

**ITINERARIO RAGUSA-CATANIA**

Collegamento viario compreso tra lo Svincolo della S.S. 514 "di Chiaramonte" con la S.S. 115 e lo Svincolo della S.S. 194 "Ragusana"

**PROGETTO ESECUTIVO**

COD. **PA890**

PROGETTAZIONE: ATI SINTAGMA - GP INGEGNERIA - COOPROGETTI -GDG - ICARIA - OMNISERVICE

PROGETTISTA RESPONSABILE DELL'INTEGRAZIONE DELLE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE:

Dott. Ing. Nando Granieri

Ordine degli Ingegneri della Prov. di Perugia n° A351



IL GEOLOGO:

Dott. Geol. Giorgio Cerquiglini

Ordine dei Geologi della Regione Umbria n° 108

IL COORDINATORE PER LA SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE:

Dott. Ing. Filippo Pambianco

Ordine degli Ingegneri della Provincia di Perugia n° A1373

VISTO IL RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO

Dott. Ing. Luigi Mupo

IL GRUPPO DI PROGETTAZIONE:

MANDATARIA:



Dott. Ing. N.Granieri  
Dott. Ing. F.Durastanti  
Dott. Ing. V.Truffini  
Dott. Arch. A.Bracchini  
Dott. Ing. L.Nani

Dott. Ing. M.Abram  
Dott. Ing. F.Pambianco  
Dott. Ing. M.Briganti Botta  
Dott. Ing. L.Gagliardini  
Dott. Geol. G.Cerquiglini

MANDANTI:



Dott. Ing. G.Guiducci  
Dott. Ing. A.Signorelli  
Dott. Ing. E.Moscatelli  
Dott. Ing. A.Bela

Dott. Ing. G.Lucibello  
Dott. Arch. G.Guastella  
Dott. Geol. M.Leonardi  
Dott. Ing. G.Parente



Dott. Arch. E.A.E.Crimi  
Dott. Ing. M.Panfilì  
Dott. Arch. P.Ghirelli  
Dott. Ing. D.Pelle

Dott. Ing. L.Ragnacci  
Dott. Arch. A.Strati  
Archeol. M.G.Liseno



Dott. Ing. D.Carlaccini  
Dott. Ing. S.Sacconi  
Dott. Ing. C.Consorti

Dott. Ing. F.Aloe  
Dott. Ing. A.Salvemini



Dott. Ing. V.Rotisciani  
Dott. Ing. G.Pulli  
Dott. Ing. F.Macchioni

Dott. Ing. G.Verini Supplizi  
Dott. Ing. V.Piunno  
Geom. C.Sugaroni



Dott. Ing. P.Agnello

IL RESPONSABILE DI PROGETTO:  
ORDINE degli INGEGNERI



**PROGETTO INFRASTRUTTURA  
ELABORATI GENERALI**

Relazione di dimensionamento della pavimentazione stradale

CODICE PROGETTO		NOME FILE	REVISIONE	SCALA:	
PROGETTO	LIV. PROG.	N. PROG.			
L0408Z	E	2101			
		CODICE ELAB.			
		T00PS00TRARE05			
			B		-
B	Revisione a seguito istruttoria Anas		Set 2021	L. Rossetti	F. Durastanti N. Granieri
A	Emissione		Giu 2021	L. Rossetti	F. Durastanti N. Granieri
REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO

**INDICE**

<b>1</b>	<b>DIMENSIONAMENTO DEL PACCHETTO STRADALE.....</b>	<b>2</b>
1.1	DESCRIZIONE PACCHETTO STRADALE.....	2
1.2	VERIFICA DEL PACCHETTO STRADALE CON IL METODO RAZIONALE .....	2
1.2.1	Carichi di traffico.....	2
1.2.2	Verifica (metodo razionale) .....	4
<b>2</b>	<b>CONSIDERAZIONI SULLE DEFORMAZIONI PERMANENTI.....</b>	<b>13</b>
<b>3</b>	<b>CONSIDERAZIONI SUL RIUTILIZZO DEI MATERIALI DA DEMOLIZIONE DELA PAVIEMNTAZIONE STRADALE ESISTENTE.....</b>	<b>14</b>

## 1 DIMENSIONAMENTO DEL PACCHETTO STRADALE

### 1.1 DESCRIZIONE PACCHETTO STRADALE

Per la sovrastruttura della viabilità di progetto si è adottata una pavimentazione flessibile costituita dai seguenti strati:

- Fondazione in misto granulare stabilizzato con legante naturale – 20 cm.
- Sottobase in misto cementato – 18cm
- Strato di base in conglomerato bituminoso – 10 cm.
- Strato di collegamento (binder) in conglomerato bituminoso – 6 cm.
- Strato di usura in conglomerato bituminoso fonoassorbente – 4 cm.

### 1.2 VERIFICA DEL PACCHETTO STRADALE CON IL METODO RAZIONALE

#### 1.2.1 Carichi di traffico

Al fine di verificare la pavimentazione è necessario ricondurre i passaggi dei veicoli pesanti in passaggi di assi standard da 8,2t.

