

Analisi strutturale delle tubazioni in gres posate in trincea mediante la modellazione agli elementi finiti del sistema tubo-terreno

1. Introduzione

L'analisi strutturale delle tubazioni interrate deve essere condotta attraverso un rigoroso e completo studio del fenomeno dell'interazione tubo-terreno. Un siffatto studio è abbastanza complesso a causa dell'elevato numero di fattori in gioco, e cioè: geometria della tubazione e proprietà del materiale costituente essa, geometria e proprietà meccaniche del terreno costituente il backfill (terreno circostante la tubazione), proprietà geotecniche del terreno in sito, natura ed entità dei carichi esterni applicati.

Inoltre, un altro fattore che incrementa la complessità dell'analisi è lo stato tenso-deformativo che si genera lungo l'interfaccia tubo-backfill. Tale fattore costituisce un problema staticamente indeterminato in quanto l'entità e la distribuzione delle tensioni agenti lungo l'interfaccia sono dipendenti dalle deformazioni che subisce la struttura, ma queste ultime, a loro volta, dipendono dalle suddette tensioni (aspetto duale tensioni-deformazioni).

Allo stato attuale la modellazione del fenomeno dell'interazione tubo-terreno può essere condotta tramite il metodo degli elementi finiti (F.E.M.). Infatti, grazie a tale metodo ogni componente del sistema (tubo, backfill, terreno in sito) viene trattato come un *continuo* (sono quindi applicabili i rigorosi principi della Meccanica del Continuo) caratterizzato da specifiche proprietà meccaniche. Inoltre, tramite equazioni di equilibrio e di compatibilità cinematica insite nel metodo agli elementi finiti, ed in base alle condizioni di interfaccia (scorrimento relativo tra tubo e terreno circostante, perdita di contatto locale), lo stato tenso-deformativo agente sulla tubazione viene definito in modo univoco.

Nel presente lavoro, tramite la modellazione agli elementi finiti del sistema tubo-terreno, si è effettuata l'analisi strutturale (determinazione dello stato tensionale circonferenziale e successiva verifica statica) di tubazioni in gres di diverso diametro nominale (DN 300, DN 500, DN 800) posate in trincea. Inoltre, per ciascun diametro nominale e per una ben definita condizione di carico (nel presente come condizione di carico si è considerata solo quella indotta dal rinterro), è stato messo in evidenza come si modifica lo stato tensionale circonferenziale delle suddette tubazioni al variare dell'angolo di posa 2α (60° , 90° , 180°) e del grado di compattazione dell'appoggio (l'appoggio è costituito dal letto di posa e dal rinfianco [UNI EN 1610, 1999]).

2. Analisi strutturale delle tubazioni in gres tramite la modellazione agli elementi finiti del sistema tubo-terreno

Per poter effettuare la modellazione agli elementi finiti del sistema tubo-terreno, e quindi determinare lo stato tensionale circonferenziale dell'elemento tubo, è necessario definire:

- caratteristiche geometriche dell'elemento tubo, la reologia del materiale costituente l'elemento tubo ed i parametri fisico-meccanici;
- caratteristiche geometriche della trincea e le dimensioni dei singoli strati costituenti essa;
- i materiali utilizzati per la realizzazione degli strati costituenti la trincea (letto di posa, rinfianco, riempimento) ed il grado di compattazione di ciascun singolo strato;

- il tipo di terreno in sito e le sue caratteristiche geotecniche;
- la natura ed entità dei carichi esterni applicati.

2.1 Caratteristiche geometrico-meccanico dell'elemento tubo

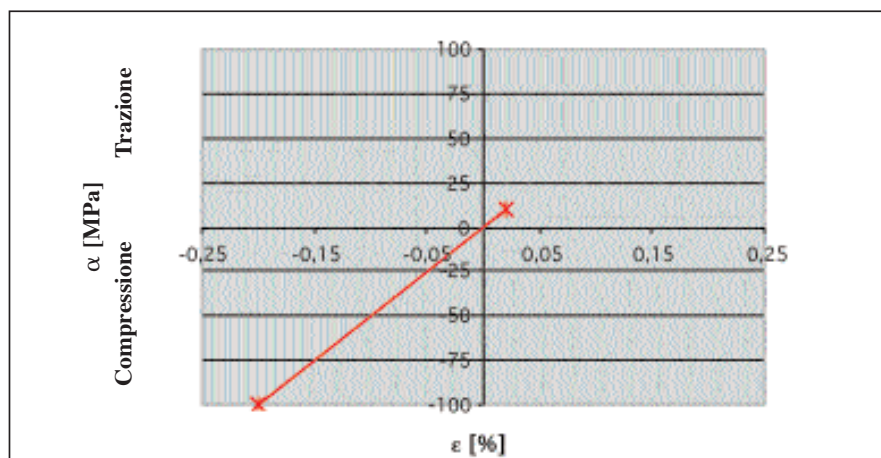
Le caratteristiche geometriche delle tubazioni in gres oggetto di studio sono riportate nella tabella 1. I diametri minimi ed i diametri esterni relativi ai diametri nominali di cui in tabella 1 sono definiti rispettivamente dalla normativa UNI EN 295 e dal fabbricante. Infatti, secondo quanto stabilito dalla suddetta normativa, per le procedure di calcolo strutturale lo spessore della parete e/o il diametro esterno devono essere dichiarati dal fabbricante. La reologia del gres è quella tipica dei materiali ceramici, ossia un legame tensione-deformazione di tipo elastico-lineare [Gordon, 1988] che si mantiene pressoché inalterato fino a rottura. Come si può evincere dalla figura 1 la rottura del materiale gres è di tipo *fragile*, ossia caratterizzata da un campo di deformazione plastica del tutto assente, inoltre il legame tensione-deformazione è di tipo *asimmetrico*, ossia le tensioni di rottura a compressione ed a trazione hanno valori diversi. I parametri meccanici delle tubazioni in gres oggetto di studio sono riportati nella tabella 2.

