

SITEBSi srl
**Rassegna
del bitume**

RIVISTA DEL SITEB-ASSOCIAZIONE ITALIANA BITUME ASFALTO STRADE

ESTRATTO DAL N° **01/86**

**La misura della capacità portante delle pavimentazioni aeroportuali
mediante il falling weight deflectometer**

Gianfranco Battiato

RO.DE.CO Road Construction & Structural Design Consultants.

La misura della capacità portante delle pavimentazioni aeroportuali mediante il falling weight deflectometer

Dott. G. Battiato

1. Sommario

Nel presente articolo viene descritta la metodologia teorico-sperimentale per la valutazione della portanza delle pavimentazioni aeroportuali, basata sull'impiego del «Falling Weight Deflectometer», un'apparecchiatura ad alto rendimento già utilizzata nel campo stradale, per il controllo e la manutenzione programmata delle pavimentazioni.

Utilizzando i dati ottenuti mediante il deflettometro mobile F.W.D., è possibile determinare per ogni punto di misura i valori dei moduli dei diversi strati che compongono la struttura; questo consente non solo di individuare le caratteristiche di portanza della pavimentazione e di evidenziare le zone più critiche, ma di stabilire anche le cause delle eventuali carenze riscontrate.

Dalle informazioni così ottenute è possibile ottimizzare il tipo di intervento manutentorio che consente di ripristinare le necessarie caratteristiche di funzionalità e di portanza della struttura.

Come esempio di applicazione pratica sono riportati i risultati di un'indagine eseguita recentemente su un Aeroporto dell'Aeronautica Militare.



Vista del Falling Weight Deflectometer



Il F.W.D. sull'Aeroporto di Genova

2. Introduzione

Per meglio comprendere l'importanza che l'impiego del Falling Weight Deflectometer ha significato nel campo delle pavimentazioni aeroportuali, riteniamo utile riportare la parte introduttiva dell'intervento del Prof. Giorgio Moraldi nel corso del «Seminario sulla manutenzione programmata delle pavimentazioni stradali ed aeroportuali» tenutosi a Verona il 29 Marzo 1985.

«L'impiego del deflettometro a massa cadente (F.W.D.) per la valutazione della portanza delle pavimentazioni aeroportuali e per la previsione di una manutenzione tempestiva e programmata, ha in campo aeroportuale un'importanza economica forse maggiore che non in campo stradale. Infatti prove e riparazioni anche ridotte, da effettuare su una pista di volo di un aeroporto monopista, comportano la chiusura al traffico dell'aeroporto e lo sconvolgimento di tutte le procedure di volo, cosa che non si verifica su una strada dove, temporaneamente, il traffico può essere incanalato su una sola carreggiata o corsia. Ne è riprova il fatto che, pur di evitare la chiusura dell'aeroporto, spesso si ricorre alla costruzione di una pista di volo provvisoria come è avvenuto a Ciampino e a Pisa.

Resta pertanto acquisito il fatto che per il gestore di aeroporti è di vitale importanza ridurre al minimo i tempi di chiusura al traffico di una pista.

Ciò premesso, per inquadrare il problema, consentitemi di richiamare brevemente i metodi in uso per la valutazione della capacità portante di una pavimentazione aeroportuale.

I metodi di valutazione sono fondamentalmente tre:

- Metodi distruttivi basati sull'uso inverso dei diagrammi di progetto.
- Metodi non distruttivi basati sulla esecuzione di prove di carico con piastre.
- Moderni metodi non distruttivi basati sulla interpretazione del responso della pavimentazione a carichi vibranti o ad impulso.

Il primo metodo richiede l'esecuzione di scavi per eseguire prove sul terreno e sugli strati della sovrastruttura; si tratta quindi di un metodo distruttivo.

