della pavimentazione, il valore di CBR per il sottofondo e lo spettro di traffico annuale. Lo spessore totale equivalente è stato ricavato a partire dalla stratigrafia reale della pavimentazione con l'utilizzo dei coefficienti di conversione dati dall'AC 150-5335-5D, portando a un valore di spessore equivalente pari a 877mm. Lo spettro di traffico inserito è lo stesso utilizzato in FAARFIELD con alcune variazioni degli aeromobili poichè non presenti nella libreria interna del programma. La Figura 3.22 è l'output ricavato da COMFAA che individua il valore di PCN pari a 90 (89,8) in funzione dell'aeromobile critico B787-9 (Preliminary). L'aeromobile critico è quello che presenta il valore di ACN per la categoria di sottofondo (B) presente al di sotto della pavimentazione come si evince dalla Figura 3.23. Per poter comprendere meglio se il limite $ACN \leq PCN$ viene rispettato sono stati rappresentati tramite un istogramma i valori ACN per poterli confrontare con il valore di PCN, Figura 3.24. La dichiarazione della resistenza attraverso il codice alfa-numerico dovrebbe quindi essere 90/F/B/X/T.

CBR = 11,60 (Subgrade Category is B(10))
 Evaluation pavement thickness = 877,0 mm
 Pass to Traffic Cycle (PtoTC) Ratio = 1,00
 Maximum number of wheels per gear = 10
 Maximum number of gears per aircraft = 4

At least one aircraft has 4 or more wheels per gear. The FAA recommends a reference section assuming 127 mm of HMA and 203 mm of crushed aggregate for equivalent thickness calculations.

Results Table 1. Input Traffic Data

No.	Aircraft Name	Gross Weight	Percent Gross Wt	Tire Press	Annual Deps	20-yr Coverages	6D Thick
1	A380e (WLG) 575t	575,000	37,73	1.500	2.313	24.441	659,2
2	B747-8	449,056	94,70	1.524	739	8.344	649,0
3	An-124	397,996	95,00	1.027	7	221	420,4
4	A350-900 Preliminary	268,900	93,68	1.660	5.278	46.228	700,6
5	B777-200LR	348,722	91,68	1.503	3.163	48.348	683,2
6	B747-400	397,801	93,32	1.379	2.020	23.169	625,4
7	A330-300 std	242,000	95,74	1.420	2.715	29.669	671,9
8	A330-200 238.9t	240,000	92,59	1.420	1.588	16.996	637,1
9	B787-8	227,900	91,30	1.572	1.177	12.259	641,6
10	B777-300 ER	352,441	92,44	1.524	1.157	17.731	670,4
11	B787-9 (Preliminary)	251,744	93,55	1.544	5.103	49.971	718,3
12	A340-300 std	275,895	79,58	1.420	119	1.266	538,7
13	A340-200 std	257,896	80,10	1.320	7	75	381,2
14	B747-300 Combi Mixed	379,203	90,96	1.310	4	45	331,7
15	B757-200	116,120	91,18	1.262	3.198	32.191	471,5
16	A300-600 LB	172,600	95,00	1.340	2.877	33.430	596,0
17	B767-300 ER	187,334	92,40	1.379	3.071	33.627	607,1
18	B767-400 ER	204,570	93,94	1.482	845	9.311	616,4
19	MD11ER	287,124	77,54	1.420	19	206	468,3
20	IL76T	171,000	94,00	530	6	122	271,2
21	C-17A	265,352	95,00	951	2	31	319,0
22	A320 Twin opt	78,400	92,80	1.440	48.888	263.548	606,9
23	B737-800	79,243	93,56	1.413	34.856	195.960	617,7
24	A321-200 opt	97,000	94,60	1.500	27.768	164.561	693,0

Results Table 2. PCN Values

No.	Aircraft Name	Critical Aircraft Total Equiv. Covs.	Thickness for Total Equiv. Covs.	Maximum Allowable Gross Weight	ACN Thick at Max. Allowable Gross Weight	CDF	PCN on B(10)
11	B787-9 (Preliminary)	895,007	785,6	293,824	822,31	0,0000	89,8
						Total CDF =	0,0000

Figura 3.22: Output del PCN del software COOMFAA

Results Table 3. Flexible ACN at Indicated Gross Weight and Strength

No.	Aircraft Name	Gross Weight	% GW on Main Gear	Tire Pressure	ACN Thick	ACN on B(10)
1	A380e (WLG) 575t	575,000	37,73	1.500	700,0	65,1
2	B747-8	449,056	94,70	1.524	730,4	70,9
3	An-124	397,996	95,00	1.027	589,9	46,2
4	A350-900 Preliminary	268,900	93,68	1.660	723,2	69,5
5	B777-200LR	348,722	91,68	1.503	721,9	69,3
6	B747-400	397,801	93,32	1.379	667,9	59,3
7	A330-300 std	242,000	95,74	1.420	708,5	66,6
8	A330-200 238.9t	240,000	92,59	1.420	689,3	63,1
9	B787-8	227,900	91,30	1.572	704,5	65,9
10	B777-300 ER	352,441	92,44	1.524	732,6	71,3
11	B787-9 (Preliminary)	251,744	93,55	1.544	739,3	72,6
12	A340-300 std	275,895	79,58	1.420	683,9	62,1
13	A340-200 std	257,896	80,10	1.320	654,7	56,9
14	B747-300 Combi Mixed	379,203	90,96	1.310	633,7	53,3
15	B757-200	116,120	91,18	1.262	498,4	33,0
16	A300-600 LB	172,600	95,00	1.340	626,2	52,0
17	B767-300 ER	187,334	92,40	1.379	637,1	53,9
18	B767-400 ER	204,570	93,94	1.482	688,7	63,0
19	MD11ER	287,124	77,54	1.420	714,5	67,8
20	IL76T	171,000	94,00	530	398,9	21,1
21	C-17A	265,352	95,00	951	599,2	47,7
22	A320 Twin opt	78,400	92,80	1.440	568,3	42,9
23	B737-800	79,243	93,56	1.413	584,0	45,3
24	A321-200 opt	97,000	94,60	1.500	657,5	57,4

Figura 3.23: Output degli ACN del software COOMFAA

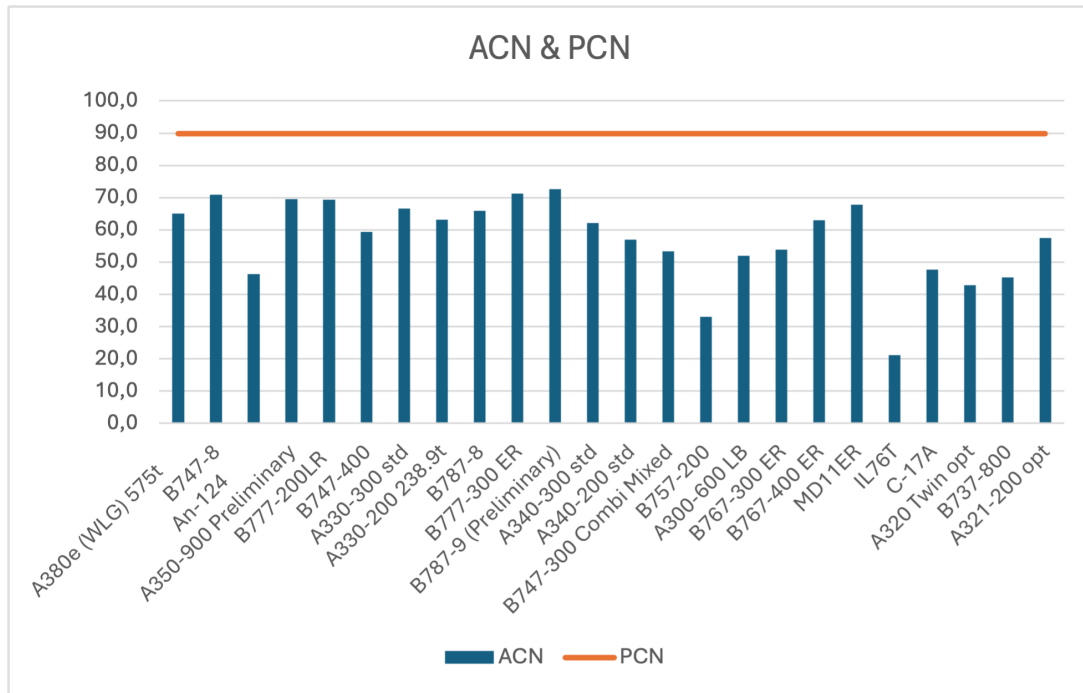


Figura 3.24: Confronto dei valori di ACN e PCN ottenuti con COMFAA

Nonostante non vi sia correlazione matematica tra i metodi, è possibile verificare che per la pavimentazione analizzata entrambi i metodi vengono verificati, ma come si evince dai grafici di confronto la distanza tra il limite dei valori ACR e PCR e dei valori ACN e PCN varia significativamente, in particolare il nuovo metodo favorisce particolarmente il limite mentre il vecchio metodo seppure verificato se ne avvicina molto. Il perchè potrebbe essere legato al fatto che nel nuovo metodo il software analizza la pavimentazione come realmente è costituita, la sua configurazione stratigrafica reale e i parametri meccanici reali, inoltre FAARFIELD rispetto a COMFAA presenta aeromobili aggiornati in termini di configurazioni e pesi rispetto alla libreria interna presente nel vecchio software ed è in grado di calcolare il danno cumulato CDF prodotto dagli aeromobili sulla pavimentazione.

3.2.2 Hub con rilevanza internazionale

Nel presente studio sono analizzati due aeroporti con rilevanza internazionale, indicati come Aeroporto A e Aeroporto B, selezionati per la valutazione comparativa della resistenza delle pavimentazioni airside mediante i metodi ACN-PCN e ACR-PCR. Entrambi gli aeroporti sono caratterizzati da traffico commerciale e da livelli di sollecitazione sulle pavimentazioni rappresentativi di contesti operativi tipici del trasporto aereo internazionale, sebbene presentino differenti configurazioni strutturali e condizioni di esercizio. In particolare, l'Aeroporto A è analizzato con riferimento alle pavimentazioni di pista, taxiway e apron, mentre per l'Aeroporto B l'analisi è focalizzata sulla pista di volo e sulle taxiway. La selezione dei due casi studio consente di valutare l'applicabilità e le differenze tra i sistemi di classificazione ACN-PCN e ACR-PCR in presenza di diverse configurazioni airside e condizioni operative simili.

3.2.2.1 Aeroporto A con rilevanza internazionale

Dal punto di vista dell'infrastruttura Air-Side, l'aeroporto A analizzato dispone di una pista di volo, un apron principale a servizio delle attività di aviazione commerciale e diversi raccordi di collegamento, tra cui le taxiways "A", "B", "C", "E", "F", "G". Secondo le indicazioni dell'Annesso 14 di ICAO e delle CS-ADR-DSN di EASA, l'Aeroporto A ha codice di riferimento (Aerodrome Reference Code - ARC) "4D":

- codice numerico 4: "Aeroplane reference field length" Lunghezza del campo di riferimento dell'aeroplano maggiore di 1.800 m;
- codice alfabetico D definisce un'apertura alare inferiore ai 52 m.

La Pista di Volo presenta una lunghezza pari a 2.400 m ed una larghezza della fascia portante pari a 45 m. Oltre tale fascia, lungo ambo i lati, si estendono le shoulders per una larghezza di 7,50 m.

Così come visto per l'aeroporto con rilevanza intercontinentale è necessario considerare la stratigrafia reale della pavimentazione aeroportuale per la valutazione della sua resistenza, la pavimentazione della pista di volo è di tipo flessibile ed è composta da strati in conglomerato bituminoso usura di 6 cm, binder di 9 cm, base di 15 cm, da una fondazione stabilizzata in sito di 20 cm e dal sottofondo assunto seminfinito caratterizzato da un CBR pari a 20%. Lo spettro di traffico, riportato nella tabella sottostante, è caratterizzato da aeromobili di classe C e D per voli a medio raggio.

Tabella 3.4: Stratigrafia della pavimentazione

Strato	Spessore [cm]	“Material” in FAARFIELD
Usura in CB a tessitura ottimizzata	6	P-401/P-403 HMA Surface
Binder in CB ad elevate prestazioni	9	P-401/P-403 HMA Stabilized
Base in CB ad elevate prestazioni	15	P-401/P-403 HMA Stabilized
Fondazione stabilizzata in sito a cemento	20	Variable (flexible) $E = 1100$ MPa
Sottofondo Portanza del piano di posa	200 MPa	Subgrade (CBR = 20%)

Tabella 3.5: Spettro di traffico aeroporto A

Aeromobili	Codice	Movimenti stimati (20 anni)	N° input FAARFIELD
Saab 340A	B	142	8
ATR 42 / ATR 72	C	55.053	2753
CRJ-700	C	142	8
EMB 170 / EMB 175	C	19.251	963
CRJ-900	C	213	11
CRJ-1000	C	568	29
BAE 146-300	C	3.197	160
Fokker F100	C	213	11
Boeing 737-200	C	3.907	196
EMB 195	C	40.419	2021
Boeing 717	C	118.559	5928
Boeing 737-500	C	9.803	491
Boeing 737-300	C	39.141	1958
Boeing 737-600	C	1.492	75
MD-82	C	24.010	1201
Airbus A318	C	142	8
Boeing 737-400 Freighter	C	35.944	1798
Boeing 737-400	C	6.109	306
Boeing 737-700	C	21.915	1096
Airbus A319	C	440.990	22050
Airbus A320	C	829.200	41460
Boeing 737-800	C	786.933	39347
Boeing 737 MAX 8	C	8.098	405
Boeing 737-900ER	C	2.770	139
Airbus A321	C	143.918	7196
Boeing 757-200	D	1.137	57
Boeing 757-300	D	568	29
Airbus A310	D	71	4
Boeing 767-300	D	1.776	89

La funzione di distribuzione cumulativa (CDF) rappresenta la distribuzione probabilistica dei passaggi degli aeromobili rispetto all'asse della pista. Essa descrive il fenomeno del lateral wander, ovvero la dispersione laterale delle traiettorie degli aeromobili durante le operazioni di decollo. La distribuzione risulta simmetrica rispetto all'asse pista e presenta valori massimi in corrispondenza delle posizioni più frequentemente percorse dalle ruote. La curva complessiva rappresenta la distribuzione cumulata del traffico ed è utilizzata nel modello FAARFIELD per determinare la distribuzione spaziale dei carichi e l'accumulo del danno nella pavimentazione. Come si evince dall'immagine rispetto all'asse della pista il CDF è la sommatoria dei CDF degli aeromobili che operano sulla pavimentazione ha massimo in corrispondenza della traccia delle ruote, rispetto al caso precedente, la configurazione dei carrelli più semplici determina dei picchi più alti del danno cumulato totale associato al fatto che il peso viene ripartito in modo meno distribuito rispetto ai carrelli più complessi.

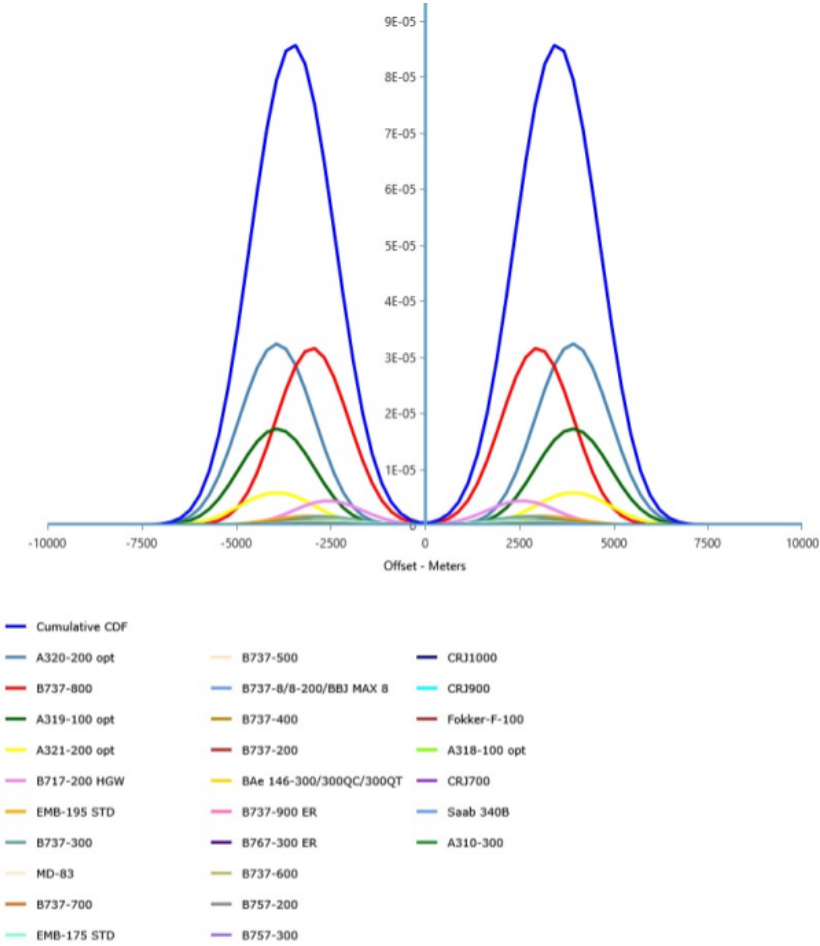


Figura 3.25: Grafico CDF aeroporto A ottenuto da FAARFIELD

Anche nel caso dell'aeroporto A è stata calcolata la vita utile associata alla stratigrafia iniziale pari a 230.000 anni, anche in questo caso è difficile che effettivamente la pavimentazione resista ai carichi senza mai deteriorarsi, ma legata al fatto che il pacchetto

stratigrafico è pressoché simile a quello della pavimentazione analizzata precedentemente ma con una riduzione significativa del volume e dello spettro di traffico e un aumento di portanza del sottofondo significativo tale per cui una riduzione degli strati non porta a valori sensati di vita utile.

Il metodo prevede il confronto tra i valori di ACR propri degli aeromobili operativi individuati nello spettro di traffico e il valore di PCR pari a 1040 ricavato per la pavimentazione. La Figura 3.26 permette di verificare che sia rispettato il limite imposto dalla normativa $ACR \leq PCR$, che in questo caso viene ampiamente verificato, rispetto all'aeromobile critico A321-200 con ACR pari a 462. La dichiarazione della resistenza dovrebbe essere tramite il codice 1040/F/A/X/T.

