



# **SIMULAZIONE DELLA PROPAGAZIONE DI DIFETTI A FATICA IN GIUNTI INCOLLATI IN CONDIZIONI DI MODO MISTO ATTRAVERSO UN MODELLO MODIFICATO DI ZONA COESIVA**

**Prof. Alessandro Pirondi ([alessandro.pirondi@unipr.it](mailto:alessandro.pirondi@unipr.it))**

**Ing. Fabrizio Moroni ([moroni@ied.unipr.it](mailto:moroni@ied.unipr.it))**

*Dipartimento di Ingegneria Industriale – Università di Parma, v. le. G.P. Usberti 181/A, Parma - IT*



# Giunti incollati - Fatica



- Alleggerimento
- Strutture multi-materiale
- Composite integral construction

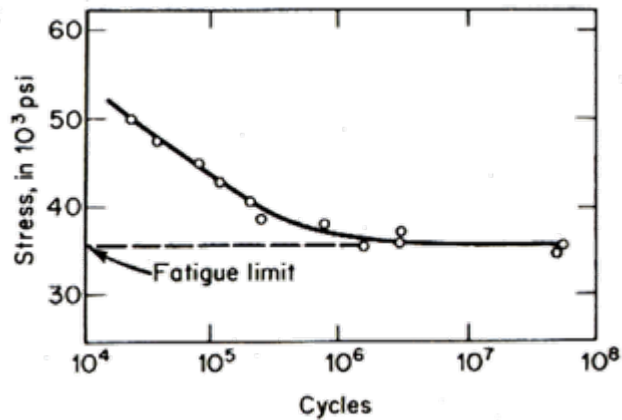
- Previsione resistenza a fatica
- Previsione accrescimento di difetti
- Fail Safe design
- Damage Tolerant design





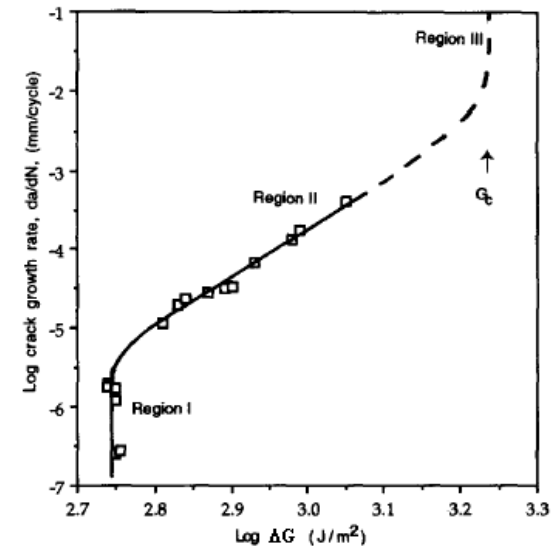
# Come stimare la resistenza a fatica?

## Curva di Wöhler



- Intuitivo
- Tensione locale o singolarità?
- Importanza fase di propagazione?

## Meccanica della frattura



- Complesso
- Conteggia la vita spesa in propagazione
- Importanza fase di innesco?

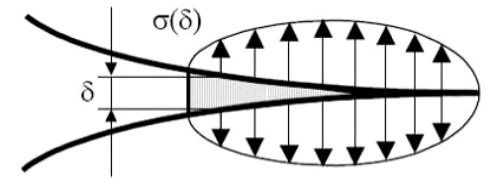


# Modello di zona coesiva

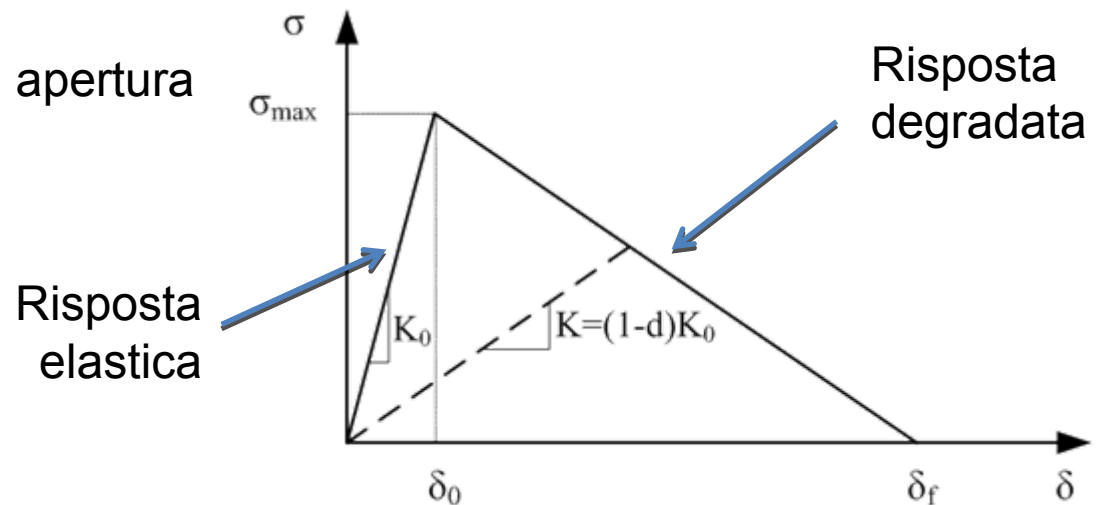
Modello micromeccanico per la previsione della evoluzione di difetti

