



**GRUPPO  
ITALIANO  
FRATTURA (IGF)**

# **COMPORTAMENTO A FATICA DI STRUTTURE MECCANICHE IN PIENA SCALA: RISULTATI SPERIMENTALI E PREVISIONE**



**Prof. M. Beghini  
Prof. L. Bertini  
Prof. V. Fontanari  
Prof. E. Manfredi  
Ing. C. Santus**

## Aspetti generali del lavoro

- Sono state presentate le principali attività sperimentali degli ultimi anni del *DIMNP dell'Università di Pisa* di fatica su componenti in piena scala
- Sperimentazione di fatica in piena scala generalmente comporta condizioni di fatica multiassiale
- Previsioni mediante correlazione con sperimentazione in piccola scala e modelli FEM

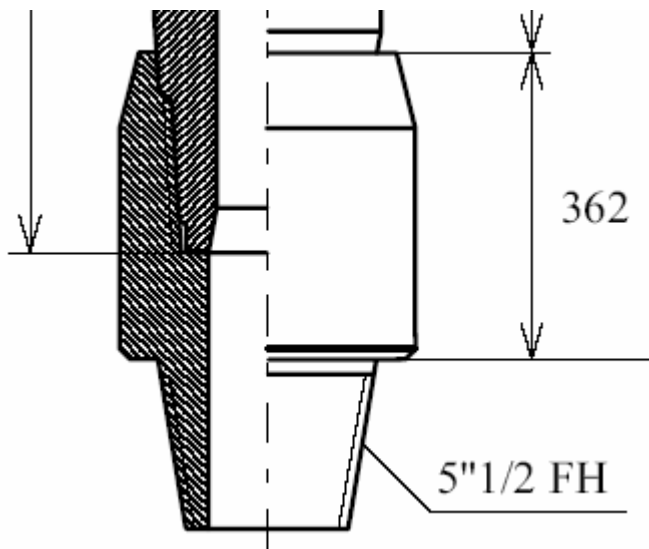
**Sperimentazione a fatica su componenti in piena scala, presso il  
Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Nucleare e della  
Produzione (DIMNP) dell'Università di Pisa**

- **Elementi di perforazione petrolifera** in acciaio ed alluminio  
(collaborazione con **ENI S.p.A.**)
- **Bracci di sospensione per motoveicolo** in alluminio presso-fuso  
(collaborazione con **Piaggio S.p.A.**)
- **Ingranaggi per applicazioni aeronautiche** ad elevate prestazioni  
(collaborazione con **AVIO Propulsione Aerospaziale S.p.A.**)

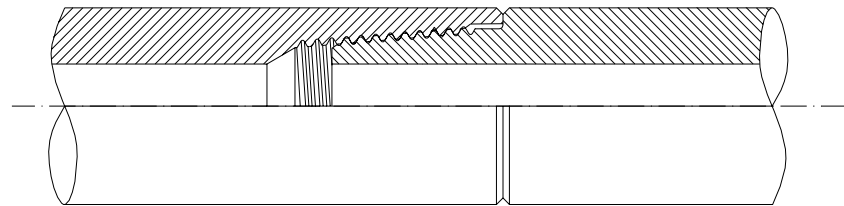
# Sperimentazione a fatica su componenti in piena scala su *elementi di perforazione petrolifera in acciaio ed alluminio*

Utilizzo di **macchine a risonanza** per *Drill Pipe* o *Drill Collars*,  
elementi di stringhe di perforazione petrolifera

## **ADP –TJ threaded connection**



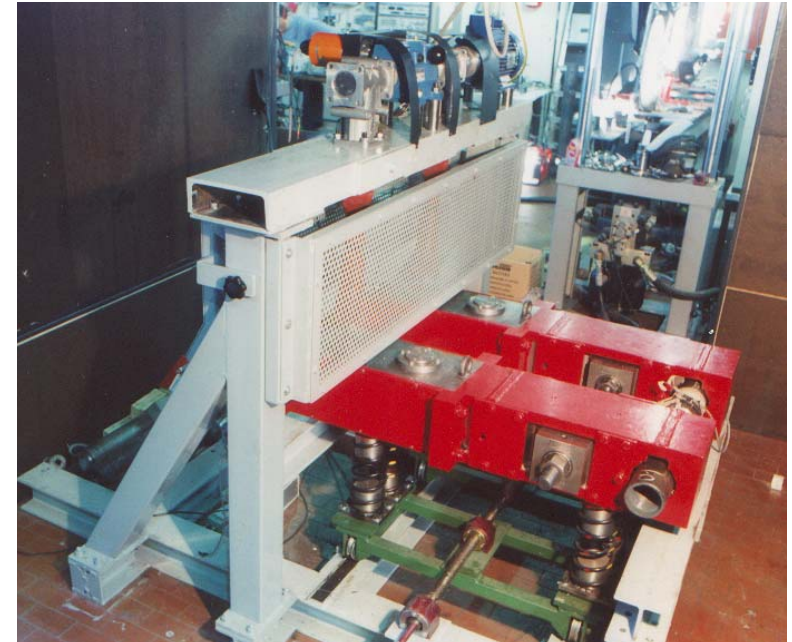
## **Drill Collar NCxx**



# Sperimentazione a fatica su componenti in piena scala su *elementi di perforazione petrolifera in acciaio ed alluminio*

Utilizzo di **macchine a risonanza**

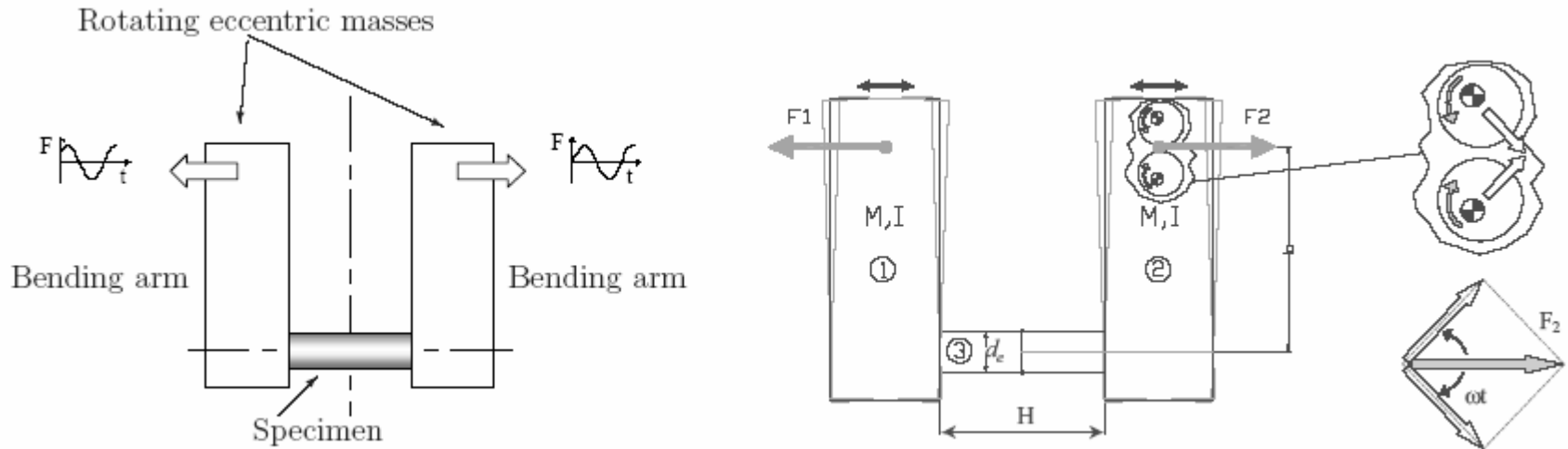
- Macchina per fatica a flessione **alternata** (immagini)



# Sperimentazione a fatica su componenti in piena scala su elementi di perforazione petrolifera in acciaio ed alluminio

Utilizzo di macchine a risonanza

- Macchina per fatica a flessione **alternata** (funzionamento)

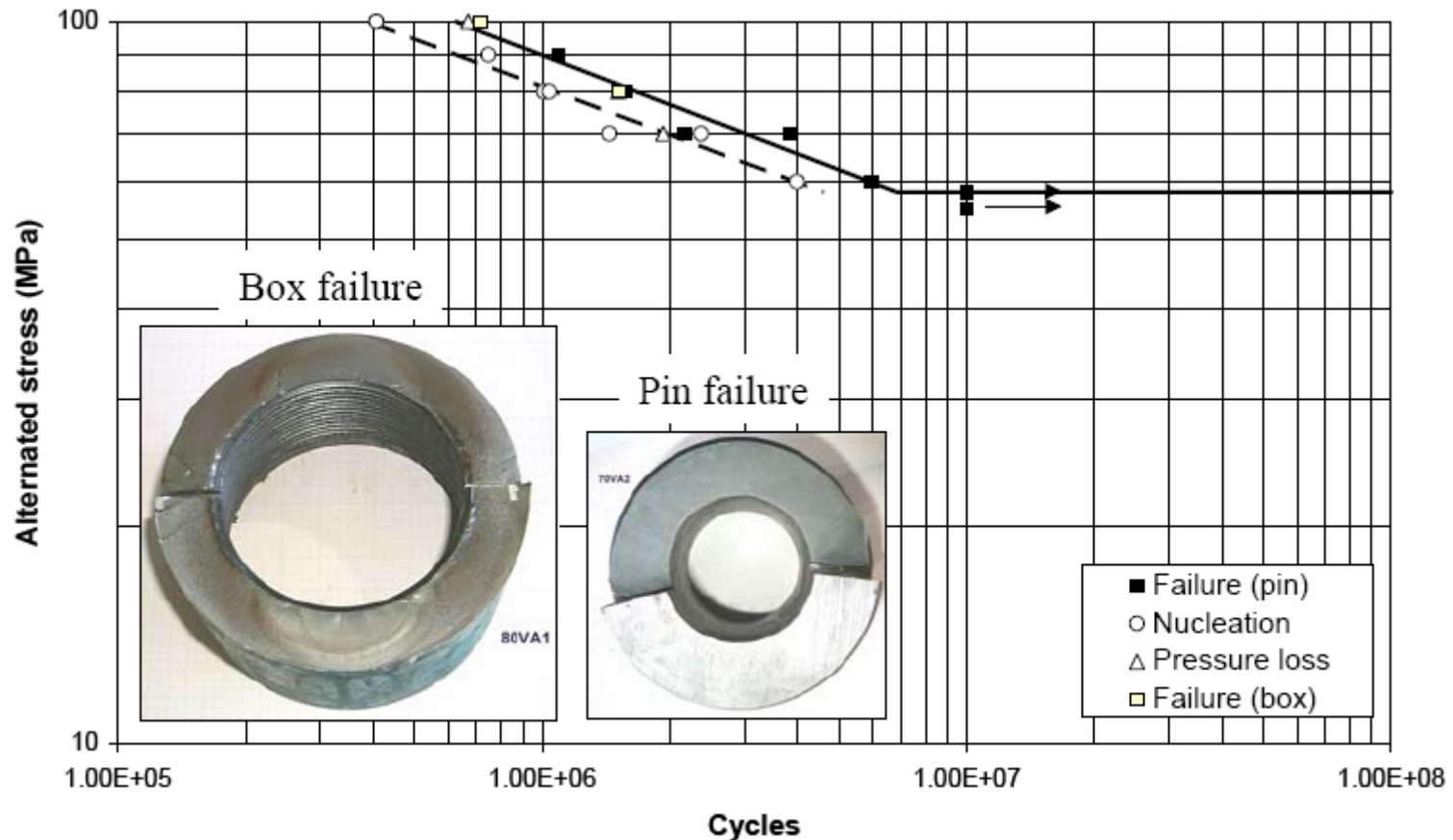


[rif.] **M. Beghini, L. Bertini, F. Frendo, M. Storai, and A. Baryshnikov.**  
*“Una macchina a risonanza per prove di fatica su particolari cilindrici in piena scala”.* AIAS XXVIII, 1999.

