

Misura per confronto della durata a fatica delle miscele per le pavimentazioni

E.Cesolini & P.Bernardinetti & C.Sartori

Anas S.p.A., Centro Sperimentale Stradale - Cesano (Roma), Italy

ABSTRACT: Obiettivo “comprendere” meglio, misurare ed aumentare la durata delle miscele componenti le pavimentazioni stradali, mediante test dinamico facilmente ripetibile a basso costo di prova su campioni cilindrici realizzati con l’impiego di pressa giratoria secondo parametri semplici e di facile esecuzione. Il test rappresenta uno strumento basilare con influenza diretta nelle scelte progettuali, di calcolo e di controllo delle lavorazioni anche da parte degli esecutori sui pacchetti e su materiali innovativi (e non) presenti nel campo delle costruzioni stradali, in linea con le nuove linee guida ANAS sulle pavimentazioni.

1. LA VICENDA DELLA MISURA DELLA FATICA DEI MATERIALI STRADALI

Il termine *resistenza a fatica* o *vita a fatica* nasce nei primi anni del 1800, come fenomeno essenzialmente metallurgico; i primi studi riguardarono inspiegabili rotture di assali ferroviari progettati per resistere a carichi statici di gran lunga superiori rispetto a quelli che ne determinavano la rottura in esercizio. Il concetto può essere esteso ovviamente a tutte le strutture che devono sopportare, durante la loro vita utile, continui cicli di carico e scarico. Il danneggiamento per fatica si manifesta con la formazione di fessure la cui entità e propagazione dipende fortemente dal tipo di materiale, dall’entità e dal modo di applicazione della sollecitazione e, non ultimo, dalle condizioni al contorno (condizioni ambientali).

Il numero di ripetizioni che porta a rottura può essere identificato con il numero di cicli a seguito del quale compare la prima fessura ovvero, secondo alcuni studiosi, con la rottura completa della struttura. In senso generale si considera collassata una struttura che non sia più in grado di adempiere ai compiti per cui è stata progettata anche nel caso in cui non si sia manifestata ancora la rottura completa.

Molti passi avanti in queste valutazioni si sono avuti nel periodo di studio della fatica dei materiali aeronautici in cui sono stati messi a punto una serie di regole matematiche, delle quali la più nota è la legge di Miner, applicata per la prima volta nei calcoli di durata delle strutture alari dei cacciabombardieri usati nella II guerra mondiale, che permette la valutazione comparata di diverse azioni inducenti la fatica al variare dei carichi, delle loro frequenze e delle condizioni al contorno, come temperatura di funzionamento e velocità di applicazione del carico, per i materiali che ne risentono.

1.1 *La fatica dei materiali stradali*

Queste regole sono divenute basilari nell’uso in campo stradale, dove il comportamento a fatica dei materiali rappresenta il parametro “principe” che “decide” la durata tecnica della

pavimentazione e nello stesso tempo rappresenta “ il tallone di Achille” per ciò che concerne la diffusione di test realmente impiegabili su larga scala in modo omogeneo e coerente.

In effetti, dopo gli studi svolti negli anni 70 e completati nell’ultima parte del secolo scorso, che hanno messo a punto la metodologia matematica delle valutazioni*, e dopo la individuazione e la messa a punto delle macchine di rilievo di stato sulla strada di cui diremo, il problema per arrivare all’impiego della fatica per gestire le pavimentazioni è stato quello della ricerca di criteri speditivi ed affidabili per la misura delle resistenze “a fatica” fornibili da parte delle diverse miscele. Occorrevano macchine di laboratorio che potessero effettuare queste valutazioni in modo operativo, cioè rapido ed affidabile, superando le difficoltà di impiego delle attrezzature fino allora usate per ottenere le curve di riferimento da usare nei calcoli di durata, difficoltà legate alla loro complessità ed anche al loro costo di acquisto e di uso.

Si sono sempre usate, per queste misure, macchine pulsanti estremamente complesse da impiegare, con ampia gamma di carichi e frequenze di carico, e in generale configurazioni di prova estremamente variegata e tecnicamente complesse, camere di controllo della temperatura del provino e con provini delle più svariate forme, cilindriche, parallelepipedo e piramidali.

Anche la preparazione del provino è stata una delle variabili complesse del problema o per la difficoltà propria di preparazione, o per il disturbo che la realizzazione e preparazione poteva indurre sul prodotto da testare.