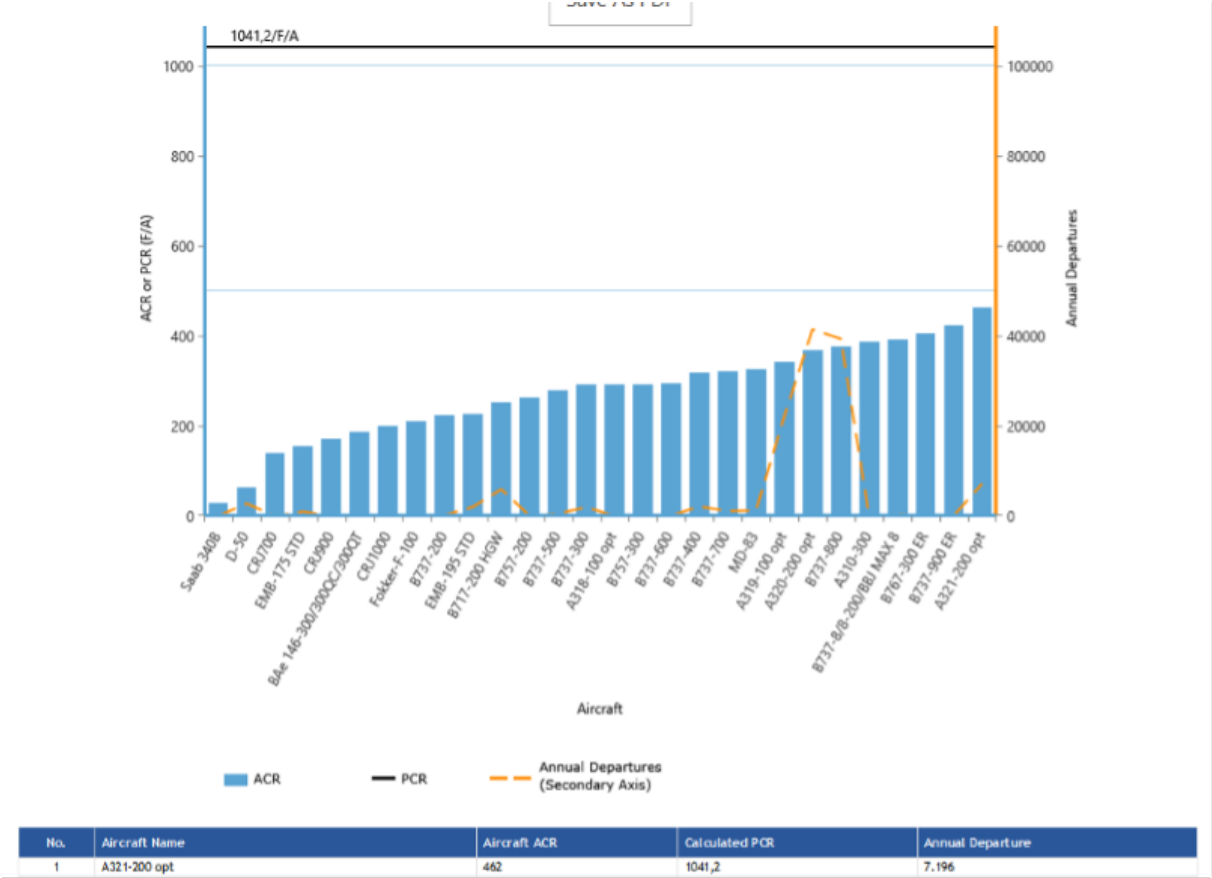


Figura 3.26: Grafico PCR aeroporto A per la pista di volo ottenuto da FAARFIELD

Per comprendere se la pavimentazione può ospitare i vari aeromobili, bisogna confrontare gli ACR degli aeromobili calcolati per il sottofondo considerato con il valore di PCR calcolato. La figura 3.27 riporta i valori di ACR calcolati in funzione dello spettro di traffico inserito per la pavimentazione.

No.	Aircraft Name	Aircraft ACR	Calculated PCR	Annual Departure
1	A321-200 opt	462	1041,2	7.196
2	B767-300 ER	439,9	-	89
3	B737-900 ER	422,9	-	139
4	B737-8/8-200/BBJ MAX 8	399,4	-	405
5	B737-800	377,2	-	39.347
6	A320-200 opt	368	-	41.460
7	MD-83	360,5	-	1.201
8	A310-300	338,8	-	4
9	B737-700	321	-	1.096
10	B737-400	318,6	-	305
11	A319-100 opt	299,8	-	22.050
12	A318-100 opt	291,7	-	7
13	B737-600	291,4	-	75
14	B737-300	291,4	-	1.957
15	B757-300	289,2	-	28
16	B737-500	279,5	-	490
17	B757-200	262,3	-	57
18	B717-200 HGW	252,9	-	5.928
19	B737-200	224,4	-	195
20	Fokker-F-100	210	-	11
21	EMB-195 STD	208,8	-	2.021
22	CRJ1000	199,7	-	28
23	BAe 146-300/300QC/300QT	179,3	-	160
24	CRJ900	172,2	-	11
25	EMB-175 STD	153,2	-	963
26	CRJ700	138,6	-	7
27	Saab 340B	27,7	-	7

Figura 3.27: ACR aeroporto A per la pista di volo ottenuto da FAARFIELD

Il valore di PCR ricavato è frutto dei moduli elastici che il software associa ai materiali selezionati per rappresentare la pavimentazione. Per poter modificare i moduli associati ai singoli strati è stato necessario trasformare la stratigrafia assegnata da FAARFIELD per gli strati in conglomerato bituminoso in strati "user defined" a cui è possibile associare il modulo elastico legato alle variazioni stagionali.

La Figura 3.28 rappresenta i valori di PCR ricavati da FAARFIELD che variano in funzione delle variazioni stagionali dei moduli elastici, presentati nella tabella 3.6, rispetto al valore ricavato precedentemente tramite i parametri associati ai materiali degli strati presenti nella pavimentazione, come visto per il primo aeroporto analizzato i valori variano a seconda del fatto che in inverno le temperature più rigide portano a valori di modulo elastico molto grandi mentre con l'alzarsi delle temperature i moduli elastici diminuiscono.

Dal confronto con i valori di ACR ricavati tramite FAARFIELD i PCR delle variazioni stagionali risultano comunque verificati ma differenti con la variazione stagionale, per questo si riporta nel grafico anche la variazione percentuale del PCR. Rispetto al caso precedente la variazione stagionale presentata è pressochè la stessa nonostante vari la pavimentazione considerata e la locazione geografica dell'aeroporto.

Tabella 3.6: Caratteristiche meccaniche dei materiali con variazioni stagionali

Strato	Caratteristiche meccaniche dei materiali				Coeff. Poisson [-]
	E [MPa] inverno	E [MPa] primavera	E [MPa] estate	E [MPa] autunno	
Usura in CB a tessitura ottimizzata	10.605	5.604	1.521	4.004	0,35
Binder in CB ad elevate prestazioni	11.300	6.148	2.003	4.507	0,35
Base in CB ad elevate prestazioni	12.148	7.315	2.146	5.612	0,35

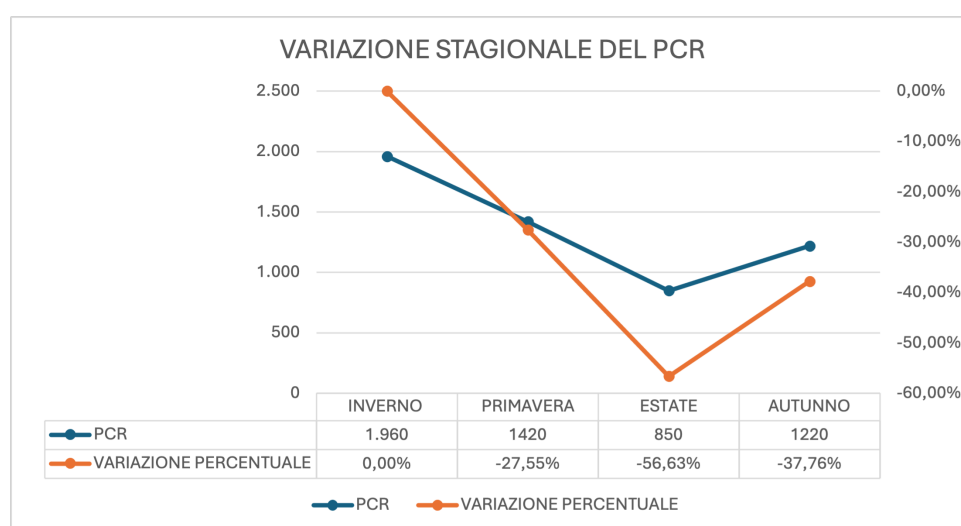


Figura 3.28: Variazione stagionale dei PCR aeroporto A per la pista di volo

Anche in questo caso nonostante la normativa del nuovo metodo affermi che non c'è una correlazione matematica tra i due metodi, è stata analizzata la pista anche con il metodo ACN-PCN attraverso l'utilizzo del software COMFAA. I parametri di input richiesti dal programma sono lo spessore totale equivalente della pavimentazione, il valore di CBR per il sottofondo e lo spettro di traffico annuale. Lo spessore totale equivalente è stato ricavato a partire dalla stratigrafia reale della pavimentazione con l'utilizzo dei coefficienti di conversione dati dall'AC 150-5335-5D, portando a un valore di spessore equivalente pari a 853 mm. Lo spettro di traffico inserito è lo stesso utilizzato in FAARFIELD con alcune variazioni degli aeromobili poichè non presenti nella libreria interna del programma. La Figura 3.29 è l'output ricavato da COMFAA che individua il valore di PCN pari a 85 (84,1) in funzione dell'aeromobile critico A321-200 opt. L'aeromobile critico è quello che presenta il valore di ACN per la categoria di sottofondo (B) presente al di sotto della pavimentazione come si evince dalla Figura 3.30. Per poter comprendere meglio se il

limite $ACN \leq PCN$ viene rispettato sono stati rappresentati tramite un istogramma i valori ACN per poterli confrontare con il valore di PCN, Figura 3.31.

Evaluation pavement type is flexible and design procedure is CBR.
Alpha Values are those approved by the ICAO in 2007.

CBR = 20,00 (Subgrade Category is A(15))
Evaluation pavement thickness = 853,0 mm
Pass to Traffic Cycle (PtoTC) Ratio = 1,00
Maximum number of wheels per gear = 4
Maximum number of gears per aircraft = 2

At least one aircraft has 4 or more wheels per gear. The FAA recommends a reference section assuming 127 mm of HMA and 203 mm of crushed aggregate for equivalent thickness calculations.

Results Table 1. Input Traffic Data

No.	Aircraft Name	Gross Weight	Percent Gross Wt	Tire Press	Annual Deps	20-yr Coverages	6D Thick
1	A321-200 opt	93,900	94,60	1.500	7.196	41.966	442,4
2	B737-900 ER	85,366	94,58	1.517	139	787	320,8
3	B767-300 ER	187,334	92,40	1.379	89	975	337,3
4	A310-300	142,900	94,40	1.290	4	44	205,9
5	B737-800	79,243	93,56	1.413	39.347	221.209	433,8
6	A320 Twin opt	78,400	92,80	1.440	41.460	223.505	423,4
7	A319-100 opt	68,400	91,40	1.380	22.050	112.609	373,2
8	MD83	73,028	94,76	1.344	1.201	7.022	355,4
9	B737-700	70,307	91,70	1.413	1.096	5.750	326,9
10	B737-400	68,266	93,82	1.276	305	1.729	298,7
11	B737-600	65,771	91,66	1.413	75	381	249,3
12	B757-300	122,924	92,62	1.344	28	283	246,3
13	A318-100 opt	68,400	89,16	1.240	7	37	173,4
14	B737-300	63,503	90,86	1.386	1.957	10.112	323,1
15	B737-500	60,781	92,24	1.338	490	2.540	287,1
16	B757-200	116,120	91,18	1.262	87	574	250,5
17	B717-200 HGW	55,338	94,42	1.131	5.928	33.366	328,2
18	Adv. B737-200	58,332	91,92	1.255	195	1.021	256,3
19	Fokker 100	44,680	95,60	980	11	61	157,7
20	BAe 146	40,600	94,20	880	160	861	193,4

Results Table 2. PCN Values

No.	Aircraft Name	Critical Aircraft Total Equiv. Covs.	Thickness for Total Equiv. Covs.	Maximum Allowable Gross Weight	ACN Thick at Max. Allowable Gross Weight	CDF	PCN on A(15)
1	A321-200 opt	>5,000,000	663,0	138,679	622,07	0,0000	84,1
						Total CDF =	0,0000

Figura 3.29: Grafico PCN aeroporto A per la pista di volo ottenuto da COMFAA

Flexible ACN at Indicated Gross Weight and Strength. Units = Metric.

No.	Aircraft Name	Gross Weight	% GW on Main Gear	Tire Pressure	ACN at Indicated Code			
					A(15)	B(10)	C(6)	D(3)
1	A321-200 opt	93,900	94,60	1.500	52,2	55,1	61,0	66,6
2	B737-900 ER	85,366	94,58	1.517	47,9	50,8	56,0	60,8
3	B767-300 ER	187,334	92,40	1.379	48,8	53,9	65,8	86,7
4	A310-300	142,900	94,40	1.290	37,7	41,8	50,5	65,8
5	B737-800	79,243	93,56	1.413	42,8	45,3	50,3	55,2
6	A320 Twin opt	78,400	92,80	1.440	41,0	42,9	47,3	53,1
7	A319-100 opt	68,400	91,40	1.380	34,2	35,4	38,9	44,6
8	MD83	73,028	94,76	1.344	42,4	45,9	50,0	53,1
9	B737-700	70,307	91,70	1.413	36,3	38,1	42,1	47,2
10	B737-400	68,266	93,82	1.276	37,0	39,3	44,0	47,9
11	B737-600	65,771	91,66	1.413	33,5	35,0	38,6	43,7
12	B757-300	122,924	92,62	1.344	32,9	36,6	45,1	58,1
13	A318-100 opt	68,400	89,16	1.240	32,9	33,9	37,5	43,2
14	B737-300	63,503	90,86	1.386	33,0	34,8	38,8	42,8
15	B737-500	60,781	92,24	1.338	31,9	33,3	37,4	41,4
16	B757-200	116,120	91,18	1.262	29,7	33,0	40,3	52,9
17	B717-200 HGW	55,338	94,42	1.131	30,8	32,5	36,5	39,5
18	Adv. B737-200	58,332	91,92	1.255	30,0	31,1	35,2	39,3
19	Fokker 100	44,680	95,60	980	24,7	26,4	29,8	32,2
20	BAe 146	40,600	94,20	880	19,4	20,6	23,5	27,1

Figura 3.30: Grafico ACN aeroporto A per la pista di volo ottenuto da COMFAA

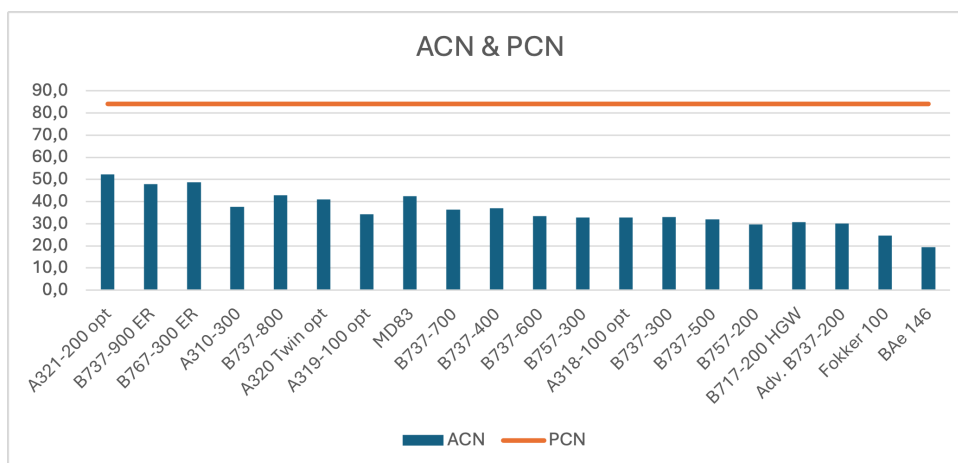


Figura 3.31: Grafico ACN aeroporto A per la pista di volo ottenuto da COMFAA

Nel presente studio non viene considerata esclusivamente la pista, ma anche le taxiway, in quanto da normativa l'analisi della resistenza delle pavimentazioni deve estendersi alle superfici pavimentate su cui transitano gli aeromobili nell'Airside, anche tali infrastrutture devono quindi possedere e dichiarare un valore di resistenza che rispetti il limite imposto da normativa. In particolare per l'aeroporto A le taxiway presentano la medesima stratigrafia e lo spettro di traffico della pista, si discostano però nei valori di moduli elastici e CBR come riportato nella tabella seguente.

Tabella 3.7: Parametri di sottofondo e moduli elastici per le taxiway

TAXIWAY	Indice CBR [%]	Modulo elastico del piano di posa [MPa]
A	13	136
B	13	139
C	18	184
E	16	166
F	18	192
G	16	169

Per il confronto tra i valori delle resistenze individuate dai due metodi si riportano nelle tabelle per le taxiway A, B, C, E, F, G i valori di PCR associati all'ACR dell'aeromobile critico, ovvero quell'aeromobile che per la pavimentazione in esame riporta il più alto valore di ACR, ricavati da FAARFIELD e i valori di PCN associati al valore dell'ACN dell'aeromobile critico individuati con COMFAA.

Tabella 3.8: Taxiway A Aeroporto A

TAXIWAY A			
Resistenza	Aeromobile critico		
PCR	830	ACN A321-200opt	500
PCN	110	ACR A321-200opt	55

Tabella 3.9: Taxiway B Aeroporto A

TAXIWAY B			
Resistenza	Aeromobile critico		
PCR	830	ACN A321-200opt	500
PCN	110	ACR A321-200opt	55

Tabella 3.10: Taxiway C Aeroporto A

TAXIWAY C			
Resistenza	Aeromobile critico		
PCR	950	ACN A321-200opt	462
PCN	73	ACR A321-200opt	53

Tabella 3.11: Taxiway E Aeroporto A

TAXIWAY E			
Resistenza	Aeromobile critico		
PCR	860	ACN A321-200opt	462
PCN	62	ACR A321-200opt	53

Tabella 3.12: Taxiway F Aeroporto A

TAXIWAY F			
Resistenza	Aeromobile critico		
PCR	950	ACN A321-200opt	462
PCN	73	ACR A321-200opt	53

Tabella 3.13: Taxiway G Aeroporto A

TAXIWAY G			
Resistenza	Aeromobile critico		
PCR	860	ACN A321-200opt	462
PCN	62	ACR A321-200opt	53

Dalle tabelle delle diverse taxiway si evince che i limiti vengono sempre rispettati, così come avveniva per la pista, ma anche per le taxiway il nuovo metodo presenta un margine più alto dal limite.

Nel caso studio dell'aeroporto A viene inoltre analizzata anche la pavimentazione del piazzale di sosta (apron), realizzata in lastronato di calcestruzzo, cioè una pavimentazione rigida. La stratigrafia della pavimentazione rigida è composta da una lastra in calcestruzzo di 40 cm, dalla fondazione in misto cementato e dal sottofondo seminfinito caratterizzato da un modulo elastico di 112,6 Mpa. Lo spettro di traffico considerato si riduce semplicemente a due aeromobili che utilizzano il piazzale A320 e A321-200. Il piazzale è stato analizzato sia attraverso FAARFIELD sia attraverso COMFAA.