# Sperimentazione a fatica su componenti in piena scala su elementi di perforazione petrolifera in acciaio ed alluminio

Utilizzo di [macchine a risonanza](#)

- Macchina per fatica a flessione **alternata** (risultati)



# **Sperimentazione a fatica su componenti in piena scala su elementi di perforazione petrolifera in acciaio ed alluminio**

Utilizzo di **macchine a risonanza**

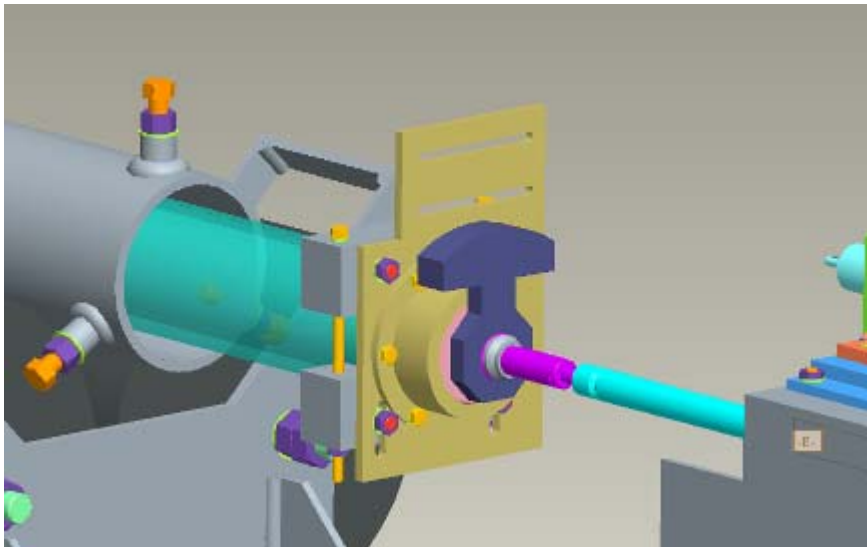
- Macchina per fatica a flessione **rotante** (immagini)



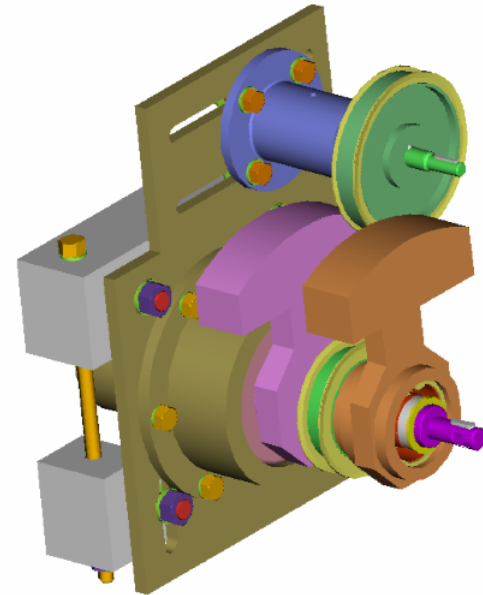
# Sperimentazione a fatica su componenti in piena scala su elementi di perforazione petrolifera in acciaio ed alluminio

Utilizzo di macchine a risonanza

- Macchina per fatica a flessione rotante (funzionamento)



Eccentrico rotante,  
Singola massa, controllo in  
frequenza dell'eccitazione

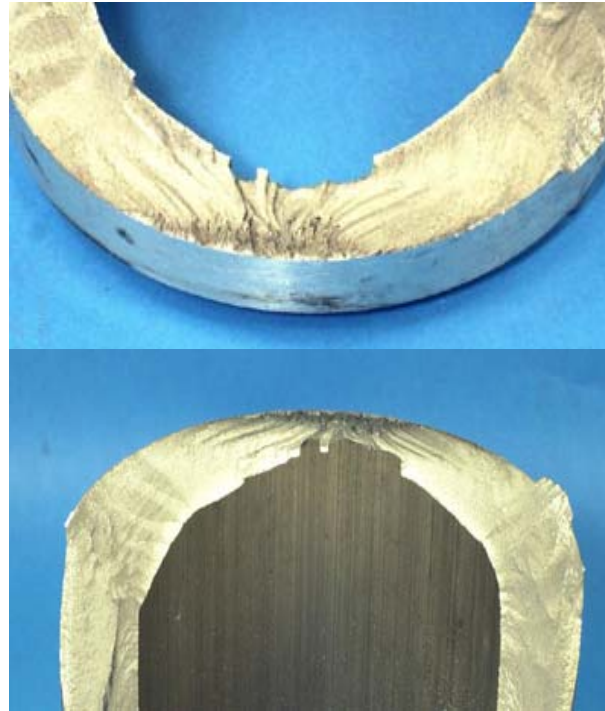
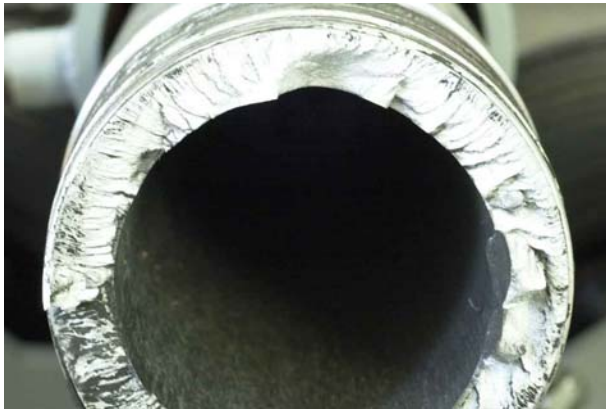


Gruppo eccentrico rotante,  
Due masse, controllo in  
fase dell'eccitazione

# Sperimentazione a fatica su componenti in piena scala su *elementi di perforazione petrolifera in acciaio ed alluminio*

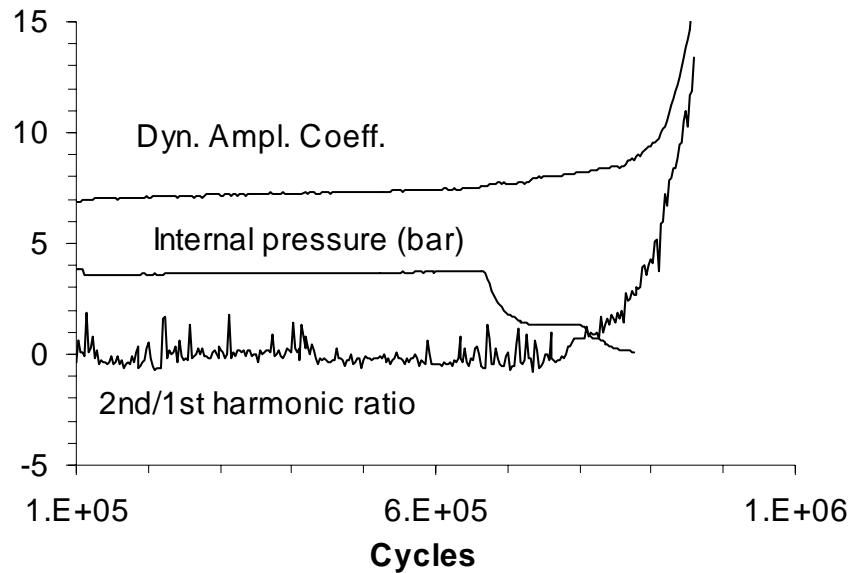
Utilizzo di **macchine a risonanza**

- Macchina per fatica a flessione **rotante** (risultati)



# Sperimentazione a fatica su componenti in piena scala su elementi di perforazione petrolifera in acciaio ed alluminio

Utilizzo di macchine a risonanza



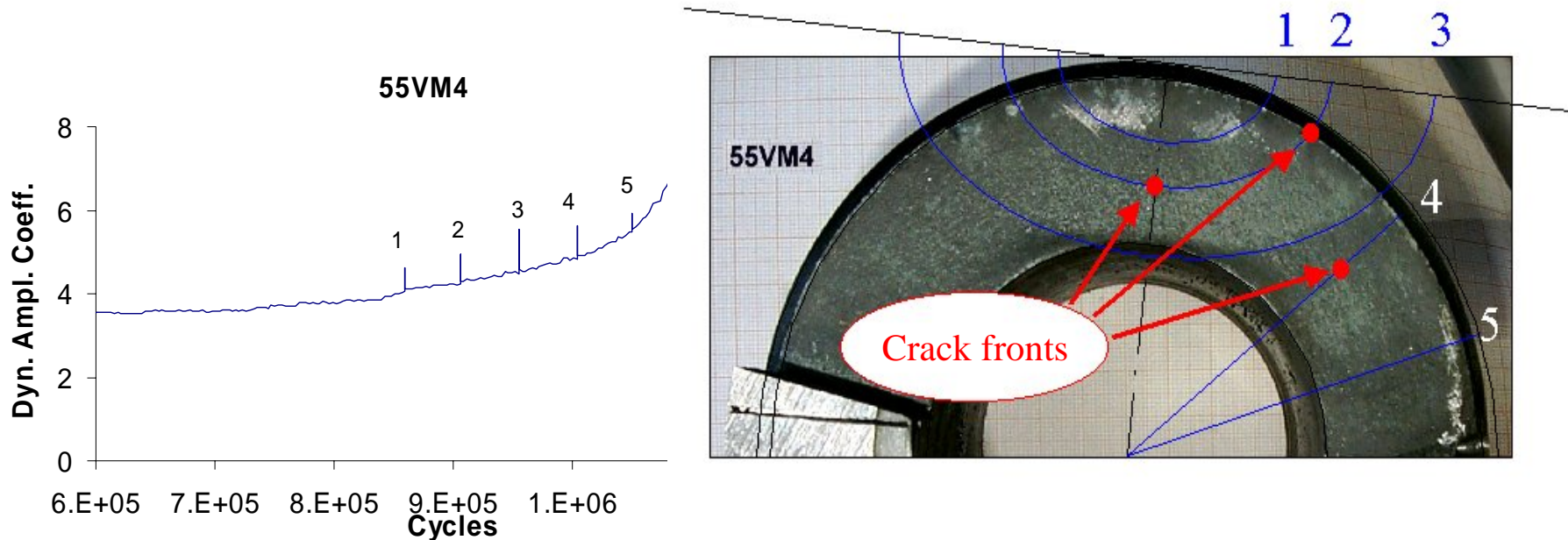
Rilievo di fratture tramite:

