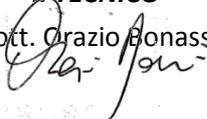


	<b>RELAZIONE ILLUSTRATIVA</b> <b>Report #1-agg.01</b>	<b>DATA</b> <b>24/02/2012</b>
--	--	----------------------------------

<b>COMMITTENTE:</b>	<b>RUREDIL S.p.A.</b> Via B. Buozzi, n.1, 20097 San Donato Milanese (MI)
---------------------	---

<b>PRODOTTO :</b>	<b>RUREDILI XB FIBER</b>
<b>LAVORO :</b>	<b>FIBRE SINTETICHE PER IL RINFORZO STRUTTURALE DEI CONGLOMERATI BITUMINOSI</b>
<b>ATTIVITA' :</b>	<b>CARATTERIZZAZIONE DI CONGLOMERATI BITUMINOSI FIBRORINFORZATI E STUDIO COMPARATIVO SUL MIGLIORAMENTO DELLE PROPRIETÀ MECCANICHE</b>

<b>RELAZIONE :</b>	<b>ANALISI COMPARATIVA DEI RISULTATI</b>	<b>R.P. N. 120489</b>
--------------------	--	-----------------------

**IL TECNICO**  
Dott. Crazio Bonassi  


**PREMESSA**

Oggetto del presente lavoro è la verifica sperimentale di conglomerati bituminosi rinforzati con una miscela di fibre sintetiche Ruredil XB Fiber, per valutare l'eventuale rinforzo strutturale apportato in termini di miglioramento delle proprietà meccaniche.

Lo studio è stato condotto per comparazione con miscele bituminose con caratteristiche uguali ma prive delle fibre Ruredil XB Fiber. Inoltre il programma sperimentale è stato strutturato con particolare riferimento ai precedenti studi condotti dal Dipartimento di Ingegneria civile ed ambientale dell'Università dello stato dell'Arizona e riassunti nella seguente pubblicazione:

- "Evaluation of fiber-reinforced asphalt mixture using advanced material characterization test", Kaloush, Zeiada, Biligiri, Rodezno e Reed - Dep. Of Civil and Env. Eng. of Arizona State University.

Scopo secondario è stato anche quello di confermare i risultati del predetto studio e di completarli con ulteriori prove tipiche dei capitolati tecnici vigenti in Italia e condotte secondo le norme europee UNI EN.

**IL PROGRAMMA SPERIMENTALE**

Il programma sperimentale è stato strutturato nelle seguenti fasi

- 1) Individuazione del conglomerato bituminoso di riferimento
  - I. Caratterizzazione della miscela di aggregati "di riferimento"
  - II. Caratterizzazione della legante bituminoso
- 2) Confezionamento delle miscele di prova e/o prelievo del campione di C.B.
- 3) Caratterizzazione fisico meccanica dei conglomerati bituminosi
  - I. Trazione indiretta unificata UNI EN 12697-23
  - II. Prova Marshall completa UNI EN 12697-34

L'elaborazione e l'analisi dei dati sperimentali ottenuti attraverso le prove di cui al punto 3) ha consentito una prima valutazione sull'efficacia dell'impiego delle fibre sintetiche Ruredil XB Fiber di rinforzo strutturale da cui è discesa la volontà di proseguire la sperimentazione valutando la possibilità d'impiego delle fibre come rinforzo strutturale per altre tipologie di conglomerato bituminoso ripetendo i passi dal numero 1) p.to II, al numero 3).

- 4) Analisi comparativa dei risultati

Infine una seconda fase ha previsto:

- 1) Analisi sulla possibile azione modificante nei leganti bituminosi
- 2) Prove complesse di tipo prestazionale
  - I. modulo di rigidezza UNI EN 12697-26
  - II. resistenza alla fatica: UNI EN 12697-24

**INDIVIDUAZIONE DEL CONGLOMERATO BITUMINOSO DI RIFERIMENTO**

Il programma sperimentale è stato focalizzato sui possibili effetti di rinforzo strutturale, in termini di miglioramento delle proprietà meccaniche, per conglomerati bituminosi tipo usura per 2 motivi principali:

- a. perché gli studi pregressi a disposizione riguardavano una sperimentazione su di una miscela bituminosa tipo usura ("asphalt mixture specification" PHX C-3/4 con legante bituminoso PG70-10);
- b. per opportunità commerciale essendo lo strato di usura quello che viene maggiormente rinnovato.

Inoltre l'ipotesi è stata quella di utilizzare dei conglomerati bituminosi che fossero previsti in opere in corso di realizzazione per poter avere dei capitolati, con relative specifiche tecniche, da poter utilizzare per fissare gli obiettivi di riferimento, e per poter avere un'eventuale immediata applicazione in opera.

Il conglomerato bituminoso di riferimento iniziale è stato un "TAPPETO D'USURA"  $\phi_{max} < 14,0mm$  con bitume modificato per piste automobilistiche.

La successiva prosecuzione della sperimentazione, per valutare la possibilità d'impiego delle fibre sintetiche Ruredil XB Fiber come rinforzo strutturale per altre tipologie di conglomerato bituminoso, ha consentito di scegliere 2 ulteriori miscele di conglomerato bituminoso di riferimento: la prima è stato uno studio per uno SPLIT MASTIX ASPHALT con bitume modificato hard e con lo 0,3% microfibra di cellulosa e la seconda è stato un altro "TAPPETO D'USURA" T100 ma con bitume normale del tipo 70/100.

**CONGLOMERATO BITUMINOSO TIPO USURA PER PISTE AUTOMOBILISTICHE (ARLETTI S.R.L.)**

La prima miscela di conglomerato bituminoso individuata come riferimento per la sperimentazione è stata quella prevista nei "lavori di realizzazione di una nuova pavimentazione di un tratto della pista" dell'Autodromo Enzo e Dino Ferrari di Imola.

Con riferimento alle caratteristiche prescritte nel capitolato d'onere, sono state prodotte in laboratorio due miscele di conglomerato bituminoso di cui una con 0,5kg/ton di fibre sintetiche Ruredil XB Fiber.

Il dosaggio delle fibre, 0,5kg/ton di miscela, è quello indicato dal produttore ed utilizzato anche nello studio precedentemente citato dell'Università dello stato dell'Arizona

**CARATTERIZZAZIONE DELLA MISCELA DI AGGREGATI "DI RIFERIMENTO"**

Le caratteristiche fisico-meccaniche dei singoli componenti costitutivi la miscela degli aggregati sono contenute nei seguenti rapporti di prova a cui si rimanda:

Filler di recupero	<b>RP #: 112393</b>	21/07/2011
Filler di apporto	<b>RP #: 112392</b>	21/07/2011
Porfido 8-12 S	<b>RP #: 112391</b>	21/07/2011
Porfido 4-8 T	<b>RP #: 112390</b>	21/07/2011
Sabbia 0-4	<b>RP #: 112389</b>	21/07/2011

La miscela di aggregati era composta da: 38% sabbia 0-4; 16% porfido 4-8 T; 36% porfido 8-12 S; 4% filler di recupero; 6% filler apporto.

#### *CARATTERIZZAZIONE DELLA LEGANTE BITUMINOSO*

Il legante bituminoso utilizzato è stato del tipo modificato con polimeri SBS (modifica hard) a viscosità controllata per ottenere un'alta lavorabilità: Lowall HM40 prodotto dalla Vlli&Zabban, con un dosaggio pari al 6,5% calcolato sull'aggregato.

Descrizione	NORMA	Valore tipico	U. mis.
Penetrazione su bitume a 25°C, 100 g/5''	UNI EN 1426	32	dmm
Punto di rammollimento (P.A.)	UNI EN 1427	80	°C
Punto di rottura Fraass - Metodo A	UNI EN 12593	-15	°C
<i>Caratteristiche dopo RTFOT EN 12607-1</i>	<i>Mth prova</i>		
Penetrazione su bitume a 25°C, 100 g/5''	%originale	70	%

Rif. scheda tecnica su bitume "fresco"

#### **CONGLOMERATO BITUMINOSO SPLITT MASTIX ASPHALT (MISC. DI LAB.)**

La seconda miscela di conglomerato bituminoso individuata come riferimento per la sperimentazione è stato uno Splitt Mastix Asphalt che oltre ad avere un legante bituminoso modificato era previsto con l'aggiunta dello 0,3% (calcolato sulla miscela) di microfibra di cellulosa.

Con riferimento alle caratteristiche prescritte, sono state prodotte in laboratorio due miscele di conglomerato bituminoso di cui una con le microfibre già previste e la seconda con lo 0,5kg/ton di fibre sintetiche Ruredil XB Fiber in sostituzione delle microfibre di cellulosa.

Il dosaggio delle fibre, 0,5kg/ton di miscela, è quello indicato dal produttore ed utilizzato anche nello studio precedentemente citato dell'Università dello stato dell'Arizona.

#### *CARATTERIZZAZIONE DELLA MISCELA DI AGGREGATI "DI RIFERIMENTO"*

Le caratteristiche fisico-meccaniche dei singoli componenti costitutivi la miscela degli aggregati sono contenute nei certificati di marcatura CE del prodotto (rif. Sangalli S.p.A. C.B. T95) a cui si rimanda.

La miscela di aggregati era composta da: 24% sabbia 0-4; 36% graniglia 3-6; 30% graniglia 6-12; 2% filler di recupero; 8% filler apporto e con 0,3% microfibra di cellulosa calcolato sulla miscela laddove non era presente la fibra sintetica Ruredil XB Fiber.

#### *CARATTERIZZAZIONE DELLA LEGANTE BITUMINOSO*

Il legante bituminoso utilizzato è stato del tipo modificato con polimeri SBS (modifica hard) con un dosaggio pari al 6,0% calcolato sull'aggregato.

**CONGLOMERATO BITUMINOSO TIPO USURA T100 (SANGALLI SPA)**

La terza miscela di conglomerato bituminoso individuata come riferimento per la sperimentazione è stata un tappeto d'usura con legante bituminoso non modificato 70/100, previsto in un lavoro di rifacimento del manto superficiale di un tratto della strada provinciale S.S.342 (Bergamo-Lecco), tra Perego e Rovagnate, e previsto anche in una parte del completamento del sistema di svincoli di uscita di Mapello (BG) del prolungamento della nuova tangenziale che si innesta nella S.S.342 (Bergamo-Lecco).

In questo caso sono stati prelevati dall'impianto di produzione di Sangalli SpA a Mapello, tre miscele di conglomerato bituminoso di cui una secondo le prescrizioni di capitolato e le altre 2 con l'aggiunta di un dosaggio crescente di fibre sintetiche Ruredil XB Fiber e più precisamente: 0,5kg/ton e 1,0kg/ton sulla miscela.

Il primo dosaggio delle fibre, 0,5kg/ton di miscela, è quello indicato dal produttore ed utilizzato anche nello studio precedentemente citato dell'Università dello stato dell'Arizona mentre il secondo dosaggio è stato ipotizzato per 2 motivi principali:

- 1) enfatizzare i possibili effetti di rinforzo strutturale delle fibre sintetiche Ruredil XB Fiber;
- 2) assimilare il dosaggio a quello indicato nel capitolato ANAS per l'uso di fibre di rinforzo nei conglomerati bituminosi.

**CARATTERIZZAZIONE DELLA MISCELA DI AGGREGATI "DI RIFERIMENTO"**

Le caratteristiche fisico-meccaniche dei singoli componenti costitutivi la miscela degli aggregati sono contenute nei certificati di marcatura CE del prodotto (rif. Sangalli S.p.A. C.B. T100) a cui si rimanda.

**CARATTERIZZAZIONE DELLA LEGANTE BITUMINOSO**

Il legante bituminoso utilizzato è stato del tipo "normale 70/100" con un dosaggio pari al 5,4%±0,25%, calcolato sull'aggregato.

Le prove di caratterizzazione del legante bituminoso sono state effettuate sul bitume recuperato con il metodo Abson (norma di rif.to: CNR B.U. n 133/91) da una soluzione ottenuta da una estrazione effettuata a freddo del conglomerato bituminoso.

Le caratteristiche fisico-meccaniche dei bitumi estratti dalla miscela sono contenute nei seguenti rapporti di prova a cui si rimanda:

Tappeto T100 fibrorinforzato 1,0kg/ton	<b>RP #: 113686</b>	17/11/2011
Tappeto T100 fibrorinforzato 0,5kg/ton	<b>RP #: 113525</b>	03/11/2011
Tappeto T100 --	<b>RP #: 113526</b>	03/11/2011

**CONFEZIONAMENTO DELLE MISCELE DI PROVA E/O PRELIEVO DEL CAMPIONE DI C.B.**

La prima miscela di conglomerato bituminoso TIPO USURA PER PISTE AUTOMOBILISTICA (ARLETTI S.R.L.) è stata confezionata direttamente in laboratorio miscelando le diverse pezzature di aggregati come risultanti dal precedente studio della miscela, opportunamente preriscaldati e aggiungendo la quantità di legante previsto in capitolato. L'operazione è stata reiterata 2 volte per ottenere la quantità delle 2 tipologie di miscela necessaria alle successive prove: con e senza fibre sintetiche Ruredil XB Fiber [nel dosaggio di 0,5kg/ton].

La seconda miscela di conglomerato bituminoso SPLIT MASTIX ASPHALT è stata confezionata direttamente in laboratorio utilizzando la ricetta della miscela marcata CE dal produttore (Sangalli SpA) che ha direttamente fornito le diverse pezzature di aggregati. Dopo la fase di riscaldamento e miscelazione degli aggregati è stata aggiunta la fibra e la quantità di legante previsto nella predetta ricetta della miscela. L'operazione è stata reiterata 2 volte per ottenere la quantità di miscela necessaria alle successive prove delle 2 tipologie di miscela: la prima con lo 0,3% di microfibra di cellulosa (calcolato sulla miscela) e la seconda con le fibre sintetiche Ruredil XB Fiber [nel dosaggio di 0,5kg/ton].

La terza miscela di conglomerato bituminoso TIPO USURA T100 (SANGALLI SPA) è stata confezionata direttamente dal produttore presso il suo impianto di Mapello (BG). Il confezionamento della miscela priva di fibre ha seguito il processo produttivo usuale, mentre per le 2 miscele fibrorinforzate l'aggiunta delle fibre è avvenuta manualmente da un apposito bocchettone posto nel mescolatore a valle dell'aggiunta di filler e a monte dell'aggiunta del bitume. Le fibre sintetiche Ruredil XB Fiber sono state pertanto aggregate all'inerte già debitamente riscaldato e poi sono state mescolate per un periodo di almeno 35sec prima dell'aggiunta del legante bituminoso.

Nota: la benna di confezionamento ha una capacità di 1,2 ton per cui sono state svuotati 1,5 sacchetti da 1libbra (0,45kg) per un dosaggio pari a circa 0,05% e 3 sacchetti da 1libbra / cad per il dosaggio dello 0,1%.

Il prelievo della miscela di conglomerato bituminoso è avvenuto durante la fase di caricamento dei camion.

**CONFEZIONAMENTO E STESA SPERIMENTALE**

La terza miscela di conglomerato bituminoso TIPO USURA T100 (SANGALLI SPA) ha rappresentato il primo caso applicativo consentendo di verificare la compatibilità dell'aggiunta delle fibre con il sistema produttivo costituito dal confezionamento, trasporto, stesa e compattazione in opera.

Premesso che in questa prima fase sperimentale si è preferito aggiungere manualmente la quantità di fibre sintetiche Ruredil XB Fiber. Queste, attualmente, si presentano già confezionate in buste di plastica da 1 libbra = 0,45kg.

Confezionamento: si è optato di aggiungere le fibre subito dopo l'aggiunta del filler e appena prima la premiscelazione dell'inerte già riscaldato alla temperatura di confezionamento. Per ottimizzare la miscelazione delle fibre, considerato il tempo ridotto di questa operazione, si è optato per sversare direttamente le fibre separandole dal contenitore plastico. L'operazione, condotta manualmente, ha

permesso di verificare che le fibre sono inodori, si disperdono poco, compatibilmente con la loro relativa leggerezza, e si omogeneizzano bene ovvero non formano grumi.

Il conglomerato bituminoso in uscita dalla benna di miscelazione prima della fase di caricamento mostra la presenza del reticolo fibroso.

Trasporto stesa e compattazione: gli operatori che hanno trattato in stretta sequenza le 2 miscele, con e senza fibre, non hanno rilevato, seppur a livello qualitativo, alcuna differenza nel processo di decadimento della temperatura / raffreddamento, nella resa di stesa e nella lavorabilità e compattazione risultando pertanto le fibre neutre nel processo produttivo.

