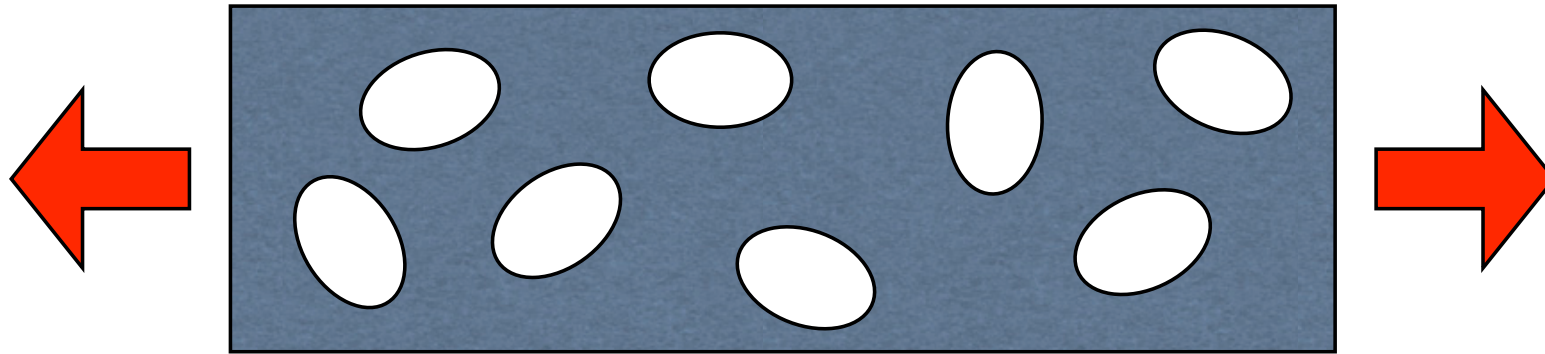


Proprietà meccaniche dei compositi

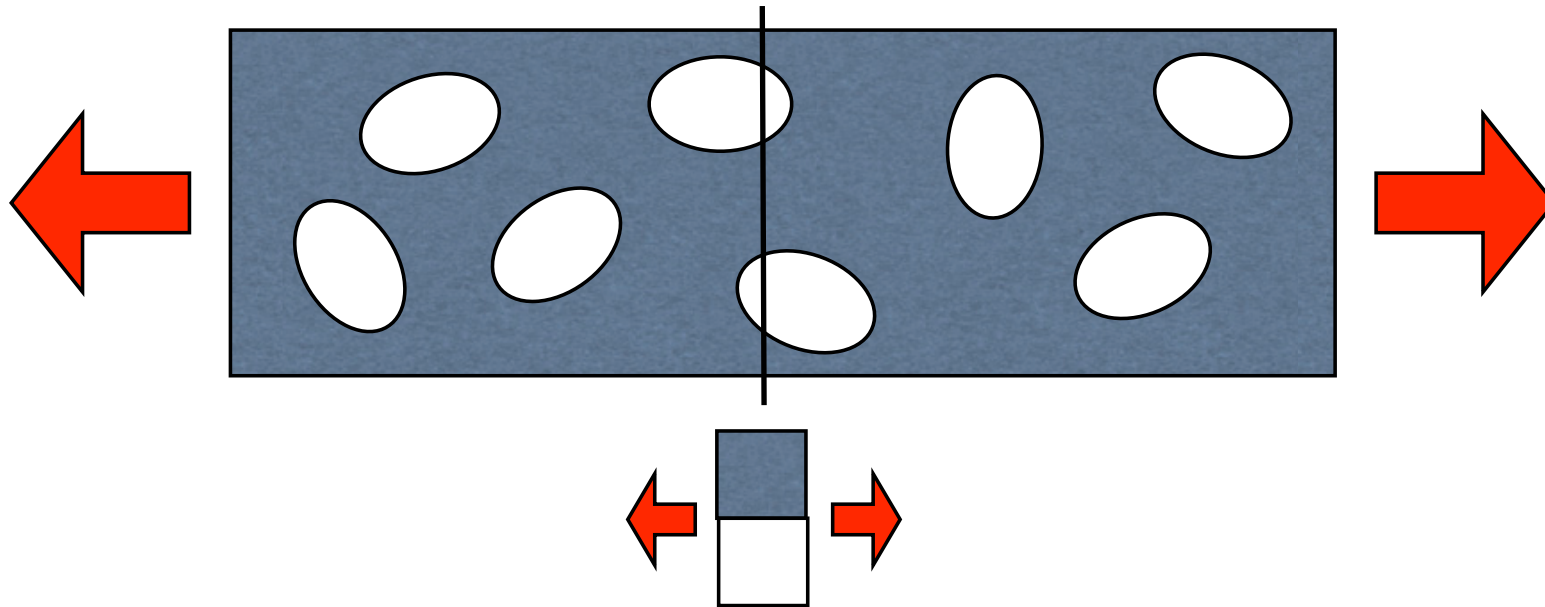
Calcolo moduli elastici
Caso inclusioni random
Fibre unidirezionali
Resistenze a rottura
Effetto orientazione

Calcolo modulo elastico: inclusioni random



- Deformazione puramente elastica ϵ , ϵ_f nelle fibre, ϵ_m nella matrice, carico σ applicato, σ_f nelle fibre e σ_m nella matrice
- ϕ : frazione volumetrica di inclusioni o fibre
- Matrice con modulo elastico E_m
- Inclusioni (fibre corte) con modulo elastico E_f
- Distribuzione stocastica delle forme, orientazione random

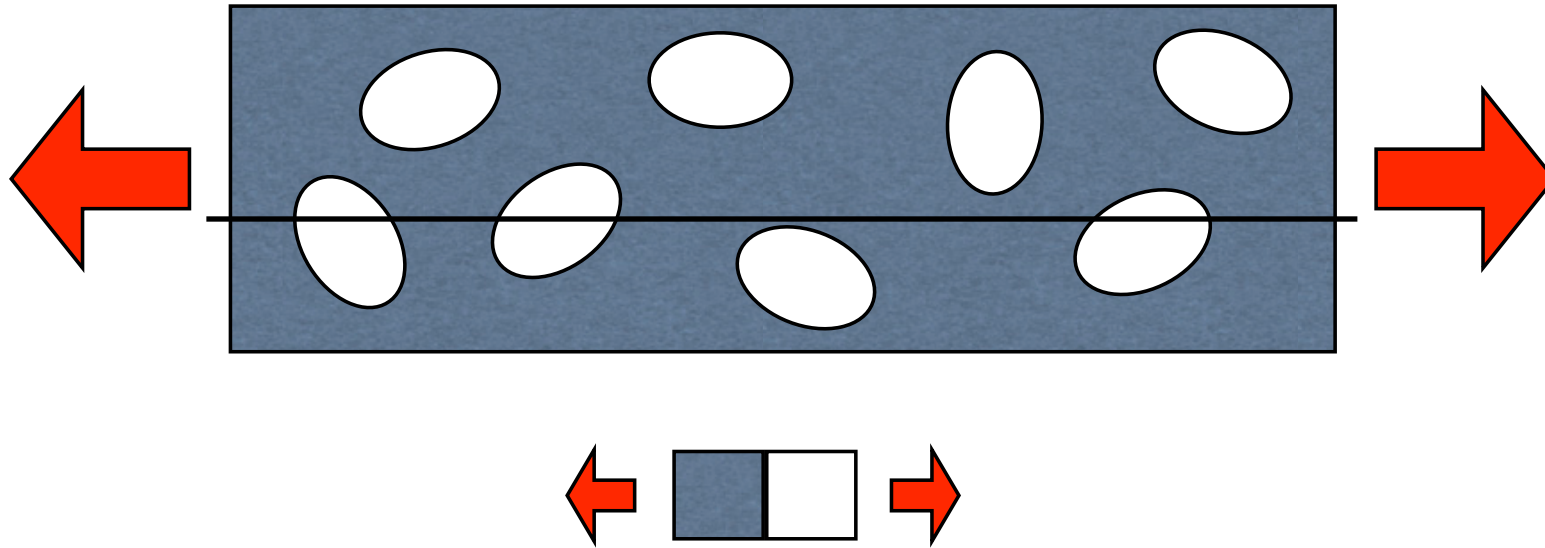
Ipotesi di Voigt



- Compatibilità delle deformazioni, lungo la sezione in figura la deformazione è costante $\Rightarrow \epsilon = \epsilon_f = \epsilon_m$
- Allora il modulo elastico del composito diventa:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{F}{A\epsilon} = \frac{\sigma_f A_f + \sigma_m A_m}{A\epsilon} = \frac{\sigma_f}{\epsilon_f} \phi + \frac{\sigma_m}{\epsilon_m} (1 - \phi) = E_f \phi + E_m (1 - \phi)$$

Ipotesi di Reuss



- Compatibilità degli sforzi, lungo la sezione in figura lo sforzo è costante $\Rightarrow \sigma = \sigma_f = \sigma_m$
- Allora il modulo elastico del composito diventa:

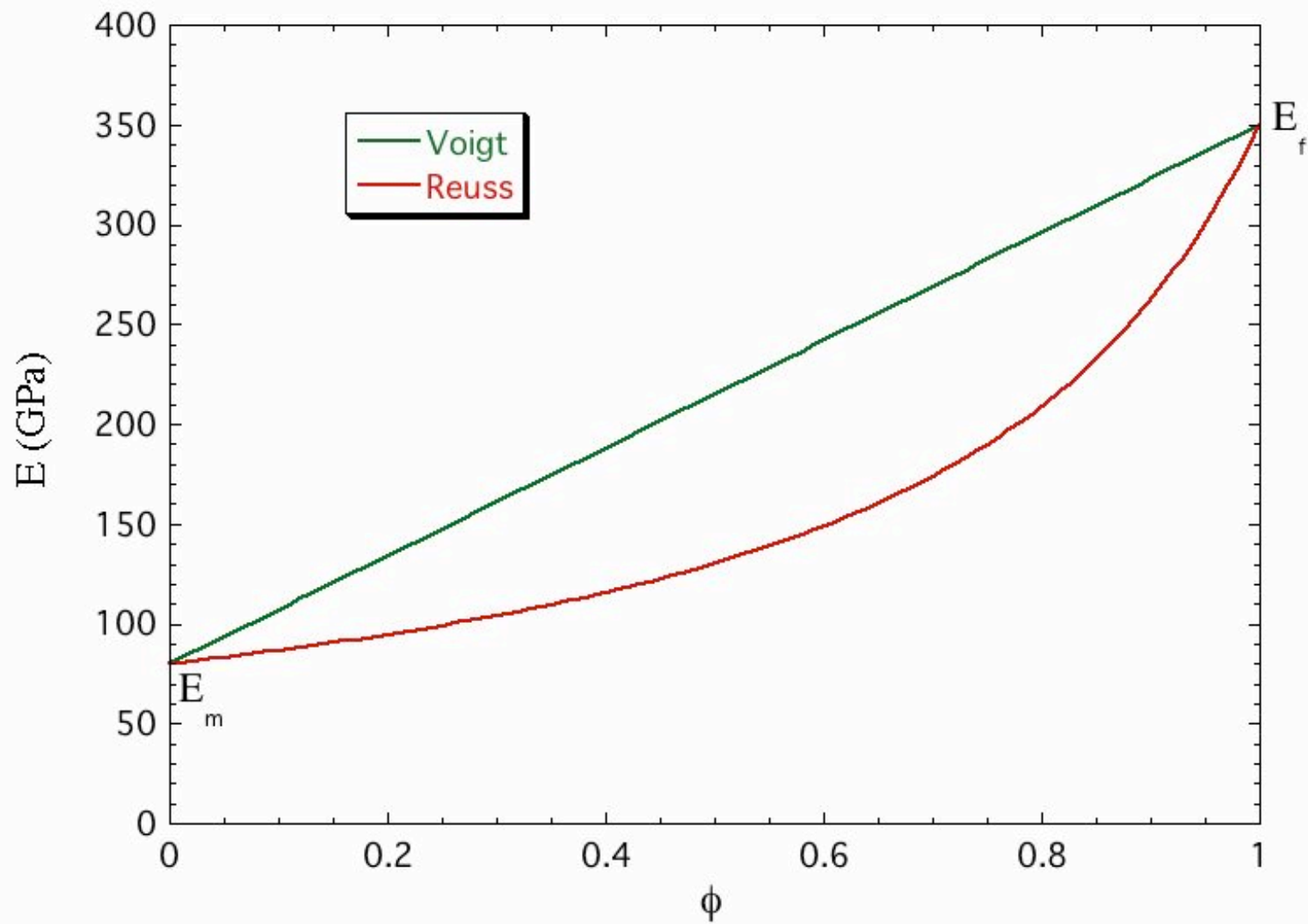
$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\sigma}{\frac{\varepsilon l_0}{l_0}} = \frac{\sigma}{\frac{l_f \varepsilon_f + l_m \varepsilon_m}{l_0}} = \frac{\sigma}{\varepsilon_f \phi + \varepsilon_m (1 - \phi)} = \frac{1}{\frac{1}{E_f} \phi + \frac{1}{E_m} (1 - \phi)}$$

Limiti di Reuss-Voigt

Voigt o limite superiore $E_V = E_f \phi + E_m (1 - \phi)$

Reuss o limite inferiore $E_R^{-1} = E_f^{-1} \phi + E_m^{-1} (1 - \phi)$

Limiti di Reuss-Voigt

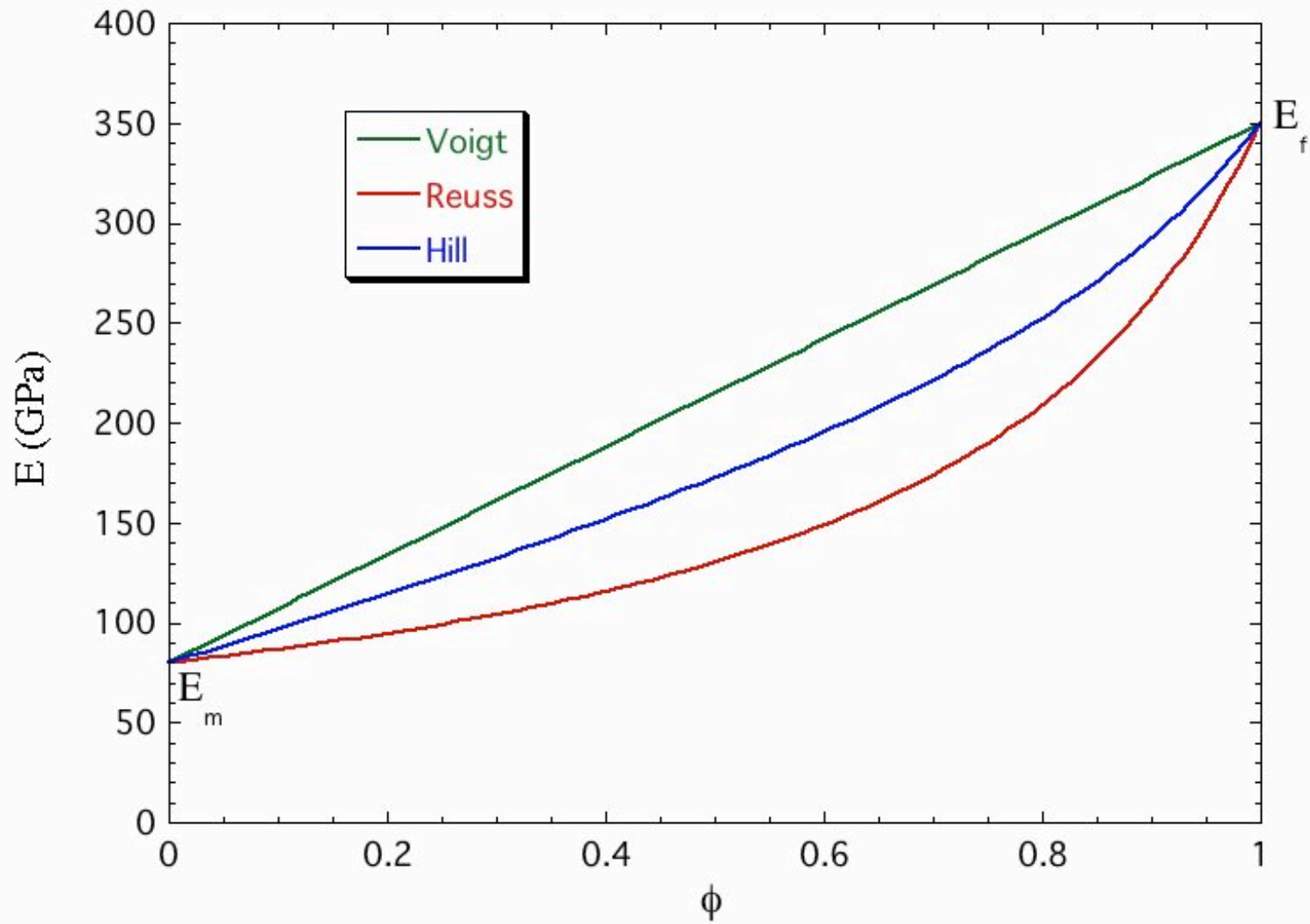


Metodo di Hill

- Problema: conosciamo il limite superiore e il limite inferiore, ma qual è il valore del modulo elastico?
- Hill propone la media tra i due valori per cui “in media” si sbaglia meno