- variazione della **dinamica** del componente
- intensità della **seconda armonica** rispetto alla prima (FFT)
- perdita di **pressione** (possibilità di pressurizzare internamente il componente)

Rilievo di una fessura di 10-15 mm  
(**molto maggiore di quella ipotizzabile al termine della fase di innesco**)

# Sperimentazione a fatica su componenti in piena scala su elementi di perforazione petrolifera in acciaio ed alluminio

Utilizzo di macchine a risonanza, studio della fase di propagazione



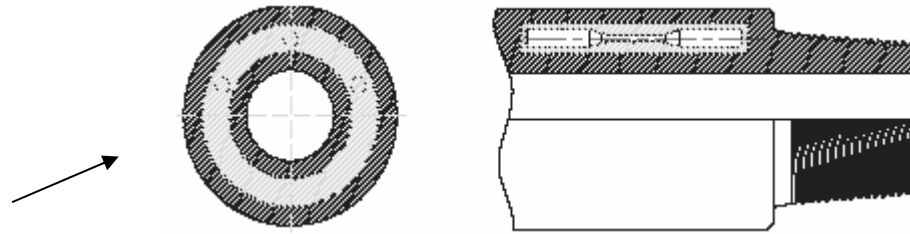
per **Acciaio** ad alta tenacità è possibile eseguire il *benchmarking* a vari livelli della vita di propagazione del fronte della cricca (FCGR)

per **Alluminio** molto incrudito la propagazione è quasi trascurabile

# Sperimentazione a fatica su componenti in piena scala su elementi di perforazione petrolifera in acciaio ed alluminio

Interpretazione dei risultati – Test in piccola scala

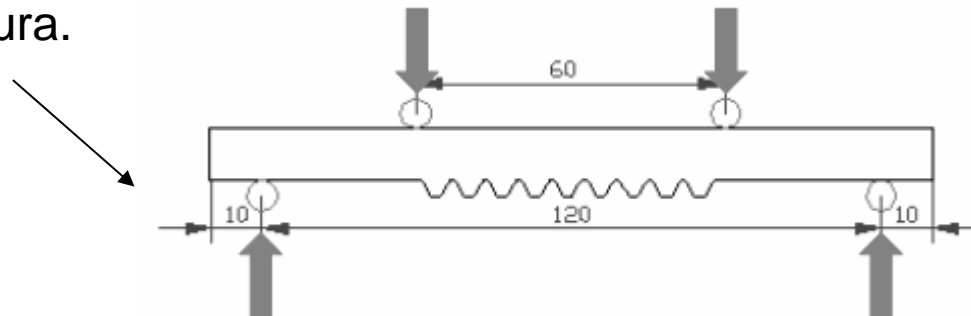
(1) Trazione



(2) Fatica assiale su provini lisci ( $R = -1, 0 \div 0.7$ )

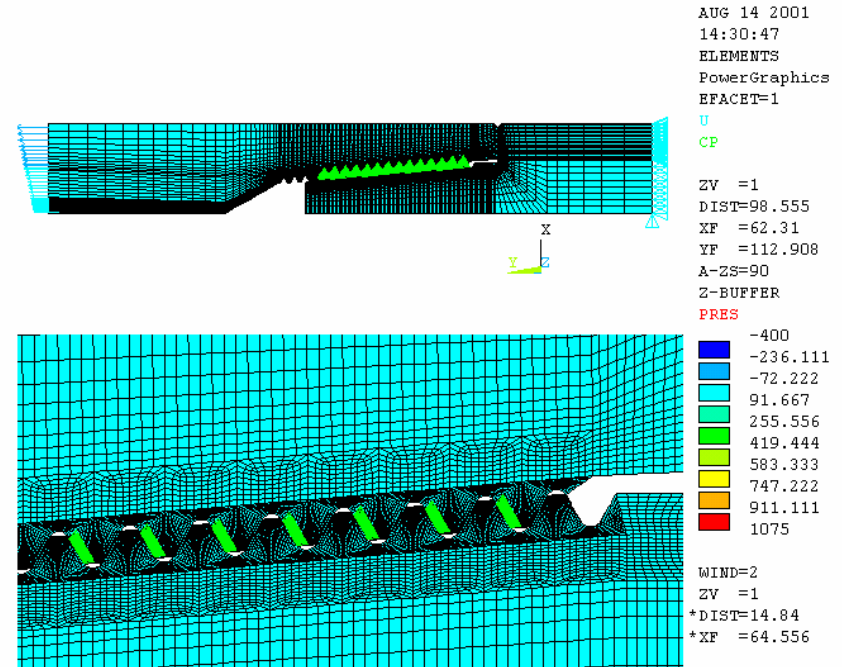
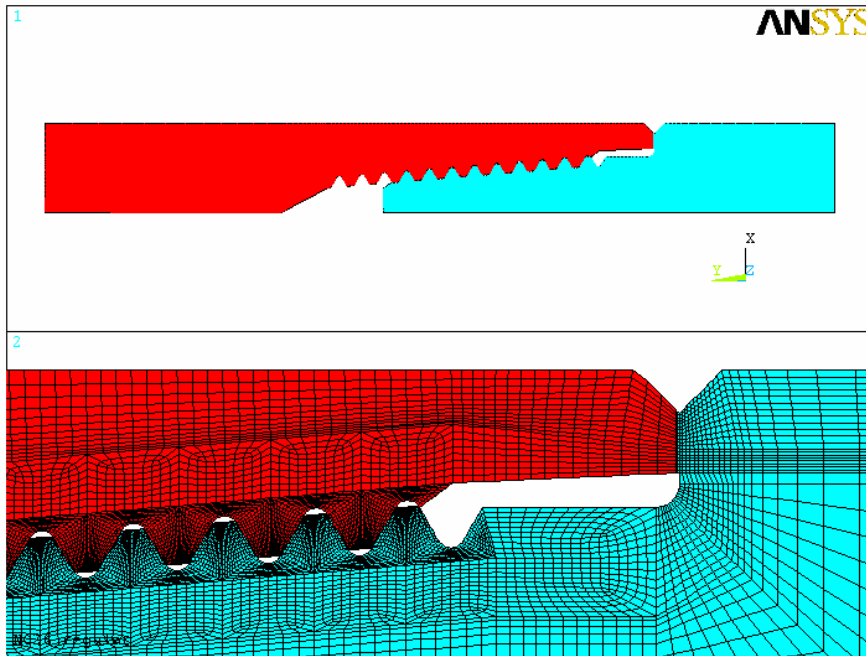
(3) Fatica assiale su provini intagliati (raggio di fondo intaglio  $r=0.5, 1, 1.5$ )

(4) Fatica a flessione su 4 punti ( $R=0.1$ ) su provini aventi estratti dalla filettatura.



# Sperimentazione a fatica su componenti in piena scala su elementi di perforazione petrolifera in acciaio ed alluminio

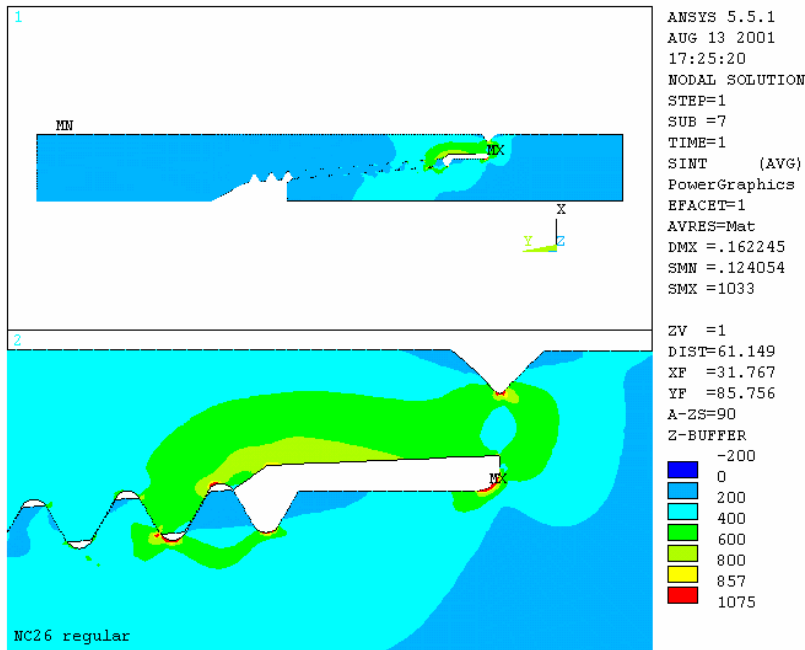
Interpretazione dei risultati – Modelli FEM



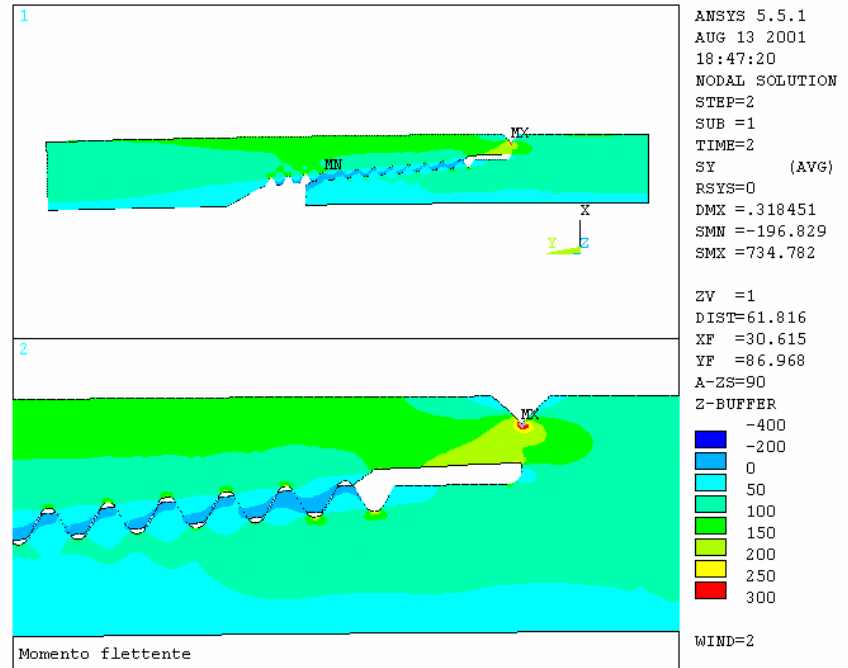
Modelli **assialsimmetrici**, contatto con elementi **gap** sui filetti

