

Sessione II: I conglomerati bituminosi a basso dispendio energetico

Modifica con cere dei bitumi stradali



Filippo Merusi

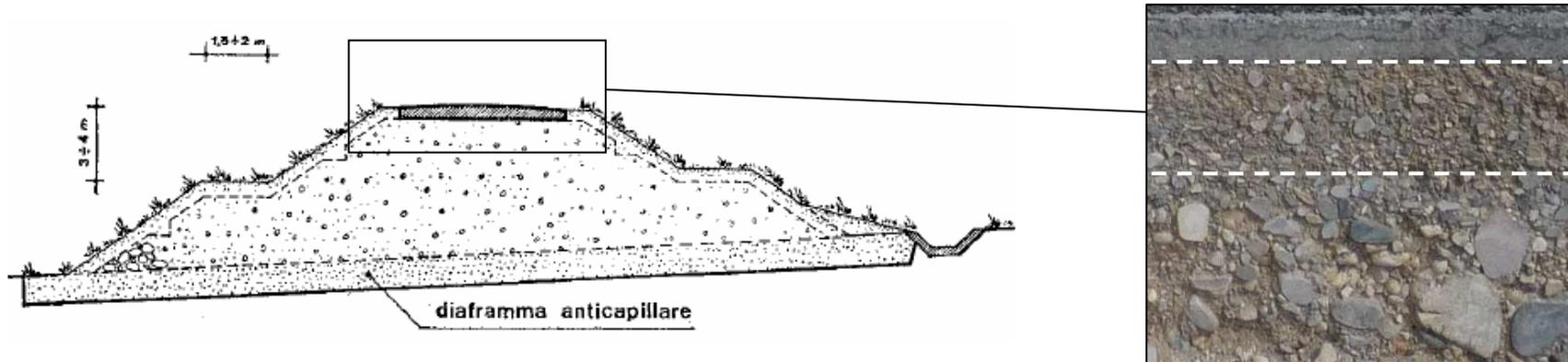
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PARMA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE

Laboratorio Bitumi e Conglomerati Bituminosi

Brescia, 7 settembre 2011

Warm Mix Asphalt (WMA)



Conglomerati a caldo tradizionali (HMA)



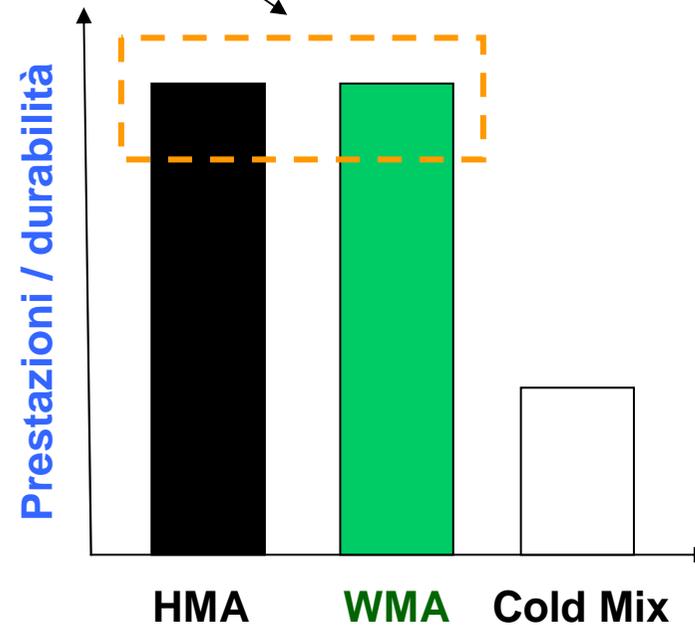
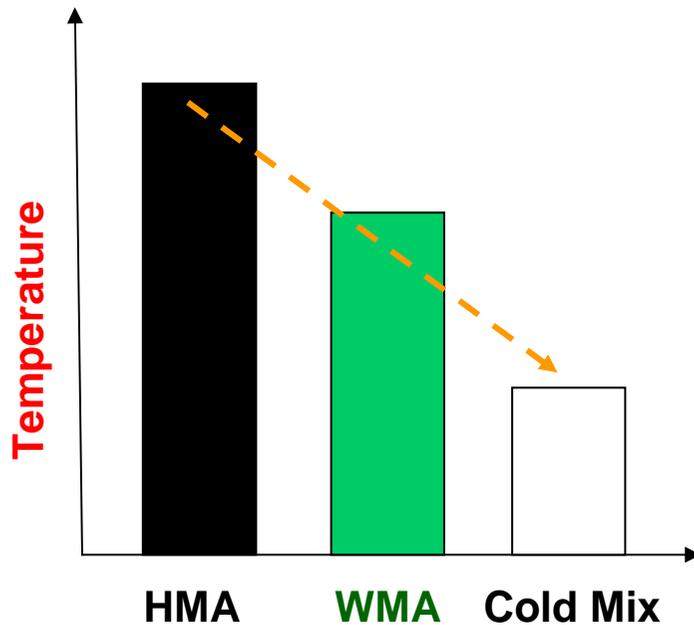
Warm Mix Asphalt (WMA)

- ❑ Riduzione delle temperature di processo
- ❑ Risparmio energetico
- ❑ Abbattimento delle emissioni in atmosfera
- ❑ Estensione della stagione di stesa
- ❑ Estensione delle distanze di trasporto

Warm Mix Asphalt (WMA)

HMA, WARM MIX ASPHALT (WMA) e COLD MIX

- ❑ Temperature di processo
 - ❑ Prestazioni meccaniche
 - ❑ Durabilità
- } Mantenimento di prestazioni analoghe ad HMA



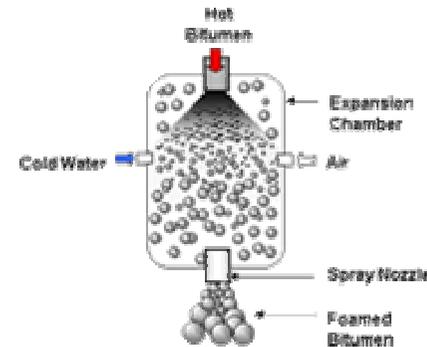
Warm Mix Asphalt (WMA)

TECNOLOGIE DI PROCESSO

□ Processi water-based (FOAMING)

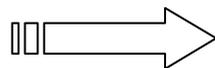


- Aggregati umidi (LEA, ...)
- Legante a 2 componenti (WAM-Foam, ...)
- Additivi inorganici, zeoliti (Aspha-min,)
- (*Impiego di emulsioni bituminose riscaldate*)



□ Modifica del bitume

- Modifica con **additivi fluidificanti (!)**



1. Fluidificare il bitume a $T > T_{laying}$
2. **Non** modificare consistenza a $T < T_{laying}$

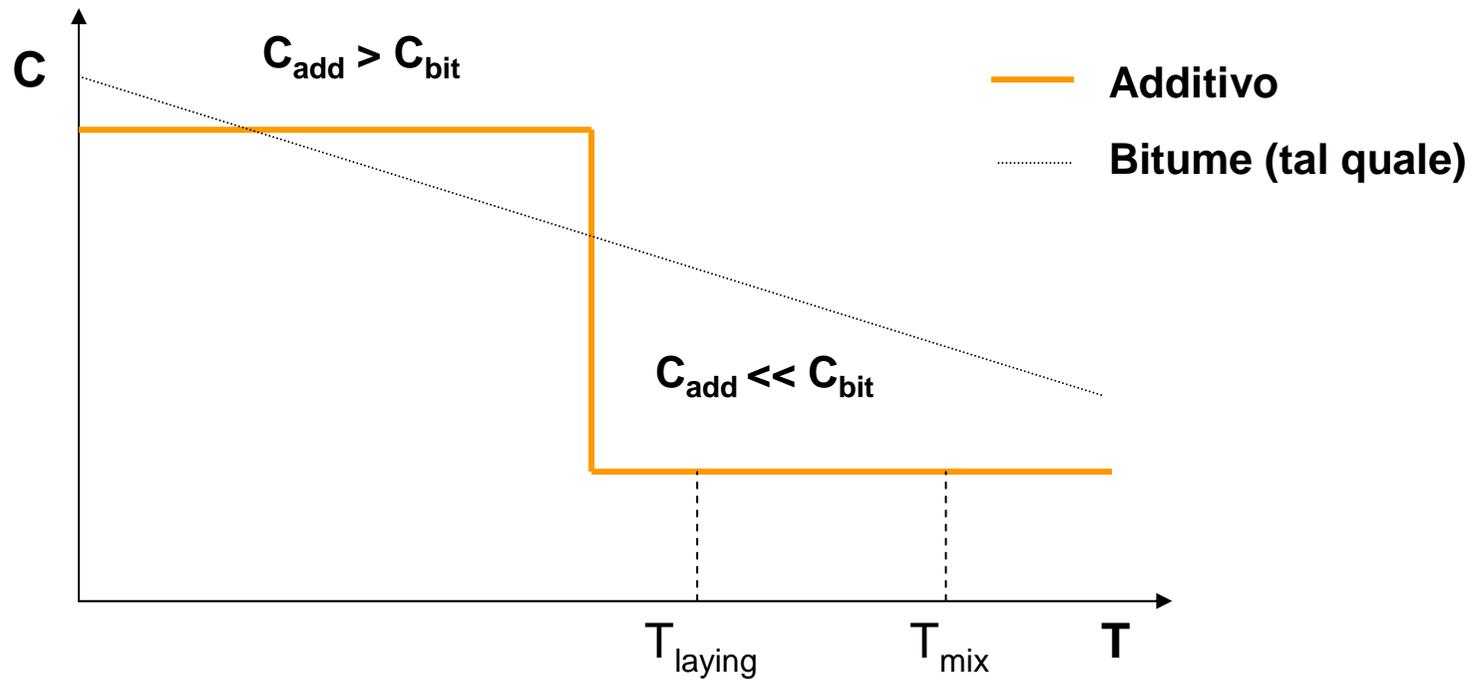
Warm Mix Asphalt (WMA)

TECNOLOGIE DI PROCESSO

- **Modifica del bitume**
 - Additivo WMA 'ideale'

Fluidificare il bitume a $T > T_{laying}$

Non modificare consistenza a $T < T_{laying}$



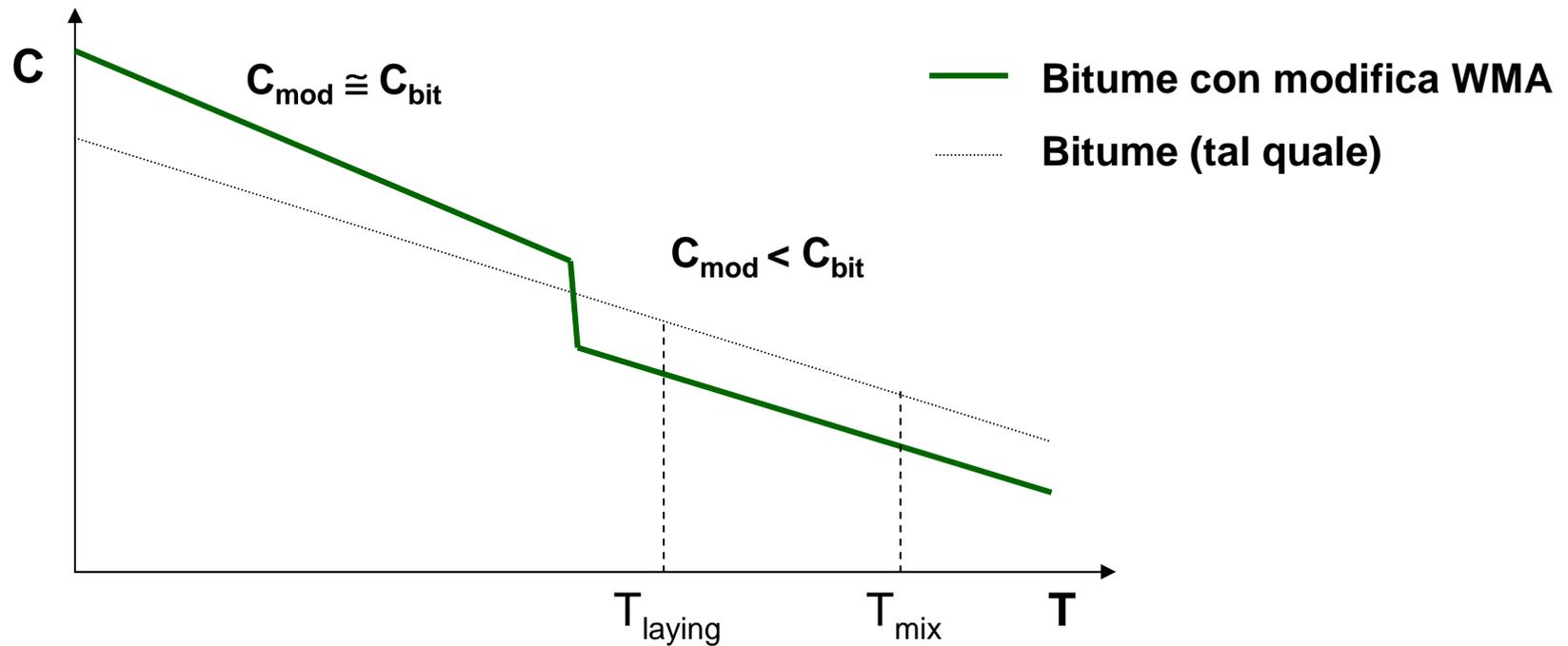
Warm Mix Asphalt (WMA)

TECNOLOGIE DI PROCESSO

- **Modifica del bitume**
 - Additivo WMA ideale

Fluidificare il bitume a $T > T_{laying}$

Non modificare consistenza a $T < T_{laying}$



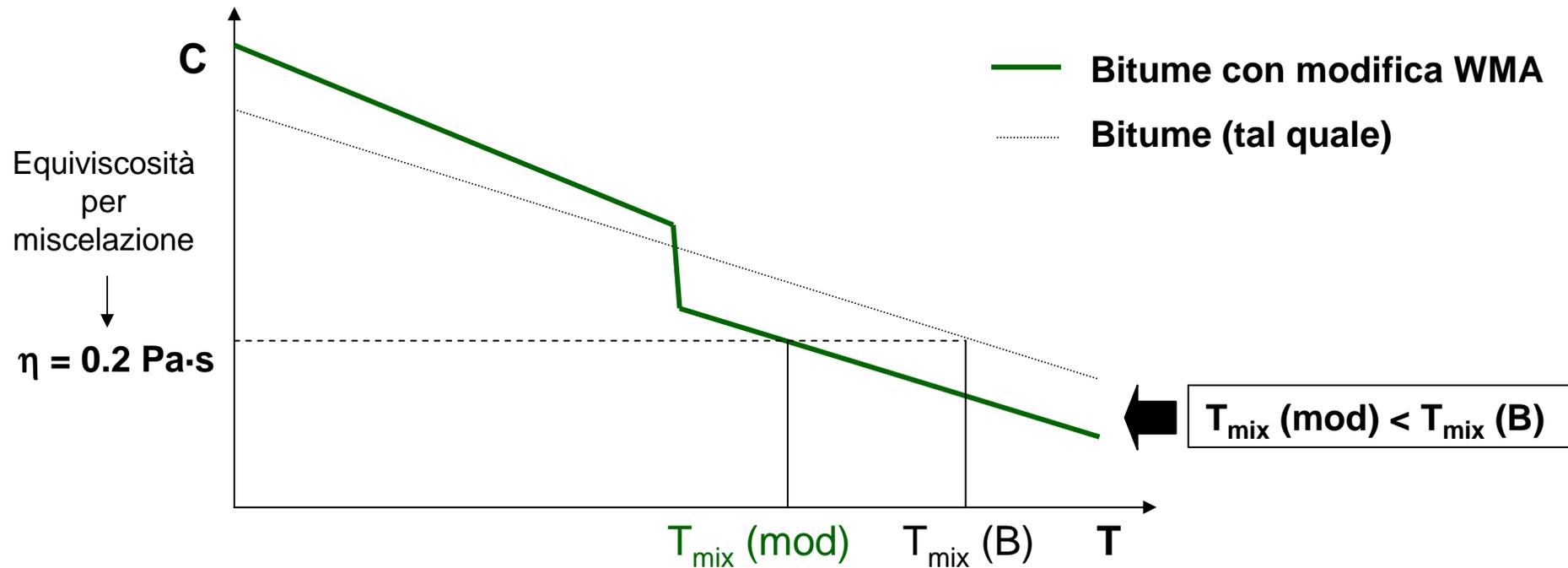
Warm Mix Asphalt (WMA)

TECNOLOGIE DI PROCESSO

- **Modifica del bitume**
 - Additivo WMA 'ideale'

Fluidificare il bitume a $T > T_{laying}$

Non modificare consistenza a $T < T_{laying}$



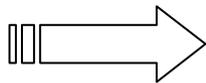
Warm Mix Asphalt (WMA)

TECNOLOGIE DI PROCESSO

□ Modifica del bitume

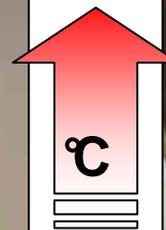
- Additivo WMA 'ideale'

Occorre additivo che sia solubile nel bitume e che presenti una transizione di fase da solido a liquido in un preciso intervallo di temperatura.