Dal catalogo delle pavimentazioni è possibile ottenere le categorie di veicoli e le percentuali riferite alla strada di progetto:

TIPO DI STRADA	TIPO VEICOLI															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1 Autostrada extraurbana	12,2	0	24,4	14,6	2,4	12,2	2,4	4,9	2,4	4,9	2,4	4,9	0,1	0	0	12,2
2 Autostrade urbane	18,2	18,2	16,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,6	18,2	27,3	0
3 Strade extraurbana principale e secondaria a forte traffico	0	13,1	39,5	10,5	7,9	2,6	2,6	2,5	2,6	2,5	2,6	2,6	0,5	0	0	10,5
4 Strade extraurbana secondaria ordinaria	0	0	58,8	29,4	0	5,9	0	2,8	0	0	0	0	0,2	0	0	2,9
5 Strade extraurbana secondaria turistiche	24,5	0	40,8	16,3	0	4,15	0	2	0	0	0	0	0,05	0	0	12,2
6 Strade urbane di scorrimento	18,2	18,2	16,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,6	18,2	27,3	0
7 Strade urbane di quartiere e locali	80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	0	0
8 Corsie preferenziali	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	47	53	0

A partire dal calcolo del coefficiente di equivalenza per ogni singolo asse si ottiene il coefficiente di equivalenza per la strada facendo una media pesata:

RELAZIONE DI CALCOLO

Tipo di veicolo	N° assi	Configurazione assi	F.E.	B & C (forte traffico)
1) autocarri leggeri	2	10s* 20s	0.00338	0.00
2) " "	2	15s 30s	0.01900	0.00
3) autocarri medi e pesanti	2	40s 80s	1.05620	0.42
4) " " "	2	50s 110s	3.66110	0.38
5) autocarri pesanti	3	40s 160t**	1.43620	0.11
6) " "	2	60s 200t	3.59000	0.09
7) autotreni e autoarticolati	4	40s 90s 80s 80s	3.56620	0.09
8) " "	4	60s 100s 100s 100s	7.67000	0.19
9) " "	5	200T*** 160t	2.17300	0.06
10) " "	5	240T 200t	4.93000	0.12
11) " "	5	140t 240T	2.48000	0.06
12) " "	5	170t 270T	4.35000	0.11
13) mezzi d'opera	5	170t 390T	12.92737	0.06
14) autobus	2	40s 80s	1.05620	0.00
15) " "	2	60s 100s	2.77000	0.00
16) " "	2	50s 80s	1.13110	0.12
				1.84

Partendo dunque dall'informazione sul traffico giornaliero medio su base annua (TGM), è possibile risalire al numero di applicazioni dell'asse di riferimento nel corso della vita utile dell'opera tramite la seguente relazione:

$$N_{8,2t} = TGM \cdot 365 \cdot F^* \cdot \%VC \cdot C_{SN} \cdot D \cdot L$$

dove:

- TGM = Traffico Giornaliero Medio su base annua (9368); moltiplicato per 365 consente di ottenere l'informazione sul flusso di traffico annuale;
- F\* = fattore di crescita, determinabile come:

$$F^* = \frac{(1 + r)^n - 1}{r}$$

con:

- r = tasso di crescita annuale (1.68%);
- n = vita utile dell'infrastruttura.
- %VC = percentuale veicoli commerciali (13.55%);
- C<sub>SN</sub> = fattore di equivalenza dell'intera flotta di veicoli commerciali (1.84);
- D = percentuale di traffico nella singola direzione (70%);
- L = percentuale di veicoli commerciali transitanti sulla corsia di calcolo. Non tutti i veicoli pesanti transitano sulla corsia "lenta" (corsia di destra); tipicamente si considera un 80%.

Per una vita utile di 25 anni si ottiene un numero di passaggi dell'asse equivalente pari a 14.654.486.

### 1.2.2 Verifica (metodo razionale)

I metodi fondati su una valutazione "razionale", cioè "per via di calcolo", si basano sullo studio del comportamento tenso-deformativo dei vari strati della pavimentazione attraverso cui si perviene alla verifica di "resistenza" della sovrastruttura, intesa come la capacità della stessa di garantire adeguati livelli di servizio entro un predefinito periodo temporale (vita utile); superato questo periodo di tempo, la degradazione subita dalla pavimentazione ne rende necessario il rifacimento.

Il processo progettuale "razionale" per il dimensionamento strutturale di una pavimentazione stradale si basa principalmente sui seguenti passaggi:

- la conoscenza dei dati di traffico;
- la conoscenza delle condizioni climatiche di esercizio;
- la definizione preliminare degli spessori di ogni singolo strato;
- la scelta dei materiali da impiegare;
- il calcolo dello stato tenso-deformativo indotto dall'applicazione dei carichi;
- l'applicazione degli appropriati criteri di verifica.

In particolare, la durata di una pavimentazione viene correlata al numero massimo di passaggi dell'asse standard che è in grado di sopportare prima di raggiungere il collasso strutturale. Nota pertanto la classe di traffico assunta come riferimento, si determinerà il relativo stato tenso-deformativo indotto risolvendo la sovrastruttura tramite opportuni modelli di calcolo. Si evidenzia che la vita utile della pavimentazione non esclude la necessità di interventi manutentivi non strutturali relativi al ripristino delle condizioni superficiali di regolarità e aderenza. È opportuno sottolineare che non si tratta di metodi puramente razionali, in quanto l'empirismo non è del tutto eliminato: vi si rifà infatti per la determinazione delle caratteristiche meccaniche dei materiali e per lo studio delle leggi di degrado.

### TRAFFICO DI PROGETTO

§ par.1.2.1. Dal calcolo si perviene ad un numero di passaggi dell'asse di riferimento pari a 14.654.486.

### CONDIZIONI CLIMATICHE

Le proprietà meccaniche di alcuni materiali impiegati nella realizzazione delle pavimentazioni stradali (conglomerati bituminosi) risentono fortemente delle variazioni di temperatura, poiché essa influenza i valori del modulo complesso. Risulta necessario dunque suddividere l'anno in periodi caratterizzati da una temperatura media dell'aria pressoché uniforme (tipicamente 4 periodi della durata di 3 mesi ciascuno, corrispondenti alle 4 stagioni).

Nel caso in esame ci si è riferiti alle situazioni climatiche medie dell'Italia Centrale suggerite dal Catalogo delle Pavimentazioni Stradali; nella tabella sottostante è riportata una sintesi della tabella presente nel Catalogo.