# Sperimentazione a fatica su componenti in piena scala su elementi di perforazione petrolifera in acciaio ed alluminio

## Interpretazione dei risultati – Modelli FEM



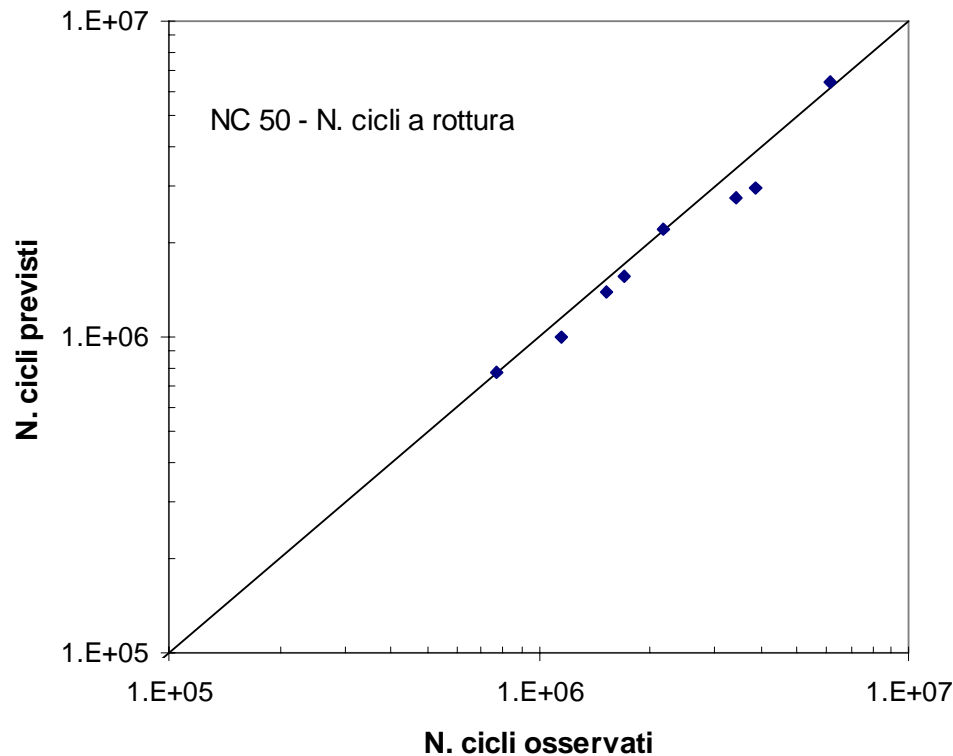
Modello **elastoplastico**  
preserraggio e primo sovraccarico  
dovuto alla flessione



Modello **armonico**  
valutazione della fluttuazione di  
flessione in campo elastico

# **Sperimentazione a fatica su componenti in piena scala su elementi di perforazione petrolifera in acciaio ed alluminio**

Interpretazione dei risultati – Correlazione fra risultati in **piena scala** e previsione da **prove in piccola scala** e modelli **FEM**



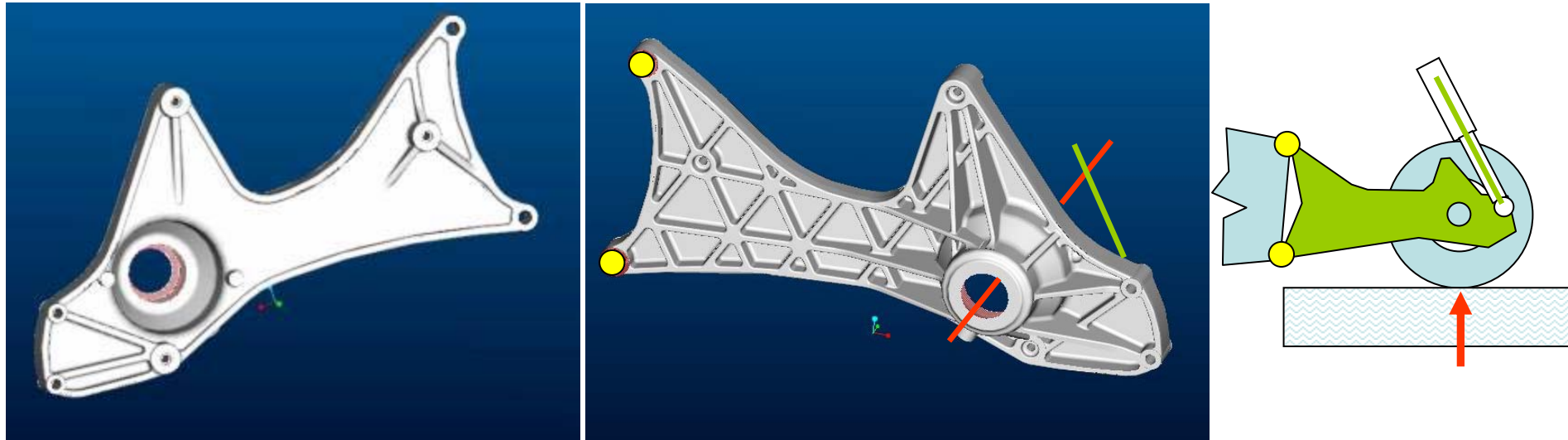
# **Sperimentazione a fatica su componenti in piena scala su elementi di perforazione petrolifera in acciaio ed alluminio**

## Interpretazione dei risultati – Problematiche di interesse

- (1) Stima delle tensioni prodotte dal **pre-serraggio** iniziale è resa difficoltosa dalla sua forte dipendenza dai valori del coefficiente di attrito agente durante il montaggio
- (2) Cicli di tensione a valori **elevati di R** (0.7-0.8), intervento del rilassamento del materiale, necessità di modelli fisici accurati
- (3) Difficile stima del ciclo effettivo di tensione alla **radice dell'intaglio**
- (4) Forte **sensibilità allo stato superficiale del fondo filetto** interpretazione mediante **prove in piccola scala su provini estratti dalla zona della filettatura**
- (5) Necessità di stimare correttamente la **sensibilità all'intaglio**, mediante **test in piccola scala con provini intagliati**

# Sperimentazione a fatica su componenti in piena scala su Bracci di sospensione per motoveicolo in alluminio presso-fuso

Esecuzione di prove sia di sola **flessione** che combinata **flessione torsione**

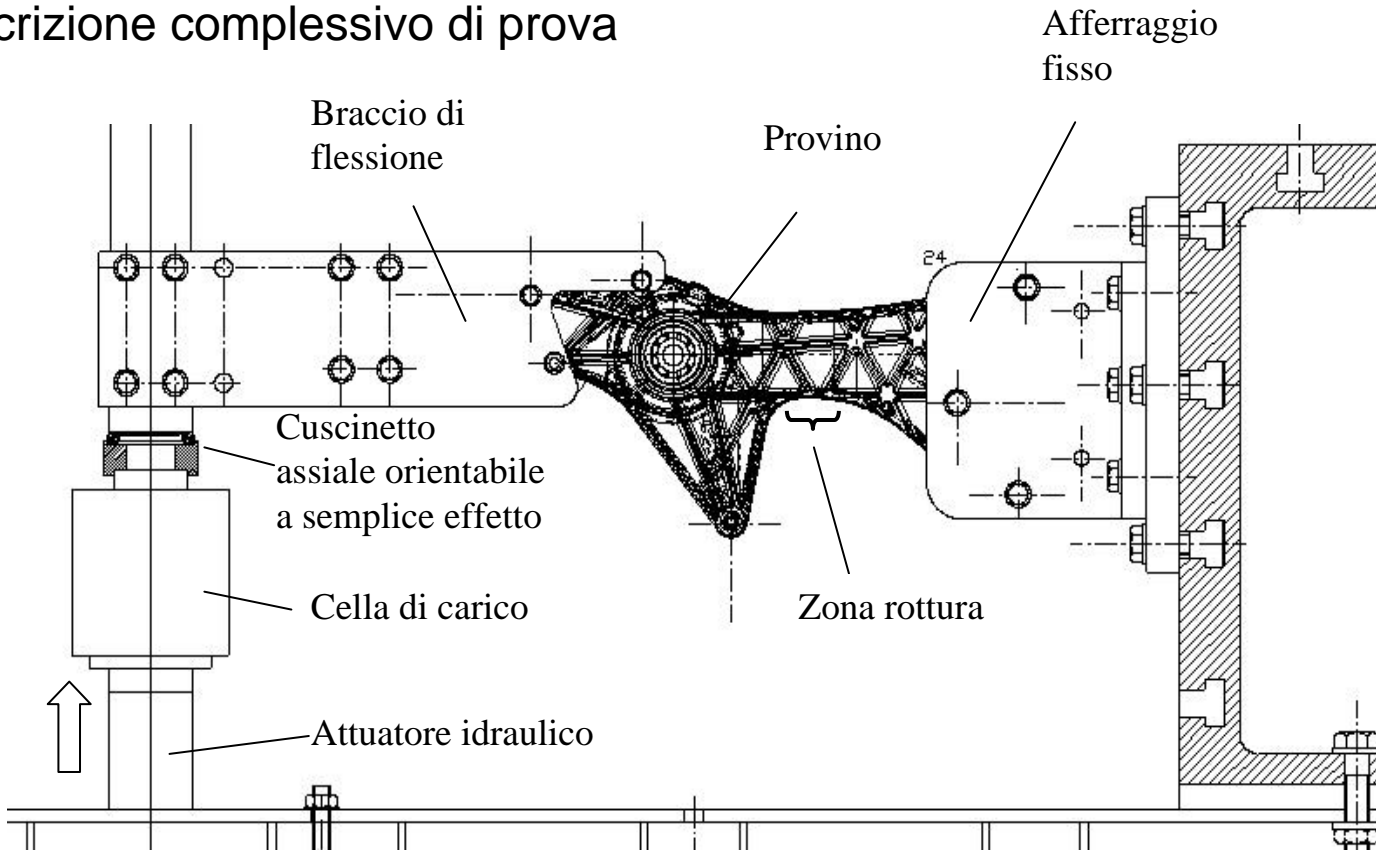


[rif.] **M. Beghini, L. Bertini** et alii. “*Comportamento a fatica di un braccio sospensione in alluminio presso fuso*”,XXXI AIAS, Parma 2002.