$$E_H = \frac{E_V + E_R}{2}$$

Metodo di Hill



Media geometrica

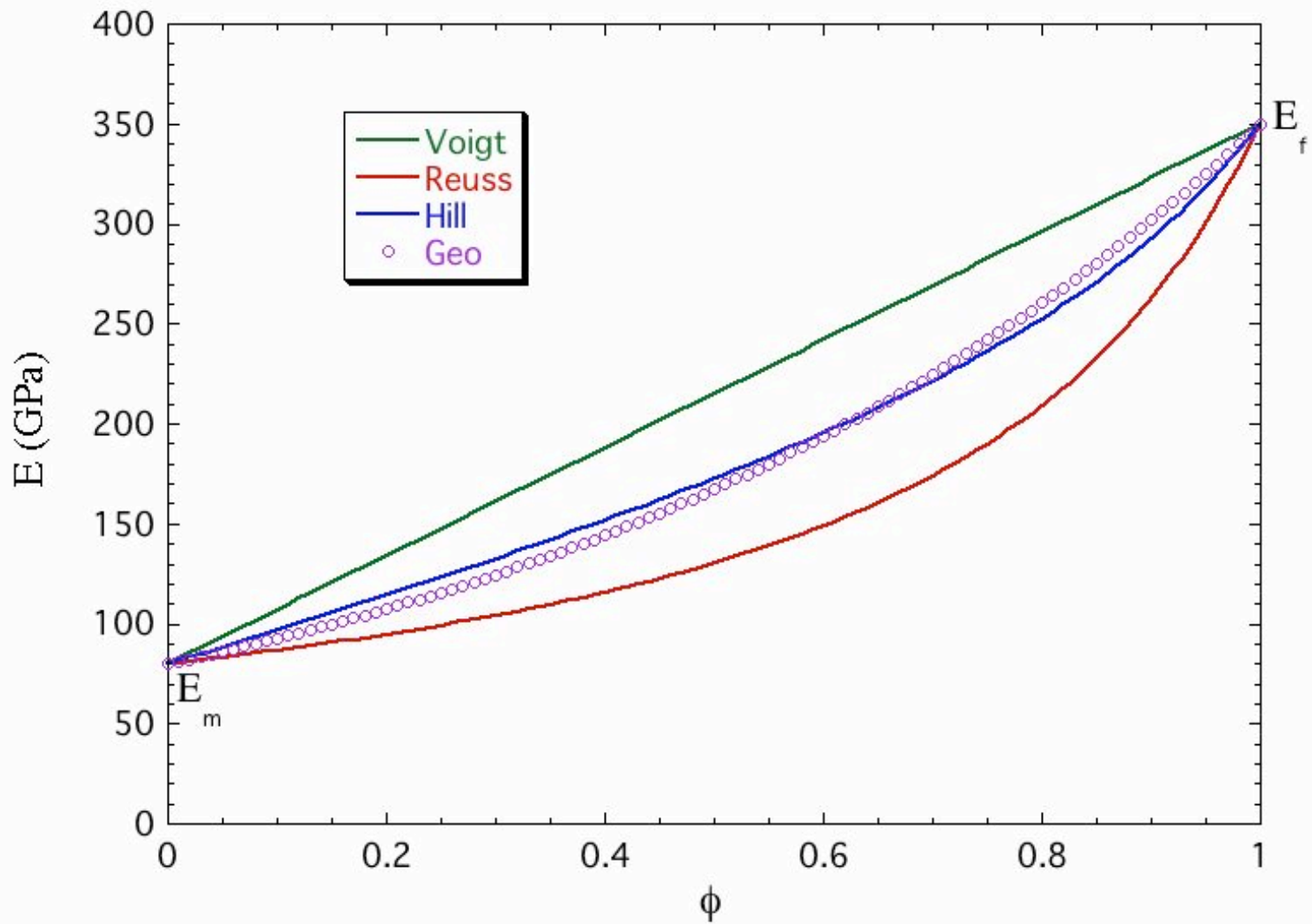
- Quale valor medio?
- Il metodo di omogenizzazione corretto dovrebbe assicurare che mediare la rigidezza o la cedevolezza dovrebbe dare un risultato che sia l'uno l'inverso dell'altro.
- Sul principio di invertibilità si basano i metodi autoconsistenti e il metodo geometrico (che ha il vantaggio di essere facilmente applicabile).

$$\ln E_{Geo} = \phi \ln E_f + (1 - \phi) \ln E_m$$

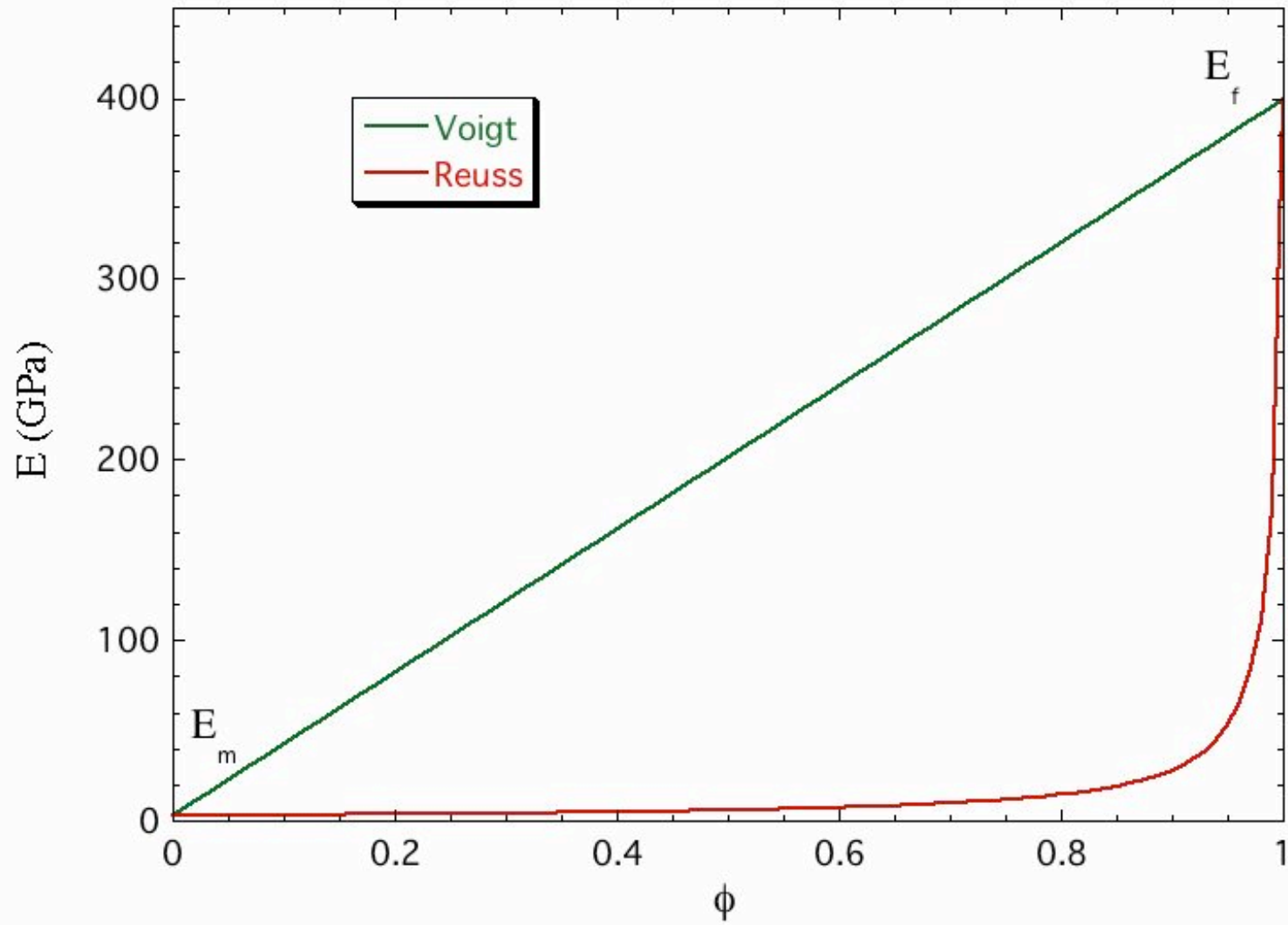
$$E_{Geo} = e^{\phi \ln E_f + (1 - \phi) \ln E_m}$$

$$\ln E_{Geo}^{-1} = -\ln E_{Geo} = -\phi \ln E_f - (1 - \phi) \ln E_m = \phi \ln E_f^{-1} + (1 - \phi) \ln E_m^{-1}$$