Le foto mostrano un campione di *USURA T100 FIBRORINFORZATO* Ruredil XB Fiber, steso ma non compattato e la successiva fase di rullatura.



**CARATTERIZZAZIONE FISICO MECCANICA DEI CONGLOMERATI BITUMINOSI**

La preparazione di tutti i provini da sottoporre alle prove di laboratorio per la caratterizzazione fisico-meccanica dei conglomerati bituminosi sono avvenute immediatamente dopo il confezionamento mantenendo calda la miscela in apposite stufe tarate sulle temperature previste per la stesa ed il costipamento. Anche la terza miscela è stata costipata subito dopo il confezionamento mantenendo la temperatura ottimale di stesa durante il trasporto dall'impianto al laboratorio. Questo ha consentito di evitare di riscaldare il conglomerato bituminoso raffreddato, innestando fenomeni di possibile alterazione delle qualità del legante bituminoso che avrebbero potuto a loro volta, alterare la qualità e la rappresentatività dei risultati alle condizioni di messa in opera.

**TRAZIONE INDIRECTA UNIFICATA UNI EN 12697-23**

I risultati delle prove di laboratorio per le diverse miscele sono contenute nei seguenti rapporti di prova a cui si rimanda:

Tappeto T100 fibrorinforzato 1,0kg/ton	<b>RP #: 113686</b>	17/11/2011
Tappeto T100 fibrorinforzato 0,5kg/ton	<b>RP #: 113525</b>	03/11/2011
Tappeto T100 --	<b>RP #: 113526</b>	03/11/2011
Splitt Mastix Asphalt <i>fibrorinforzato 0,5kg/ton</i>	<b>RP #: 113148</b>	06/10/2011
Splitt Mastix Asphalt con 0,3% microfibra di cellulosa	<b>RP #: 113147</b>	06/10/2011
Usura per piste automobilistiche <i>fibrorinforzato 0,5kg/ton</i>	<b>RP #: 112394</b>	21/07/2011
Usura per piste automobilistiche	<b>RP #: 112394</b>	21/07/2011

**PROVA MARSHALL COMPLETA UNI EN 12697-34**

I risultati delle prove di laboratorio per le diverse miscele sono contenute nei seguenti rapporti di prova a cui si rimanda:

Splitt Mastix Asphalt <i>fibrorinforzato 0,5kg/ton</i>	<b>RP #: 113148</b>	06/10/2011
Splitt Mastix Asphalt con 0,3% microfibra di cellulosa	<b>RP #: 113147</b>	06/10/2011
Usura per piste automobilistiche <i>fibrorinforzato 0,5kg/ton</i>	<b>RP #: 112394</b>	21/07/2011
Usura per piste automobilistiche	<b>RP #: 112394</b>	21/07/2011

**ELABORAZIONE E ANALISI DEI DATI SPERIMENTALI**

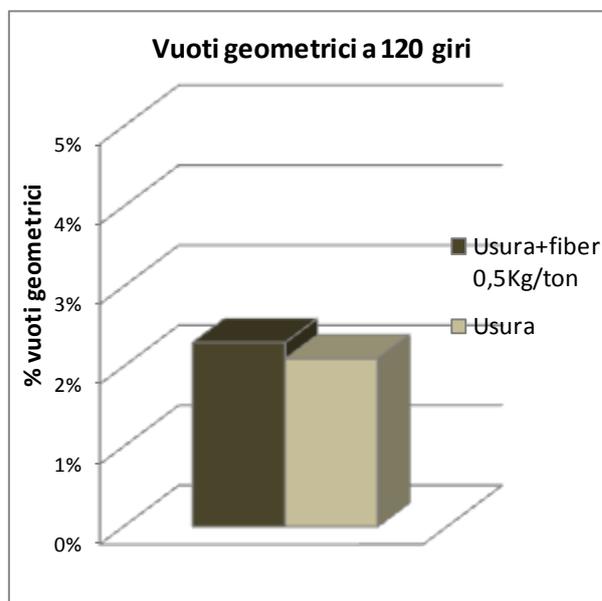
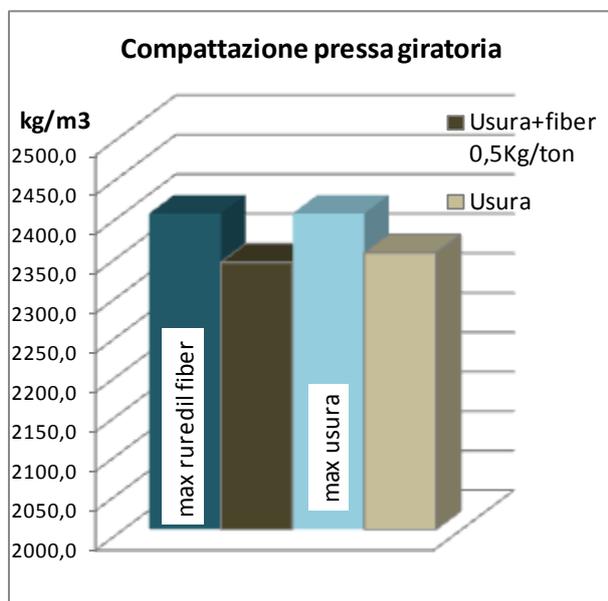
USURA PER PISTE AUTOMOBILISTICA (ARLETTI S.R.L.)

USURA PER PISTE AUTOMOBILISTICA (ARLETTI S.R.L.) *fibrorinforzato 0,5kg/ton*

Di seguito sono rappresentati i grafici dei risultati ottenuti dal procedimento di addensamento in pressa giratoria di provini di conglomerato bituminoso (UNI EN 12697-31).

In particolare, per tipologia di miscela, si è espresso il valore della massa volumica massima teorica, quella ottenuta a “fine vita” ed i rispettivi vuoti geometrici.

Il “fine vita” rappresenta lo stato di addensamento al termine della vita utile del conglomerato bituminoso e, nel procedimento di confezionamento del provino in laboratorio, è rappresentato da un numero di giri della pressa giratoria prescritto nelle specifiche tecniche in funzione dei dati di progetto del solido stradale.



Le risultanze evidenziano per il conglomerato bituminoso fibrorinforzato un valore minore di massa volumica addensata a parità di massa volumica massima teorica, a cui corrisponde una percentuale maggiore di vuoti teorici (ovvero calcolati dai dati geometrici del provino).

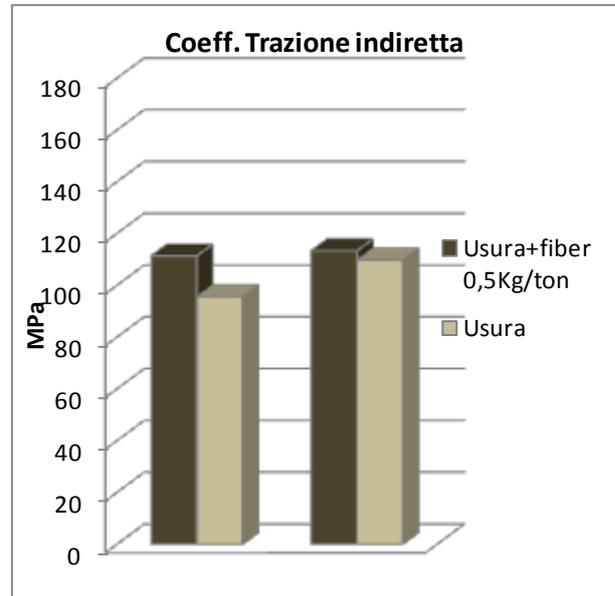
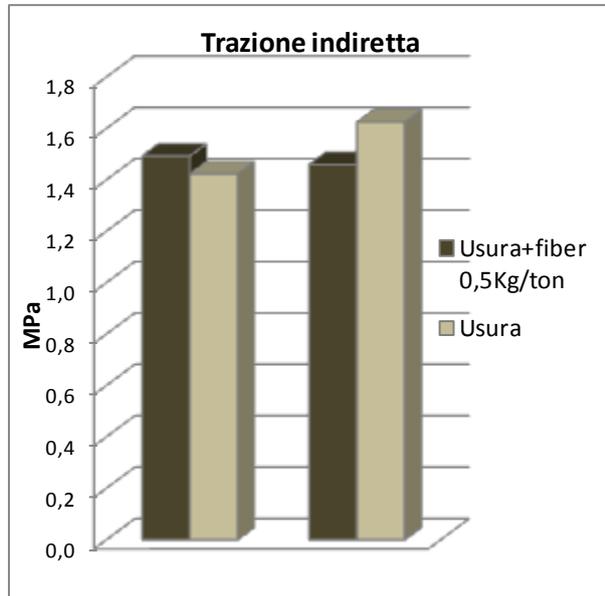
Di seguito sono rappresentati i grafici dei risultati ottenuti dalla prova di trazione indiretta. (UNI EN 12697-23). La prova è stata condotta sui provini cilindrici ottenuti attraverso il procedimento di addensamento in pressa giratoria (vedi p.to prec.) che, per il caso in esame, è stato condotto a “fine vita” (n. giri = 120).

Il valore di resistenza a trazione indiretta (ITS) è la massima tensione di trazione calcolata caricando diametralmente, fino a rottura, un provino cilindrico condizionato alla temperatura di prova e con una specifica velocità di avanzamento della macchina di compressione per la prova.

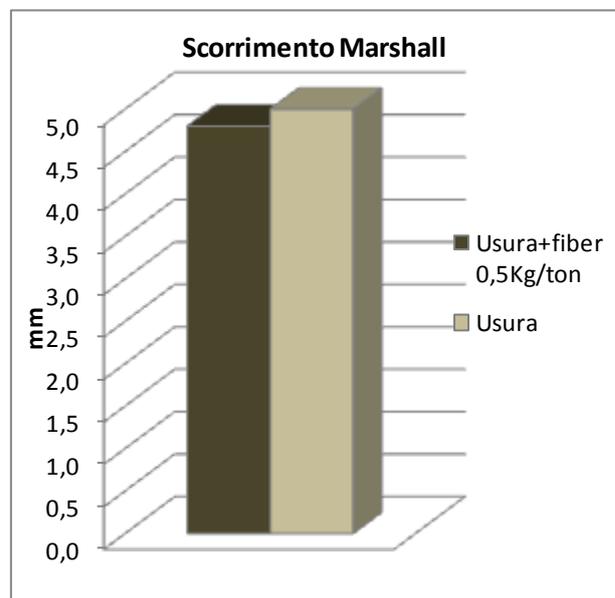
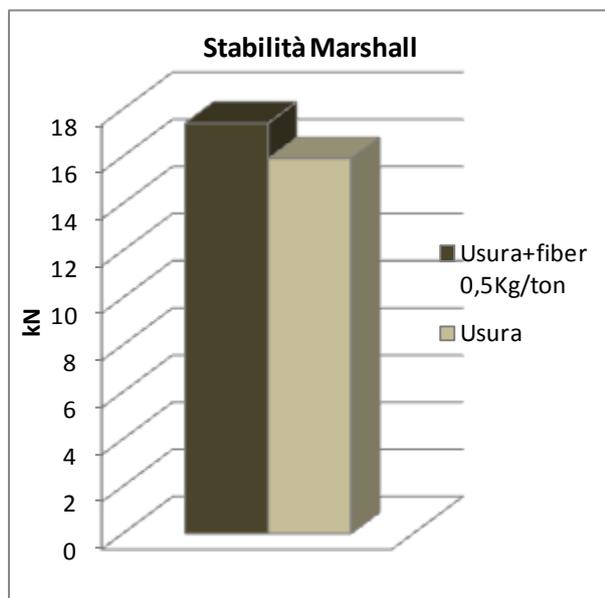
A livello deterministico puntuale, le risultanze non evidenziano, per il conglomerato bituminoso fibrorinforzato, un significativo miglioramento della resistenza a trazione indiretta né una univoca variazione del relativo coefficiente di trazione indiretta.

*Seguono i grafici.*

*Cfr fra 2 miscele di C.B. tipo usura per piste automobilistiche – bitume modificato hard  
(usura e usura con fibre)*



Di seguito sono rappresentati i grafici dei risultati ottenuti dalla prova Marshall. (UNI EN 12697-34). La prova è stata condotta sui provini cilindrici ottenuti attraverso il procedimento di costipamento Marshall.



Le risultanze sembrerebbero evidenziare, per il conglomerato bituminoso fibrorinforzato, un miglioramento del valore della stabilità Marshall e di una conseguente diminuzione dello scorrimento espresso in mm.

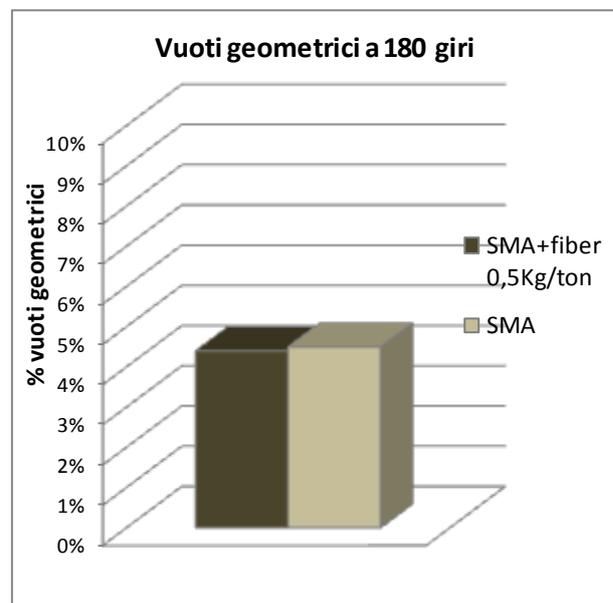
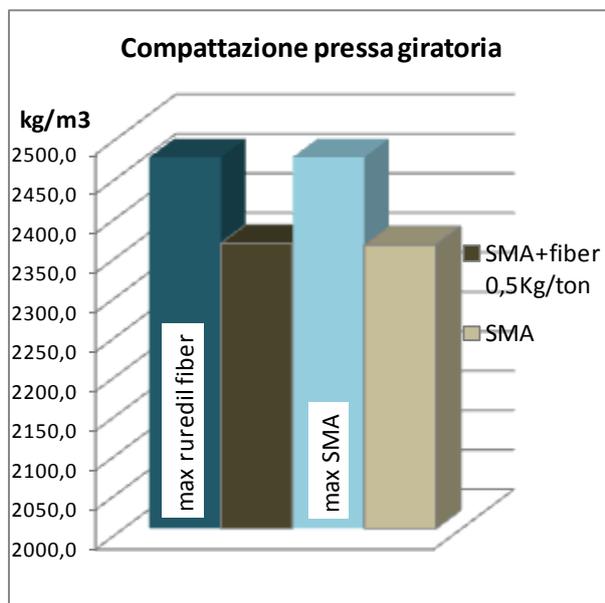
SPLITT MASTIX ASPHALT (SANGALLI SPA) con 0,3% microfibra di cellulosa

SPLITT MASTIX ASPHALT (SANGALLI SPA) *fibrorinforzato 0,5kg/ton*

Di seguito sono rappresentati i grafici dei risultati ottenuti dal procedimento di addensamento in pressa giratoria di provini di conglomerato bituminoso (UNI EN 12697-31).

In particolare, per tipologia di miscela, si è espresso il valore della massa volumica massima teorica, quella ottenuta a “fine vita” ed i rispettivi vuoti geometrici.

Nel caso specifico il “fine vita”, che nel procedimento di confezionamento del provino in laboratorio è rappresentato da un numero di giri della pressa giratoria, è riferito al valore indicato nel capitolato ANAS ed è pari a 180 giri.



Le risultanze non evidenziano apprezzabili differenze di addensabilità sia come valori di massa volumica che di % di vuoti teorici (ovvero calcolati dai dati geometrici del provino). Si rammenta però che entrambe le miscele testate erano dei conglomerati bituminosi fibrorinforzati avendo sostituito lo 0,3% microfibra di cellulosa originariamente prevista, con 0,5kg/ton di Ruredil XB Fiber. Le fibre testate hanno avuto gli stessi risultati della microfibra pur essendo con un dosaggio decisamente inferiore (0,05% contro 0,3%).