# Sperimentazione a fatica su componenti in piena scala su Bracci di sospensione per motoveicolo in alluminio presso-fuso

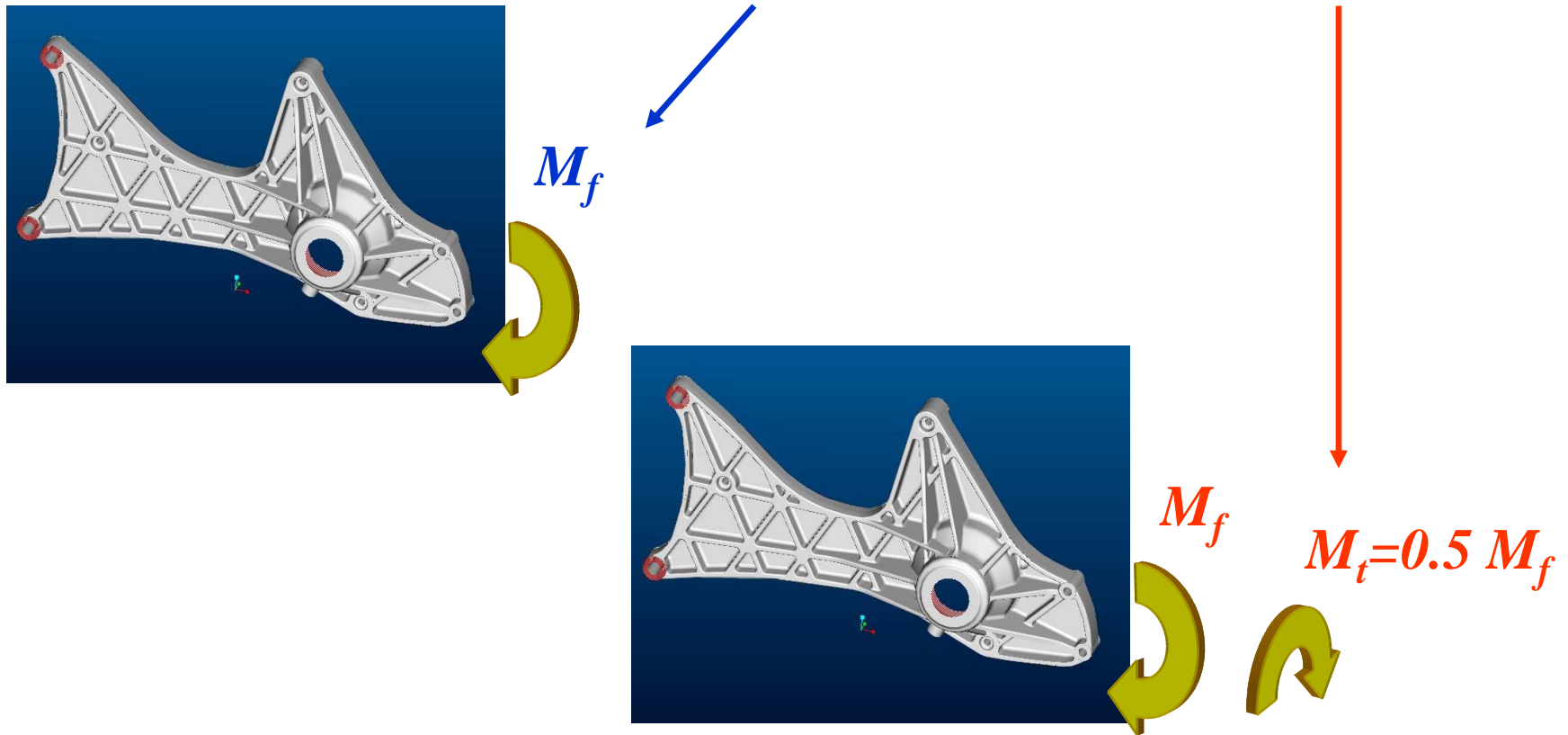
Esecuzione di prove sia di sola **flessione** che combinata **flessione torsione**

Descrizione complessivo di prova

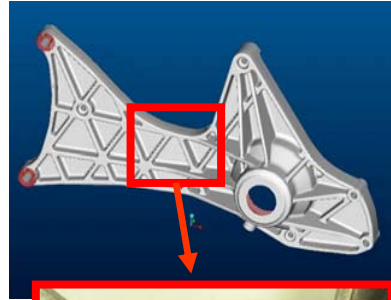


# Sperimentazione a fatica su componenti in piena scala su Bracci di sospensione per motoveicolo in alluminio presso-fuso

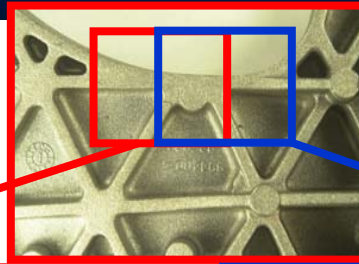
Esecuzione di prove sia di sola **flessione** che combinata **flessione torsione**



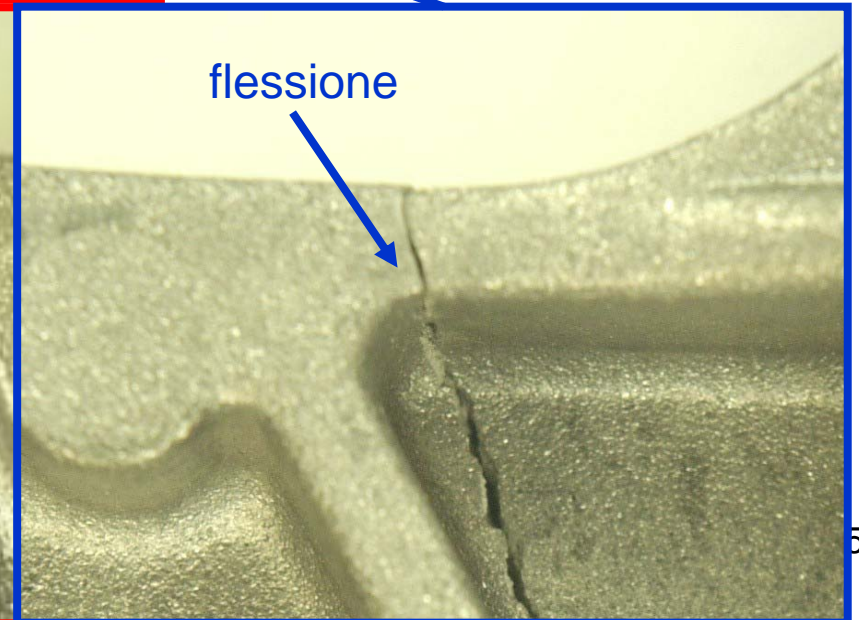
# Sperimentazione a fatica su componenti in piena scala su Bracci di sospensione per motoveicolo in alluminio presso-fuso



Modalità di rottura combinata  
flessione torsione

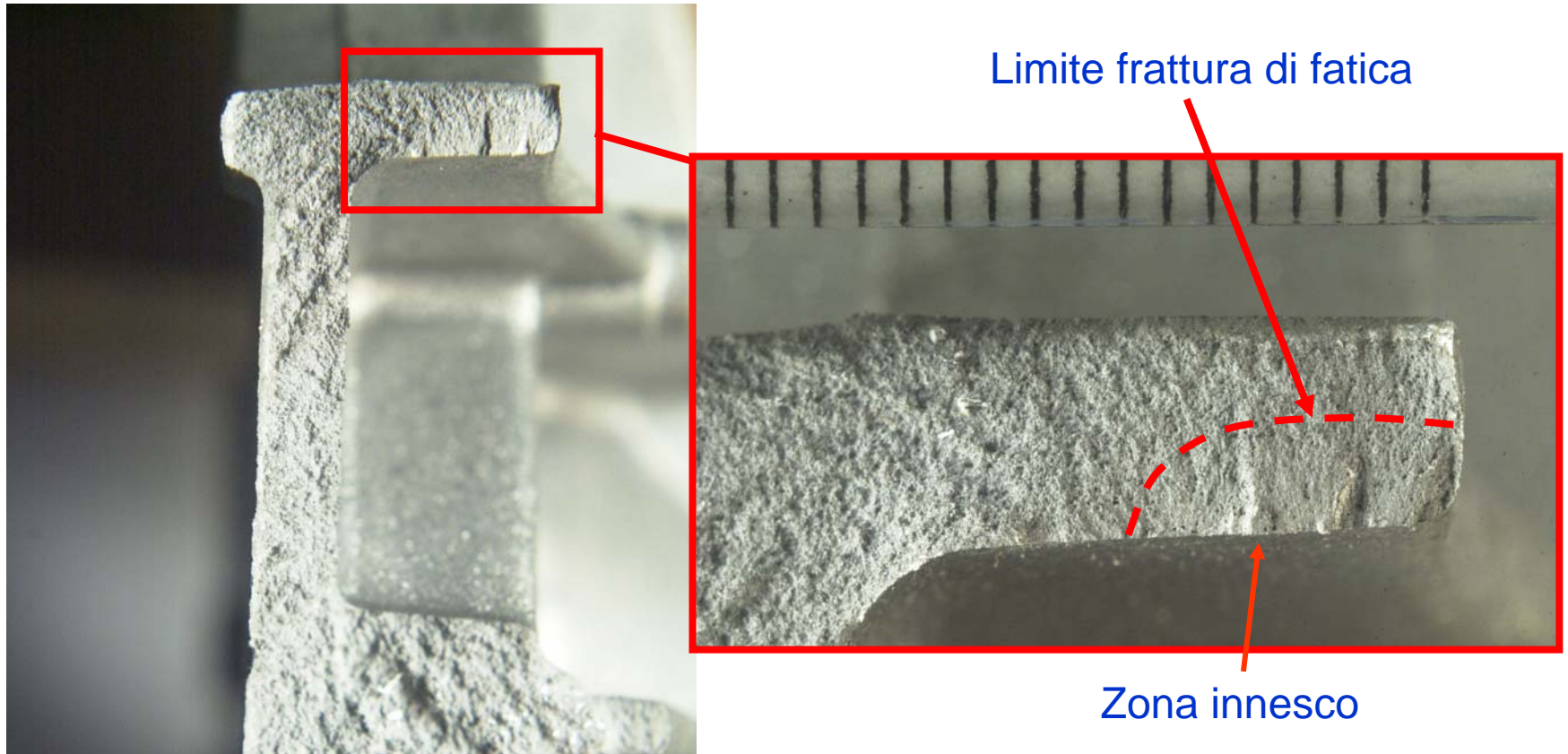


Modalità di rottura  
sola flessione



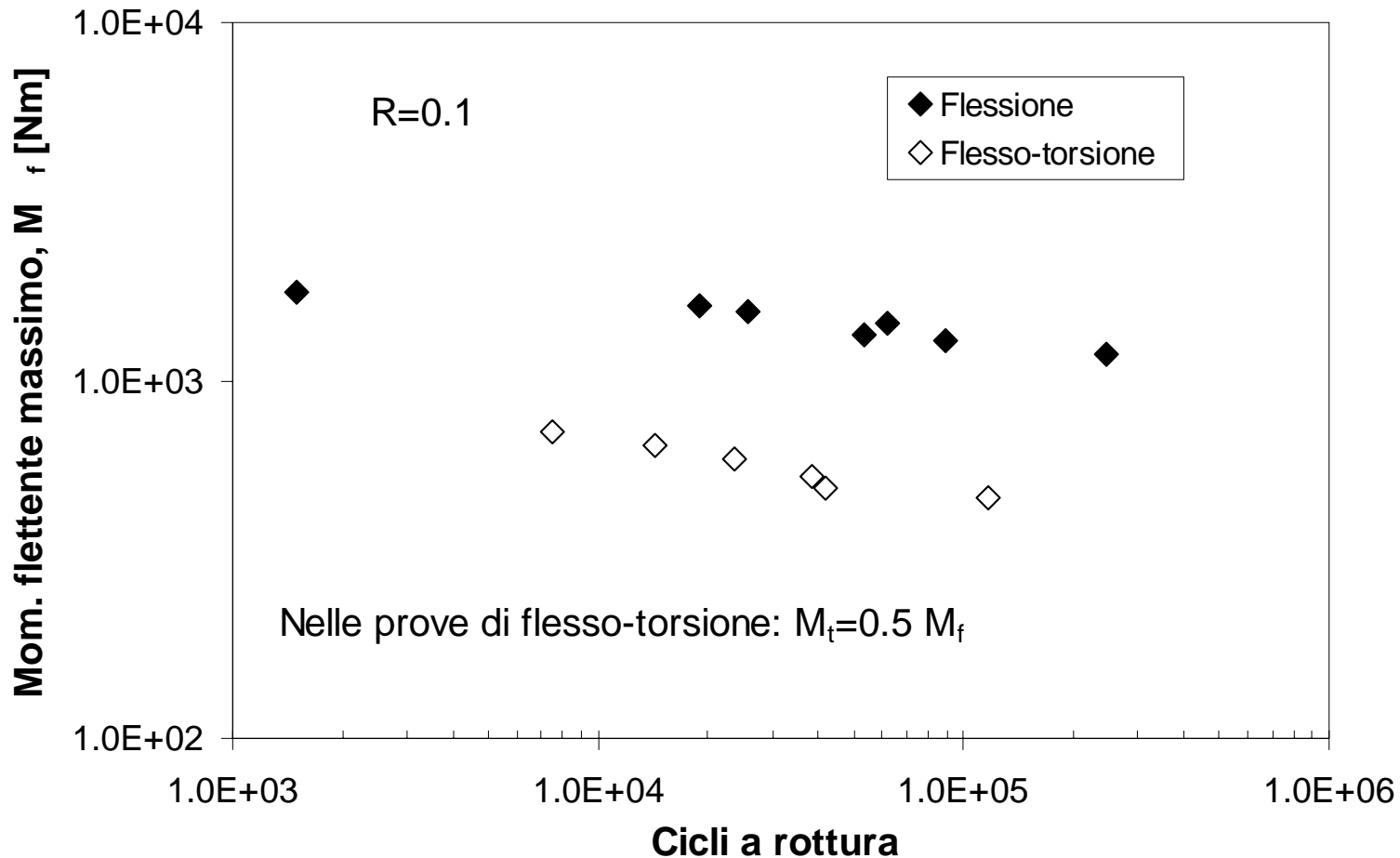
# Sperimentazione a fatica su componenti in piena scala su Bracci di sospensione per motoveicolo in alluminio presso-fuso