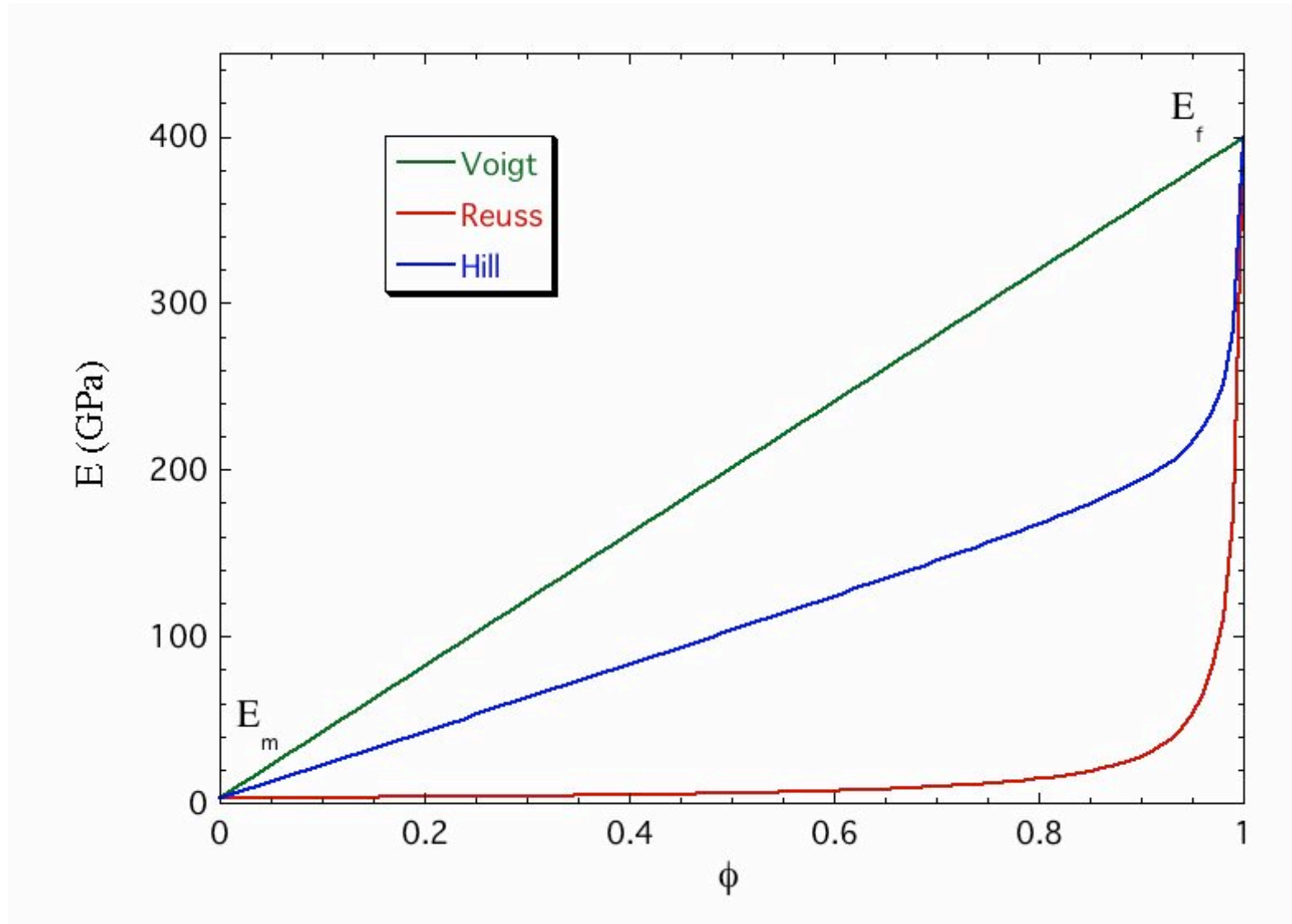
Media geometrica



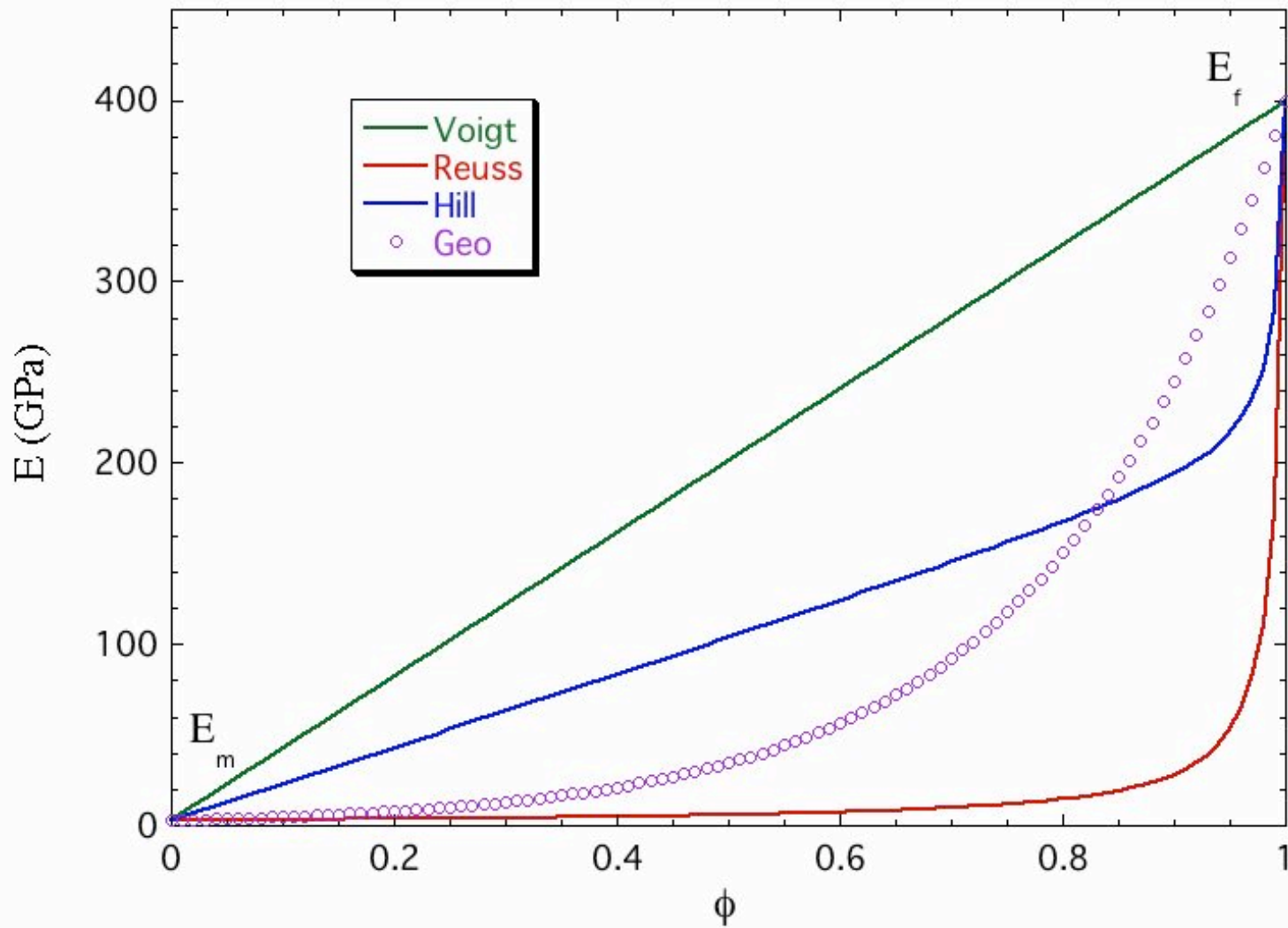
Caso composito CFRP: Reuss-Voigt



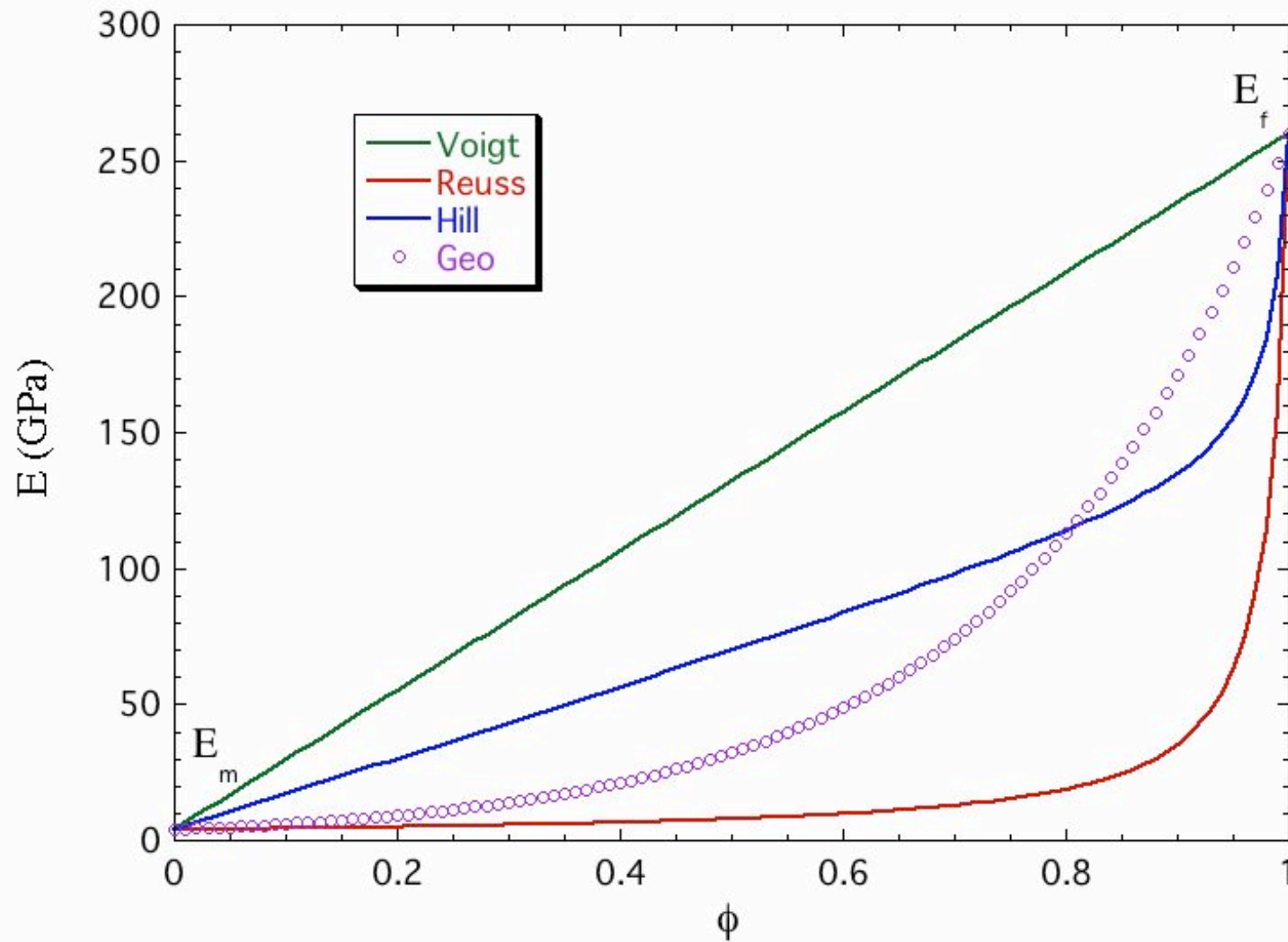
Caso composito CFRP: Hill



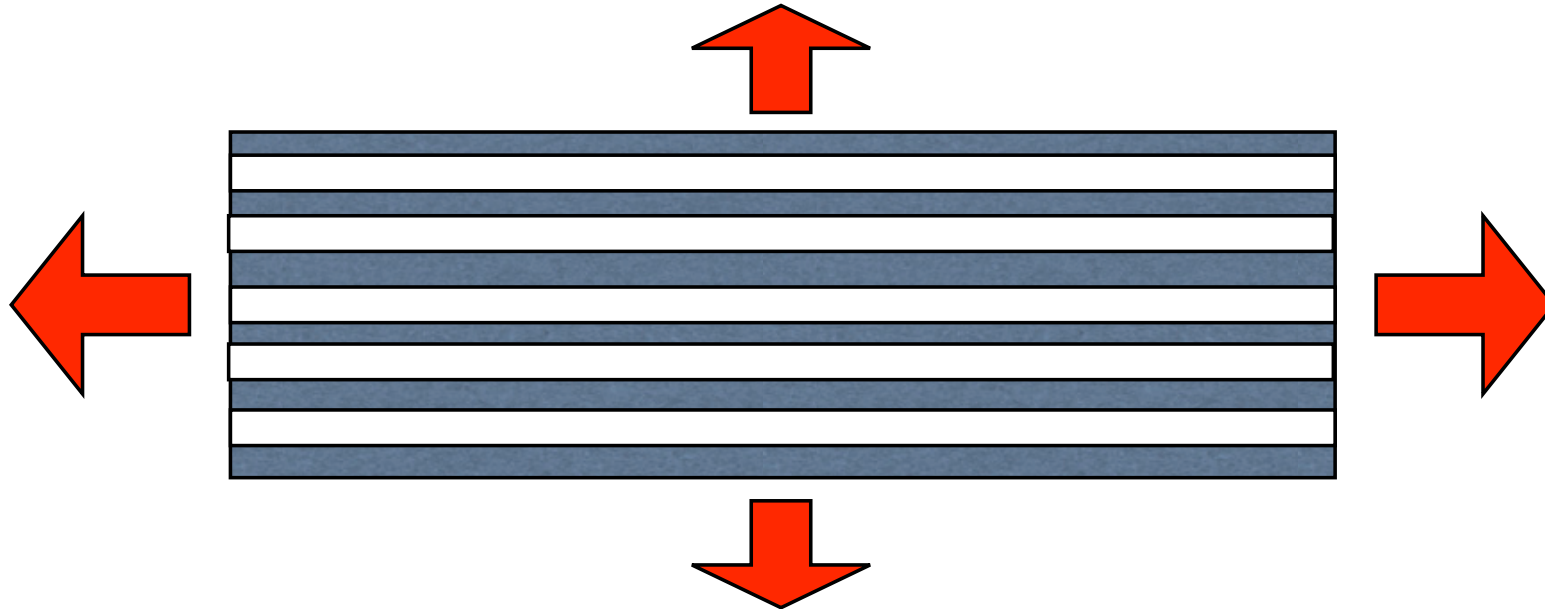
Caso composito CFRP: Geo



Fibre carbonio T300 in matrice epossidica



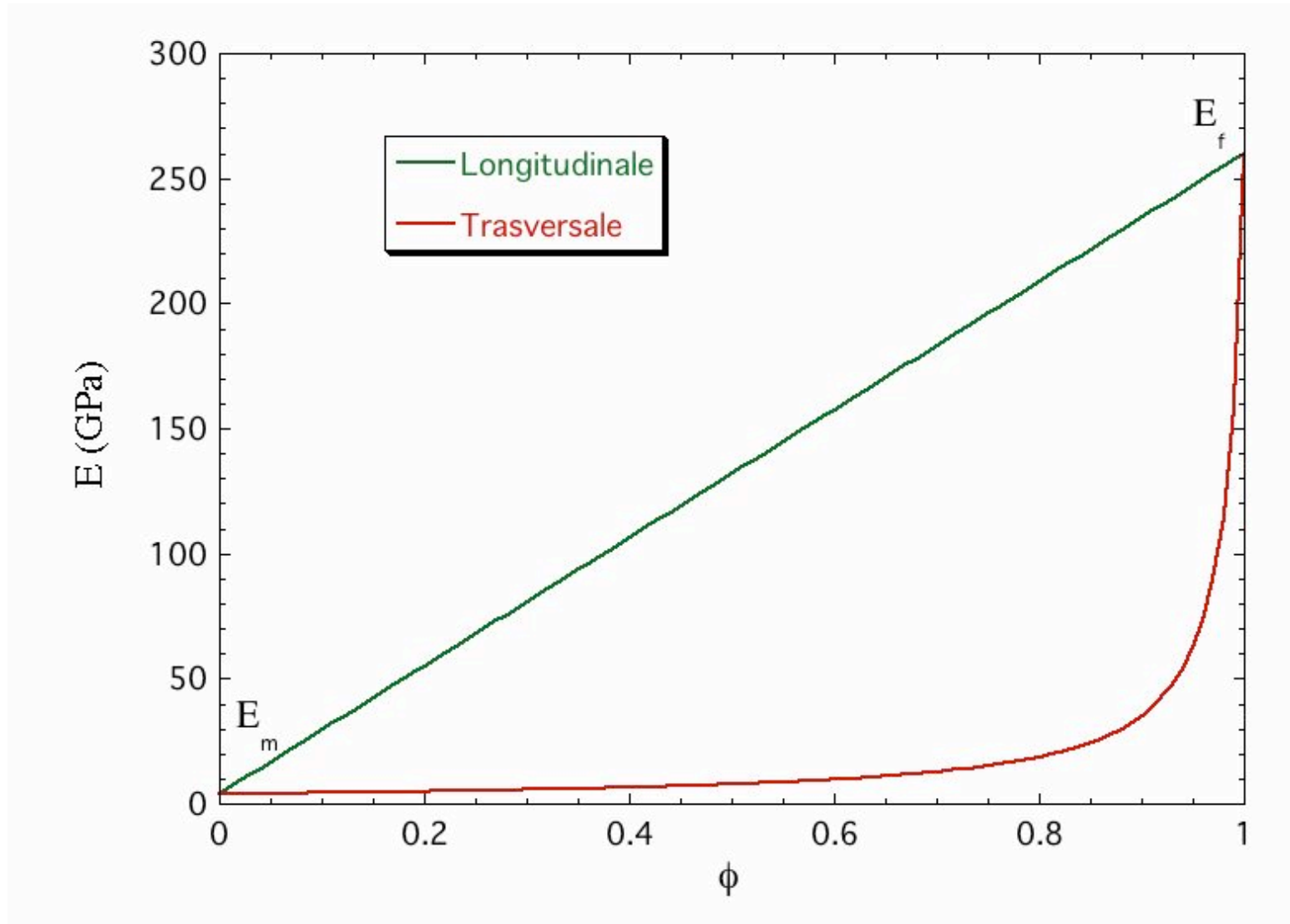
Calcolo modulo elastico: fibre unidirezionali



- In direzione longitudinale abbiamo compatibilità delle deformazioni => ipotesi di Voigt $E_l = E_f \phi + E_m (1 - \phi)$

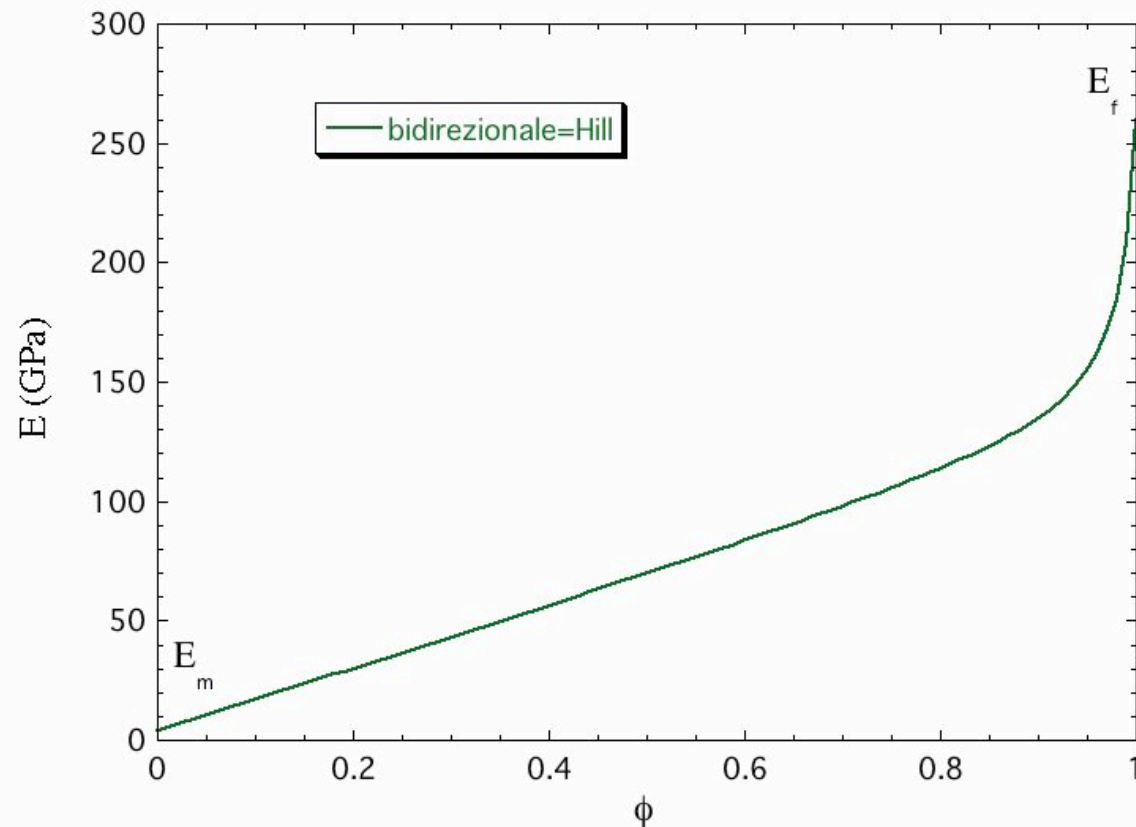
- In direzione trasversale abbiamo costanza degli sforzi => ipotesi di Reuss $E_R^{-1} = E_f^{-1} \phi + E_m^{-1} (1 - \phi)$

Composito fibre lunghe longitudinali



Composito a fibre lunghe in due direzioni

- Mettiamo due laminati uno sopra l'altro, uno ruotato di 90° . Abbiamo compatibilità delle deformazioni \Rightarrow mediamo i due strati con Voigt \Rightarrow Hill



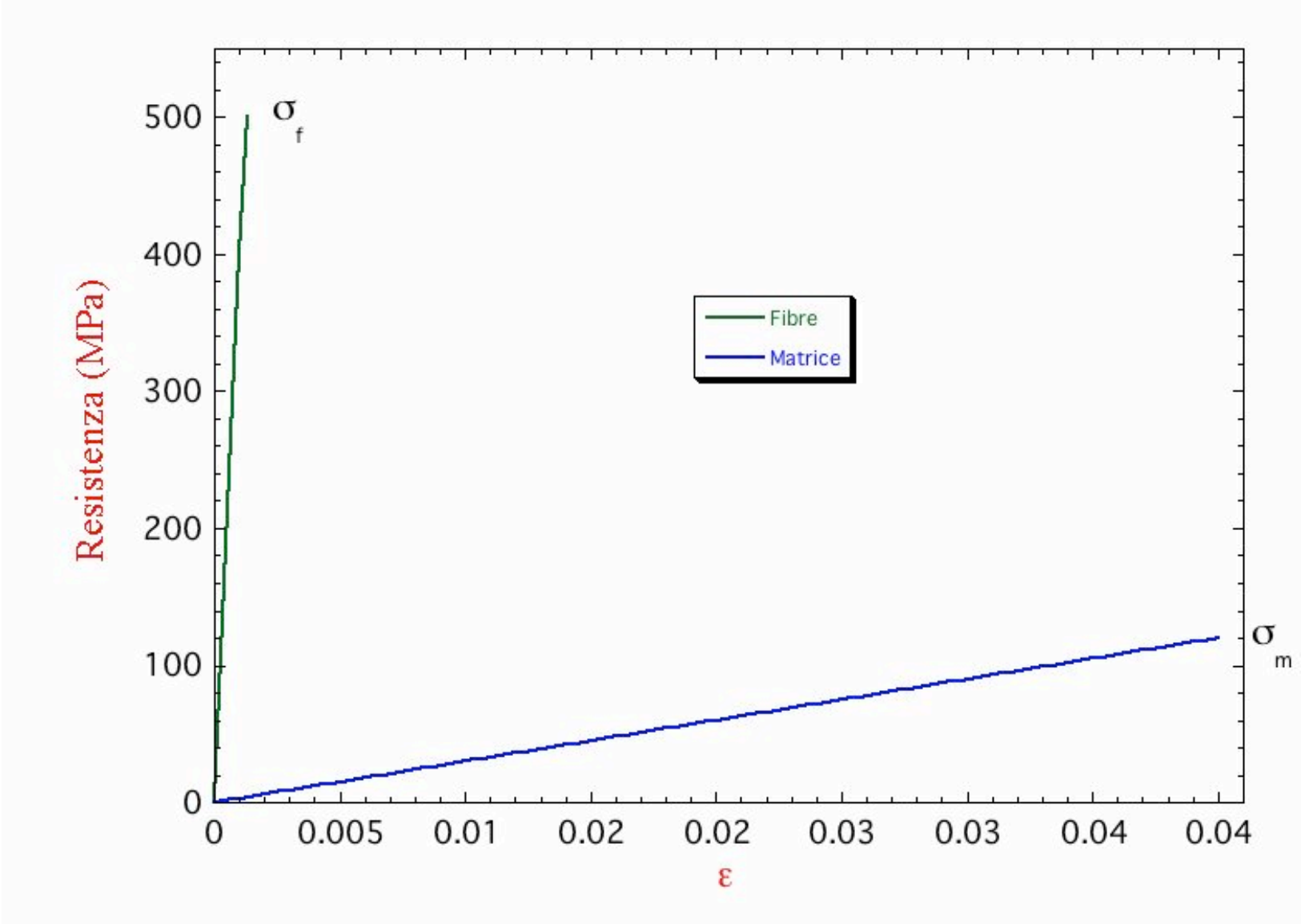
Resistenza a rottura

- Previsione resistenza a rottura di un composito a fibre lunghe unidirezionali in funzione della frazione ϕ .
- Per semplicità supponiamo che sia la fibra che la matrice seguano la legge di Hooke fino a rottura:

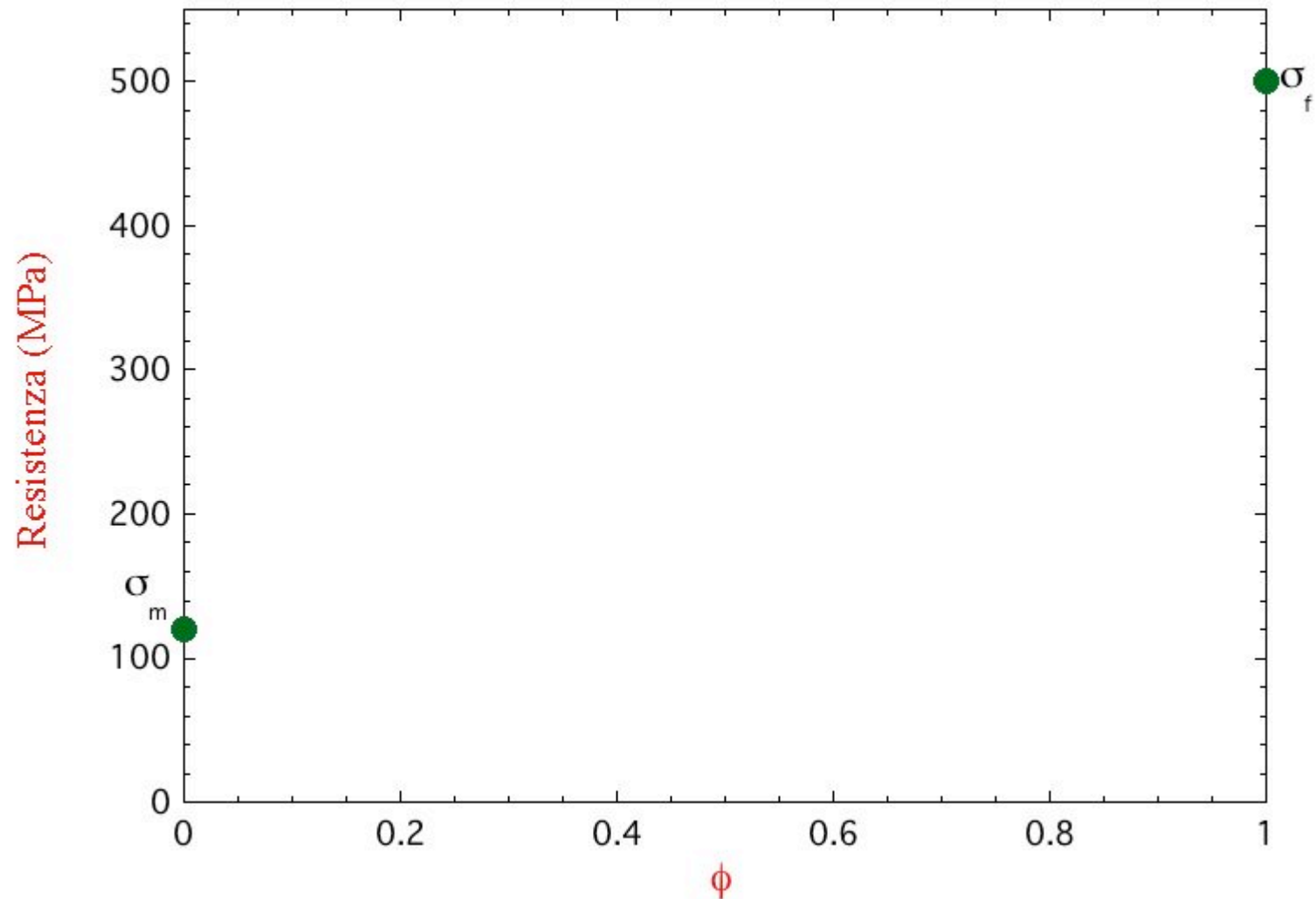
$$\sigma = E\varepsilon$$

- Supponiamo inoltre che la fibra funga da rinforzo, ossia la fibra abbia una resistenza maggiore della matrice, e che il modulo elastico della fibra sia maggiore della matrice.
- Consideriamo due casi:
 - caso 1: matrice duttile $\varepsilon_m > \varepsilon_f$
 - caso 2: matrice fragile $\varepsilon_m < \varepsilon_f$

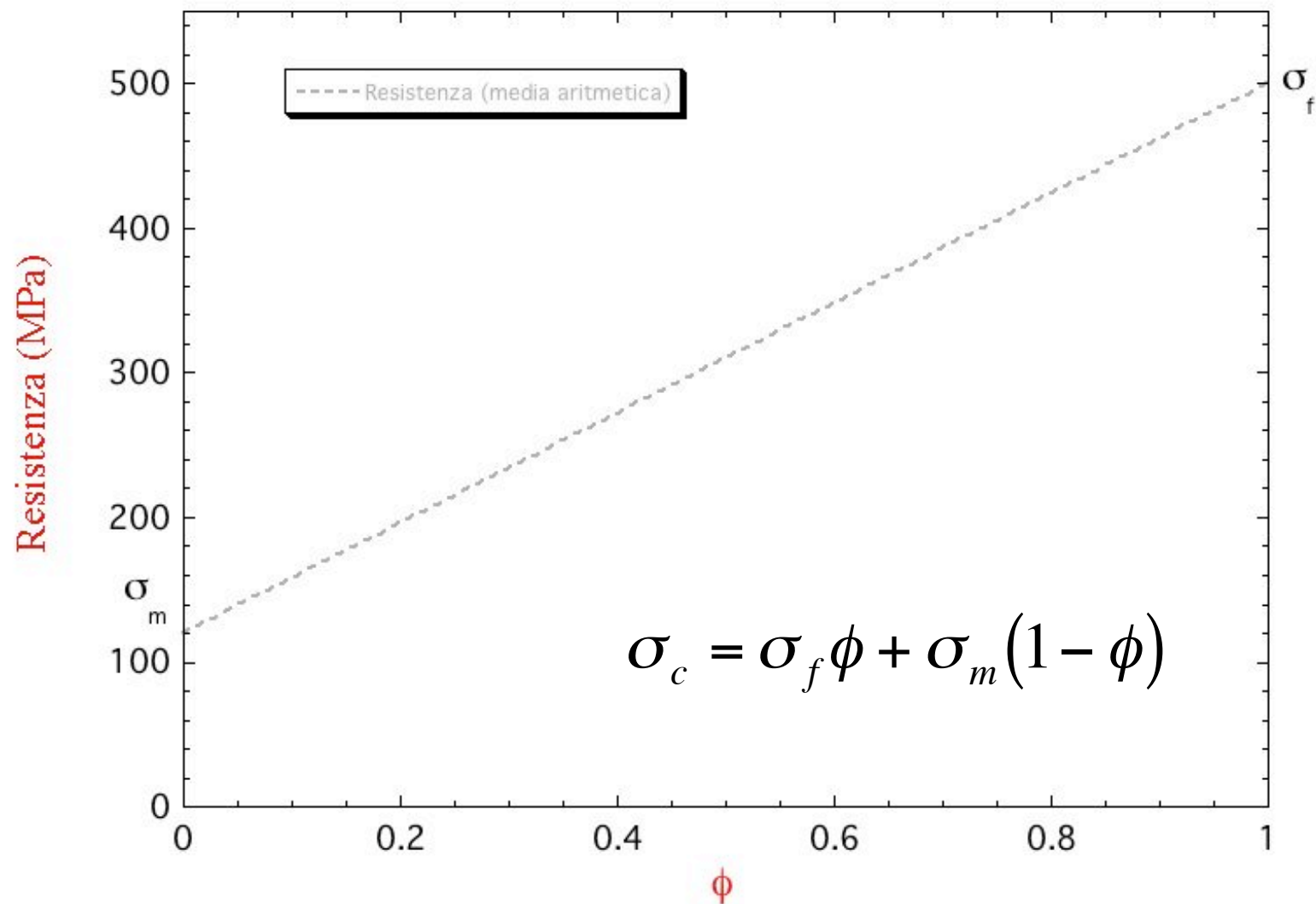
Caso I: matrice duttile



Resistenza per i due casi limite



Se usiamo la media aritmetica



Matrice duttile

$$\varepsilon_m > \varepsilon_f$$

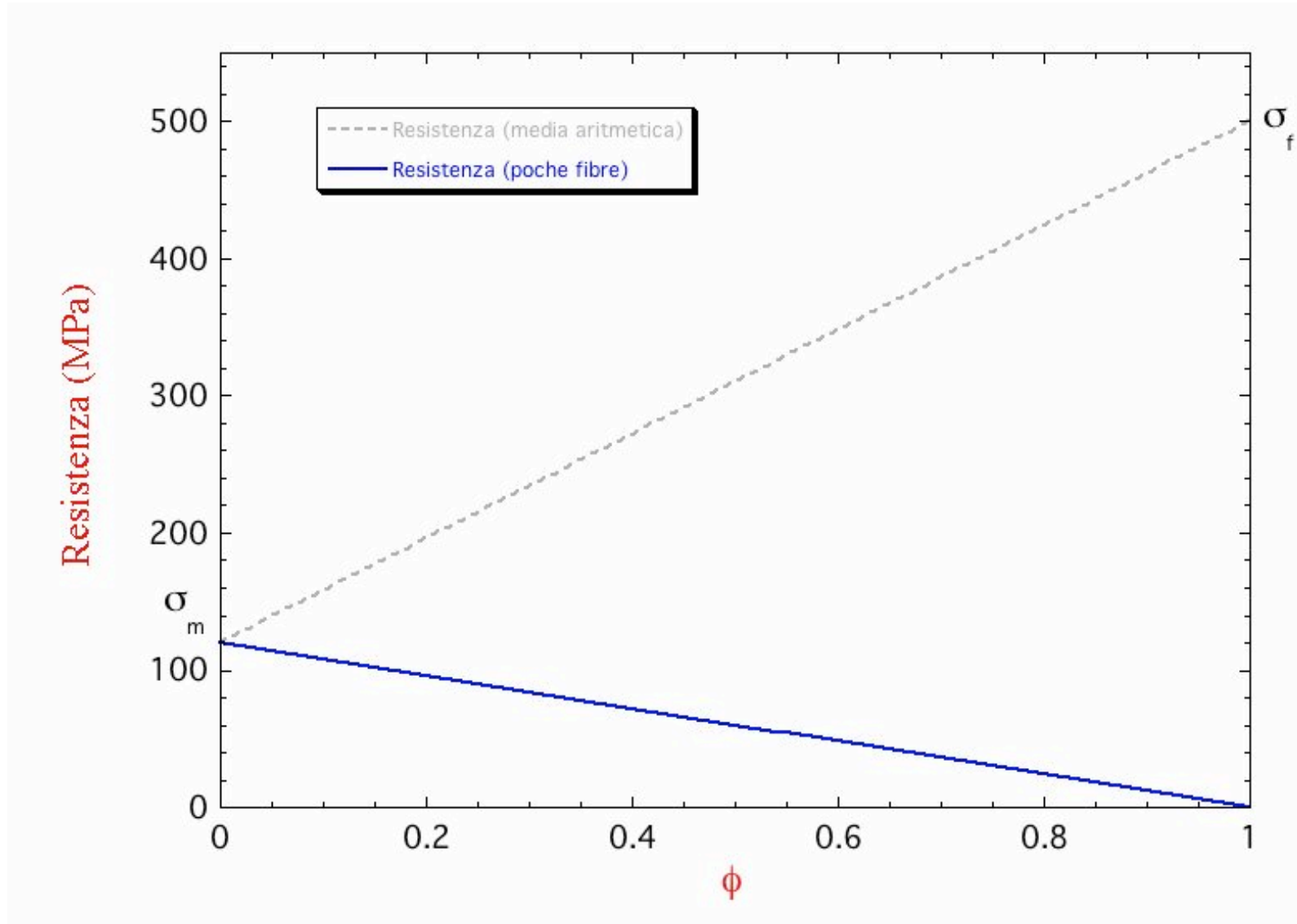
- Le resistenza a rottura per fibra e matrice siano:

$$\sigma_m = E_m \varepsilon_m \qquad \sigma_f = E_f \varepsilon_f$$

- carichiamo il composito longitudinalmente alle fibre fino alla massima deformazione delle fibre. Matrice e fibre devono mantenere compatibilità di deformazione. A quel punto le fibre si rompono e la parte di carico da loro sopportata si trasferisce alla matrice e possiamo avere due casi:
 - caso a): la matrice riesce a reggere anche il carico delle fibre (in genere con piccola % di fibre) e si rompe alla deformazione massima della matrice:

$$\sigma_c = E_m (1 - \phi) \varepsilon_m = \sigma_m (1 - \phi)$$

Caso a): la matrice regge



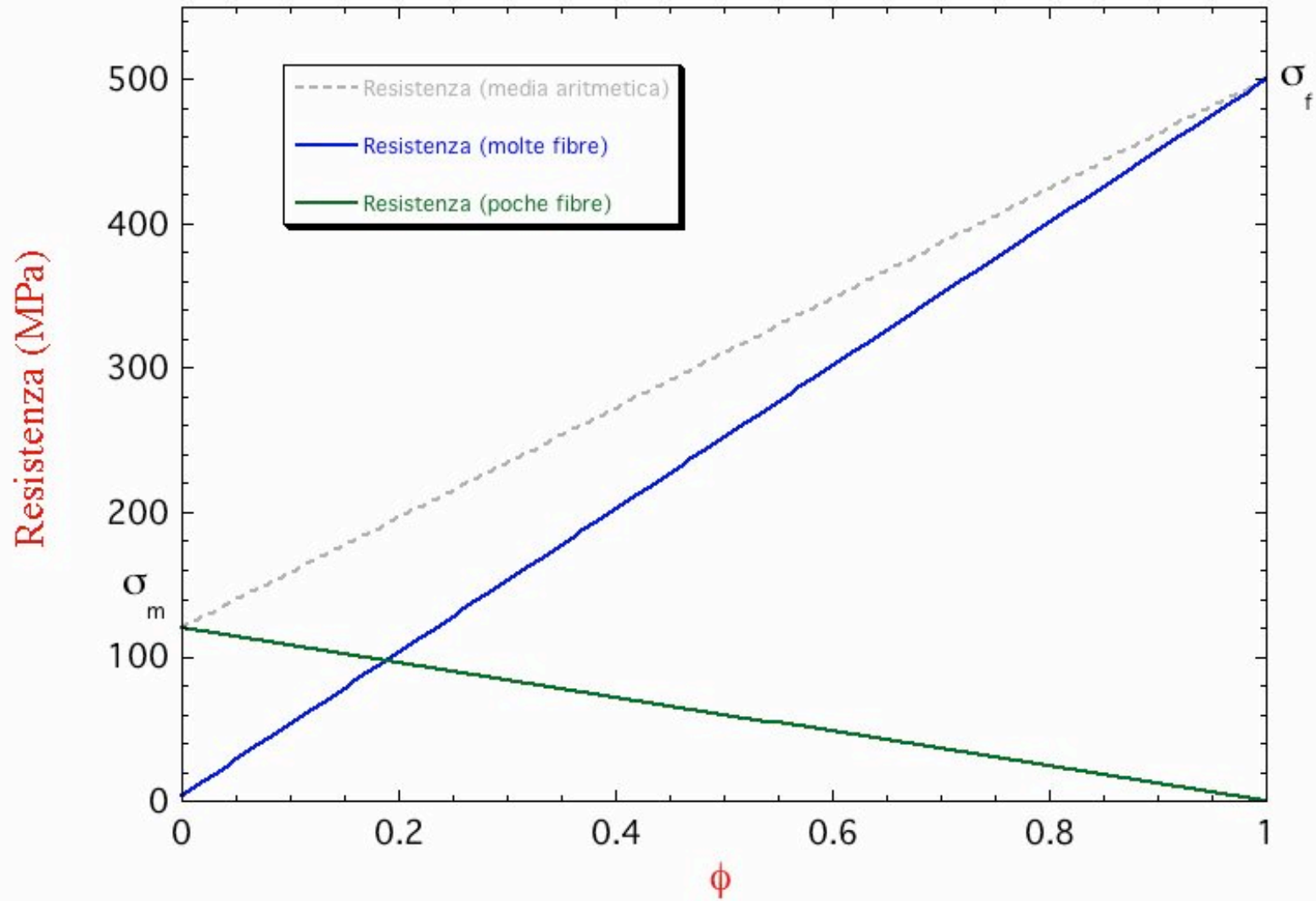
Matrice duttile

$$\varepsilon_m > \varepsilon_f$$

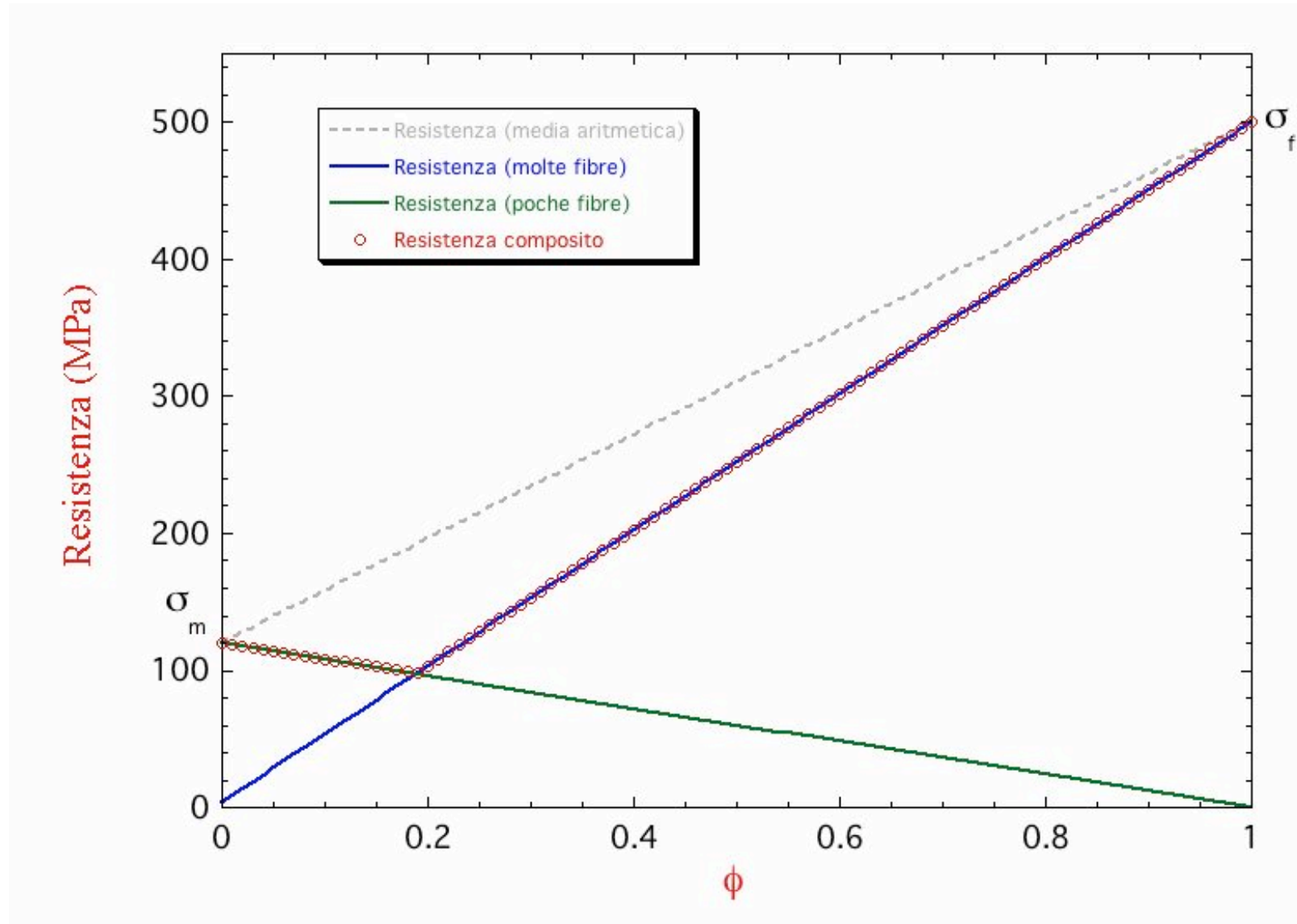
- Caso b): la matrice non riesce a reggere l'extra carico delle fibre (caso con molte fibre) e il composito si rompe:

$$\sigma_c = E_c \varepsilon_f = [E_m(1 - \phi) + E_f \phi] \varepsilon_f = \sigma_f \left[\frac{E_m}{E_f} (1 - \phi) + \phi \right]$$