Nel frattempo diveniva sempre più urgente misurare la fatica dei materiali stradali perché ci si stava spostando dal campo dei conglomerati realizzati con materiali vergini e selezionati a quello delle miscele realizzate con materiali marginali o materiali riciclati, di affidabilità minore, la cui variabilità potenziale a fatica, richiedeva una valutazione più frequente.

Sotto la spinta di queste esigenze la soluzione è scaturita** in ambito ANAS, passando dalla prova di misura della fatica diretta alla prova indiretta, cioè alla valutazione della durata del materiale in esame in rapporto alla durata di un materiale, ben conosciuto, di riferimento.

In questo modo era possibile semplificare la prova e la macchina per eseguirla, conseguendo una attrezzatura ed una metodologia da usare speditivamente nei cantieri di costruzione.

Vediamo allora di comprendere in che consiste l’innovazione messa a punto e come si colloca nella pratica operativa del settore.

2. L’APPROCCIO PRESTAZIONALE DI ANAS: IL NUOVO CAPITOLATO SPECIALE D’APPALTO

Fino ad oggi la progettazione stradale ha seguito un approccio di tipo “prescrittivo” fondato sostanzialmente sul rispetto di una serie di prescrizioni inerenti i materiali e le procedure per lavorarli, confidando sul fatto che, con materiali predefiniti, il prodotto finale sarebbe stato quello previsto nel progetto, in ogni momento dell’opera.

In molti casi però il risultato non è stato soddisfacente perché il numero di prove da eseguire per ottenere un controllo efficace ed i tempi ed i costi per eseguirle non sono in linea con le velocità e le esigenze di posa in opera di questo tipo di lavori, per cui i controlli spesso assumono un carattere solo formale e non riescono a governare i lavori durante le esecuzioni. Se poi arrivano alle sanzioni, lo fanno in modo incompleto e quando ormai il lavoro è terminato.

Oggi il continuo aumento dei volumi di traffico sulle pavimentazioni, unito alla crescente necessità di adoperare materiali “poveri” opportunamente trattati, provenienti dal riciclo di pavimentazioni esistenti fresate, ha spostato l’attenzione sul risultato finale del lavoro anche per l’impossibilità pratica di testare singolarmente tutti i nuovi prodotti che si affacciano

* Vedi Gabriele Camomilla- Franco Giannini “*Procedure for the Structural Design of Pavement Used on Italian Motorways*” “*University of Michigan - Fourth International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements* – Ann Arbor 1977.

Camomilla Malgarini Fornaci “*La manutenzione delle pavimentazioni con programmazione elettronica*” *Autostrade* 1/1993

** Vedi G. Camomilla “*L’evoluzione del riciclaggio in Italia*” - *Rassegna del bitume SITEB* n.59 - 2008 e rivista *Quarry & Construction* n.554 febbraio 2009

continuamente sul mercato. È prevalsa quindi la linea di misurare il risultato finale, la “prestazione reale” ottenuta che la pavimentazione sarà in grado di offrire nel tempo.

Per le miscele questa prestazione globale non può che essere la resistenza a fatica del prodotto, da valutare spesso perché i materiali marginali variano di più di quelli di prima qualità.

Da qui la necessità delle misure speditive di fatica sulle miscele.

Per verificare, inoltre, che in opera finiscano proprio quelle miscele testate si è poi passati*** alla misura in sito con macchine ad Alto Rendimento in grado di misurare rapidamente ed a basso costo, tutto il lavoro eseguito, per cui è importante per l'imprenditore l'impiego di materiali idonei e la corretta esecuzione in modo da ottenere una prestazione certa. Diventa perciò indispensabile conoscere il comportamento a fatica dei materiali stradali per determinare contemporaneamente la vita utile della pavimentazione.

E' per questo motivo che Anas sta realizzando, presso il Centro Sperimentale Stradale di Cesano, test di fatica finalizzati al tracciamento di curve di fatica per ciascuno dei materiali inseriti nelle nuove Norme Tecniche.

2.1 Una prova di fatica semplificata per i cantieri

Il test di fatica, come ricordato, è in assoluto uno dei più difficili da eseguire, in particolare sui conglomerati bituminosi, per l' elevato numero di configurazioni possibili, per la definizione delle condizioni al contorno e per l' elevato costo delle attrezzature necessarie, che ne impediscono di fatto una diffusione su larga scala. La normativa europea UNI EN 12697-24 descrive diverse procedure di prova, come ad esempio flessione su due o tre punti, trazione indiretta su provini cilindrici, taglio su elemento prismatico ecc; ovviamente metodi diversi portano a risultati diversi non comparabili tra di loro. In aggiunta a ciò rimangono inalterati i dubbi su quale tra il controllo di forza (tensione) e di spostamento (deformazione) sia la configurazione di prova ottimale.