Periodo	[°C]	[°F]
Inverno	4,5	40,1
Primavera	11,5	52,7
Estate	22	71,6
Autunno	14	57,2

### PAVIMENTAZIONE PROPOSTA

Si rimanda al paragrafo 1.1.

### PARAMETRI DI CALCOLO ASSUNTI

I metodi razionali per il calcolo delle pavimentazioni, come detto, si basano sulla determinazione dello stato tenso-deformativo all'interno della sovrastruttura stessa.

Lo schema di riferimento è quello del multistrato elastico, caratterizzato da una serie di strati di spessore predefinito al di sopra di un semispazio elastico. Le ipotesi alla base di tale modello sono le seguenti:

- materiali elastici, omogenei ed isotropi;
- spessore costante dei singoli strati;
- sottofondo considerato come semispazio;
- perfetta aderenza tra gli strati;

- i carichi applicati sono considerati circolari (impronta di carico circolare con pressione uniforme).

Al fine di poter procedere al calcolo tenso-deformativo, risulta dunque necessario assegnare, ai diversi strati, dei parametri meccanici che meglio rappresentino il loro comportamento sotto carico.

- Per il sottofondo si è fatto ricorso al valore intermedio presente nel Catalogo delle Pavimentazioni Italiane, corrispondente a 90 MPa.
- Il modulo dello strato di fondazione in misto granulare è stato stimato in riferimento alla relazione proposta da Shell Institute, secondo cui il modulo dello strato in misto granulare è influenzato dallo spessore dello strato stesso e dal modulo del sottofondo:

$$E_{mg} = 0,2 \cdot h_{mg}^{0.45} \cdot E_{sf}$$

dove:

- $E_{mg}$  = modulo elastico dello strato in misto granulare;
- $h_{mg}$  = spessore dello strato in misto granulare (20 cm);
- $E_{sf}$  = modulo elastico del sottofondo (90 MPa).

Si ottiene dunque un valore di  $E_{mg}$  pari a 195 MPa.

- Relativamente allo strato in misto cementato, si presume che esso si fessuri, con fessure che si innescano nella parte inferiore e che si propagano verso la parte superiore. La condizione terminale è quando il materiale è fessurato in misura tale da avere una rigidità effettiva simile a uno strato granulare. Questa condizione è nota come lo "stato granulare equivalente" (*South African Pavement Engineering Manual*, 2013). Si considerano dunque due distinte fasi di vita dello strato: una prima caratterizzata da un modulo di 2000 MPa e una seconda, nella quale il modulo si riduce al valore di 300 MPa.
- Per gli strati in conglomerato bituminoso è necessario ricorrere a formulazioni empiriche che consentono di stimare il modulo complesso del materiale partendo da informazioni circa le

proprietà meccaniche del bitume (penetrazione e temperatura di rammollimento), la volumetria della miscela e la temperatura della pavimentazione (ricavabile dalle informazioni sulla temperatura dell'aria).

I parametri meccanici adottati per i diversi strati della pavimentazione sono riportati nella tabella seguente:

<b>Modulo Elastico [Mpa]</b>				
	inverno	primavera	estate	autunno
Usura	5282	3238	903	2575
Binder	7214	4271	1227	3378
Base	7280	4438	1409	3565
Sottobase	2000 (FASE I) / 300 (FASE II)			
Fondazione	195			
Sottofondo	90			
<b>Coeff. Poisson</b>				
Usura	0.35			
Binder	0.35			
Base	0.35			
Sottobase	0.30			
Fondazione	0.40			
Sottofondo	0.45			

### VERIFICA DELLA PAVIMENTAZIONE

Una volta fissati i parametri di calcolo, è possibile determinare lo stato tenso-deformativo all'interno della pavimentazione mediante il software BISAR. Ottenuta la risposta della pavimentazione sotto carico, è necessario correlarla alla performance della pavimentazione stessa; ciò è possibile mediante le Leggi di Degrado.

In riferimento a specifici ammaloramenti della pavimentazione, si determina il numero di passaggi dell'asse standard che porta a condizioni ultime la pavimentazione relativamente al fenomeno di degrado considerato. Tale numero di passaggi "consentiti" ( $N_c$ ) è poi paragonato al numero di passaggi "previsto" ( $N_p$ ) al fine di verificare la pavimentazione di progetto; la pavimentazione risulterà verificata se il rapporto tra  $N_p$  e  $N_c$  è minore di 1.

Le verifiche devono essere condotte in riferimento ai periodi in cui è stato suddiviso l'anno; nel caso in esame è stata prevista una ripartizione omogenea del traffico nei 4 periodi considerati. La verifica sarà dunque del tipo:

$$\sum_{i=1}^k \frac{\left(\frac{N_x}{k}\right)}{N_i} \leq 1$$

La pavimentazione manifesterà un certo numero di applicazioni dell'asse standard che la porta in condizioni ultime in termini dei diversi fenomeni di degrado associati ai diversi strati; la verifica dovrà essere condotta sulla base della condizione più gravosa, ossia del fenomeno di degrado che si sviluppa in corrispondenza del minor numero di applicazioni dell'asse standard.

- **Sottofondo**

La natura ciclica dei carichi che transitano sulla superficie stradale è tale da produrre sulla sommità del terreno di sottofondo delle tensioni verticali  $\sigma_z$  che possono creare avvallamenti sul piano viabile per effetto di accumulo di deformazioni plastiche  $\varepsilon_z$ . Tale evenienza è tanto più probabile quanto più elevato è il livello tenso-deformativo trasferito dalla sovrastruttura.

