



Università degli Studi di Trieste
Dipartimento di Ingegneria e Architettura
Laurea Magistrale: Ingegneria Civile
Corso di INFRASTRUTTURE AEROPORTUALI

Lezione 09: Le pavimentazioni aeroportuali

Roberto Roberti

Tel.: 040/558.3588

E-mail: roberto.roberti@dia.units.it

Anno accademico 2016/2017



Argomenti

Funzioni pavimentazioni

Differenze tra pavimentazioni stradali e aeroportuali

Il terreno di sottofondo

I materiali delle pavimentazioni

I carichi

I metodi di dimensionamento

La classifica delle pavimentazioni aeroportuali

Esempi di Calcolo

Funzioni delle pavimentazioni

ASSICURARE UN PIANO STABILE PER LA CIRCOLAZIONE DEGLI AEREI

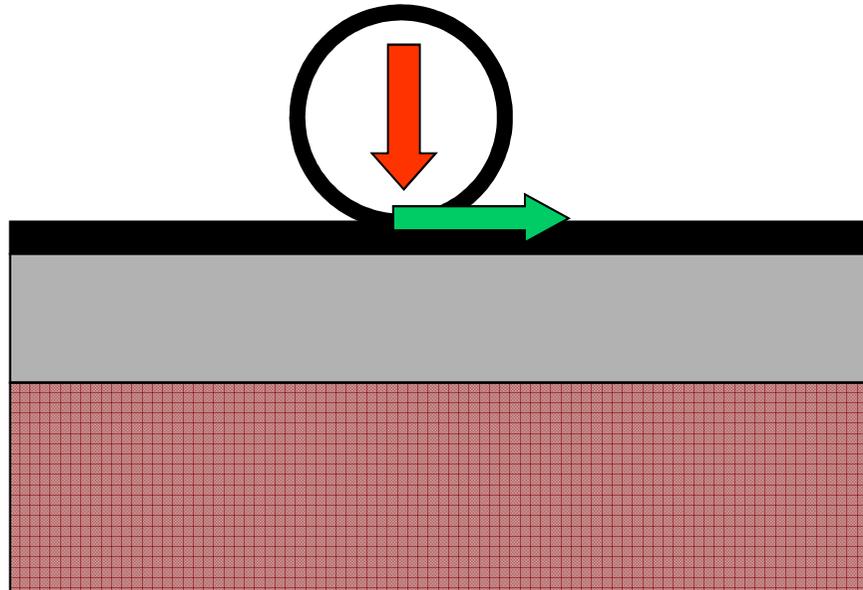


GARANTIRE LA SICUREZZA NELLE OPERAZIONI A TERRA



ASSICURARE L'ASSENZA DI VIBRAZIONI

Progettare e gestire le pavimentazioni



PROGETTAZIONE STRUTTURALE

Spessori strati e materiali

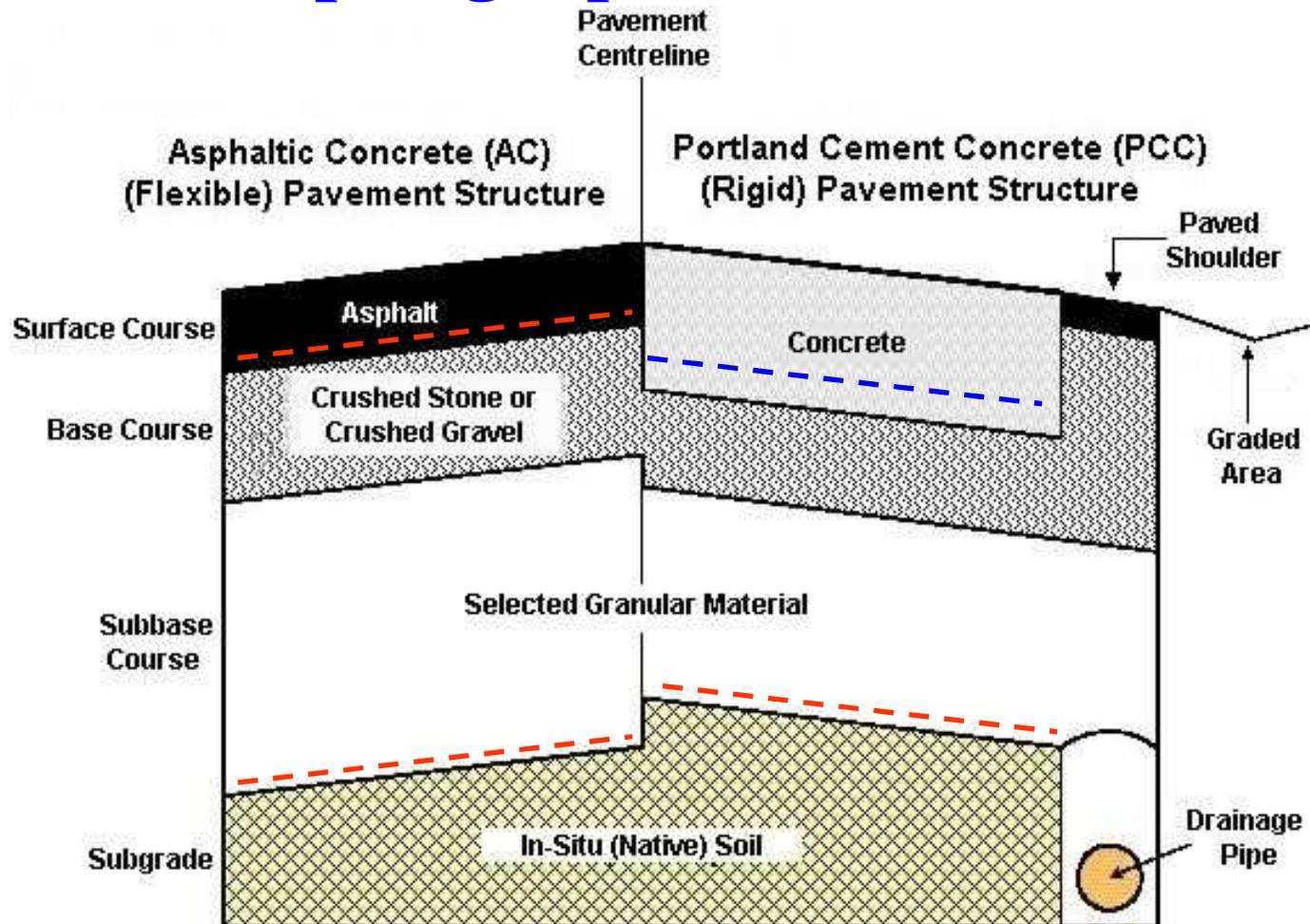
PROGETTAZIONE PIANO SUPERFICIALE

Materiali

VALUTAZIONE STRUTTURALE

VALUTAZIONE CARATTERISTICHE SUPERFICIALI

Tipologia pavimentazioni



Differenze tra pav. stradali e aeroportuali

	PAV. AEROPORTUALI	PAV. STRADALI
Pesi veicoli	400 t	44 t
Carico per carrello	100 t	12 – 20 t
Pres. Pneumatici	1,4 MPa (14 kg/cm²)	0,8 MPa (8 kg/cm²)
Velocità	300 km/h	100 km/h
Ripetizioni di carico	< 6.000.000 in 20 anni	> 300.000.000 in 20 anni
Azioni dinamiche	elevate e ripetute	poche e di modesta entità
Estensione	elevata in larghezza	elevate in lunghezza

Dati e obiettivi del progetto strutturale

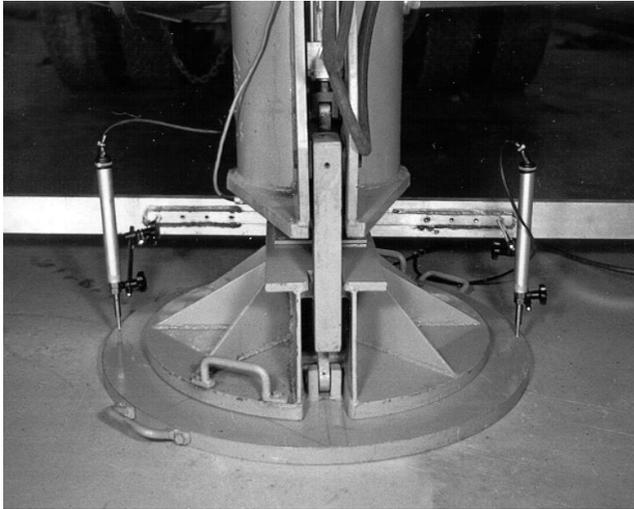
DATI

- Caratteristiche del terreno di sottofondo
- Materiali costituenti la pavimentazione
- Fattori climatici
- Carichi
- Traffico
- Distribuzione trasversale dei carichi
- Vita utile

OBIETTIVI

- Spessori pavimentazioni
- Prescrizioni capitolari sui materiali e sulle modalità costruttive

Il modulo elastico



$$E = \frac{\pi \cdot p \cdot a}{2 \cdot f} \cdot (1 - \mu^2)$$

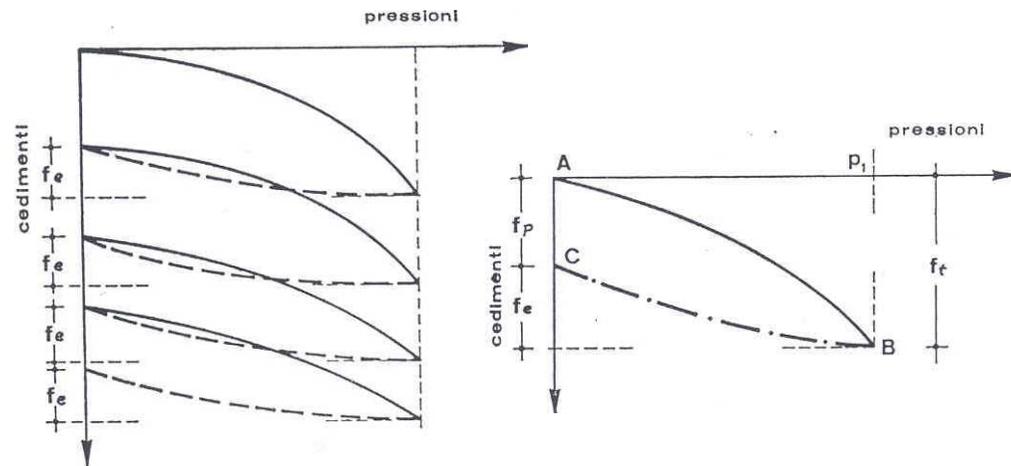
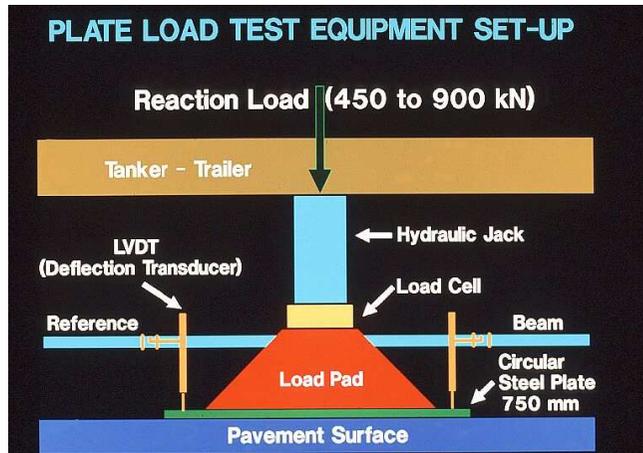
E = Modulo elastico [N/m²]

p = pressione tra piastra e terreno [N/m²]

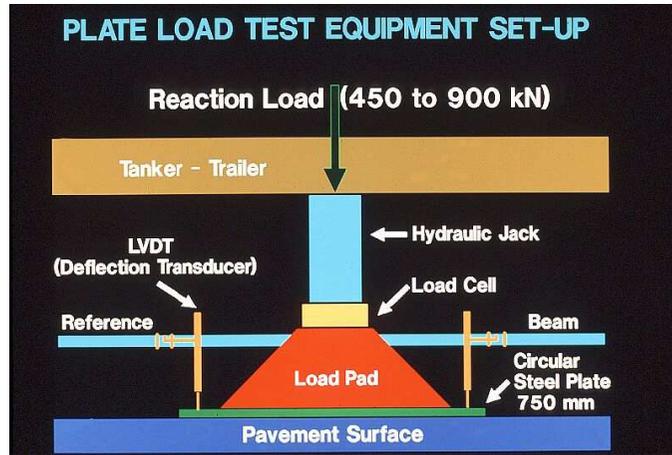
a = raggio della piastra [m]

f = freccia (cedimento) [m]