Anas, ponendosi come obiettivo la standardizzazione del test di fatica alla stregua di una prova Marshall o di una Giratoria, ha pensato di operare per confronto di durate rispetto ad un materiale di riferimento. In questo modo ha potuto semplificare sia la prova del riferimento (magari eseguita per più punti) ed anche quella dei materiali che ad esso vanno riferiti. Noto poi il comportamento in opera del riferimento, l'uso degli altri materiali si ricava per comparazione riferita alle diversità di durate misurata, sapendo bene che la precisione di queste misure non è quella di un cronometro svizzero (o dovremmo dire giapponese?).

Questa scelta ha portato a definire una configurazione semplificata basata su di una sollecitazione sinusoidale diametrale con controllo di forza (preferibile) o di deformazione conferita con una frequenza di 10 Hz alla temperatura ambiente di 20°C; i provini standard sono di forma cilindrica aventi diametro 150 (±2mm) e altezza 65 (±10 mm) realizzati con la pressa giratoria imponendo 180 giri alla pressione di 600 kPa, con angolo giretorio 22mrad, alla velocità di 30 giri/min.

Il concetto è molto semplice: le condizioni al contorno e la configurazione di prova rimangono costanti, può variare solo il campione.

$$\varepsilon = k \left(\frac{N}{10^6} \right)^{-1/\alpha} \quad \text{o} \quad \sigma = \ln(x) + c \quad (1)$$

*** *A onor del vero in termini temporali la misura della fatica è stato l'ultimo scoglio da superare per la misura delle prestazioni, perché le macchine ad Alto Rendimento per la misura in opera su tutto l' eseguito, l'hanno preceduta. Per la fatica in opera si ricordano le grandi macchine di fatica sud africane che eseguivano la misura in opera, ma solo su di un tratto di prova ed erano quindi solo delle enormi e costosissime “macchine di laboratorio”*



Figura 1. Pressa dinamica a basso costo per test a fatica

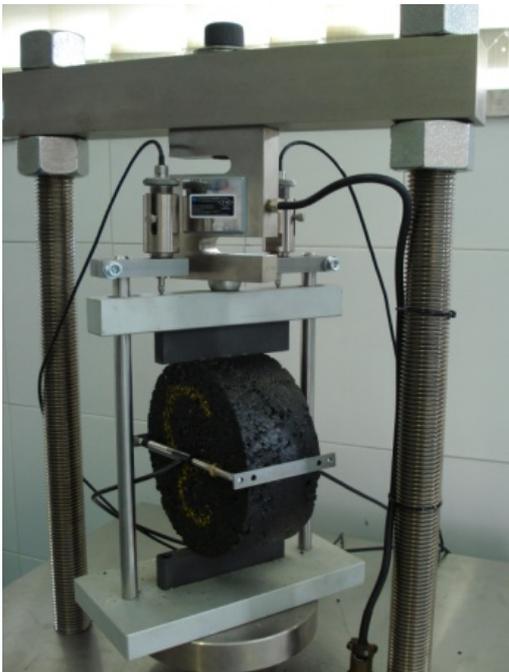


Figura 2. Configurazione di carico senza cella climatizzatrice

3. LE CURVE DI RIFERIMENTO

Lo scopo delle sperimentazioni, che portano alla futura metodologia di uso pratico, è stato in primo luogo quello di determinare la curve di fatica di riferimento di un materiale stradale di ottima qualità soggetto massimamente a fatica nelle strutture di pavimentazione (conglomerato bituminoso di base) usato nei modelli di calcolo della vita utile della pavimentazione.