Modalità di rottura **flessione**



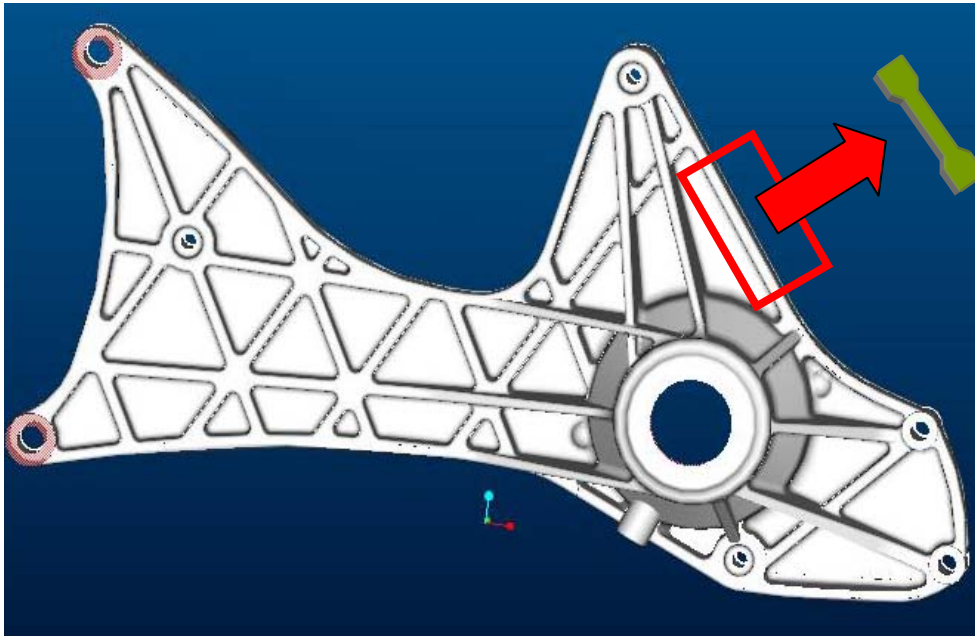
# Sperimentazione a fatica su componenti in piena scala su Bracci di sospensione per motoveicolo in alluminio presso-fuso

Risultati (S-N) per entrambi i tipi di sollecitazione



# Sperimentazione a fatica su componenti in piena scala su Bracci di sospensione per motoveicolo in alluminio presso-fuso

Interpretazione dei risultati – Test in piccola scala

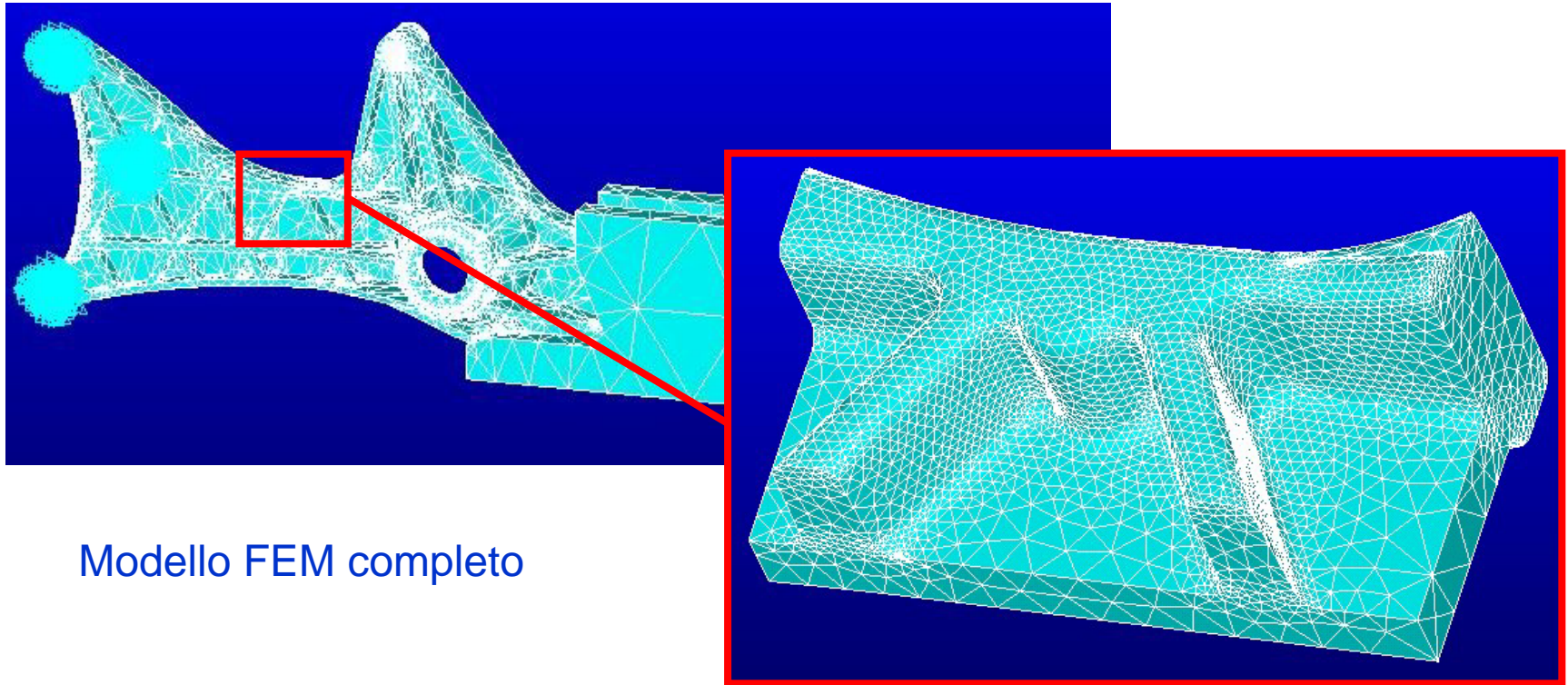


- Trazione
- Fatica assiale  $R = -1 ; 0 ; 0.25$

(provino ricavato in corrispondenza di una nervatura, riproduce lo stato superficiale)

# Sperimentazione a fatica su componenti in piena scala su Bracci di sospensione per motoveicolo in alluminio presso-fuso

Interpretazione dei risultati – **Modelli FEM**



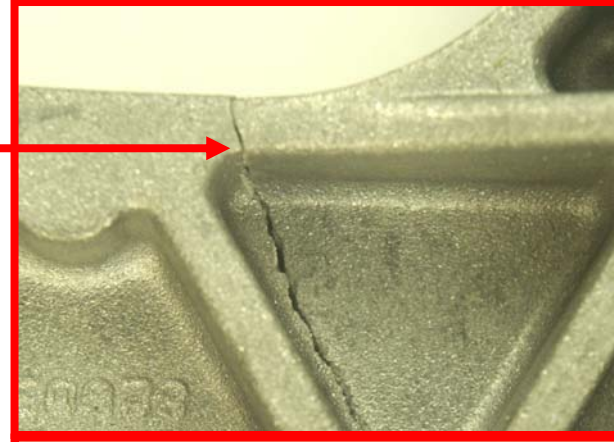
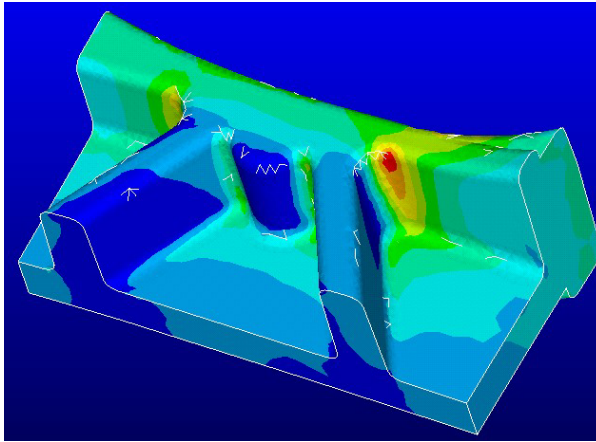
Modello FEM completo

Sottostruttura

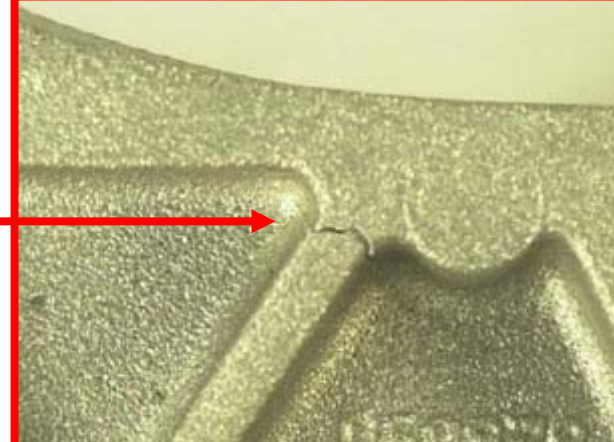
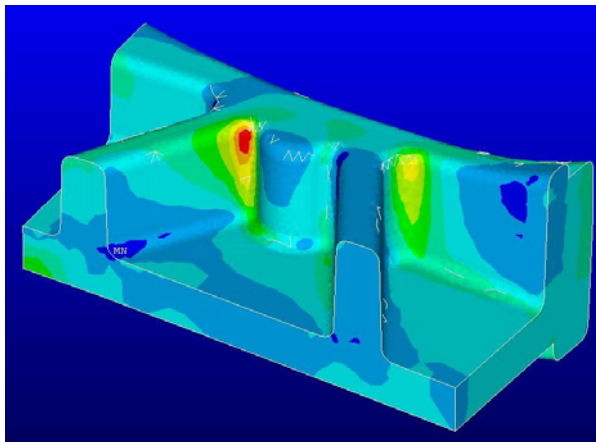
# Sperimentazione a fatica su componenti in piena scala su Bracci di sospensione per motoveicolo in alluminio presso-fuso

