

## CAPITOLO 8

### ANALISI DEI RISULTATI E CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

#### 8.1 PREMESSE

Come già ampiamente illustrato nel Capitolo 7, l'indagine sperimentale affrontata con la presente tesi è stata caratterizzata dall'obiettivo primario di valutare l'evoluzione nel tempo delle caratteristiche superficiali di usure in conglomerato bituminoso, realizzate con l'impiego di aggregati lapidei di diversa natura petrografica e poste in opera su un tronco stradale in esercizio, con la finalità ultima della elaborazione di un modello analitico di decadimento.

L'analisi dati riportata nel presente Capitolo è stata condotta a valle delle 4 campagne di monitoraggio delle caratteristiche superficiali effettuate sulle pavimentazioni stradali poste in opera (*cfr. Cap.7*). I dati acquisiti sono stati successivamente post elaborati in relazione ad una serie di obiettivi "intermedi" di seguito elencati:

- comprendere l'evoluzione temporale delle caratteristiche superficiali del piano di rotolamento;
- valutare analogie e differenze nello stato evolutivo delle 4 diverse usure in conglomerato bituminoso poste in opera;
- quantificare e valutare l'influenza delle diverse tipologie di aggregati impiegati nel confezionamento del conglomerato bituminoso posto in opera, al fine di identificare le soluzioni progettuali più adeguate all'ottimizzazione delle performance superficiali del piano di rotolamento;
- analizzare la variabilità intrinseca delle misurazioni effettuate, nonché la variabilità legata alla geometria del tracciato (rettifilo/curva) e alla direzione di marcia lungo le wheel tracks (Nord/Sud);
- individuare possibili correlazioni fra dati di tessitura acquisiti attraverso metodiche e strumentazioni diverse
- elaborare un modello matematico di decadimento delle caratteristiche superficiali del piano di rotolamento in funzione dell'entità del traffico veicolare;
- individuare possibili futuri sviluppi di ricerca.

Operazione preliminare è stata quella di procedere ad una omogeneizzazione dei dati mediando i punti monitorati per direzione, senso di marcia e distinguendo fra misure effettuate in rettilineo e misure in curva. L'operazione è stata eseguita per tutti e 4 i rilievi e per ciascuna miscela di conglomerato bituminoso. Laddove per alcuni indicatori in particolare si sono presentate difficoltà di interpretazione numerica dei risultati, nonché di valutazione fenomenologica, si è proceduto, invece, ad una maggiore aggregazione dei dati per individuare comunque linee di tendenze e validare le indicazioni fornite dalla letteratura in proposito. In alcuni casi, in particolare per ciò che riguarda la ricerca di nessi correlativi fra le misure effettuate con diverse strumentazioni, l'aggregazione dei dati si è rivelata poco significativa; pertanto sono state proposte regressioni statistiche a valle dell'identificazione di trend generali (crescenti/decrescenti su tutti i punti monitorati) caratterizzanti alcuni dei più importanti e noti indicatori aggregati e/o disaggregati intrinseci ed estrinseci di tessitura.

## 8.2 EVOLUZIONE TEMPORALE DELLE CARATTERISTICHE SUPERFICIALI

### 8.2.1 Misure di microtessitura - British Pendulum Number (BPN)

Le misure di microtessitura effettuate tramite British Pendulum Tester sulle quattro miscele per i 4 intervalli temporali vengono espresse in termini di BPN (British Pendulum Number (*cfr. Cap.3*). In *Tabella 8.1* viene fornito un quadro sinottico dei risultati mediati sulle wheel track (2 in direzione Nord e 2 in direzione Sud) dei punti in rettilineo per la miscela M0. In *Fig. 8.1* è rappresentata graficamente l'evoluzione temporale dell'indicatore di microtessitura.

Tempo (mesi)	MISCELA M0			
	Rettifilo DX Sud	RETTIFILO SX Sud	Rettifilo DX Nord	Rettifilo SX Nord
<b>0</b>	46	46	47	46
<b>6</b>	49	47	49	48
<b>13</b>	53	49	49	47
<b>18</b>	44	41	45	45

*Tabella 8.1 – Misure di microtessitura sulle wheel track in rettilineo per la miscela M0*

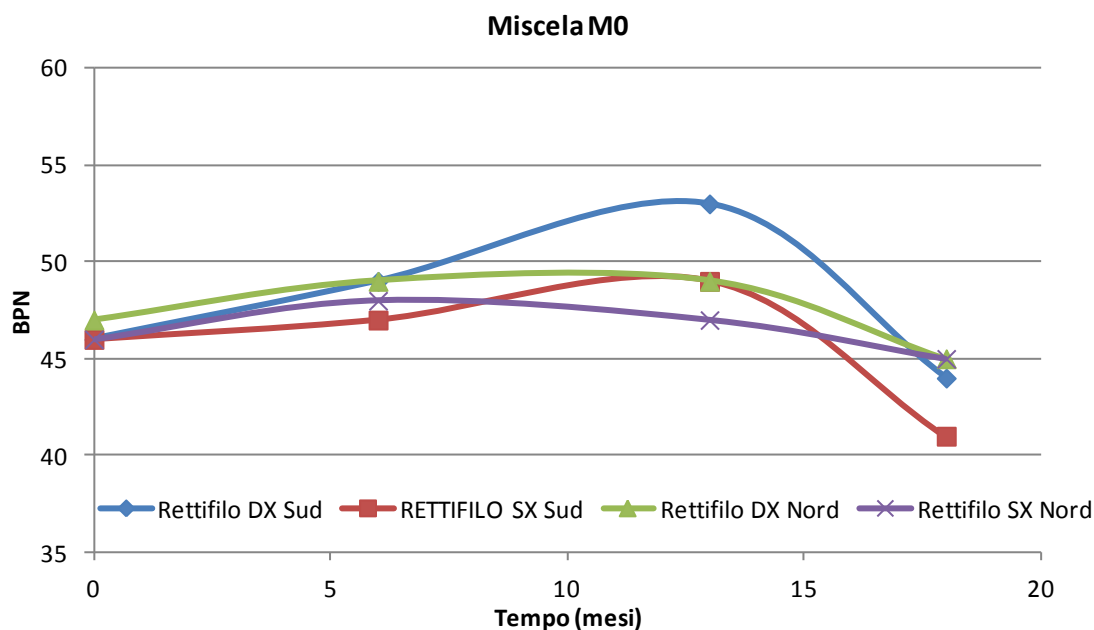


Fig. 8.1 - Evoluzione temporale dell'indicatore di microtessitura sulle wheel track in rettifilo per la miscela M0

I dati acquisiti in situ su tutte le 4 wheel track del rettifilo appartenente al tronco M0 mostrano un andamento prevalentemente crescente del BPN. In particolare, si registrano valori massimi di microtessitura al tempo T pari a 13 mesi (corrispondente alla terza fase del monitoraggio), ossia a poco più di un anno dalla posa in opera del manto superficiale. A T=18 mesi per tutte le wheel tracks si registrano valori di BPN decisamente inferiori rispetto a tutte le altre misurazioni effettuate in precedenza. La medesima procedura ha riguardato l'analisi dati delle misure effettuate in curva (cfr. Tabella 8.2 e Fig. 8.2)

Tempo (mesi)	MISCELA M0			
	Curva DX Sud	Curva SX Sud	Curva DX Nord	Curva SX Nord
<b>0</b>	46	46	47	46
<b>6</b>	46	46	51	47
<b>13</b>	53	50	49	47
<b>18</b>	45	42	47	45

Tabella 8.2 – Misure di microtessitura sulle wheel track in curva per la miscela M0

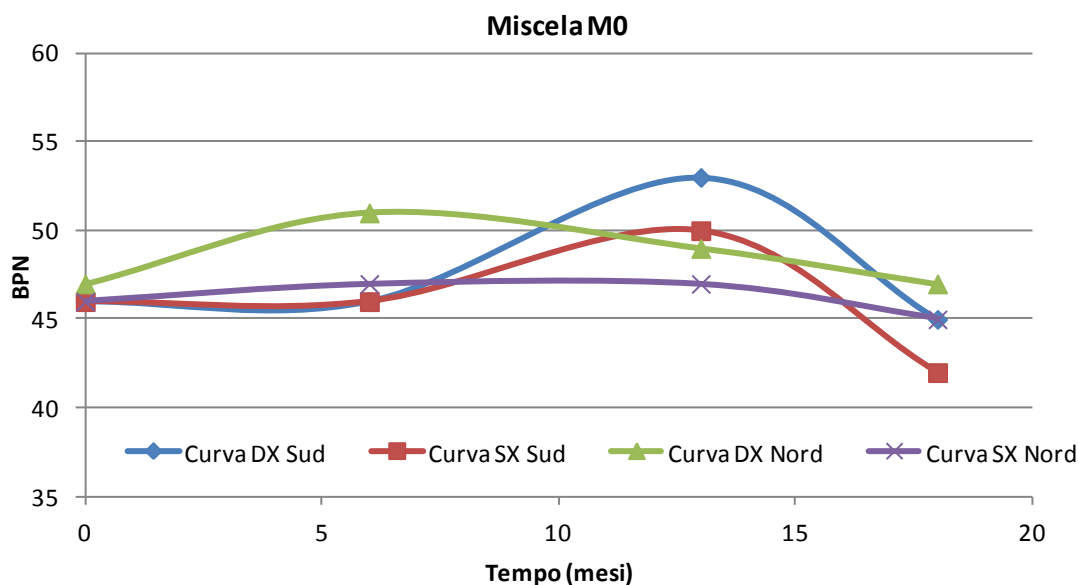


Fig.8.2 - Evoluzione temporale dell'indicatore di microtessitura sulle wheel track in curva per la miscela M0

Per ciò che riguarda le traiettorie curvilinee, per il tratto M0 si registrano andamenti del BPN che, solo in parte, riproducono la fenomenologia osservata per il rettilo. In particolare, da quanto è possibile osservare nel grafico di Fig. , l'andamento del BPN lungo la direzione Nord si rivela ancora crescente, anche se con entità inferiore rispetto a quanto osservato in rettilo; in direzione Sud si mantiene pressoché costante per le prime due misurazioni per mostrare, poi, un incremento dei circa il 10% rispetto al valore iniziale a circa 1 anno.

Anche in questo caso, a T=18 mesi per le wheel tracks in direzione Nord è evidente in maniera significativa una drastica riduzione dei valori di BPN rispetto al picco mostrato; in direzione Sud l'andamento è decisamente meno marcato. Una possibile interpretazione di quest'ultima fenomenologia, che in parte non rispecchia quanto osservato nel 75% dei casi per la miscela M0 potrebbe essere attribuita all'entità del traffico veicolare e/o alla variabilità, già analizzata al Cap. 6 della presente tesi, dovuta alla corretta individuazione delle wheel track reali percorse dai veicoli.

Una analoga omogeneizzazione delle misure ha condotto alla medesima struttura dell'analisi dati per la miscela M1 (cfr. *Tabella 8.3* e *Fig.8.3* per il caso di rettilo; cfr. *Tabella 8.4* e *Fig. 8.4* per i rilievi in curva).

	MISCELA M1			
Tempo (mesi)	Rettifilo DX Sud	RETTIFILO SX Sud	Rettifilo DX Nord	Rettifilo SX Nord
0	49	48	47	48
6	47	46	44	45
13	55	53	53	53
18	51	51	49	48

Tabella 8.3– Misure di microtessitura sulle wheel track in rettifilo per la miscela M1

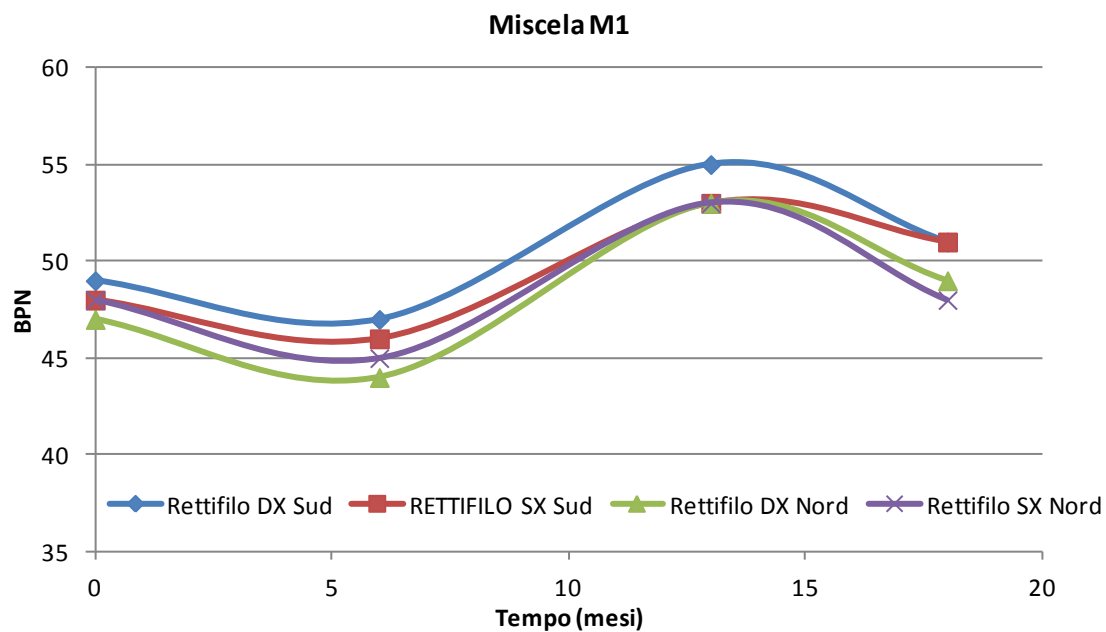


Fig.8.3 - Evoluzione temporale dell'indicatore di microtessitura sulle wheel track in rettifilo per la miscela M1

	MISCELA M1			
Tempo (mesi)	Curva DX Sud	Curva SX Sud	Curva DX Nord	Curva SX Nord
0	47	46	50	49
6	44	44	48	45
13	55	53	52	55
18	49	47	49	48

Tabella 8.4– Misure di microtessitura sulle wheel track in curva per la miscela M1

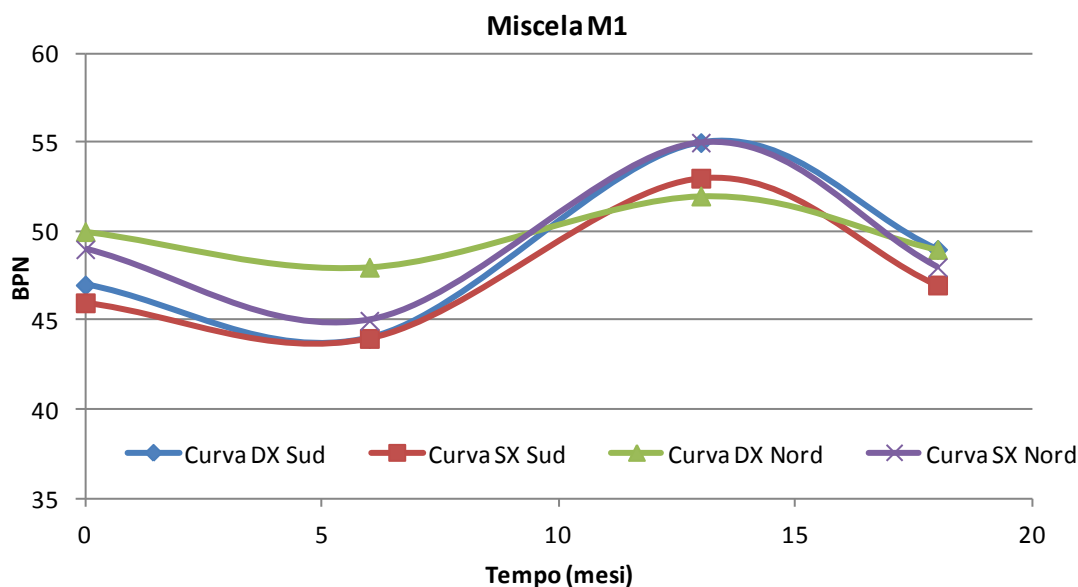


Fig.8.4 - Evoluzione temporale dell'indicatore di microtessitura sulle wheel track in curva per la miscela M1

Lo studio dell'evoluzione delle caratteristiche di microtessitura superficiale per la miscela M1 mostra andamenti analoghi per tutte le wheel tracks, sia in rettilineo che in curva, a meno di scostamenti dell'ordine del 1-2%. In tutti i casi l'analisi dati rivela una fenomenologia diversa rispetto a quanto osservato per la miscela M1: a T=6mesi si registrano valori di BPN inferiori rispetto al valore iniziale; successivamente il BPN torna a crescere fino a raggiungere il valore di picco a T=13 mesi per subire, poi, un'ulteriore diminuzione che, però, non si attesta ancora al minimo registrato a T=6mesi.

I dati relativi alle misure di microtessitura per la miscela M2 vengono riportati in *Tabella 8.5* per le wheel track in rettilineo e in *Tabella 8.6* per quelle in curva. Gli andamenti dell'evoluzione temporale del BPN sono graficamente rappresentati in *Fig. 8.5* e in *Fig. 8.6*, rispettivamente.

Tempo (mesi)	MISCELA M2			
	Rettilineo DX Sud	RETTIFILLO SX Sud	Rettilineo DX Nord	Rettilineo SX Nord
0	51	51	51	52
6	49	48	50	50
13	59	57	55	56
18	52	51	53	53

Tabella 8.5– Misure di microtessitura sulle wheel track in rettilineo per la miscela M2

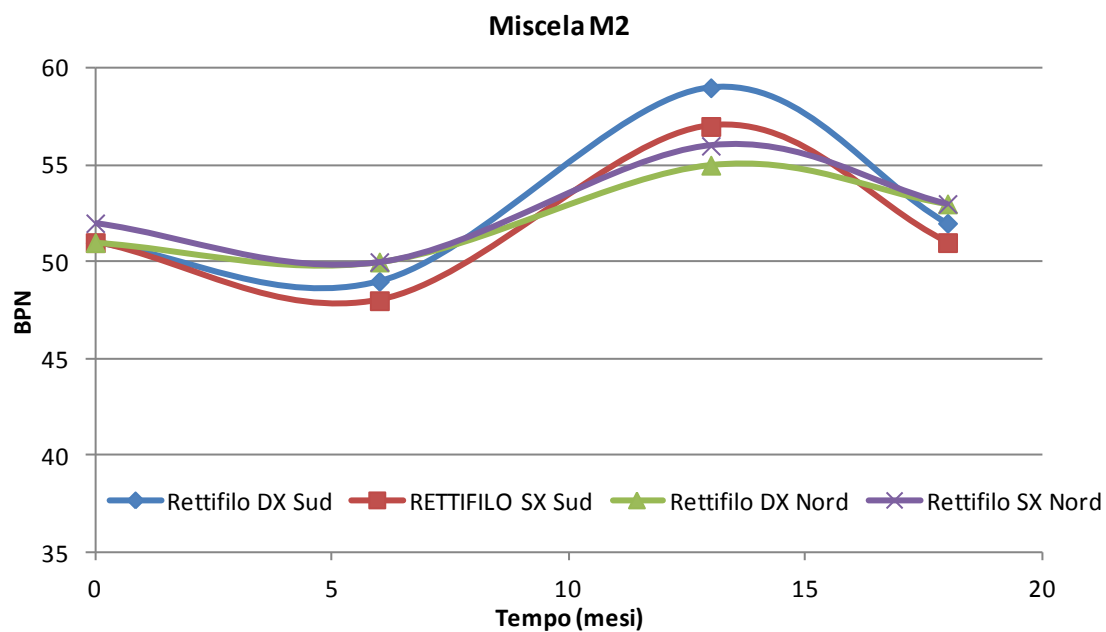


Fig. 8.5- Evoluzione temporale dell'indicatore di microtessitura sulle wheel track in rettifilo per la miscela M2

MISCELA M2				
Tempo (mesi)	Curva DX Sud	Curva SX Sud	Curva DX Nord	Curva SX Nord
0	52	50	53	51
6	48	47	50	46
13	59	56	56	55
18	52	52	53	51

Tabella 8.6– Misure di microtessitura sulle wheel track in curva per la miscela M2

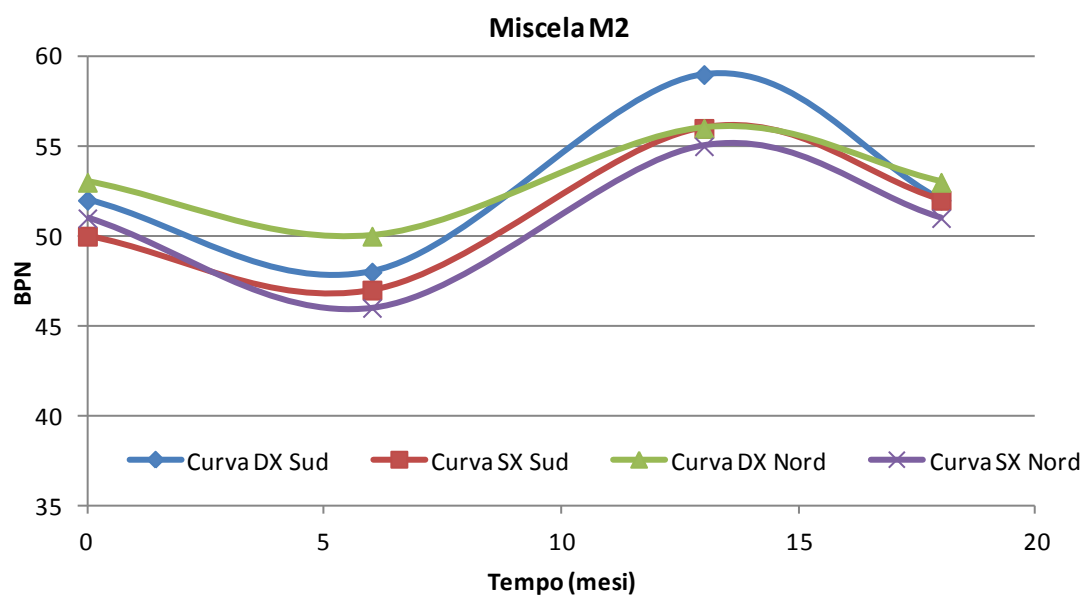
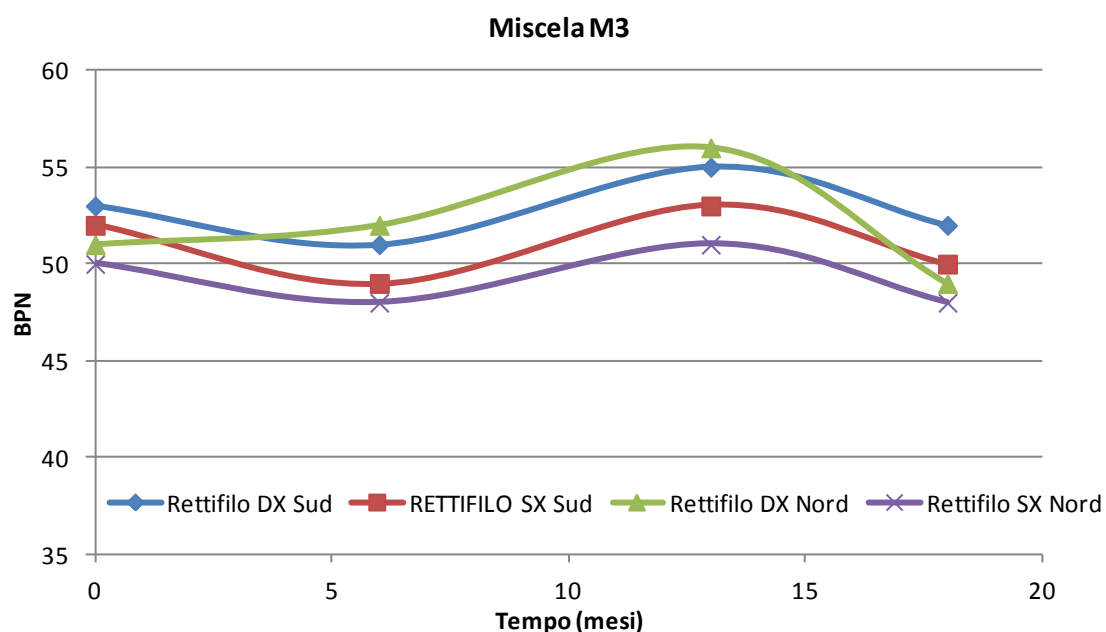


Fig. 8.6- Evoluzione temporale dell'indicatore di microtessitura sulle wheel track in curva per la miscela M2

Considerazioni analoghe a quanto già osservato per la miscela M1 possono essere fatte nel caso della miscela M2. Anche per questa tipologia di usura superficiale si registrano i valori massimi di BPN a T= 13 mesi, intervallo temporale in cui si suppone che si verifichi lo spogliamento completo degli aggregati lapidei. E' inoltre evidente un aumento considerevole dei valori di BPN registrati rispetto alla miscela M0 ed M1; In *Tabella 8.7* e in *Tabella 8.8* vengono riportati i dati relativi alla miscela M3 (rettifilo/curva). I grafici di *Fig. 8.7* e di *Fig.8.8* ne mostrano gli andamenti temporali.