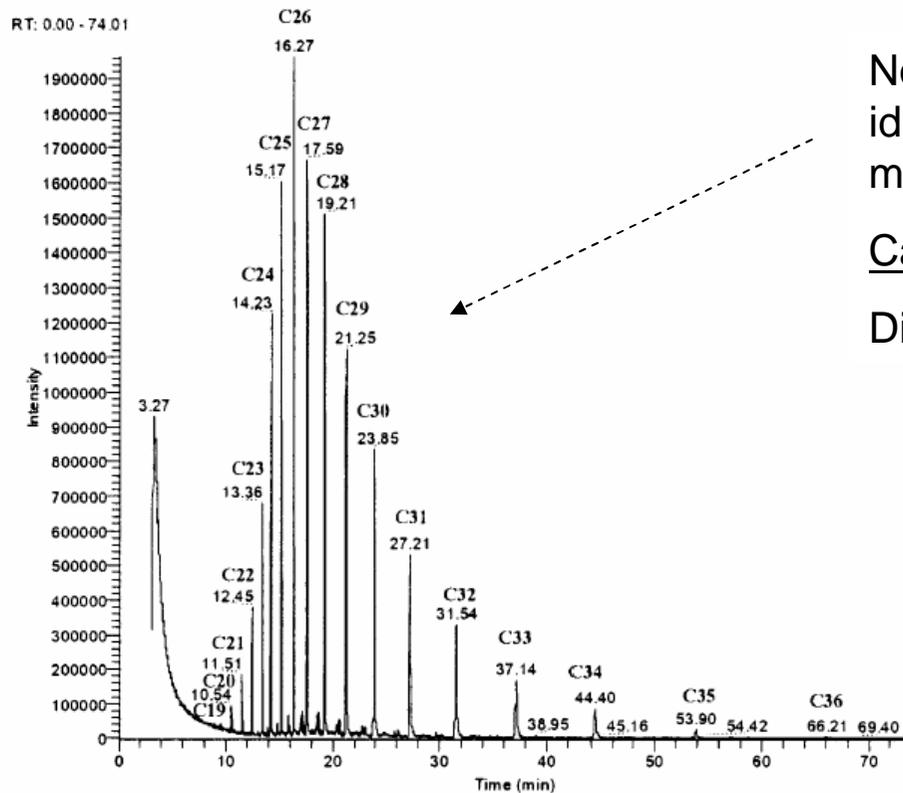


CERA

Miscele di idrocarburi alifatici (**alcani**) ad elevato peso molecolare, lunga catena ($> C_{20}$).



GAS CROMATOGRAFIA



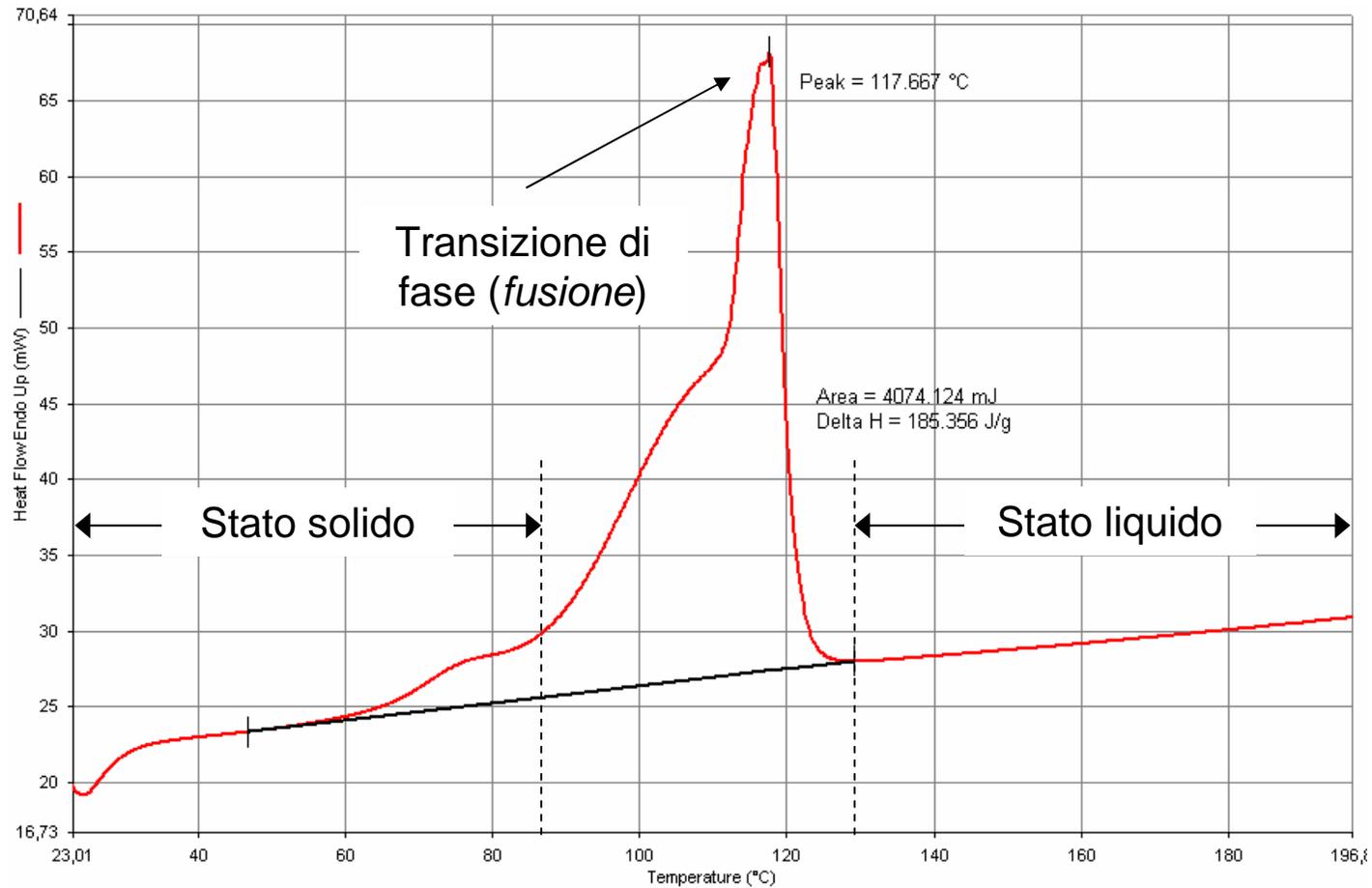
No unico composto, miscela di idrocarburi con diverso peso molecolare.

Caratteristica fondamentale:

Distribuzione lunghezze catene

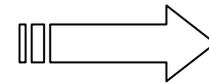
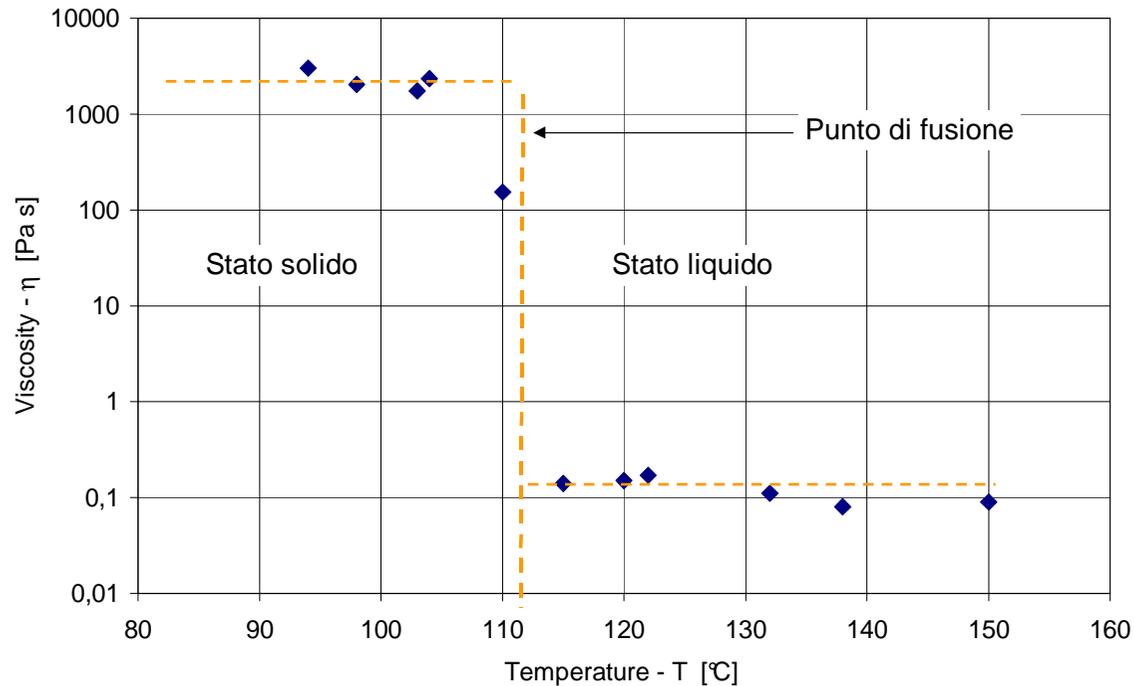
(Edwards, Redelius, 2003)

DIFFERENTIAL SCANNING CALORIMETRY (DSC)



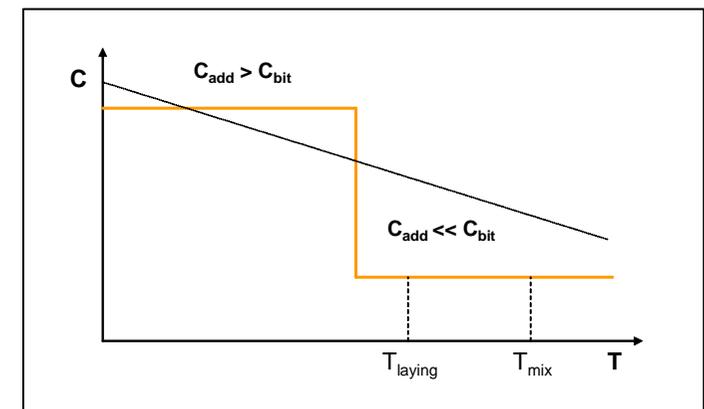
Comportamento termico delle cere

Misure meccaniche (consistenza) su cera pura



Affinità con caso ideale

(Giuliani, Merusi, 2008)



In sintesi

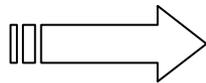
CERA

1. Miscela di idrocarburi alifatici a lunga catena

- ❑ Presunta **affinità** col bitume

2. Transizione di fase solido-liquido

- ❑ Presunta **fluidificazione** a temperature di processo



WAX-MODIFIED ASPHALT

WAX-MODIFIED ASPHALT

- ❑ Formulazione
- ❑ Struttura e proprietà fisiche
- ❑ Caratteristiche tecniche e prestazionali

WAX-MODIFIED ASPHALT

□ Bitume

- No problemi (finora riconosciuti di compatibilità / stabilità).
- In linea generale possono essere usati bitumi con diverse origini e classi di pen.
- Evitare bitumi che contengono cere naturali (**petroleum waxes**).
- Evitare bitumi classe < 50 / 70 per eccessiva rigidità della miscela.

□ Polimeri

- Possibilità di formulare miscele ternarie bitume / polimero / cera.

□ Cera

- Elementi fondamentali:

1. **Origine chimica** e composizione (tipologia della cera)
2. **Concentrazione** (dosaggio) nella miscela bitume / cera

CERE NEL BITUME

PETROLEUM WAXES (!)

Cere dei petroli greggi, naturali componenti dei bitumi di raffineria.

- Paraffine macrocristalline ($< C_{45}$)
- Cere microcristalline ($> C_{45}$)
- Altri composti organici cristallizzanti

WAX MODIFIERS

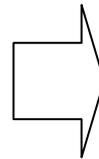
Cere selezionate da produzioni industriali. Possono avere diversa origine.

CERE NEL BITUME

PETROLEUM WAXES (!)

Cere dei petroli greggi, naturali componenti dei bitumi di raffineria.

- Paraffine macrocristalline ($< C_{45}$)
- Cere microcristalline ($> C_{45}$)
- Altri composti organici cristallizzanti



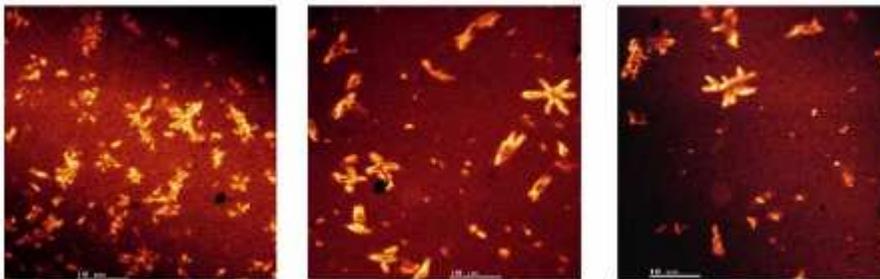
WAX MODIFIERS

1. Basso punto di fusione

Perdita di consistenza ad alte T di esercizio.

2. Macro-cristalli

Eccessiva rigidezza a basse T di esercizio.

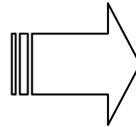


(Lu et al., 2005)

Wax modifiers

~~PETROLEUM WAXES (!)~~

- ~~- Paraffine macrocristalline~~
- ~~- Cere microcristalline~~
- ~~- Altri composti organici cristallizzanti~~



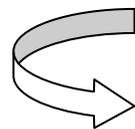
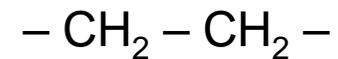
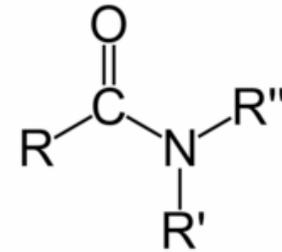
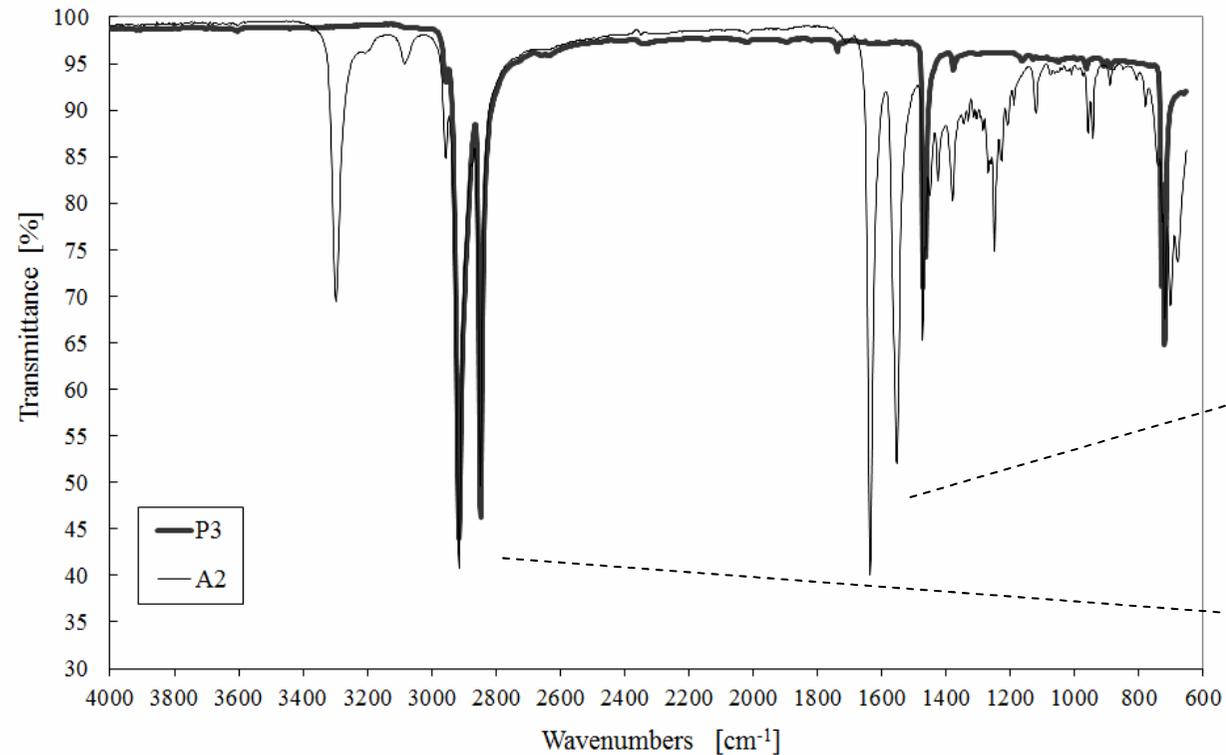
WAX MODIFIERS

