



Associazione Italiana per l'Analisi delle Sollecitazioni

SIMULAZIONI LTCA MEDIANTE METODI *F.E.M.* PER L'ANALISI DI INGRANAGGI CILINDRICI A DENTI DRITTI

Autori:

Marco Beghini

Fabio Presicce

Ciro Santus

Marco Facchini



Collaborazione fra

DIMNP, Università di Pisa

AVIO S.p.A. Propulsione
Aerospaziale, Torino



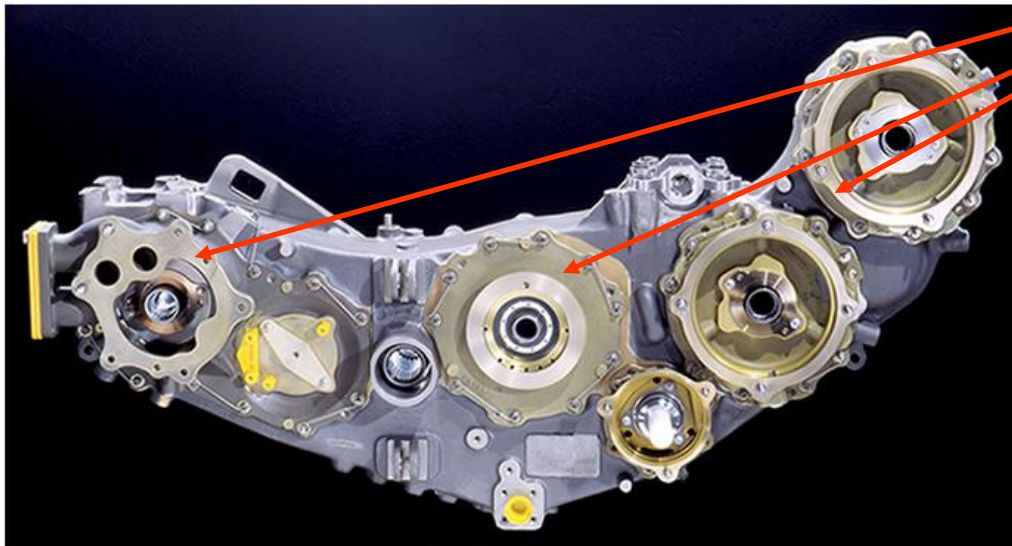
Tipo di ingranaggi considerati

Scatola di trasmissione per applicazioni AEROSPAZIALI

- alte prestazioni
- esigenze di pesi limitati
- assenza di spinte assiali sui cuscinetti



**Ingranaggi
cilindrici a
denti dritti**



Definizione di analisi *LTCA*

Acronimi:

- **LTCA** (*Loaded Tooth Contact Analysis*)
- **TCA** (*Tooth Contact Analysis*)

Differenze fra analisi *LTCA* e *TCA*

- Sono considerati gli effetti deformativi sui denti in contatto (e quindi sotto carico)
- Analisi *TCA* per ingranaggi coniugati **poco significativa** (mentre più interessante per ingranaggi non coniugati come Ipoidi o Spiroconici)

Ipotesi e limiti dei modelli considerati

- Assenza di errori geometrici (errori di passo, errori sul profilo)



Possibilità di modellare un solo periodo di ingranamento (dato che le informazioni si ripetono)

- Assenza di errori di posizionamento relativo fra i due ingranaggi
- Assenza di bombatura (correzione in direzione assiale)



Possibilità di modellare secondo lo schema di stato piano di deformazione

- Attrito trascurato (l'incertezza del coefficiente Coulombiano)
- Effetti dinamici trascurabili



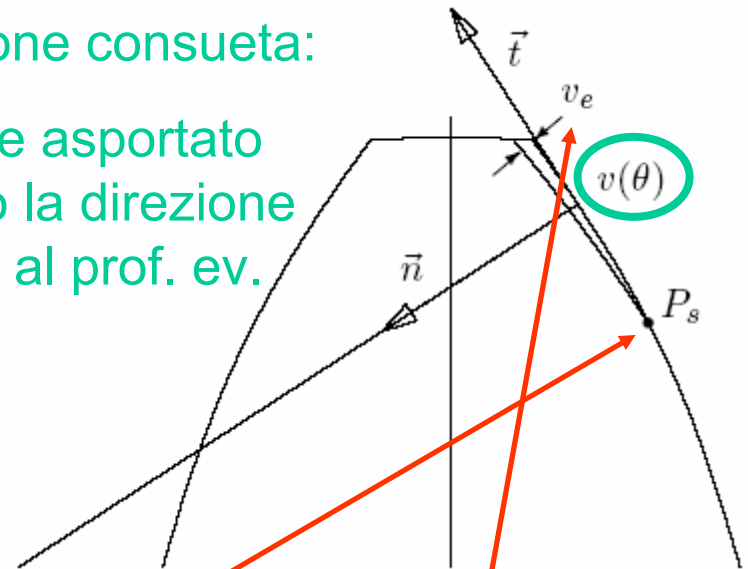
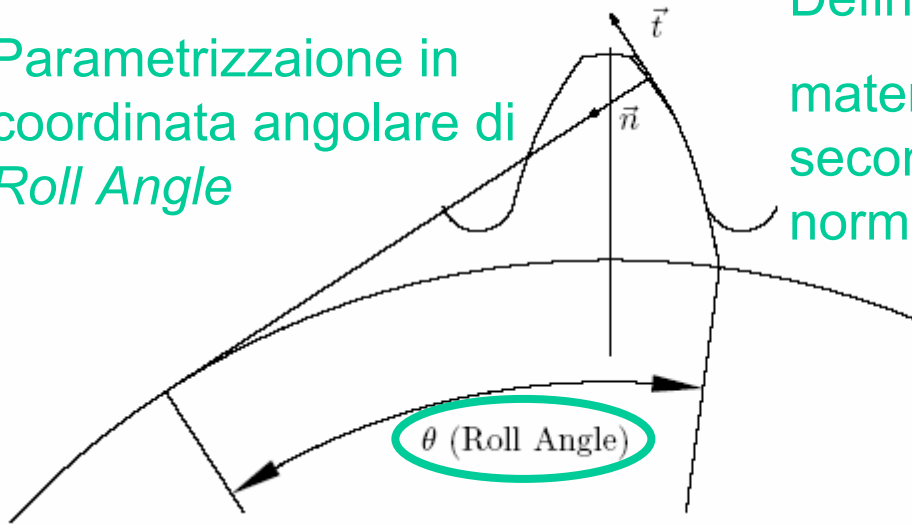
Possibilità di analizzare ogni singolo istante di ingranamento indipendentemente dagli altri