μ = modulo di Poisson



Il modulo di reazione

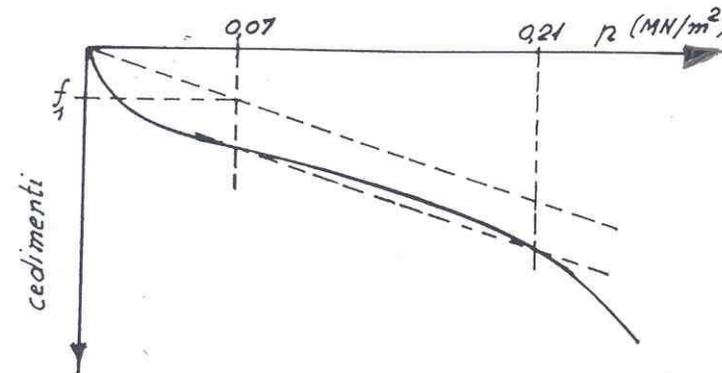
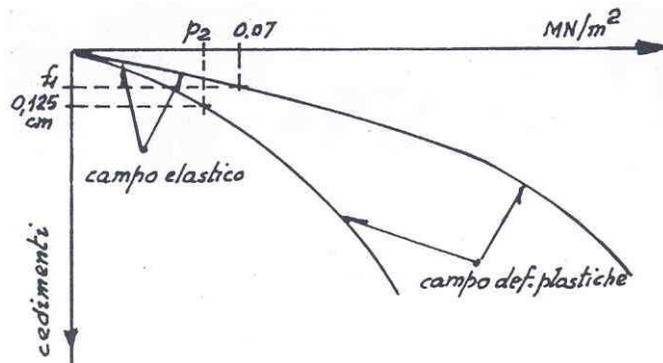


$$K = \frac{p}{f}$$

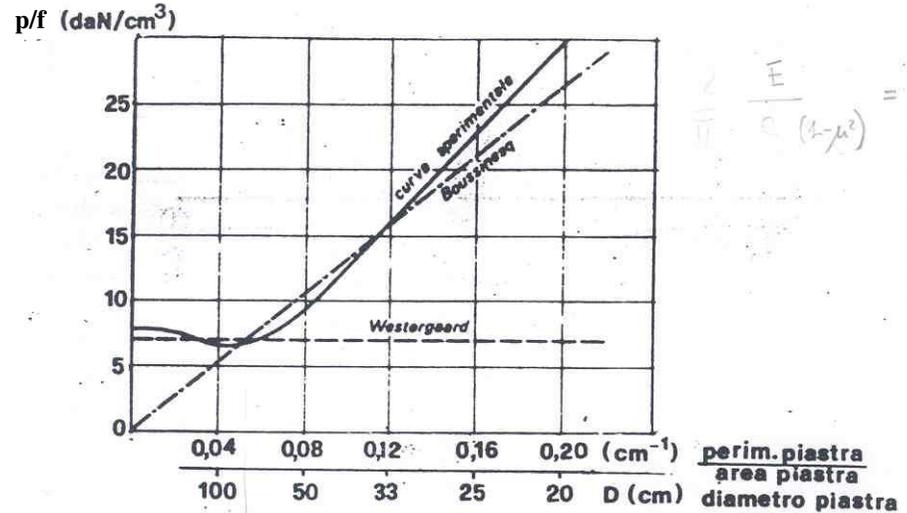
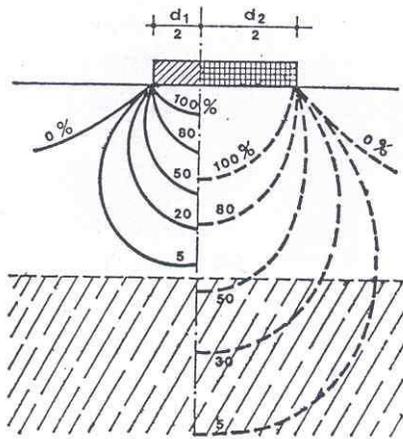
K = Modulo di reazione [N/m³]

p = pressione tra piastra e terreno [N/m²]

f = freccia (cedimento) [m]



Influenza del diametro della piastra

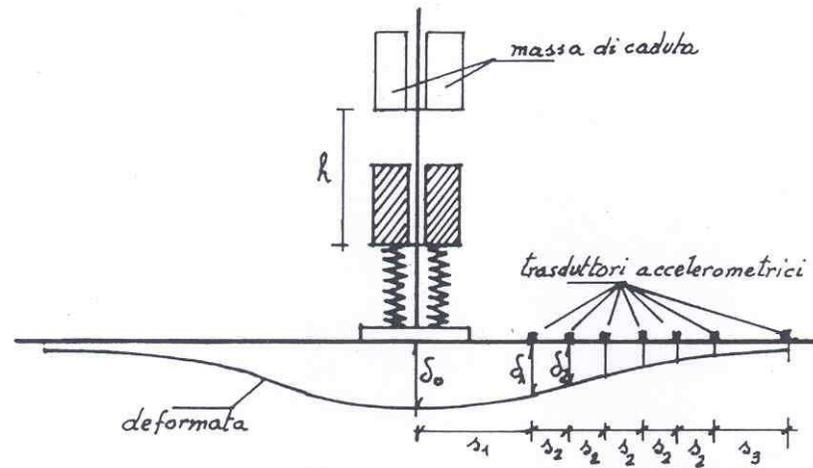


$$E = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{p \cdot a}{f} \cdot (1 - \mu^2)$$

$$\frac{2 \cdot E}{\pi \cdot (1 - \mu^2) \cdot a} = \frac{p}{f}$$

$$K = \frac{p}{f}$$

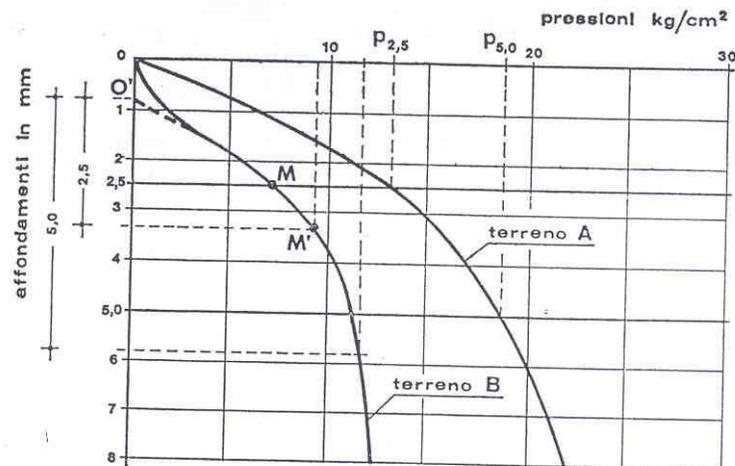
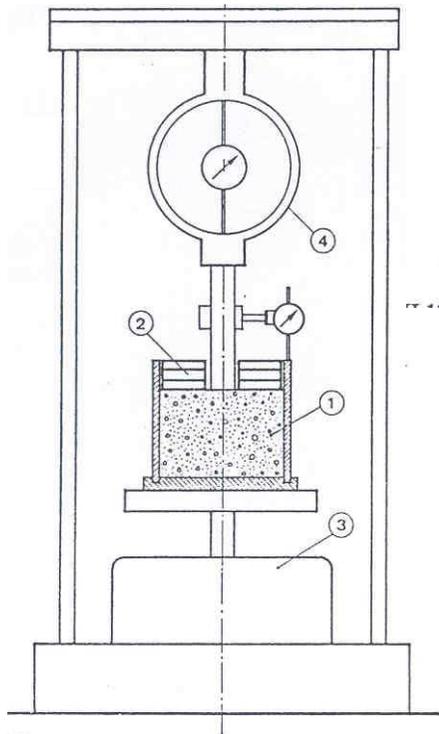
Modulo elastico e dinamico



$$E_d = c \cdot E_s$$

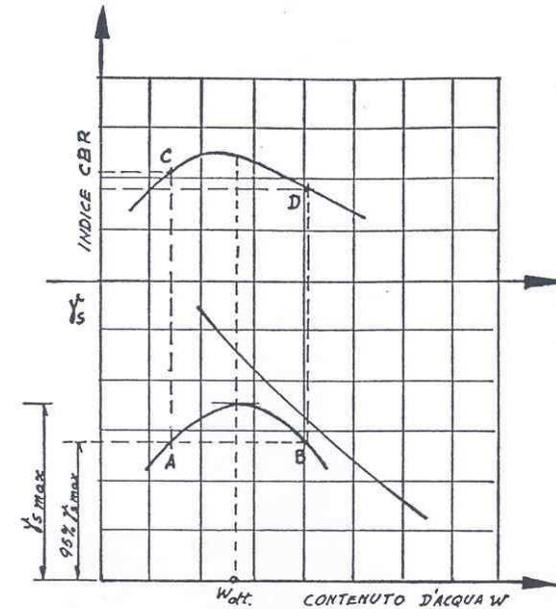
$$c = 1,1 - 2$$

Indice CBR



$$I_{2,5} = \frac{p_{2,5}}{70} \cdot 100$$

$$I_5 = \frac{p_5}{105} \cdot 100$$



Classifica FAA

TABELLA XII.1 — Classificazione dei terreni secondo la FAA e determinazione delle classi per pavimentazioni flessibili e rigide.

Gruppo	Trattenuto al n. 10 ASTM %	Passante al setaccio n. 10 ASTM			Limite di liquidità LL	Indice di plasticità IP	Classe			
		Trattenuto al n. 60 ASTM	Passante al n. 60 e trattenuto al 270	Passante al n. 270 ASTM			Buon drenaggio		Cattivo drenaggio	
							assenza di gelo	forte gelo	assenza di gelo	forte gelo
E_1	0 ÷ 45	> 40	< 60	< 15	< 25	< 6	F_a R_a	F_a R_a	F_a R_a	F_a R_a
E_2	0 ÷ 45	> 15	< 85	< 25	< 25	< 6	F_a R_a	F_a R_a	F_1 R_a	F_2 R_a
E_3	0 ÷ 45	—	—	< 25	< 25	< 6	F_1 R_a	F_1 R_a	F_2 R_a	F_2 R_a
E_4	0 ÷ 45	—	—	< 35	< 35	< 10	F_1 R_a	F_1 R_a	F_2 R_b	F_3 R_b
E_5	0 ÷ 45	—	—	< 45	< 40	< 15	F_1 R_a	F_2 R_b	F_3 R_b	F_4 R_b
E_6	0 ÷ 55	—	—	> 45	< 40	< 10	F_2 R_b	F_3 R_b	F_4 R_b	F_5 R_c
E_7	0 ÷ 55	—	—	> 45	< 50	10 ÷ 30	F_3 R_b	F_4 R_b	F_5 R_b	F_6 R_c
E_8	0 ÷ 55	—	—	> 45	< 60	15 ÷ 40	F_4 R_b	F_5 R_c	F_6 R_c	F_7 R_d
E_9	0 ÷ 55	—	—	> 45	> 40	< 30	F_5 R_c	F_6 R_c	F_7 R_c	F_8 R_d
E_{10}	0 ÷ 55	—	—	> 45	< 70	20 ÷ 50	F_5 R_c	F_6 R_c	F_7 R_c	F_8 R_d
E_{11}	0 ÷ 55	—	—	> 45	< 80	> 30	F_6 R_d	F_7 R_d	F_8 R_d	F_9 R_e
E_{12}	0 ÷ 55	—	—	> 45	> 80	—	F_7 R_d	F_8 R_e	F_9 R_e	F_{10} R_e
E_{13}	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Le classi indicate con F si riferiscono al dimensionamento di sovrastrutture flessibili, quelle con R alle sovrastrutture rigide.

Correlazioni tra indici

	CLASSIFICAZIONE F.R.A.	E1 E2 E3 E4 E5 E6 E7 E8 E9 E10																
		3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	25	30	40	50	60	70	100
	CBR (%)																	
$E = 6,5 I^{0,65}$	E MN/m ²	13,28	16,00	18,50	20,83	23,03	25,11	27,14	29,03	37,79	45,56	52,67	59,30	71,69	82,85	93,05	102,86	122,67
$E = 3 I_{CBR}$	E MN/m ²	9,0	12,0	15,0	18,0	21,0	24,0	27,0	30,0	45,0	60,0	75,0	90,0	120,0	150,0	180,0	240,0	300,0
$K = 1,923 E$ ($\mu = 0,35$)	K MN/m ³	25,54	30,72	35,54	40,06	44,23	48,30	52,14	55,84	72,67	87,82	101,29	114,04	137,48	158,94	178,94	197,40	243,41
$K = 2,222 E$ ($\mu = 0,50$)	K MN/m ³	29,51	35,56	41,11	46,25	51,48	57,77	64,51	71,90	83,98	101,29	117,04	131,78	158,87	183,67	206,78	228,58	288,20
$K = 13,4 I^{0,65}$	K MN/m ³	27,37	32,99	38,14	42,94	47,67	52,33	56,91	61,41	77,90	93,92	108,52	122,25	147,38	170,39	191,82	212,04	267,37

FIG. XII.9 - Correlazione fra i vari parametri caratterizzanti la portanza di un terreno di sottofondo.

