

L'IMPIEGO DEI CONTENITORI TUBOLARI IN GEOSINTETICO NEL RIPRISTINO E NELLA VALORIZZAZIONE AMBIENTALE

Carrubba P. *, Pavanello P. **, Frigo L. ***

* Università degli Studi di Padova, dip. ICEA, Padova

** Università degli Studi di Padova, dip. ICEA, Padova

*** Geosintex srl, Sandrigo, Vicenza

SOMMARIO

I contenitori tubolari in geosintetico stanno ricevendo un crescente interesse nell'ambito dell'ingegneria civile, ambientale ed industriale. Trovano prevalente impiego nella difesa costiera e fluviale, nelle opere di sbarramento e di colmata e nella disidratazione di fanghi.

Tali manufatti hanno un'evidente importanza nel ripristino e nella valorizzazione ambientale, anche alla luce della ridotta impronta di carbonio che essi comportano rispetto alle tradizionali opere in calcestruzzo. La memoria analizza il comportamento tenso-deformativo dei contenitori tubolari sotto varie condizioni al contorno e di carico, al fine di inquadrarne l'importanza in ambito geotecnico e di evidenziare gli aspetti meritevoli di particolare attenzione.

Parole chiave: geosintetico, geo-tubo, geotessile tubolare, ripristini ambientali.

1 INTRODUZIONE

I geo-tubi sono elementi tubolari in geosintetico, generalmente propilene o poliestere ad alta resistenza, riempito di terreno. Possono essere realizzati in varie lunghezze e con differenti diametri, in relazione alle esigenze di progetto.

La loro messa in opera prevede il riempimento mediante pompaggio di una miscela fluida di acqua e terreno: le proporzioni sono tipicamente dell'ordine di 80% acqua e 20% solido. In questa fase la permeabilità del contenitore tubolare permette all'acqua di drenare rapidamente cosicché il materiale solido, contenuto al suo interno, possa addensarsi e divenire zavorra per la stabilità del manufatto.

I geo-tubi, anche in ragione del loro basso costo di realizzazione, presentano svariati campi d'impiego, sia nell'ambito ambientale che in quello industriale.

In ambito ambientale sono diffusamente impiegati come elementi sommersi o semi-sommersi per la difesa costiera, nonché per la formazione di isole artificiali e sbarramenti fluviali; in questi casi i geotessili tubolari vengono zavorrati con terreno reperibile presso la zona di installazione, purché idoneo all'uso, anche sotto il profilo della compatibilità ambientale.

Tali manufatti hanno anche dato prova di una buona performance nella difesa degli apparati dunali in occasione di eventi meteorologici estremi. In questo caso i geo-tubi fungono da nucleo della duna mentre la copertura

più superficiale può essere selezionata in modo da permettere lo sviluppo della vita vegetale.

I geo-tubi si prestano, inoltre, ad essere utilizzati come elementi di confinamento (arginature) per interventi temporanei o di emergenza, in virtù dei tempi ridotti di posa in opera.

Vi è poi l'ambito d'impiego relativo alla filtrazione e deidratazione di fanghi industriali o di sedimenti inquinati: in questo caso i geo-tubi vengono utilizzati come filtri per la separazione della fase solida da quella liquida (Fig. 1), ed è necessario un condizionamento chimico della miscela in ingresso al geo-tubo. Tale operazione varia in relazione alla natura del materiale da addensare; la fase fluida, così separata, è ricca di elementi inquinanti e dev'essere veicolata verso un impianto di depurazione.

Un'ulteriore applicazione, che si differenzia dalle precedenti, è quella dello stoccaggio di fanghi inquinanti: in questo caso è richiesto che l'involucro esterno abbia caratteristiche di impermeabilità e non viene quindi realizzato con un geotessile bensì con una geomembrana.

La posa in opera dei geotessili tubolari è generalmente a carattere definitivo ma, qualora se ne rendesse necessaria la rimozione, essa può essere effettuata tramite sollevamento, se il geo-tubo è di lunghezza contenuta, o con convenzionale escavatore meccanico.

Si ricorda, inoltre, come la realizzazione di geo-tubi comporti una ridotta impronta di carbonio rispetto alle tradizionali opere in calcestruzzo e, sotto questo profilo, la tecnologia sposa il concetto di sostenibilità ambientale.