2.2 Caratteristiche geometriche della trincea

Le caratteristiche geometriche fondamentali di una trincea a pareti verticali (tipologia considerata nel presente lavoro) sono la larghezza minima B e

DN mm	Classe di resistenza kN/m ²	Carico di rottura kN/m	Diametro minimo mm	Diametro esterno mm
300	240	72	293	375
500	120	60	487	581
800	L	60	780	895

• Tabella 1 - Caratteristiche geometriche delle tubazioni in gres oggetto di studio



• Figura 1 - Legame tensione-deformazione del materiale gres.

Tensione di rottura a trazione	10 ÷ 20 MPa
Tensione di rottura a compressione	100 ÷ 200 MPa
Tensione di rottura a flessione	15 ÷ 40 MPa
Modulo di elasticità	50000 MPa

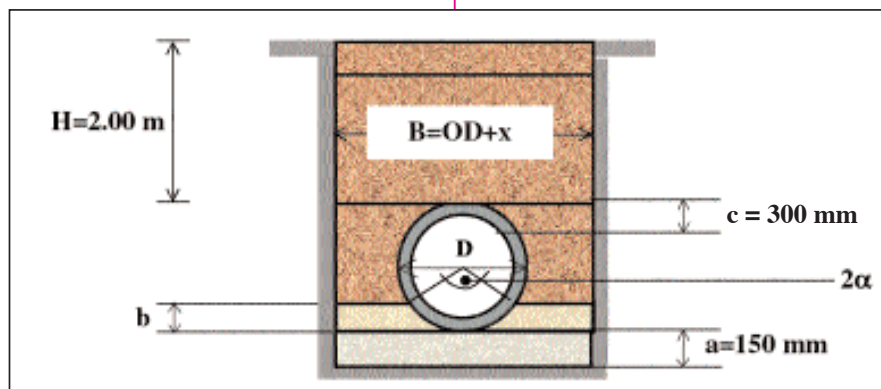
• Tabella 2 - Caratteristiche fisico-meccaniche del gres

l'altezza di rinterro H (figura 2).

La normativa UNI EN 1610 stabilisce che la larghezza minima delle trincee non supportate (come nel caso in esame) è funzione del diametro nominale DN , ossia:

$$B = OD + 2(x/2)$$

dove OD è il diametro esterno relativo al diametro nominale DN del tubo ed $x/2$ è lo spazio di lavoro minimo compreso tra il tubo e la parete della trincea.



• Figura 2 - Sezione tipo

Le larghezze minime B relative ai diametri nominali dei tubi in gres oggetto

- $B = 0.375 + 0.50 = 0.875 \text{ m} \rightarrow 0.90 \text{ m}$ per DN 300;
- $B = 0.581 + 0.700 = 1.281 \text{ m} \rightarrow 1.30 \text{ m}$ per DN 500;
- $B = 0.895 + 0.850 = 1.645 \text{ m} \rightarrow 1.70 \text{ m}$ per DN 800;

di studio assumono i seguenti valori: L'altezza di rinterro H , ossia la distanza compresa tra la generatrice superiore del tubo e la sommità del terreno, è stata assunta pari a 2.00 m.

Il tipo d'appoggio utilizzato nel presente lavoro è quello che nella norma UNI EN 1610/99 è definito come "tipo di appoggio n° 1". Tale tipo d'appoggio può essere utilizzato qualsiasi sia il tipo di rivestimento (per rivestimento si intende il supporto intorno al tubo, comprendente il rinfianco ed i riempimenti laterale ed iniziale); esso fornisce supporto ai tubi per tutta la loro lunghezza purché vengano rispettati i requisiti di spessore dello strato a e b (figura 2). Lo spessore a del letto di posa deve essere [UNI EN 1610, 1999]:

- $a \geq 100 \text{ mm}$ in condizioni di terreno normale;
- $a \geq 100 \text{ mm}$ in roccia o in condizioni di terreno duro (tale valore è stato assunto nella modellazione agli elementi finiti del sistema tubo in gres-terreno).