- **Fischer-Tropsch waxes**
(cere sintetiche)
- **Montan waxes**
(cere minerali derivate da lignite)
- **Modified (functionalized) waxes**
(cere modificate chimicamente)

| Cera sintetica Fischer-Tropsch | Cera Montan modificata | Cera Montan modificata | Cera Montan naturale | Cera funzionalizzata |
|---|---|--|---|---|
| es. Sasobit | es. Asphaltan A | es. Asphaltan B | es. Romonta Normal | es. Licomont BS- 100 |
|  |  |  |  |  |

Selezione del tipo di cera

WAX-MODIFIERS: ORIGINE CHIMICA (FTIR)



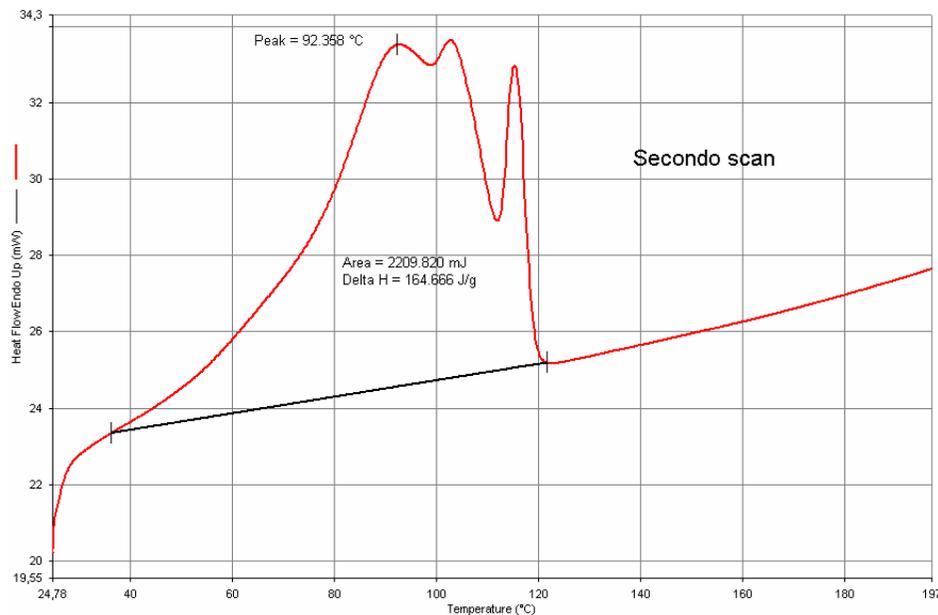
P3: cera paraffinica (ordinaria)

A2: cera ammidica (modificata)

(Merusi et al., 2010)

Selezione del tipo di cera

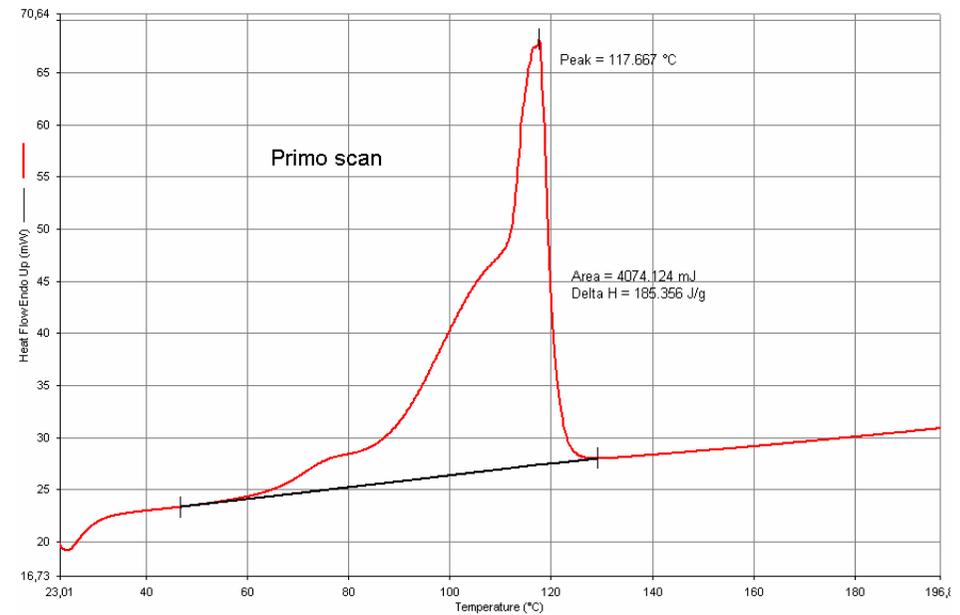
WAX-MODIFIERS: COMPORTAMENTO TERMICO (DSC)



Cera P2 (paraffinica): $T_m = 40 \div 120^\circ\text{C}$



(distribuzione pesi molecolari estesa)

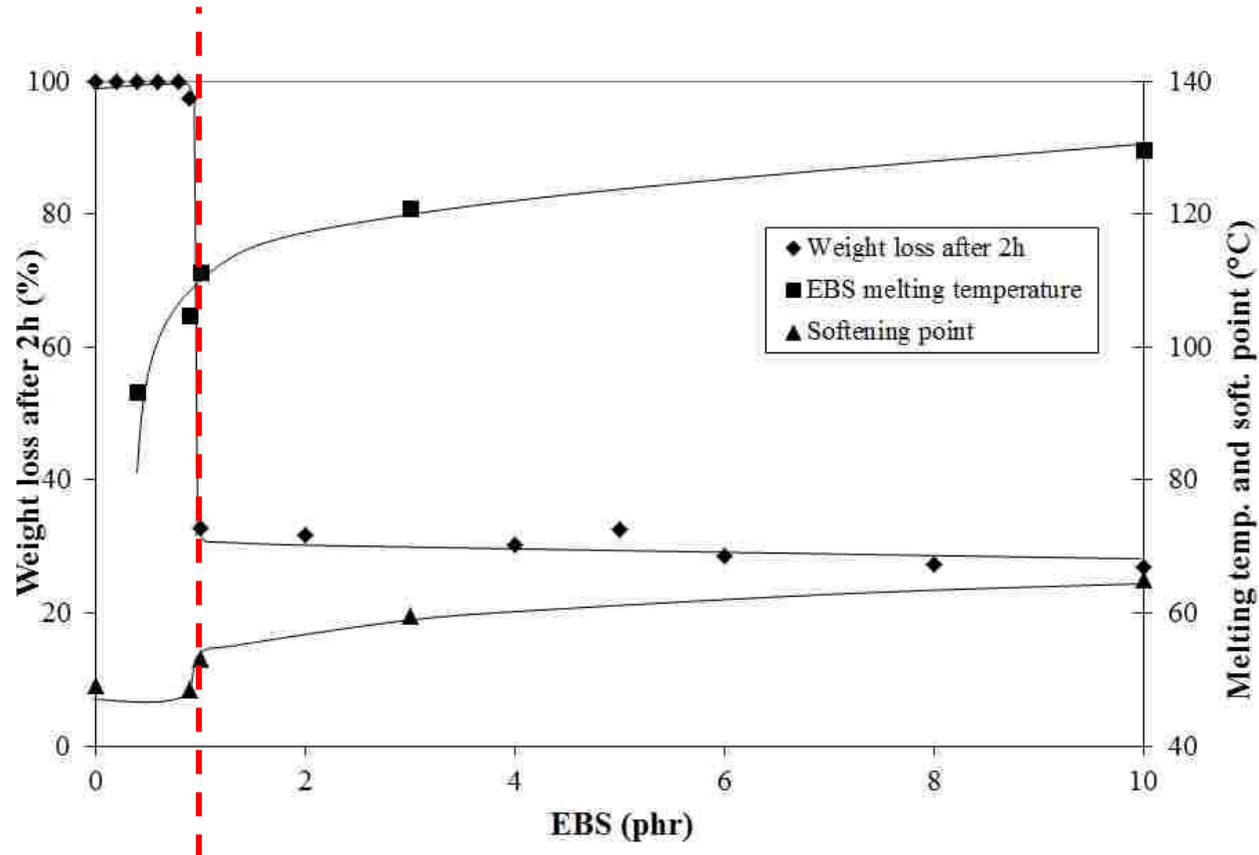


Cera P3 (paraffinica): $T_m = 80 \div 120^\circ\text{C}$



(distribuzione pesi molecolari ridotta)

Concentrazione critica (k)



C < k : nessun effetto

C = k :

- solubilità si riduce
- T_r aumenta

C > k : comportamento
asintotico

(Polacco et al., 2011)

In sintesi

- ❑ Wax-modifiers \neq petroleum waxes (naturalmente presenti nel bitume)

- ❑ Wax-modifiers (indipendentemente dall'origine) si possono distinguere in:
 1. Tipo P (ordinari): miscele di composti paraffinici
 2. Tipo A (modificati): presenza gruppo funzionale ammidico

- ❑ Comp. termico e T_m sono caratteristiche tecniche fondamentali per la selezione della cera.

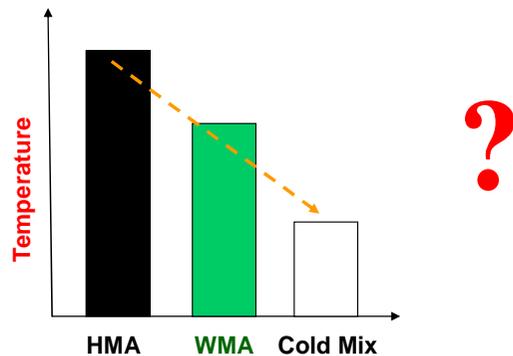
- ❑ Esiste concentrazione critica (k). La concentrazione da impiegare deve essere maggiore di k . k dipende dal tipo di cera (?).

WAX-MODIFIED ASPHALT

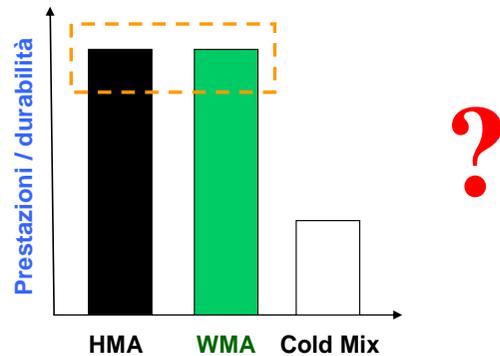
- ❑ Formulazione
- ❑ Struttura e proprietà fisiche
- ❑ Caratteristiche tecniche e prestazionali

Proprietà fisiche

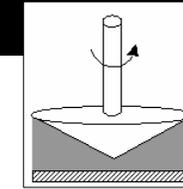
- Proprietà di flusso alle temperature di processo



- Proprietà viscoelastiche alle temperature di esercizio

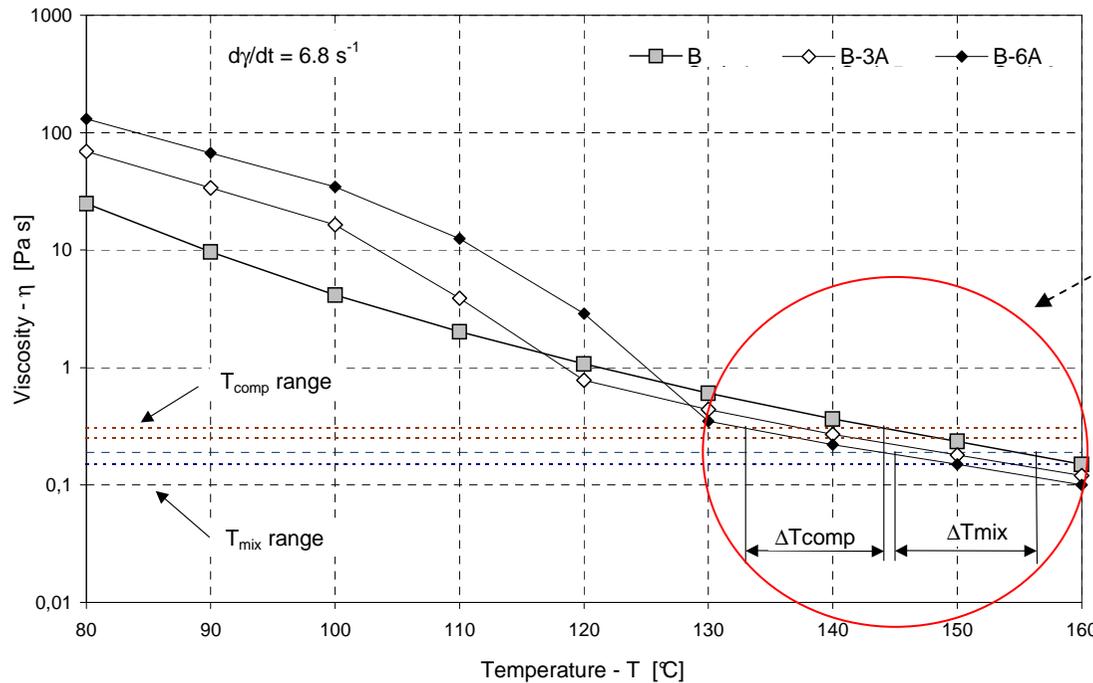


Proprietà di flusso (Effetto WARM)



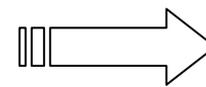
Misure di viscosità rotazionale

- Diagramma viscosità – temperatura per **miscele bitume/cera**

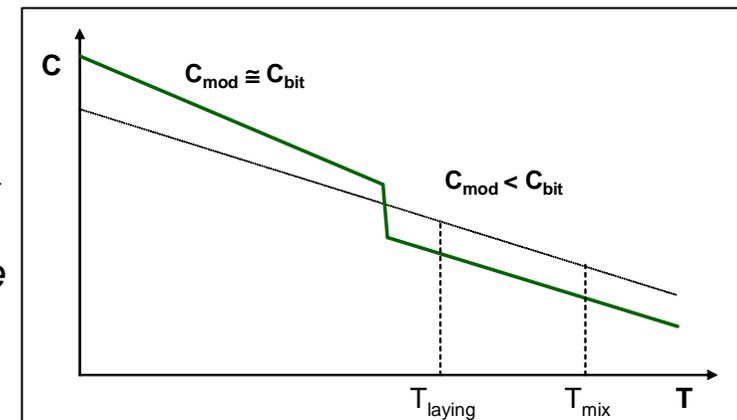


Esiste effetto 'WARM'

Fluidificazione e riduzione di η

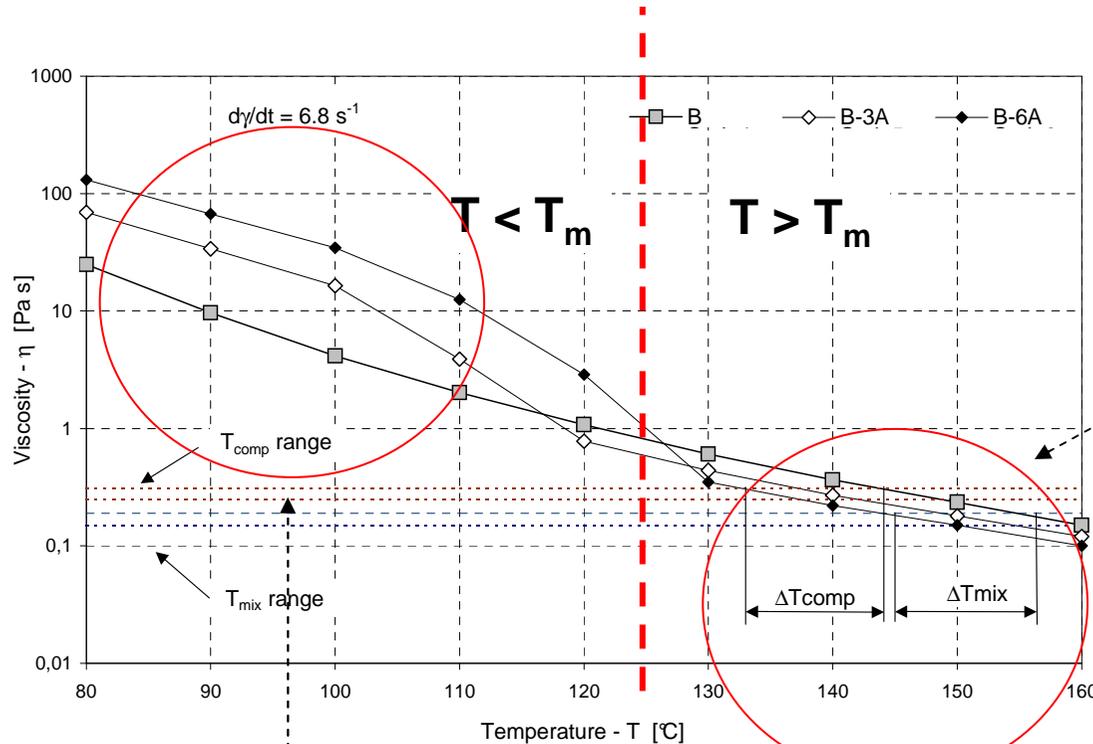


Affinità con caso ideale



(Giuliani, Merusi, 2009)

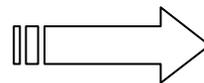
Analisi in due domini di comportamento



T_m = temp. di fusione della cera

Esiste effetto 'WARM'

Fluidificazione e riduzione di η

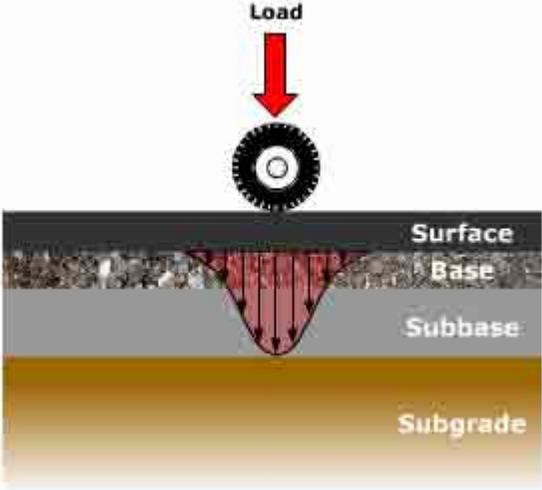


- $T > T_m$ (wax) : fluido Newtoniano

Unico effetto è la riduzione di η

- $T < T_m$ (wax) : ?