La legge di degrado adottata per la verifica del sottofondo stradale riprende il modello sviluppato dal Transport Research Laboratory (TRL):

$$\log N_z = -7.21 - 3.95 \cdot \log \varepsilon_z$$

dove:

- $N_z$  = numero di cicli riferito all'asse standard considerato che causa l'accumulo critico di deformazioni permanenti;
- $\varepsilon_z$  = deformazione verticale di compressione sulla sommità del sottofondo.

- **Fondazione in misto granulare**

Per lo strato di fondazione in misto granulare stabilizzato è stata utilizzata la legge di fatica proposta dal South African Mechanistic Pavement Design and Analysis (SAMPDAM):

$$N_B = 10^{(2.605122 F + 3.480098)}$$

dove  $N_B$  è il numero di cicli riferito all'asse standard considerato che causa l'accumulo critico di deformazioni permanenti ed  $F$  è un fattore di sicurezza che si determina con le formule seguenti:

$$F = \frac{\sigma_3 \left[ K \left( \tan^2 \left( 45 + \frac{\phi}{2} \right) - 1 \right) \right] + 2 K C \tan \left( 45 + \frac{\phi}{2} \right)}{(\sigma_1 - \sigma_3)}$$

$$F = \frac{\sigma_3 \phi_{\text{term}} + C_{\text{term}}}{(\sigma_1 - \sigma_3)}$$

dove:

- $\sigma_1, \sigma_3$  = tensioni principali determinate alla profondità intermedia dello strato di fondazione;
- $C$  = coesione (assunta pari a 100 kPa per materiale di classe G5 e condizioni di umidità moderata);
- $\Phi$  = angolo di attrito interno (assunto pari a 45° per materiale di classe G5 e condizioni di umidità moderata);
- $C_{\text{term}}$  = coefficiente tabulato in funzione del tipo di materiale granulare (84 per materiale di classe G6 e condizioni di umidità moderata);
- $\Phi_{\text{term}}$  = coefficiente tabulato in funzione del tipo di materiale granulare (2.32 per materiale di classe G6 e condizioni di umidità moderata);
- $K$  = costante che dipende dalle condizioni di umidità (0,8 per condizioni di umidità moderata).

- **Sottobase in misto cementato**

Gli strati in misto cementato presentano un comportamento evolutivo molto diverso a seconda che vengano considerati i primi anni di servizio (prima fase) o il periodo successivo (seconda fase).

I misti cementati nella prima fase mostrano un effettivo comportamento a fatica in cui il materiale si presenta a "blocchi" ma comunque rigido e coeso per poi fessurarsi progressivamente fino ad assumere, nella seconda fase, un comportamento simile ai misti granulari.

Benché questo cambiamento di comportamento avvenga gradualmente nel tempo, la modellazione della struttura prevede una schematizzazione in due fasi consecutive distinte tra loro:

- nella prima fase, quando il misto cementato si presenta a blocchi di dimensioni da 1 a 10 volte lo spessore dello strato, la sovrastruttura viene calcolata attribuendo al misto cementato un valore di modulo iniziale. In questo caso viene definita la vita a fatica sulla base della massima deformazione di trazione subita dallo strato  $\epsilon_t$  e della massima deformazione di trazione ammissibile  $\epsilon_b$ . I parametri fondamentali che entrano in gioco in questa prima fase sono il modulo elastico iniziale, lo spessore dello strato, la massima deformazione alla base dello strato stesso e la deformazione critica;
- nella seconda fase lo strato passa da uno stato a "blocchi" di dimensioni circa uguali allo spessore dello strato ad uno stato granulare. L'interna sovrastruttura viene ricalcolata con un valore di modulo ridotto e viene applicata una legge di trasferimento che tiene in considerazione la massima tensione di compressione  $\sigma_v$  subita dallo strato e il rispettivo valore ammissibile UCS. In questa fase i parametri fondamentali che entrano in gioco sono il modulo ridotto (valore che tiene in considerazione la natura fessurato/granulare dello strato), lo spessore dello strato, la massima tensione di compressione in sommità dello strato stesso e la rispettiva tensione di compressione critica.

In tale ambito, numerose ricerche (de Beer, 1990, Theyse et al., 1996) sono state svolte al fine di fornire i valori di riferimento (in funzione dei materiali impiegati) per ognuno dei parametri sopraelencati e di tarare adeguate leggi previsionali per la vita utile dello strato cementato e le sue ripercussioni all'interno dell'intera sovrastruttura.

Andando perciò a distinguere le due fasi comportamentali del misto cementato è possibile affermare che, durante la prima fase, la deformazione di trazione è il parametro chiave nella determinazione della vita utile a fatica. La vita a fatica è definita come il numero di ripetizioni di carico che determina la riduzione del modulo fino a raggiungere un valore critico in funzione del tipo di miscela. Il criterio proposto per strade con elevato traffico pesante è basato sulla seguente equazione:

$$N_f = 10^{6,72 \cdot \left(1 - \frac{\epsilon_t}{7,49 \cdot \epsilon_b}\right)}$$

dove  $N_f$  è il numero di cicli di carico di asse standard ammissibile durante il periodo di vita a fatica effettivo,  $\epsilon_t$  è la massima deformazione di trazione alla base dello strato e  $\epsilon_b$  è la massima deformazione di trazione ammissibile.

Infine, tale valore viene relazionato allo spessore dello strato  $d$  per mezzo di uno Shift Factor ( $SF$ ), o fattore di traslazione, definito secondo la seguente equazione:

$$SF = 10^{(0,00285d - 0,293)}$$

Dopo aver calcolato il numero di cicli di carico che determinano la fine della prima fase (fase a fatica con materiale non fessurato), si passa allo studio della seconda fase nella quale il materiale si comporta in maniera analoga ad uno strato granulare e la legge a cui si fa riferimento per strade ad alto traffico è la seguente:

$$N_{C_a} = 10^{7,386 \cdot \left(1 - \frac{\sigma_v}{1,09 \cdot UCS}\right)}$$

dove  $\sigma_v$  è la tensione di compressione in sommità dello strato e  $UCS$  è la tensione massima a compressione ammissibile.

