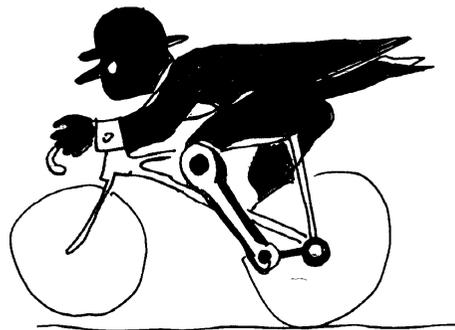


Calcolo della biella e dello spinotto

Antonio Strozzi

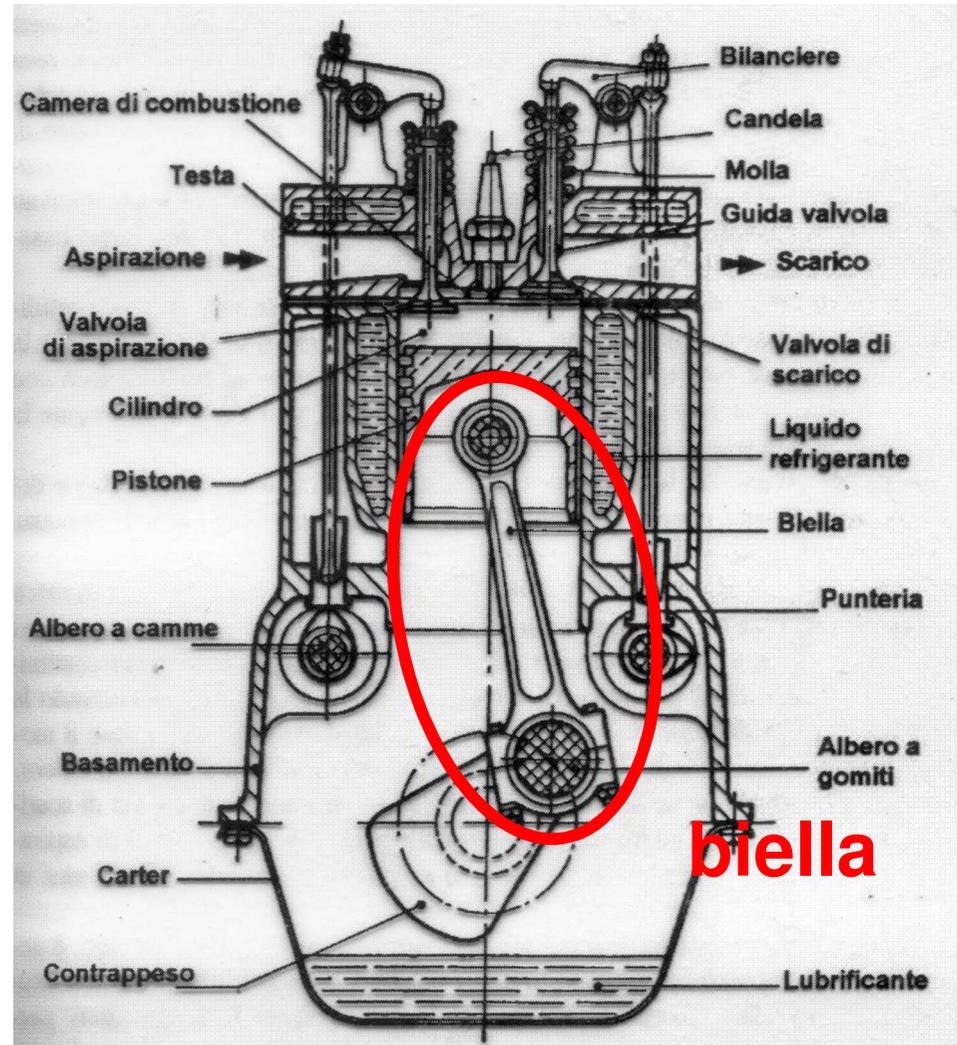
Costruzione di Macchine

Università di Modena e Reggio Emilia

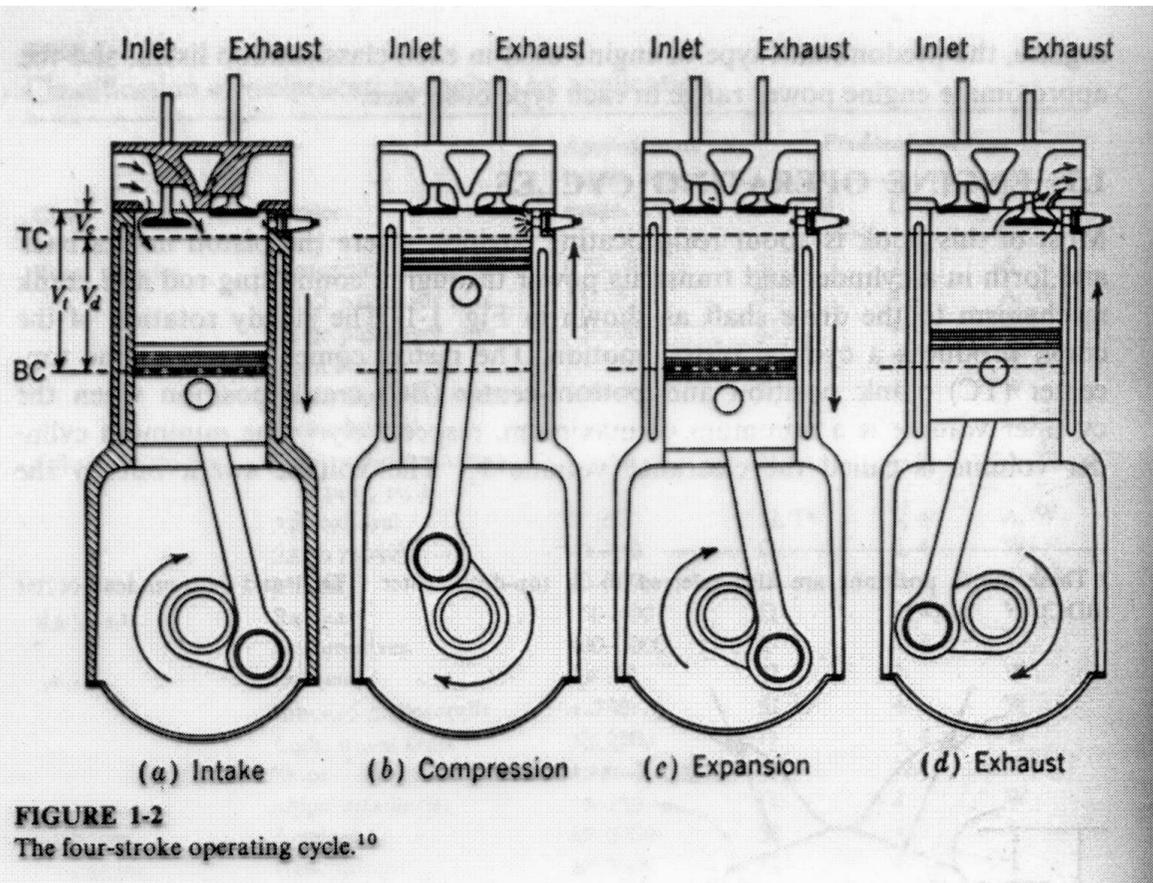


April 97

La biella nel manovellismo



Le quattro fasi del motore



aspirazione

compressione

espansione

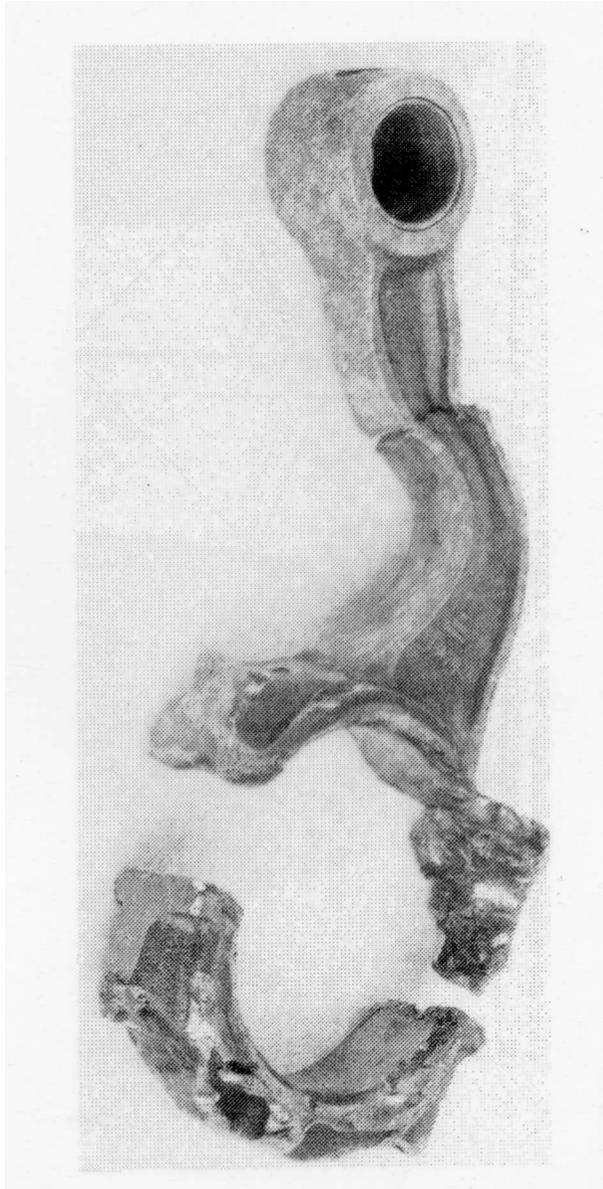
incrocio

+

combustione

La biella è il cuore del motore: quando
la biella cede, il motore si sfascia

Mauro Forghieri





La biella di Capitan Uncino



**Biella in alluminio Lombardini:
crack passante da piede a testa**



Biella in alluminio Lombardini



Biella in alluminio Lombardini

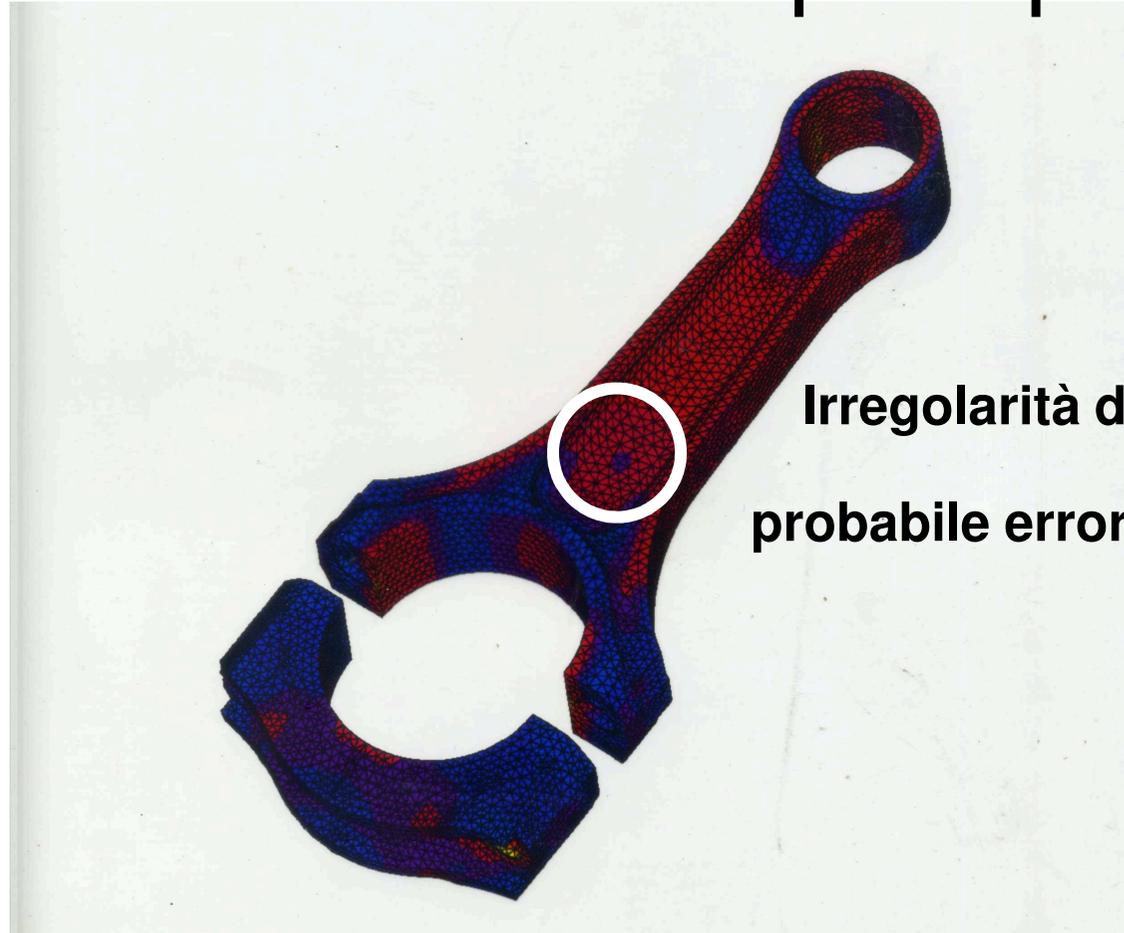


**Cedimento per
carico di punta**

Cedimento per carico di punta

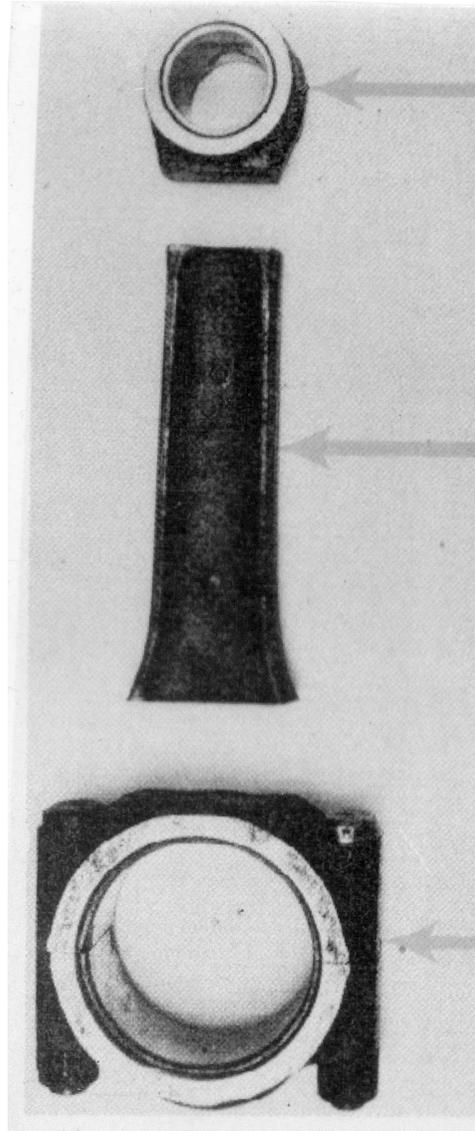


Si può analizzare agli Elementi Finiti l'intera biella, ma conviene sezionarla virtualmente nelle sue parti principali



**Irregolarità delle tensioni:
probabile errore di meshatura**

Le tre parti della biella



piede

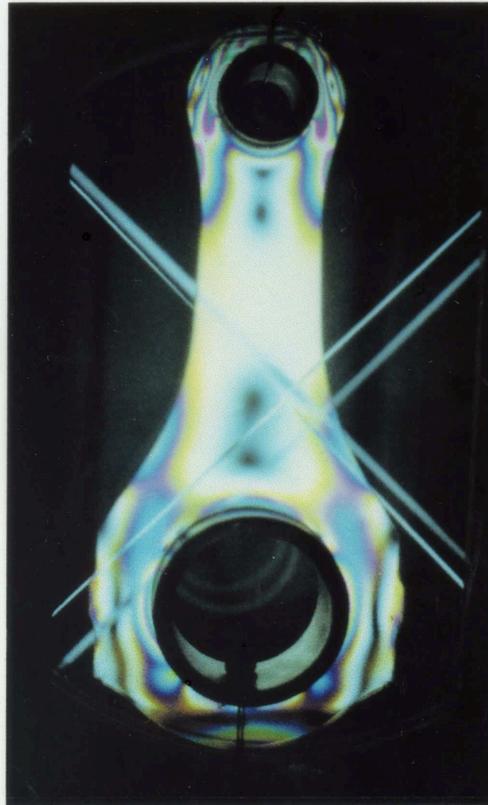
fusto

testa

**zona della testa
adiacente al fusto**

cappello

Tecniche per analizzare le tensioni



Stato tensionale ottenuto con
fotoelasticimetria

Fotoelasticità



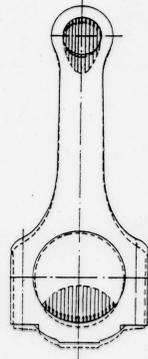
Stato tensionale ottenuto con calcolatore

Elementi Finiti

Condizioni di carico sul fusto

**Punto morto superiore
senza scoppio
(fase di incrocio)**

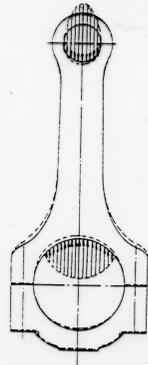
**fusto in trazione per
carichi inerziali**



Trazione punto morto superiore incrocio

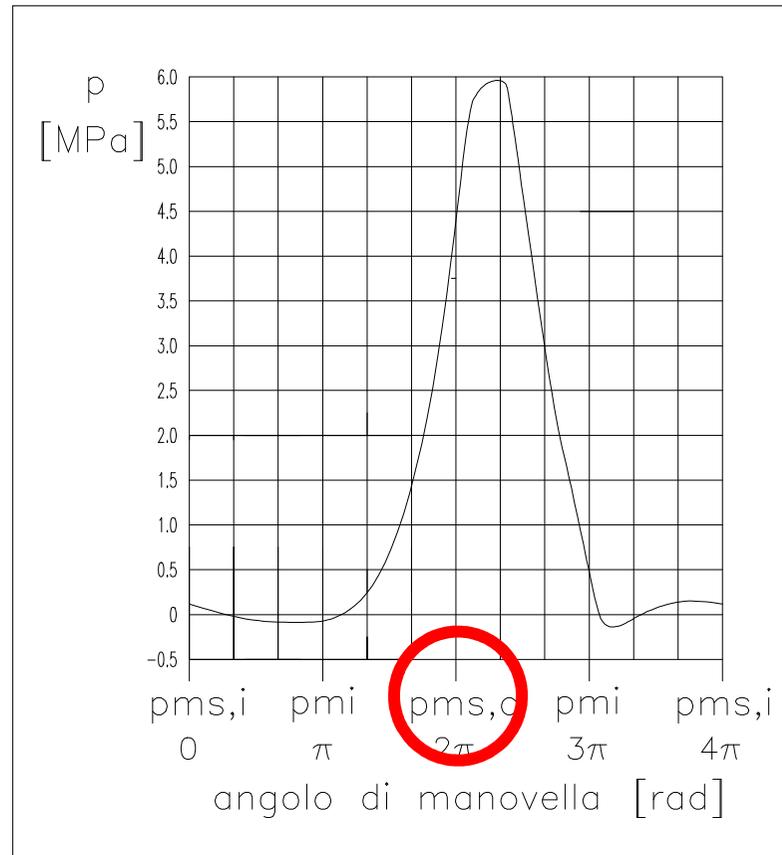
**Punto morto superiore
con scoppio**

**fusto in compressione
per pressione di
combustione**



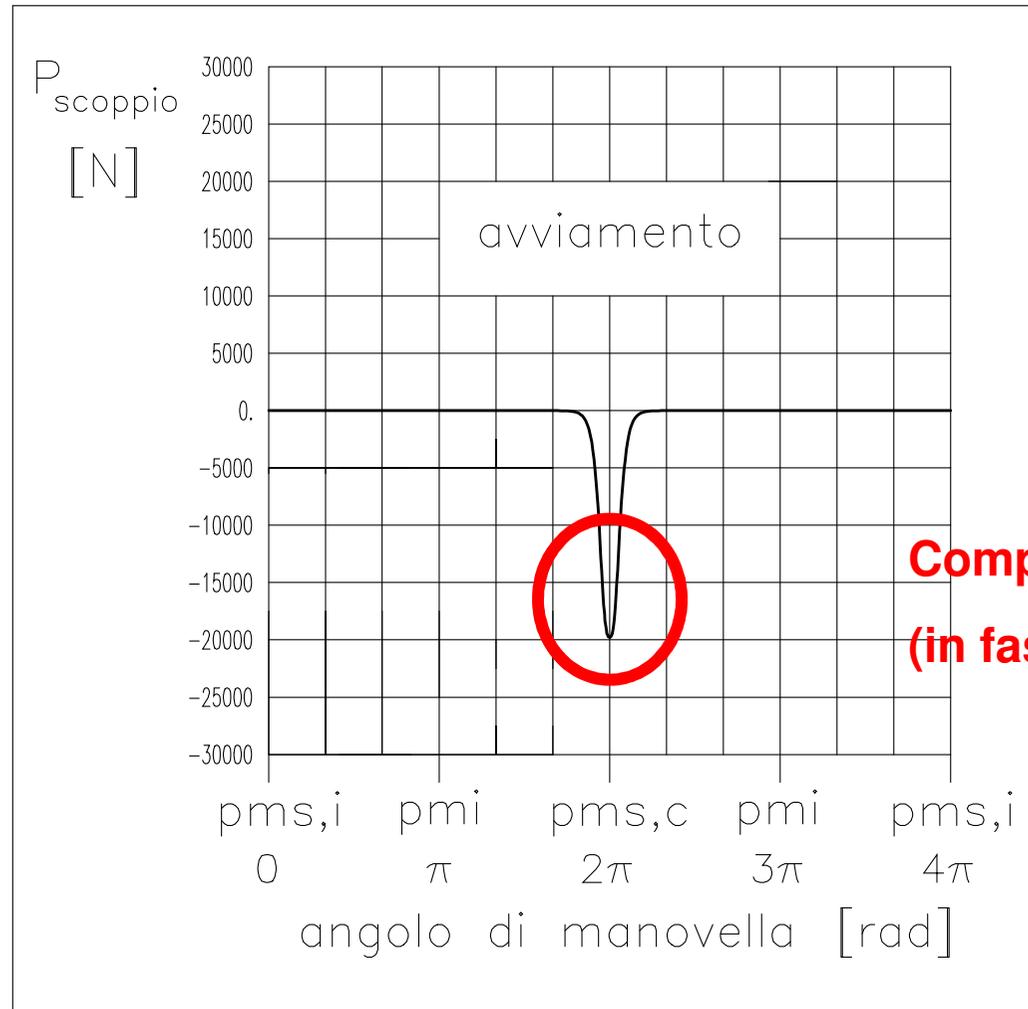
Compressione punto morto superiore scoppio

Diagramma di indicatore



**Punto morto superiore
in fase di combustione**

Diagramma di indicatore (idealizzato) all'avviamento



**Compressione
(in fase di combustione)**

Diagramma di indicatore (idealizzato) a regime

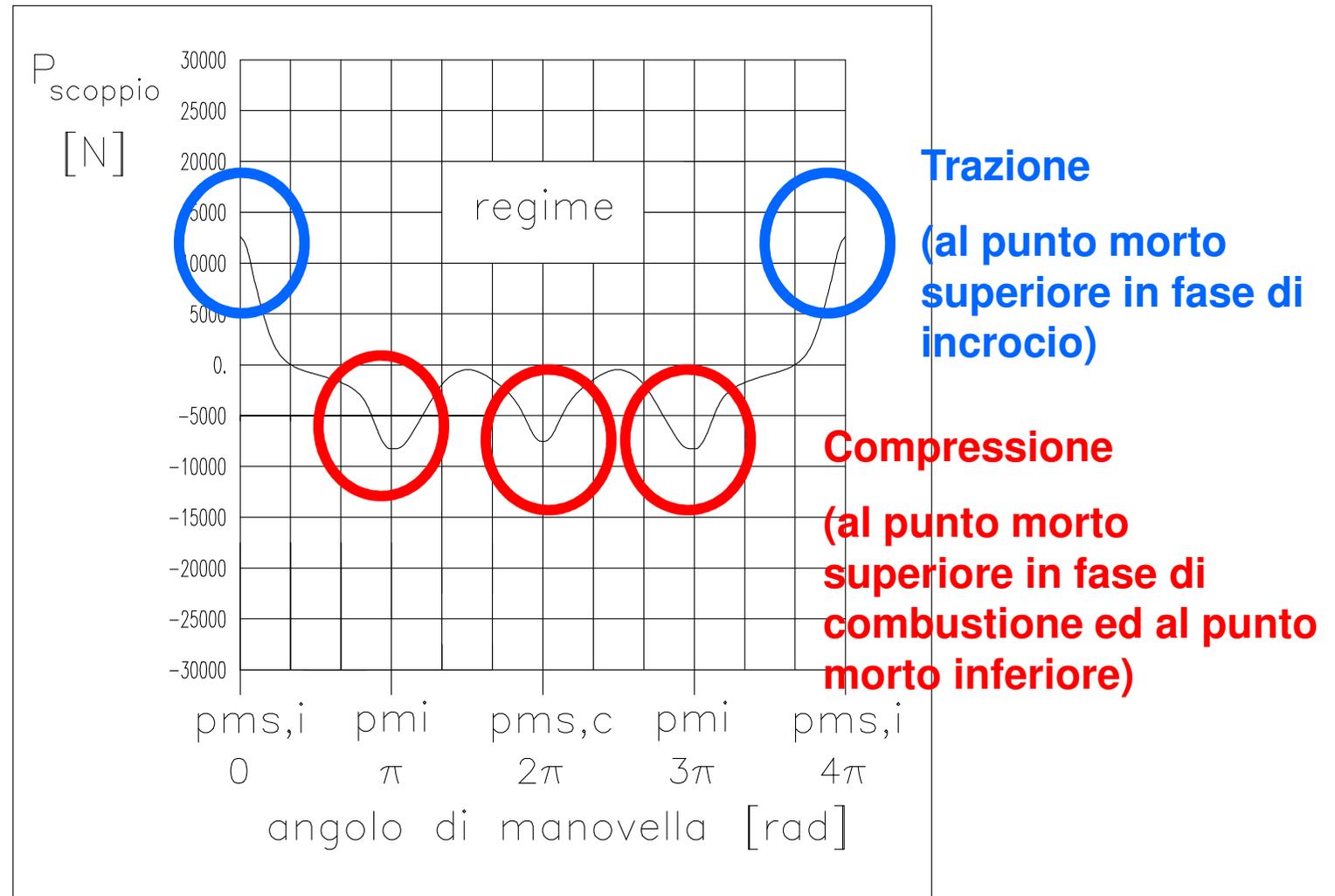
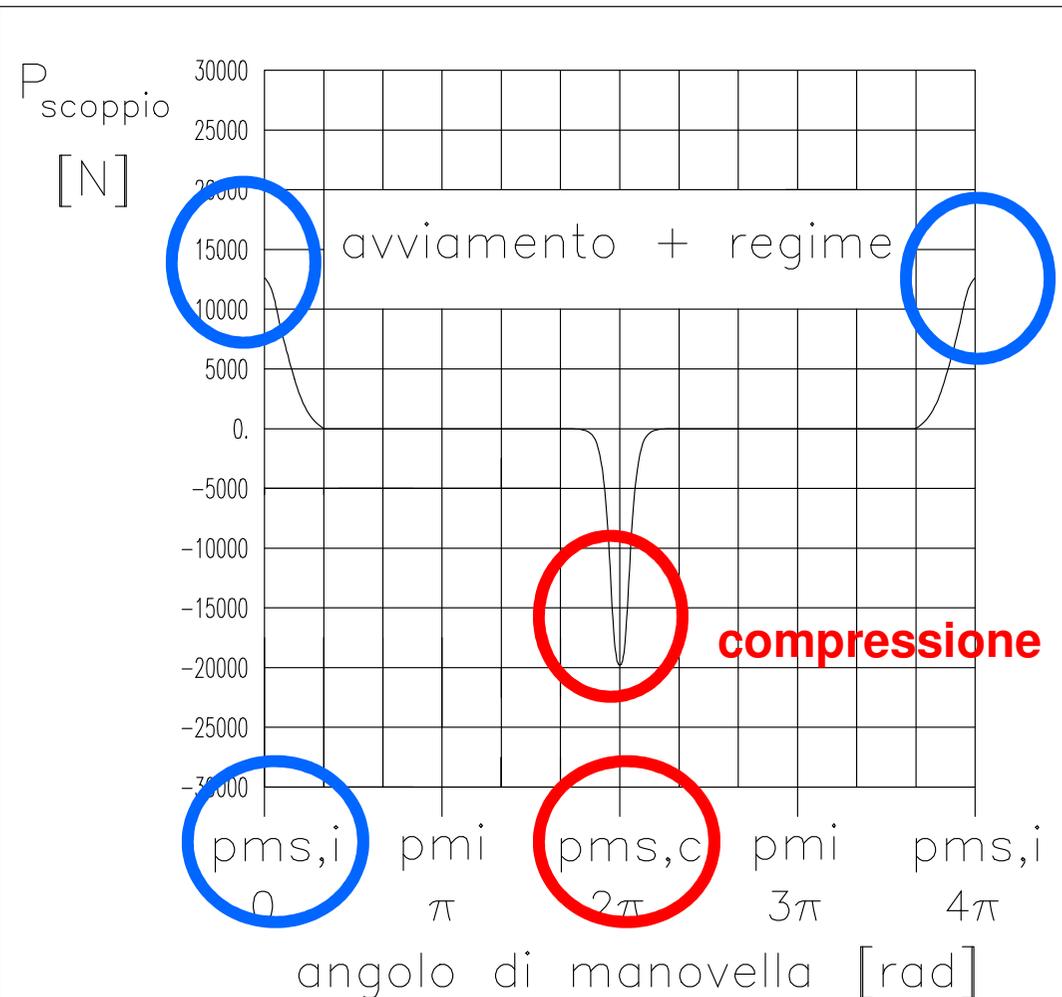