Lo spessore b del letto di posa è funzione dell'angolo d'appoggio 2α , ossia:

$$b = OD/2 \cdot \{1 - \cos [(2\alpha)/2]\}$$

Lo spessore c del riempimento iniziale si è assunto pari a 300 mm (figura 2). I materiali impiegati per la realizzazione del letto di posa, del rivestimento e del riempimento propriamente detto sono riportati nella tabella 3. Nella stessa tabella sono inoltre riporta-

ti per ciascuno strato (letto di posa, rivestimento e riempimento propriamente detto) i relativi gradi di compattazione.

I due diversi gradi di compattazione relativi all'appoggio (si ricorda che l'appoggio è costituito dal letto di posa e dal rinfianco [UNI EN 1610, 1999]) sono caratterizzati l'uno da una densità relativa pari al 35% (appoggio leggermente compattato) l'altro da una densità relativa pari al 90% (appoggio ben compattato).

Strato (secondo le definizioni della norma UNI EN 1610)	Tipo di terreno costituente lo strato	Grado di compattazione (in termini di densità relativa)	
		Leggermente compattato	Ben compattato
Letto di posa	Sabbia ben graduata	DR=35%	DR=90%
Rinfianco	Sabbia ben graduata	DR=35%	DR=90%
Riempimento laterale	Sabbia	DR=35%	DR=35%
Riempimento iniziale	Sabbia	DR=35%	DR=35%
Riempimento propriamente detto	Terreno proveniente dallo scavo della trincea	DR=35%	DR=35%

• Tabella 3 - Tipi di materiali xcostituenti gli strati della trincea e relativi gradi di compattazione

2.3 Caratteristiche del terreno in sito

Nella simulazione agli elementi finiti si è adottato un terreno compatto caratterizzato da una densità relativa pari al 90% (terreno ben compattato).

2.4 Natura ed entità dei carichi esterni applicati

Nel presente lavoro come carichi gravanti sulle tubazioni oggetto di studio è stato assunto solo quello dovuto al peso del rinterro (carico di natura statica) caratterizzato da un peso specifico pari a 20 kN/m^3 .

2.5 Modellazione agli elementi finiti del sistema tubo-terreno

La modellazione agli elementi finiti del sistema tubo-terreno (figura 3) è stata

realizzata mediante il codice di calcolo SAP 90 [Wilson E.L. et al., 1988]. La simulazione è stata effettuata considerando ciascuna delle tubazioni in gres oggetto di studio posata in una trincea caratterizzata da un appoggio di tipo n° 1 [UNI EN 1610, 1999] (figura 2).

Il programma SAP 90 permette di analizzare la risposta meccanica di un sistema continuo bidimensionale grazie all'utilizzo delle relazioni caratterizzanti lo stato piano di deformazione.

Affinché nel caso specifico, ossia sistema tubo-terreno, lo stato piano di deformazione sia rispettato è necessario che:

- la tubazione sia abbastanza lunga;
- lungo l'asse longitudinale non avvenga variazione alcuna della configurazione riguardante il sistema tubo-terreno.

In base alle suddette condizioni si deduce che le deformazioni del sistema tubo-terreno risultano essere nulle in

direzione longitudinale e che ogni sezione trasversale di tale sistema si deforma allo stesso modo.

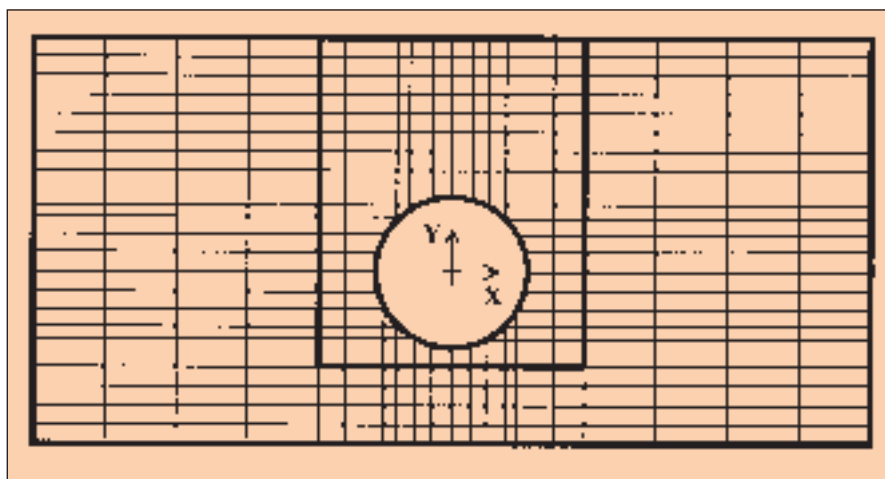
Conseguentemente, la delimitazione del cosiddetto “volume di controllo” necessario per lo studio dell’interazione si riduce alla descrizione di una singola sezione trasversale, che risulterà essere rappresentativa del sistema tubo-terreno.

