

SUMMER SCHOOL 2011

Centro Paolo VI - Brescia



APPLICAZIONE DELL'APPROCCIO ENERGETICO PER LA CARATTERIZZAZIONE A FATICA DEI WMA

Dott. Ing. Cesare Sangiorgi
Ricercatore - Università di Bologna



Mercoledì 7 Settembre 2011

I CONGLOMERATI BITUMINOSI A BASSO DISPENDIO ENERGETICO

Chair: Prof. Ing. Gianluca Cerni



SOMMARIO

1) INTRODUZIONE

La Fatica nei Conglomerati Bituminosi

La Fatica in Laboratorio

2) APPROCCIO TRADIZIONALE

3) APPROCCIO ENERGETICO

Basics

Van Dijk

Carpenter

FEL e Healing

4) METODOLOGIE DI PROVA, MATERIALI e PROVINI

5) MASTER CURVES e TEMPERATURE SENSITIVITY

6) RESISTENZA A FATICA

Estrapolazione della rottura

RDEC

7) TEST A CONFRONTO

8) IN PROGRESS



Prof. Carl L. Monismith:

Robert Horonjeff Professor of Civil Engineering, Emeritus



Dott. Ing. Matteo Pettinari, PhD – Università di Bologna



Laboratori:



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE,
AMBIENTALE E DEI MATERIALI





1. INTRODUZIONE

La Fatica nei c.b.

La Fatica in Labo

2. APPROCCIO

TRADIZIONALE

3. APPROCCIO

ENERGETICO

Basics

Van Dijk

Carpenter

FEL e Healing

4. METODOLOGIE DI

PROVA, MATERIALI

e PROVINI

5. MASTER CURVES

TEMP. SENSITIVITY

6. RESIST. A FATICA

Ext. della rottura

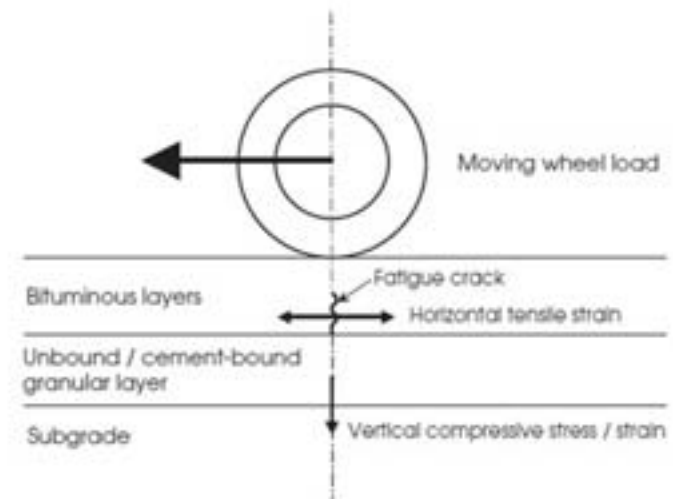
RDEC

7. TEST A CONFR.

8. IN PROGRESS

INTRODUZIONE: la fatica nei c.b.

Gli strati bituminosi costituenti una pavimentazione stradale sono soggetti all'applicazione di carichi di breve durata ogni qualvolta sul piano viabile transita un veicolo.



Si ritiene che ad ogni passaggio corrisponda uno scadimento delle proprietà meccaniche del materiale di strato associato alla formazione di micro-lesioni nel volume dello stesso, fino alla comparsa di fessure visibili anche ad occhio nudo. L'accumulo del danno porta, nel tempo, al degrado della sovrastruttura ed alla sua perdita di funzionalità (sicurezza e regolarità).



1.INTRODUZIONE

La Fatica nei c.b.

La Fatica in Labo

2.APPROCCIO TRADIZIONALE

3.APPROCCIO ENERGETICO

Basics

Van Dijk

Carpenter

FEL e Healing

4.METODOLOGIE DI PROVA, MATERIALI e PROVINI

5.MASTER CURVES TEMP. SENSITIVITY

6.RESIST. A FATICA

Ext. della rottura

RDEC

7.TEST A CONFR.

8.IN PROGRESS

INTRODUZIONE: la fatica nei c.b.

Il danneggiamento a fatica si manifesta quindi sotto forma di fessurazioni degli strati bituminosi e prende il nome di “fessurazione per fatica” (fatigue cracking). Ne esistono comunque altre.



Bisogna anche ricordare l'effetto domino che le fessurazioni possono avere sulle caratteristiche strutturali della sovrastruttura; la percolazione di acque nel sottofondo può ridurre la portanza, oppure la perdita di rigidità degli strati superficiali può risultare in un aumento delle tensioni trasmesse agli strati sottostanti.



1. INTRODUZIONE

La Fatica nei c.b.

La Fatica in Labo

2. APPROCCIO

TRADIZIONALE

3. APPROCCIO

ENERGETICO

Basics

Van Dijk

Carpenter

FEL e Healing

4. METODOLOGIE DI

PROVA, MATERIALI
e PROVINI

5. MASTER CURVES

TEMP. SENSITIVITY

6. RESIST. A FATICA

Ext. della rottura

RDEC

7. TEST A CONFR.

8. IN PROGRESS

INTRODUZIONE: definizioni



C.L. Monismith definì nel 1969 la fatica dei c.b. come *“quel fenomeno di fessurazione del materiale soggetto a tensioni cicliche o comunque ripetute aventi un valore massimo in genere inferiore alla resistenza a trazione del materiale stesso”*.

J. Read propose nella sua tesi di dottorato del 1996, una definizione per la fatica che comprendesse tutti le possibili azioni generatrici di sollecitazioni ripetute: *“la fatica dei materiali bituminosi è identificabile col fenomeno della fessurazione. Essa consiste di due fasi principali, l’innescò e la propagazione ed è causata dalle deformazioni per trazione generate non solo dal carico indotto dal traffico, ma anche dalle variazioni di temperatura e dalle procedure costruttive”*.





1. INTRODUZIONE

La Fatica nei c.b.

La Fatica in Labo

2. APPROCCIO

TRADIZIONALE

3. APPROCCIO

ENERGETICO

Basics

Van Dijk

Carpenter

FEL e Healing

4. METODOLOGIE DI

PROVA, MATERIALI

e PROVINI

5. MASTER CURVES

TEMP. SENSITIVITY

6. RESIST. A FATICA

Ext. della rottura

RDEC

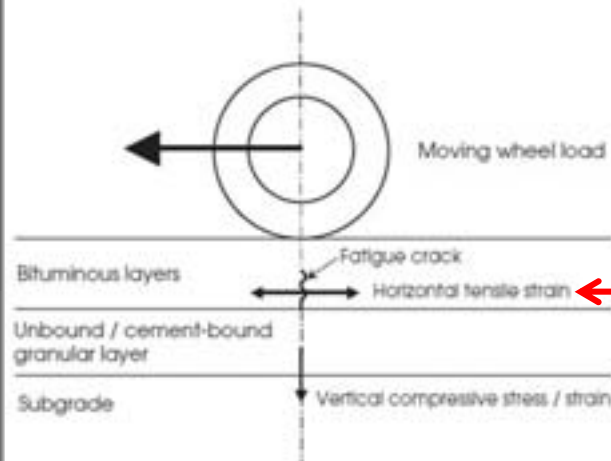
7. TEST A CONFR.

8. IN PROGRESS

INTRODUZIONE: la fatica in labo

Sperimentalmente, lo studio della fatica è visto come un processo atto a stabilire un legame tra il cambiamento delle proprietà meccaniche del materiale ed il numero di applicazioni di carico.

La possibilità di assimilare quest'ultime al transito di veicoli in superficie ha reso assai appetibile questo metodo rappresentativo potendosi stimare, con le dovute approssimazioni, la vita del materiale in esercizio e condurre un calcolo a fatica della sovrastruttura.



Caltrans HVS mobile testing device



1. INTRODUZIONE

La Fatica nei c.b.

La Fatica in Labo

2. APPROCCIO

TRADIZIONALE

3. APPROCCIO

ENERGETICO

Basics

Van Dijk

Carpenter

FEL e Healing

4. METODOLOGIE DI

PROVA, MATERIALI

e PROVINI

5. MASTER CURVES

TEMP. SENSITIVITY

6. RESIST. A FATICA

Ext. della rottura

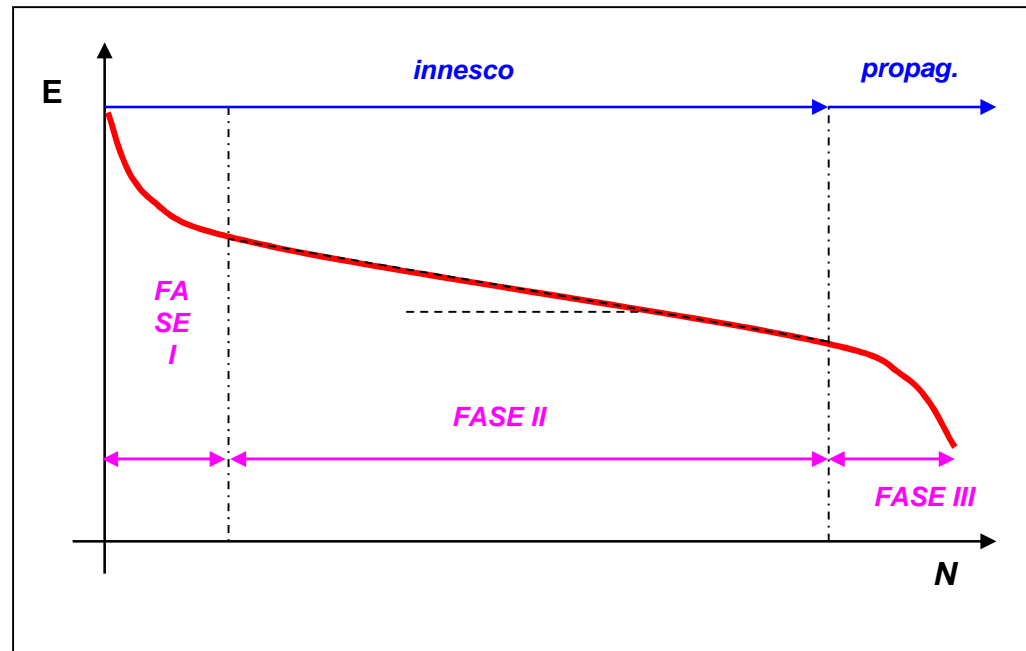
RDEC

7. TEST A CONFR.

8. IN PROGRESS

INTRODUZIONE: la fatica in labo

La caratterizzazione a fatica di un conglomerato bituminoso è solitamente condotta sottoponendo un provino di materiale a carichi ripetuti, in genere della stessa entità, registrando il numero di applicazioni necessarie per portarlo a rottura.



Il risultato di una singola prova di fatica può essere espresso tramite la variazione di parametri fisico-meccanici (per es. lo Stiffness Modulus) del materiale sollecitato sotto forma di provino, in funzione del numero di applicazioni di carico cui è sottoposto.



1. INTRODUZIONE

La Fatica nei c.b.

La Fatica in Labo

2. APPROCCIO

TRADIZIONALE

3. APPROCCIO

ENERGETICO

Basics

Van Dijk

Carpenter

FEL e Healing

4. METODOLOGIE DI

PROVA, MATERIALI

e PROVINI

5. MASTER CURVES

TEMP. SENSITIVITY

6. RESIST. A FATICA

Ext. della rottura

RDEC

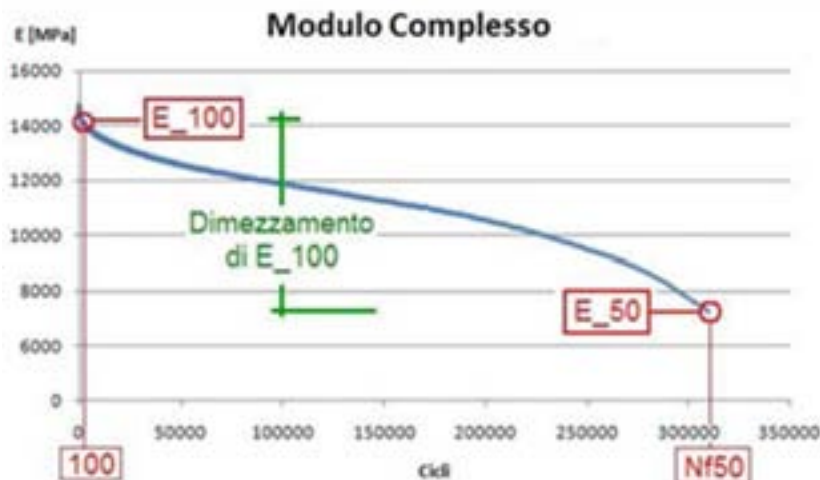
7. TEST A CONFR.

8. IN PROGRESS

INTRODUZIONE: la fatica in labo

La rottura, anche identificata come “vita a fatica” è definita sulla base di uno specifico criterio scelto in base al tipo ed alle condizioni di prova. I criteri di rottura possono essere vari:

- riduzione specifica della rigidezza rispetto alla iniziale (100 cicli); $\sigma_{\text{rottura}} = 1/2 \sigma_0$
- incremento del 100% della deformazione; $\epsilon_{\text{rottura}} = 2 \epsilon_0$
- valore preciso dell'angolo di fase;
- rottura completa del provino;
- valore preciso di uno spostamento nel provino (es. 9 mm ITFT).





1. INTRODUZIONE

La Fatica nei c.b.

La Fatica in Labo

2. APPROCCIO TRADIZIONALE

3. APPROCCIO ENERGETICO

Basics

Van Dijk

Carpenter

FEL e Healing

4. METODOLOGIE DI PROVA, MATERIALI e PROVINI

5. MASTER CURVES TEMP. SENSITIVITY

6. RESIST. A FATICA

Ext. della rottura

RDEC

7. TEST A CONFR.

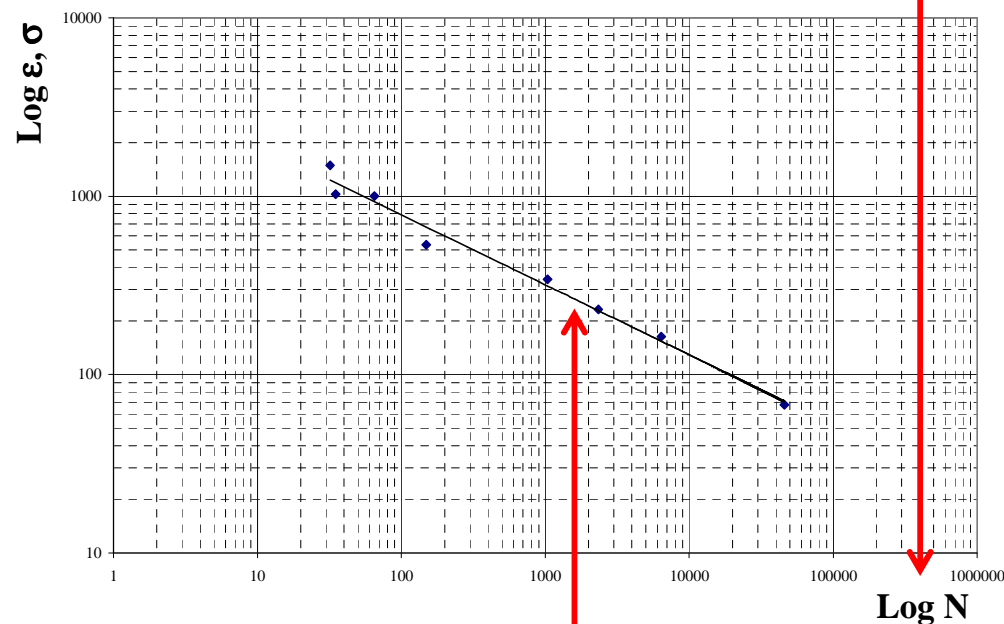
8. IN PROGRESS

APPROCCIO TRADIZIONALE:

La resistenza a fatica per N cicli di carico è definita come il valore dell'ampiezza della sollecitazione imposta per cui il criterio di rottura scelto è soddisfatto all'N-esimo ciclo.

Lo studio tradizionale a fatica prevede la realizzazione di un set* di prove in cui l'ampiezza della sollecitazione viene fatta variare in un range di possibili valori.

Curva di fatica o di Wöhler



La curva che esprime l'ampiezza di sollecitazione (tensione o deformazione) applicata in funzione del numero di cicli è la curva di Wöhler, rappresentata da una retta sul piano bi-logaritmico.



1.INTRODUZIONE

La Fatica nei c.b.

La Fatica in Labo

2.APPROCCIO TRADIZIONALE

3.APPROCCIO ENERGETICO

Basics

Van Dijk

Carpenter

FEL e Healing

4.METODOLOGIE DI PROVA, MATERIALI e PROVINI

5.MASTER CURVES TEMP. SENSITIVITY

6.RESIST. A FATICA

Ext. della rottura

RDEC

7.TEST A CONFR.

8.IN PROGRESS

APPROCCIO TRADIZIONALE:

L'andamento è descritto per comodità da una relazione del tipo:

$$\varepsilon \text{ (oppure } \sigma) = A N^{-b}$$

ε o σ : rappresenta l'ampiezza del carico (in def. o tensione);
 N : è il n° di applicazioni per soddisfare il criterio di rottura;
 A e b : sono coefficienti determinati con la regressione.

Tale relazione può anche essere espressa nelle forme inverse:

$$N = K (1/\varepsilon)^n \quad \text{per prove in controllo di deformazione, o}$$
$$N = C (1/\sigma)^m \quad \text{per prove in controllo di tensione, essendo}$$

K , n , C ed m coefficienti di regressione legati alle caratteristiche del materiale ed alla metodologia e condizioni di prova.

In controllo di tensione è utilizzata anche la rappresentazione in base alla deformazione specifica iniziale proposta inizialmente da P.S.Pell:

$$N = K_1 (1/\varepsilon_0)^{K_2}$$



1. INTRODUZIONE

La Fatica nei c.b.

La Fatica in Labo

2. APPROCCIO TRADIZIONALE

3. APPROCCIO ENERGETICO

Basics

Van Dijk

Carpenter

FEL e Healing

4. METODOLOGIE DI PROVA, MATERIALI e PROVINI

5. MASTER CURVES

TEMP. SENSITIVITY

6. RESIST. A FATICA

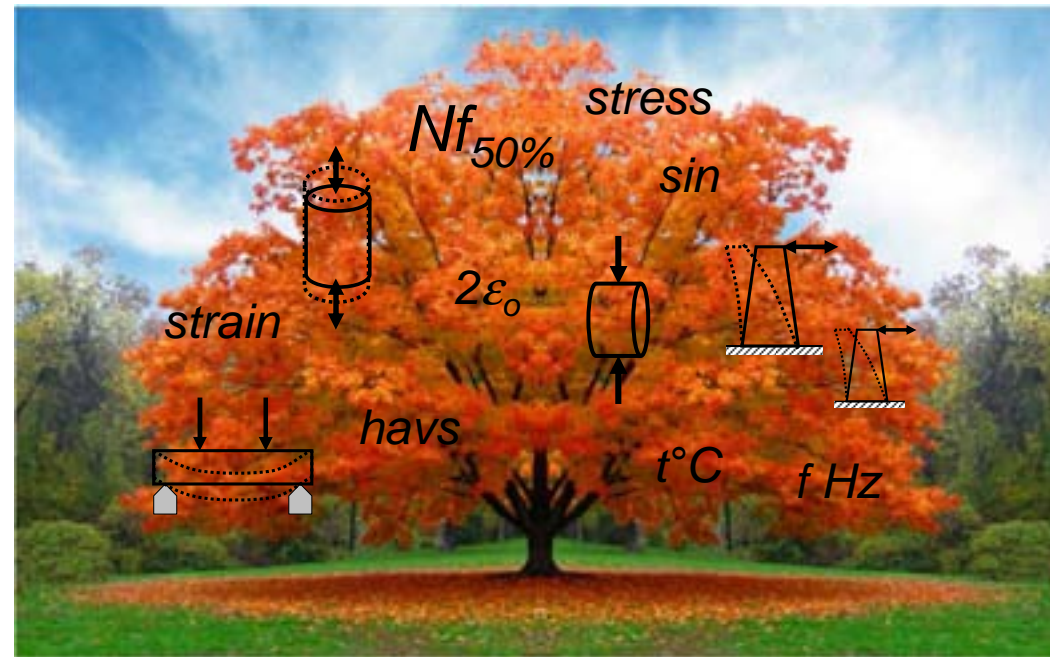
Ext. della rottura

RDEC

7. TEST A CONFR.

8. IN PROGRESS

APPROCCIO TRADIZIONALE:



Non univocità nella determinazione della rottura per fatica di un materiale bituminoso

A partire dagli anni '70 sono stati proposti da vari ricercatori diversi metodi di analisi basati sul concetto di ENERGIA DISSIPATA per individuare un criterio di danneggiamento a fatica che fosse caratteristico per il materiale ed indipendente dalle modalità di prova.



1. INTRODUZIONE

La Fatica nei c.b.

La Fatica in Labo

2. APPROCCIO

TRADIZIONALE

3. APPROCCIO

ENERGETICO

Basics

Van Dijk

Carpenter

FEL e Healing

4. METODOLOGIE DI

PROVA, MATERIALI

e PROVINI

5. MASTER CURVES

TEMP. SENSITIVITY

6. RESIST. A FATICA

Ext. della rottura

RDEC

7. TEST A CONFR.

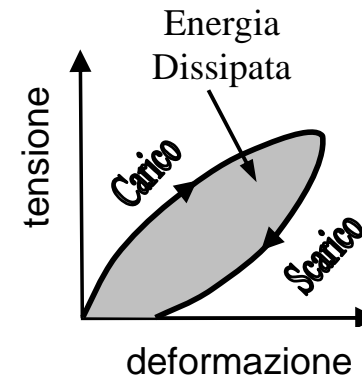
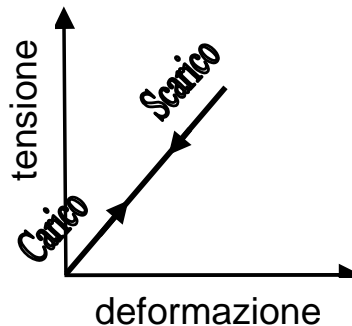
8. IN PROGRESS

APPROCCIO ENERGETICO: basics

Caricato ciclicamente il c.b. viscoelastico descrive percorsi di carico e scarico distinti e genera un ciclo di isteresi.

L'area interna al ciclo è **L'ENERGIA DISSIPATA**.

Comportamento
elastico



Comportamento
visco-elastico

Integrando l'incremento di lavoro svolto $\sigma \cdot d\varepsilon$ sul ciclo di carico di periodo T si ottiene l'area racchiusa nel cappio:

$$w_i = \int_0^T \sigma \frac{d\varepsilon}{dt} dt$$

con:

$$\sigma = \sigma_i \sin(\omega t)$$

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \omega \varepsilon_i \cos(\omega t - \varphi)$$

da cui:
$$w_i = \int_0^T [\omega \sigma_i \varepsilon_i \sin(\omega t) \cos(\omega t - \varphi)] dt$$



1. INTRODUZIONE

La Fatica nei c.b.

La Fatica in Labo

2. APPROCCIO

TRADIZIONALE

3. APPROCCIO

ENERGETICO

Basics

Van Dijk

Carpenter

FEL e Healing

4. METODOLOGIE DI

PROVA, MATERIALI
e PROVINI

5. MASTER CURVES

TEMP. SENSITIVITY

6. RESIST. A FATICA

Ext. della rottura

RDEC

7. TEST A CONFR.

8. IN PROGRESS

APPROCCIO ENERGETICO: basics

Per una sollecitazione di tipo sinusoidale come quella generalmente adottata per prove a fatica, l'energia dissipata durante un ciclo, può quindi essere calcolata attraverso la:

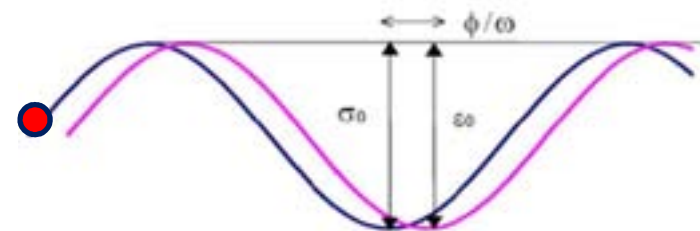
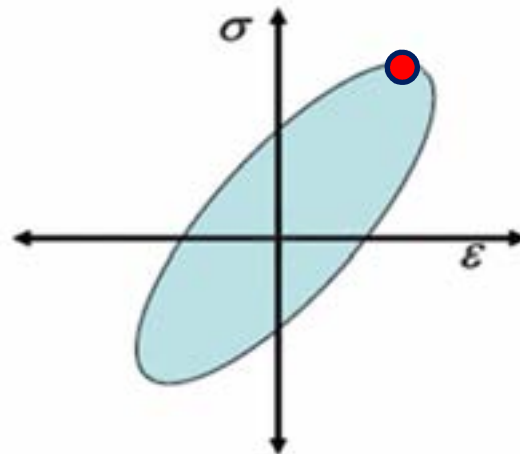
$$W_i = \pi \sigma_i \varepsilon_i \sin \varphi_i$$

W_i : l'energia dissipata durante il ciclo i-esimo;

σ_i : l'ampiezza della tensione al ciclo i-esimo;

ε_i : l'ampiezza della deformazione al ciclo i-esimo;

φ_i : lo sfasamento tensione-deformazione al ciclo i-esimo.



La dissipazione di questa energia è in gran parte associata alla deformazione viscosa del materiale che la dissipa in calore, ma anche alla formazione di micro-lesioni nel materiale che condurranno alla rottura.



1. INTRODUZIONE

La Fatica nei c.b.

La Fatica in Labo

2. APPROCCIO

TRADIZIONALE

3. APPROCCIO

ENERGETICO

Basics

Van Dijk

Carpenter

FEL e Healing

4. METODOLOGIE DI

PROVA, MATERIALI

e PROVINI

5. MASTER CURVES

TEMP. SENSITIVITY

6. RESIST. A FATICA

Ext. della rottura

RDEC

7. TEST A CONFR.

8. IN PROGRESS

APPROCCIO ENERGETICO: Van Dijk

Uno dei primi studi per la caratterizzazione della fatica in termini di Energia Dissipata è dovuto al gruppo di ricerca di Van Dijk.

Inizialmente ipotizzarono che l'Energia Dissipata Totale W_{fat} fosse costante indipendentemente dal modo di carico (stress o strain):

$$W_{fat} = \sum_{i=1}^n W_i$$

essendo W_i l'energia dissipata per ogni i-esimo intervallo di cicli:

$$W_i = \pi \times N_i \times \overline{\sigma}_i \times \overline{\varepsilon}_i \times \sin \overline{\varphi}_i$$

Con N_i = intervallo fisso di cicli, $\overline{\sigma}_i$, $\overline{\varepsilon}_i$ e $\overline{\varphi}_i$ i valori medi per le ampiezze di stress, strain e angolo di fase nell'intervallo i-esimo.

W_{fat} è essenzialmente l'area totale inclusa nel ciclo di isteresi, moltiplicata per il numero di cicli N_i per i quali quel ciclo può essere approssimato tale.



1. INTRODUZIONE

La Fatica nei c.b.

La Fatica in Labo

2. APPROCCIO

TRADIZIONALE

3. APPROCCIO

ENERGETICO

Basics

Van Dijk

Carpenter

FEL e Healing

4. METODOLOGIE DI

PROVA, MATERIALI

e PROVINI

5. MASTER CURVES

TEMP. SENSITIVITY

6. RESIST. A FATICA

Ext. della rottura

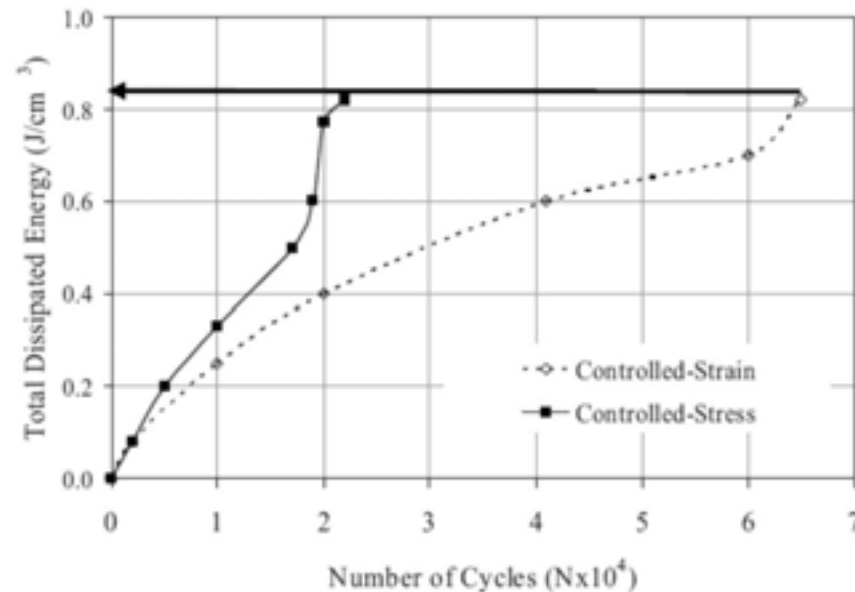
RDEC

7. TEST A CONFR.

8. IN PROGRESS

APPROCCIO ENERGETICO: Van Dijk

All'ipotesi iniziale Van Dijk aggiunse un corollario: considerando un test a controllo di deformazione come un test ciclico con tensioni variabili ad ogni ciclo, *l'Energia Dissipata Totale a rottura deve essere costante anche per diverse ampiezze di tensione o deformazione per uno stesso modo di carico.*



In breve, secondo Van Dijk per un materiale bituminoso l'energia totale richiesta per la completa rottura a fatica è costante ed indipendente dalla storia di carico* (tipo e entità del carico e numero di cicli) (1972).



1.INTRODUZIONE

La Fatica nei c.b.

La Fatica in Labo

2.APPROCCIO TRADIZIONALE

3.APPROCCIO ENERGETICO

Basics

Van Dijk

Carpenter

FEL e Healing

4.METODOLOGIE DI PROVA, MATERIALI e PROVINI

5.MASTER CURVES TEMP. SENSITIVITY

6.RESIST. A FATICA

Ext. della rottura

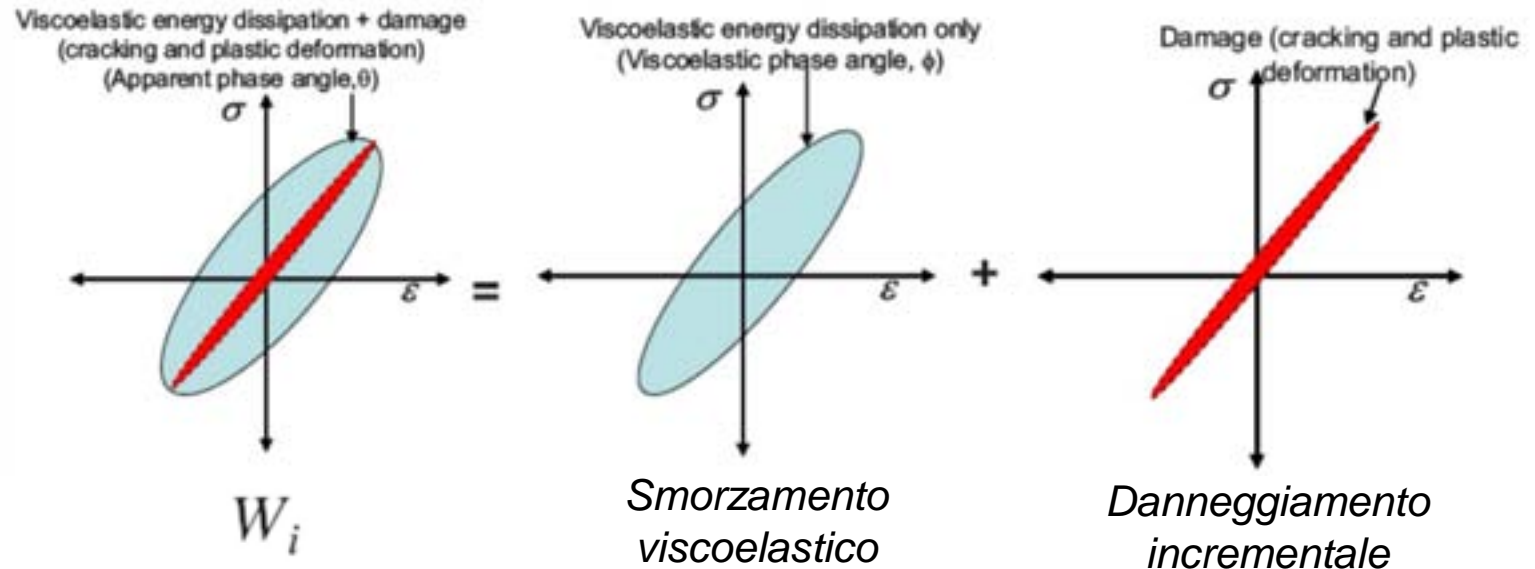
RDEC

7.TEST A CONFR.