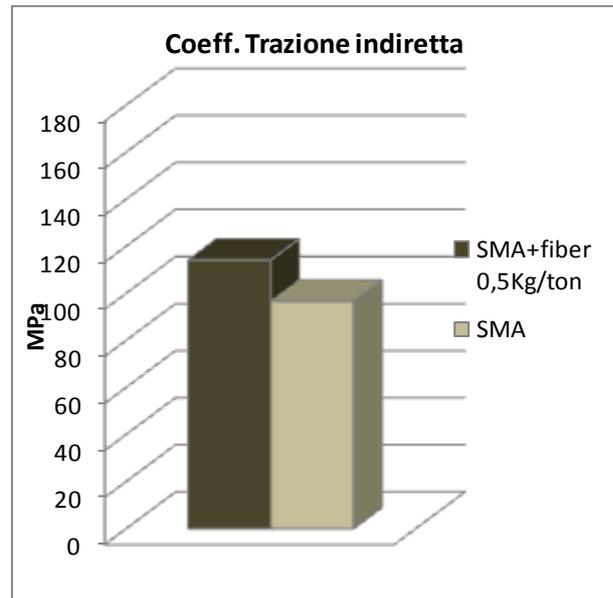
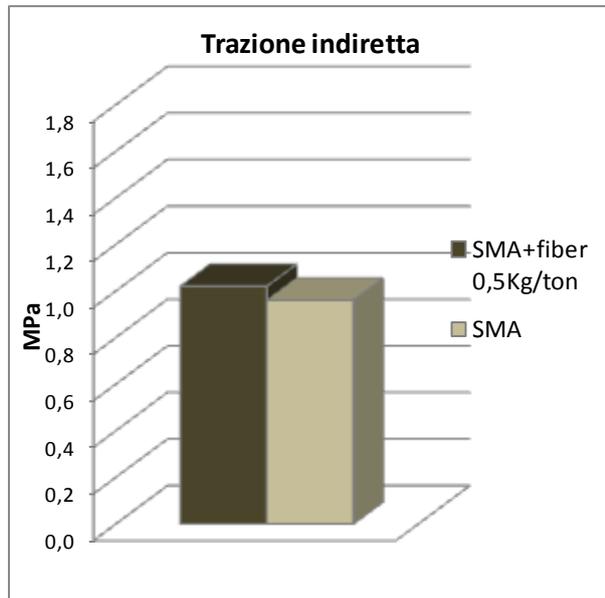
Di seguito sono rappresentati i grafici dei risultati ottenuti dalla prova di trazione indiretta. (UNI EN 12697-23). La prova è stata condotta sui provini cilindrici ottenuti attraverso il procedimento di addensamento in pressa giratoria (vedi p.to prec.) che, per il caso in esame, è stato condotto a “fine vita” (n. giri = 180).

Il valore di resistenza a trazione indiretta (ITS) è la massima tensione di trazione calcolata caricando diametralmente, fino a rottura, un provino cilindrico condizionato alla temperatura di prova e con una specifica velocità di avanzamento della macchina di compressione per la prova.

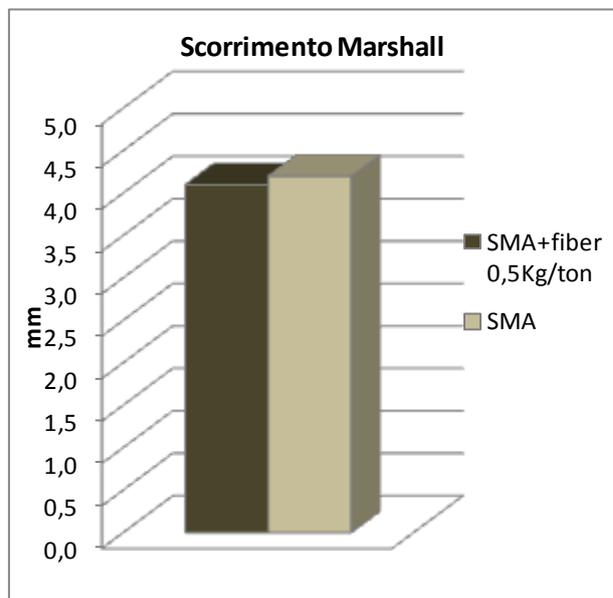
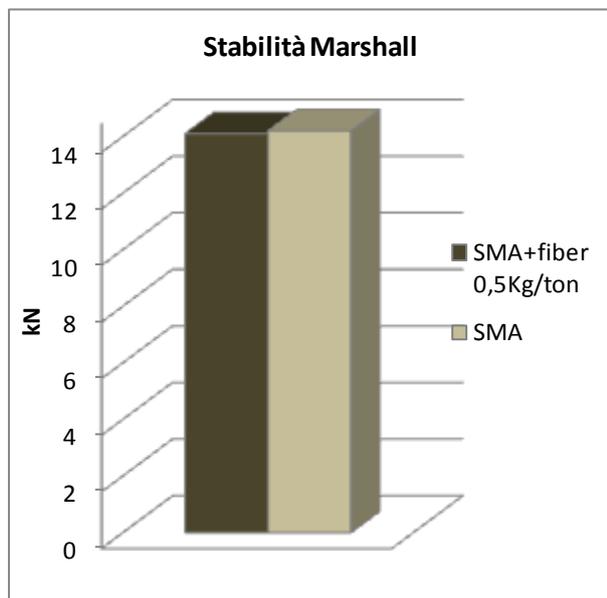
I risultati ottenuti sembrano evidenziare un lieve miglioramento della resistenza a trazione indiretta per il conglomerato bituminoso fibrorinforzato con le Ruredil XB Fiber.

Seguono i grafici.

*Cfr fra 2 miscele di C.B. tipo SMA – bitume modificato e microfibra di cellulosa sost. da XB Fiber*



Di seguito sono rappresentati i grafici dei risultati ottenuti dalla prova Marshall. (UNI EN 12697-34). La prova è stata condotta sui provini cilindrici ottenuti attraverso il procedimento di costipamento Marshall.



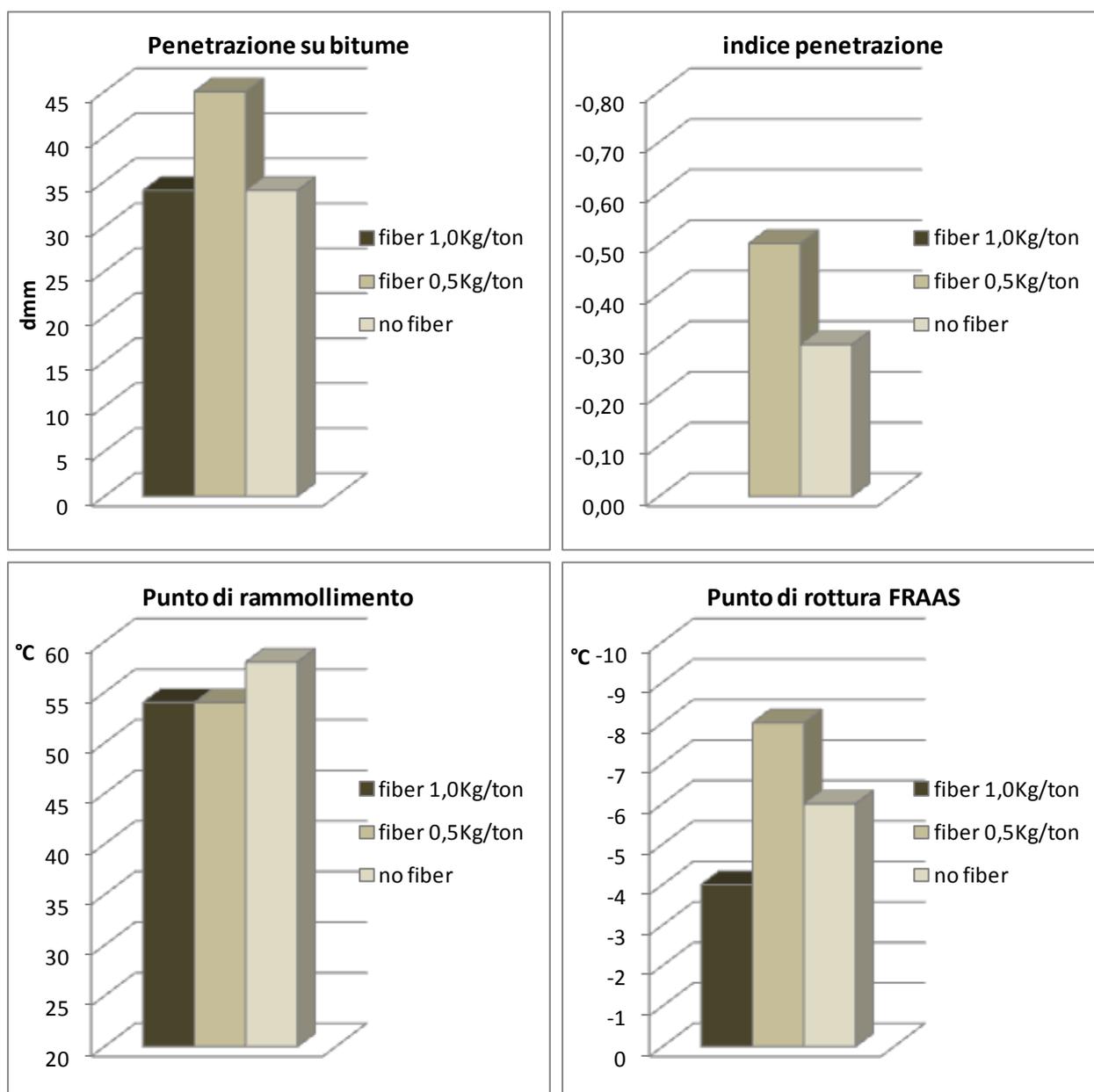
A livello deterministico puntuale i risultati ottenuti non evidenziano significative differenze del valore della stabilità Marshall e del relativo scorrimento in quanto tali variazioni rientrano nelle tolleranze previste dalla norma.

USURA T100 (SANGALLI SPA)

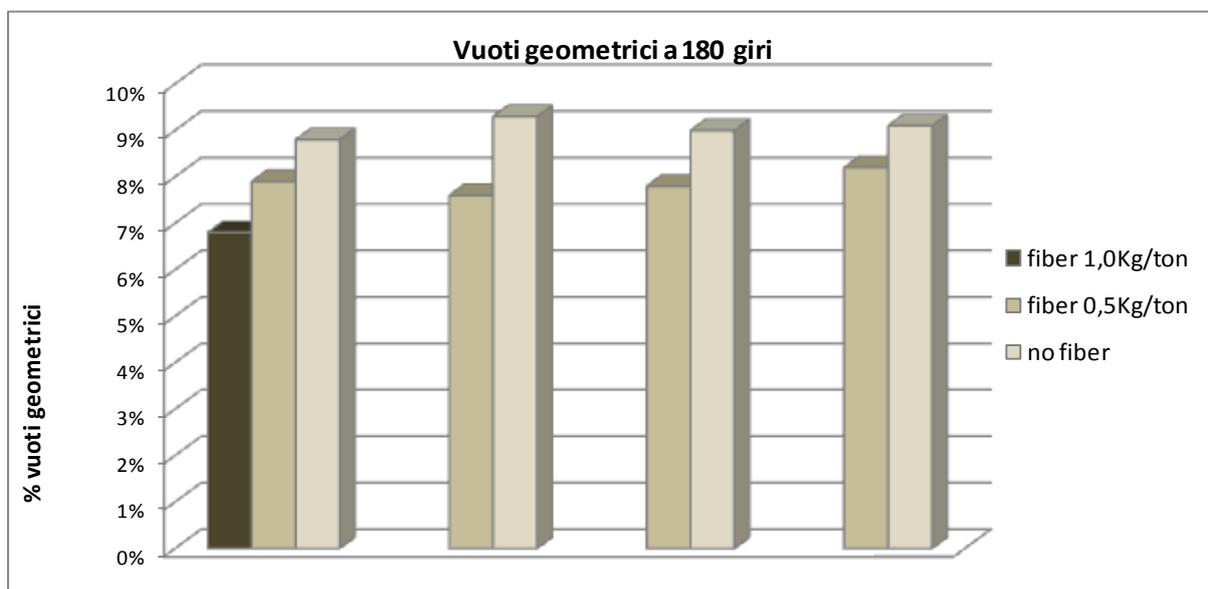
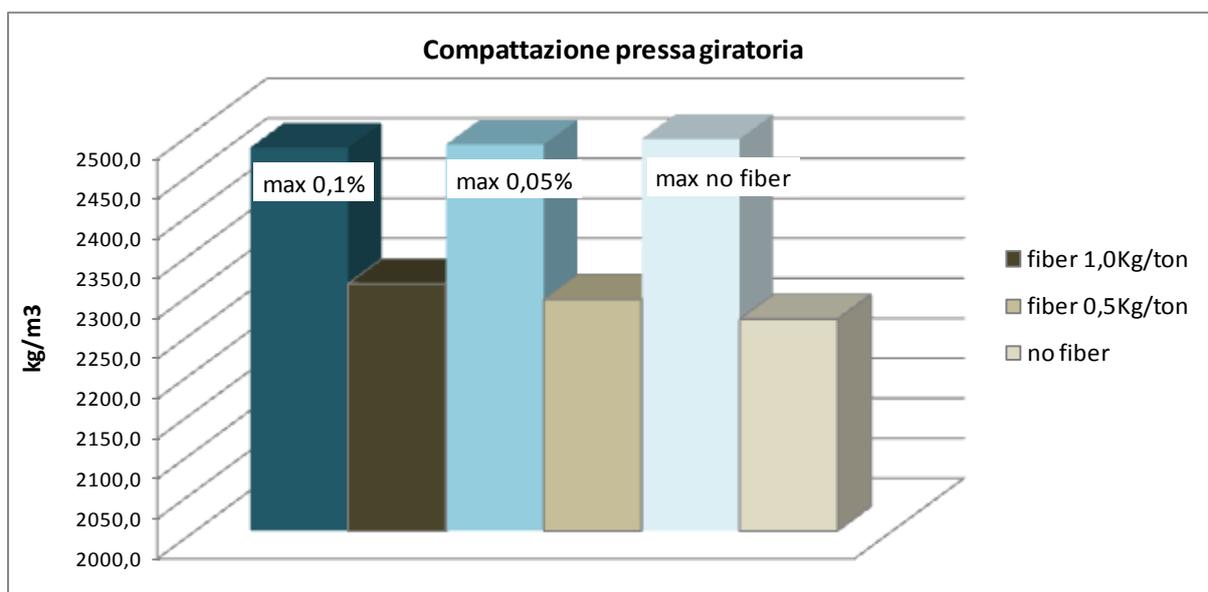
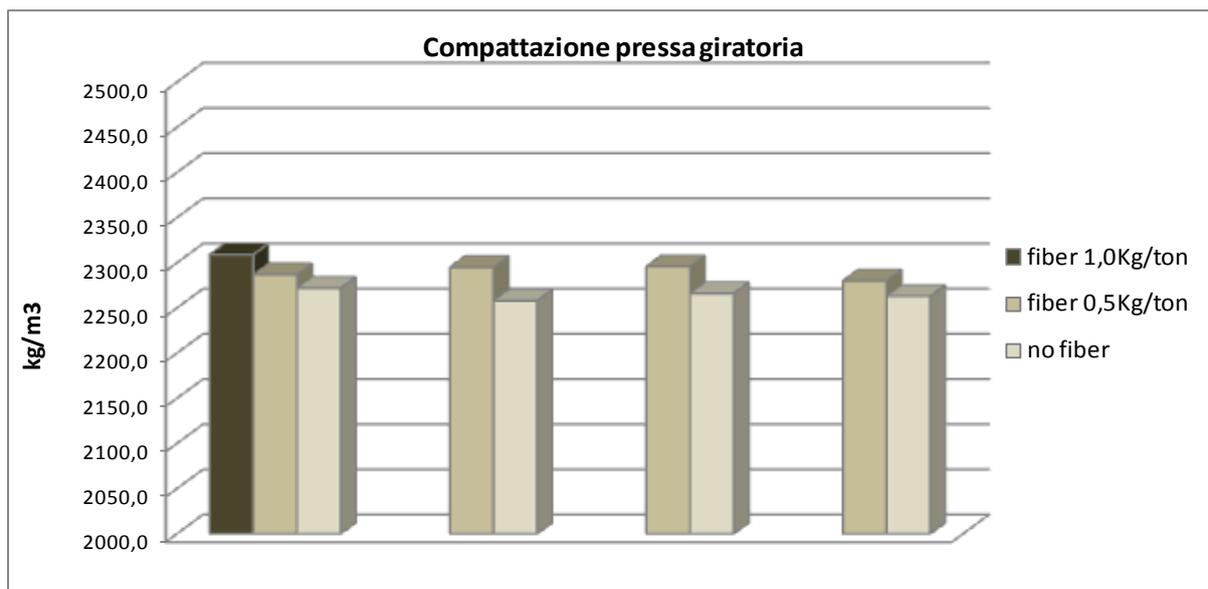
*USURA T100 (SANGALLI SPA) fibrorinforzato 0,5kg/ton*

*USURA T100 (SANGALLI SPA) fibrorinforzato 1,0kg/ton*

Di seguito sono rappresentati i grafici dei risultati ottenuti dalle prove eseguite su campioni di bitume estratti da 3 campioni di conglomerato bituminoso a contenuto crescente di fibre Ruredil XB Fiber. Considerato infatti che è stato utilizzato un bitume non modificato del tipo 70/100, si è cercato di verificare l'eventuale apporto dato dalla parte di fibre della miscela Ruredil XB Fiber che si scioglie con il calore e che potrebbe interagire con il legante bituminoso.