Tempo (mesi)	MISCELA M3			
	Rettifilo DX Sud	RETTIFILO SX Sud	Rettifilo DX Nord	Rettifilo SX Nord
0	53	52	51	50
6	51	49	52	48
13	55	53	56	51
18	52	50	49	48

*Tabella 8.7– Misure di microtessitura sulle wheel track in rettifilo per la miscela M3*



*Fig.8.7 - Evoluzione temporale dell'indicatore di microtessitura sulle wheel track in rettifilo per la miscela M3*

Tempo (mesi)	MISCELA M3			
	Curva DX Sud	Curva SX Sud	Curva DX Nord	Curva SX Nord
0	53	58	50	51
6	54	56	49	50
13	58	57	53	53
18	49	51	51	51

*Tabella 8.8– Misure di microtessitura sulle wheel track in curva per la miscela M3*



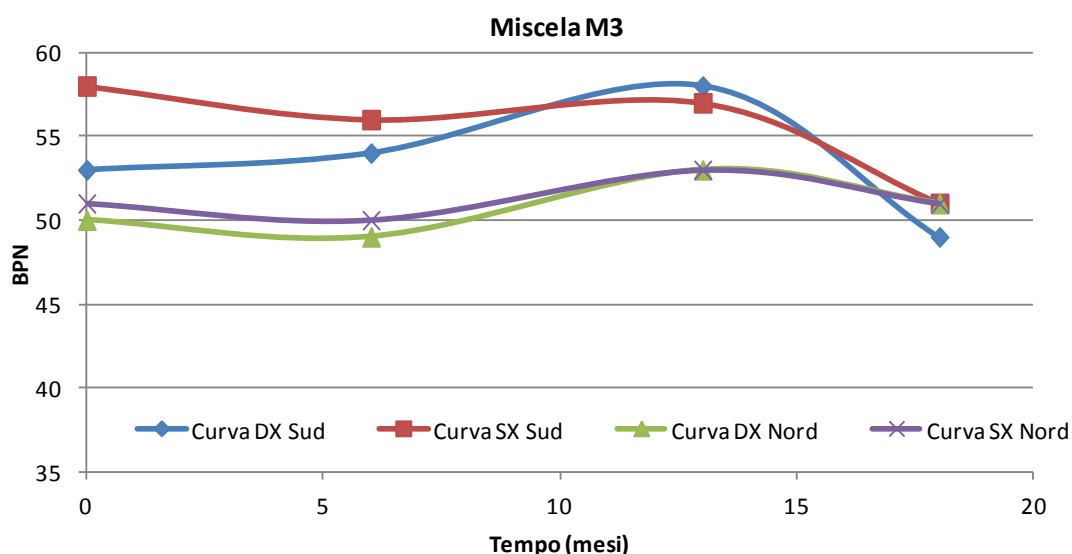


Fig.8.8- Evoluzione temporale dell'indicatore di microtessitura sulle wheel track in curva per la miscela M3

Il comportamento della miscela realizzata con argilla espansa si rivela “intermedio” rispetto a quanto osservato per M0, M1 e M2 e con una forte variabilità rettilo/curva, wheel track destra/sinistra. I rilievi effettuati in curva mostrano lievi diminuzioni a T= 6 mesi rispetto al valore iniziale nel 90% dei casi; tali diminuzioni risultano essere di entità superiore in rettilo. In Tabella 8.9 si riportano gli scostamenti percentuali dei valori di BPN registrati nelle fasi di rilievo successive alla posa in opera rispetto al valore registrato a T=0 e assunto quale riferimento. La rappresentazione grafica di tali scostamenti è visibile nelle Fig. 8.9-8.12 sia per il caso di rilievo effettuato in rettilo che per il caso di misure sulle wheel track in curva. In tal caso, i valori riportati sono stati preventivamente mediati sulle 4 wheel track in rettilo e sulle 4 in curva.

BPN (Variazione Percentuale) [%]		T=0 mesi	T= 6 mesi	T= 13 mesi	T= 18 mesi
Miscela M0	Rettifilo	-	4	7	-5
	Curva	-	3	8	-3
Miscela M1	Rettifilo	-	-5	11	4
	Curva	-	-6	12	1
Miscela M2	Rettifilo	-	-4	11	2
	Curva	-	-7	10	1
Miscela M3	Rettifilo	-	-6	11	2
	Curva	-	-1	4	-5

Tabella 8.9– Variazioni % del BPN rispetto al valore di riferimento a T=0

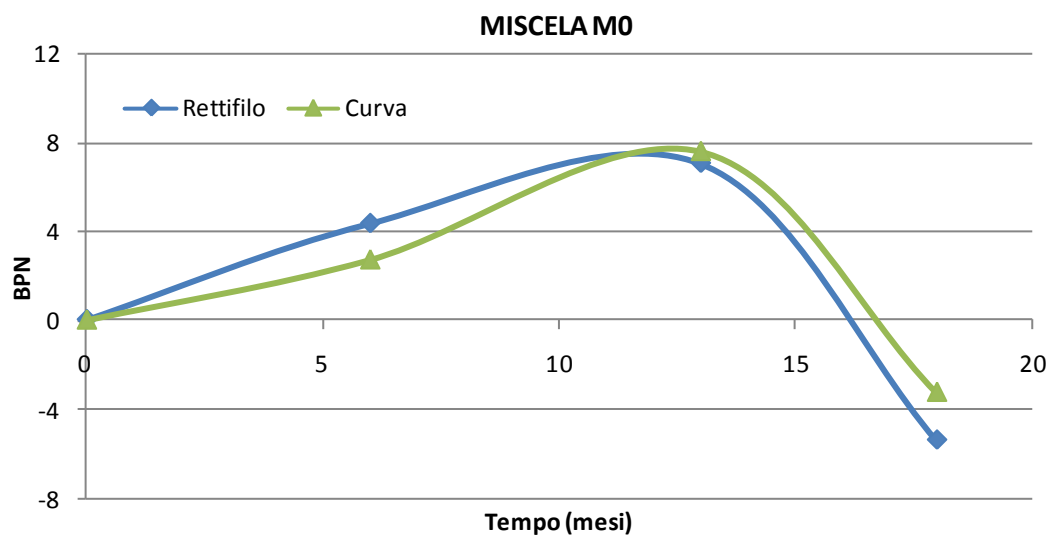


Fig.8.9 - Variabilità temporale dell'indicatore di microtessitura rispetto a  $T=0$  per la miscela M0

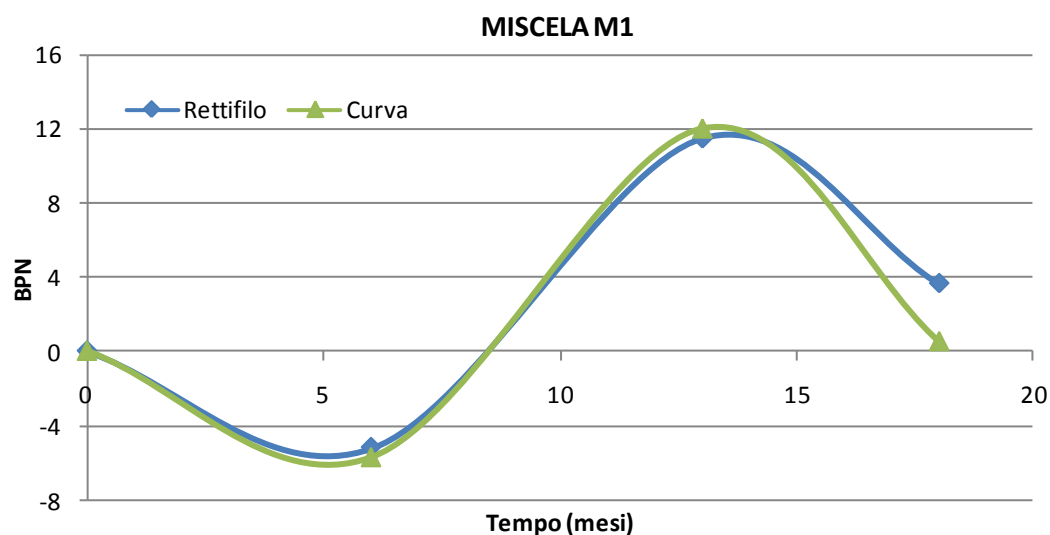


Fig.8.10 - Variabilità temporale dell'indicatore di microtessitura rispetto a  $T=0$  per la miscela M1

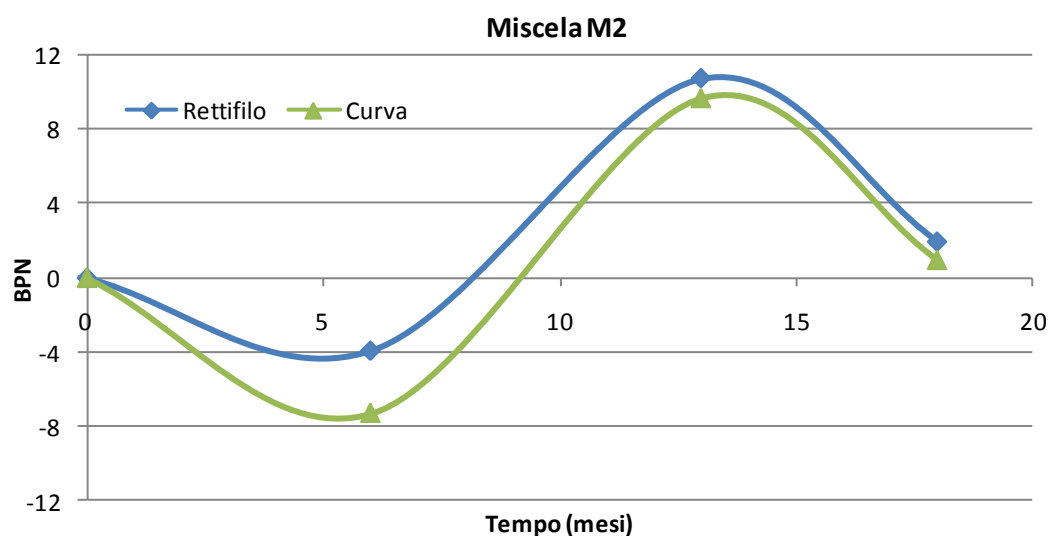


Fig.8.11 - Variabilità temporale dell'indicatore di microtessitura rispetto a T=0 per la miscela M2

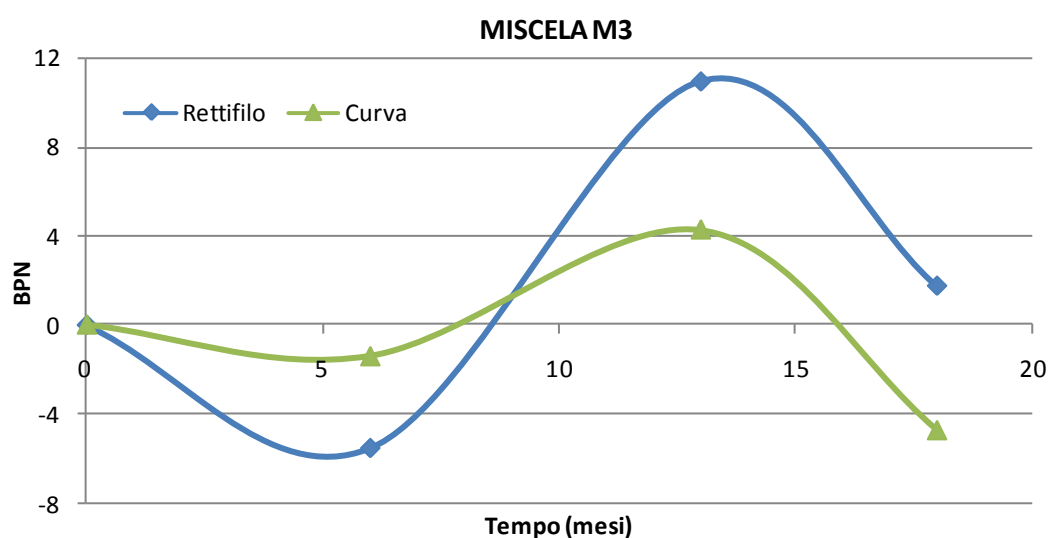


Fig.8.12 - Variabilità temporale dell'indicatore di microtessitura rispetto a T=0 per la miscela M3

### 8.2.2 Analisi comparata ed interpretazione dei risultati

L'analisi comparata delle miscele, effettuata facendo riferimento a valori di BPN mediati sui rettifili lungo tutte le wheel tracks (Fig.8.13), e sulle curve (Fig. 8.14), rivela in maniera semplificata quanto già osservato in precedenza, evidenziando le differenze registrate per la miscela costituita da soli inerti di natura calcarea rispetto a tutte le altre.

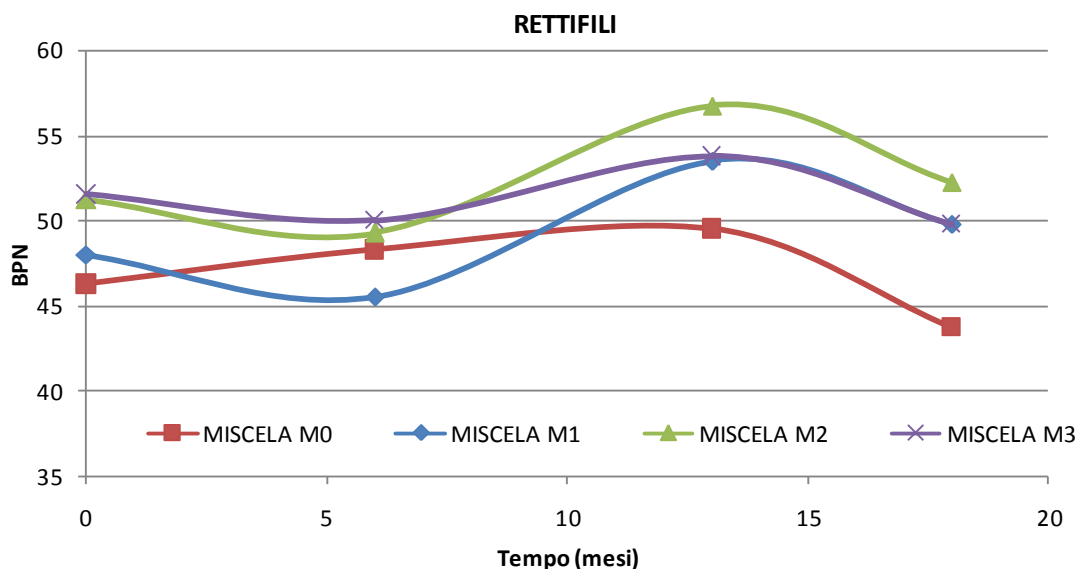


Fig.8.13 - Variabilità temporale dell'indicatore di microtessitura sulle wheel track in rettilineo per le 4 miscele

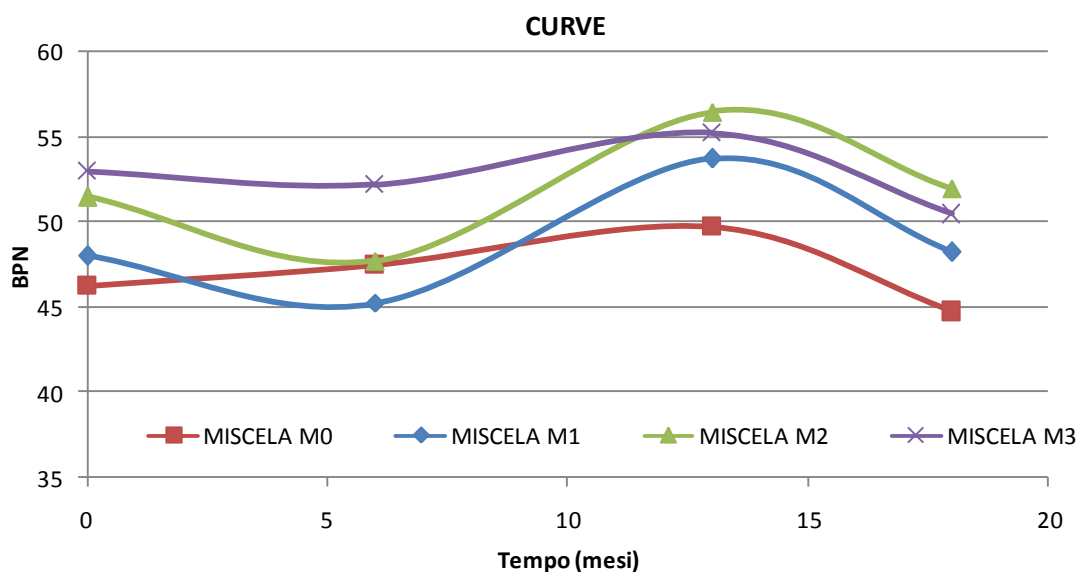


Fig.8.14 - Variabilità temporale dell'indicatore di microtessitura sulle wheel track in curva per le 4 miscele

L'analisi comparata consente di osservare che i valori di BPN registrati per la miscela M0 si attestano, per il 90% dei casi fra 45 e 50, denotando come la natura petrografica dell'aggregato (100% di tipo calcareo), influenzi le performance superficiali in termini di microtessitura e fenomenologia ad essa correlata. Per la miscela M2, realizzata con il 30% di basalto, il range di variabilità del BPN è molto più ampio e le misure di microtessitura assumono valori assoluti compresi fra un minimo di 46 e un massimo di 57, rivelando

l'influenza esercitata proprio dall'aggregato di natura basaltica sulla microtessitura superficiale. L'effetto sulla microtessitura dovuto alla presenza di inerte basaltico nella miscela, inoltre, sembra essere direttamente proporzionale alla quantità di aggregato lapideo utilizzata. I dati sperimentali mostrano che un aumento del 50% della percentuale di basalto nella miscela implica un incremento dell'ordine di 4 punti BPN in tutte le 4 fasi del processo evolutivo studiato (Fig. 8.14 – valori mediati rettilineo/curva).

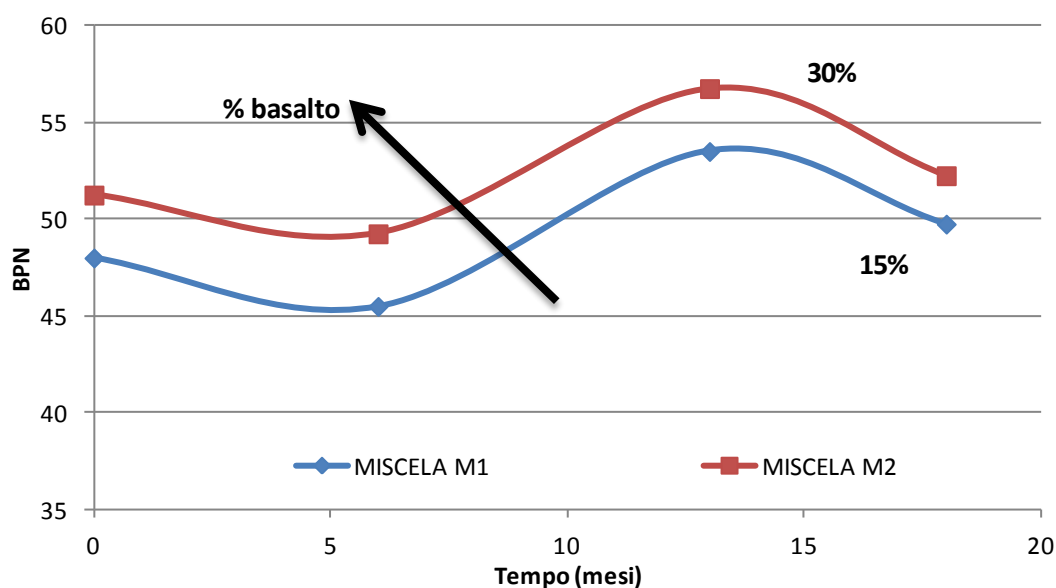


Fig.8.14 – Influenza della percentuale di basalto sull'indicatore di microtessitura per le miscele M1 ed M2

La fenomenologia che caratterizza gli andamenti temporali mostrati nelle Fig. 8.13 e 8.14 potrebbe essere compresa a partire da due distinte ipotesi di fondo, entrambe di seguito esplicitate. In particolare, la dicotomia interpretativa è legata al fatto che un fenomeno evolutivo, per essere compreso a pieno, necessita di un monitoraggio molto più esteso nel tempo. L'orizzonte temporale coperto con i rilievi effettuati (18 mesi dalla posa in opera) non consente una completa e soprattutto univoca interpretazione dei dati che necessiterebbe di almeno un altro step di rilievo a  $T > 2$  anni.

Una prima chiave di lettura della fenomenologia osservata potrebbe derivare da considerazioni in merito alla composizione delle miscele e alla combinazione aggregato-legante. Tale prima ipotesi è identificata come "ipotesi dello spogliamento differenziato". In particolare, infatti, tutte le miscele poste in opera in fase sperimentale sono state confezionate con l'impiego di bitume modificato di tipo "hard" per cui potrebbero verificarsi fenomeni di spogliamento differenziati come ampiamente mostrato dalla letteratura (cfr. Cap.6) [01], [02], [03].