Il profilo anulare della tubazioni in gres oggetto di studio è stato discretizzato con una mesh di 24 elementi *frame* elastici-lineari, a due nodi, formulati in uno spazio bidimensionale. Ognuno dei due nodi dell’elemento *frame* è dotato di tre gradi di libertà: due traslazionali (secondo gli assi X ed Y) ed uno rotazionale. Il modello strutturale caratterizzante l’elemento *frame* è basato sulla teoria di Bernoulli. Le funzioni di forma dell’elemento trave risultano essere di tipo cubico per quanto riguarda la flessione e di tipo lineare per quanto riguarda lo sforzo normale. Lo stato tensionale lungo lo spessore di parete dell’elemento *frame* è definito dalla relazione:

$$\sigma = \pm 6 \cdot \frac{M}{s^2} + \frac{N}{\delta} \quad (1)$$

in cui M è il momento circonferenziale (positivo se generano tensioni di trazione all’intradosso del profilo anulare del tubo), N è lo sforzo normale circonferenziale (positivo se di trazione). Poiché per tubazioni rigide, come lo è una tubazione in gres, le tensioni indotte dallo sforzo normale circonferenziale N sono normalmente di un ordine di grandezza inferiore a quelle indotte dai momenti circonferenziali M [Miglio, 1999] è possibile riscrivere la (1) trascurando le tensioni dovute ad N, ossia:

$$\sigma = \pm 6 \cdot \frac{M}{s^2} \quad (2)$$



• Figura 3 – Mesh del sistema tubo-corrente

L’elemento terreno in sito è stato discretizzato con una mesh di 216 elementi *asolid* mentre i vari strati componenti la trincea (letto di posa, rivestimento, riempimento propriamente detto) sono stati discretizzati con una mesh di 132 elementi *asolid*. Ognuno dei quattro nodi dell’elemento *asolid* è dotato di due gradi di libertà traslazionali.

Lo stato tenso-deformativo dell’elemento *asolid* con cui si è simulato il comportamento meccanico del terreno in sito e degli strati di terreno componenti la trincea è caratterizzato da un legame elastico-lineare.

Nella modellazione tubo-terreno si sono utilizzati due diversi moduli di elasticità del terreno per l’appoggio:

- E= 7.0 MPa per terreno leggermente compattato [Harteley J.D., Duncan J.M.];
- E= 23.2 MPa per terreno ben compattato [Harteley J.D., Duncan J.M.].

Per il terreno in sito si è adottato un modulo di elasticità pari a 23.2 MPa [Harteley J.D., Duncan J.M.]. Ognuno dei sopra riportati moduli di elasticità caratterizza da un punto di vista meccanico l’elemento *asolid* costi-

tante i diversi tipi di terreno (appoggio, rivestimento, riempimento propriamente detto, terreno in sito).

2.6 Risultati della simulazione

I risultati delle simulazioni effettuate col codice di calcolo agli elementi finiti SAP90 sono sintetizzati sotto forma di grafici e tabelle nel seguito riportate. I grafici riguardano solo l’andamento delle tensioni di trazione circonferenziale poiché, come ben evidenziato in figura 1, lo stato ultimo che prima si raggiunge e che quindi interessa ai fini della sicurezza strutturale è quello di trazione.

Gli stati di trazione circonferenziale di seguito riportati relativi ai tre diametri nominali oggetto di studio sono stati diagrammati in funzione dell’angolo d’appoggio 2α (60° , 90° , 180°), del grado di compattazione dell’appoggio e dell’ascissa angolare θ ; tale ascissa assume valore nullo ($\theta = 0^\circ$) in corrispondenza della generatrice superiore della tubazione ed è crescente in senso orario fino al valore, $\theta = 180^\circ$ corrispondente alla generatrice inferiore della tubazione (si analizza solo metà

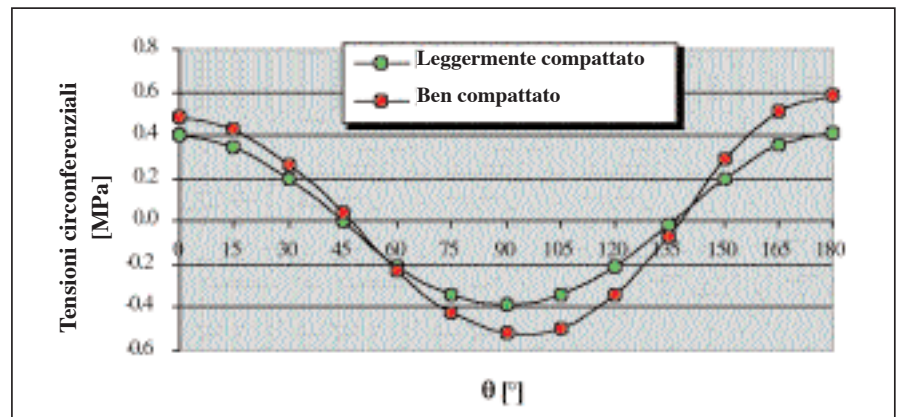
tubazione in quanto l'asse verticale della tubazione è anche asse di simmetria del sistema tubo-terreno (figura 3). Per ogni grafico si è adottata la seguente convenzione: il valore positivo della tensione circonferenziale di trazione indica che tale tensione agisce sull'intradosso della parete della tubazione; il valore negativo della tensione circonferenziale di trazione indica che tale tensione agisce sull'estradosso della parete della tubazione.