Diagramma di indicatore (idealizzato) ad **avviamento + regime** (Giovannozzi)



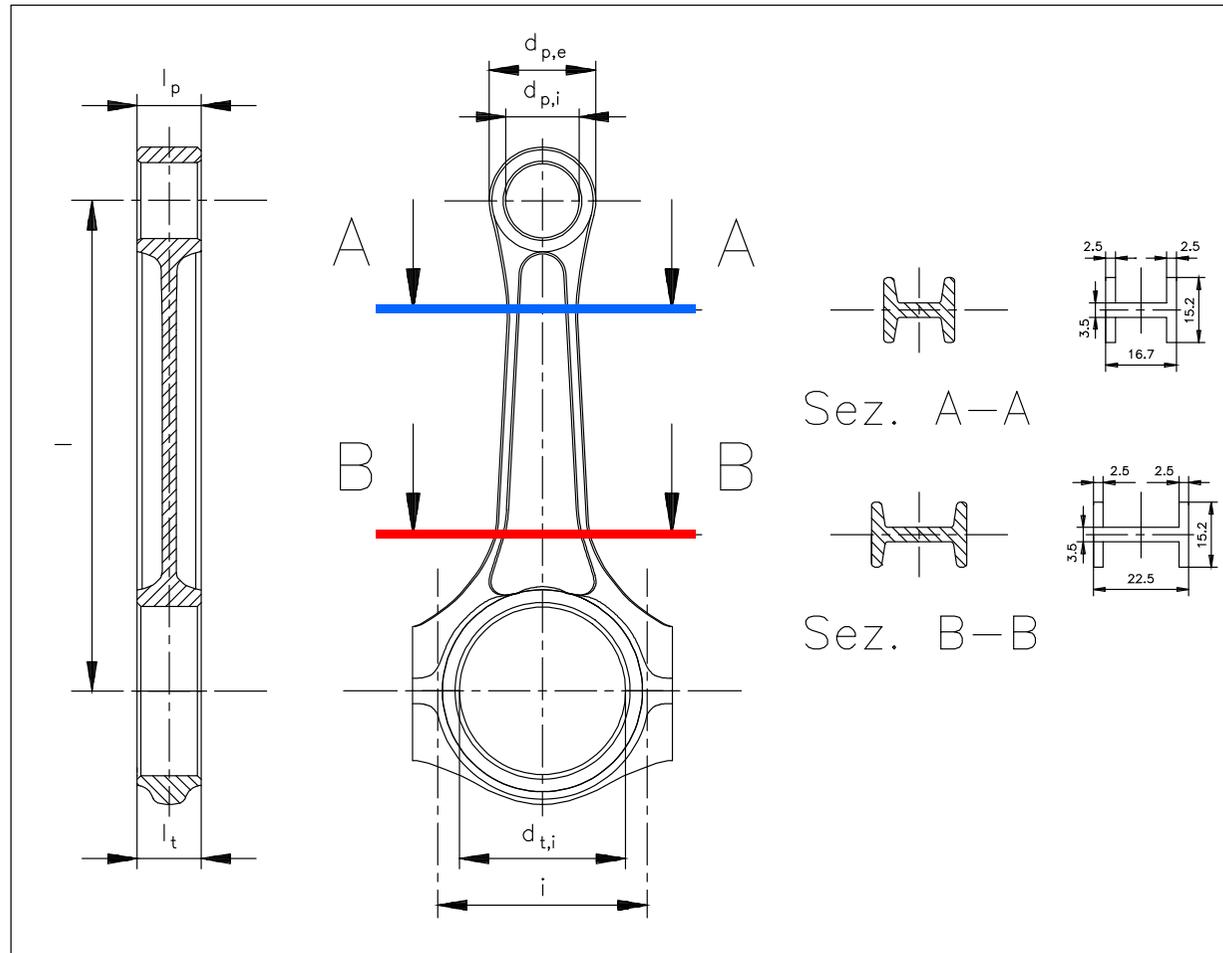
trazione

Si estraggono dai
diagrammi precedenti
i massimi di trazione
e di compressione

Punto morto superiore
in fase di incrocio

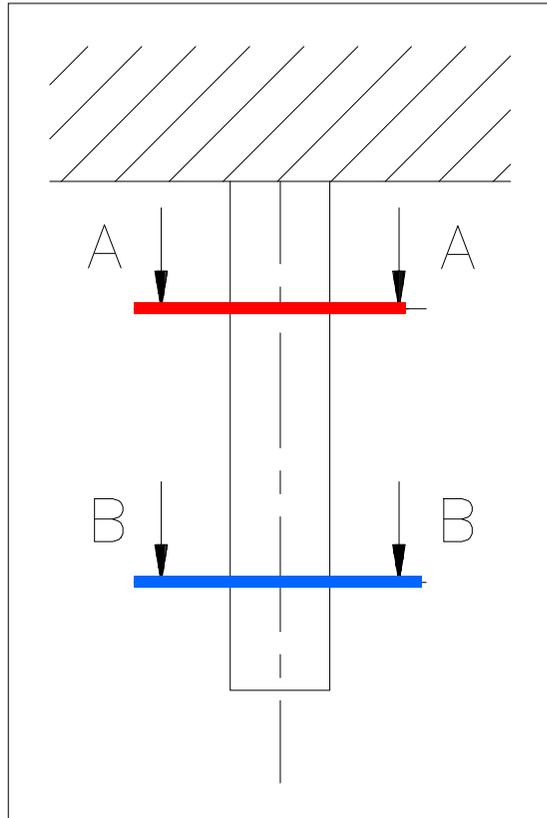
Punto morto superiore
in fase di combustione

Analisi dei carichi **inerziali** nella biella



I calcoli a resistenza del fusto vanno eseguiti nella sezione **A-A** o **B-B**?

Effetto dei carichi inerziali: analogia con la stalattite

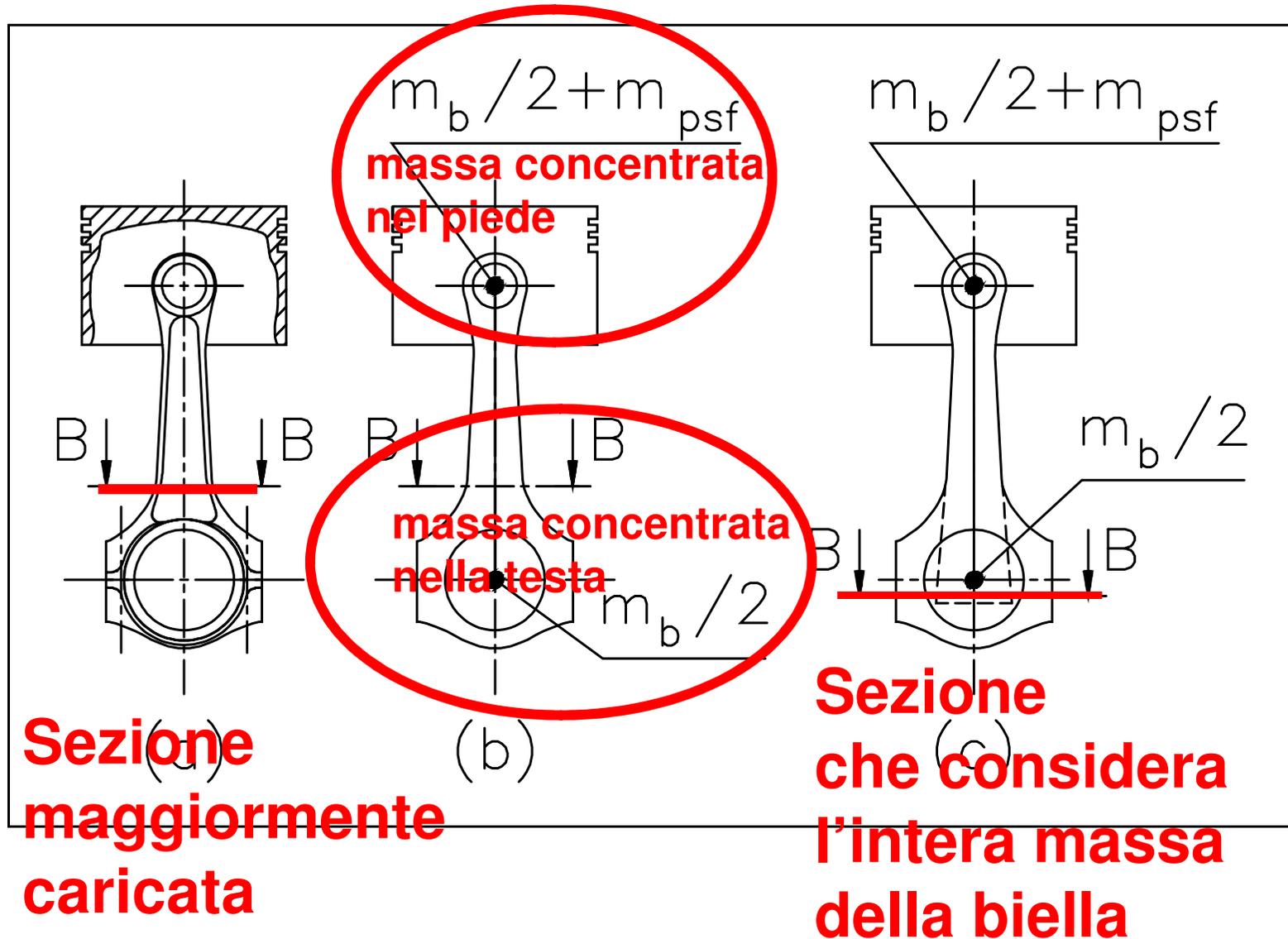


Sezione maggiormente caricata

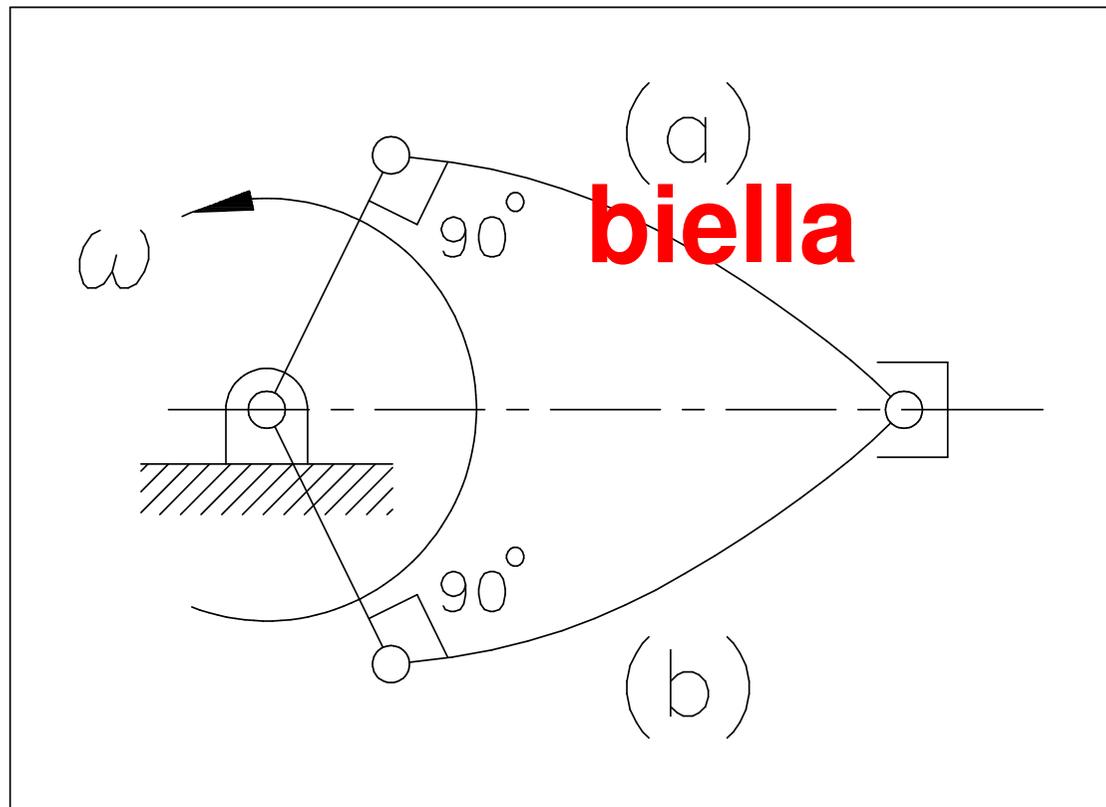
Sezione meno caricata

La biella è una stalattite capovolta

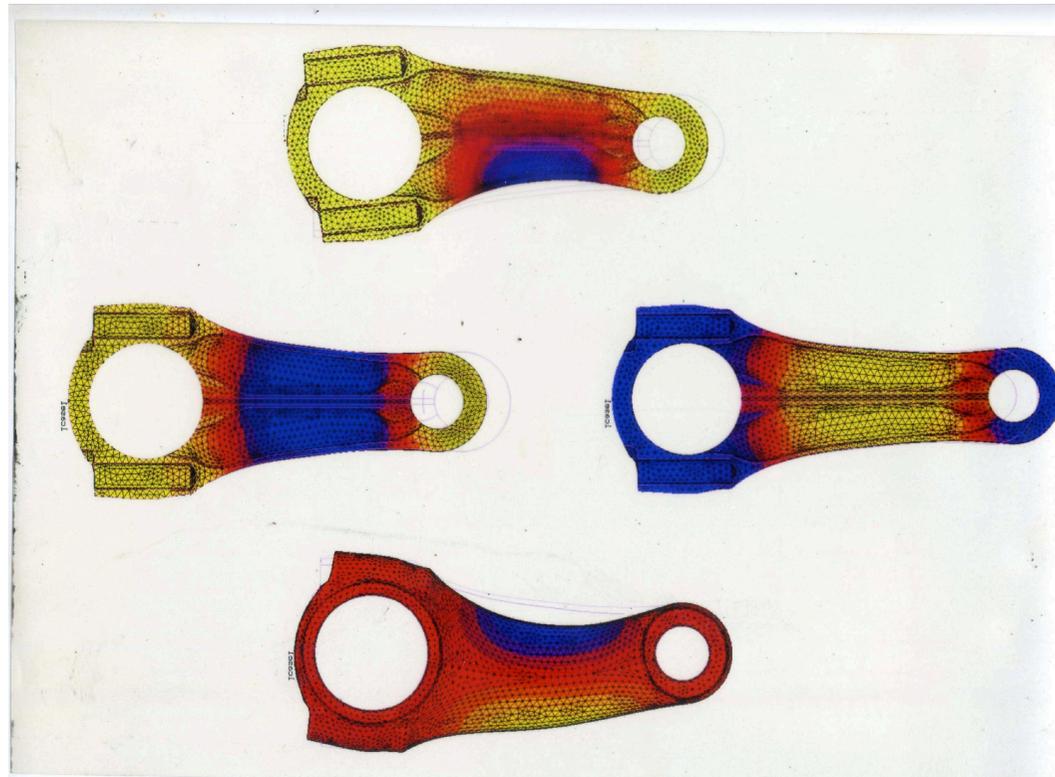
Modello a masse concentrate per il calcolo delle forze inerziali nel fusto



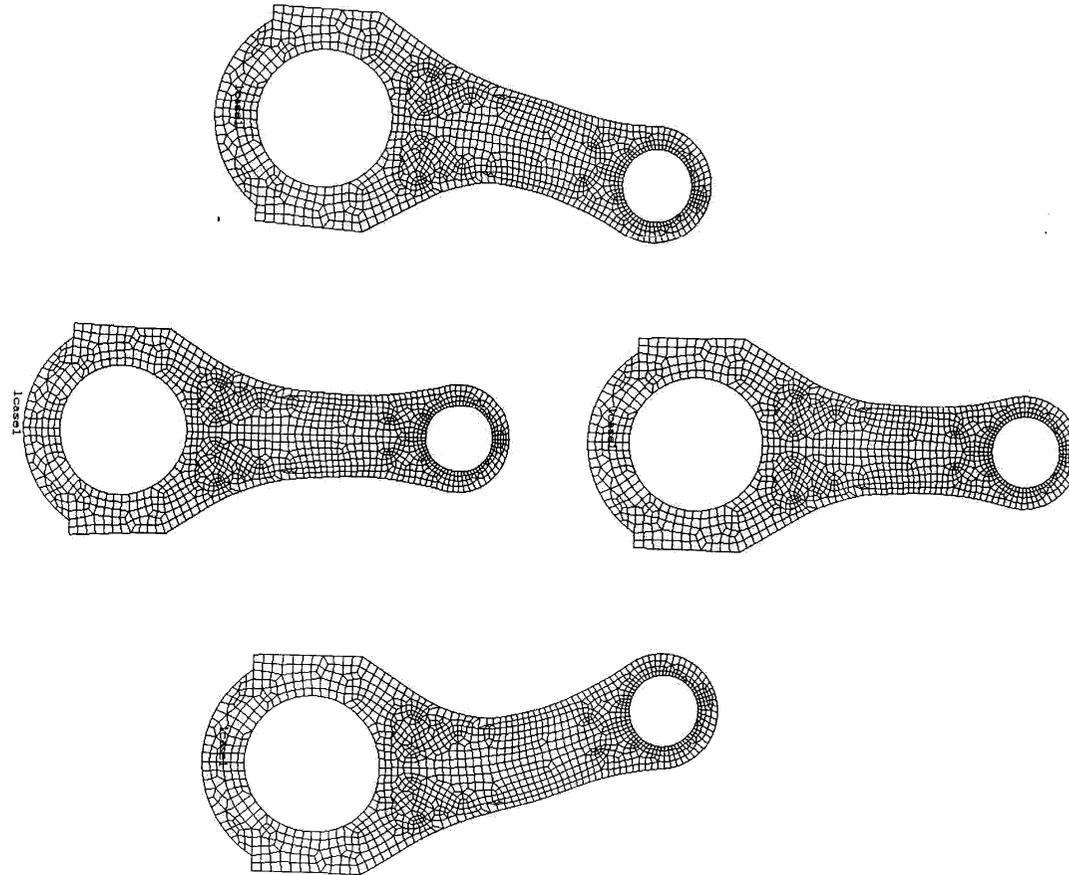
**Calcolo a colpo di frusta in quadratura:
la biella spancia sempre in fuori:
fatica flessionale all'inversione**



Calcolo a colpo di frusta:
la biella spancia sempre in fuori:
fatica flessionale all'inversione



Colpo di frusta:
la biella spancia sempre in fuori:
fatica flessionale all'inversione

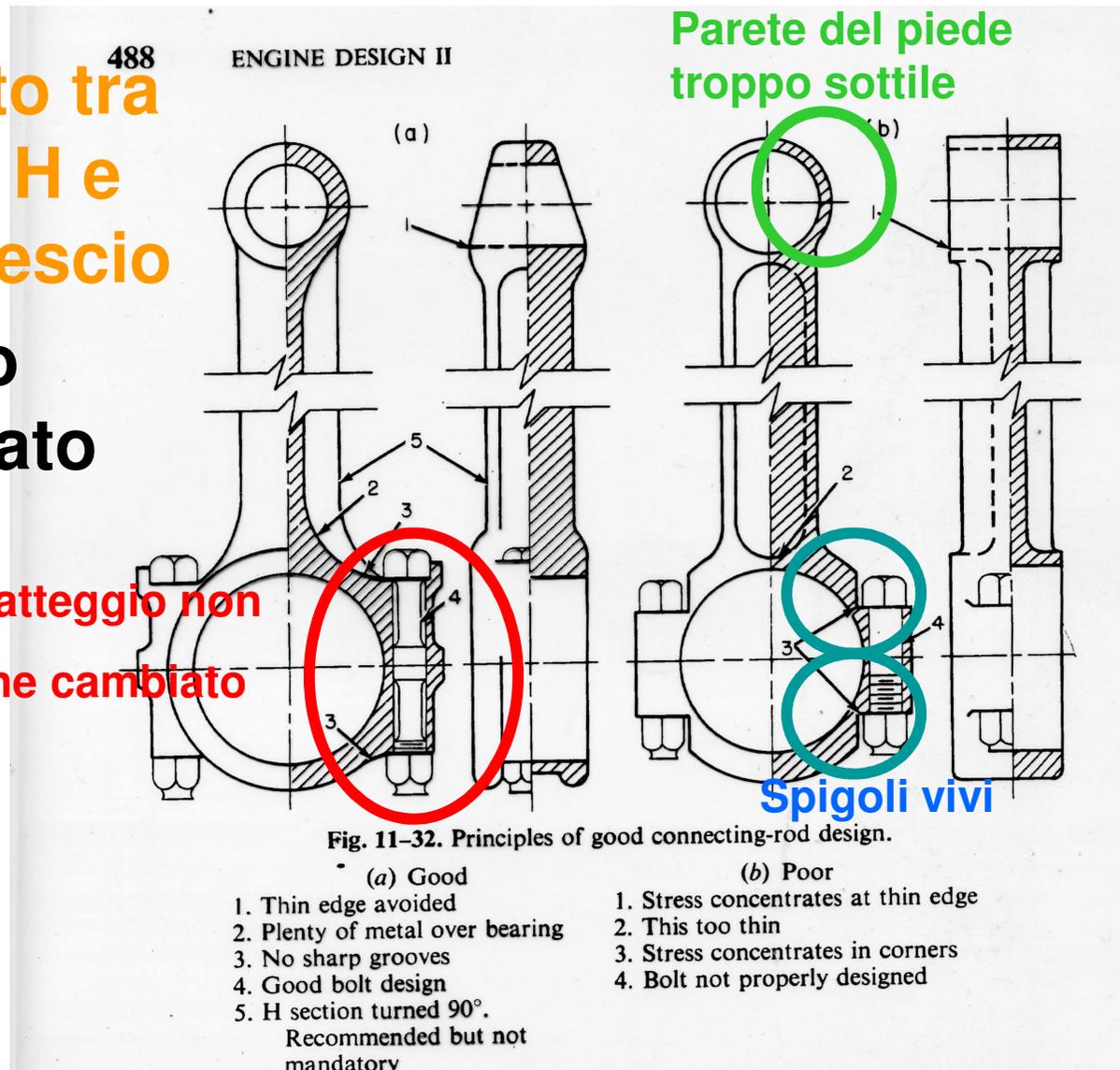


Taylor: Internal Combustion Engine in Theory and Practice

Confronto tra
bielle ad H e
ad H rovescio

Disegno
inaccurato

Il tratteggio non
viene cambiato



Geometrie tipiche dei **pedi di biella**

FORME DI PIEDI DI BIELLA PER MOTORI 2T



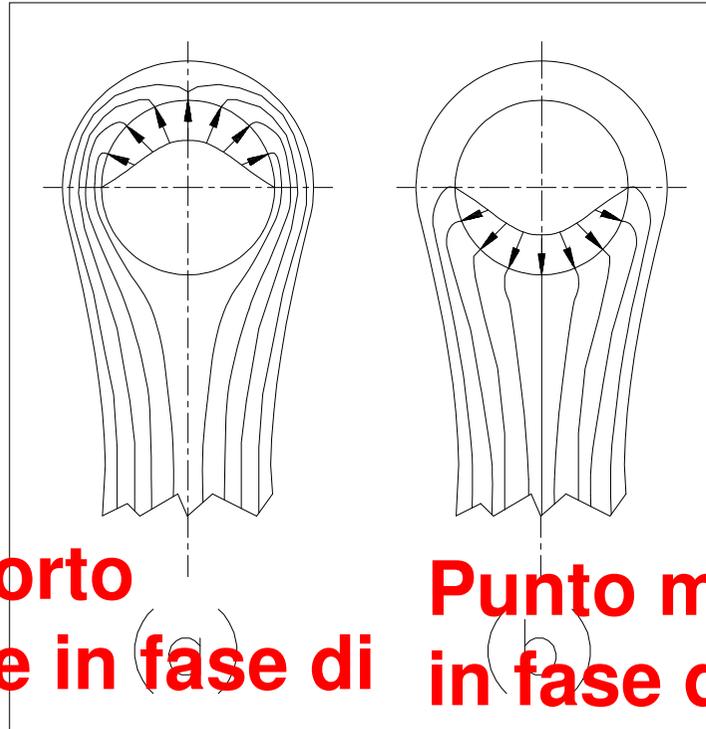
Due tempi
 $r_e/r_i=1.2\div 1.6$

FORME DI PIEDI DI BIELLA PER MOTORI 4T



Quattro tempi
 $r_e/r_i=1.6\div 2$

Tensioni nel piede di biella



**Punto morto
superiore in fase di
incrocio:
fusto in trazione.
Piede tensionato**

**Punto morto superiore
in fase di combustione:
fusto in compressione.
Piede scarico**

**Le tensioni nel piede vanno calcolate al
punto morto superiore in fase di incrocio**

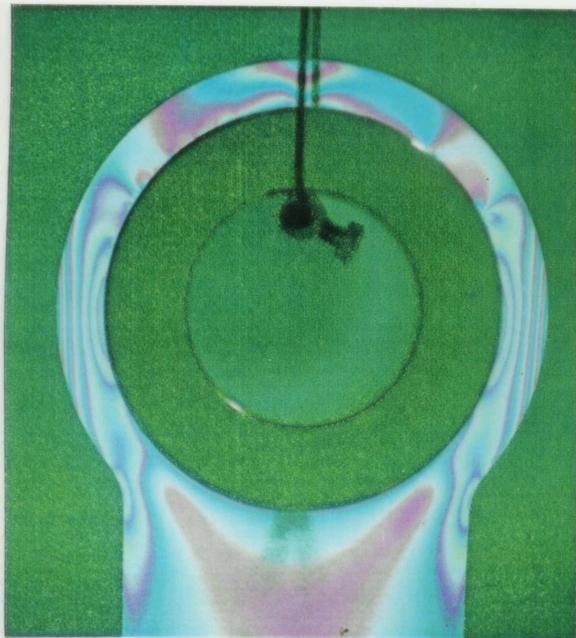
Fotoelasticità

CONFRONTO DELLE FRANGE FOTOELASTICHE NEL PIEDE DI BIELLA DI UN MOTORE 2T

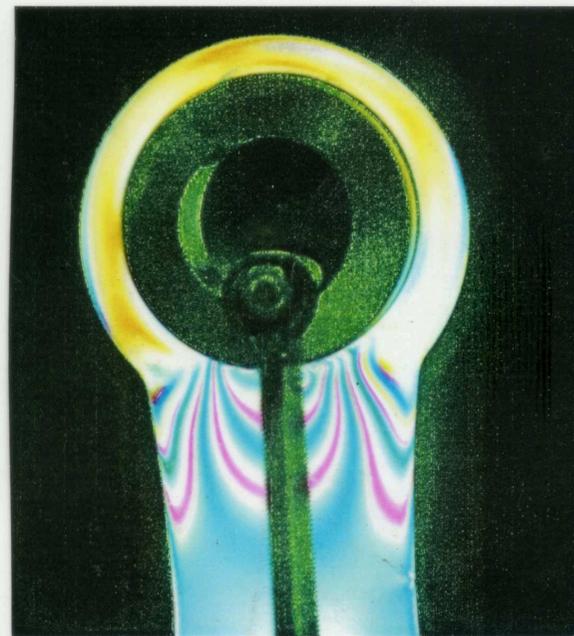
Punto morto superiore
in fase di incrocio