Tale ipotesi conduce ad una prima importante considerazione interpretativa dei risultati numerici elaborati: a T= 13 mesi, per tutte le miscele monitorate, si raggiunge la fase di spogliamento massimo degli aggregati lapidei con la totale rimozione della pellicola di bitume superficiale. In tutti i casi, infatti, sia in rettilineo che in curva, si registrano i valori massimi dell'indicatore di microtessitura proprio in corrispondenza di tale step di rilievo (cfr. Fig.8.13 e Fig.8.14). La miscela M2, poi, presenta in assoluto i valori più elevati di BPN, in tutte le fasi del monitoraggio; di contro, la miscela M0 denota la più spiccata attitudine del calcare alla levigazione e alla lucidatura rispetto all'inerte basaltico. Pertanto, i valori di BPN registrati risultano sempre inferiori rispetto a tutte le altre miscele, fatta eccezione per T=6 mesi in cui i valori di BPN registrati per la miscela M0 risultano addirittura prossimi a quelli misurati sulle usure M2 e M3 (cfr. Tabella 8.10).

Tempo (mesi)	BPN		
	Min		Max
0	M0	M1	M2/M3
6	M1	M0	M2/M3
13	M0	M3/M1	M2
18	M0	M3/M1	M2

Tabella 8.10 – Variabilità del BPN per le diverse miscele poste in opera

A valle di questa prima osservazione dei dati sperimentali è possibile fornire alcune valutazioni sui processi evolutivi registrati. In particolare, proprio in base all'ipotesi dello spogliamento differenziato sopra menzionata, è fondamentale tracciare alcune linee interpretative fondamentalmente legate alle caratteristiche compositive delle diverse miscele.

La miscela M0 è costituita da aggregati di natura calcarea, notoriamente caratterizzati da valori di PSV (Polished Stone Value) decisamente più bassi rispetto a quelli caratteristici di aggregati come il basalto o l'argilla espansa. Pertanto, il comportamento in fase di "early life skid resistance" si rivela, in termini di aderenza offerta, prossimo o addirittura migliore rispetto a quello osservato per le altre miscele. In termini più specifici per l'aggregato calcareo lo spogliamento del film di bitume superficiale avviene già a partire di primi mesi di vita della pavimentazione, determinando così una successiva fase di decadimento più accelerata ed evidentemente di entità superiore rispetto alle altre tipologie di aggregato lapideo con valori "terminali" di BPN (a T=18 mesi) inferiori a 45.

Le miscele M1 ed M2, di contro, mostrano entrambe un decremento iniziale del BPN (a  $t=6$  mesi) dell'ordine del 10-12% (*cfr. Tabella 8.9*) che potrebbe essere legato ancora una volta all'impiego del bitume modificato nella miscela; studi di letteratura a riguardo (*cfr. Cap. 6*) confermano come le marcate proprietà elastiche e coesive di un bitume modificato con l'aggiunta di polimeri possano determinare una maggiore difficoltà nell'innescarsi del processo di spogliamento, in particolar modo se l'aggregato è maggiormente resistente alla levigazione (PSV più elevati). Per tale ragione, l'uso del legante modificato potrebbe essere, in una prima fase, addirittura peggiorativo delle condizioni di aderenza poiché la pellicola di bitume che ricopre gli aggregati diventa ancora più liscia e levigata a causa del transito veicolare, così da determinare la diminuzione iniziale dell'aderenza registrata. Solo successivamente, con un fenomeno di spogliamento vero e proprio, si verifica quell'incremento dell'aderenza legato all'aumento della percentuale di superficie dell'inerte lapideo esposta. Se la quantità di bitume è elevata anche questa seconda fase viene posticipata nel tempo.

Per la miscela M3 i valori di BPN mostrano un'evoluzione temporale analoga a quella osservata per M1 e M2; gli andamenti decisamente meno marcati potrebbero essere correlati anche in questo caso all'effetto combinato legante - aggregato. L'argilla espansa, infatti, è presente nel conglomerato bituminoso con una percentuale in peso pari all'8% che determina un PSV della miscela di aggregati, stimato a partire da indicazioni rinvenute in letteratura, intermedio rispetto a quello caratteristico della miscela di inerti che costituiscono le usure M1 ed M2. Pertanto potrebbe così interpretarsi l'assenza di un decremento importante di BPN in fase iniziale.

Una seconda possibile chiave di lettura della fenomenologia osservata, pur derivando anch'essa da considerazioni in merito alle caratteristiche compositive delle miscele, è strettamente correlata a valutazioni in merito all'evoluzione temporale della microtessitura rispetto ad un valore teorico di BPN "finale" stimato a partire dal PSV minimo delle miscele di aggregati utilizzate. Tale ipotesi viene identificata nella trattazione come "*ipotesi del valore soglia*". Un approccio di questo tipo consentirebbe di cogliere se la variabilità dei dati rispecchia un fenomeno evolutivo ancora in atto oppure se l'entità di tali variazioni è esclusivamente legata a fluttuazioni stagionali. E' evidente come questo secondo approccio abbia quali posizioni iniziali l'assunzione di modelli analitici di letteratura sia per ciò che attiene alla levigabilità intrinseca degli aggregati che alla funzione di trasformazione di questa

attitudine in valori di aderenza. Fatta questa doverosa premessa di approccio metodologico è possibile descrivere in maniera adeguata la fenomenologia osservata.

Nel contesto di tale seconda ipotesi, tuttavia, è fondamentale esplicitare alcune limitazioni procedurali. In primo luogo, i valori di PSV caratteristici delle diverse miscele non sono stati determinati sperimentalmente, ma calcolati a partire da valori noti di letteratura per gli inerti di diversa natura (calcare, basalto, argilla espansa) e in funzione della percentuale in peso che ciascuna famiglia mineralogica ha nella singola miscela (*cfr. Tabella 8.11*). Per il calcolo dei PSV minimi è stata fissata, in base ad indicazioni rinvenute in bibliografia [04], [05], una percentuale di riduzione del PSV iniziale degli aggregati pari al 30%. E' opportuno qui sottolineare che la finalità di un tale approccio, di carattere puramente teorico, è quello di stimare dei valori terminali di aderenza, pur contemplando evidentemente un fattore di variabilità intrinseca legato alla procedura seguita, nell'ottica di comprendere quale sia lo stato evolutivo che caratterizza, ad oggi, le pavimentazioni sperimentali.

	PSV* (Stimati)	PSV <sub>min</sub> * (Stimati)
<b>M0</b>	35	25
<b>M1</b>	42	29
<b>M2</b>	48	34
<b>M3</b>	38	27

Tabella 8.11 – Valori stimati dei PSV e dei PSV minimi per le diverse miscele

Il calcolo del valore di soglia del BPN è stato effettuato, a partire da indicazioni rinvenute in letteratura, secondo la seguente espressione analitica:

(1)

in cui:

$SN_{terminal}$ : valore terminale dello skid number (ASTM E-274);

PV= minimum Polish Stone Value.

E' evidente, dunque, la trasposizione da effettuare per il caso in esame da un indicatore di aderenza (SN40), misurato con dispositivo ad alta velocità e a ruota bloccata, ad un indicatore, il BPN, determinato con strumentazione di rilievo a bassa velocità. La trasformazione da indicatore SN40 ad indicatore BPN è stata effettuata tramite equazioni di correlazione rinvenute in letteratura [07]:

(2)



in cui:

è lo skid number misurato con pneumatico scanalato (ribbed tire), mentre

è il valore del coefficiente di aderenza misurato con pneumatico liscio (smooth tire).

Poiché la correlazione del BPN con il termine SB40S è caratterizzata da un coefficiente molto minore di 1, l'equazione (2) può essere semplificata nella (3):

(3)

I valori di BPN terminali stimati secondo la procedura di cui sopra sono riportati in *Tabella 8.12*.

BPN MINIMO CALCOLATO			
M0	M1	M2	M3
34	40	45	36

Tabella 8.12 – Valori calcolati di BPN minimo

Per comprendere meglio lo stato del fenomeno evolutivo delle pavimentazioni ed effettuare una valutazione relativamente al valore minimo del BPN calcolato secondo la procedura analitica sopra descritta si riportano nelle *Fig. 8.15- 8.18* gli andamenti temporali del BPN per le quattro miscele mediati per le wheel track in rettifilo e in curva.

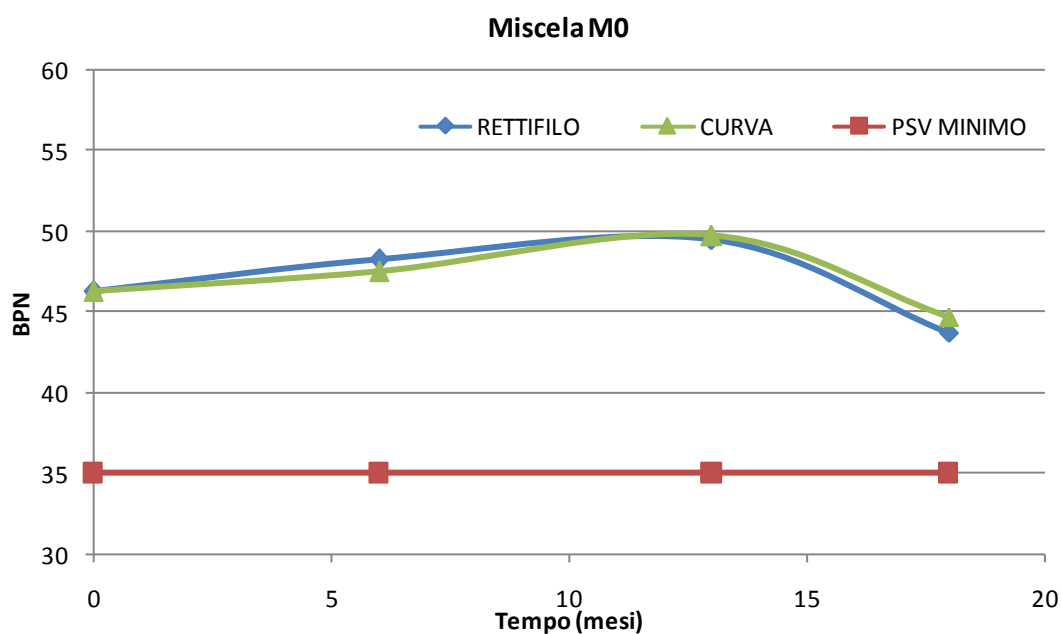


Fig.8.15 – Evoluzione temporale del BPN e indicazione del BPN minimo calcolato per la miscela M0

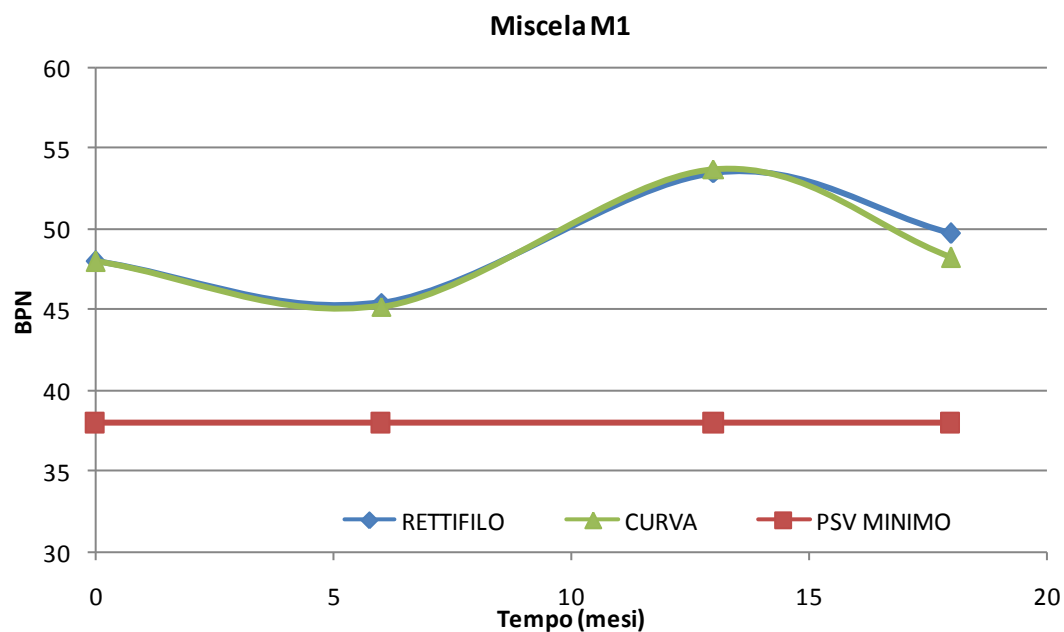


Fig.8.16 – Evoluzione temporale del BPN e indicazione del BPN minimo calcolato per la miscela M1

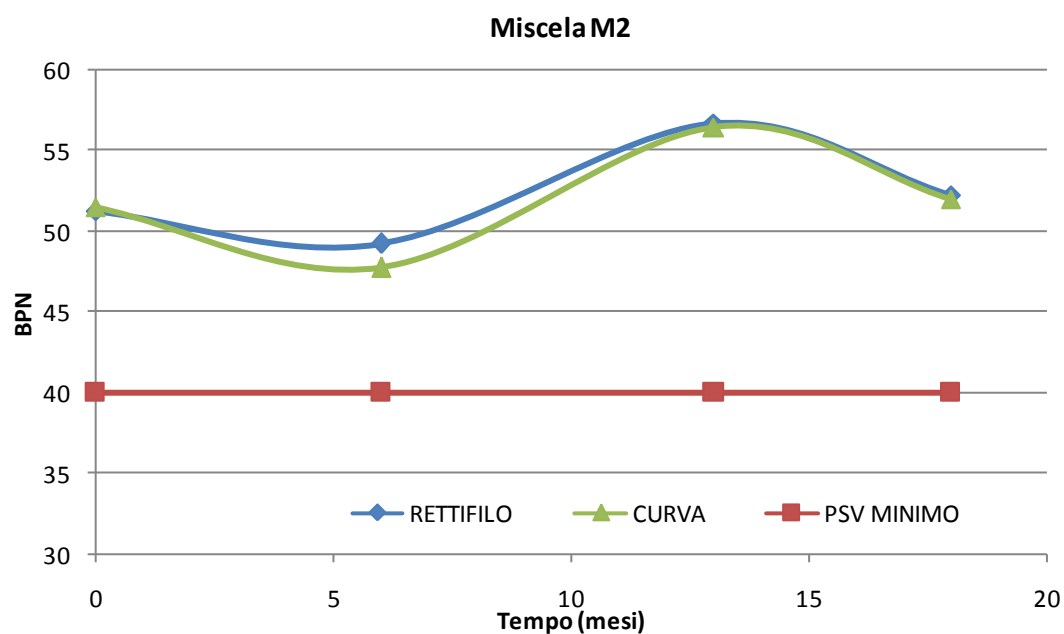


Fig.8.17 – Evoluzione temporale del BPN e indicazione del BPN minimo calcolato per la miscela M2

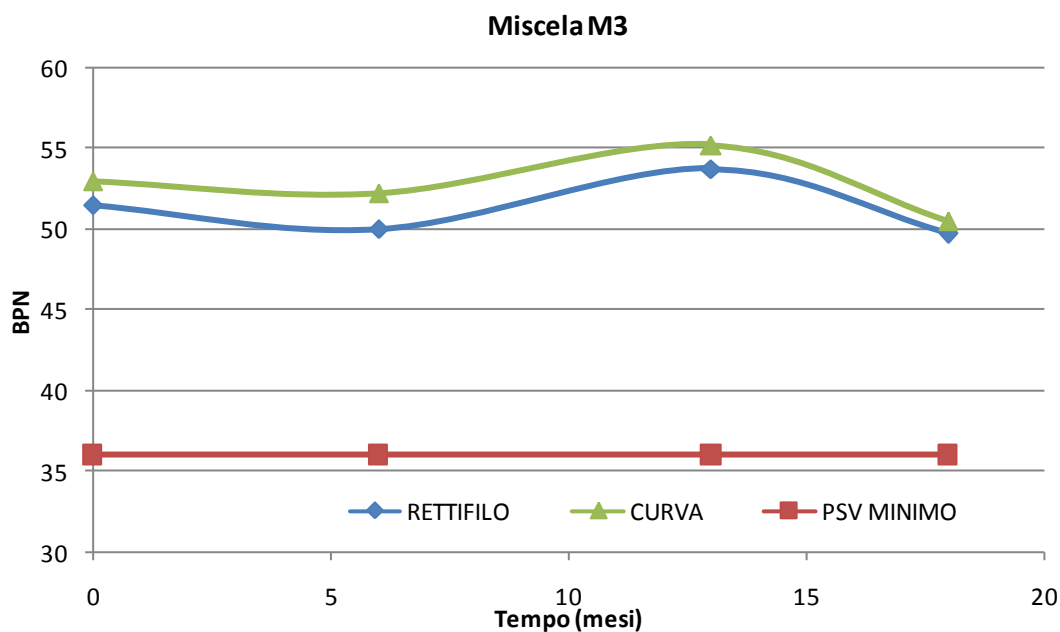


Fig.8.18 – Evoluzione temporale del BPN e indicazione del BPN minimo calcolato per la miscela M3

Come è possibile osservare dai grafici delle Fig. 8.15- 8.18 per tutte le 4 miscele si può ritenere che la variabilità della microtessitura sia caratterizzata, a ragione, da un fenomeno di decadimento iniziato in corrispondenza del tempo  $t=13$  mesi. Tale decadimento è ancora di entità ridotta a  $T=18$  mesi; il  $\Delta BPN$  valutato come differenza fra il valore del BPN misurato al tempo  $T=18$  mesi e quello minimo teorico previsto è variabile da miscela a miscela. Per la miscela M0, in particolare, assume il valore minimo per la miscela M0 e il valore massimo per la miscela M3 (cfr Tabella 8.13)

$\Delta BPN (BPN_{18\text{mesi}} - BPN_{\text{min calcolato}})$			
M0	M1	M2	M3
9	10	12	15

Tabella 8.13– Valori stimati del  $\Delta BPN$

A valle delle considerazioni fatte, dunque, si ritiene valida l'interpretazione fenomenologica dello spogliamento differenziato, avvalorata dalla verifica dell'ipotesi del valore soglia che mostra come per tutte le 4 miscele ci sia un fenomeno evolutivo appena iniziato e, pertanto, la variabilità registrata nell'indicatore di microtessitura BPN non è indice di fluttuazioni stagionali ma è interpretabile secondo quanto proposto nell'ipotesi di spogliamento differenziato.

### 8.2.2 Misure di macrotestitura – Metodo dell'altezza in sabbia (HS)

Le misure di macrotestitura effettuate tramite Metodo dell'altezza in sabbia sulle quattro miscele per i 4 intervalli temporali vengono espresse in termini di HS (*cfr. Cap.3*). In *Tabella 8.14* viene fornito un quadro sinottico dei risultati mediati sulle wheel track (2 in direzione Nord e 2 in direzione Sud) dei punti monitorati in rettifilo per la miscela M0. In *Fig. 8.19* è rappresentata graficamente l'evoluzione temporale dell'indicatore di macrotestitura.

Tempo (mesi)	MISCELA M0- HS [mm]			
	Rettifilo DX Sud	RETTIFILO SX Sud	Rettifilo DX Nord	Rettifilo SX Nord
0	0,47	0,47	0,49	0,46
6	0,39	0,40	0,40	0,41
13	0,41	0,44	0,42	0,47
18	0,42	0,43	0,41	0,42

Tabella 8.14 – Misure di macrotestitura sulle wheel track in rettifilo per la miscela M0

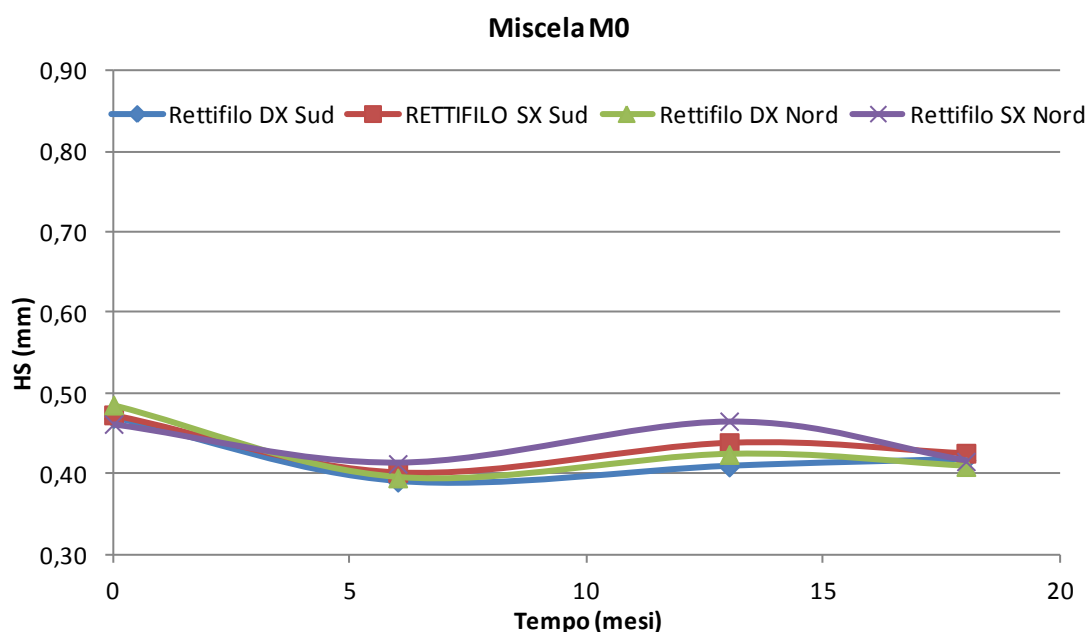


Fig.8.19 - Evoluzione temporale dell'indicatore di macrotestitura sulle wheel track in rettifilo per la miscela M0

I risultati sperimentali dei rilievi effettuati lungo le wheel track in curva per il tratto M0 sono riassunti in *Tabella 8.15*. La *Fig. 8.20* mostra il processo evolutivo della macrotestitura nel tempo.

	MISCELA M0- HS [mm]			
Tempo (mesi)	Curva DX Sud	Curva SX Sud	Curva DX Nord	Curva SX Nord
0	0,49	0,45	0,50	0,53
6	0,40	0,39	0,40	0,44
13	0,44	0,47	0,46	0,47
18	0,43	0,46	0,42	0,43

Tabella 8.15 – Misure di macrotestitura sulle wheel track in curva per la miscela M0

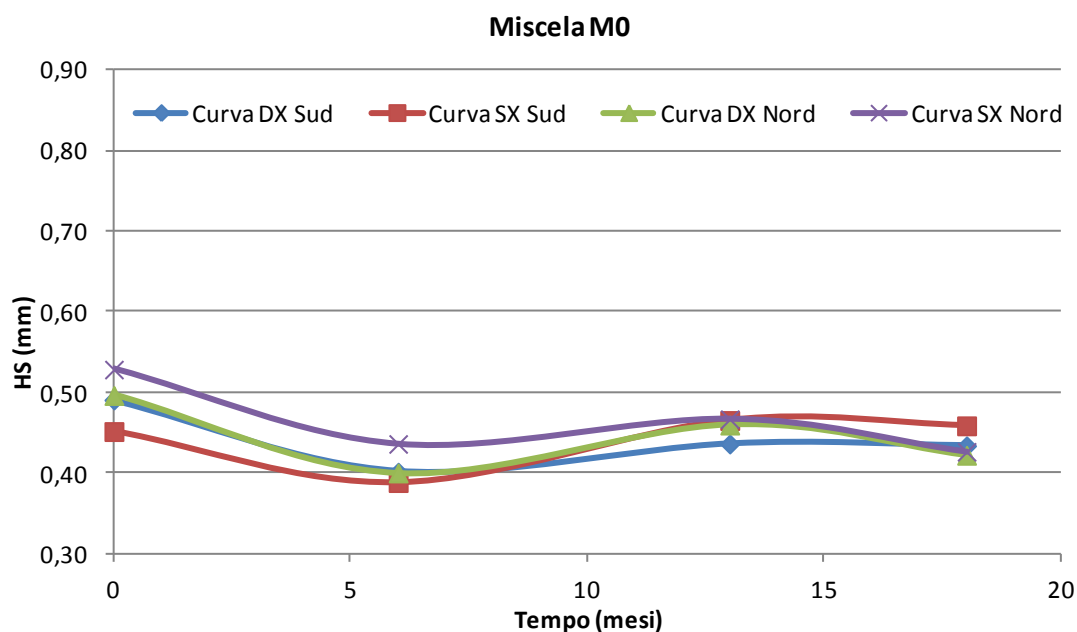


Fig. 8.20 - Evoluzione temporale dell'indicatore di macrotestitura sulle wheel track in curva per la miscela M0

La variabilità della macrotestitura mostra, per la miscela M0, sia in rettilineo che in curva, andamenti del tutto analoghi con un decremento iniziale a T= 6mesi e un nuovo incremento a T=13mesi. Non si registrano, infine, sostanziali differenze fra terzo e quarto rilievo.

