

Giunti di tubazioni in calcestruzzo per microtunnelling: calcolo dei massimi carichi di spinta

F. Alessandrini

Alpe Progetti Ingegneria – Udine - Italy

Giunti di tubazioni in calcestruzzo per microtunnelling: calcolo dei massimi carichi di spinta

F. Alessandrini

Alpe Progetti Ingegneria – Udine - Italy

L'articolo descrive un nuovo algoritmo basato sul "linear joint stress model" per la valutazione dei massimi carichi di spinta di tubazioni in calcestruzzo da microtunnelling. Viene in particolare esaminata l'influenza del materiale costituente il giunto e le sue dimensioni, rivelatisi elementi fondamentali nella distribuzione delle pressioni all'interfaccia tra due tubi contigui e nella concentrazione di tensioni sul calcestruzzo in corrispondenza dei giunti. Il metodo viene paragonato a quelli inseriti in normativa (EN e ATV) dimostrando un'ottima coincidenza di risultati qualora la determinazione dell'asse neutro venga sviluppata con gli stessi criteri. Vengono fornite indicazioni sui massimi carichi di spinta per tubazioni con diametri nominali variabili tra 1100 e 2500 mm.

1. INTRODUZIONE

La tubazione in calcestruzzo da microtunnelling, durante le fasi di spinta, è soggetta a pressioni longitudinali di notevole intensità. La zona che presenta le maggiori sollecitazioni di compressione è in genere quella contigua ai giunti tra tubo e tubo. In tale zona, infatti, la superficie che trasmette le pressioni di spinta è talvolta (ad eccezione dei giunti "in spessore") ridotta rispetto alla sezione corrente del tubo per l'interposizione di un cuscinetto (anello ripartitore) di dimensioni inferiori a quelle della sezione in calcestruzzo. Sempre nella stessa zona, inoltre, si presenta un andamento non uniforme delle pressioni a causa della diversa angolazione longitudinale presente tra due tubi contigui, grazie alla quale si può ottenere una curvatura complessiva della condotta o permettere delle correzioni di direzione della condotta stessa nel caso di condotta rettilinea. L'angolo di disallineamento tra due tubazioni rappresenta uno dei parametri che

maggiormente limitano la massima pressione di spinta ammissibile. La determinazione di un angolo limite in funzione della dimensione della tubazione (sezione e lunghezza), delle sue caratteristiche meccaniche, delle dimensioni e caratteristiche del giunto e del relativo anello di interposizione è un fattore di notevole rilevanza nel calcolo della spinta ammissibile: influenza la possibilità di ottenere curvature più o meno accentuate, la scelta dei materiali costituenti la tubazione e il giunto nonché la lunghezza dei singoli tratti di tubazione (con implicazioni sui tempi di inserimento), divenendo dunque un fattore di primaria rilevanza economica.

In quanto segue vengono presentati i "principi informativi" che vengono normalmente utilizzati dall'ALPE Progetti nella determinazione della massima deviazione angolare tra due tubi contigui o, equivalentemente, del massimo carico ammissibile per date geometrie e caratteristiche meccaniche della condotta-tubazione.

La determinazione viene eseguita mediante un metodo noto come “linear joint stress model”, informatizzato con un nuovo algoritmo di calcolo sviluppato nell’ambito di ALPE Progetti. A tale determinazione seguono poi due determinazioni di confronto: una è basata sulle prescrizioni prEN1916-HS248E [1] che permette una valutazione del massimo carico di spinta in condizione di “open joint”; la seconda si basa sulla norma ATV A 161 [2] che permette una determinazione del massimo carico di spinta in funzione dell’eccentricità di trasmissione della pressione tra due tubi contigui.

Analizziamo per sommi capi i tre metodi per giungere poi ad alcune considerazioni sulla loro affidabilità.