Punto morto superiore in
fase di combustione

Piede
tensionato



TRAZIONE



COMPRESSIONE

piede scarico

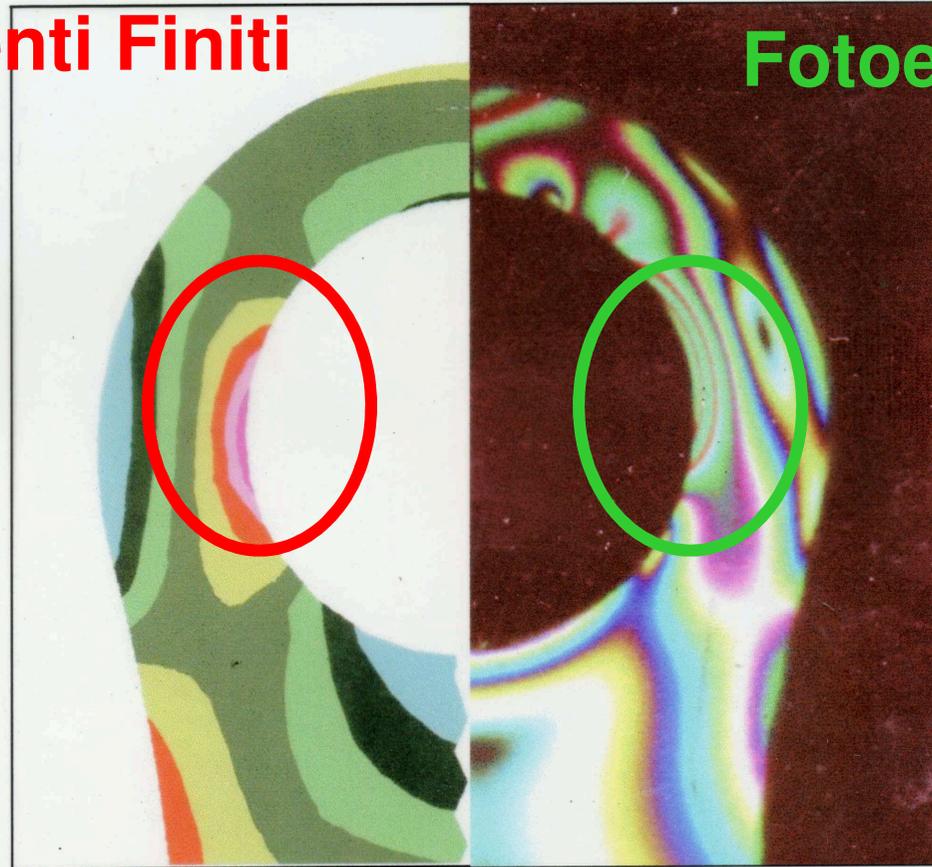
Le frange
passano
direttamente
nel fusto

CONFRONTO RISULTATI

- ♦ TENSIONI NEL PIEDE DI BIELLA AL PMS
- ♦ IN FASE DI INCROCIO

Elementi Finiti

Fotoelasticità



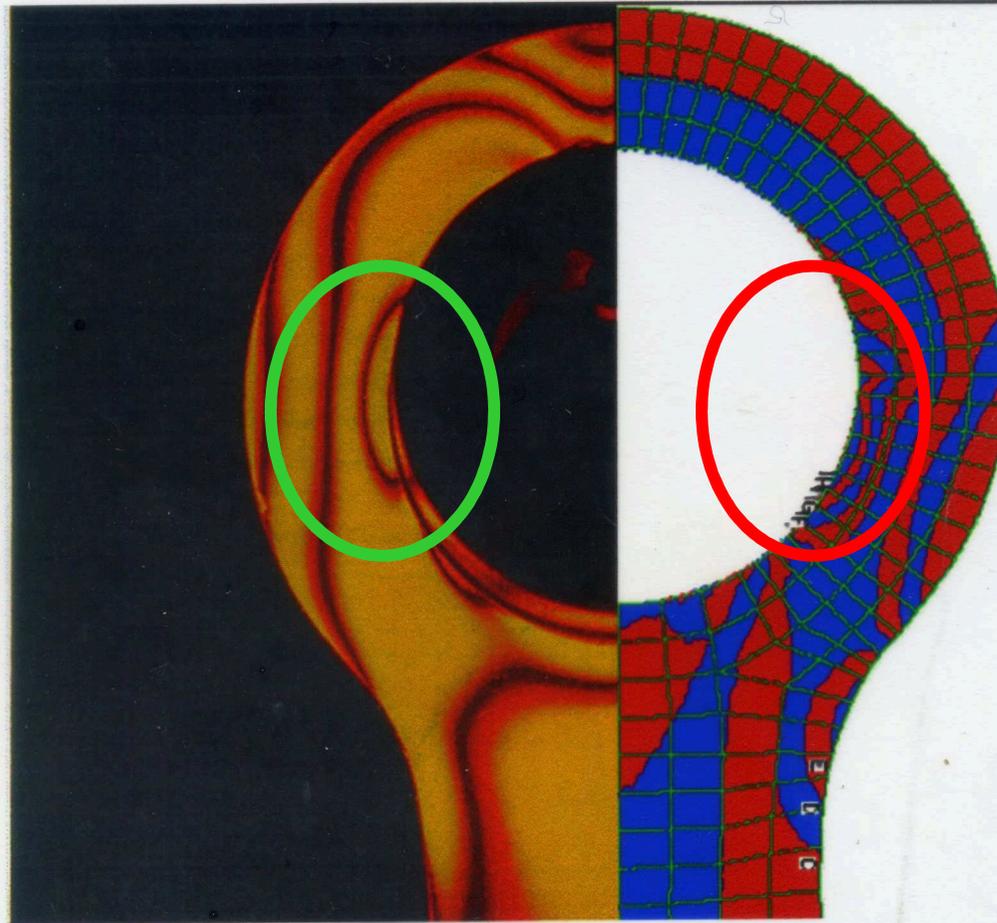
RISULTATO AL CALCOLATORE

RISULTATO CON
FOTOELASTICIMETRIA

STUDIO SU PIEDE DI BIELLA SOLLECITATO A TRAZIONE

Fotoelasticità

Elementi Finiti

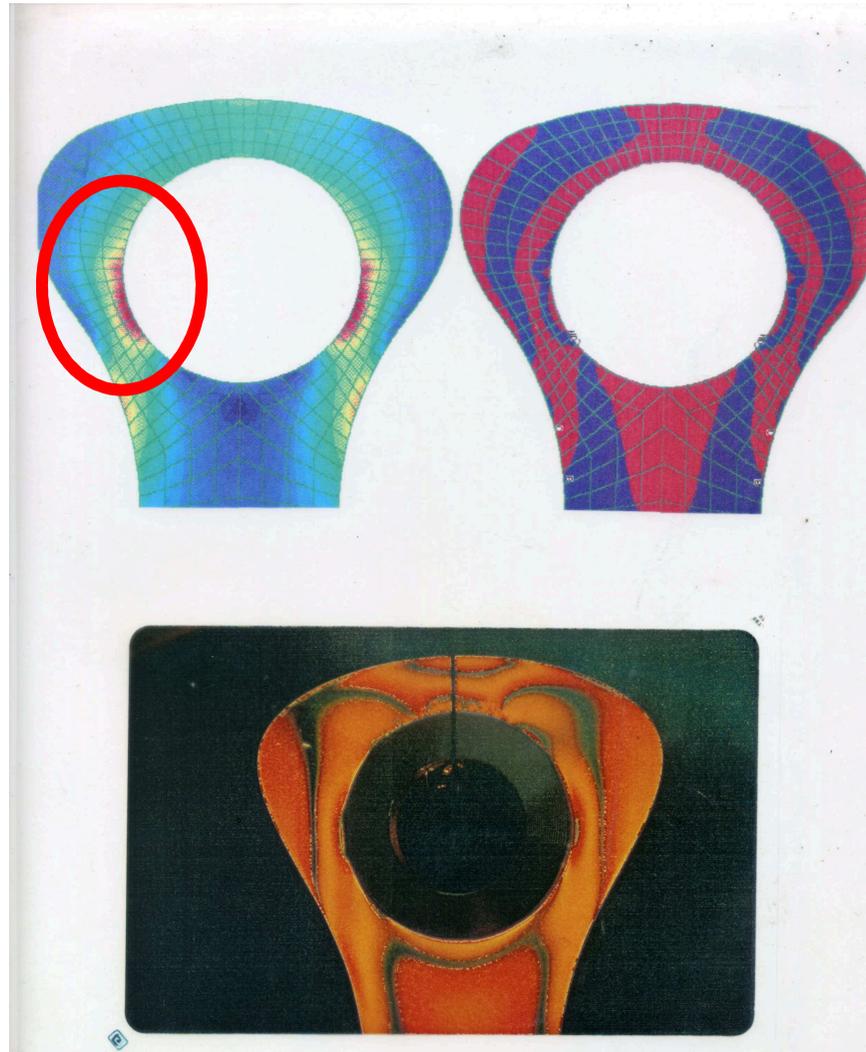


Fotoelasticità

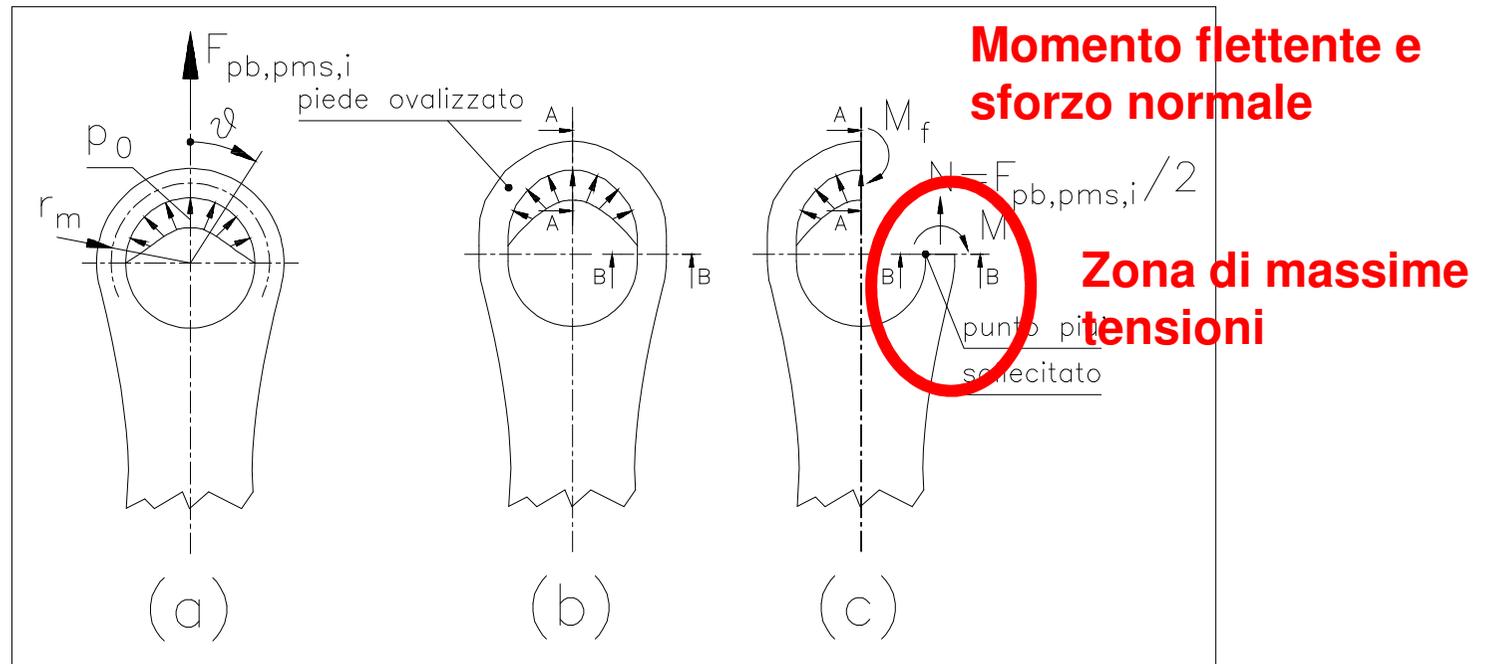
Elementi finiti

Tentativo di ottimizzazione della forma del piede di biella

Con questa
forme le tensioni
sono minori

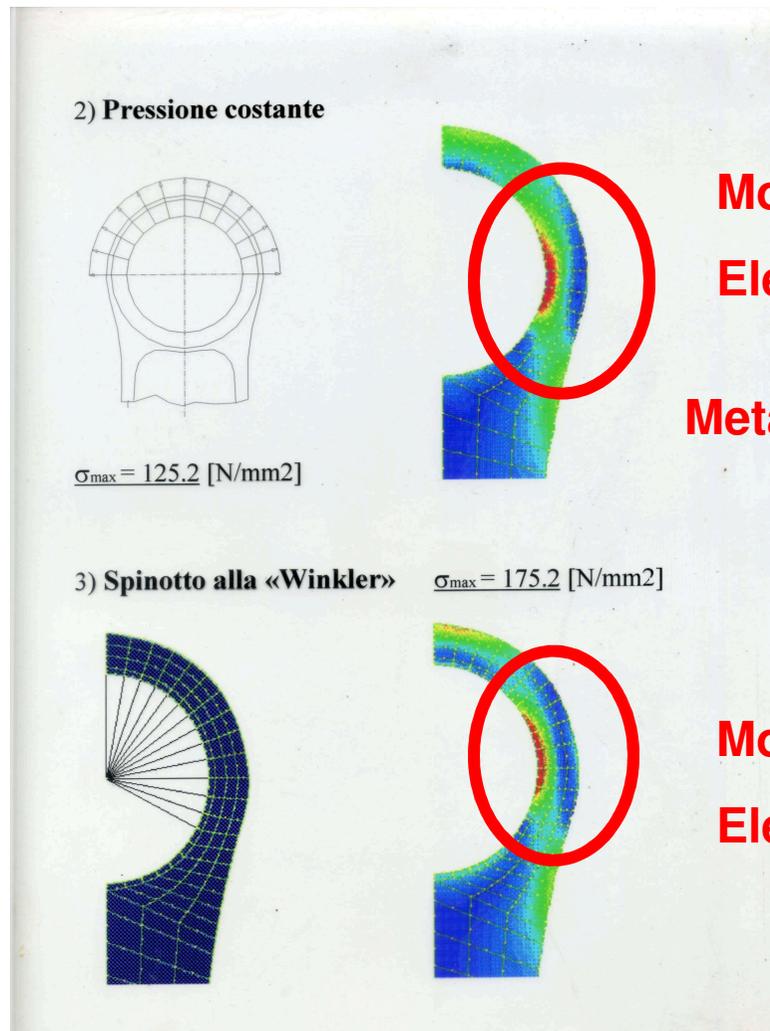


Analisi delle tensioni nel **piede di biella** con un modello a trave curva



Le tensioni massime nel piede cadono al fianco del foro, e vanno calcolate al punto morto superiore in fase di incrocio

Posizione della massima tensione nel piede al fianco del foro: punto morto superiore in **fase di incrocio**

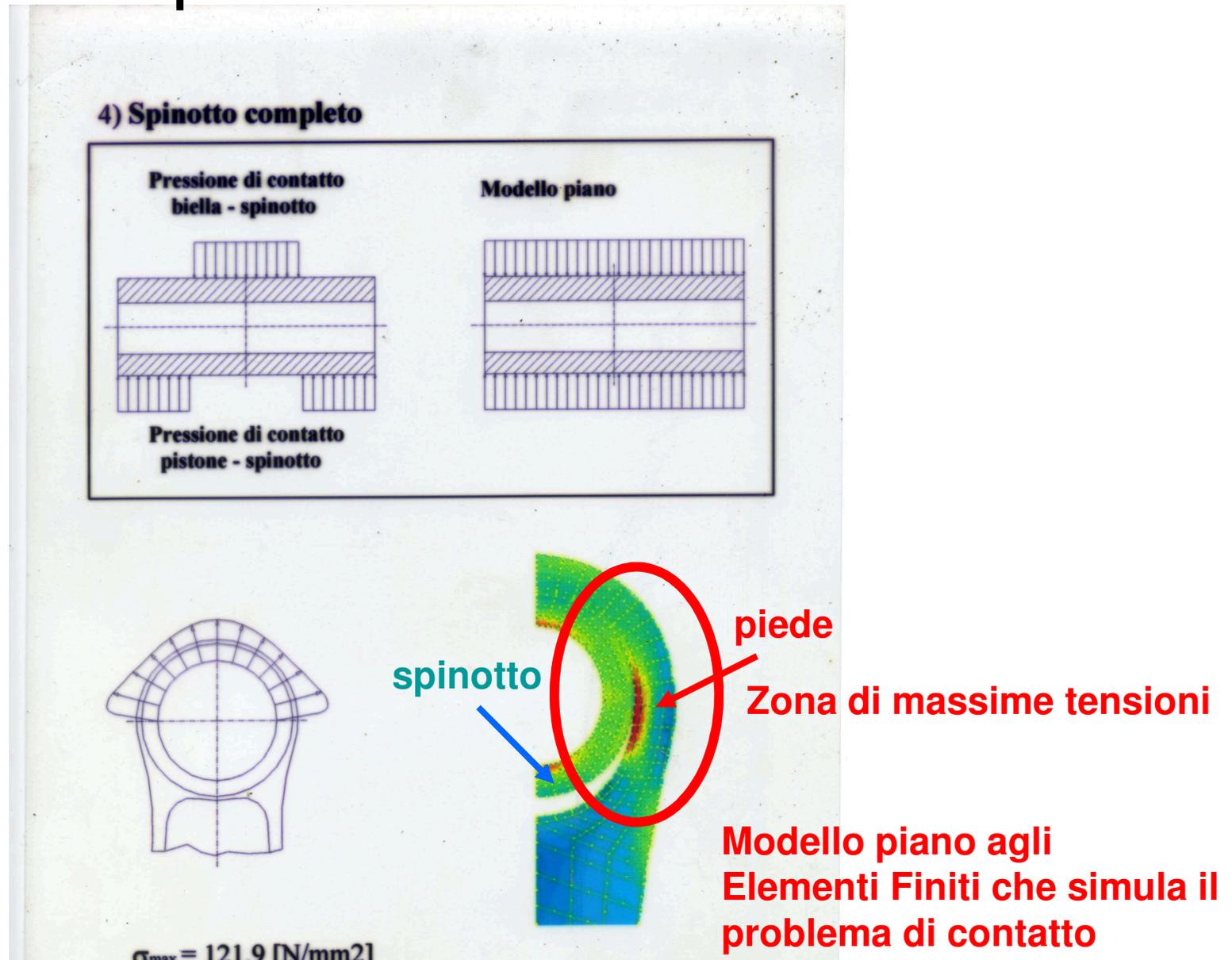


Modello piano agli
Elementi Finiti

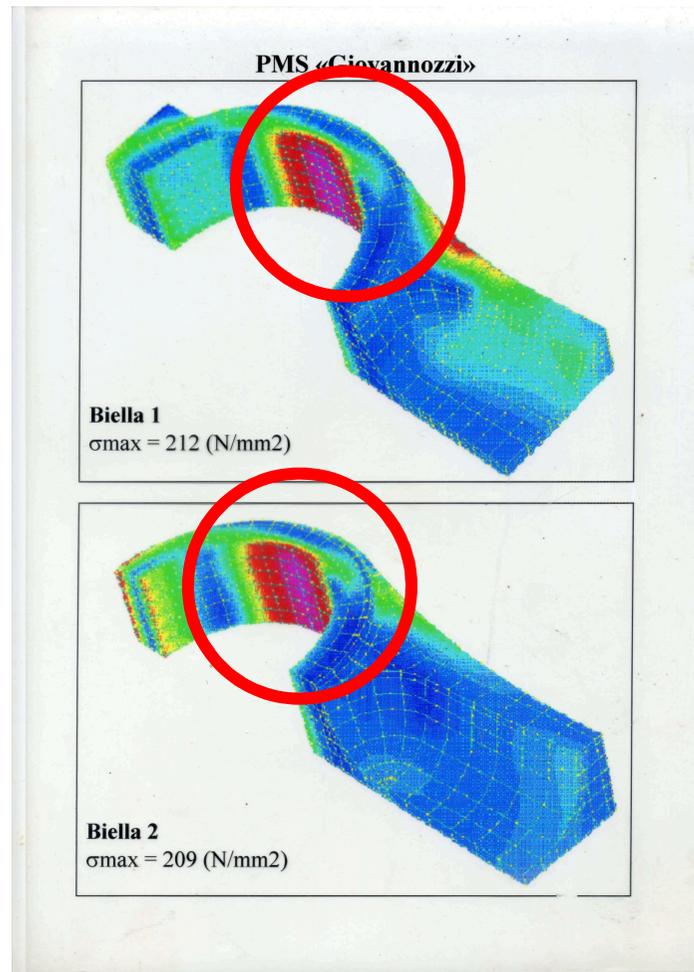
Metà biella per simmetria

Modello piano agli
Elementi Finiti

Posizione della massima tensione nel piede al fianco del foro

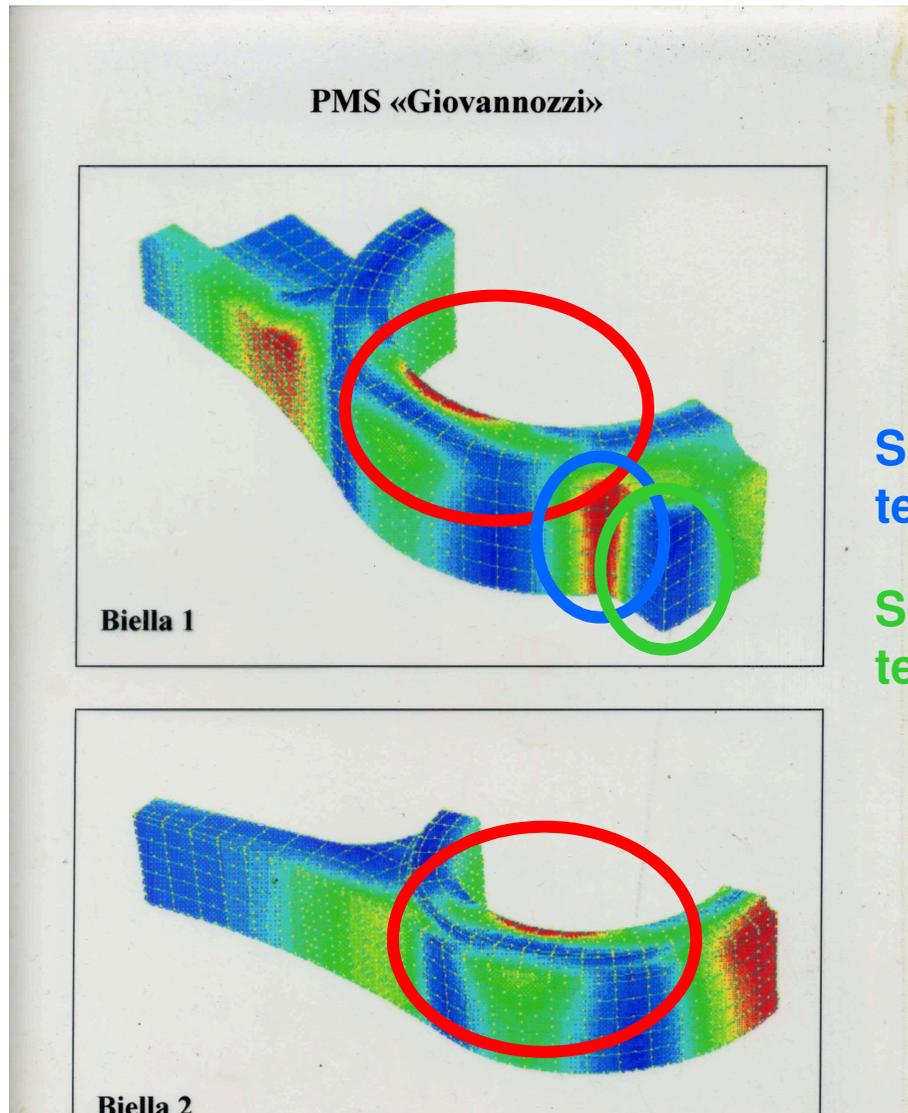


Posizione della massima tensione nel piede al fianco del foro



**Modello tridimensionale agli
Elementi Finiti**

Posizione della massima tensione nel piede al fianco del foro



Modello tridimensionale agli Elementi Finiti

Spigolo rientrante, alte tensioni

Spigolo uscente, basse tensioni

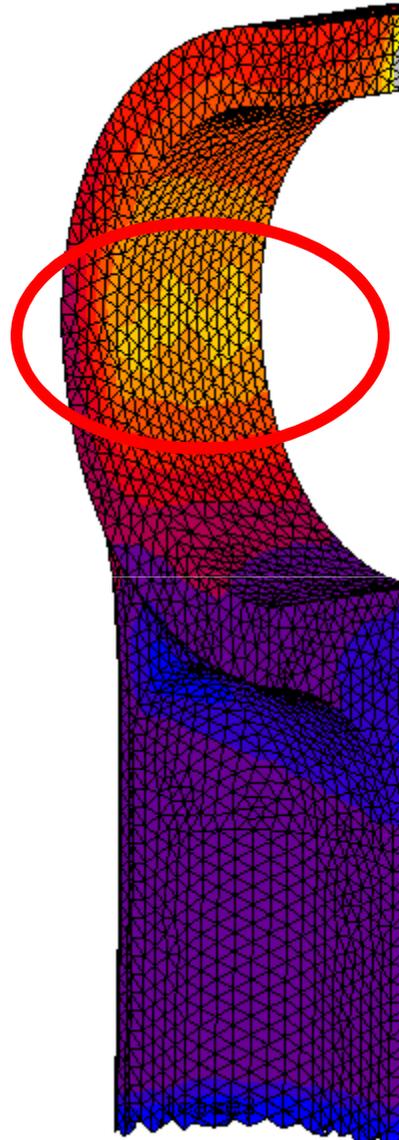
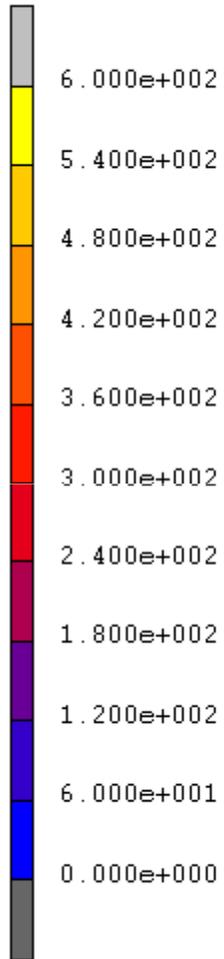
Modello tridimensionale agli Elementi Finiti