I dati relativi alle misure di macrotestitura per la miscela M1 vengono riportati in *Tabella 8.16* per le wheel track in rettilineo e in *Tabella 8.17* per quelle in curva. Gli andamenti dell'evoluzione temporale dell'indicatore HS sono graficamente rappresentati in *Fig. 8.21* e in *Fig. 8.22*, rispettivamente.

	MISCELA M1- HS [mm]			
Tempo (mesi)	Rettifilo DX Sud	RETTIFILLO SX Sud	Rettifilo DX Nord	Rettifilo SX Nord
0	0,54	0,46	0,52	0,53
6	0,42	0,39	0,42	0,41
13	0,43	0,45	0,43	0,44
18	0,52	0,50	0,45	0,47

Tabella 8.16 – Misure di macrotestitura sulle wheel track in rettilineo per la miscela M1

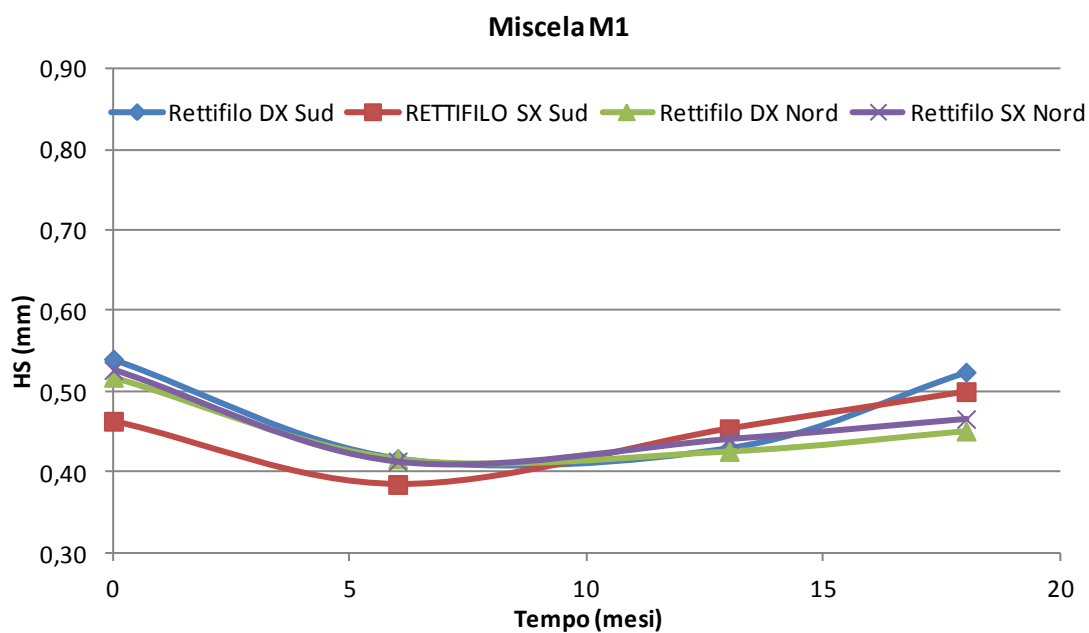


Fig.8.21 - Evoluzione temporale dell'indicatore di macrotestitura sulle wheel track in rettifilo per la miscela M1

MISCELA M1- HS [mm]				
Tempo (mesi)	Curva DX Sud	Curva SX Sud	Curva DX Nord	Curva SX Nord
0	0,45	0,48	0,54	0,52
6	0,38	0,41	0,42	0,45
13	0,37	0,45	0,45	0,45
18	0,47	0,60	0,55	0,52

Tabella 8.17 – Misure di macrotestitura sulle wheel track in curva per la miscela M1

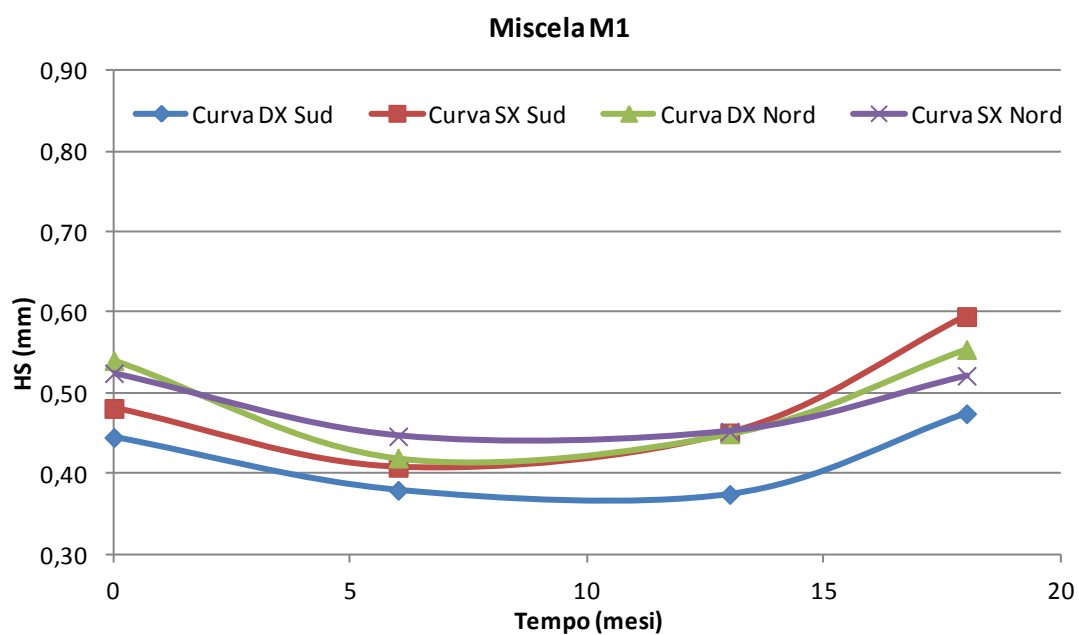


Fig.8.22 - Evoluzione temporale dell'indicatore di macrotestitura sulle wheel track in curva per la miscela M1

Anche la miscela M1 mostra una diminuzione iniziale di Hs a T= 6mesi. A T=12 mesi si verifica un nuovo incremento di HS di entità maggiore rispetto a quello osservato per la miscela M0; incremento che a T=18 mesi fa attestare l'HS attorno ai valori iniziali.

Una analoga omogeneizzazione delle misure ha condotto alla medesima struttura dell'analisi dati per la miscela M2 (cfr. *Tabella 8.18* e *Fig.8.21* per il caso di rettifilo; cfr. *Tabella 8.19* e *Fig. 8.22* per i rilievi in curva).

Tempo (mesi)	MISCELA M2- HS [mm]			
	Rettifilo DX Sud	RETTIFILO SX Sud	Rettifilo DX Nord	Rettifilo SX Nord
0	0,52	0,54	0,52	0,58
6	0,39	0,47	0,41	0,48
13	0,41	0,45	0,43	0,48
18	0,42	0,49	0,46	0,50

Tabella 8.18 – Misure di macrotestitura sulle wheel track in rettifilo per la miscela M2

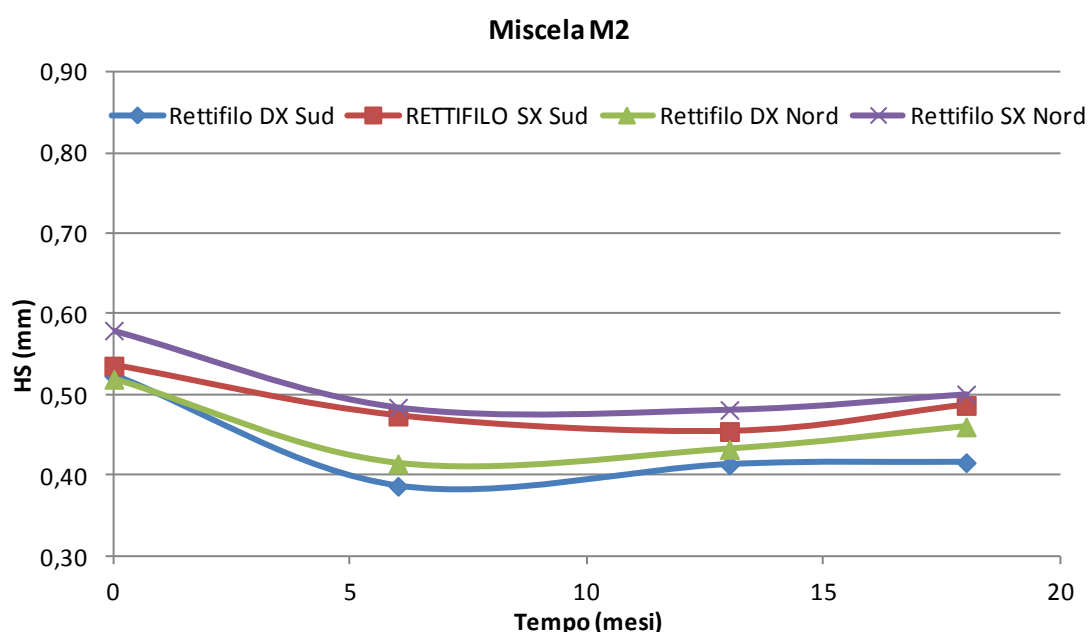


Fig.8.23 - Evoluzione temporale dell'indicatore di macrotestitura sulle wheel track in rettifilo per la miscela M2

Tempo (mesi)	MISCELA M2- HS [mm]			
	Curva DX Sud	Curva SX Sud	Curva DX Nord	Curva SX Nord
0	0,42	0,45	0,56	0,58
6	0,45	0,48	0,43	0,48
13	0,44	0,48	0,46	0,47
18	0,46	0,50	0,46	0,49

Tabella 8.19 – Misure di macrotestitura sulle wheel track in curva per la miscela M2

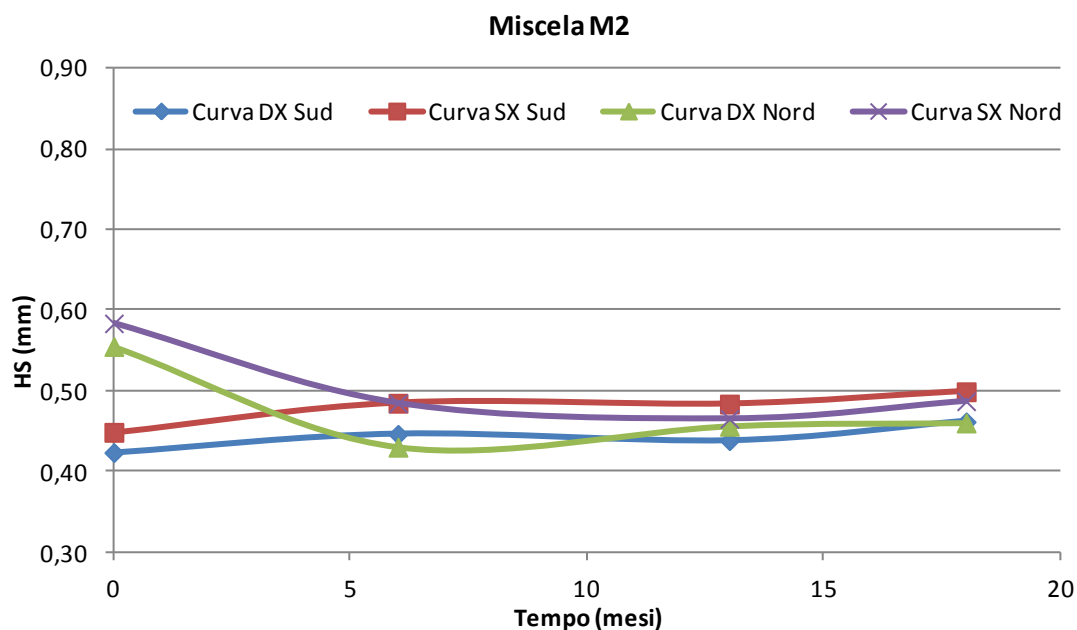


Fig.8.24 - Evoluzione temporale dell'indicatore di macrotestitura sulle wheel track in curva per la miscela M2

La miscela M2 mostra andamenti analoghi ai precedenti. Caso particolare è rappresentato dal rilievo in curva per cui, mentre lungo le wheel track in direzione Nord (destra e sinistra) si registrano fenomenologie comuni alle altre miscele, lungo le wheel track in direzione Sud i valori iniziali di HS risultano decisamente più bassi. Data la numerosità di dati che confermano una diminuzione iniziale di HS si ritiene che, per i rilievi effettuati sulla corsia Sud del tratto M2, possano essere subentrati fattori di incertezza nelle misure legati, probabilmente, alla identificazione delle wheel track reali percorse dai veicoli (*cfr. Cap.6*).

I dati relativi alle misure di macrotestitura per la miscela M3 vengono riportati in *Tabella 8.20* per le wheel track in rettilineo e in *Tabella 8.21* per quelle in curva. Gli andamenti dell'evoluzione temporale dell'indicatore HS sono graficamente rappresentati in *Fig. 8.25* e in *Fig. 8.26*, rispettivamente.

Tempo (mesi)	MISCELA M3 - HS [mm]			
	Rettifilo DX Sud	RETTIFILO SX Sud	Rettifilo DX Nord	Rettifilo SX Nord
0	0,51	0,56	0,45	0,45
6	0,38	0,44	0,35	0,37
13	0,33	0,38	0,32	0,36
18	0,34	0,39	0,36	0,39

Tabella 8.20 – Misure di macrotestitura sulle wheel track in rettilineo per la miscela M3



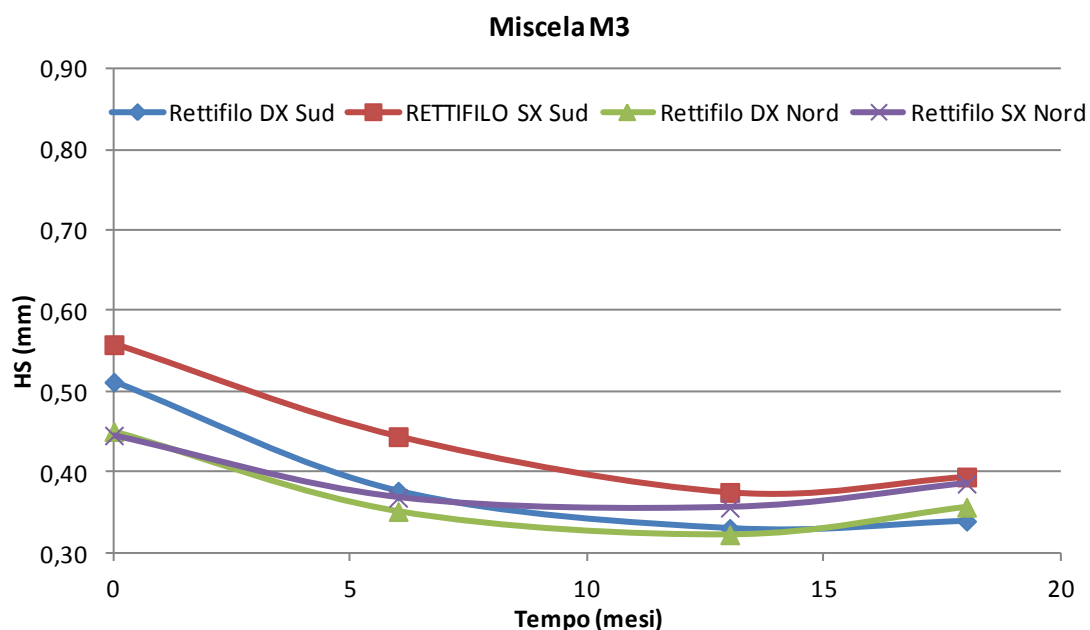


Fig.8.25- Evoluzione temporale dell'indicatore di macrotestitura sulle wheel track in rettifilo per la miscela M3

MISCELA M3 - HS [mm]				
Tempo (mesi)	Curva DX Sud	Curva SX Sud	Curva DX Nord	Curva SX Nord
0	0,52	0,62	0,53	0,55
6	0,44	0,45	0,38	0,43
13	0,39	0,42	0,34	0,40
18	0,41	0,46	0,37	0,45

Tabella 8.21 – Misure di macrotestitura sulle wheel track in curva per la miscela M3

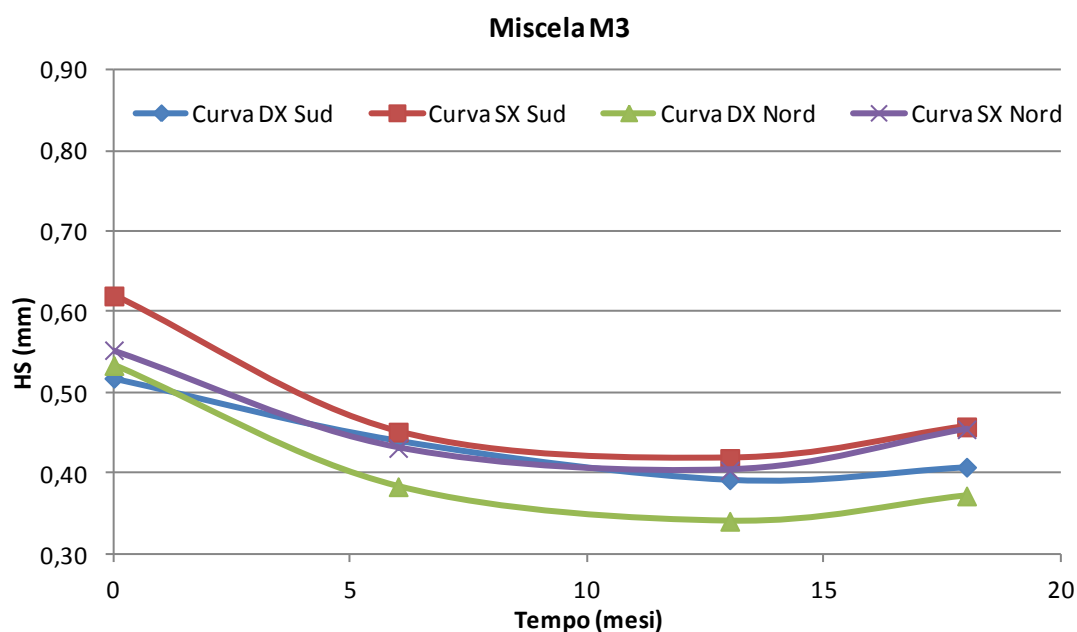


Fig.8.26- Evoluzione temporale dell'indicatore di macrotestitura sulle wheel track in curva per la miscela M3

Le valutazioni in merito alla profondità di tessitura (misurata con il metodo dell'altezza in sabbia) mostrano andamenti simili per tutte le 4 miscele poste in opera. Il trend evolutivo vede una fase iniziale (a T=6 mesi) in cui si registrano decrementi di HS di entità variabile dal 15% (Miscela M0) al 18% (Miscela M3) (cfr. *Tabella 8.22*). Tali decrementi potrebbero essere correlati a fenomeni di migrazione del legante e ad una post-compattazione del conglomerato bituminoso posto in opera a causa del traffico veicolare. La successiva rimozione del film di bitume, nonché del legante precedentemente migrato fa sì che si registrino a T=18 mesi nuovi lievi incrementi di HS di entità ancora una volta variabili da un minimo di 0,01mm (Miscela M2) ad un massimo di 0,04 mm (Miscela M2 e M1). Tali incrementi si verificano anche nel caso della miscela M3 pur registrandosi a t=18 mesi valori di HS nettamente inferiori rispetto ai valori iniziali. Quanto osservato, dunque, per l'evoluzione temporale della macrotessitura sembra avvalorare le ipotesi fatte in merito al decadimento della microtessitura misurata attraverso British Pendulum: lo spogliamento degli aggregati e la progressiva rimozione del bitume migrato ad opera delle azioni dovute al traffico veicolare determina a T=18 mesi nuovi incrementi di HS.

In *Tabella 8.22* si riportano, così come per il BPN, gli scostamenti percentuali dei valori di HS registrati nelle fasi di rilievo successive alla posa in opera rispetto al valore registrato a T=0 e assunto quale riferimento. La rappresentazione grafica di tali scostamenti è visibile nelle *Fig. 8.27-8.30* sia per il caso di rilievo effettuato in rettifilo che per il caso di misure sulle wheel track in curva. In tal caso, i valori riportati sono stati preventivamente mediati sulle 4 wheel track in rettifilo e sulle 4 in curva.