2. LINEAR JOINT STRESS MODEL

Il primo metodo si basa su ipotesi teoriche di comportamento elastico lineare dei materiali in gioco (calcestruzzo della tubazione e legno o elastomeri dell’anello di interposizione). Tale ipotesi, in realtà, non è del tutto adeguata per i calcestruzzi quando ci si avvicina al carico limite e ancor meno per i materiali dell’anello di interposizione, in genere sollecitati ben oltre un loro supposto limite elastico. E’ anche vero però che nel dimensionamento si tiene conto di non superare certi valori di pressione nel calcestruzzo (in genere pari a $0,6 R_{ck}$) in corrispondenza dei quali il suo comportamento può ancora essere considerato approssimativamente elastico. Il materiale di interposizione certamente subisce una plasticizzazione: nell’intervallo di carico che ci interessa il legno, ed esempio, perde completamente le sue caratteristiche strutturali e diventa una specie di “massa organica” con rigidità pseudo lineare all’aumentare del carico di valore sensibilmente inferiore a quello di picco del legno con struttura. Il materiale dell’anello di interposizione può dunque essere considerato a comportamento lineare qualora si consideri un certo intervallo di sollecitazioni di utilizzo, a patto di considerare le caratteristiche di

deformabilità di questo intervallo e non quelle riscontrabili a partire da una situazione scarica.

A quest’ultimo riguardo sono state eseguite numerose prove a compressione semplice su provini non confinati su materiali considerati idonei per gli anelli di interposizione. Sono stati verificati direttamente dei campioni di pioppo multistrato e diversi tipi di pannello truciolare per identificare il materiale migliore (alta resistenza ma rigidità non eccessiva ai livelli di carico di esercizio). I risultati hanno permesso di ritenere un determinato tipo di pannello truciolare come il materiale più idoneo, per il quale sono stati determinati valori di modulo elastico E (Young) relativamente costante e dell’ordine dei 85 Mpa per sollecitazioni variabili nell’intervallo tra i 24 e i 30 Mpa (vd. Tabella 1).

Tabella 1: valori medi del modulo elastico (E) di vari legni nel range di carico da 24 a 30 MPa

tipo legno	spessore iniziale [mm]	prova	E medio [MPa]
pannello truciolare	27,0	(1)	84,00
multistrato di pioppo	27,0	(1)	109,20
panforte	18,8	(2)	50,91
faggio	17,0	(2)	85,85

(1) prove eseguite presso CATAS srl, San Giovanni al Natisone (UD), prot. 2115/1, 1999

(2) da bibl. [3]

Il modello utilizzato considera le seguenti ipotesi di base:

- 1) comportamento elastico lineare del calcestruzzo del tubo e dell’anello di interposizione;
- 2) andamento lineare delle pressioni di contatto lungo il diametro del giunto.

Esso permette di valutare:

- 1) le deformazioni dell’anello e dei due semitubi contigui;
- 2) l’andamento delle sollecitazioni nella sezione di giunto a partire da una deviazione angolare nota tra i due tubi e da una geometria e caratteristiche dei

materiali note delle tubazioni e del giunto.

Il calcolo viene sviluppato andando inizialmente a valutare un modulo elastico equivalente del giunto (E_j) in cui si tiene conto sia della deformabilità effettiva del giunto che dei due semitubi a cavallo del giunto.

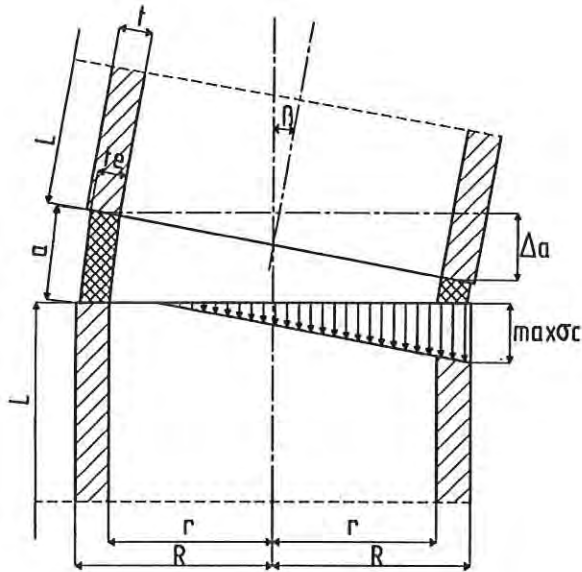


Figura 1: Denominazione delle grandezze geometriche utilizzate nel calcolo mediante il "linear joint stress method".