Per una tubazione in gres di DN 300, come si può evincere dalle figura 4, a parità di angolo d'appoggio ($2\alpha = 60^\circ$) ma con due diversi gradi di compattazione dell'appoggio (leggermente compattato e ben compattato), le tensioni di trazione circonferenziale risultano essere essere maggiori per l'appoggio avente il grado di compattazione più elevato, ciò è spiegabile per le seguenti ragioni:

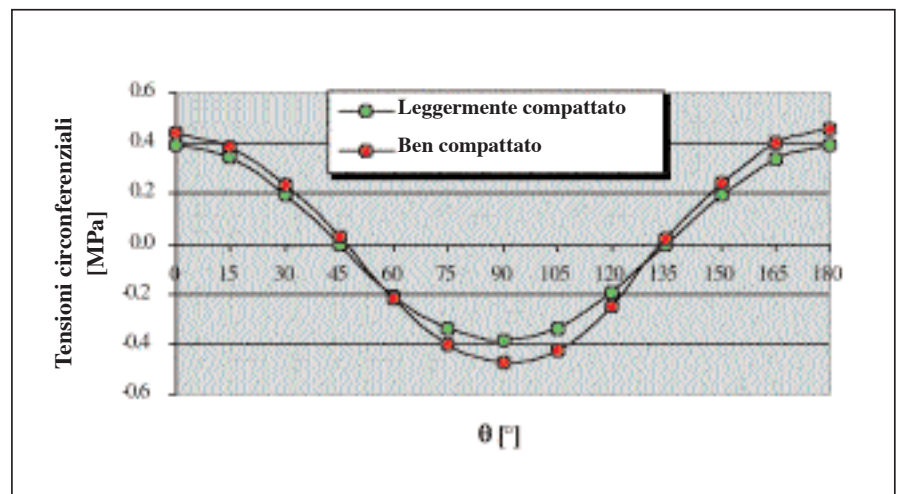
1. le pressioni del terreno nell'intorno della tubazione si concentrano sempre nella zona a maggior rigidezza (in questo caso l'appoggio poiché rispetto agli altri strati è quello maggiormente compattato);
2. più piccolo è l'angolo d'appoggio 2α maggiore è la pressione di reazione esplicita dall'appoggio e, di conseguenza, maggiori sono i momenti circonferenziali.

Aumentando l'angolo di appoggio (figure 5 e 6), ma mantenendo sempre i due diversi gradi di costipamento dell'appoggio, si osserva che:

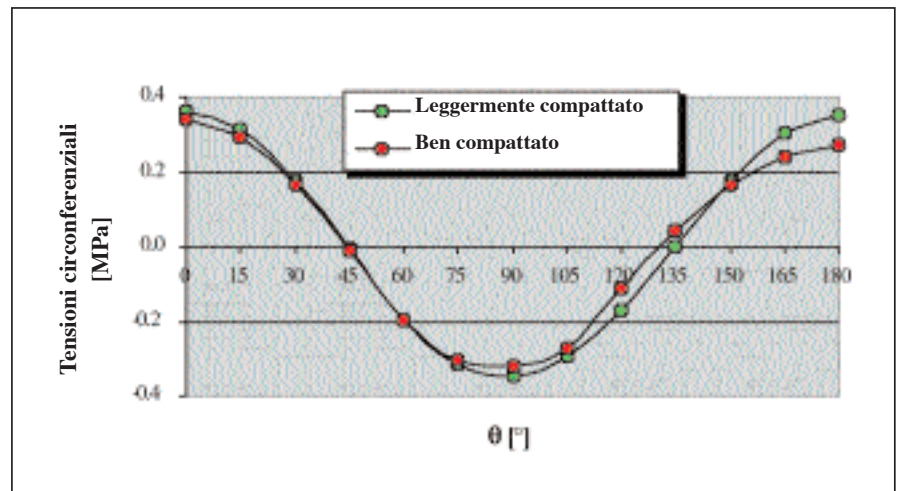
- le tensioni di trazione, rispetto a quelle con angolo d'appoggio $2\alpha = 60^\circ$, diminuiscono per entrambi i due diversi gradi di compattazione;
- per angoli d'appoggio $2\alpha \geq 90^\circ$ le tensioni di trazione relative all'appoggio ben compattato iniziano ad assumere valori inferiori rispetto a quelli relativi ad un appoggio de-



• Figura 4 – Diagramma delle tensioni di trazione circonferenziali al variare del grado di compattazione dell'appoggio. DN 300 ed angolo d'appoggio $2\alpha = 60^\circ$.