I risultati ottenuti inerenti le prove di carattere fisico meccanico, non evidenziano trend univoci rispetto alla variazione crescente di contenuto di fibre di rinforzo.



Nella pagina precedente sono rappresentati i grafici dei risultati ottenuti dal procedimento di addensamento in pressa giratoria di provini di conglomerato bituminoso (UNI EN 12697-31).

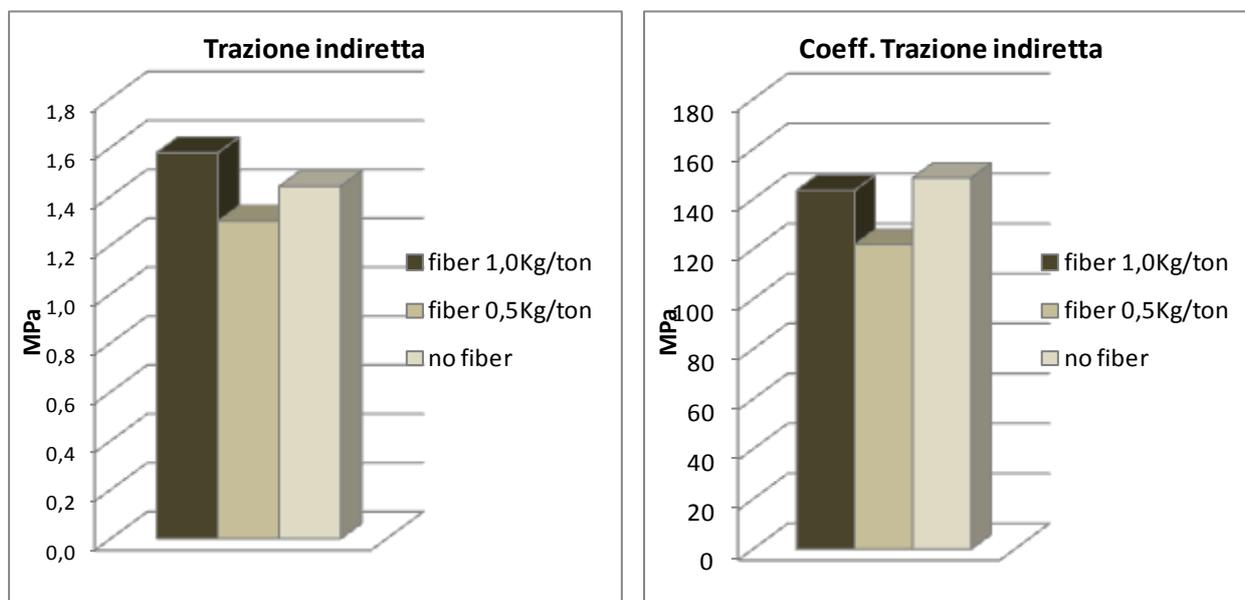
In particolare, per tipologia di miscela, nel primo grafico si è espresso il valore della massa volumica ottenuta dopo l'addensamento, nel secondo grafico si è evidenziato il valore della massa volumica massima teorica ed il rispettivo valore medio a "fine vita" e nel terzo grafico sono rappresentati i vuoti geometrici.

Anche in questo caso il "fine vita" è il numero di giri della pressa giratoria riferito al valore indicato nel capitolato ANAS ed è pari a 180 giri.

Le risultanze evidenziano una crescente addensabilità sia come valori di massa volumica che cresce al crescere del contenuto di fibre e di % di vuoti teorici (ovvero calcolati dai dati geometrici del provino) che per contro diminuiscono al crescere del contenuto di fibre.

Di seguito sono rappresentati i grafici dei risultati ottenuti dalla prova di trazione indiretta. (UNI EN 12697-23). La prova è stata condotta sui provini cilindrici ottenuti attraverso il procedimento di addensamento in pressa giratoria (vedi p.to prec.) che, per il caso in esame, è stato condotto a "fine vita" (n. giri = 180).

Il valore di resistenza a trazione indiretta (ITS) è la massima tensione di trazione calcolata caricando diametralmente, fino a rottura, un provino cilindrico condizionato alla temperatura di prova e cuna una specifica velocità di avanzamento della macchina di compressione per la prova.



I risultati ottenuti non evidenziano trend univoci rispetto alla variazione crescente di contenuto di fibre di rinforzo.

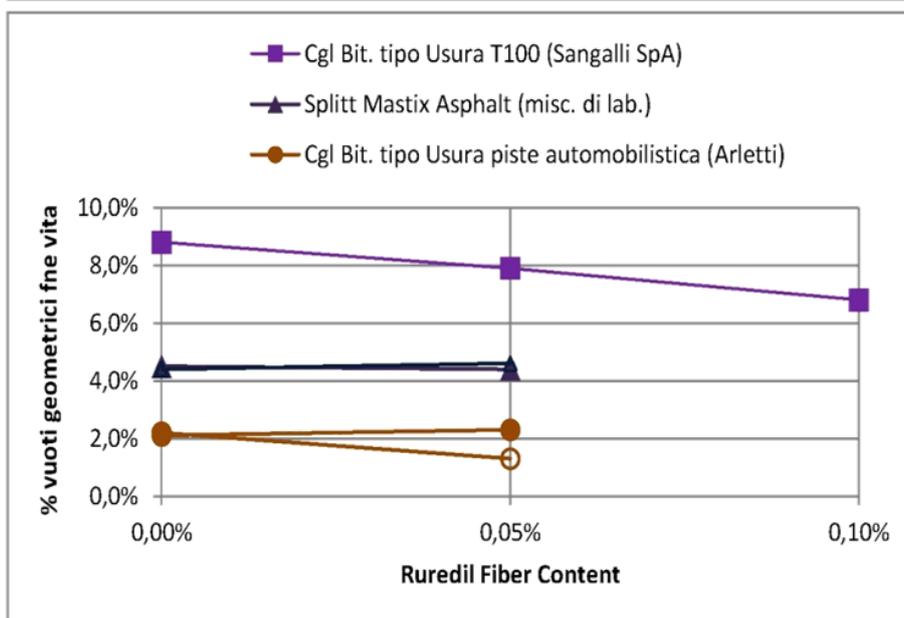
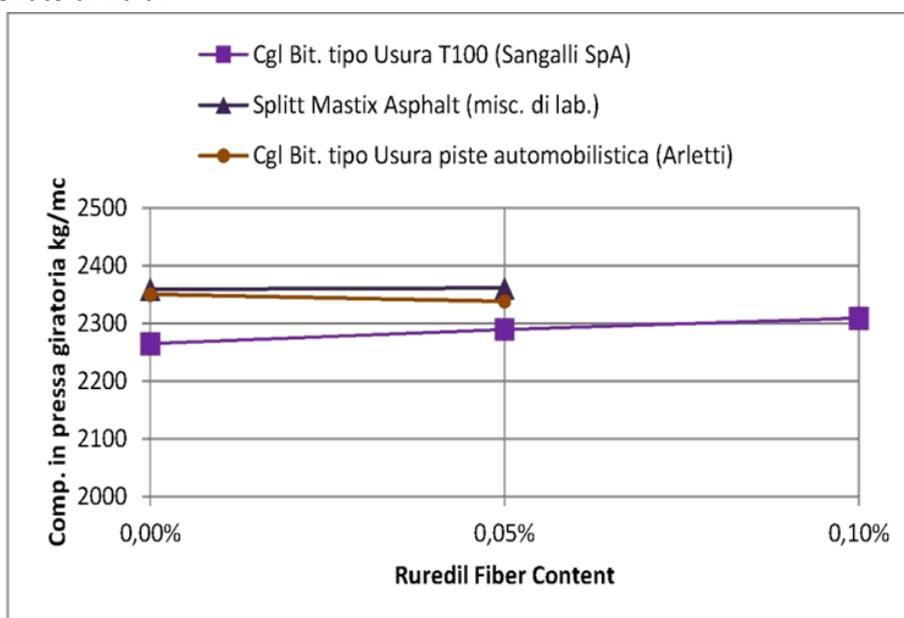
**ANALISI COMPARATIVA DEI RISULTATI**

Di seguito si procede con una analisi comparativa dei risultati illustrati nel paragrafo precedente e contenuti nei rispettivi rapporti di prova a cui si rimanda.

L'obiettivo di quest'analisi è di verificare se esistano dei trend comuni nella variazione dei singoli parametri per le 3 miscele di riferimento.

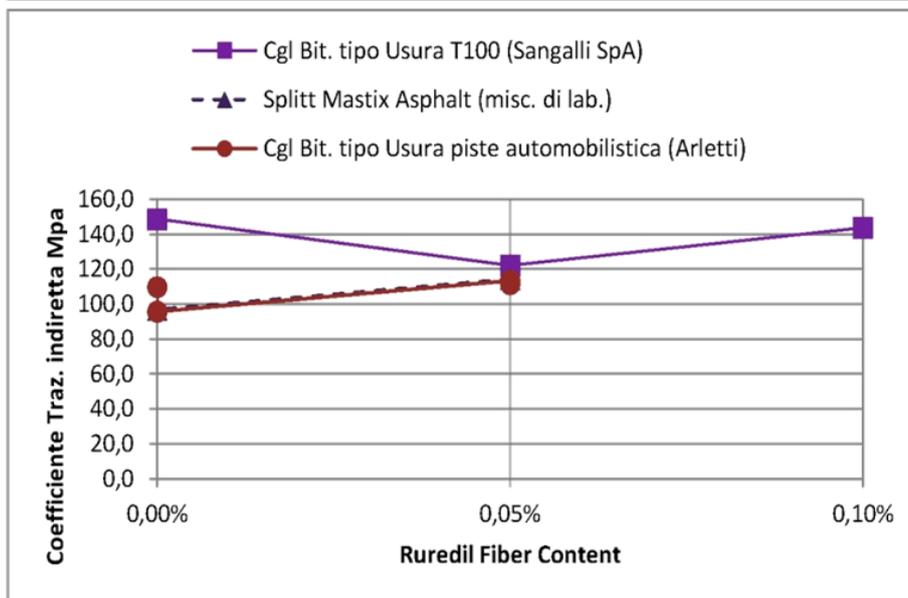
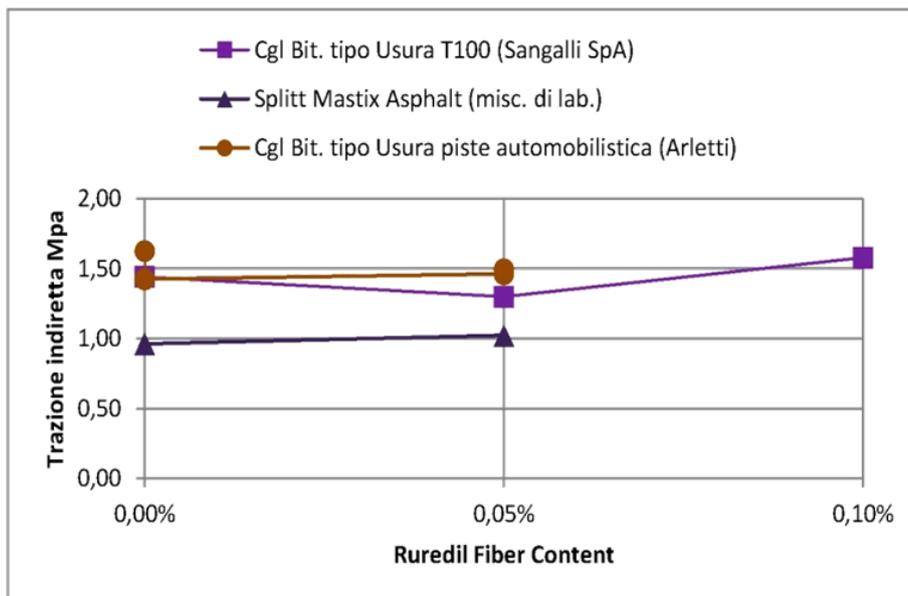
Ovviamente la valenza di questo tipo di analisi sarebbe ottimale se fosse svolta su di una significativa popolazione statistica di ogni risultato per ogni tipologia di miscela di riferimento. In ogni caso anche in questa fase si possono ricavare suggerimenti utili alla successiva prosecuzione della fase sperimentale.

I primi 2 grafici comparano i risultati ottenuti nel procedimento di addensamento in pressa giratoria al variare del contenuto di fibra.



La presenza delle fibre sembra essere significativa e con un trend univoco, solo nella miscela di conglomerato bituminoso che non usa il bitume modificato ovvero l'*USURA T100 (SANGALLI SPA)* mentre è indifferente nelle altre 2 tipologie di miscela di riferimento

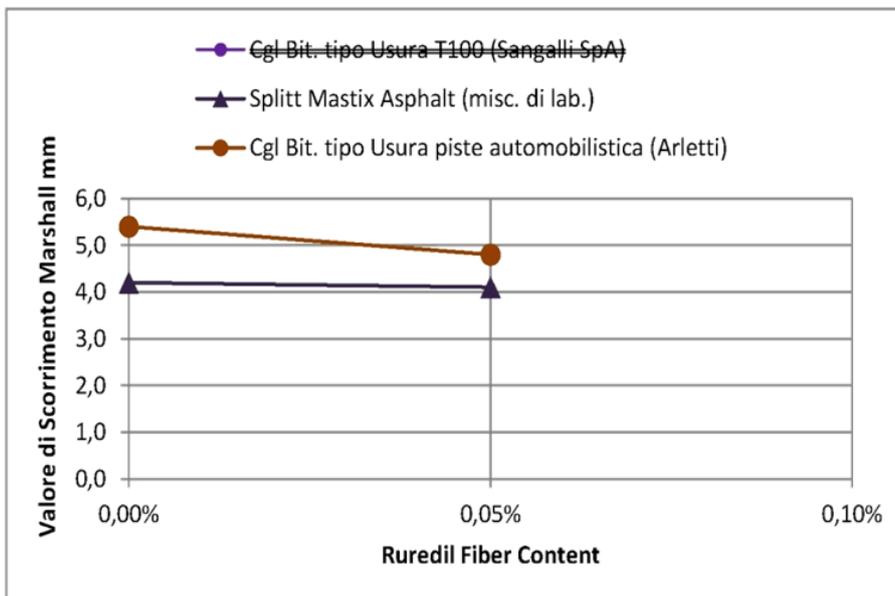
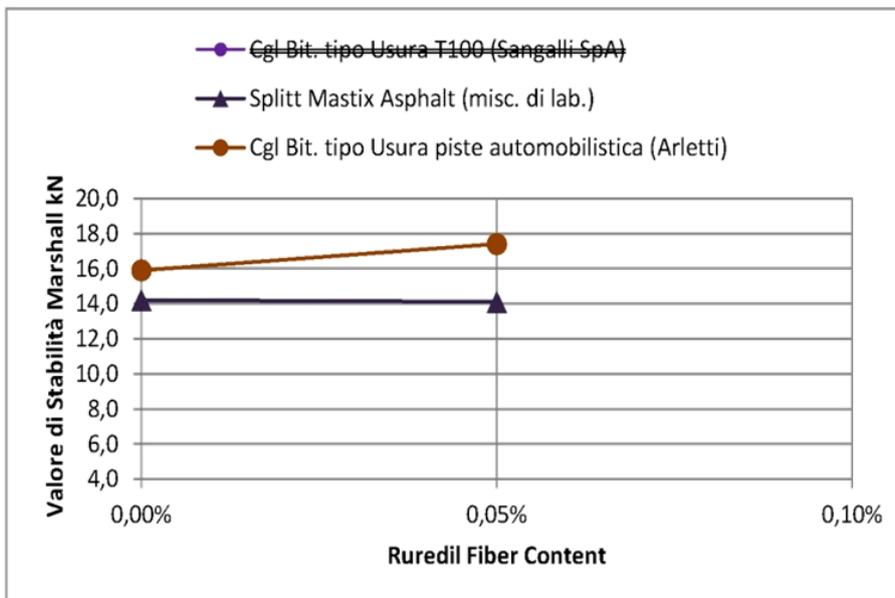
I 2 grafici che seguono comparano i risultati ottenuti dalla prova di trazione indiretta al variare del contenuto di fibra.