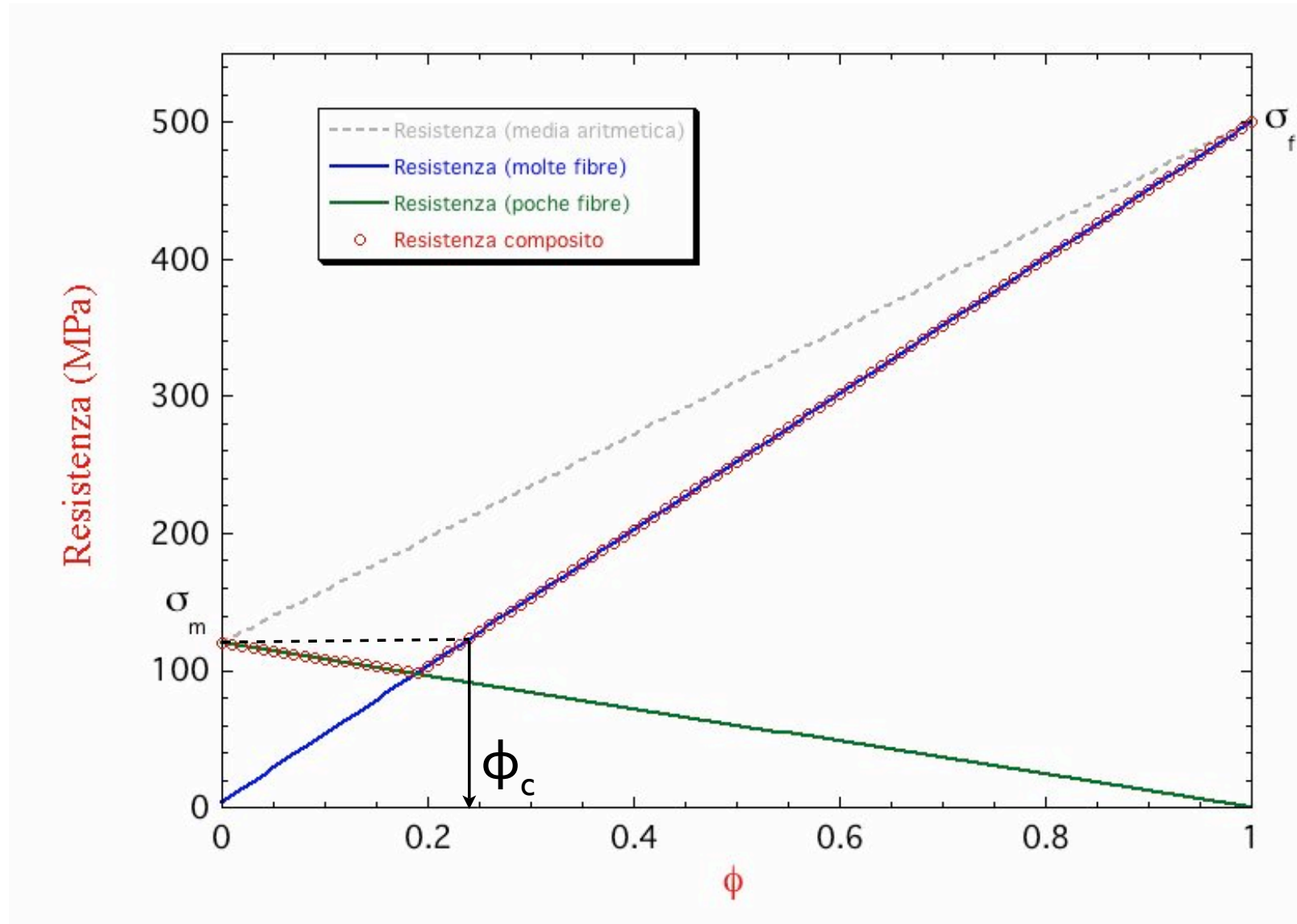
Caso b): la matrice non regge



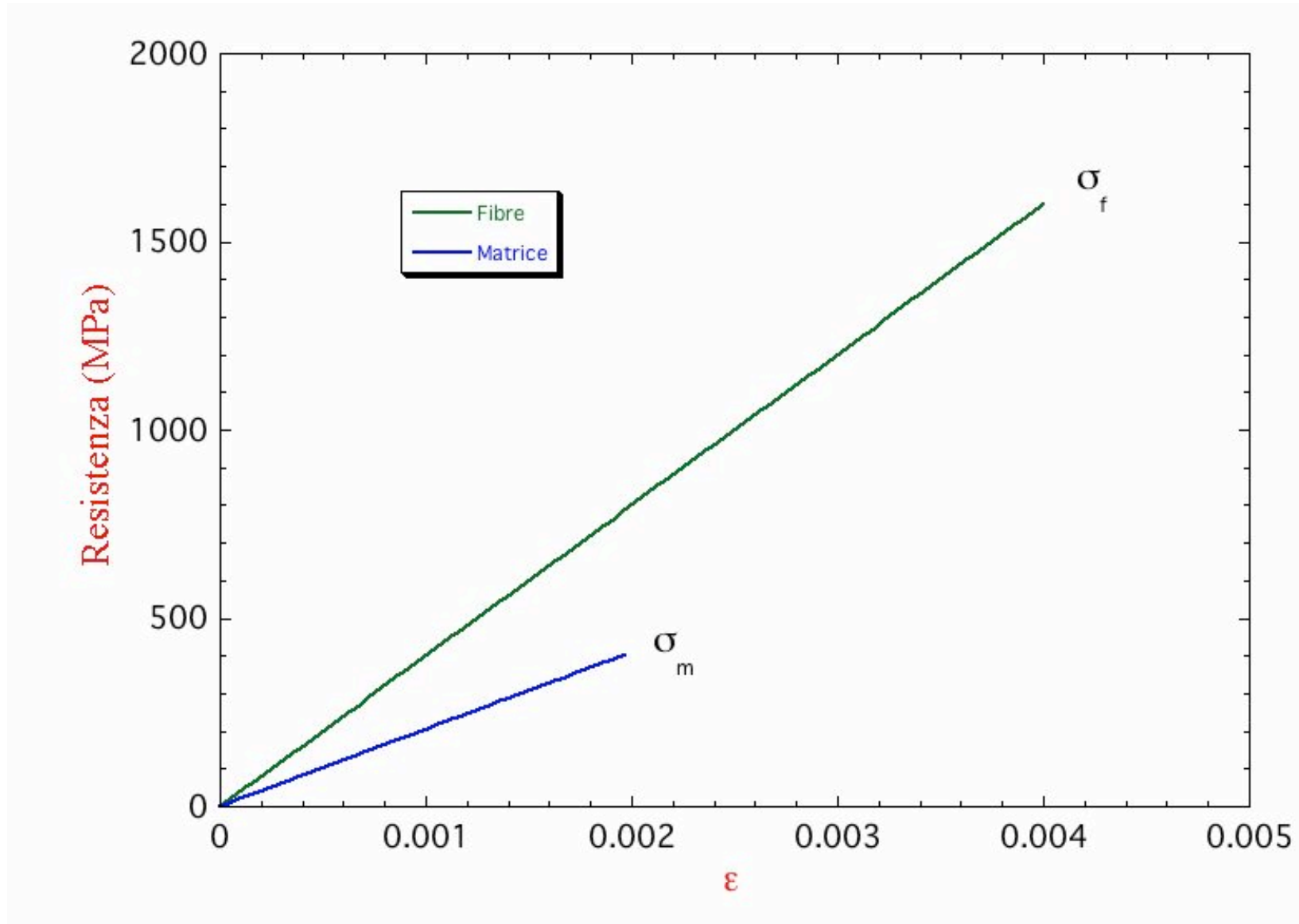
Caso matrice duttile: resistenza composito