I materiali

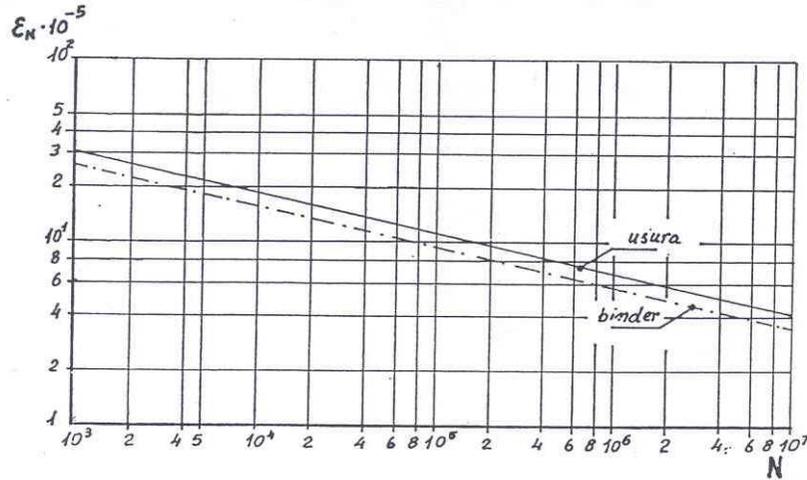


FIG. VII.10 - Legge che lega ϵ_N con il numero N dei cicli di carico per pervenire alla rottura (Verstraeten).

$$\epsilon_N = D \cdot N^{-\alpha}$$

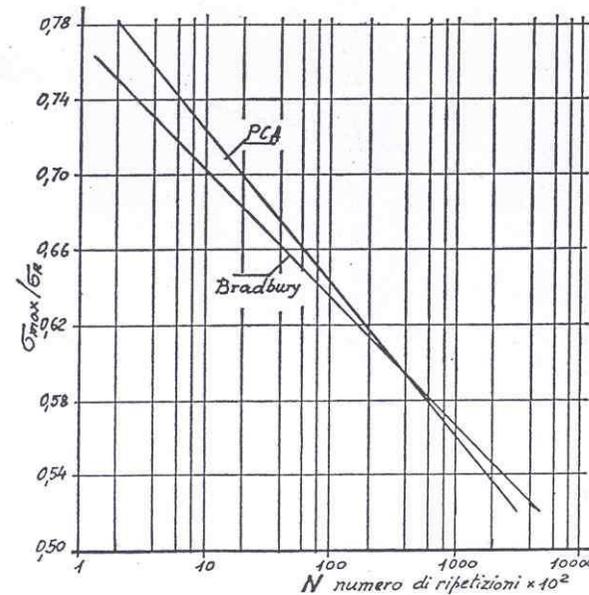


FIG. XI.7 - Curve di fatica del calcestruzzo: relazione fra σ_{max}/σ_R in funzione del numero di ripetizioni fino a rottura secondo le ricerche di Bradbury e le esperienze della PCA.

$$\frac{\sigma_{max}}{\sigma_{Rot.}} = 0,9715 - 0,0824 \cdot \log(N)$$

I fattori climatici

TEMPERATURA (valori, variazioni stagionali, giornaliere)

PERCENTUALE ACQUA NEL TERRENO

GELO (profondità)

L'entità dei carichi



N_i = ripetizioni di carico dell'aereo i-esimo che porta al collasso della pavimentazione

n_i = ripetizioni reali di carico dell'aereo i-esimo

N_s = ripetizioni di carico dell'aereo di riferimento che porta al collasso della pavimentazione

n_s = ripetizioni reali di carico dell'aereo di riferimento che porta allo stesso danno della mix di traffico

$$N_i = A \cdot \varepsilon_i^{-\alpha} \quad d_i \cdot N_i = d_s \cdot N_s \quad \frac{d_i}{d_s} = \frac{N_s}{N_i} = F_i \quad D = \sum_{i=1}^k D_i = \sum_{i=1}^k n_i \cdot d_i = \sum_{i=1}^k n_i \cdot d_s \cdot F_i$$

$$N_s = A \cdot \varepsilon_s^{-\alpha}$$

$$n_s = \frac{D}{d_s} = \sum_{i=1}^k n_i \cdot F_i \quad n_s = \sum_{i=1}^k n_i \cdot \frac{N_s}{N_i} = N_s \cdot \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} \quad \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = 1$$

La diversità dei carrelli (1)



$$l = \sqrt[4]{\frac{E \cdot h^3}{12 \cdot (1 - \nu^2) \cdot K}}$$

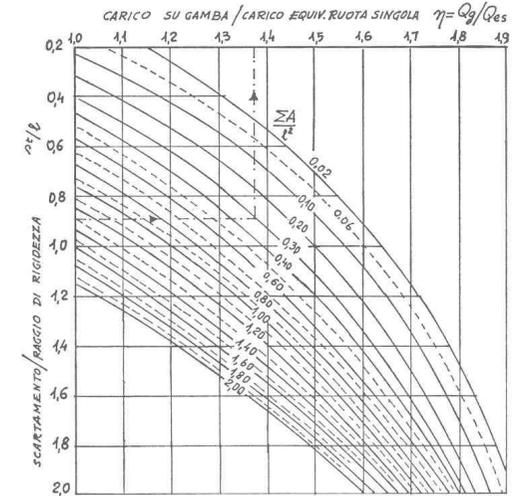
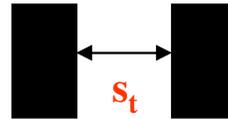


Fig. XIII.6 - Determinazione del carico equivalente su ruota singola per ruote gemelle (pavimentazione rigida).

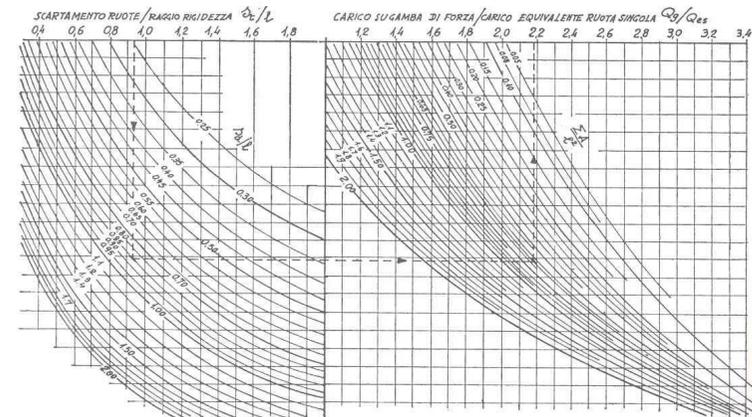
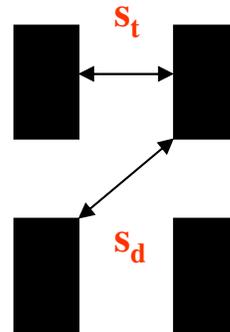


Fig. XIII.7 - Determinazione del carico equivalente su ruota singola per gamba di forza con ruote doppio tandem (pavimentazione rigida).

La diversità dei carrelli (2)

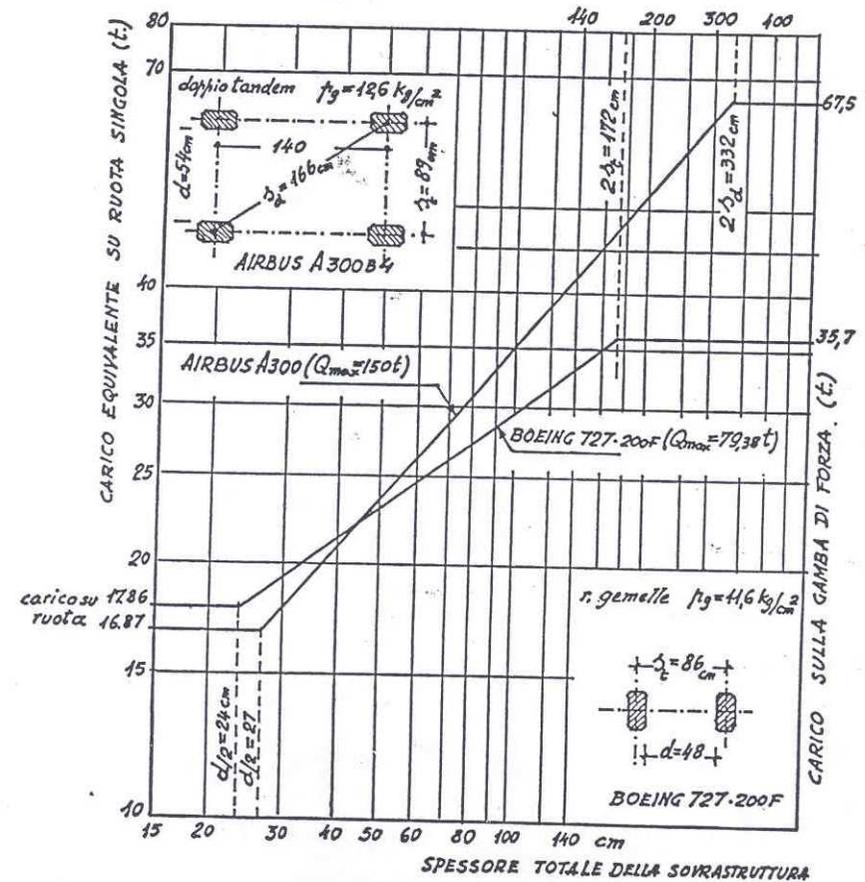
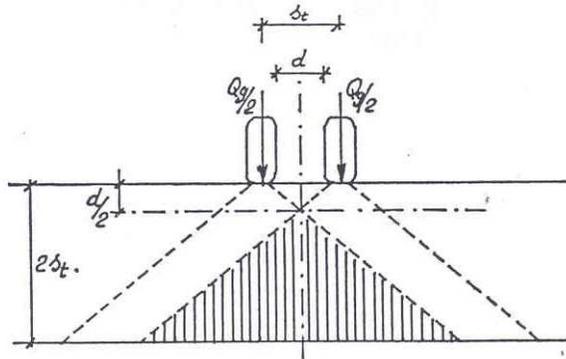
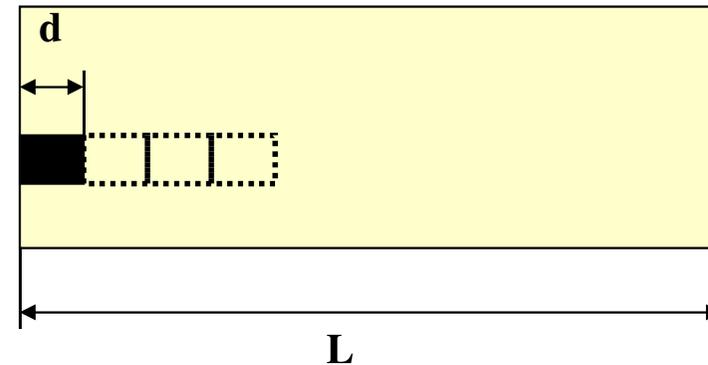
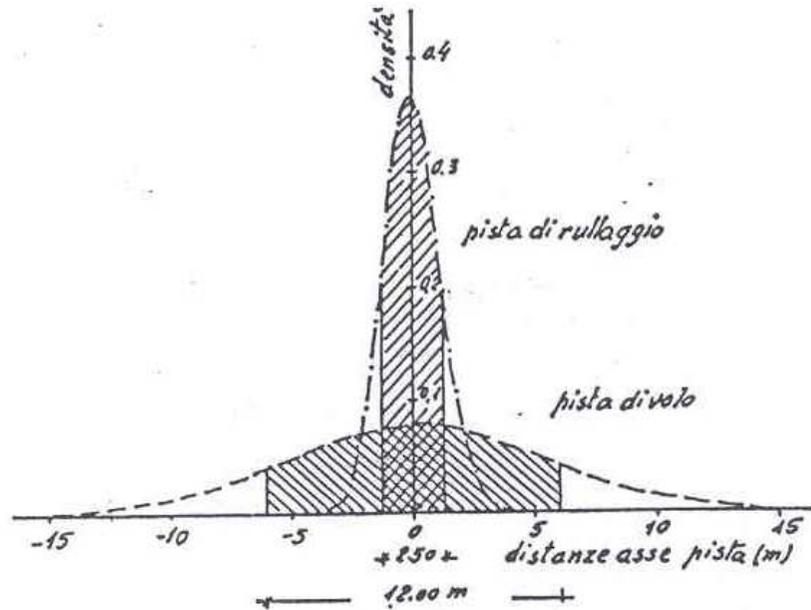


Fig. XIII.9 - Determinazione del carico equivalente su ruota singola nel caso di sovrastrutture flessibili per ruote gemelle e doppio tandem.

La dispersione della traiettorie



$$C = N \cdot \frac{t \cdot n \cdot d}{100 \cdot L}$$

C = numero ricoprimenti (coperture)

N = numero operazioni

t = percentuale di traffico che interessa **L**

n = numero di ruote affiancate per carrello

d = larghezza area di contatto della ruota

L = larghezza striscia interessata dal traffico "t"

I metodi di dimensionamento

METODI EMPIRICI: basati su dati sperimentali;

METODI SEMIEMPIRICI: nei quali i dati sperimentali corretti con interpretazioni teoriche;

METODI ANALITICI (RAZIONALI): hanno seguito un impostazione teorica validata da risultati sperimentali;

METODI PER PAVIMENTAZIONI FLESSIBILI

METODI PER PAVIMENTAZIONI RIGIDE

Metodi empirici basati su classificazioni

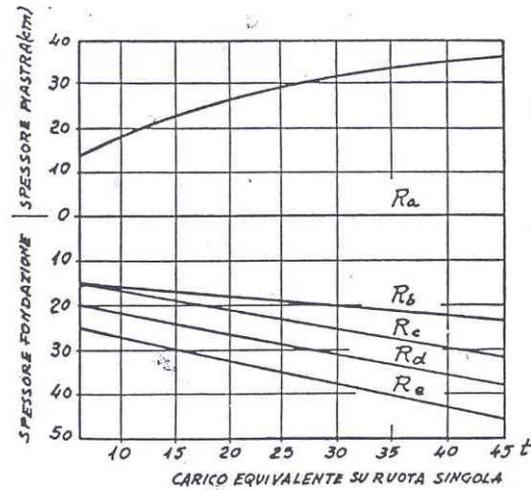


FIG. XV.11 - Metodo FAA per la determinazione dello spessore di una piastra rigida e della relativa fondazione in funzione del carico equivalente su ruota singola e della classe del terreno di sottofondo (zona critica).

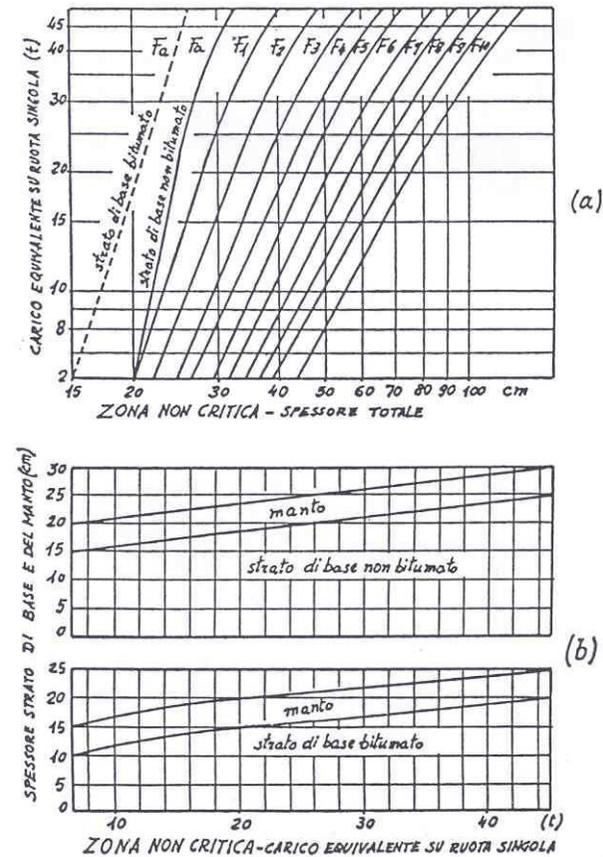


FIG. XVI.2 - Metodo FAA per sovrastrutture flessibili in zona critica: a) determinazione dello spessore totale; b) determinazione dello spessore dello strato di base (bitumato e non) e del manto.