E inoltre assai impreciso, in quanto i diagrammi di dimensionamento in uso non sanno tener conto di quanto influiscano sulla portanza materiali che si trovano in condizioni diverse di quelle previste in progetto; quale può risultare da una loro evoluzione sotto traffico o da carente qualità o posa in opera.

Il secondo metodo delle prove di carico con piastre è non distruttivo ed era ed è ancora il metodo più in uso in quanto collegato con la classificazione L.C.N. delle piste, sponsorizzato dall'O.A.'C.I. e dalla N.A.T.O. fino alla entrata in vigore della nuova classificazione A.C.N.-P.C.N.

Il grave inconveniente cui va soggetto è dovuto alla poca maneggevolezza dell'attrezzatura di prova e alla durata che l'esecuzione di una prova richiede. Anche con l'attrezzatura più sofisticata e moderna quale è quella impiegata attualmente dal Service Technique des Bases Aériennes (S.T.B.A.) francese in cui tutto è automatizzato (pompa e martinetto programmati per l'applicazione e la rimozione rapida dei carichi, rilevamento e registrazione elettronica dei dati su stampante ecc.) si tratta sempre di spostare su strada da un aeroporto all'altro un rimorchio del peso di 20 tonn. (che va portato, al momento di eseguire la prova, a 60 tonn. zavorrandolo con acqua) ed ogni prova richiede da 20 a 40 minuti di tempo, cosicché per esplorare una pista viene richiesta almeno una settimana di tempo.

E soprattutto per questo motivo che all'apparire negli anni 70 dei primi vibratorii leggeri tipo Dynaflect l'interesse

delle autorità aeroportuali si è rivolta ansiosamente verso questi nuovi metodi. Senonché la necessità dell'impiego di vibratorii molto pesanti, subito rivelatasi necessaria a seguito delle prove eseguite da parte del Waterways Experiment Station (W.E.S.) per tener conto della non linearità del responso degli strati profondi, ha ridotto notevolmente l'interesse verso questi apparecchi, in quanto si stava per tornare ad attrezzature pesanti e non maneggevoli.

Il deflettometro a massa cadente (Falling Weight Deflectometer) le cui applicazioni si sono sviluppate in questi ultimi tre o quattro anni ha costituito un salto di qualità notevole, in quanto permette di applicare ad una pavimentazione carichi dinamici elevati, pur con una attrezzatura di rapido impiego e assai maneggevole.

3. Descrizione dell'apparecchiatura Falling Weight Deflectometer

Il F.W.D. (Falling Weight Deflectometer) è un deflettometro mobile in grado di misurare con estrema precisione le deflessioni verticali provocate sulla superficie della pavimentazione da un carico di tipo dinamico.

Il principio base del F.W.D. è quello di una massa cadente su una piattaforma connessa con il piattobase per mezzo di una serie di molle (vedi foto 1).

Il picco della forza (F) esercitata sulla pavimentazione è:

$$F = \sqrt{2Mghk}$$

dove M = massa del peso cadente (Kg)
h = altezza di caduta (m)
k = costante della molla (N/m)

Il Dynatest 8000 è un sistema completo di rilevamento, comprensivo del deflettometro e dei sistemi di registrazione ed elaborazione dati (foto 2 e 3).

La parte principale del Dynatest 8000 FWD è il Dynatest 8002 FWD. Esso consiste in un rimorchio a 2 assi (di peso 850 Kg max) che trasporta una massa variabile da 50 Kg a 300 Kg. Viene trainato da una autovettura che contiene le apparecchiature di alimentazione e di registrazione. Dopo aver posizionata l'apparecchiatura sul punto di prova, la massa battente viene lasciata cadere ad una altezza che può variare da 2 a 40 cm producendo una sollecitazione che diagrammata in un piano forza-tempo risulta molto simile ad una semisinusoide.

Il picco della forza esercitata sulla sovrastruttura può allora variare fino ad oltre 11.000 Kg, (è in fase di avanzata realizzazione, da parte della Soc. DYNATEST, un F.W.D. in grado di applicare un carico dinamico fino a 24 ton).