La presenza delle fibre sembrerebbe comportare un trend univoco, migliorativo e comparabile, nella 2 miscele di conglomerato bituminoso che usano il bitume modificato ovvero USURA PER PISTE AUTOMOBILISTICA (ARLETTI S.R.L) e SPLITT MASTIX ASPHALT (SANGALLI SPA). Per l'*USURA T100 (SANGALLI SPA)* se non si considera il valore ottenuto con un dosaggio di Ruredil XB Fiber pari a 0,5kg/ton, si potrebbe anche ipotizzare una linea

di tendenza per il solo valore di resistenza a Trazione indiretta, compatibile con le altre 2 tipologie di miscela di riferimento.

I 2 grafici che seguono comparano i risultati ottenuti dalla prova Marshall.



La presenza delle fibre sembrerebbe migliorare il valore di Stabilità Marshall nell'USURA PER PISTE AUTOMOBILISTICA (ARLETTI S.R.L) mentre parrebbe confermare l'interscambiabilità delle microfibre di cellulosa originariamente previste nello SPLITT MASTIX ASPHALT (SANGALLI SPA) con le Ruredil XB Fiber anche se ad un dosaggio inferiore (pari a 0,05% contro lo 0,3%)

La prova non è stata eseguita per l'USURA T100 (SANGALLI SPA).

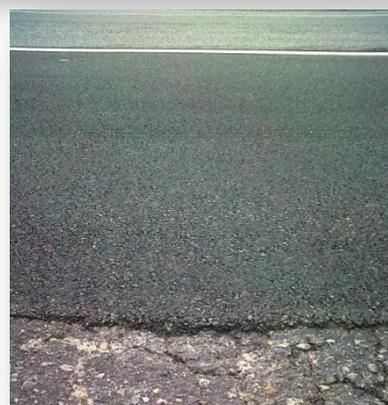
### **SOPRALLUOGO SULLE STESE SPERIMENTALI**

In data 20/12/2011, prima dell'inizio della seconda fase sperimentale che riguarda le prove complesse di tipo prestazionale, è stato eseguito un primo sopralluogo sulle 2 stese sperimentali ovvero: un tratto della strada provinciale S.S.342 (Bergamo-Lecco), tra Perego e Rovagnate, e in una parte del sistema di svincoli di uscita di Mapello (BG) del prolungamento della nuova tangenziale che si innesta nella S.S.342 (Bergamo-Lecco).

Il sopralluogo è avvenuto congiuntamente al cliente, in condizioni climatiche fredde ( $Temp < 10^{\circ}C$ ), dopo 1 mese circa dalla stesa e successiva riapertura al traffico.

Il traffico per i 2 tratti di strada in oggetto si può definire intenso soprattutto la provinciale S.S.342 tra Perego e Rovagnate che, inoltre, rispetto alla percorrenza, è leggermente in discesa e immediatamente prima di un semaforo.

Le fotografie del sopralluogo sono riportate di seguito.



*Strada provinciale S.S.342 (Bergamo-Lecco), tra Perego e Rovagnate*

A destra: particolari del tratto di stesa sperimentale con l'*USURA T100 (SANGALLI SPA)* con un dosaggio di Ruredil XB Fiber pari a 0,5kg/ton.

Allo stato dell'arte, come normalmente dovrebbe accadere, non si hanno evidenze di fenomeni deformativi o di degrado incipiente, ne si possono osservare differenze tra le due stese con e senza le Ruredil XB Fiber.



*Sistema di svincoli di uscita di Mapello (BG)*

A destra: particolari del tratto di stesa sperimentale con l'USURA T100 (SANGALLI SPA) con un dosaggio di Ruredil XB Fiber pari a 1,0kg/ton

Allo stato dell'arte, come normalmente dovrebbe accadere, non si hanno evidenze di fenomeni deformativi o di degrado incipiente, ne si possono osservare differenze tra le due stese con e senza le Ruredil XB Fiber.

**PROVE COMPLESSE DI TIPO PRESTAZIONALE**

A conclusione della prima fase sperimentale si è proceduto con la seconda fase sperimentale nella quale sono state condotte prove complesse di tipo prestazionale. In particolare sono stati messi a confronto i risultati ottenuti con la miscela di conglomerato bituminoso tipo usura T100 con bitume non modificato 70/100 prodotta da Sangalli SpA, e la stessa con 0,5kg/ton di fibre sintetiche Ruredili XBfiber.

**MODULO DELLA RIGIDEZZA UNI EN 12697-26 ALLEGATO C**

Il modulo di rigidità caratterizza la capacità di deformazione di una miscela in conseguenza delle tensioni derivate dall'applicazione di un carico di tipo impulsivo e pertanto definisce il comportamento meccanico dei conglomerati bituminosi.

Con riferimento alla norma UNI EN 12697-26, è dato dal valore assoluto del modulo complesso:

$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} = \sqrt{(E_1^2 + E_2^2)}$$

**MODULO DI RIGIDEZZA**

Inoltre la norma specifica i metodi per la caratterizzazione della rigidità di miscele bituminose, eseguite su materiale bituminoso compattato sottoposto a carico sinusoidale o altro tipo di carico controllato, usando differenti tipi di provino e supporti, attraverso tipologie di prova alternative incluso test di flessione e test di trazione diretta e/o indiretta.

Nello specifico è stato eseguito un "Indirect tensile test" [IT] su "cylindrical specimens" [CY] secondo l'appendice C delle norme citate.

Questa tipologia di test [IT-CY] risulta essere tra le più diffuse in Italia, in quanto offre alcuni vantaggi:

- il provino è sottoposto ad uno stato di tensione biassiale (che meglio rappresenta le condizioni reali rispetto ai test di flessione);
- il modulo di rigidità si ottiene, a meno di un fattore di forma, dal rapporto tra tensione e deformazione;
- non si tratta di una prova distruttiva, perché il provino rimane disponibile per eventuali altre prove;
- si possono utilizzare provini anche di piccolo diametro.

I risultati delle prove di laboratorio sono contenute nei seguenti rapporti di prova a cui si rimanda:

<i>USURA T100 (SANGALLI SPA) fibrorinforzato 0,5kg/ton</i>	<b>RP #: 120364</b>	13/02/2012
<i>USURA T100 (SANGALLI SPA)</i>	<b>RP #: 120367</b>	13/02/2012

**CURVA MAESTRA DELLA RIGIDEZZA**

Il comportamento reologico del conglomerato bituminoso è fortemente dipendente dalla temperatura e dal tempo di carico (o dalla frequenza, cioè il reciproco del periodo).

Per confrontare i risultati restituiti dalle prove sul materiale a diverse temperature si usa normalizzare una delle due variabili. Si arriva, cioè, a riunire in un'unica curva i dati registrati alle diverse isoterme, in virtù del *principio di sovrapposizione tempo temperatura* teorizzato da P.E. Rouse all'interno di The Journal of Chemical Physics 21 del 1953.

Il principio implica che la stessa variazione di una grandezza meccanica, in questo caso il Modulo di rigidità, ottenuta variando la temperatura a frequenza fissata, può essere ottenuta variando la frequenza e tenendo fissa la temperatura.

La singola curva alla quale vengono ricondotti i dati relativi alle diverse temperature prende il nome di "Master Curve", o Curva Maestra.

Questa curva si ottiene scegliendo una temperatura di riferimento e traslando orizzontalmente i valori del Modulo ottenuti alle rimanenti temperature di prova.

I risultati delle prove di laboratorio sono contenute nei seguenti rapporti di prova a cui si rimanda:

<i>USURA T100 (SANGALLI SPA) fibrorinforzato 0,5kg/ton</i>	<b>RP #: 120365</b>	13/02/2012
<i>USURA T100 (SANGALLI SPA)</i>	<b>RP #: 120368</b>	13/02/2012

**PROVE A FATICA E DETERMINAZIONE DELLA LEGGE DI FATICA UNI EN 12697-24 ALLEGATO E**

Anche in questa prova si utilizza un provino cilindrico compattato in laboratorio.

Attraverso la prova si caratterizza il comportamento della miscela bituminosa sottoposta a prova di fatica con carico ripetuto, con una modalità di carico costante e utilizzando un carico di trazione diretta.

Infatti il provino, di forma cilindrica, è sottoposto a carichi di compressione ripetuti con un segnale di carico semisenverso attraverso il piano diametrale verticale. Questo carico sviluppa uno sforzo di trazione relativamente uniforme perpendicolare alla direzione del carico applicato lungo il piano diametrale verticale, che causa la rottura del provino mediante rottura nella parte centrale del diametro verticale.

La vita a rottura deve essere determinata come il numero totale di applicazioni del carico prima che si verifichi la rottura del provino dove la rottura è quando lo "spostamento" (deformazione  $\mu\epsilon$ ) è aumentato del doppio rispetto all'inizio della prova [*criteri di fatica convenzionale (forza costante)*].

**DETERMINAZIONE DELLA LEGGE DI FATICA**

Il criterio di fatica per ogni materiale bituminoso si ottiene dal rapporto di regressione dei minimi quadrati dei singoli risultati dei diversi provini sottoposti a prova e opportunamente inseriti in un grafico dove il logaritmo della deformazione iniziale è la variabile indipendente e i dati del logaritmo della vita a rottura è la variabile dipendente da cui deriva:

$$\log(N_f) = k + n * \log(\epsilon_0)$$

dove:  $N_f$  è il numero di applicazioni del carico;

$k, n$  sono costanti del materiale;

$\epsilon_0$  è la deformazione a trazione in  $\mu\epsilon$  al centro del provino.

I risultati delle prove di laboratorio sono contenute nei seguenti rapporti di prova a cui si rimanda:

<i>USURA T100 (SANGALLI SPA) fibrorinforzato 0,5kg/ton</i>	<b>RP #: 120366</b>	13/02/2012
<i>USURA T100 (SANGALLI SPA)</i>	<b>RP #: 120369</b>	13/02/2012

**ANALISI COMPARATIVA DEI RISULTATI OTTENUTI**

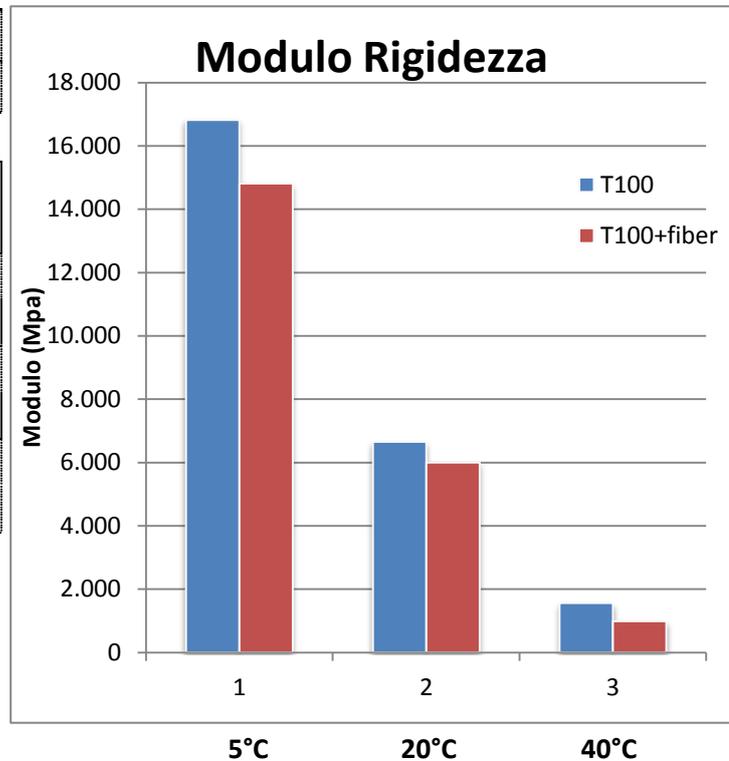
Di seguito si procede con una analisi comparativa dei risultati illustrati nel paragrafo precedente e contenuti nei rispettivi rapporti di prova a cui si rimanda.

L'obiettivo di quest'analisi è di verificare ed evidenziare eventuali differenziazioni nel comportamento prestazionale delle 2 miscele Usura T100 con e senza Ruredili XBfiber attraverso un confronto comparativo dei risultati ottenuti senza però entrare nel merito specifico dei valori ottenuti.

### MODULO DELLA RIGIDEZZA UNI EN 12697-26 ALLEGATO C

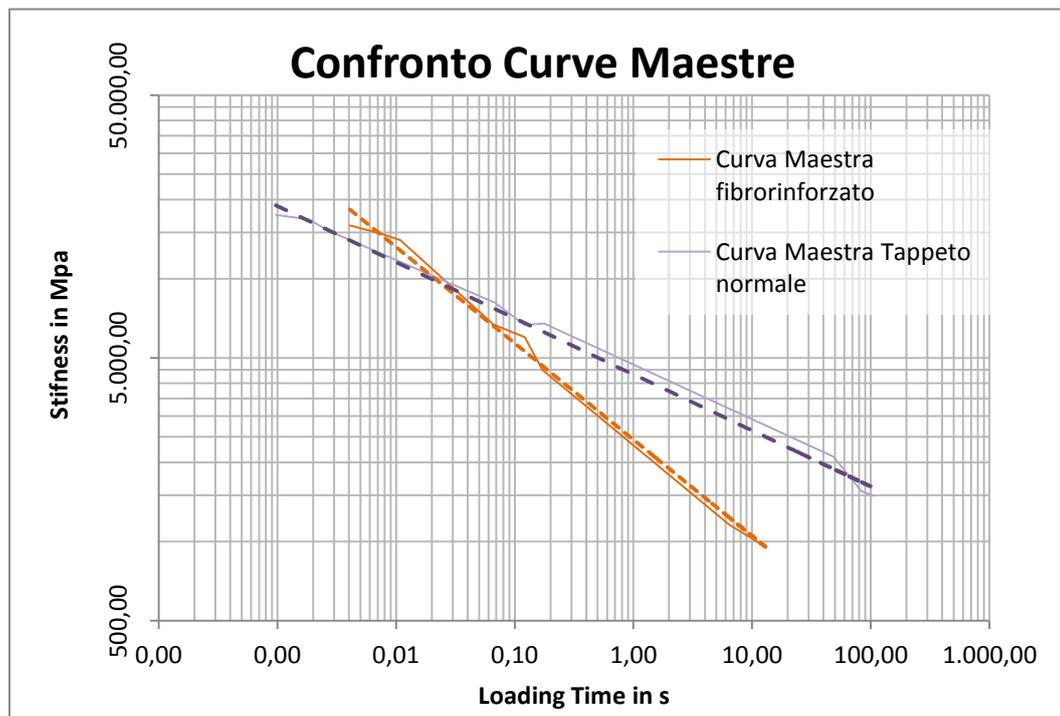
Tempo di carico	124ms
Deformazione o spostamento	5 $\mu$ m

Provino cod.	Modulo Mpa	Temp °C
2	16.816	5
2F	14.808	
5	6.653	20
5F	5.995	
8	1.555	40
8F	986	



Temperatura alla quale è stata eseguita la prova

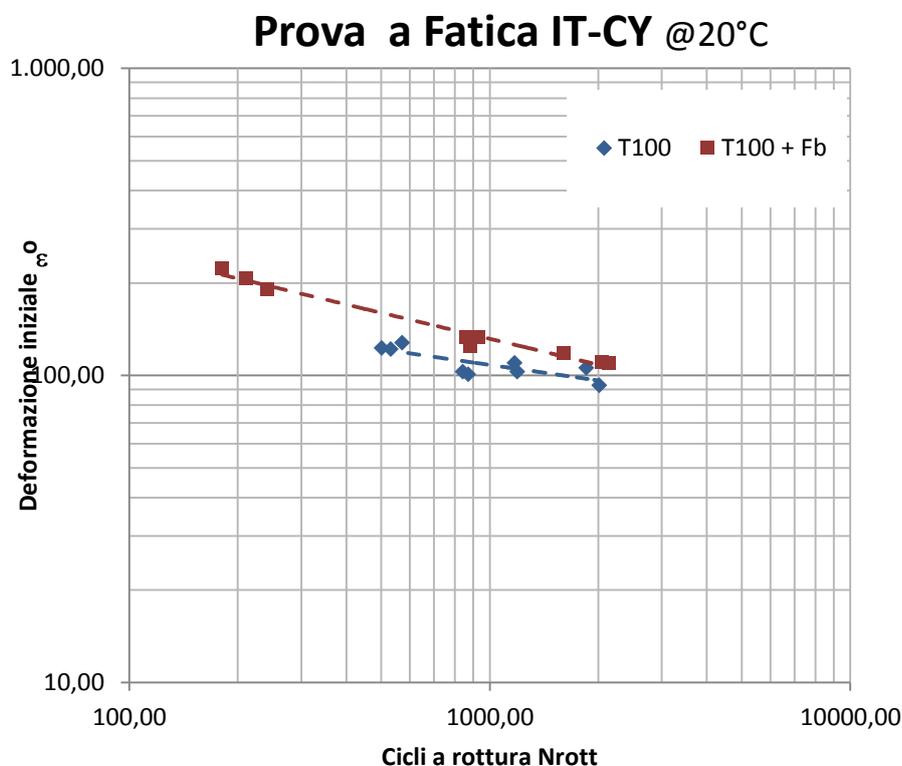
### CURVA MAESTRA DELLA RIGIDEZZA



### DETERMINAZIONE DELLA LEGGE DI FATICA

T100	Y	X
DATI	$\epsilon_0$	$N_{rott}$
Provino 1	106,00	1.851
Provino 2	93,00	2.011
Provino 3	110,00	1.171
Provino 4	128,00	571
Provino 5	123,00	501
Provino 6	122,00	531
Provino 7	101,00	871
Provino 8	103,00	1.191
Provino 9	103,00	841