Tale modulo risulta essere pari a:

$$E_j = \frac{(E_l \cdot t_l \cdot E_c \cdot a)}{(a \cdot t_c \cdot E_c + L \cdot t_l \cdot E_l)} \quad 1.$$

dove il significato dei simboli è il seguente:

E_l = modulo elastico dell'anello di interposizione [MPa]

E_c = modulo elastico del calcestruzzo del tubo [MPa]

E_j = modulo elastico equivalente in spessore di giunto [MPa]

a = spessore iniziale del giunto (anello di interposizione) [mm]

t_l = altezza radiale dell'anello di interposizione (altezza della corona circolare) [mm]

t_c = spessore del tubo in calcestruzzo [mm]

L = lunghezza del tubo [mm].

Successivamente l'algoritmo va a individuare la posizione dell'asse neutro in base alla deformazione Δa del giunto e dell'angolo β , deviazione angolare tra due tubi successivi. Tale valore, in corrispondenza della massima sollecitazione ammissibile sul calcestruzzo $\max \sigma_c$, risulta:

$$z = \frac{\max \sigma_c \cdot a}{(E_j \cdot \beta)} \cdot \left(\frac{180}{\pi} \right) \quad 2.$$

dove il significato dei simboli è il seguente:

z = distanza dell'asse neutro dal bordo più deformato del giunto [mm]

β = deviazione angolare tra due tubi successivi (in ° sessadecimali).

Si va poi a calcolare il carico applicato alla tubazione in funzione della posizione di z appena determinata; l'algoritmo determina il carico mediante integrazione (in forma chiusa) delle pressioni sull'area da esse interessata, suddividendo l'integrazione in sei situazioni diverse, una relativa alla pressione uniforme su tutta la superficie del giunto (carico centrato) e altre cinque a seconda delle seguenti posizioni dell'asse neutro:

$$\begin{aligned} z &> 2 \cdot R \\ z &= 2 \cdot R \\ 2 \cdot R > z &> R+r \\ R+r > z &> R-r \\ R-r > z &> 0 \end{aligned}$$

dove il significato dei simboli è il seguente:

R = raggio esterno della tubazione in calcestruzzo [mm];

r = raggio interno della tubazione in calcestruzzo [mm].

Il carico così determinato viene ad essere il massimo carico applicabile alla tubazione per

l'angolo di deviazione impostato. Quest'angolo viene in genere suddiviso in due contributi: uno è quello dato dalla curvatura complessiva della tubazione, ed è funzione anche della lunghezza dei singoli tubi; il secondo è invece un contributo di "tolleranza" dovuto a possibili correzioni di direzione che si possono avere durante la spinta del tubo: dall'esperienza recente quest'angolo varia tra i $0,20^\circ$ e i $0,50^\circ$, a seconda dell'abilità di chi manovra la macchina (si considerano almeno $0,15^\circ$ con guida automatica)¹.

Negli esempi che seguono l'angolo di tolleranza considerato è stato posto uguale all'angolo di "closed joint" (vd. normativa prEN 1916 - HS248E); i valori di quest'angolo variano tra $0,25^\circ$ e $0,48^\circ$, valori minori per tubi di diametro maggiore.

Nelle figure (2a,2b) si riportano i massimi carichi di spinta individuati con il metodo descritto in funzione dell'angolo di deviazione e del raggio di curvatura della condotta per diversi diametri di tubazione e spessori del giunto; è stato analizzato il caso di tubi in calcestruzzo con R_{ck} pari a 50 N/mm^2 e modulo elastico del legno pari a 85 N/mm^2 .

3. MODELLO SECONDO ATV A161

L'utilizzo delle considerazioni contenute nella ATV A161 passa per la preventiva ricerca dell'asse neutro del giunto, ricerca non esplicitata nella normativa. A partire da tale dato e dalla geometria della tubazione/giunto, con ipotesi di andamento lineare delle pressioni in corrispondenza del giunto stesso, la normativa presenta dei diagrammi che permettono di ottenere direttamente la massima pressione di contatto nella zona più sollecitata del tubo, pressione espressa tramite il rapporto $\max\sigma/\sigma_0$ (vedi figura 3), dove $\max\sigma$ è la massima pressione di contatto mentre σ_0 è la pressione uniformemente distribuita che si avrebbe nel giunto per lo

stesso valore di carico di spinta supposto perfettamente centrato.