Correzione di profilo

Correzione secondo la direzione del profilo (in gergo **spoglia**)

Parametrizzazione in
coordinata angolare di
Roll Angle

Definizione consueta:
materiale asportato
secondo la direzione
normale al prof. ev.



Parametri geometrici per la definizione della spoglia

- Morfologia di spoglia (Lineare o Parabolica)
- Punto di inizio spoglia P_s (Roll Angle di inizio spoglia)
- Profondità massima di materiale asportato in testa v_e

Strumenti F.E.M. utilizzati

Metodo agli elementi finiti completo

ANSYS™

implementa la non linearità di contatto con i metodi

Lagrange Multiplier

Penalty Function

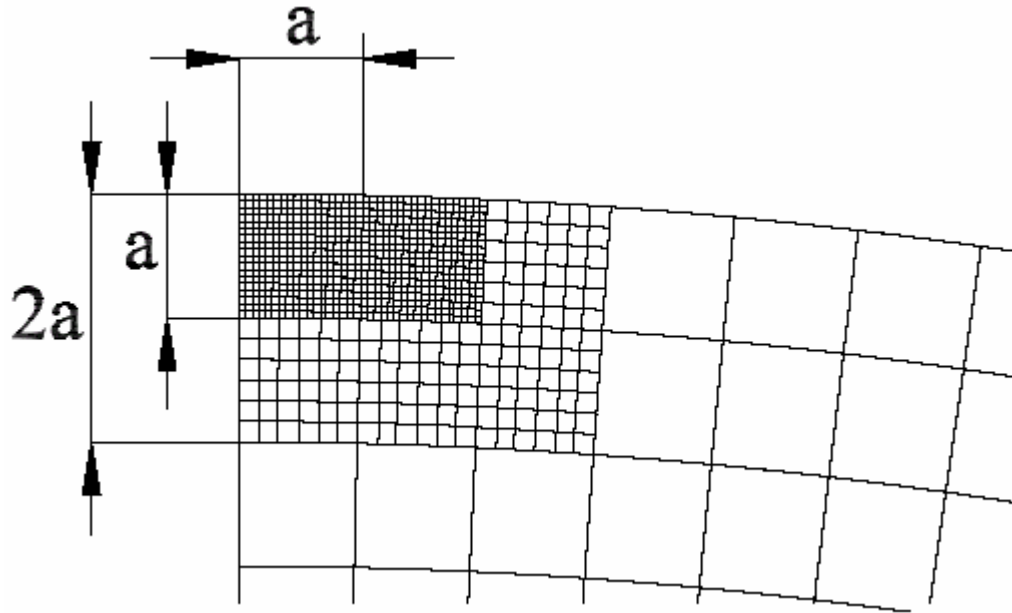
Metodo ibrido F.E.M. semi-analitico

ExtPair2D™

implementa la non linearità del contatto combinando una soluzione semi-analitica locale con una soluzione agli elementi finiti a distanza sufficiente

Discretizzazione di riferimento

È stata messa a punto una *mesh* di riferimento affinché l'errore in termini di pressione massima sia inferiore all'1%



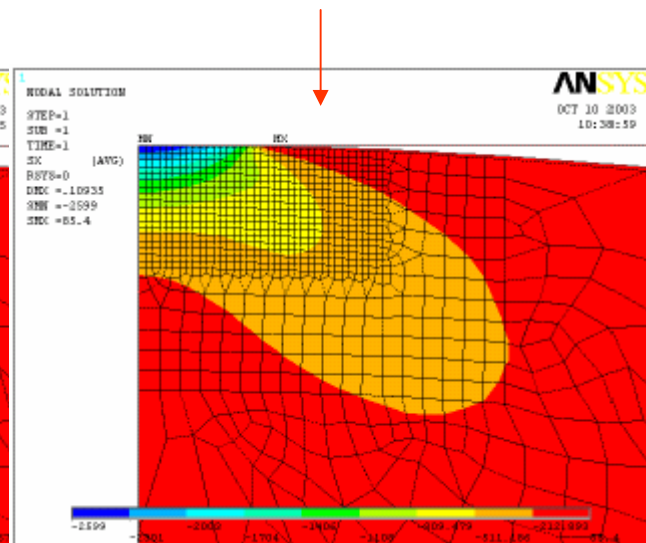
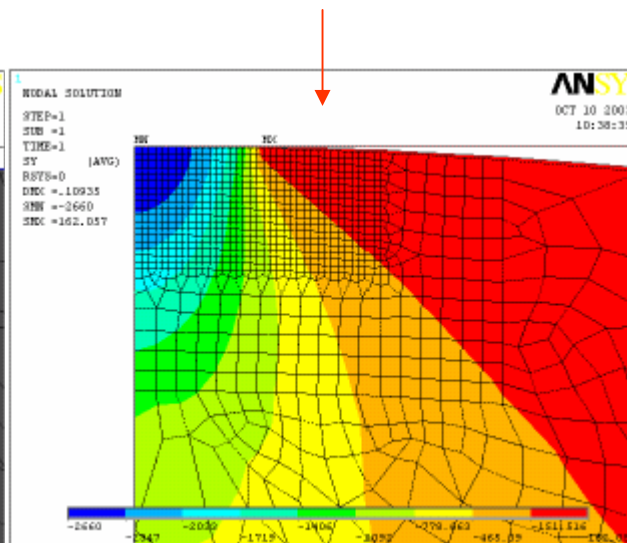
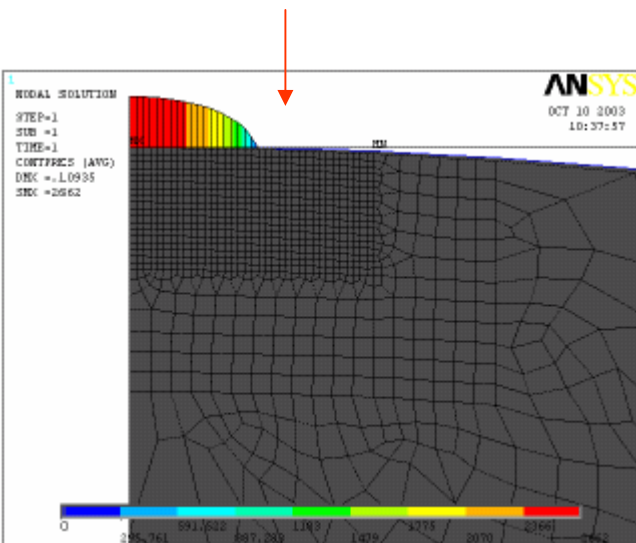
Il problema del contatto è **autosimile** -> a (semiampiezza Hertziana) può essere assunta come lunghezza di riferimento per trasferire il modello di discretizzazione al caso dei denti in contatto