Posizione della massima tensione nel piede al fianco del foro



Modello tridimensionale agli Elementi Finiti che simula il problema di contatto

Inc: 12
Time: 2.000e+000

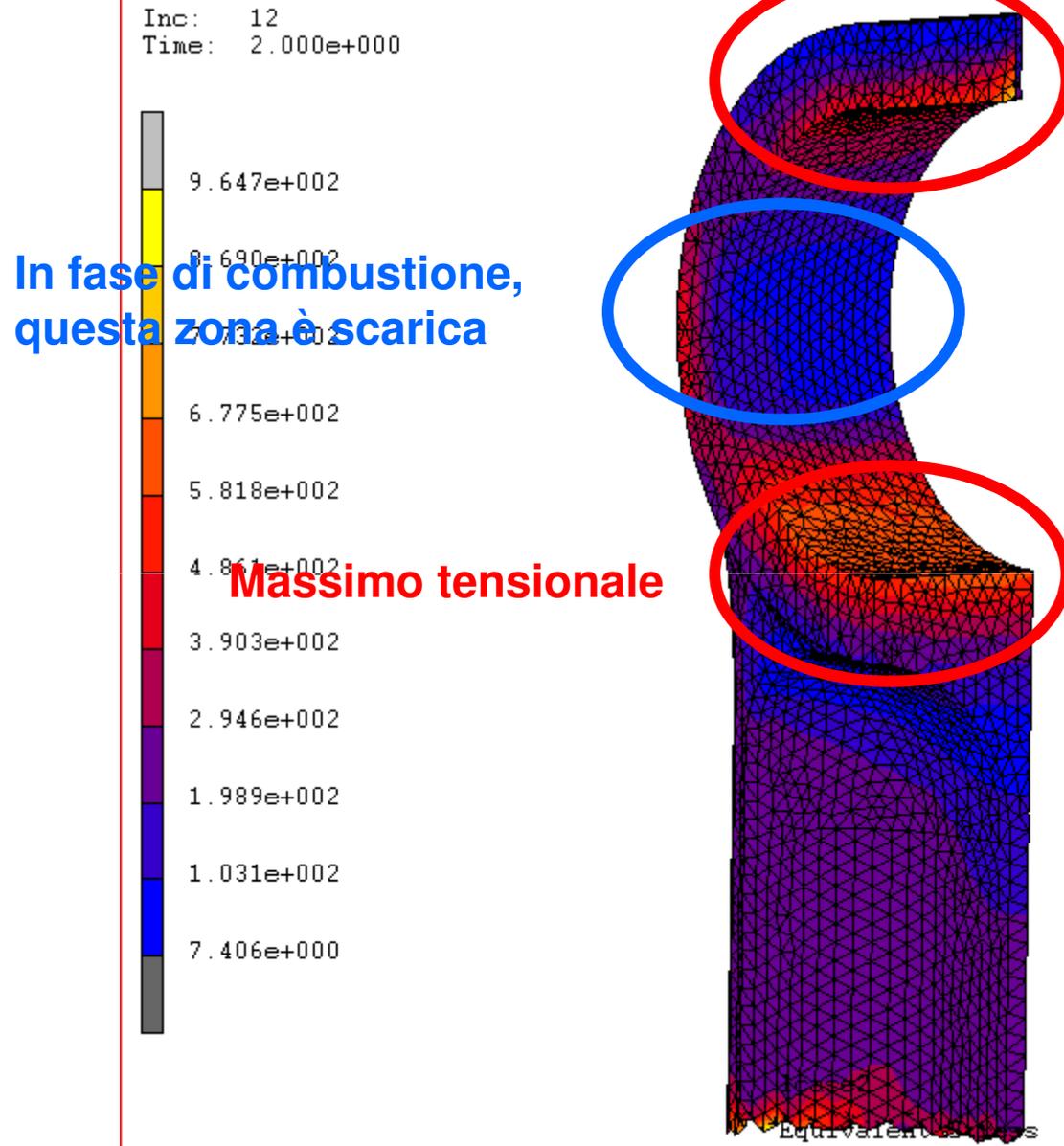


Modello tridimensionale agli Elementi Finiti che simula il problema di contatto

Un quarto di biella per simmetria



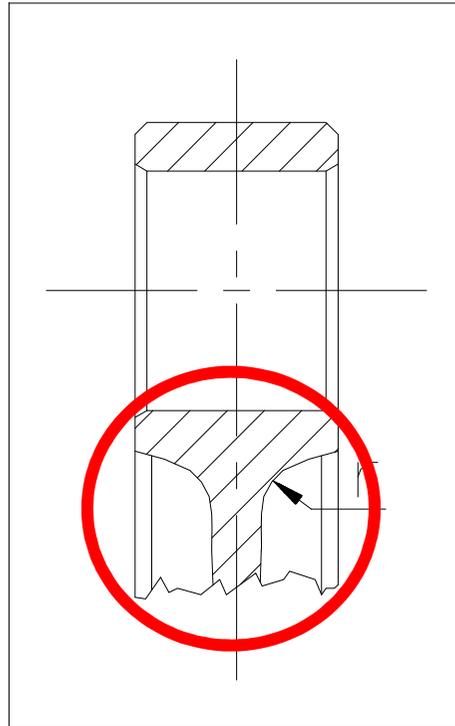
Massimo tensionale



Punto morto
superiore in fase
di combustione

Modello tridimensionale agli
Elementi Finiti che simula il
problema di contatto

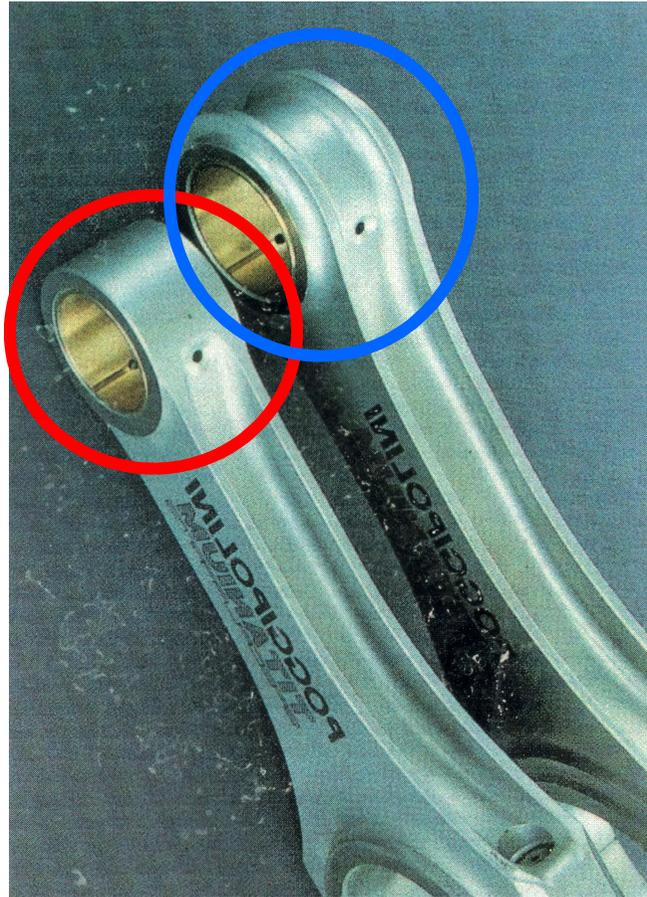
Raggio di raccordo al **passaggio** tra **piede e fusto**



Il passaggio tra piede e fusto non si può studiare con un modello a trave, dato che questo è un problema di **effetto intaglio**: occorrono gli **Elementi Finiti**

Diversi raccordi tra piede e fusto Poggipolini, titanio

Superficie esterna del
piede non nervata



Superficie esterna del
piede nervata

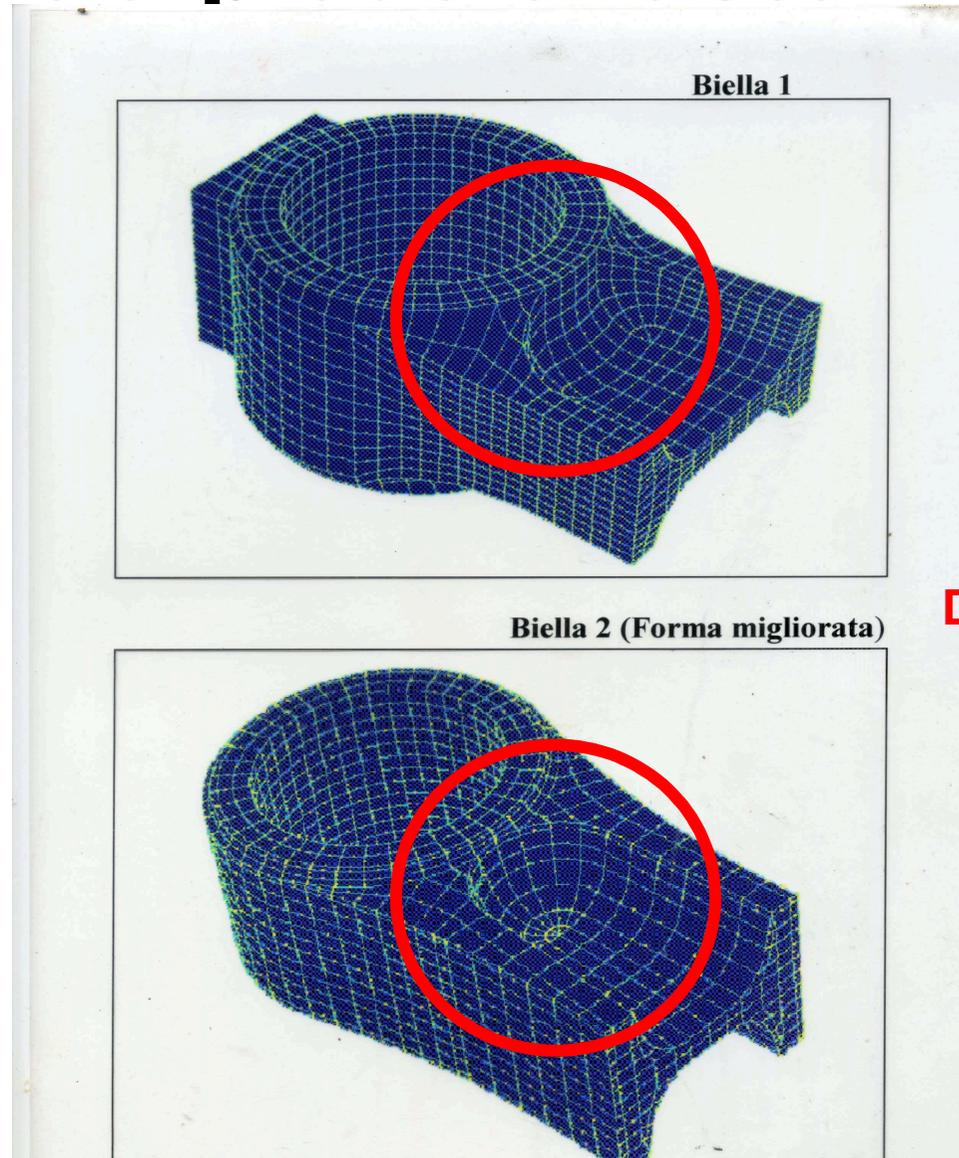
Rottura al passaggio tra piede e fusto



Rottura al passaggio tra piede e fusto



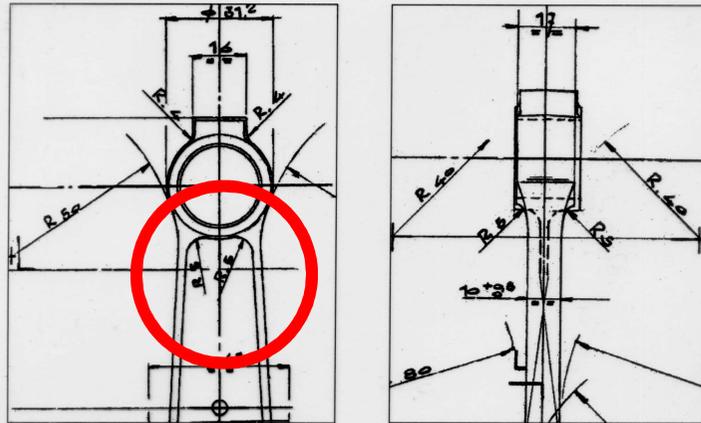
Piede di biella Maserati: passaggio tra piede e fusto



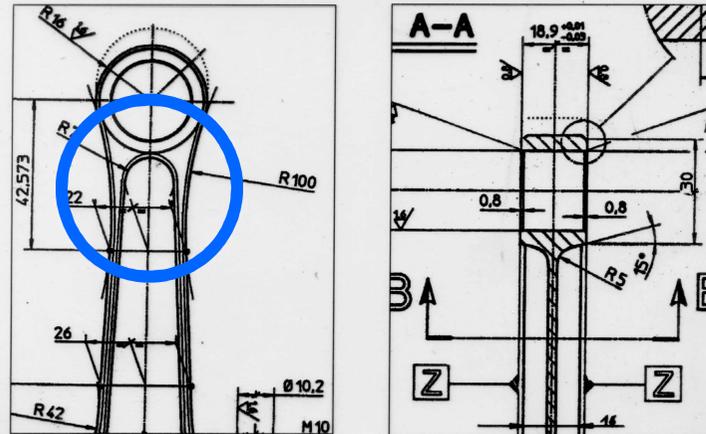
Due diverse tasche

Piede di biella Maserati

Biella 1



Biella 2 (forma migliorata)



Due diverse tasche

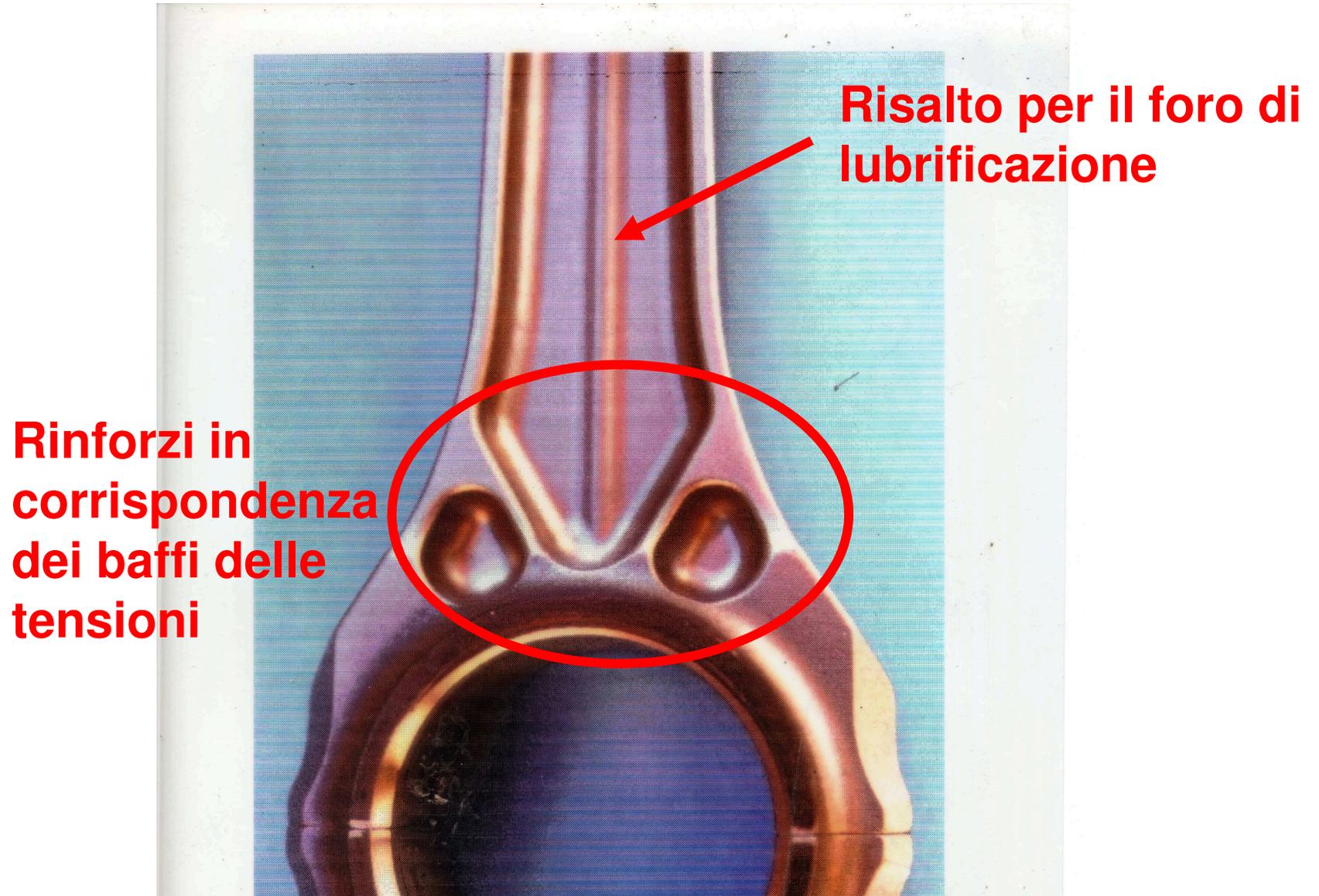
Biella Bugatti



Punto morto superiore in fase di combustione

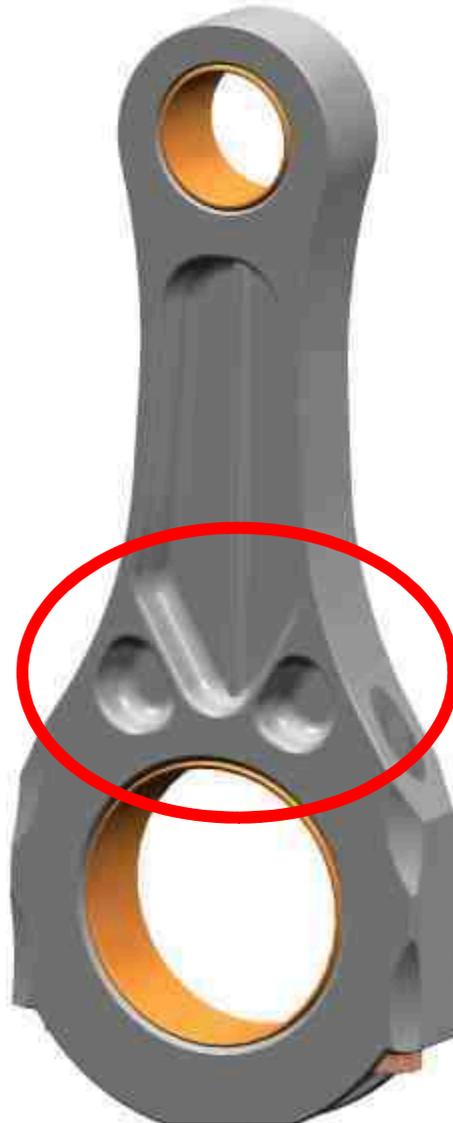
Il piede è scarico, e le tensioni passano direttamente nel fusto

Biella Ferrari F1, periodo Schumacher



Biella Ferrari, periodo Schumacher

**Rinforzi in
corrispondenza
dei baffi delle
tensioni**



Biella Husqvarna (Pankl, Austria)

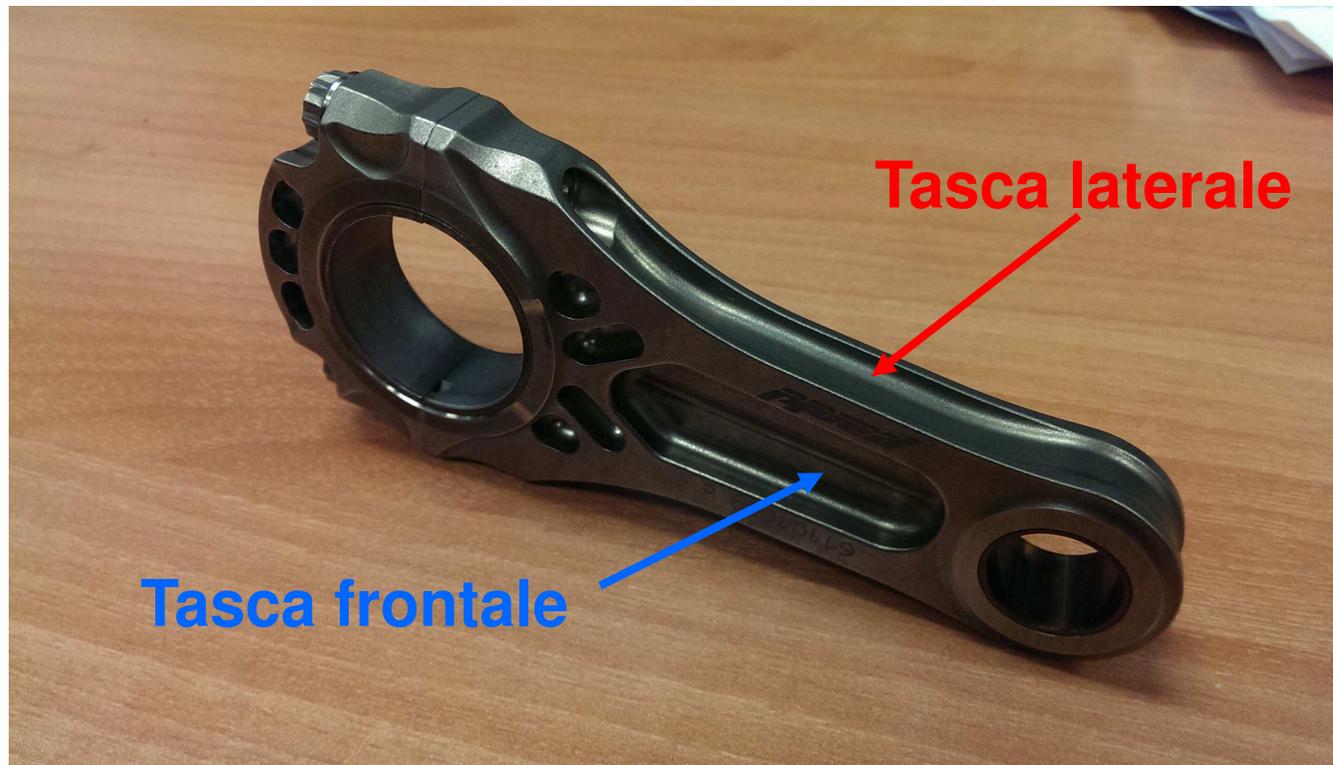


**Molto simile alla
odierna biella Ferrari F1**

**Doppi rinforzi in
corrispondenza
dei baffi delle
tensioni**

Biella Husqvarna (Pankl, Austria)

Due tasche, una laterale ed una frontale.
Ricorda soluzioni aeronautiche di bielle
con fusto ad X.