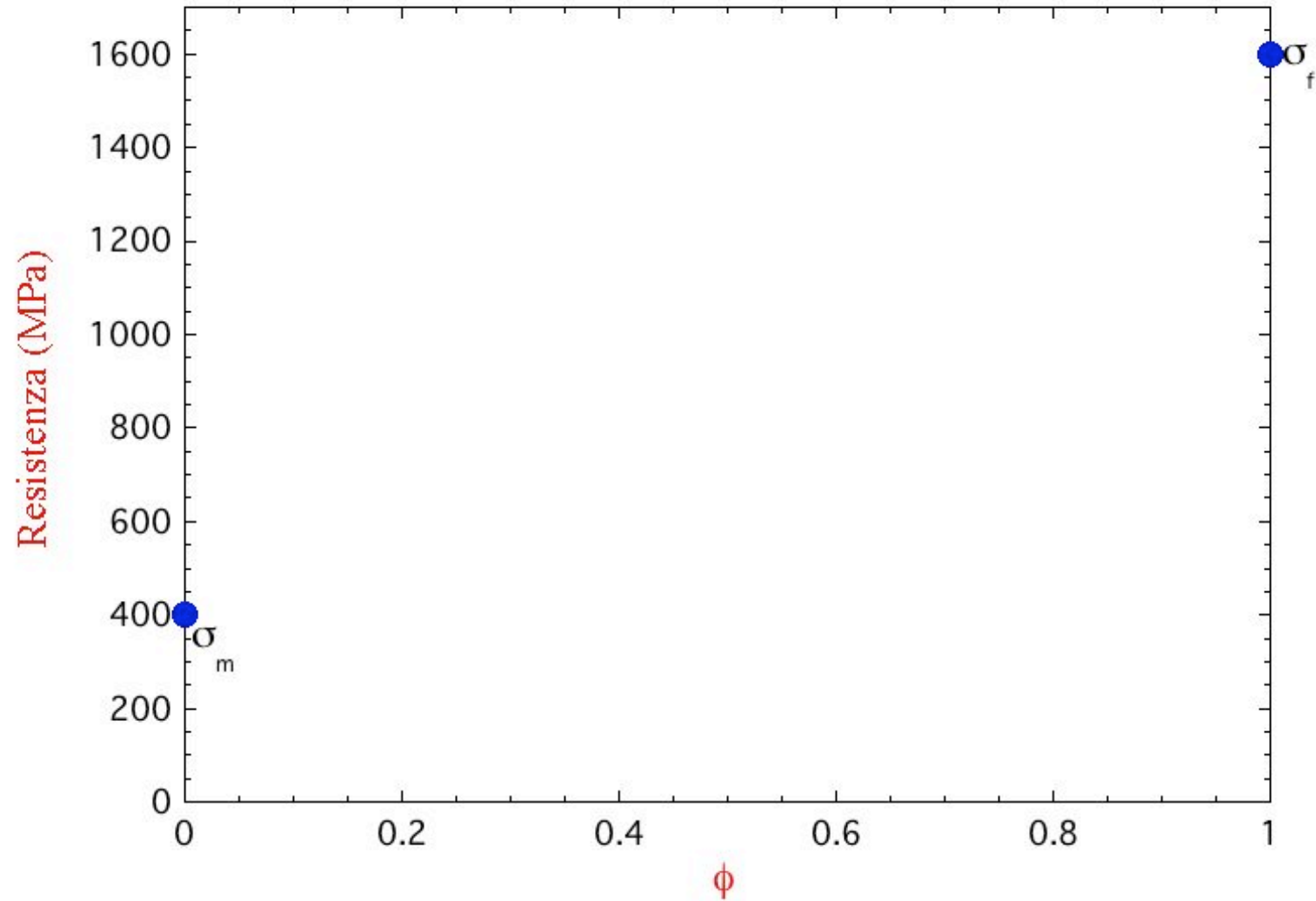
Caso matrice duttile: frazione critica



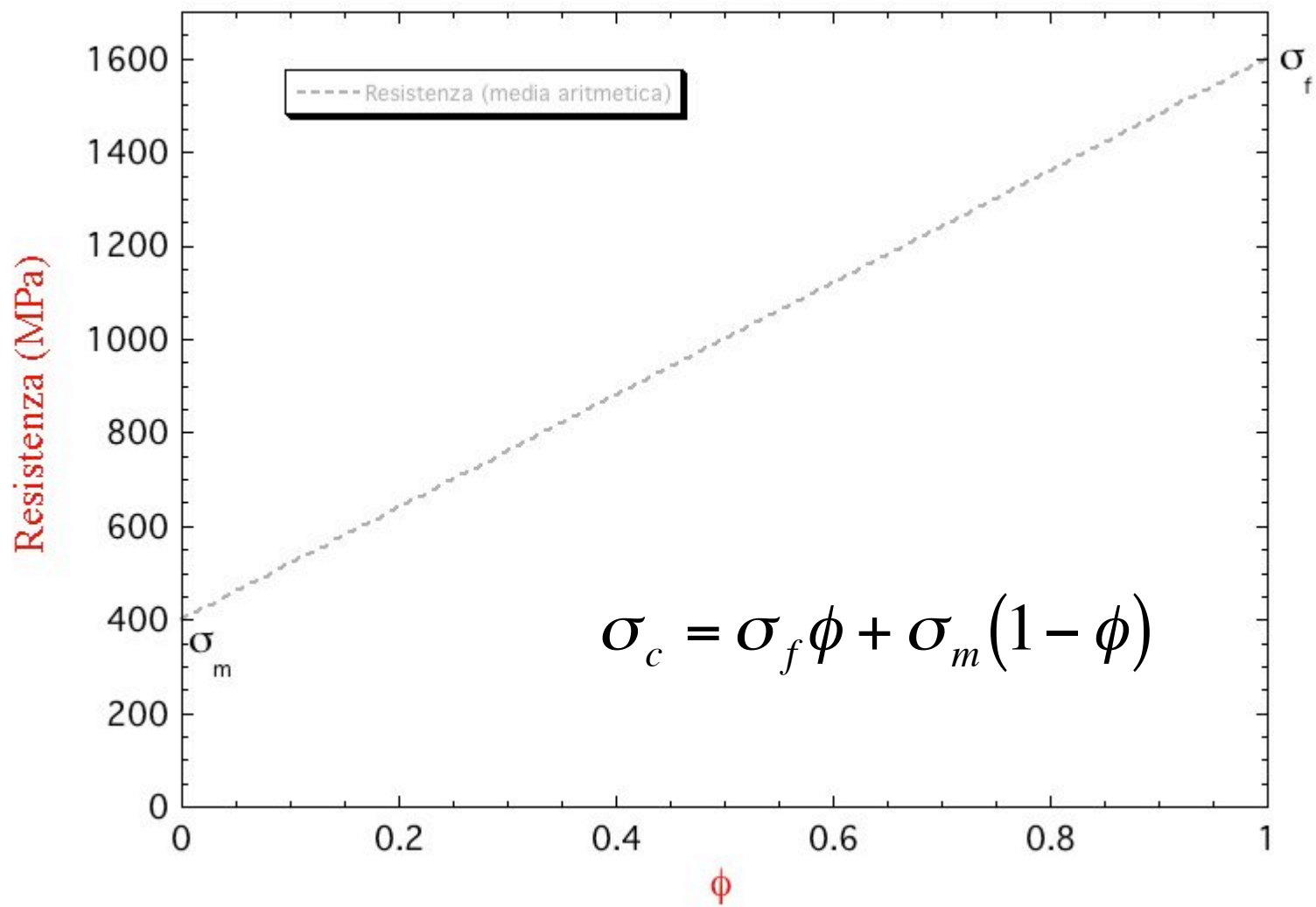
Caso II: matrice fragile



Resistenza per i due casi limite



Se usiamo la media aritmetica



Matrice fragile

$$\varepsilon_m < \varepsilon_f$$

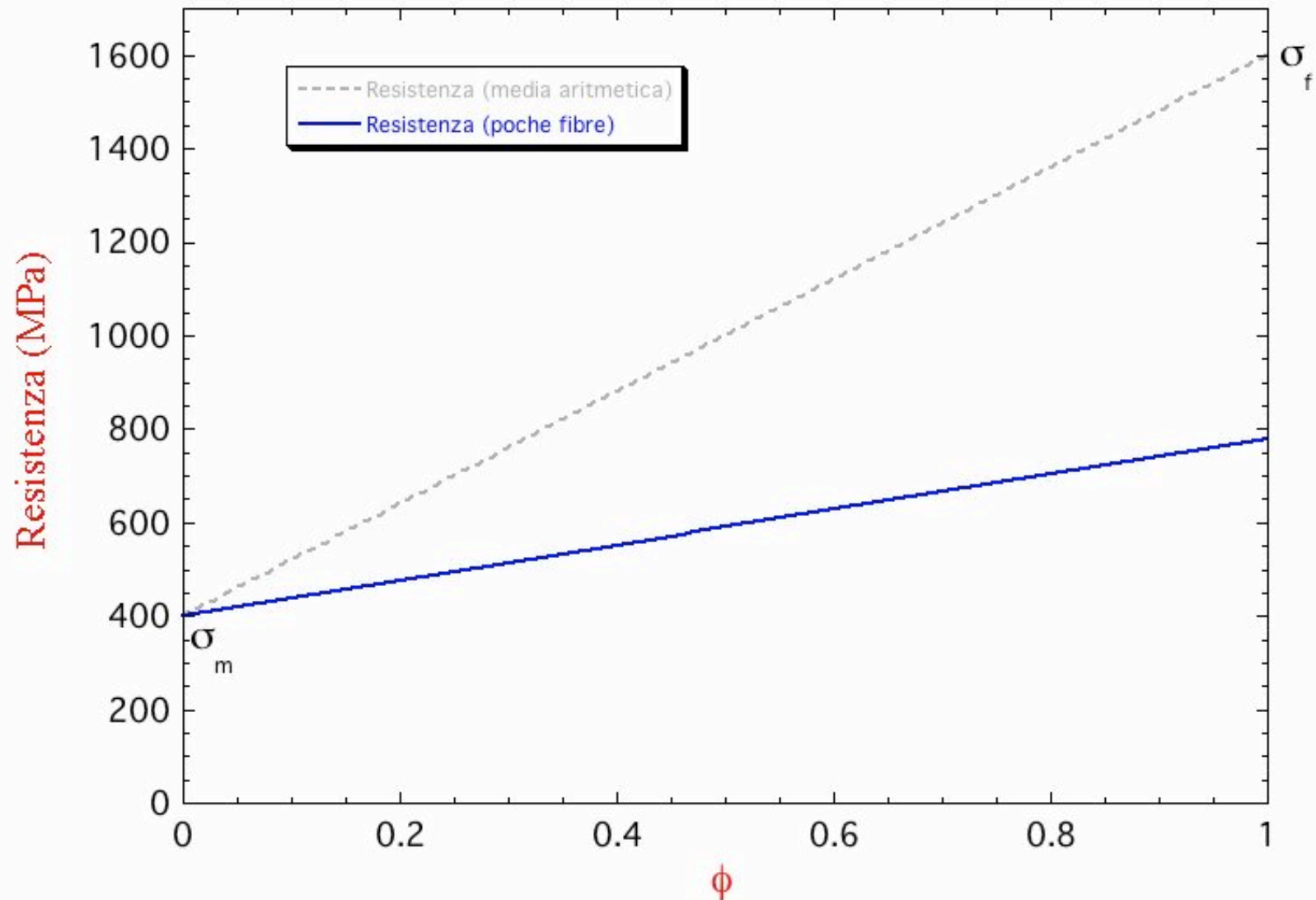
- Le resistenze a rottura per fibra e matrice siano:

$$\sigma_m = E_m \varepsilon_m \qquad \sigma_f = E_f \varepsilon_f$$

- carichiamo il composito longitudinalmente alle fibre fino alla massima deformazione della matrice. Matrice e fibre devono mantenere compatibilità di deformazione. A quel punto la matrice si rompe e la sua parte di carico si trasferisce sulle fibre e possiamo avere due casi:
 - caso a): le fibre non riescono a reggere anche il carico della matrice (in genere con piccola % di fibre):

$$\sigma_c = E_c \varepsilon_m = \left[E_m (1 - \phi) + E_f \phi \right] \varepsilon_m = \sigma_m \left[(1 - \phi) + \frac{E_f}{E_m} \phi \right]$$

Caso a): le fibre non reggono



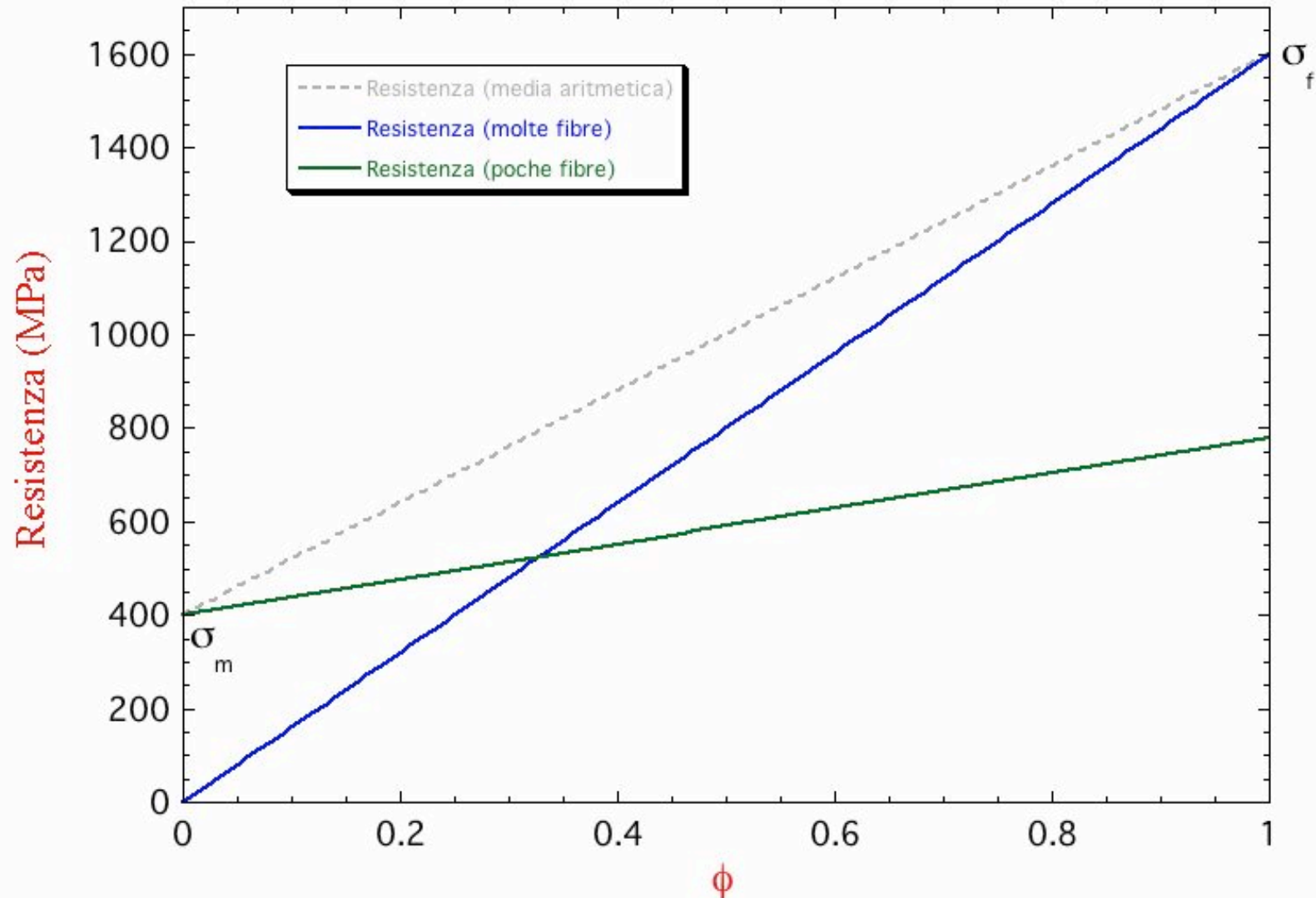
Matrice fragile

$$\varepsilon_m < \varepsilon_f$$

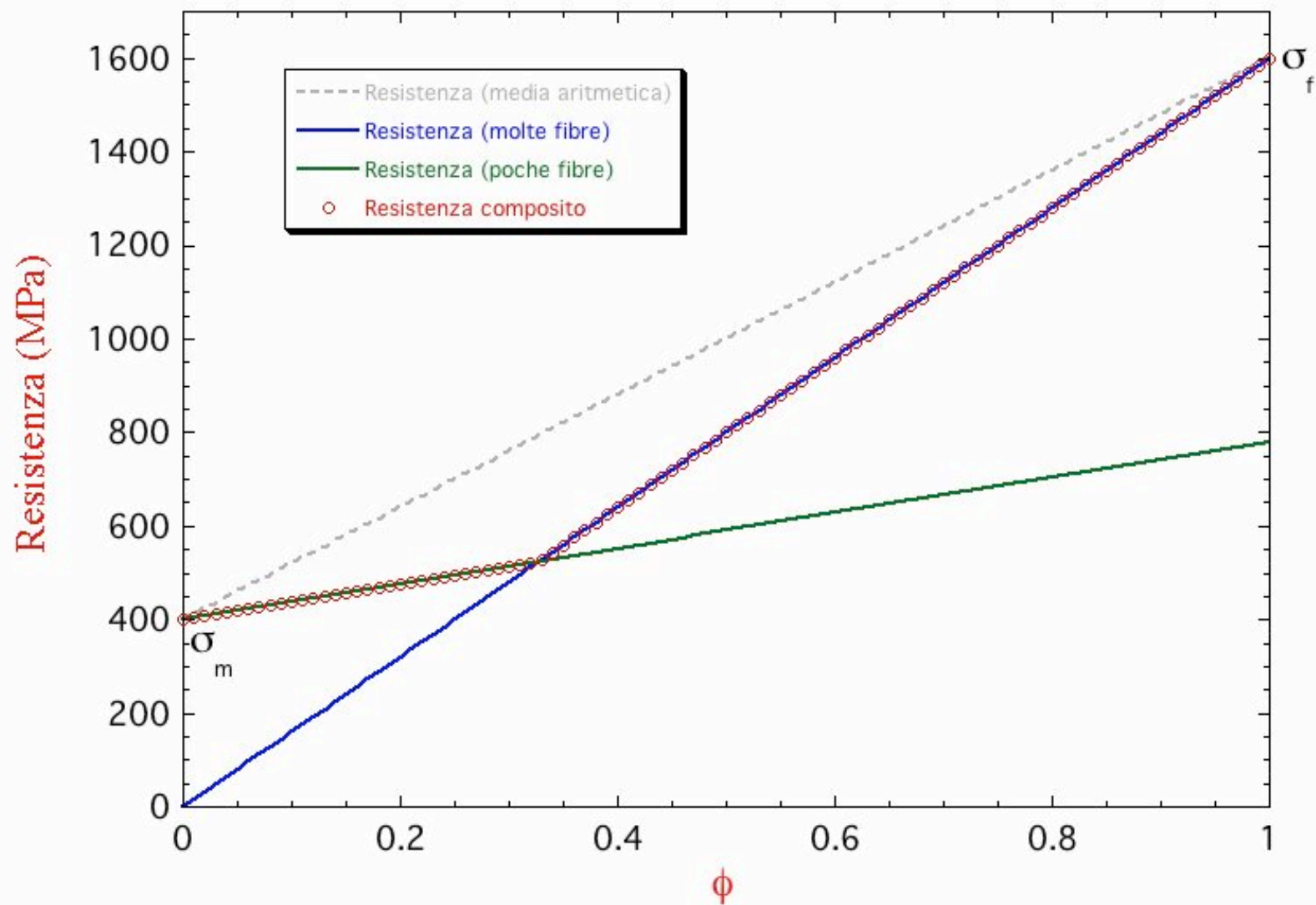
- Caso b): le fibre riescono a reggere l'extra carico della matrice (caso con molte fibre) e il composito non si rompe subito, ma solo a deformazione massima delle fibre:

$$\sigma_c = E_f \phi \varepsilon_f = \sigma_f \phi$$

Matrice fragile: le fibre reggono



Matrice fragile: resistenza del composito



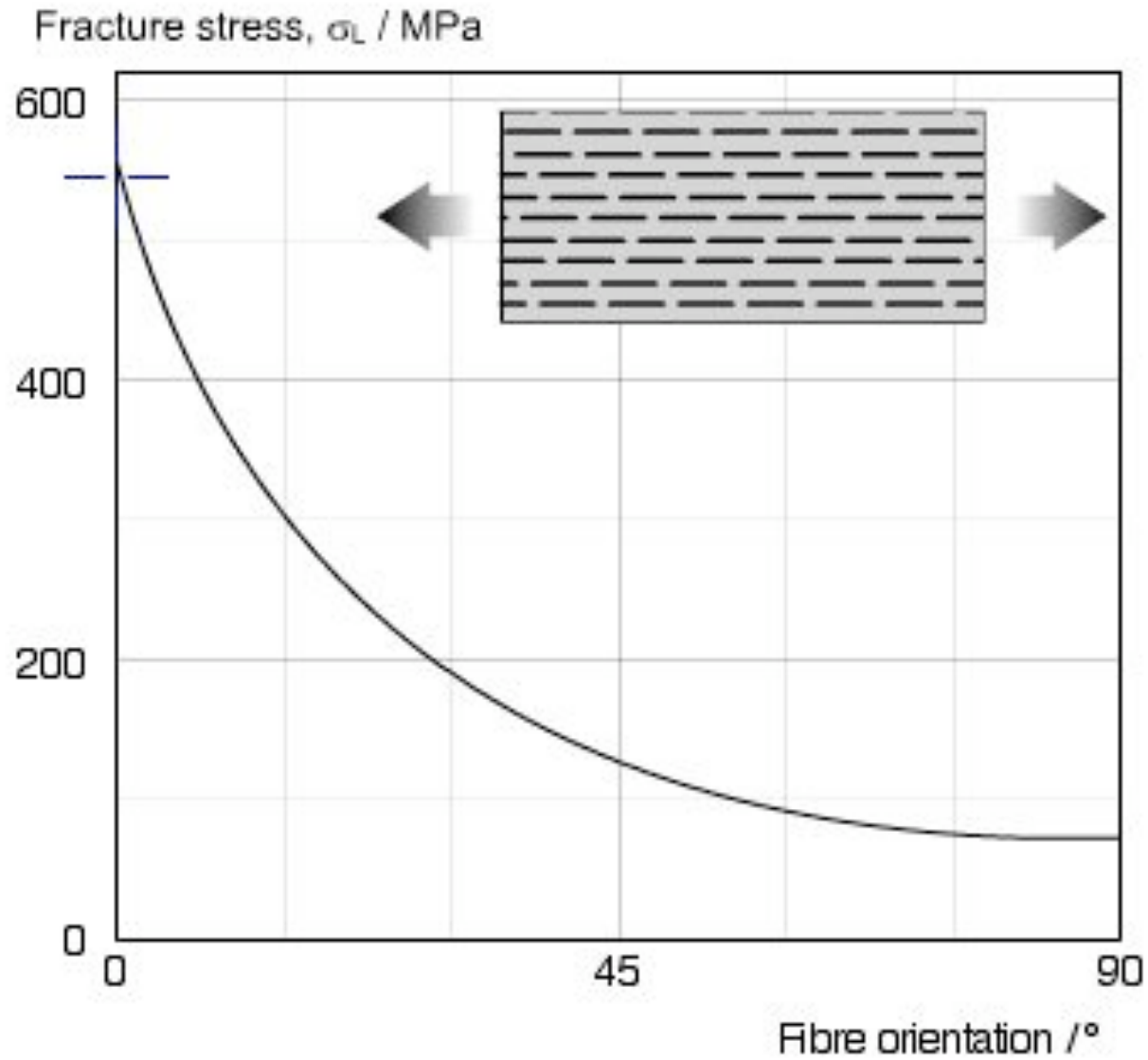
Resistenza direzione trasversale

- La resistenza del composito è dominata dalla minima resistenza tra matrice e interfaccia.
- A compressione invece la presenza delle fibre perpendicolari al carico di compressione limitano la deformazione secondaria elevando il carico di rottura.
- La scarsa resistenza trasversale a trazione invece limita la resistenza a compressione longitudinale.