Tabella 3.14: Stratigrafia pavimentazione rigida

Strato	Spessore [cm]	“Materiale” in FAARFIELD
Lastra in CLS C45/55	40	P-501 PCC Surface
Fondazione in misto cementato	20	Variable (flexible)
Sottofondo	112,6 MPa	Subgrade

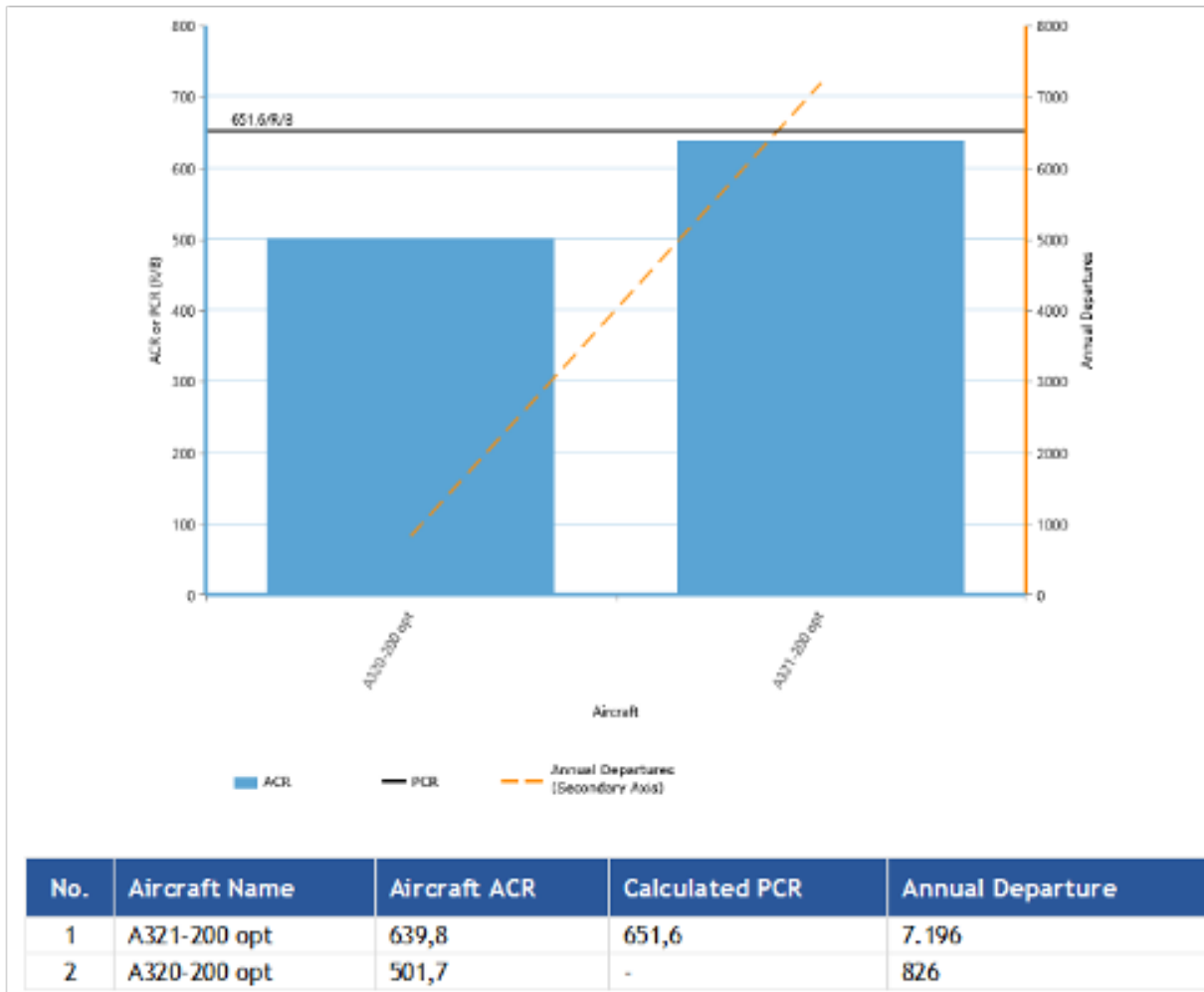


Figura 3.32: Grafico PCR aeroporto A per lo stand ottenuto da FAARFIELD

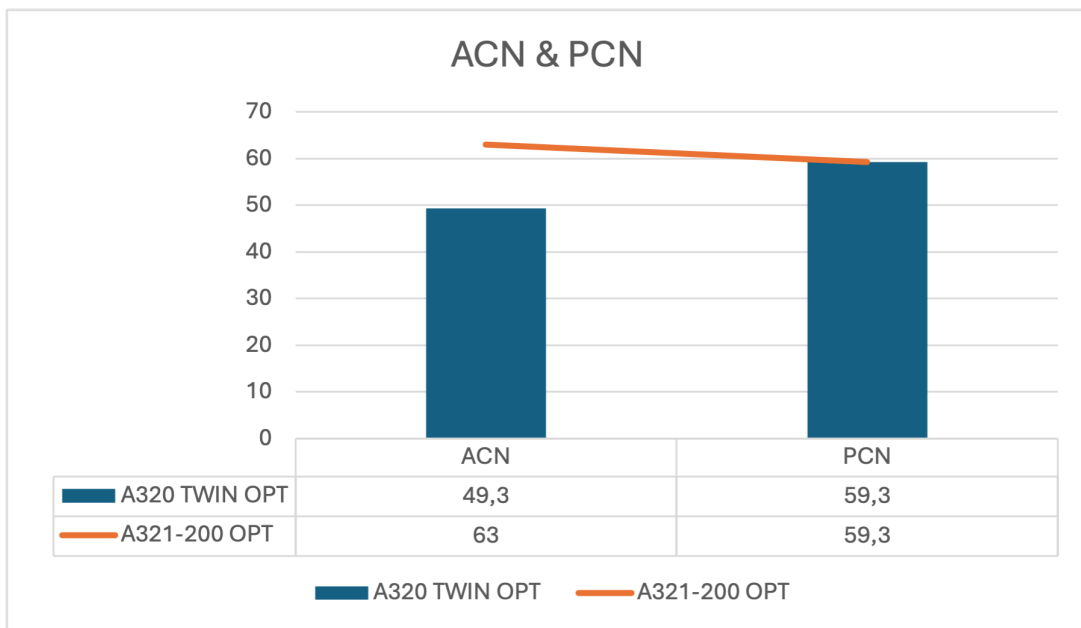


Figura 3.33: Grafico ACN & PCN aeroporto A per lo stand

Dal confronto del grafico di PCR in funzione degli ACR e del grafico di PCN in funzione degli ACN si evidenzia che nel caso del nuovo metodo il limite è rispettato anche se di poco, mentre per il vecchio metodo il limite non viene rispettato. Questo perchè analizzando tramite COMFAA il danno cumulato (CDF) l'aeromobile A321-200 opt eccede il limite di vita utile, che avviene quando $CDF = 1$, questo comporta che la pavimentazione per il periodo di vita considerato supera la sua capacità limite e quindi la pavimentazione non risulta in grado di sostenere il traffico previsto. La normativa consente operazioni in sovraccarico che nel caso del vecchio metodo per pavimentazioni rigide era al massimo il 5% in più del valore di PCN e il totale dei movimenti non doveva eccedere il 5% del totale dei movimenti annui. Nonostante ciò il valore di ACN supera del 6,24% il valore di PCN quindi questo implica che con il vecchio metodo non è possibile ospitare tutto il traffico previsto e quindi bisognerebbe ridurre il numero di partenze annuali almeno per far rientrare il confronto nei limiti delle operazioni in sovraccarico consentite.

```

Maximum gross weight computed with the AC 150/5320-6C/D edge stress design method.

          k Value = 66,0 MN/m3 (Subgrade Category is B(80))
    flexural strength = 5.000 kPa
    Evaluation pavement thickness = 400,0 mm
    Pass to Traffic Cycle (PtoTC) Ratio = 1,00

    Maximum number of wheels per gear = 2
    Maximum number of gears per aircraft = 2

Results Table 1. Input Traffic Data

```

No.	Aircraft Name	Gross Weight	Percent Gross Wt	Tire Press	Annual Deps	20-yr Coverages	6D Thick
1	A320 Twin opt	78,400	92,80	1.440	826	4.453	320,5
2	A321-200 opt	93,900	94,60	1.500	7.196	41.966	410,2

```

Results Table 2. PCN Values

```

No.	Aircraft Name	Critical Aircraft Total Gross Weight	Thickness for Total Equiv. Covs.	Maximum Allowable Gross Weight	ACN Thick at Max. Allowable Gross Weight	CDF	PCN on B(80)
1	A320 Twin opt	282.100	409,5	74,921	306,45	0,0244	46,7
2	A321-200 opt	42.639	410,6	89,235	342,41	1,5213	59,3
Total CDF =						1,5457	

```

Results Table 3. Rigid ACN at Indicated Gross Weight and Strength

```

No.	Aircraft Name	Gross Weight	% GW on Main Gear	Tire Pressure	ACN Thick	ACN on B(80)
1	A320 Twin opt	78,400	92,80	1.440	314,2	49,3
2	A321-200 opt	93,900	94,60	1.500	352,1	63,0

Figura 3.34: Valore di PCN aeroporto A per lo stand ottenuto da COMFAA

In definitiva per le pavimentazioni flessibili il limite viene sempre verificato anche se la distanza dal limite nel caso del nuovo metodo è più ampia rispetto al vecchio metodo, mentre per la pavimentazione rigida analizzata il limite con il nuovo metodo viene rispettato cosa che però non avviene con il vecchio metodo.

3.2.2.2 Aeroporto B con rilevanza internazionale

Dal punto di vista dell'infrastruttura Air-Side, l'aeroporto dispone di una Pista di Volo e diversi raccordi di collegamento, tra cui le taxiways "A", "B", "BC", "C", "D", "E", "F", "G" e "L" per l'aviazione commerciale. Secondo le indicazioni dell'Annesso 14 di ICAO e

delle CS-ADR-DSN di EASA, l'Aeroporto ha codice di riferimento (Aerodrome Reference Code - ARC) "4D":

- codice numerico 4: "Aeroplane reference field length" Lunghezza del campo di riferimento dell'aeroplano maggiore di 1.800 m;
- codice alfabetico D definisce un'apertura alare inferiore ai 52 m.

La Pista di Volo presenta una lunghezza pari a 2.600 m ed una larghezza della fascia portante pari a 45 m. Oltre tale fascia, lungo ambo i lati, si estendono le shoulders per una larghezza di 7,50 m.

Tabella 3.15: Stratigrafia della pavimentazione Aeroporto B

Strato	Spessore [cm]	"Material" in FAARFIELD
Usura in CB a tessitura ottimizzata	5	P-401/P-403 HMA Surface
Binder in CB ad elevate prestazioni	7	P-401/P-403 HMA Stabilized
Base in CB ad elevate prestazioni	14	P-401/P-403 HMA Stabilized
Fondazione stabilizzata in sito a cemento	27	Variable (flexible) $E = \text{MPa}$
Sottofondo Portanza del piano di posa	120 MPa	Subgrade (CBR = 11,6 %)

Così come visto per l'aeroporto A è necessario considerare la stratigrafia reale della pavimentazione aeroportuale per la valutazione della sua resistenza, anche in questo caso la pavimentazione della pista di volo è di tipo flessibile ed è composta da strati in conglomerato bituminoso, usura di 5 cm, binder di 7 cm, base di 14 cm, da una fondazione stabilizzata in sito di 27 cm e dal sottofondo assunto seminfinito caratterizzato da un CBR pari a 11,6%. Lo spettro di traffico viene riportato nella tabella seguente caratterizzato da aeromobili di classe C in prevalenza, D e E per voli a medio raggio.

Tabella 3.16: Flotta aeromobili e input FAARFIELD Aeroporto B

Aereomobili	MTOW [ton]	Code	N° passaggi 20 anni	N°input FAARFIELD
Fokker 100	45,8	C	962	49
Airbus A220-100	63,1	C	1.519	76
Airbus A220-300	70,9	C	62.768	3139
Embraer E195-E2	62,5	C	4.254	213
Airbus A318	68	C	1.823	92
Airbus A319	75,5	C	235.881	11795
Airbus A320-100/200	78	C	668.930	33447
Airbus A320 NEO	79	C	67.123	3357
Boeing 737-300	64	C	3.444	173
Boeing 737-400	68	C	3.570	179
Boeing 737-500	61,7	C	101	6
Boeing 737-700	70,1	C	5.824	292
Boeing 737-800	79,2	C	614.644	30733
Boeing 737-900	79,2	C	3.393	170
Embraer 190	51,8	C	25.345	1268
Embraer 195	52,3	C	9.470	474
MD82	68	C	51	3
Boeing 737 MAX 8	83	C	95.102	4756
Airbus A321-100/200	93,5	C	80.896	4045
Airbus A321 NEO	97	C	86.514	4326
Airbus A330-200	242	E	68.410	3421
Airbus A330-300	242	E	9.121	457
Airbus A330-900 NEO	251	E	18.243	913
Boeing 757-200	116,1	D	926	47
Boeing 767-300	158,8	D	9.563	479
Boeing 787-9	254	E	9.121	457
Boeing 737 MAX 9	88,5	C	886	45
Airbus A300-600	172,6	D	10.026	502

Il metodo prevede il confronto tra i valori di ACR propri degli aeromobili operativi individuati nello spettro di traffico e il valore di PCR pari a 1210 ricavato per la pavimentazione. La Figura 3.35 permette di verificare che sia rispettato il limite imposto dalla normativa $ACR \leq PCR$, che in questo caso viene ampiamente verificato, l'aereo critico individuato è il B787-9 che presenta un ACR pari a 652,7. La dichiarazione dovrebbe avvenire con il codice alfa-numerico 1210/F/B/X/T.

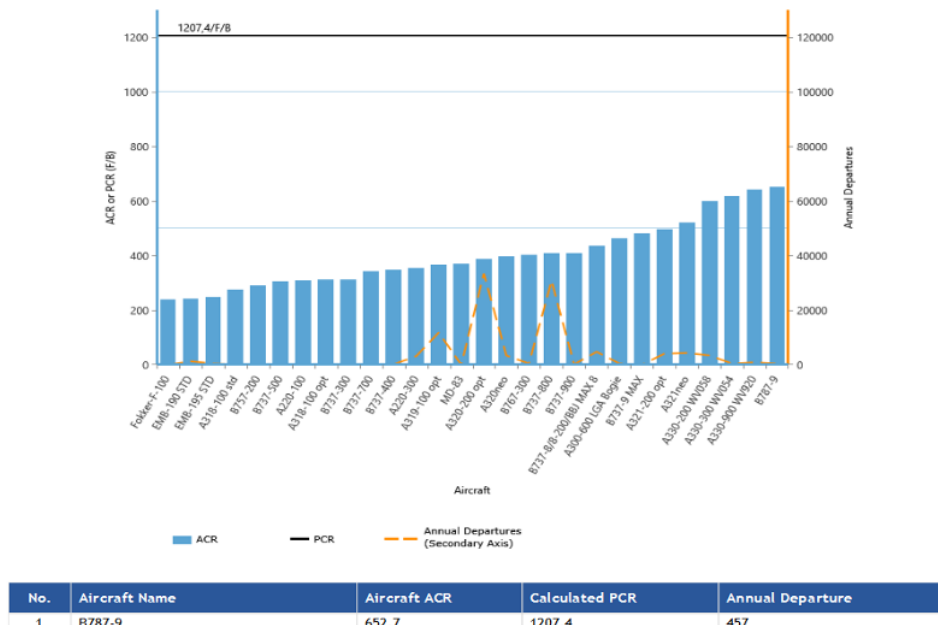


Figura 3.35: Grafico PCR aeroporto B per la pista di volo ottenuto da FAARFIELD

Così come per l'aeroporto A viene riportata la curva del CDF in funzione dello spettro di traffico operativo sulla pavimentazione analizzata che riporta il picco più o meno nel medesimo punto del precedente traffico, indice del fatto che gli aeromobili percorrono quasi sempre le stesse traiettorie ma riportando un valore totale di CDF leggermente inferiore. La vita utile che deriva dal software riporta sempre valori elevati pari a 200000 anni.

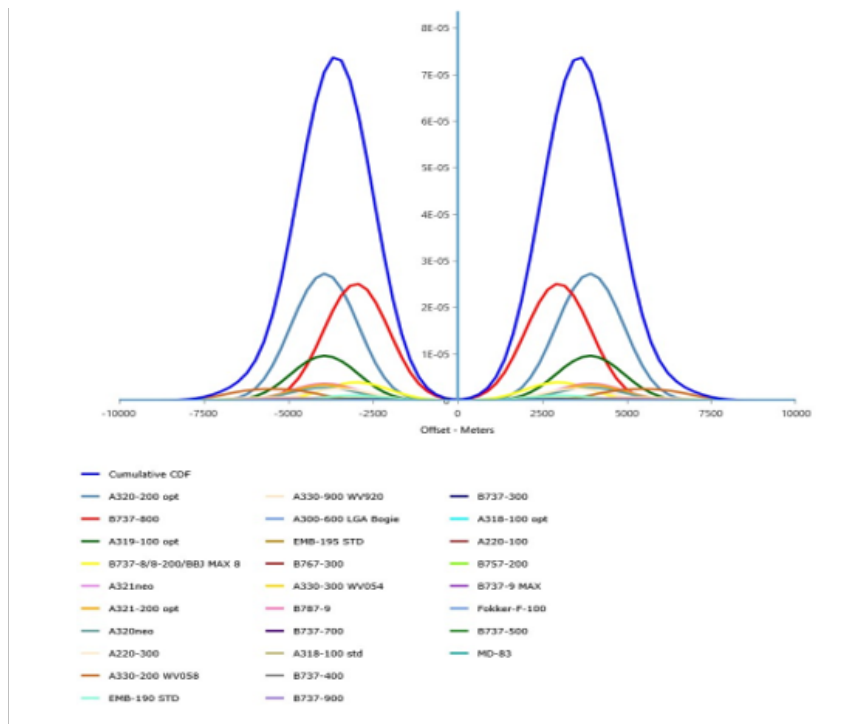


Figura 3.36: Grafico CDF aeroporto B ottenuto da FAARFIELD

No.	Aircraft Name	Aircraft ACR	Calculated PCR	Annual Departure
1	B787-9	652,7	1207,4	457
2	A330-900 WV920	642,2	-	913
3	A330-300 WV054	617,5	-	457
4	A330-200 WV058	599,7	-	3.421
5	A321neo	520,9	-	4.326
6	A321-200 opt	497,4	-	4.045
7	B737-9 MAX	481,2	-	45
8	A300-600 LGA Bogie	462,6	-	502
9	B737-8/8-200/BBJ MAX 8	435,1	-	4.756
10	B737-900	410,1	-	170
11	B737-800	410	-	30.733
12	B767-300	403,3	-	479
13	A320neo	396,6	-	3.357
14	A320-200 opt	388,9	-	33.447
15	MD-83	368,6	-	3
16	A319-100 opt	365,8	-	11.795
17	A220-300	354,2	-	3.139
18	B737-400	349,8	-	179
19	B737-700	343,8	-	292
20	B737-300	313,4	-	173
21	A318-100 opt	312,6	-	92
22	A220-100	309,7	-	76
23	B737-500	307,4	-	6
24	B757-200	289,4	-	47
25	A318-100 std	276	-	213
26	EMB-195 STD	248,4	-	474
27	EMB-190 STD	243,9	-	1.268
28	Fokker-F-100	240,1	-	49

Figura 3.37: ACR aeroporto B per la pista di volo ottenuto da FAARFIELD

Tabella 3.17: Caratteristiche meccaniche dei materiali con variazioni stagionali

Strato	Caratteristiche meccaniche dei materiali			
	E [MPa] inverno	E [MPa] primavera	E [MPa] estate	E [MPa] autunno
Usura in CB a tessitura ottimizzata	11.874	6.270	1.731	4.828
Binder in CB ad elevate prestazioni	12.620	6.812	2.191	5.326
Base in CB ad elevate prestazioni	13.333	7.949	2.576	6.452

Il valore di PCR ricavato è frutto dei moduli elastici che il software associa ai materiali selezionati per rappresentare la pavimentazione. Per poter modificare i moduli associati ai singoli strati è stato necessario trasformare la stratigrafia assegnata da FAARFIELD per gli strati in conglomerato bituminoso in strati "user defined" a cui è possibile associare il modulo elastico legato alle variazioni stagionali.

La Figura 3.38 rappresenta i valori di PCR ricavati da FAARFIELD che variano in funzione delle variazioni stagionali dei moduli elastici, presentati nella tabella 3.17, rispetto

al valore ricavato precedentemente tramite i parametri associati ai materiali degli strati presenti nella pavimentazione, come visto per l'aeroporto A analizzato i valori variano.

Dal confronto con i valori di ACR ricavati tramite FAARFIELD i PCR delle variazioni stagionali risultano comunque verificati ma differenti con la variazione stagionale, per questo si riporta nel grafico anche la variazione percentuale del PCR. Rispetto al caso precedente la variazione stagionale presentata è pressochè la stessa nonostante vari la pavimentazione considerata.