8.IN PROGRESS

APPROCCIO ENERGETICO: Van Dijk

Una importante osservazione fatta a Van Dijk riguarda il fatto che l'energia dissipata per ciclo W_i sia in realtà costituita da 2 contributi:



In pratica, l'angolo di fase φ_i non è il reale angolo viscoelastico, ma risulta un angolo apparente in quanto racchiude la dissipazione di energia combinata dovuta alla viscoelasticità, assieme a quella per la deformazione plastica ed alla crescita della frattura. Le ipotesi risultano pertanto significativamente approssimate essendo indistinti i contributi energetici somministrati al provino.



1. INTRODUZIONE

La Fatica nei c.b.

La Fatica in Labo

2. APPROCCIO

TRADIZIONALE

3. APPROCCIO

ENERGETICO

Basics

Van Dijk

Carpenter

FEL e Healing

4. METODOLOGIE DI

PROVA, MATERIALI

e PROVINI

5. MASTER CURVES

TEMP. SENSITIVITY

6. RESIST. A FATICA

Ext. della rottura

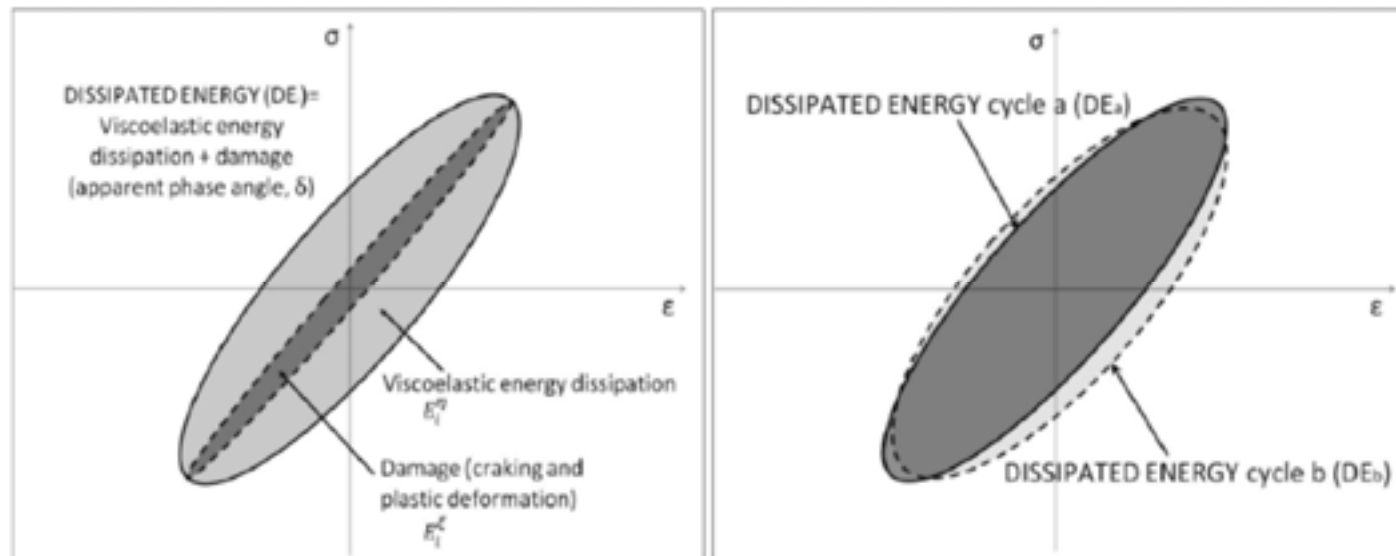
RDEC

7. TEST A CONFR.

8. IN PROGRESS

APPROCCIO ENERGETICO: Carpenter

Per superare la limitazione alla base dell'approccio di Van Dijk, Ghuzlan e Carpenter (2000) proposero di studiare la fatica basandosi sulla variazione relativa di energia dissipata tra due cicli consecutivi (a) e (b), anziché sull'energia totale di ciascun ciclo.



L'energia dissipata viscoelastica non varia sensibilmente tra due cicli di carico vicini e, in un test a fatica in cui la sollecitazione è lontana dal provocare la rottura, è molto maggiore dell'energia di danneggiamento. La differenza tra le energie di due cicli successivi indica l'ammontare di energia dissipata che incrementa il danno.



1. INTRODUZIONE

La Fatica nei c.b.

La Fatica in Labo

2. APPROCCIO TRADIZIONALE

3. APPROCCIO ENERGETICO

Basics

Van Dijk

Carpenter

FEL e Healing

4. METODOLOGIE DI PROVA, MATERIALI e PROVINI

5. MASTER CURVES TEMP. SENSITIVITY

6. RESIST. A FATICA

Ext. della rottura

RDEC

7. TEST A CONFR.

8. IN PROGRESS

APPROCCIO ENERGETICO: Carpenter

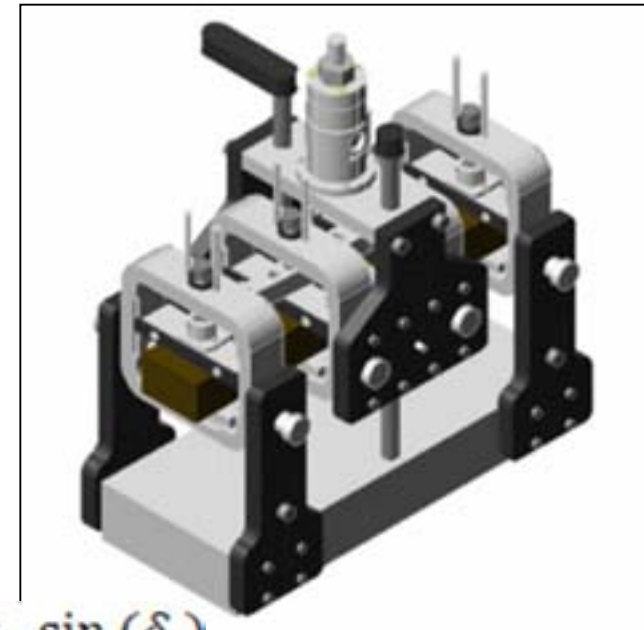
Dunque, escludendo le dissipazioni viscosse e termiche, solo la quantità relativa di energia dissipata dovuta a ciascun ciclo addizionale produrrà ulteriore danneggiamento. Il valore incrementale di energia dissipata è direttamente legato al danno accumulato.

Considerarono che la rottura è imminente quando si verifica un significativo incremento della DE tra due cicli consecutivi. Tale variazione è quantificata tramite il Ratio of Dissipated Energy Change (RDEC) calcolato come:

$$RDEC_a = \frac{|DE_a - DE_b|}{DE_a \times (b - a)}$$

DE_a , DE_b sono le energie dissipate nei due cicli calcolabili graficamente o matematicamente impiegando le ampiezze di stress-strain e l'angolo di fase di ciascun ciclo; solitamente $(b-a)=100$.

$$DE_i = \pi \sigma_i \varepsilon_0 \sin(\delta_i)$$





1.INTRODUZIONE

La Fatica nei c.b.

La Fatica in Labo

2.APPROCCIO TRADIZIONALE

3.APPROCCIO ENERGETICO

Basics

Van Dijk

Carpenter

FEL e Healing

4.METODOLOGIE DI PROVA, MATERIALI e PROVINI

5.MASTER CURVES

TEMP. SENSITIVITY

6.RESIST. A FATICA

Ext. della rottura

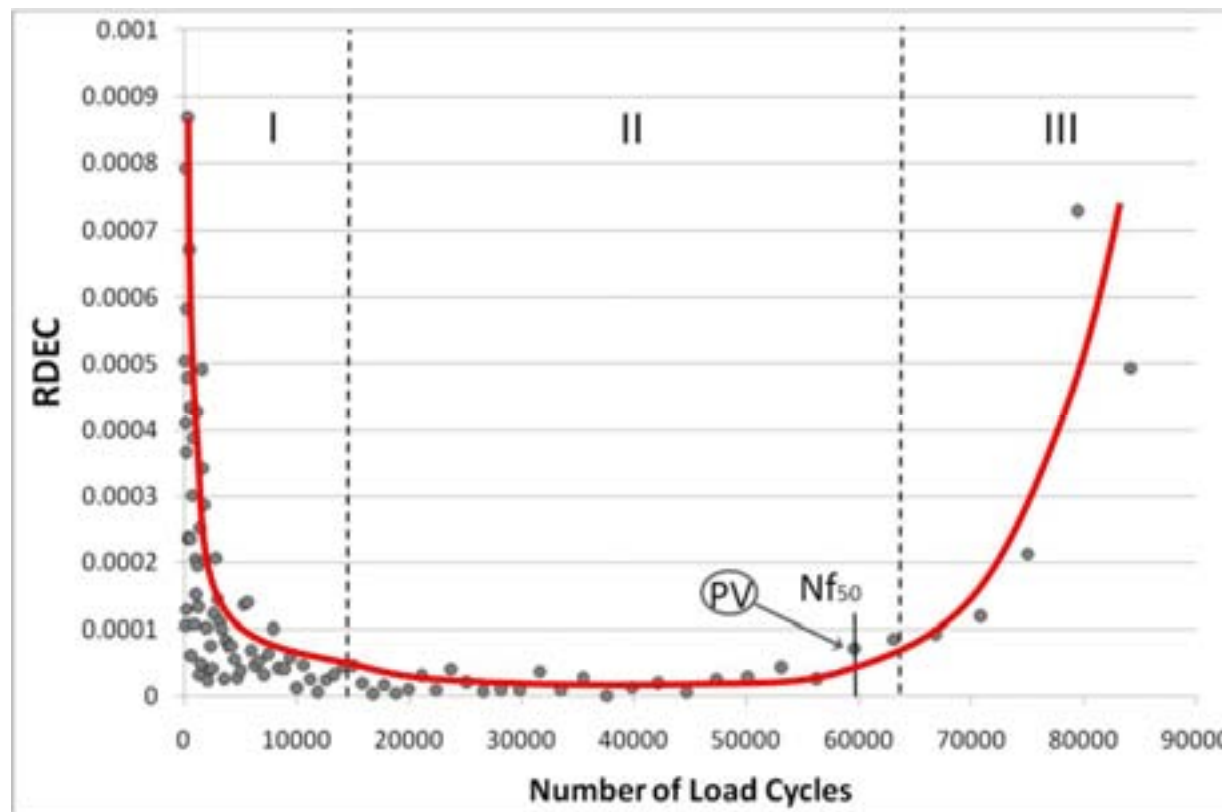
RDEC

7.TEST A CONFR.

8.IN PROGRESS

APPROCCIO ENERGETICO: Carpenter

La curva RDEC-cicli, se si arriva a rottura, presenta un andamento ad U nel quale si distinguono 3 fasi. Nella fase I iniziale si ha l'assestamento del provino sotto carico, nella fase II di plateau il danno incrementale è costante e la frattura si propaga in modo uniforme, fino alla fase III di rottura dove il tasso di danno cresce repentinamente ad indicare la rottura.





1. INTRODUZIONE

La Fatica nei c.b.

La Fatica in Labo

2. APPROCCIO TRADIZIONALE

3. APPROCCIO ENERGETICO

Basics

Van Dijk

Carpenter

FEL e Healing

4. METODOLOGIE DI PROVA, MATERIALI e PROVINI

5. MASTER CURVES TEMP. SENSITIVITY

6. RESIST. A FATICA

Ext. della rottura

RDEC

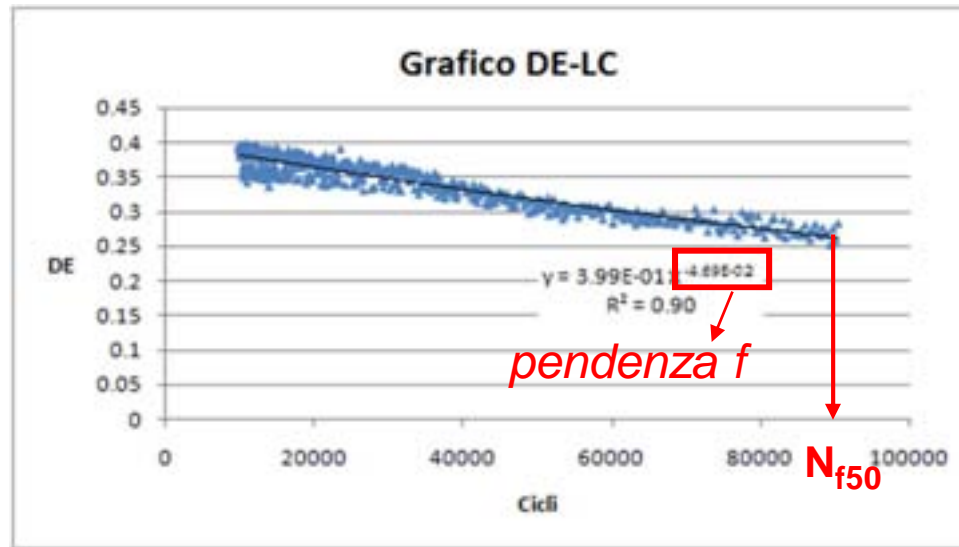
7. TEST A CONFR.

8. IN PROGRESS

APPROCCIO ENERGETICO: Carpenter

Il valore assunto da RDEC nella fase II di plateau è detto appunto PLATEAU VALUE (PV) e lo si calcola in corrispondenza del numero di cicli $N_{f50\%}$ nel quale si ha il dimezzamento del Modulo iniziale.

In pratica, a partire dalla curva DE-cicli fittata con una esponenziale si calcola l'andamento di RDEC-cicli applicando la formula vista, oppure semplicemente utilizzando la pendenza f della curva nella seguente espressione valida per $(b-a)=100$:



$$RDEC_a = \frac{1 - \left(1 + \frac{100}{a}\right)^f}{100}$$

$$PV = \frac{1 - \left(1 + \frac{100}{N_{f50}}\right)^f}{100}$$

Il valore di PV corrisponde all' RDEC per il ciclo $a = N_{f50}$ e risulta definito conoscendo il valore di f e di N_{f50}



1. INTRODUZIONE

La Fatica nei c.b.

La Fatica in Labo

2. APPROCCIO TRADIZIONALE

3. APPROCCIO ENERGETICO

Basics

Van Dijk

Carpenter

FEL e Healing

4. METODOLOGIE DI PROVA, MATERIALI e PROVINI

5. MASTER CURVES

TEMP. SENSITIVITY

6. RESIST. A FATICA

Ext. della rottura

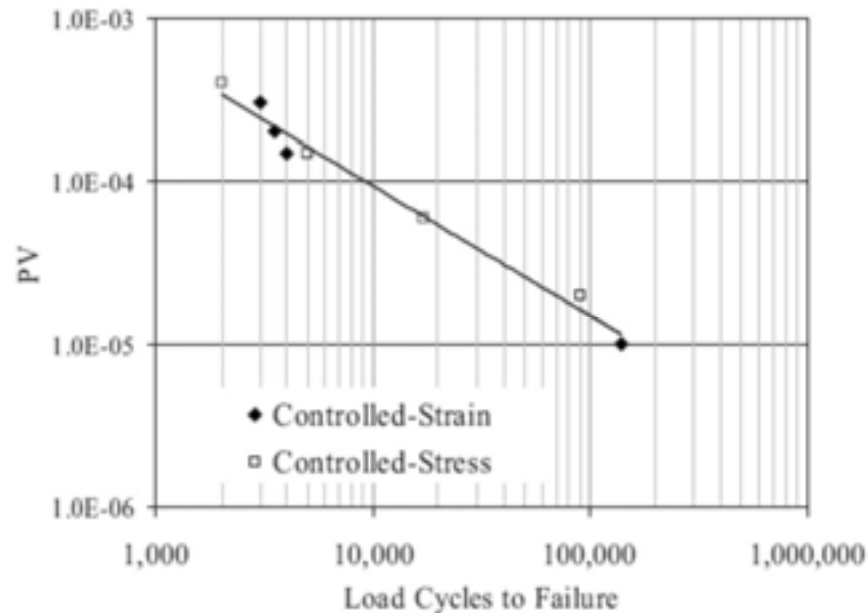
RDEC

7. TEST A CONFR.

8. IN PROGRESS

APPROCCIO ENERGETICO: Carpenter

Shen e Carpenter dimostrarono l'esistenza di una UNICA relazione tra PV ed N_{f50} testando oltre 20 miscele diverse (più di 600 test), indipendentemente dal modo e dai livelli di carico e dalle condizioni di prova (frequenze, Rest Periods, etc.).



Il modello impiegato è del tipo:

$$PV = cN_f^d$$

Essendo c e d costanti di regressione ed N_f il numero di cicli a rottura, scelto pari a N_{f50} .

Secondo i ricercatori americani il PV è un indice di danno complessivo che racchiude in sé gli effetti delle proprietà del materiale e delle condizioni di prova e che, pertanto, «può essere scelto come parametro energetico fondamentale per rappresentare la fatica dei conglomerati bituminosi».



1. INTRODUZIONE

La Fatica nei c.b.

La Fatica in Labo

2. APPROCCIO TRADIZIONALE

3. APPROCCIO ENERGETICO

Basics

Van Dijk

Carpenter

FEL e Healing

4. METODOLOGIE DI PROVA, MATERIALI e PROVINI

5. MASTER CURVES TEMP. SENSITIVITY

6. RESIST. A FATICA

Ext. della rottura

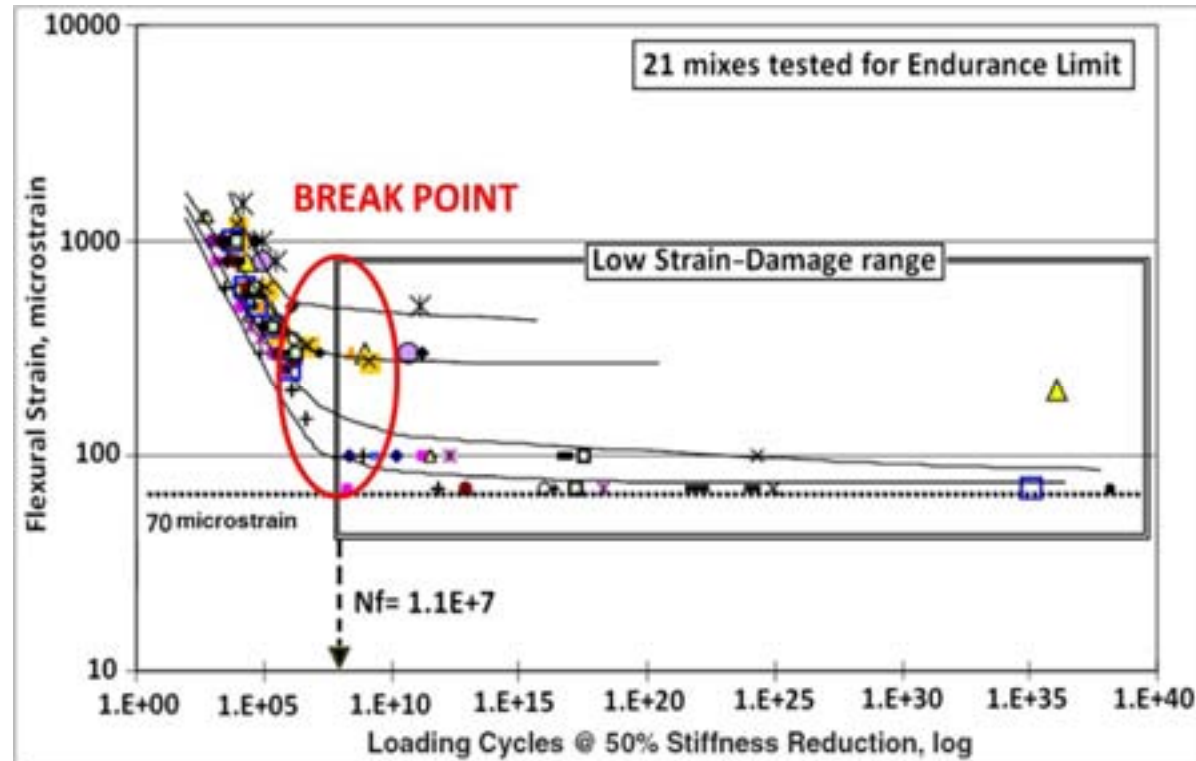
RDEC

7. TEST A CONFR.

8. IN PROGRESS

APPROCCIO ENERGETICO: FEL

L'approccio dell'RDEC e del PV consente anche di rappresentare il tema del **FATIGUE ENDURANCE LIMIT** per la progettazione delle Perpetual Pavements (PP) anche dette Long Life Pavements (LLP).



Il FEL è identificato con il livello tenso-deformativo nei c.b. al di sotto del quale l'energia di danneggiamento introdotta dal carico non è sufficiente per incrementare quello già accumulato ed il materiale esibisce una vita a fatica molto superiore al normale*



APPROCCIO ENERGETICO: FEL

Secondo Carpenter il FEL è compreso tra i 70 ed i 500 $\mu\epsilon$ in base alla miscela testata.

1. INTRODUZIONE

La Fatica nei c.b.

La Fatica in Labo

2. APPROCCIO

TRADIZIONALE

3. APPROCCIO

ENERGETICO

Basics

Van Dijk

Carpenter

FEL e Healing

4. METODOLOGIE DI

PROVA, MATERIALI

e PROVINI

5. MASTER CURVES

TEMP. SENSITIVITY

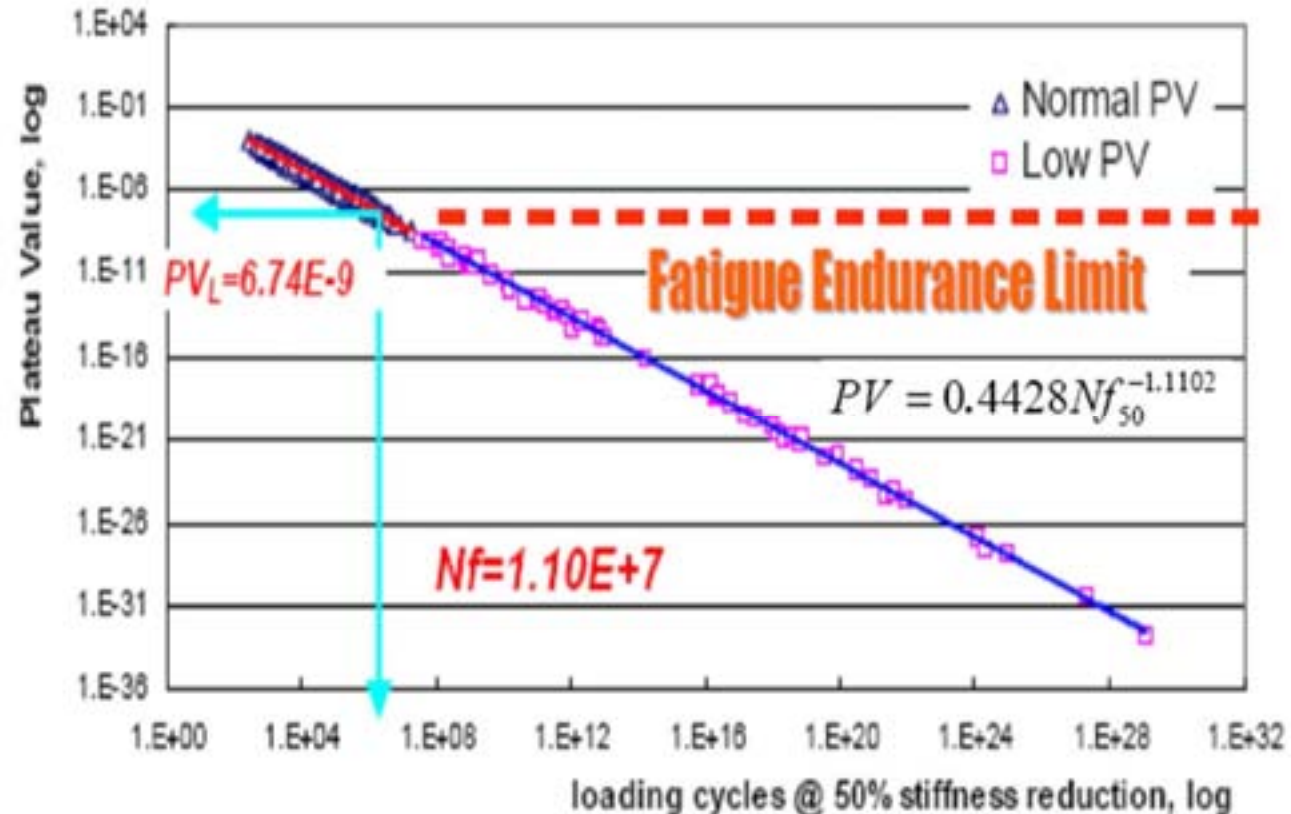
6. RESIST. A FATICA

Ext. della rottura

RDEC

7. TEST A CONFR.

8. IN PROGRESS



Un pacchetto bituminoso progettato affinché, nelle più gravose condizioni di carico, operi in condizioni di FEL è del tipo PP. In pratica, se gli strain di tensione massimi restano per tutto l'anno al di sotto del valore conservativo di 70 - 100 $\mu\epsilon$, non si ha danno.

Sam Carpenter



1. INTRODUZIONE

La Fatica nei c.b.

La Fatica in Labo

2. APPROCCIO TRADIZIONALE

3. APPROCCIO ENERGETICO

Basics

Van Dijk

Carpenter

FEL e Healing

4. METODOLOGIE DI PROVA, MATERIALI e PROVINI

5. MASTER CURVES TEMP. SENSITIVITY

6. RESIST. A FATICA

Ext. della rottura

RDEC

7. TEST A CONFR.

8. IN PROGRESS

APPROCCIO ENERGETICO: HEALING

La capacità di autoripararsi di un materiale bituminoso può essere vista come fonte di FEL ed aiuta a spiegare il comportamento a fatica dei c.b. soggetti a stati tenso-deformativi per i quali il numero dei cicli a rottura è accresciuto notevolmente.

Strain > FEL il danneggiamento prodotto dal ciclo è più elevato del potenziale di Healing del materiale;

Strain < FEL il danneggiamento è \leq al potenziale di Healing ed il danno può essere completamente riparato.

L'Healing è un processo continuo che appare maggiormente quando si impone un Rest Period tra cicli di carico e si osserva un incremento del modulo.

Una combinazione bitume-aggregati ha un certo potenziale di Healing e può esistere un livello deformativo per il quale la cinetica del processo di autoriparazione supera il danno per ciclo e non si verifica alcun danneggiamento nel materiale.

L'effetto è una estensione della vita a fatica che corrisponde al raggiungimento della condizione di FEL descritta.



1. INTRODUZIONE

La Fatica nei c.b.

La Fatica in Labo

2. APPROCCIO

TRADIZIONALE

3. APPROCCIO

ENERGETICO

Basics

Van Dijk

Carpenter

FEL e Healing

4. METODOLOGIE DI PROVA, MATERIALI e PROVINI

5. MASTER CURVES

TEMP. SENSITIVITY

6. RESIST. A FATICA

Ext. della rottura

RDEC

7. TEST A CONFR.

8. IN PROGRESS

METODOLOGIE DI PROVA:

4PB-PR

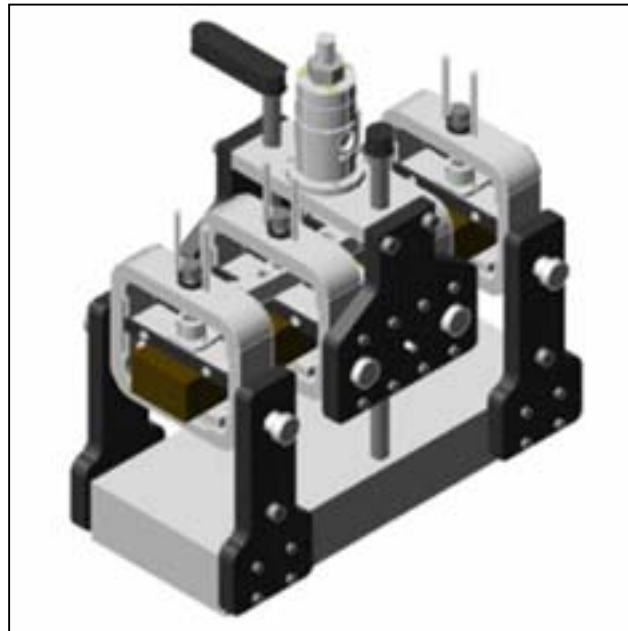
UNI EN 12697-24 e 26
ASTM D7460-10
AASHTO T 321

Prisma Rettangolare

B = 63 mm

s = 50 mm

L = 380 mm



2PB-TR

UNI EN 12697-24 e 26*

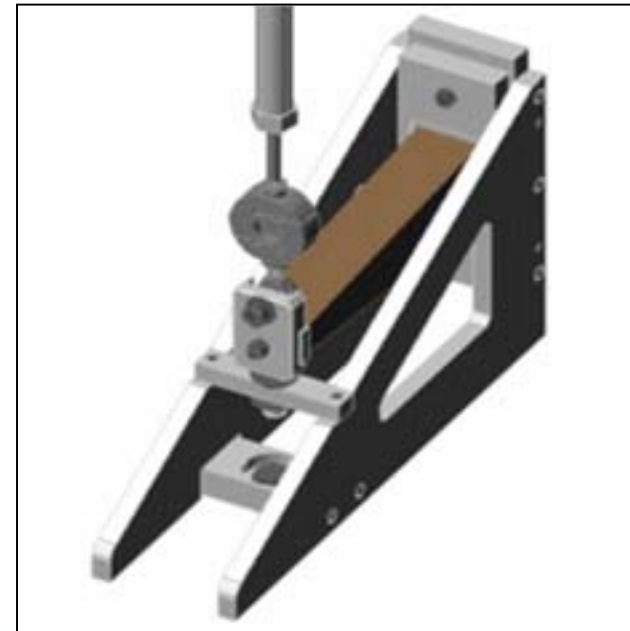
Prisma Trapezoidale

B = 50 – 70 mm

b = 25 – 50 mm

s = 25 – 50 mm

L = 250 mm





1. INTRODUZIONE

La Fatica nei c.b.