I geo-tubi, come tutte le opere composite devono garantire l'equilibrio interno e quello esterno. L'equilibrio interno richiede che la tensione mobilizzata nel geosintetico sia inferiore a quella di rottura, mentre l'equilibrio esterno richiede la stabilità dei manufatti sotto le azioni esterne.

Ai fini dell'equilibrio interno, le azioni da esaminare sono quelle relative al pompaggio, agli spostamenti differenziali e ai sovraccarichi. Con riferimento all'equilibrio esterno, le azioni da considerare sono quelle della spinta della terra, nel caso di geo-tubi impilati con funzione di opere di sostegno a gravità, o l'azione della corrente, quando essi siano utilizzati come opere di difesa costiera e fluviale. Sempre nell'ambito dell'equilibrio esterno, potrebbe risultare delicata la verifica di stabilità globale di geo-tubi impilati, a causa della ridotta aderenza all'interfaccia con la fondazione o con altri geo-tubi.



Figura 1 – Esempio di applicazione di geo-tubi per lo stoccaggio e la deidratazione di fanghi industriali (cortesia Geosintex srl).

2 STATO DELL'ARTE

In letteratura tecnica sono presenti alcuni studi inerenti le verifiche di stabilità interna e la valutazione delle trazioni di progetto nel geosintetico, condotti in forma chiusa o al discreto.

I primi metodi di calcolo, in forma analitica, sono stati proposti da Liu e Silvester (1977), Kazimierowicz (1994), Carroll (1994), Leshchinsky et al. (1996), Plaut e Suherman (1998). Si tratta di analisi bidimensionali di una membrana flessibile, di prefissata circonferenza, sollecitata da una certa pressione interna iniziale.

In particolare, il metodo proposto da Leshchinsky et al. (1996) si basa sulle seguenti ipotesi: problema analizzato in stato piano di tensione, perdite di pressione durante la fase di pompaggio trascurabili (la pressione nel geo-tubo è alla base dell'analisi), peso proprio del geosintetico trascurabile, stato tensionale interno di tipo idrostatico (miscela omogenea) ed infine assenza di forze tangenziali tra geosintetico e materiale di riempimento.

Con riferimento ad una generica sezione del geo-tubo (Fig. 2), la geometria dell'involucro può essere definita da una funzione incognita $y=f(x)$. Partendo dalla correlazione tra pressione interna e curvatura, gli autori ricavano la seguente equazione differenziale:

$$T \cdot y'' - (p_0 + \gamma \cdot x) \left[1 + (y')^2 \right]^{\frac{3}{2}} = 0 \quad (1)$$

nella quale γ è il peso di volume del fango all'interno del geo-tubo, p_0 la pressione di pompaggio e T la forza di trazione nel geotessuto, costante lungo tutto il perimetro avendo trascurato le forze d'attrito tra fango e geosintetico e sulla superficie di contatto tra il geosintetico e il piano di fondazione.

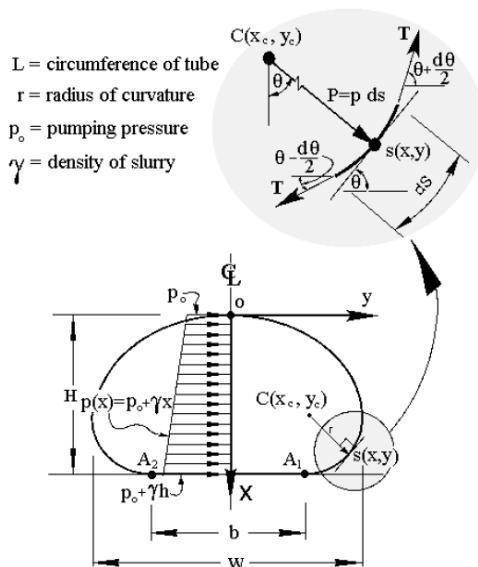


Figura 2 – Sezione trasversale di un geo-tubo e relativa simbologia utilizzata (da Leshchinsky et al., 1996).