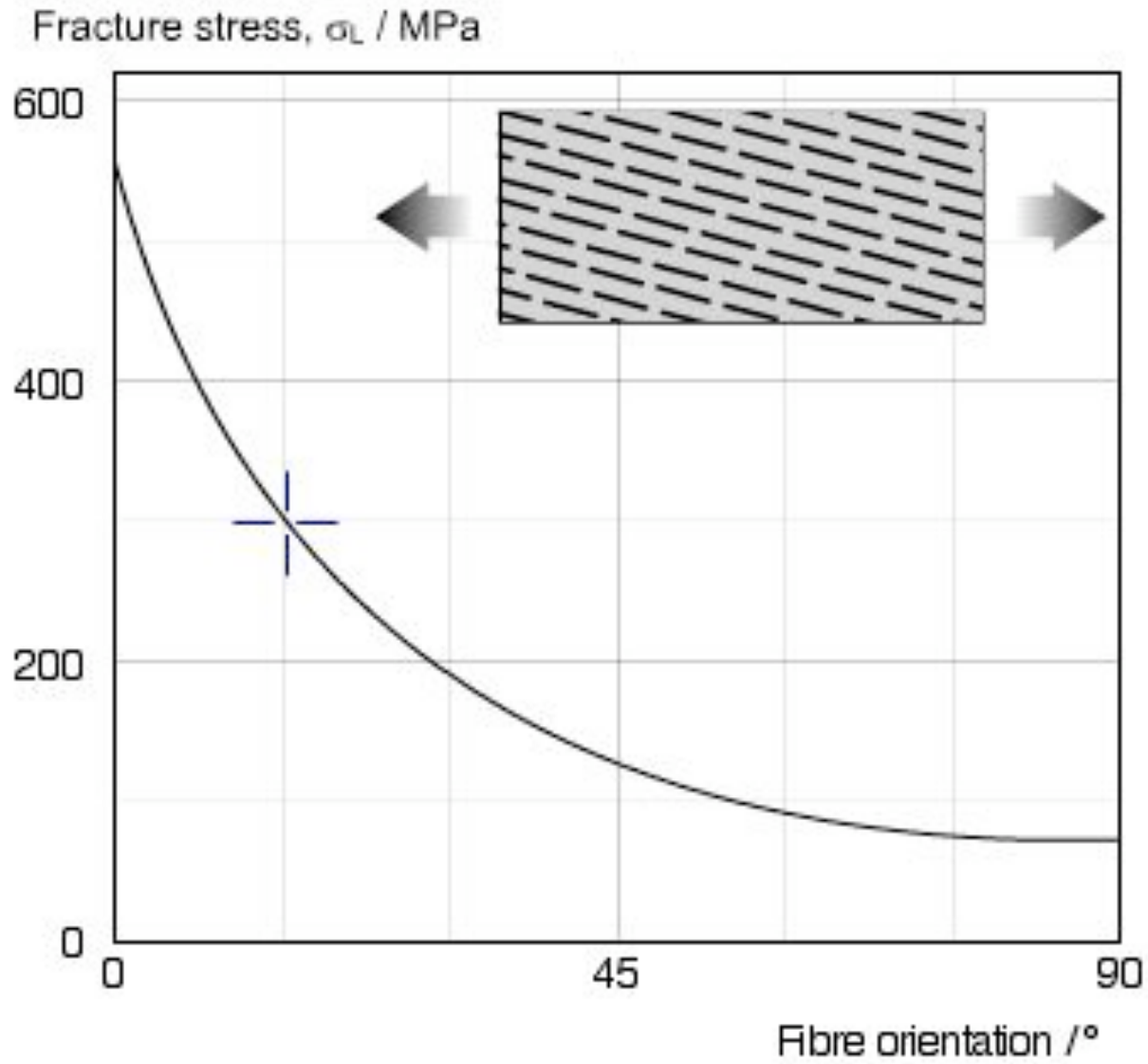
Compositi e orientazione delle fibre

- I compositi a fibre sono vantaggiosi dal punto di vista meccanico solo se si sfrutta l'orientazione delle fibre
- Le caratteristiche migliori si hanno in corrispondenza di orientazioni uniassiali (ossia carichi uniassiali)
- In seconda battuta applicazioni con sforzi piani, dove si utilizzano come laminati
- I compositi non risultano vantaggiosi rispetto alle leghe leggere o altri materiali strutturali nel caso di carichi triassiali e/o componenti 3D
- Si realizzano compositi 3D (fibre corte) per riciclo di compositi a fibre lunghe in matrici termoplastiche. La macinazione nel riciclo riduce la lunghezza delle fibre.

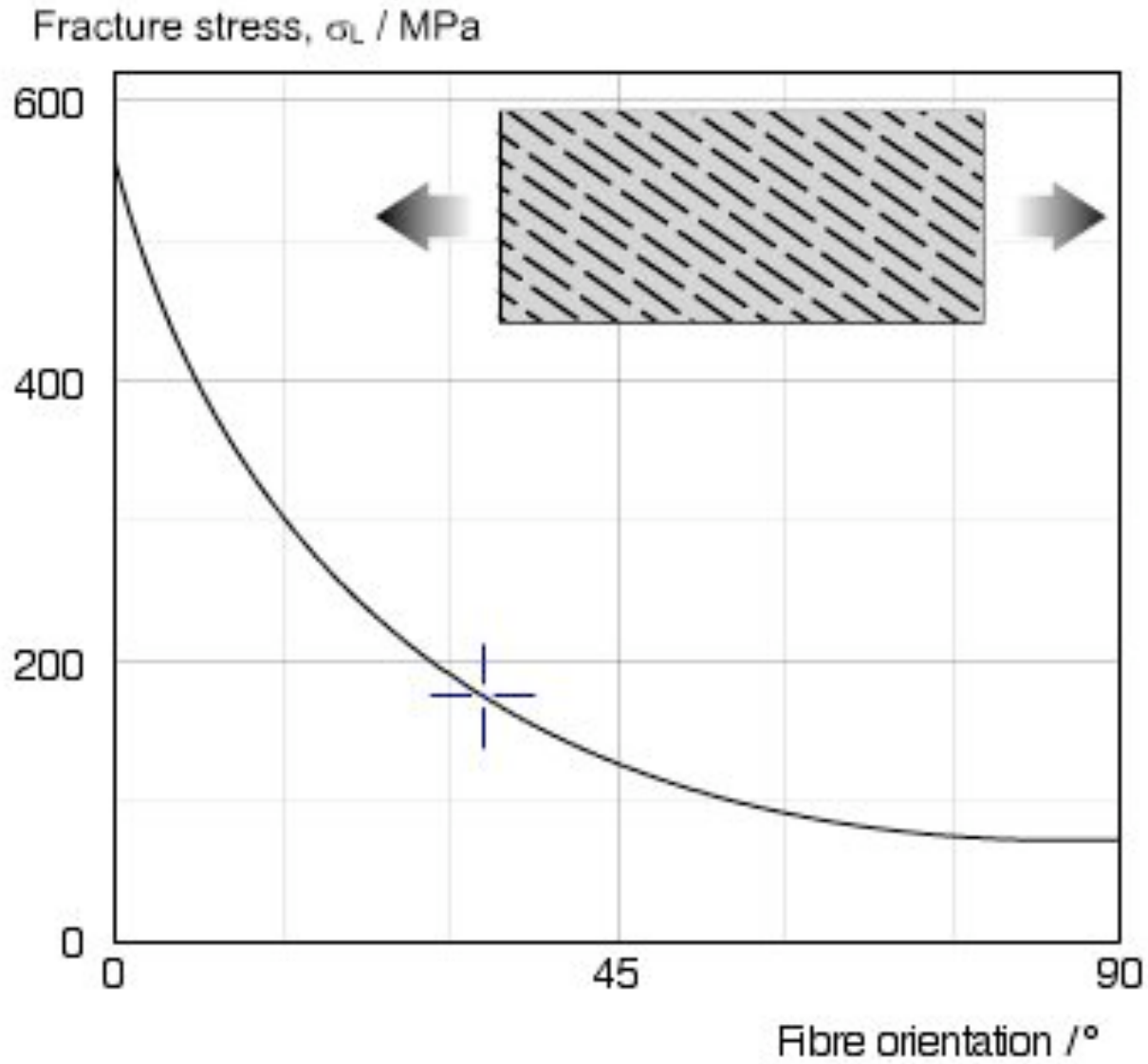
Effetto orientazione fibre corte



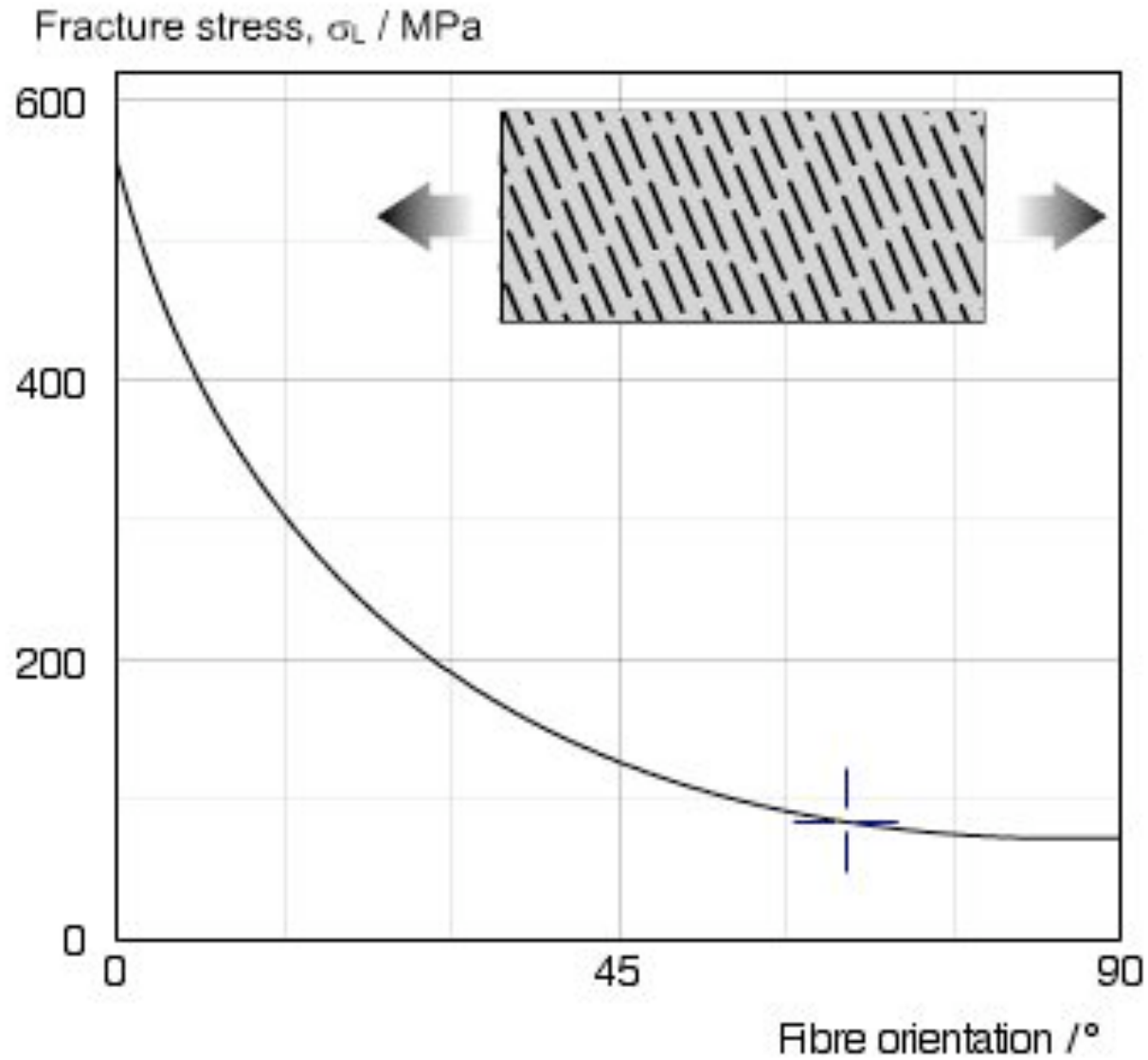
Effetto orientazione fibre corte



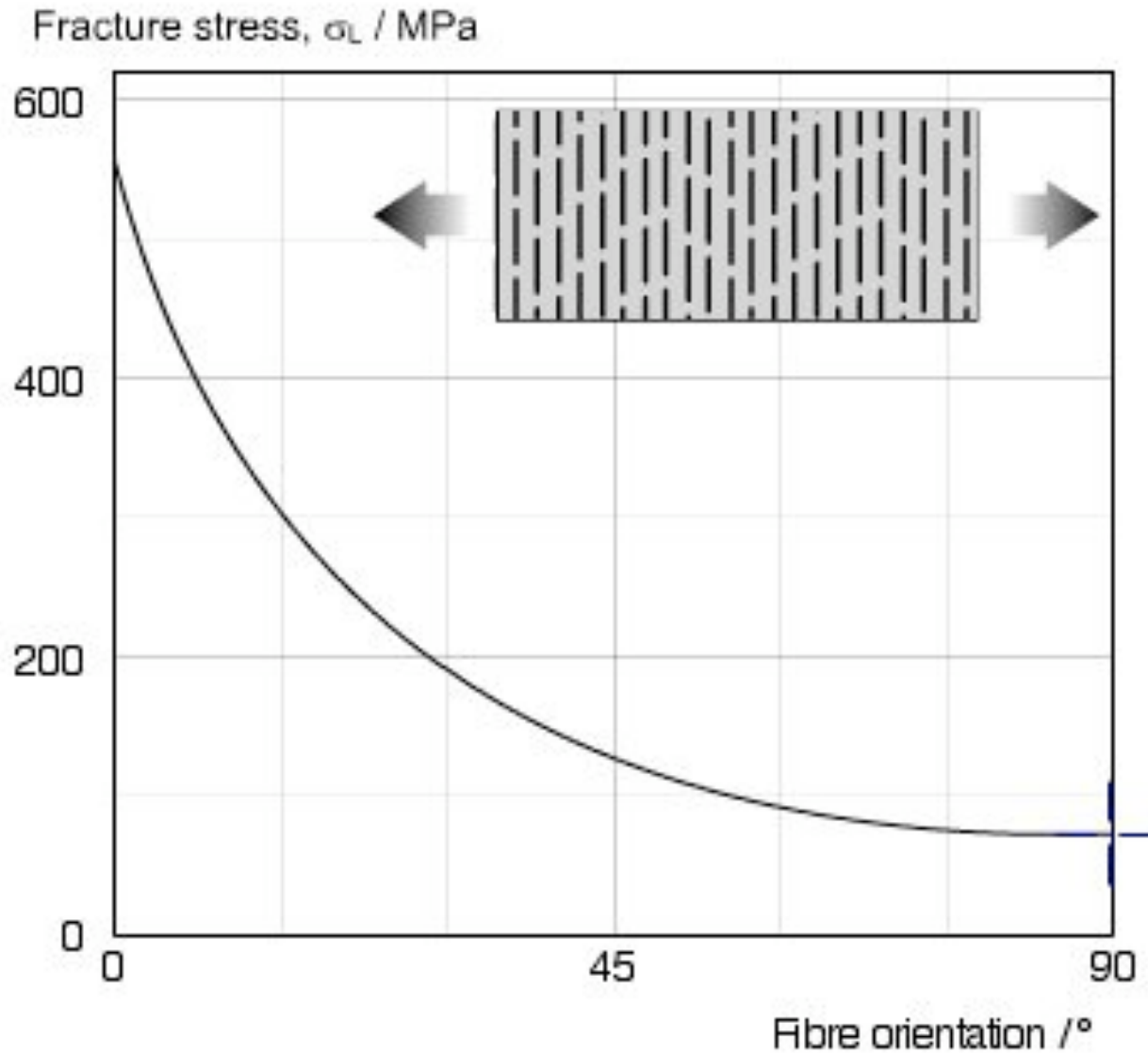
Effetto orientazione fibre corte



Effetto orientazione fibre corte

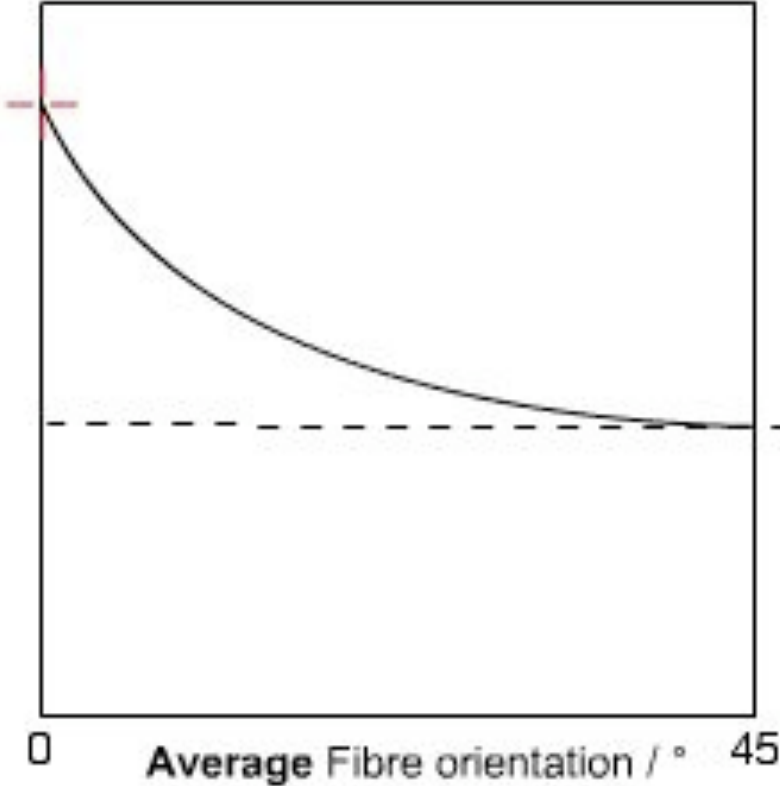


Effetto orientazione fibre corte

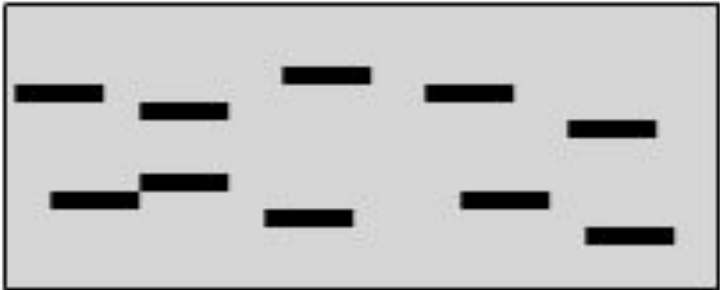
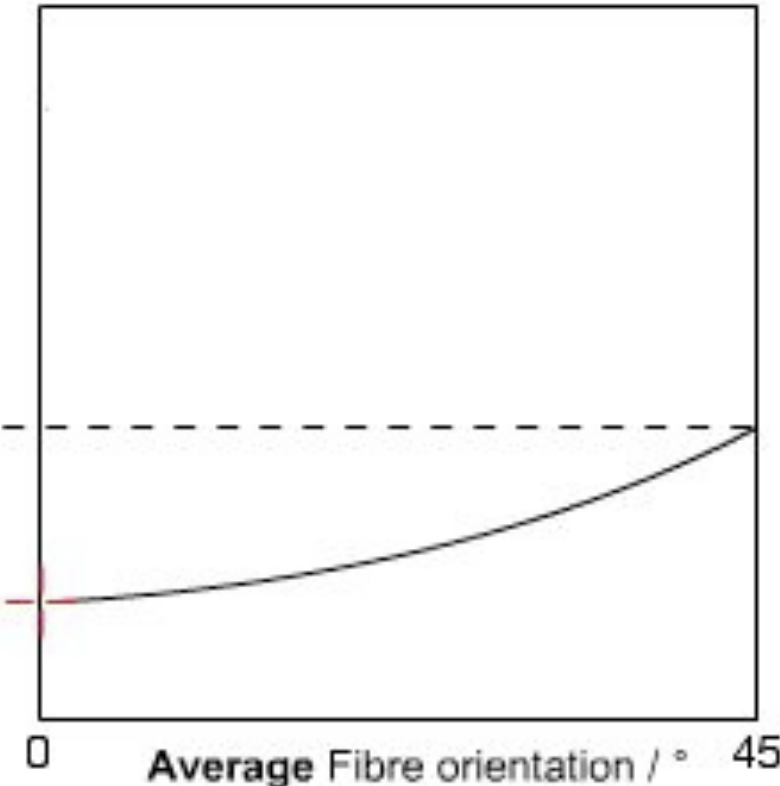