Metodo CBR

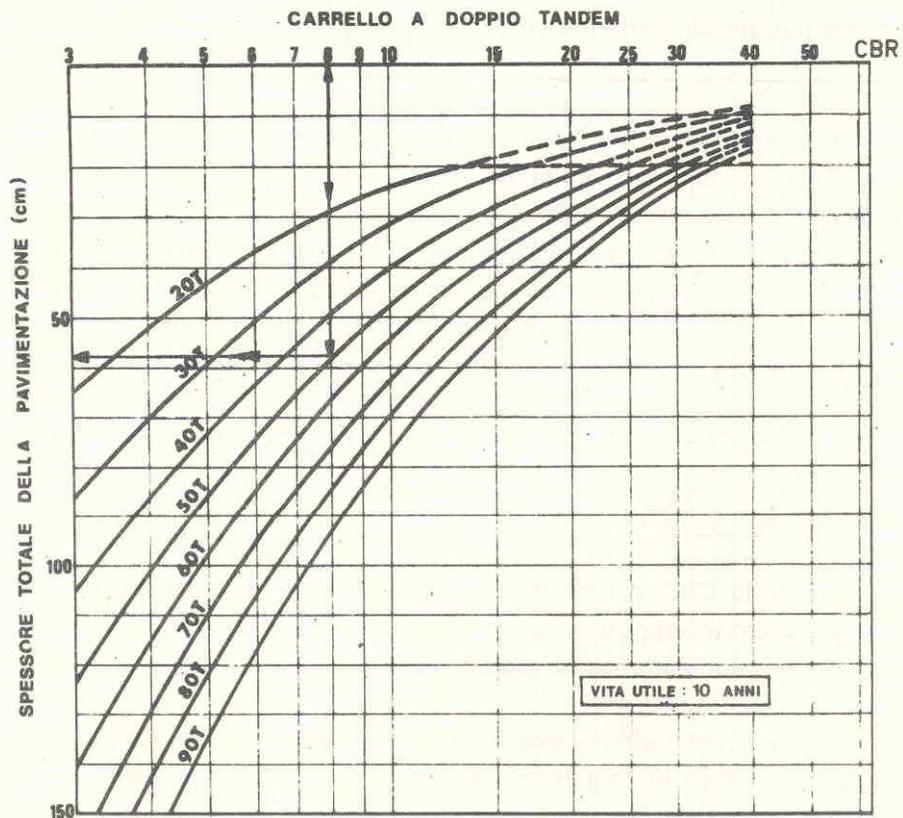


Fig. IV.7. - Carta di progetto per pavimentazione flessibile e gamba di forza con ruote a doppio tandem (metodo CBR) [85].

RUOTA SINGOLA

Pressione pneumatici = 6 kg/cm²

RUOTE GEMELLE

Pressione pneumatici = 9 kg/cm²

Interasse ruote = 0,70 m

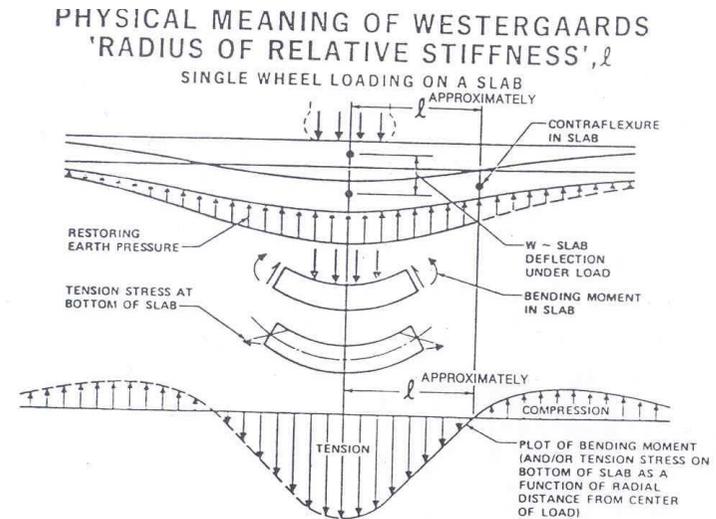
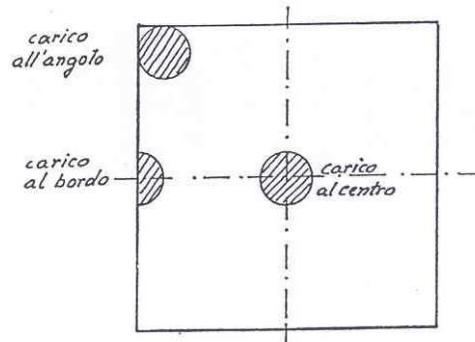
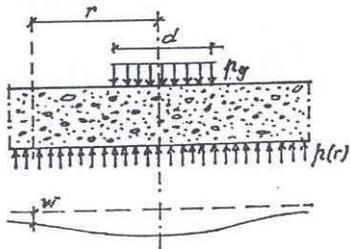
RUOTE DOPPIO TANDEM

Pressione ruote = 12 kg/cm²

Interasse longitudinale = 1,4 m

Interasse trasversale = 0,75 m

Teoria del Westergaard



$$q(r) = p_g(r) - p(r) = p_g(r) - K \cdot w(r)$$

$$D \cdot \Delta^2 w(z) = q(r)$$

$$D = \frac{E \cdot s^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)}$$

$$\Delta^2 w(z) = \left(\frac{d^2 w}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{dw}{dr} \right)^2$$

$$\sigma = \frac{0,316}{s^2} \cdot p_g \left[4 \cdot \log \frac{l}{b} + 1,069 \right]$$

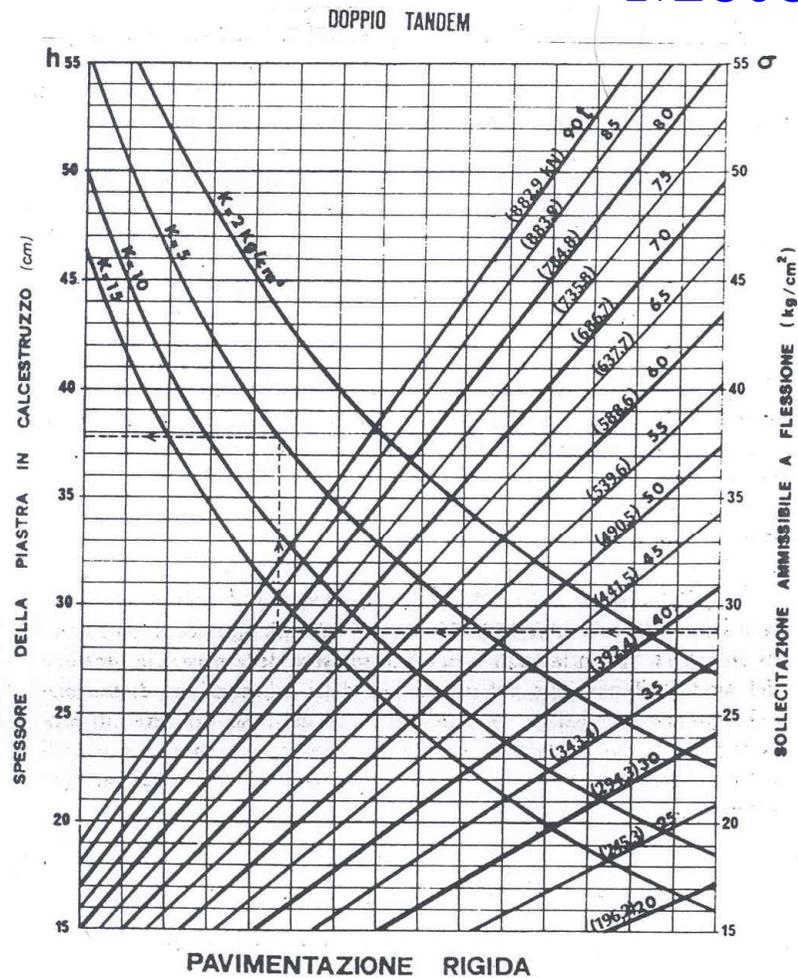
$$l = \sqrt[4]{\frac{E \cdot s^3}{12 \cdot (1 - \nu^2) \cdot K}}$$

$$b = \sqrt{1,6 \cdot a^2 + s^2} - 0,675 \cdot s$$

Raggio rigidezza

Raggio fittizio

Metodo PCA



$$\sigma_{amm} = c \cdot \sigma_{Rot.}$$

σ_c/σ_R	N_i	σ_c/σ_R	N_i
0,51	400.000	0,63	14.000
0,52	300.000	0,64	11.000
0,53	240.000	0,65	8.000
0,54	180.000	0,66	6.000
0,55	130.000	0,67	4.500
0,56	100.000	0,68	3.500
0,57	75.000	0,69	2.500
0,58	57.000	0,70	2.000
0,59	42.000	0,71	1.500
0,60	32.000	0,72	1.100
0,61	24.000	0,73	850
0,62	18.000	0,74	650

Fig. V.17. - Carta di progetto P.C.A. per pavimentazioni rigide, relativa al caso di doppio tandem [85].

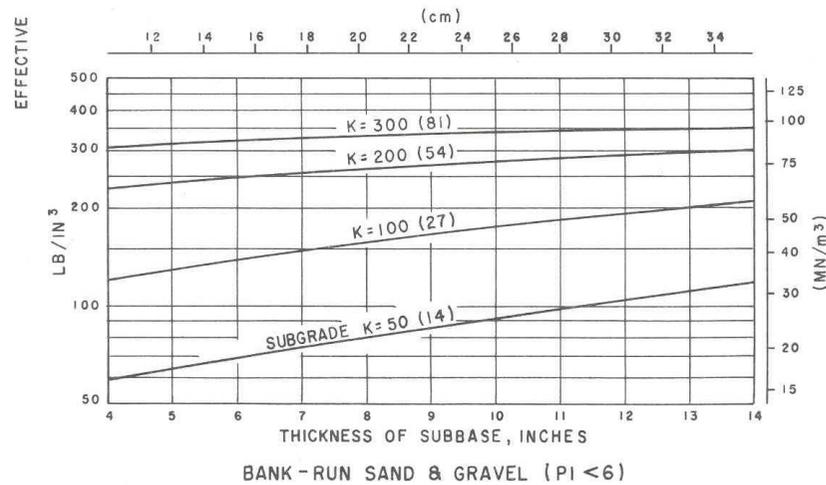
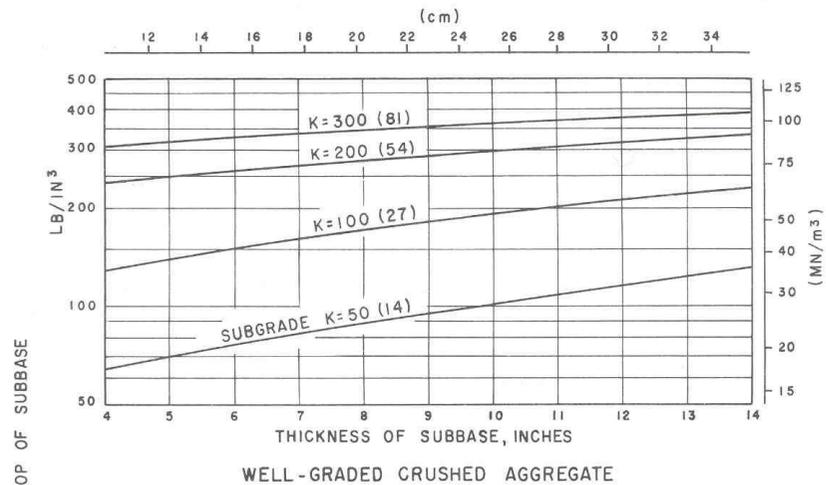
Metodo FAA (1)

CIRCOLARE FAA 150/5320-6e (ultima versione)

Programma di dimensionamento delle pavimentazioni nell'ultima versione della norma FAARFIELD