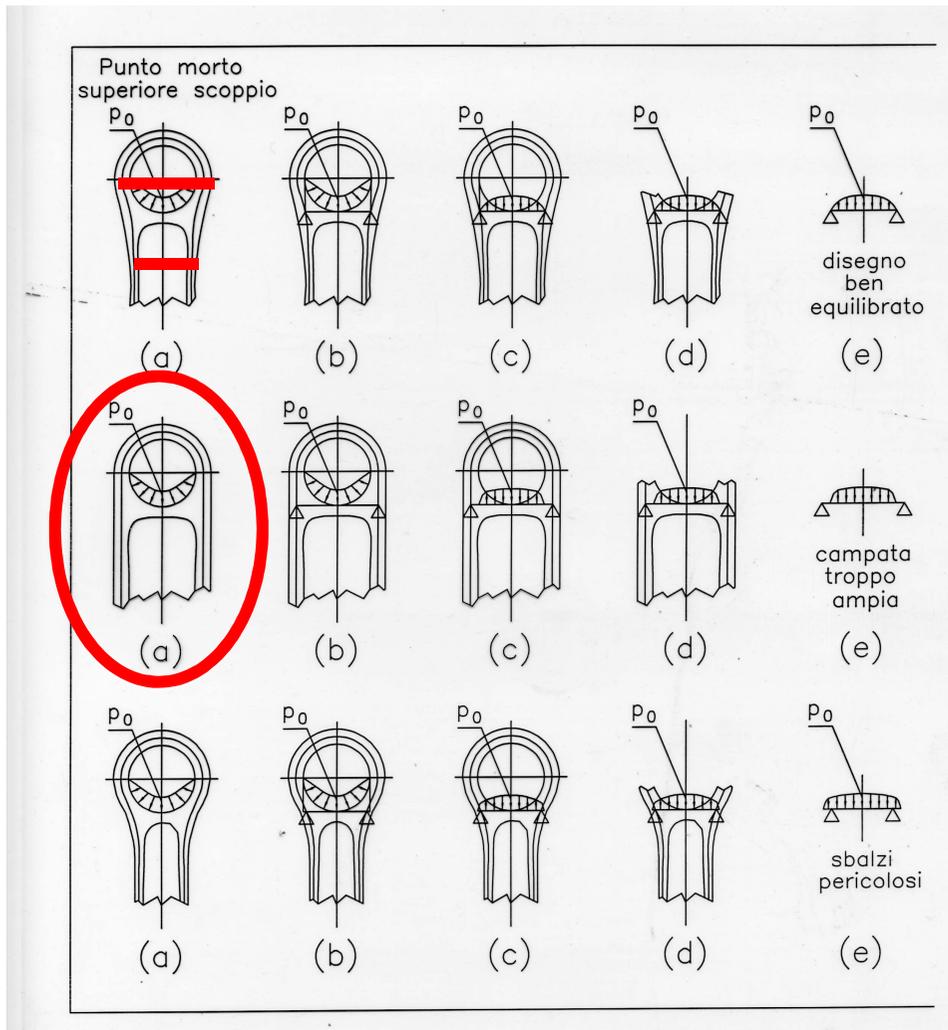


Biella Husqvarna (Pankl, Austria)

Alleggerimenti cappello

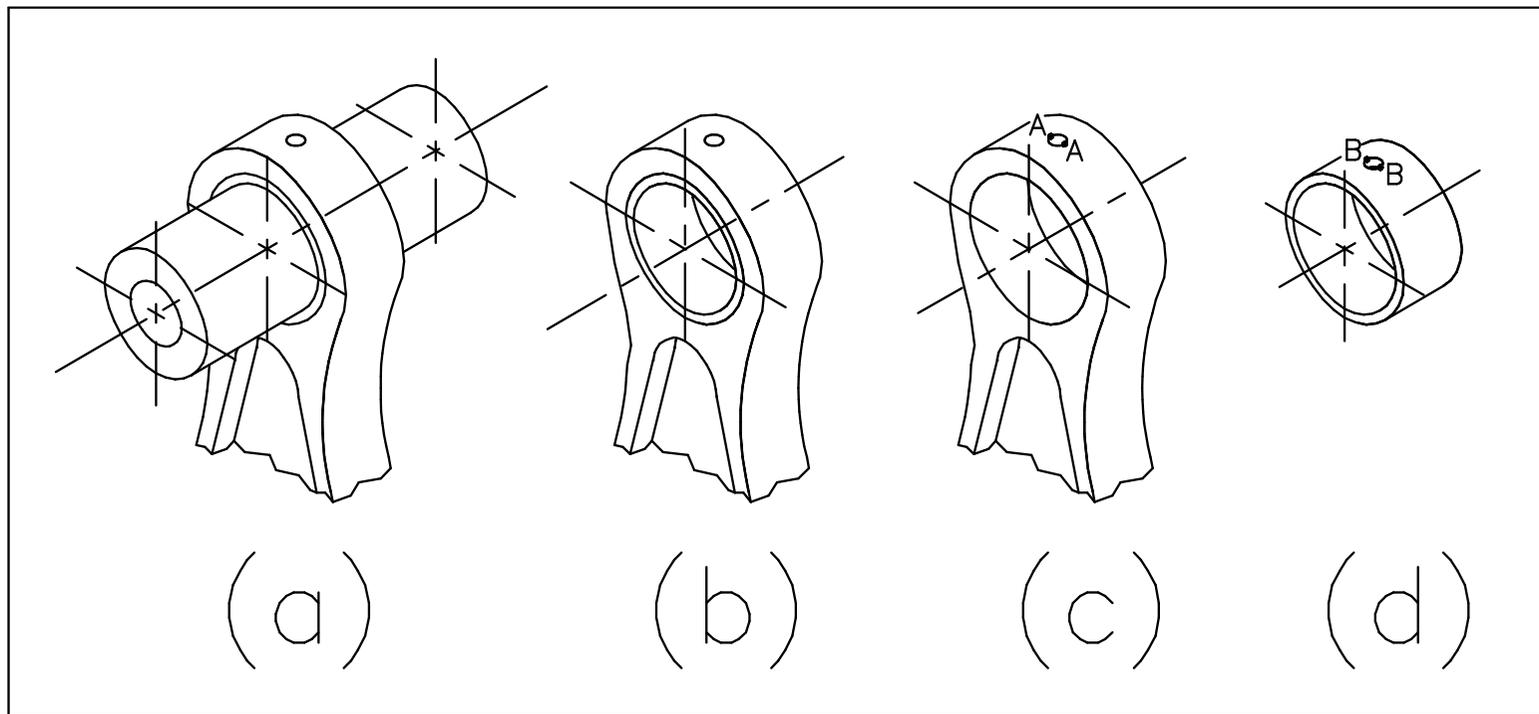


Esiste un rapporto ideale tra diametro esterno del piede e larghezza del fusto,
 $\cong 3/2$ o $4/3$

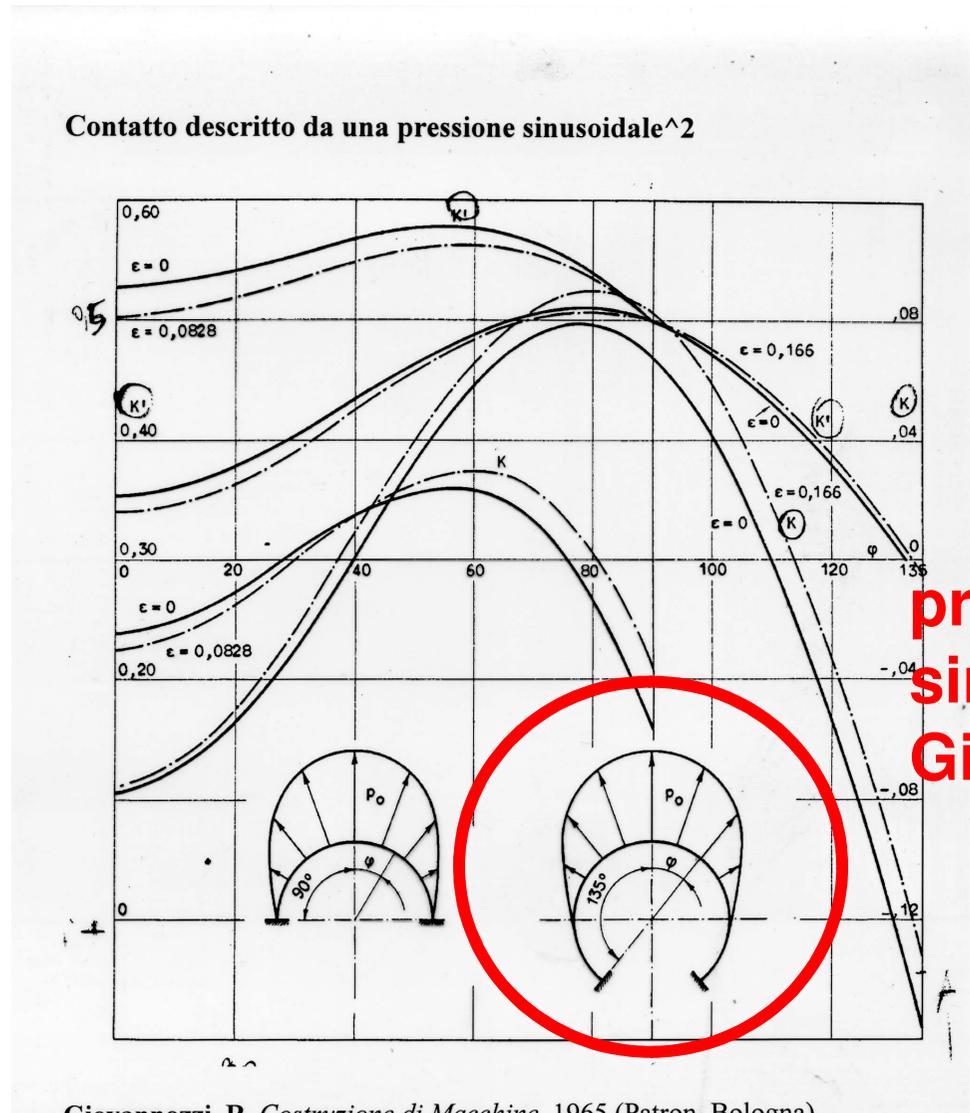


I fianchi del fusto tangenti al piede sono una cattiva soluzione

La bronzina è assimilabile ad un tubo; in un tubo, le tensioni sono sempre massime al bordo interno; se l'interferenza con la quale è montata la bronzina è troppo alta, la bronzina si snerva a partire dal **bordo interno**, anche se è caricata dal forzamento al bordo esterno



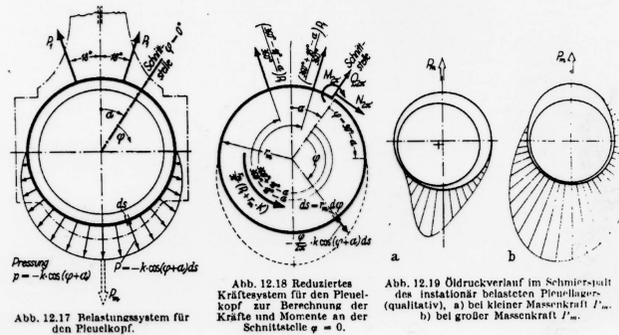
Bibliografia sulle formule per il calcolo del piede:1965



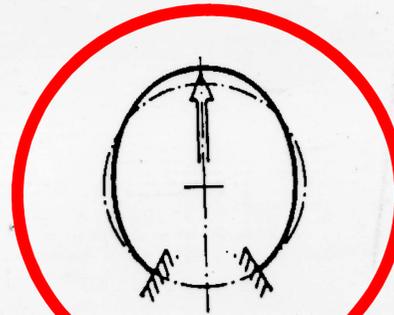
Bibliografia: 1966

ANALISI STORICA SULLA PRESSIONE DI CONTATTO TRA PIEDE DI BIELLA E SPINOTTO

Contatto descritto da forze concentrate o da una pressione sinusoidale



Schnittstellen. Wegen der Symmetrie der äußeren Kräfte zur Pleuelachse braucht nur der halbe Ringumfang $0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$ betrachtet zu werden. Man erhält als



**Carico concentrato,
cultura tedesca**

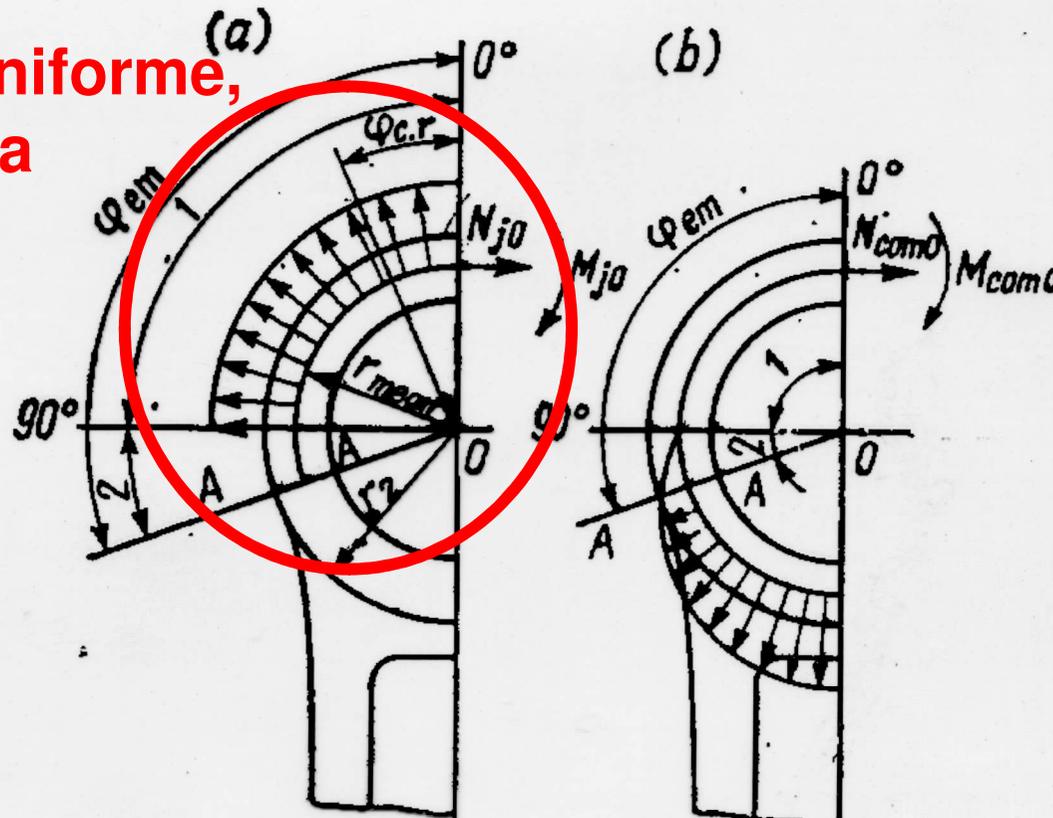
Abb. 12.26 Die Annahme einer Einzelkraft am Pleuelauge führt zu sehr großen Ovalverformungen, die nicht der Wirklichkeit entsprechen.

Lang, O.R. *Triebwerke schnelllaufender Verbrennungsmotoren*, 1966 (Springer-Verlag, Berlin).

Bibliografia: 1984

Contatto descritto da una pressione uniforme

pressione uniforme,
cultura russa

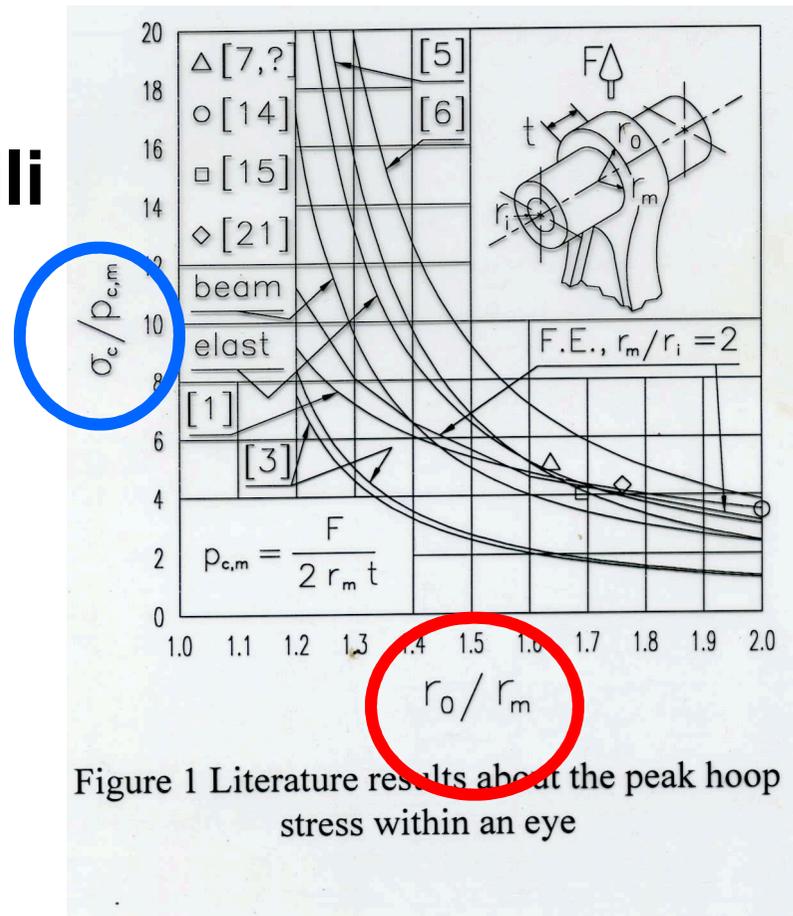


Kolkin, A. and Demidov, V. *Design of Automotive Engines*, 1984 (MIR, Moscow).

Bibliografia sulle formule per il calcolo del piede di biella

Grossa dispersione dei risultati disponibili

Tensione nel piede, normalizzata



Rapporto tra raggio esterno ed interno del piede di biella

Bibliografia sulle formule per il piede di biella

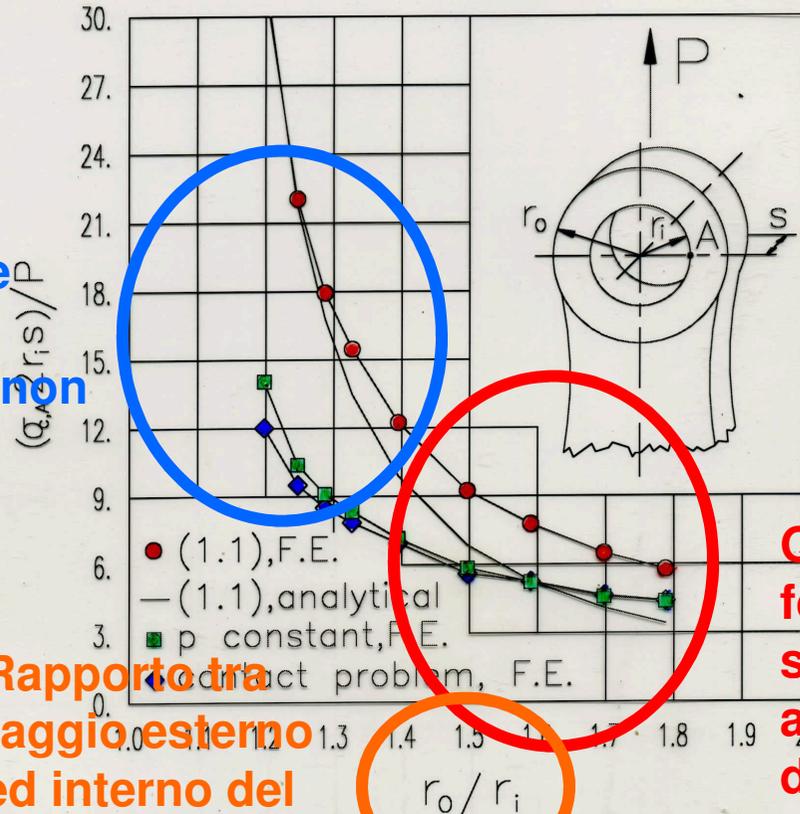
De Pona, Strozzi, Vaccari

Formule selezionate

Due tempi: le formule semplificate non vanno bene

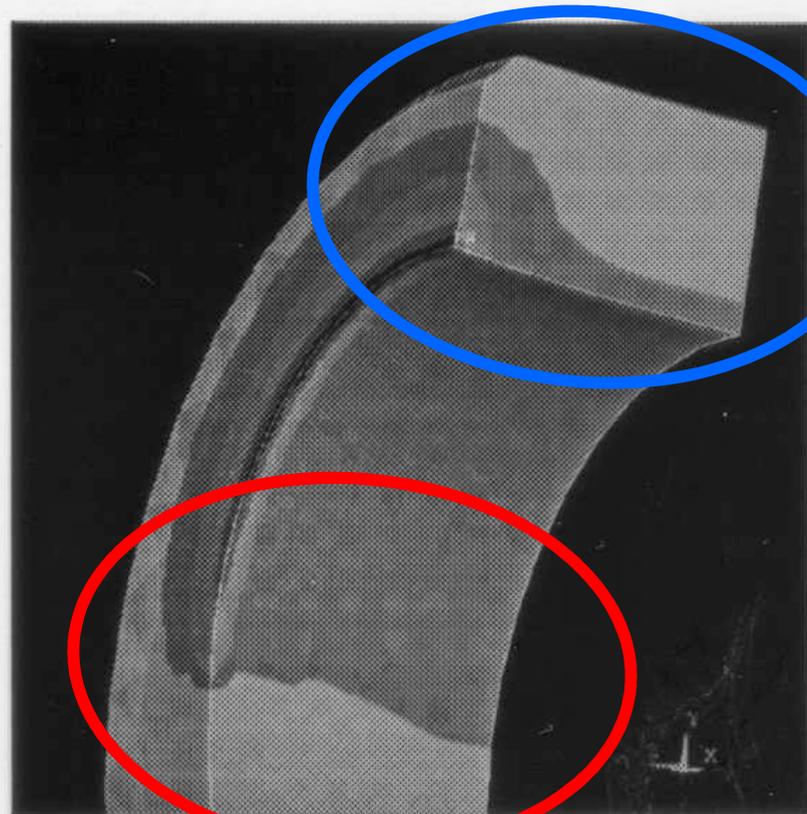
Rapporto tra raggio esterno ed interno del piede di biella

Four plane models for the evaluation of the peak stress (point A) in the small end of a conrod



Quattro tempi: le formule semplificate sono accettabili, ed ancora usate per un dimensionamento iniziale

Il piede di biella può essere modellato come problema **piano** o deve essere modellato come problema **tridimensionale** ?



Parte superiore
del piede:
tensioni
tridimensionali

Fianco del foro:
tensioni
costanti
assialmente:
modello piano
accettabile

Figure 6

Siccome le tensioni massime cadono al fianco del foro, un modello piano è accettabile

Diagrammi che forniscono le tensioni nel piede tenendo conto del **gioco iniziale** tra spinotto e piede

Coefficiente che
tien conto del
gioco tra spinotto
e piede

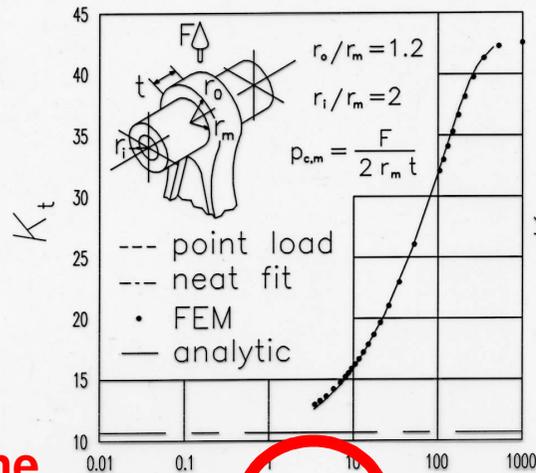


Figure 3

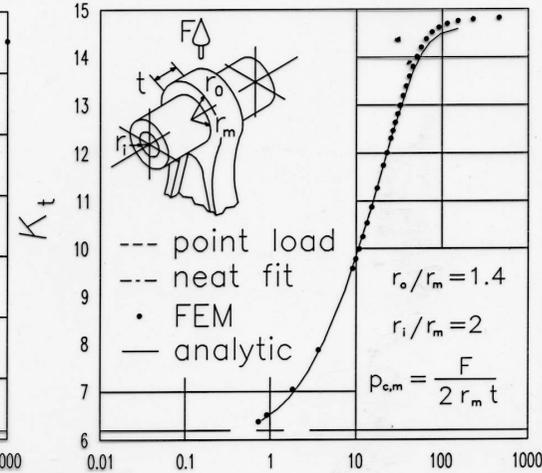
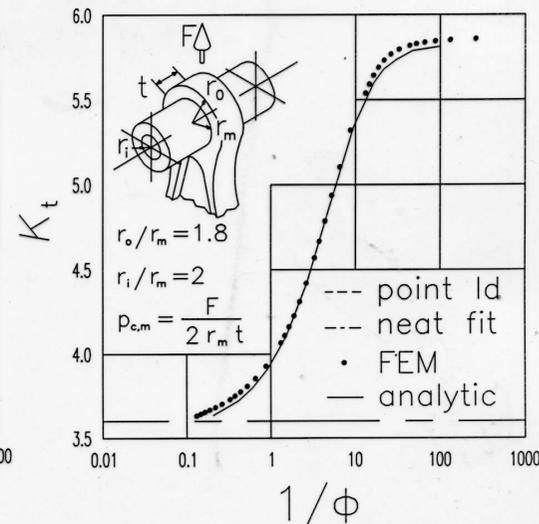
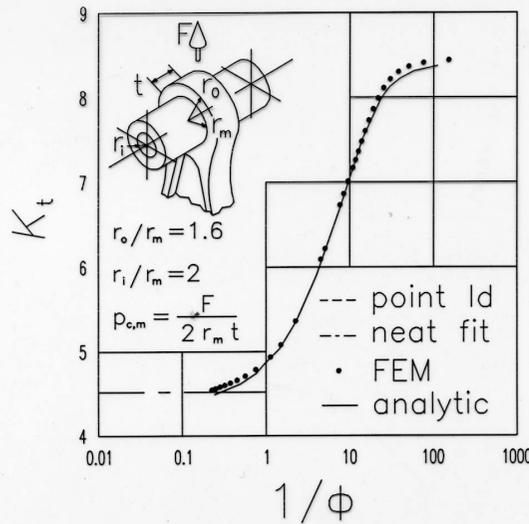
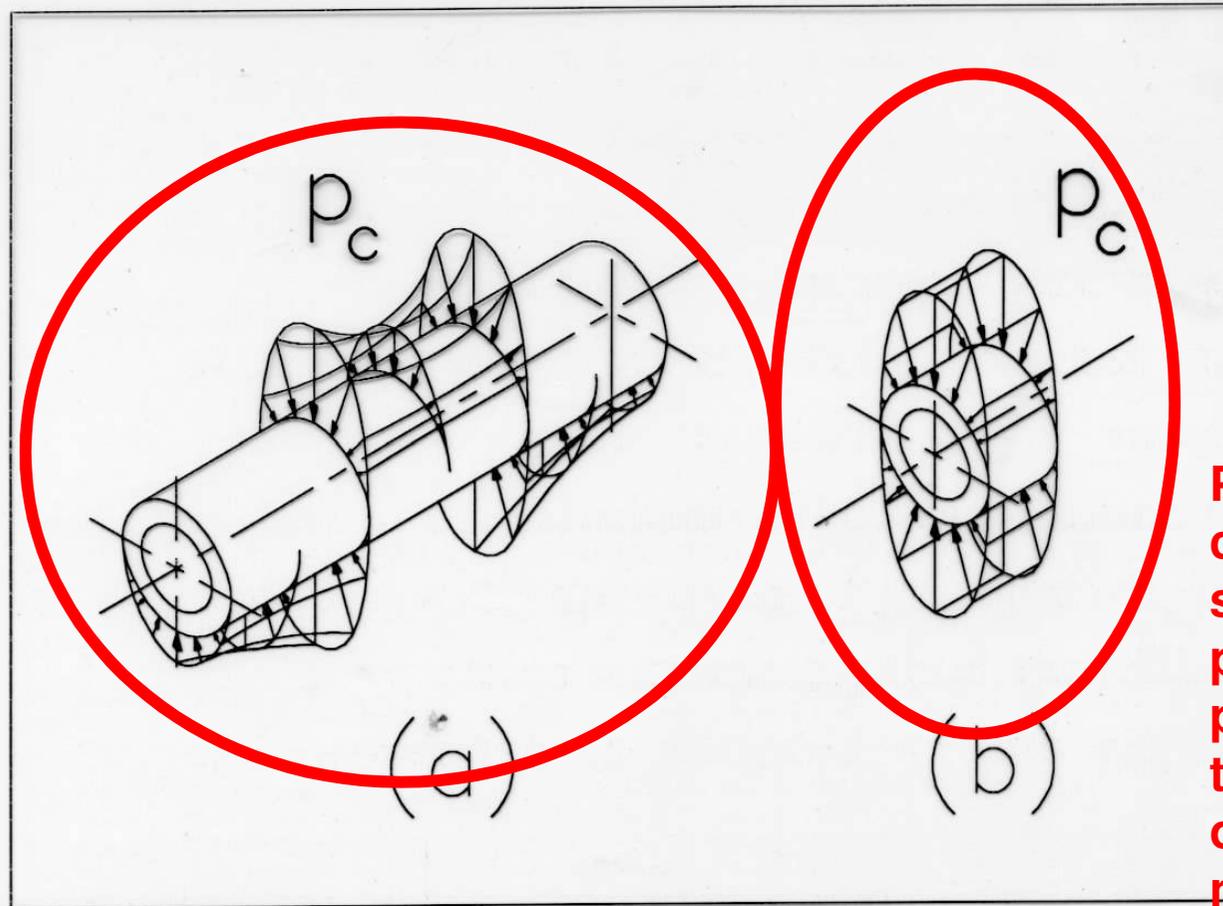


Figure 4



Pressione di contatto tra spinotto e piede

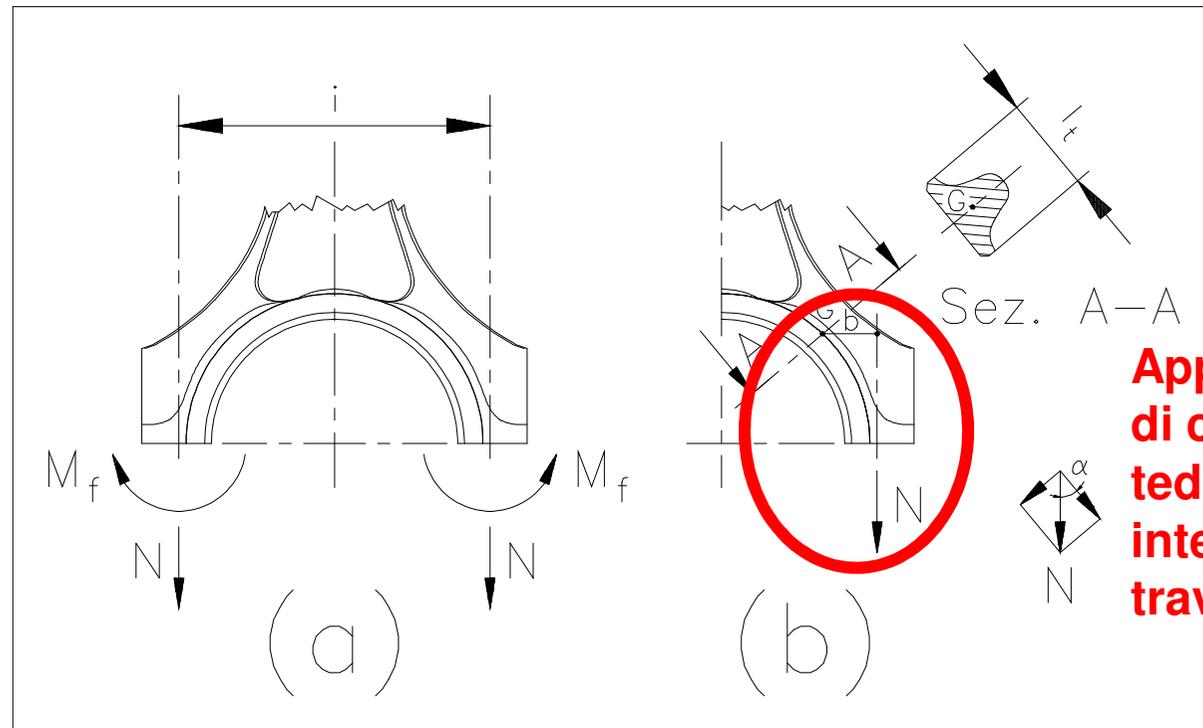
Pressione di contatto tra spinotto, piede, e portate dei pistono