La Fatica in Labo

2. APPROCCIO TRADIZIONALE

3. APPROCCIO ENERGETICO

Basics

Van Dijk

Carpenter

FEL e Healing

4. METODOLOGIE DI PROVA, MATERIALI e PROVINI

5. MASTER CURVES

TEMP. SENSITIVITY

6. RESIST. A FATICA

Ext. della rottura

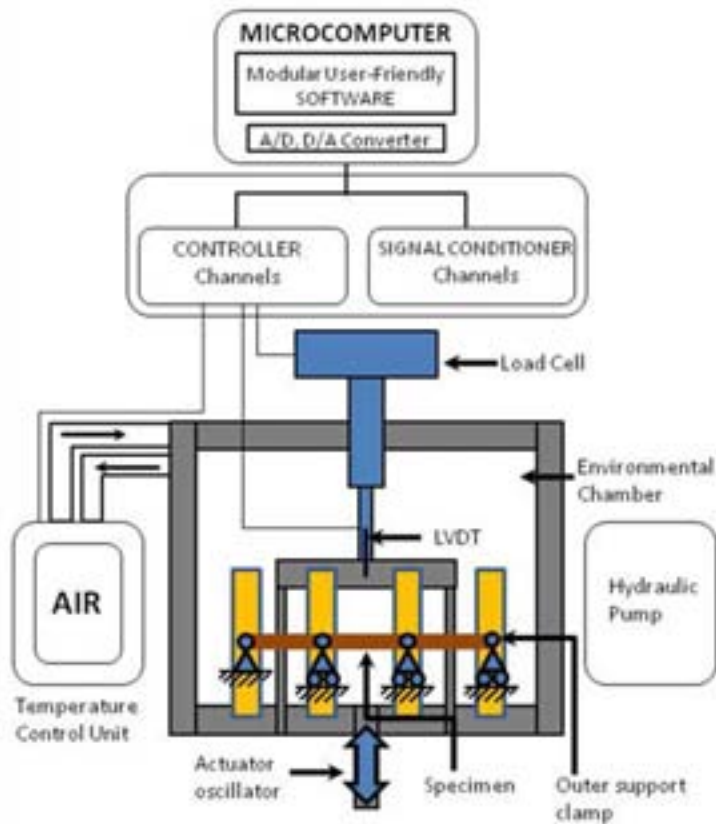
RDEC

7. TEST A CONFR.

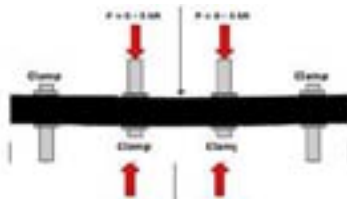
8. IN PROGRESS

METODOLOGIE DI PROVA:

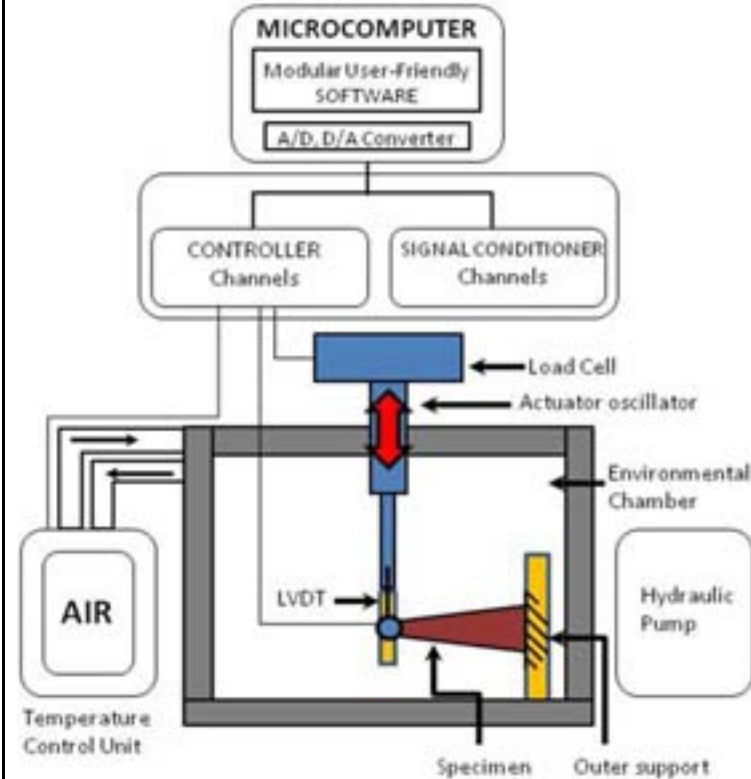
4PB-PR



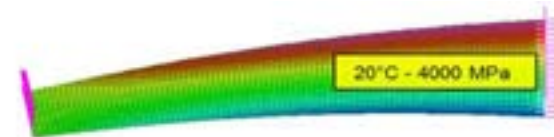
L'attuatore può agire superiormente (IPC, GCTS, COOPER) o inferiormente (COX).



2PB-TR



La EN non specifica la direzione del provino. Studi specifici ne hanno comprovato la validità con comparazioni dirette e modellazioni FEM





1. INTRODUZIONE

La Fatica nei c.b.

La Fatica in Labo

2. APPROCCIO

TRADIZIONALE

3. APPROCCIO

ENERGETICO

Basics

Van Dijk

Carpenter

FEL e Healing

4. METODOLOGIE DI

PROVA, MATERIALI

e PROVINI

5. MASTER CURVES

TEMP. SENSITIVITY

6. RESIST. A FATICA

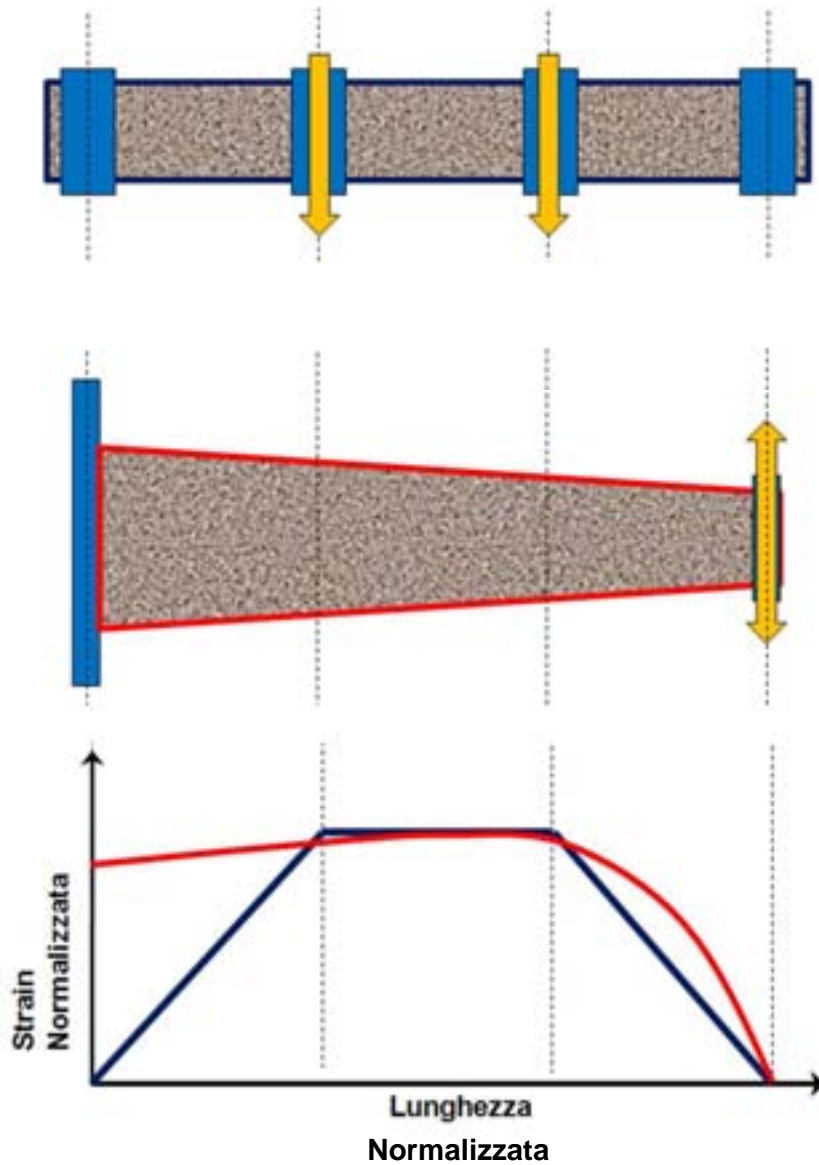
Ext. della rottura

RDEC

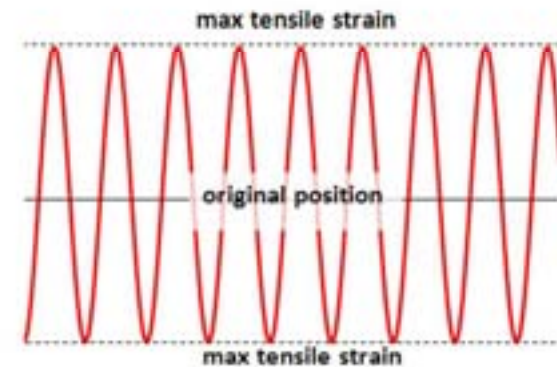
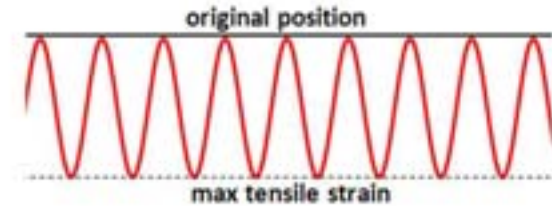
7. TEST A CONFR.

8. IN PROGRESS

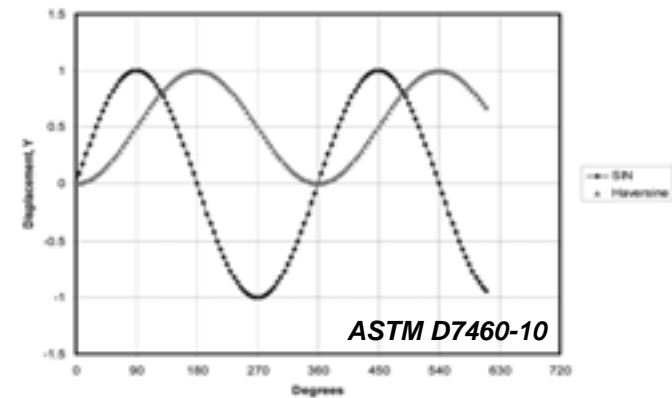
METODOLOGIE DI PROVA:



SEMISENOVERSA (HAVERISINE)



SINUSOIDALE





METODOLOGIE DI PROVA: 4PB

1. INTRODUZIONE

La Fatica nei c.b.
La Fatica in Labo

2. APPROCCIO TRADIZIONALE

3. APPROCCIO ENERGETICO

Basics

Van Dijk

Carpenter

FEL e Healing

4. METODOLOGIE DI PROVA, MATERIALI e PROVINI

5. MASTER CURVES

TEMP. SENSITIVITY

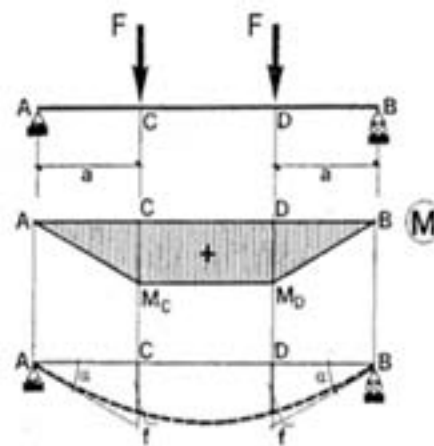
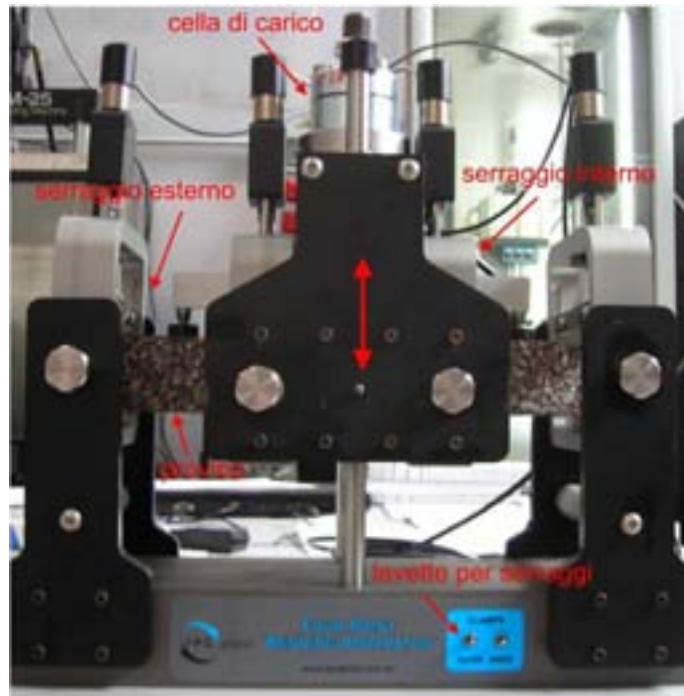
6. RESIST. A FATICA

Ext. della rottura

RDEC

7. TEST A CONFR.

8. IN PROGRESS





METODOLOGIE DI PROVA: 2PB

1.INTRODUZIONE

La Fatica nei c.b.

La Fatica in Labo

2.APPROCCIO

TRADIZIONALE

3.APPROCCIO

ENERGETICO

Basics

Van Dijk

Carpenter

FEL e Healing

4.METODOLOGIE DI PROVA, MATERIALI e PROVINI

5.MASTER CURVES

TEMP. SENSITIVITY

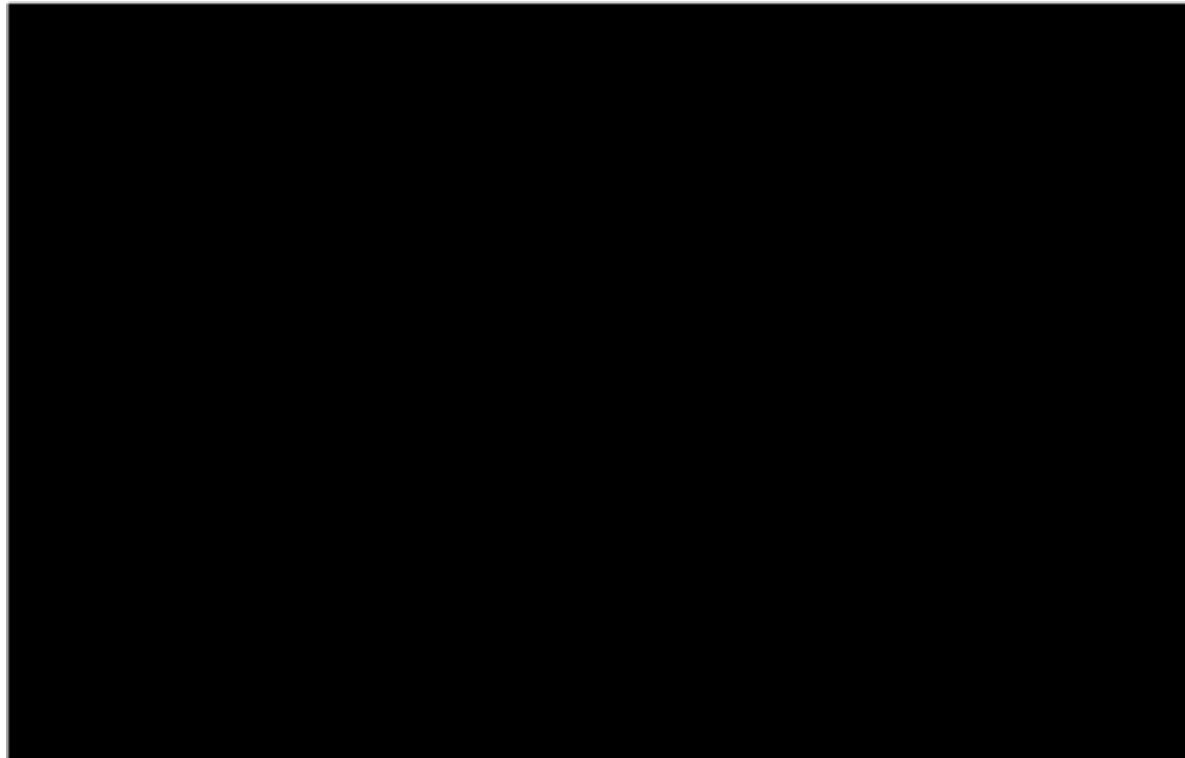
6.RESIST. A FATICA

Ext. della rottura

RDEC

7.TEST A CONFR.

8.IN PROGRESS





1. INTRODUZIONE

La Fatica nei c.b.

La Fatica in Labo

2. APPROCCIO

TRADIZIONALE

3. APPROCCIO

ENERGETICO

Basics

Van Dijk

Carpenter

FEL e Healing

4. METODOLOGIE DI

PROVA, MATERIALI
e PROVINI

5. MASTER CURVES

TEMP. SENSITIVITY

6. RESIST. A FATICA

Ext. della rottura

RDEC

7. TEST A CONFR.

8. IN PROGRESS

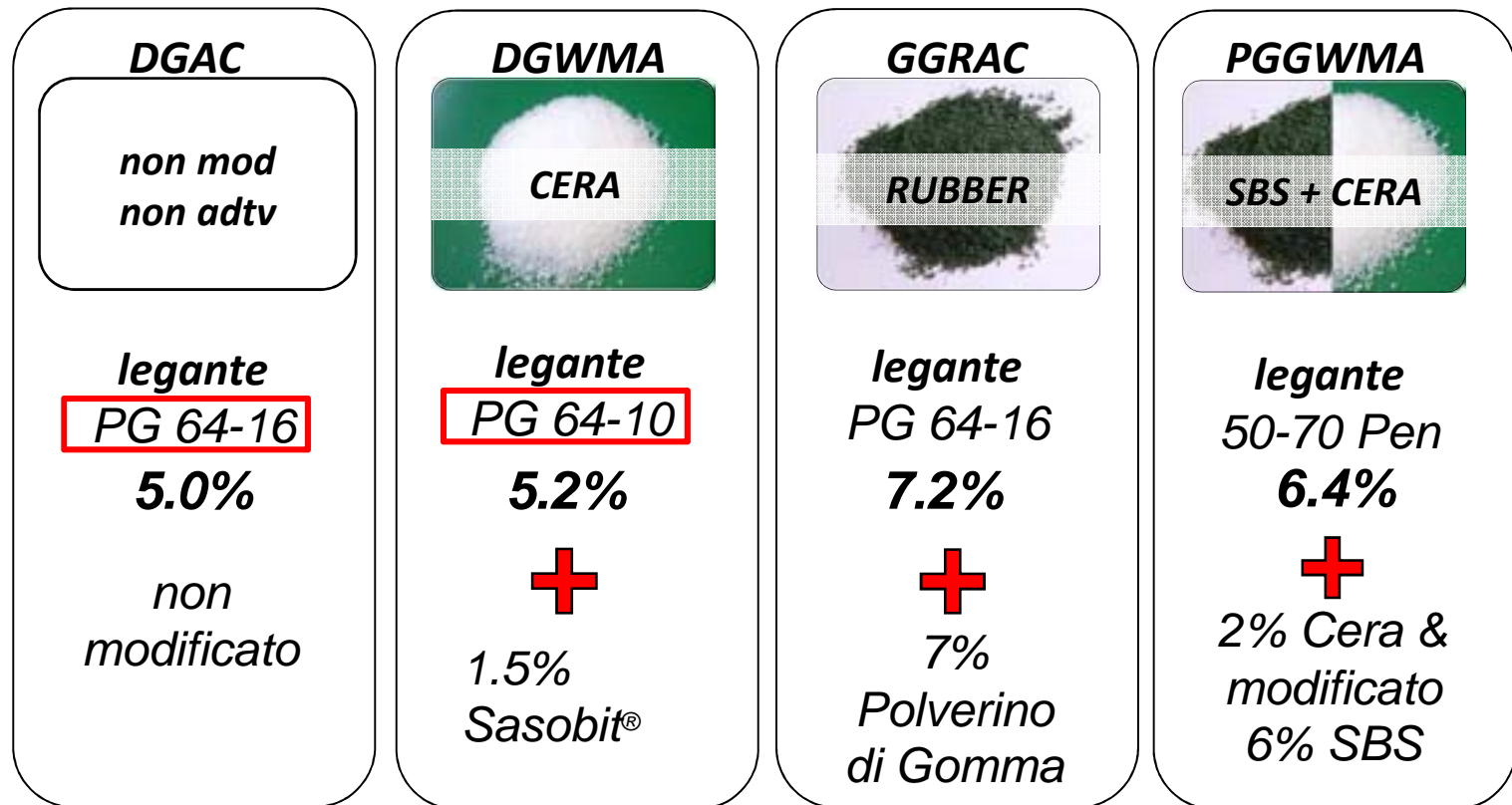
MATERIALI:

- Dense Graded Asphalt Concrete: **DGAC**

- Dense Graded Warm Mix Asphalt: **DGWMA**

- Gap Graded Rubber Asphalt Concrete: **GGRAC**

- Polimer Modified Gap Graded Warm Mix Asphalt: **PGGWMA (SMA)**





1. INTRODUZIONE

La Fatica nei c.b.

La Fatica in Labo

2. APPROCCIO

TRADIZIONALE

3. APPROCCIO

ENERGETICO

Basics

Van Dijk

Carpenter

FEL e Healing

4. METODOLOGIE DI

PROVA, MATERIALI

e PROVINI

5. MASTER CURVES

TEMP. SENSITIVITY

6. RESIST. A FATICA

Ext. della rottura

RDEC

7. TEST A CONFR.

8. IN PROGRESS

MATERIALI:

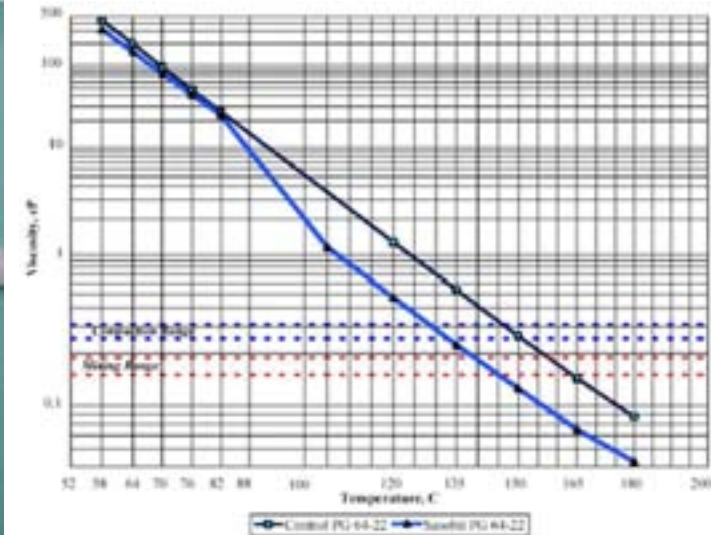
Sasobit®

Sasobit è una cera prodotta attraverso il processo di sintesi Fischer-Tropsch. È reperibile in commercio sotto forma di polvere bianca o granulata ed è presente nel mercato Europeo dal 1997. Sasobit è una miscela di lunghe catene di idrocarburi avente una temperatura di fusione intorno ai 100°C-120°C.

Sasobit riduce la viscosità del legante alle temperature di produzione e stesa, migliorando la lavorabilità del conglomerato. Durante il raffreddamento, la cristallizzazione inizia a 105°C e si completa a 65°C formando nel bitume delle fibre di forma allungata regolarmente distribuite.

Alle temperature di servizio Sasobit forma una struttura reticolare nel legante bituminoso che migliora la stabilità della miscela.

Sulla base di esperimenti Europei ed Americani, il quantitativo ottimo di Sasobit si aggira intorno al 2-3% sul peso del legante.





1. INTRODUZIONE

La Fatica nei c.b.

La Fatica in Labo

2. APPROCCIO

TRADIZIONALE

3. APPROCCIO

ENERGETICO

Basics

Van Dijk

Carpenter

FEL e Healing

4. METODOLOGIE DI

PROVA, MATERIALI
e PROVINI

5. MASTER CURVES

TEMP. SENSITIVITY

6. RESIST. A FATICA

Ext. della rottura

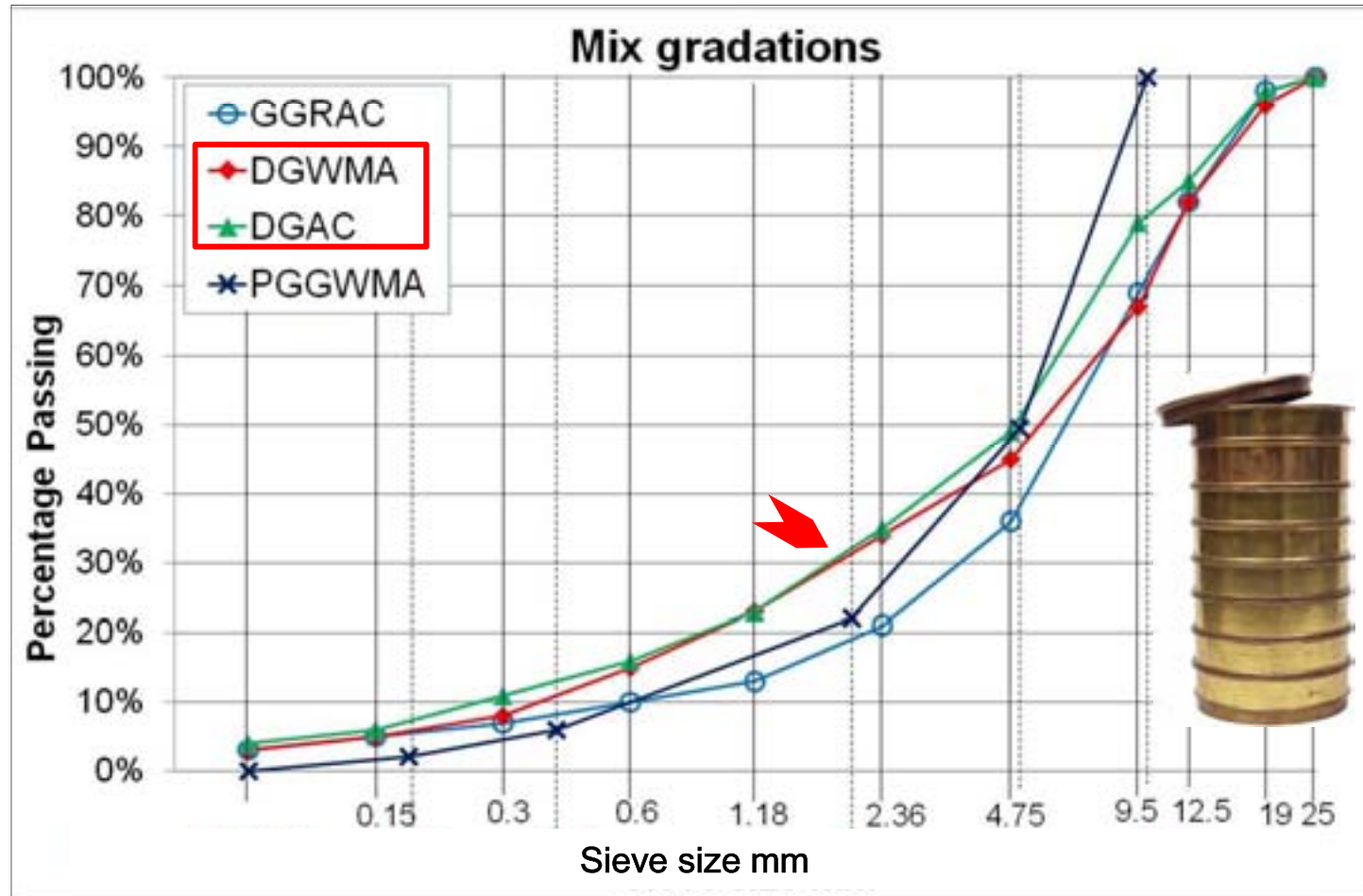
RDEC

7. TEST A CONFR.

8. IN PROGRESS

MATERIALI:

- Granulometrie (calcare, granito e porfido)
- Specifiche Caltrans (USA) e Civis (ITA)





PROVINI:

Preparazione PRC - Berkeley

1.INTRODUZIONE

La Fatica nei c.b.

La Fatica in Labo

2.APPROCCIO

TRADIZIONALE

3.APPROCCIO

ENERGETICO

Basics

Van Dijk

Carpenter

FEL e Healing

4.METODOLOGIE DI PROVA, MATERIALI e PROVINI

5.MASTER CURVES

TEMP. SENSITIVITY

6.RESIST. A FATICA

Ext. della rottura

RDEC

7.TEST A CONFR.

8.IN PROGRESS





PROVINI:

Preparazione Valli Zabban - Bologna

1.INTRODUZIONE

La Fatica nei c.b.

La Fatica in Labo

2.APPROCCIO

TRADIZIONALE

3.APPROCCIO

ENERGETICO

Basics

Van Dijk

Carpenter

FEL e Healing

4.METODOLOGIE DI PROVA, MATERIALI e PROVINI

5.MASTER CURVES

TEMP. SENSITIVITY

6.RESIST. A FATICA

Ext. della rottura

RDEC

7.TEST A CONFR.

8.IN PROGRESS





PROVINI:

Preparazione Elletipi - Ferrara

1.INTRODUZIONE

*La Fatica nei c.b.
La Fatica in Labo*

2.APPROCCIO TRADIZIONALE

3.APPROCCIO ENERGETICO

Basics

Van Dijk

Carpenter

FEL e Healing

4.METODOLOGIE DI PROVA, MATERIALI e PROVINI

5.MASTER CURVES

TEMP. SENSITIVITY

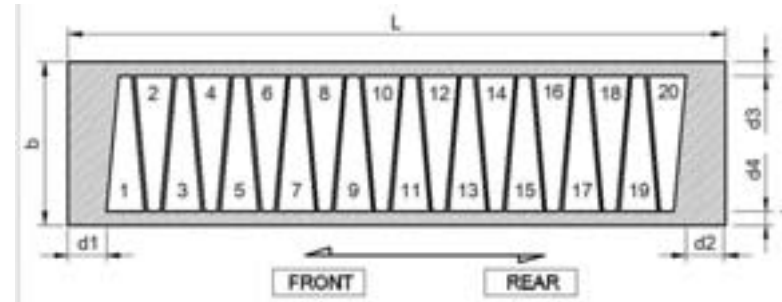
6.RESIST. A FATICA

Ext. della rottura

RDEC

7.TEST A CONFR.

8.IN PROGRESS





PROVINI:

1. INTRODUZIONE

La Fatica nei c.b.

La Fatica in Labo

2. APPROCCIO

TRADIZIONALE

3. APPROCCIO

ENERGETICO

Basics

Van Dijk

Carpenter

FEL e Healing

4. METODOLOGIE DI PROVA, MATERIALI e PROVINI

5. MASTER CURVES

TEMP. SENSITIVITY

6. RESIST. A FATICA

Ext. della rottura

RDEC

7. TEST A CONFR.

8. IN PROGRESS

DGAC

Nessuna
modifica

24 Travetti (PR)

6.1 % Vuoti



18 Carote (C)

6.0 % Vuoti



DGWMA

CERA

24 Travetti (PR)

5.9 % Vuoti



18 Carote (C)

5.9 % Vuoti



GGRAC

RUBBER

24 Travetti (PR)

6.9 % Vuoti



18 Carote (C)

6.0 % Vuoti



PGGWMA

SBS + CERA

24 Travetti (PR)

6.7 % Vuoti



18 Carote (C)

6.1 % Vuoti



15 Trapezi (TR)

6.2 % Vuoti



TOT. PROVINI = 183 (96 PR + 72 C + 15 TR)

Vuoti di PROGETTO 6%



1. INTRODUZIONE

La Fatica nei c.b.