Il valore totale dei cicli di carico sopportati dallo strato trattato con cemento risulta essere la somma dei cicli accumulati durante le due fasi.

$$N = N_f + N_{C_i}$$

Occorre notare che se durante la prima fase gli altri strati ("P") che costituiscono la sovrastruttura hanno tutti una vita utile ( $N_{i2}$ ) superiore a  $N_f$ , tale eccesso ( $N_{i2} - N_f$ ) va moltiplicato per il rapporto  $N_{i2}/N_{i1}$  dove  $N_{i2}$  è il numero di cicli dello stesso strato calcolato nelle condizioni di seconda fase. In tal caso la vita utile dello strato  $i$ -esimo risulterebbe essere  $N_f + (N_{i1} - N_f) \cdot \frac{N_{i2}}{N_{i1}}$ .

In caso contrario se uno strato qualsiasi della pavimentazione va in crisi per un numero di cicli  $N_i$  inferiore a  $N_f$ , è evidente che questo determina la vita utile dell'intera pavimentazione senza l'instaurarsi della seconda fase.

- **Strati in conglomerato bituminoso**

Il fenomeno di degrado associato agli strati legati a bitume è la fessurazione per fatica. Il fenomeno è governato dalla massima deformazione di trazione orizzontale che si manifesta alla base dei suddetti strati.

La legge di fatica considerata nella presenta analisi è la legge di Finn:

$$N_t = 10^{-3.083} \cdot \varepsilon_t^{-3.291} \cdot E^{-0.854}$$

dove:

- $N_t$  = numero di cicli di applicazione del carico, riferito all'asse standard considerato, che causa la fessurazione del 10% della superficie stradale;
- $\varepsilon_t$  = deformazione orizzontale di trazione massima alla base degli strati legati a bitume;
- $E$  = modulo elastico (espresso in MPa) dello strato più profondo in conglomerato bituminoso riferito alla temperatura effettiva dello strato stesso.

I risultati delle diverse verifiche sono riportati nella seguente tabella:

VERIFICHE				
	Conglomerato Bituminoso	Misto Cementato	Misto Granulare	Sottofondo
$N_p/N_c$ inverno	0.1406	0.1403	0.0004	0.0458
$N_p/N_c$ primavera	0.1965	0.1507	0.0123	0.0840
$N_p/N_c$ estate	0.2800	0.1867	0.3121	0.2130
$N_p/N_c$ autunno	0.2187	0.1563	0.0375	0.1054
$N_p/N_c$ TOT	<b>0.8357</b>	0.6340	0.3623	0.4482
	<b>VERIFICATA</b>	<b>VERIFICATA</b>	<b>VERIFICATA</b>	<b>VERIFICATA</b>

Dai risultati delle diverse verifiche si può notare come la pavimentazione proposta risulti ben dimensionata; infatti, il rapporto tra i cicli di carico previsti e i cicli di carico a rottura, per ciascuno strato, si mantiene al di sotto dell'unità.

La legge di degrado che mette in luce la maggiore criticità è quella relativa alla rottura per fatica degli strati in conglomerato bituminoso.

Si può concludere dicendo che la pavimentazione proposta risulta verificata essendo in grado di sopportare un numero di cicli di carico di assi standard da 8,2 t superiore a quello previsto per i primi 25 anni di esercizio.

## 2 CONSIDERAZIONI SULLE DEFORMAZIONI PERMANENTI

Il fenomeno dell'ormaiamento è stato preso in considerazione relativamente al sottofondo; infatti, la natura ciclica dei carichi che transitano sulla superficie stradale è tale da produrre sulla sommità del terreno di sottofondo delle tensioni verticali  $\sigma_z$  che possono creare avvallamenti sul piano viabile per effetto di accumulo di deformazioni plastiche  $\epsilon_z$ . La verifica è stata condotta nel sottofondo in quanto è questo strato a manifestare le principali criticità relativamente al suddetto fenomeno; difatti, il criterio proposto riprende il modello sviluppato dal Transport Research Laboratory (TRL), il quale associa il numero di cicli di carico dell'asse standard che causa l'accumulo critico di deformazioni permanenti alla deformazione verticale di compressione sulla sommità del sottofondo stesso