HS (Incremento Percentuale) [%]		T=0 mesi	T= 6 mesi	T= 13 mesi	T= 18 mesi
Miscela M0	Rettifilo	-	-15	-8	-3
	Curva	-	-14	-12	-8
Miscela M1	Rettifilo	-	-14	-7	+3
	Curva	-	-12	-9	+14
Miscela M2	Rettifilo	-	-7	-6	-1
	Curva	-	-2	-2	+1
Miscela M3	Rettifilo	-	-18	-27	-22
	Curva	-	-10	-18	-10

*Tabella 8.22 – Scostamenti percentuali dei valori di HS rispetto al valore registrato a T=0*

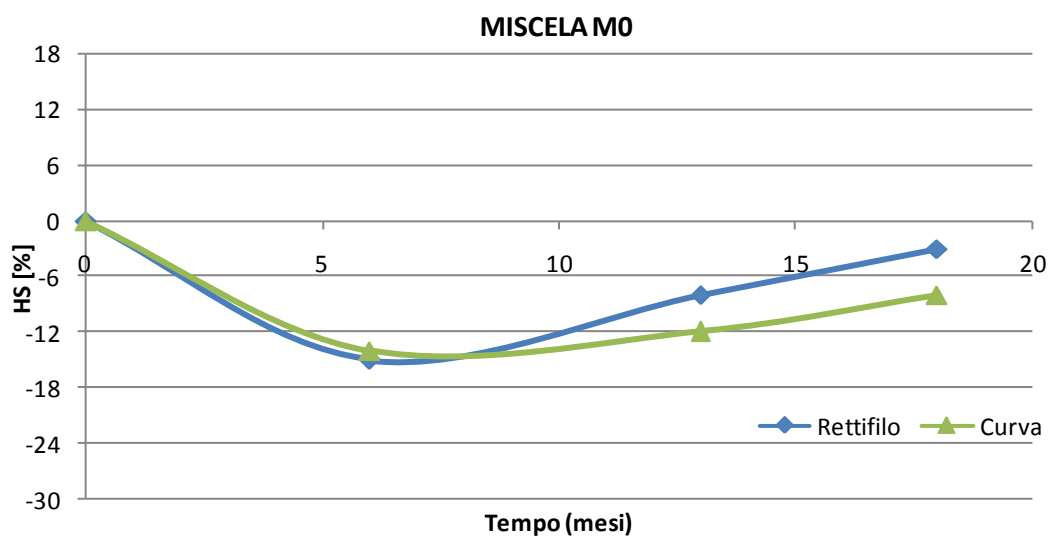


Fig.8.27 - Variabilità temporale dell'indicatore di macrotestitura rispetto a  $T=0$  per la miscela M0

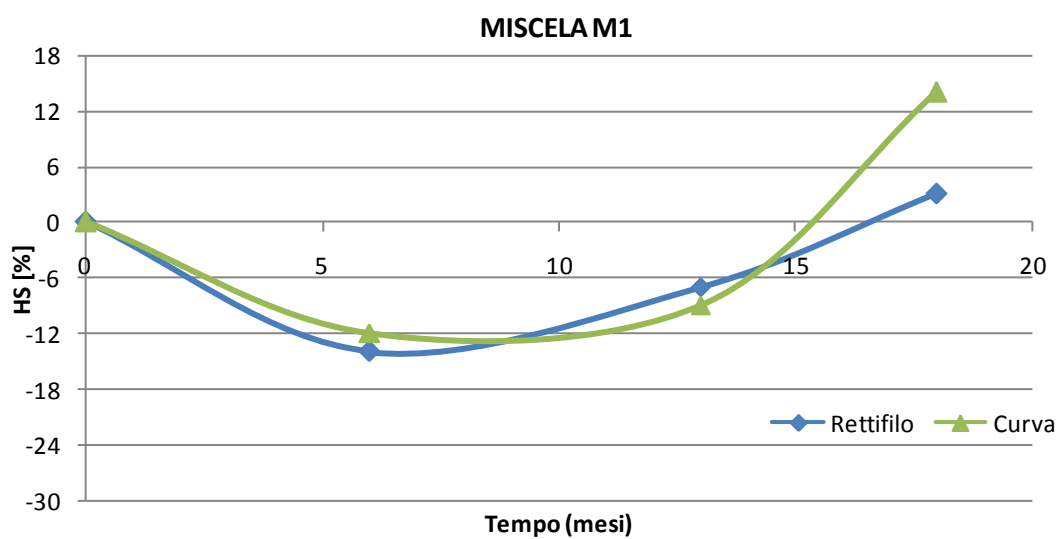
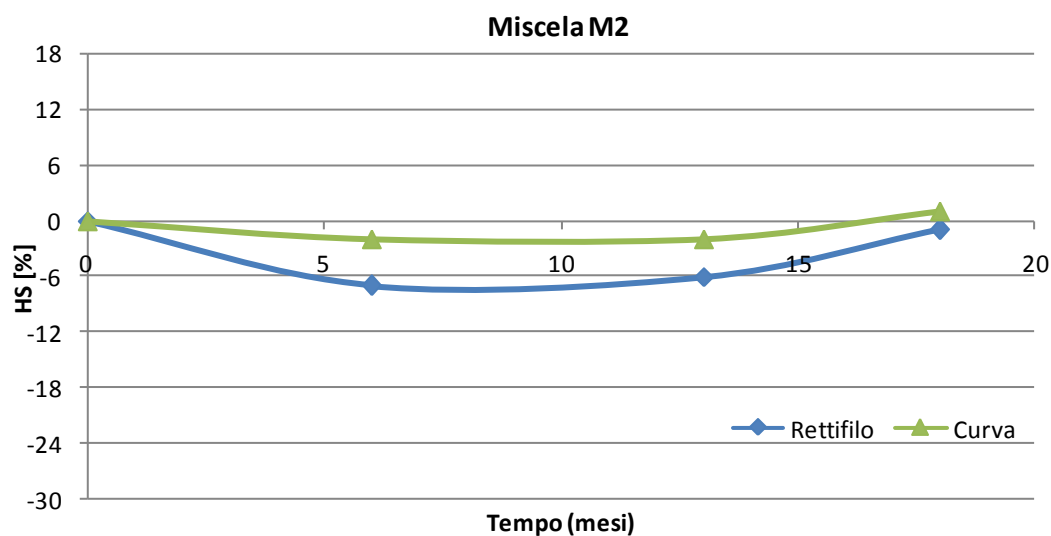
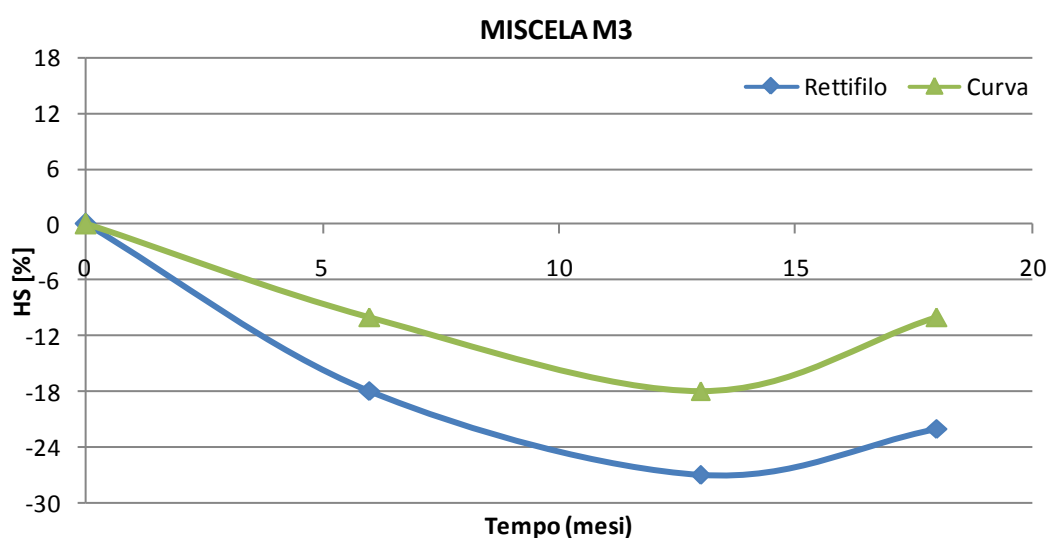


Fig.8.28 - Variabilità temporale dell'indicatore di macrotestitura rispetto a  $T=0$  per la miscela M1

Fig.8.29 - Variabilità temporale dell'indicatore di macrotestitura rispetto a  $T=0$  per la miscela M2Fig.8.30 - Variabilità temporale dell'indicatore di macrotestitura rispetto a  $T=0$  per la miscela M3

Un confronto effettuato sui valori medi lungo tutte le wheel track, sia in rettifilo che in curva, per le 4 miscele conferma quanto in precedenza esposto mostrando, tuttavia, come la miscela M3 risulti essere caratterizzata da una macrotestitura decisamente più bassa rispetto a tutte le altre miscele (cfr. Fig. 8.31 e Fig. 8.32). Questo fenomeno è fortemente condizionato dall'entità della percentuale di legante impiegata nella miscela che, nel caso dell'usura con argilla espansa, raggiunge valori prossimi all'8%.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Valore stimato dalle verifiche a consuntivo effettuate sul conglomerato bituminoso prelevato in situ (cfr. Cap. 7)

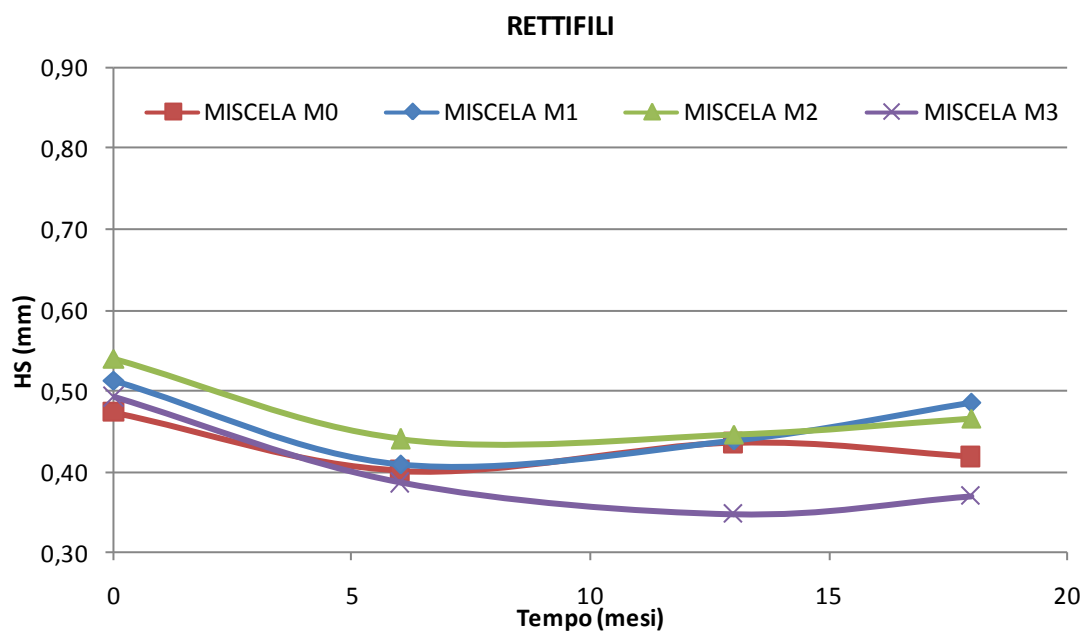


Fig.8.31 - Variabilità temporale dell'indicatore di macrotestitura sulle wheel track in rettifilo per le 4 miscele

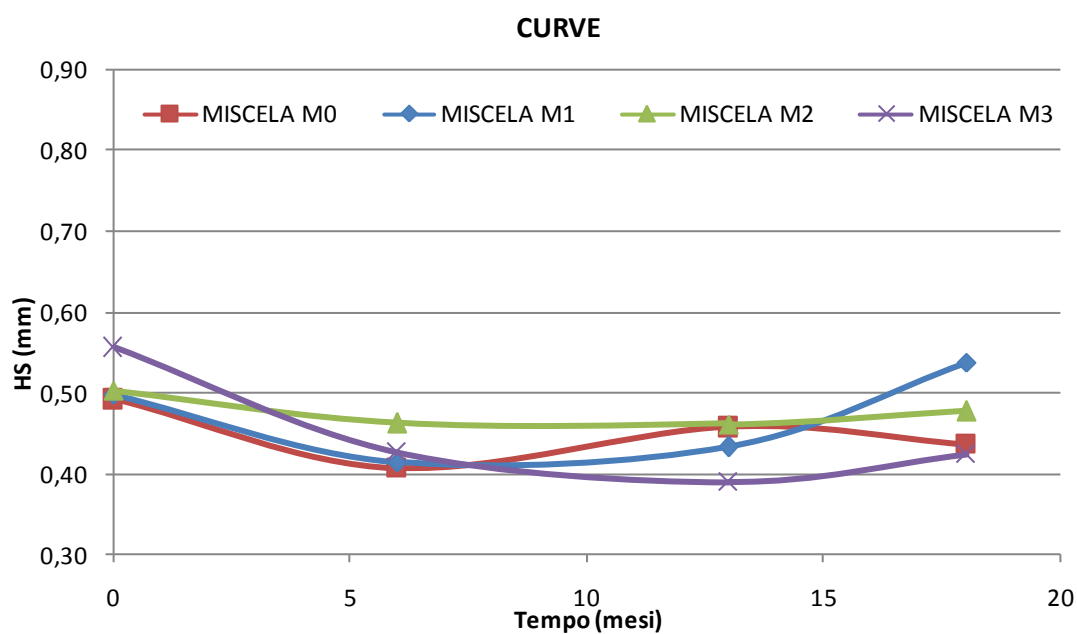


Fig.8.32 - Variabilità temporale dell'indicatore di macrotestitura sulle wheel track in curva per le 4 miscele

### 8.3 INDICATORI DISAGGREGATI DI TESSITURA: ALCUNE CONSIDERAZIONI

L'elaborazione dei profili di tessitura superficiale, acquisiti tramite l'utilizzo del profilometro laser, ha consentito la validazione di alcune delle considerazioni già esplicitate nel precedente paragrafo in merito all'evoluzione temporale della macrotessitura e, in particolare, alle differenze di profondità di tessitura legate alle caratteristiche compositive delle miscele poste in opera. Lo studio degli indicatori disaggregati, con particolare riferimento ai Livelli di Tessitura  $L_T$  (cfr. Cap.3), ha mostrato risultati molto prossimi a quelli ottenuti mediante il metodo dell'altezza in sabbia. Il confronto fra i livelli di tessitura è stato effettuato per ciascuno step di rilievo fra le quattro miscele. I risultati ottenuti, mediati lungo le 4 wheel track, in rettifilo così come in curva, sono mostrati nelle Fig. 8.33-8.40.