• Figura 5 – Diagramma delle tensioni di trazione circonferenziale al variare del grado di compattazione dell'appoggio. DN 300 ed angolo d'appoggio $2\alpha = 90^\circ$.



• Figura 6 – Diagramma delle tensioni di trazione circonferenziale al variare del grado di compattazione dell'appoggio. DN 300 ed angolo d'appoggio $2\alpha = 180^\circ$.

bolmente compattato.

Le osservazioni fatte per la tubazione in gres caratterizzata da un DN 300 valgono anche per gli altri due diametri nominali oggetto di studio, ossia DN 500 e DN 800 (figure 7, 8, 9, 10, 11, 12).

Nella tabella 4, per ciascun diametro nominale delle tubazioni oggetto di studio, sono riportate in funzione dell'angolo d'appoggio e del grado di compattazione dell'appoggio le massime tensioni di trazione circonferenziale, l'ascissa angolare θ in corrispondenza delle quali si generano ed il coefficiente di sicurezza η .

Il coefficiente η risulta così definito:

$$\eta = \frac{\sigma_{R}^{fl}}{\sigma_{max}}$$

dove:

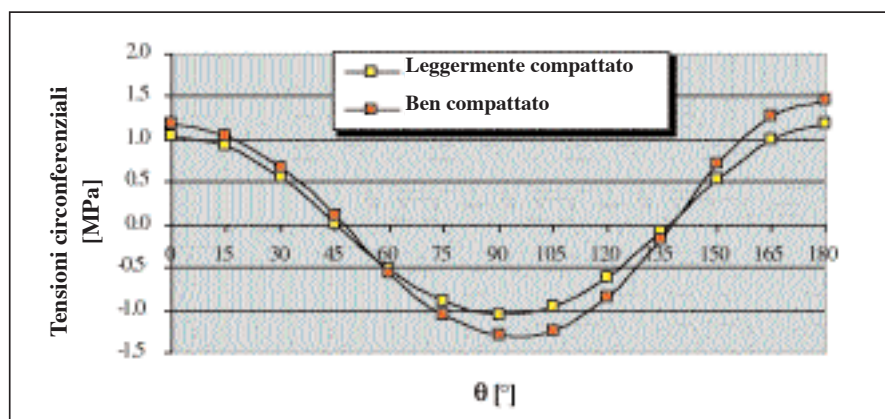
σ_{max} = è la massima tensione di trazione lungo il profilo circonferenziale del tubo oggetto di studio;

σ_{R}^{fl} = è la tensione di rottura a trazione per flessione (nelle elaborazioni tale valore è stato assunto pari a 15 MPa).

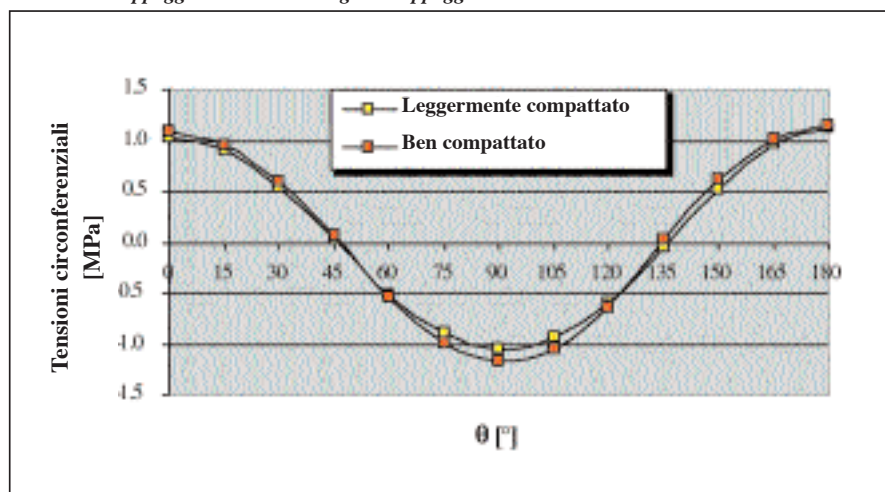
3. Conclusioni

Tramite la modellazione agli elementi finiti si è analizzato come l'angolo d'appoggio ed il grado di compattazione dell'appoggio influenzano lo stato tensionale delle tubazioni in gres di diverso diametro.

Per ciascuna tubazione in gres analizzata è risultato che un appoggio ben compattato genera uno stato tensionale di trazione circonferenziale inferiore ad un appoggio leggermente ben compattato.