Major Divisions (1)	Letter (2)	Name (3)	Value as Foundation Subject to Frost Action (5)	Value as Base Directly under Wearing Surface (6)	Potential Frost Action (7)	Compressibility and Expansion (8)	Drainage Characteristics (9)	Compaction Equipment (10)	Unit Dry Weight lb/ft ³ (11)	Field CBR (12)	Subgrade Modulus & lb/in ² (13)	
Coarse-grained soils	Gravel and gravelly soils	GW	Gravel or sandy gravel, well graded	Excellent	Good	None to very slight	Almost none	Excellent	Crawler-type tractor, rubber-tired equipment, steel-wheeled roller	125-140	60-80	300 or more
		GP	Gravel or sandy gravel, poorly graded	Good to excellent	Poor to fair	None to very slight	Almost none	Excellent	Crawler-type tractor, rubber-tired equipment, steel-wheeled roller	120-130	35-60	300 or more
		GU	Gravel or sandy gravel, uniformly graded	Good	Poor	None to very slight	Almost none	Excellent	Crawler-type tractor, rubber-tired equipment	115-125	25-50	300 or more
		GM	Silty gravel or silty sandy gravel	Good to excellent	Fair to good	Slight to medium	Very slight	Fair to poor	Rubber-tired equipment, sheepsfoot roller, close control of moisture	130-145	40-80	300 or more
	GC	Clayey gravel or clayey sandy gravel	Good	Poor	Slight to medium	Slight	Poor to practically impervious	Rubber-tired equipment, sheepsfoot roller	120-140	20-40	200-300	
	Sand and sandy soils	SW	Sand or gravelly sand, well graded	Good	Poor	None to very slight	Almost none	Excellent	Crawler-type tractor, rubber-tired equipment	110-130	20-40	200-300
		SP	Sand or gravelly sand, poorly graded	Fair to good	Poor to not suitable	None to very slight	Almost none	Excellent	Crawler-type tractor, rubber-tired equipment	105-120	15-25	200-300
		SU	Sand or gravelly sand, uniformly graded	Fair to good	Not suitable	None to very slight	Almost none	Excellent	Crawler-type tractor, rubber-tired equipment	100-115	10-20	200-300
		SM	Silty sand or silty gravelly sand	Good	Poor	Slight to high	Very slight	Fair to poor	Rubber-tired equipment, sheepsfoot roller, close control of moisture	120-135	20-40	200-300
		SC	Clayey sand or clayey gravelly sand	Fair to good	Not suitable	Slight to high	Slight to medium	Poor to practically impervious	Rubber-tired equipment, sheepsfoot roller	105-130	10-20	200-300
Fine-grained soils		Low compressibility LL < 50	ML	Silts, sandy silts, gravelly silts, or diatomaceous soils	Fair to poor	Not suitable	Medium to very high	Slight to medium	Fair to poor	Rubber-tired equipment, sheepsfoot roller, close control of moisture	100-125	5-15
	CL		Lean clays, sandy clays, or gravelly clays	Fair to poor	Not suitable	Medium to high	Medium	Practically impervious	Rubber-tired equipment, sheepsfoot roller	100-125	5-15	100-200
	OL		Organic silts or lean organic clays	Poor	Not suitable	Medium to high	Medium to high	Poor	Rubber-tired equipment, sheepsfoot roller	90-105	4-8	100-200
	High compressibility LL > 50	MH	Micaceous clays or diatomaceous soils	Poor	Not suitable	Medium to very high	High	Fair to poor	Rubber-tired equipment, sheepsfoot roller	80-100	4-8	100-200
		CH	Fat clays	Poor to very poor	Not suitable	Medium	High	Practically impervious	Rubber-tired equipment, sheepsfoot roller	90-110	3-5	50-100
OH	Fat organic clays	Poor to very poor	Not suitable	Medium	High	Practically impervious	Rubber-tired equipment, sheepsfoot roller	80-105	3-5	50-100		
Peat and other fibrous organic soils	Pt	Peat, humus, and other	Not suitable	Not suitable	Slight	Very high	Fair to poor	Compaction not practical				

Metodo FAA (2)



Metodo FAA (3)

TABLE 1. SINGLE WHEEL ASSEMBLY

Gross Weight		Tire Pressure	
lbs.	(kg)	psi	(MN/m ²)
30,000	(13 600)	75	(0.52)
45,000	(20400)	90	(0.62)
60,000	(27 200)	105	(0.72)
75,000	(34 000)	120	(0.83)

TABLE 2. DUAL WHEEL ASSEMBLY

Gross Weight		Tire Pressure		Dual Spacing	
lbs.	(kg)	psi	(MN/m ²)	in.	(mm)
50,000	(22 700)	80	(0.55)	20	(51)
75,000	(34 000)	110	(0.76)	21	(53)
100,000	(45 400)	140	(0.97)	23	(58)
150,000	(68 000)	160	(1.10)	30	(76)
200,000	(90700)	200	(1.38)	34	(86)

TABLE 3. DUAL TANDEM ASSEMBLY

Gross Weight		Tire Pressure		Dual Spacing		Tandem Spacing	
lbs.	(kg)	psi	(MN/m ²)	in.	(mm)	in.	(mm)
100,000	(45 400)	120	(0.83)	20	(51)	45	(114)
150,000	(68 000)	140	(0.97)	20	(51)	45	(114)
200,000	(90700)	160	(1.10)	21	(53)	46	(117)
300,000	(136 100)	180	(1.24)	26	(66)	51	(130)
400,000	(181 400)	200	(1.38)	30	(76)	55	(140)

Metodo FAA (4)

To Convert From	To	Multiply Departures by
single wheel	dual wheel	0.8
single wheel	dual tandem	0.5
dual wheel	dual tandem	0.6
double dual tandem	dual tandem	1.0
dual tandem	single wheel	2.0
dual tandem	dual wheel	1.7
dual wheel	single wheel	1.3
double dual tandem	dual wheel	1.7

$$\log N_1 = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{0,5} \cdot \log N_2$$

N1 = numero di partenze annue dell'aereo di progetto

N2 = numero di partenze annue dell'aereo considerato già omogenizzato per carrello

P1 = carico per ruota dell'aereo di progetto

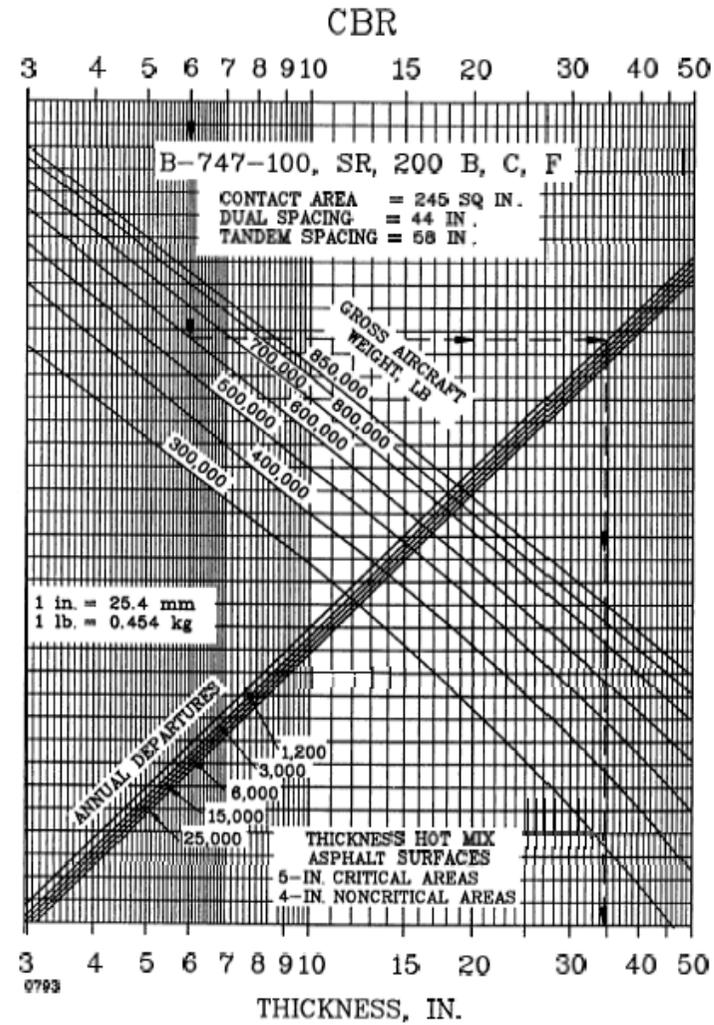
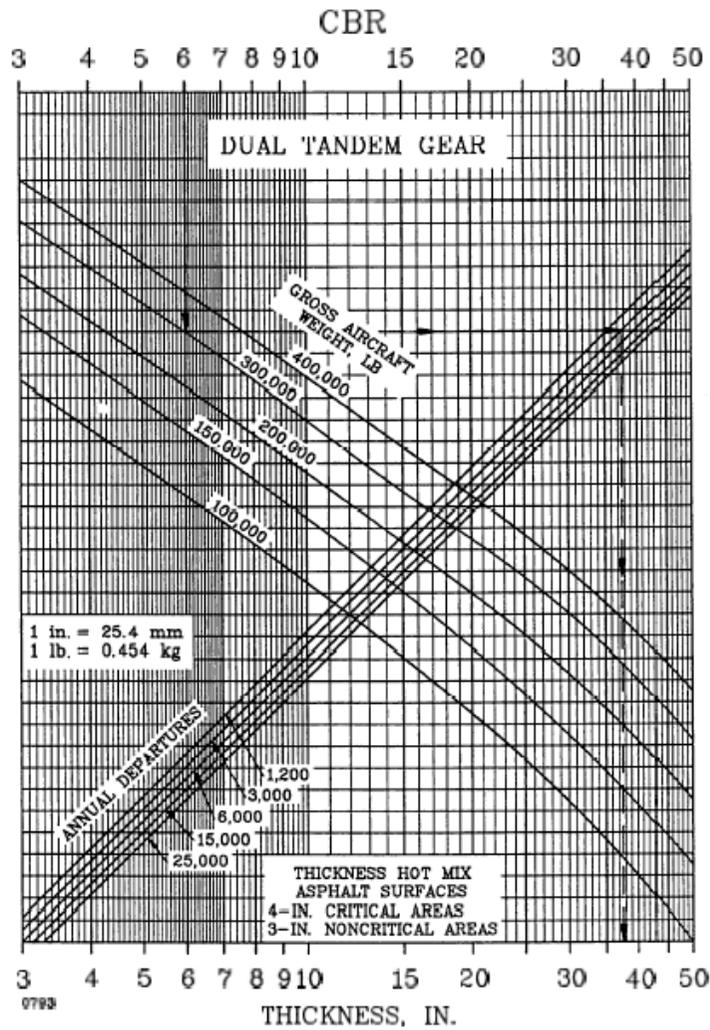
P2 = carico su ruota per l'aereo considerato

Metodo FAA (5)

Aircraft	Gear Type	Average Annual Departures	Maximum Takeoff Weight lbs.	(kg)
727-100	dual	3,760	160,000	(72600)
727-200	dual	9,080	190,500	(86500)
707-320B	dual tandem	3,050	327,000	(148 500)
DC-g-30	dual	5,800	108,000	(49 000)
cv-880	dual tandem	400	184,500	(83 948)
737-200	dual	2,650	115,500	(52 440)
L-101 1-100	dual tandem	1,710	450,000	(204 120)
747-100	double dual tandem	85	700,000	(3 17 800)

Aircraft	Equi. Dual Gear Departs.	Wheel Load lbs.	(kg)	Wheel Load of Design Aircraft lbs.	(kg)	Equi. Annual Departs Design Aircraft
727-100	3,760	38,000	(17 240)	45,240	(20 520)	1,891
727-200	9,080	45,240	(20 520)	45,240	(20 520)	9,080
707-320B	5,185	38,830	(17 610)	45,240	(20 520)	2,764
DC-g-30	5,800	25,650	(11 630)	45,240	(20 520)	682
cv-880	680	21,910	(9 940)	45,240	(20 520)	94
737-200	2,650	27,430	(12,440)	45,240	(20 520)	463
747	145	35,625'	(16 160)	45,240	(20520)	83
L-101 1	2,907	35,625'	(16 160)	45,240	(20,520)	1,184
Total = 16,241						

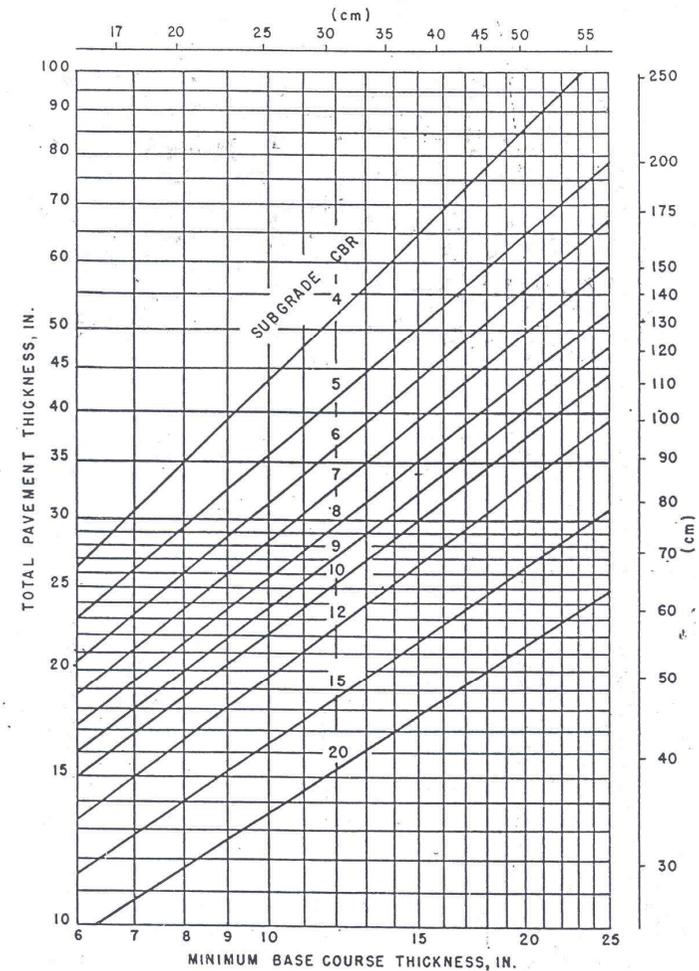
Metodo FAA (6)



Metodo FAA (7)

TABLE 3-4. MINIMUM BASE COURSE THICKNESS

Design Aircraft	Design Load Range		Minimum Base Course Thickness	
	lbs.	(kg)	in.	(mm)
Single Wheel	30,000 - 50,000	(13600 - 22 700)	4	(100)
	50,000 - 75,000	(22700 - 34 000)	6	(150)
Dual Wheel	50,000 - 100,000	(22700 - 45 000)	6	(150)
	100,000 - 200,000	(45 000 - 90 700)	8	(200)
Dual Tandem	100,000 - 250,000	(45 000 - 113 400)	6	(150)
	250,000 - 400,000	(113400 - 181 000)	8	(200)
757 767	200,000 - 400,000	(90700 - 181000)	6	(150)
DC-10 L1011	400,000 - 600,000	(181 000 - 272000)	8	(200)
	600,000 - 850,000	(272 000 - 385 700)	8	(200)
B-747	400,000 - 600,000	(181 000 - 272000)	6	(150)
	600,000 - 850,000	(272 000 - 385 700)	8	(200)
c-130	75,000 - 125,000	(34 000 - 56 700)	4	(100)
	125,000 - 175,000	(56700 - 79 400)	6	(150)