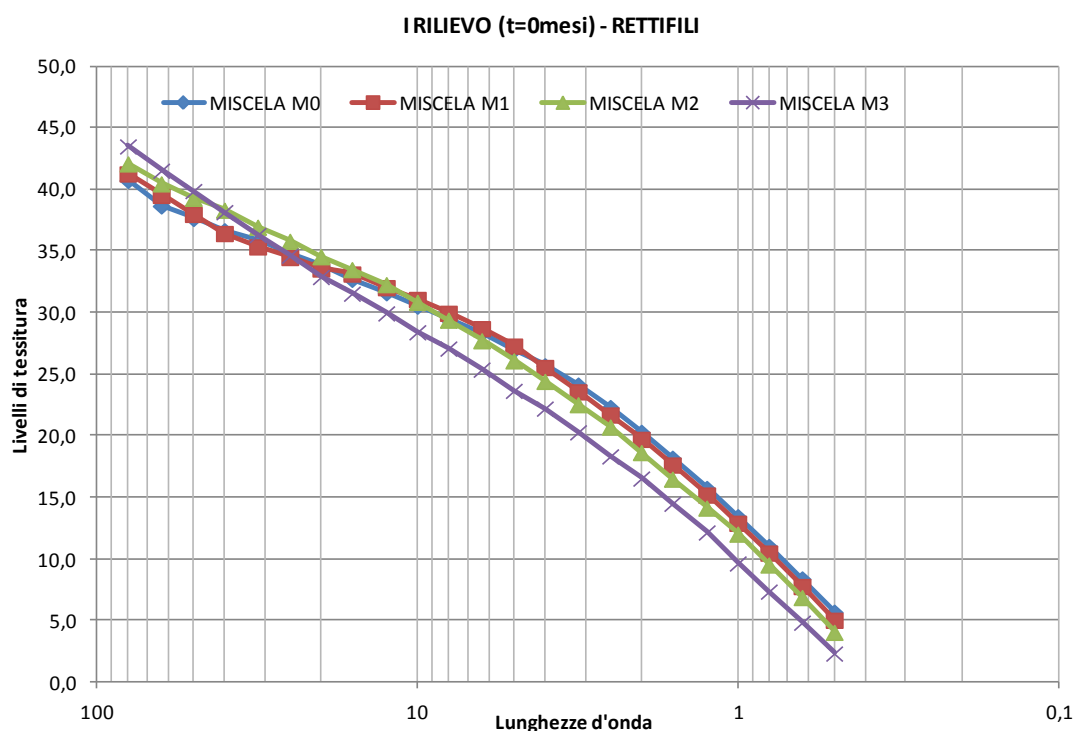


Fig.8.33 - Livelli di tessitura per le 4 miscele in rettifilo al tempo t=0mesi

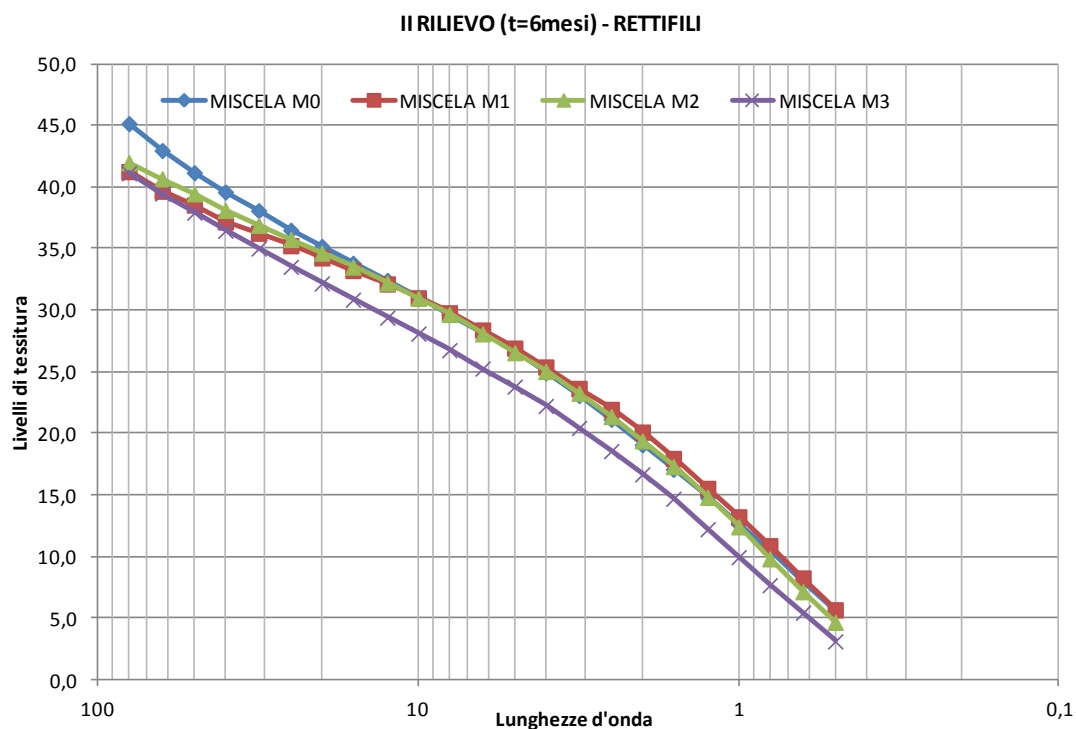


Fig.8.34 - Livelli di tessitura per le 4 miscele in rettifilo al tempo t=6mesi

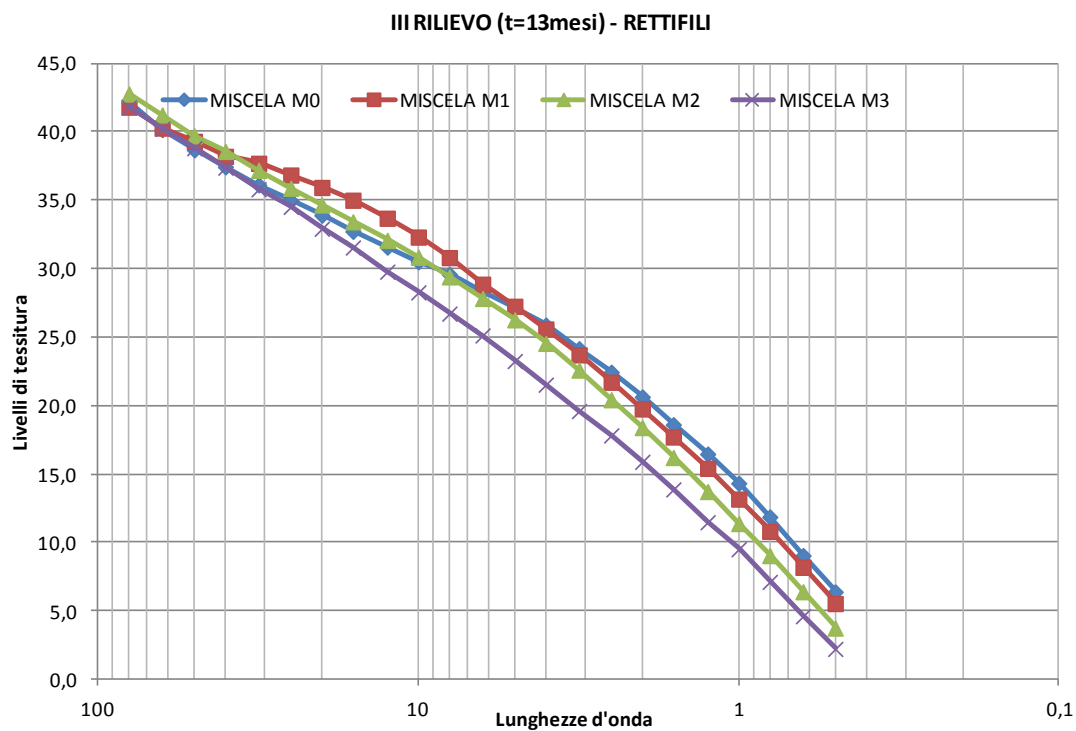


Fig.8.35 - Livelli di tessitura per le 4 miscele in rettifilo al tempo t=13mesi

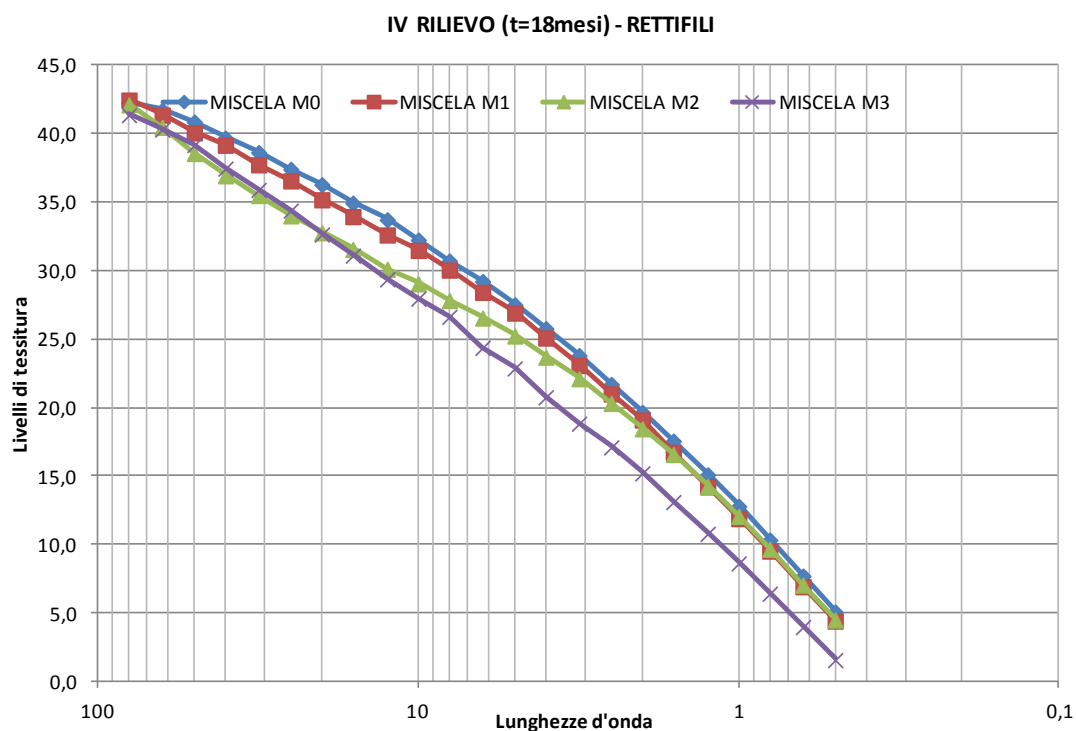


Fig.8.36 - Livelli di tessitura per le 4 miscele in rettilo al tempo t=18mesi

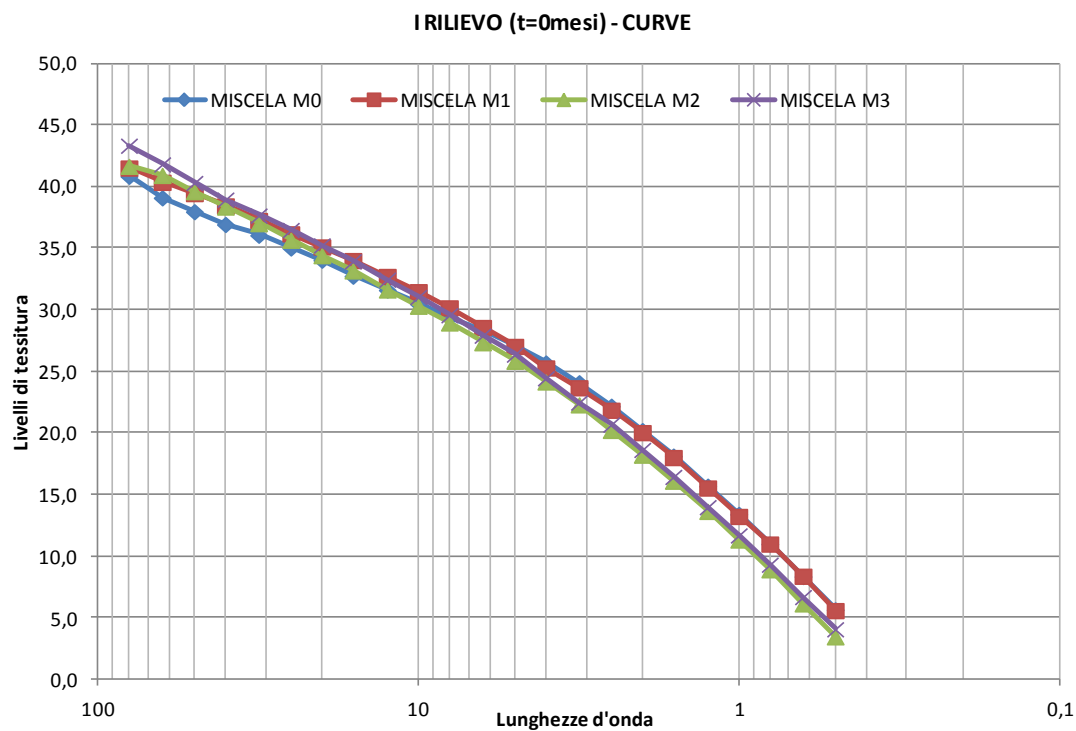


Fig.8.37 - Livelli di tessitura per le 4 miscele in curva al tempo t=0mesi



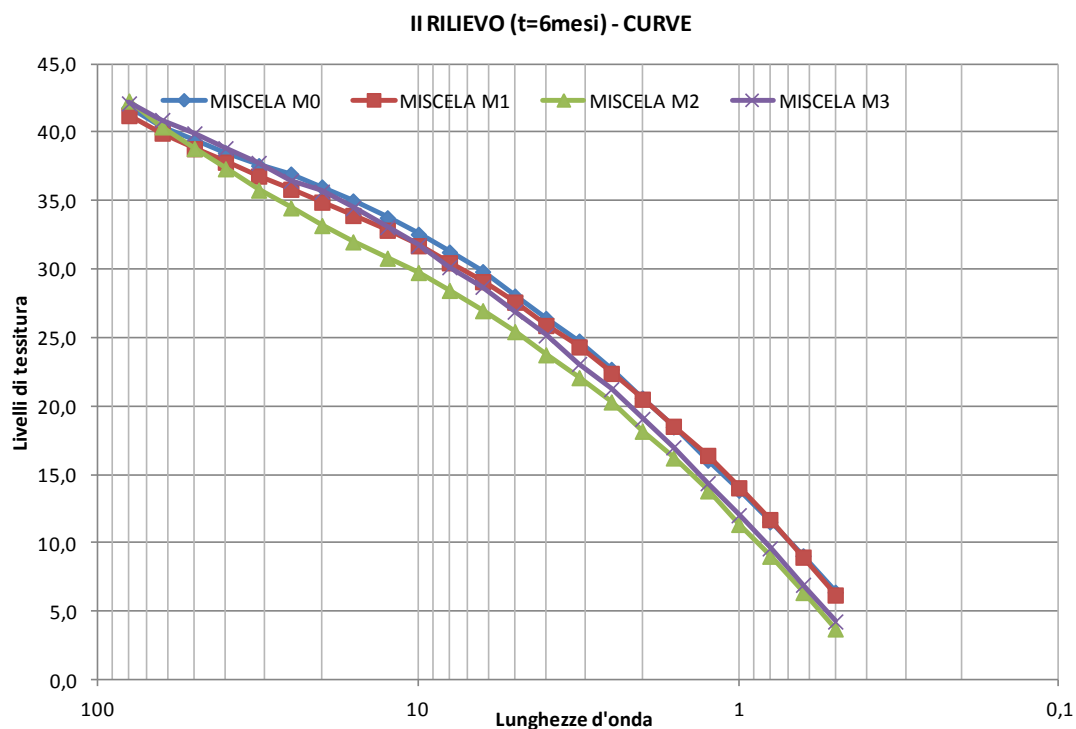


Fig.8.38 - Livelli di tessitura per le 4 miscele in curva al tempo t=6mesi

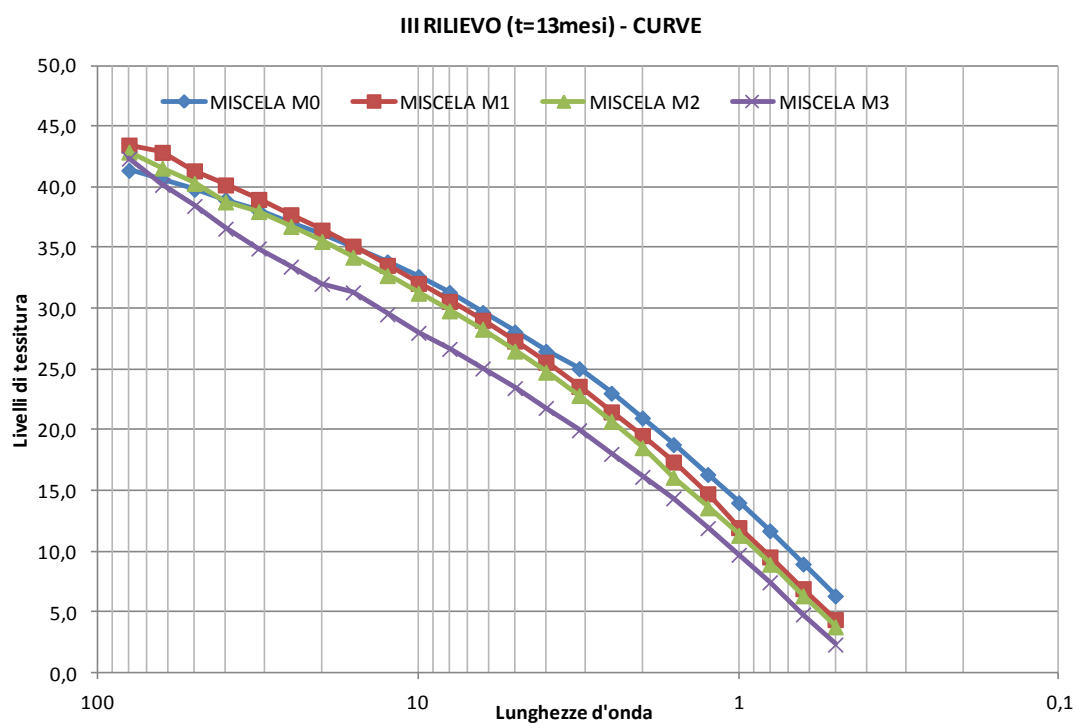


Fig.8.39 - Livelli di tessitura per le 4 miscele in curva al tempo t=13mesi

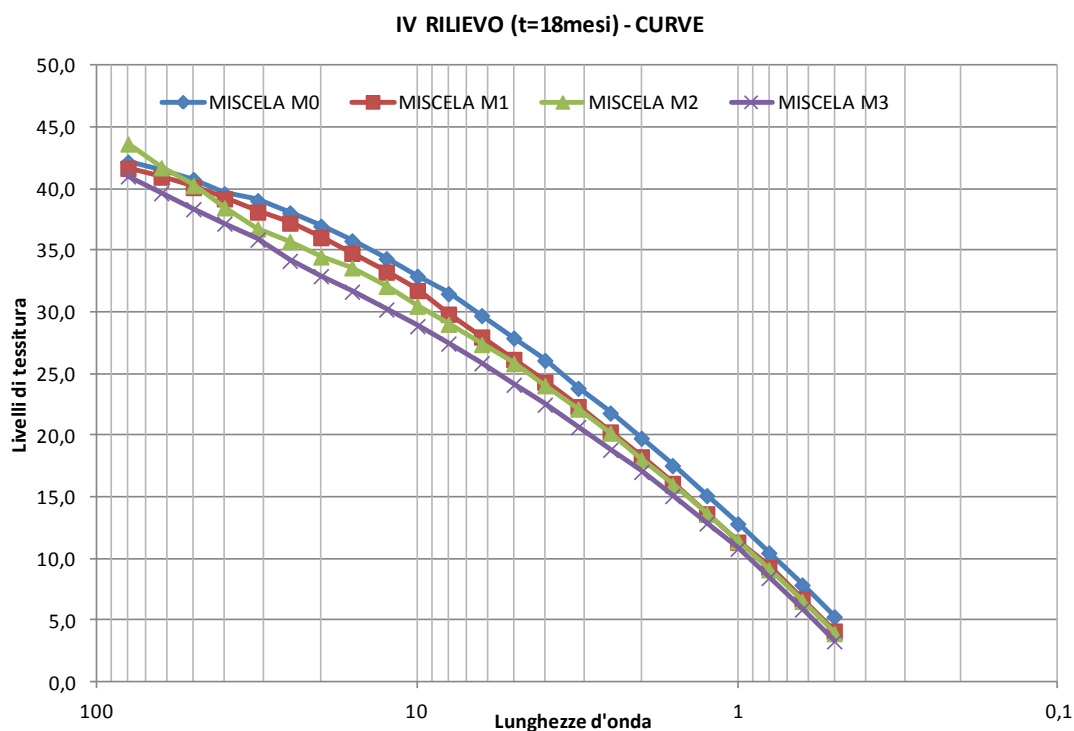


Fig.8.40 - Livelli di tessitura per le 4 miscele in curva al tempo t=6mesi

Dall'analisi dei grafici relativi al monitoraggio dei punti in rettilineo (Fig.8.33-8.36) è evidente che i valori di  $L_T$  per la miscela M3 risultano sempre più bassi rispetto a quelli caratteristici delle altre miscele. I valori di  $L_T$  per le miscele M0, M1, M2, invece, sono praticamente sovrapponibili. Per le curve, il fenomeno già descritto in merito alla miscela M3 risulta ancora più marcato in corrispondenza del 3° step di rilievo, a conferma di quanto osservato nell'analisi dell'evoluzione temporale di HS (cfr. Fig.8.39).

In definitiva, l'indagine attraverso indicatori disaggregati sembra evidenziare come, in realtà, la variabilità fra i valori di HS sia effettivamente molto bassa; laddove tale variabilità assume entità maggiori (nel caso di M3, ad esempio), anche gli indicatori disaggregati sembrano descrivere il medesimo fenomeno registrato, appunto, per l'indicatore HS.

#### 8.4 MICRO E MACROTESSITURA SUPERFICIALE: CALCOLO DELL'INDICE IFI

A valle dello studio dell'evoluzione temporale degli indicatori BPN e HS (cfr. Par. 8.2), l'analisi dati ha riguardato un confronto fra le misure di micro e macrotelessitura attraverso il supporto matematico dell'indice IFI (cfr. Cap.3). A tale scopo, dunque, per ogni miscela, ad ogni step di rilievo, sono stati calcolati la costante di velocità  $S_p$ , funzione della macrotelessitura, il

parametro di aderenza FR60, a sua volta funzione del BPN e della velocità  $S_p$ , per “tradurre” il valore misurato con lo strumento di rilievo della microtessitura alla velocità  $S$  (per il British Pendulum Tester 10 Km/h) in un valore di aderenza alla velocità di scorrimento di 60 Km/h. Il valore di macrotessitura utilizzato per il calcolo dell’indice IFI è il Mean Profile Depth\* (MPD\*), ossia quello ricavato a partire dalle misure di HS tramite la relazione classica fornita dalla norma ISO 1347-3:

Tale operazione si è rivelata necessaria poiché i dati di MPD ricavati a valle dell’elaborazione dei profili, acquisiti tramite profilometro laser, sono stati processati senza previa operazione di filtraggio (cfr. Cap.3) delle lunghezze d’onda. Per tale ragione, al fine di limitare possibili errori di valutazione, si è ritenuto opportuno utilizzare un indicatore (MPD\*) che, seppur stimato, è correlato tramite relazione lineare ad una misura più “affidabile” di macrotessitura effettuata con il metodo dell’altezza di sabbia.

Sono stati, dunque, rappresentati su grafici F60-MPD\* i valori stimati con la procedura classica dell’IFI precedentemente descritta. (cfr. Fig.8.41 – Fig. 8.44). Ogni grafico, relativo ad uno step di rilievo (0, 6, 13 e 18 mesi), mostra per tutte le 4 miscele monitorate i valori di micro e macrotessitura mediati lungo le 4 wheel track in rettilineo e in curva. In base alla nota suddivisione del piano F60-MPD, risultato dell’esperimento internazionale (cfr. Cap.3), per ogni intervallo temporale tutti i dati monitorati rientrano nel quadrante delimitato dalla curva standard F60-MPD e dalla retta  $sp^*=100\text{Km/h}$ . Il settore è quello identificato come “Increase Macrotexture”: è evidente, dunque, che pur registrandosi valori di microtessitura adeguati per tutte le miscele in tutte le fasi del monitoraggio, le medesime usure sono caratterizzate da valori di macrotessitura relativamente bassi. Si ritiene che il fenomeno sia legato ancora una volta alla composizione granulometrica delle miscele, nonché alla volumetria del conglomerato bituminoso: nessuna miscela posta in opera ha una percentuale di vuoti maggiore del 3.5%. Anche in questo caso il fenomeno è ancora più accentuato per la miscela M3 che, come già evidenziato nello studio dell’evoluzione temporale dell’HS, risente anche dell’elevata percentuale di bitume presente nel conglomerato. Per ciò che riguarda la microtessitura, anche la rappresentazione sul diagramma micro-macro mostra che a T=13 mesi e a T= 18 mesi le miscele costituite da aggregati di natura calcarea e da una percentuale di aggregati di natura basaltica (M1 ed M2) offrono sicuramente condizioni di aderenza migliori.

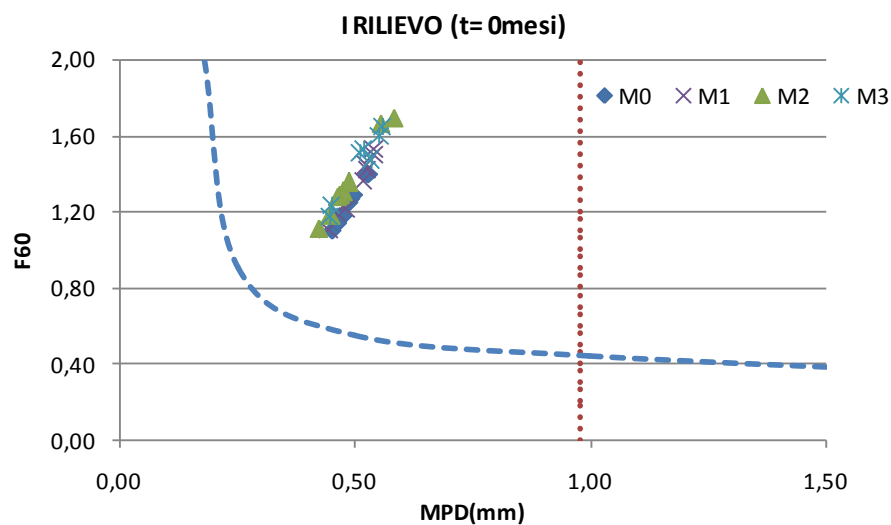


Fig.8.41 – Relazioni micro-macrotessitura a t=0mesi per le 4 miscele

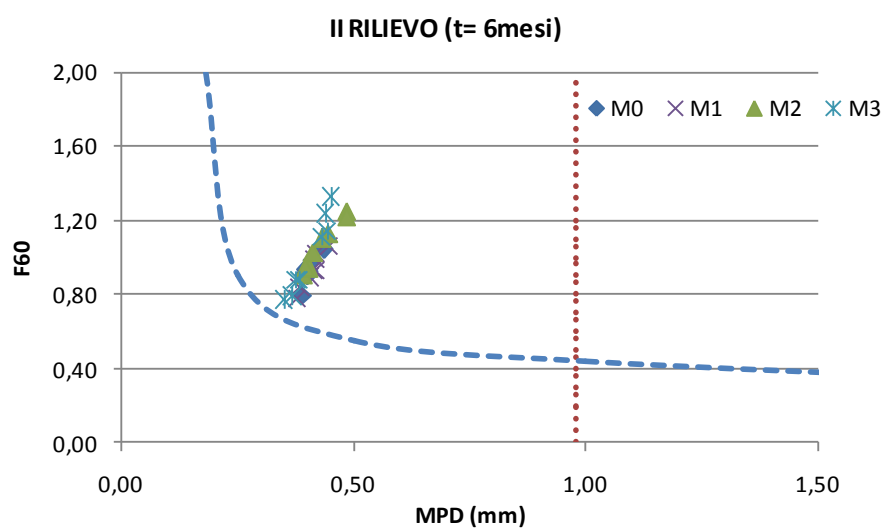


Fig.8.42– Relazioni micro-macrotessitura a t=6mesi per le 4 miscele

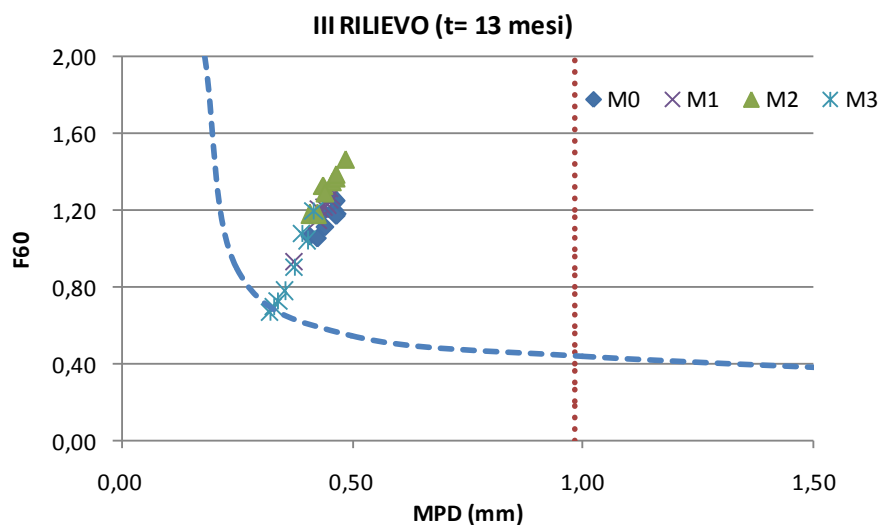


Fig.8.43 – Relazioni micro-macrotessitura a t=13mesi per le 4 miscele

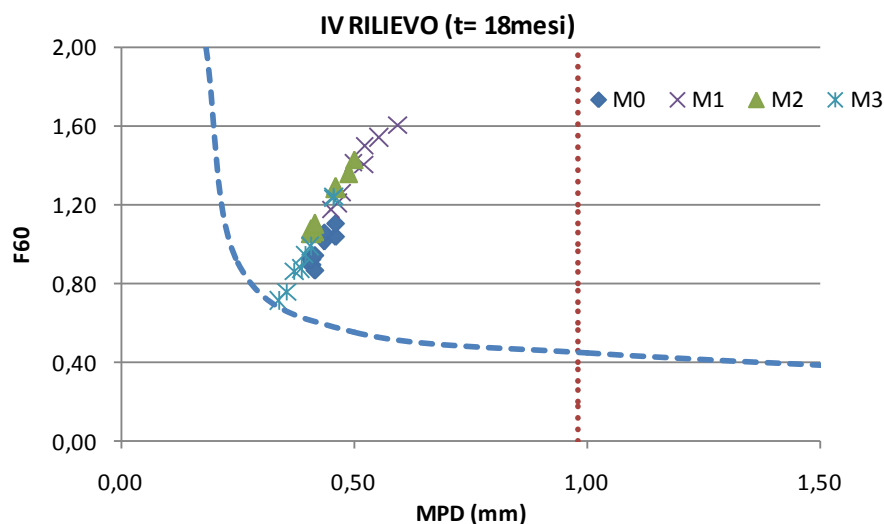


Fig.8.44– Relazioni micro-macrotessitura a t=18mesi per le 4 miscele

## 8.5 NESSI CORRELATIVI FRA INDICATORI DI MACROTESSITURA

Un'ulteriore fase dell'analisi dati ha riguardato la ricerca di nessi correlativi fra indicatori aggregati di macrotessitura, stimati a valle dell'elaborazione dei profili acquisiti in situ, e l'indicatore estrinseco HS.

In prima istanza tale ricerca ha mostrato alcune difficoltà di interpretazione dei risultati legata principalmente al problema della scarsa variabilità degli indicatori di macrotessitura. Infatti, pur se in termini assoluti è immediato individuare alcune tendenze evolutive, in realtà, soprattutto in alcune fasi del rilievo, i range di variazione della stessa misura per la medesima

miscela sono relativamente bassi. Anche fra le diverse miscele non si registrano variazioni importanti di macrotestitura. A valle di tali considerazioni, dunque, si è proceduto ad un filtraggio dei dati tramite calcolo di un parametro  $\Delta I$ , assunto quale riferimento e definito come la variazione percentuale dell'indicatore all'interno della stessa famiglia di dati (data miscela, step fissato):

\_\_\_\_\_

con                valore massimo assunto dall'indicatore                all'interno della famiglia di dati considerata e                valore minimo nello stesso intervallo.

In tal modo è stato possibile identificare per ciascuna miscela intervalli di dati con una variabilità superiore ad un valore soglia fissato nel 20%; per questi dati si registrano correlazioni fra gli indicatori anche decisamente elevate ed, in ogni caso, tendenze chiaramente definite e interpretabili.

Le procedure di calcolo dei principali indicatori aggregati di macrotestitura qui analizzati sono state ampiamente descritte al Cap. 3 della presente tesi. Si rimanda, pertanto, al medesimo capitolo per le esplicitazioni del significato di ciascun indicatore.