- Propagazione di difetti in interfacce materiali
- No Remeshing
- No definizione tecniche rilascio nodale

Distribuzione tensioni all'apice del difetto



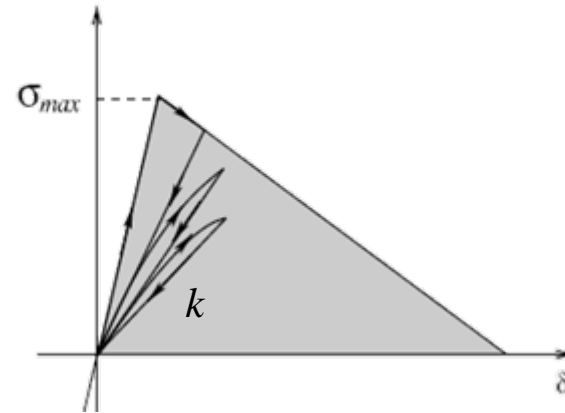
Relazione tensioni apertura





# Modello di zona coesiva e fatica

## Danneggiamento Progressivo



## Letteratura

- Accumulo di danno Cycle-by-cycle + cohesive endurance limit (esempio da Roe, Siegmund, Eng Fract Mech. 2003; 70:209-232)

$$\dot{D}_f = \frac{\Delta \dot{\bar{u}}}{\delta_\Sigma} \left[ \frac{\bar{T}}{\sigma_{\max}} - C_f \right] H(\Delta \bar{u} - \delta_0)$$

$$\Delta \bar{u} = \sqrt{\Delta u_n^2 + \Delta u_t^2}$$

$$\bar{T} = \sqrt{T_n^2 + T_t^2}$$

$\delta_\Sigma$  = parametro di scala  
 $C_f$  = rapporto limite di fatica

- Riduzione della rigidezza del materiale attraverso una dipendenza dal numero di cicli (esempio S. Maiti, P. H. Geubelle - A cohesive model for fatigue failure of polymers, Fracture Mechanics 2004)

$$k = -\frac{1}{\alpha} N^{-\beta} \sigma$$

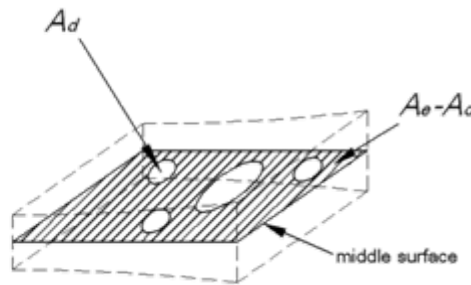
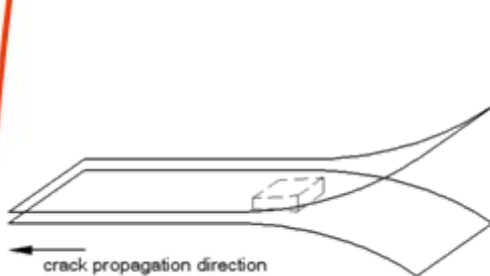
$\alpha, \beta$  da identificare