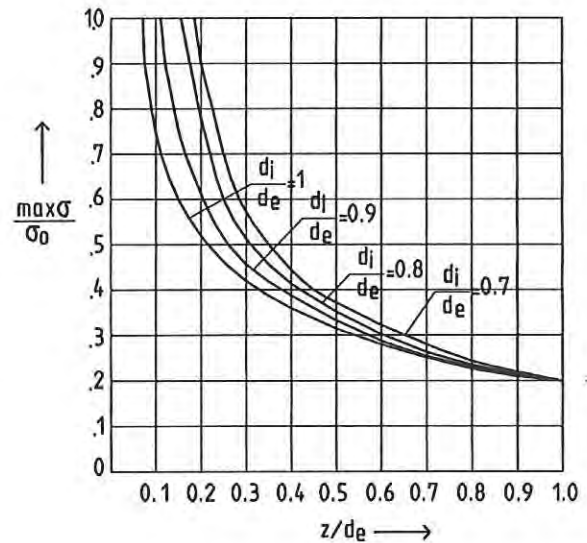


Figura 3: Determinazione del rapporto $\max\sigma/\sigma_0$ in funzione della posizione dell'asse neutro z e dei diametri interni ed esterni della tubazione (d_i e d_e).

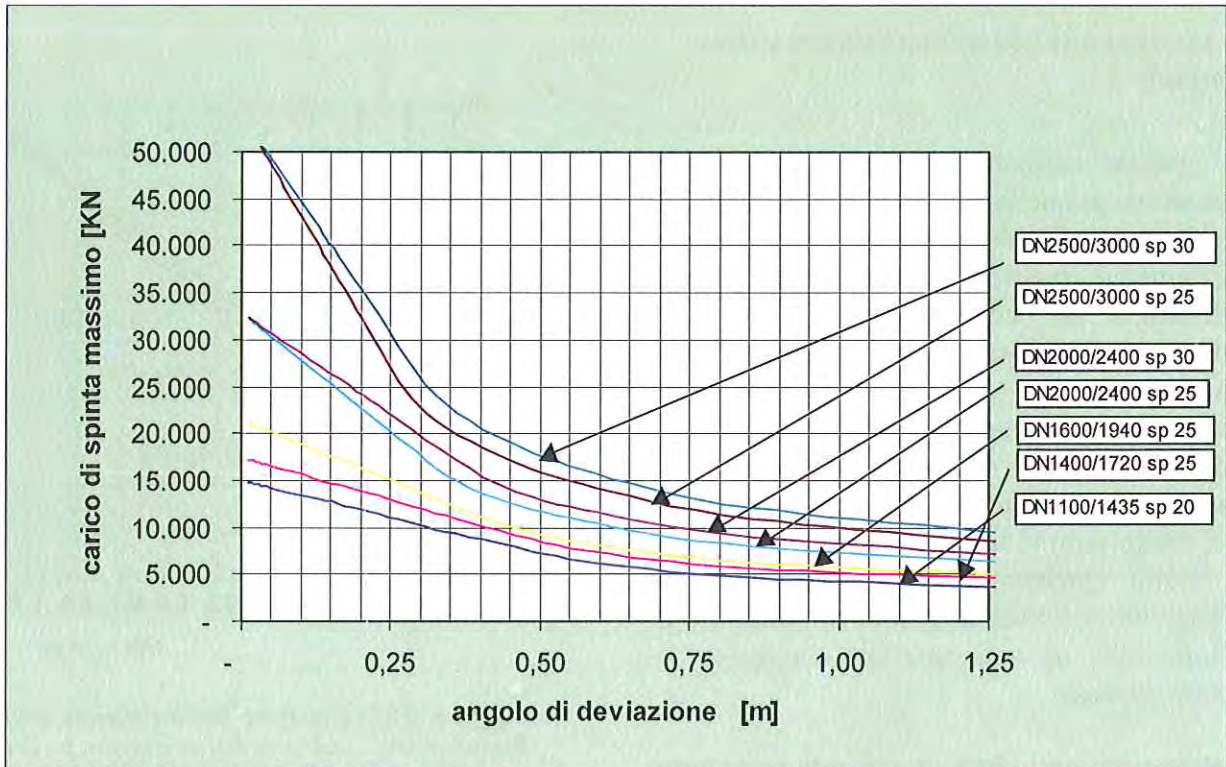
Una volta determinato tale valore si risale rapidamente al massimo carico ammissibile in funzione della seguente espressione:

$$\text{permis.V} = A \cdot \frac{\beta_{LP} / \gamma}{\max\sigma / \sigma_0} \quad 3.$$

dove il significato dei simboli è il seguente:

- permis.V = massimo carico di spinta [MPa];
- $A = (d_3^2 - d_i^2) \cdot \pi / 4$, minima area di trasferimento delle pressioni [m^2];
- d_3 = diametro del tubo, misurato nel suo punto più debole [m];
- d_i = diametro interno della tubazione [m];
- d_e = diametro esterno della tubazione [m];
- β_{LP} = resistenza longitudinale del calcestruzzo [MPa]
- γ = coefficiente di sicurezza ($1/0,6=1,67$)

¹ In [3] si riportano valori ricavati da esperienze antecedenti il 1985 pari a $0,29^\circ \pm 0,21^\circ$, con un angolo massimo registrato di $1,31^\circ$; il frattile 5% è risultato essere pari a $0,63^\circ$. Le tecniche di guida nel frattempo sono state sensibilmente migliorate.



Nel calcolo di confronto di seguito riportato, la posizione dell'asse neutro è stata valutata

con lo stesso algoritmo utilizzato nel metodo "linear joint stress model".

Figura 2a: carichi massimi di spinta in funzione dell'angolo di deviazione per diversi diametri di tubazione e spessori del giunto secondo il "linear joint stress model".

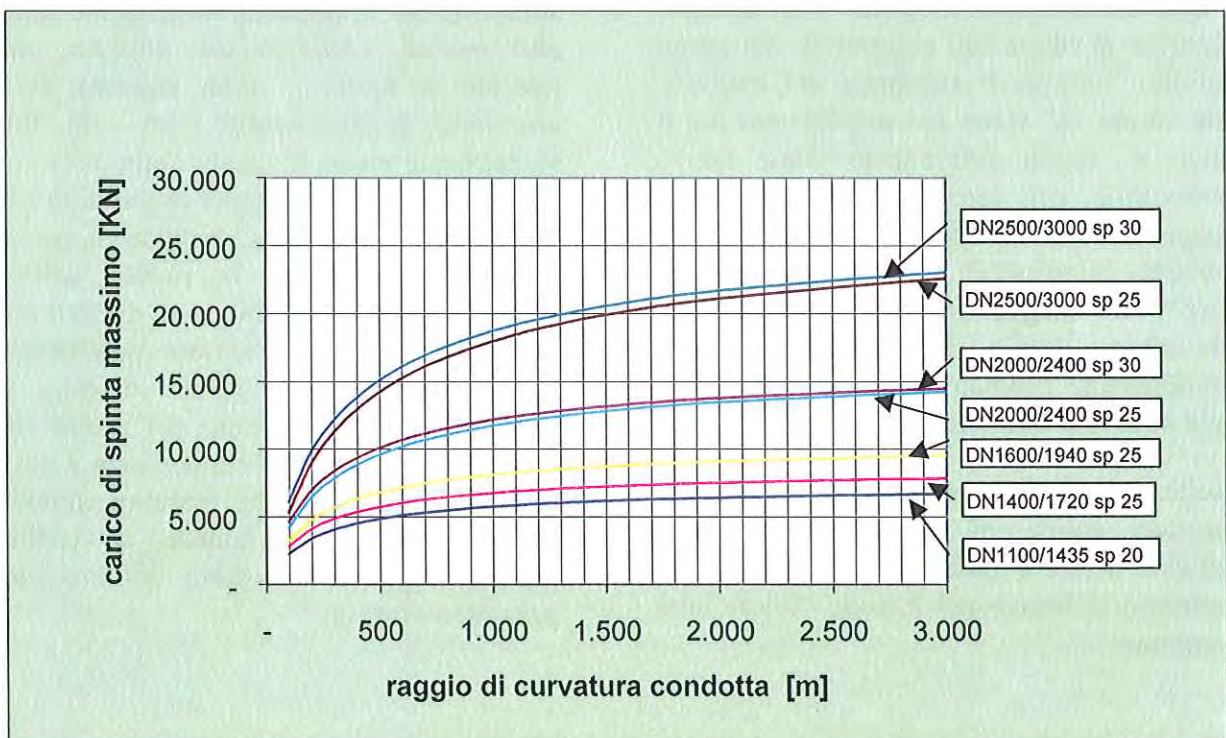


Figura 2b: carichi massimi di spinta in funzione del raggio di curvatura della condotta per diversi diametri di tubazione e spessori del giunto secondo il "linear joint stress model".