### **8.5.1 Correlazioni HS-MPD<sub>iso</sub>**

Le correlazioni ricavate fra gli indicatori HS e MPD, quest'ultimo calcolato secondo tramite procedura ISO (ISO 1347-3) sono riportate nelle *Fig.8.45-8.48*, distinguendo fra rilievi sulle wheel track in rettilo ed in curva per ciascuna miscela.

Tuttavia, è opportuno sottolineare come le rette di regressione, pur mostrando in alcuni casi coefficienti di correlazione elevati si discostano dall'equazione classica  $ETD=f(MPD)$  fornita dalla norma ISO 1347-3- Come già sottolineato in precedenza, nel calcolo dell'MPD non sono state eseguite operazioni di filtraggio del profilo (filtro passa banda bassa o passa banda alto-basso); pertanto le rette di regressione hanno coefficienti angolari decisamente più bassi rispetto al valore 0.8 dell'equazione di riferimento.

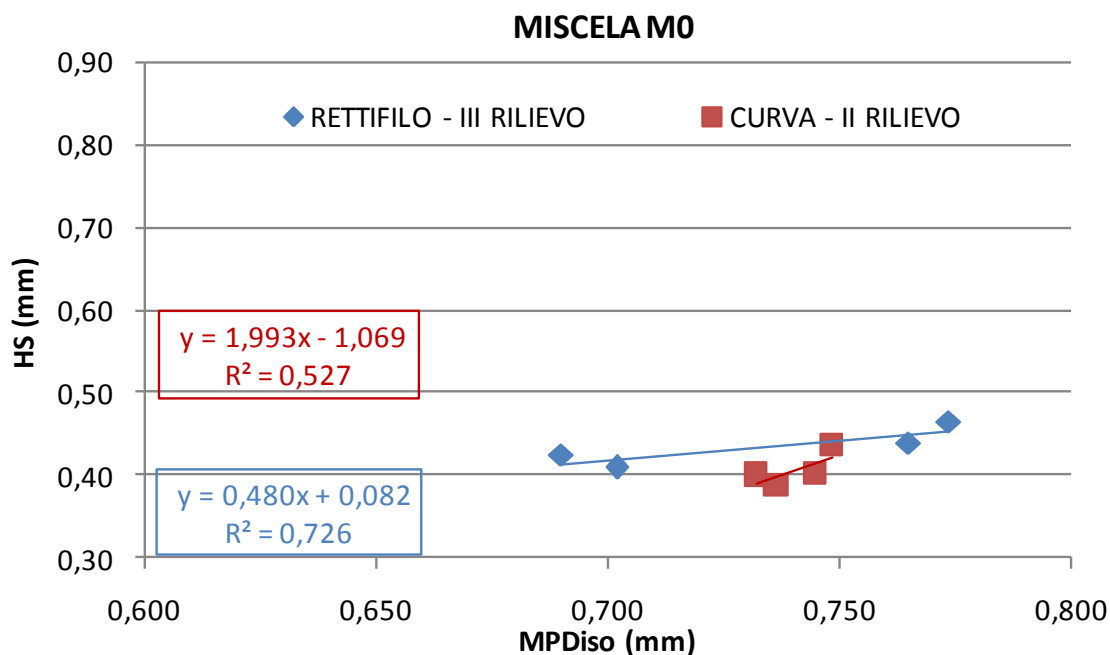


Fig.8.45– Correlazioni HS - MPDiso per la miscela M0

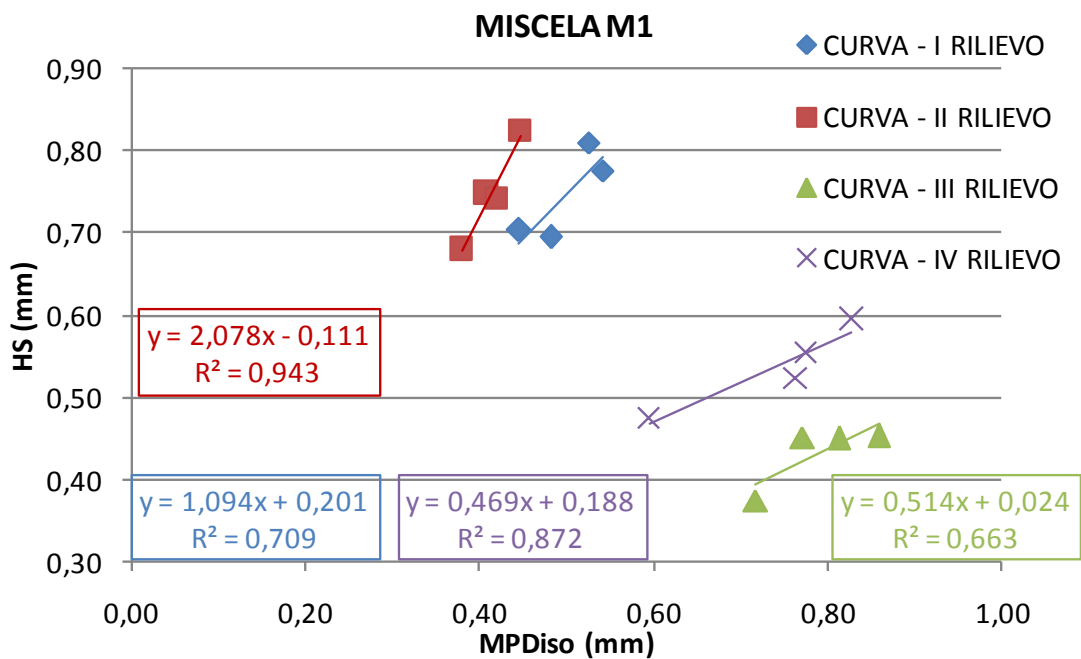


Fig.8.46– Correlazioni HS -MPDiso per la miscela M1

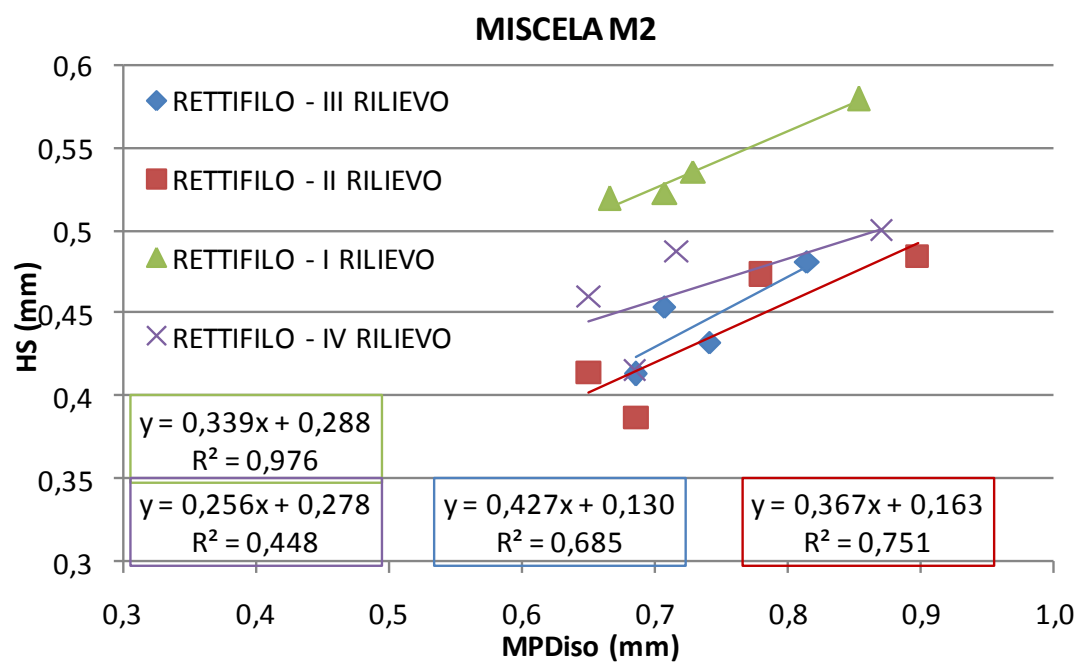


Fig.8.47– Correlazioni HS -MPDiso per la miscela M2

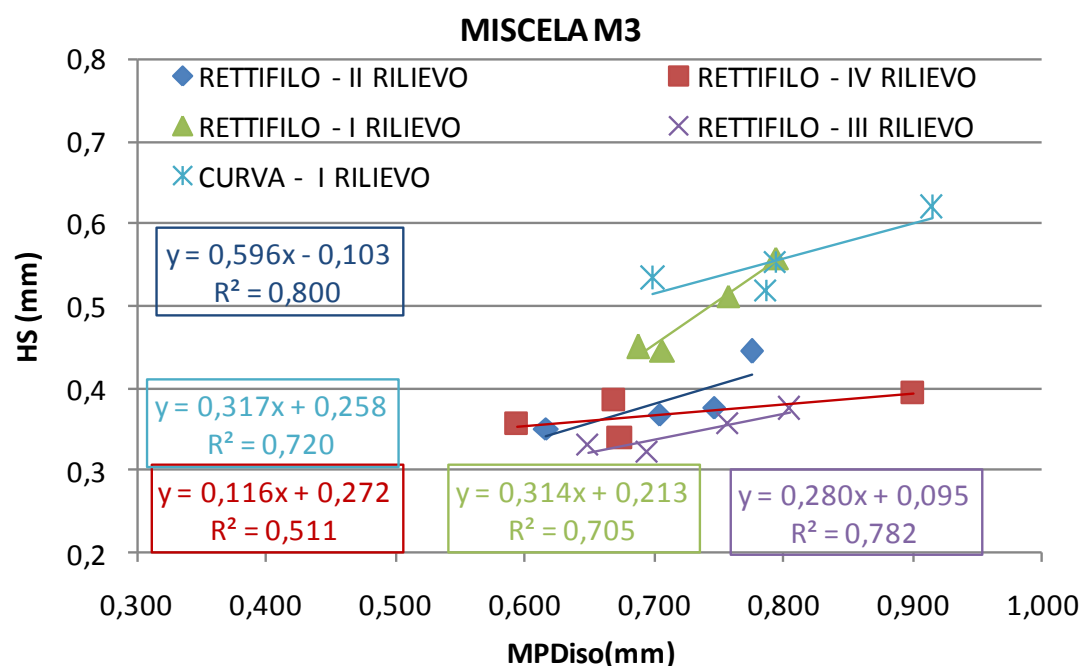


Fig.8.48– Correlazioni HS- MPDiso per la miscela M3



### 8.5.2 Correlazioni HS-MPDaipcr

Nei grafici delle Fig.8.49-8.52 vengono riportate le correlazioni individuate a valle dell'operazione di screening dei dati mediante il parametro  $\Delta I$  precedentemente definito, fra HS e MPDaipcr (calcolato, appunto, tramite procedura AIPC), ancora una volta distinte per miscela e geometria del tracciato (rettifilo/curva)

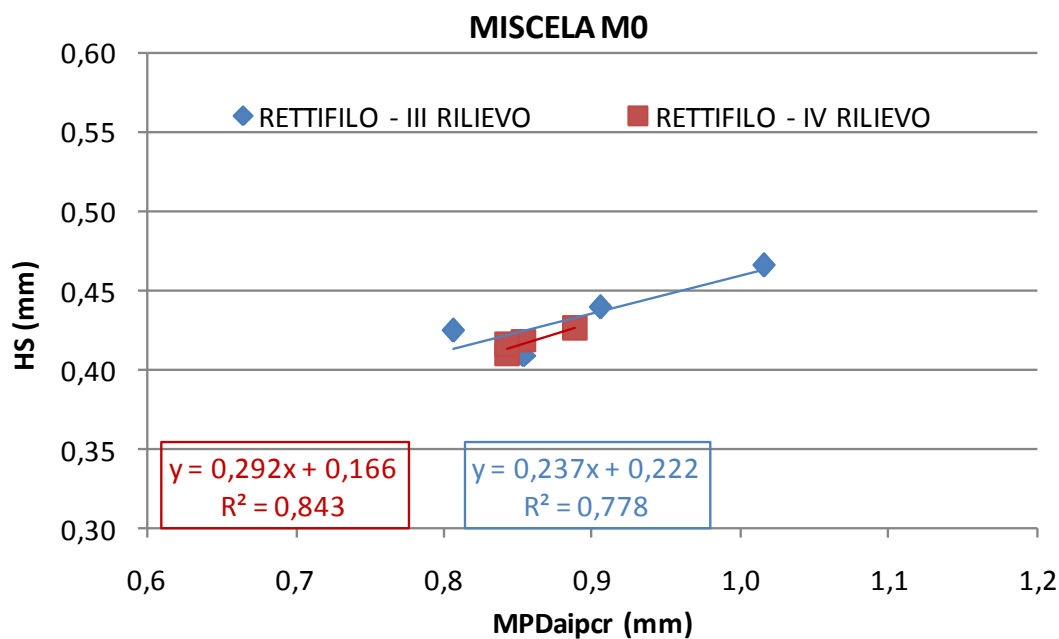


Fig.8.49– Correlazioni HS- MPDaipcr per la miscela M0

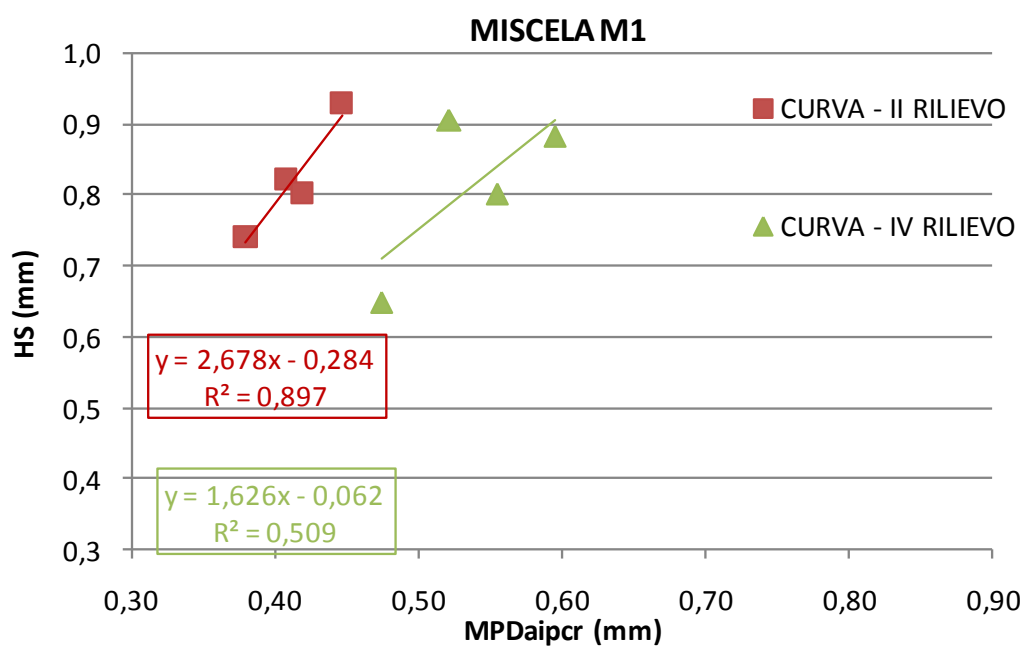


Fig.8.50– Correlazioni HS- MPDaipcr per la miscela M1

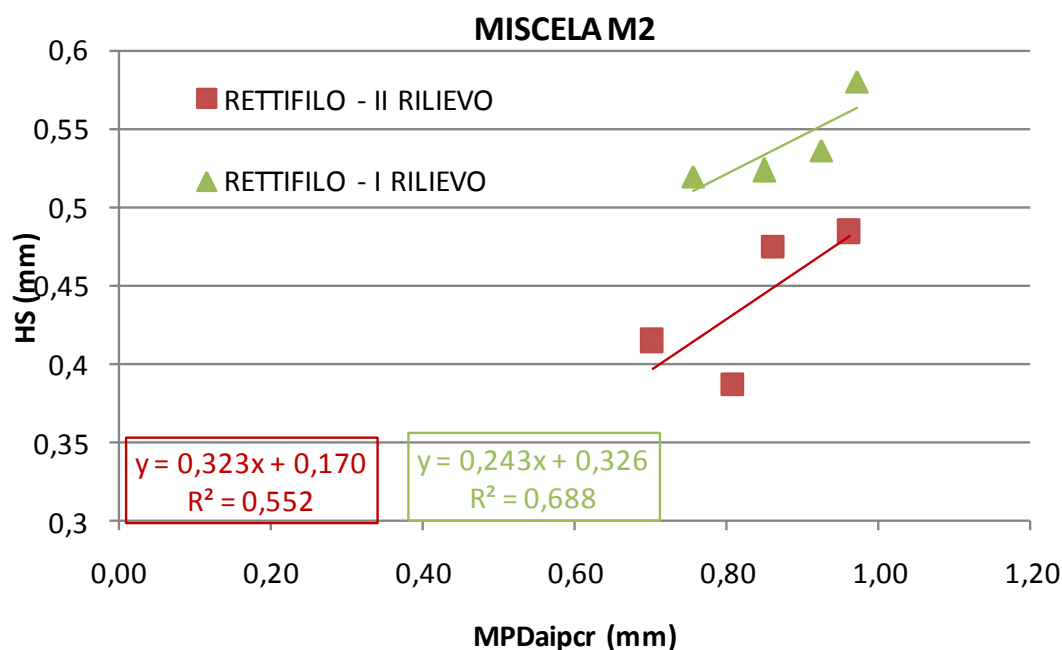


Fig.8.51– Correlazioni HS - MPDaipcr per la miscela M2

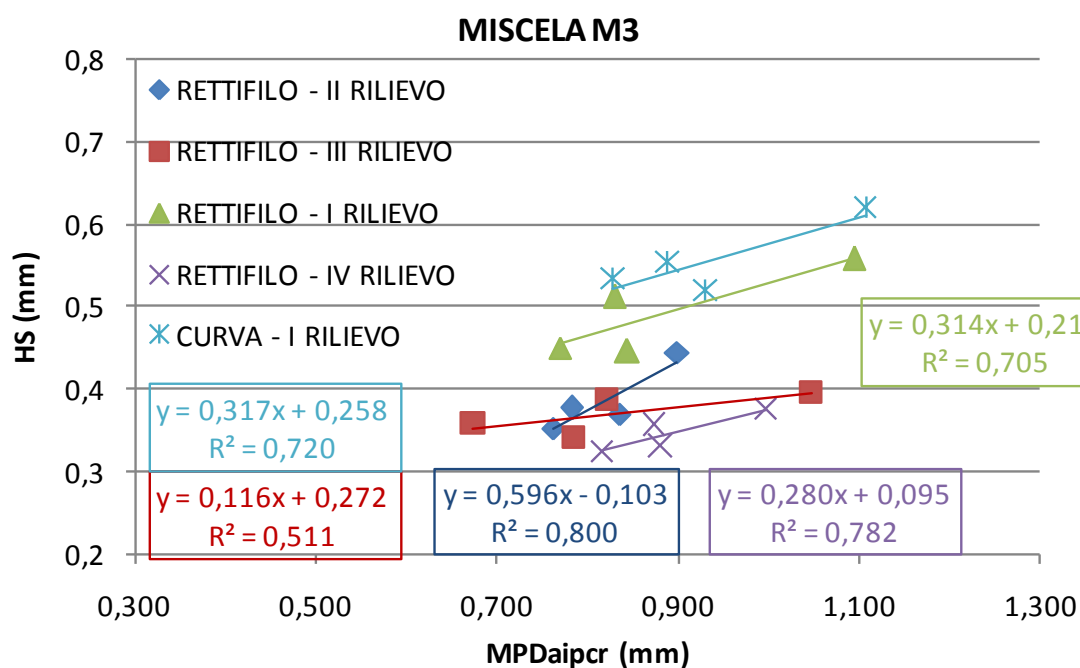


Fig.8.52– Correlazioni HS- MPDaipcr per la miscela M3

### 8.4.3 Correlazioni HS-RMS

Le correlazioni fra HS e RMS sono riportate nelle Fig. 8.53 - 8.56.