# Zona coesiva e danneggiamento a fatica

Aumento di lunghezza del difetto,  $dA$

➔ Aumento del danno,  $dD$ , nella zona di processo  $A_{CZ}$



$$\frac{dD}{dN} = \frac{dD}{dAd} \frac{dAd}{dN}$$

$$D = \frac{Ad}{Ae}$$

$$\frac{dA}{dN} = \sum_{i \in Acz} \frac{dAd^i}{dN}$$

$$\frac{dD}{dAd} = \frac{1}{Ae}$$

$$\frac{dA}{dN} = \sum_{i \in Acz} \frac{dAd}{dN} = n_{CZ} \frac{dAd}{dN} = \frac{A_{CZ}}{Ae} \frac{dAd}{dN}$$

$$\frac{dA}{dN} = C \Delta G^m$$

$$\frac{dD}{dN} = \frac{1}{A_{CZ}} C \Delta G^m$$

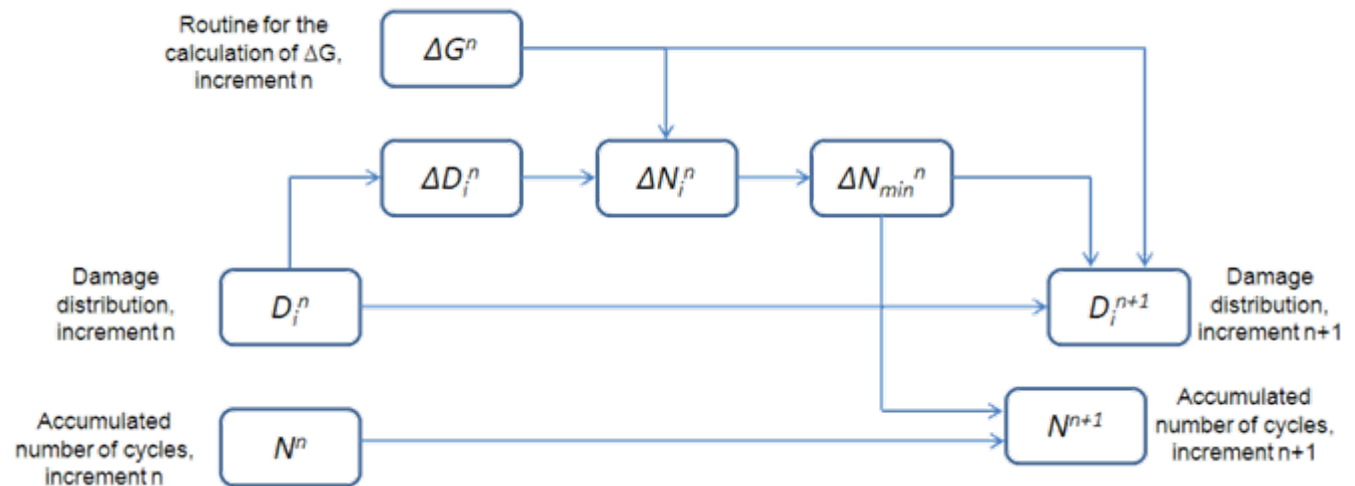
\* Turon, Costa, Camanho, Dàvila. Composites: Part A. 38 (2007), 2270-2282



# Implementazione EF (ABAQUS 6.7)

- Utilizzo elementi coesivi
- Danneggiamento degli elementi per fatica + danneggiamento quasi statico
- Degrado della rigidezza degli elementi mediante routine USDFLD

Diagramma di flusso aggiornamento danno:



Variazione massima di danneggiamento  $\Delta D_i^n$

$$\Delta D = \Delta D_{\max} \quad \text{if } 1 - D_i > \Delta D_{\max}$$

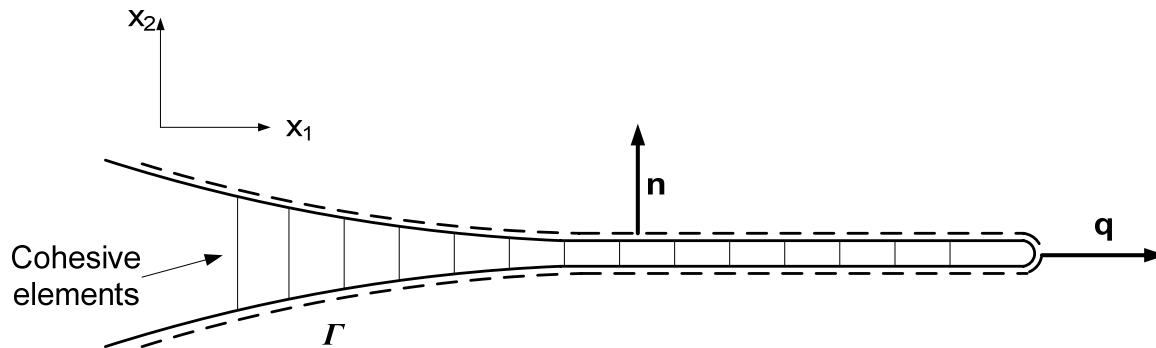
$$\Delta D = 1 - D_i \quad \text{if } 1 - D_i < \Delta D_{\max}$$