4. MODELLO SECONDO PREN 1916 - HS248E

In questa normativa si distinguono due situazioni: a) quella del "closed joint" in cui il giunto tra due tubi è sempre e comunque interamente compresso, pur ammettendo una difformità di compressione (andamento lineare) lungo il giunto; e b) quella dell'"open joint" in cui una parte del giunto si presenta scarica ovvero una parte dell'anello di interposizione non rimane più in contatto con entrambe le superfici dei due tubi contigui.

Nel primo caso si limita il carico ammissibile a quello corrispondente ad un'andamento triangolare delle sollecitazioni sul giunto, con valore nullo ad una estremità e massimo a quella opposta.

Nel secondo caso, invece, si ricade in un caso simile a quello del modello precedentemente presentato in cui, a partire dalla posizione dell'asse neutro (anche qui non si specifica come determinarlo) e dalle caratteristiche della tubazione, si risale mediante diagramma o, equivalentemente, mediante formulazione algebrica, al valore dell'eccentricità del carico (definito "fattore di riduzione del carico"). Tale valore "e" viene poi moltiplicato per il carico di spinta determinato come carico ammissibile nel caso del "closed joint", giungendo così al nuovo valore del carico massimo ammissibile. Nella figura 4 si riporta il diagramma che permette di determinare "e" in funzione delle caratteristiche geometriche della tubazione e della posizione dell'asse neutro.

Anche in questo caso per il calcolo del massimo carico di spinta, la posizione dell'asse neutro è stata valutata con lo stesso algoritmo utilizzato nel metodo "linear joint stress model".

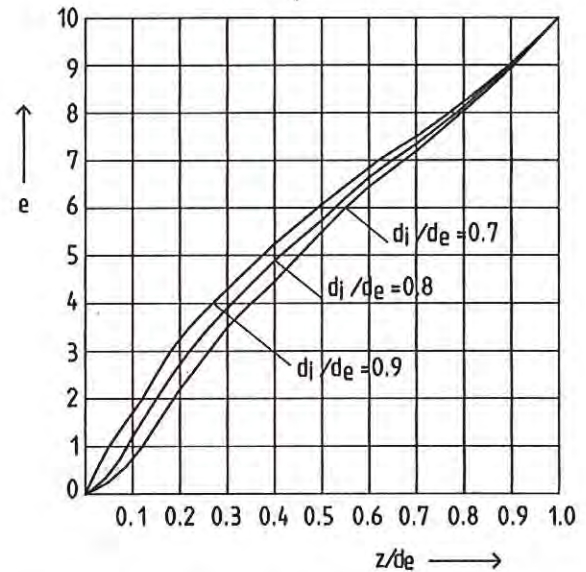


Figura 4: Determinazione dell'eccentricità e in funzione della posizione dell'asse neutro z e dei diametri interni ed esterni della tubazione (d_i e d_e).

5. CONSIDERAZIONI FINALI

Il calcolo eseguito secondo il "linear joint stress method" si presenta, al paragone con gli altri metodi, perfettamente allineato, come riportato in figura 5, forse leggermente più cautelativo di quello prEN 1916 - HS248E e leggermente meno di quello della della ATV A161. L'aspetto di maggior importanza e che maggiormente influenza i risultati è, per tutti i metodi considerati, la ricerca dell'asse neutro in funzione dell'angolo relativo tra le tubazioni, ricerca influenzata pesantemente dalle dimensioni del giunto e dalla sua rigidità. La corretta scelta del giunto viene dunque ad assumere un'importanza notevole nella determinazione dei massimi carichi di spinta, specialmente quando si vogliono ottenere raggi di curvatura della condotta inferiori a 1000 m.