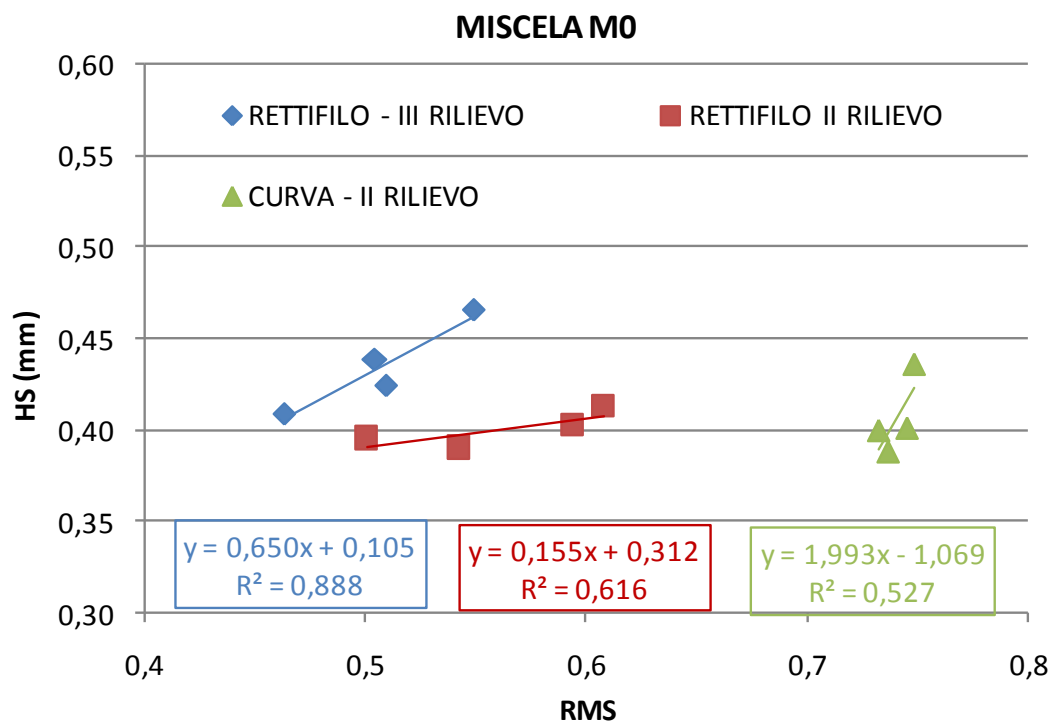


Fig.8.53– Correlazioni HS-RMS per la miscela M0

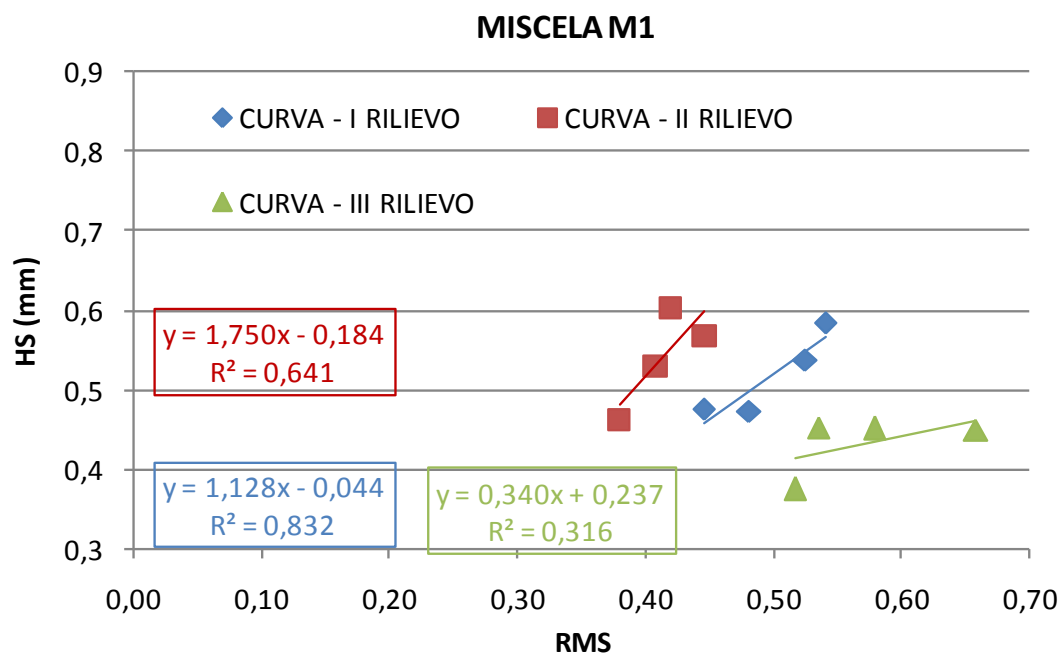


Fig.8.54– Correlazioni HS-RMS per la miscela M1

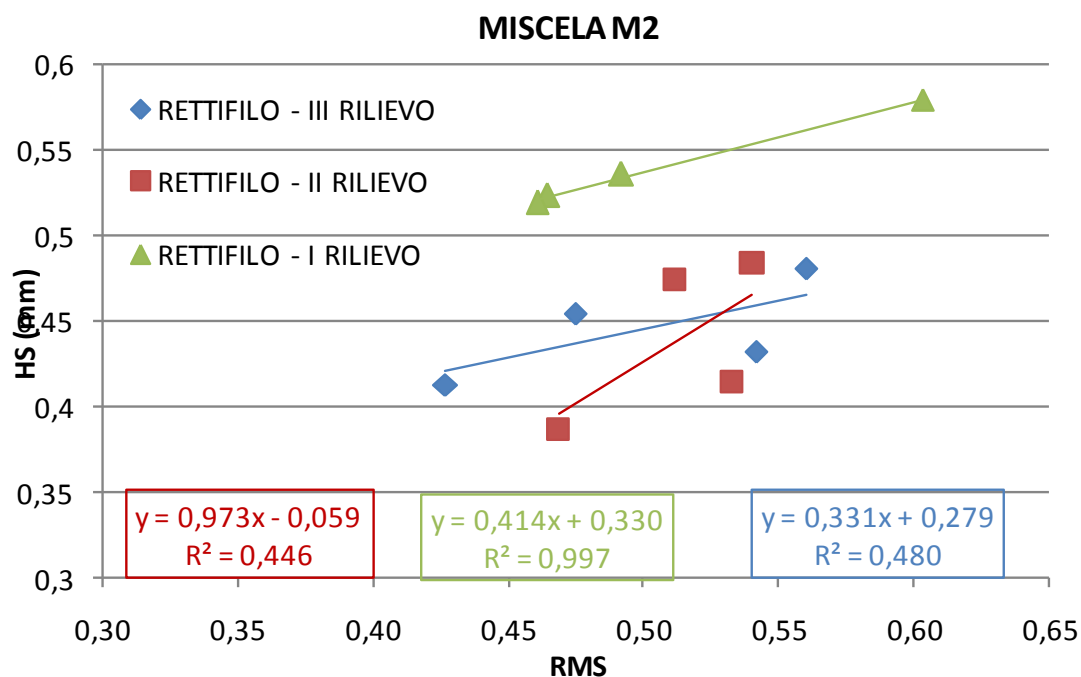


Fig.8.55– Correlazioni HS-RMS per la miscela M2

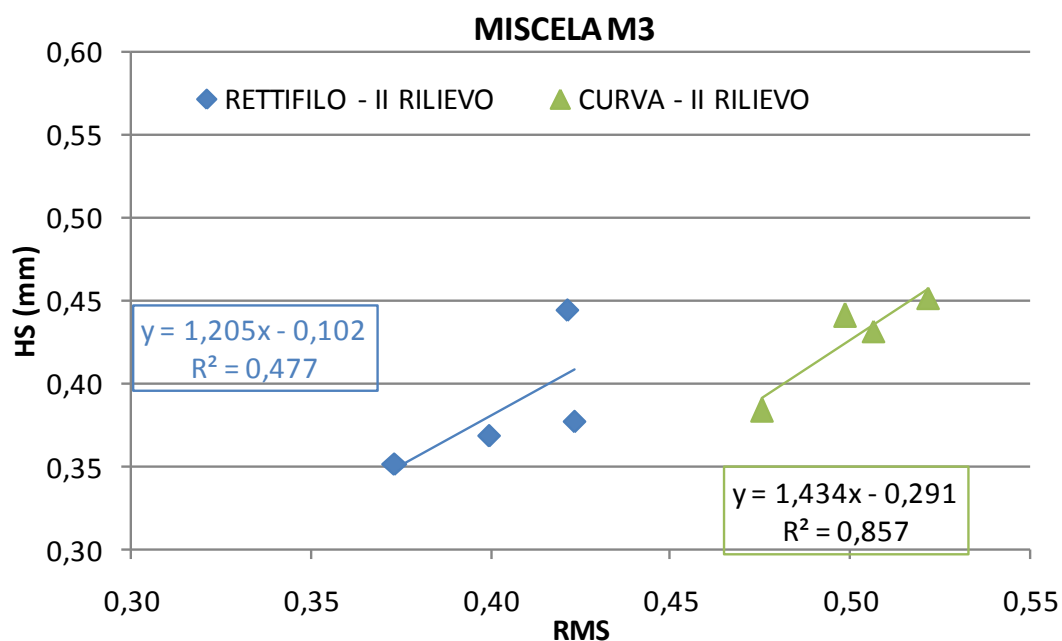


Fig.8.56– Correlazioni HS-RMS per la miscela M3

#### 8.5.4 Correlazioni HS-Rt

L'analisi dati ha riguardato anche la ricerca di nessi correlativi fra HS e l'indicatore di macrotestitura Rt. Le rette di regressione ricavate vengono riportate nei grafici delle Fig.8.57-8.60.

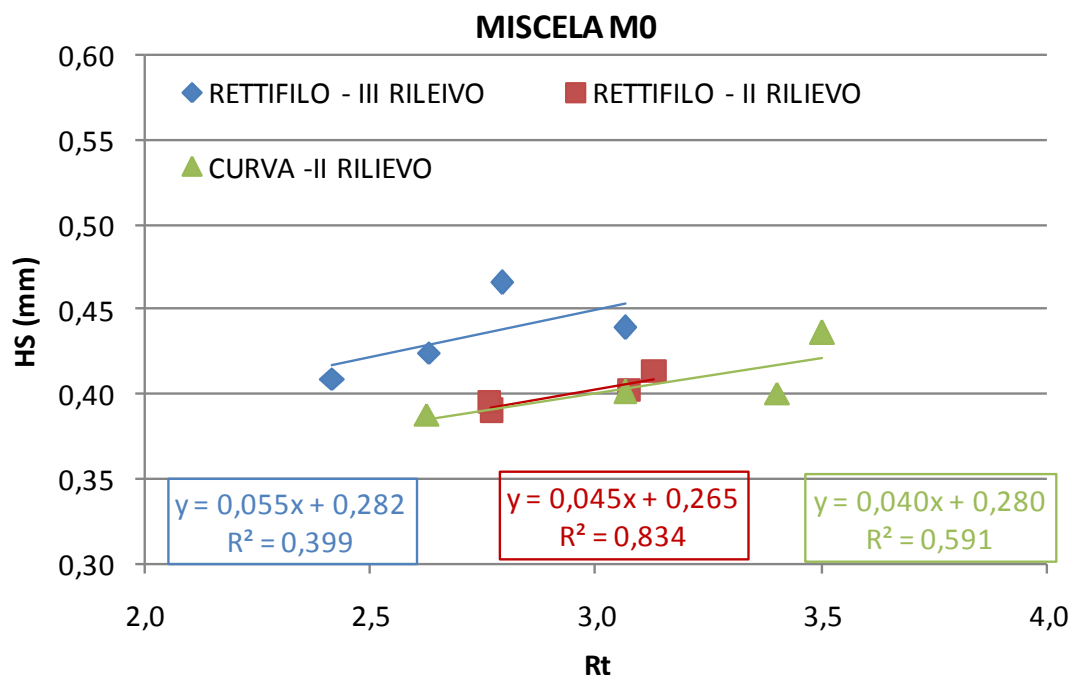


Fig.8.57– Correlazioni HS-Rt per la miscela M0

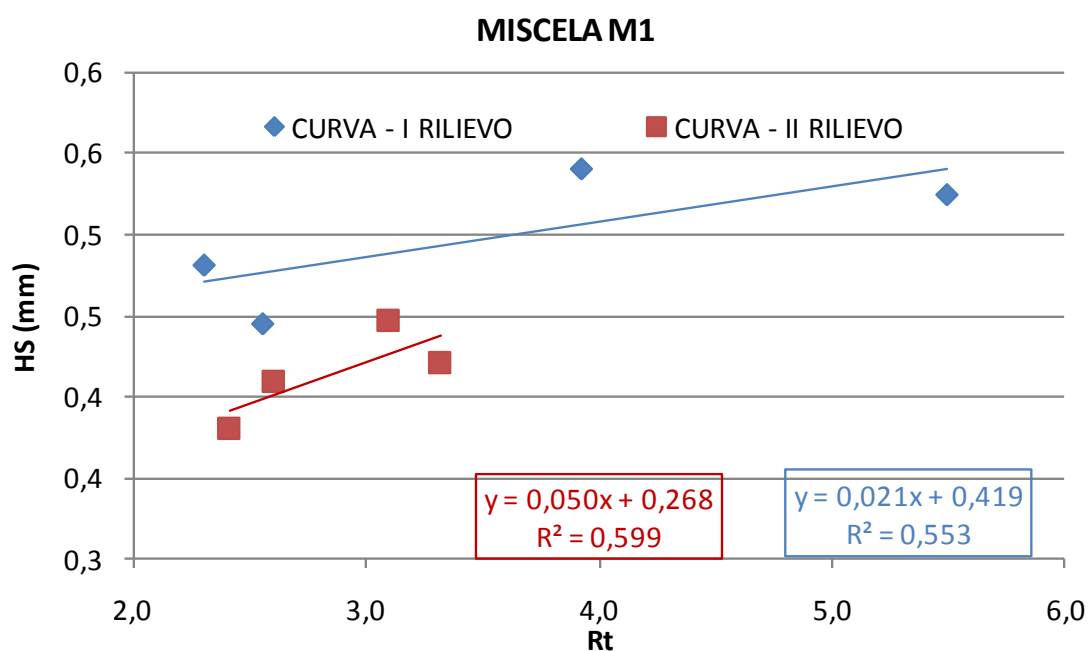


Fig.8.58– Correlazioni HS-Rt per la miscela M1

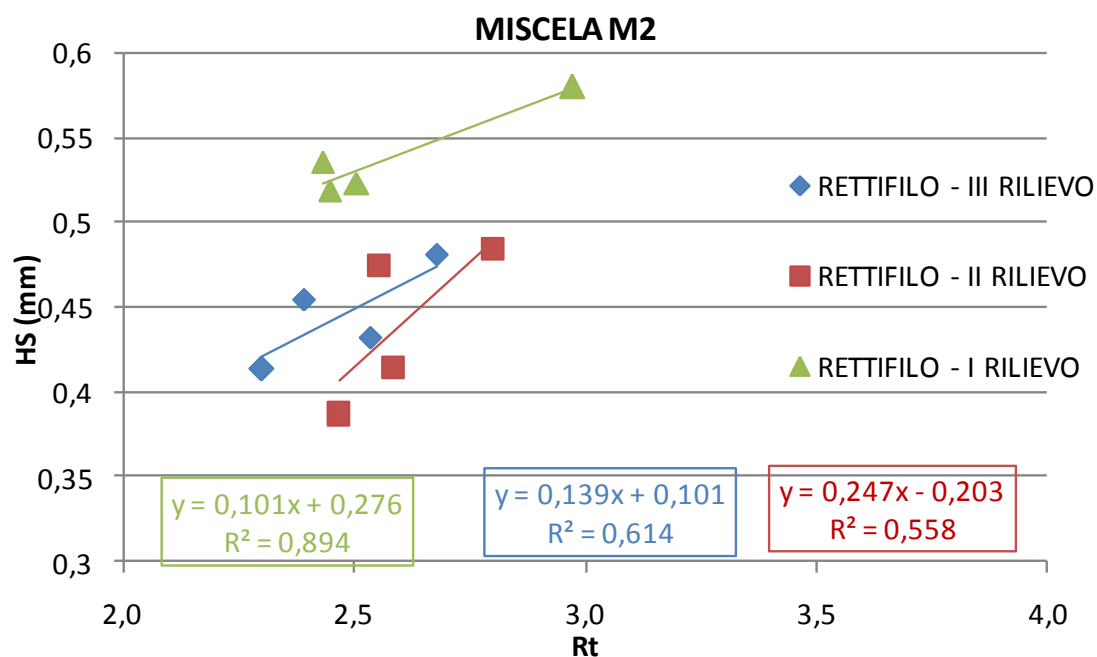


Fig.8.59– Correlazioni HS-Rt per la miscela M2

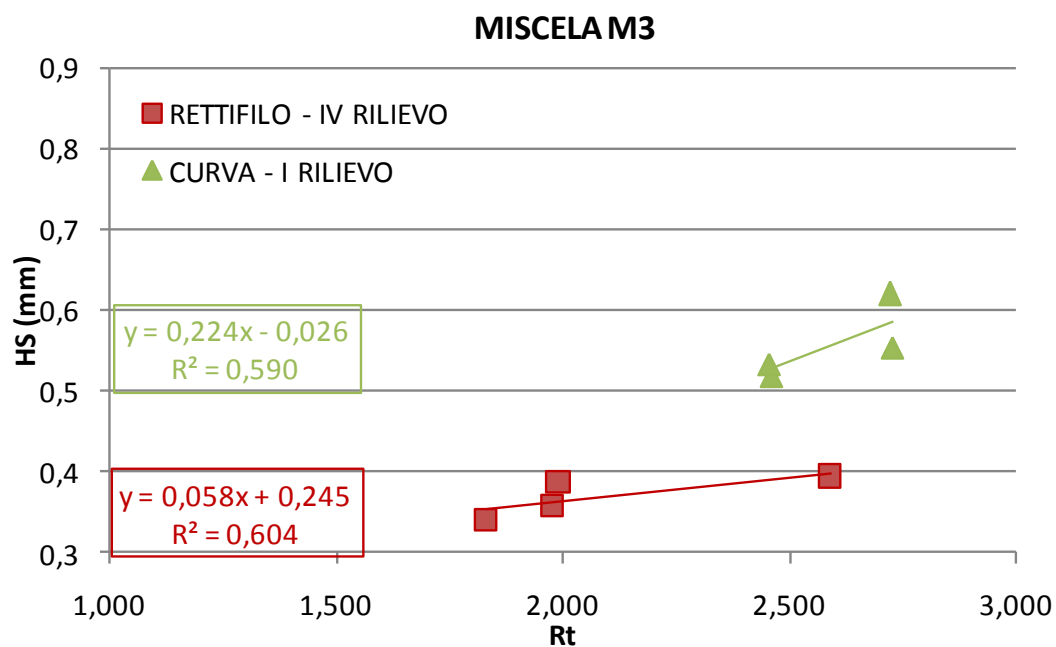


Fig.8.60– Correlazioni HS-Rt per la miscela M3

## 8.6 CONCLUSIONI E PROSPETTIVE FUTURE

L'analisi dati, in particolare quella relativa all'indicatore di microtessitura BPN, ha mostrato un fenomeno evolutivo che sembra essere caratterizzato da una fase di decadimento effettivamente "visibile" a partire dall'ultima campagna di rilievi effettuata, per tutte le pavimentazioni monitorate. I dati di cui si dispone, pertanto, non sono sufficienti per procedere ad una formulazione matematica che descriva il decadimento delle performance superficiali. Tale limitazione è strettamente connessa al fattore "tempo": l'ultimo step della campagna di acquisizione dati in situ, infatti, corrisponde a circa 18 mesi dalla posa in opera delle usure sui tronchi sperimentali, intervallo temporale limitato nell'ottica di una valutazione del processo evolutivo subito dal piano di rotolamento ad opera del traffico veicolare, che richiederebbe un monitoraggio molto più esteso.

Tuttavia, l'indagine finora condotta, pur non consentendo l'elaborazione analitica di un modello di decadimento, pone una serie di questioni fondamentali per la comprensione di alcuni fenomeni intrinseci al processo evolutivo e differenziati in base alla tipologia di miscela considerata.

Dallo studio dei risultati numerici ottenuti dalle misurazioni è possibile, infatti, fornire indicazioni di carattere qualitativo sulle performance superficiali delle 4 miscele, anche nell'intento di identificare la soluzione più vantaggiosa nell'ottica di una corretta ottimizzazione della micro e macrotessitura, per rispondere in maniera adeguata alle istanze di sicurezza per gli utenti della strada più volte menzionate nel presente lavoro di tesi.

Le miscele M1, M2 ed M3 nella fase di "early life skid resistance" sembrano aver subito una analoga variabilità della microtessitura caratterizzata da una diminuzione dell'indicatore BPN misurato. Solo successivamente, a circa un anno dall'apertura al traffico delle pavimentazioni sperimentali si è innescato il processo di spogliamento degli aggregati lapidei. La miscela M0, invece, ha mostrato una variabilità sempre crescente della microtessitura da  $t=0$  mesi (posa in opera) a  $t=13$  mesi. Il fenomeno è stato identificato nella trattazione come processo di "spogliamento differenziato": la qualità e la natura petrografica dell'inerte utilizzato nel confezionamento delle miscele di conglomerato bituminoso sembrano essere, infatti, elementi distintivi nel determinare differenze nei processi evolutivi della microtessitura superficiale.

Altro fattore compositivo che sembra aver determinato variabilità nel comportamento delle miscele è il legante bituminoso: l'utilizzo di un bitume modificato, infatti, ha in parte

condizionato la risposta dell'aggregato all'azione di spogliamento dovuta al traffico e alle condizioni ambientali: l'aggregato con PSV minore (il calcare) è riuscito a "trattenere" meno il legante modificato adeso sulla superficie dando vita ad un processo di spogliamento anticipato. Il basalto e l'argilla espansa presenti nelle miscele M1, M2, M3 e dotati di una maggiore resistenza alla levigazione, nonché di una maggiore microrugosità superficiale, hanno trattenuto meglio il film di bitume. Nella fase di "early life skid resistance, dunque, in base a tale ipotesi, il calcare sembra offrire livelli di microtessitura più elevati rispetto alle altre miscele di aggregati. A spogliamento avvenuto, invece, i rilievi mostrano sempre valori di microtessitura decisamente più elevati per la miscela M2 (30% basalto).

I risultati di macrotessitura, espressi in termini di HS, hanno mostrato un comportamento analogo fra le 4 miscele: una prima fase del processo evolutivo ( $t=6$  mesi) caratterizzata da un decremento di macrotessitura attribuito ai fenomeni di migrazione del legante e alla post compattazione; una fase successiva caratterizzata, invece, nella maggior parte dei casi, da un nuovo incremento della profondità media di tessitura legato anch'esso ai fenomeni di spogliamento del bitume adeso sugli inerti, nonché di quello precedentemente migrato nei vuoti interstiziali. Le considerazioni in merito alla macrotessitura sono, in realtà, affette da una limitazione intrinseca dovuta alla "volumetria" del conglomerato bituminoso posto in opera: tutte le miscele, avendo una percentuale dei vuoti non superiore al 3,5%, non manifestano differenze sostanziali di macrotessitura. La miscela con argilla espansa mostra, in assoluto i valori minimi di HS; tale osservazione è confermata anche dallo studio effettuato sui livelli di tessitura.

La miscela con argilla espansa, infine, sembra non aver risposto in esercizio a quanto previsto in fase progettuale: in tal caso si ritiene che i fattori determinanti nel condizionare le prestazioni dei tronchi realizzati con miscela M3 siano ancora una volta i fattori compositivi del conglomerato posto in opera, in particolare, la percentuale di argilla impiegata ma soprattutto la percentuale di bitume che, a consuntivo, è risultata essere prossima al 9%.

In definitiva la pavimentazione che sembra rispondere meglio sia in termini di microtessitura, e dunque di aderenza offerta, che di macrotessitura è quella realizzata con la miscela M2: il 30% di basalto sulla miscela di aggregati ha contribuito decisamente a garantire livelli di microtessitura in assoluto più elevati rispetto a quelli registrati per tutte le altre miscele.



Nessi correlativi e tendenze generali sono state identificate per gli indicatori di macrotestitura; anche in tal caso la scarsa variabilità dei valori acquisiti dalle campagne di monitoraggio effettuate ha determinato, in alcuni casi, difficoltà interpretative dei risultati ottenuti.

A valle di tali considerazioni, dunque, si prospettano interessanti sviluppi del progetto di ricerca finalizzati principalmente al monitoraggio del traffico veicolare che, ora, si rende necessario per valutare correttamente il processo evolutivo, appena iniziato, delle caratteristiche superficiali delle pavimentazioni sperimentali.

In seconda istanza, è evidente la necessità di ulteriori campagne di monitoraggio e di acquisizione dati in situ mirate non solo all'elaborazione del modello analitico del decadimento ma necessarie anche per una validazione dei risultati e delle ipotesi sulle fenomenologie osservate fin qui proposte.

Ulteriori approfondimenti potrebbero riguardare l'analisi mirata delle proprietà meccaniche e fisiche degli aggregati lapidei impiegati nel confezionamento delle miscele, in particolare eseguire una prova di levigabilità per determinare sperimentalmente i valori di PSV minimi caratteristici delle miscele di inerti utilizzati e, in tal modo, individuare, a partire da dati reali, la fase in cui il BPN si attesterà attorno al suo valore terminale di equilibrio.

## 8.7 BIBLIOGRAFIA SPECIFICA CAPITOLO 8

- [01] Woodward D.- *The Effect of Aggregate Type and Size on the Performance of Thin Surfacing Materials* - 2008
- [02] Woodward. W.D.H., Woodside. A.R. and Jellie.J.H. - *Predicting The Early Life Skid Resistance Of Asphalt Surfacing* - University of Ulster, Northern Ireland, 2003
- [03] Shaun Friel, David Woodward and Alan Woodside - *Laboratory prediction of thin surfacing early life asphalt surfacing properties* - University of Ulster, Jordanstown, Northern Ireland
- [04] Diringier, K. T. and R. T. Barros - Predicting the Skid Resistance of Bituminous Pavements Through Accelerating Laboratory Testing of Aggregates - Surface Characteristics of Roadways: International Research and Technologies, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, ASTM STP 1031, pp 61-76, 1990
- [05] Mahone D. C., Sherwood C. - The effect of aggregate type and mix design on the wet skid resistance of bituminous pavement: recommendations for virginia's wet accident reduction program - Report FHWNVA-96-RIO, 1995
- [06] AASHTO *Guide for Pavement Friction*, 2008.