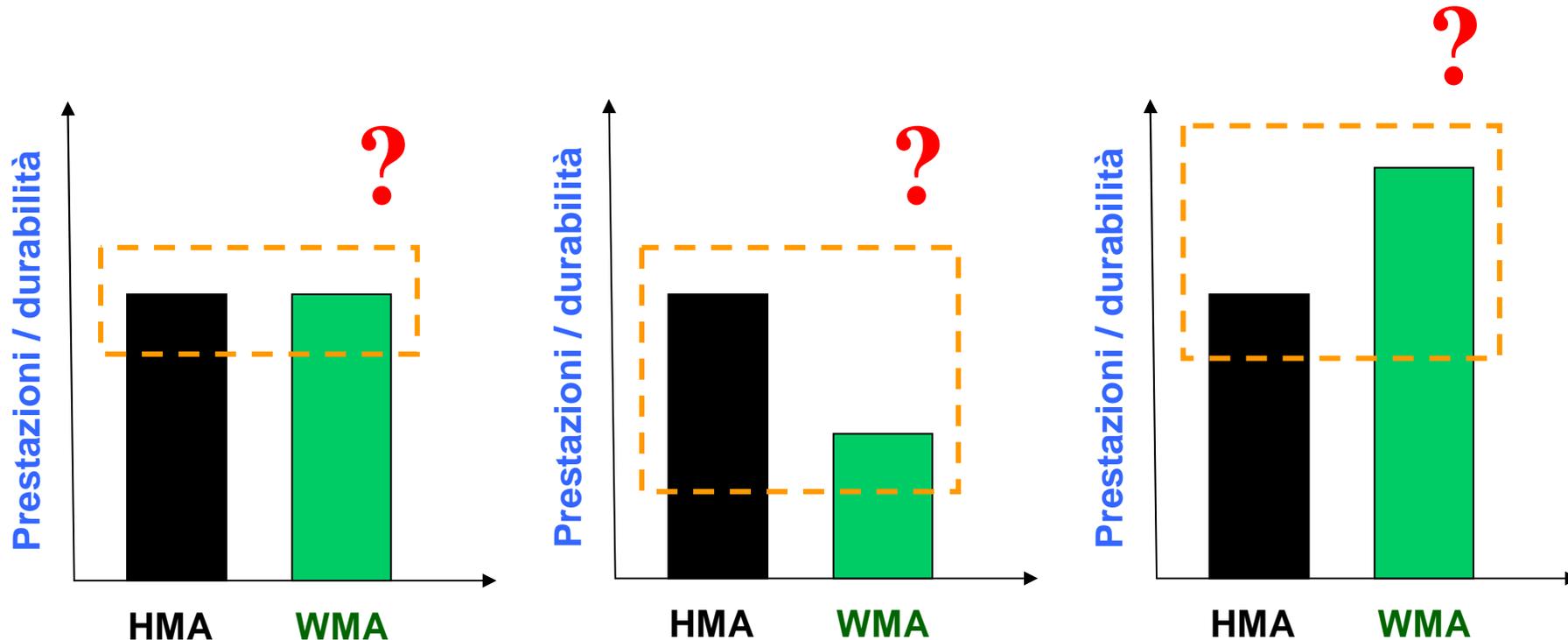
Esiste effetto anche per $T < T_m$!

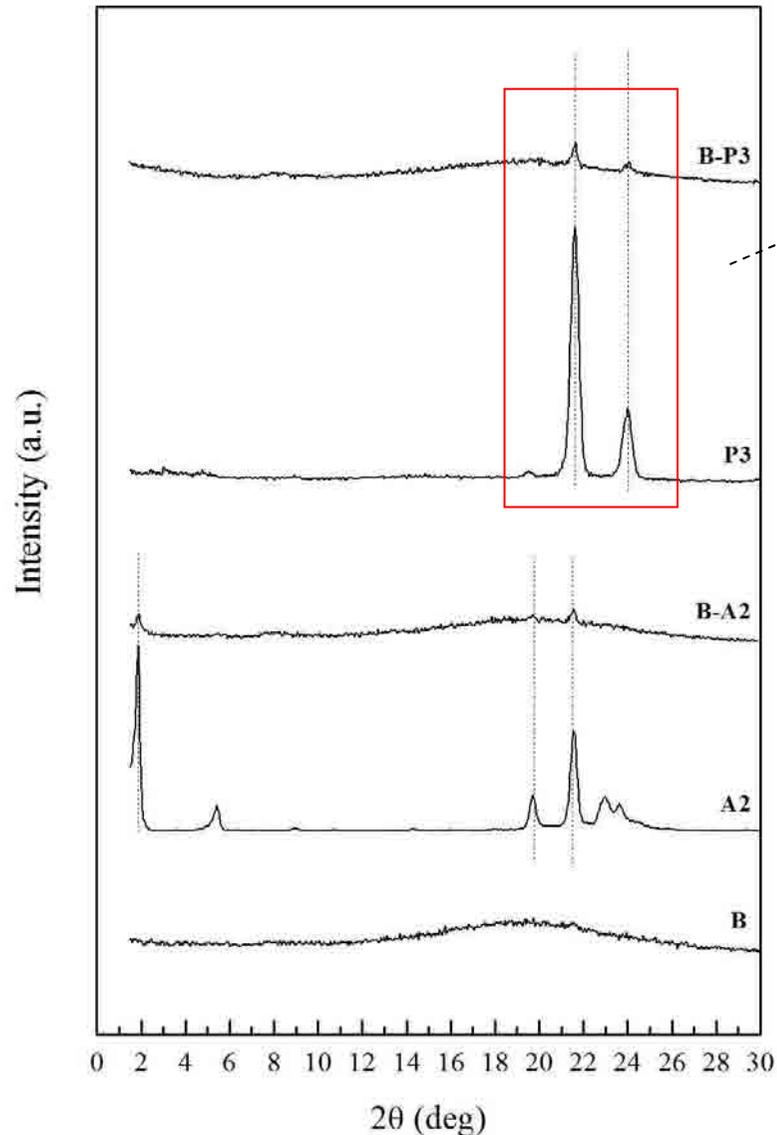
| Temperatura | $T > T_m$ | $T < T_m$ |
|---------------------------------|--|---|
| Condizione operativa |  |  |
| Stato fisico cera | liquido | solido |
| Effetti della modifica con cere | Fluidificazione, riduzione di η | ? |

Effetti alle temperature di esercizio (?)

La presenza della cera introduce variazioni importanti nel comportamento del legante per $T < T_m$?

In termini di prestazioni/durabilità possono verificarsi tre differenti situazioni.





CRISTALLINITA' RESIDUA

I picchi caratteristici della cera sono conservati dopo la miscelazione col bitume.

La miscela bitume / cera è quindi caratterizzata dalla presenza di cera in forma cristallina dispersa all'interno della matrice bituminosa.

Aspetti fondamentali:

1. Quantità cristalli residui
2. Forma e dimensione
3. Conseguenze su proprietà fisiche

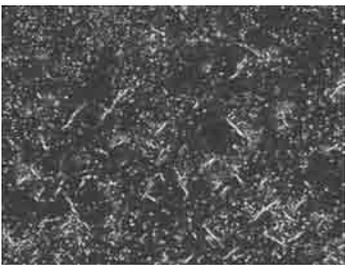
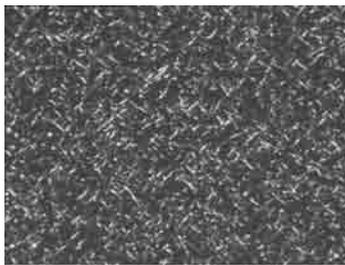
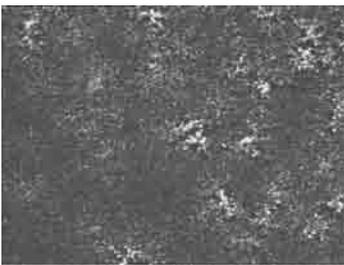
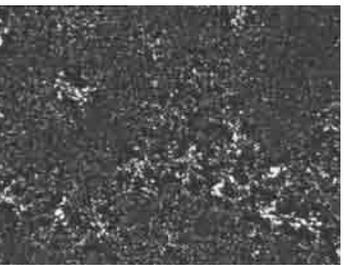
Quantità cristalli residui

| | Pure waxes | | Bitumen/wax blends | | | | $\Delta H_{m,b}/\Delta H_{m,w}$ (-) |
|-----------|-------------------|---------------------------|--------------------|-----------|-------------------|---------------------------|--|
| | $T_{m,w}$ (°C) | $\Delta H_{m,w}$ (J/g) | $T_{g,1}$ (°C) | $T_{g,2}$ | $T_{m,b}$ (°C) | $\Delta H_{m,b}$ (J/g) | |
| B | - | - | -16.9 | 18.7 | - | - | - |
| P1 | 84.7 | 127.8 | -16.6 | 26.4 | 78.6 | 47 | 0.37 |
| P2 | - | 168.3 | -18.2 | 17.2 | - | 95 | 0.57 |
| P3 | 98.9 111 | 214.0 | -16.7 | 18.0 | 84.8 105.7 | 153 | 0.72 |
| A1 | 69.0 145.0 | 18.5 107.5 | -16.7 | 18.0 | 68.5 124.0 | 16 94 | 0.87 0.87 |
| A2 | 146.7 | 124.0 | -18.5 | 18.4 | 126.4 | 107 | 0.86 |

1. Cristallinità residue differenti per 3 cere tipo P
2. Cristallinità residua maggiore per cere tipo A

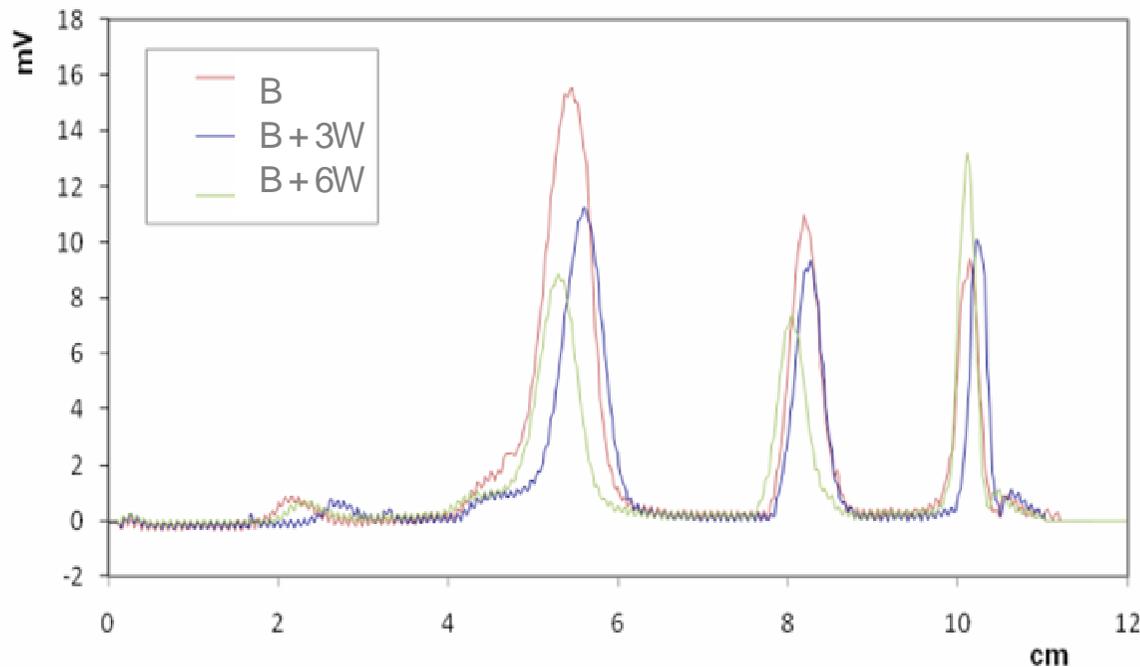
Morfologia POM

Forma e dimensione cristalli residui

| Cera sintetica Fischer-Tropsch | Cera Montan modificata 1 | Cera Montan modificata 2 | Cera Montan naturale | Cera funzionalizzata |
|--|--|---|--|---|
| $-\text{CH}_2 - \text{CH}_2 -$ | $-\text{CH}_2 - \text{CH}_2 -$ | $\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{R}-\text{C}-\text{N}-\text{R}'' \\ \\ \text{R}' \end{array}$ | $-\text{CH}_2 - \text{CH}_2 -$ | $\begin{array}{c} \text{O} \\ \parallel \\ \text{R}-\text{C}-\text{N}-\text{R}'' \\ \\ \text{R}' \end{array}$ |
|  |  |  |  |  |
| (B) | (B) | (C) | (A) | (C) |

- (A) Scarsa cristallinità residua
- (B) Evidente cristallinità residua
- (C) Domini cristallini interconnessi

| Asphalt binder | Composition | | | | Ic |
|----------------|-------------|--------|-----------|-----------|------|
| | [%] | | | | |
| | Asphaltenes | Resins | Aromatics | Saturates | [-] |
| B | 15.4 | 23.3 | 59.1 | 2.2 | 0.21 |
| B-6W | 23.2 | 24.5 | 50.1 | 2.2 | 0.34 |
| B-6L | 19.8 | 22.2 | 55.8 | 2.2 | 0.28 |



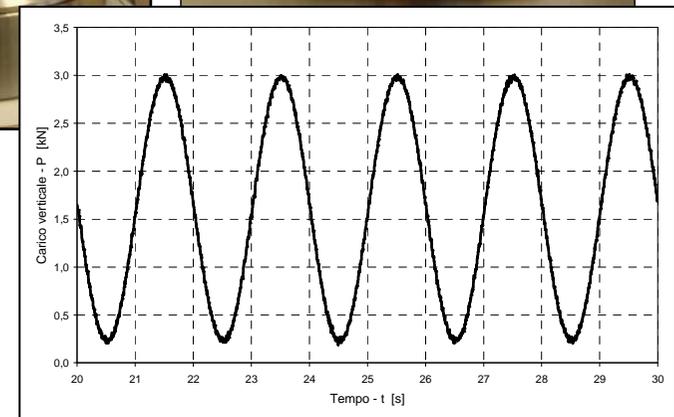
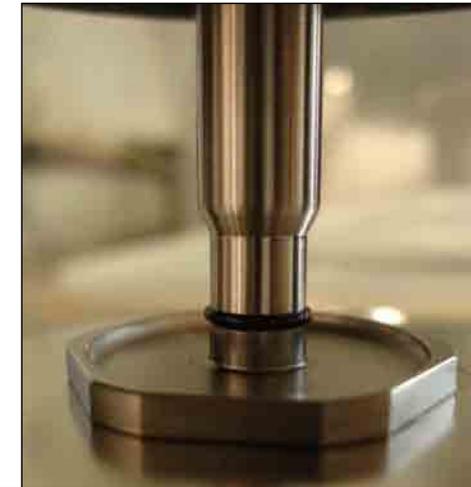
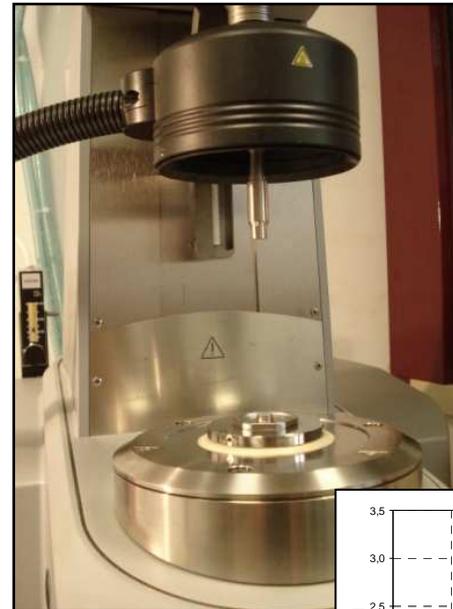
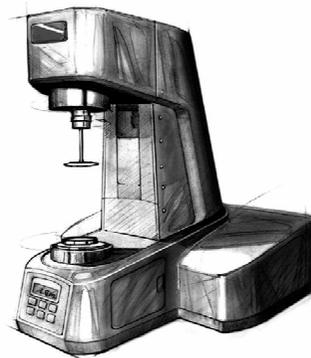
1. Non risulta aumento nel contenuto di composti saturi !
2. Aumenta invece l'abbondanza relativa della frazione più polare (asfalteni) !!