Interpretazione dei risultati – Modelli FEM

Flessione

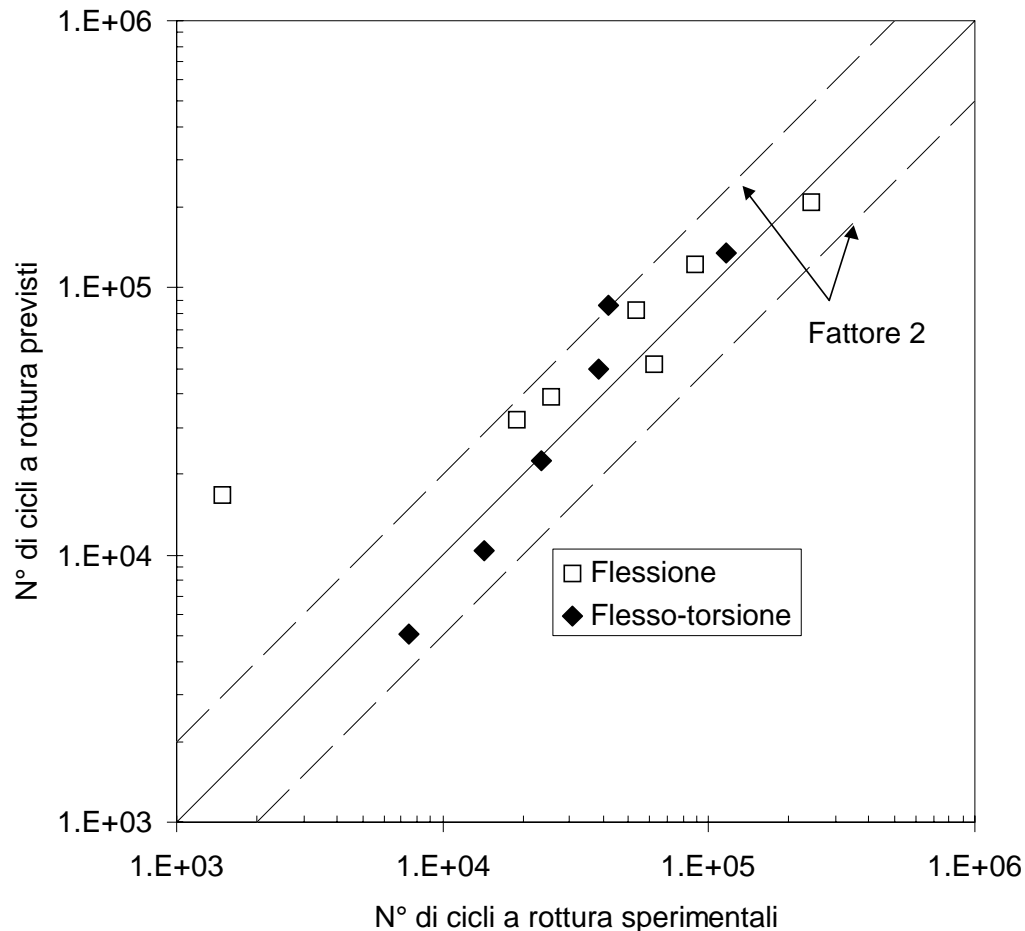


Flessione-Torsione



# Sperimentazione a fatica su componenti in piena scala su Bracci di sospensione per motoveicolo in alluminio presso-fuso

Interpretazione dei risultati – Correlazione fra risultati in **piena scala** e previsione da **prove in piccola scala** e modelli **FEM**



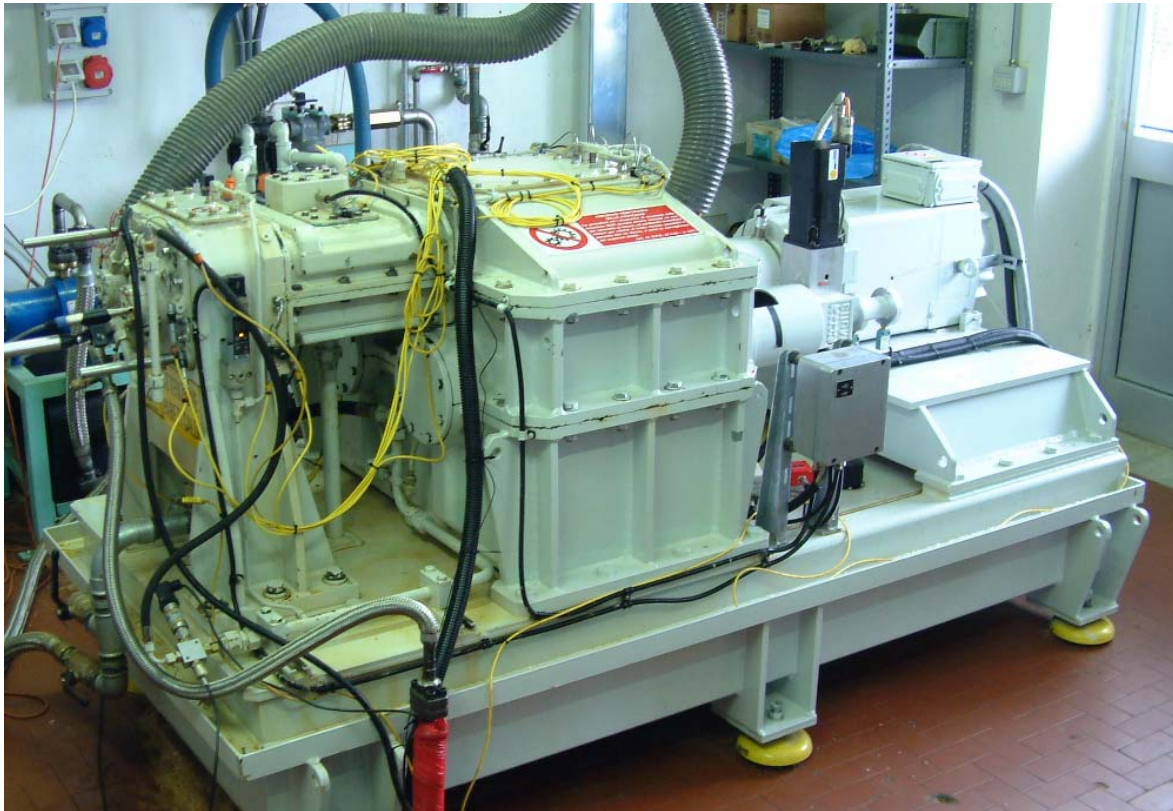
# Sperimentazione a fatica su componenti in piena scala su Bracci di sospensione per motoveicolo in alluminio presso-fuso

Interpretazione dei risultati – Problematiche di interesse

- (1) L'effetto dello stato superficiale (**grezzo di presso-fusione**) è stato direttamente tenuto di conto nella caratterizzazione del materiale di fatica in piccola scala
- (2) Elevata difficoltà nel definire un **raggio di fondo intaglio** a causa della complessa geometria tridimensionale del componente
- (3) Corretta individuazione del **punto di innesco** da parte del modello FEM

# Sperimentazione a fatica su componenti in piena scala su Ingranaggi per applicazioni aeronautiche ad alte prestazioni

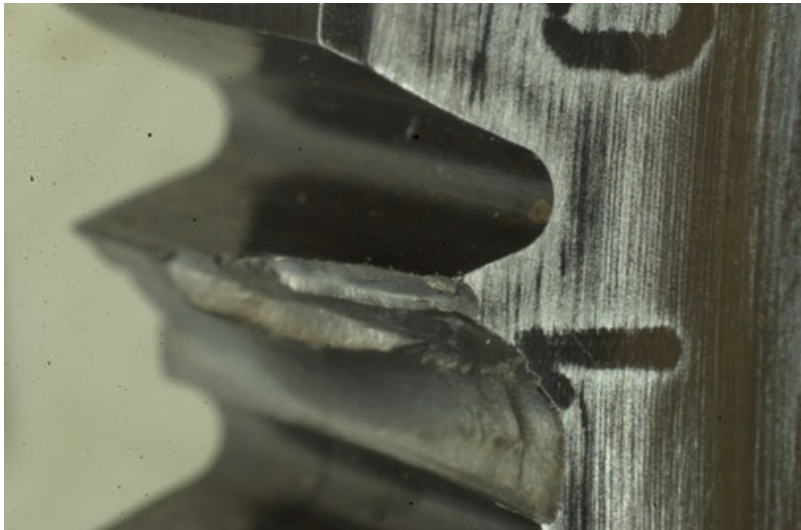
Banco di prova Ingranaggi (RENK) presso il CRTM dell' Univ. Di Pisa