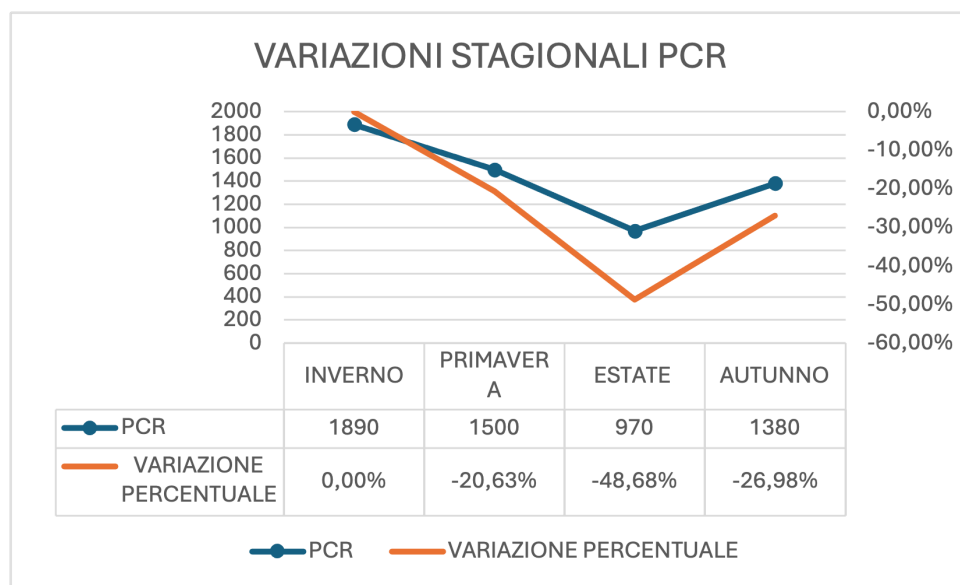


Figura 3.38: Variazione stagionale dei PCR aeroporto B per la pista di volo

Come per l'aeroporto A l'analisi è stata estesa al vecchio metodo, lo spessore totale equivalente è stato ricavato a partire dalla stratigrafia reale della pavimentazione con l'utilizzo dei coefficienti di conversione dati dall'AC 150-5335-5D, portando a un valore di spessore equivalente pari a 703 mm. Lo spettro di traffico inserito è lo stesso utilizzato in FAARFIELD con alcune variazioni degli aeromobili poichè non presenti nella libreria interna del programma.

La Figura 3.39 è l'output ricavato da COMFAA che individua il valore di PCN pari a 77 (76,1) in funzione dell'aeromobile critico B787-9 Preliminary. L'aeromobile critico è quello che presenta il valore di ACN per la categoria di sottofondo (B) presente al di sotto della pavimentazione come si evince dalla Figura 3.40. Per poter comprendere meglio se il limite $ACN \leq PCN$ viene rispettato, sono stati rappresentati tramite un istogramma i valori ACN per poterli confrontare con il valore di PCN, Figura 3.41.

CBR = 11,60 (Subgrade Category is B(10))
 Evaluation pavement thickness = 703,0 mm
 Pass to Traffic Cycle (PtoTC) Ratio = 1,00
 Maximum number of wheels per gear = 4
 Maximum number of gears per aircraft = 2

At least one aircraft has 4 or more wheels per gear. The FAA recommends a reference section assuming 127 mm of HMA and 203 mm of crushed aggregate for equivalent thickness calculations.

Results Table 1. Input Traffic Data

No.	Aircraft Name	Gross Weight	Percent Gross Wt	Tire Press	Annual Deps	20-yr Coverages	6D Thick
1	A318-100 opt	68,400	89,16	1.240	92	489	356,2
2	A318-100 std	56,400	90,40	1.020	213	1.142	345,7
3	Fokker 100	44,680	95,60	980	49	273	287,5
4	A-320 Bogie	73,900	93,80	1.220	72	614	285,9
5	B737-300	63,503	90,86	1.386	173	894	380,4
6	B737-400	68,266	93,82	1.276	179	1.015	407,8
7	B737-500	60,781	92,24	1.338	6	31	231,8
8	B737-700	70,307	91,70	1.413	292	1.532	419,5
9	B737-800	79,243	93,56	1.413	30.733	172.781	614,2
10	MD83	73,028	94,76	1.344	3	18	231,6
11	B757-200	116,120	91,18	1.262	47	473	353,3
12	B787-9 (Preliminary)	251,744	93,55	1.544	1.021	10.000	666,2
13	A300-600 STD	172,600	95,00	1.340	478	5.666	557,9
14	A330-300 235.9t	235,900	94,67	1.450	457	4.852	598,9
15	A330-200 238.9t	238,900	92,59	1.420	3.421	36.531	657,1
16	A321-200 opt	93,900	94,60	1.500	4.045	23.590	615,3
17	A320 Twin opt	78,400	92,80	1.440	33.447	180.308	597,4
18	A319-100 opt	68,400	91,40	1.380	11.795	60.237	518,1

Results Table 2. PCN Values

No.	Aircraft Name	Critical Aircraft Total Equiv. Covs.	Thickness for Total Equiv. Covs.	Maximum Allowable Gross Weight	ACN Thick at Max. Allowable Gross Weight	CDF	PCN on B(10)
12	B787-9 (Preliminary)	17.999	686,6	260,636	756,90	0,3375	76,1
					Total CDF =	0,3375	

Figura 3.39: Grafico PCN aeroporto B per la pista di volo ottenuto da COMFAA

Flexible ACN at Indicated Gross Weight and Strength. Units = Metric.

No.	Aircraft Name	Gross Weight	% GW on Main Gear	Tire Pressure	ACN at Indicated Code			
					A(15)	B(10)	C(6)	D(3)
1	A318-100 opt	68,400	89,16	1.240	32,9	33,9	37,5	43,2
2	A318-100 std	56,400	90,40	1.020	25,8	26,8	29,6	34,8
3	Fokker 100	44,680	95,60	980	24,7	26,4	29,8	32,2
4	A-320 Bogie	73,900	93,80	1.220	18,3	20,0	23,8	32,5
5	B737-300	63,503	90,86	1.386	33,0	34,8	38,8	42,8
6	B737-400	68,266	93,82	1.276	37,0	39,3	44,0	47,9
7	B737-500	60,781	92,24	1.338	31,9	33,3	37,4	41,4
8	B737-700	70,307	91,70	1.413	36,3	38,1	42,1	47,2
9	B737-800	79,243	93,56	1.413	42,8	45,3	50,3	55,2
10	MD83	73,028	94,76	1.344	42,4	45,9	50,0	53,1
11	B757-200	116,120	91,18	1.262	29,7	33,0	40,3	52,9
12	B787-9 (Preliminary)	251,744	93,55	1.544	66,0	72,6	87,5	117,5
13	A300-600 STD	172,600	95,00	1.340	48,8	55,1	67,4	84,9
14	A330-300 235.9t	235,900	94,67	1.450	58,8	63,5	73,7	99,7
15	A330-200 238.9t	238,900	92,59	1.420	57,8	62,7	72,7	98,3
16	A321-200 opt	93,900	94,60	1.500	52,2	55,1	61,0	66,6
17	A320 Twin opt	78,400	92,80	1.440	41,0	42,9	47,3	53,1
18	A319-100 opt	68,400	91,40	1.380	34,2	35,4	38,9	44,6

Figura 3.40: Grafico ACN aeroporto B per la pista di volo ottenuto da COMFAA

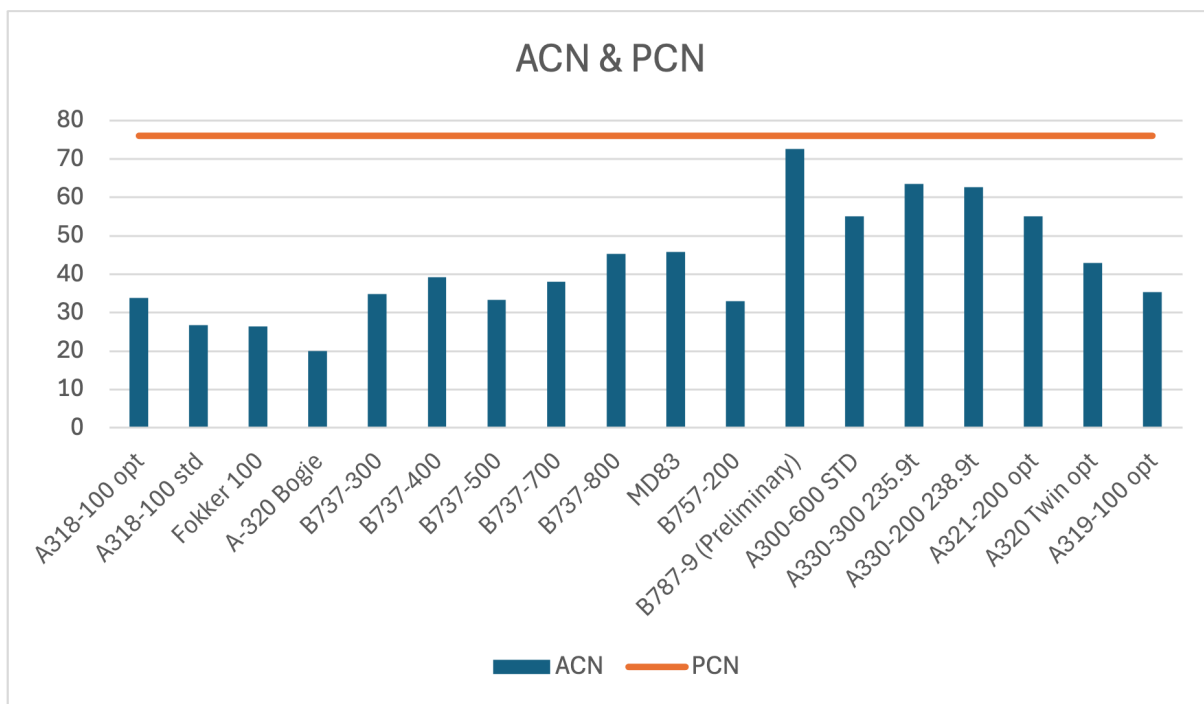


Figura 3.41: Grafico ACN PCN aeroporto B per la pista di volo

Nello studio dell'aeroporto B non viene considerata esclusivamente la pista, ma anche le taxiway, così come è stato fatto per l'aeroporto A. In particolare per l'aeroporto B le taxiway presentano stratigrafie differenti che sono riportate nelle tabelle sottostanti, mentre lo spettro di traffico della pista è il medesimo della pista. I valori di CBR del sottofondo associati alle diverse taxiway risultano i seguenti: la taxiway A presenta un valore di CBR pari a 14,5, la taxiway B pari a 13, la taxiway BC pari a 11,6, la taxiway C pari a 13, la taxiway D pari a 14, la taxiway E e la taxiway F presentano entrambe un valore pari a 10, la taxiway G pari a 16,2 e infine, la taxiway L presenta un valore di CBR pari a 10,6.

Tabella 3.18: Stratigrafia Taxiway BC e materiali FAARFIELD

TAXIWAY BC		
Strato	Spessore [cm]	Material in FAARFIELD
Usura in CB a tessitura ottimizzata	5	P-401/P-403 HMA Surface
Binder in CB ad elevate prestazioni	7	P-401/P-403 HMA Stabilized
Base in CB ad elevate prestazioni	14	P-401/P-403 HMA Stabilized
Fondazione stabilizzata in sito a cemento	27	P-301 Soil Cement Base

Tabella 3.19: Taxiway BC Aeroporto B

TAXIWAY BC			
Resistenza	Aeromobile critico		
PCR	1210	ACN 787-9	653
PCN	77	ACR 787-9	73

Tabella 3.20: Stratigrafia Taxiway A, B, C, D e G e materiali FAARFIELD

TAXIWAY A B C D G		
Strato	Spessore [cm]	Material in FAARFIELD
Usura in CB a tessitura ottimizzata	5	P-401/P-403 HMA Surface
Binder in CB ad elevate prestazioni	7	P-401/P-403 HMA Stabilized
Base in CB ad elevate prestazioni	14	P-401/P-403 HMA Stabilized
Fondazione stabilizzata in sito a cemento	23	P-301 Soil Cement Base

Tabella 3.21: Taxiway A Aeroporto B

TAXIWAY A			
Resistenza	Aeromobile critico		
PCR	1310	ACN 787-9	653
PCN	84	ACR 787-9	66

Tabella 3.22: Taxiway B Aeroporto B

TAXIWAY B			
Resistenza	Aeromobile critico		
PCR	1170	ACN 787-9	653
PCN	95	ACR 787-9	72,6

Tabella 3.23: Taxiway C Aeroporto B

TAXIWAY C			
Resistenza	Aeromobile critico		
PCR	1170	ACN 787-9	653
PCN	95	ACR 787-9	72,6

Tabella 3.24: Taxiway D Aeroporto B

TAXIWAY D			
Resistenza	Aeromobile critico		
PCR	1260	ACN 787-9	653
PCN	99	ACR 787-9	66

Tabella 3.25: Taxiway G Aeroporto B

TAXIWAY G			
Resistenza	Aeromobile critico		
PCR	1120	ACN 787-9	653
PCN	76	ACR 787-9	66

Tabella 3.26: Stratigrafia Taxiway E, F e L e materiali FAARFIELD

TAXIWAY E F L		
Strato	Spessore [cm]	Material in FAARFIELD
Usura in CB a tessitura ottimizzata	5	P-401/P-403 HMA Surface
Binder in CB ad elevate prestazioni	7	P-401/P-403 HMA Stabilized
Base in CB ad elevate prestazioni	14	P-401/P-403 HMA Stabilized
Fondazione stabilizzata in sito a cemento	30	P-301 Soil Cement Base

Tabella 3.27: Taxiway E Aeroporto B

TAXIWAY E			
Resistenza	Aeromobile critico		
PCR	1160	ACN 787-9	653
PCN	78	ACR 787-9	72,6

Tabella 3.28: Taxiway F Aeroporto B

TAXIWAY F			
Resistenza	Aeromobile critico		
PCR	1160	ACN 787-9	653
PCN	78	ACR 787-9	72,6

Tabella 3.29: Taxiway L Aeroporto B

TAXIWAY L			
Resistenza	Aeromobile critico		
PCR	1220	ACN 787-9	653
PCN	86	ACR 787-9	72,6

Per quanto riguarda le taxiway quindi i limiti vengono sempre rispettati, nonostante cambi la stratigrafia e la portanza del sottofondo, ma con margini diversi dal limite così come avveniva per la pista.

3.2.3 Hub con rilevanza nazionale

Nel presente lavoro vengono analizzati anche due aeroporti con rilevanza nazionale, indicati come Aeroporto C e Aeroporto D, rappresentativi di scali con funzione di collegamento su scala nazionale e con diversi livelli di traffico e sollecitazione delle infrastrutture airside.

3.2.3.1 Aeroporto C con rilevanza nazionale

L'aeroporto C considerato per il caso di aeroporti con rilevanza nazionale secondo le indicazioni dell'Annesso 14 di ICAO e delle CS-ADR-DSN di EASA, ha codice di riferimento (Aerodrome Reference Code - ARC) "4E":

- codice numerico 4: "Aeroplane reference field length" Lunghezza del campo di riferimento dell'aeroplano maggiore di 1.800 m;
- codice alfabetico D definisce un'apertura alare inferiore ai 65 m.

La Pista di Volo presenta una lunghezza pari a 2.900 m ed una larghezza della fascia portante pari a 45 m. Oltre tale fascia, lungo ambo i lati, si estendono le shoulders per una larghezza di 7,50 m.

La pavimentazione analizzata è di tipo flessibile, così come quella delle piste viste in precedenza, la stratigrafia della pista dell'aeroporto C è composta quindi da uno strato di usura di 6 cm, strati di binder e base di 24 cm, uno strato in misto cementato di 20 cm, uno strato in materiale granulare di 25 cm ed infine dal sottofondo assunto seminfinito caratterizzato da un CBR pari a 11,6% a cui è associato un modulo elastico di 118 MPa. Viene anche riportato lo spettro di traffico operativo sulla pavimentazione per il periodo d'analisi considerato.

Tabella 3.30: Stratigrafia della pavimentazione Aeroporto B

Strato	Spessore [cm]	“Material” in FAARFIELD
Usura in CB a tessitura ottimizzata	6	P-401/P-403 HMA Surface
Binder e Base in CB ad elevate prestazioni	24	P-401/P-403 HMA Stabilized
Fondazione stabilizzata in sito a cemento	20	P304 Cement treated
Sottofondazione in materiale granulare	25	P209 Crushed Aggregate
Sottofondo Portanza del piano di posa	118 MPa	Subgrade (CBR = 11,6 %)

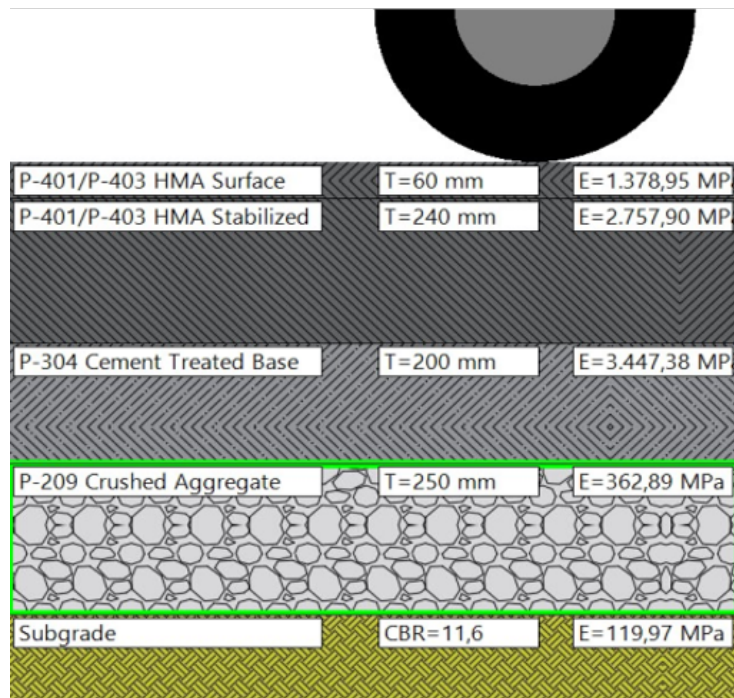
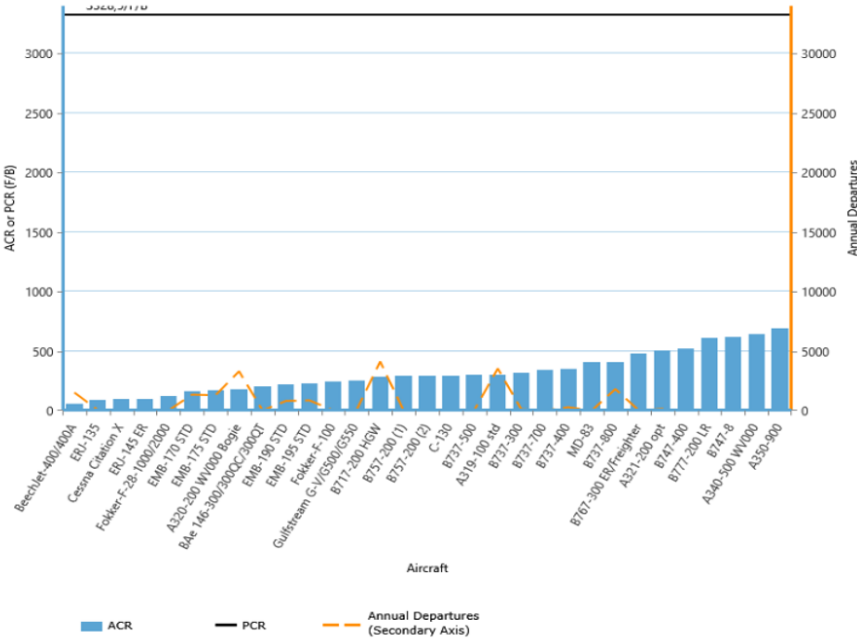


Figura 3.42: Stratigrafia aeroporto C per la pista di volo ottenuta da FAARFIELD

Tabella 3.31: Flotta aeromobili e input FAARFIELD Aeroporto C

Aeromobile	Codice AA/M	Partenze in 20 anni	N°input FAARFIELD
Fokker 100	C	309	16
Airbus 319-100 STD	C	70652	3533
Airbus 320 TWIN OPT	C	66069	3304
Airbus 321-200 OPT	C	2935	147
B717-200 HGW	C	82316	4116
B737-300	C	2420	121
B737-400	C	5562	279
B737-500	C	669	34
B737-800	C	36139	1807
B737-700	C	360	18
B757-200F	D	51	3
A350-900	E	335	17
BAE 146-100	C	103	6
B747-400	E	232	12
B747-8	F	51	3
B757-200	D	154	8
B767-300 ER	D	206	11
B777-200LR	E	103	6
737-700 BBJ	C	206	11
737-800 BBJ	C	51	3
Beechjet 400	B	30331	1517
Lockheed C130	D	103	6
Cessna Citation X	B	463	24
Challenger 850	D	51	3
Canadair REG. 700	B	51	3
Candair REG. 200	B	669	34
Embrarer 135	B	824	42
EMB 190	B	16324	817
EMB 195	B	17148	858
EMB 170	B	26803	1341
EMB 175	B	25851	1293
EMB 145	B	824	42
Fokker F28	B	154	8
Gulfstream G550	D	1339	67
MD 83	C	154	8
A340-500	E	51	3

Il metodo ACR-PCR prevede il confronto tra i valori di ACR propri degli aeromobili operativi individuati nello spettro di traffico e il valore di PCR pari a 3330 ricavato per la pavimentazione. La Figura 3.43 permette di verificare che sia rispettato il limite imposto dalla normativa $ACR \leq PCR$, che in questo caso viene ampiamente verificato, rispetto all'aeromobile critico A350-900 con ACR pari a 693. La dichiarazione della resistenza avviene tramite il codice alfa-numerico 3300/F/B/X/T.