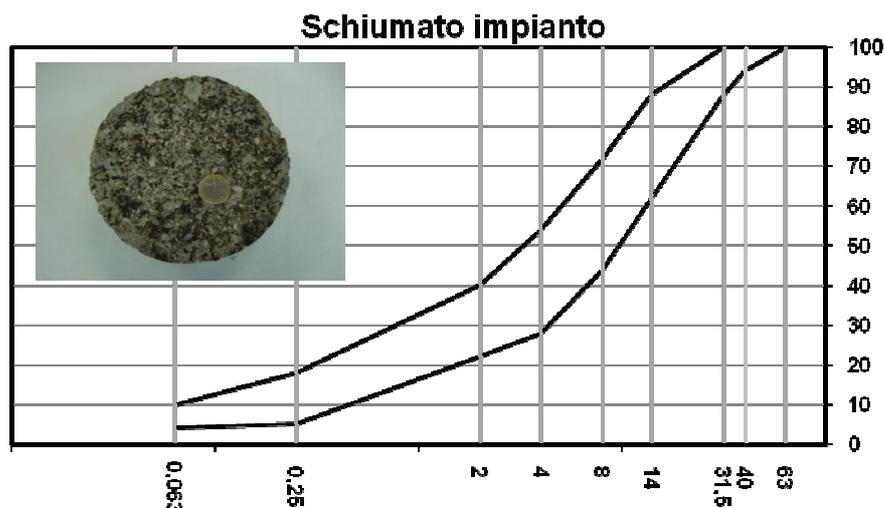
È seguita poi la valutazione per comparazione con la curva primaria così definita, il comportamenti a fatica di miscele di nuovi materiali (spesso di tipo marginale o riciclato)e/o combinazioni diverse multistrato costruite sulla base di standard minimi di buona esecuzione.

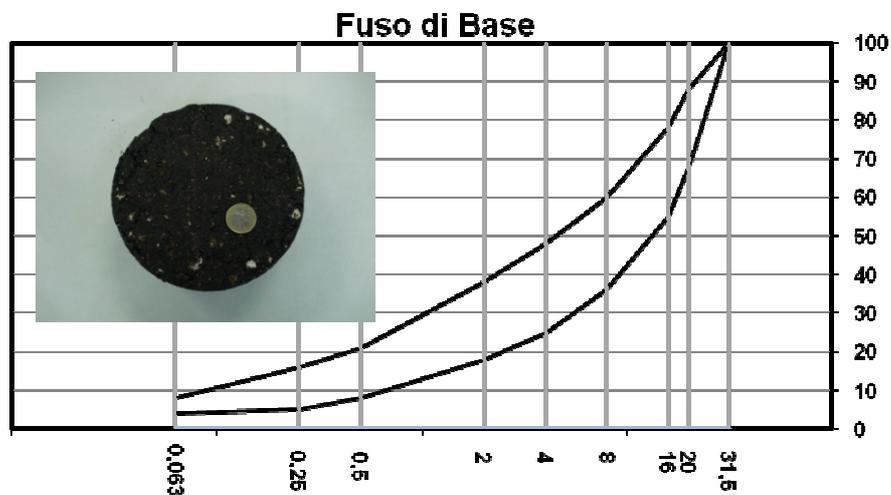
Per la procedura che si descrive , si è operato confezionando due miscele di cui la prima a caldo per uno strato di base (riferimento) ed una seconda miscela, rappresentativa di un riciclaggio a freddo mediante tecnica dello schiumato.

Di seguito si riportano i fusi impiegati nelle nuove Norme Tecniche Anas

Tabella 1. Fusi di riferimento

Setacci mm	Base	Schiumato
63		100 - 100
40		94 - 100
31,5	100 - 100	88 - 100
20	68 - 88	----
16	55 - 78	----
14	----	62 - 88
12,5	----	----
8	36 - 60	44 - 72
4	25 - 48	28 - 54
2	18 - 38	22 - 40
0,5	8 - 21	----
0,25	5 - 16	5 - 18
0,063	4 - 8	4 - 10





3.1 Materiali impiegati

La miscela di base impiega inerti di cava di natura calcarea, legati con bitume modificato hard. La seconda miscela invece utilizza bitume schiumato che va a ricoprire del fresato integrato granulometricamente con la frazione grossa di calcare.

Il bitume schiumato si ottiene ponendo in contatto diretto bitume caldo (a circa 180 °C), acqua a temperatura ambiente e aria compressa. Il bitume espande (fino a trenta volte) il suo volume iniziale, aumenta la superficie specifica e quindi la possibilità di ricoprire dell' inerte freddo e magari umido; per rendere il processo più efficace, la schiumatura viene eseguita direttamente nel miscelatore contenente gli inerti.



Figura 3. Macchina schiumatrice da laboratorio



Figura 4. Impasto con bitume schiumato

Il legante è stato caratterizzato mediante le prove di penetrazione a 25 °C, determinazione del punto di rammollimento con il metodo della biglia e anello e prove di viscosità a 160 °C con il viscosimetro Brookfield.