Effetto allineamento fibre

Axial tensile strength / MPa

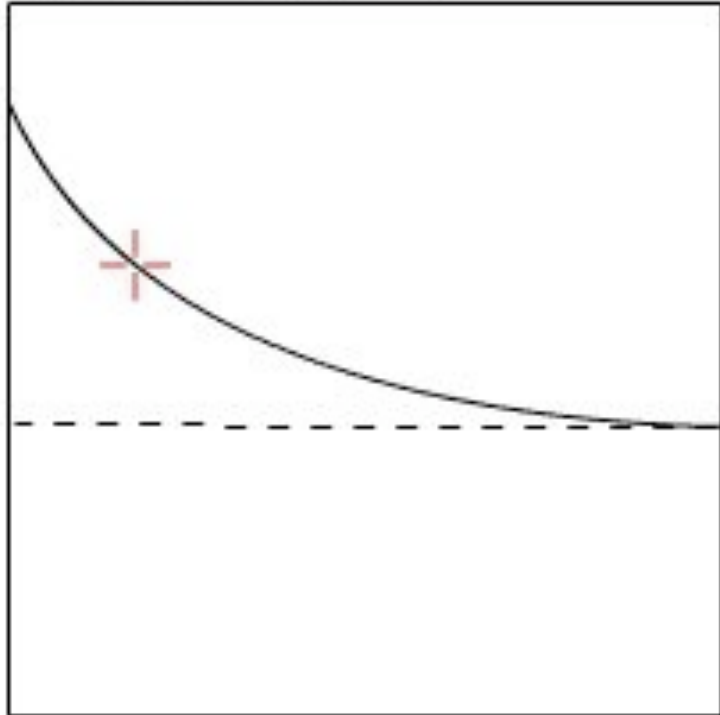


Transverse tensile strength / MPa



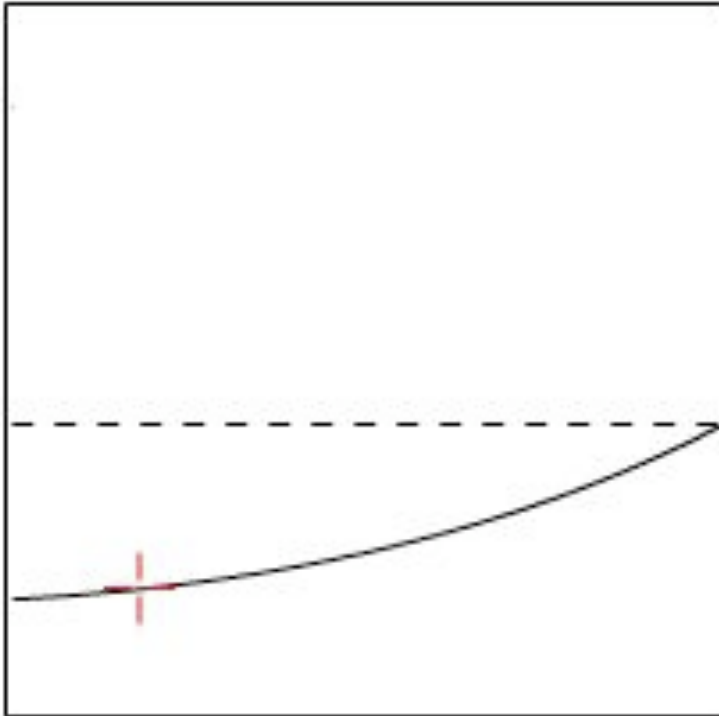
Effetto allineamento fibre

Axial tensile strength / MPa

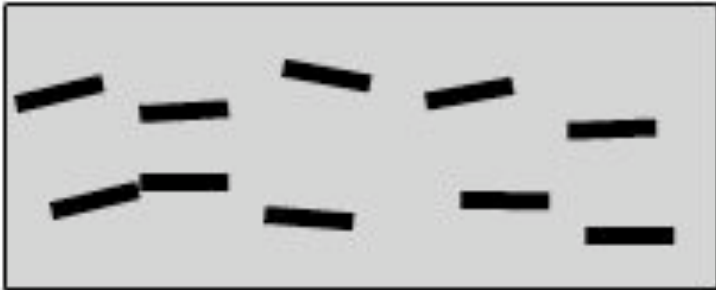


0 Average Fibre orientation / ° 45

Transverse tensile strength / MPa

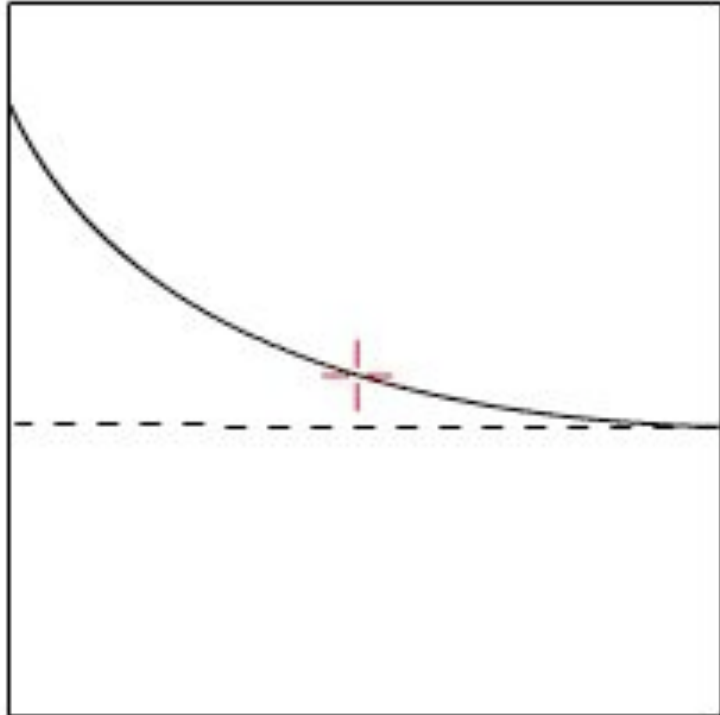


0 Average Fibre orientation / ° 45



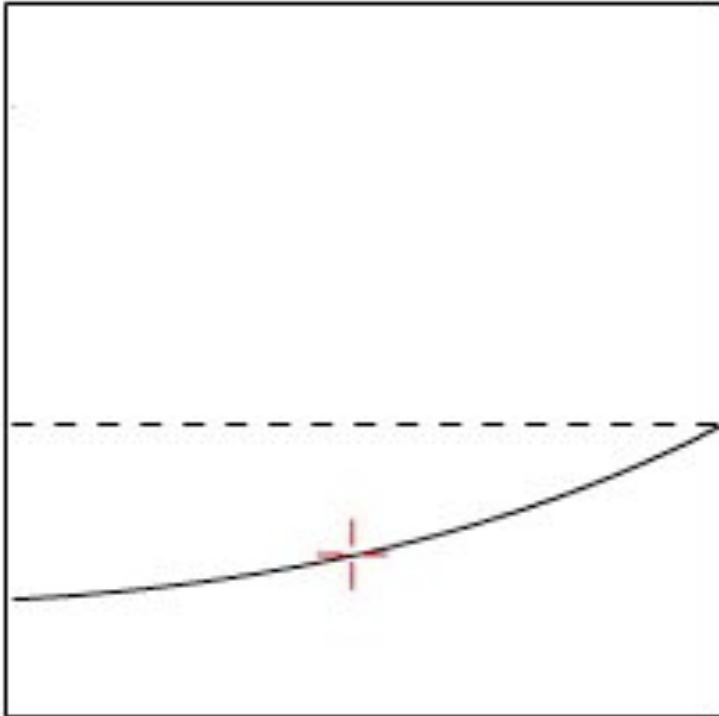
Effetto allineamento fibre

Axial tensile strength / MPa



0 Average Fibre orientation / ° 45

Transverse tensile strength / MPa

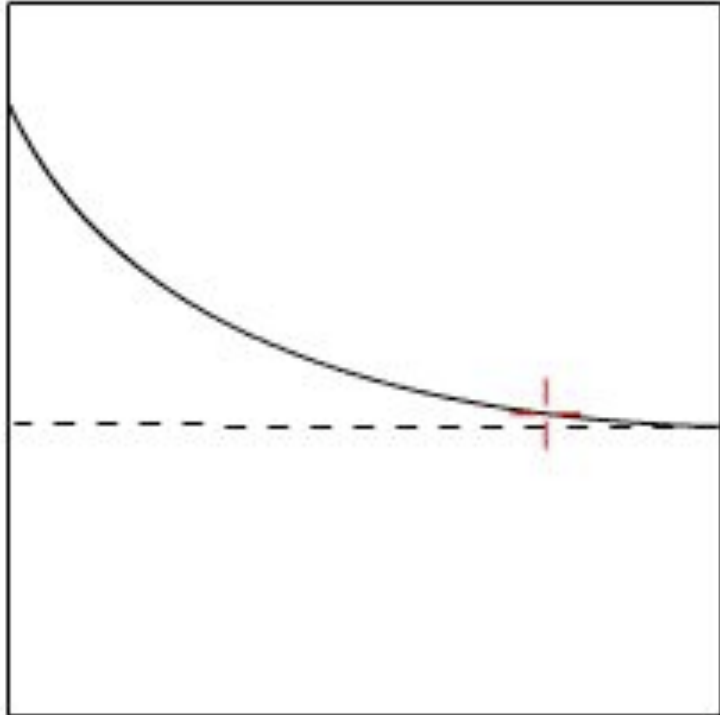


0 Average Fibre orientation / ° 45



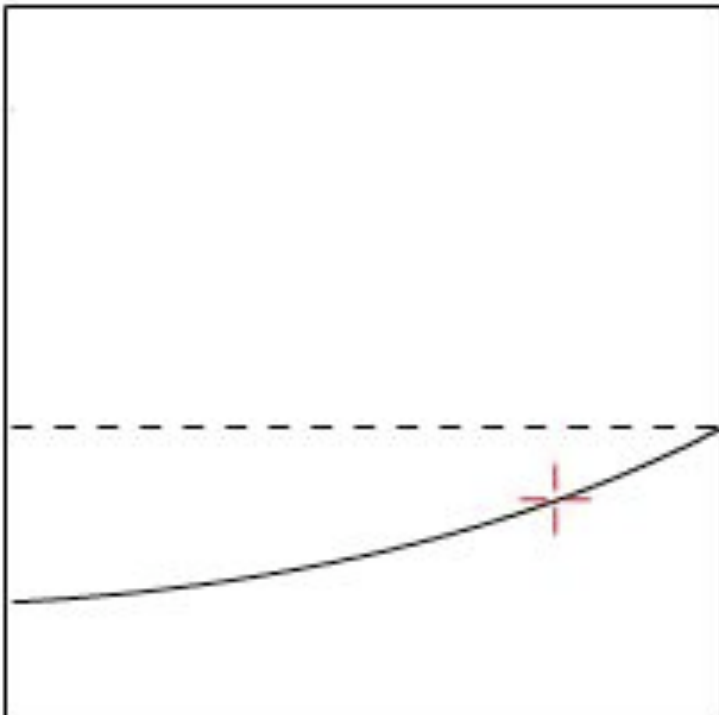
Effetto allineamento fibre

Axial tensile strength / MPa

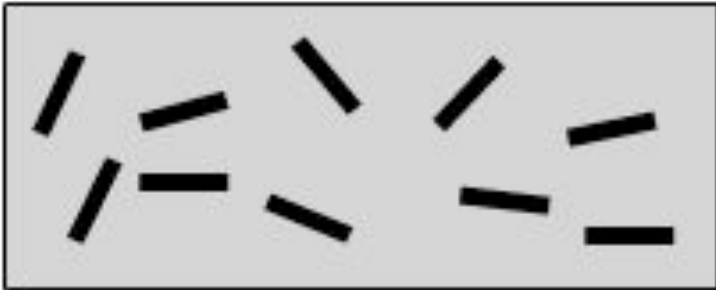


0 Average Fibre orientation / ° 45

Transverse tensile strength / MPa

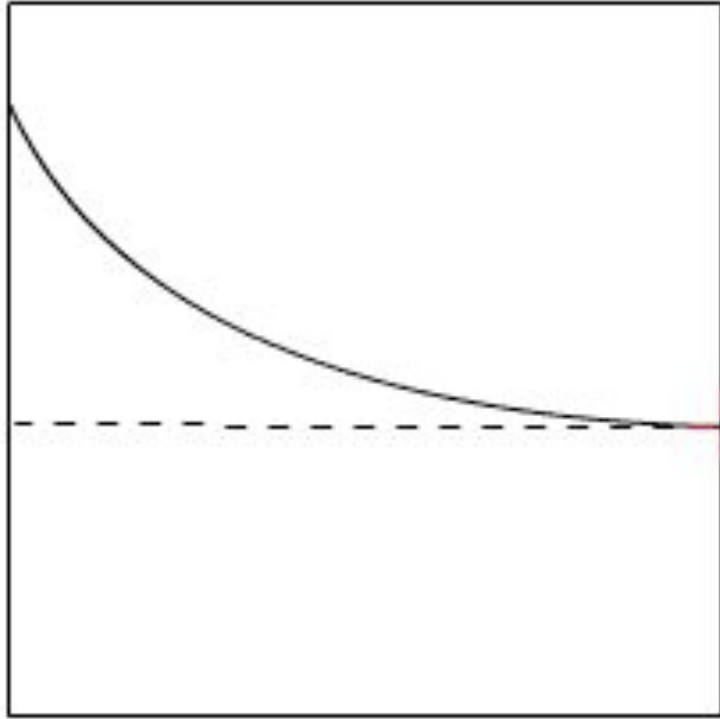


0 Average Fibre orientation / ° 45



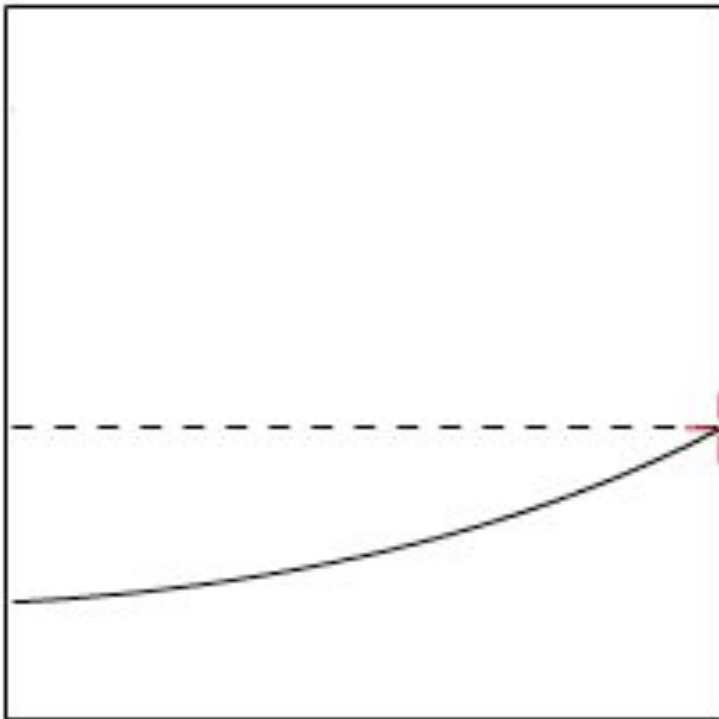
Effetto allineamento fibre

Axial tensile strength / MPa



0 Average Fibre orientation / ° 45

Transverse tensile strength / MPa



0 Average Fibre orientation / ° 45