No.	Aircraft Name	Aircraft ACR	Calculated PCR	Annual Departure
1	A350-900	693,3	3328,5	17

Figura 3.43: Grafico PCR aeroporto C per la pista di volo ottenuto da FAARFIELD

Così come per gli altri aeroporti viene riportata la curva del CDF in funzione dello spettro di traffico operativo sulla pavimentazione analizzata che riporta il picco più o meno nel medesimo punto del precedente traffico, indice del fatto che gli aeromobili percorrono quasi sempre le stesse traiettorie, ma riportando un valore totale di CDF molto inferiore, questo dovuto al volume totale del traffico basso che induce un danno cumulato inferiore rispetto al pacchetto stratigrafico dell'aeroporto C.

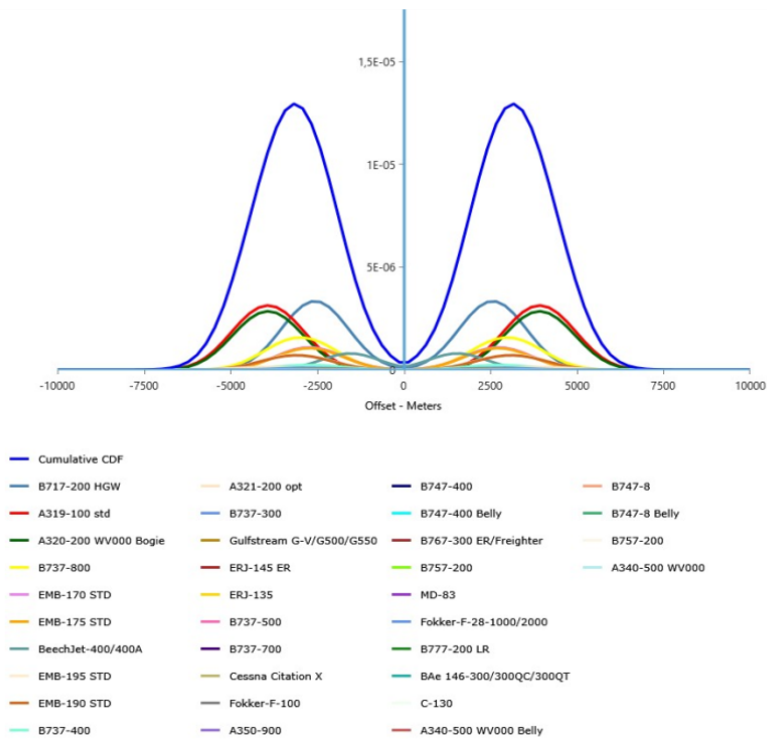


Figura 3.44: Grafico CDF aeroporto C per la pista di volo ottenuto da FAARFIELD

No.	Aircraft Name	Aircraft ACR	Calculated PCR	Annual Departure
1	A350-900	693,3	3328,5	17
2	A340-500 WV000	644,9	-	3
3	B747-8	616,7	-	3
4	B777-200 LR	611,7	-	6
5	B747-400	518,3	-	12
6	A321-200 opt	500,4	-	147
7	B767-300 ER/Freighter	477,2	-	11
8	B737-800	410	-	1.807
9	MD-83	409,1	-	8
10	B737-400	349,8	-	279
11	B737-700	345,1	-	18
12	B737-300	313,4	-	121
13	A319-100 std	302,5	-	3.533
14	B737-500	301,4	-	34
15	C-130	291,6	-	6
16	B757-200	289,4	-	3
17	B757-200	289,4	-	8
18	B717-200 HGW	288,3	-	4.116
19	Gulfstream G-V/G500/G550	253,4	-	67
20	Fokker-F-100	240,1	-	16
21	EMB-195 STD	227,7	-	858
22	EMB-190 STD	220,3	-	817
23	BAe 146-300/300QC/300QT	205,6	-	6
24	A320-200 WV000 Bogie	181,2	-	3.304
25	EMB-175 STD	172,5	-	1.293
26	EMB-170 STD	161,6	-	1.341
27	Fokker-F-28-1000/2000	124,5	-	8
28	ERJ-145 ER	100,7	-	42
29	Cessna Citation X	98,5	-	24
30	ERJ-135	89,8	-	42
31	BeechJet-400/400A	56,8	-	1.517

Figura 3.45: ACR aeroporto C per la pista di volo ottenuti da FAARFIELD

Il limite risulta ampiamente verificato e il PCR che si dovrebbe assumere per la dichiarazione implicherebbe in pratica che qualsiasi aeromobile possa operare senza limitazione il che però porta a pensare che forse la pavimentazione sia meccanicamente resistente a qualsiasi carico. Per comprendere quindi se il nuovo metodo permetta anche un'ottimizzazione dei pacchetti stratigrafici è stato simulato tramite FAARFIELD a partire dal pacchetto stratigrafico precedente e togliendo lo strato trattato a cemento dalla pavimentazione se i limiti venissero comunque verificati e infatti come si vede nella figura 3.46 il limite viene comunque rispettato.

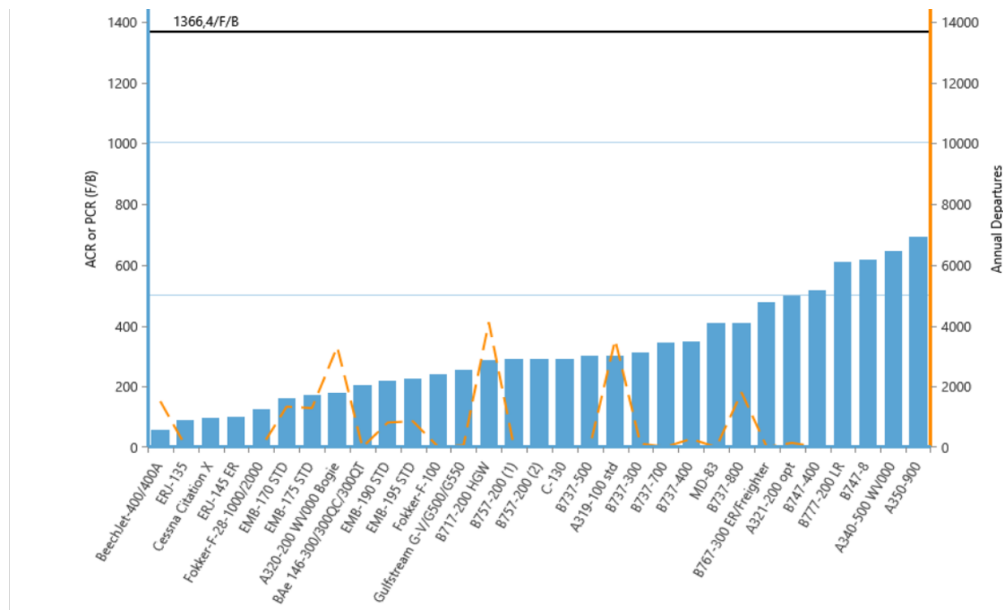


Figura 3.46: Grafico PCR aeroporto C per la pista di volo ottenuto da FAARFIELD senza lo strato di fondazione

Il valore di PCR ricavato è frutto dei moduli elastici che il software associa ai materiali selezionati per rappresentare la pavimentazione. Per poter modificare i moduli associati ai singoli strati è stato necessario trasformare la stratigrafia assegnata da FAARFIELD per gli strati in conglomerato bituminoso in strati "user defined" a cui è possibile associare il modulo elastico legato alle variazioni stagionali.

La Figura 3.47 rappresenta i valori di PCR ricavati da FAARFIELD che variano in funzione delle variazioni stagionali dei moduli elastici, presentati nella tabella, rispetto al valore ricavato precedentemente tramite i parametri associati ai materiali degli strati presenti nella pavimentazione, come visto per gli altri aeroporti analizzati i valori variano.

Dal confronto con i valori di ACR ricavati tramite FAARFIELD i PCR delle variazioni stagionali risultano comunque verificati ma differenti con la variazione stagionale, per questo si riporta nel grafico anche la variazione percentuale del PCR. Rispetto ai casi

precedenti la variazione stagionale presentata ha un picco in corrispondenza dell'estate ma con una diminuzione percentuale inferiore.

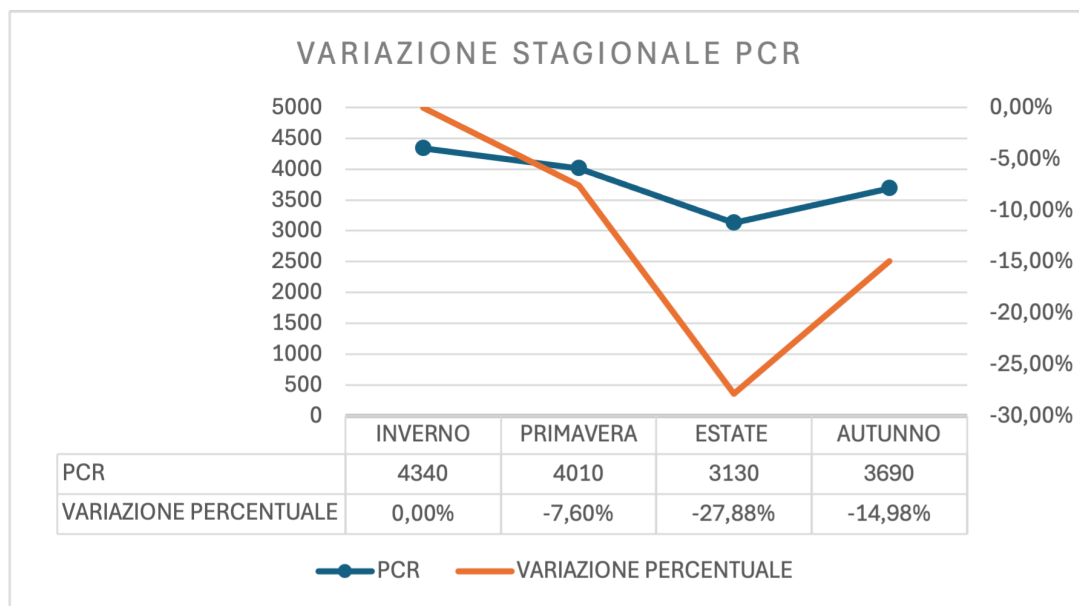


Figura 3.47: Variazione stagionale del PCR aeroporto C per la pista di volo

Come per l'aeroporto A l'analisi è stata estesa al vecchio metodo, lo spessore totale equivalente è stato ricavato a partire dalla stratigrafia reale della pavimentazione con l'utilizzo dei coefficienti di conversione dati dall'AC 150-5335-5D, portando a un valore di spessore equivalente pari a 1047 mm. Lo spettro di traffico inserito è lo stesso utilizzato in FAARFIELD con alcune variazioni degli aeromobili poichè non presenti nella libreria interna del programma.

La Figura 3.48 è l'output ricavato da COMFAA che individua il valore di PCN pari a 92 in funzione dell'aeromobile critico B747-8. L'aeromobile critico è quello che presenta il valore di ACN per la categoria di sottofondo (B) presente al di sotto della pavimentazione come si evince dalla Figura 3.49. Per poter comprendere meglio se il limite $ACN \leq PCN$ viene rispettato sono stati rappresentati tramite un istogramma i valori ACN per poterli confrontare con il valore di PCN, Figura 3.50.

CBR = 11,60 (Subgrade Category is B(10))
 Evaluation pavement thickness = 1.047,0 mm
 Pass to Traffic Cycle (PtoTC) Ratio = 1,00
 Maximum number of wheels per gear = 6
 Maximum number of gears per aircraft = 4

At least one aircraft has 4 or more wheels per gear. The FAA recommends a reference section assuming 127 mm of HMA and 203 mm of crushed aggregate for equivalent thickness calculations.

Results Table 1. Input Traffic Data

No.	Aircraft Name	Gross Weight	Percent Gross Wt	Tire Press	Annual Deps	20-yr Coverages	6D Thick
1	A321-200 opt	93,900	94,60	1.500	147	857	473,8
2	Fokker 100	44,680	95,60	980	16	89	245,8
3	A319-100 std	64,400	92,60	1.190	3.533	18.968	469,8
4	A320 Twin opt	78,400	92,80	1.440	3.304	17.811	532,0
5	A340-500HGW 381.2t	381,200	62,62	1.610	300	3.126	611,0
6	MD83	73,028	94,76	1.344	8	47	286,5
7	Gulfstream-G-V	41,232	95,00	1.296	67	319	297,4
8	Fokker-F-28-4000	33,112	95,00	724	8	45	178,8
9	RegionalJet-200	21,523	95,00	1.220	34	124	195,4
10	RegionalJet-700	32,885	95,00	1.262	3	13	140,7
11	Citation-X	16,329	95,00	1.303	24	74	149,1
12	C-130	70,307	95,00	724	6	52	249,2
13	B777-200LR	348,722	91,68	1.503	6	92	448,8
14	B767-300 ER	187,334	92,40	1.379	11	120	387,3
15	B747-8	449,056	94,70	1.524	3	34	358,1
16	B747-400	397,801	93,32	1.379	12	138	413,0
17	BAe 146	40,600	94,20	880	6	32	186,7
18	A350-900 Preliminary	268,900	93,68	1.660	17	149	466,2
19	B757-200	116,120	91,18	1.262	3	30	241,2
20	B737-700	70,307	91,70	1.413	18	94	302,1
21	B737-800	79,243	93,56	1.413	1.807	10.159	526,8
22	B737-500	60,781	92,24	1.338	34	176	309,4
23	B737-400	68,266	93,82	1.276	279	1.582	424,8
24	B737-300	63,503	90,86	1.386	121	625	366,7
25	B717-200 HGW	55,338	94,42	1.131	4.116	23.167	471,0

Results Table 2. PCN Values

No.	Aircraft Name	Critical Aircraft Total Equiv. Covs.	Thickness for Total Equiv. Covs.	Maximum Allowable Gross Weight	ACN Thick at Max. Allowable Gross Weight	CDF	PCN on B(10)
15	B747-8	>5,000,000	912,5	534,595	829,87	0,0000	91,5
						Total CDF =	0,0000

Figura 3.48: PCN aeroporto C per la pista di volo ottenuti da COMFAA

Results Table 3. Flexible ACN at Indicated Gross Weight and Strength

No.	Aircraft Name	Gross Weight	% GW on Main Gear	Tire Pressure	ACN Thick	ACN on B(10)
1	A321-200 opt	93,900	94,60	1.500	644,2	55,1
2	Fokker 100	44,680	95,60	980	446,0	26,4
3	A319-100 std	64,400	92,60	1.190	496,9	32,8
4	A320 Twin opt	78,400	92,80	1.440	568,3	42,9
5	A340-500HGW 381.2t	381,200	62,62	1.610	725,1	69,8
6	MD83	73,028	94,76	1.344	588,1	45,9
7	Gulfstream-G-V	41,232	95,00	1.296	458,0	27,9
8	Fokker-F-28-4000	33,112	95,00	724	364,0	17,6
9	RegionalJet-200	21,523	95,00	1.220	339,8	15,3
10	RegionalJet-700	32,885	95,00	1.262	378,5	19,0
11	Citation-X	16,329	95,00	1.303	284,7	10,8
12	C-130	70,307	95,00	724	477,0	30,2
13	B777-200LR	348,722	91,68	1.503	721,9	69,3
14	B767-300 ER	187,334	92,40	1.379	637,1	53,9
15	B747-8	449,056	94,70	1.524	730,4	70,9
16	B747-400	397,801	93,32	1.379	667,9	59,3
17	BAe 146	40,600	94,20	880	393,7	20,6
18	A350-900 Preliminary	268,900	93,68	1.660	723,2	69,5
19	B757-200	116,120	91,18	1.262	498,4	33,0
20	B737-700	70,307	91,70	1.413	535,4	38,1
21	B737-800	79,243	93,56	1.413	584,0	45,3
22	B737-500	60,781	92,24	1.338	501,0	33,3
23	B737-400	68,266	93,82	1.276	543,7	39,3
24	B737-300	63,503	90,86	1.386	512,2	34,8
25	B717-200 HGW	55,338	94,42	1.131	494,6	32,5

Figura 3.49: ACN aeroporto C per la pista di volo ottenuti da COMFAA

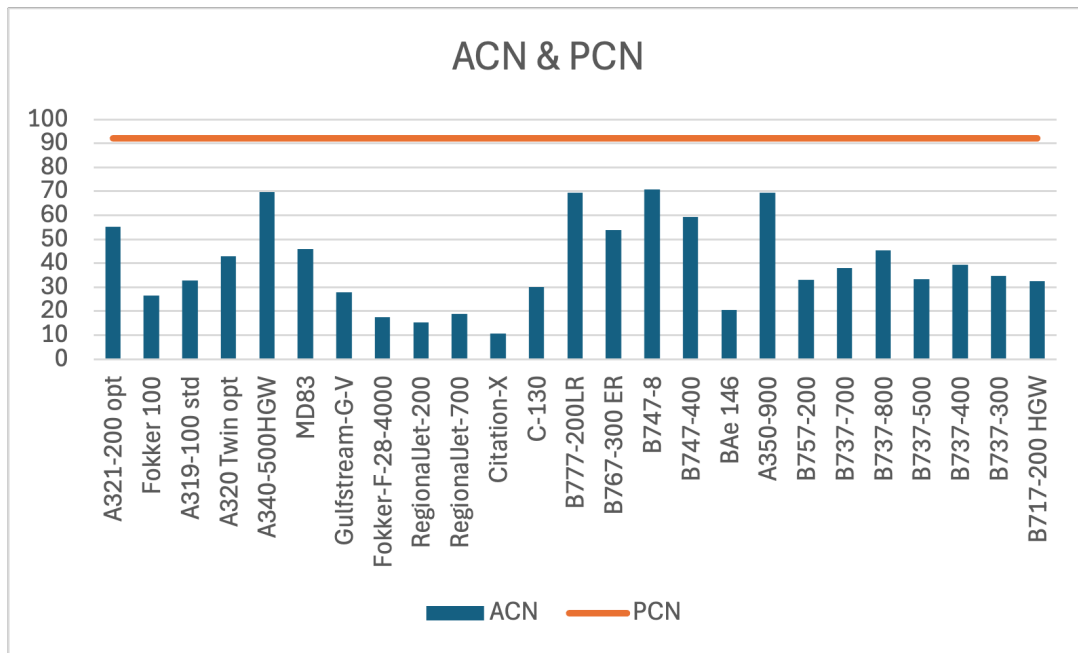


Figura 3.50: Confronto ACN e PCN aeroporto C per la pista di volo

3.2.3.2 Aeroporto D con rilevanza nazionale

Il presente caso studio riguarda l'analisi strutturale dell'apron dell'aeroporto D, per il quale è stata adottata una pavimentazione di tipo semirigido. Tale soluzione progettuale deriva dalla limitata entità dei carichi di traffico previsti, che non rende necessario il ricorso a pavimentazioni rigide in calcestruzzo, caratterizzate da maggiori costi di realizzazione e manutenzione. La configurazione semirigida rappresenta pertanto un compromesso ottimale tra prestazioni strutturali, durabilità e sostenibilità economica.