Per la miscela di schiumato sono stati realizzati 8 provini sottoposti a due cicli di maturazioni differenti; un lotto di 4 provini è stato maturato a 40 °C per tre giorni prima di essere testato a fatica. Il secondo lotto è stato maturato (sempre a 40 °C) per tre mesi in modo da far reagire completamente il cemento presente nella miscela. Quest'ultima è stata realizzata cercando di massimizzare l'impiego del riciclato che ha raggiunto il 73% del totale della miscela; la lavorazione prevede inoltre l'aggiunta, durante la miscelazione, del 5% (riferita al peso della miscela) di acqua e del 2% di cemento.

Tabella 2. Mix design

Inerte	Percentuali di impiego						
	Calcare 25-30	Calcare 10-20	Calcare 5-10	Sabbia 0-4	Fresato	Filler	Bitume %
Schiumato	-	15%	-	12%	73%	-	3,20
Base	30%	16%	22%	31%	-	1%	4,5

Tabella 3. Dati volumetrici

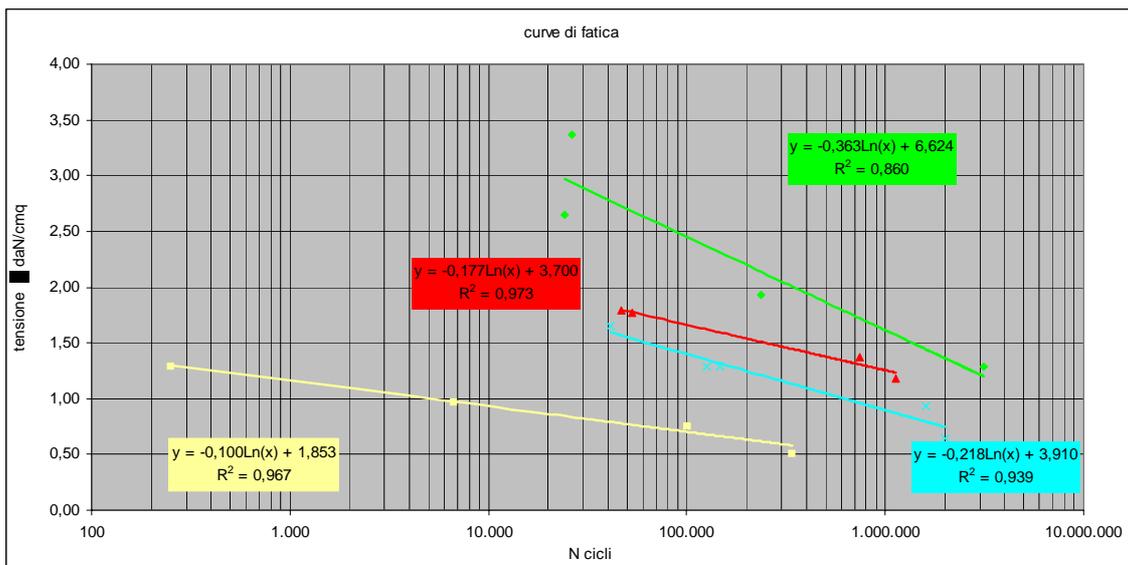
<i>Diametro 150mm Altezza ≈65 mm</i>	Schiumato	Miscela di Base
Numero di giri	Vuoti residui %	Vuoti residui %
10	22,5	14,5
100	13,7	4,7
180	11,6	2,5

Sul bitume sono state

eseguite le prove classiche di caratterizzazione:

	Penetrazione con ago a 25°C	Punto di Ramollimento	Viscosità dinamica	Indice di Penetrazione
Bitume per schiumato	118 dmm	44,1 °C	245 mPa*s (a 135°C)	-0,56
Bitume per Base	53 dmm	93,2 °C	450 mPa*s	6,10

I test di fatica sono stati condotti imprimendo al provino una sollecitazione sinusoidale alla frequenza di 10 Hz, alla temperatura di circa 20°C (temperatura ambiente) con valori del carico ciclico compreso tra 0,8 e circa 2,8 kN. Le curve di fatica, calcolate secondo la formula citata al paragrafo 2.1, mostrano i valori più alti per la miscela di Base confezionata con bitume modificato, mentre i più bassi ovviamente sono relativi allo schiumato maturato per tre soli giorni. Da evidenziare l' incremento di vita utile che si ottiene portando la maturazione dello schiumato fino a tre mesi; evidentemente il cemento in combinazione al bitume, una volta raggiunta la maturazione completa, conferisce alla miscela una grande resistenza in termini di sopportazione dei carichi.