Pressione di contatto tra spinotto e piede, adottata per studiare le tensioni ovalizzanti nello spinotto

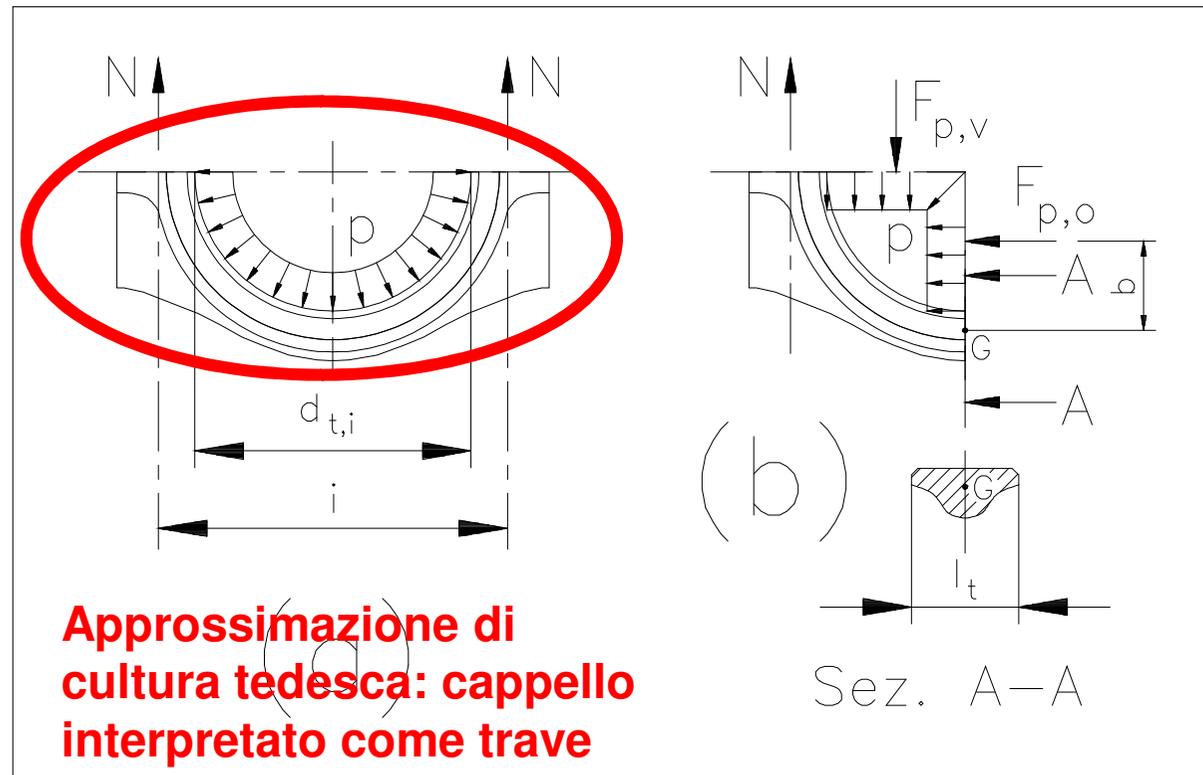
Figure 3 The plane modelling

Calcolo della testa: zona della testa adiacente al fusto



**Approssimazioni
di cultura
tedesca: zona
interpretata come
trave**

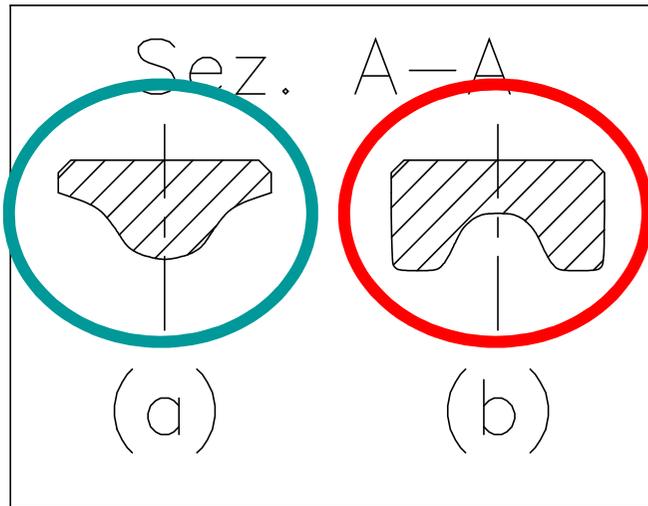
Calcolo cappello



L'approssimazione tedesca è troppo sbagliata, per cui il cappello viene dimensionato per similitudine

Tra le formule semplificate di calcolo della biella, quelle per il calcolo del cappello sono le uniche inaccurate.

Nervature del cappello



Spianatura:
causa effetto
intaglio



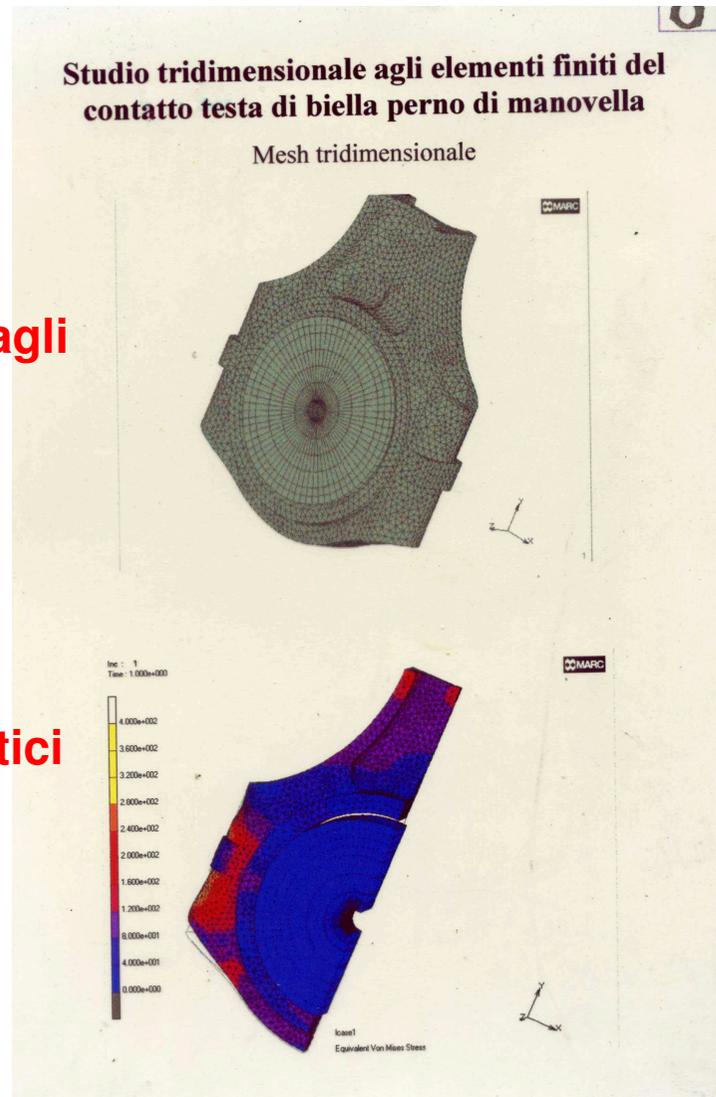
Vite mordente:
elimina l'effetto
intaglio della
spianatura



Testa di biella: i calcoli più affidabili sono agli Elementi Finiti

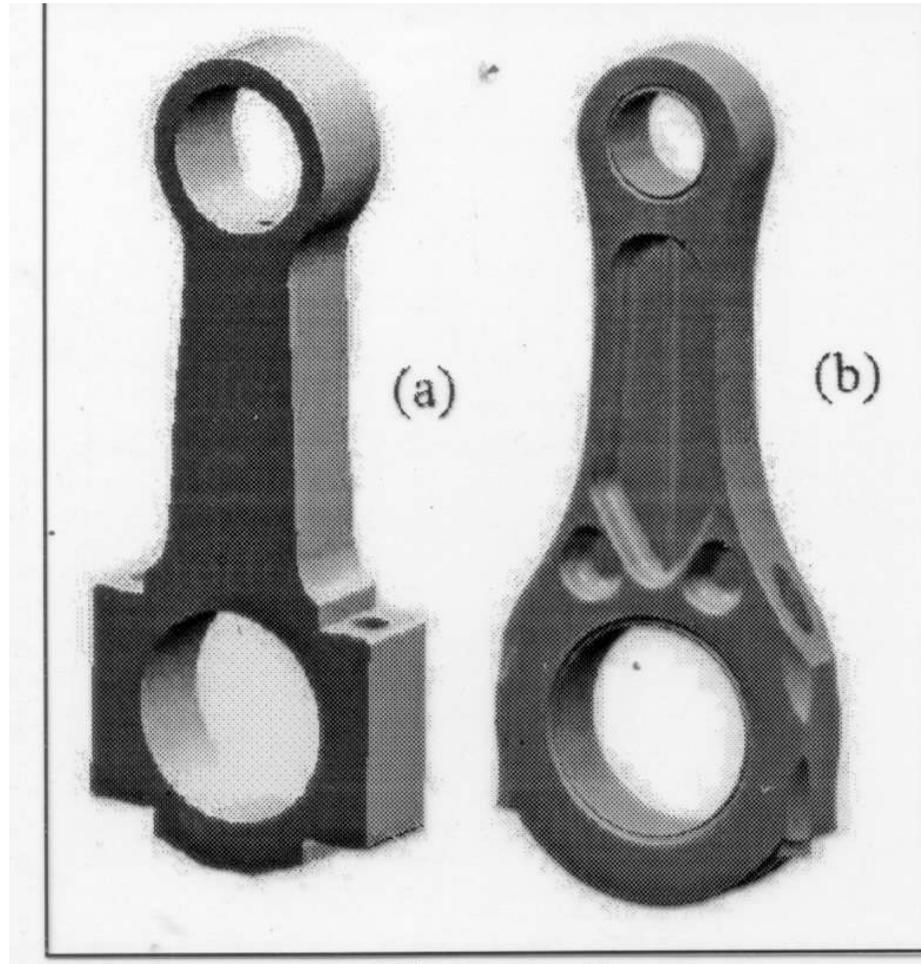
Modello tridimensionale agli Elementi Finiti

Nel calcolo della testa (cappello), i modelli analitici sono insufficienti



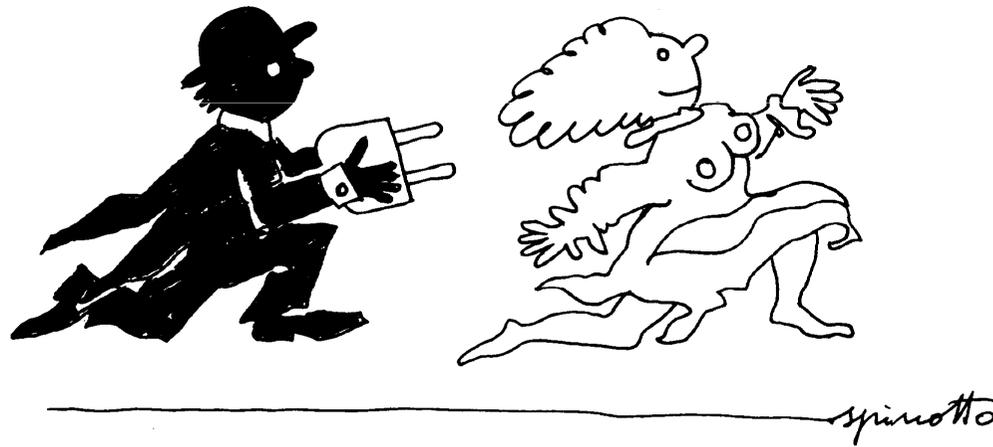
La biella più bella e la biella più brutta

**Compressore
metano
per auto**

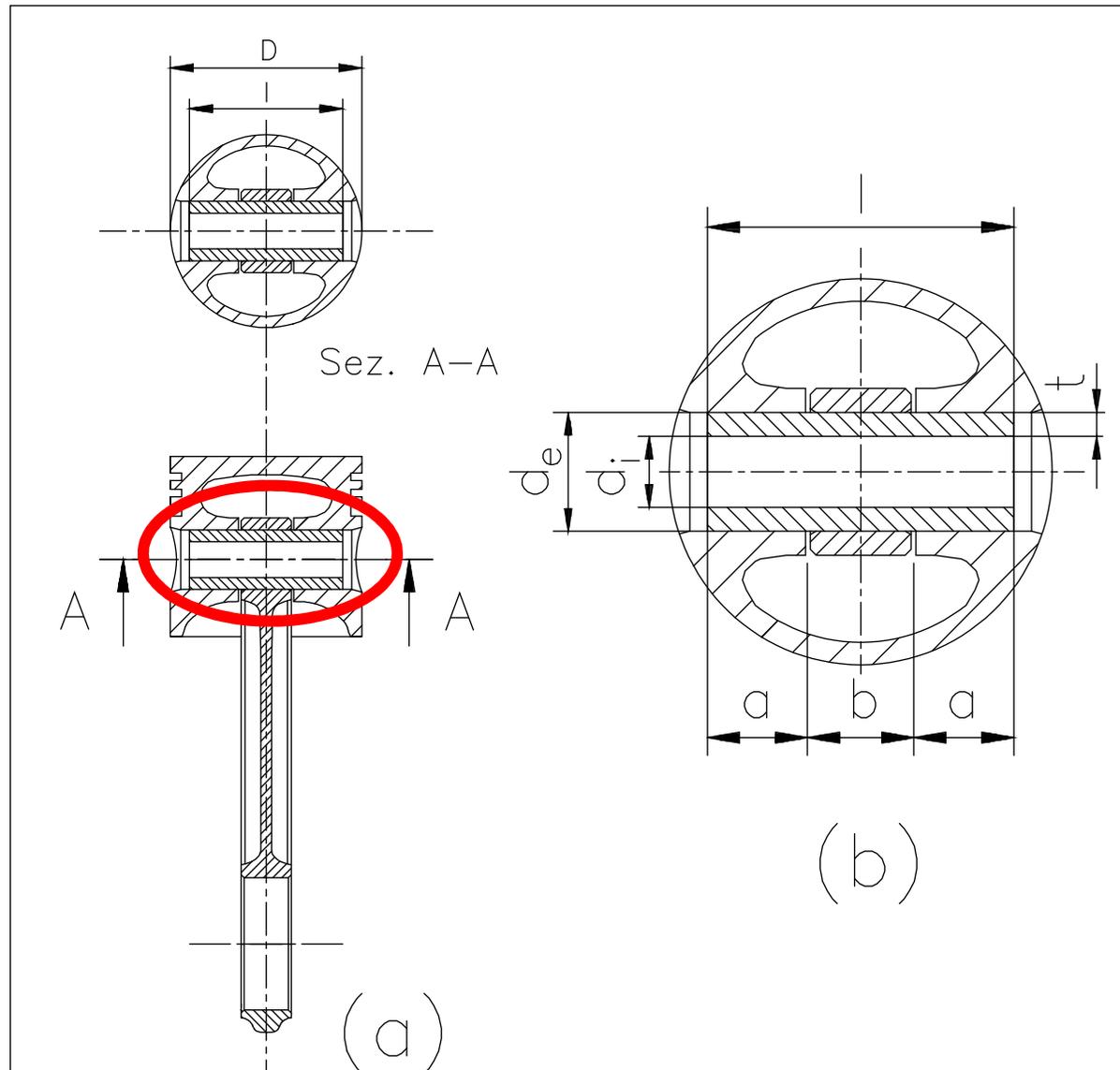


**Ferrari F1, periodo
Schumacher**

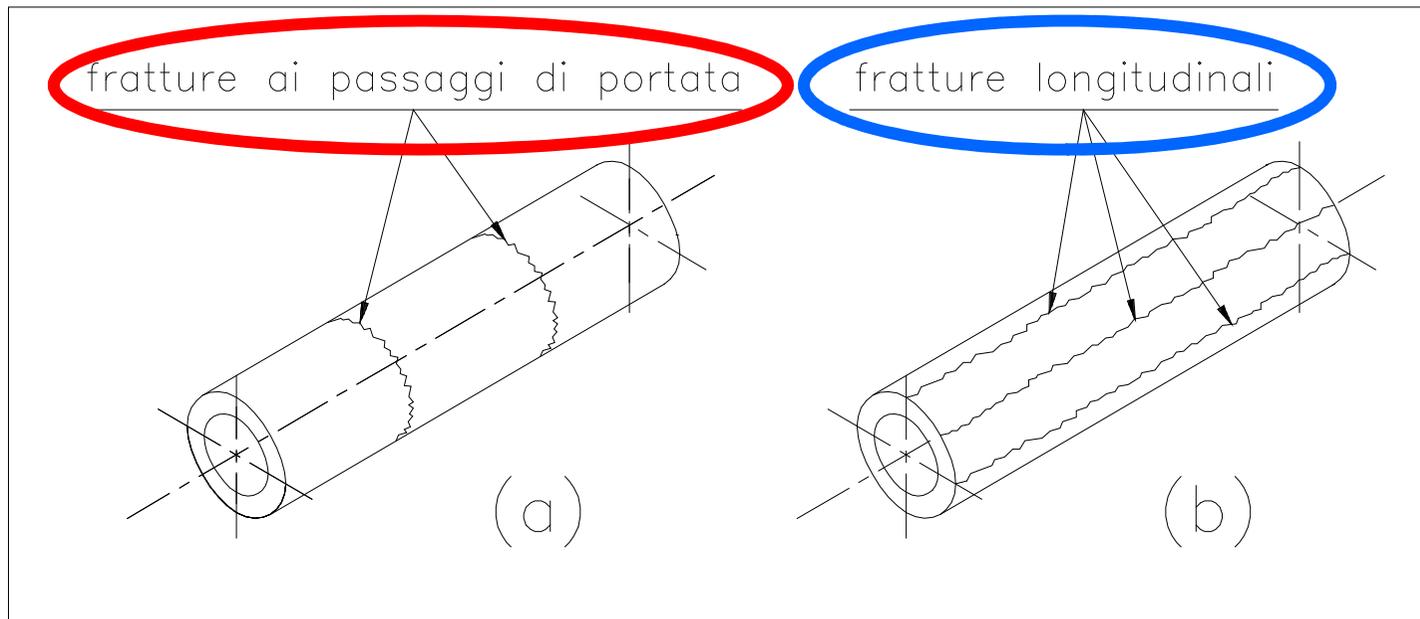
Calcolo dello spinotto



Lo spinotto realizza lo snodo cilindrico tra biella e pistone



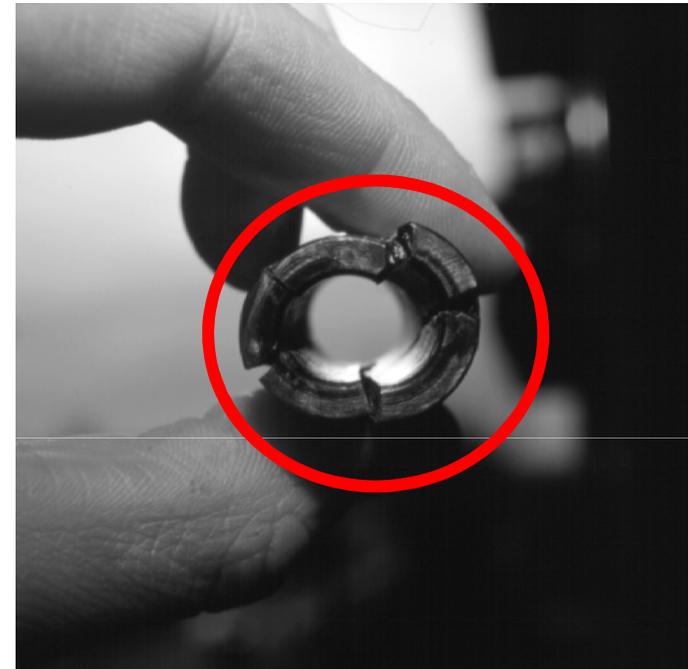
Classiche **fratture** dello spinotto



Classiche fratture dello spinotto



Frattura al passaggio di portata



Fratture longitudinali

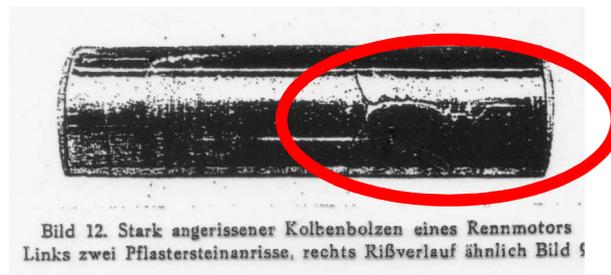
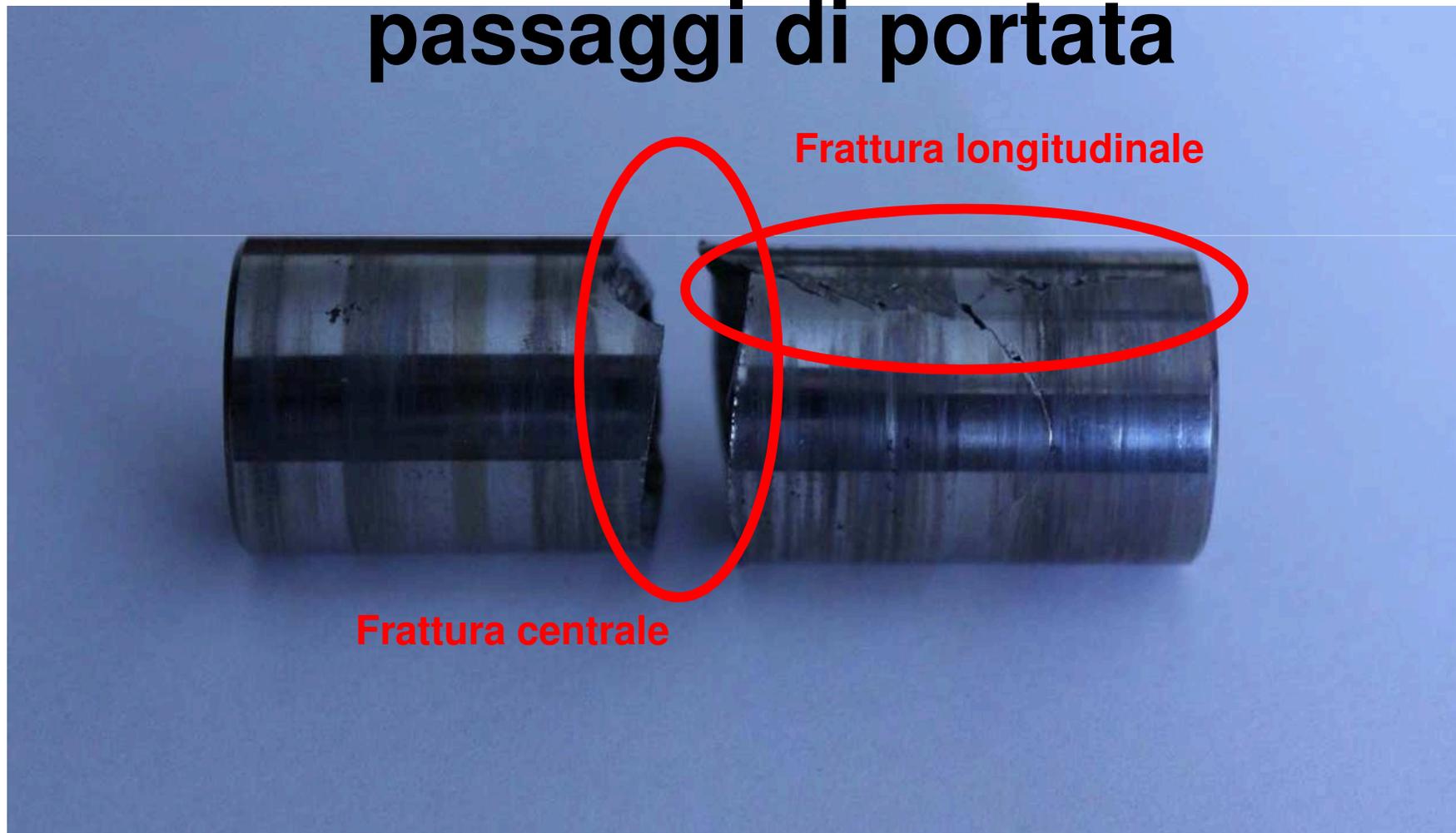


Bild 12. Stark angerissener Kolbenbolzen eines Rennmotors
Links zwei Pflastersteinanrisse, rechts Rißverlauf ähnlich Bild 9



Questa frattura è parzialmente anomala, perché lo spinotto si è fratturato in mezzzeria, e non ai passaggi di portata



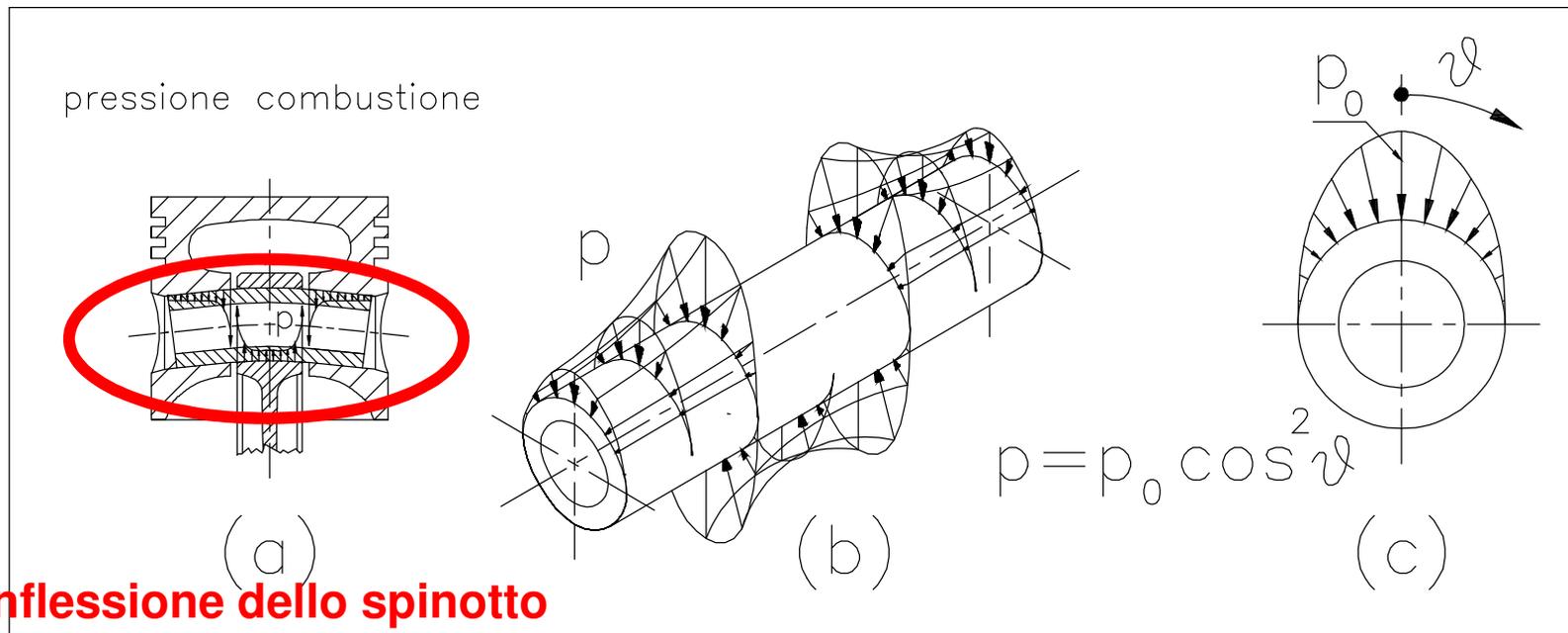
Frattura longitudinale a fatica dello spinotto