La sovrastruttura analizzata presenta la seguente stratigrafia: uno strato di usura in conglomerato bituminoso a tessitura ottimizzata con bitume modificato dello spessore di 5 cm, uno strato di base in conglomerato bituminoso ad elevate prestazioni dello spessore di 15 cm, uno strato di sottobase costituito da misto granulare stabilizzato a cemento realizzato in situ dello spessore di 25 cm, una fondazione in misto granulare stabilizzato dello spessore di 20 cm e un sottofondo costituito dal terreno naturale in situ con CBR pari al 9%.

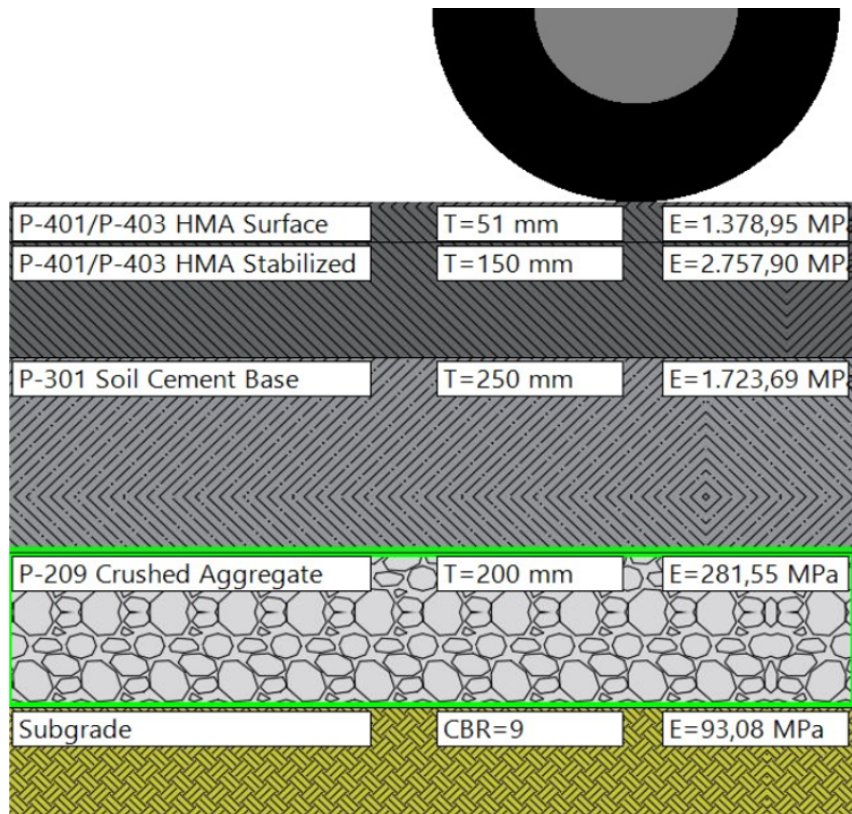


Figura 3.51: Stratigrafia aeroporto D per la pista di volo ottenuta da FAARFIELD

Tabella 3.32: Flotta aeromobili e input FAARFIELD

Aeromobile	MTOW [ton]	Codice AA/M	Movimenti in 20 anni	Input FAARFIELD
B737-800 Next Gen	78	C	81	5
A319	70	C	81	5
A220-300	69,9	C	161	9
Antonov 12	61	D	81	5
Global 7000	48,2	D	161	9
Gulfstream VI	45,2	D	1.169	59
Global Express	43,5	D	726	37
Gulfstream V	40,3	D	645	33
Global 5000	40	D	443	23
Gulfstream IV	33,2	D	111	6
Falcon 8X	33,1	D	332	17
Falcon 7X	28,9	D	609	31
Challenger 600	19,5	D	2.048	103
CL35	19	C	1.661	84
Citation X	16,1	B	5.535	277
Falcon 200	14,5	B	3.155	158
C680	14	C	1.495	75
PC-24	8,2	B	2.269	114
EMBRAER Phenom 300	8	B	2.048	103
P180	5,2	B	4.096	205
Cessna 525	4,7	B	4.318	216

L'analisi dello spettro di traffico operativo evidenzia la presenza prevalente di aeromobili appartenenti alla business aviation e regionale, caratterizzati da valori di MTOW medio-bassi ma da elevata frequenza operativa annua, quali Citation X, Cessna 525, P180, Challenger 600 e Falcon 200. Gli aeromobili di maggiore peso al decollo, come B737-800 Next Generation, A319 e A220-300, presentano invece un numero di movimenti annui significativamente inferiore e risultano pertanto meno gravosi in termini di danno cumulativo sulla pavimentazione.

Poiché i software impiegati non includono la tipologia degli aeromobili dello spettro operativo, gli aeromobili reali sono stati ricondotti ad aeromobili di riferimento equivalenti, caratterizzati da analoghe configurazioni del carrello, pressione di gonfiaggio e distribuzione dei carichi.

Il metodo ACR-PCR prevede il confronto tra i valori di ACR propri degli aeromobili operativi individuati nello spettro di traffico e il valore di PCR pari a 2200 ricavato per la pavimentazione. La Figura 3.52 permette di verificare che sia rispettato il limite imposto dalla normativa $ACR \leq PCR$, che in questo caso viene ampiamente verificato, rispetto all'aeromobile critico B737-800 con ACR pari a 448.

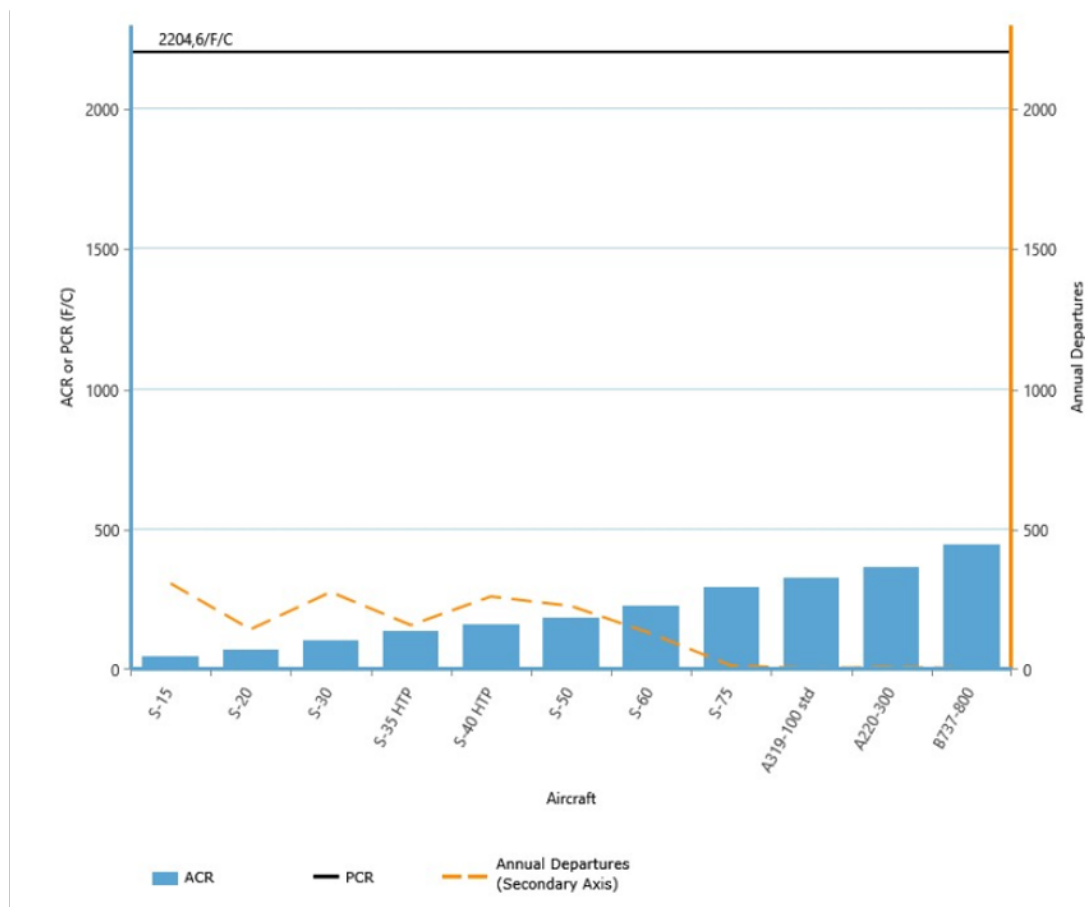


Figura 3.52: PCR aeroporto D per la pista di volo ottenuti da FAARFIELD

Così come per gli altri aeroporti viene riportata la curva del CDF in funzione dello spettro di traffico operativo sulla pavimentazione analizzata che in questo caso riporta il picco spostato verso la center-line poichè la configurazione dei carrelli più semplici prevede una spaziatura tra le ruote inferiore.

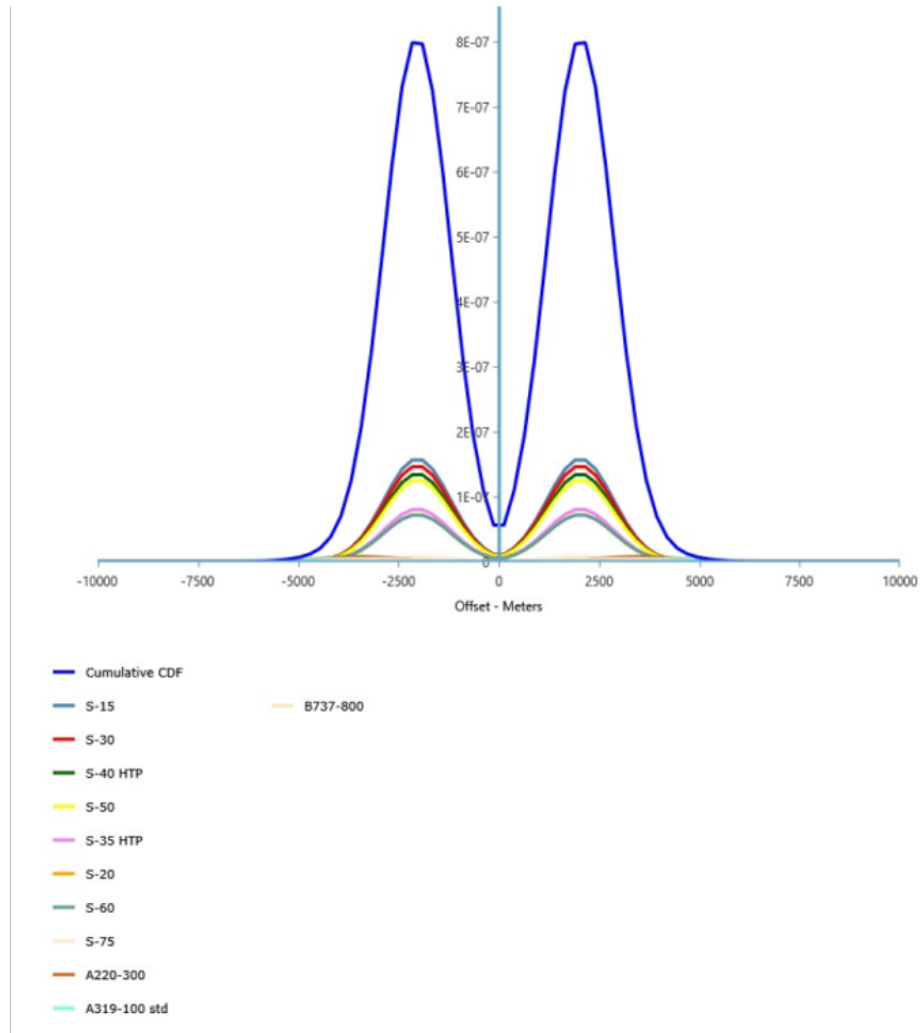


Figura 3.53: CDF aeroporto D per la pista di volo ottenuti da FAARFIELD

No.	Aircraft Name	Aircraft ACR	Calculated PCR	Annual Departure
1	B737-800	447,9	2204,6	5
2	A220-300	367,2	-	9
3	A319-100 std	326,1	-	5
4	S-75	294,7	-	14
5	S-60	229,6	-	129
6	S-50	187,3	-	227
7	S-40 HTP	159,6	-	261
8	S-35 HTP	139,8	-	159
9	S-30	105,9	-	277
10	S-20	71,2	-	144
11	S-15	45,6	-	308

Figura 3.54: ACR aeroporto D per la pista di volo ottenuti da FAARFIELD

L'analisi quindi è stata estesa al vecchio metodo, lo spessore totale equivalente è stato ricavato a partire dalla stratigrafia reale della pavimentazione con l'utilizzo dei coefficienti di conversione dati dall'AC 150-5335-5D, portando a un valore di spessore equivalente pari a 993 mm. Lo spettro di traffico inserito è lo stesso utilizzato in FAARFIELD con alcune variazioni degli aeromobili poichè non presenti nella libreria interna del programma. La Figura 3.55 è l'output ricavato da COMFAA che individua il valore di PCN pari a 82 in funzione dell'aeromobile critico B737-800. L'aeromobile critico è quello che presenta il valore di ACN per la categoria disottofondo (C) presente al di sotto della pavimentazione come si evince dalla Figura 3.56. Per poter comprendere meglio se il limite $ACN \leq PCN$ viene rispettato sono stati rappresentati tramite un istogramma i valori ACN per poterli confrontare con il valore di PCN, Figura 3.57.

```

                                CBR = 9,00 (Subgrade Category is B(10))
                                Evaluation pavement thickness = 993,0 mm
                                Pass to Traffic Cycle (PtoTC) Ratio = 1,00
                                Maximum number of wheels per gear = 2
                                Maximum number of gears per aircraft = 2

No aircraft have 4 or more wheels per gear. The FAA recommends a reference section assuming
1/6 mm of HMA and 152 mm of crushed aggregate for equivalent thickness calculations.

Results Table 1. Input Traffic Data

```

No.	Aircraft Name	Gross Weight	Percent Gross Wt	Tire Press	Annual Deps	20-yr Coverages	6D Thick
1	S-30	13,608	95,00	517	277	887	239,1
2	S-50	22,680	95,00	655	77	282	285,5
3	S-60	27,216	95,00	724	129	492	340,8
4	S-75	34,019	95,00	827	14	56	286,5
5	A319-100 std	64,400	92,60	1.190	5	27	264,5
6	SWL-50	22,680	100,00	1.241	216	834	499,2
7	B737-800	79,243	93,56	1.413	5	28	307,0

```

Results Table 2. PCN Values

```

No.	Aircraft Name	Critical Aircraft Total Equiv. Covs.	Thickness for Total Equiv. Covs.	Maximum Allowable Gross Weight	ACN Thick at Max. Allowable Gross Weight	CDF	PCN on B(10)
7	B737-800	268.640	750,8	124,811	781,49	0,0000	81,2
						Total CDF =	0,0000

Figura 3.55: PCN aeroporto D per la pista di volo ottenuti da COMFAA

```

Results Table 3. Flexible ACN at Indicated Gross Weight and Strength

```

No.	Aircraft Name	Gross Weight	% GW on Main Gear	Tire Pressure	ACN Thick	ACN on B(10)
1	S-30	13,608	95,00	517	269,0	9,6
2	S-50	22,680	95,00	655	371,3	18,3
3	S-60	27,216	95,00	724	413,0	22,6
4	S-75	34,019	95,00	827	473,7	29,8
5	A319-100 std	64,400	92,60	1.190	496,9	32,8
6	SWL-50	22,680	100,00	1.241	579,5	44,6
7	B737-800	79,243	93,56	1.413	584,0	45,3

Figura 3.56: ACN aeroporto D per la pista di volo ottenuti da COMFAA

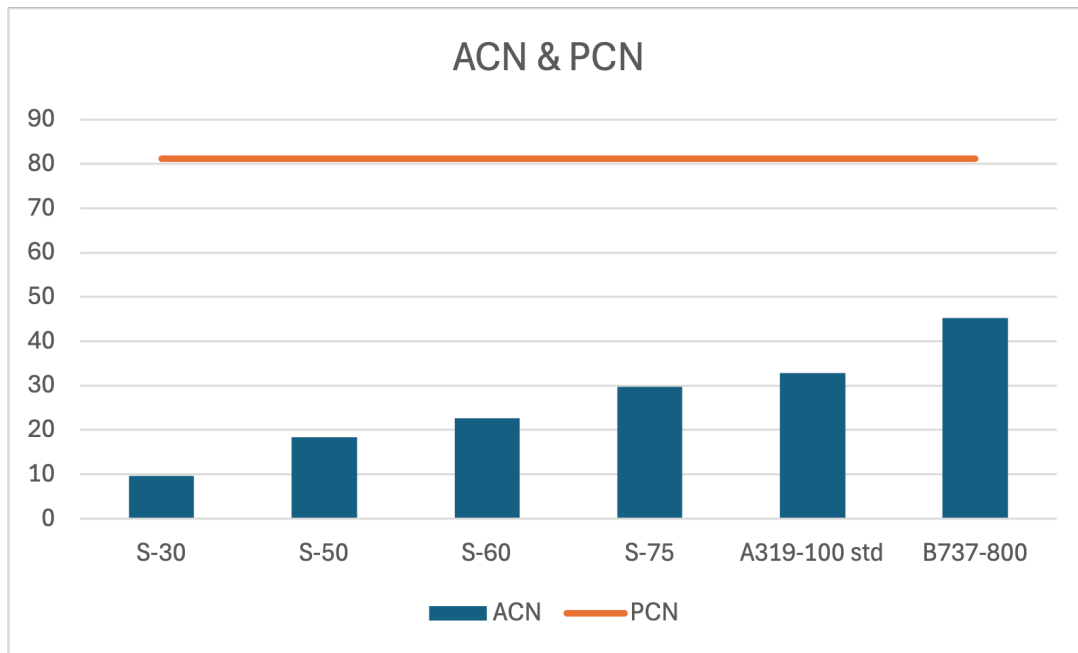


Figura 3.57: Confronto dei valori di ACN PCN per l'aeroporto D per la pista di volo

Nel caso studio analizzato, sebbene entrambe le metodologie confermino la verifica della pavimentazione dell'apron, l'approccio ACR-PCR evidenzia margini di sicurezza più ampi rispetto al metodo tradizionale ACN-PCN.

In conclusione, l'analisi condotta dimostra l'adeguatezza della soluzione semirigida adottata per l'apron dell'aeroporto D rispetto alle condizioni di traffico attuali previste. La pavimentazione risulta verificata sia secondo il metodo tradizionale ACN-PCN sia secondo il nuovo approccio ACR-PCR, con margini di sicurezza maggiori evidenziati da quest'ultimo, confermando l'efficacia della stratigrafia adottata e la validità dell'approccio meccanistico nella valutazione della resistenza delle pavimentazioni aeroportuali.

3.3 Considerazioni sui risultati ottenuti

Nel presente capitolo, sulla base dei risultati ottenuti dalle simulazioni condotte mediante i software, si intendono mettere in evidenza gli aspetti maggiormente significativi emersi dall'analisi, evitando una riproposizione puntuale dei singoli casi studio già discussi nei capitoli precedenti. In particolare, l'attenzione è rivolta alle principali tendenze generali osservate, quali la variazione del valore di PCR in funzione delle condizioni strutturali e operative considerate e l'andamento delle curve di danno, che risultano determinanti nella valutazione della resistenza della pavimentazione.

Un ulteriore aspetto di rilievo riguarda l'influenza delle condizioni stagionali sul valore di PCR, le analisi hanno evidenziato come le variazioni delle caratteristiche meccaniche degli strati in conglomerato bituminoso comportino modifiche anche significative della resistenza della pavimentazione, determinando oscillazioni del valore di PCR influenzato dalla variabilità stagionale dei moduli elastici.