(Merusi et al., 2010)

Conseguenze cristallinità residua su proprietà fisiche

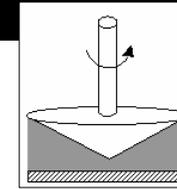
Diversi domini di temperatura

- Bending Beam Rheometer (BBR)
- Dynamic Shear Rheometer (DSR)
(flusso, DMA, creep)



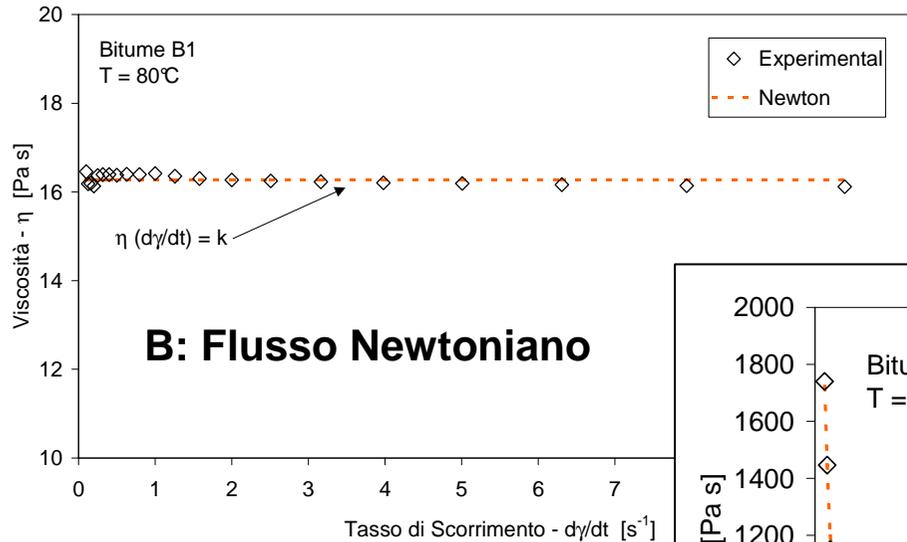
Modulo complesso: $|G^*|$

Angolo di fase: δ



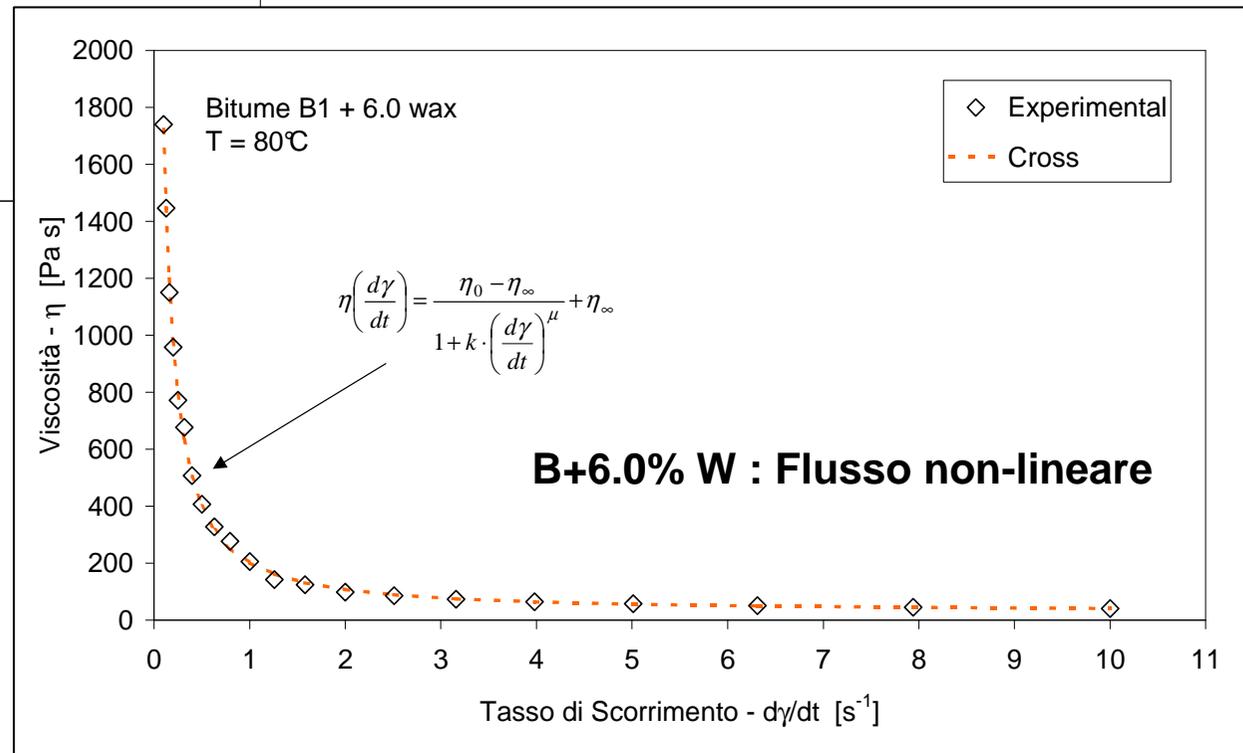
Misure di viscosità rotazionale

Bitume di base (B)



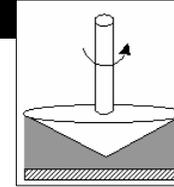
B: Flusso Newtoniano

Bitume mod. con cera FT (B+6.0% W)

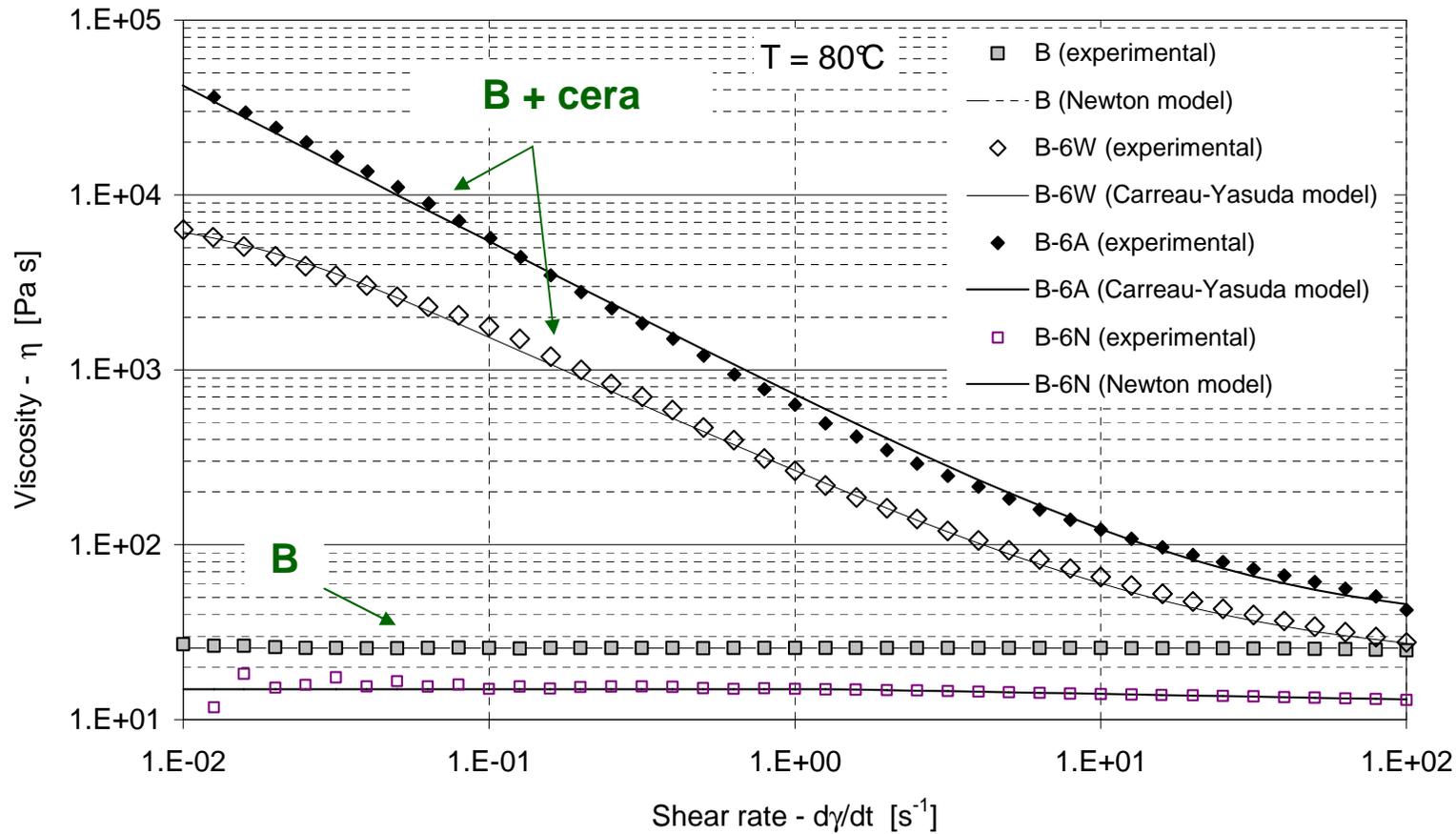


B+6.0% W : Flusso non-lineare

Bitume di base (B) + modifiche con diverse cere

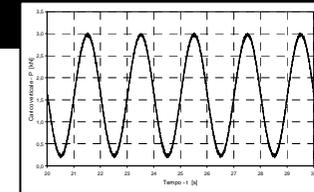


Misure di viscosità rotazionale

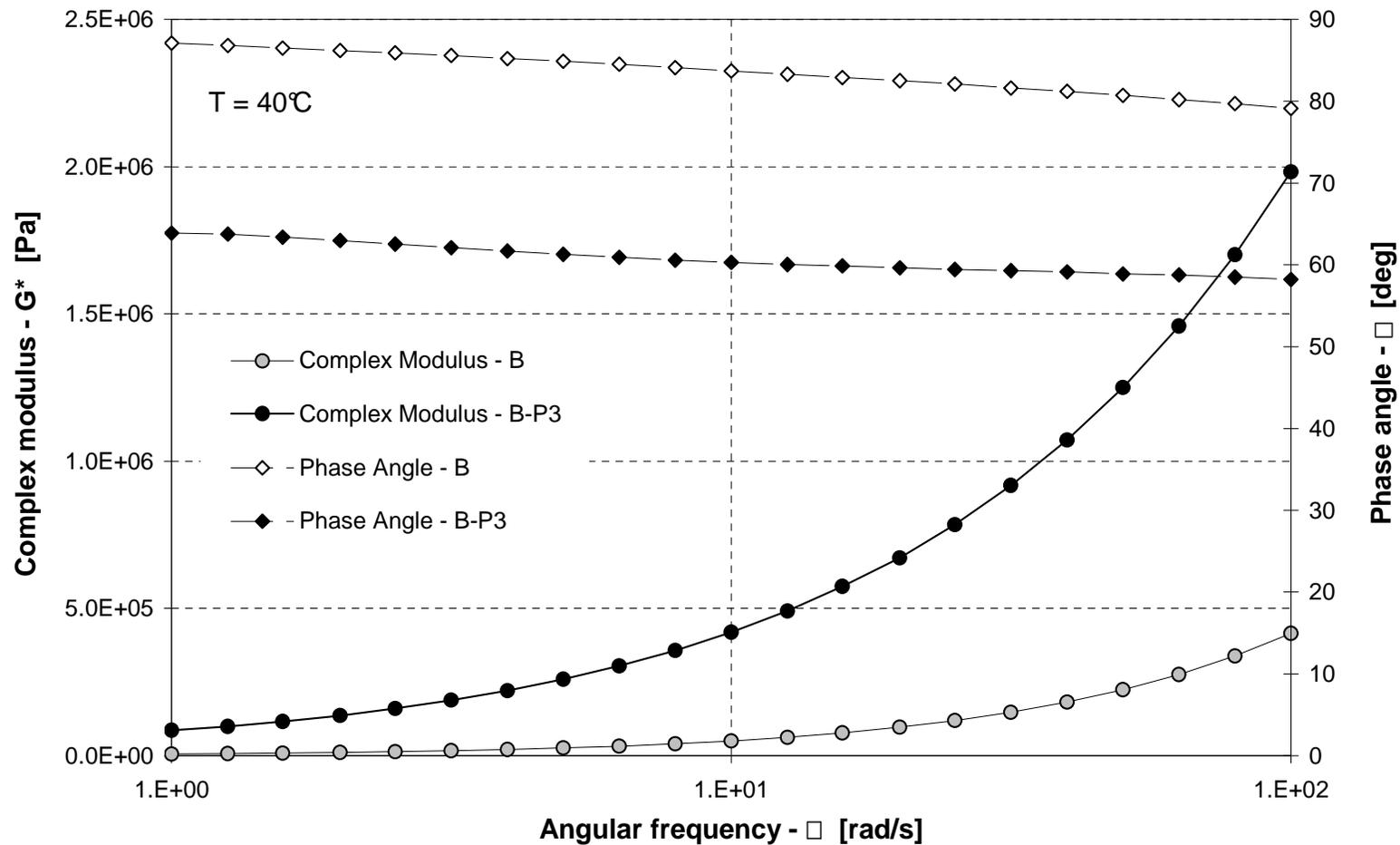


(Giuliani, Merusi, 2009)

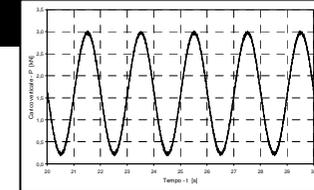
Conseguenze su modulo complesso e angolo di fase