Discretizzazione di riferimento (risultati delle simulazioni di contatto)

pressione di contatto

tensione normale verticale

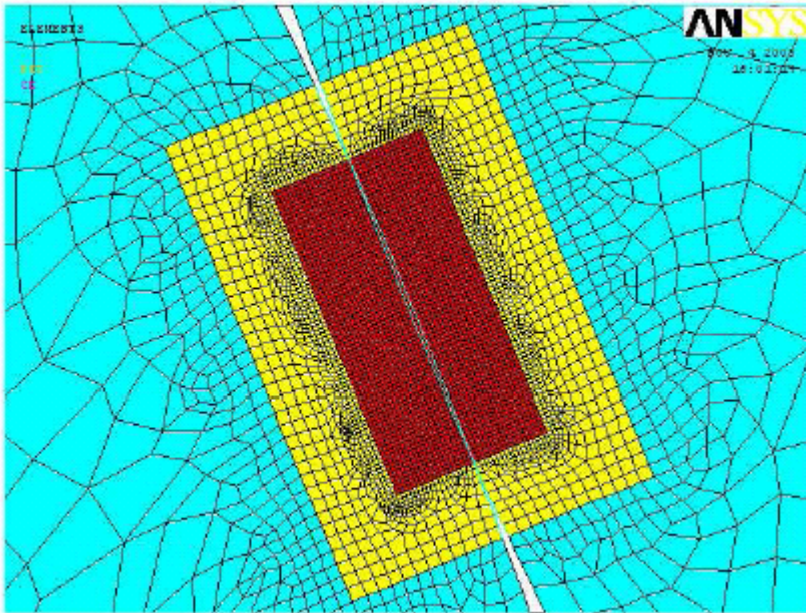
tensione normale orizzontale



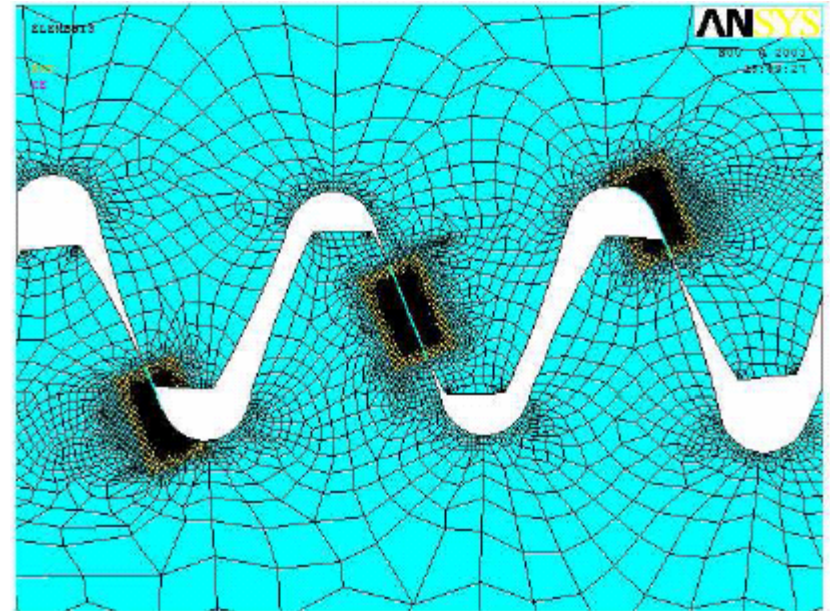
verifica di convergenza mediante il modello di Hertz,
inoltre contro verifica:

$$\max(p_{\text{cont}}) = \min(S_y) = \min(S_x)$$

Discretizzazione di riferimento (trasferimento della *mesh* di contatto)



↑
applicazione dello schema di
mesh al fianco del dente



↑
generalizzazione al caso di
testa dente

Esigenza di rigenerare la *mesh* ad ogni diverso istante ingranamento, e quindi necessità di avere un problema conservativo (ipotesi compatibili)

Risultati delle simulazioni, analizzati

- **Forza di Contatto** di ogni singola coppia di denti in presa
- massima **Pressione di Contatto** lungo il fianco del dente
- massima **Tensione Principale** alla base del dente
- **Errore di Trasmissione** (statico)