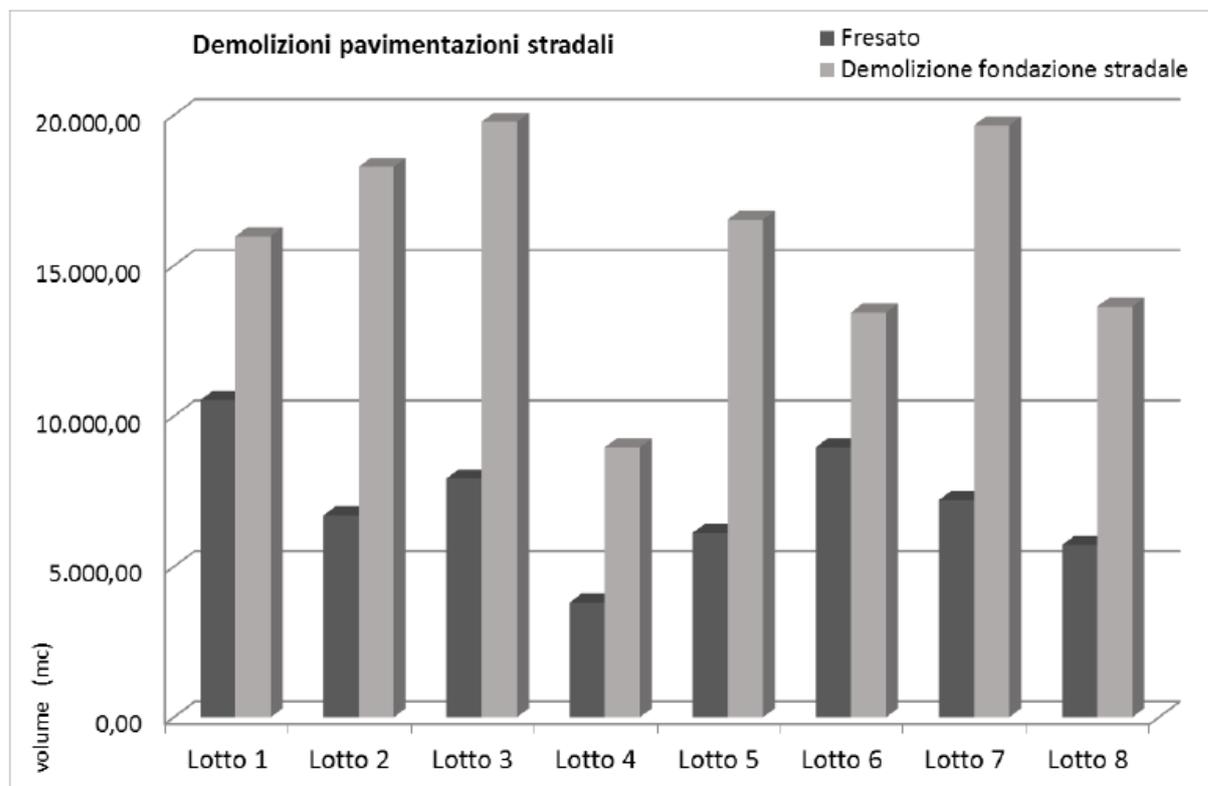
### **3 CONSIDERAZIONI SUL RIUTILIZZO DEI MATERIALI DA DEMOLIZIONE DELLA PAVIMENTAZIONE STRADALE ESISTENTE**

Il progetto prevede la produzione di un volume di demolito di conglomerato bituminoso, chiamato per semplicità "fresato", pari a 57.000 mc e di un volume di materiale di demolizione della fondazione stradale esistente, ove è prevista la dismissione e rinaturalizzazione della vecchia sede, dell'ordine di 126.290 mc.

La risorsa di "fresato" è stata computata individuando le aree di pavimentazione da dismettere, dal rilievo topografico e ipotizzando uno spessore medio di 8 cm, valore ottenuto confrontando i dati derivanti dai pozzetti esplorativi e carotaggi eseguiti lungo il tracciato (in allegato si riportano i risultati delle analisi in Tabella I.13).

La seconda risorsa è stata computata per gli strati di fondazione della pavimentazione demolita dello spessore variabile di 12-22 cm (valori desunti dai carotaggi di cui sopra).

**Figura E.3: Contributo di ogni lotto alla produzione di materiale di demolizione della sede stradale esistente**



In Figura E.3 è visualizzato il contributo di ogni lotto (tratto dal Progetto Defi alla produzione di materiale di demolizione della sede stradale esistente).

In Tabella E.2 sono riportate le possibilità di riutilizzo prese in considerazione per i materiali provenienti dalla demolizione della pavimentazione, a seconda delle caratteristiche e composizioni, dopo essere stati sottoposti al processo di vagliatura e ricomposti per ottenere il fuso granulometrico previsto da capitolato per il relativo riutilizzo, se necessario con l'aggiunta di materiale vergine dall'esterno.

Le possibilità di riutilizzo illustrate sono state analizzate dal punto di vista sia tecnico sia economico, con l'ausilio di prove di caratterizzazione del conglomerato bituminoso esistente prelevato con carote lungo l'asse stradale esistente, riportate in sintesi in Tabella I.13.

La caratterizzazione della miscela è stata fatta attraverso le seguenti prove:

- Analisi del fuso granulometrico
- Peso specifico
- Percentuale di assorbimento
- Indice di forma
- Indice di appiattimento
- Percentuale di bitume nella miscela
- Massa volumica
- Test di penetrazione

Le analisi condotte sull'infrastruttura esistente mostrano evidenti zone di disomogeneità strutturale lungo il tracciato, che non permettono una completa caratterizzazione degli strati legati della pavimentazione in esercizio.

Inoltre, il riutilizzo del fresato, per la realizzazione di materiali pregiati, richiede, oltre ad un monitoraggio completo sia dei volumi disponibili sia dell'omogeneità delle caratteristiche del materiale della miscela, anche particolari impianti di produzione in grado di utilizzare il fresato per la realizzazione della nuova miscela.

Per questi motivi, nell'ambito del presente B.M.T. è stato previsto il reimpiego del materiale proveniente dalla fresatura della sovrastruttura (spessore 8cm) della pavimentazione esistente per la composizione dei conglomerati bituminosi di progetto e più precisamente dello strato di base con bitume modificato hard dell'asse principale e degli svincoli, nella percentuale prevista in capitolato per questa tipologia di conglomerato (25% degli inerti), mentre il volume derivante dalla demolizione degli strati più profondi e disomogenei della pavimentazione esistente potranno essere reimpiegati per la realizzazione della nuova fondazione stradale e/o dei rilevati stradali.