L'eq. (1) è un'equazione differenziale non lineare, la cui soluzione in forma chiusa è assai complessa ma che può essere risolta per via numerica, fornendo una relazione tra la geometria del tubo $y(x)$, la forza di trazione T nel geotessile, la pressione di pompaggio p_0 , il peso di volume del fango γ e l'altezza del tubo H .

Essendo generalmente il peso di volume γ del materiale di riempimento noto, una volta fissata la circonferenza L del geo-tubo e uno dei tre parametri T , H , p_0 è possibile determinare la geometria $y(x)$ del geo-tubo e il valore dei rimanenti due parametri.

A tal riguardo, riveste particolare interesse pratico il codice di calcolo automatico GeoCoPS (Leshchinsky and Leshchinsky, 1996) che implementa il metodo summenzionato e permette il calcolo della geometria deformata del geo-tubo e la tensione nel geotessile in relazione alla circonferenza, alla pressione di iniezione e/o all'altezza del geo-tubo.

Più recentemente alcune soluzioni analitiche sono state discusse da Malik (2009). Per quanto riguarda possibili diverse condizioni al contorno, Plaut e Suherman (1998), Guo et al. (2011) hanno esaminato la parziale o totale sommersione del manufatto e la deformabilità del piano di fondazione, mentre Plaut e Klusman (1999) hanno preso in esame due configurazioni tipiche di geo-tubi sovrapposti; Ghavanloo e Daneshmand (2009) hanno

analizzato l'effetto di diverse forme del piano d'appoggio, nell'ipotesi di fondazione rigida; Plaut e Stephens (2012) hanno esaminato le fasi di riempimento, considerando anche lo sviluppo di attrito tra il contenitore ed il contenuto densificato. Infine, Zhu et al. (2014) hanno svolto uno studio di stabilità globale di geo-tubi impilati utilizzando il codice di calcolo SLIDE (Rocscience 2013).

Analisi al discreto sono state proposte da Cantré (2002), utilizzando il codice di calcolo ABAQUS, mentre un confronto tra metodo analitico e modello fisico è stato proposto da Cantré e Saathoff (2011).

3 MODELLO NUMERICO

Nella presente memoria vengono presentati alcuni risultati ottenuti da analisi numerica: a tal scopo è stato implementato un modello di geo-tubo nel codice di calcolo Flac 2D 8.0. Tale codice implementa l'analisi del continuo risolvendo le equazioni differenziali con il metodo delle differenze finite di tipo esplicito.

Il modello (Fig. 3) schematizza un geo-tubo in condizione emersa, avente circonferenza pari a 16.3 m, riempito a bassa pressione di pompaggio (0.8 kPa). In questo caso l'azione dovuta al peso proprio del materiale di riempimento è preponderante rispetto alla pressione di pompaggio.

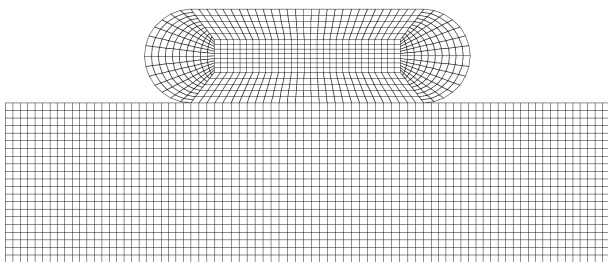


Figura 3 – Modello numerico Flac di un geo-tubo e relativa suddivisione in zone.

Il geotessile tubolare è stato schematizzato mediante 86 elementi tipo beam a comportamento elastico, aventi sezione pari a $1.0 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$, modulo elastico pari a $1.15 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$ e rigidità flessionale pari a zero, considerando il geotessile perfettamente flessibile. Il volume interno del geo-tubo è stato suddiviso in 773 zone; al fine di simulare il comportamento iniziale del materiale fluido appena iniettato all'interno del contenitore questo è stato descritto come un mezzo elastico con parametri di elasticità prossimi a quelli dell'acqua, ovvero modulo di compressibilità K (bulk modulus) pari a $2.0 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$ e coefficiente di Poisson prossimo a 0.5.

Tra il materiale di riempimento ed il geotessile esterno sono stati poi inseriti degli elementi d'interfaccia, con attrito nullo in considerazione del fatto che non si sviluppano azioni tangenziali tra il fluido e l'involucro. Le costanti di rigidità di tali elementi sono $K_S = 1.0 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$ e $K_N = 1.0 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$.