Grandezze rappresentate in funzione o del **tempo t** ,
o meglio, del **Roll Angle θ** di ingranamento del
Pignone (svincolandosi dalla velocità di rotazione)

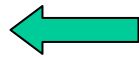
Caratteristiche ingranaggio considerato

- Caratteristiche geometriche (principali)

- modulo 1.75 mm
- n. denti Pignone e Ruota (ruote uguali) 80
- Roll Angle inizio spoglia Pinione e Ruota 24.000 °
- Profondità max. spoglia Pinione e Ruota 21.0 μm

- Topografia di spoglia

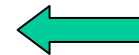
- Lineare
- Parabolica



confronto, effetti sui
risultati

- Coppia da trasmettere applicata

- Basso carico: 62.5 % Carico nominale
- Carico nominale
- Sovraccarico: 125.0% Carico nominale

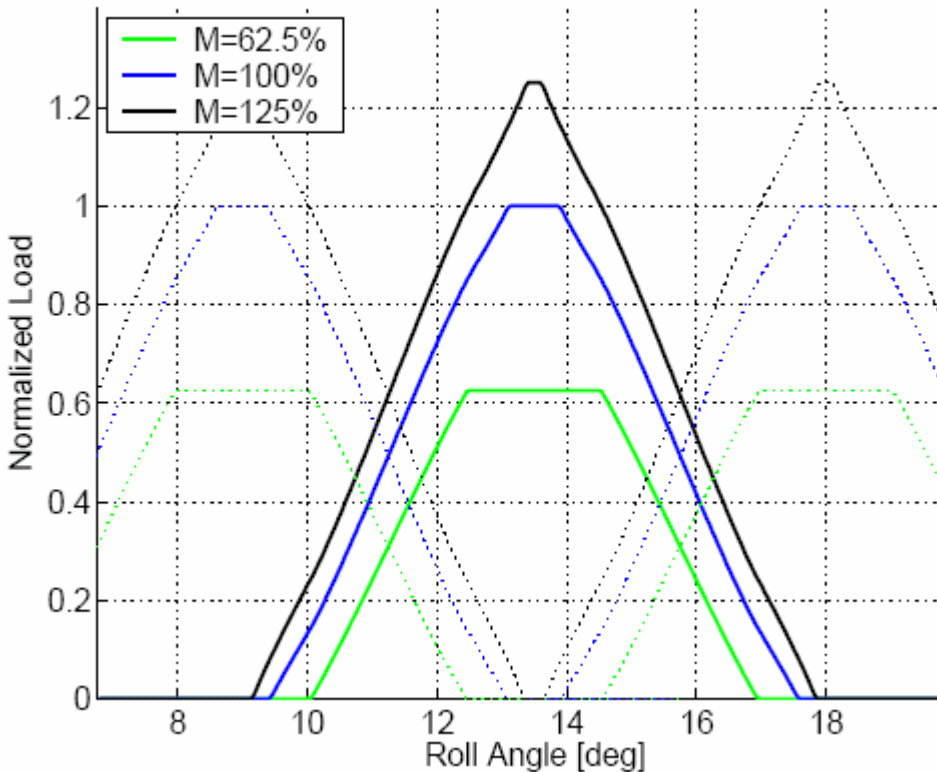


visualizzazione del
trend

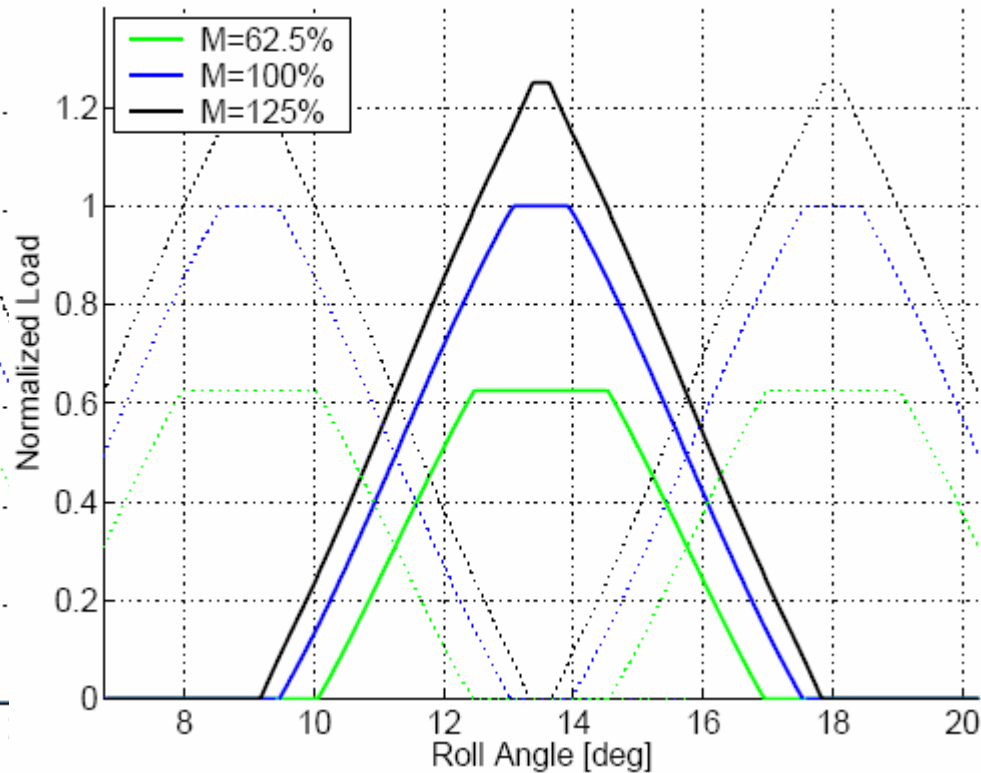
Risultati

- Forza di contatto di ogni singola coppia di denti in presa

Carico su dente con spoglia lineare



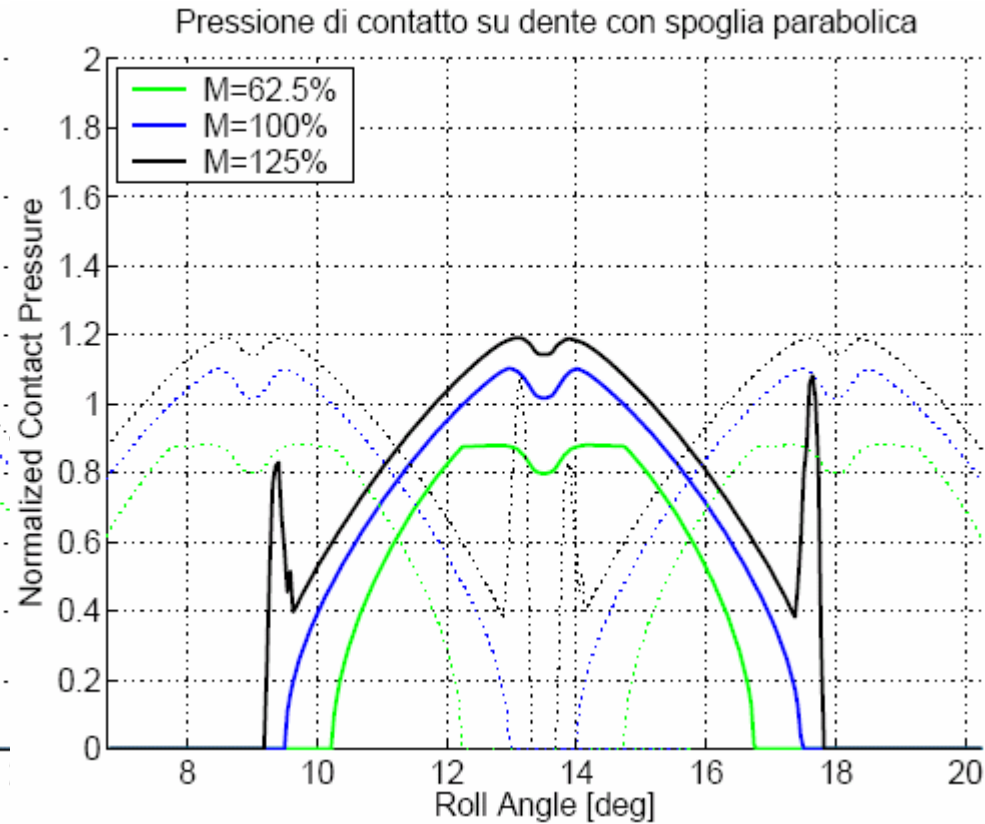
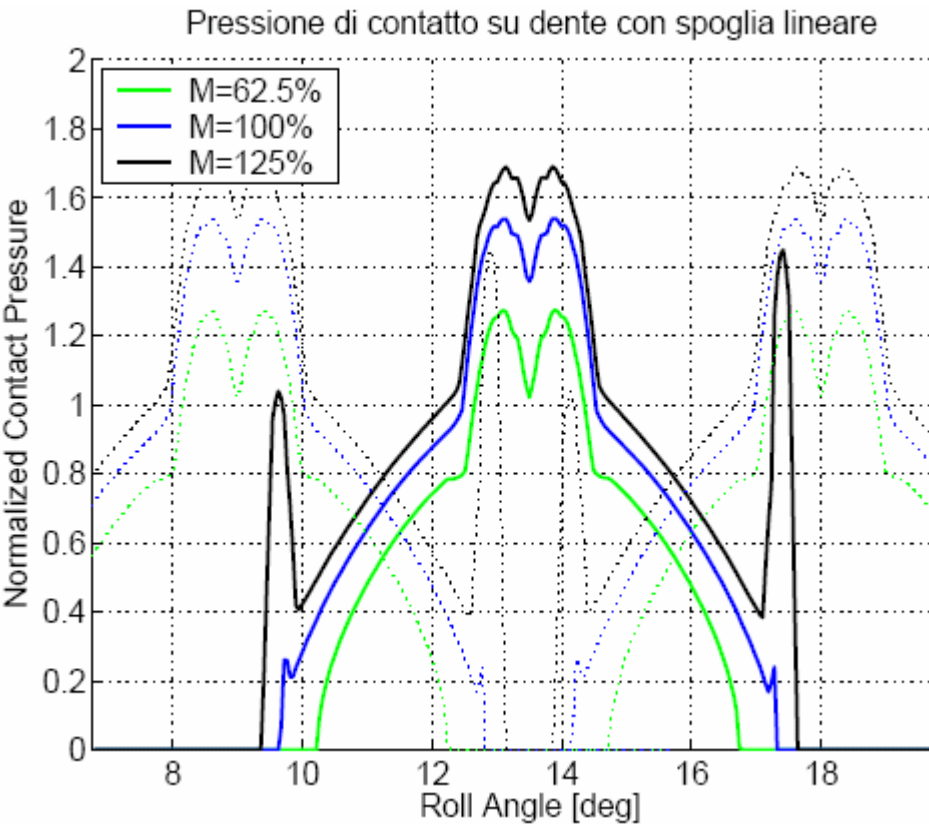
Carico su dente con spoglia parabolica



- **bassissimo** effetto della morfologia della modifica di profilo
- **notevole** allargamento del *Contact Ratio* all'aumentare del carico