Si è pertanto considerato:

- quanto disciplinato dall'allegato C3 della Circolare del Ministero dell'Ambiente n. 5205 del 15/07/2005 "Green Public Procurement – Indicazioni per l'operatività nel settore edile, stradale ed ambientale, ai sensi del decreto ministeriale 8 maggio 2003, n. 5205", il quale definisce le caratteristiche dell'aggregato riciclato per la realizzazione di strati di fondazione nelle infrastrutture di trasporto (L'allegato sancisce che i conglomerati bituminosi provenienti dalla demolizione della sovrastruttura esistente, possono essere riutilizzati negli strati di fondazione nella misura in cui il trattenuto al setaccio da 8 mm non sia superiore al 5% della massa totale necessaria a coprire il fabbisogno per la realizzazione della fondazione stradale);
- la percentuale del trattenuto al setaccio da 8 mm derivante dalle analisi granulometriche effettuate sui campioni di conglomerati bituminosi;
- i requisiti richiesti dal capitolato per la composizione del fuso granulometrico che dovrà caratterizzare gli strati di fondazione stradale;

Considerato quanto sopra, si è scelto di imporre, in via cautelativa, un limite tecnico del reimpiego di CB del 30% per la fondazione in misto granulare stabilizzato, sulla base di esperienze e prove tecniche di letteratura.

Si specifica che il recupero è subordinato all'esecuzione di test di cessione e a trattamento in impianto autorizzato. I rifiuti da sottoporre a caratterizzazione devono essere campionati secondo le modalità descritte nella norma UNI 10802:2004 "Rifiuti liquidi, granulari, pastosi e fanghi – Campionamento manuale e preparazione ed analisi degli eluati". L'esecuzione del test di cessione è normato dalla UNI EN 12457-2:2004. Si veda al riguardo il par. H.2.2.

In via cautelativa si è scelto di computare comunque la pavimentazione come completamente nuova e di pagare lo smaltimento dell'esistente a discarica nelle more della definizione peculiare specifica dei singoli riutilizzi.

**Tabella E.2: Possibilità di riutilizzo dei materiali provenienti dalla demolizione della pavimentazione (fresato)**

Riutilizzo possibile (**)	Descrizione	Vantaggi/Svantaggi	Attrezzatura/Trattamento
1. Fondazione stradale in misto granulare. (*)	<p>Il riciclaggio dei materiali provenienti dalla demolizione, parziale o totale della pavimentazione e fondazione stradale esistente, può essere fatta mediante integrazione della miscela con aggregati vergini e materiali litici provenienti dalla demolizione delle strutture in calcestruzzo.</p> <p><u>Studi preliminari necessari:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Analisi granulometrica</li> <li>• Verifica dell'indice di portanza CBR</li> <li>• Sviluppo della miscela ideale per ottimizzare le proprietà del materiale</li> </ul>	<p>Possibilità di riutilizzo limitato del materiale fresato (vedi normativa UNI EN 13285 e circolare 5205/2005; 5% di fresato al trattenuto del 8mm).</p> <p>Limite tecnico imposto per il riutilizzo del conglomerato bituminoso derivante da demolizione: 30% della miscela.</p>	<p>Possibile integrazione della miscela con aggregati provenienti dalla demolizione di calcestruzzo e aggregati vergini per l'ottenimento del fuso granulometrico richiesto da capitolato.</p> <p>Impianto di cantiere con frantumazione a mascelle e vagliatura.</p>
2. Fondazione stradale in misto cementato. (*)	<p>Il riciclaggio dei materiali provenienti dalla demolizione, parziale o totale della pavimentazione e fondazione stradale esistente, può essere fatta mediante integrazione della miscela con aggregati vergini e materiali litici provenienti dalla demolizione delle strutture in calcestruzzo, con l'aggiunta di legante idraulico (cemento).</p> <p><u>Studi preliminari necessari:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Analisi granulometrica</li> <li>• Sviluppo della miscela ideale per ottimizzare le proprietà del materiale</li> <li>• Verifica della miscela con prove di pressa a taglio giratoria.</li> </ul>	<p>Possibilità di riutilizzo di materiale fresato senza limitazione, previa verifica normativa e del fuso granulometrico, con l'eventuale integrazione di materiali litici vergini o da demolizione di strutture in calcestruzzo.</p> <p>Limite tecnico imposto per il riutilizzo del conglomerato bituminoso derivante da demolizione: 50% della miscela.</p>	<p>Possibile integrazione della miscela con aggregati provenienti dalla demolizione di calcestruzzo e aggregati vergini per l'ottenimento del fuso granulometrico richiesto da capitolato.</p> <p>Impianto mobile di cantiere con frantumazione a mascelle, vagliatura e miscelazione.</p>

RELAZIONE DI CALCOLO

Riutilizzo possibile (**)	Descrizione	Vantaggi/Svantaggi	Attrezzatura/Trattamento
3. Fondazione stradale e base con l'utilizzo del trattamento a bitume schiumato. (*)	<p>Il riciclaggio con il processo del bitume schiumato in impianto, consiste nel riutilizzare il materiale proveniente dalla demolizione, parziale o totale della pavimentazione e fondazione stradale esistente, attraverso il trattamento con una miscela di acqua e bitume caldo, questo processo aumenta il volume del bitume di 15-20 volte.</p> <p><u>Studi preliminari necessari:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Identificazione dei costituenti e analisi granulometrica</li> <li>• Proctor modifica per determinare il contenuto di acqua ottimale (OMC) e la massima densità secca (MDD)</li> <li>• Sviluppo della miscela ideale per ottimizzare le proprietà del materiale</li> </ul>	<p>Possibilità di riutilizzo totale del fresato previa verifica del fuso granulometrico richiesto da capitolato e caratteristiche meccaniche del materiale ottenibile.</p> <p>L'utilizzo di una fondazione con legante bituminoso permette di ottenere spessori ridotti rispetto ad una fondazione con leganti cementizi a parità di portanza del sottofondo.</p> <p><u>Svantaggi:</u></p> <p>Necessità di uno specifico impianto di riciclaggio che permette il trattamento con bitume schiumato.</p> <p><u>Vantaggio:</u></p> <p>Metodologia con circa 15 anni di esperienza nel mondo.</p> <p>Possibilità di riutilizzo del conglomerato bituminoso derivante da demolizione fino ad un massimo del 70-80% della miscela.</p>	<p>L'utilizzo di una fondazione con legante bituminoso permette di ottenere spessori ridotti rispetto ad una fondazione tradizionale non legata.</p> <p>È possibile effettuare una verifica della miscela ed eventuale correzione del fuso granulometrico con l'aggiunta di aggregati vergini.</p> <p>È necessario utilizzare un impianto di cantiere idoneo a produrre riciclato per fondazione con bitume schiumato.</p> <p>La fase finale è composta dalla stesa in cantiere per mezzo di vibrofinitrici e successiva compattazione con rulli idonei (il giusto grado di compattazione con questo metodo è di notevole importanza).</p>