Chap 3 FIGURE 3-12. MINIMUM BASE COURSE THICKNESS REQUIREMENTS

Metodo FAA (8)

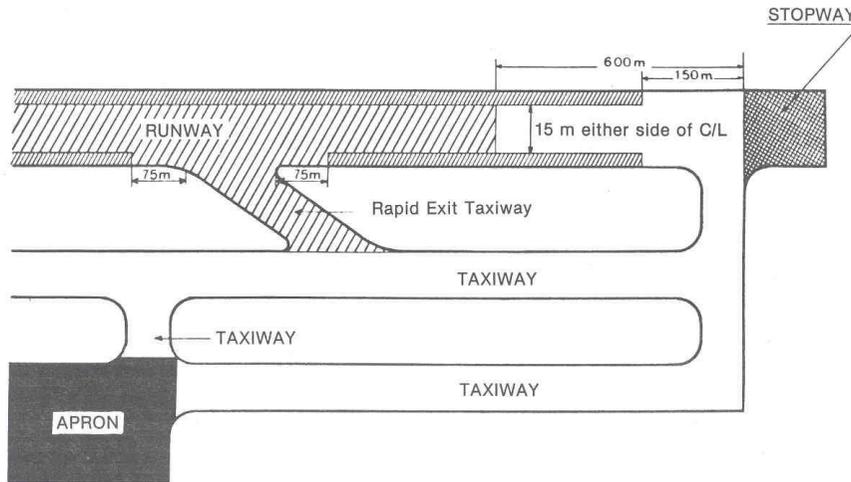
Table 4-9. Recommended equivalency factor range stabilized sub-base

<u>Material</u>	<u>Equivalency factor range</u>
Bimuminous surface course	1.7-2.3
Bituminous base course	1.7-2.3
Cold laid bituminous base course	1.5-1.7
Mixed in-place base course	1.5-1.7
Cement treated base course	1.6-2.3
Soil cement base course	1.5-2.0
Crushed aggregate base course	1.4-2.0
Gravel sub-base course	1.0

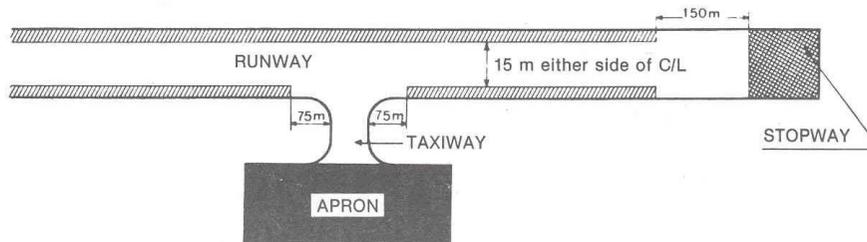
Table 4-10. Recommended equivalency factor range stabilized base

<u>Material</u>	<u>Equivalency factor range</u>
Bituminous surface course	1.2-1.6
Bituminous base course	1.2-1.6
Cold laid bituminous base course	1.0-1.2
Mixed in-place base course	1.0-1.2
Cement treated base course	1.2-1.6
Soil cement base course	N/A
Crushed aggregate base course	1.0
Sub-base course	N/A

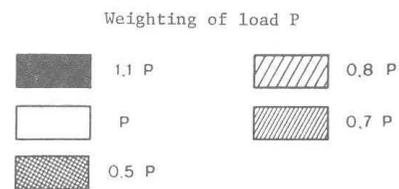
Metodo FAA (9)



a) Example of a runway equipped with a parallel taxiway



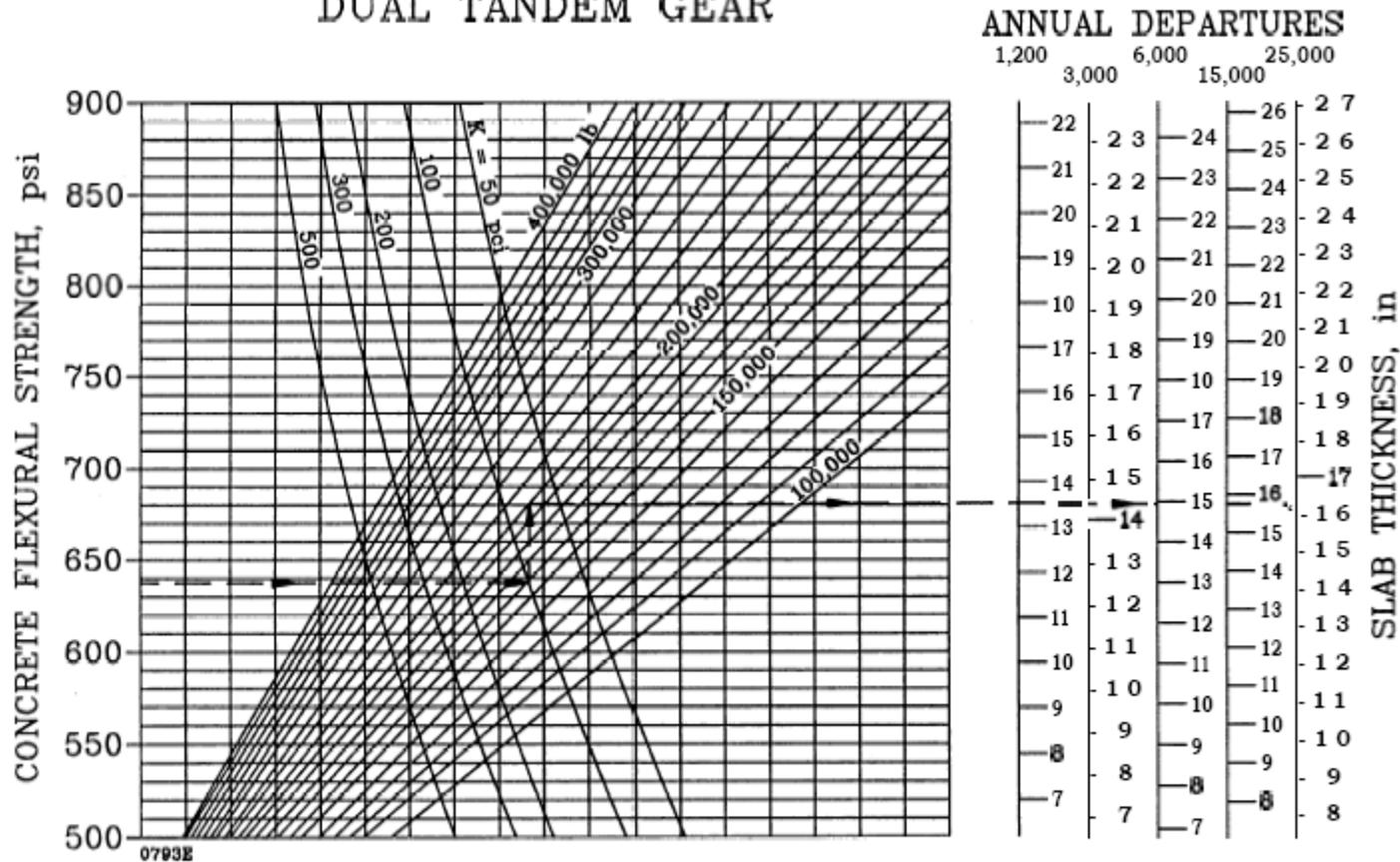
b) Example of a runway not equipped with a parallel taxiway



Annual Departure Level	Percent of 25,000 Departure Thickness
50,000	104
100,000	108
150,000	110
200,000	112

Metodo FAA (10)

DUAL TANDEM GEAR



NOTE:

1 inch = 25.4 mm
1 lb = 0.454 kg

1 psi = 0.0069 MN/m²
1 pci = 0.272 MN/m³

Metodo FAA (11)

TABLE 4. PASS-TO-COVERAGE RATIOS FOR RIGID PAVEMENTS

Design Curve	Pass-to-Coverage Ratio
Single Wheel	5.18
Dual Wheel	3.48
Dual Tandem	3.68
A-300 Model B2	3.5 1
A-300 Model B4	3.45
B-747	3.70
B-757	3.88
B-767	3.90
c-130	4.15
DC 10-10	3.64
DC 10-30	3.38
L-101 I	3.62

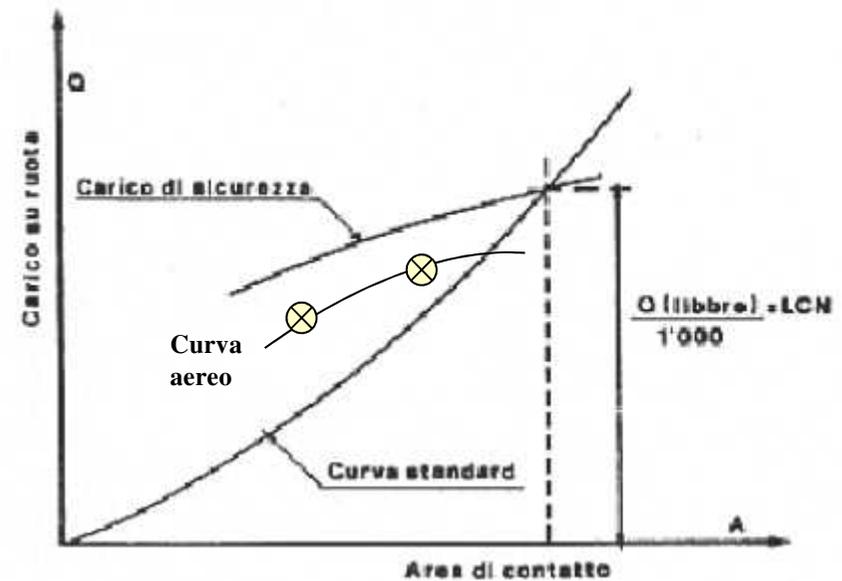
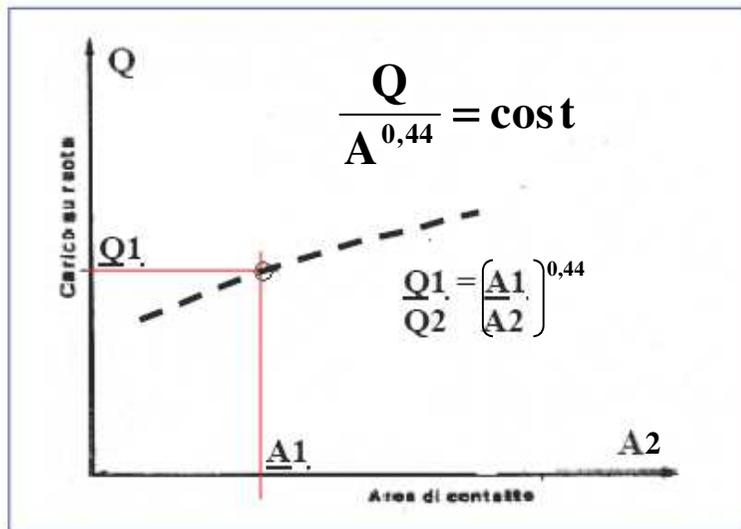
TABLE 5. PASS-TO-COVERAGE RATIOS FOR FLEXIBLE PAVEMENTS

Design Curve	Pass-to-Converge Ratio
Single Wheel	5.18
Dual Wheel	3.48
Dual Tandem	1.84
A-300 Model B2	1.76
A-300 Model B4	1.73
B-747	1.85
B-757	1.94
B-767	1.95
c-130	2.07
DC 10-10	1.82
DC IO-30	1.69
L-101 1	1.81

Metodo LCN (1)

LCN (Load Classification Number):

LCN(pav) > LCN(aereo)



Metodo ACN – PCN (1)

ACN (Aircraft Classification Number): numero che esprime l'effetto strutturale prodotto da un aereo con il suo carrello principale su differenti tipi di pavimentazione, per specifici valori di resistenza standard, in termini di carico per ruota singola gonfiata ad una pressione di 1,25 Mpa.

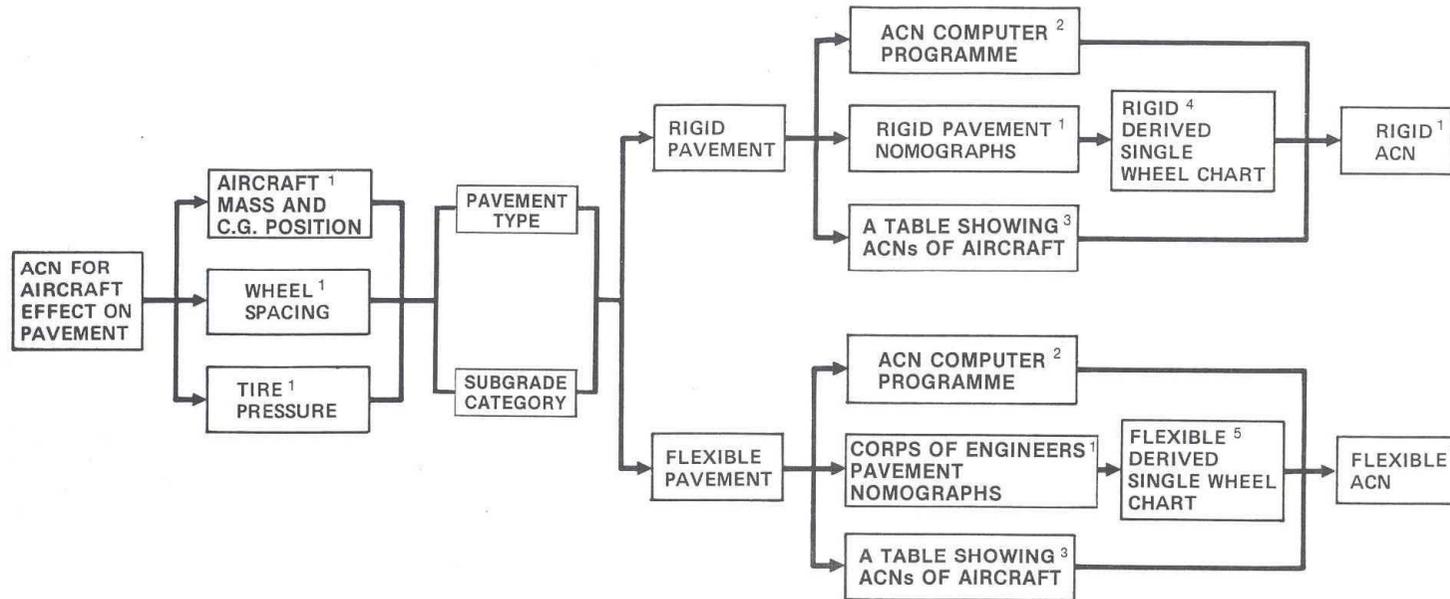
PCN (Pavement Classification Number): numero che esprime la relativa capacità di una pavimentazione a sopportare carichi, in termini di carico per ruota singola, gonfiata ad una pressione di 1,25 Mpa

Annesso 14 ICAO; Aerodrome design manual (part 3) Pavements

CIRCOLARE FAA 150/5335-5a (ultima versione)

Programma di dimensionamento delle pavimentazioni nell'ultima versione della norma COMFAA

Metodo ACN – PCN (2)



Relevant Documents

1. AIRPLANE CHARACTERISTICS FOR AIRPORT PLANNING (published by the aircraft manufacturer).
2. Appendix 2 of this manual.
3. Annex 14, Attachment B, Table B-1 and Appendix 5 of this manual
4. Figure 1-4 of this manual.
5. Figure 1-5 of this manual.