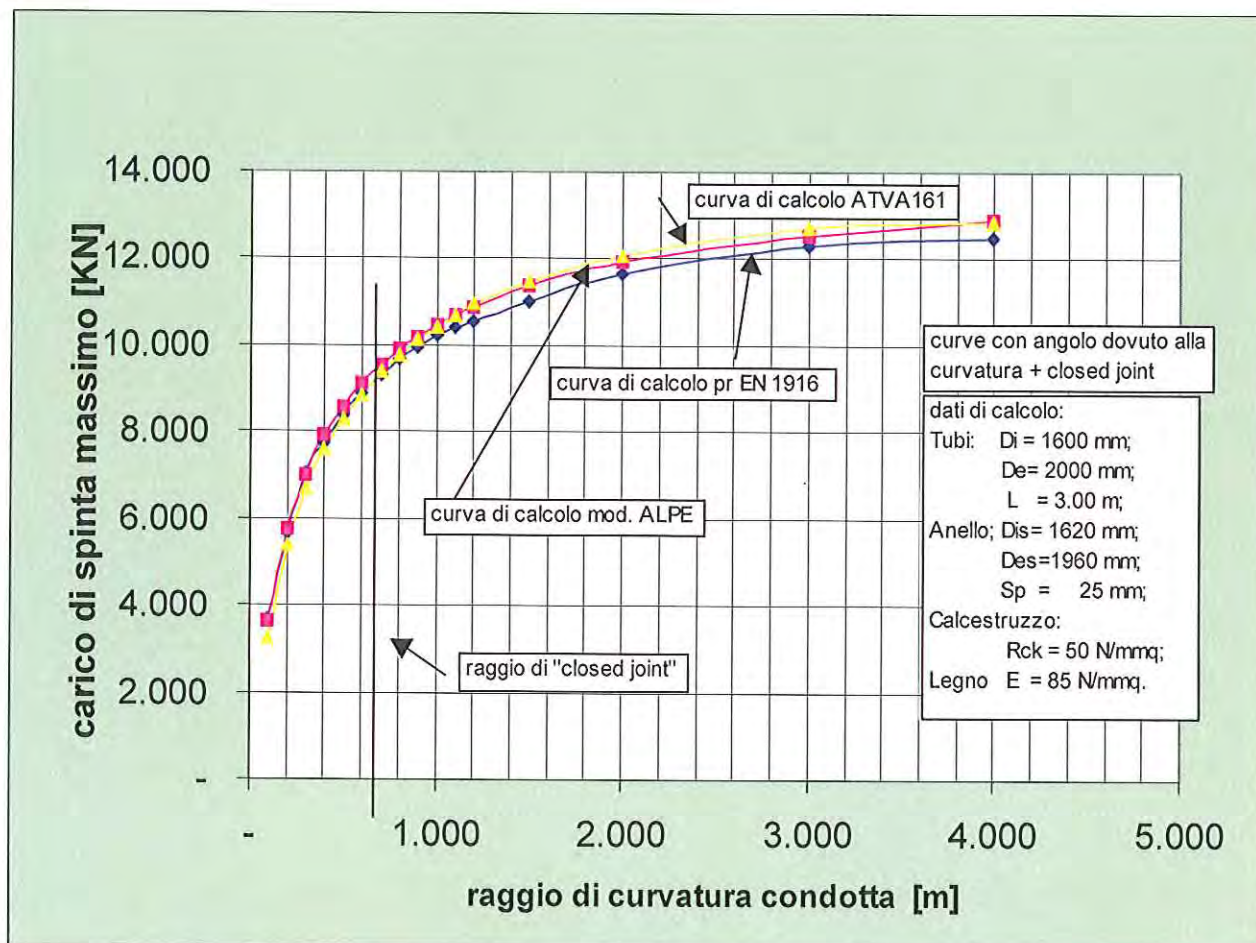


Figura 5: Confronto tra i massimi carichi di spinta determinati mediante i tre metodi di calcolo esaminati.

Dal paragone con gli altri metodi di normativa, il “linear joint stress method” si presenta come il più completo, prendendo in considerazione tutti i principali parametri geometrici e costitutivi, cosa che gli altri metodi fanno solo parzialmente. I due metodi di normativa non danno indicazioni operative sulla determinazione dell’asse neutro. Essi inoltre presentano una determinazione delle massime sollecitazioni molto meno raffinata di quella del “linear joint stress method” che, nell’algoritmo dell’Alpe Progetti, viene effettuata mediante integrazione in forma chiusa.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] prEN1916-HS248E, Concrete pipes and fittings, unreinforced, steel fibre and reinforced, *Norme Europee*, ver. 11, settembre 1998
- [2] ATV A 161, Static calculation of driven Pipes, *Abwassertechnische Vereinigung e. V.*, gennaio 1990
- [3] Helmut Antz, Untersuchungen über Kantenpressungen an Vorprebrohren, *Bautechnik* 7/1986
- [4] H. Burd, G. Milligan, Improved design of concrete jacking pipes, *No-Dig International*, april 1999