Ingranaggio test  
Limite di fatica a  
 $10 * 10^6$

# Sperimentazione a fatica su componenti in piena scala su Ingranaggi per applicazioni aeronautiche ad alte prestazioni

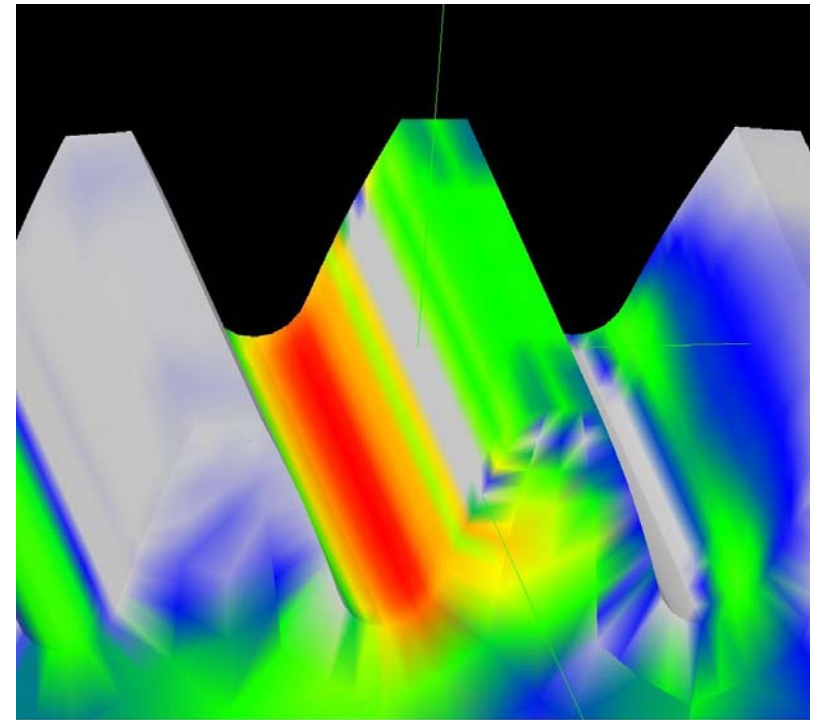
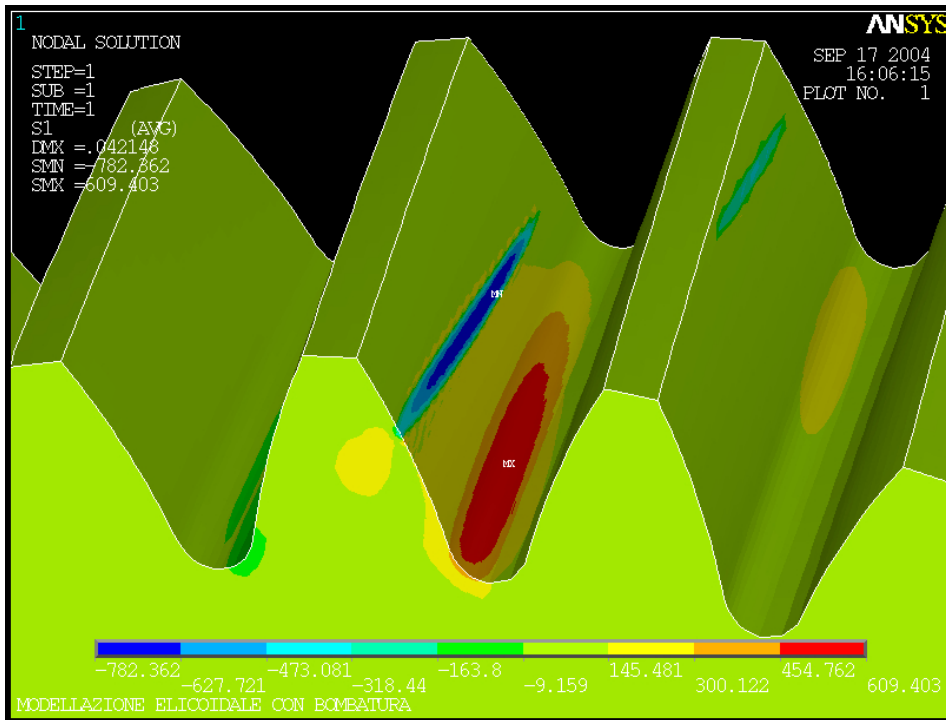
Esempio di rottura



Nucleazione e propagazione difficilmente rilevabili dall'analisi della superficie di rottura

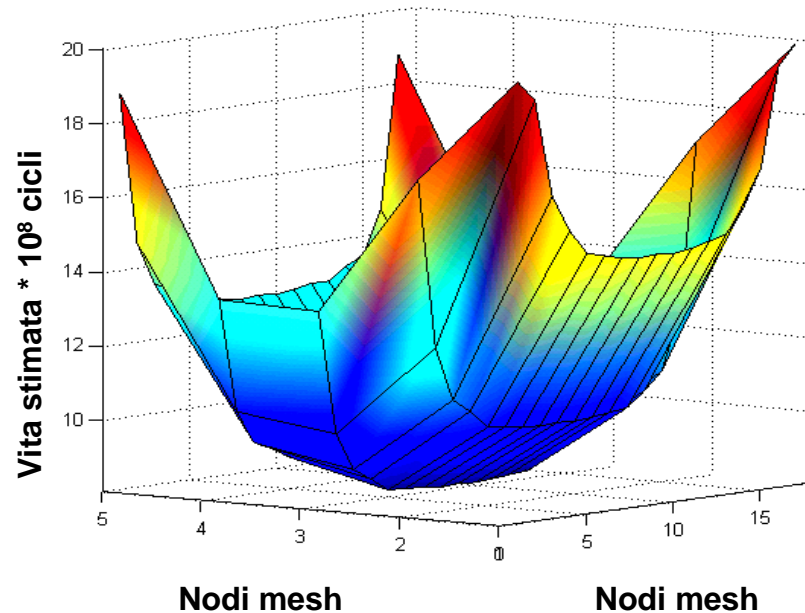
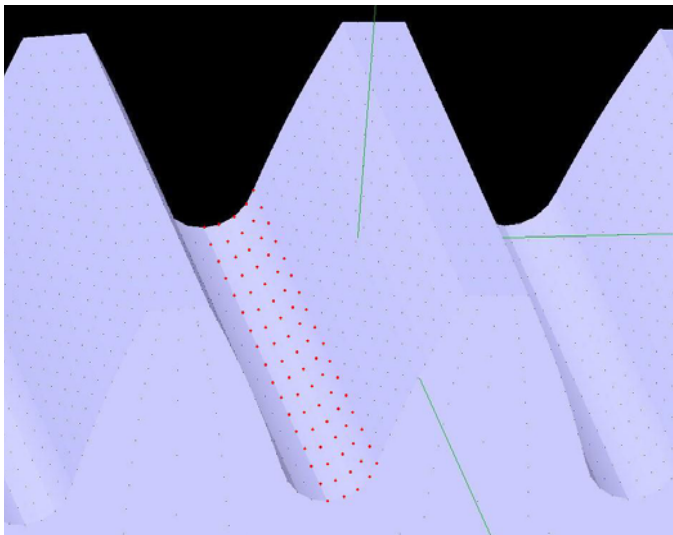
# Sperimentazione a fatica su componenti in piena scala su Ingranaggi per applicazioni aeronautiche ad alte prestazioni

Interpretazione dei risultati – **Modelli FEM** / **Semi analitico Ibrido FEM**



# Sperimentazione a fatica su componenti in piena scala su Ingranaggi per applicazioni aeronautiche ad alte prestazioni

Interpretazione dei risultati – correlazione fra risultati di **modelli FEM** e **modelli di fatica del materiale**



Valutazione della vita a fatica per ciascun nodo del modello FEM

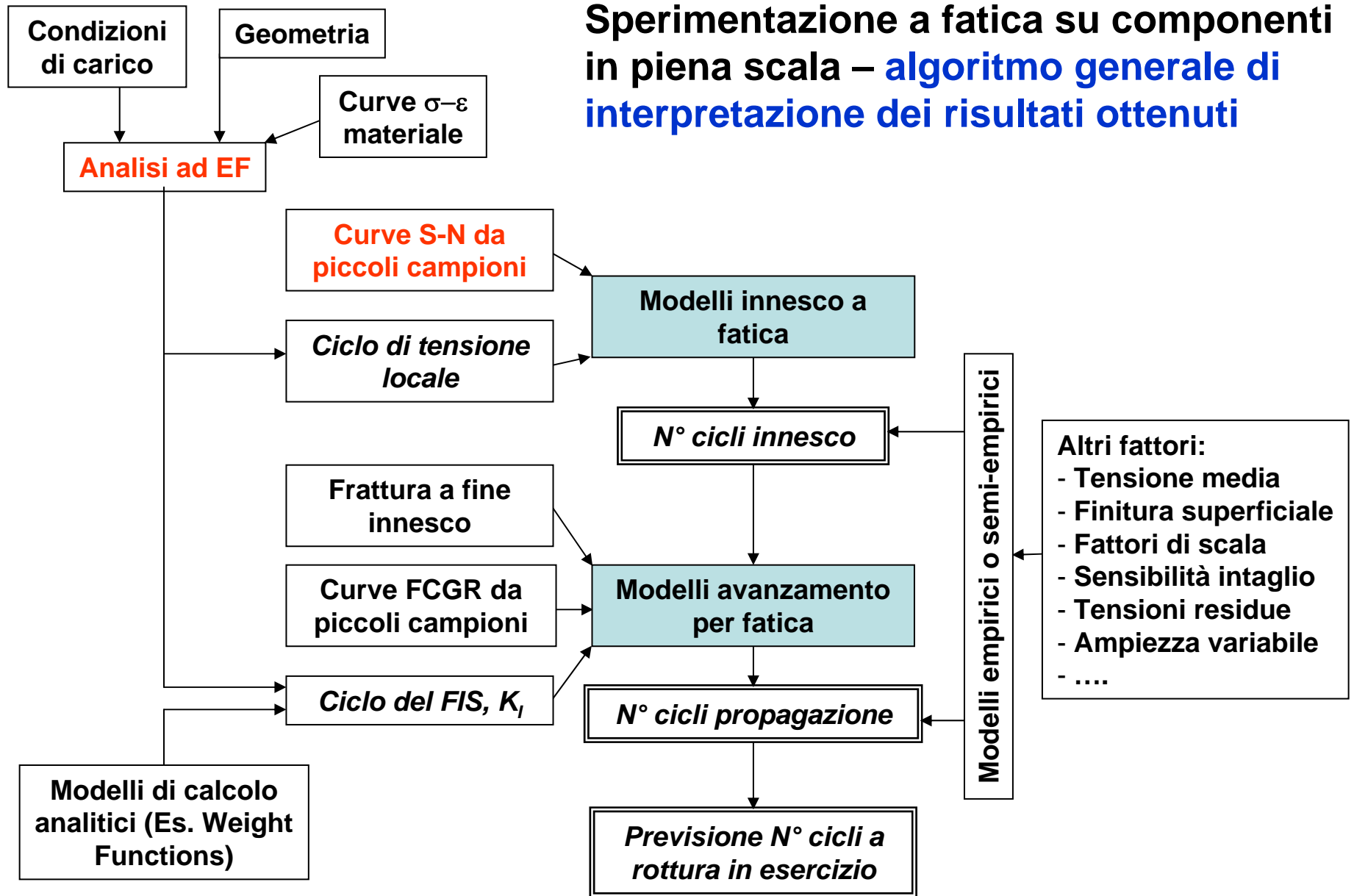
Per l'attuale livello di carico la vita a fatica stimata risulta notevolmente elevata

# **Sperimentazione a fatica su componenti in piena scala su Ingranaggi per applicazioni aeronautiche ad alte prestazioni**

Interpretazione dei risultati – Problematiche di interesse

- (1) Denti sottoposti a **trattamenti di indurimento superficiale**, la determinazione di curve di resistenza a fatica tramite prove su piccoli provini risulta difficoltosa
- (2) Nel caso specifico, per il tracciamento di queste curve è stato quindi deciso di utilizzare i **valori di resistenza a rottura dedotti dalla durezza del materiale**
- (3) Si è tenuto conto, secondo le consuete tecniche semi-empiriche, della **finitura superficiale** derivante dal processo di lavorazione superficiale, di rettifica, del fondo dente.

# Sperimentazione a fatica su componenti in piena scala – algoritmo generale di interpretazione dei risultati ottenuti



# Sperimentazione a fatica su componenti in piena scala

## Conclusioni e discussione

- Interpretazione delle prove in **piena scala** con modelli **FEM** / **prove in piccola scala** offre risultati convincenti a “*posteriori*” ma non permette di eliminare la sperimentazione sui campioni reali
  - Incertezza sull'effettivo **stato di tensione** del materiale
  - Carenza di **modelli di comportamento** del materiale / necessità di scelte talvolta arbitrarie fra modelli
  - Necessità di **coefficienti empirici** di taratura dei modelli
  - Difficoltà nel descrivere la transizione dalla **fase di innesco a quella di propagazione**
  - Necessità di utilizzare **provini in piccola scala** estratti ad hoc dal componente
- **Allo stato attuale la conduzione di prove in piena scala rimane tuttora uno strumento indispensabile**