- Usura con bitume hard
- Base con bitume hard
- Schiumato a tre mesi
- Schiumato a tre giorni

Il numero di cicli corrispondenti alla rottura si può ricavare dal grafico deformazione/cicli.

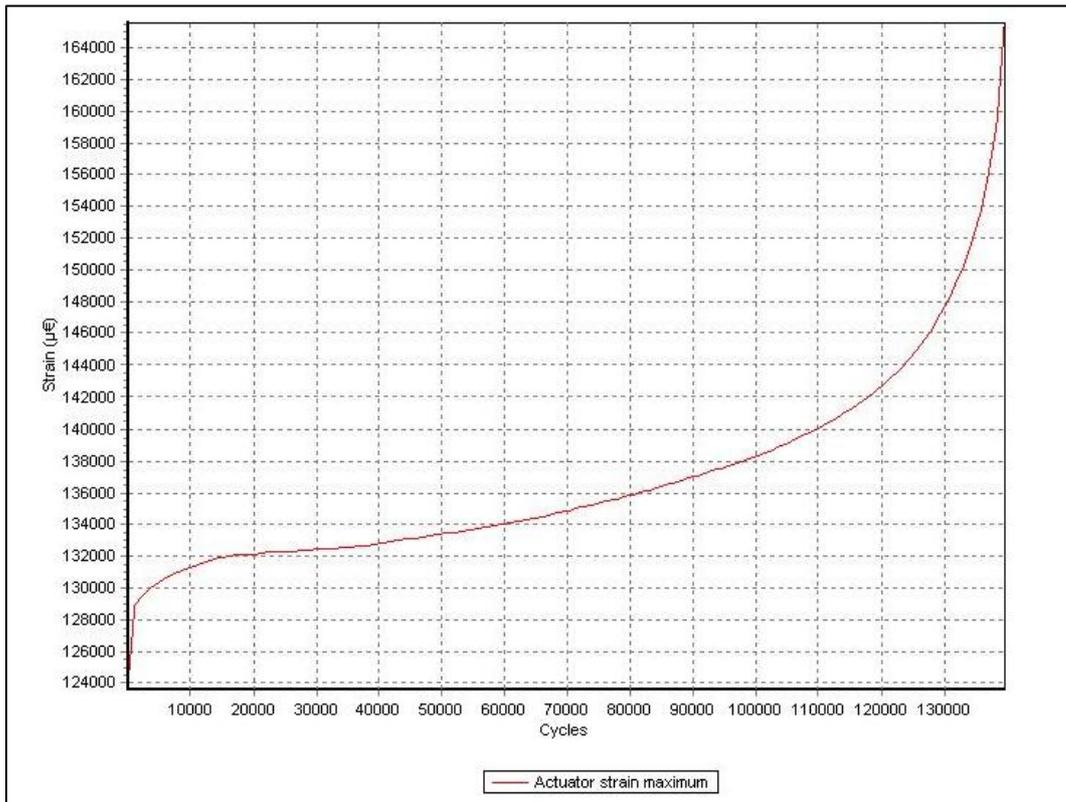


Figura 5. Curva di prova cicli/deformazione

4. CONCLUSIONI

L'obiettivo di portare a rango di test di cantiere la prova "qualità" intesa come misura della "prestazione a fatica" passa attraverso la definizione di modalità di prova semplice su campioni realizzati in modo semplice e facilmente ripetibile.

La metodologia impostata ha dato i risultati attesi, e ora si procederà alla formulazione di famiglie di curve di riferimento di accettabilità, distinte indicativamente in:

Miscele chiuse a caldo

Miscele aperte

Riciclaggio a freddo mediante schiumato ed emulsione.

Cementati

I test potranno validare l'efficacia di prodotti innovativi o migliorativi (additivi, dopes, rigeneranti, fibre, bitumi particolari ecc.), e consentire una migliore comprensione delle modalità di interazione delle materie prime seconde con i materiali vergini.

Inoltre si potranno impiegare le curve per il calcolo della vita utile di pacchetti di pavimentazione per manutenzioni e per nuove costruzioni di progetto ANAS, e ottimizzare l'impiego delle curve di progetto nei lavori stradali.