DMA



Conseguenze su modulo complesso e angolo di fase



DMA

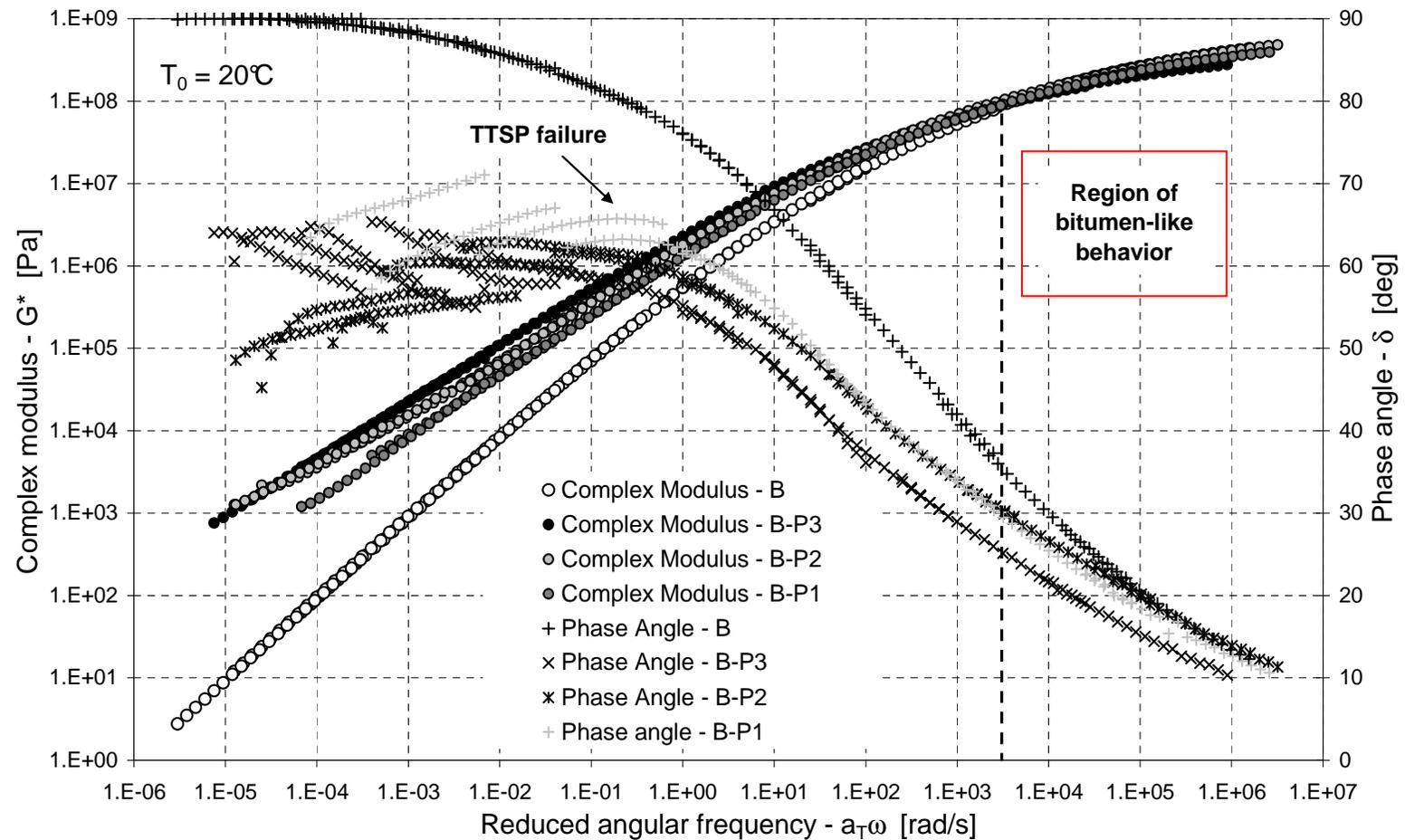
| Blend | T = 40°C | | T = 60°C | | T = 80°C | |
|-------------|----------|-------|----------|-------|----------|-------------|
| | G* | δ | G* | δ | G* | δ |
| | (Pa) | (deg) | (Pa) | (deg) | (Pa) | (deg) |
| B | 50102 | 83.7 | 1769 | 88.6 | 153 | 90.0 |
| B-P1 | 199740 | 65.1 | 9211 | 67.6 | 109 | 90.0 |
| B-P2 | 275150 | 62.8 | 26943 | 55.0 | 3858 | 51.6 |
| B-P3 | 419510 | 60.3 | 49208 | 58.7 | 4264 | 61.7 |
| B-A1 | 198390 | 56.2 | 28413 | 41.0 | 17675 | 23.5 |
| B-A2 | 178660 | 60.6 | 29616 | 42.0 | 24845 | 22.7 |

1. Esiste effetto su comportamento viscoelastico;
2. $|G^*|$ aumenta e δ diminuisce in accordo con cristallinità residua.

Viscoelasticità lineare (TTSP)

CURVE MAESTRE (DSR)

Modifica con cere **tipo P** (paraffiniche)



Viscoelasticità lineare (TTSP)

CURVE MAESTRE (DSR)

Modifica con cere **tipo P** (paraffiniche)

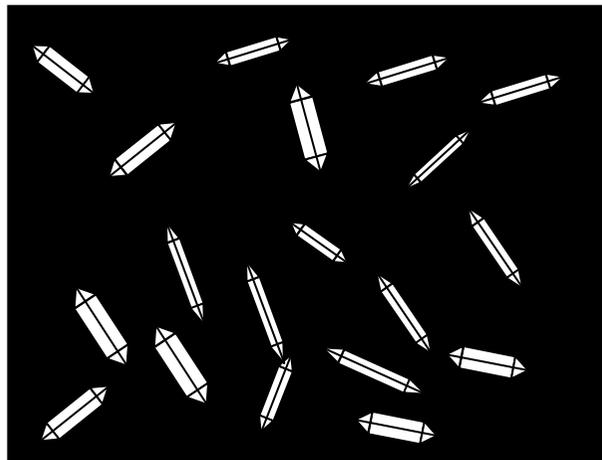
1. **Regione alte ω_r** : comportamento affine a bitume base. Nessuna variazione significativa (*anche secondo risultati BBR*).
2. **Regione intermedia**: Incremento di consistenza. $|G^*|$ aumenta e δ diminuisce in accordo con cristallinità residua.
Effetto su reologia: $P1 < P2 < P3$
Cristallinità residua: $P1 = 0.37$, $P2 = 0.57$, $P3 = 0.72$.
3. **Regione basse ω_r** : Materiale diventa non termo-reologicamente semplice. TTSP non applicabile per prossimità fusione cera.

INTERPRETAZIONE STRUTTURALE

Modifica con cere tipo P (paraffiniche)

1. Variazioni in η e $|G^*|$

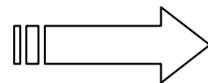
Spiegabile con presenza stessa dei cristalli che, in qualità di PARTICELLE SOLIDE disperse, limitano la mobilità della matrice bituminosa.



Matrice bituminosa continua

+

cristalli dispersi



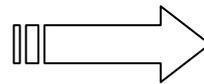
EFFETTO FILLER

INTERPRETAZIONE STRUTTURALE. Modifica con cere tipo P (paraffiniche)

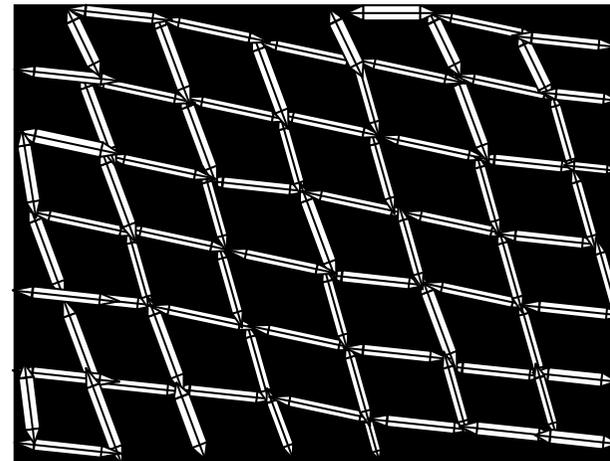
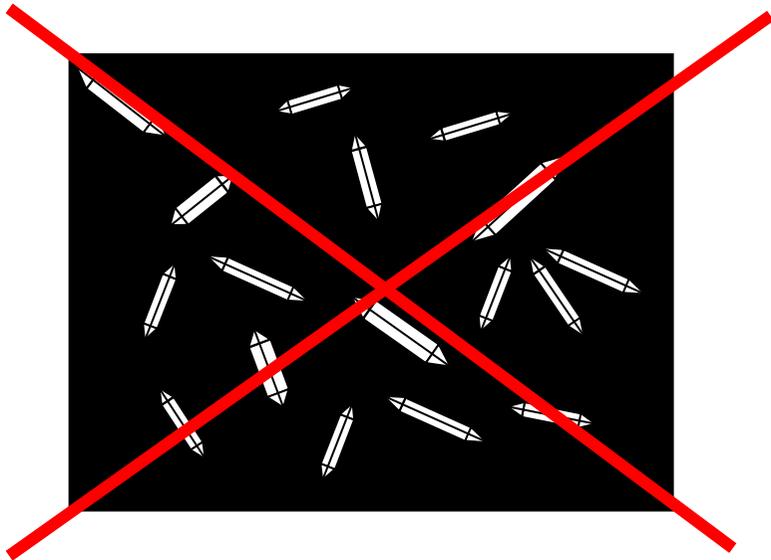
2. Variazioni in δ ?

Occorre prendere in considerazione l'ABILITA' DEI CRISTALLI di associarsi in STRUTTURE INTERCONNESSE che possano immagazzinare energia per poi restituirla al momento della rimozione del carico.

~~EFFETTO FILLER~~



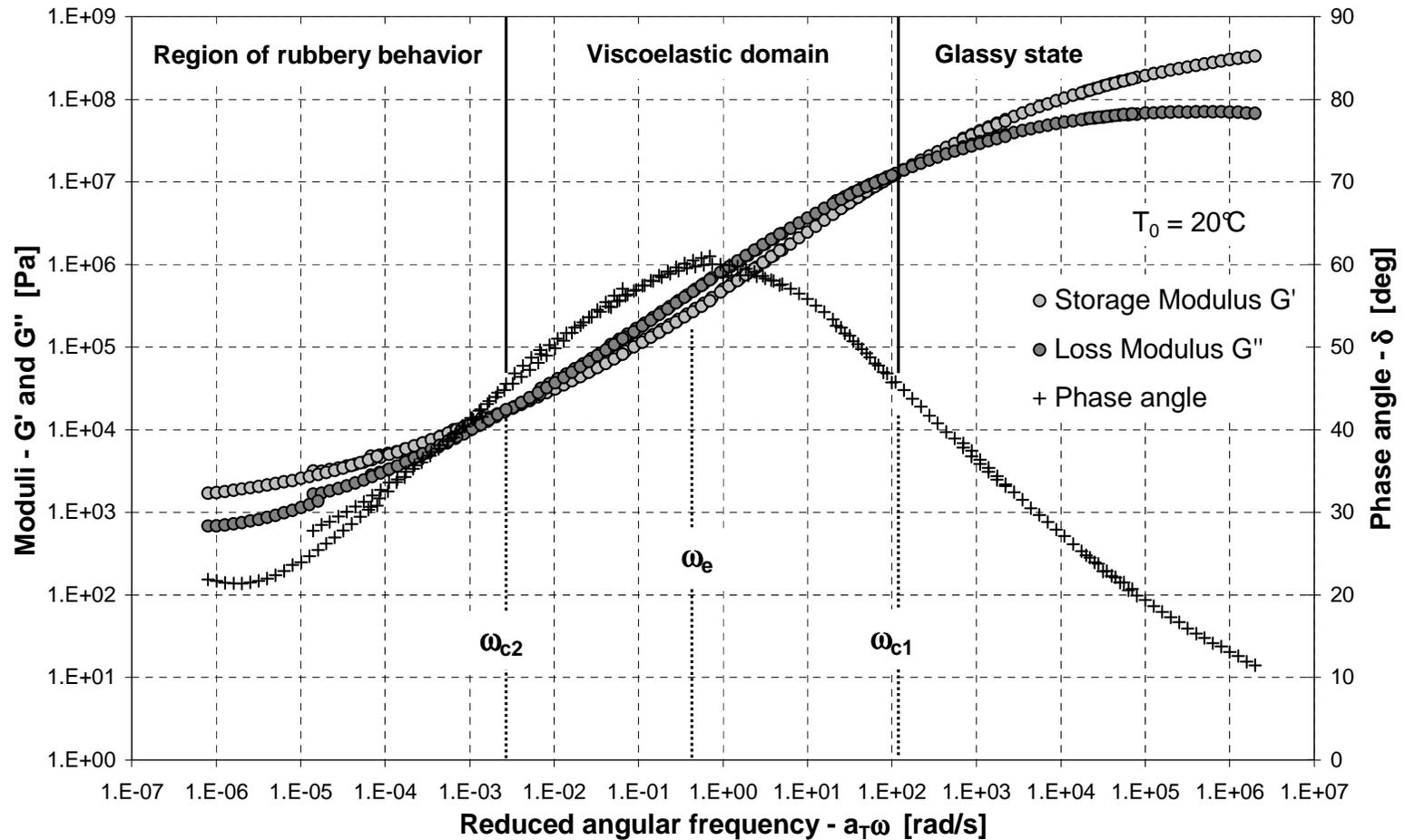
EFFETTO NETWORK



Viscoelasticità lineare (TTSP)

CURVE MAESTRE (DSR)

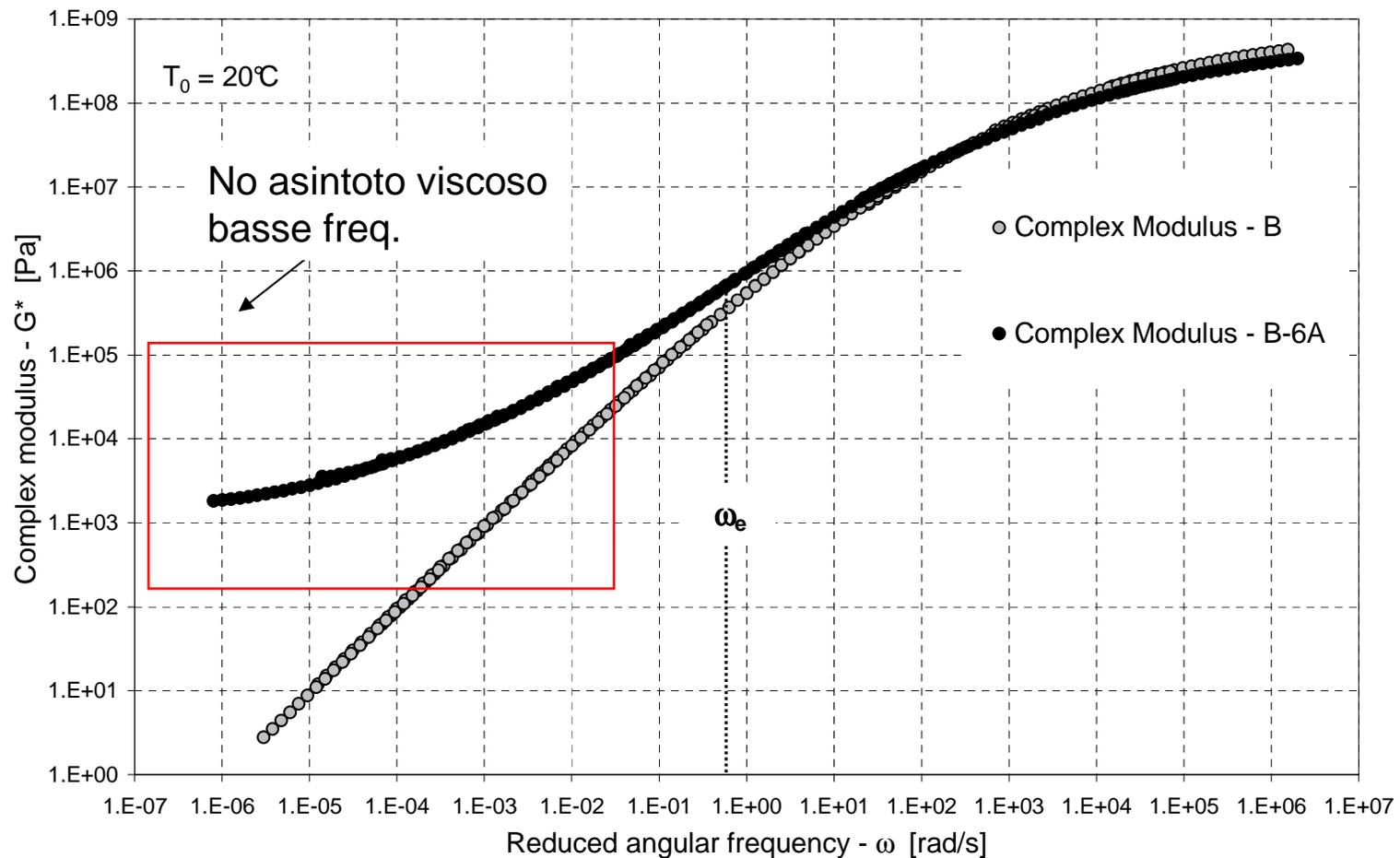
Modifica con cere tipo A (ammidiche)



Viscoelasticità lineare (TTSP)