La Fatica in Labo

2. APPROCCIO

TRADIZIONALE

3. APPROCCIO

ENERGETICO

Basics

Van Dijk

Carpenter

FEL e Healing

4. METODOLOGIE DI

PROVA, MATERIALI

e PROVINI

5. MASTER CURVES

TEMP. SENSITIVITY

6. RESIST. A FATICA

Ext. della rottura

RDEC

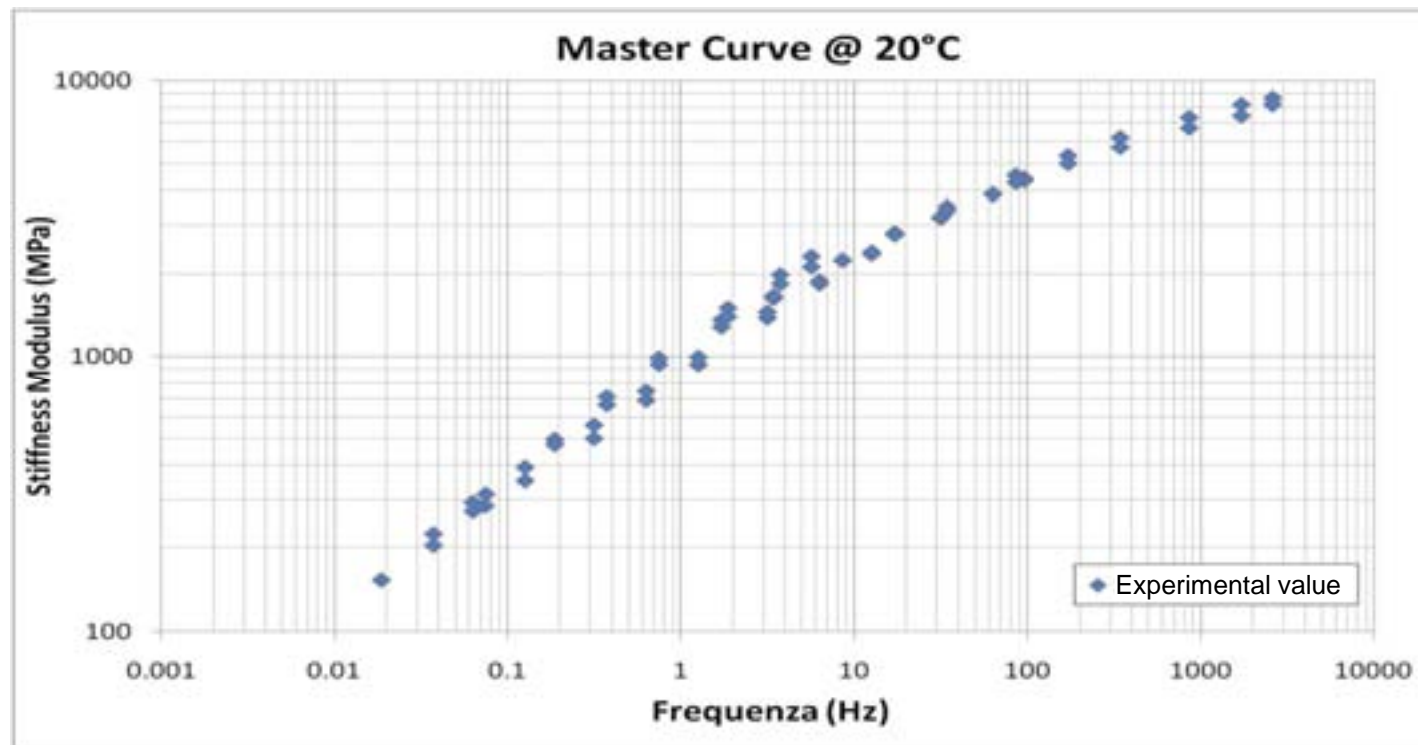
7. TEST A CONFR.

8. IN PROGRESS

MASTER CURVES:

Rappresentano la variazione della rigidezza in relazione alla frequenza di caricamento ad una data temperatura di riferimento.

La costruzione della MC si basa sul PRINCIPIO DI SOVRAPPOSIZIONE TEMPO-TEMPERATURA ed è applicabile su materiali a comportamento termoreologicamente semplice, come il conglomerato bituminoso: in pratica la stessa variazione di una grandezza meccanica ottenuta variando la temperatura a frequenza fissata, può essere ottenuta variando la frequenza e tenendo fissa la temperatura.





1. INTRODUZIONE

La Fatica nei c.b.

La Fatica in Labo

2. APPROCCIO

TRADIZIONALE

3. APPROCCIO

ENERGETICO

Basics

Van Dijk

Carpenter

FEL e Healing

4. METODOLOGIE DI

PROVA, MATERIALI
e PROVINI

5. MASTER CURVES

TEMP. SENSITIVITY

6. RESIST. A FATICA

Ext. della rottura

RDEC

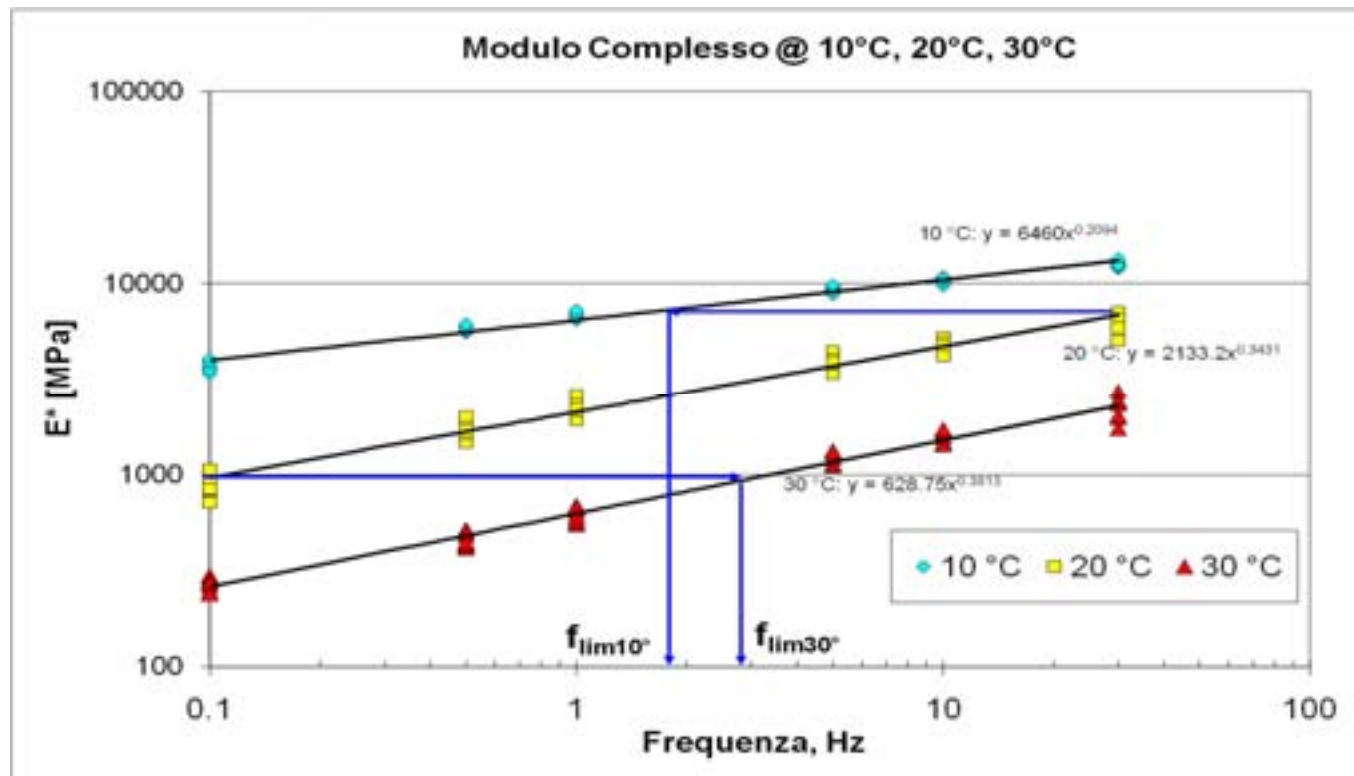
7. TEST A CONFR.

8. IN PROGRESS

MASTER CURVES: costruzione

METODO GEOMETRICO:

La curva alla temperatura di riferimento, ad esempio 20°C, viene assunta come base e mantenuta inalterata, è necessario calcolare le frequenze limite (lette sulle isoterme da traslare) oltre le quali si riportano i valori di Modulo determinati, in questo caso, alle temperature di 10 e 30°C.





1. INTRODUZIONE

La Fatica nei c.b.

La Fatica in Labo

2. APPROCCIO

TRADIZIONALE

3. APPROCCIO

ENERGETICO

Basics

Van Dijk

Carpenter

FEL e Healing

4. METODOLOGIE DI

PROVA, MATERIALI
e PROVINI

5. MASTER CURVES

TEMP. SENSITIVITY

6. RESIST. A FATICA

Ext. della rottura

RDEC

7. TEST A CONFR.

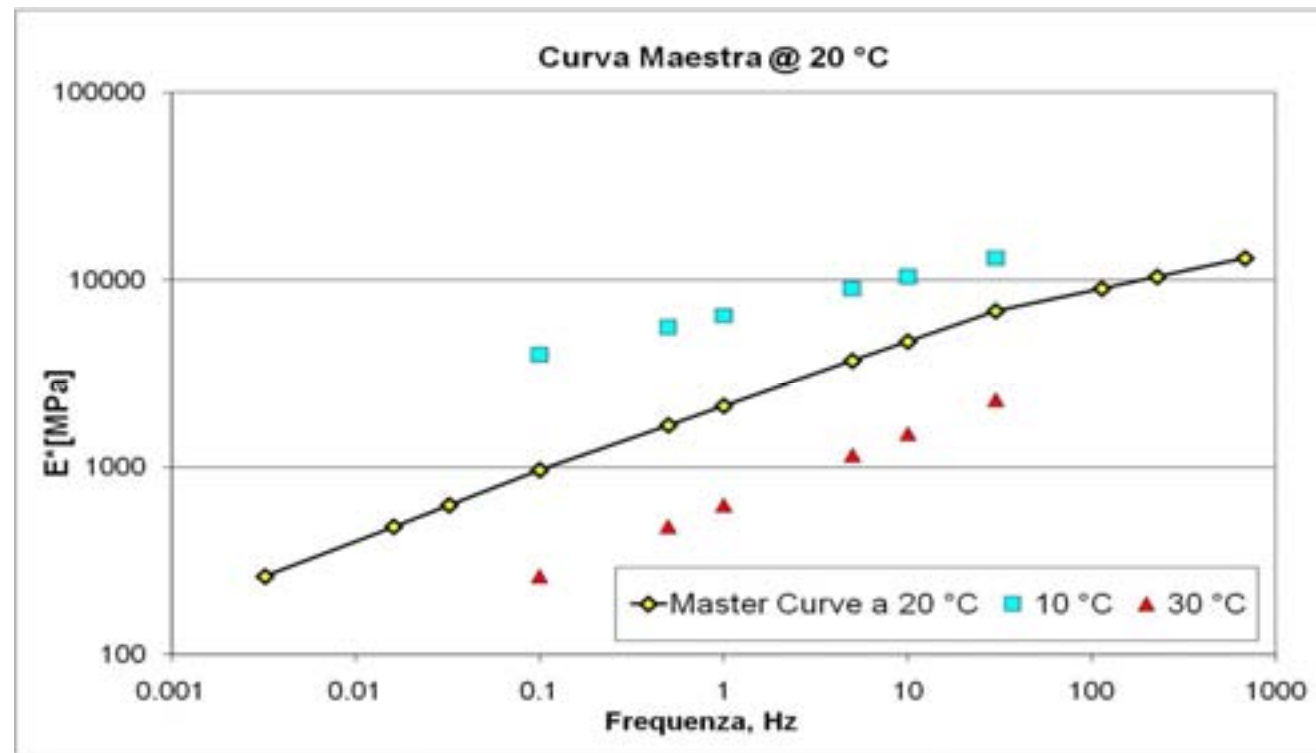
8. IN PROGRESS

MASTER CURVES: costruzione

METODO GEOMETRICO:

Essendo f le frequenze lette sull'isoterma di riferimento, cioè le frequenze reali alle quali sono state eseguite le prove, α_T gli "shift factor" per la traslazione ed f_r le frequenze a cui i valori di Modulo verranno traslati si ha:

$$\log f_r = \log \alpha_T + \log f \quad \alpha_T = \frac{f(E_{T_{rif}})}{f(E_{T_i})}$$





1. INTRODUZIONE

La Fatica nei c.b.

La Fatica in Labo

2. APPROCCIO

TRADIZIONALE

3. APPROCCIO

ENERGETICO

Basics

Van Dijk

Carpenter

FEL e Healing

4. METODOLOGIE DI

PROVA, MATERIALI

e PROVINI

5. MASTER CURVES

TEMP. SENSITIVITY

6. RESIST. A FATICA

Ext. della rottura

RDEC

7. TEST A CONFR.

8. IN PROGRESS

MASTER CURVES: costruzione

MODELLO SIGMOIDALE NORMATIVA AASHTO TP-62:

Il modello sigmoidale è costituito da una semplice espressione che, ad una temperatura di riferimento, descrive la dipendenza dal tempo di caricamento ridotto del modulo della miscela:

$$\log(E_{mix}) = \delta + \frac{\alpha}{1 + \exp(\beta + \gamma \log(tr))}$$

E_{mix} è il Modulo in MPa;

tr è il tempo ridotto in sec, tempo di caricamento alla temperatura di riferimento; α , δ , β , γ sono costanti e dipendono dalle caratteristiche dei materiali.

α , δ dipendono dalla curva granulometrica, dal contenuto di legante e dalla percentuale di vuoti;

β , γ dipendono dalle caratteristiche reologiche del legante;





1. INTRODUZIONE

La Fatica nei c.b.

La Fatica in Labo

2. APPROCCIO

TRADIZIONALE

3. APPROCCIO

ENERGETICO

Basics

Van Dijk

Carpenter

FEL e Healing

4. METODOLOGIE DI

PROVA, MATERIALI

e PROVINI

5. MASTER CURVES

TEMP. SENSITIVITY

6. RESIST. A FATICA

Ext. della rottura

RDEC

7. TEST A CONFR.

8. IN PROGRESS

MASTER CURVES: costruzione

MODELLO SIGMOIDALE NORMATIVA AASHTO TP-62:

Il tempo ridotto t_r è calcolato in funzione della temperatura, del tempo di caricamento e della viscosità del legante.

$$t_r = t_l \times \left(\frac{visc_{ref}}{visc} \right)^{aT}$$

t_l è il tempo di caricamento (in sec) = $1/f$,
 $visc_{ref}$ è la viscosità del legante alla temperatura di riferimento,
 $visc$ è la viscosità del legante alla temperatura di prova,
 aT è una costante.

Le viscosità ($visc_{ref}$ e $visc$) si ottengono con la:

$$\log(\log(visc \text{ cPoise})) = A + VTS \times \log(t_R)$$

Grade	A	VTS
40-50	10.5254	-3.5047
60-70	10.6508	-3.5537
85-100	11.8232	-3.6210
120-150	11.0897	-3.7252
200-300	11.8107	-4.0068

t_R è la temperatura in °K, A e VTS sono costanti del tipo di legante;

$VTS = \text{viscosity temperature susceptibility}$

I parametri del modello sono ottimizzati iterativamente minimizzando gli SQM tra i valori misurati e quelli dal modello.



1. INTRODUZIONE

La Fatica nei c.b.

La Fatica in Labo

2. APPROCCIO

TRADIZIONALE

3. APPROCCIO

ENERGETICO

Basics

Van Dijk

Carpenter

FEL e Healing

4. METODOLOGIE DI

PROVA, MATERIALI

e PROVINI

5. MASTER CURVES

TEMP. SENSITIVITY

6. RESIST. A FATICA

Ext. della rottura

RDEC

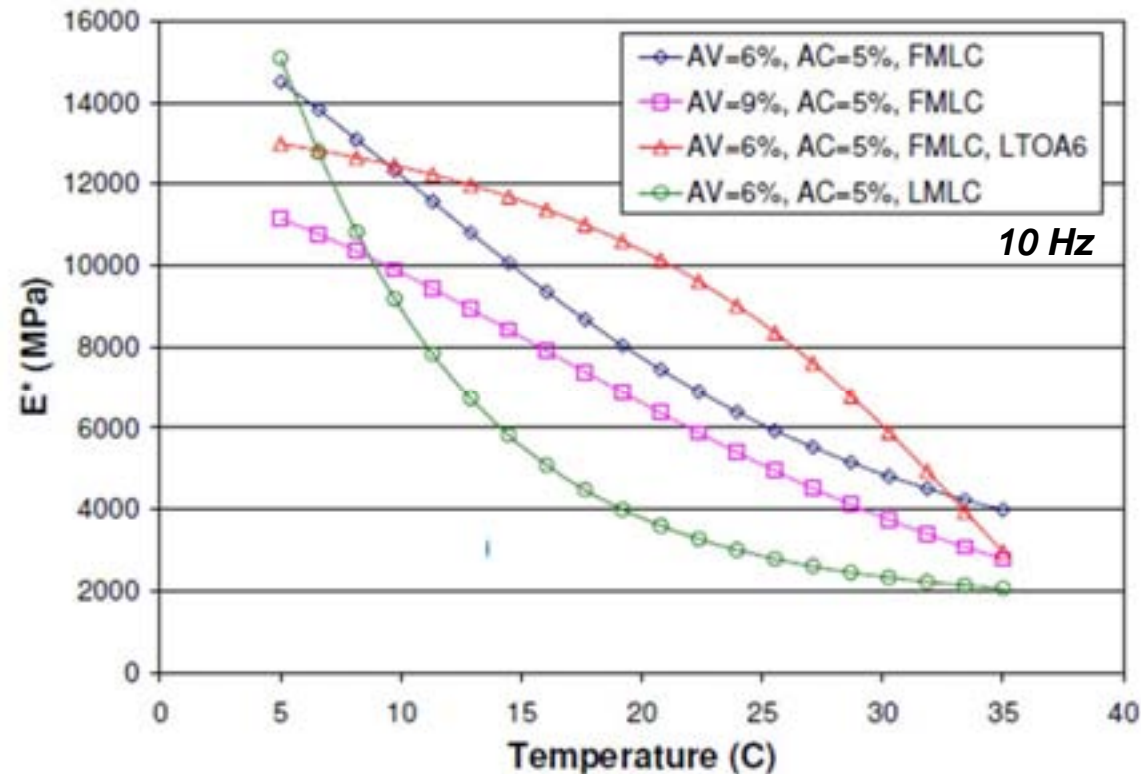
7. TEST A CONFR.

8. IN PROGRESS

TEMPERATURE SENSITIVITY:

Rappresenta la sensibilità del materiale (modulo) alla variazione di temperatura per una data frequenza di caricamento. Si può ottenere semplicemente invertendo l'espressione del modello sigmoidale. La Sensitivity è insita nella pendenza della TSC in ogni punto:

$$\text{Temp.Sens} = \frac{\delta E}{\delta T}$$





1. INTRODUZIONE

La Fatica nei c.b.

La Fatica in Labo

2. APPROCCIO

TRADIZIONALE

3. APPROCCIO

ENERGETICO

Basics

Van Dijk

Carpenter

FEL e Healing

4. METODOLOGIE DI

PROVA, MATERIALI

e PROVINI

5. MASTER CURVES

TEMP. SENSITIVITY

6. RESIST. A FATICA

Ext. della rottura

RDEC

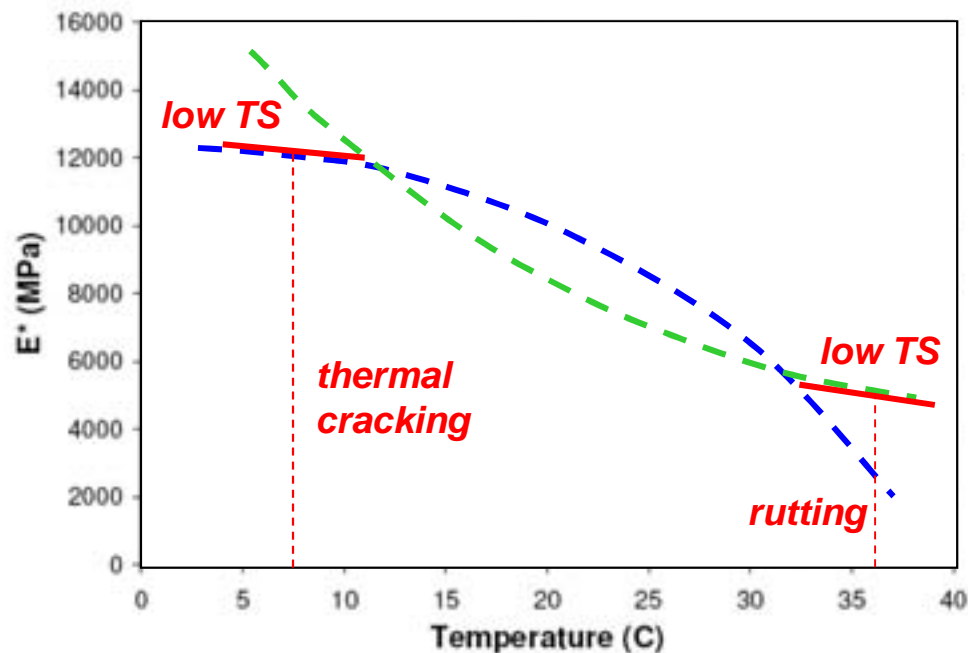
7. TEST A CONFR.

8. IN PROGRESS

TEMPERATURE SENSITIVITY:

La Temperature Sensitivity costituisce un utile parametro impiegato negli USA per una valutazione speditiva, ma approssimata del comportamento alle fessurazioni termiche ed all'ormaiamento del materiale in opera, in relazione al modulo assunto dallo stesso.

“Low temperature sensitivity results in low stiffness at low temperatures and greater stiffness at high temperatures. Low temperature sensitivity is desirable because low stiffness at low temperatures is important in limiting thermal cracking, while high stiffness at high temperatures is often important in limiting rutting”. B. Tsai, D. Jones, J. Harvey, and C. Monismith





1. INTRODUZIONE

La Fatica nei c.b.

La Fatica in Labo

2. APPROCCIO

TRADIZIONALE

3. APPROCCIO

ENERGETICO

Basics

Van Dijk

Carpenter

FEL e Healing

4. METODOLOGIE DI

PROVA, MATERIALI

e PROVINI

5. MASTER CURVES

TEMP. SENSITIVITY

6. RESIST. A FATICA

Ext. della rottura

RDEC

7. TEST A CONFR.

8. IN PROGRESS

TEST:

AASHTO T-321: Master Curve Sigmoidale

Test flessionale A DEFORMAZIONE CONTROLLATA E FREQUENZA VARIABILE

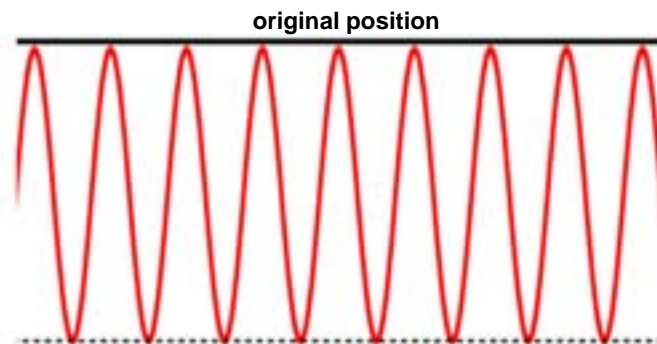
15, 10, 5, 2, 1, 0.5, 0.2, 0.1, 0.05, 0.02, 0.01 Hz

6 PR x 4 materiali



CONFIGURAZIONE TEST 4PB:

- 2 repliche dry;
- 10°C, 20°C, e 30°C;
- 100 $\mu\epsilon$ (Haversine);

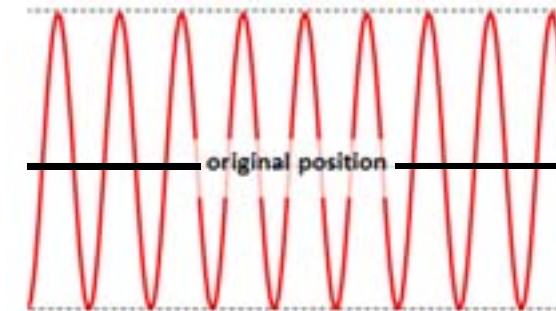


3 TR x 1 materiale



CONFIGURAZIONE TEST 2PB:

- 1 replica dry;
- 10°C, 20°C, e 30°C;
- 50 $\mu\epsilon$ (Sinusoidal);





1.INTRODUZIONE

La Fatica nei c.b.

La Fatica in Labo

2.APPROCCIO

TRADIZIONALE

3.APPROCCIO

ENERGETICO

Basics

Van Dijk

Carpenter

FEL e Healing

4.METODOLOGIE DI

PROVA, MATERIALI

e PROVINI

5.MASTER CURVES

TEMP. SENSITIVITY

6.RESIST. A FATICA

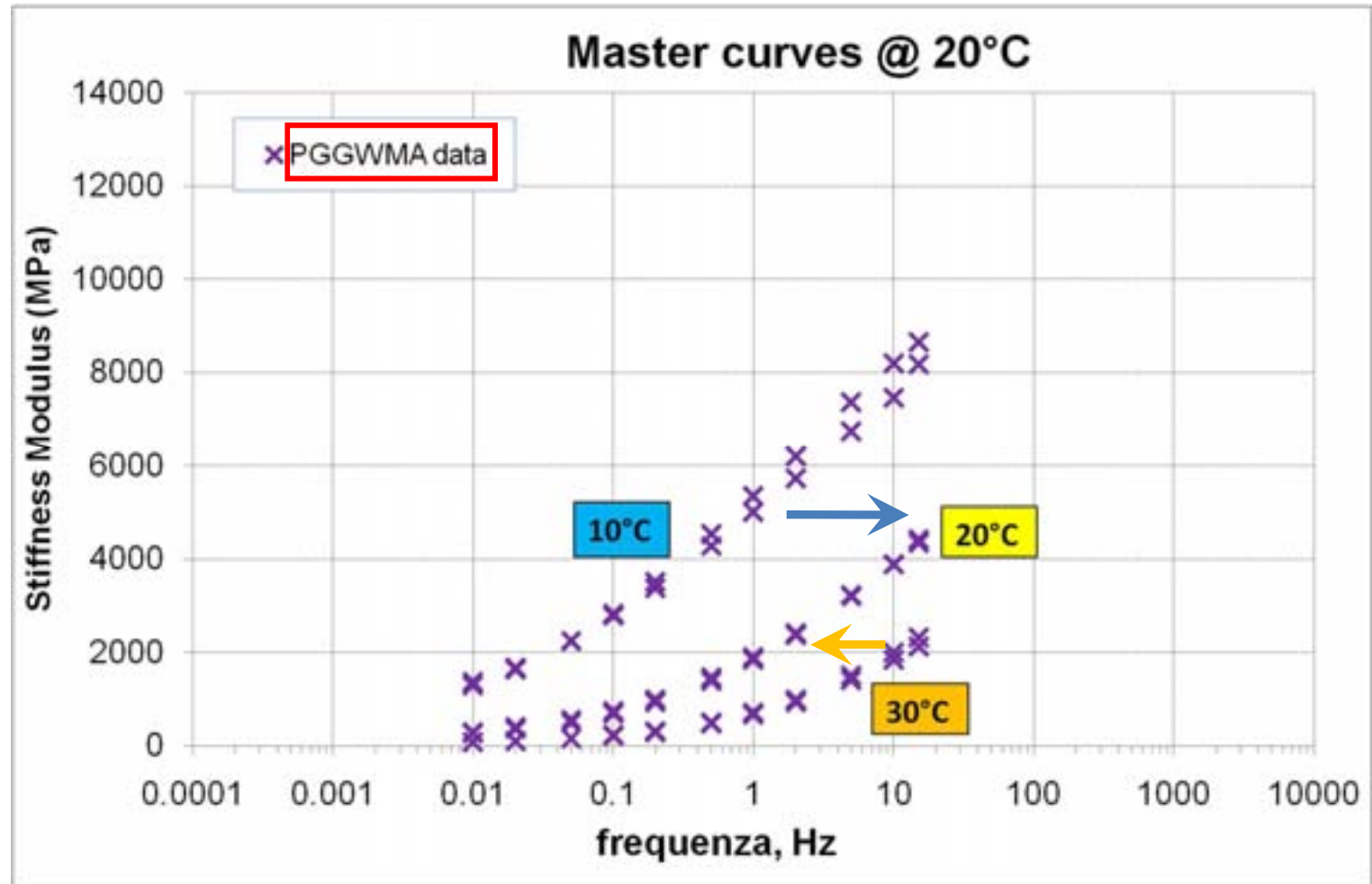
Ext. della rottura

RDEC

7.TEST A CONFR.

8.IN PROGRESS

MASTER CURVES: risultati



4PB Frequency Sweeps @ 10, 20 and 30°C



MASTER CURVES: risultati

1. INTRODUZIONE

La Fatica nei c.b.

La Fatica in Labo

2. APPROCCIO TRADIZIONALE

3. APPROCCIO ENERGETICO

Basics

Van Dijk

Carpenter

FEL e Healing

4. METODOLOGIE DI PROVA, MATERIALI e PROVINI

5. MASTER CURVES

TEMP. SENSITIVITY

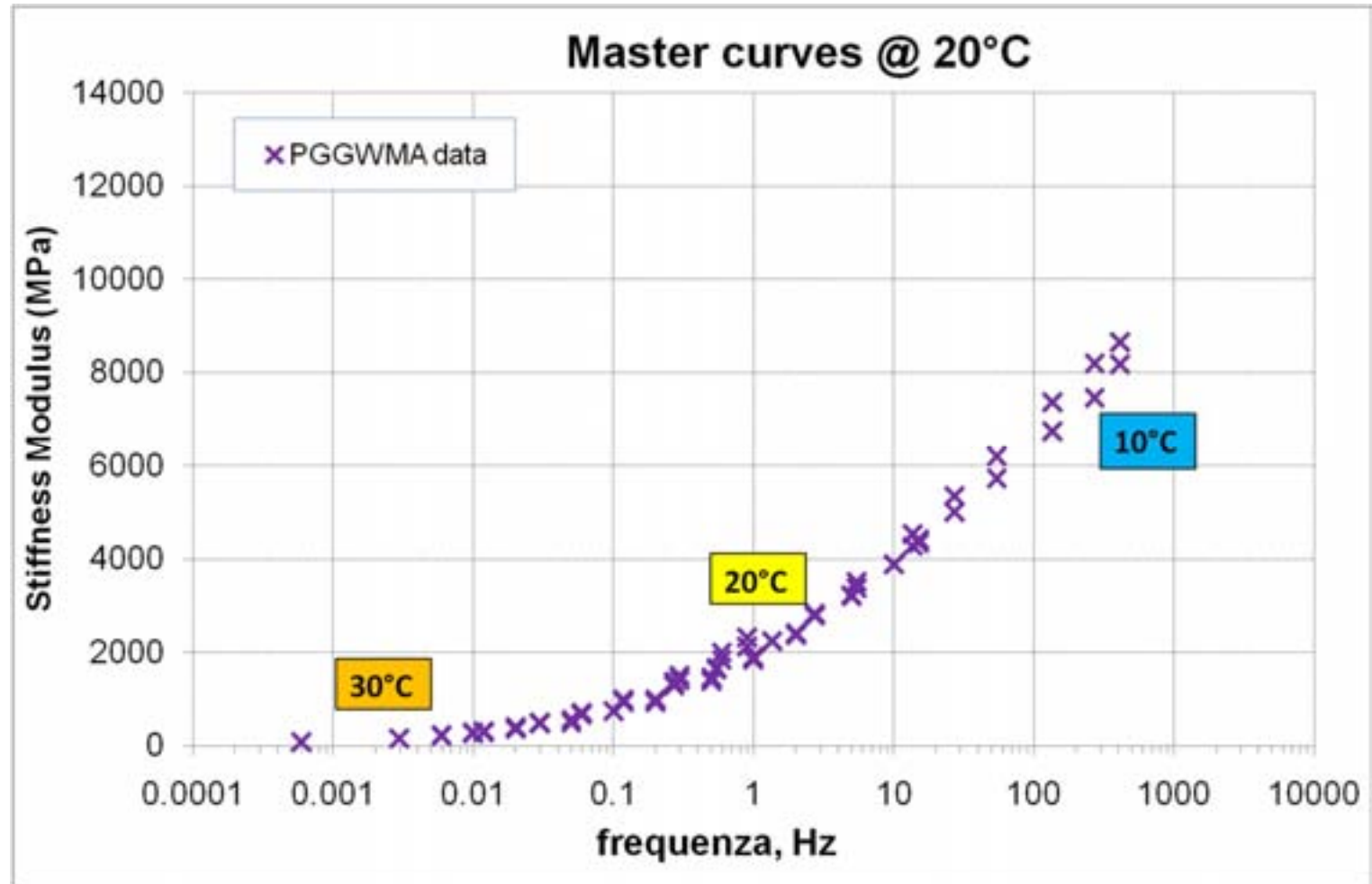
6. RESIST. A FATICA

Ext. della rottura

RDEC

7. TEST A CONFR.

8. IN PROGRESS



Master curve geometrica



MASTER CURVES: risultati

1.INTRODUZIONE

La Fatica nei c.b.