# Implementazione EF (ABAQUS 6.7)

## Valutazione del tasso di rilascio di energia attraverso il J-Integral

- All'inizio di ogni incremento mediante la subroutine URDFIL
- Percorso di integrazione = bordo degli elementi coesivi



$$J = \int_{\Gamma} \mathbf{n} \cdot [H] \cdot \mathbf{q} d\Gamma \quad [H] = W[I] - \left[ \sigma_{i,j} \right] \left[ \frac{\partial u_{i,j}}{\partial x_{i,j}} \right]$$

$u_{i,j}$ : displacement

$\sigma_{i,j}$ : stresses

$\mathbf{n}$ : vector normal to the path

$\mathbf{q}$ : vector along the crack propagation direction

$\delta$ : opening

$W$ : strain energy

$$J = \int_{\Gamma} \left( -\sigma_{1,2} \frac{\partial u_1}{\partial x_1} - \sigma_{2,2} \frac{\partial u_2}{\partial x_1} \right) d\Gamma$$

*Modo II*

*Modo I*



# Modo Misto

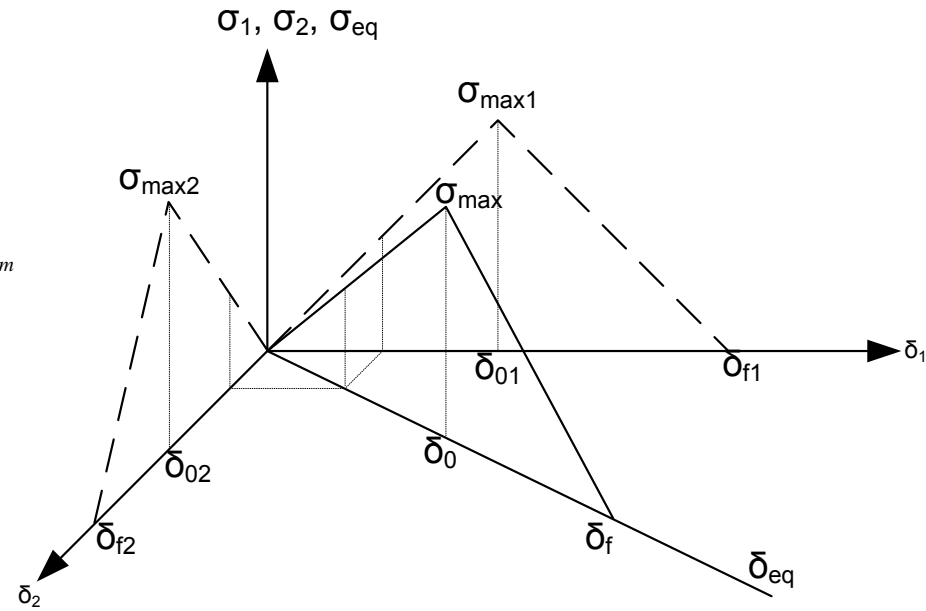
## Legge coesiva

Da leggi in puro modo I e modo II

$$\Rightarrow G_{TC} = G_{IC} + (G_{IIC} - G_{IC}) \cdot MM^{m_m}$$

$$\Rightarrow \left( \frac{\sigma_1}{\sigma_{\max 1}} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_2}{\sigma_{\max 2}} \right)^2 = 1$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow U_{eq} &= U_1 + U_2 \\ &= 0.5 \cdot \delta_{eq}^2 \cdot K_{0eq} = \\ &= 0.5 \cdot (\delta_1 + |\delta_1|)^2 \cdot K_{01} + 0.5 \cdot \delta_2^2 \cdot K_{02} \end{aligned}$$



$$\delta_{eq} = \sqrt{\left( \frac{\delta_1 + |\delta_1|}{2} \right)^2 + (\delta_2)^2}$$