T100 + Fb	Y	X
DATI	$\epsilon_0$	$N_{rott}$
Provino 1F	118,00	1.601
Provino 2F	110,00	2.141
Provino 3F	111,00	2.041
Provino 4F	223,00	181
Provino 5F	191,00	241
Provino 6F	208,00	211
Provino 7F	125,00	881
Provino 8F	133,00	931
Provino 9F	133,00	861



**T100**                       $N_{rott} = 10^{11} \epsilon_0^{-3,963}$                        $R^2 = 0,664$

**T100 fiber reinforced**     $N_{rott} = 20^{10} \epsilon_0^{-3,477}$                        $R^2 = 0,976$

### CONFRONTO CON I RISULTATI DI STUDI SPERIMENTALI PRECEDENTI

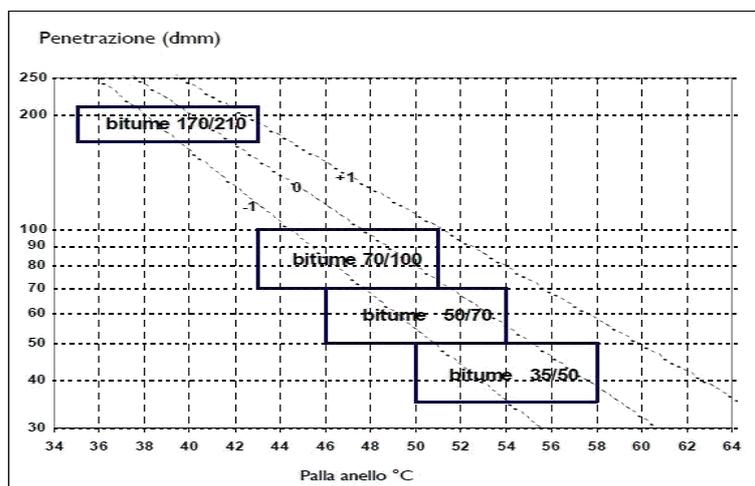
Di seguito si procede con una comparazione dei risultati ottenuti con le prove complesse di tipo prestazionale appena illustrati, rispetto a valori ottenuti nello studio condotto da Kaloush, Zeiada, Biligiri, Rodezno e Reed del dipartimento di Ingegneria civile ed ambientale dell'università dello stato dell'Arizona. La sperimentazione condotta nello studio citato ha previsto diverse prove di laboratorio eseguite su di una miscela di conglomerato bituminoso identificata dal codice PHX C-3/4 - rispondente alle specifiche previste per la città di Phoenix.

Nella tabella di pagina seguente sono riassunte le caratteristiche di tale miscela come riportate nella pubblicazione americana, comparate con la miscela di riferimento del presente studio che è un tappeto T100 con bitume normale del tipo 70/100.

	PHX C-3/4	T100
Diam. nominale massimo degli aggregati	□ ¾ ASTM ≅ Ø18mm UNI-EN	Ø10mm UNI-EN
Massa volumica massima	2428 Mg/m <sup>3</sup>	2490 Mg/m <sup>3</sup>
% di bitume	5,0% (?)	4,9% (sulla miscela)
Compattazione in pressa giratoria	φ 150mm – XX ? cicli	φ 100mm - 180 cicli
% vuoti	7% (mth ?)	9% (mth geometrico)

Il bitume utilizzato nella miscela di riferimento PHX C-3/4 ha un PG 70-10 dove: PG sta per Performance Grade, che possiamo tradurre come “categoria di prestazione”, 70°C rappresenta la massima temperatura alla quale ci si aspetta che il legante dovrà lavorare, -10°C sarà la minima temperatura attesa.

Il bitume utilizzato nella miscela di riferimento T100, oggetto del presente lavoro, è un bitume normale del tipo 70/100 dove i 2 valori esprimono l'intervallo possibile del valore della penetrazione sul bitume espresso in dmm secondo la prova UNI EN1426.



Come si evidenzia dal grafico il punto di rammollimento di un bitume 70/100, ottenibile con la prova di palla-anello (UNI EN 1427), è compreso tra 43°C e 51°C.

Nota: il valore di rammollimento “punto di palla-anello” non è comparabile con il Performance Grade.

Nella tabella seguente sono riportate le condizioni di prova per la determinazione del modulo complesso per la miscela di riferimento PHX C-3/4.

	PHX C-3/4
E* complex dynamic modulus	AASHTO TP 62-03
Dimensione provini	Cilindrici: φ100mmx150mm
Condizioni di prova: temperature	14, 40, 70, 100, 130 °F
Condizioni di prova: frequenze di carico	25, 10, 5, 1, 0,5, 0,1 Hz
Deformazione controllata	<150µε

Nota: secondo la UNI EN 12697-26 il modulo complesso (complex dynamic modulus), rappresenta la relazione tra lo sforzo e la deformazione di un materiale visco-elastico sottoposto ad un carico sinusoidale, mentre il modulo di rigidezza è il valore assoluto del modulo complesso.

Per quanto sopra proviamo a comparare il valore del modulo dinamico ottenuto secondo la norma AASHTO TP 62-03 per la miscela di riferimento PHX C-3/4, ad una frequenza di carico di 10Hz (=periodo di 100ms) e ad una temperatura di 40°F (=4,4°C) con il valore del modulo della rigidezza ottenuto secondo la norma UNI EN 12697-26 per la miscela di riferimento T100, ad un periodo di carico di 124ms e ad una temperatura di 5,0°C.

	<b>PHX C-3/4</b>	<b>T100</b>
Norma di riferimento	AASHTO TP 62-03	EN 12697-26 annex C
Forma e dimensioni del provino	Cilindrici: $\phi 100\text{mm} \times 150\text{mm}$	IT CY = $\phi 100\text{mm} \times 60\text{mm}$
Frequenza / tempo di carico	10Hz	Rise time 124ms
Temperatura	40°F = 4,4°C	5°C
<b>Valore del Modulo in MPa</b>	<i>4'027'000 psi</i> <b>27'765 MPa</b>	<b>16'816 MPa</b>

I valori del modulo dinamico per la miscela PHX C-3/4, ottenuti alle condizioni di prova indicate, sono decisamente superiori al valore del modulo di rigidezza della miscela T100 e la differenza aumenta notevolmente al crescere delle temperature.

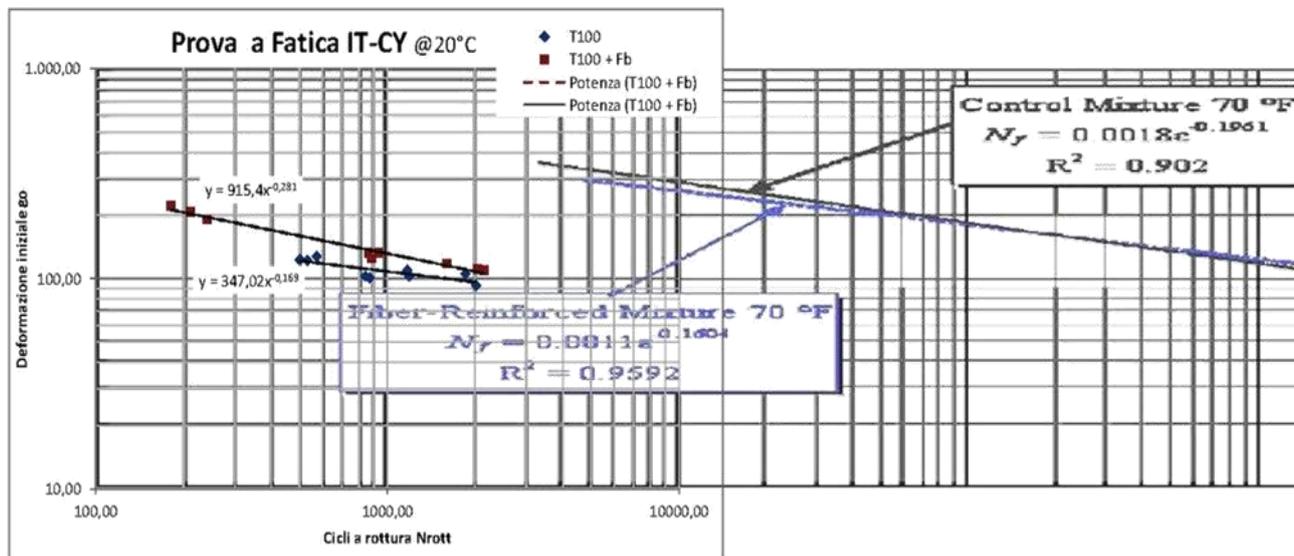
Il valore del modulo di rigidezza della miscela T100 è in linea con i valori bibliografici riferiti a casi studio italiani e riportati nel paragrafo successivo.

Nella tabella seguente sono riportate le condizioni di prova per la determinazione della legge di fatica a 70°F = 21°C per la miscela di riferimento PHX C-3/4.

	<b>PHX C-3/4</b>
Prova di flessione su tre punti su provini di forma prismatica AASTHO TP8	
Dimensione provini prismatic	63,5x50,8x381mm
Condizioni di prova: temperature	40, 70, 100 °F
Condizioni di prova: deformazione	costante, 6 ÷ 8 livelli
Vita a rottura convenzionale = N cicli che provocano una riduzione del 50% del modulo di rigidezza iniziale dove il modulo di rigidezza iniziale è quello misurato al 50° ciclo di carico ( $E_0 @ N=50^{\text{th}}$ )	

Con riferimento a quanto sopra proviamo a sovrapporre e comparare i 2 grafici che rappresentano la linea di regressione della legge di fatica, ottenuti secondo la norma AASHTO TP8 per la miscela di riferimento

PHX C-3/4 e quella fibrorinforzata, con quelli ottenuti secondo la norma UNI EN 12697-26 "annex" E (IT-CY) per la miscela di riferimento T100 e quella fibrorinforzata.



Con riferimento al grafico di cui sopra occorre sottolineare che per la determinazione della legge di fatica dei materiali ci si è basati su criteri di rottura differenti, così come differenti sono stati i materiali impiegati e le procedure utilizzati per testare a fatica gli stessi.

Inoltre la prova a fatica a trazione indiretta su provini cilindrici (IT-CY UNI EN12697 appendice E come nel caso dei C.B.: T100 e T100+Fb) porta ad una sottostima della resistenza a fatica del materiale rispetto alle prove di tipo flessionale eseguite su travetti o provini di forma trapezoidale.

Questi elementi tendono poi ad essere compensati all'interno di un parametro correttivo, detto "shift factor", che deve correlare i risultati sperimentali ottenuti alle condizioni di prova in laboratorio con le reali condizioni riscontrabili su strada.

Lo "shift factor" dipende da diversi fattori che compendiano l'effetto scala e che possono modificare le curve di fatica sperimentali di laboratorio di diversi ordini di grandezza.

Ciò che invece risulta direttamente correlabile alla legge di fatica utilizzata per stimare il numero di ripetizioni di carico ammissibili a rottura (1) sono i parametri caratteristici della legge di fatica  $k_{2,3}$ , con i fattori correttivi dipendenti dalla composizione e dalle proprietà della materia [C; m].

Curva di fatica di laboratorio

$$N_f = C (1/\varepsilon_t)^m$$

Legge di fatica a fessurazione in sito (1)

$$N_f = K_1 * (1/\varepsilon)^{k_2} * (1/E_0)^{k_3}$$

$E_0$  = Modulo di rigidezza



**m** è un coefficiente di correlazione della curva di regressione della prova IT CY da cui si determinano **k<sub>2</sub>** e **k<sub>3</sub>** mentre la correlazione tra il coefficiente C e **k<sub>1</sub>** è lo "shift factor" (SHF totale = variabile 2,5÷40)

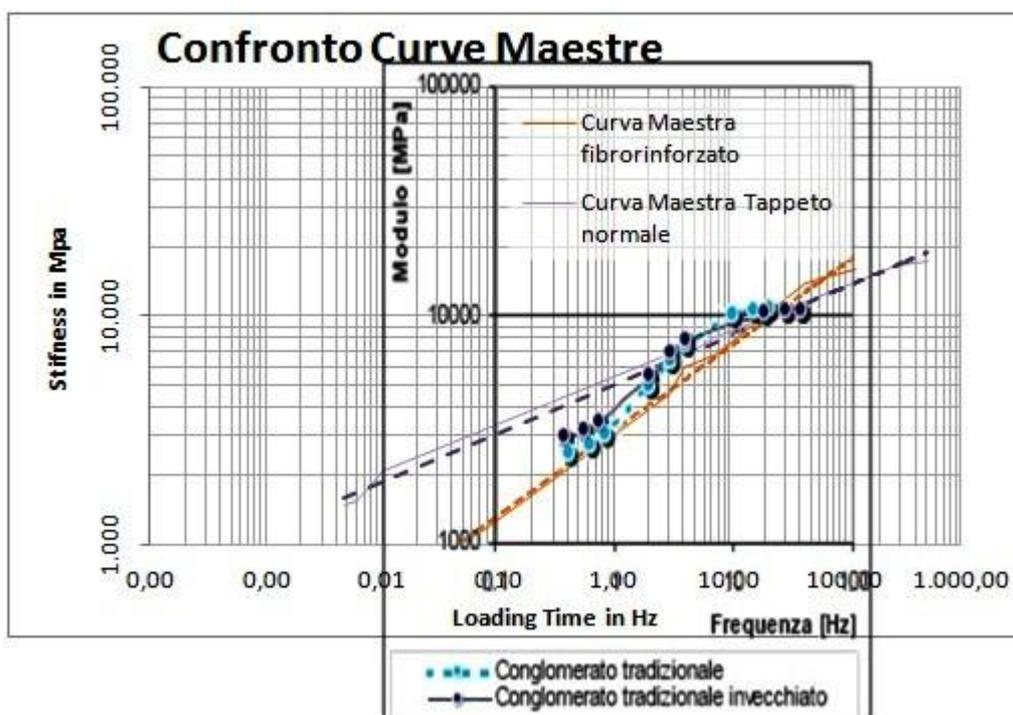
CONFRONTO CON I VALORI BIBLIOGRAFICI DISPONIBILI

Di seguito si procede con una sintetica rappresentazione dei risultati di alcuni studi di miscele bituminose attraverso le prove complesse di tipo prestazionale che sono riscontrabili nella bibliografia scientifica italiana, in modo da avere un riferimento parametrico nazionale dei valori ottenuti attraverso la miscela di riferimento Usura T100 con bitume normale 70/100 utilizzata nella presente sperimentazione.