La Fatica in Labo

2.APPROCCIO

TRADIZIONALE

3.APPROCCIO

ENERGETICO

Basics

Van Dijk

Carpenter

FEL e Healing

4.METODOLOGIE DI

PROVA, MATERIALI

e PROVINI

5.MASTER CURVES

TEMP. SENSITIVITY

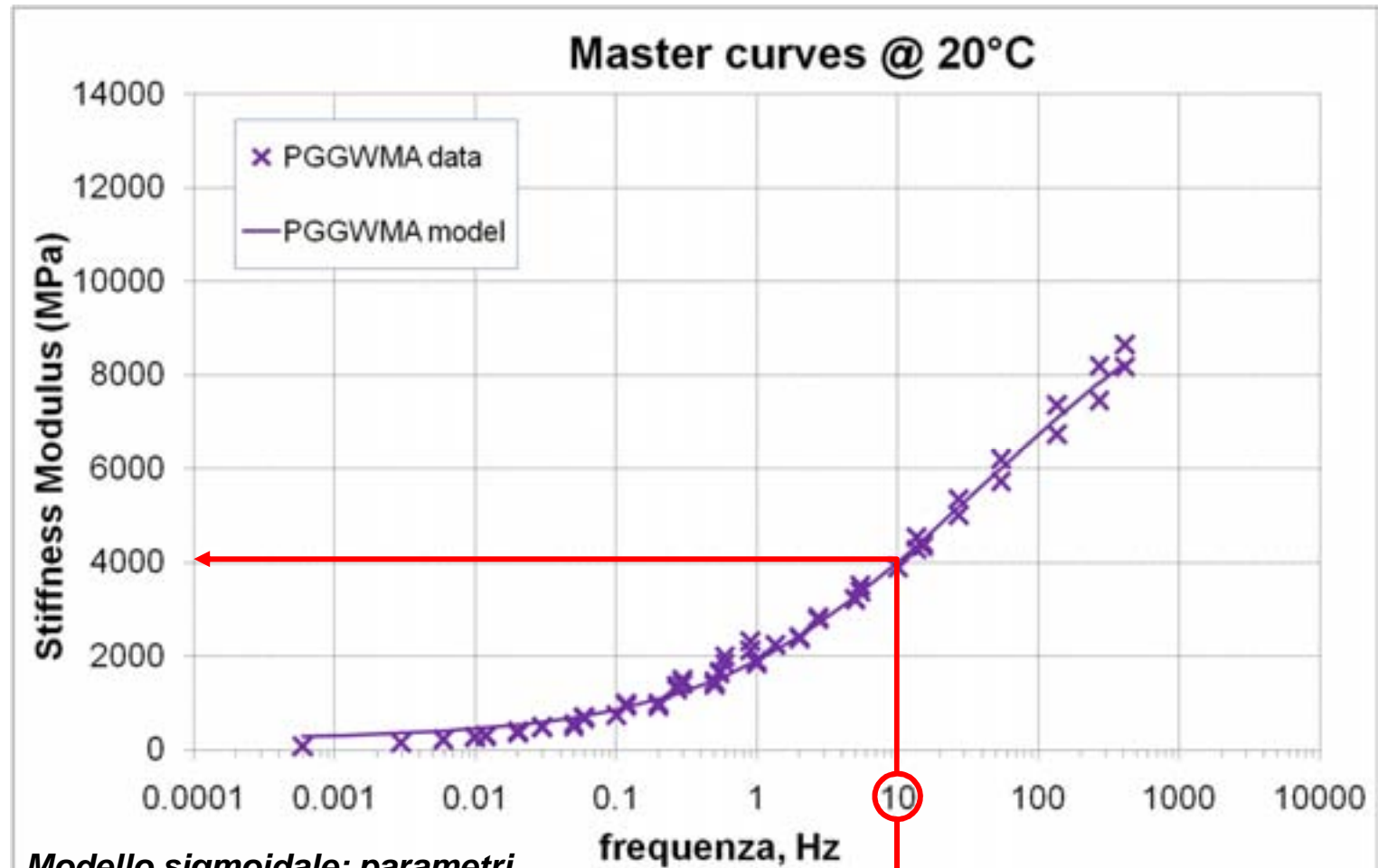
6.RESIST. A FATICA

Ext. della rottura

RDEC

7.TEST A CONFR.

8.IN PROGRESS



Modello sigmoidale: parametri

δ	β	γ	aT	A	VTS	E_{ref} MPa	t_{ref} °C	α
2.3010	0.0261	0.7422	1.0086	9.6307	-3.5047	4012	20	1.8025

200 MPa



1. INTRODUZIONE

La Fatica nei c.b.

La Fatica in Labo

2. APPROCCIO

TRADIZIONALE

3. APPROCCIO

ENERGETICO

Basics

Van Dijk

Carpenter

FEL e Healing

4. METODOLOGIE DI

PROVA, MATERIALI

e PROVINI

5. MASTER CURVES

TEMP. SENSITIVITY

6. RESIST. A FATICA

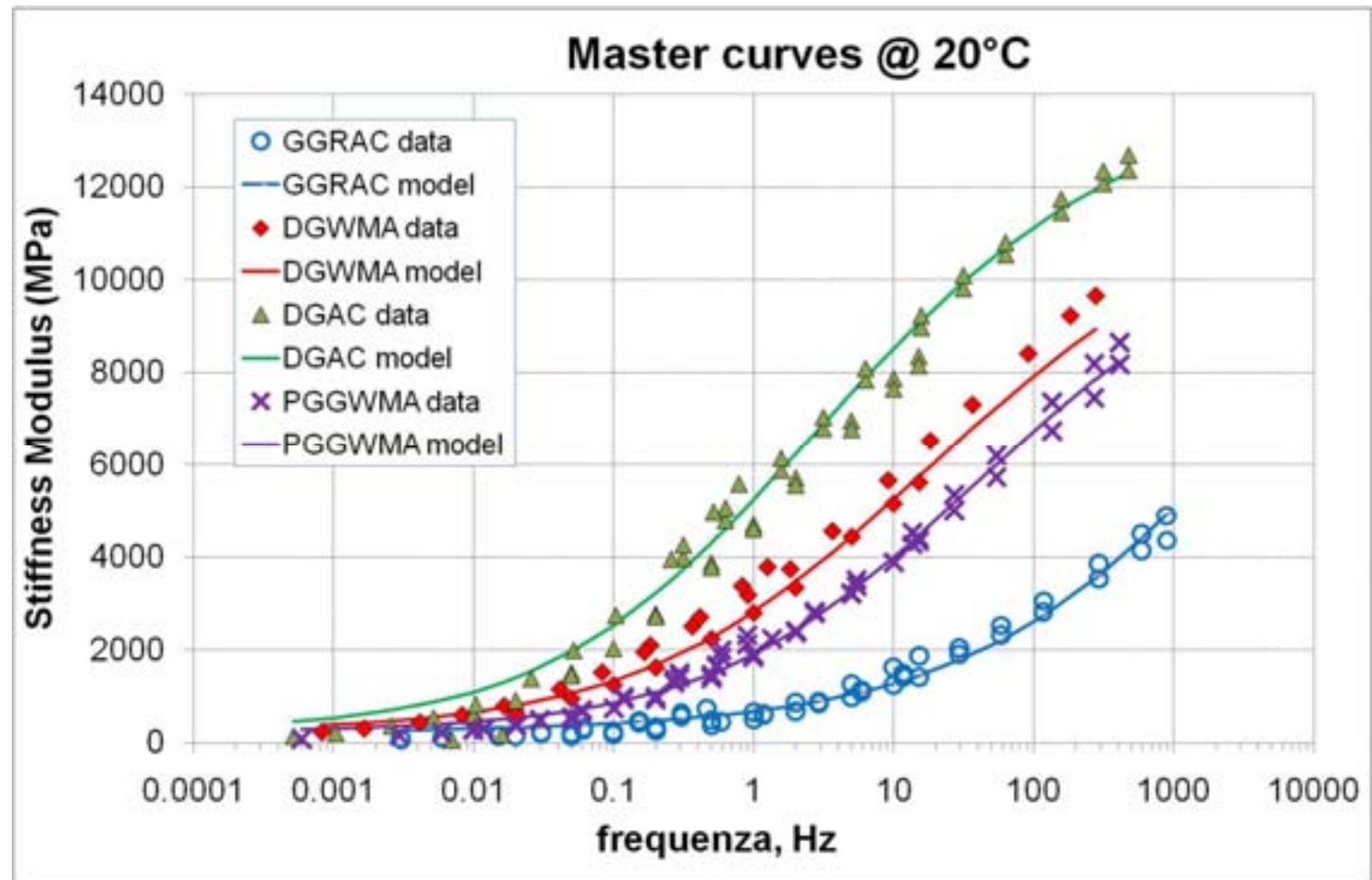
Ext. della rottura

RDEC

7. TEST A CONFR.

8. IN PROGRESS

MASTER CURVES: risultati



1- Netta distinzione nel comportamento dei materiali. In particolare, il GGRAC presenta i moduli minori ed il DGAC quelli maggiori.



1.INTRODUZIONE

La Fatica nei c.b.

La Fatica in Labo

2.APPROCCIO

TRADIZIONALE

3.APPROCCIO

ENERGETICO

Basics

Van Dijk

Carpenter

FEL e Healing

4.METODOLOGIE DI

PROVA, MATERIALI

e PROVINI

5.MASTER CURVES

TEMP. SENSITIVITY

6.RESIST. A FATICA

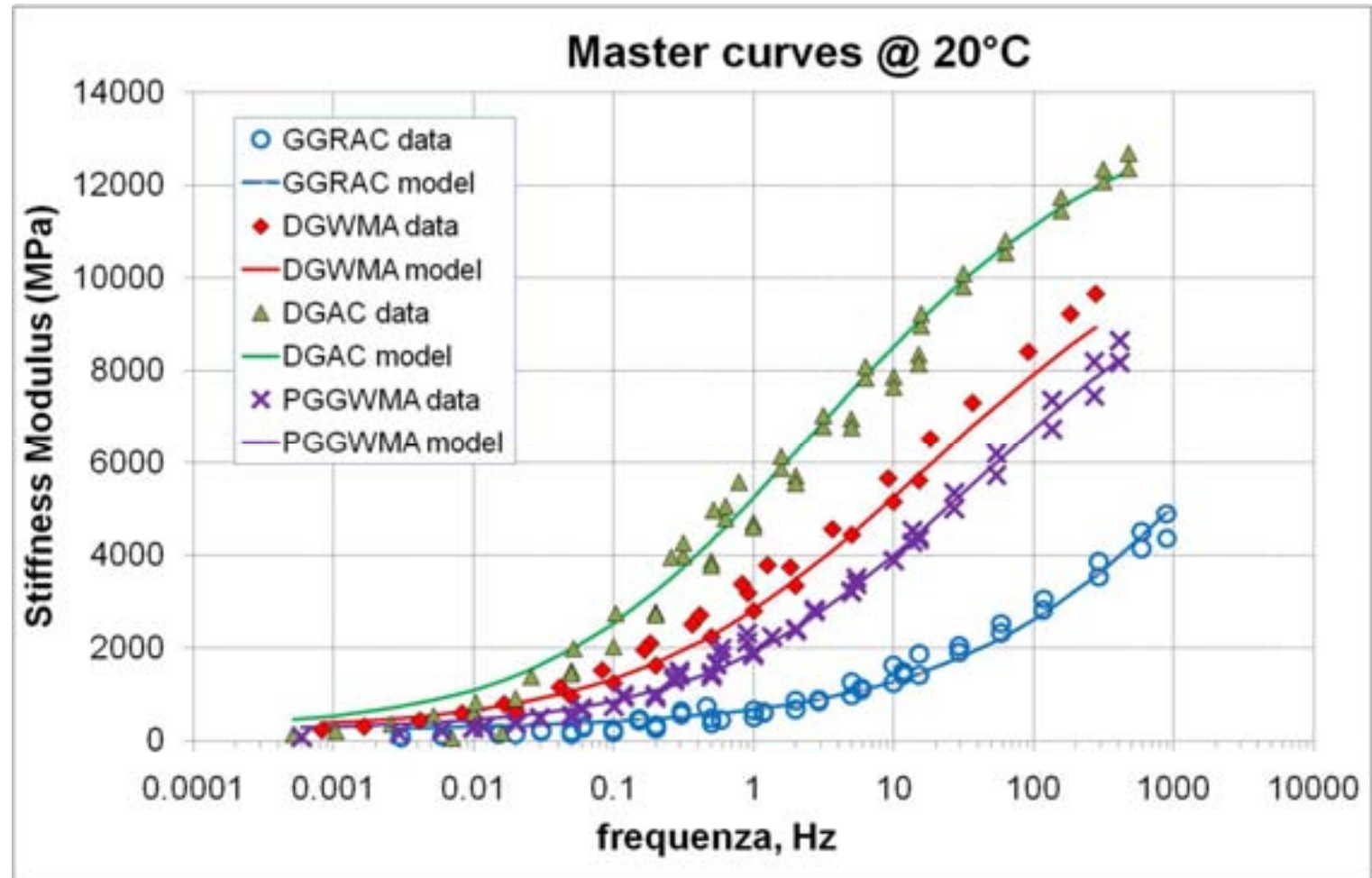
Ext. della rottura

RDEC

7.TEST A CONFR.

8.IN PROGRESS

MASTER CURVES: risultati



2- Il DGAC è anche il materiale più sensibile alle variazioni di frequenza di carico.



1. INTRODUZIONE

La Fatica nei c.b.

La Fatica in Labo

2. APPROCCIO

TRADIZIONALE

3. APPROCCIO

ENERGETICO

Basics

Van Dijk

Carpenter

FEL e Healing

4. METODOLOGIE DI

PROVA, MATERIALI

e PROVINI

5. MASTER CURVES

TEMP. SENSITIVITY

6. RESIST. A FATICA

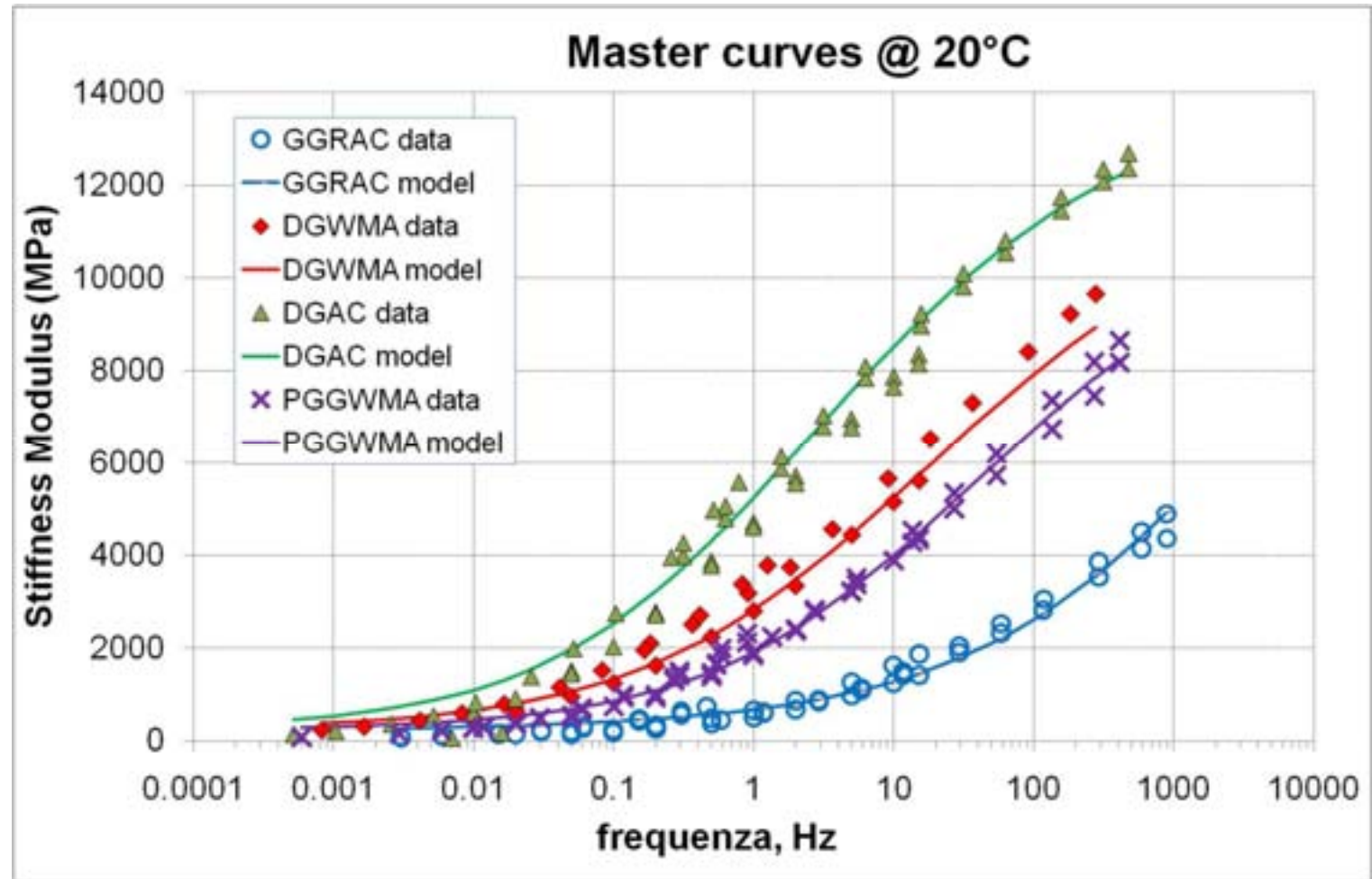
Ext. della rottura

RDEC

7. TEST A CONFR.

8. IN PROGRESS

MASTER CURVES: risultati



3- I WMAs si comportano in maniera molto simile su tutto lo sweep pur trattandosi di miscele sostanzialmente diverse. Non sono diversi da un HMA.



1. INTRODUZIONE

La Fatica nei c.b.

La Fatica in Labo

2. APPROCCIO

TRADIZIONALE

3. APPROCCIO

ENERGETICO

Basics

Van Dijk

Carpenter

FEL e Healing

4. METODOLOGIE DI

PROVA, MATERIALI

e PROVINI

5. MASTER CURVES

TEMP. SENSITIVITY

6. RESIST. A FATICA

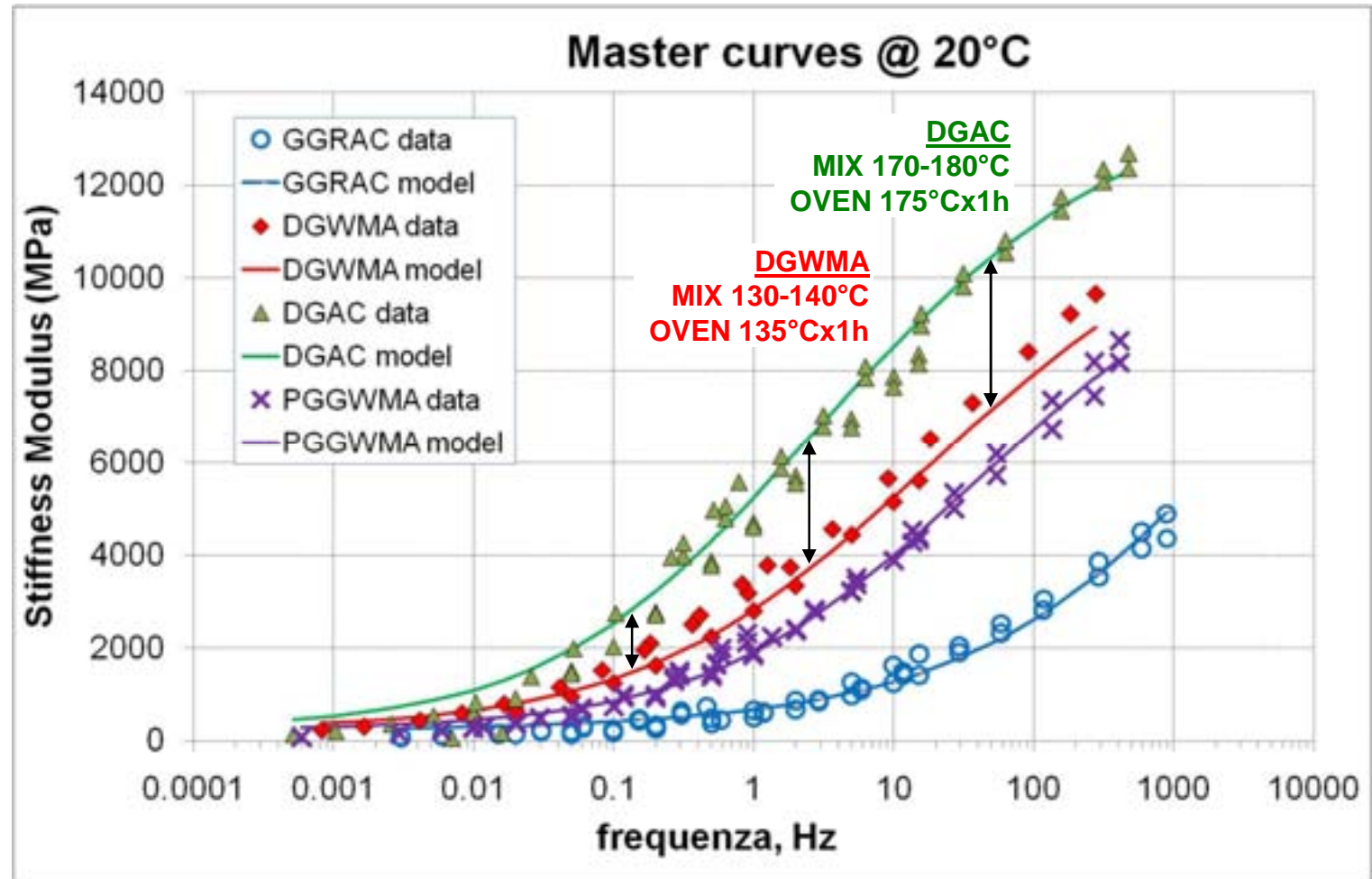
Ext. della rottura

RDEC

7. TEST A CONFR.

8. IN PROGRESS

MASTER CURVES: risultati



4- Dal confronto DGAC-DGWMA emerge che le cere agiscono sulla miscela riducendone la rigidità tra il 20 e il 30%. Ciò può essere dovuto alla viscosità del legante ed al minor invecchiamento.



1. INTRODUZIONE

La Fatica nei c.b.

La Fatica in Labo

2. APPROCCIO TRADIZIONALE

3. APPROCCIO ENERGETICO

Basics

Van Dijk

Carpenter

FEL e Healing

4. METODOLOGIE DI PROVA, MATERIALI e PROVINI

e PROVINI

5. MASTER CURVES

TEMP. SENSITIVITY

6. RESIST. A FATICA

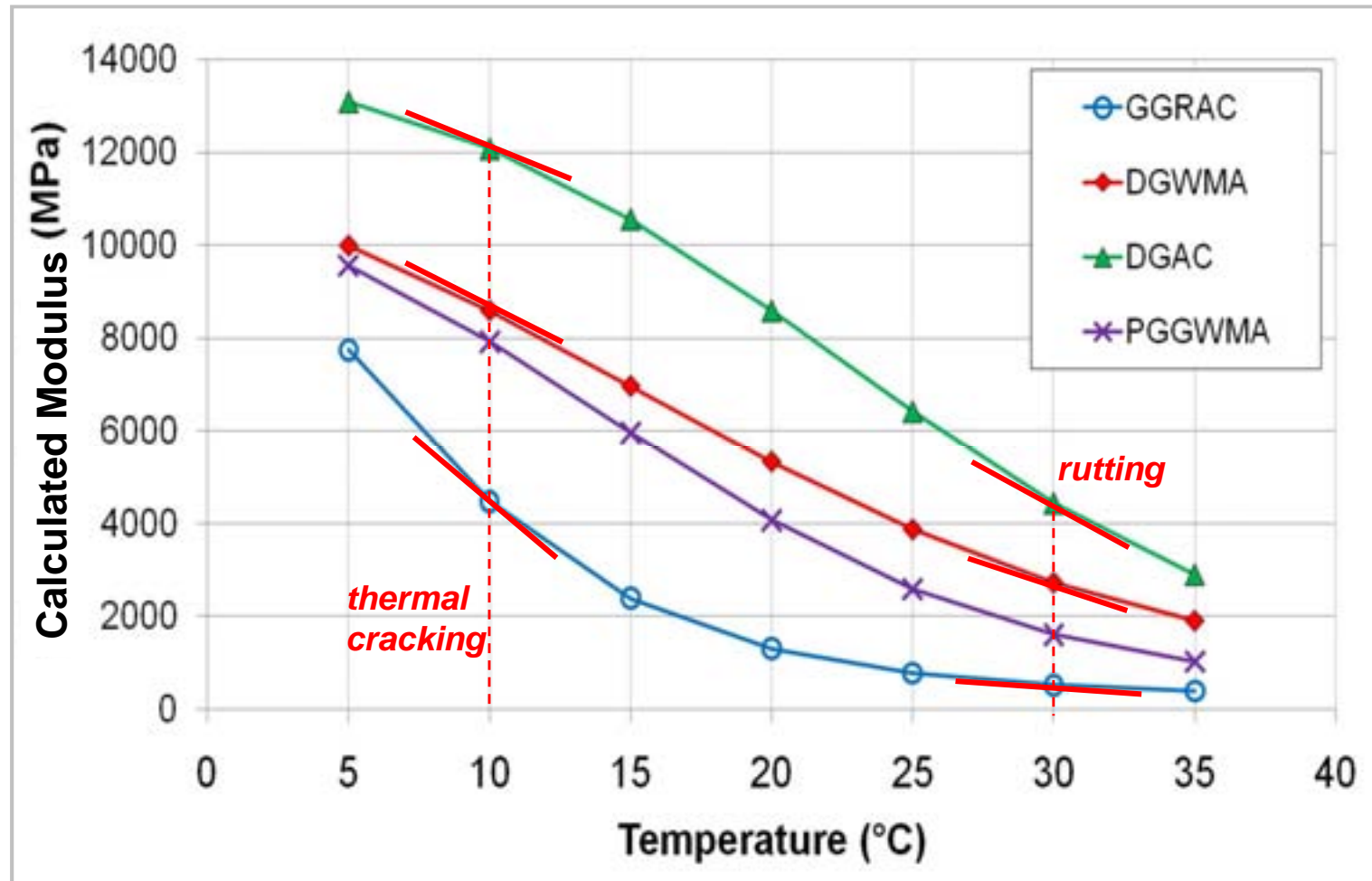
Ext. della rottura

RDEC

7. TEST A CONFR.

8. IN PROGRESS

TEMPERATURE SENSITIVITY: *result.*



1- Il DGAC è il materiale più sensibile alle variazioni di temperatura oltre i 15°C.



1. INTRODUZIONE

La Fatica nei c.b.

La Fatica in Labo

2. APPROCCIO TRADIZIONALE

3. APPROCCIO ENERGETICO

Basics

Van Dijk

Carpenter

FEL e Healing

4. METODOLOGIE DI PROVA, MATERIALI e PROVINI

e PROVINI

5. MASTER CURVES

TEMP. SENSITIVITY

6. RESIST. A FATICA

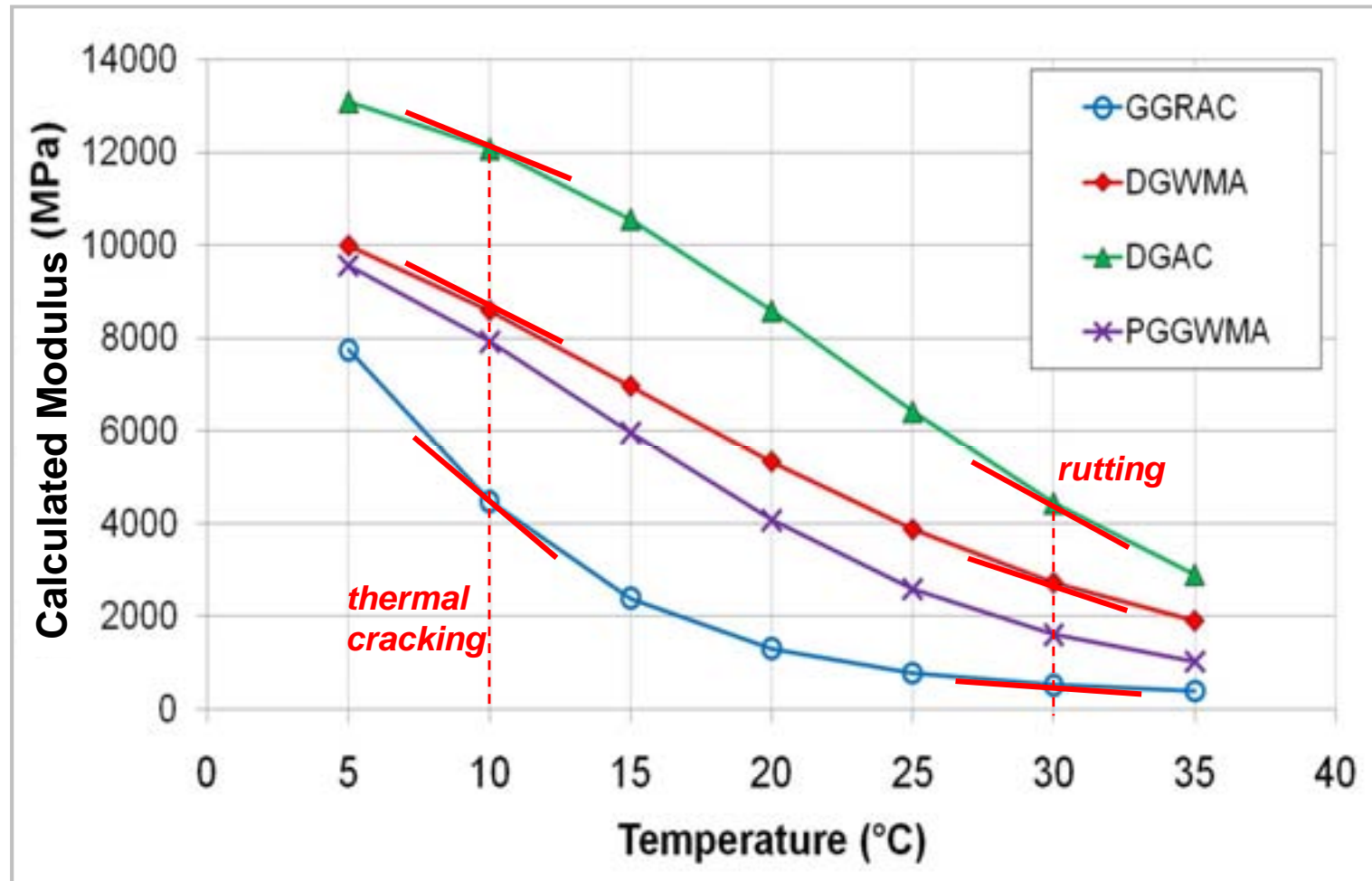
Ext. della rottura

RDEC

7. TEST A CONFR.

8. IN PROGRESS

TEMPERATURE SENSITIVITY: *result.*



2- Il DGWMA risulta meno sensibile, specialmente oltre i 25°C, anche se con moduli inferiori e quindi più a rischio di rutting. Alle basse temperature la TS non cambia molto, mentre il modulo sì.



1. INTRODUZIONE

La Fatica nei c.b.