La caratteristica della serie di molle è stata scelta in modo da produrre un impulso della durata di 28 ms equivalente a circa 34 Hz; infatti numerose misure su alcune sovrastrutture hanno mostrato che questo tempo corrisponde alla durata dell'impulso prodotto dal traffico pesante con velocità di circa 70 Km/h.

La piastra di carico normalmente impiegata è rivestita in gomma per distribuire l'impulso del carico in modo uguale sulla superficie del diametro di 30 cm. Le deflessioni sono misurate per mezzo di trasduttori ad alta precisione (geofoni).

L'effetto della forza esercitata è quello di produrre un abbassamento della pavimentazione sotto e all'intorno dell'area di carico (figura 1). La deflessione nel centro dell'area di carico è una funzione delle proprietà e delle dimensioni della sovrastruttura ma questo non è sufficiente per una

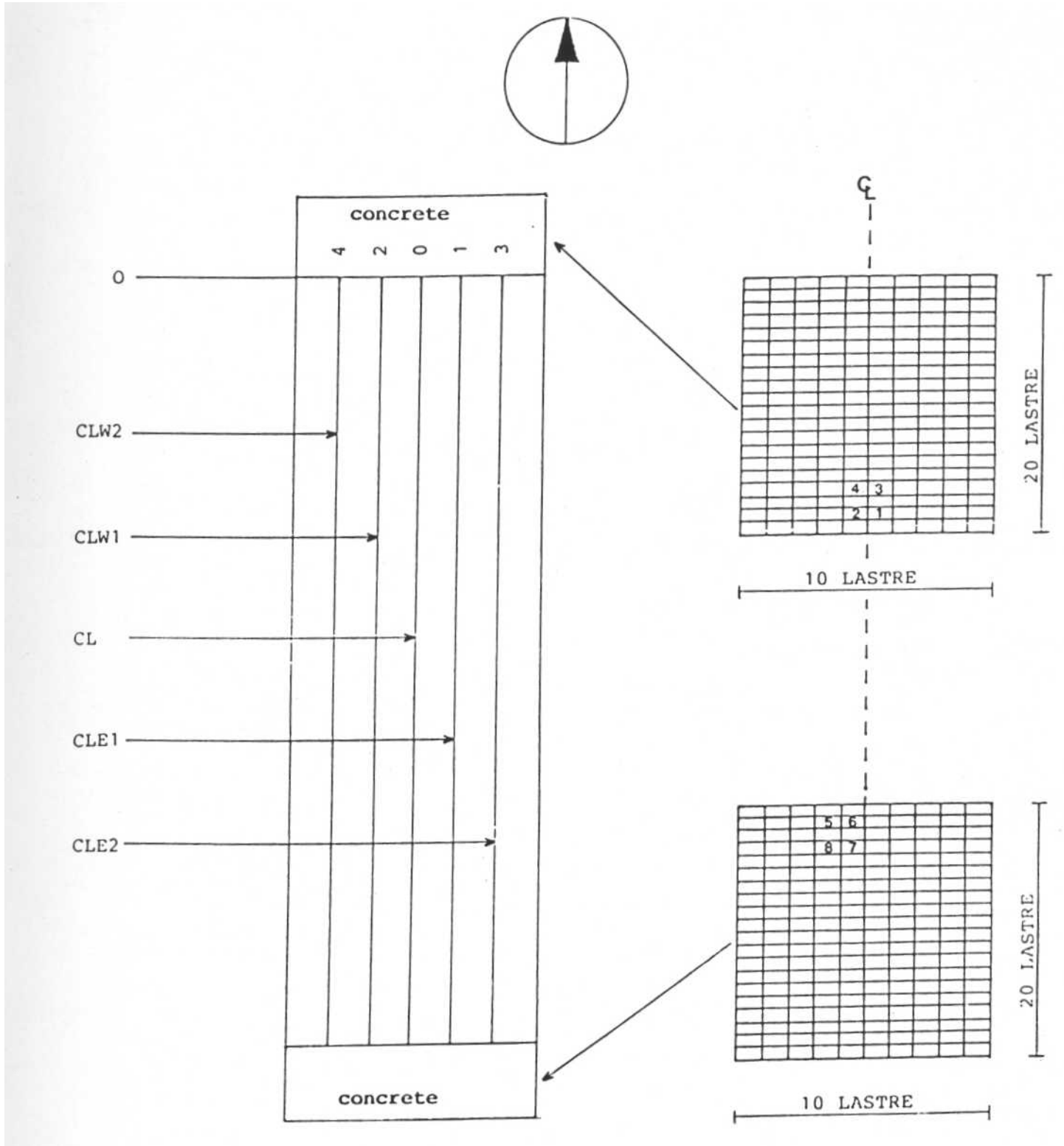


Fig. 1 - Schema delle misure eseguite sulla pista di volo



Elaborazione dei dati di deflessione in tempo reale



Il F.W.D. sull'Aeroporto di Milano Malpensa

esatta interpretazione di essa, perché le pavimentazioni possono avere diversi bacini di deflessione nel centro dell'area di carico.

Perciò in aggiunta a tale deflessione (δ_0) deve essere misurata la deflessione in altri punti (δ_i).

Per valutare il bacino di deflessione l'8002 FWD misura la deflessione in 7 punti e quindi è possibile determinare i moduli di una pavimentazione schematizzata come un multistrato.

La misura può essere controllata dallo stesso guidatore che, seduto nell'abitacolo del veicolo, registra le misure mediante una tastiera di un calcolatore Hewlett Packard HP-85 il quale agisce su una unità elettroidraulica.