$$MM = \frac{G_{II}}{G_{TOT}}$$

➡ Definizione legge coesiva modo misto



# Modo Misto

## Velocità di propagazione di difetti

$$\Rightarrow \text{Modo I} \quad \frac{da}{dN} = B_I (\Delta G)^{d_I}$$

$$\Rightarrow \text{Modo II} \quad \frac{da}{dN} = B_{II} (\Delta G)^{d_{II}}$$

Utilizzando la teoria di Kenane e Benzeggagh\*

$$\Rightarrow \frac{da}{dN} = B(\Delta G)^d$$

$$\ln B = \ln B_I + (\ln B_I - \ln B_{II})(MM)^{mB}$$

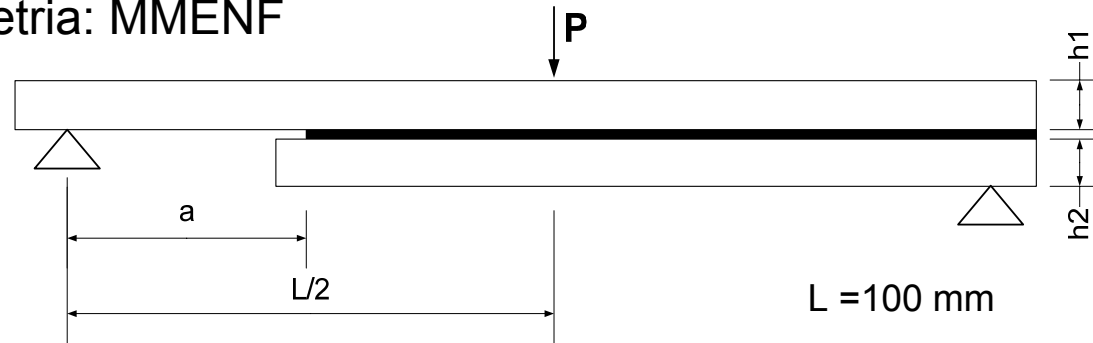
$$d = d_I + (d_{II} - d_I) \cdot (MM)^{md}$$

\* Kenane M. and Benzeggagh M. L., Mixed mode delamination fracture toughness of unidirectional glass/epoxy composites under fatigue loading. Compos. Sci. Technol. 1997, 57, pp. 597-605



# Modelli FEM

Geometria: MMENF



Variazione rapporto  $h_1/h_2 \rightarrow$  variazione modo misto

**Parametri legge coesiva e legge di Paris<sup>1</sup>**

Parametro	Modo I	Modo II
$\Gamma$ [N/mm]	0.266	1.002
$\sigma_{max}$ [MPa]	30	30
$\delta_0$ [mm]	0.003	0.003
$\delta_C$ [mm]	0.0173	0.066
$B$	0.0616	4.23
$d$	5.4	4.5
$\Delta G_{th}$ [N/mm]	0.06	0.1

**Parametri di modo misto<sup>2</sup>**

Parametro	Valore
$m_m$	2.6
$m_d$	1.85
$m_B$	0.35

<sup>1</sup>Turon, Costa, Camanho, Dàvila, Simulation of delamination in composites under high-cycle fatigue. Composites 38 (2007), 2270-2282

<sup>2</sup>Benzeggagh M. L. and Kenane M., Mixed mode delamination fracture toughness using MMB apparatus for unidirectional glass/epoxy. Compos. Sci. Technol. 1996, 56, pp. 100-123.

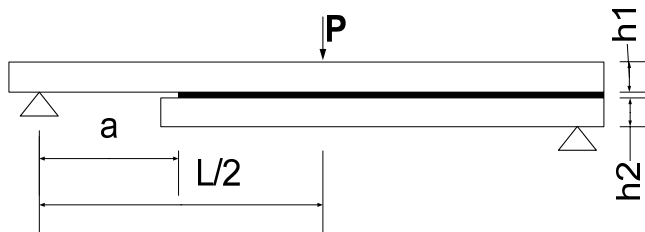
<sup>3</sup>Kenane M. and Benzeggagh M. L., Mixed mode delamination fracture toughness of unidirectional glass/epoxy composites under fatigue loading. Compos. Sci. Technol. 1997, 57, pp. 597-605