La Fatica in Labo

2. APPROCCIO TRADIZIONALE

3. APPROCCIO ENERGETICO

Basics

Van Dijk

Carpenter

FEL e Healing

4. METODOLOGIE DI PROVA, MATERIALI e PROVINI

e PROVINI

5. MASTER CURVES

TEMP. SENSITIVITY

6. RESIST. A FATICA

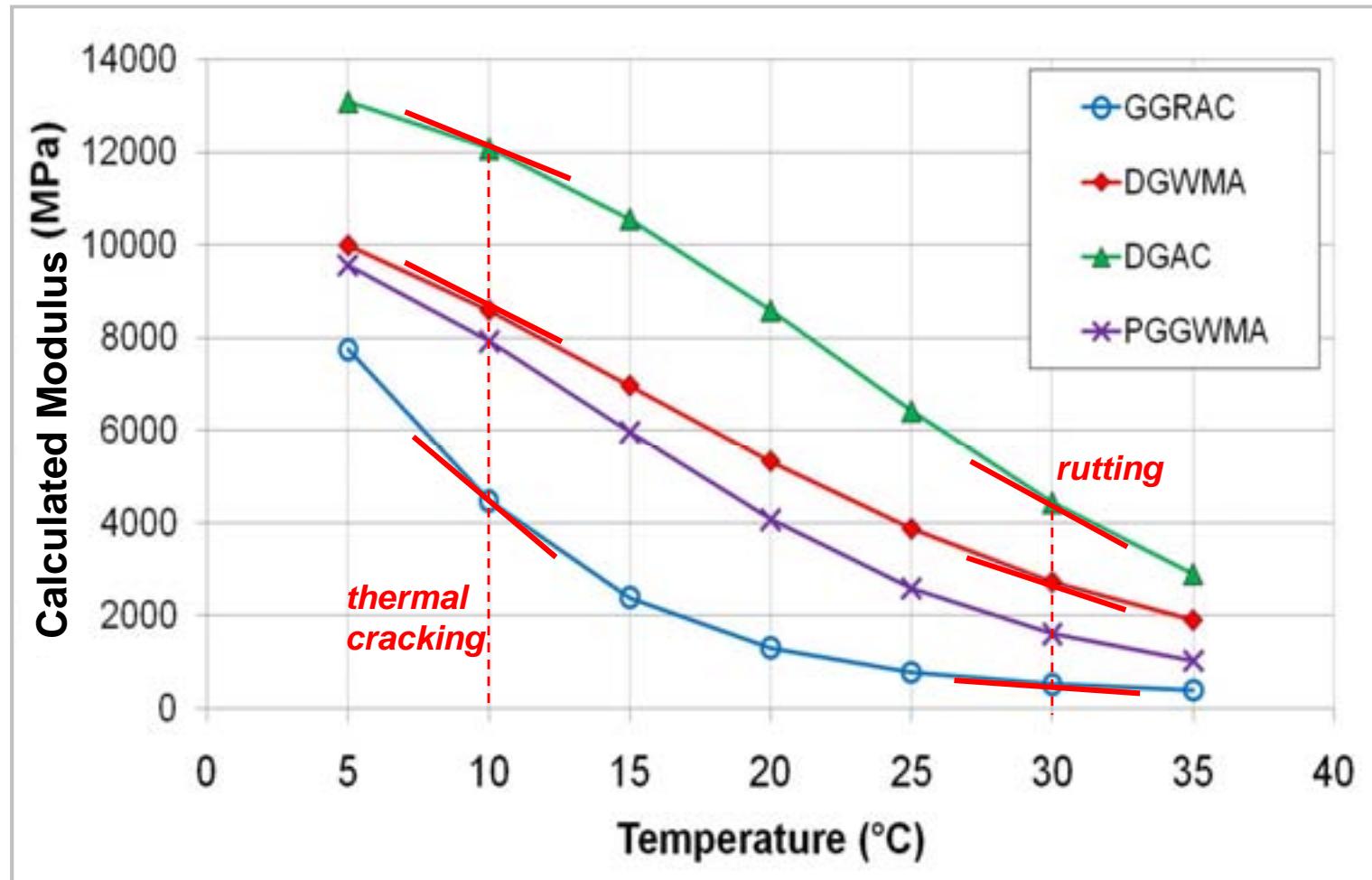
Ext. della rottura

RDEC

7. TEST A CONFR.

8. IN PROGRESS

TEMPERATURE SENSITIVITY: *result.*



3- Il GGRAC ha i moduli più bassi e si irrigidisce rapidamente sotto i 15°C, mentre oltre i 20°C ha scarsa sensibilità alle variazioni di T°C.



TEST:

AASHTO T-321, ASTM D7460: Resistenza a Fatica

Test flessionale A DEFORMAZIONE CONTROLLATA E FREQUENZA 10 Hz fino a 5 mln di cicli.

1. INTRODUZIONE

La Fatica nei c.b.

La Fatica in Labo

2. APPROCCIO

TRADIZIONALE

3. APPROCCIO

ENERGETICO

Basics

Van Dijk

Carpenter

FEL e Healing

4. METODOLOGIE DI

PROVA, MATERIALI
e PROVINI

5. MASTER CURVES

TEMP. SENSITIVITY

6. RESIST. A FATICA

Ext. della rottura

RDEC

7. TEST A CONFR.

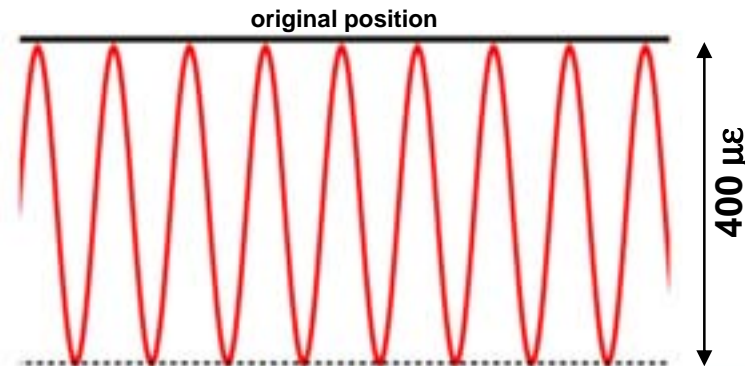
8. IN PROGRESS

18 PR x 4 materiali



CONFIGURAZIONE TEST 4PB:

- 3 repliche dry;
- **10°C, 20°C, e 30°C;**
- 200 $\mu\epsilon$ e **400 $\mu\epsilon$** (DGWMA, PGGWMA)
- **400 $\mu\epsilon$** e 700 $\mu\epsilon$ (DGAC, GGRAC)

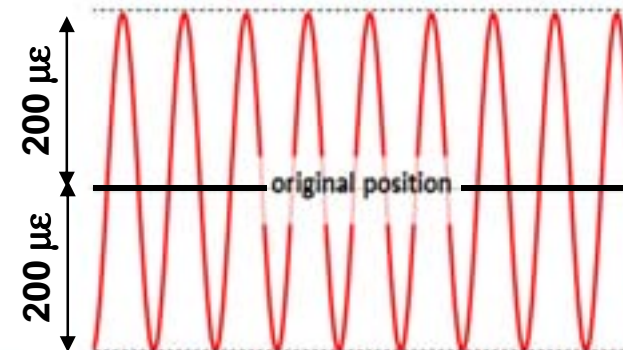


12 TR x 1 materiale



CONFIGURAZIONE TEST 2PB:

- 3 repliche dry;
- **10°C, 20°C;**
- **200 $\mu\epsilon$** e 400 $\mu\epsilon$ (PGGWMA)





RESISTENZA A FATICA: ext. rottura

CRITERIO DI ROTTURA: N_{f50} = dimezzamento modulo iniziale

Gli N_{f50} dei test che non hanno soddisfatto il criterio di rottura entro 5 mln di Cicli sono stati estrapolati secondo i modelli suggeriti nell'NCHRP Report n°646/2010: il DGAC è sempre giunto a rottura.

1.INTRODUZIONE

La Fatica nei c.b.

La Fatica in Labo

2.APPROCCIO

TRADIZIONALE

3.APPROCCIO

ENERGETICO

Basics

Van Dijk

Carpenter

FEL e Healing

4.METODOLOGIE DI

PROVA, MATERIALI
e PROVINI

5.MASTER CURVES

TEMP. SENSITIVITY

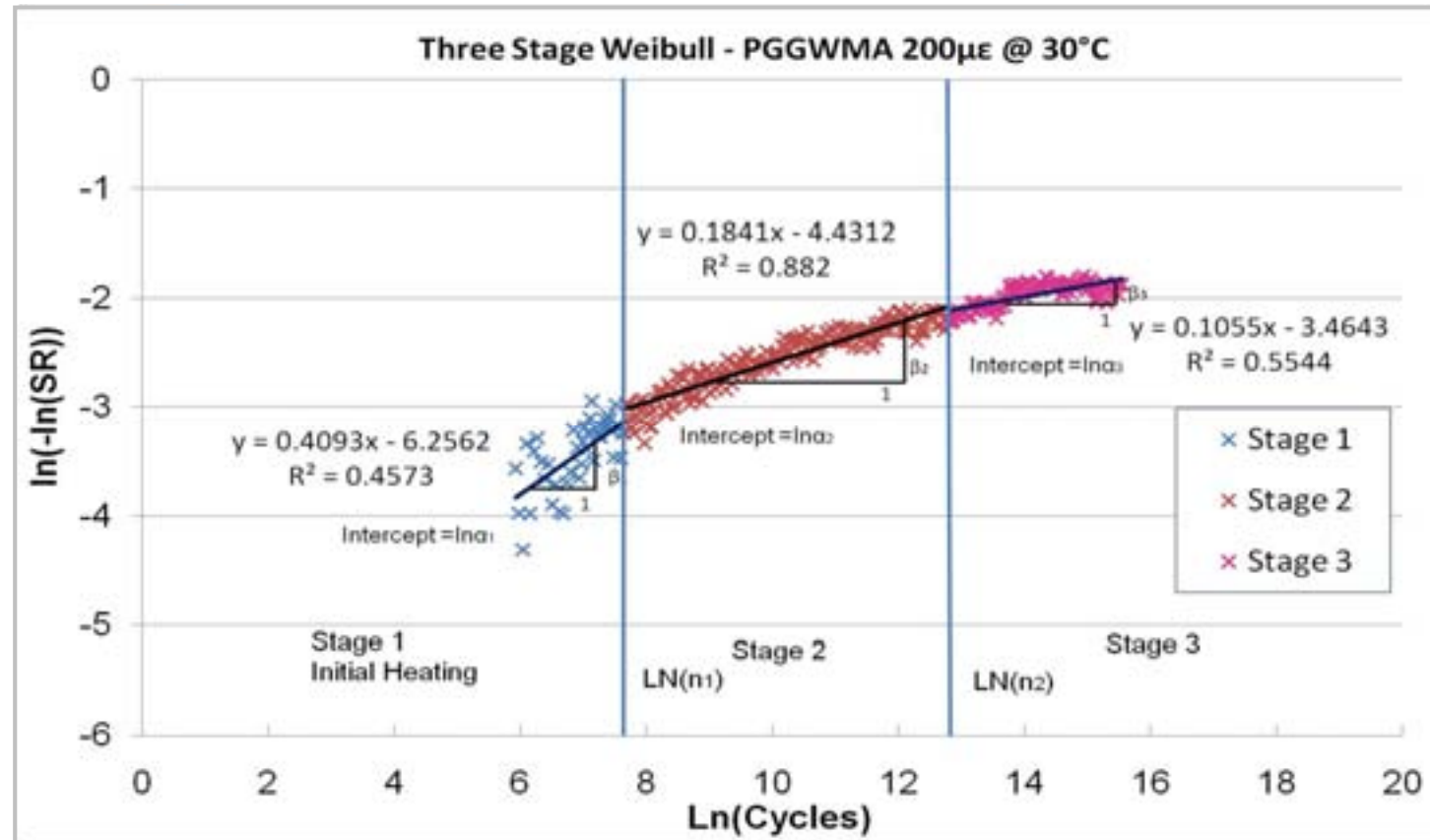
6.RESIST. A FATICA

Ext. della rottura

RDEC

7.TEST A CONFR.

8.IN PROGRESS



Modello THREE STAGE WEIBULL per DGWMA e PGGWMA



1. INTRODUZIONE

La Fatica nei c.b.

La Fatica in Labo

2. APPROCCIO

TRADIZIONALE

3. APPROCCIO

ENERGETICO

Basics

Van Dijk

Carpenter

FEL e Healing

4. METODOLOGIE DI

PROVA, MATERIALI
e PROVINI

5. MASTER CURVES

TEMP. SENSITIVITY

6. RESIST. A FATICA

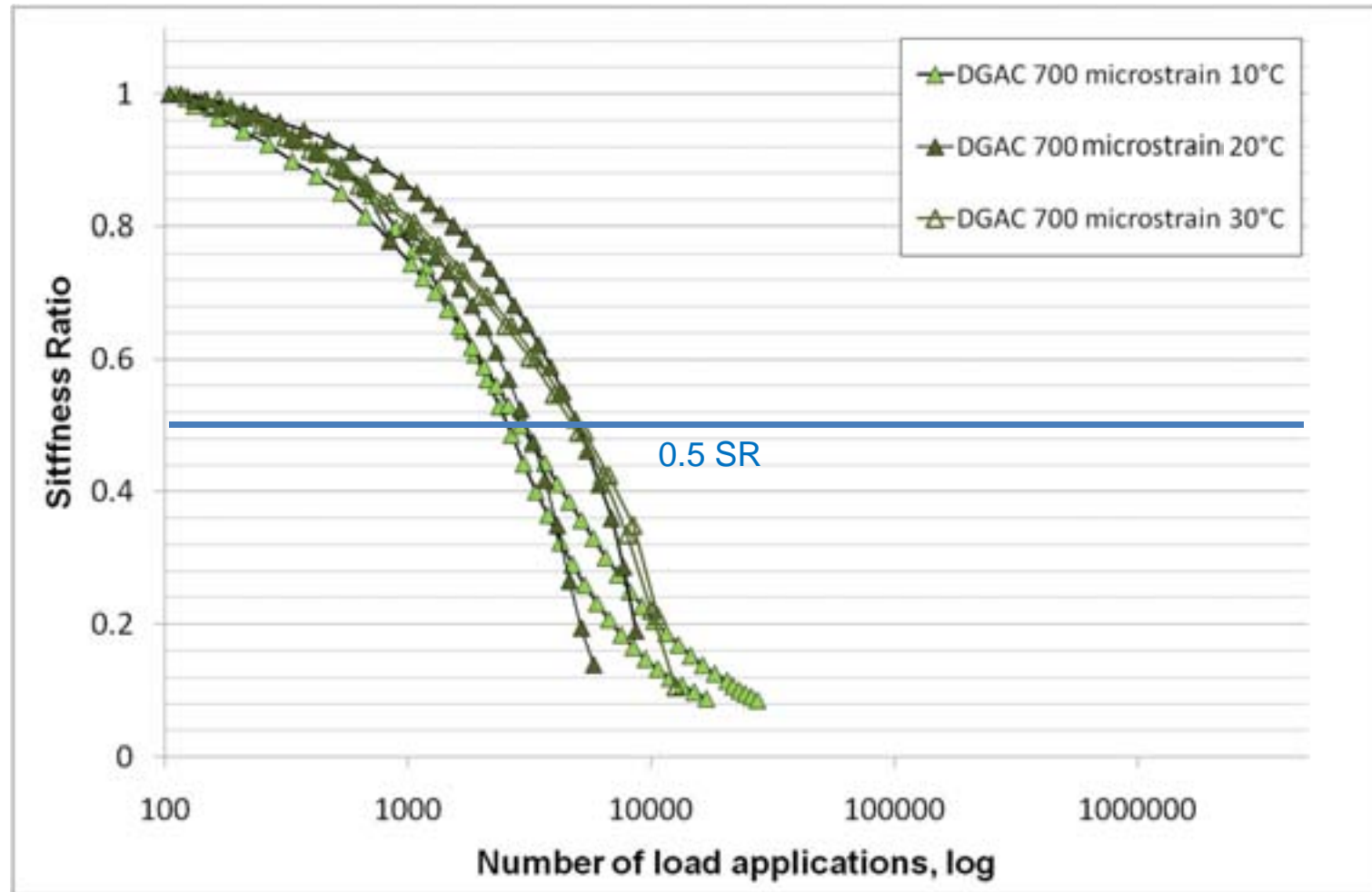
Ext. della rottura

RDEC

7. TEST A CONFR.

8. IN PROGRESS

RESISTENZA A FATICA: RDEC



1-DGAC: Curve SR-cicli a 700 $\mu\epsilon$. Tutte a rottura.



1. INTRODUZIONE

La Fatica nei c.b.

La Fatica in Labo

2. APPROCCIO TRADIZIONALE

TRADIZIONALE

3. APPROCCIO ENERGETICO

ENERGETICO

Basics

Van Dijk

Carpenter

FEL e Healing

4. METODOLOGIE DI PROVA, MATERIALI e PROVINI

METODOLOGIE DI PROVA, MATERIALI e PROVINI

e PROVINI

5. MASTER CURVES

TEMP. SENSITIVITY

6. RESIST. A FATICA

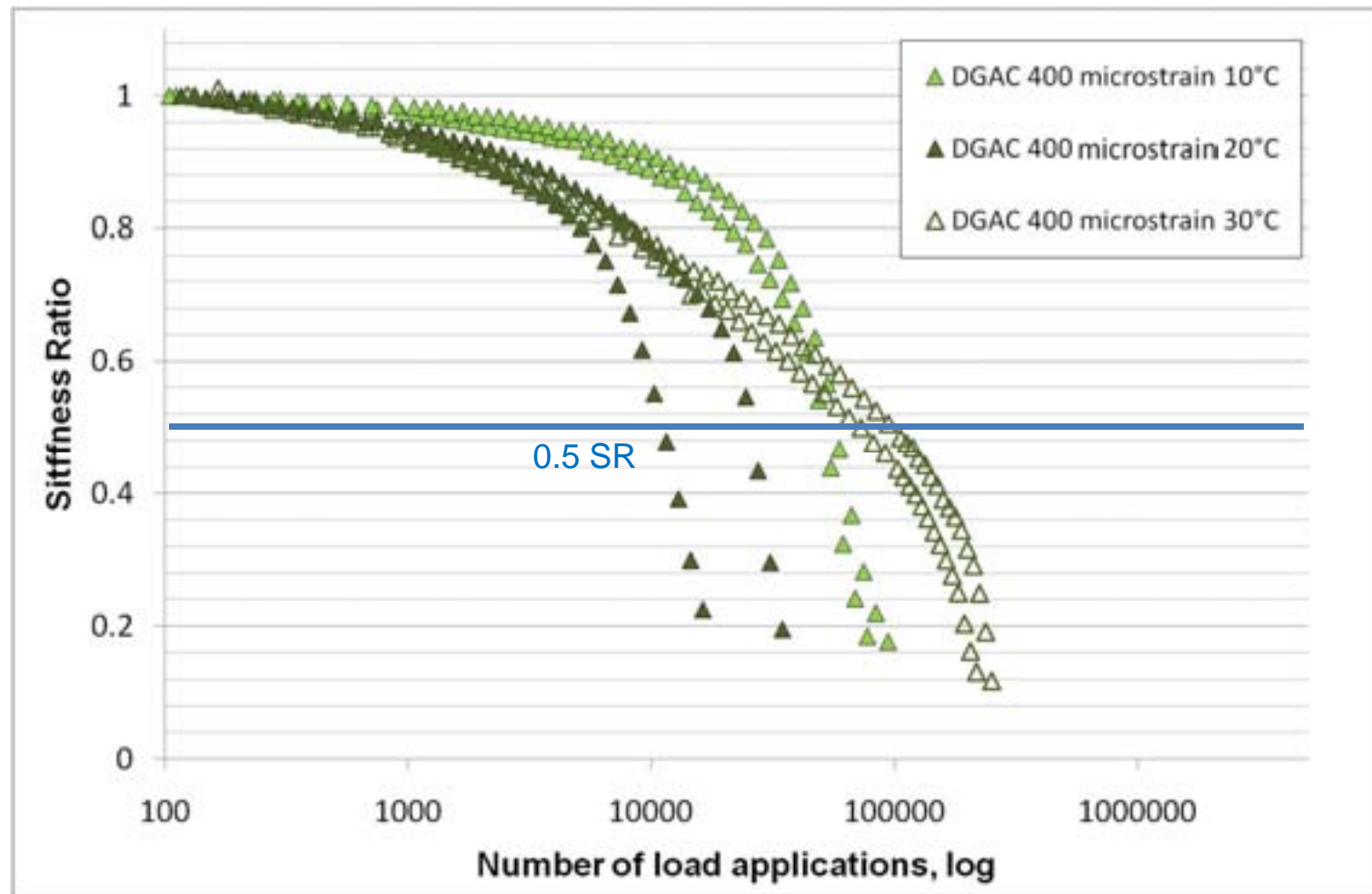
Ext. della rottura

RDEC

7. TEST A CONFR.

8. IN PROGRESS

RESISTENZA A FATICA: RDEC



2-DGAC: Curve SR-cicli a 400 $\mu\epsilon$. Tutte a rottura.



1.INTRODUZIONE

La Fatica nei c.b.

La Fatica in Labo

2.APPROCCIO

TRADIZIONALE

3.APPROCCIO

ENERGETICO

Basics

Van Dijk

Carpenter

FEL e Healing

4.METODOLOGIE DI

PROVA, MATERIALI
e PROVINI

5.MASTER CURVES

TEMP. SENSITIVITY

6.RESIST. A FATICA

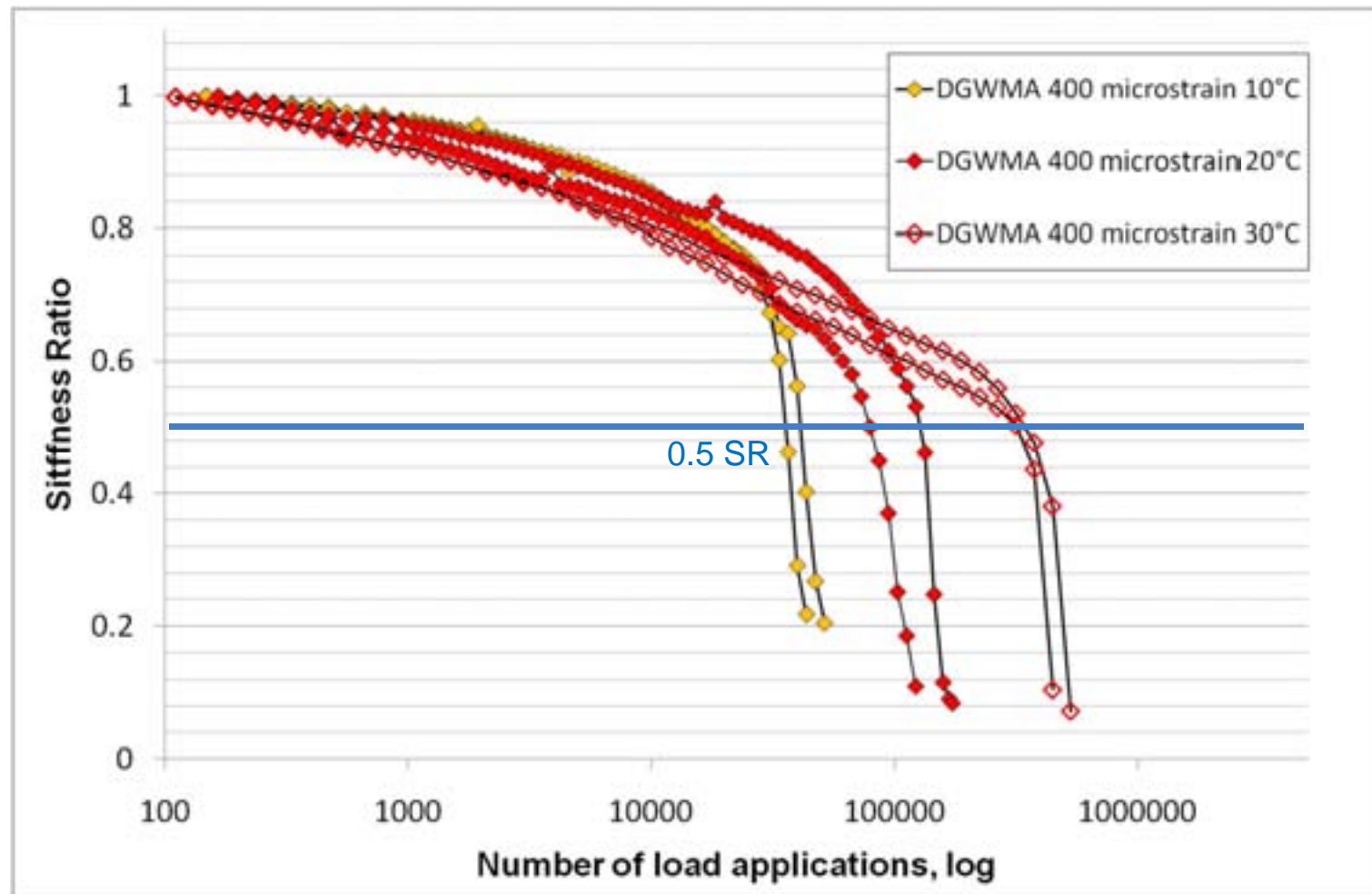
Ext. della rottura

RDEC

7.TEST A CONFR.

8.IN PROGRESS

RESISTENZA A FATICA: RDEC



3-DGWMA: Curve SR-cicli a 400 $\mu\epsilon$.



1.INTRODUZIONE

La Fatica nei c.b.

La Fatica in Labo

2.APPROCCIO

TRADIZIONALE

3.APPROCCIO

ENERGETICO

Basics

Van Dijk

Carpenter

FEL e Healing

4.METODOLOGIE DI

PROVA, MATERIALI

e PROVINI

5.MASTER CURVES

TEMP. SENSITIVITY

6.RESIST. A FATICA

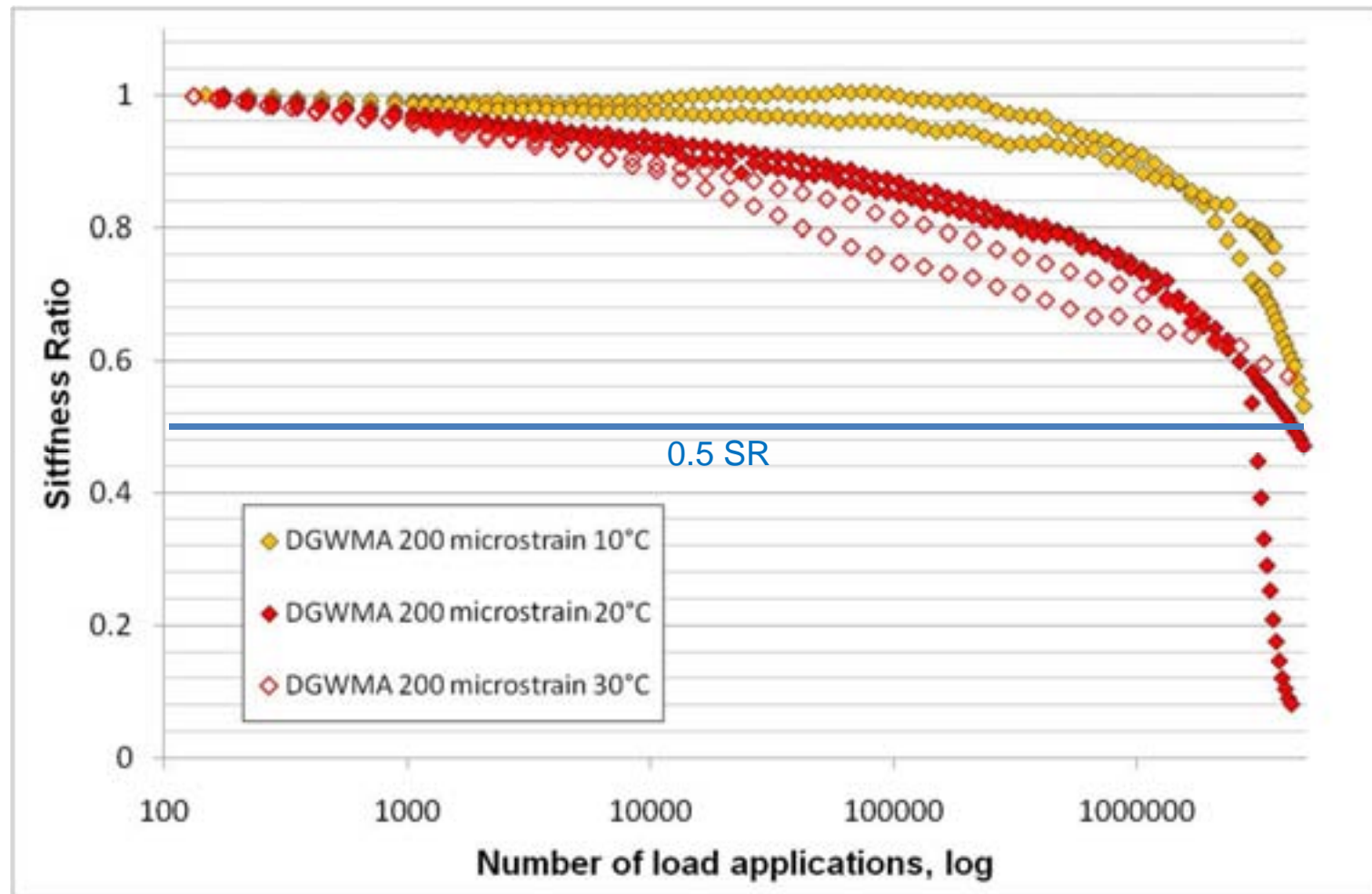
Ext. della rottura

RDEC

7.TEST A CONFR.

8.IN PROGRESS

RESISTENZA A FATICA: RDEC



4-DGWMA: Curve SR-cicli a 200 $\mu\epsilon$.



RESISTENZA A FATICA: RDEC

1.INTRODUZIONE

La Fatica nei c.b.

La Fatica in Labo

2.APPROCCIO

TRADIZIONALE

3.APPROCCIO

ENERGETICO

Basics

Van Dijk

Carpenter

FEL e Healing

4.METODOLOGIE DI

PROVA, MATERIALI

e PROVINI

5.MASTER CURVES

TEMP. SENSITIVITY

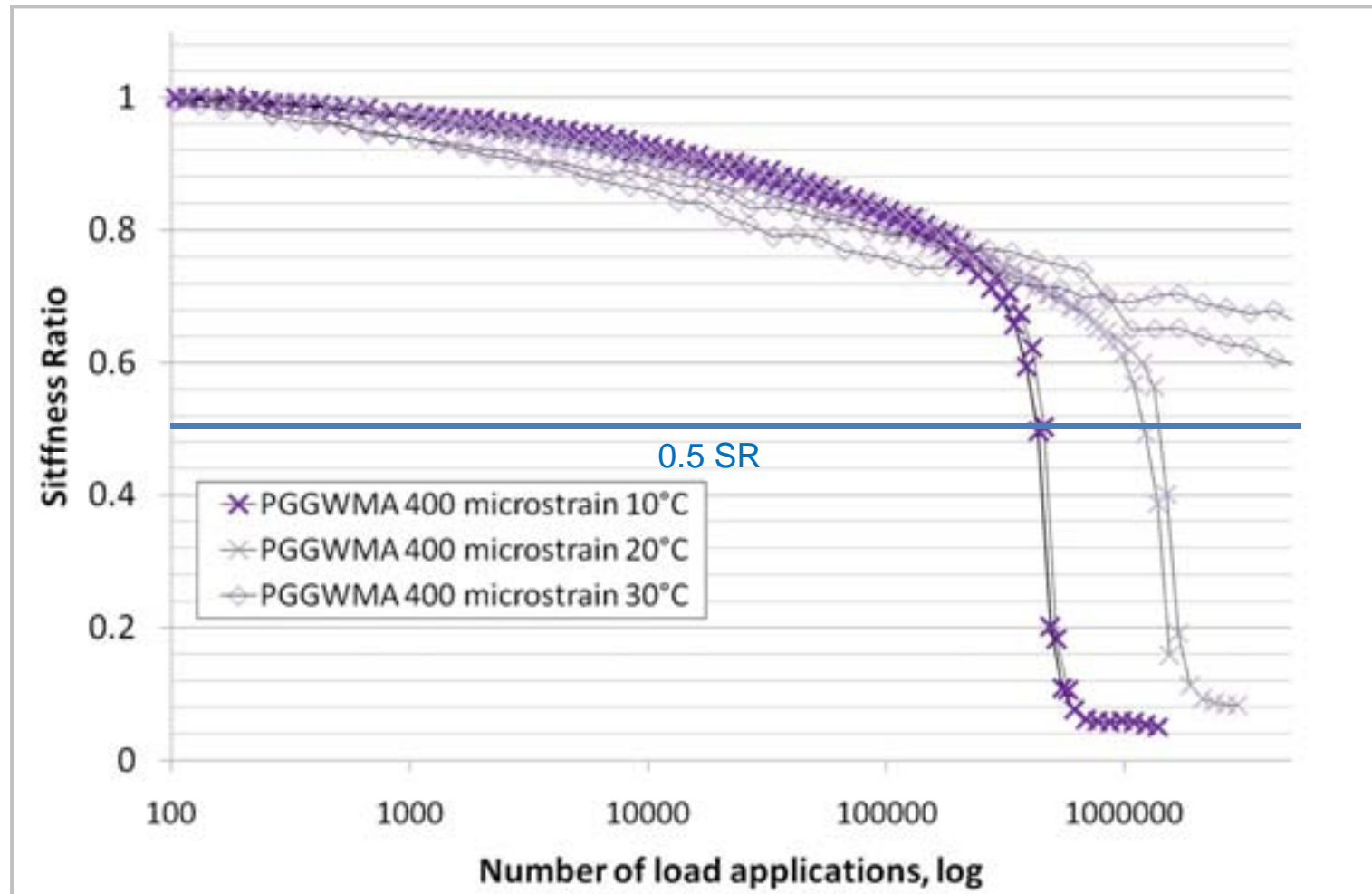
6.RESIST. A FATICA

Ext. della rottura

RDEC

7.TEST A CONFR.