Infine, i risultati ottenuti sono messi in relazione con i risultati ottenuti seguendo il vecchio metodo, attraverso il confronto tra i valori di ACN degli aeromobili e i valori di PCN dichiarati, rispetto ai limiti individuati mediante il metodo ACR-PCR. Tale confronto consente di evidenziare analogie e differenze tra i diversi approcci di valutazione, mettendo in luce le implicazioni operative e il diverso livello di conservatività dei metodi considerati. L'insieme di queste osservazioni permette di individuare i comportamenti ricorrenti e gli elementi più significativi emersi dalle analisi.

3.3.1 Valori di PCR per aeroporti considerati

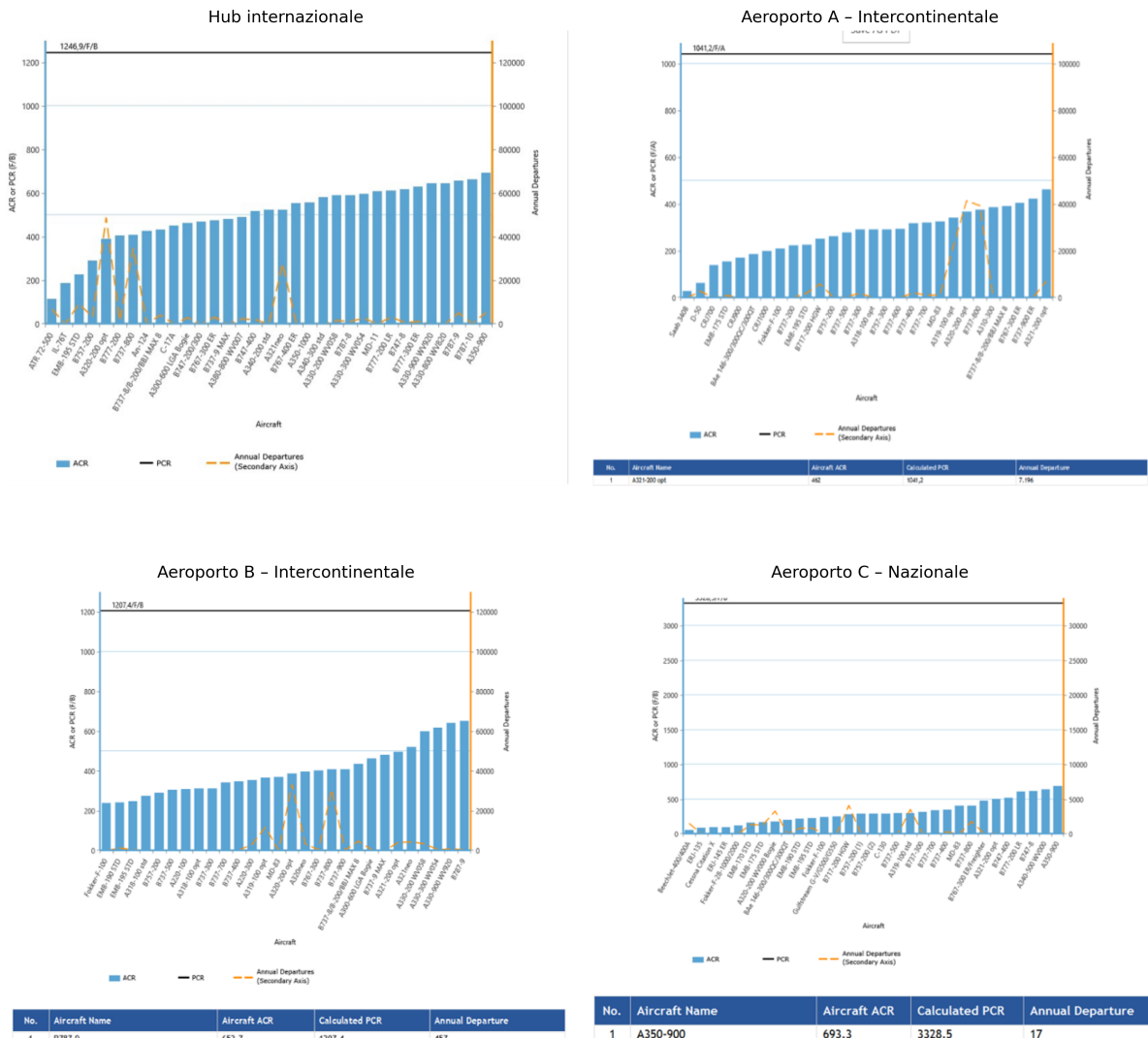
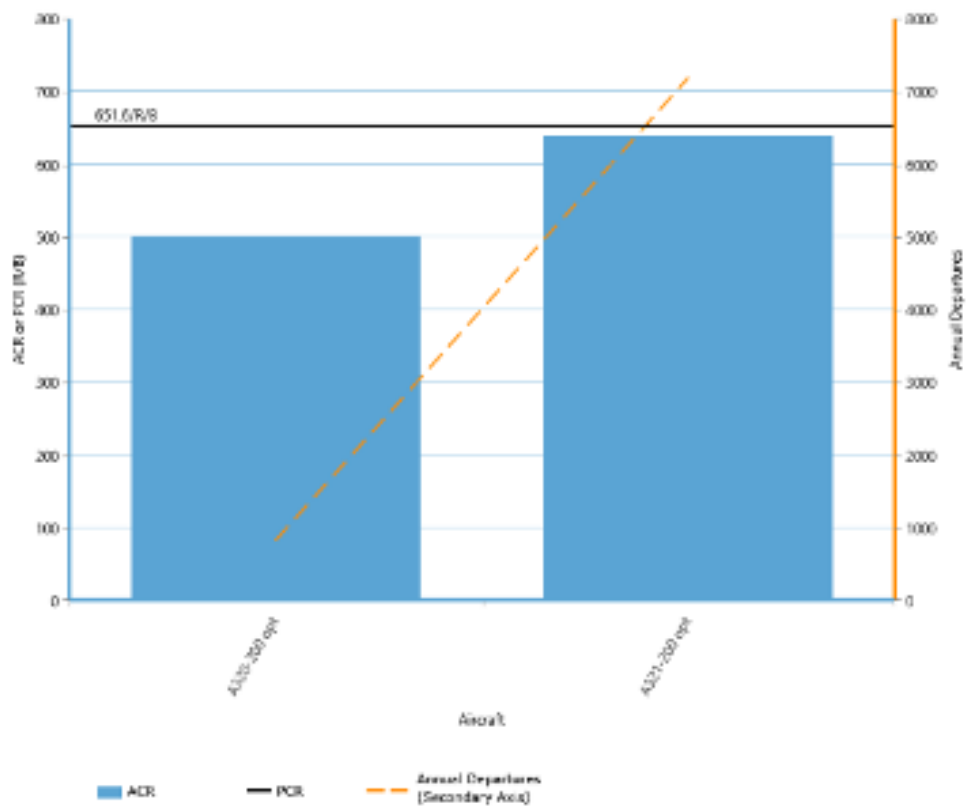


Figura 3.58: Confronto dei grafici di confronto tra PCR e ACR per le piste di volo analizzate



No.	Aircraft Name	Aircraft ACR	Calculated PCR	Annual Departure
1	A321-200 opt	639,8	651,6	7.196
2	A320-200 opt	501,7	-	826

Figura 3.59: Confronto dei grafici di confronto tra PCR e ACR per lo stand dell'aeroporto A

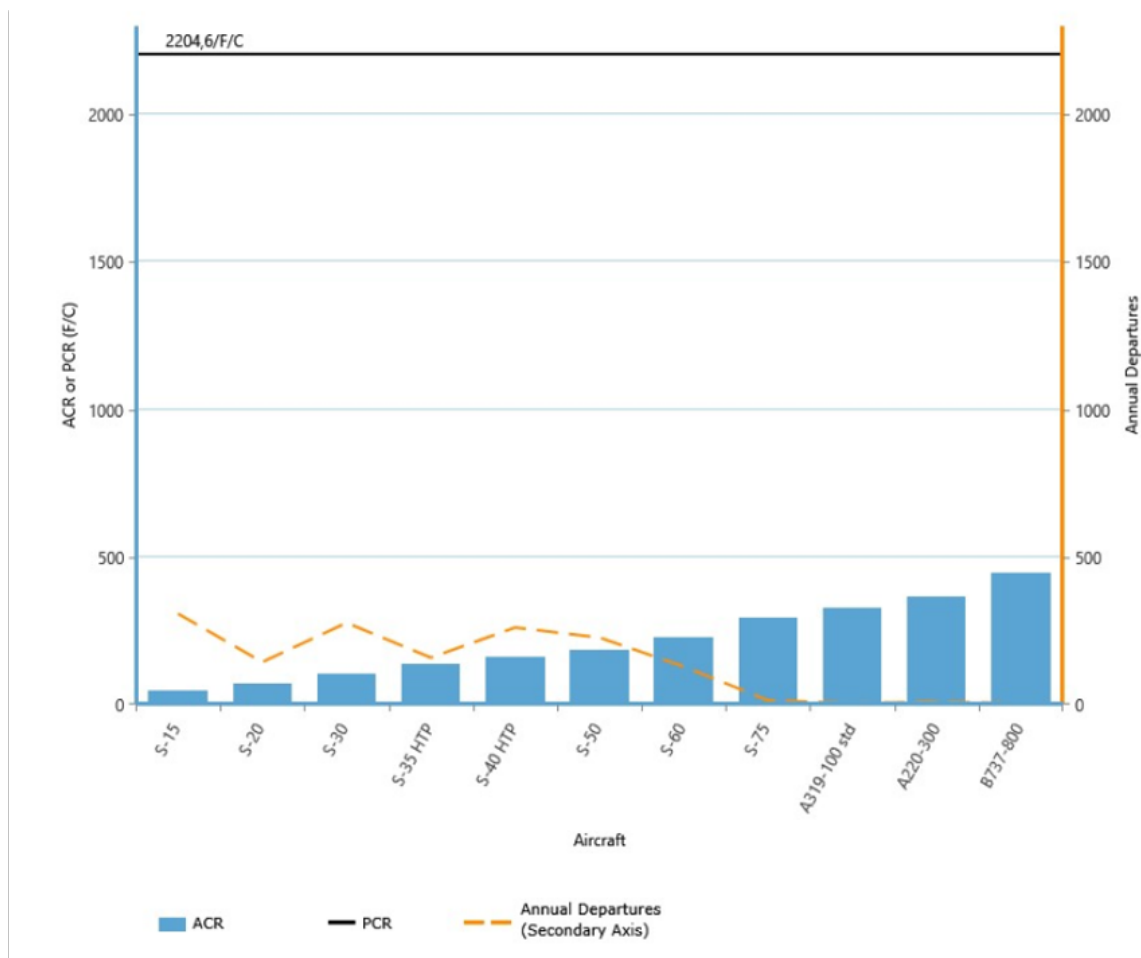


Figura 3.60: Confronto dei grafici di confronto tra PCR e ACR per lo stand dell'aeroporto D

L'analisi comparativa dei valori di Pavement Classification Rating (PCR) ottenuti dalle simulazioni evidenzia le differenze tra le configurazioni aeroportuali analizzate, mostrando come la resistenza della pavimentazione sia influenzata sia dal ruolo operativo dell'infrastruttura sia dalla configurazione stratigrafica della sovrastruttura.

La configurazione relativa all'hub intercontinentale presenta un valore di PCR pari a circa 1250, caratterizzato da un volume di traffico intenso e frequente operatività di aeromobili wide-body caratterizzati da elevati carichi per asse e configurazioni complesse del carrello principale più gravose. Tale valore riflette un dimensionamento della pavimentazione orientato a garantire adeguata resistenza alle sollecitazioni ripetute e adeguati livelli di durabilità strutturale.

Gli aeroporti internazionali analizzati mostrano valori di PCR pari a circa 1040 per l'aeroporto A e 1210 per l'aeroporto B. Tali valori, sebbene inferiori o confrontabili con quello dell'hub intercontinentale, risultano caratterizzati da operazioni di traffico a medio raggio e con la presenza di aeromobili pesanti, ma con frequenze operative inferiori rispetto alla

configurazione dell'hub intercontinentale. La differenza tra i due casi evidenzia l'influenza della configurazione stratigrafica e meccanica degli strati e dello spettro di traffico sulla resistenza risultante, ma anche l'indice di portanza CBR del sottofondo influenza l'indice di resistenza dichiarato, infatti l'aeroporto A presenta strati in conglomerato bituminoso e fondazione per un totale di 50 cm al di sopra del sottofondo con un CBR DI 20 % mentre l'aeroporto B presenta strati per un totale di 53 cm al di sopra del sottofondo con CBR di 11,6 %, stesso sottofondo caratterizzante la pavimentazione dell'hub intercontinentale.

Particolarmente significativo risulta il comportamento dell'aeroporto C, che presenta un valore di PCR pari a circa 3300, sensibilmente superiore rispetto agli altri scenari analizzati, nonostante la classificazione di aeroporto nazionale. Tale risultato è direttamente attribuibile alla configurazione stratigrafica della pavimentazione, caratterizzata dalla presenza di uno strato aggiuntivo rispetto alle altre sezioni considerate che porta a un totale stratigrafico 75 cm al di sopra del sottofondo, mentre il valore di CBR pari a 11,6 % rimane lo stesso dell'aeroporto dell'hub internazionale e dell'aeroporto B. L'incremento dello spessore complessivo e della rigidezza strutturale della sovrastruttura comporta una più efficace distribuzione dei carichi sugli strati sottostanti e una significativa riduzione delle tensioni trasmesse al sottofondo, determinando un marcato aumento della resistenza complessiva.

Il confronto evidenzia quindi come il valore di PCR non dipenda esclusivamente dalla categoria funzionale dell'aeroporto o dall'intensità del traffico, ma sia fortemente condizionato dalla configurazione strutturale della pavimentazione e dalle proprietà meccaniche degli strati costituenti. In particolare, il caso dell'aeroporto C dimostra come l'incremento dello spessore strutturale e della rigidezza della sovrastruttura possa rappresentare il fattore predominante nella determinazione della resistenza, producendo valori di PCR significativamente superiori anche in presenza di livelli di traffico relativamente contenuti.

Complessivamente, i risultati confermano la stretta relazione tra caratteristiche del traffico, configurazione stratigrafica della pavimentazione e prestazioni strutturali, evidenziando l'importanza di un approccio integrato al dimensionamento delle pavimentazioni aeroportuali basato sia su criteri operativi sia su parametri meccanico-strutturali.

dei carichi sulla pavimentazione, riducendo la concentrazione delle sollecitazioni in fasce localizzate e favorendo una ripartizione più uniforme del danno strutturale.

Per quanto riguarda l'aeroporto A – internazionale, la distribuzione CDF evidenzia una concentrazione più marcata dei picchi di probabilità, indicativa di una minore dispersione laterale delle impronte del carrello principale. Tale comportamento è associabile a una composizione della flotta caratterizzata prevalentemente da aeromobili con configurazioni del carrello principale più semplici, che tendono a concentrare l'applicazione dei carichi in fasce più ristrette della pavimentazione, con conseguente incremento delle sollecitazioni locali e maggiore accumulo del danno nelle zone di passaggio delle ruote.

Analogamente, nell'aeroporto B – intercontinentale si osserva un comportamento intermedio, con una distribuzione degli offset che riflette la presenza di configurazioni del carrello principale semplici. Ciò determina una distribuzione delle sollecitazioni meno uniforme rispetto all'hub intercontinentale, ma più diffusa rispetto all'aeroporto A, evidenziando l'influenza diretta della geometria del carrello principale sulla distribuzione delle tensioni negli strati della pavimentazione.

Nel caso dell'aeroporto C – nazionale, la distribuzione CDF mostra una maggiore concentrazione delle traiettorie vicine alla center-line, quindi delle impronte del carrello principale in fasce trasversali più limitate, coerentemente con la prevalenza di aeromobili di dimensioni inferiori caratterizzati da configurazioni del carrello più compatte e minore distanza di interasse tra i punti di appoggio. Tale comportamento comporterebbe teoricamente una maggiore concentrazione del danno strutturale; tuttavia, nel caso analizzato, l'elevata resistenza della pavimentazione, dovuta alla presenza di uno strato strutturale aggiuntivo, consente una più efficiente distribuzione delle tensioni negli strati inferiori, giustificando i valori di CDF complessivi ottenuti.

Nel complesso, il confronto tra i diversi aeroporti evidenzia come la forma delle curve CDF sia fortemente influenzata dalla configurazione geometrica del carrello principale degli aeromobili operanti, che determina la posizione e l'estensione delle aree in cui il danno si ripartisce sulla pavimentazione. Ne deriva che la valutazione delle prestazioni strutturali delle pavimentazioni aeroportuali deve considerare congiuntamente la distribuzione trasversale dei percorsi degli aeromobili, la configurazione dei carrelli e la stratigrafia della pavimentazione, in quanto elementi strettamente interconnessi nella determinazione del danno cumulativo e della resistenza risultante.

3.3.3 Variazione stagionale dei PCR



Figura 3.62: Confronto delle variazioni stagionali di PCR nelle pavimentazioni flessibili

L'analisi evidenzia come i valori di PCR risultino influenzati dalla variazione stagionale della temperatura, che modifica i moduli elastici degli strati in conglomerato bituminoso e, di conseguenza, la capacità portante della pavimentazione. In tutti i casi analizzati si osserva che la massima variazione percentuale rispetto al valore di riferimento (invernale) si registra nel periodo estivo, quando l'incremento delle temperature determina una riduzione della rigidità dei materiali e quindi una diminuzione più significativa del PCR.

L'Annesso 14 ICAO prevede la possibilità di pubblicare valori di PCR differenziati in funzione delle condizioni stagionali o ambientali, al fine di rappresentare in modo più realistico la resistenza della pavimentazione nelle diverse condizioni di esercizio. Tuttavia, nella pratica operativa tale approccio è raramente adottato. La pubblicazione di valori variabili comporterebbe infatti una maggiore complessità nella gestione operativa dei movimenti aeronautici, richiedendo una continua verifica della compatibilità tra aeromobili e pavimentazione disponibile, con possibili limitazioni dinamiche delle operazioni di decollo e atterraggio. Inoltre, per il gestore aeroportuale ciò implicherebbe un aggiornamento frequente delle informazioni aeronautiche, un aumento degli oneri di coordinamento con operatori e compagnie aeree e un maggiore rischio di ambiguità interpretative nelle procedure operative. Per tali ragioni, si preferisce generalmente dichiarare un unico

valore di PCR di tipo conservativo, rappresentativo delle condizioni più critiche della pavimentazione.

3.3.4 Confronto tra i risultati ACN-PCN e ACR-PCR

Il confronto tra i due metodi di valutazione della resistenza evidenzia differenze significative nella verifica dei limiti operativi e nei margini di sicurezza associati. Nei casi studio relativi all'hub intercontinentale, all'Aeroporto A e all'Aeroporto B, entrambi gli approcci consentono la verifica della compatibilità tra aeromobile e pavimentazione; tuttavia, il metodo ACR-PCR evidenzia generalmente margini di sicurezza più ampi rispetto al metodo tradizionale ACN-PCN, indicando una maggiore resistenza disponibile e una valutazione meno conservativa.

Diversamente, nel caso della pavimentazione rigida, il criterio operativo basato sul confronto $ACN \leq PCN$ non risulta verificato per l'aeromobile critico, evidenziando potenziali limitazioni operative secondo il metodo ICAO tradizionale. Al contrario, applicando il metodo ACR-PCR, la verifica risulta soddisfatta anche per l'aeromobile critico, suggerendo una rappresentazione più realistica della capacità strutturale della pavimentazione.

Questa differenza è riconducibile alle diverse basi concettuali dei due approcci: il sistema ACN-PCN si fonda su una metodologia standardizzata e generalmente più conservativa, mentre il sistema ACR-PCR consente una valutazione realistica delle caratteristiche strutturali della pavimentazione e delle condizioni operative effettive.