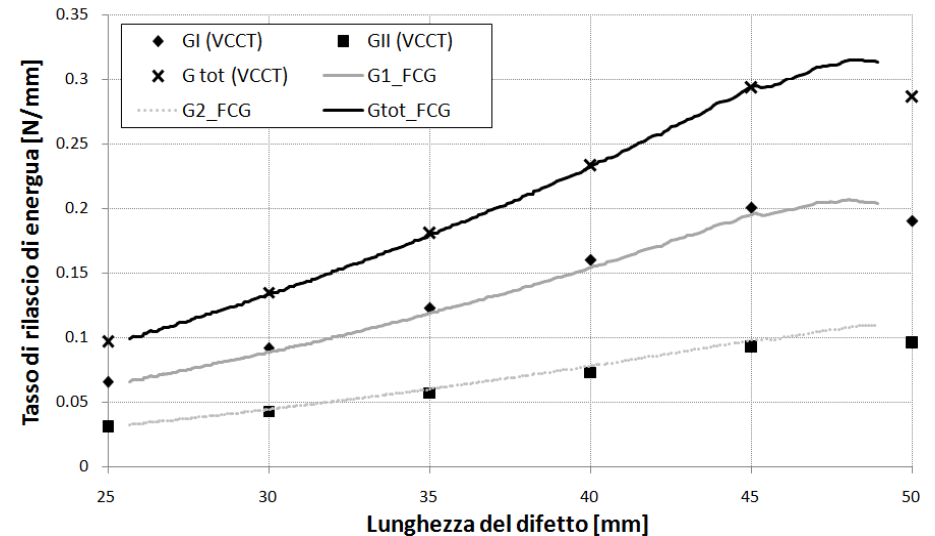
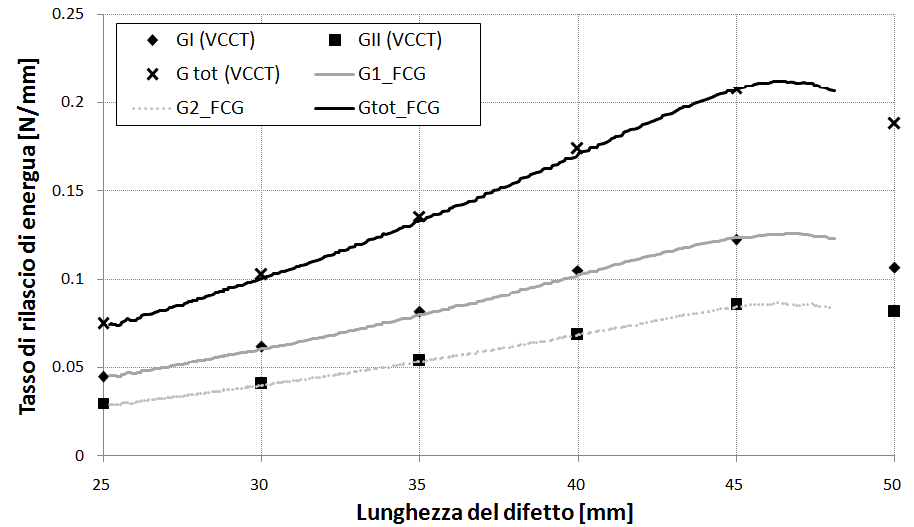
# Risultati – Calcolo tasso di rilascio di energia

Validato calcolo per confronto con VCCT

$h_1 = h_2 = 5 \text{ mm}$   
 $P = 25 \text{ N/mm}$   
 $MM = 0.40$



$h_1 = 2.5 \text{ mm}, h_2 = 5 \text{ mm}$   
 $P = 10 \text{ N/mm}$   
 $MM = 0.33$