Frattura dello spinotto in mezzzeria



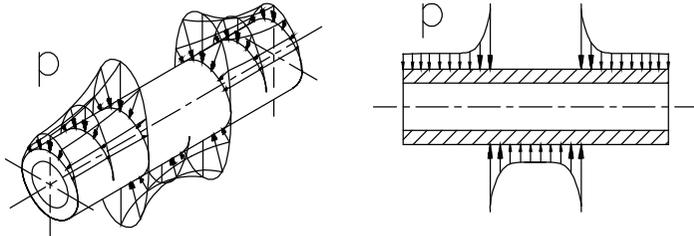
Pressione di contatto tra spinotto, portate del pistone, e piede di biella, al punto morto superiore in fase di combustione



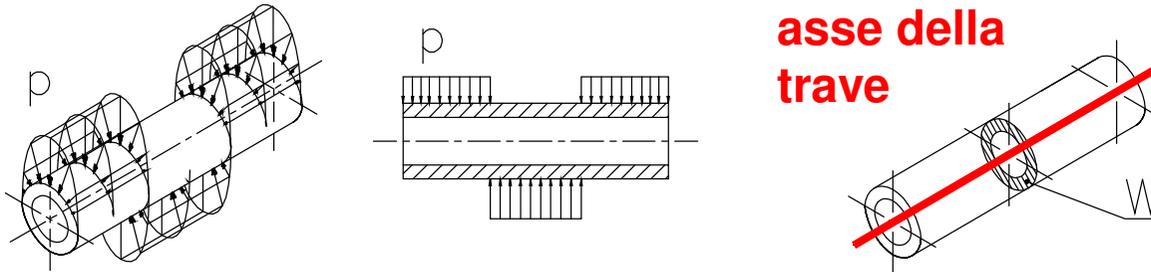
**Inflessione dello spinotto
(punto morto superiore
in fase di combustione)**

Schemi di **calcolo dello spinotto**

(a) distribuzione teorica della pressione di contatto



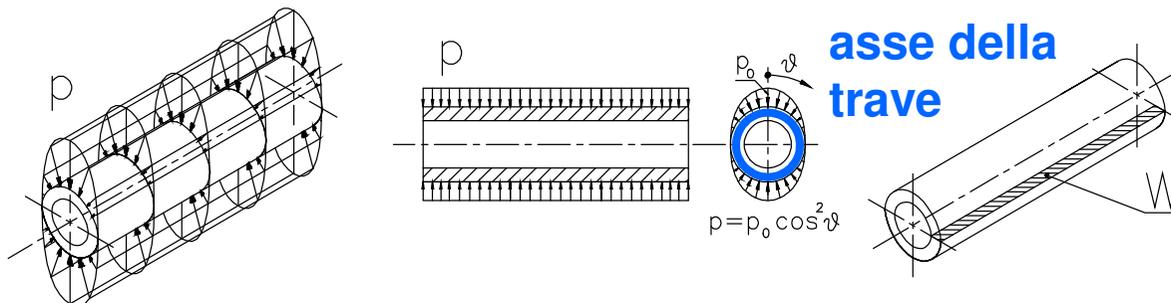
(b) idealizzazione della pressione per il calcolo di σ_g



**asse della
trave**

**Inflessione
dello spinotto.
Tensioni
flessionali
(globali)**

(c) idealizzazione della pressione per il calcolo di σ_o

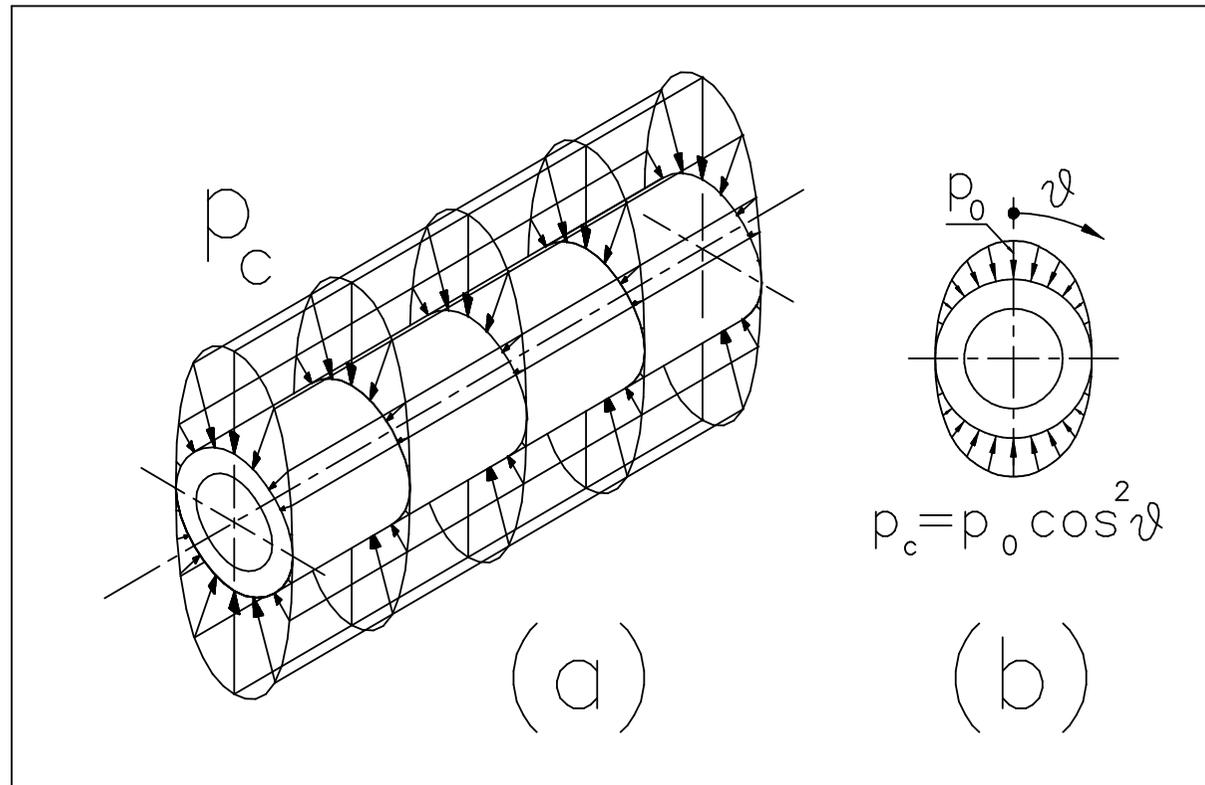


**asse della
trave**

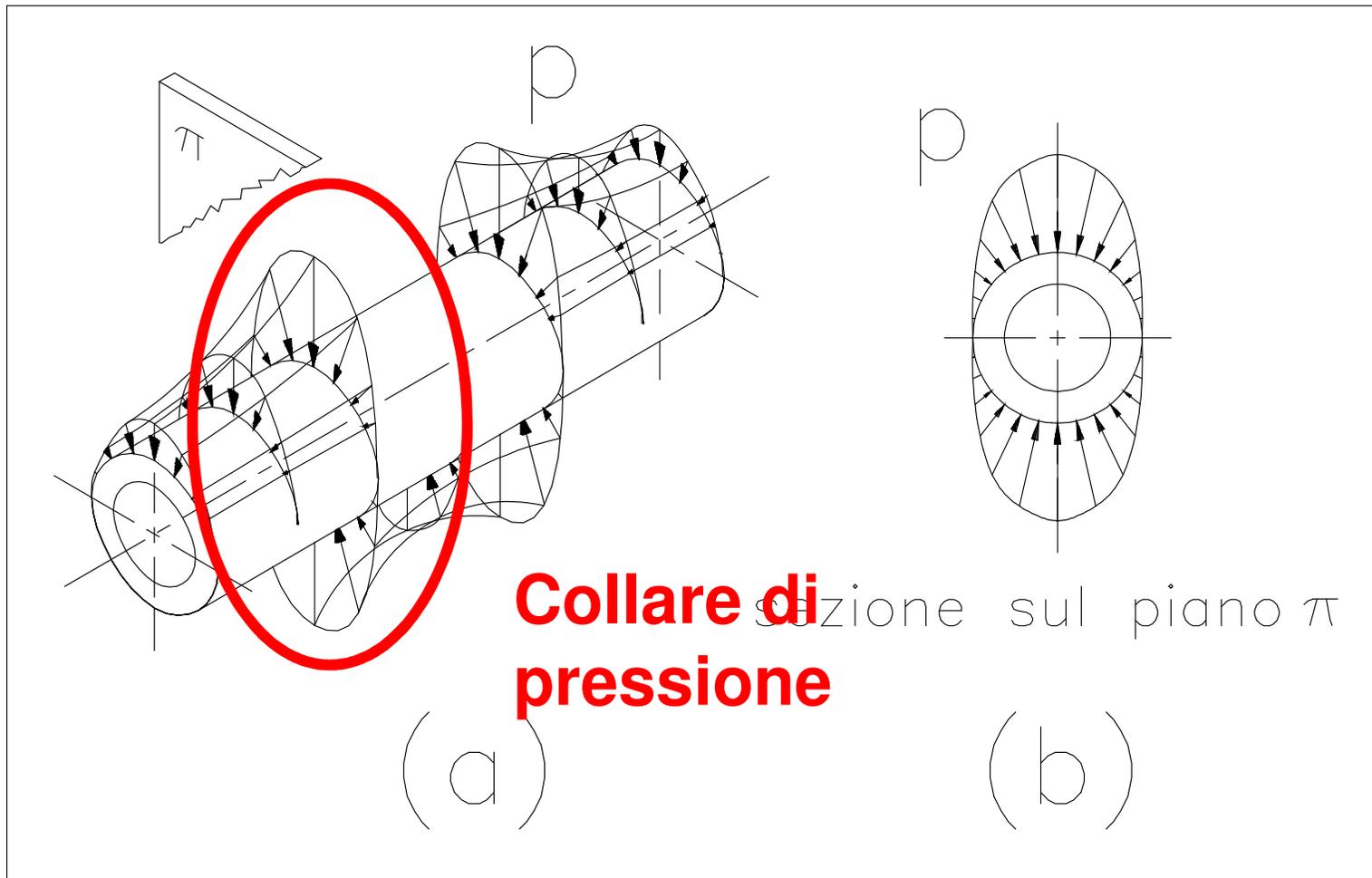
$$p = p_0 \cos^2 \varphi$$

**Ovalizzazione
dello spinotto.
Tensioni
ovalizzanti**

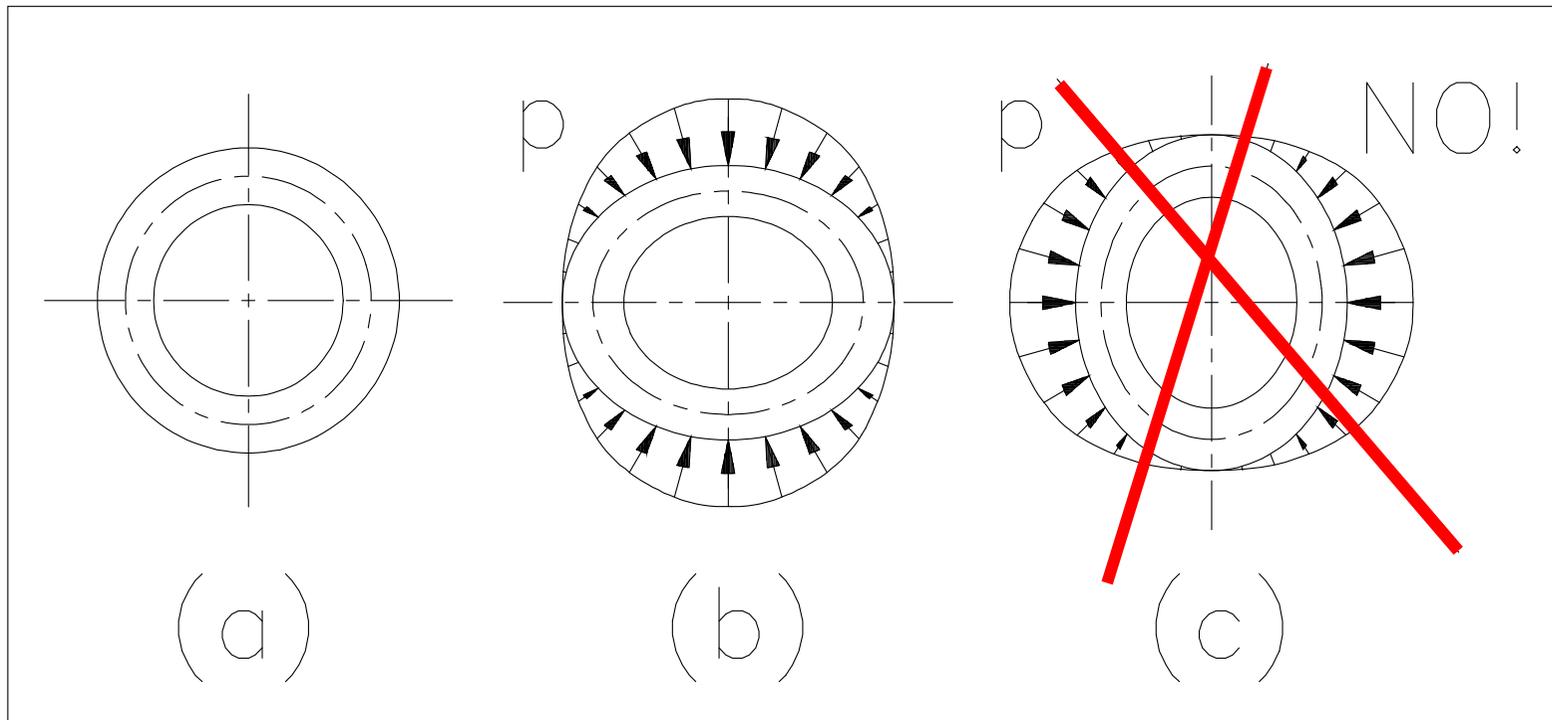
Ovalizzazione dello spinotto: la pressione viene spalmata lungo l'intero spinotto, per ottenere una formula di calcolo semplice (modello piano)

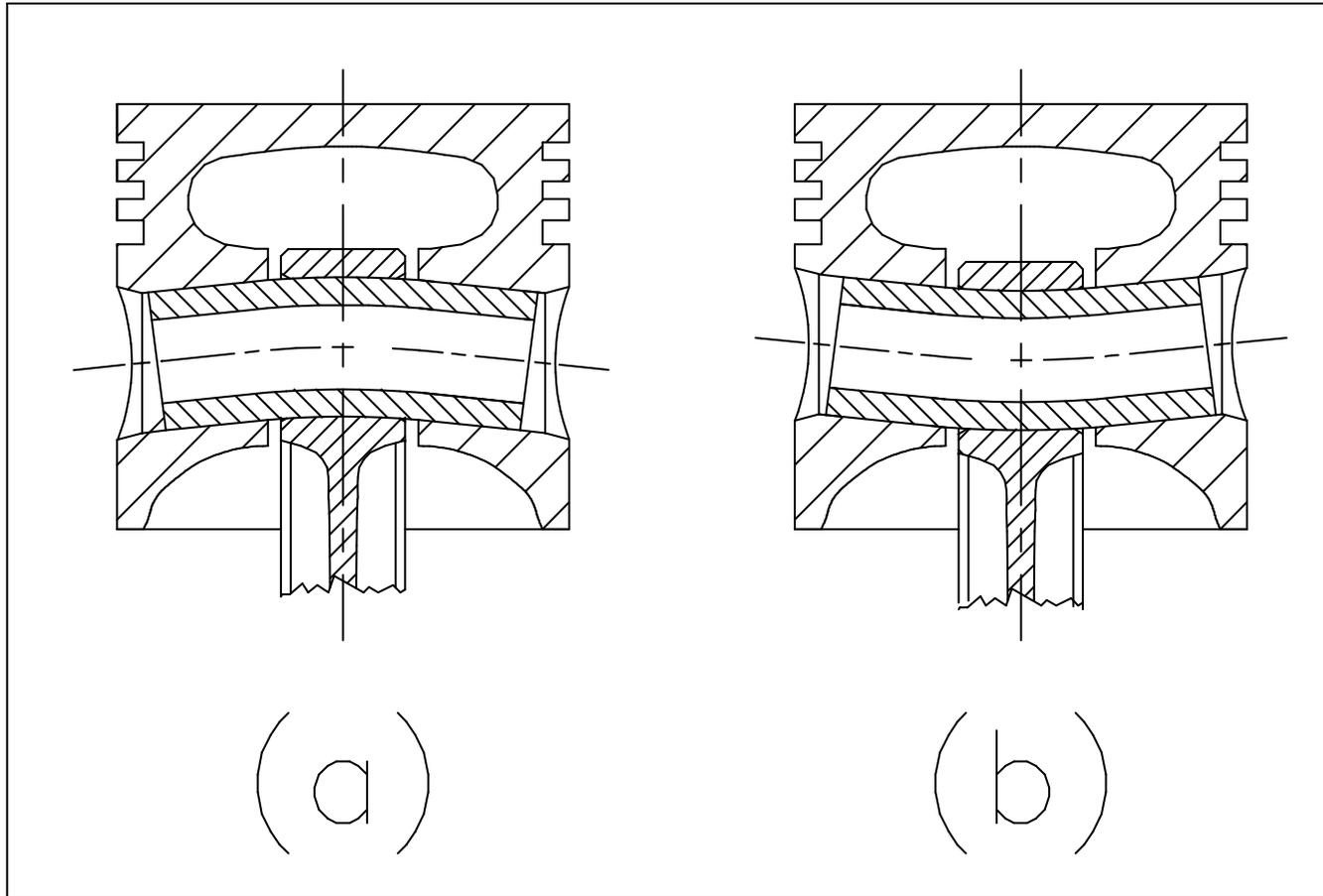


Le tensioni ovalizzanti al passaggio di portata sono maggiori di quelle fornite dalla formula approssimata



Lo spinotto si ovalizza all'origine e non all'inversione





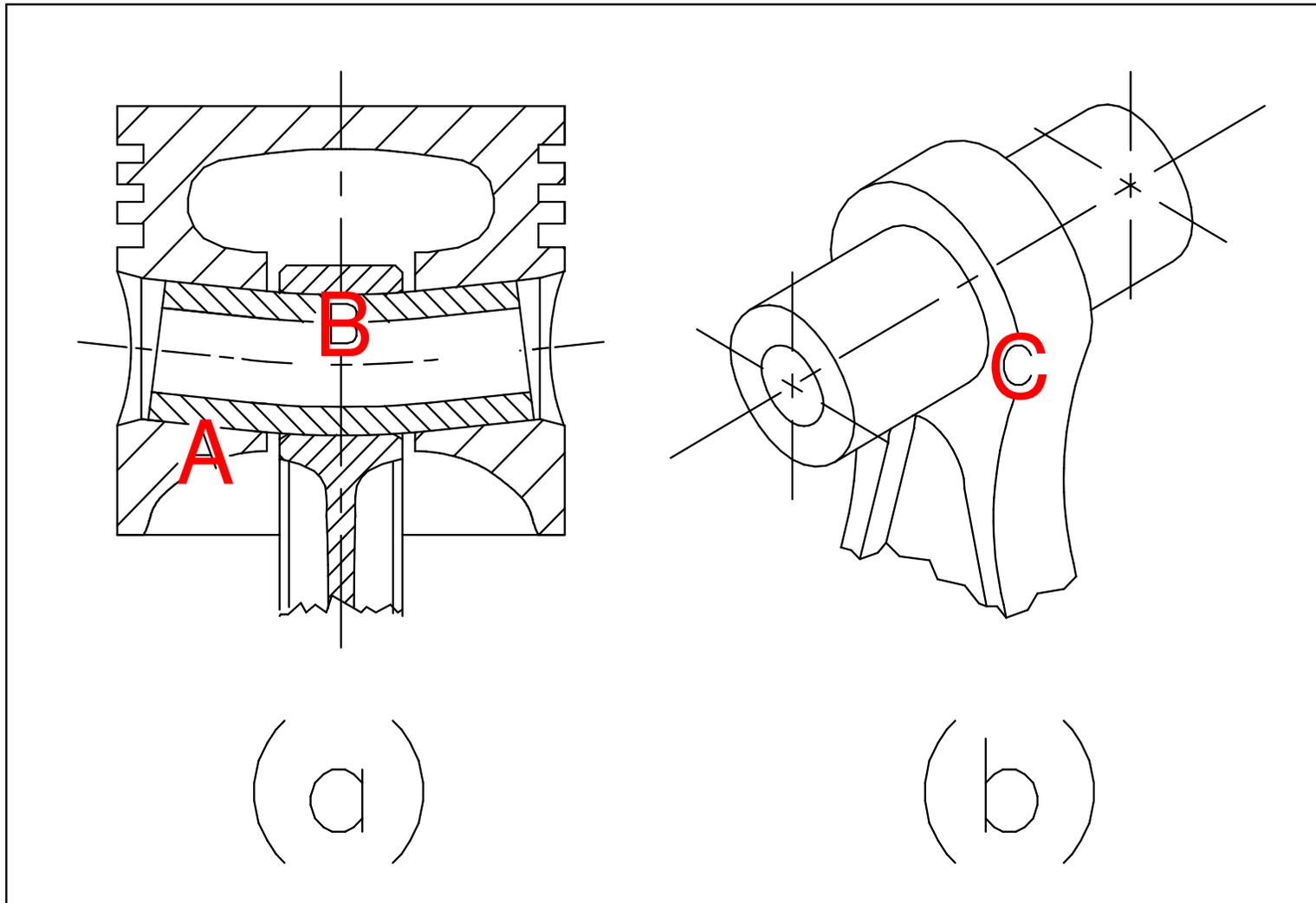
**Inflessione
dello spinotto al punto morto
superiore in fase di
combustione**

**Inflessione
dello spinotto al punto morto
superiore in fase di **incrocio****

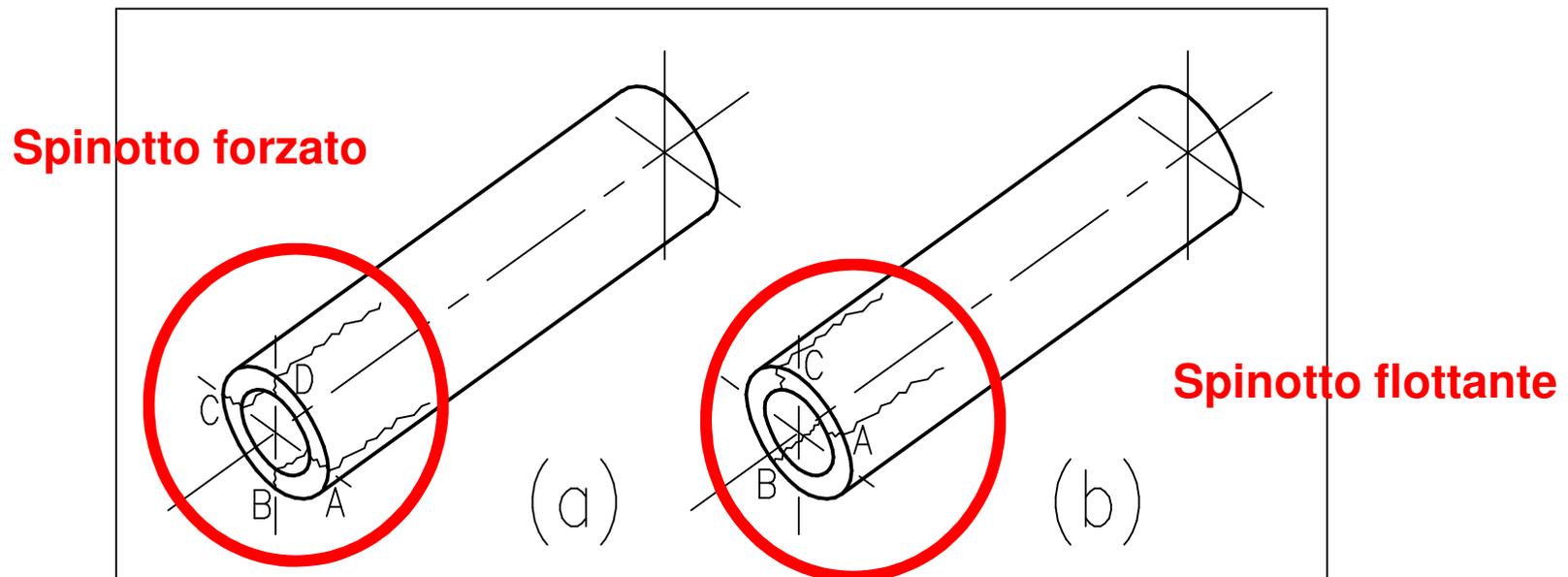
Lo spinotto si inflette all'inversione

Quali masse devo considerare per valutare le forze inerziali nei punti

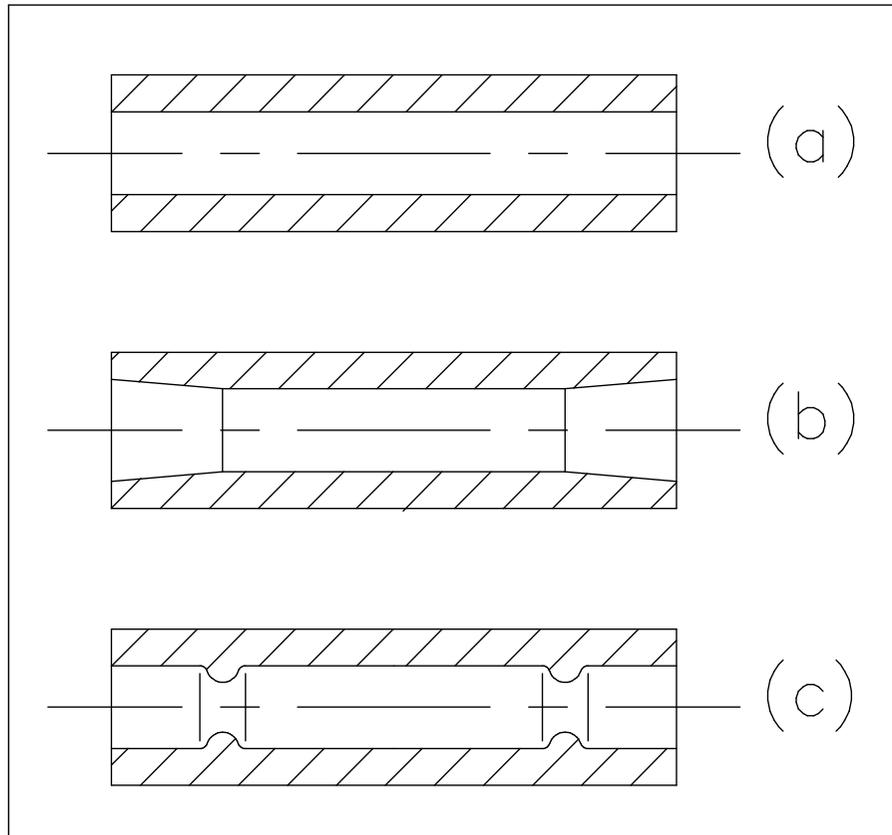
A, B, C?