Una cella di misura sopra la piastra di carico misura il carico applicato; dal posto di guida della vettura si possono comandare e registrare tutte le operazioni della misura.

Il F.W.D. è interfacciato con l'HP-85 mediante un micro-processore (Dynatest 8600 System Processor) che controlla l'operazione del F.W.D. e permette di analizzare i segnali dei trasduttori.

Nelle foto 4 e 5 è possibile vedere alcuni particolari del sistema di misura in opera sull'Aeroporto della Malpensa e di Bari Palese rispettivamente.

I valori delle deflessioni sono misurati con una risoluzione di ± 1 micron, alle seguenti distanze dal piatto: 0 (centro), 300, 600, 900, 1200, 1500 e 1800 mm.

Nel caso di pavimentazioni rigide, per valutare il trasferi-

mento di carico sui giunti e negli angoli, sono collocati due geofoni ad una distanza di 200 e 300 mm. I rimanenti geofoni sono posizionati alle distanze di 900, 1200, 1500, 1800 mm (vedi figura 2).

4. Elaborazione dei dati

4.1 - Calcolo dei moduli e del comportamento a fatica della pavimentazione

Le deflessioni così misurate vengono utilizzate per il calcolo dei moduli dei diversi strati delle strutture; normalmente viene impiegato un modello di struttura a 3 strati (vedi fig. 3 in cui lo strato superiore rappresenta l'insieme degli strati in conglomerato bituminoso; quello intermedio la fondazione (misto granulare o stabilizzato a cemento), quello sottostante il sottofondo).

Durante le prove sono eseguite misure di temperatura nei diversi strati allo scopo di valutare i moduli in condizioni standard di temperatura.

Il modello utilizzato consente di calcolare, per ogni sezione esaminata, il modulo di ogni strato, gli sforzi e le deformazioni critiche della pavimentazione per ogni punto di misura.