Risultati

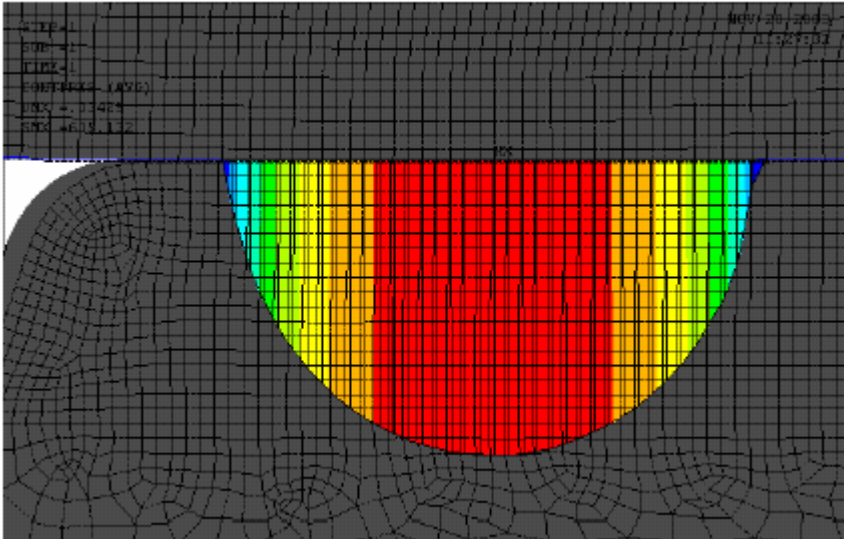
- Massima pressione di contatto lungo il fianco del dente



- riduzione del contatto di testa per la spoglia parabolica
- **singolarità** del contatto indotta della spoglia lineare

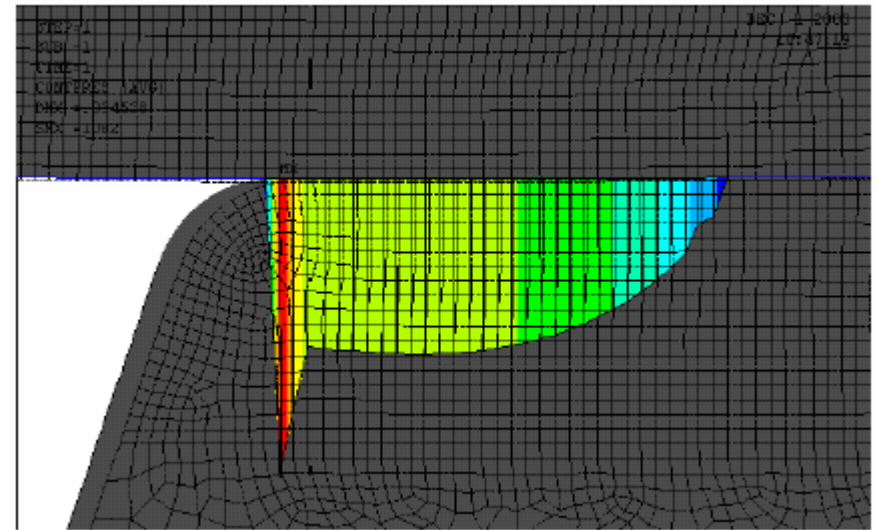
Singularità relative alla Pressione di Contatto

- Contatto di testa



assenza di contatto di testa

(la zona di contatto non comprende il raccordo di testa dente)



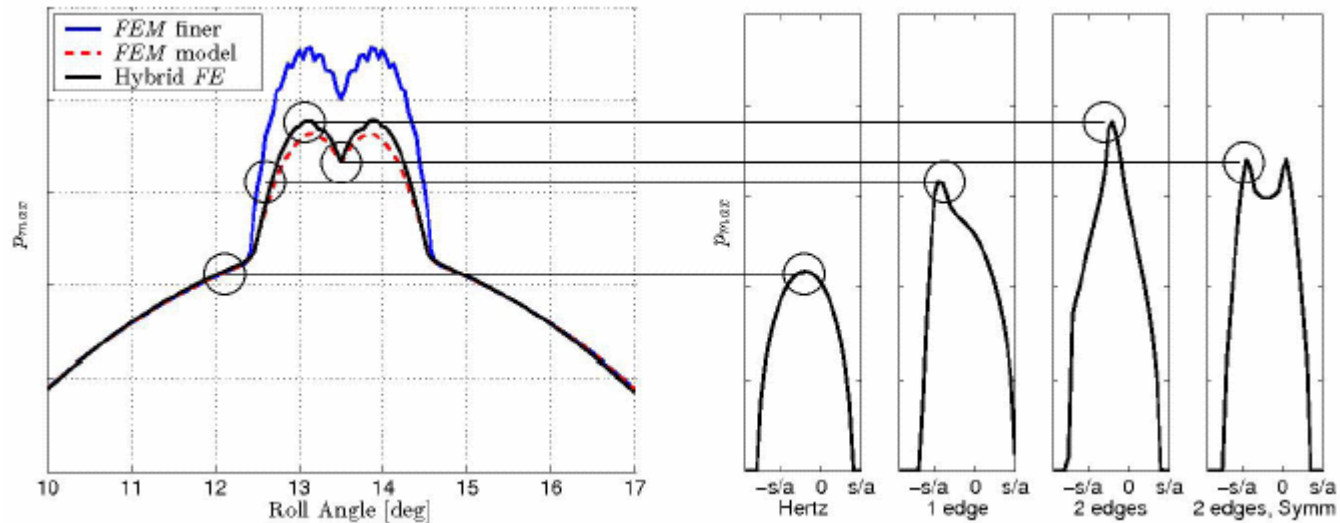
presenza del contatto di testa

(la zona di contatto comprende il raccordo di testa dente)