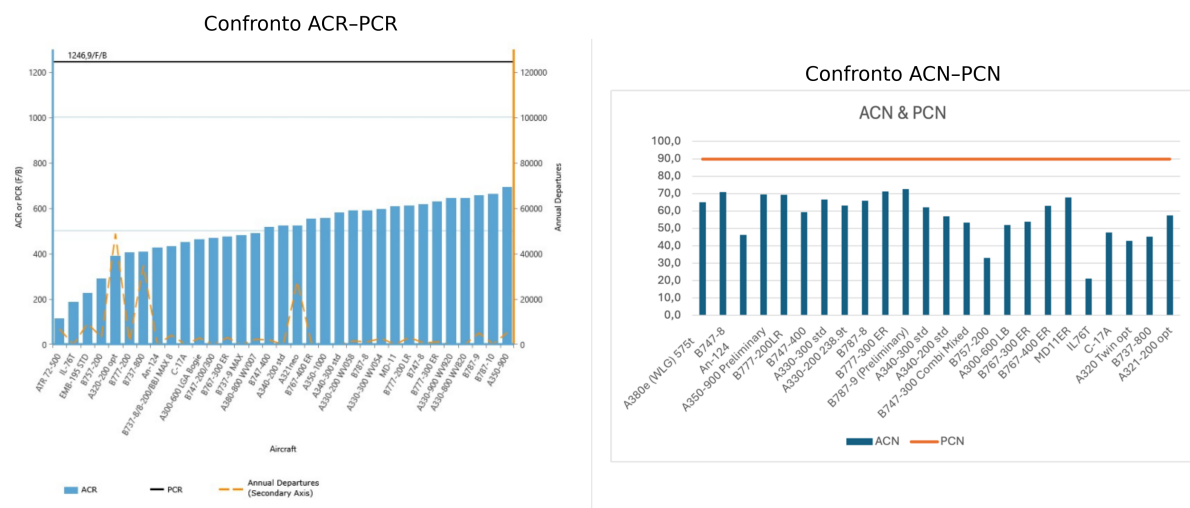


Figura 3.63: Confronto dei grafici di confronto tra ACR-PCR e ACN-PCN per l'hub intercontinentale

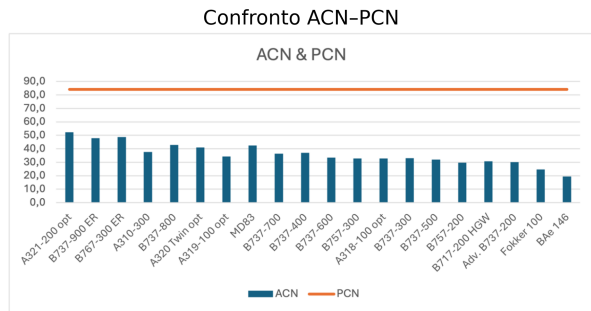
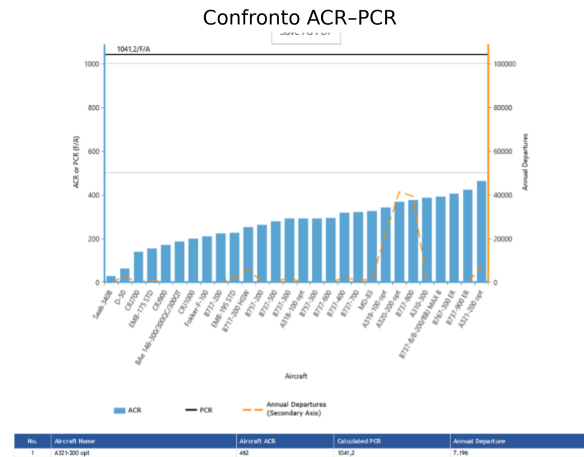


Figura 3.64: Confronto dei grafici di confronto tra ACR-PCR e ACN-PCN per la pista dell'aeroporto A intercontinentale

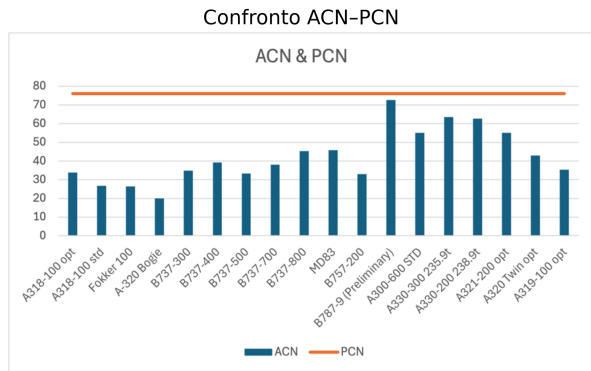
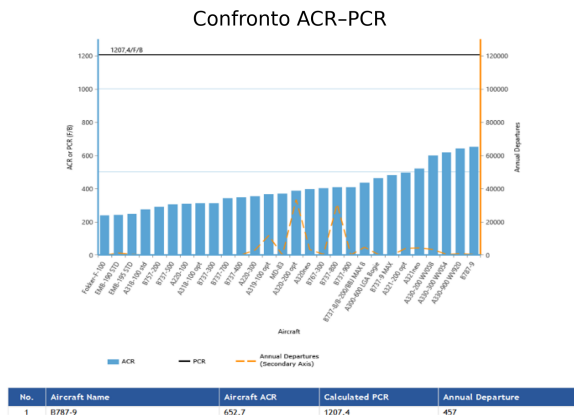


Figura 3.65: Confronto dei grafici di confronto tra ACR-PCR e ACN-PCN per l'aeroporto B intercontinentale

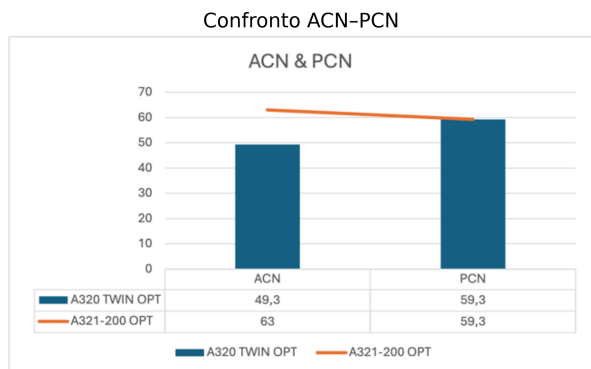
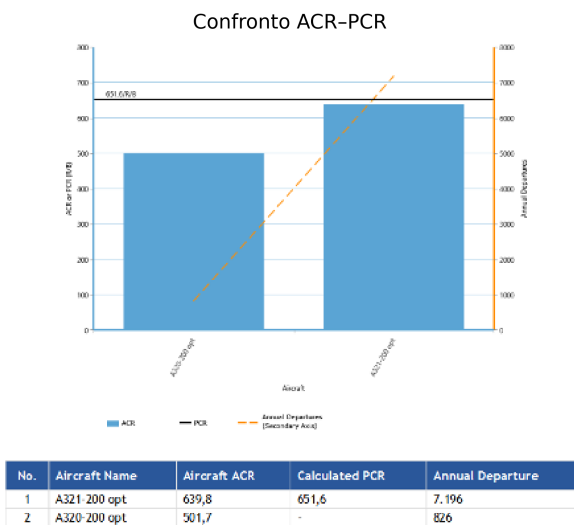


Figura 3.66: Confronto dei grafici di confronto tra ACR-PCR e ACN-PCN per lo stand dell'aeroporto A intercontinentale

Capitolo 4

Conclusioni

L'introduzione del metodo ACR-PCR rappresenta un'evoluzione sostanziale nel processo di valutazione della resistenza delle pavimentazioni aeroportuali, segnando il passaggio da un approccio prevalentemente empirico e semplificato, quale il sistema ACN-PCN, ad un'impostazione di tipo meccanicistico-prestazionale basata sulla modellazione della risposta strutturale della pavimentazione.

Nel contesto italiano, l'Ente Nazionale per l'Aviazione Civile (ENAC), responsabile della regolazione tecnica e della supervisione delle infrastrutture aeroportuali, non ha ancora definito specifiche procedure applicative per l'implementazione del nuovo metodo; tuttavia, in qualità di Stato membro dell'Unione Europea, l'Italia recepisce i regolamenti emanati dall'Agenzia dell'Unione Europea per la Sicurezza Aerea (EASA), che si conforma agli standard e alle raccomandazioni dell'International Civil Aviation Organization (ICAO). L'obiettivo comune delle diverse normative rimane quello di garantire la compatibilità operativa tra aeromobili e pavimentazioni, assicurando adeguati livelli di sicurezza strutturale e funzionalità dell'infrastruttura aeroportuale.

L'analisi condotta ha evidenziato come il metodo ACN-PCN sia fondato su un approccio standardizzato basato su configurazioni delle pavimentazioni rappresentate da uno spessore critico equivalente ottenuto dalla moltiplicazione degli strati per coefficienti normati e su parametri di classificazione della resistenza del sottofondo, che non consentono una rappresentazione esplicita dello stato tensionale e deformativo degli strati costituenti la struttura. Tale impostazione, pur garantendo semplicità applicativa e uniformità nella dichiarazione della resistenza, presenta limiti intrinseci nella valutazione del reale comportamento meccanico della pavimentazione, non permettendo una piena considerazione delle caratteristiche stratigrafiche, delle proprietà meccaniche dei materiali e dello spettro di traffico effettivamente agente.

Il metodo ACR-PCR introduce invece una formulazione basata sulla modellazione multi-

strato della pavimentazione mediante analisi elastica stratificata (Layered Elastic Analysis – LEA), che consente di determinare la risposta strutturale della pavimentazione in termini di tensioni, deformazioni e criteri di danneggiamento associati ai singoli strati. Tale approccio permette di correlare direttamente le caratteristiche meccaniche dei materiali — espresse attraverso parametri quali moduli elastici, coefficienti di Poisson e proprietà del sottofondo — con la resistenza complessiva della struttura.

Un elemento innovativo del nuovo sistema è rappresentato dall'utilizzo delle curve di danno che consentono di valutare l'evoluzione del degrado strutturale in funzione delle condizioni di carico e del numero di ripetizioni, fornendo una stima più realistica della vita utile residua della pavimentazione. Questo consente di superare la logica deterministica del metodo ACN-PCN, introducendo una valutazione prestazionale basata sul comportamento reale della struttura sotto carico.

L'applicazione del metodo ACR-PCR ai casi studio analizzati ha evidenziato come il nuovo approccio consenta di rappresentare in modo più accurato lo stato di sollecitazione indotto dagli aeromobili e di considerare esplicitamente lo spettro di traffico reale e le condizioni operative specifiche dell'infrastruttura. I risultati ottenuti mostrano una maggiore sensibilità del metodo rispetto alle caratteristiche stratigrafiche della pavimentazione e alle proprietà meccaniche dei materiali, permettendo una valutazione più affidabile della resistenza rispetto al sistema ACN-PCN.

Dal punto di vista progettuale, l'approccio meccanicistico introdotto dal metodo ACR-PCR consente una più efficace ottimizzazione stratigrafica della pavimentazione, permettendo di calibrare gli spessori degli strati e le caratteristiche dei materiali in funzione delle effettive condizioni di carico e delle prestazioni richieste. Ciò consente di evitare sovradimensionamenti strutturali e di definire soluzioni progettuali più efficienti sia dal punto di vista tecnico sia dal punto di vista economico, aspetto particolarmente rilevante considerando i costi elevati associati agli interventi di riqualificazione e manutenzione delle pavimentazioni aeroportuali.

Un aspetto particolarmente rilevante emerso dall'analisi riguarda la variabilità stagionale del Pavement Classification Rating (PCR), associata principalmente al comportamento termo-dipendente degli strati in conglomerato bituminoso. Le proprietà meccaniche dei materiali bituminosi risultano infatti fortemente influenzate dalla temperatura, con una significativa riduzione della rigidità alle alte temperature. Tale fenomeno determina variazioni della risposta strutturale della pavimentazione e, di conseguenza, della resistenza valutata mediante il metodo ACR-PCR. La possibilità di determinare valori di PCR variabili nel tempo solleva infatti il problema della scelta del valore di riferimento da pubblicare nelle Aeronautical Information Publications (AIP). Un aggiornamento continuo

del parametro risulterebbe difficilmente gestibile dal punto di vista operativo e potrebbe introdurre ulteriori incertezze nell'interpretazione dei limiti di esercizio da parte dei gestori aeroportuali e degli operatori aeronautici. Ne consegue la necessità di individuare criteri univoci per la definizione del valore rappresentativo della resistenza.

In un'ottica cautelativa e di sicurezza operativa, l'adozione del valore di PCR corrispondente alle condizioni più sfavorevoli rappresenta la soluzione più conservativa; tuttavia, tale scelta potrebbe comportare una sottoutilizzazione della capacità strutturale della pavimentazione nelle condizioni operative ordinarie. Viceversa, l'utilizzo di valori medi o rappresentativi delle condizioni nominali potrebbe non garantire adeguati margini di sicurezza durante periodi caratterizzati da condizioni ambientali critiche.

La variabilità stagionale del PCR evidenzia pertanto una delle principali sfide applicative del metodo ACR-PCR, richiedendo lo sviluppo di procedure operative e linee guida normative che definiscano criteri standardizzati per la determinazione e la dichiarazione della resistenza, al fine di garantire coerenza, affidabilità e sicurezza nell'utilizzo delle infrastrutture aeroportuali.

L'introduzione del sistema ACR-PCR comporta quindi la necessità di aggiornare i valori di resistenza pubblicati nelle Aeronautical Information Publications (AIP), al fine di garantire la coerenza tra le caratteristiche strutturali delle pavimentazioni e le informazioni operative disponibili per i gestori aeroportuali e per le compagnie aeree. Tale aggiornamento rappresenta un passaggio fondamentale per l'effettiva implementazione del nuovo metodo e per l'allineamento del sistema aeroportuale agli standard internazionali.

Dal confronto complessivo emerge che il metodo ACR-PCR costituisce un'evoluzione significativa rispetto al sistema ACN-PCN, in quanto consente una valutazione più realistica del comportamento strutturale delle pavimentazioni, una maggiore affidabilità nella stima della resistenza e una più efficace ottimizzazione delle soluzioni progettuali e gestionali. Tuttavia, l'adozione del nuovo approccio richiede una maggiore disponibilità di dati sperimentali, una caratterizzazione meccanica più approfondita dei materiali e competenze tecniche specialistiche, elementi che rappresentano le principali criticità nella sua implementazione su larga scala. Alla luce dei risultati ottenuti, il metodo ACR-PCR fornisce una valutazione della resistenza delle pavimentazioni aeroportuali maggiormente rappresentativa del loro reale comportamento strutturale rispetto al vecchio metodo ACN-PCN, contribuendo al miglioramento della sicurezza e dell'efficienza operativa ed economica delle infrastrutture aeroportuali. I risultati evidenziano pertanto la necessità di un aggiornamento dei valori attualmente pubblicati, anche nel contesto italiano, al fine di allineare la classificazione delle pavimentazioni al nuovo metodo.

Bibliografia e Sitografia

- [1] ENAC – Ente Nazionale per l’Aviazione Civile. “Ente Nazionale per l’Aviazione Civile – Sito ufficiale,” ENAC, visitato il giorno 23 feb. 2026. indirizzo: <https://www.enac.gov.it/>.
- [2] ENAC – Ente Nazionale per l’Aviazione Civile. “Normativa dell’Unione Europea sulla sicurezza aerea,” ENAC, visitato il giorno 23 feb. 2026. indirizzo: <https://www.enac.gov.it/sicurezza-aerea/quadro-normativo/normativa-dellunione-europea/>.
- [3] European Union Aviation Safety Agency, *Certification Specifications and Guidance Material for Aerodrome Design (CS-ADR-DSN), Issue 7*, Cologne, Germany, 2025.
- [4] International Civil Aviation Organization, *Annex 14 to the Convention on International Civil Aviation, Volume I: Aerodrome Design and Operations*, Montreal, Canada, 2022.
- [5] International Civil Aviation Organization, *Aerodrome Design Manual, Part 3: Pavements*, 2nd. Montreal, Canada: ICAO, 1983.
- [6] International Civil Aviation Organization, *Aerodrome Design Manual, Part 3: Pavements*, 3rd. Montreal, Canada: ICAO, 2022.
- [7] Federal Aviation Administration, “Airport Pavement Design and Evaluation,” U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration, Washington, DC, Advisory Circular AC 150/5320-6G, giu. 2021, Issued June 7, 2021.
- [8] Federal Aviation Administration, “Order 5300.7: Standard Naming Convention for Aircraft Landing Gear Configurations,” U.S. Department of Transportation, FAA, Washington, DC, rapp. tecn., 2005.
- [9] Lavionnaire. “Carrello di atterraggio di un aereo,” visitato il giorno 23 feb. 2026. indirizzo: <https://www.lavionnaire.fr/ItaCarrellodiatterraggio.php>.
- [10] Lindbergh Aviation Academy. “Scuola di aviazione a Bergamo,” visitato il giorno 23 feb. 2026. indirizzo: <https://lindberghaviationacademy.com/scuola-di-aviazione-a-bergamo/>.

- [11] Alamy. “Lufthansa Airbus A350-900, sospensione main landing gear, Aeroporto di Monaco di Baviera.” Foto stock, visitato il giorno 23 feb. 2026. indirizzo: <https://www.alamy.it/foto-immagine-lufthansa-airbus-a350-900-a350-sospensione-main-landing-gear-ruota-tubo-pneumatico-aeromobili-piano-aereo-aeroporto-di-monaco-di-baviera-172373777.html>.
- [12] R. Mass Production. “Antonov An-72 (NATO reporting name: Coaler). A Soviet STOL medium cargo plane.” Post su Reddit, r/WeirdWings, visitato il giorno 23 feb. 2026. indirizzo: https://www.reddit.com/r/WeirdWings/comments/sixeta/antonov_an72_nato_reporting_name_coaler_a_soviet/.
- [13] YouTube. “Airbus A340 lowering the landing gear [HD],” YouTube, visitato il giorno 23 feb. 2026. indirizzo: <https://www.youtube.com/watch?v=q3xySvYB8xo>.
- [14] Alamy. “Aircraft landing gear (Image ID: 2D6C5ME).” Foto stock, Image ID: 2D6C5ME, visitato il giorno 23 feb. 2026. indirizzo: <https://www.alamy.com/>.
- [15] European Union Aviation Safety Agency (EASA). “New Method to Report Pavement Strength (ACR-PCR) Webinar,” visitato il giorno 19 feb. 2026. indirizzo: <https://www.easa.europa.eu/en/newsroom-and-events/events/new-method-report-pavement-strength-acr-pcr-webinar>.
- [16] Federal Aviation Administration, “Advisory Circular 150/5335-5C: Standardized Method of Reporting Airport Pavement Strength – PCN,” U.S. Department of Transportation, FAA, Washington, DC, rapp. tecn., 2014.
- [17] Federal Aviation Administration, “Advisory Circular 150/5335-5D: Standardized Method of Reporting Airport Pavement Strength – PCR,” U.S. Department of Transportation, FAA, Washington, DC, rapp. tecn., 2022.
- [18] Ente Nazionale per l’Aviazione Civile (ENAC), “Airport Pavement Management System: Linee guida sulla implementazione del sistema di gestione della manutenzione delle pavimentazioni,” ENAC, Roma, Italia, rapp. tecn., 2015.
- [19] ASTM International, *Standard Test Method for Airport Pavement Condition Index (PCI) Surveys*, West Conshohocken, PA, 1998.
- [20] Federal Aviation Administration, “Advisory Circular 150/5370-11B: Use of Non-destructive Testing in the Evaluation of Airport Pavements,” U.S. Department of Transportation, FAA, Washington, DC, rapp. tecn., 2011.
- [21] Federal Aviation Administration. “Pavement Condition Index (PCI),” FAA, visitato il giorno 23 feb. 2026. indirizzo: <https://faapaveair.faa.gov/Help/Documents/pavementconditionindexpci.htm>.