Per valutare il comportamento a fatica della pavimentazione è stata utilizzata la seguente espressione analitica (ve-

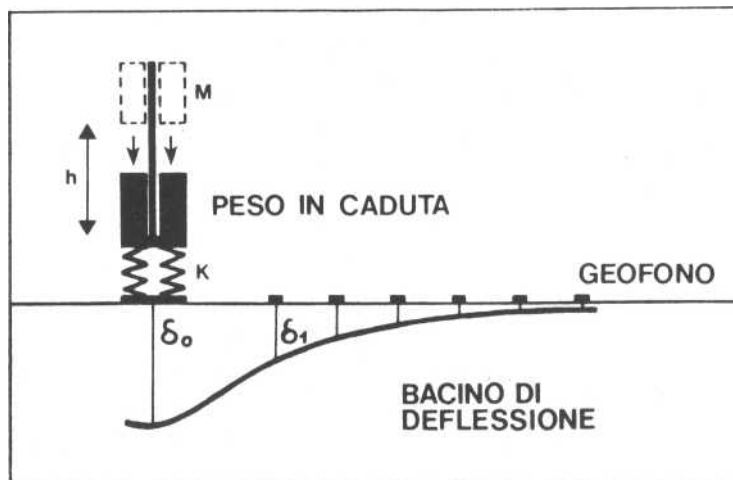


Fig. 1 - Misura del bacino di deflessione

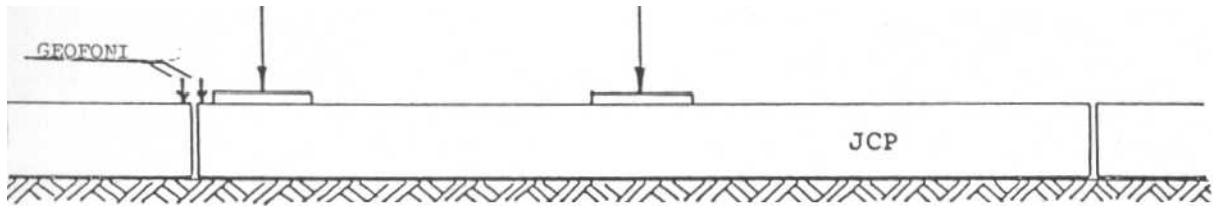


Fig. 2 - Prove condotte su lastre in calcestruzzo

di pubblicazione «Autostrade»: «Misure dell'aggressività del traffico merci sulle pavimentazioni», Gennaio 1983):

$$E_{xx} = 47.4 \times 10^{-4} \times N^{-0.234}$$

dove E_{xx} è la deformazione longitudinale alla base degli strati in conglomerato bituminoso

N è la vita della pavimentazione (numero di passaggi che provocano le fessurazioni, in corrispondenza del livello E_{xx} di deformazione).

Utilizzando i dati sulle caratteristiche del traffico aereo è possibile valutare la vita ed il comportamento a fatica della pavimentazione.

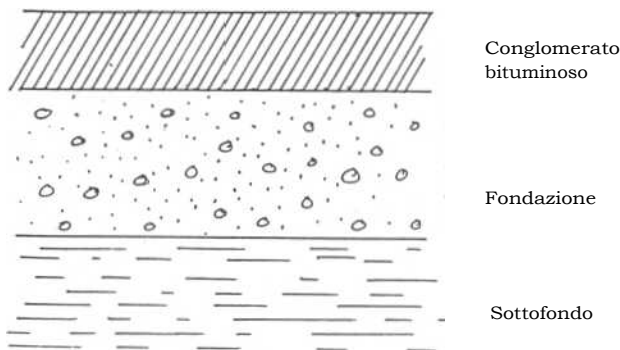


Fig. 3 - Rappresentazione della pavimentazione con un modello a 3 strati

4.2 - Elaborazione dei dati di F.W.D.

I dati di deflessione ottenuti con il F.W.D. sono elaborati mediante il programma per ordinatore ELMOD (Evaluation of Layer Moduli and Overlay Design).

Il programma ELMOD opera sullo stesso microcomputer che controlla le operazioni del F.W.D. su strada.