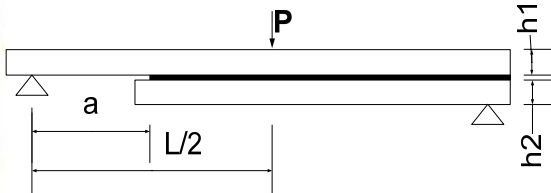


# Risultati

$$h_1 = 5 \text{ mm}, h_2 = 1 \text{ mm}$$

$$P = 35 \text{ N/mm}$$

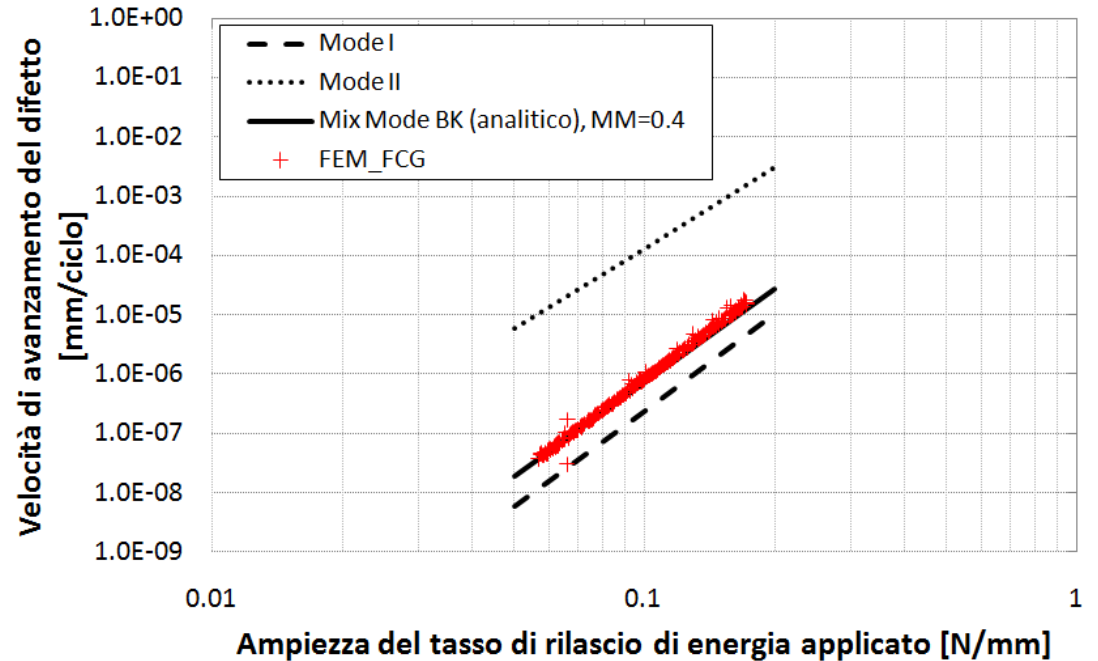
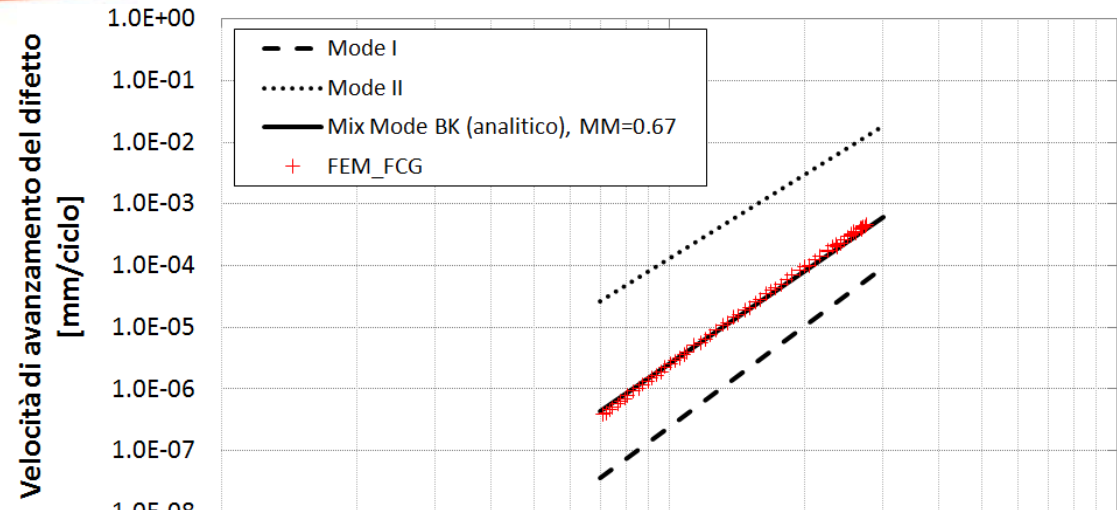
$$MM = 0.67$$