FLOW CHART

Metodo ACN – PCN (3)

L'ACN è definito come il doppio del carico su ruota singola (CRS), espresso in migliaia di kg, avente una pressione di gonfiaggio standard pari a 1,25 MPa, che richiede lo stesso spessore di pavimentazione di quello dell'aeromobile in esame.

Il modello di calcolo adottato per la determinazione del suddetto carico è:

per la pavimentazioni flessibili il metodo dell'USCE (United State Corps of Engineering) per 10.000 ricoprimenti;

per le pavimentazioni rigide il metodo del Westergaard rielaborato dalla PCA (portland Cement Association) con riferimento ad una sollecitazione di esercizio per il calcestruzzo di 2,75 MPa.

$$ACN = \frac{2 \cdot CRS}{1000}$$

Metodo ACN – PCN (4)

CLASSI DEL TERRENO DI SOTTOFONDO

CLASSE A (portanza alta)

P. R.: valore caratteristico della classe $K = 150 \text{ MN/m}^3$; limiti di classe $> 120 \text{ MN/m}^3$

P. F.: valore caratteristico della classe $\text{CBR} = 15$; limiti di classe > 13

CLASSE B (portanza media)

P. R.: valore caratteristico della classe $K = 80 \text{ MN/m}^3$; limiti di classe $60 - 120 \text{ MN/m}^3$

P. F.: valore caratteristico della classe $\text{CBR} = 10$; limiti di classe $8 - 13$

CLASSE C (portanza bassa)

P. R.: valore caratteristico della classe $K = 40 \text{ MN/m}^3$; limiti di classe $25 - 60 \text{ MN/m}^3$

P. F.: valore caratteristico della classe $\text{CBR} = 6$; limiti di classe $4 - 8$

CLASSE D (portanza molto bassa)

P. R.: valore caratteristico della classe $K = 20 \text{ MN/m}^3$; limiti di classe $< 25 \text{ MN/m}^3$

P. F.: valore caratteristico della classe $\text{CBR} = 3$; limiti di classe < 4

Metodo ACN – PCN (5)

Pressione dei pneumatici

Classe W “High” nessun limite di pressione > a 1,50 Mpa

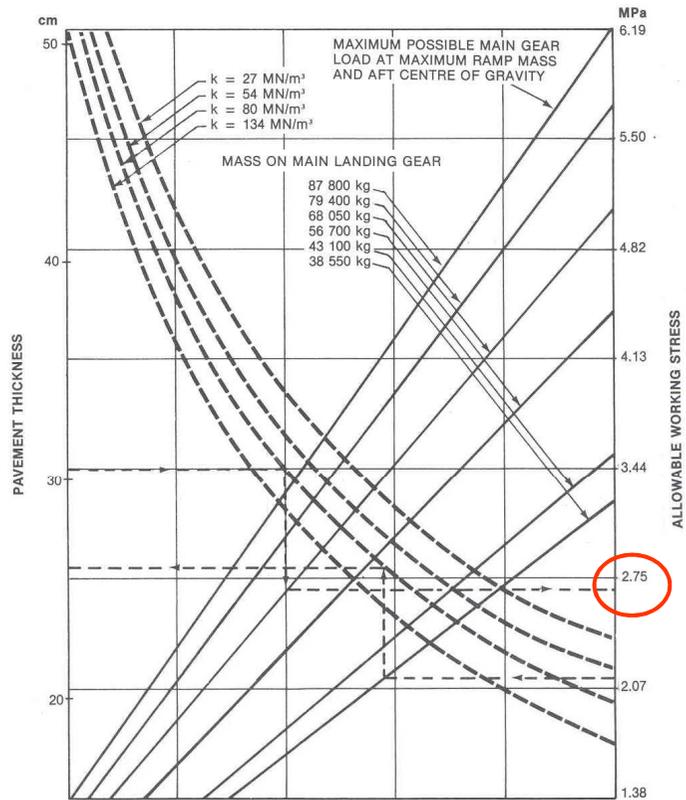
Classe X “Medium” pressione inferiore a 1,50 Mpa

Classe Y “Low” pressione inferiore a 1,0 Mpa

Classe Z “Very Low” pressione inferiore a 0,5 Mpa

Metodo ACN – PCN (6)

124.5 x 43.2 cm TIRES - TIRE PRESSURE CONSTANT AT 11.7 kg/cm²
 127 x 53.3 cm TIRES (NEW DESIGN) - TIRE PRESSURE CONSTANT AT 11.7 kg/cm²



NOTE: THE VALUES OBTAINED BY USING THE MAXIMUM LOAD REFERENCE LINE AND ANY VALUE OF k ARE EXACT. FOR LOADS LESS THAN MAXIMUM, THE CURVES ARE EXACT FOR k = 80 BUT DEVIATE SLIGHTLY FOR OTHER VALUES OF k.

REFERENCES:
 "DESIGN OF CONCRETE AIRPORT PAVEMENT" AND "COMPUTER PROGRAMME FOR AIRPORT PAVEMENT DESIGN - PROGRAMME PDILB."
 PORTLAND CEMENT ASSN.

RIGID PAVEMENT REQUIREMENTS—
 PORTLAND CEMENT ASSOCIATION DESIGN METHOD
 MODELS 727-100, -100C AT 77 200 kg; 727-200 STANDARD AT 78 500 kg,
 ADVANCED 727-200 AT 89 800 kg AND 95 300 kg MAXIMUM RAMP MASS.

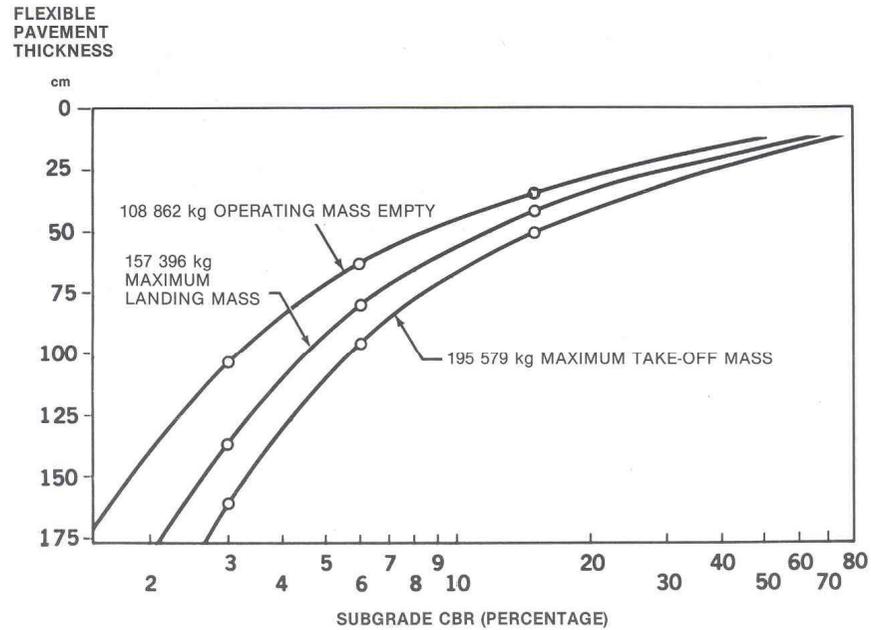
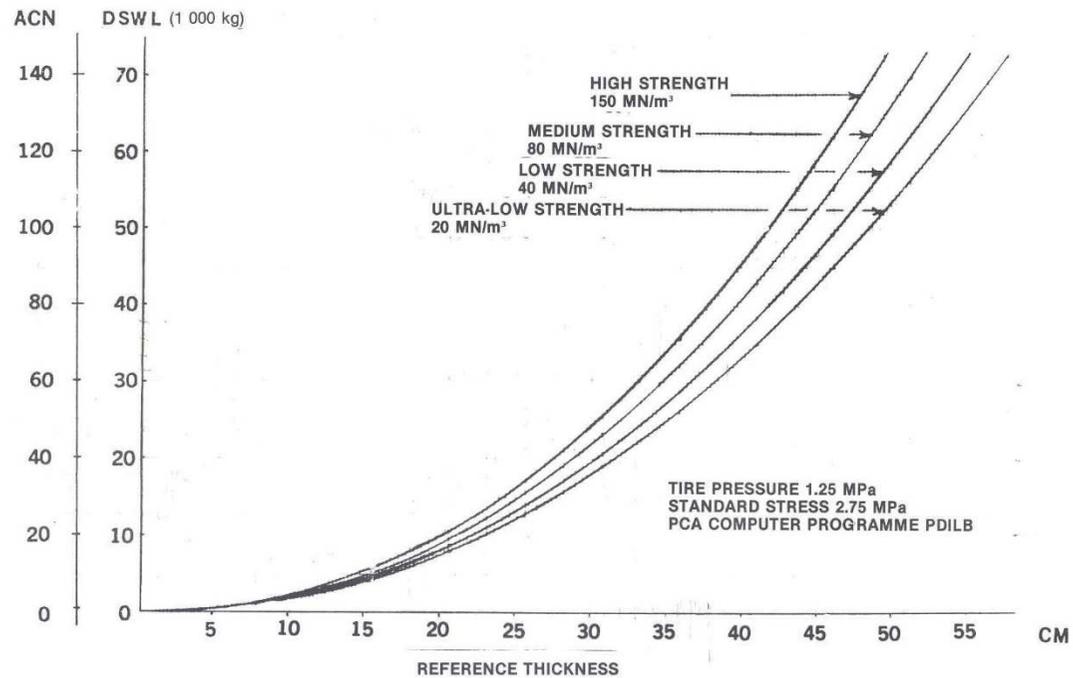
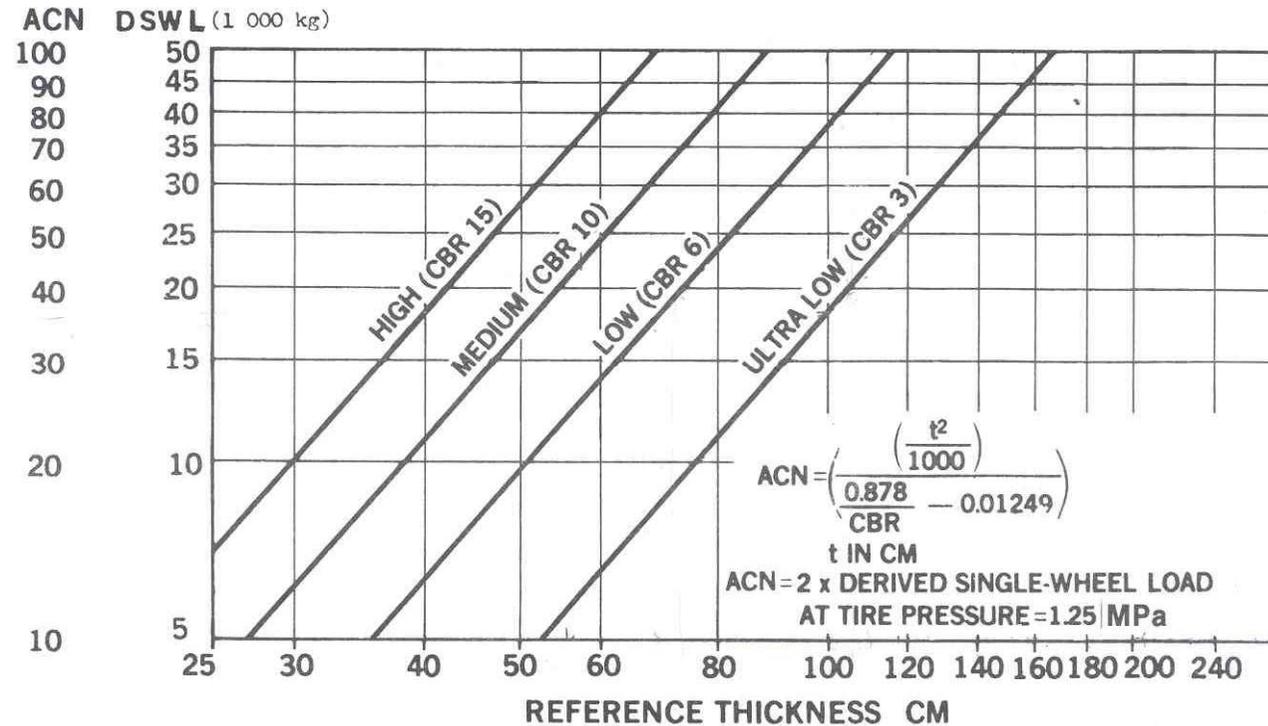


Figure 1-8. DC10-10 Flexible Pavement Requirements
 10 000 Coverages aft c.g.