CURVE MAESTRE (DSR). Confronto $|G^*|$

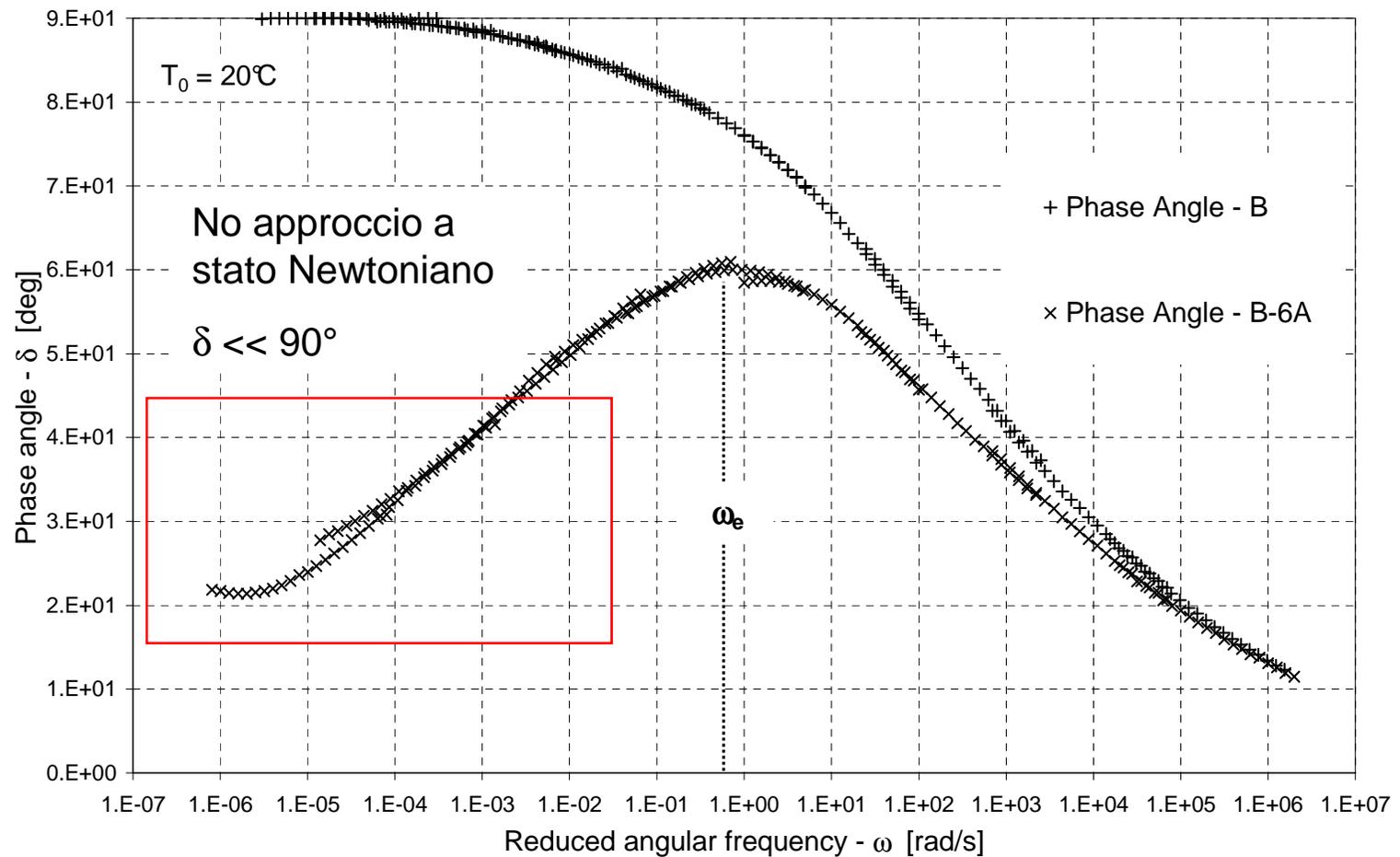
Modifica con cere tipo A (amidiche)



Viscoelasticità lineare (TTSP)

CURVE MAESTRE (DSR). Confronto δ

Modifica con cere tipo A (amidiche)



Viscoelasticità lineare (TTSP)

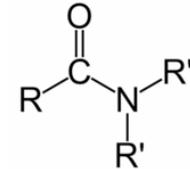
CURVE MAESTRE (DSR)

Modifica con cere tipo A (ammidiche)

1. **Regione alte ω_r** : comportamento affine a bitume base e modifiche paraffiniche. Nessuna variazione significativa.
2. **Regione intermedia**: Angolo di fase identifica valore massimo!
Completa redistribuzione contributi elastico e viscoso.
3. **Regione basse ω_r** : Comportamento affine a solido viscoelastico con assenza di transizione Newtoniana.

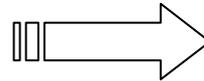
INTERPRETAZIONE STRUTTURALE

Modifica con cere **tipo A** (ammidiche)

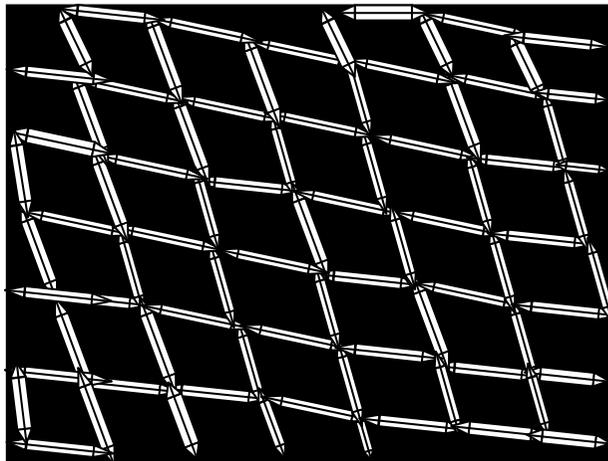


La maggiore polarità delle molecole dovuta al gruppo ammidico produce legami fra strutture cristalline e MICELLE ASFALTENICHE. Di conseguenza si hanno reticoli più stabili.

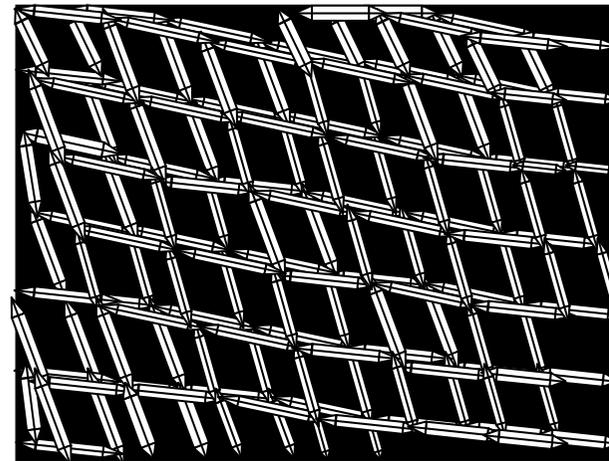
NETWORK (I Ordine)



NETWORK (II Ordine)



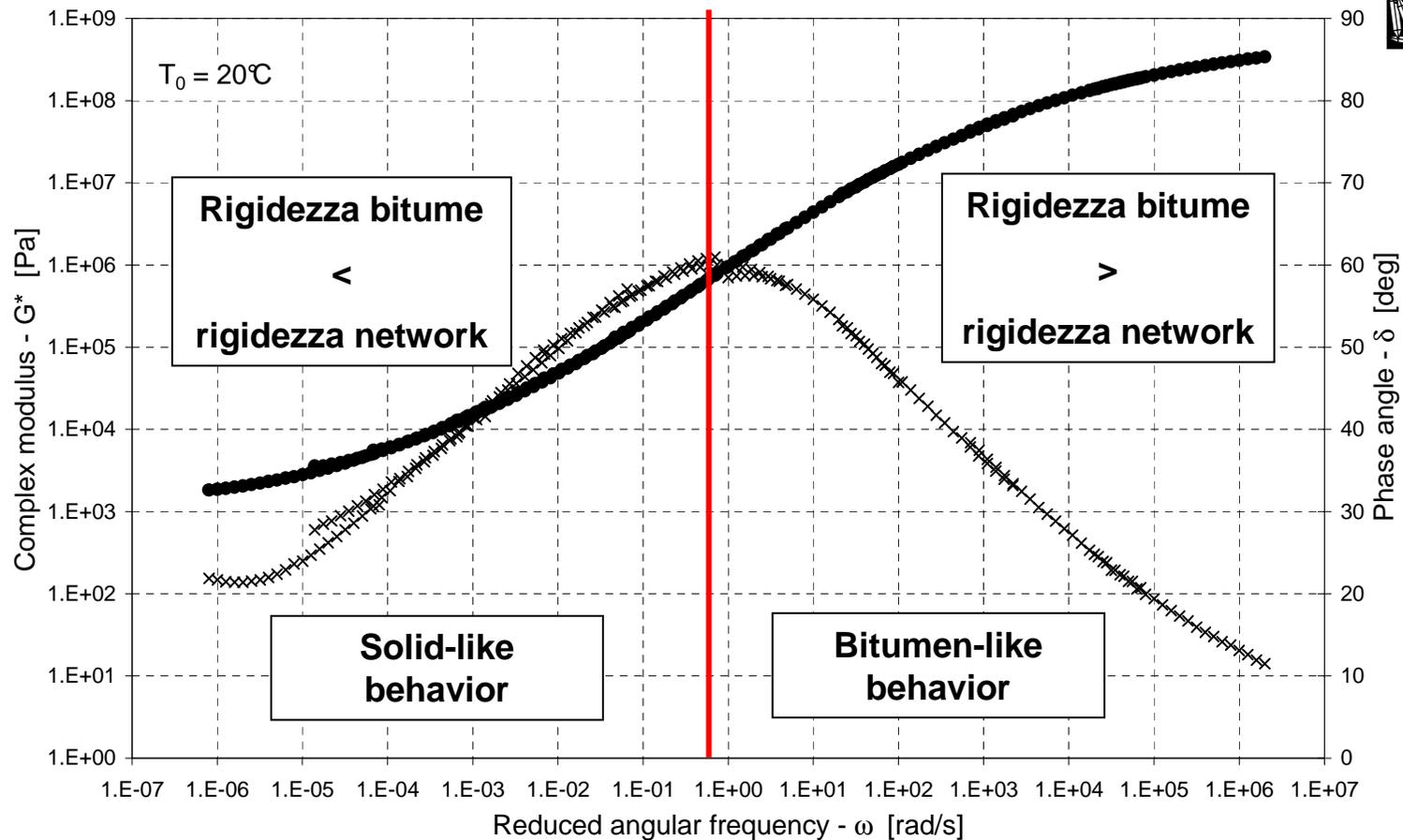
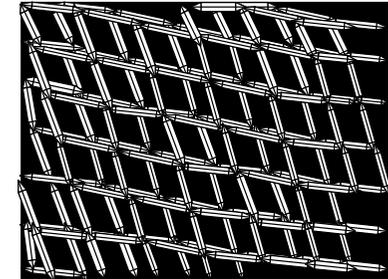
(cera)



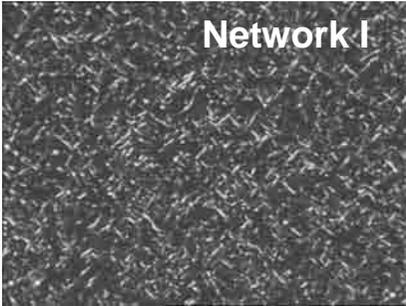
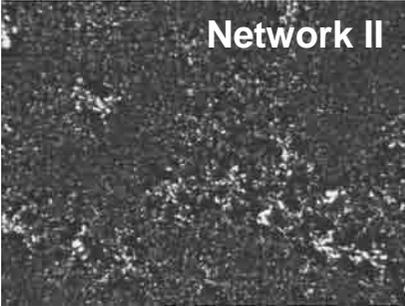
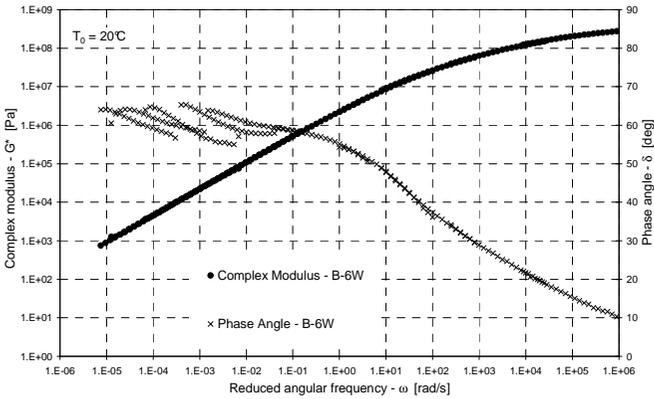
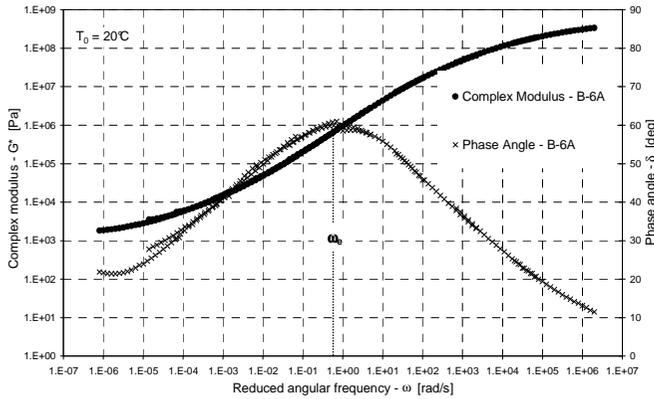
(associazioni cera / asfalteni)

INTERPRETAZIONE STRUTTURALE

Modifica con cere tipo A (ammidiche)



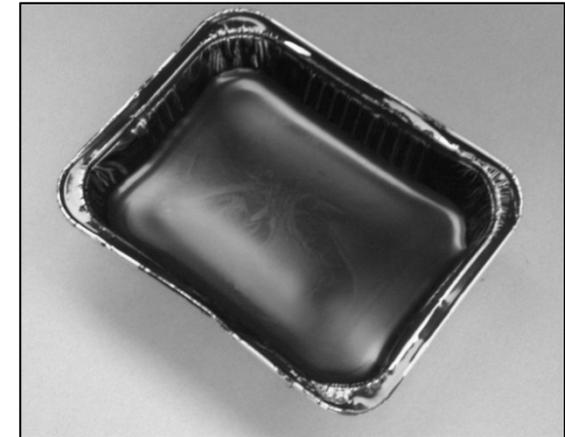
In sintesi

| Tipo modifica | Cere tipo P | Cere tipo A |
|-----------------|---|---|
| Crist. residua | Variabile (0.37÷0.72) | 0.87 |
| Struttura |  <p style="text-align: center;">Network I</p> |  <p style="text-align: center;">Network II</p> |
| Comp. meccanico |  <p style="text-align: center;">Liquido alta consistenza</p> |  <p style="text-align: center;">→ solido viscoel.</p> |

WAX-MODIFIED ASPHALT

- ❑ Formulazione
- ❑ Struttura e proprietà fisiche
- ❑ Caratteristiche tecniche e prestazionali

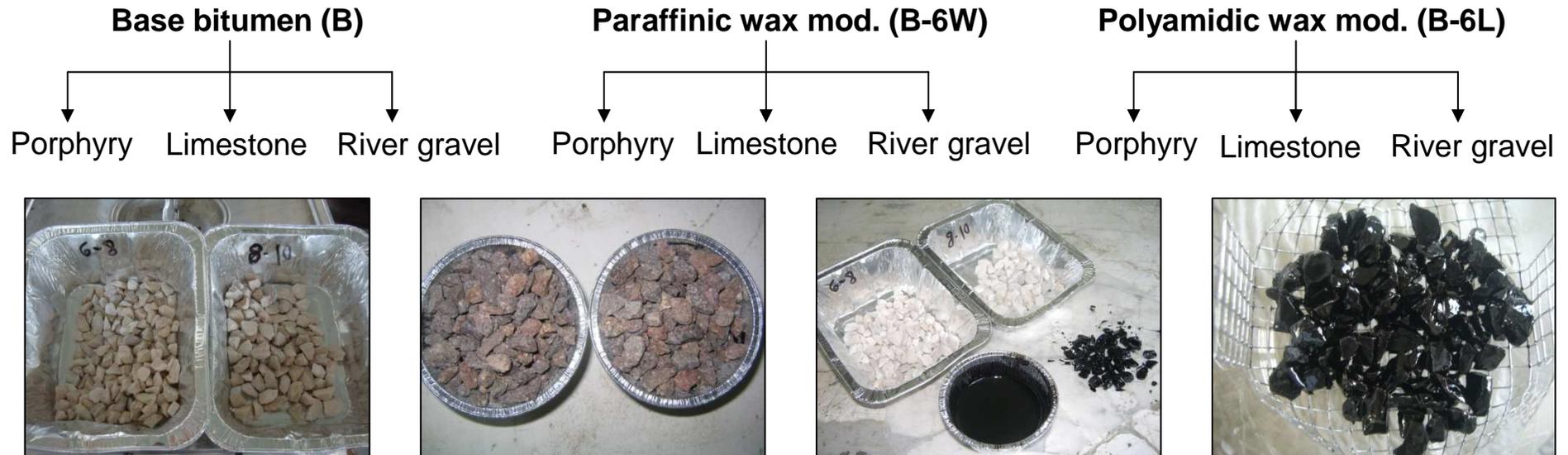
| Blend | Wax type | Pen. at 25°C | Soft. Point T _{r&b} | Pen. Index PI | Viscosity at 160°C |
|-------|----------|--------------|-------------------------------------|------------------|--------------------|
| | | (dmm) | (°C) | (-) | (Pa·s) |
| B | - | 55 | 50.7 | -0.8 | 0.15 |
| B-P1 | P1 | 29 | 68.1 | +1.2 | 0.11 |
| B-P2 | P2 | 26 | 97.0 | +4.7 | 0.11 |
| B-P3 | P3 | 26 | 95.5 | +4.6 | 0.11 |
| B-A1 | A1 | 28 | 116.8 | +6.7 | 0.10 |
| B-A2 | A2 | 24 | 115.9 | +6.3 | 0.10 |



| | Inferior limit temperature | | Intermediate limit temperature | | Superior limit temperature | |
|-------------|----------------------------|-----------------------|--------------------------------|-----------------------|----------------------------|-----------------------|
| | a | T_{LS} | b | T_{IS} | c | T_{HS} |
| | (°C ⁻¹) | (°C) | (°C ⁻¹) | (°C) | (°C ⁻¹) | (°C) |
| B | -52.4 | -13.1 | -0.183 | 12.8 | -0.203 | 59.0 |
| B-P1 | -45.9 | -13.4 | -0.149 | 15.7 | -0.172 | 71.5 |
| B-P2 | -62.6 | -13.2 | -0.132 | 16.9 | -0.158 | 77.8 |
| B-P3 | -46.0 | -12.9 | -0.126 | 15.2 | -0.147 | 81.2 |
| B-A1 | -64.6 | -13.4 | -0.134 | 14.4 | -0.071 | 104.0 |
| B-A2 | -51.6 | -15.0 | -0.148 | 16.9 | -0.100 | 90.7 |