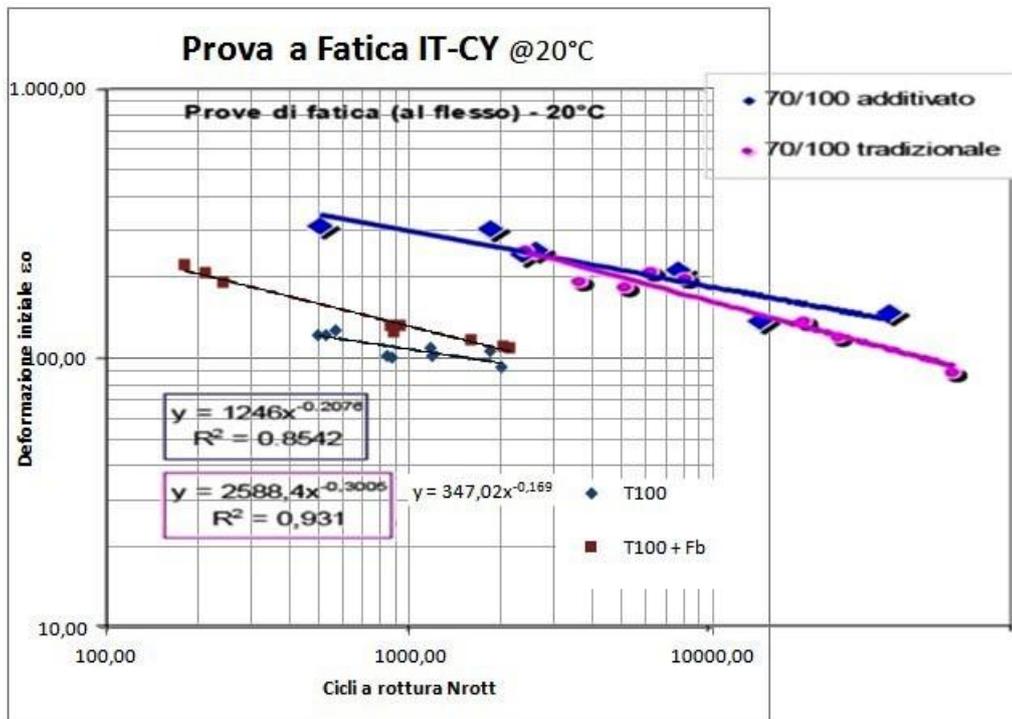
Rif #1: M. Bocci, A. Grilli (2008) "Valutazione dell'influenza dell'additivo "Carbonixide 010/Lp" sulle Caratteristiche Meccaniche del Bitume e del Conglomerato Bituminoso" Relazione Preliminare - Progetto di Ricerca 2007 –CIRS - Centro Interuniversitario sperimentale di Ricerca Stradale.

Conglomerato tradizionale con bitume 70/100			T100
Temp.	risetime	Modulo di rigidezza	Modulo
10 °C	124	9803	
	84	10228	
	63	10812	
20 °C	124	5746	6653
	84	6030	8109
	63	6808	
30 °C	124	2180	
	84	2643	
	63	2984	

Sovrapposizione dei grafici delle curve maestre alla temperatura di 20°C.

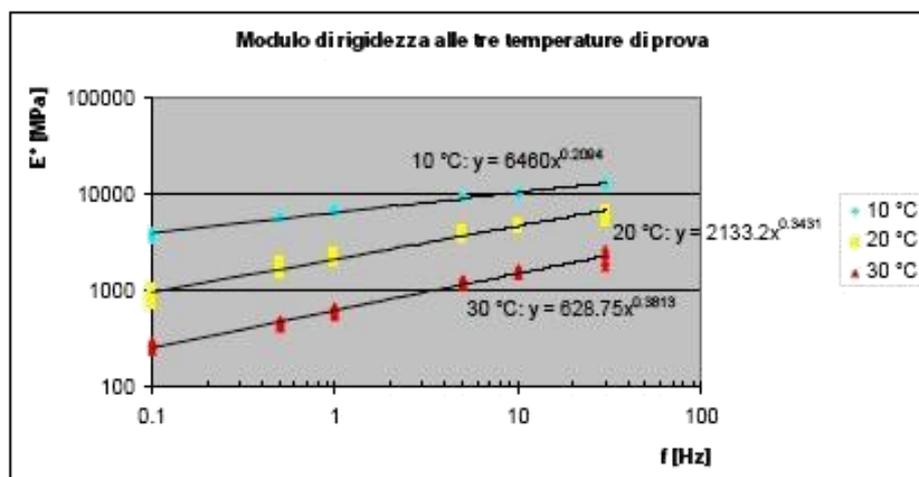


Sovrapposizione dei grafici delle curve di fatica ottenute tramite interpolazione con legge di potenza alla temperatura di 20°C per conglomerati bituminosi con legante bituminoso 70/100



NOTA: il riferimento delle ordinate della prova di bibliografia sono le deformazioni (strain) orizzontali massime  $\epsilon_{x,max}$  al centro del provino e sull'asse delle ascisse i rispettivi numero di cicli al flessione mentre per la sperimentazione in oggetto il numero di cicli è quello a "rottura" convenzionale = numero di cicli che ha comportato il raddoppio della deformazione iniziale ( $\epsilon_f > 2\epsilon_0$ ).

Rif #2): G. Dondi, S. Ghiraldini (AA 2007/2008) "Studio sperimentale per la caratterizzazione reologica di conglomerati bituminosi tramite prove di flessione su quattro punti" - tesi di laurea – Uni. Bo - Facolta' di Ingegneria



"Al crescere della temperatura il conglomerato bituminoso esibisce un Modulo di rigidità inferiore.

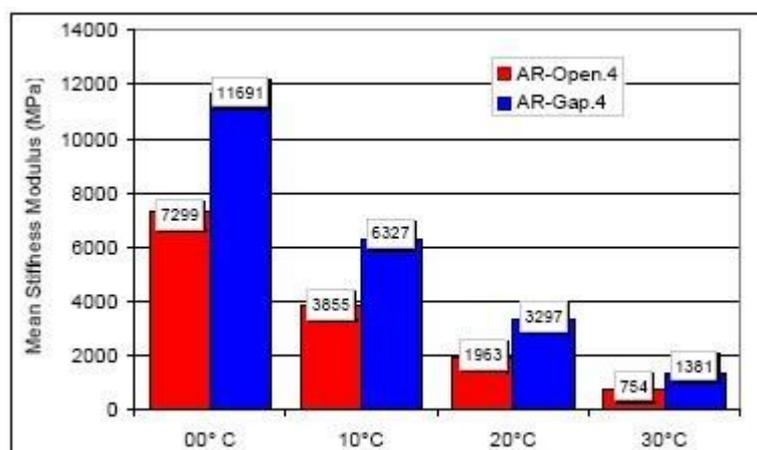
A parità di temperatura il Modulo di rigidità diventa maggiore all'aumentare della frequenza.”

“Ripetendo una prova alla stessa frequenza il valore di Modulo che si otterrà inizialmente non sarà sempre perfettamente uguale a quello della reiterazione, ma sarà maggiore o minore in modo casuale.”

“La maggiore differenza tra due valori del Modulo di rigidità da prove reiterate si verifica alle temperature più alte mentre alle temperature minori, invece, si ha una maggiore corrispondenza nei valori”

Rif #3): F. Canestrari, E. Pasquini, F. A. Santagata (nov. 2009) “Controllo della produzione, verifica delle prestazioni e predisposizione di norme tecniche di capitolato per miscele di conglomerato bituminoso tipo asphalt rubber” – Rapporto finale– Progetto di Ricerca Sperimentale - CIRS - Centro Interuniversitario sperimentale di Ricerca Stradale.

“Si riportano i moduli di rigidità dei materiali AR-Gap.4 e AR-Open.4 determinati a differenti temperature di prova al fine di valutare la termo-dipendenza di tale caratteristica prestazionale.”



“Si riportano la curva di regressione della fatica dei materiali AR-Open.1 a confronto con una miscela di conglomerato bituminoso del tipo poroso.”

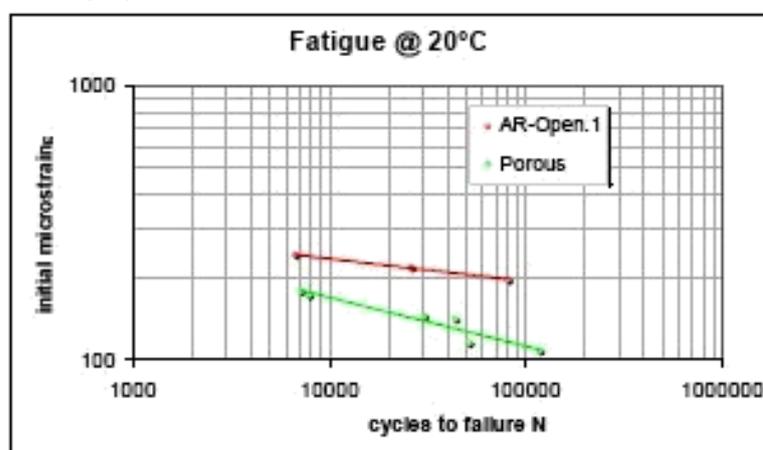
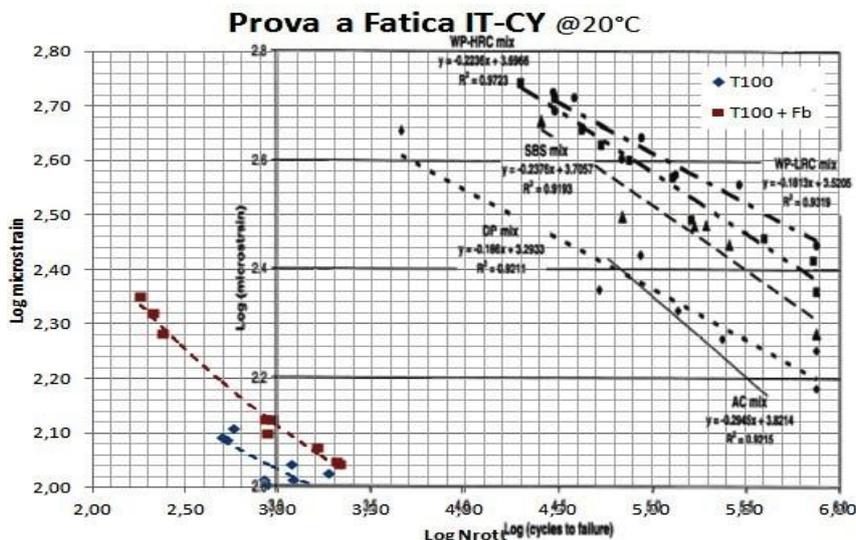


Figura 5.25: Curve di fatica miscele Open graded [ $\epsilon = f(N)$ ]

Nota: i valori indicati non sono direttamente confrontabili con quelli ottenuti nella sperimentazione in oggetto con la miscela di riferimento in quanto trattasi di materiali diversi.

Rif #4): E. Pasquini (09/IX/2011) - Materiali Riciclati: “*caratterizzazione meccanica e funzionale di conglomerati bituminosi asphalt rubber*” —IX Corso di Alta Formazione alla Ricerca – Brescia.

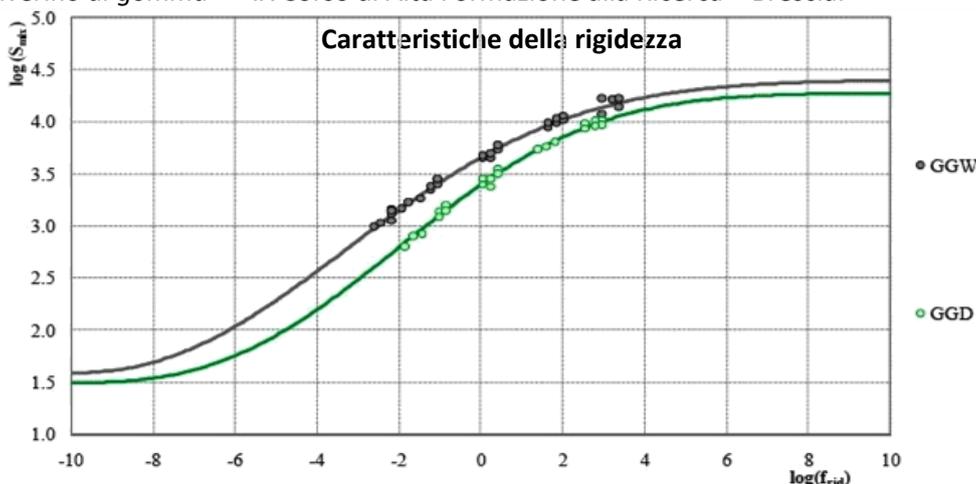
Sovrapposizione dei grafici delle curve di fatica ottenute su grafici logN vs log ε.



La comparazione delle curve di regressione ottenute dai grafici con valori logaritmici riportate nella bibliografia citata appaiono diverse da quelle delle 2 miscele oggetto della presente sperimentazione (T100 e T00+Fb).

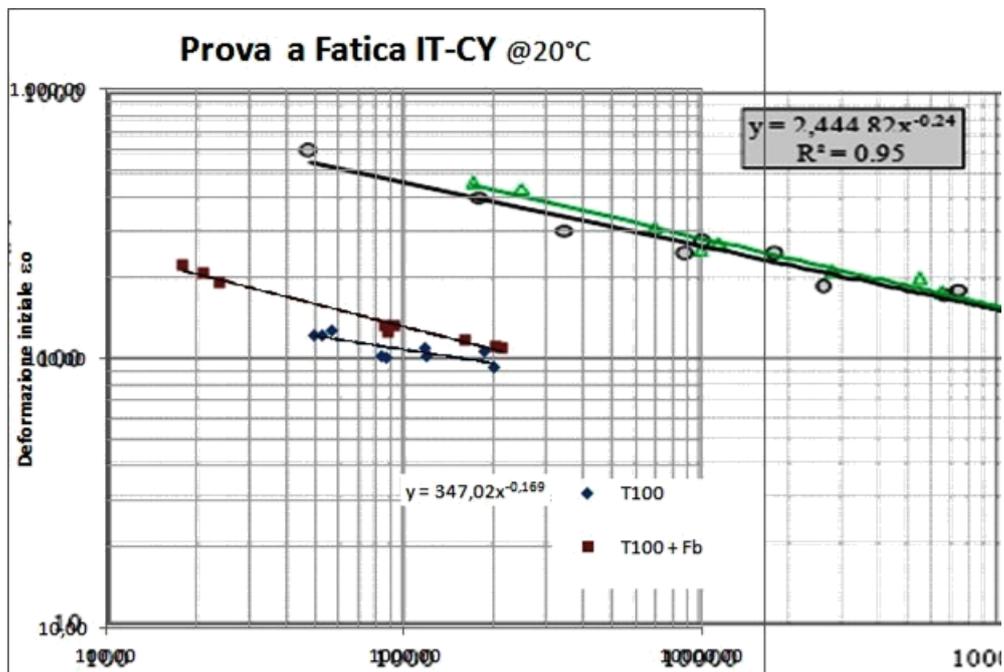
Nota: i valori riportati sono quelli ottenuti nella sperimentazione di miscele additate con polverino di gomma e quindi trattasi di materiali diversi da quello di riferimento.

Rif #5): M. Losa (09/IX/2011) – “*Studio in laboratorio e stese sperimentali di miscele per strati di usura con polverino di gomma*” —IX Corso di Alta Formazione alla Ricerca – Brescia.



Temperature (°C)	0			10			20		
Frequency (Hz)	1	2	10	1	2	10	1	2	10
M <sub>R</sub> for GGD (MPa)	9637	10558	12594	5341	6152	8202	2482	2987	4434
M <sub>R</sub> for GGW (MPa)	14876	15851	17944	9076	10082	12483	4541	5270	7212

Sovrapposizione dei grafici delle curve di fatica ottenute tramite interpolazione con legge di potenza



NOTA: le due coppie di curve di regressione appaiono all'incirca parallele ma traslate: questo, tra l'altro, può anche dipendere dai criteri di rottura utilizzati per esprimere le coppie di valori deformazioni ( $\epsilon$ : strain) vs  $N_f$ : numero di cicli. Nella sperimentazione eseguita si tratta del valore di deformazione iniziale  $\epsilon_0$  vs  $N_{rott}$  - numero di cicli che ha comportato il raddoppio della deformazione iniziale ( $\epsilon_f > 2\epsilon_0$ ).

## CONCLUSIONI

La relazione presente illustra la verifica sperimentale di conglomerati bituminosi rinforzati con una miscela di fibre sintetiche Ruredil XB Fiber, per valutare l'eventuale rinforzo strutturale apportato in termini di miglioramento delle proprietà meccaniche e secondariamente completare, confrontare e confermare i risultati di precedenti studi condotti dal Dipartimento di Ingegneria civile ed ambientale dell'Università dello stato dell'Arizona.

Il programma sperimentale è stato strutturato in più fasi che hanno visto l'individuazione del conglomerato bituminoso di riferimento, l'esecuzione di prove tipiche dei capitolati tecnici vigenti in Italia e condotte secondo le norme europee UNI EN, una prima analisi comparativa dei risultati ed infine delle prove complesse di tipo prestazionale i cui risultati sono stati analizzati rispetto ai progressi studi americani ed ai dati bibliografici e di pubblicazioni di ricerche condotte in Italia.

Il programma sperimentale è stato focalizzato sui possibili effetti di rinforzo strutturale, in termini di miglioramento delle proprietà meccaniche, per conglomerati bituminosi tipo usura.