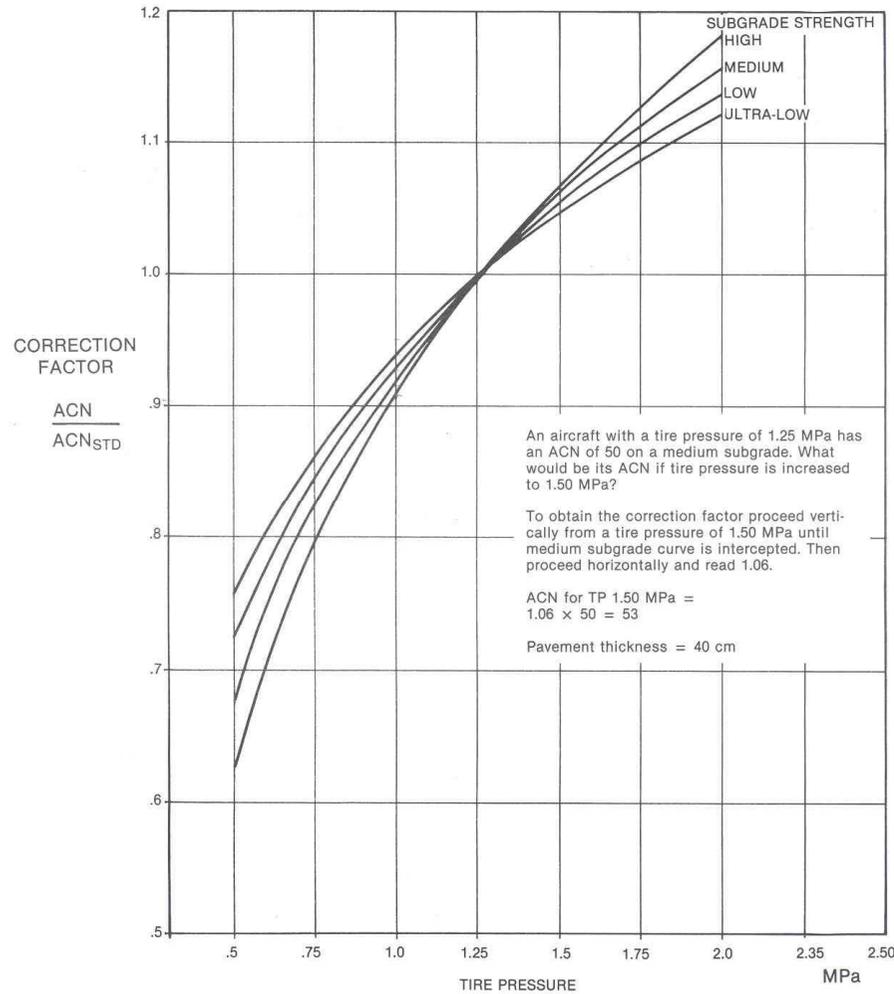
Metodo ACN – PCN (7)



Metodo ACN – PCN (8)



Metodo ACN – PCN (9)



$$ACN_R = ACN_{Max} \left[\frac{\frac{1}{C_1 \cdot CBR} - \frac{1}{C_2 \cdot P_R}}{\frac{1}{C_1 \cdot CBR} - \frac{1}{C_2 \cdot P_{Max}}} \right]$$

$$C1 = 0,5695$$

$$C2 = 32,035$$

Metodo ACN – PCN (10)

Table A5-1. ACNs for several aircraft types on rigid and flexible pavements

Aircraft type	All-up mass (kg)	Load on one main gear leg (%)	Tire pressure (MPa)	ACN FOR RIGID PAVEMENT SUBGRADES – MN/m ³ Ultra-				ACN FOR FLEXIBLE PAVEMENT SUBGRADES – CBR			
				High 150	Medium 80	Low 40	Low 20	High 15	Medium 10	Low 6	Very low 3
				1	2	3	4	5	6	7	8
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 Tandem	68 000 40 243	47.1	1.12	18 9	21 10	24 12	28 14	18 9	19 10	23 11	32 14

Metodo ACN – PCN (11)

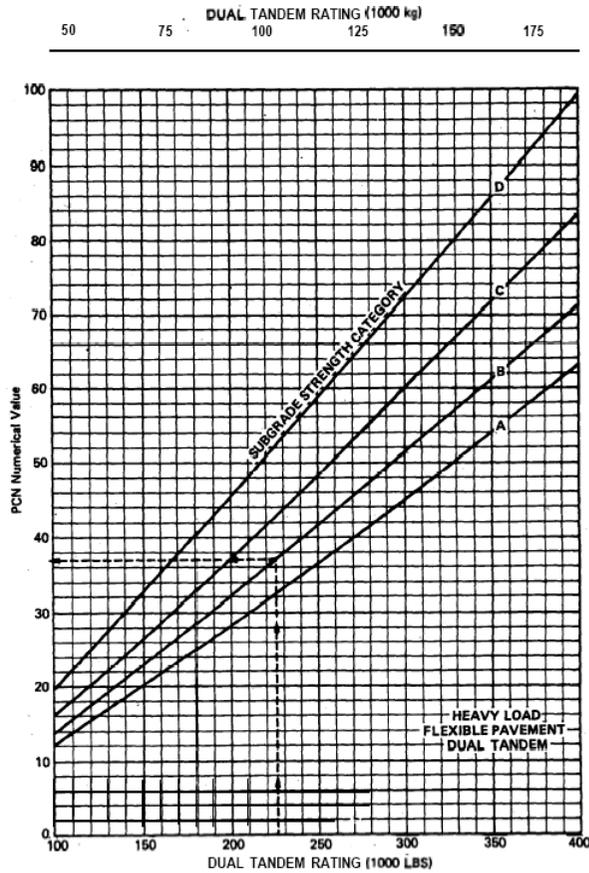


Figure 2-5. PCN Numerical Values for Dual-Tandem Load Rating--Heavy Load Flexible Pavement

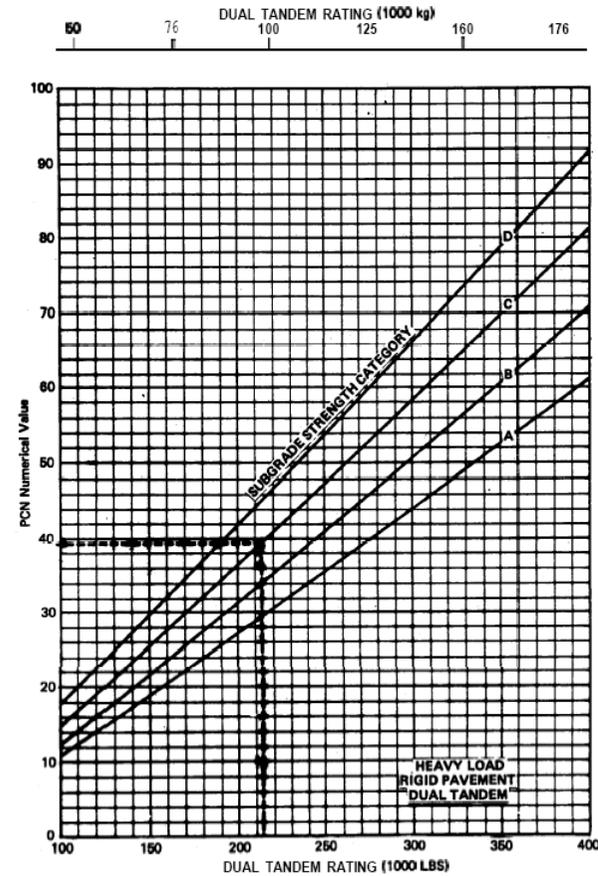
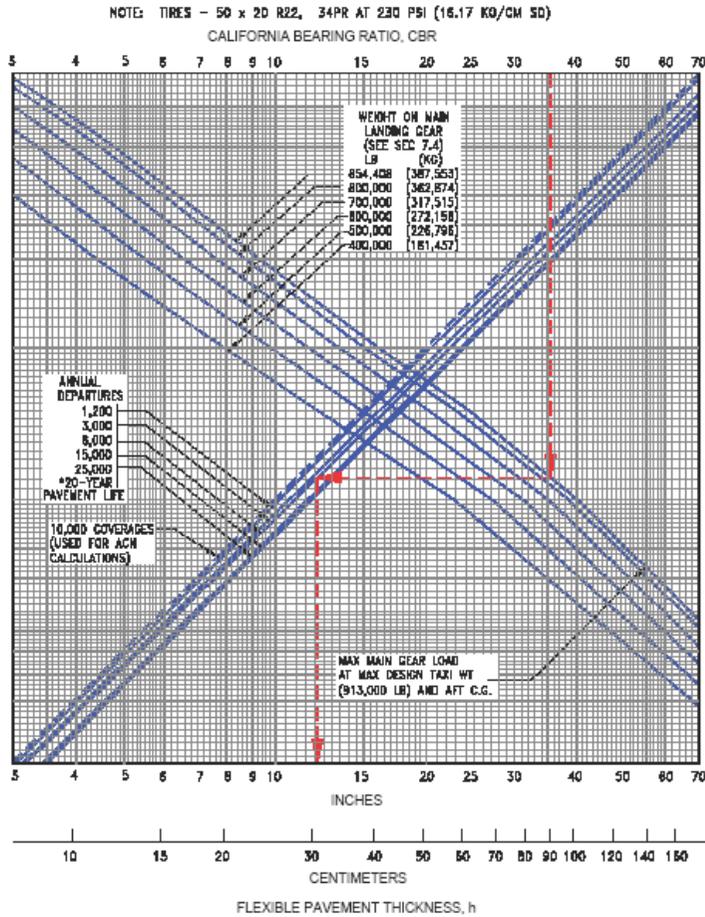


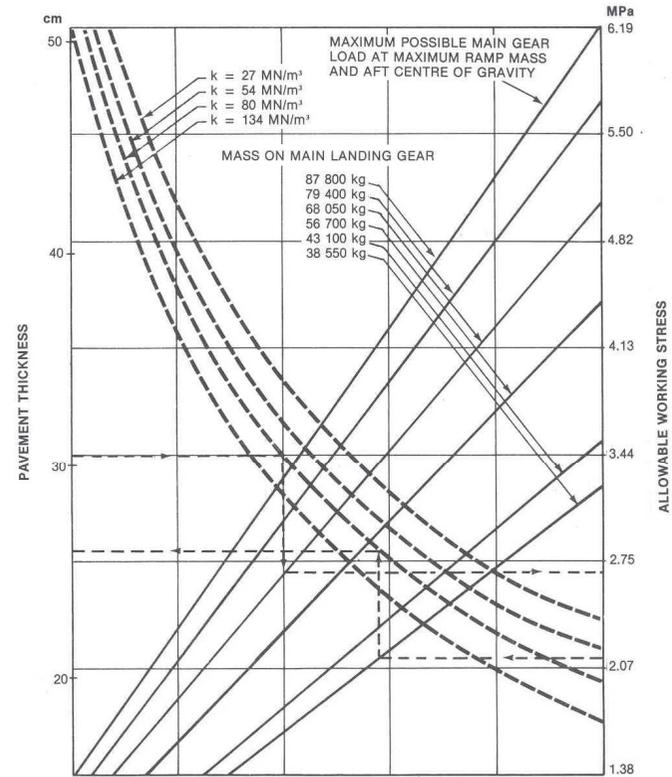
Figure 2-6. PCN Numerical Values for Dual-Tandem Load Rating--Heavy Load Rigid Pavement

Metodo ACN – PCN (12)



7.5.2 FLEXIBLE PAVEMENT REQUIREMENTS - U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS DESIGN METHOD (S-77-1)
MODEL 747-400ER, -400ER FREIGHTER

124.5 x 43.2 cm TIRES - TIRE PRESSURE CONSTANT AT 11.7 kg/cm²
127 x 53.3 cm TIRES (NEW DESIGN) - TIRE PRESSURE CONSTANT AT 11.7 kg/cm²



RIGID PAVEMENT REQUIREMENTS—
PORTLAND CEMENT ASSOCIATION DESIGN METHOD
MODELS 727-100, -100C AT 77 200 kg; 727-200 STANDARD AT 78 500 kg,
ADVANCED 727-200 AT 89 800 kg AND 95 300 kg MAXIMUM RAMP MASS.

Metodo ACN – PCN (13)

PCN 70 / R / C / W / U

Rigida (R) o Flessibile (F)

Portanza del sottofondo A, B, C, D

Pressione di gonfiaggio W, X, Y, Z

**Metodo di valutazione: tecnica
(T), funzione d'uso (U)**

Dati di progetto:

Esempio di calcolo

Caratteristiche del terren di sottofondo: CBR 15; $K = 5,13 \log(\text{CBR}) + 0,41$ [dN/cm³] (per CBR da 2 a 30) $K=26,67 \log(\text{CBR}) - 31,45$ (per CBR 30 -100)

Materiali: per la fondazione misto granulare CBR 30, misto di frantumazione CBR 80

Per la base conglomerati bituminosi oppure calcestruzzi con $\sigma_{rot} = 35 \text{ kg/cm}^2$ (rottura a 28 giorni)

Aereo	mix %	Mtow	carrello
MD 80	56	67 000 kg	ruote gemelle
ATR 42	32	14500	ruote gemelle
BAe146	12	44000	ruote gemelle

Numero di operazioni giornaliere 25 di cui il 50% di aerei commerciali.

PROGETTARE LE PAVIMENTAZIONI FLESSIBILI E RIGIDE, CALCOLARE GLI ACN DEGLI AEREI E I PCN DELL'AEROPORTO

Norma FAA file: 5320-6dp1/2/3/4/5. Pdf; 5320-6e. Pdf

Norma FAA file: 5335- 5-1/2. Pdf;