8.IN PROGRESS



5-PGGWMA: Curve SR-cicli a 400 $\mu\epsilon$.



1. INTRODUZIONE

La Fatica nei c.b.

La Fatica in Labo

2. APPROCCIO

TRADIZIONALE

3. APPROCCIO

ENERGETICO

Basics

Van Dijk

Carpenter

FEL e Healing

4. METODOLOGIE DI

PROVA, MATERIALI

e PROVINI

5. MASTER CURVES

TEMP. SENSITIVITY

6. RESIST. A FATICA

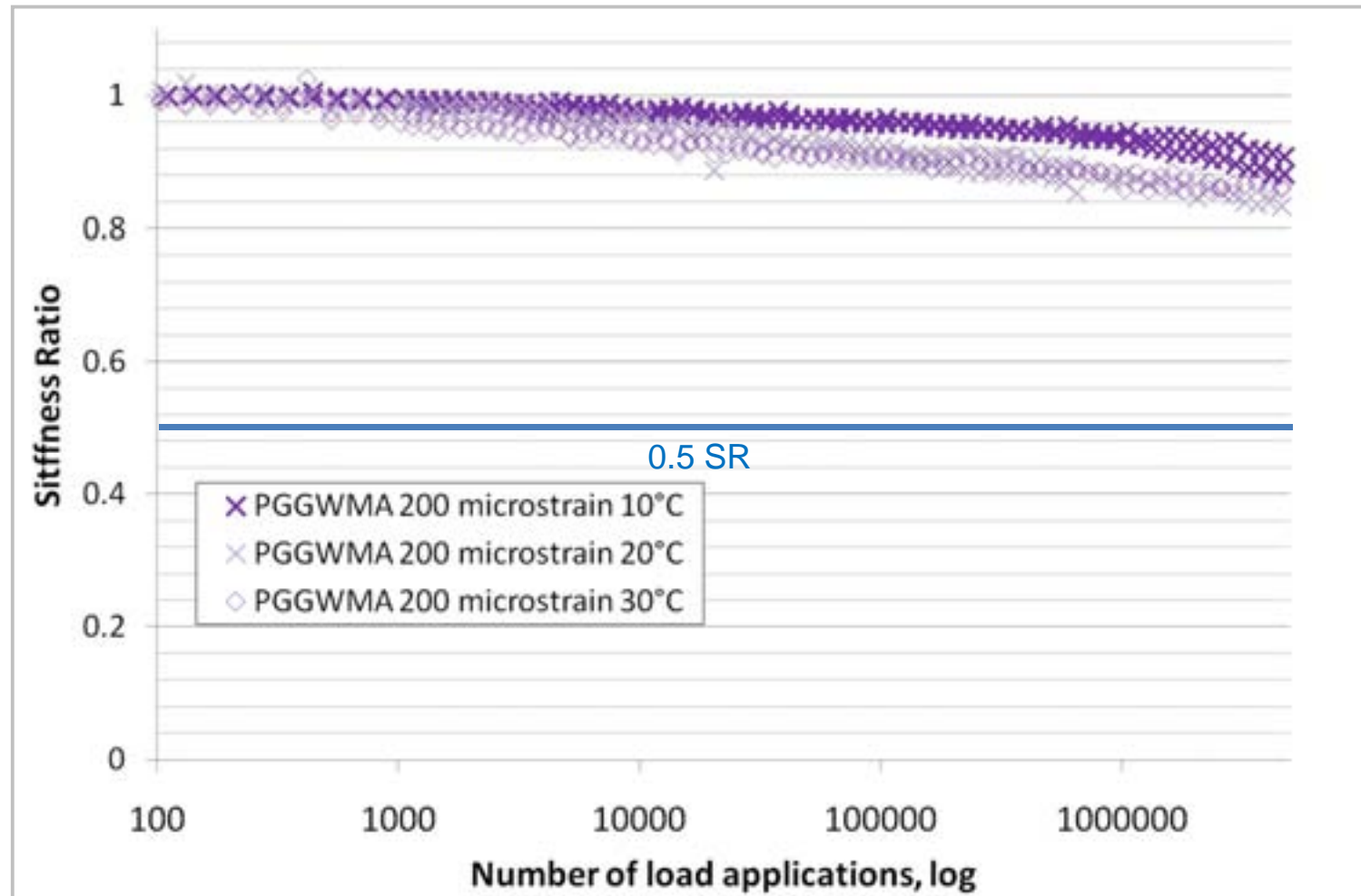
Ext. della rottura

RDEC

7. TEST A CONFR.

8. IN PROGRESS

RESISTENZA A FATICA: RDEC



6-PGGWMA: Curve SR-cicli a 200 $\mu\epsilon$. Tutte estrapolate oltre i 5 mln.



1. INTRODUZIONE

La Fatica nei c.b.

La Fatica in Labo

2. APPROCCIO

TRADIZIONALE

3. APPROCCIO

ENERGETICO

Basics

Van Dijk

Carpenter

FEL e Healing

4. METODOLOGIE DI

PROVA, MATERIALI
e PROVINI

5. MASTER CURVES

TEMP. SENSITIVITY

6. RESIST. A FATICA

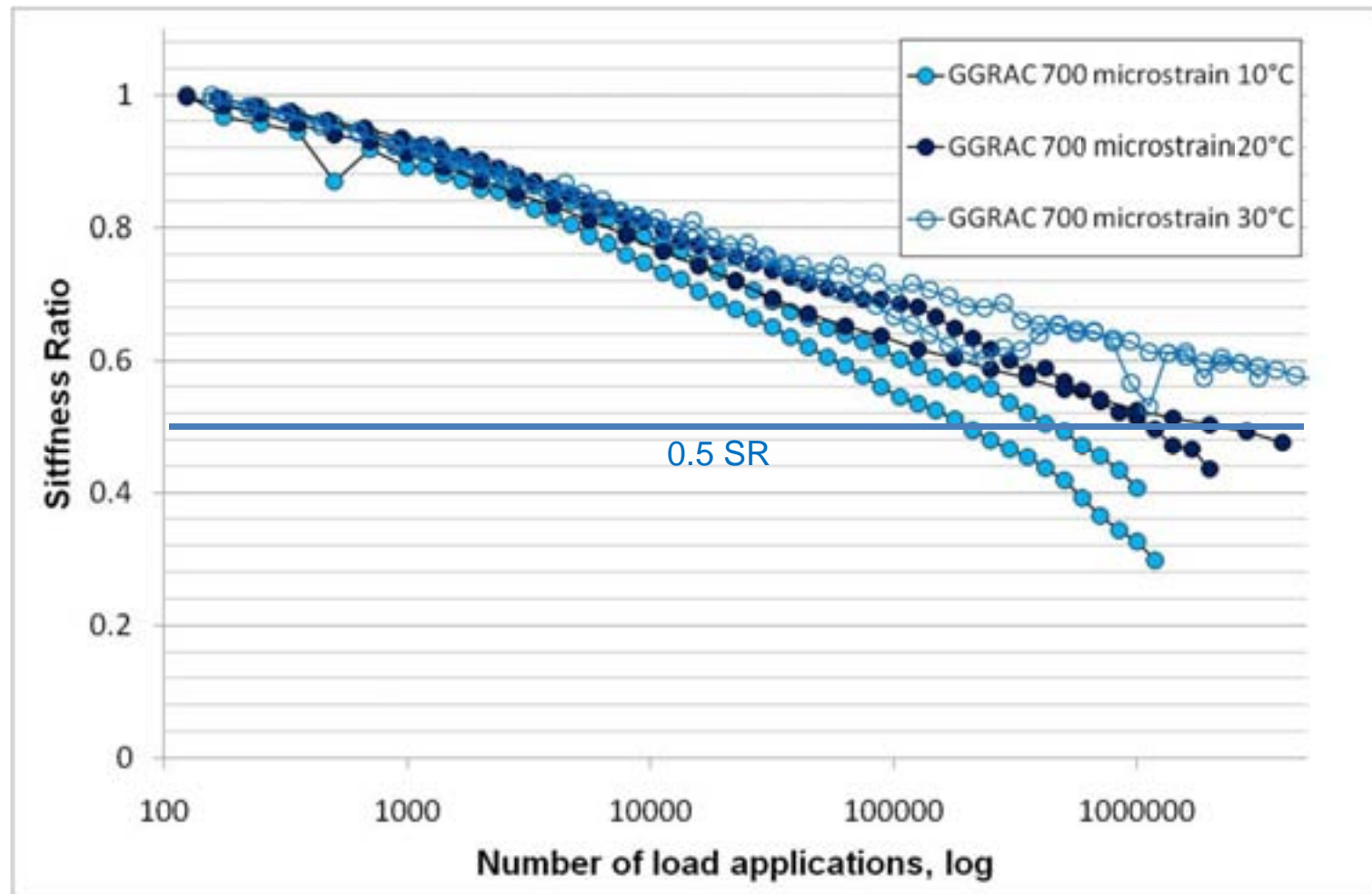
Ext. della rottura

RDEC

7. TEST A CONFR.

8. IN PROGRESS

RESISTENZA A FATICA: RDEC



7-GGRAC: Curve SR-cicli a 700 $\mu\epsilon$. A 30°C rotture estrapolate.



1. INTRODUZIONE

La Fatica nei c.b.

La Fatica in Labo

2. APPROCCIO TRADIZIONALE

TRADIZIONALE

3. APPROCCIO ENERGETICO

ENERGETICO

Basics

Van Dijk

Carpenter

FEL e Healing

4. METODOLOGIE DI PROVA, MATERIALI e PROVINI

METODOLOGIE DI PROVA, MATERIALI e PROVINI

e PROVINI

5. MASTER CURVES TEMP. SENSITIVITY

TEMP. SENSITIVITY

6. RESIST. A FATICA

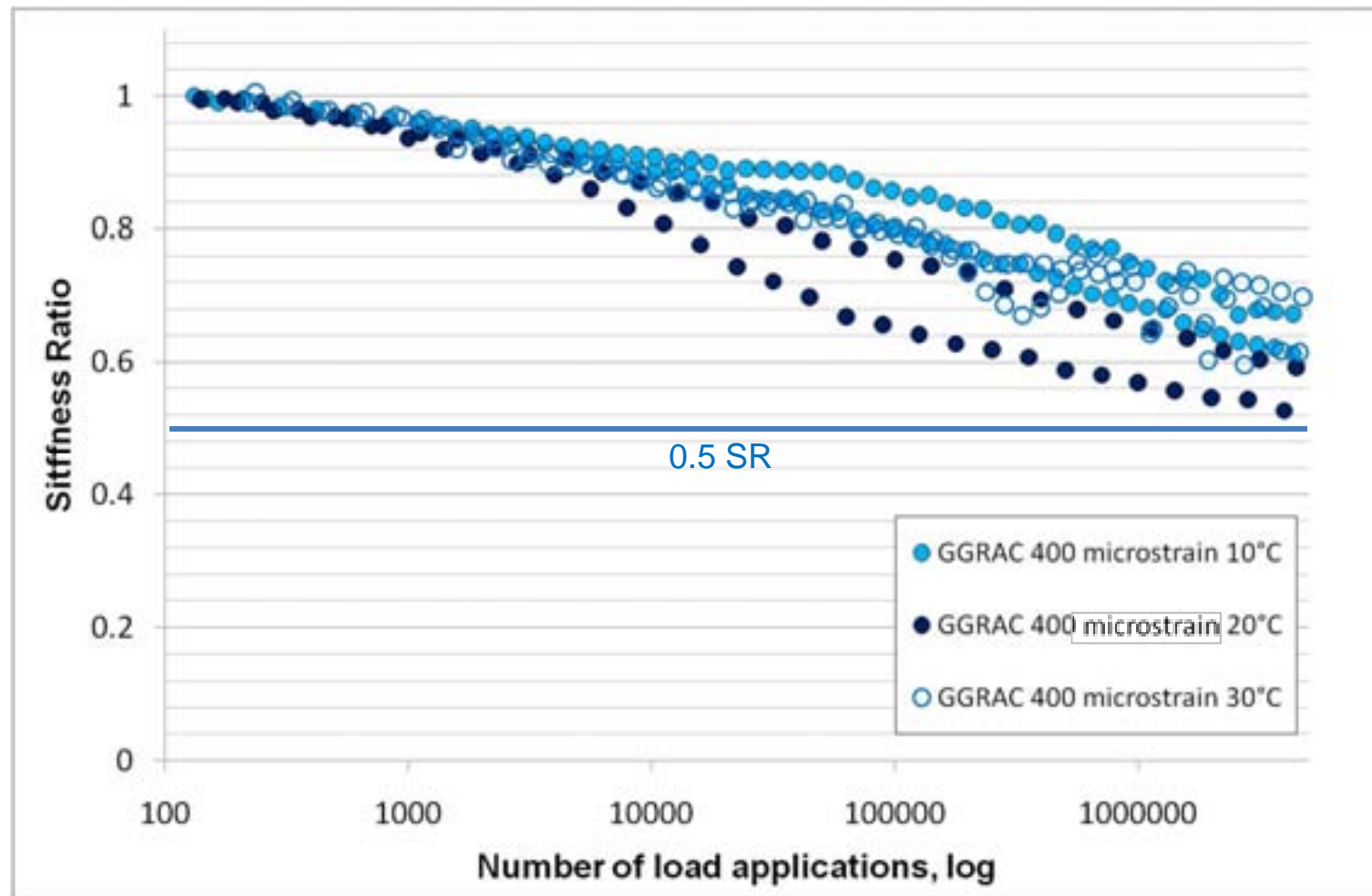
Ext. della rottura

RDEC

7. TEST A CONFR.

8. IN PROGRESS

RESISTENZA A FATICA: RDEC



8-GGRAC: Curve SR-cicli a 400 $\mu\epsilon$. Tutte estrapolate oltre i 5 mln.



1. INTRODUZIONE

La Fatica nei c.b.

La Fatica in Labo

2. APPROCCIO

TRADIZIONALE

3. APPROCCIO

ENERGETICO

Basics

Van Dijk

Carpenter

FEL e Healing

4. METODOLOGIE DI

PROVA, MATERIALI

e PROVINI

5. MASTER CURVES

TEMP. SENSITIVITY

6. RESIST. A FATICA

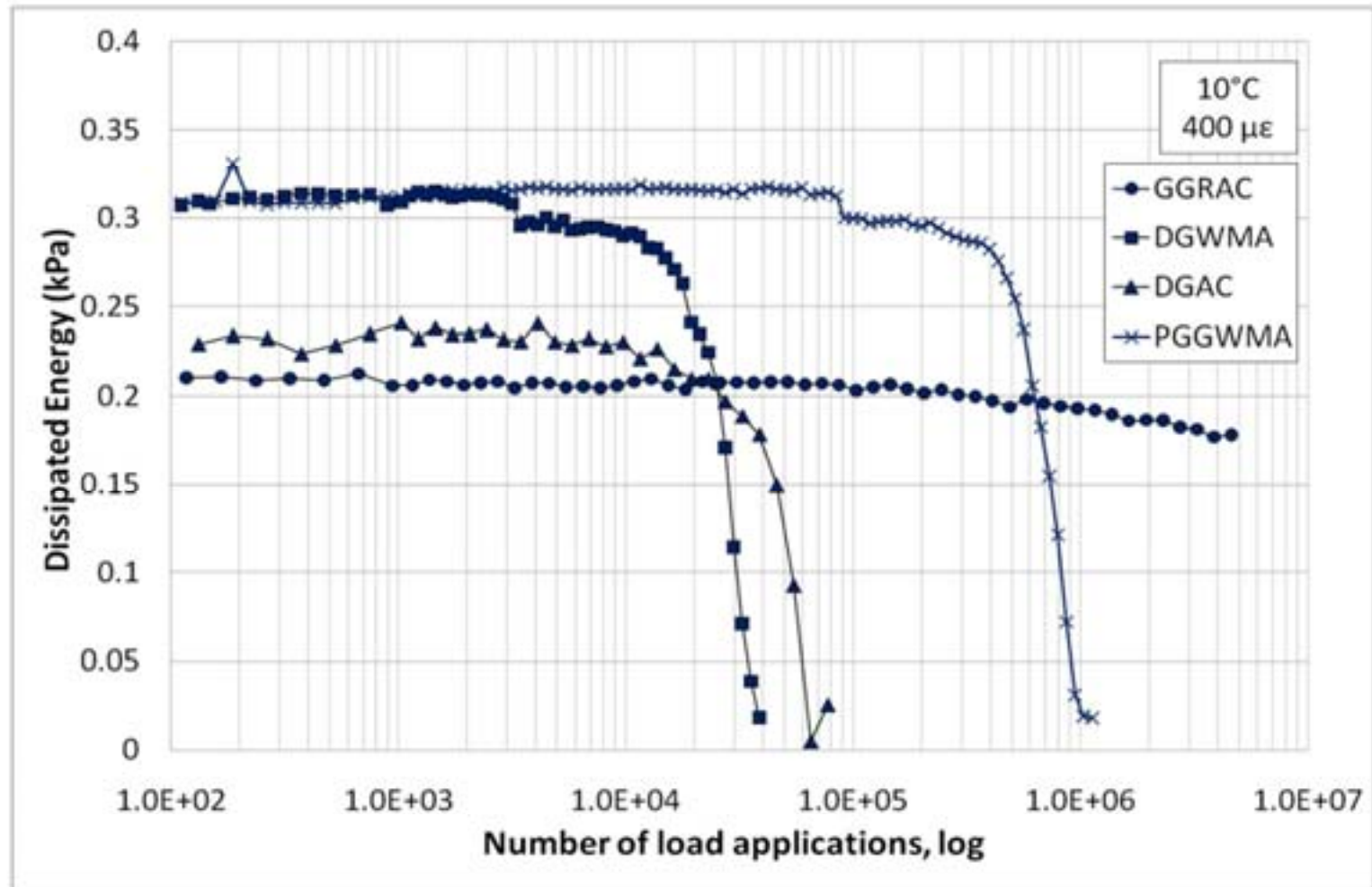
Ext. della rottura

RDEC

7. TEST A CONFR.

8. IN PROGRESS

RESISTENZA A FATICA: RDEC



1- DE-cicli a 10°C e 400 $\mu\epsilon$. Ad una minor DE iniziale corrisponde una maggior vita a fatica.



1.INTRODUZIONE

La Fatica nei c.b.

La Fatica in Labo

2.APPROCCIO

TRADIZIONALE

3.APPROCCIO

ENERGETICO

Basics

Van Dijk

Carpenter

FEL e Healing

4.METODOLOGIE DI

PROVA, MATERIALI

e PROVINI

5.MASTER CURVES

TEMP. SENSITIVITY

6.RESIST. A FATICA

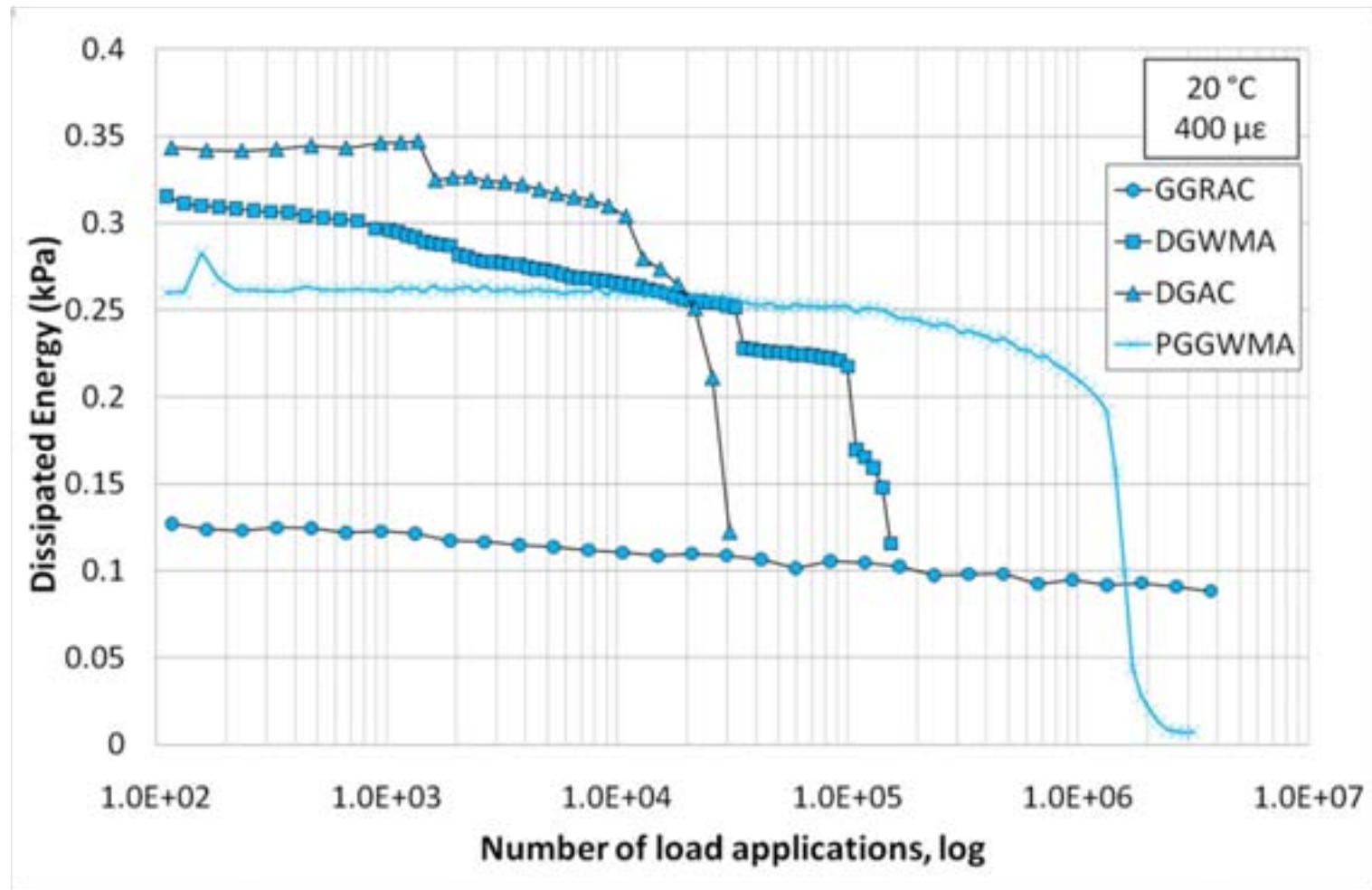
Ext. della rottura

RDEC

7.TEST A CONFR.

8.IN PROGRESS

RESISTENZA A FATICA: RDEC



2- In questo caso il DGAC dissipa di più e la modifica Warm comporta un certo incremento di vita. Il PGGWMA ed il GGRAC esibiscono sempre le vite più lunghe.



1. INTRODUZIONE

La Fatica nei c.b.

La Fatica in Labo

2. APPROCCIO

TRADIZIONALE

3. APPROCCIO

ENERGETICO

Basics

Van Dijk

Carpenter

FEL e Healing

4. METODOLOGIE DI

PROVA, MATERIALI
e PROVINI

5. MASTER CURVES

TEMP. SENSITIVITY

6. RESIST. A FATICA

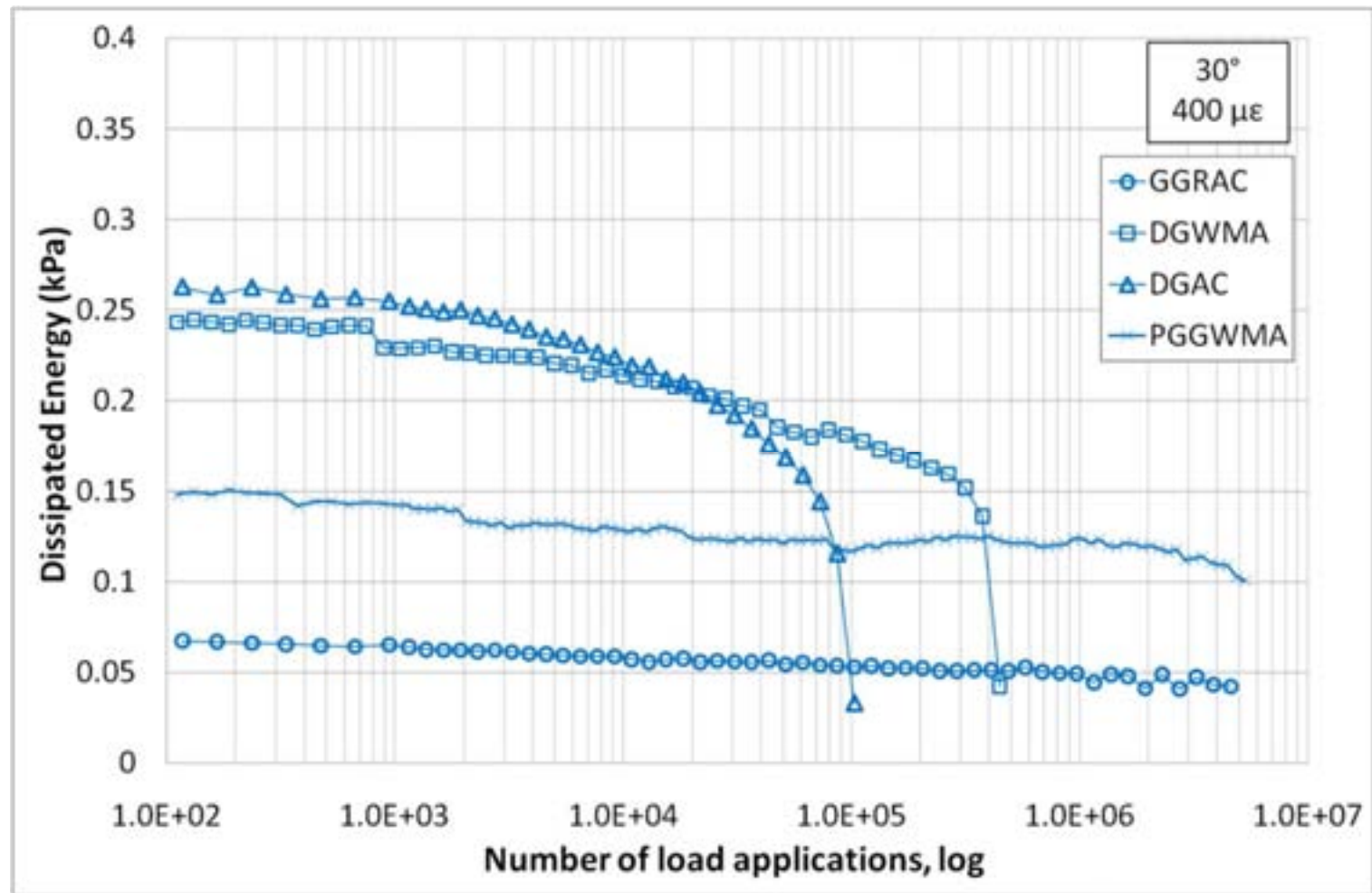
Ext. della rottura

RDEC

7. TEST A CONFR.

8. IN PROGRESS

RESISTENZA A FATICA: RDEC



3- Anche a 30°C il DGAC dissipa più del DGWMA che resiste di più. Il GGRAC dimezza l'energia dissipata ad ogni incremento di temperatura di 10°C.



1. INTRODUZIONE

La Fatica nei c.b.

La Fatica in Labo

2. APPROCCIO TRADIZIONALE

3. APPROCCIO ENERGETICO

Basics

Van Dijk

Carpenter

FEL e Healing

4. METODOLOGIE DI PROVA, MATERIALI e PROVINI

5. MASTER CURVES TEMP. SENSITIVITY

6. RESIST. A FATICA

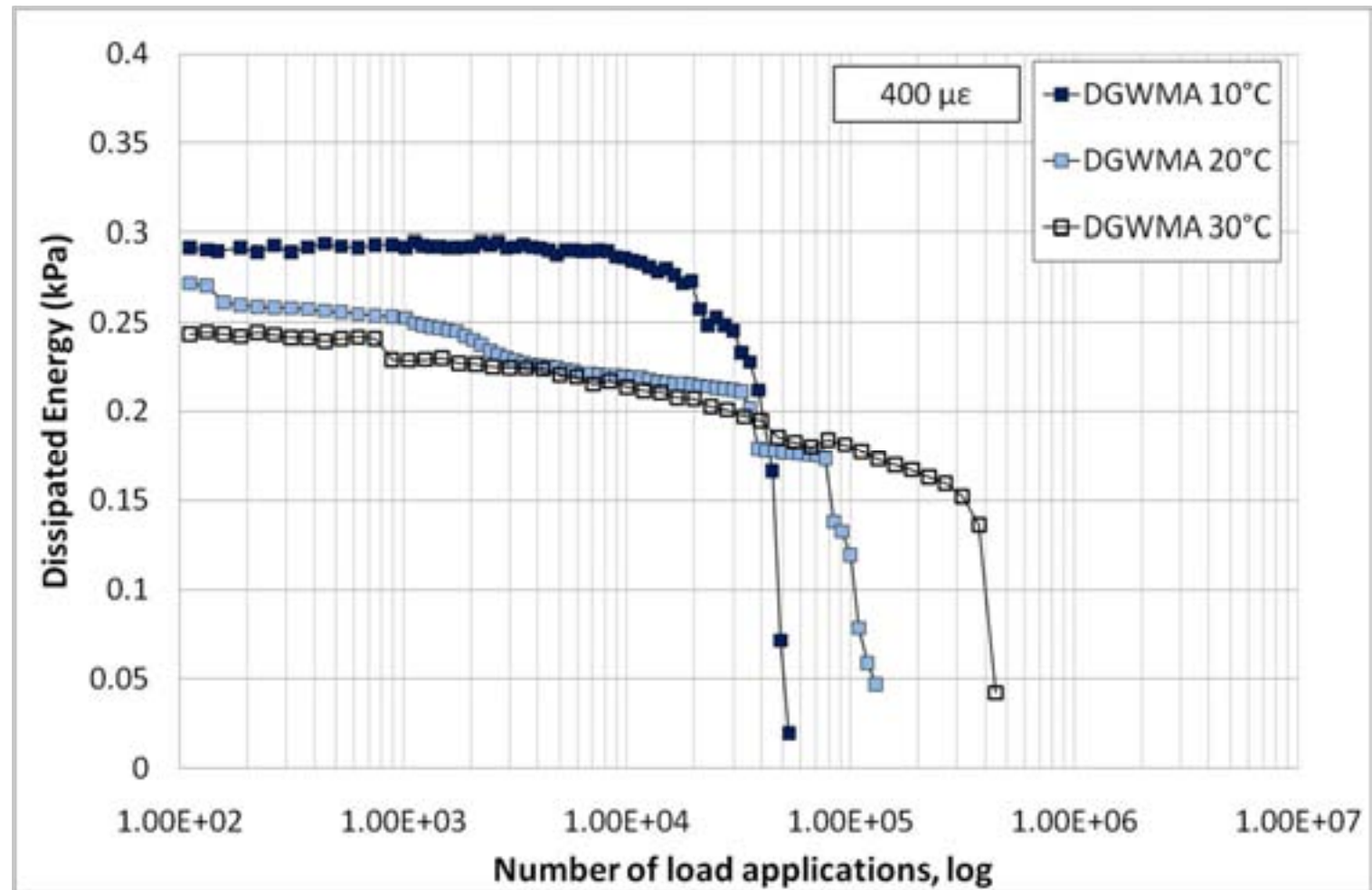
Ext. della rottura

RDEC

7. TEST A CONFR.

8. IN PROGRESS

RESISTENZA A FATICA: RDEC



4- L'incremento di temperatura agisce sul DGWMA riducendo l'energia dissipata iniziale ed incrementando la vita a fatica.



1. INTRODUZIONE

La Fatica nei c.b.