Fratture longitudinali: se lo spinotto è forzato, sono 4 fratture angolarmente equidistanziate; se lo spinotto è flottante, non è detto che le fratture siano 4.



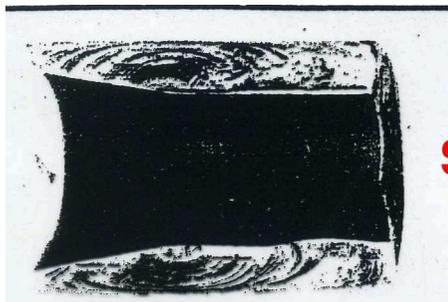
Alleggerimenti dello spinotto



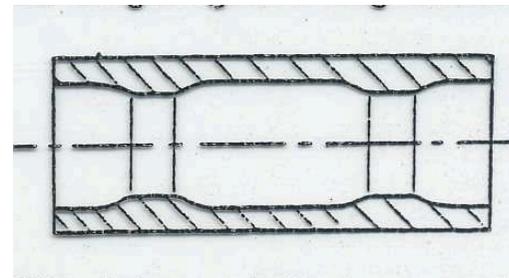
Spinotto usuale

Spinotto rastremato: si toglie materiale ai lati, dove il momento flettente cala

**Spinotto rinforzato ai passaggi di portata: si aggiunge materiale per aumentare la resistenza a taglio.
Non si conoscono applicazioni**



Spinotto rastremato



Spinotto rinforzato

Bibliografia scientifica 1968

A CONTRIBUTION TO THE STRESS ANALYSIS OF PISTON PINS

Fotoelasticista tedesco

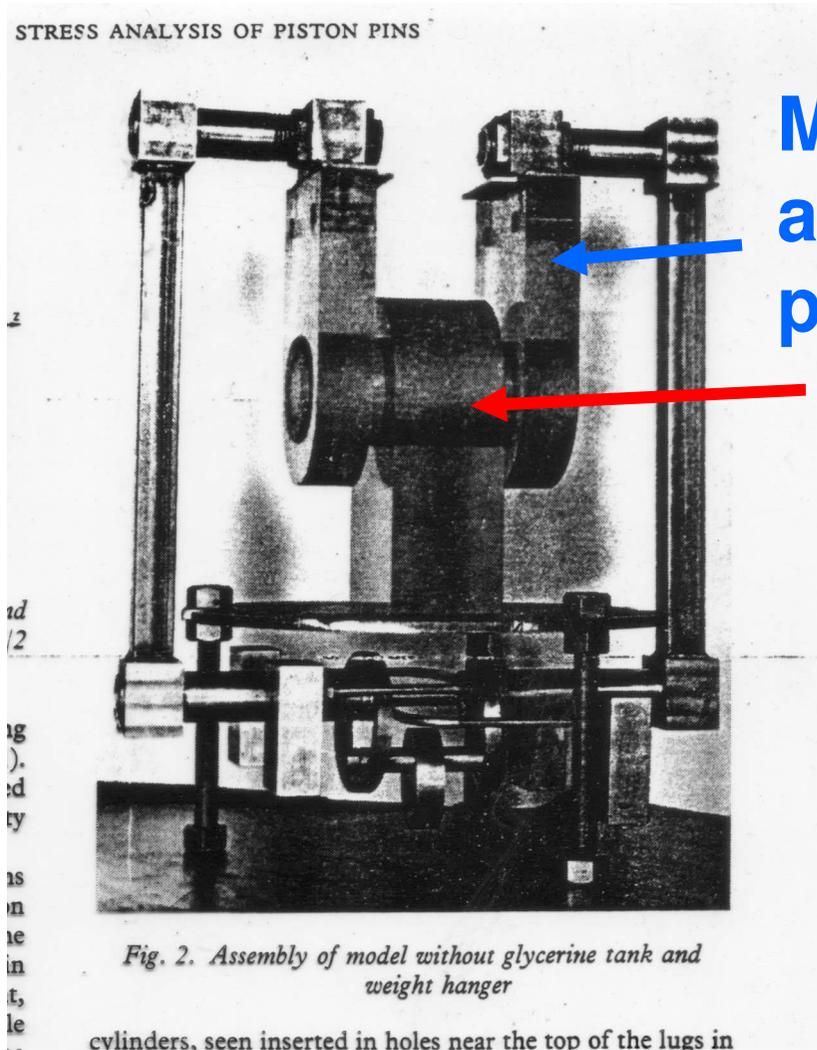
H. FESSLER *Department of Mechanical Engineering, University of Nottingham*

H. B. PADGHAM *Chrysler Corporation, Detroit, Michigan, U.S.A.*

The frozen stress photoelastic technique was used to study the stresses in hollow cylinders supported on a central lug and loaded through two outer lugs, simulating the loading of a piston pin by the connecting rod and piston. The loading was arranged so that the resultant piston thrust acted through the (exaggerated) gaps between the lugs.

In addition to the surface stresses in the bore and on the outer surface of the pins, the distributions of orthogonal shear stresses on four (circular) cross-sections of one pin were determined and integrated to give the load transfer from the central lug into the pin. The orthogonal shear distribution in the gap was compared with Love's theoretical solution for the shear stresses in a thick walled tube.

Modello fotoelastico



Modellazione
approssimata delle
portate del pistone

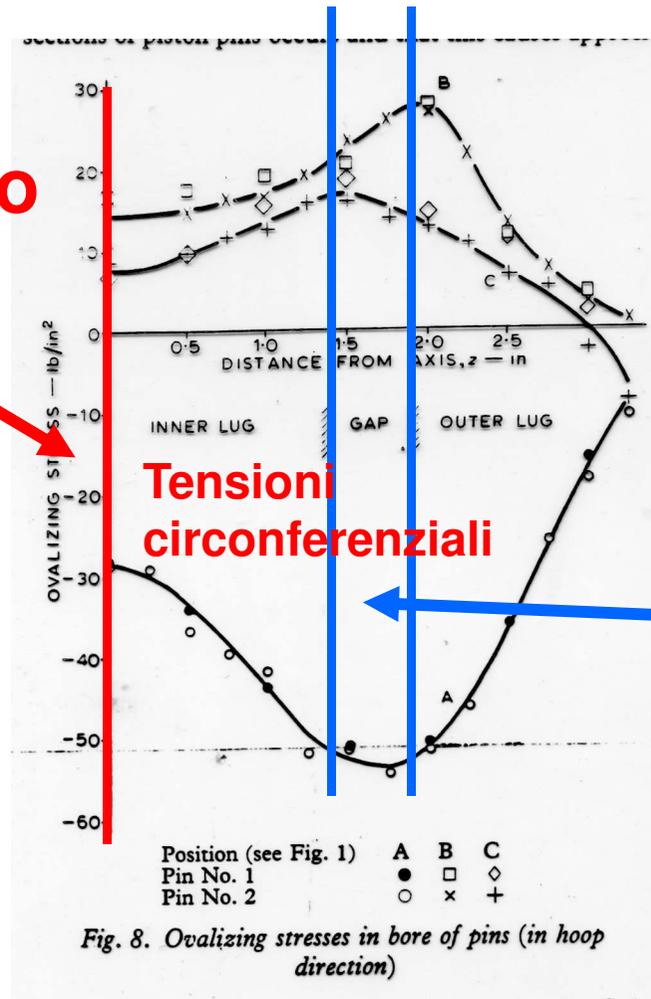
Piede biella

Andamento delle tensioni nello spinotto

Mezzeria dello spinotto

Estremo libero dello spinotto

Le tensioni circonferenziali sono massime nella zona del passaggio di portata

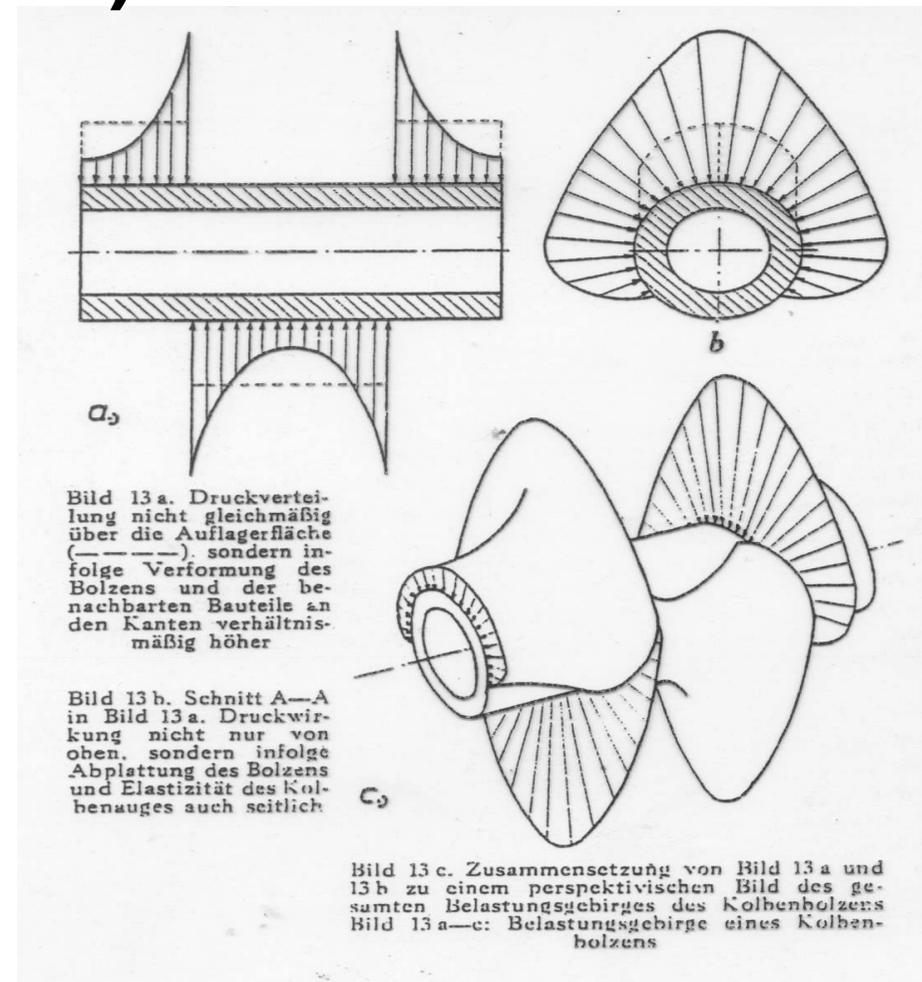


Tensioni circonferenziali

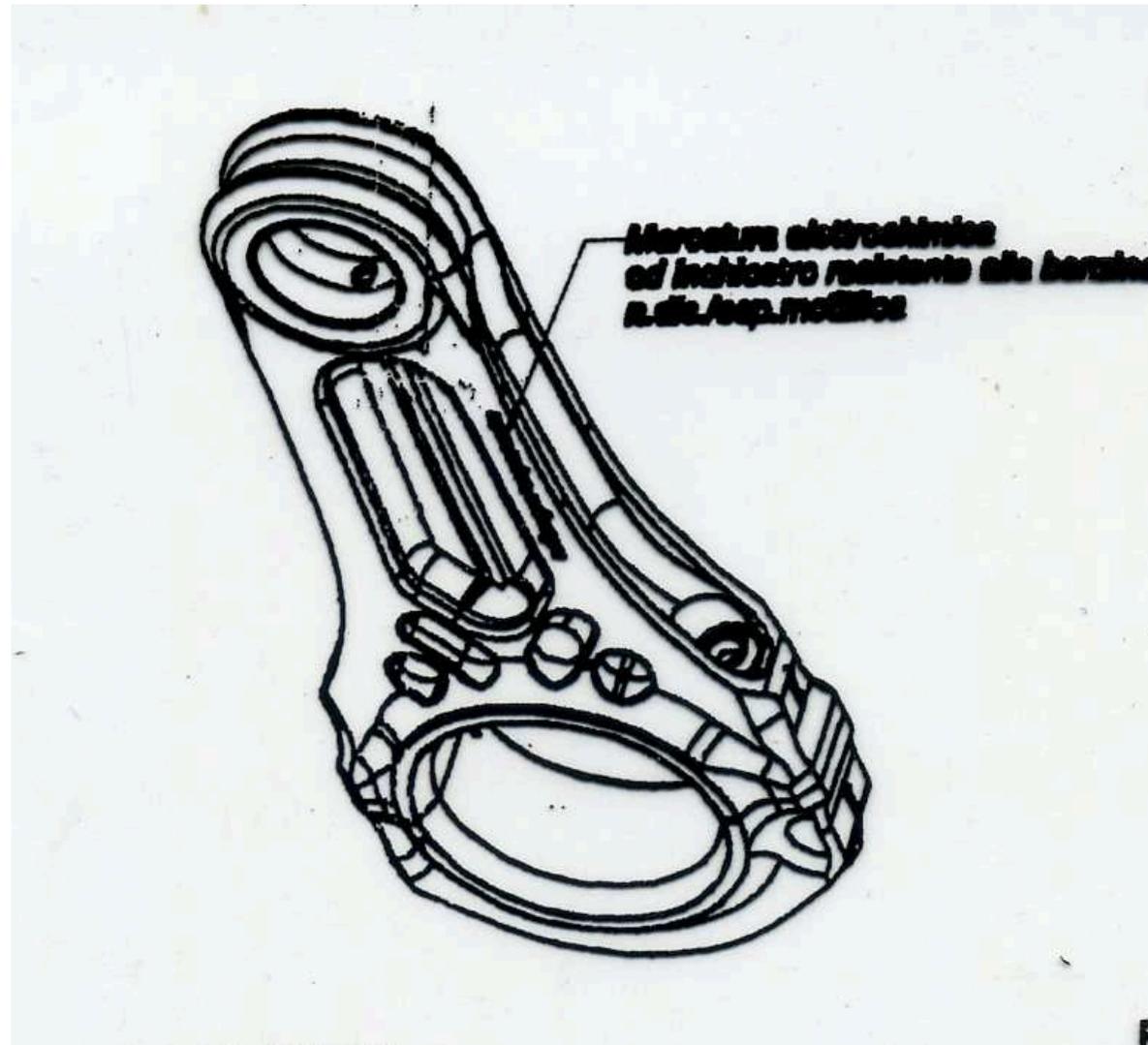
Gioco nel passaggio di portata

Andamento della pressione di contatto tra spinotto, portate del pistone, e piede di biella, prima degli Elementi Finiti (1941)

La pressione proposta è uguale a quella fornita dagli Elementi Finiti !

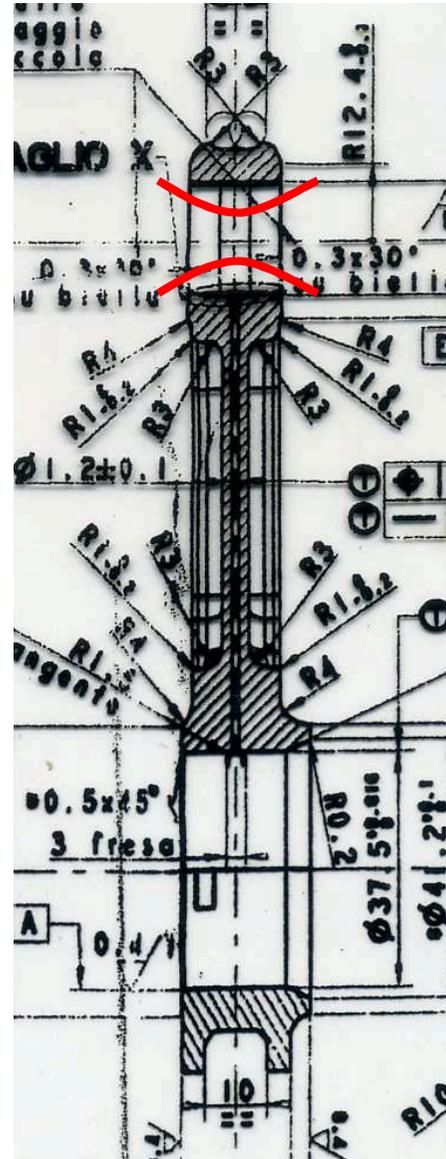


Biella Ferrari F1, periodo Schumacher

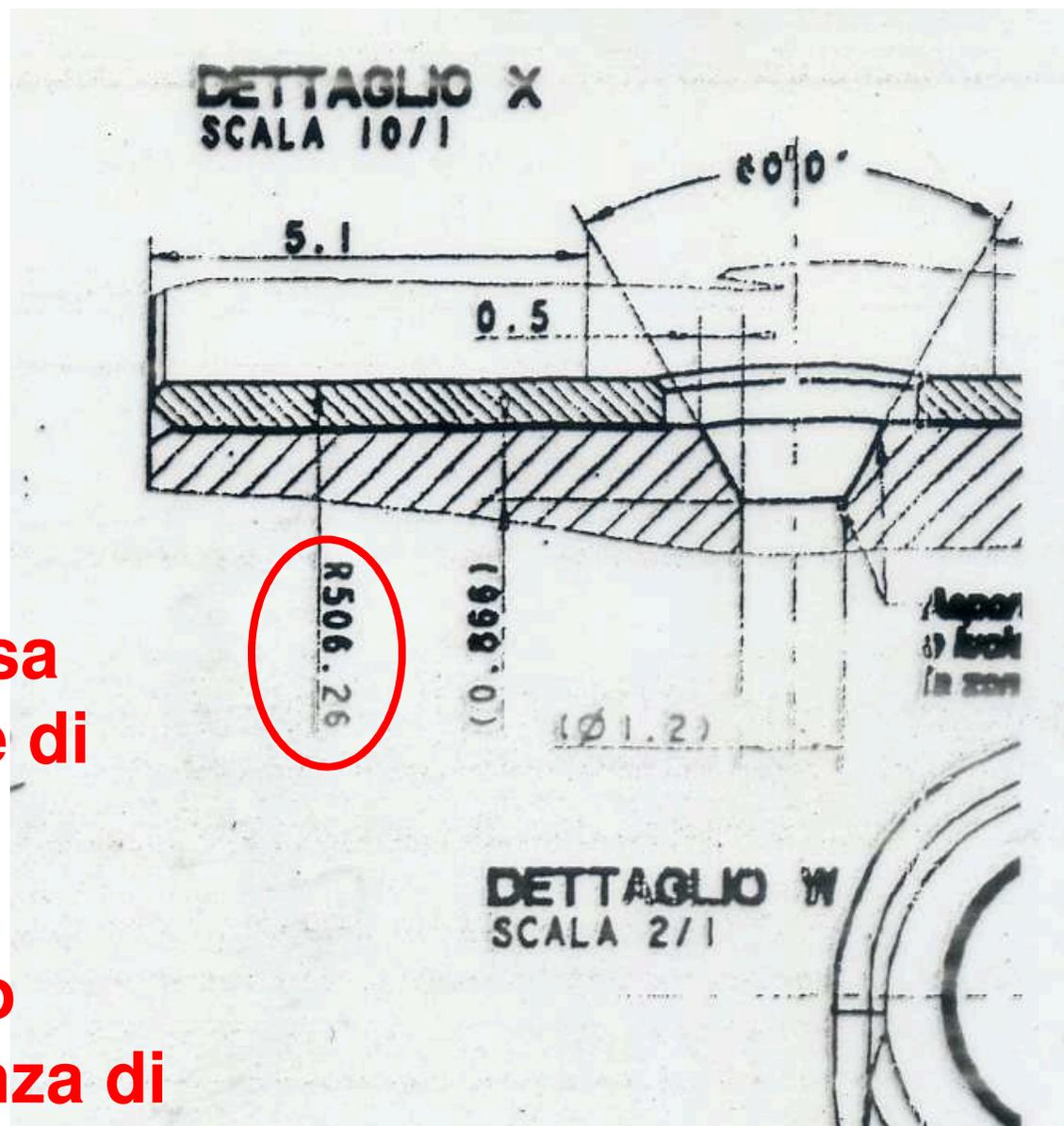


Il foro del piede di biella presenta una **barellatura inversa**, per accompagnare l'inflessione dello spinotto.

Barellatura inversa del foro del piede di biella, per accompagnare l'inflessione dello spinotto.

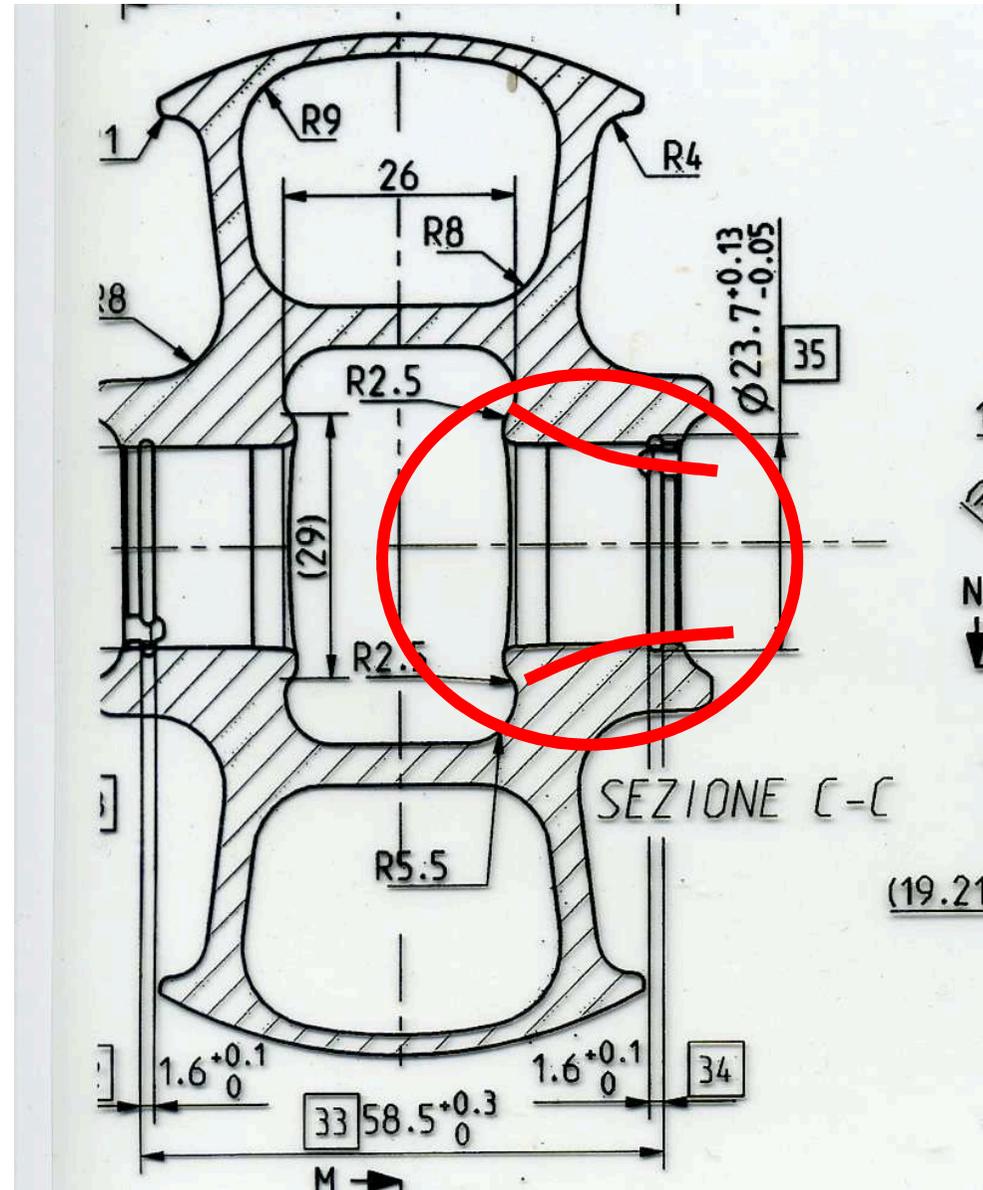


Barellatura inversa del foro del piede di biella, per accompagnare l'inflessione dello spinotto. Tolleranza di qualche micron

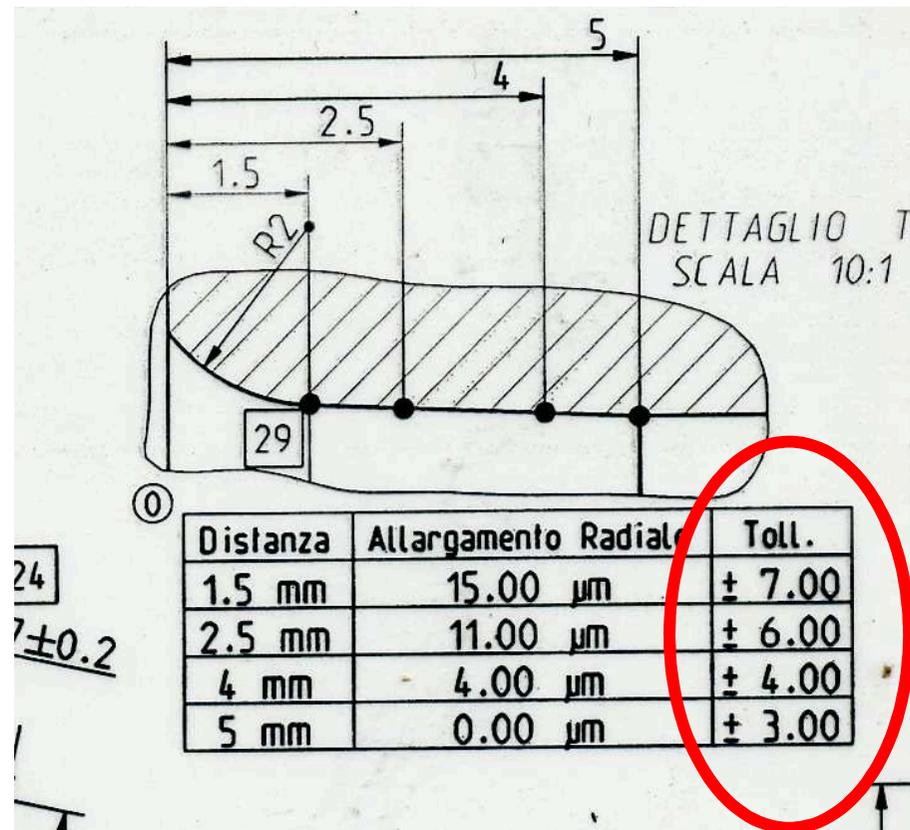


Pistone Ducati: Mahle

**Foro strombato,
per accompagnare
l'inflessione dello
spinotto**



Pistone Ducati: tolleranze nella **strombatura** di qualche micron



Si stanno realizzando **strombature non assialsimmetriche**, per tener conto che l'inflessione dello spinotto nei due versi è diversa

Grazie per l'attenzione



CHI SA FADIGAR IN ALTO SALE
Mattonella friulana del sedicesimo secolo