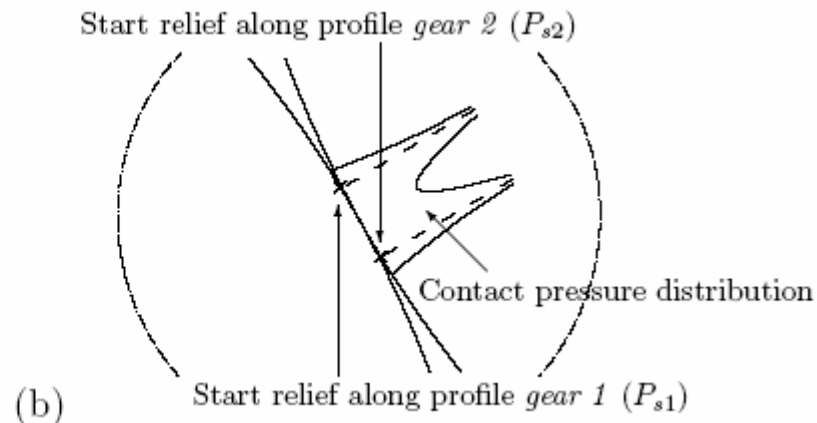
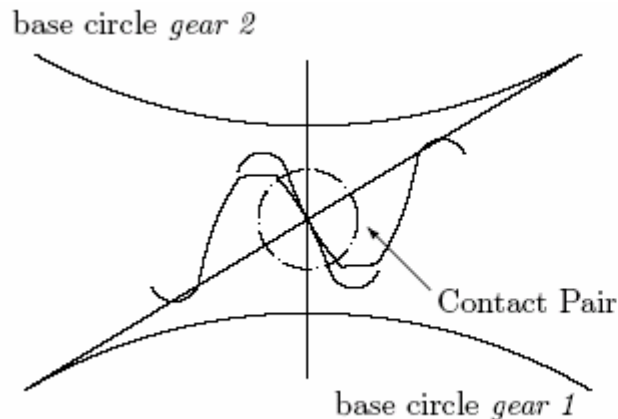
Valore del picco di pressione poco attendibile, **incertezza** del valore del raggio di raccordo, **instabilità** numerica

Singularità relative alla Pressione di Contatto

- Contatto di spigolo indotto dall'inizio spoglia lineare

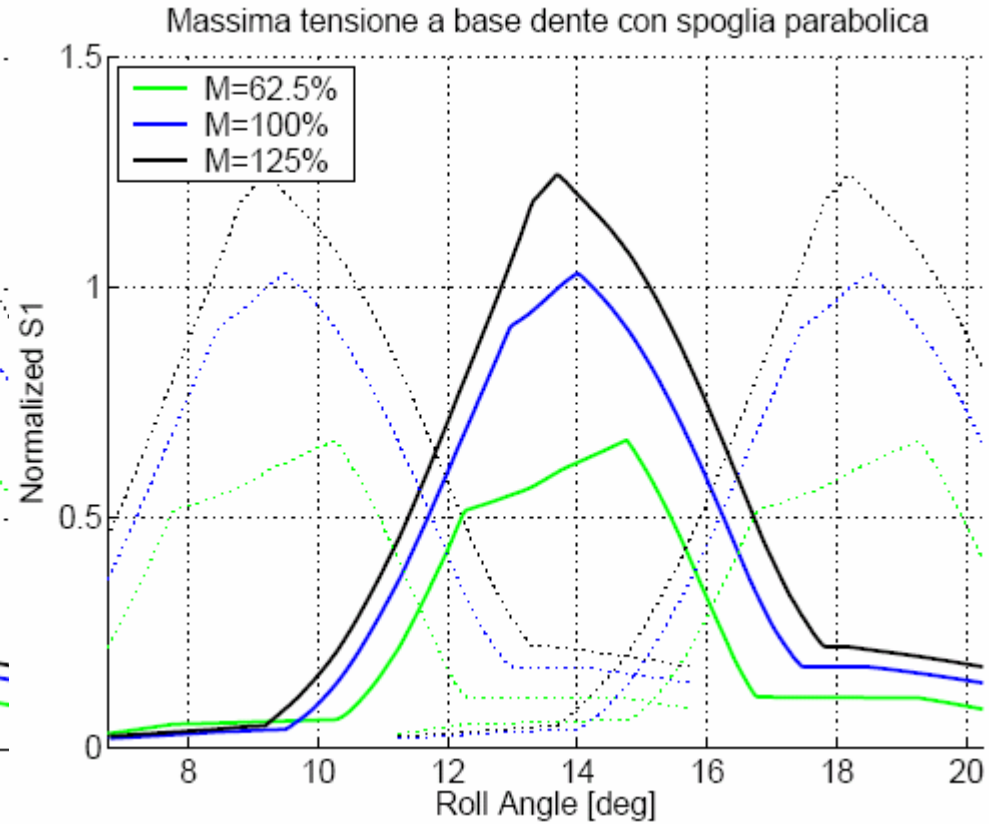
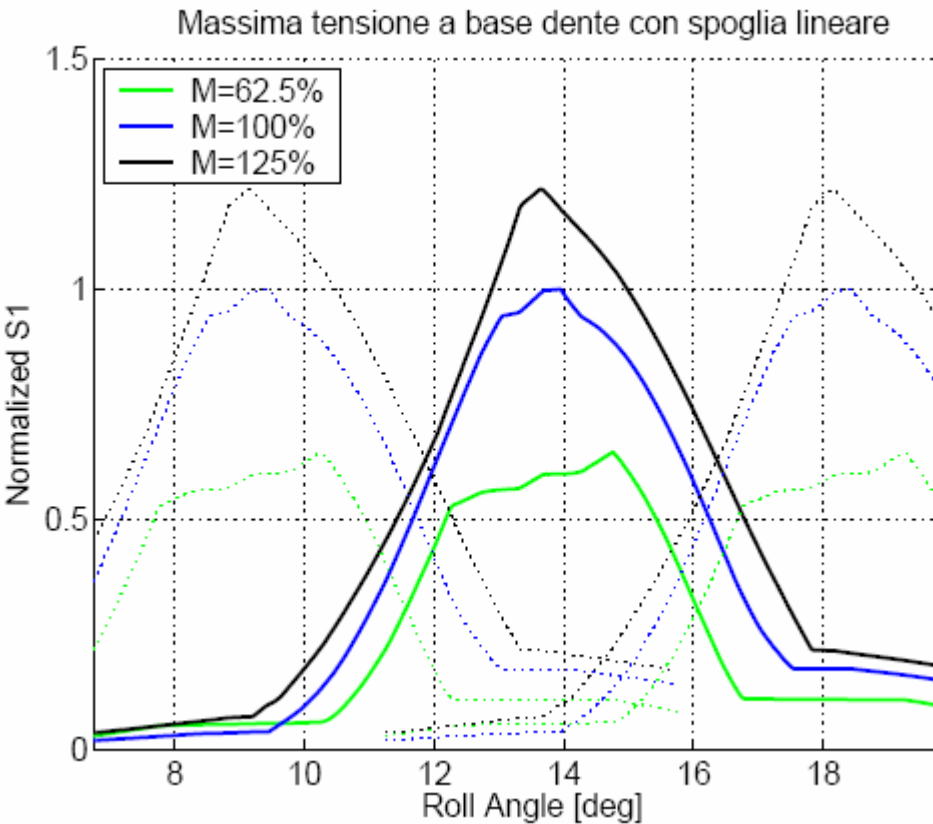