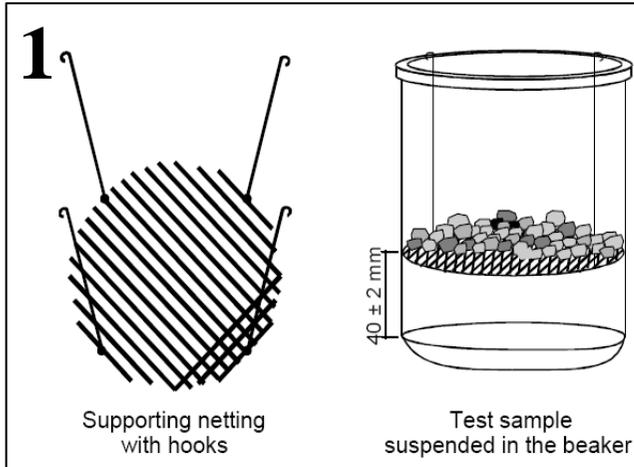
MISCELE BITUME/AGGREGATI LAPIDEI

- Due differenti modifiche (cera paraffinica e cera ammidica)
- Tre differenti tipologie di aggregati lapidei (calcare, porfido, siliceo)
- Composizione campioni: 30 ± 0.5 g di aggregati $8 \div 10$ mm + 30 ± 0.5 g di aggregati $6.3 \div 8$ mm



Affinità bitume-aggregato

SUPERFICI 'SPOGLIATE' DOPO CONDIZIONAMENTO IN ACQUA

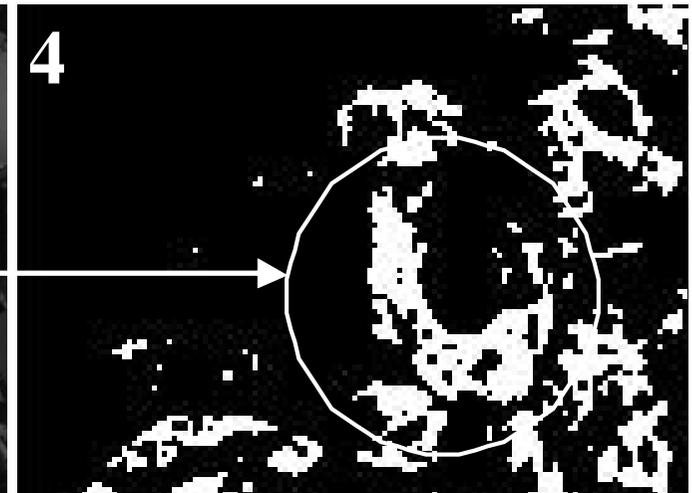
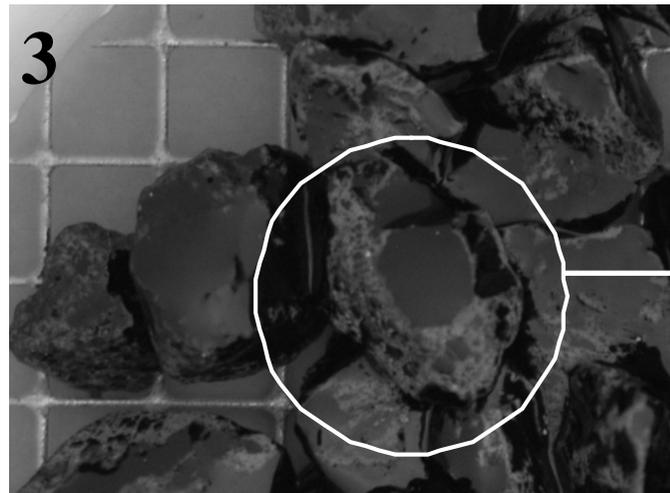


Test di spogliamento convenzionale:

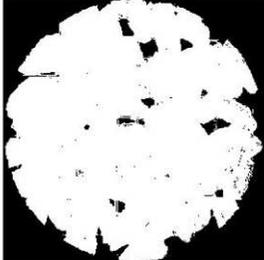
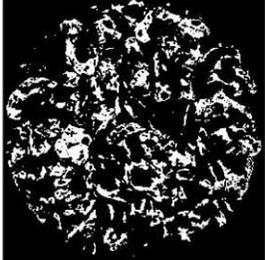
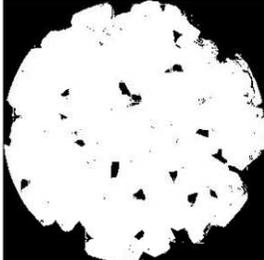
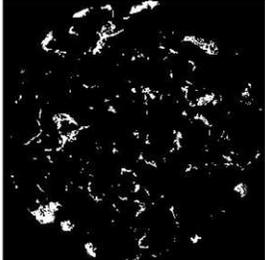
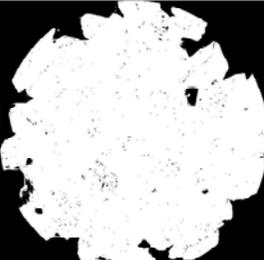
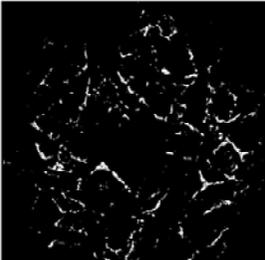
- miscela bitume / aggregati
- condizionamento in acqua (30 min.)

ANALISI DELLE IMMAGINI

Identificazione coordinate cromatiche delle aree soggette a spogliamento



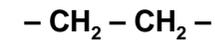
Affinità bitume-aggregato

| Mixture type | Step 1. Asphalt mixture image acquisition | Step 2. Identification of the sample total surface (white) | Step 3. Identification of the sample stripped surface (white) |
|----------------------|---|--|---|
| C-B (sample 1) |  |  |  |
| C-B-6W (sample 3) |  |  |  |
| C-B-6L (sample 1) |  |  |  |

B
(Base bitumen)

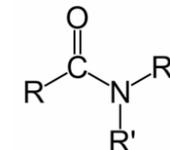
S = 20.4%

B-6W
(Modified with **paraffinic wax**)



S = 6.2%

B-6L
(Modified with **polyamidic wax**)



S = 3.2%

Affinità bitume-aggregato



Cambiamento delle proprietà fisiche superficiali?



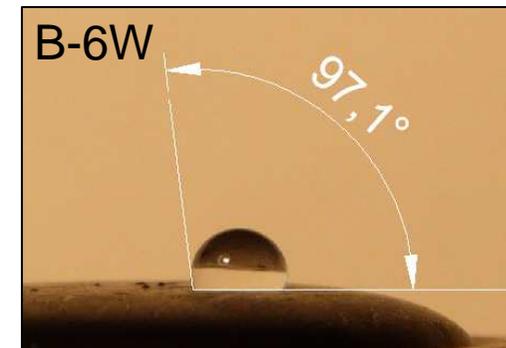
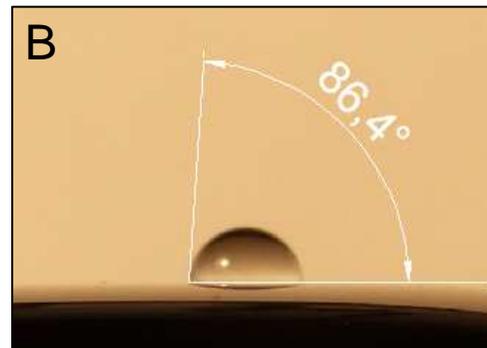
| Binder | Contact angle - θ [deg] | | | |
|-------------|--------------------------------|----------|-------------------------------|----------|
| | Water drop volume = 2 μ L | | Water drop volume = 5 μ L | |
| | Average | St. Dev. | Average | St. Dev. |
| B | 83.8 | 2.7 | 88.1 | 1.8 |
| B-6W | 90.0 | 3.1 | 93.2 | 1.1 |
| B-6L | 89.6 | 3.2 | 91.8 | 2.8 |

θ (B) < 90°

θ (B-6W, B-6L) \geq 90°



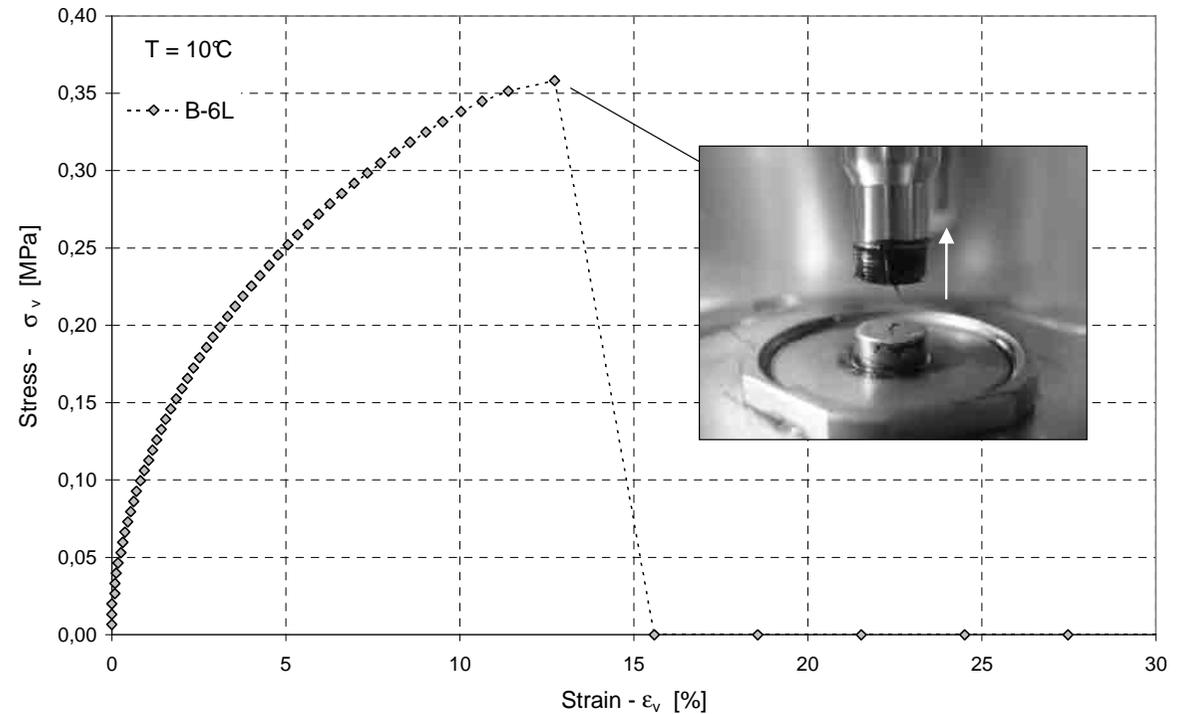
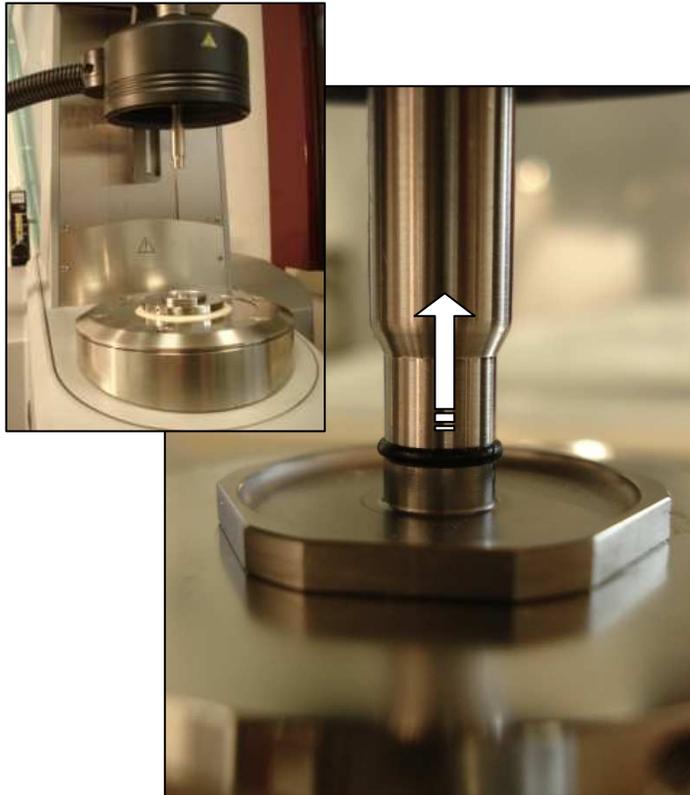
Riduzione della affinità bitume-acqua



Affinità bitume-aggregato in presenza di cera

Criterio di analisi

Misura dello spostamento verticale in presenza di uno sforzo normale N.

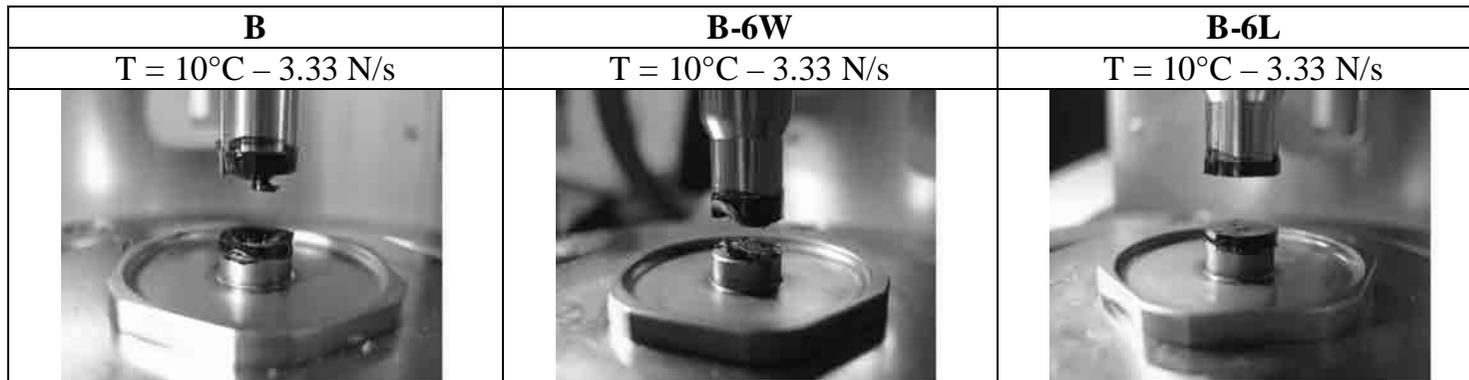


Configurazioni di prova:

$T = 10^\circ\text{C}$

- Low stress rate (0.33 N/s)
- High stress rate (3.33 N/s)

3.33 N/s: Frattura coesiva



| Binder | Low stress rate (0.33 N/s) | | | | High stress rate (3.33 N/s) | | | |
|--------|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------|----------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------|----------------|
| | $\sigma_{v \text{ lim}}$ (MPa) | $\epsilon_{v \text{ lim}}$ (%) | AFC (MPa) | Failure (-) | $\sigma_{v \text{ lim}}$ (MPa) | $\epsilon_{v \text{ lim}}$ (%) | AFC (MPa) | Failure (-) |
| B | 0.32 | 14.69 | 2.16 | A | 0.51 | 8.21 | 6.24 | A/C |
| B-6W | 0.47 | 12.92 | 3.64 | A | 0.39 | 3.00 | 12.85 | C |
| B-6L | 0.34 | 9.98 | 3.37 | A | 0.52 | 5.41 | 9.62 | C |

In sintesi

- ❑ Variazioni dei parametri di consistenza convenzionali.
 - Riduzione del valore di penetrazione a 25°C.
 - Marcato incremento della temperatura di rammollimento.

- ❑ Variazione degli indicatori SHRP con estensione PG significativa
 - Incremento livello prestazionale alle alte temperature di esercizio.

- ❑ No impatto negativo su affinità bitume/aggregati anche in presenza di acqua
 - Riduzione spogliamento in test convenzionali
 - Riduzione angolo di contatto con acqua
 - Adesione / coesione non subiscono significative riduzioni (parziale accordo con prove PATTI)

Sommario

- Warm Mix Asphalt e modifiche con cere
- Wax modifiers
- Formulazione wax-modified binders
- Proprietà fisiche e struttura
- Caratteristiche tecniche e prestazionali
- ??