(\*) Necessarie ulteriori verifiche per l'applicabilità e l'efficacia del metodo di riutilizzo proposto.

(\*\*) Tutti i metodi proposti devono essere validati dopo opportune prove di laboratorio per verificare l'effettiva efficacia del metodo e previa caratterizzazione ambientale.

**RELAZIONE DI CALCOLO**

Riutilizzo possibile (**)	Descrizione	Vantaggi/Svantaggi	Attrezzatura/Trattamento
4. Riciclaggio a freddo in impianto per la realizzazione strato di base e sottobase.	<p>Il riciclaggio a freddo dei materiali provenienti dalla demolizione, parziale o totale della pavimentazione esistente, avviene con l'aggiunta di leganti idraulici, pozzolanici o di materiali bituminosi. Si può considerare l'aggiunta del legante sottoforma di emulsione bituminosa (miscela acqua e bitume).</p> <p><u>Studi preliminari necessari:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Identificazione dei costituenti</li> <li>• Sviluppo della formula</li> <li>• Verifica della formula con alcune prove di laboratorio.</li> </ul>	<p>Possibilità di riutilizzo pressoché totale del fresato previa verifica della formula utilizzata per la determinazione della miscela.</p> <p>Questa tecnica è possibile per la realizzazione di uno strato di sottobase (o fondazione legata a bitume), alcuni esperimenti sono stati fatti per essere utilizzata anche per la realizzazione dello strato di base.</p> <p>L'utilizzo di spessori maggiori, tipici dei riciclati a freddo, permette di ottenere una vita utile della pavimentazione maggiore.</p> <p><u>Vantaggio:</u></p> <p>Possibilità di riutilizzo del conglomerato bituminoso derivante da demolizione fino ad un massimo del 80% della miscela.</p> <p>Soluzione già sperimentata nell'ampliamento dell'autostrada Torino-Milano.</p>	<p>Per applicare questa tipologia di riciclaggio è sufficiente l'utilizzo di un impianto mobile di cantiere.</p> <p>In particolare, l'impianto dovrà essere provvisto di frantumatore e vagliatore al setaccio 40mm.</p> <p>Successivamente, si passa alla fase di rigenerazione, dove la miscela viene trattata come un normale inerte in cui viene aggiunta la percentuale di emulsione bituminosa, cemento e acqua ottimale e miscelata.</p> <p>La fase finale è semplicemente composta dalla stesa in cantiere per mezzo di vibrofinitrici e successiva compattazione con rulli idonei.</p>

**RELAZIONE DI CALCOLO**

Riutilizzo possibile (**)	Descrizione	Vantaggi/Svantaggi	Attrezzatura/Trattamento
5. Riciclaggio a caldo per la realizzazione degli strati legati superiori.	<p>Il riciclaggio a caldo in impianto partendo dalla demolizione complessiva o parziale di vecchie pavimentazioni flessibili relativo agli strati di: usura, binder, base. Questi materiali vengono definiti con il termine di aggregati. Normative Europee sperimentali definiscono la caratterizzazione degli aggregati per il riciclaggio dei conglomerati bituminosi a caldo.</p> <p><u>Studi preliminari necessari:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Identificazione dei costituenti</li> <li>• Sviluppo della formula</li> <li>• Prova della formulazione</li> </ul>	<p>Questo metodo di riciclaggio si può applicare a tutti gli strati della pavimentazione: usura, binder e base; anche se per lo strato di usura se ne sconsiglia il riutilizzo poiché questo può ridurre la resistenza e quindi la sua vita utile.</p> <p><u>Svantaggi:</u> Necessità di uno specifico impianto di miscelazione a caldo e genera funi inquinanti.</p> <p><u>Tasso di riciclaggio medio:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 10% di fresato per la realizzazione del nuovo strato di binder.</li> <li>• 20% di fresato per la realizzazione del nuovo strato di base.</li> <li>• 25% di fresato per la realizzazione del nuovo strato di base con bitume modificato hard.</li> </ul>	<p>La tecnologia utilizzata gioca un ruolo importante sulla qualità finale del conglomerato bituminoso ottenibile. Il dosaggio di aggregati è fornita da una tramoggia in grado di assicurare un flusso regolare del prodotto.</p> <p>È necessario utilizzare un impianto di cantiere o fisso (se disponibile) idoneo a produrre riciclato a caldo, ovvero in grado di riscaldare il conglomerato bituminoso proveniente dalla demolizione che si intende riutilizzare nella nuova miscela.</p>

(\*) Necessarie ulteriori verifiche per l'applicabilità e l'efficacia del metodo di riutilizzo proposto.

(\*\*) Tutti i metodi proposti devono essere validati dopo opportune prove di laboratorio per verificare l'effettiva efficacia del metodo e previa caratterizzazione ambientale.