- Contatto **non Hertziano** quando il punto di inizio spoglia cade all'interno della zona di contatto (continuità C^0 del profilo)



Risultati

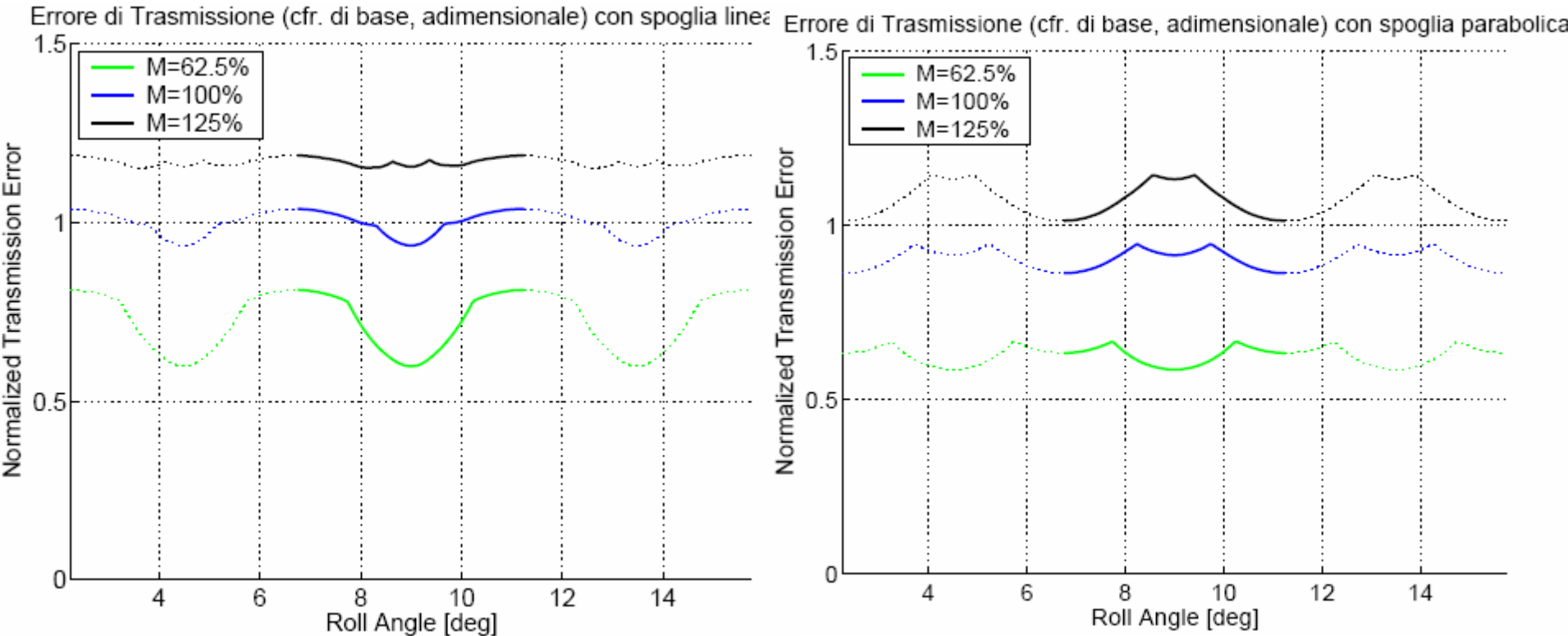
- Massima tensione alla base del dente



- **bassissimo** effetto della morfologia della modifica di profilo
- andamento **pressoché lineare** con il carico
- **esigenza** di sovrapporre le tensioni residue, relative ai trattamenti ¹⁶

Risultati

- Errore di trasmissione, *Transmission Error* (T.E.)



- **notevole** sensibilità dell'andamento dalla morfologia della spoglia
- P.P.T.E. (distanza Picco a Picco) dell'andamento del T.E. **minore** nel caso di spoglia lineare ad **alti** carichi e viceversa

Conclusioni

- Estesa campagna di analisi LTCA effettuate con accurate simulazioni numeriche
- Vengono discussi effetti di **singolarità** sulla Pressione di Contatto relativi alla modifica di profilo
- Sensibilità dei risultati alla morfologia di spoglia
 - **Pressione di Contatto e Errore di Trasmissione molto sensibili**
 - **Forza sul dente Tensionale principale a base dente poco sensibili**
- Effetto di **allargamento** del grado di ricoprimento in funzione del carico
- **Evoluzione** della funzione dell'Errore di Trasmissione in funzione della morfologia di spoglia applicata