La Fatica in Labo

2. APPROCCIO TRADIZIONALE

3. APPROCCIO ENERGETICO

Basics

Van Dijk

Carpenter

FEL e Healing

4. METODOLOGIE DI PROVA, MATERIALI e PROVINI

5. MASTER CURVES

TEMP. SENSITIVITY

6. RESIST. A FATICA

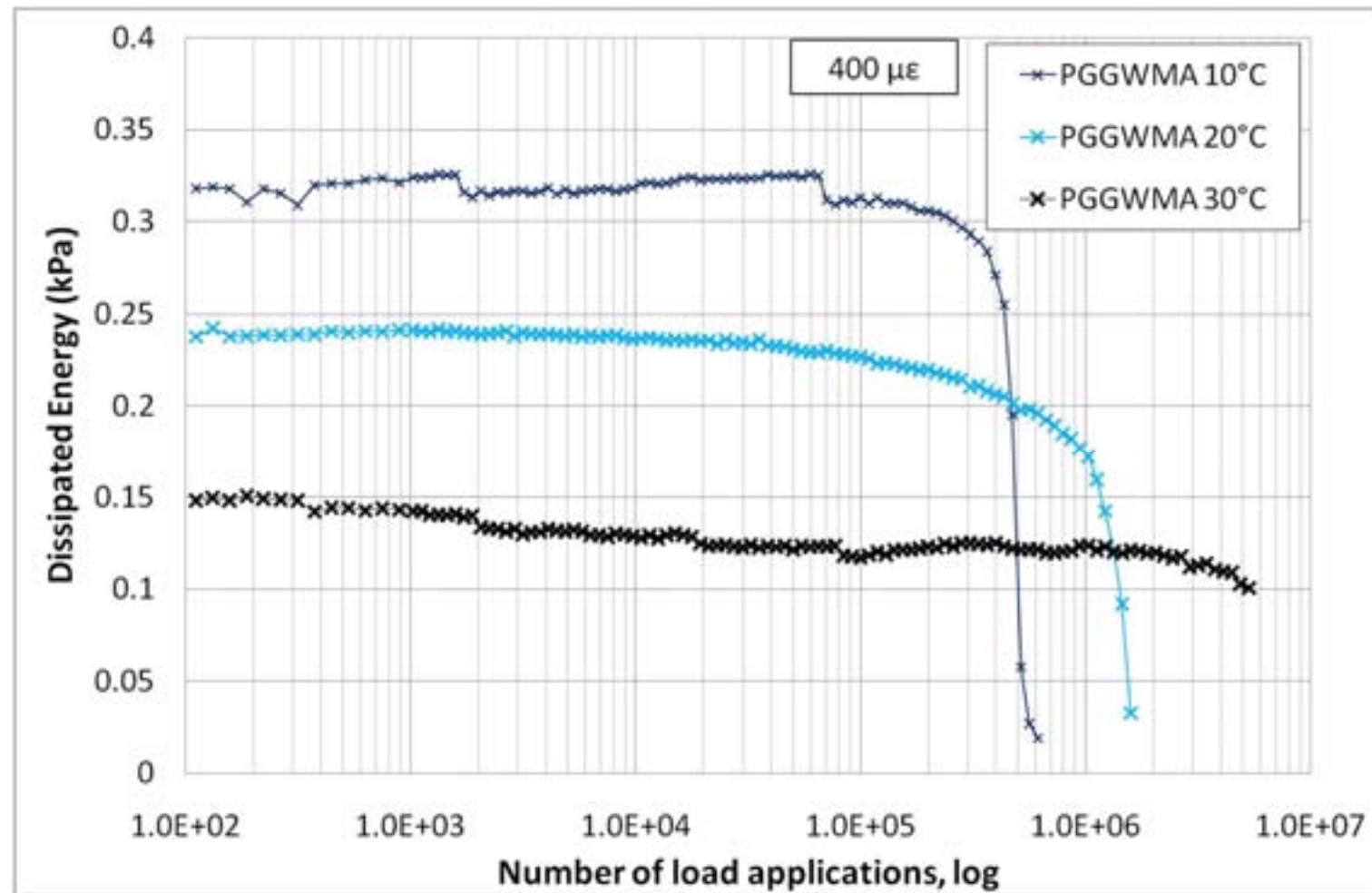
Ext. della rottura

RDEC

7. TEST A CONFR.

8. IN PROGRESS

RESISTENZA A FATICA: RDEC



5- Analogamente accade per il PGGWMA dove i 30°C portano il materiale verso il FEL già a 400 $\mu\epsilon$.



1. INTRODUZIONE

La Fatica nei c.b.

La Fatica in Labo

2. APPROCCIO TRADIZIONALE

3. APPROCCIO ENERGETICO

Basics

Van Dijk

Carpenter

FEL e Healing

4. METODOLOGIE DI PROVA, MATERIALI e PROVINI

e PROVINI

5. MASTER CURVES

TEMP. SENSITIVITY

6. RESIST. A FATICA

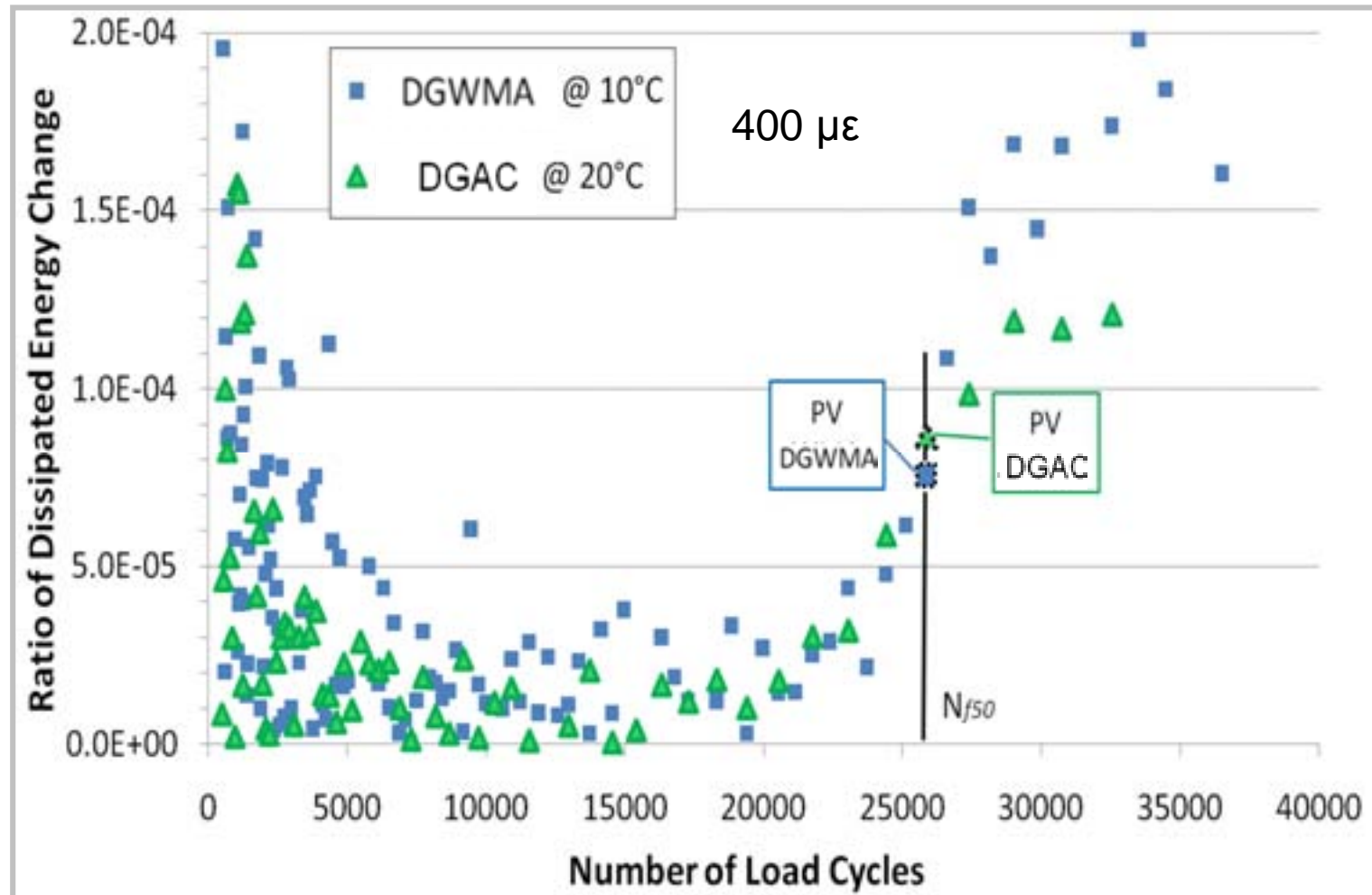
Ext. della rottura

RDEC

7. TEST A CONFR.

8. IN PROGRESS

RESISTENZA A FATICA: RDEC



Es. RDEC-cicli. Il DGWMA a 10°C ha un andamento di RDEC simile a quello del DGAC a 20°C. I due test restituiscono due punti prossimi sul piano PV- N_{f50} .



1. INTRODUZIONE

La Fatica nei c.b.
La Fatica in Labo

2. APPROCCIO

TRADIZIONALE

3. APPROCCIO

ENERGETICO

Basics

Van Dijk

Carpenter

FEL e Healing

4. METODOLOGIE DI

PROVA, MATERIALI
e PROVINI

5. MASTER CURVES

TEMP. SENSITIVITY

6. RESIST. A FATICA

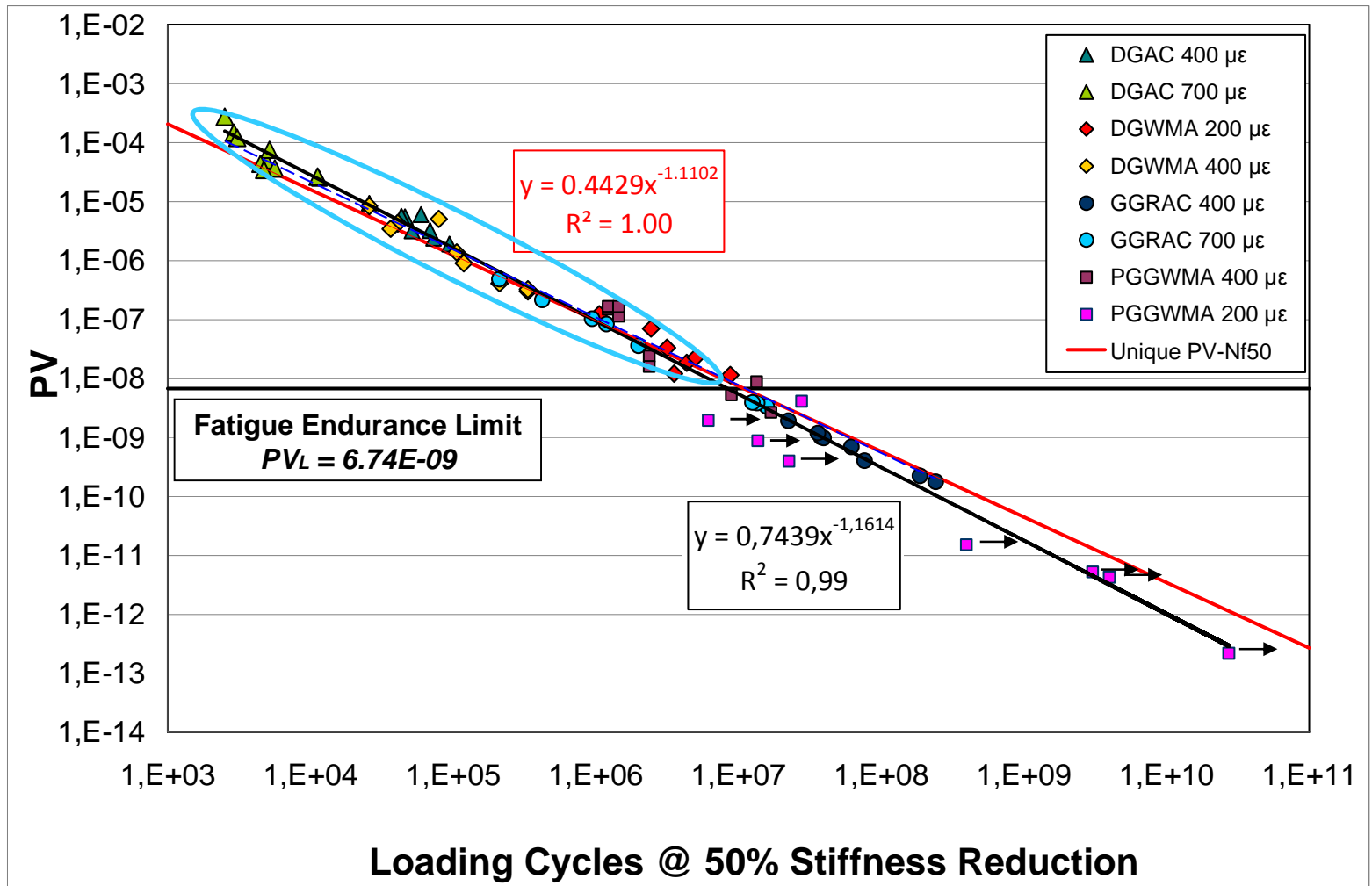
Ext. della rottura

RDEC

7. TEST A CONFR.

8. IN PROGRESS

RESISTENZA A FATICA: RDEC



Piano PV-N_{f50}: sopra il FEL i dati si attestano sulla Unique. I dati estrapolati (3S Weibull) possono risultare sottostimati. Vi è una certa aleatorietà sulla stima in relazione al modello usato. Sviluppo.



TEST A CONFRONTO:

1. INTRODUZIONE

La Fatica nei c.b.

La Fatica in Labo

2. APPROCCIO TRADIZIONALE

3. APPROCCIO ENERGETICO

Basics

Van Dijk

Carpenter

FEL e Healing

4. METODOLOGIE DI PROVA, MATERIALI e PROVINI

e PROVINI

5. MASTER CURVES

TEMP. SENSITIVITY

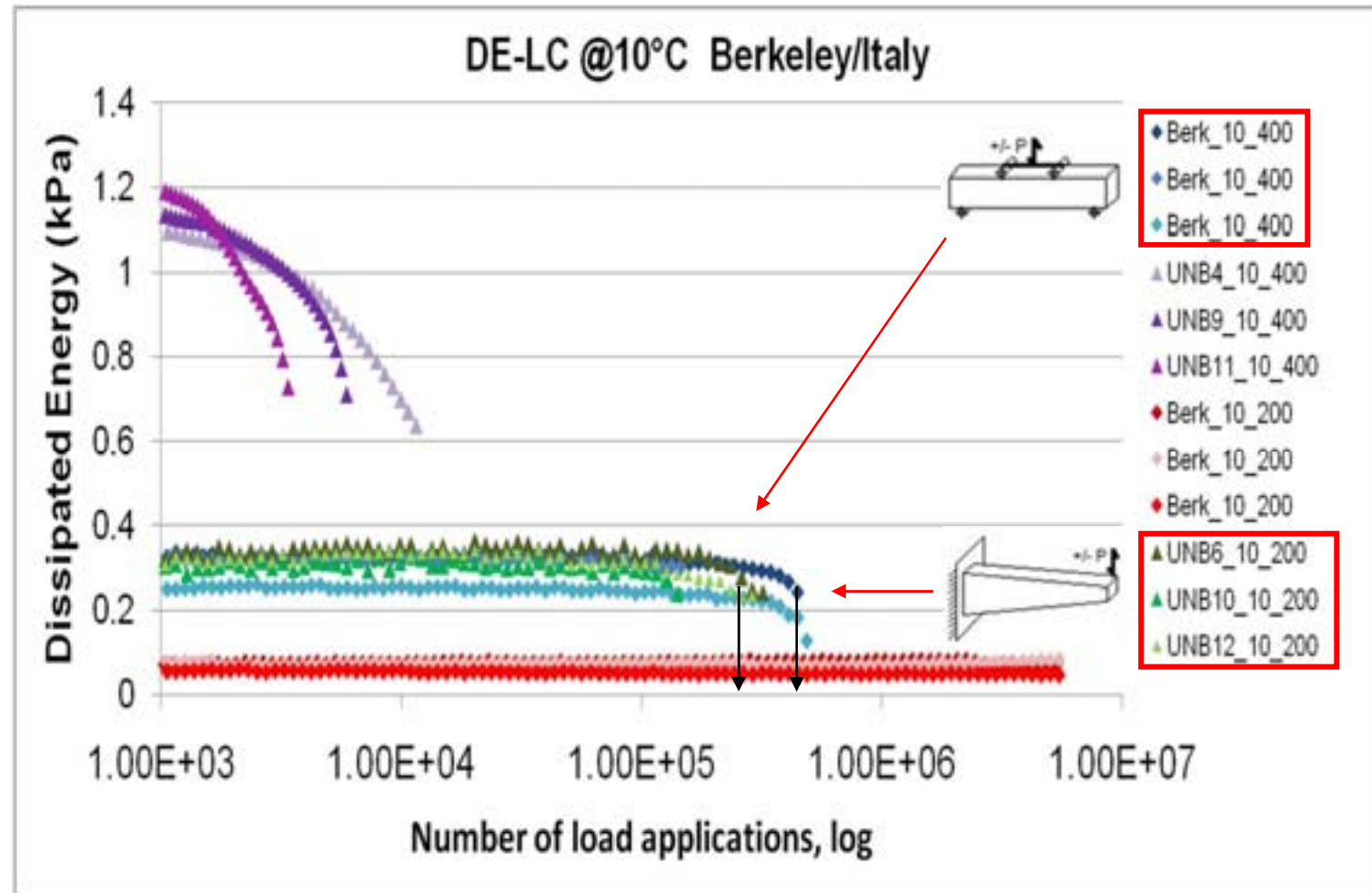
6. RESIST. A FATICA

Ext. della rottura

RDEC

7. TEST A CONFR.

8. IN PROGRESS



Le curve DE sul PGGWMA a 10°C sono confrontabili:
4PB Haversine @ 400 $\mu\epsilon$ vs. 2PB Sinusoidal @ 200 $\mu\epsilon$



1.INTRODUZIONE

La Fatica nei c.b.

La Fatica in Labo

2.APPROCCIO

TRADIZIONALE

3.APPROCCIO

ENERGETICO

Basics

Van Dijk

Carpenter

FEL e Healing

4.METODOLOGIE DI

PROVA, MATERIALI

e PROVINI

5.MASTER CURVES

TEMP. SENSITIVITY

6.RESIST. A FATICA

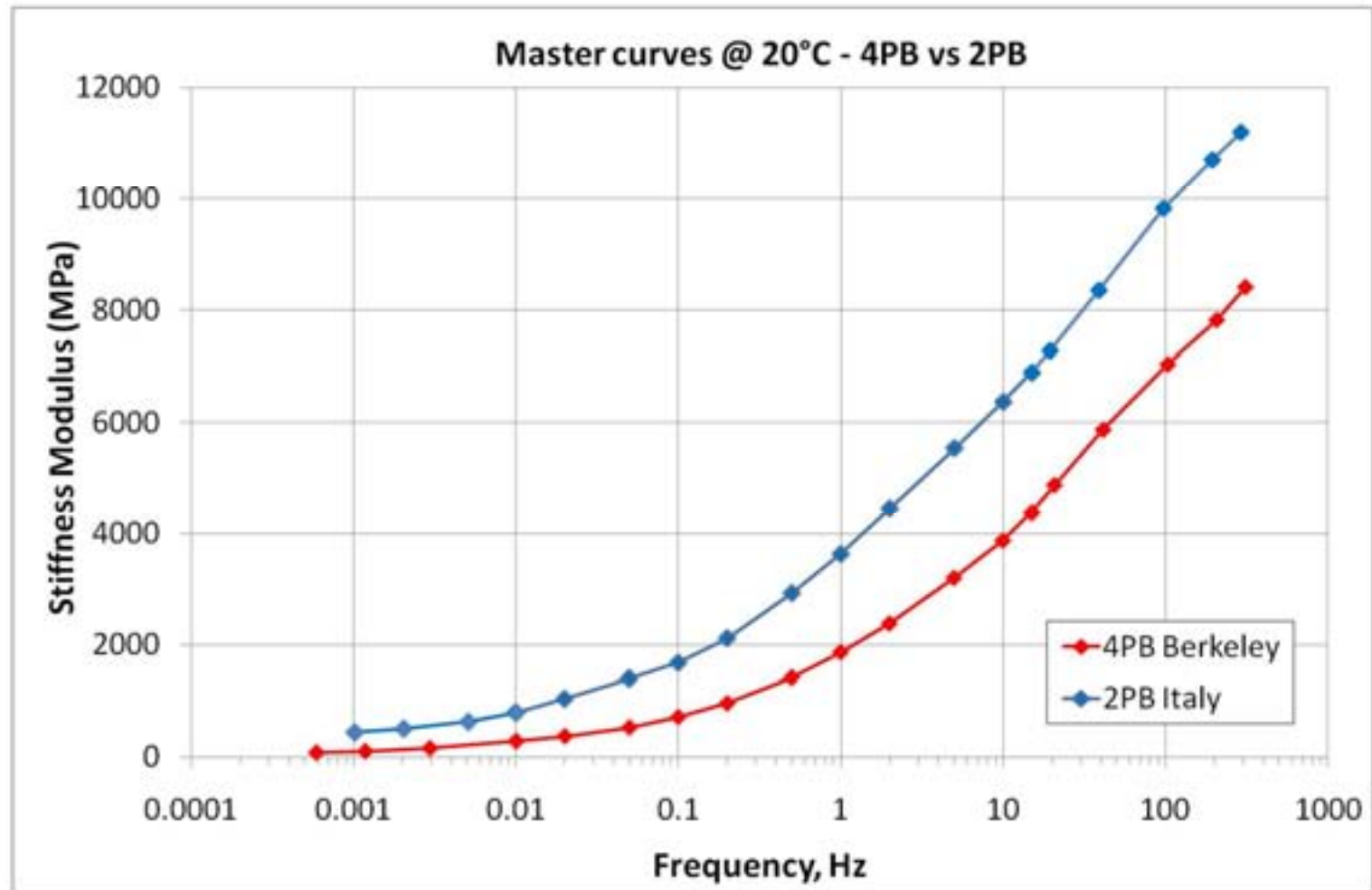
Ext. della rottura

RDEC

7.TEST A CONFR.

8.IN PROGRESS

TEST A CONFRONTO:



Master Curves @ 20°C a confronto: vi è una certa differenza tra i moduli iniziali restituiti.



1. INTRODUZIONE

La Fatica nei c.b.

La Fatica in Labo

2. APPROCCIO

TRADIZIONALE

3. APPROCCIO

ENERGETICO

Basics

Van Dijk

Carpenter

FEL e Healing

4. METODOLOGIE DI

PROVA, MATERIALI
e PROVINI

5. MASTER CURVES

TEMP. SENSITIVITY

6. RESIST. A FATICA

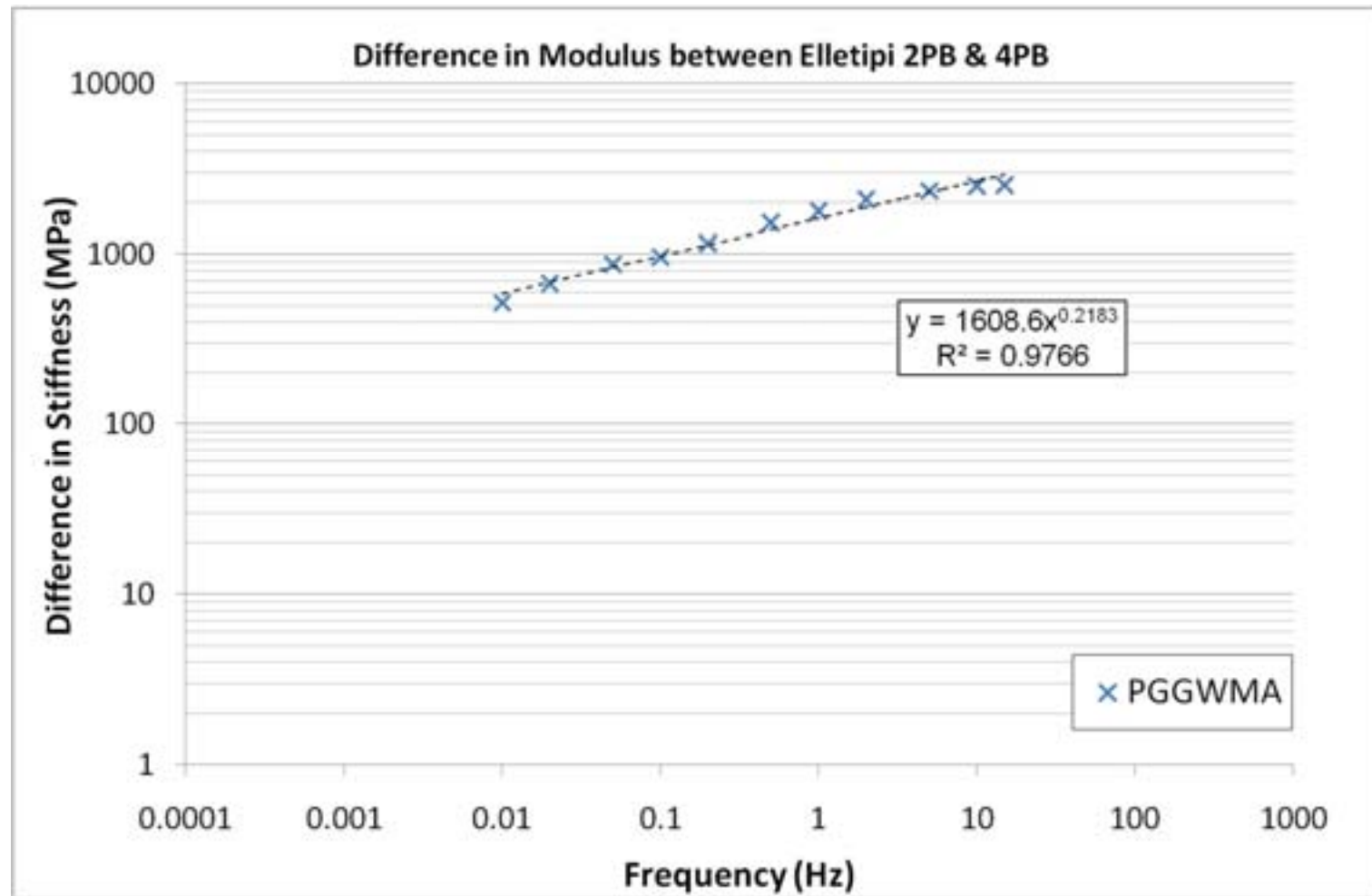
Ext. della rottura

RDEC

7. TEST A CONFR.

8. IN PROGRESS

TEST A CONFRONTO:



La differenza tra le rigidezze è crescente con la frequenza secondo un trend ben definito. *Bias* nella configurazione di prova.



1. INTRODUZIONE

La Fatica nei c.b.

La Fatica in Labo

2. APPROCCIO

TRADIZIONALE

3. APPROCCIO

ENERGETICO

Basics

Van Dijk

Carpenter

FEL e Healing

4. METODOLOGIE DI

PROVA, MATERIALI

e PROVINI

5. MASTER CURVES

TEMP. SENSITIVITY

6. RESIST. A FATICA

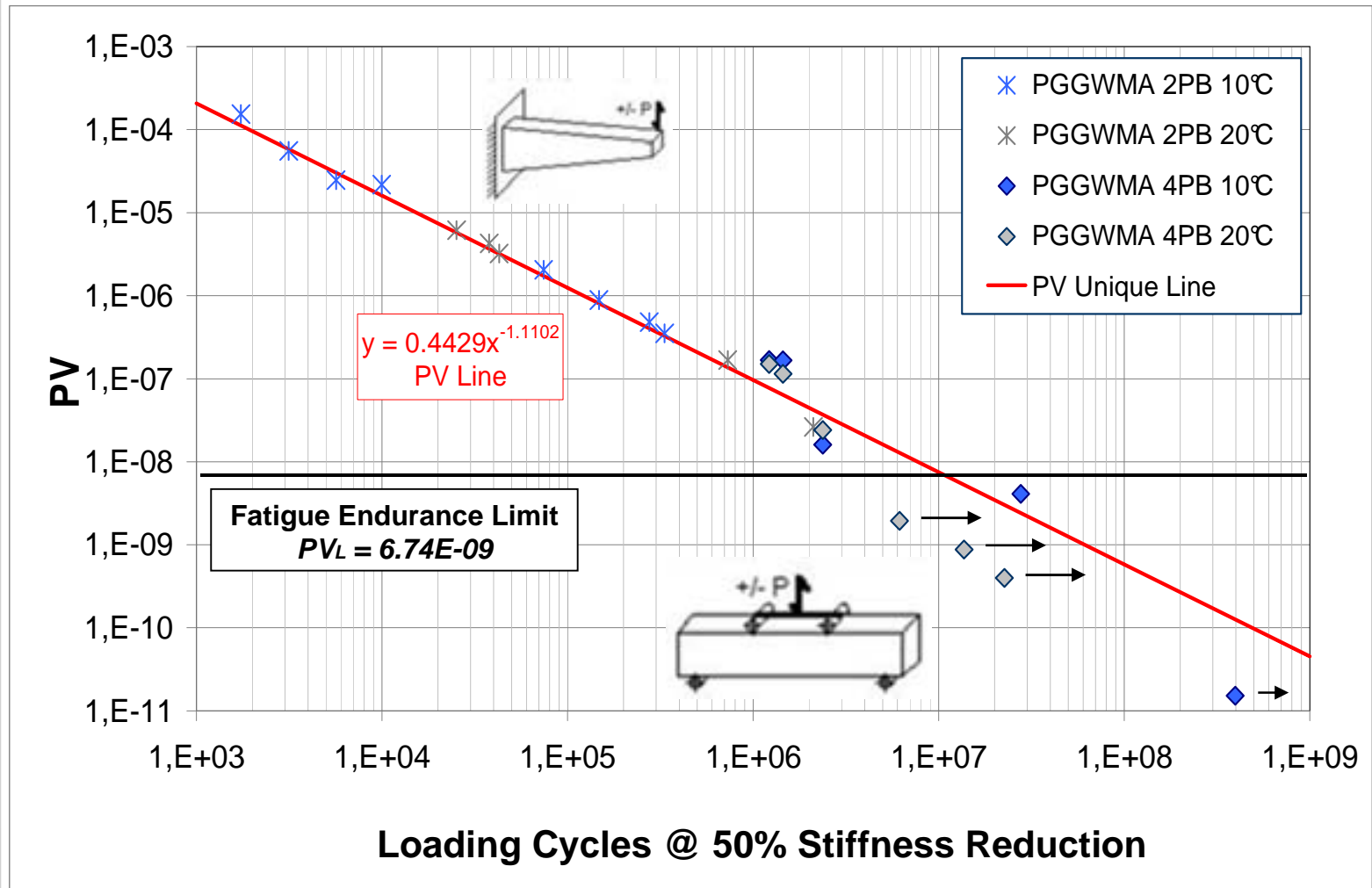
Ext. della rottura

RDEC

7. TEST A CONFR.

8. IN PROGRESS

TEST A CONFRONTO:



Piano PV- N_{f50} : i test 2PB tutti a rottura si attestano sulla Unique e ne indicano una indipendenza dal metodo di prova. I punti 4PB estrapolati con il 3SW possono risultare sottostimati per le hp fatte.



IN PROGRESS:



MATERIALE SMA-CIVIS: PGGWMA

Un campione è costituito da 3 provini-replica. Test a 10 Hz. Dry.

1.INTRODUZIONE

La Fatica nei c.b.

La Fatica in Labo

2.APPROCCIO

TRADIZIONALE

3.APPROCCIO

ENERGETICO

Basics

Van Dijk

Carpenter

FEL e Healing

4.METODOLOGIE DI

PROVA, MATERIALI

e PROVINI

5.MASTER CURVES

TEMP. SENSITIVITY


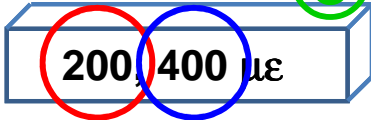









6.RESIST. A FATICA

Ext. della rottura

RDEC

7.TEST A CONFR.

8.IN PROGRESS

	10°C	20°C	30°C
HAVS 			
SINUS 	   	 	



Grazie per l'attenzione!



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Cesare Sangiorgi

DICAM

Facoltà di Ingegneria

V.le Risorgimento 2, BOLOGNA

cesare.sangiorgi4@unibo.it