• Figura 7 – Diagramma delle tensioni di trazione circonferenziali al variare del grado di compattazione dell'appoggio. DN 500 ed angolo d'appoggio $2\alpha = 60^\circ$.



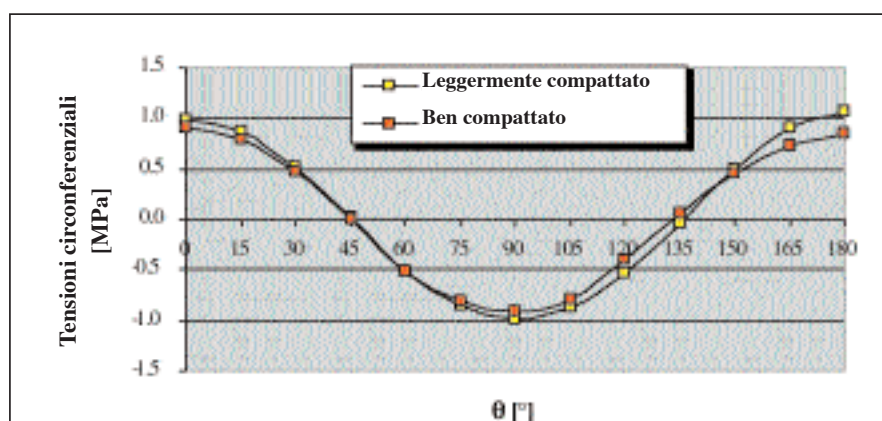
• Figura 8 – Diagramma delle tensioni di trazione circonferenziale al variare del grado di compattazione dell'appoggio. DN 500 ed angolo d'appoggio $2\alpha = 90^\circ$.

DN mm	Angolo d'appoggio	Grado di compattazione	σ_{max} MPa	θ	η
300	60°	Ben compattato	0.59	180°	25
300	90°	Ben compattato	0.47	90°	32
300	180°	Ben compattato	0.34	0°	44
300	60°	Leggermente compattato	0.41	180°	37
300	90°	Leggermente compattato	0.39	180°	38
300	180°	Leggermente compattato	0.36	0°	42
500	60°	Ben compattato	1.46	180°	10
500	90°	Ben compattato	1.17	90°	13
500	180°	Ben compattato	0.91	0°	16
500	60°	Leggermente compattato	1.18	180°	13
500	90°	Leggermente compattato	1.13	180°	13
500	180°	Leggermente compattato	1.06	180°	14
800	60°	Ben compattato	2.82	180°	5
800	90°	Ben compattato	2.23	180°	7
800	180°	Ben compattato	1.79	90°	8
800	60°	Leggermente compattato	2.58	180°	6
800	90°	Leggermente compattato	2.45	180°	6
800	180°	Leggermente compattato	2.31	180°	6

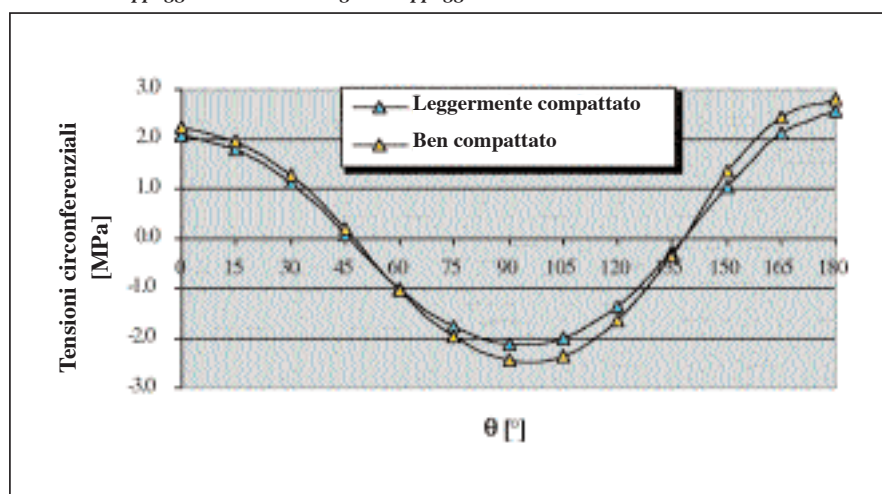
• Tabella 4 - Tensioni di trazione circonferenziale massima

tato per angoli d'appoggio $2\alpha \geq 90^\circ$, invece per angoli d'appoggio $2\alpha < 90^\circ$ avviene il contrario.