I parametri di input del programma sono costituiti dai valori delle deflessioni (l'intero bacino di deflessione), del carico, dello spessore degli strati (il programma può operare con un modello a 2, 3 o 4 strati).

Le caratteristiche del sottofondo contribuiscono in maniera determinante (>> 50%) ai valori delle 7 deflessioni; risulta conseguentemente importante considerare il comportamento non lineare nella risposta di tale strato. Il programma assolve a questa funzione utilizzando 3 dei 7 valori della deflessione ad una distanza sufficientemente grande, tale da risultare funzione unicamente della risposta del sottofondo.

Il programma è in grado di valutare pertanto i valori del modulo del sottofondo a tre diversi livelli di sforzo, prendendo in esame il comportamento non lineare.

I valori dei moduli dei rimanenti strati sono determinati per mezzo del raggio di curvatura e dei valori delle deflessioni sotto e vicino il carico applicato.

I valori dei moduli così trovati sono successivamente corretti in funzione delle variazioni stagionali delle temperature della pavimentazione.

Sulla base delle funzioni di trasferimento che legano sforzi e deformazioni nella struttura (sotto carico) al tipo di degradazione della pavimentazione, il programma è in grado di calcolare la «vita residua» della pavimentazione e lo spessore di rinforzo teoricamente necessario per garantire la vita utile della struttura nelle condizioni di traffico aereo previste.

Le pavimentazioni rigide (normalmente testate in calcestruzzo della pista di volo) sono valutate utilizzando una versione particolare del programma ELMOD denominata ELCON (Elmod for CONcrete).

Tale programma fa uso dello stesso metodo degli spessori equivalenti per calcolare i moduli degli strati al centro della lastra, impiegando inoltre le nuove equazioni di Werstergaard per determinare il modulo di reazione del sottofondo (il valore K di un sottofondo di Winkler) al centro della lastra e sul giunto, per calcolare inoltre la percentuale di trasferimento del carico.

Viene inoltre calcolata la deflessione differenziale corrispondente ad un asse standard di 18.000 lbr (sebbene questa sia particolarmente utile soprattutto nella valutazione di pavimentazioni autostradali).

Un valore basso del modulo di reazione del sottofondo (valore K) sul giunto o sull'angolo (rispetto al valore riscontrato al centro) indica un'insufficienza del supporto al giunto.

La percentuale di trasferimento di carico, % LT, viene calcolata utilizzando l'espressione di Werstergaard:

$$Z_j - Z_j' = \frac{(1 - \%LT)}{100} \times (Z_e - Z_e')$$



II F.W.D. sull'Aeroporto di Bari Palese

nella quale Z_j e Z_j' sono le deflessioni delle lastre adiacenti in un punto situato sul giunto, mentre Z_e e Z_e' sono le deflessioni corrispondenti che si avrebbero nello stesso punto se il giunto non avesse alcuna capacità di trasferimento di carico.

Una misura semplificata del grado di trasferimento di carico viene talora calcolata come rapporto in % fra Z_j' e Z_j , determinabile dall'espressione seguente:

$$\frac{Z_j'}{Z_j} \times 100\% = \frac{\%LT}{100 - \%LT} \times 100\%$$

5. Esempio di applicazione

Come esempio di applicazione sono riportati i risultati di un'indagine recentemente eseguita su un aeroporto dell'Aeronautica Militare, nel corso di due sole giornate di pro-

va senza interruzione di traffico aereo, su oltre 350 diverse postazioni della pista di volo.

I punti di prova sono stati distribuiti lungo 5 allineamenti longitudinali e precisamente: sul centro linea, a ± 4.5 metri ed a ± 10 metri dal centro linea.

Le prove sono state condotte ogni 30 metri sulle tre linee centrali, ogni 100 metri sulle due linee esterne e su 8 lastre delle testate.

Lo schema dei punti di misura è riportato in figura 1.