Il conglomerato bituminoso di riferimento iniziale è stato un "TAPPETO D'USURA"  $\phi_{max} < 14,0mm$  con bitume modificato per piste automobilistiche, quindi si sono effettuate delle prove di laboratorio su di uno SPLIT

MASTIX ASPHALT con bitume modificato hard e con lo 0,3% microfibra di cellulosa ed infine è stato utilizzato come riferimento un "TAPPETO D'USURA" T100 ma con bitume normale del tipo 70/100.

Tutte le miscele sono state confezionate con e senza fibre sintetiche Ruredil XB Fiber nel dosaggio di 0,5kg/ton ad eccezione del "TAPPETO D'USURA" T100 che ha visto anche il confezionamento con un dosaggio di 1,0kg/ton.

La miscela di conglomerato bituminoso "TAPPETO D'USURA" T100 ha rappresentato anche il primo caso applicativo con 2 stese sperimentali in opera.

I risultati delle prove di laboratorio per le diverse miscele sono contenute nei relativi rapporti di prova a cui si rimanda.

La prima analisi comparativa dei risultati ottenuti con il "TAPPETO D'USURA" con bitume modificato evidenzia che, a parità di massa volumica massima, il conglomerato bituminoso fibrorinforzato dopo l'addensamento ha un valore minore della massa volumica e quindi una percentuale maggiore di vuoti calcolati dai dati geometrici del provino, inoltre sembrerebbero evidenziare un miglioramento del valore della stabilità Marshall anche se si tratta di un dato puntuale.

L'analisi comparativa dei risultati ottenuti con il "TAPPETO D'USURA" con bitume modificato hard, evidenziano, per il conglomerato bituminoso fibrorinforzato, un valore minore di massa volumica addensata, a parità di massa volumica massima teorica, e sembrerebbero evidenziare un miglioramento del valore della stabilità Marshall, anche se si tratta di un dato puntuale, mentre non si evidenzia alcun significativo miglioramento della resistenza a trazione indiretta (ITS).

L'analisi comparativa dei risultati ottenuti con lo "S.M.A." confezionato in laboratorio, non evidenziano apprezzabili differenze di addensabilità né significative differenze del valore della stabilità Marshall, mentre sembrerebbe di poter evidenziare un lieve miglioramento della resistenza a trazione indiretta (ITS) per il conglomerato bituminoso fibrorinforzato con le Ruredil XB Fiber anche se si tratta di un dato puntuale.

L'analisi comparativa dei risultati ottenuti con il "TAPPETO D'USURA T100" con bitume normale 70/100, evidenziano una crescente addensabilità come valori di massa volumica che cresce al crescere del contenuto di fibre ma non evidenziano trend univoci rispetto alla variazione crescente di contenuto di fibre di rinforzo.

Ovviamente la valenza di questa prima analisi comparativa sarebbe ottimale se fosse svolta su di una significativa popolazione statistica di ogni risultato per ogni tipologia di miscela di riferimento.

A conclusione della prima fase sperimentale si è proceduto con la seconda fase sperimentale nella quale sono state condotte prove complesse di tipo prestazionale. In particolare sono stati messi a confronto i risultati ottenuti con la miscela di conglomerato bituminoso tipo usura T100 con bitume non modificato 70/100 prodotta da Sangalli SpA, e la stessa con 0,5kg/ton di fibre sintetiche Ruredili XBfiber.

I valori del modulo di rigidezza ottenuti alle varie temperature e a diversi livelli di tempo d'impulso di carico (rise time) manifestano sempre risultati inferiori per il conglomerato bituminoso fibrorinforzato.

La curva maestra della rigidezza che se ne deriva evidenzia, al crescere del tempo di carico dunque al diminuire delle frequenza di carico, ovvero al crescere della temperatura, un decadimento più rapido delle

prestazioni, espresse come moduli della rigidità, per il conglomerato bituminoso fibrorinforzato (pendenza maggiore della curva maestra T100+fb rispetto a quella ricavata dal tappeto T100).

Questo risultato è in contrasto con quanto ottenuto nei precedenti studi condotti dal Dipartimento di Ingegneria civile ed ambientale dell'Università dello stato dell'Arizona

E' da notare invece che i valori dei moduli della rigidità e della relativa curva maestra della miscela di riferimento (tappeto T100) sono perfettamente allineati con i valori medi bibliografici riscontrabili in pubblicazioni di ricerche condotte in Italia mentre non sono comparabili con i valori espressi per la miscela di riferimento dello studio americano. Si rammenta però che la miscela PHX C-3/4 è totalmente diversa rispetto alla miscela T100 e che le prove sono state condotte secondo la normativa americana (AASHTO).

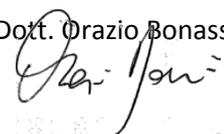
La rappresentazione della legge di fatica mostra una maggiore uniformità di comportamento da parte del conglomerato bituminoso fibrorinforzato anche se evidenzia valori di deformabilità maggiori che tendono a sovrapporsi al diminuire della deformazione iniziale (ovvero minore carico impulsivo) e all'aumentare del relativo numero di cicli a rottura.

Anche i risultati ottenuti nello studio condotto dal Dipartimento di Ingegneria civile ed ambientale dell'Università dello stato dell'Arizona per quanto riguarda il comportamento a fatica, non sono univoci essendo le 2 linee rappresentative delle leggi di fatica dei 2 materiali quasi sovrapposte e, soprattutto, avendo osservato un deciso decadimento delle prestazioni del conglomerato fibrorinforzato all'aumentare del livello deformativo imposto ovvero all'aumentare del carico impulsivo applicato.

E' da notare invece che la rappresentazione grafica della legge di fatica della miscela di riferimento (tappeto T100) appare traslata rispetto ai riscontri bibliografici di pubblicazioni di ricerche condotte in Italia. Questo, può dipendere da diversi fattori quali materiali diversi, provini diversi e, numero di cicli ( $N_f$ ) diversi in funzione del criterio di rottura utilizzato. Si rammenta che nella sperimentazione eseguita si tratta del valore di deformazione iniziale  $\epsilon_0$  vs  $N_{rott}$  che è il numero di cicli che a comportato il raddoppio della deformazione iniziale ( $\epsilon_f > 2\epsilon_0$ ).

Per quanto esposto la sperimentazione ad oggi condotta alle condizioni esposte e sui prodotti come sopra individuati non ha confermato le risultanze positive ottenute dai precedenti studi.

Bisogna considerare però l'estrema eterogeneità dei conglomerati bituminosi il cui comportamento è intimamente legato alle caratteristiche della miscela degli aggregati e ancor più alla tipologia di legante bituminoso. Sarebbe pertanto necessario allargare la base statistica dei risultati ottenuti e per converso verificare dosaggi diversi di fibre sintetiche Ruredili XBfiber.

Il tecnico  
Dott. Orazio Bonassi  


Spett.le

**RUREDIL S.p.A.**

Via B. Buozzi, n.1,  
20097 San Donato Milanese (MI)

*Brescia, 29/03/2012*

*Oggetto: Fibre sintetiche per il rinforzo strutturale dei conglomerati bituminosi*

La presente nota è parte integrante e complementare della verifica sperimentale di conglomerati bituminosi rinforzati con una miscela di fibre sintetiche Ruredil XB Fiber, per valutare l'eventuale rinforzo strutturale apportato in termini di miglioramento delle proprietà meccaniche.

Lo studio è stato condotto per comparazione con miscele bituminose con caratteristiche uguali ma prive delle fibre Ruredil XB Fiber. Le risultanze ottenute sono state illustrate nella relazione: "analisi comparativa dei risultati" - R.P. N. 120489 di cui la presente nota ne è un'appendice.

Nelle conclusioni della relazione citata si evidenziava che l'analisi comparativa dei risultati ottenuti con il "TAPPETO D'USURA T100" con bitume normale 70/100, non evidenziavano trend univoci rispetto alla variazione crescente di contenuto di fibre di rinforzo. Ovviamente la valenza di quella prima analisi comparativa sarebbe stata ottimale se fosse stata svolta su di una significativa popolazione statistica di ogni risultato per ogni tipologia di miscela di riferimento.

Inoltre si affermava che la sperimentazione condotta non confermava le risultanze positive ottenute dai precedenti studi condotti dal Dipartimento di Ingegneria civile ed ambientale dell'Università dello stato dell'Arizona (Kaloush, Zeiada, Biligiri, Rodezno e Reed) ma che, per contro, bisognava considerare l'estrema eterogeneità dei conglomerati bituminosi il cui comportamento è intimamente legato alle caratteristiche della miscela degli aggregati e ancor più alla tipologia di legante bituminoso.

Si concludeva infine auspicando di allargare la base statistica dei risultati ottenuti e/o per converso di verificare dosaggi diversi di fibre sintetiche Ruredili XBfiber.

Sulla base di quest'ultima ipotesi si è proceduto ad eseguire miscele "TAPPETO D'USURA T100" con bitume normale 70/100 a dosaggio crescente di fibre sintetiche Ruredili XBfiber, su cui si sono fatte delle prove di trazione indiretta (UNI EN 12697-23) su provini cilindrici ottenuti attraverso il procedimento di compattazione Marshall.

## Confezionamento Miscela

Il confezionamento delle miscele sperimentali è stato eseguito in laboratorio utilizzando direttamente gli aggregati forniti dal produttore Sangalli S.p.A. e applicando la stessa ricetta della miscela con il medesimo dosaggio di bitume normale del tipo 70/100:

Aggregato:	<i>pietrischetto 6- 12</i>	24,8%
	<i>graniglia 2-6</i>	24,0%
	<i>sabbia</i>	25,6%
	<i>filler di recupero</i>	2,4%
	<i>filler di apporto</i>	3,2%
Fresato	Bitume dal fresato	20%
	Legante	Bitume 70/100

Prima dell'apporto del bitume si è proceduto con l'aggiunta delle fibre sintetiche Ruredili XBfiber nei seguenti 3 dosaggi calcolati in % sul peso della miscela:

- 1) Miscela 1 con 0,3% di fibra;
- 2) Miscela 2 con 0,6% di fibra;
- 3) Miscela 3 con 1,0% di fibra.

Nota: il dosaggio inizialmente indicato dal fornitore delle fibre era 0,5Kg/ton pari allo 0,05% e già nella prima fase sperimentale si era proceduto anche con una miscela avente un dosaggio di 1,0kg/ton pari allo 0,1%.

Nota: in fase di miscelazione si è potuto constatare un sovradosaggio delle fibre a partire dallo 0,3%, che rendeva difficoltosa la lavorabilità e l'omogeneizzazione come mostrano le foto seguenti in cui si evidenzia la tendenza alla formazione di grumi di fibre.



Successivamente tutti i campioni sono stati compattati con il metodo Marshall (75 colpi/faccia).

## Esecuzione delle prove

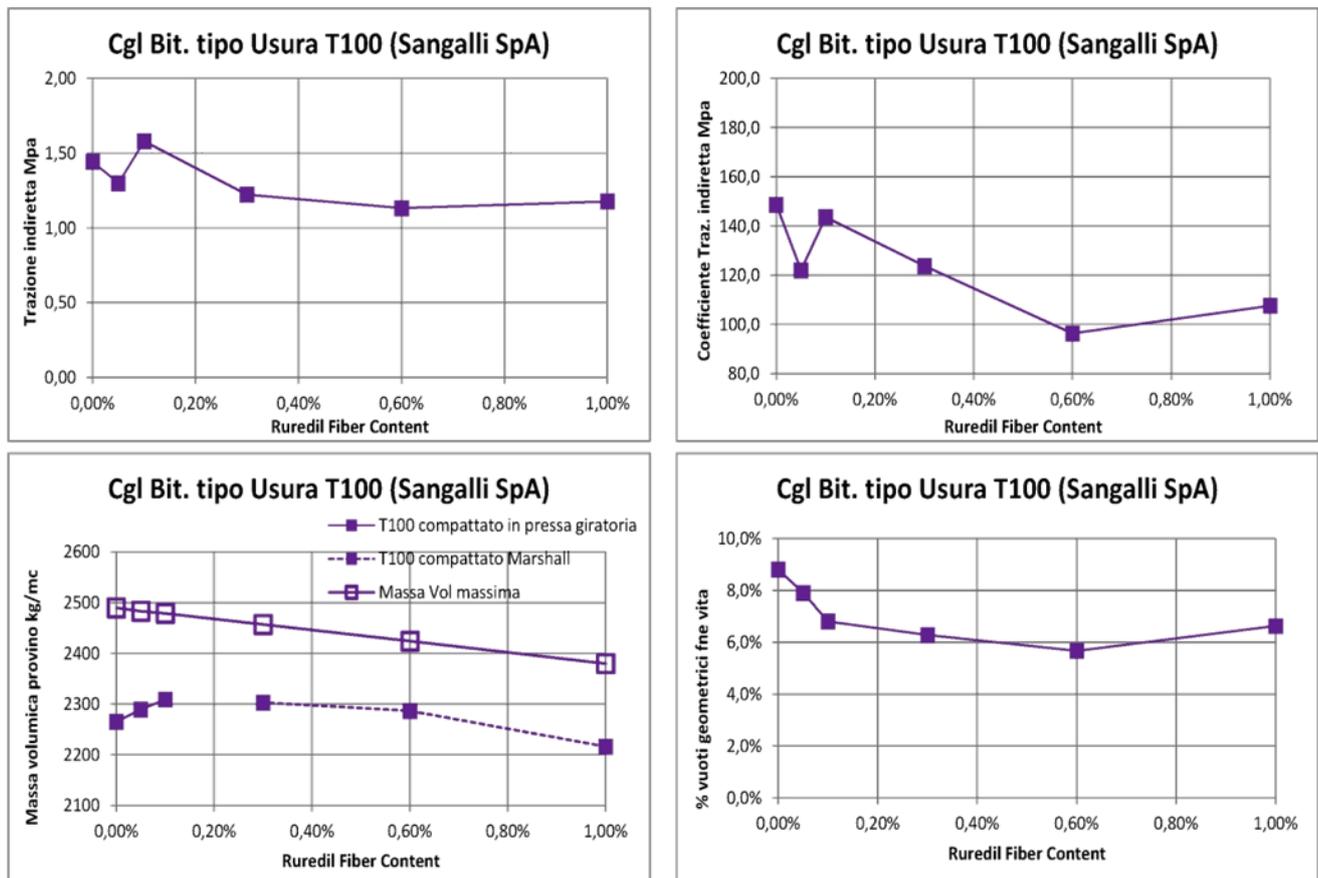
La prova di Trazione indiretta è stata eseguita sulle 3 miscele a dosaggio crescente di fibra secondo la norma UNI EN12697-23.

Le prove sono state eseguite il 20 e 21/03/2012 ed i risultati sono contenuti nei rapporti di prova di cui la presente nota è di accompagnamento:

- 4) Miscela 1 con 0,3% di fibra sintetica Ruredili XBfiber: rapporto di prova 120773
- 5) Miscela 2 con 0,6% di fibra sintetica Ruredili XBfiber: rapporto di prova 120774
- 6) Miscela 3 con 1,0% di fibra sintetica Ruredili XBfiber: rapporto di prova 120775

## Analisi comparativa dei risultati

Di seguito è proposta la sintesi dei risultati ottenuti in funzione del dosaggio crescente di fibra.



### Conclusioni

L'analisi comparativa dei risultati ottenuti con il "TAPPETO D'USURA T100" con bitume normale 70/100, a contenuto crescente di fibre di rinforzo, sembra evidenziare un trend mediamente decrescente della resistenza a trazione indiretta (ITS) anche se il dato non è univoco e le variazioni possono comunque essere considerate nell'ambito della variabilità dei conglomerati bituminosi.

Rispetto all'addensabilità espressa attraverso il valore della massa volumica e della percentuale di vuoti si rileva che al crescere della quantità di fibre diminuisce il valore massimo della massa volumica di riferimento e la massa volumica del provino ha un massimo, a cui corrisponde un minimo relativo dei vuoti "geometrici", attorno ad un valore di fibre dello 0,3% ÷ 0,4%.

In effetti oltre questo dosaggio abbiamo riscontrato una difficoltosa omogeneizzazione delle fibre che tendono a raggrumarsi.

Pertanto l'ulteriore sperimentazione condotta non evidenzia risultanze positive ne conferma quelle ottenute dai precedenti studi condotti dal Dipartimento di Ingegneria civile ed ambientale dell'Università dello stato dell'Arizona: "Evaluation of fiber-reinforced asphalt mixture using advanced material characterization test" Kaloush, Zeiada, Biligiri, Rodezno e Reed. Bisogna comunque considerare la variabilità dei conglomerati bituminosi e, quindi la necessità di avere una ampia base statistica di risultati di prove per esprimere giudizi definitivi.

**GEOLAB s.r.l.**

Dott. Crazio Bonassi