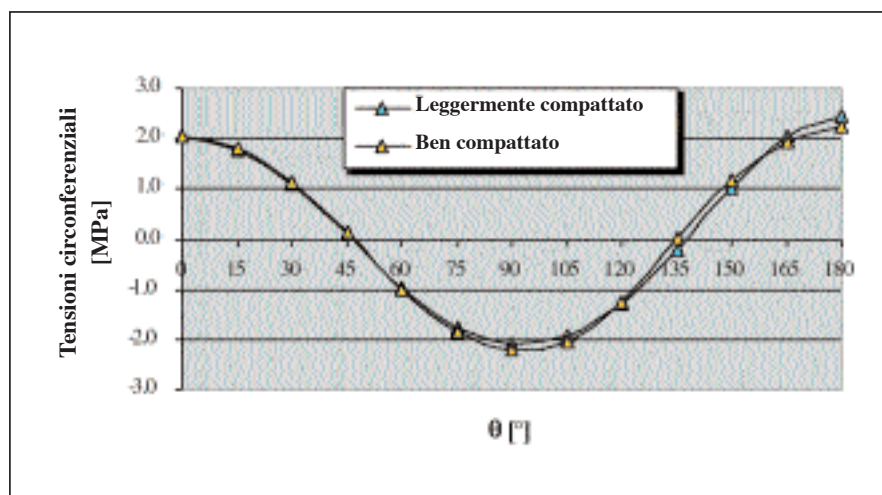
Il risultato più interessante di tale analisi è quello relativo alla sicurezza strutturale offerto da tali tubazioni; il coefficiente di sicurezza strutturale varia da un minimo $\eta = 5$ per tubazioni di DN 800 ad un massimo $\eta = 44$ per tubazioni di DN 300, ciò permette di affermare che il gres offre notevoli garanzie riguardo la sicurezza strutturale. Inoltre, l'invariabilità temporale della microstruttura del materiale gres (fattore di notevole importanza), riflettendosi sui parametri meccanici (modulo elastico e delle resistenze meccaniche), garantisce l'invariabilità temporale del coefficiente di sicurezza strutturale η .



• Figura 9 – Diagramma delle tensioni di trazione circonferenziale al variare del grado di compattazione dell'appoggio. DN 500 ed angolo d'appoggio $2\alpha = 180^\circ$.



• Figura 10 – Diagramma delle tensioni di trazione circonferenziale al variare del grado di compattazione dell'appoggio. DN 800 ed angolo d'appoggio $2\alpha = 60^\circ$.



• Figura 11 – Diagramma delle tensioni di trazione circonferenziale al variare del grado di compattazione dell'appoggio. DN 800 ed angolo d'appoggio $2\alpha = 90^\circ$.



Bibliografia

Gordon J.E. – *The Science of Structures and Materials* – Scientific American Books Inc., New York, 1988.

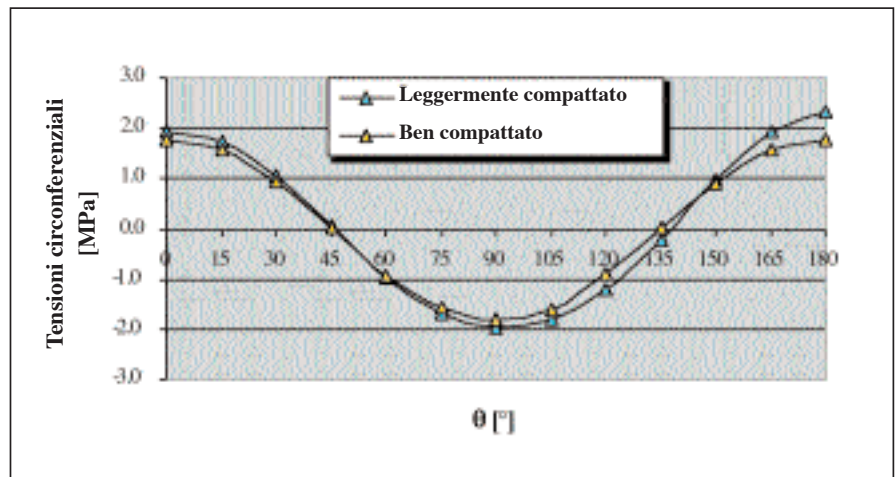
Harteley J.D., Duncan J.M. – *E' and its variation with depth* – Journal of Transportation Engineering, ASCE, September 1987.

Miglio A. – *L'interazione tubo-terreno nel calcolo statico delle tubazioni interrate. Metodi empirici e metodi razionali* – Tesi di Laurea, Università della Calabria, 1999.

UNI EN 295 Parte (1992) – *Tubi ed elementi di gres e relativi sistemi di giunzione, destinati alla realizzazione di impianti di raccolta e smaltimento di liquami. Specificazioni.*

UNI EN 1610 (1999) – *Costruzione e collaudo di connessioni di scarico e collettori di fognatura.*

Wilson E.L.Habibullah A. - *SAP90 Users Manual* - Computer & Structures, Inc., Berkeley, California, 1988.



• Figura 12 – Diagramma delle tensioni di trazione circonferenziale al variare del grado di compattazione dell'appoggio. DN 800 ed angolo d'appoggio $2\alpha = 180^\circ$.