La struttura flessibile era costituita da una fondazione di misto granulare dello spessore di 20 cm, con una sovrastruttura di conglomerato bituminoso dello spessore complessivo di 20 cm. Lo spessore delle lastre di calcestruzzo era pari a 20 cm.

I risultati salienti dell'indagine condotta con il F.W.D. sono riassunti nella tabella 1, nella quale sono riportati i valori medi dei moduli dell'insieme degli strati in conglomerato bituminoso (E_1), della fondazione (E_2) e del sottofondo (E_3) in MPa, oltre i valori di PCN (Pavement Classification Number).

TABELLA 1 - Quadro sintetico dei risultati sulle pavimentazioni flessibili

	Linee di misura	Progress.	E_1 MPa	E_2 MPa	E_3 MPa	PCN	Spessori di rinforzo mm
Pista di volo	CL	0-2.7	1277	942	256	118	0
	CLE1	0-2.7	1183	926	237	108	0
	CLE2	0-2.7	1208	1006	243	117	0
	CLW1	0-2.7	1049	705	219	96	0
	CLW2	0-2.7	935	822	220	107	0

Dall'insieme dei risultati della tabella 1 si può rilevare quanto segue: le caratteristiche strutturali della pista di volo risultano particolarmente elevate, con valori di PCI' elevati e capacità portante che non richiede alcun intervento di rafforzamento.

Sulla pavimentazione sono state inoltre effettuate misure di regolarità per la determinazione del PSR (Present Serviceability Rating).

Le caratteristiche di regolarità sono risultate leggermente insufficienti (con valori di PSR compresi fra 2.5 e 3.0).

I moduli dell'insieme degli strati legati a bitume risultano insufficienti (in taluni casi inferiori a 1000 MPa a 27°C) in conseguenza del particolare grado di ammaloramento superficiale.

Un intervento di rigenerazione in situ può pertanto risolvere le carenze di regolarità e di ammaloramento superficiale della pavimentazione.

I risultati dei calcoli eseguiti sulle strutture rigide sono

riportati sinteticamente nella tabella 2.

Per ogni sezione omogenea (individuata dal numero delle lastre) sono riportati:

- il valore medio del modulo equivalente E, del calcestruzzo;
- il valore medio del modulo equivalente E_2 del supporto di fondazione (valore medio diviso il fattore di deviazione standard);
- le deflessioni differenziali in mm sui giunti e sugli angoli (valore medio + la deviazione standard);
- il trasferimento di carico (%) sui giunti e sugli angoli (valore medio diminuito della deviazione standard);
- i valori di PCN (valore logaritmico diviso il fattore di deviazione standard);
- lo spessore di rinforzo teoricamente necessario per ottenere un valore di PCN pari all'ACN di un Boeing 747-200F.

TABELLA 2 - Risultati sulle pavimentazioni rigide.

N. delle lastre	E_1 MPa	E_2 MPa	DIF	LT %	PCN	Spessori di rinforzo mm
1-4	18290	231	0.089	74	23	230
5-8	27952	443	0.074	64	52	0

Nei calcoli si è considerato un sistema a due strati con 200 mm di calcestruzzo sul supporto di fondazione.

Il modulo del calcestruzzo sulla testata sud risulta elevato (quasi 30.000 MPa); tuttavia il valore basso del rapporto fra i valori del modulo di reazione del sottofondo sull'angolo ed al centro della lastra, denota la presenza di vuoti sugli angoli e consiglia un intervento di stabilizzazione sui giunti.

Sulle lastre della testata nord la capacità portante risulta notevolmente inferiore, come si può rilevare dai valori di PCN, dalle caratteristiche inferiori dei moduli del sottofondo e del calcestruzzo.

Lo spessore di rinforzo teoricamente necessario per elevare il valore di PCN all'ACN corrispondente ad un Boeing 747, è pari a circa 230 mm.