$$h_1 = 5 \text{ mm}, h_2 = 5 \text{ mm}$$

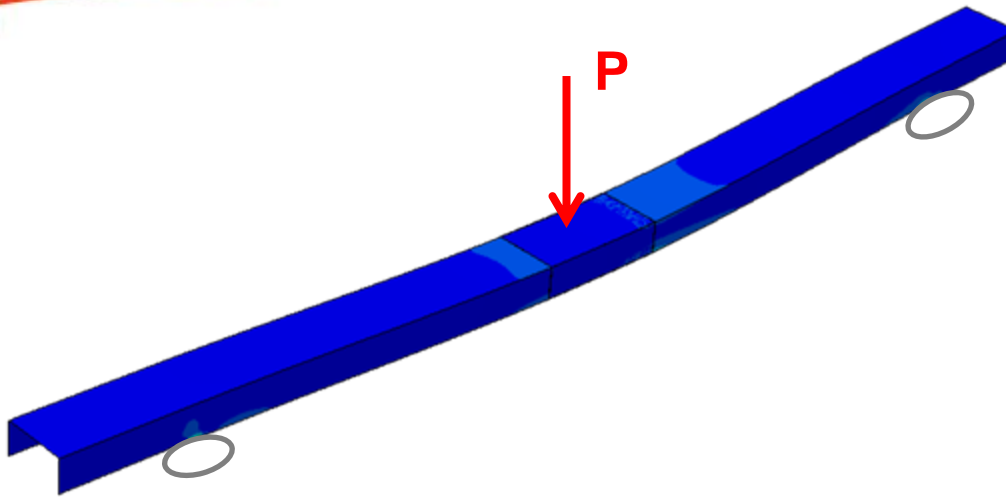
$$P = 10 \text{ N/mm}$$

$$MM = 0.40$$

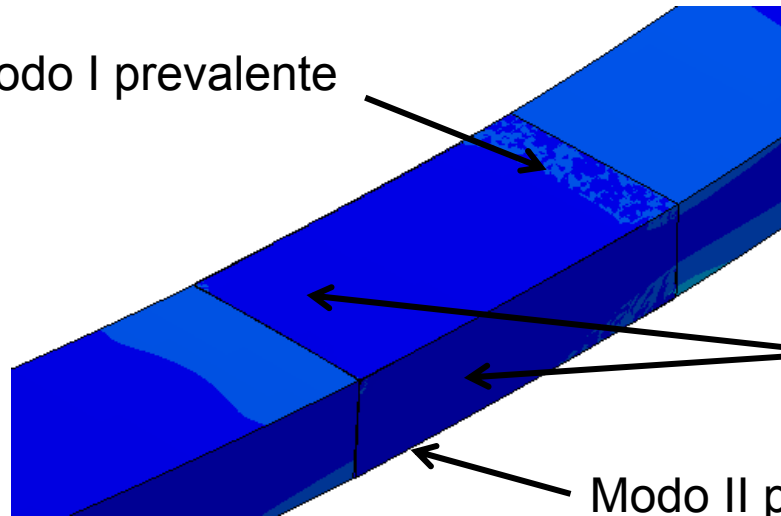




# Come trattare situazioni più complesse?



Modo I prevalente



Modo II prevalente



# Come trattare situazioni più complesse?

Approccio di modo misto “globale”

Per l'intero modello

$$\begin{array}{l} G_I \\ G_{II} \end{array} \begin{array}{l} \diagup \\ \diagdown \end{array} G_{TOT}, MM \text{ — } B (MM), d (MM) \text{ — } \frac{da}{dN} = B(\Delta G)^d$$

Approccio di modo misto “locale”

Per ogni punto di integrazione

$$MM_U = U_I / U_{II} \text{ — } G_{TOT}, MM_U \text{ — } B (MM_U), d (MM_U) \text{ — } \frac{da}{dN} = B(\Delta G)^d$$

$$d = d_I + (d_{II} - d_I) \cdot (MM)^{md}$$

$$\ln B = \ln B_I + (\ln B_I - \ln B_{II}) (MM)^{mB}$$



# Conclusioni – Sviluppi futuri

## Conclusioni

- Implementazione di una procedura per la previsione della propagazione di difetti a fatica attraverso una subroutine esterna interagente con il software ABAQUS
- definizione procedura per il calcolo automatico del tasso di rilascio di energia
- implementazione di criteri di avanzamento in modo misto

## Sviluppi futuri

- Estensione del funzionamento a geometrie tridimensionali
- Estensione a diverse forme di leggi coesive



# Altre attività in corso/prospettiva

## Giunzioni incollate

- Analisi resistenza a fatica giunzioni CFRP-CFRP e acciaio-CFRP (assieme a Politecnico di Milano)
- Effetto del distacco parziale di rinforzi (stringers e doublers) incollati sulla tolleranza al danno di pannelli aeronautici
  1. modalità empirica
  2. utilizzo della procedura mostrata in precedenza (quando disponibile per geometria 3D)

## Giunzioni ibride

- Analisi resistenza statica ed a fatica di giunzioni USMWB (UltraSonic Metal WeldBonding; assieme a Politecnico di Milano)
- Simulazione del cedimento utilizzando elementi punto di connessione per l'unione meccanica e zona coesiva per l'incollaggio