Il terreno di fondazione, considerato fuori falda, è

discretizzato per uno spessore pari a 3.5 m ed è stato suddiviso in 1659 zone con un peso di volume pari a 18 kN/m^3 . In una prima fase la fondazione è stata considerata pressoché rigida, assegnando al materiale un comportamento elastico con valori dei moduli elastici molto alti ($K = 2.8 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$ e $G = 2.1 \cdot 10^8 \text{ N/m}^2$).

In una seconda fase si è considerato un possibile cedimento del terreno di fondazione, variando le caratteristiche del terreno fino a quelle di un mezzo elastoplastico con costanti elastiche $K = 1.7 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$ e $G = 3.4 \cdot 10^4 \text{ N/m}^2$ e con parametri di resistenza al taglio $\phi = 0$ e $c = 10 \text{ kPa}$.

Anche tra terreno di fondazione ed elementi beam sono stati inseriti degli elementi di interfaccia con rigidità coincidenti con quelle prima indicate ($K_S = 1.0 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$ e $K_N = 1.0 \cdot 10^9 \text{ N/m}^2$).

4 ANALISI E DISCUSSIONE DEI RISULTATI

Sulla base del modello numerico precedentemente descritto è stata svolta una serie di analisi per evidenziare l'effettiva influenza dei vari parametri di carico e delle condizioni al contorno.

Come prima schematizzazione, al fine di consentire un confronto con i risultati forniti dal programma GeoCoPS, che implementa il metodo di Leshchinsky et al. (1996), si è considerato un geo-tubo poggiato su una base rigida con contatto privo di attrito. Nell'ulteriore ipotesi di un peso di volume della miscela di riempimento pari a $\gamma = 12 \text{ kN/m}^3$, si ottengono, con i due metodi, le configurazioni del geo-tubo rappresentate in Fig. 4.

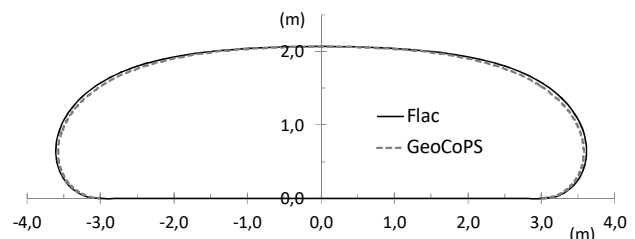


Figura 4 – Configurazione di un geo-tubo riempito a bassa pressione: confronto tra modello Flac e risultati codice GeoCoPS.

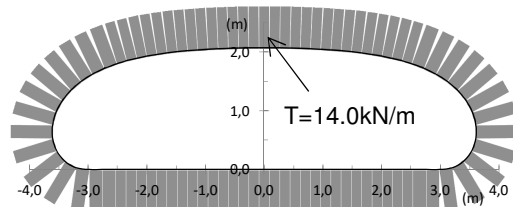


Figura 5 – Distribuzione delle trazioni nel geosintetico ottenute dal modello Flac nelle ipotesi di appoggio rigido e contatto privo di attrito.

Come si può osservare vi è un buon accordo tra le

geometrie ottenute con i due metodi di calcolo: le lievi differenze possono essere imputabili al fatto che il programma GeoCoPS considera il geotessile come inestensibile. L'altezza massima del geo-tubo, lungo l'asse di simmetria, risulta pari a 2.07 m.

La corrispondente distribuzione delle tensioni nel geosintetico, ottenuta mediante il modello numerico Flac, è diagrammata nella Fig. 5. Come si può osservare la tensione presenta una distribuzione uniforme lungo tutto il geosintetico, con valore pari a 14.0 kN/m, coincidente con quello fornito dal programma GeoCoPS.

Un primo parametro che è stato fatto variare è quello della densità del fluido all'interno del geo-tubo. Come descritto in precedenza, l'immissione di terreno all'interno del geo-tubo avviene per pompaggio di una miscela di acqua e terreno molto fluida. Per tale motivo il campo di variabilità del peso di volume del riempimento non può essere molto ampio: sono state considerate le densità di 10 kN/m³, circa pari a quella dell'acqua, 12 kN/m³ e 14 kN/m³, mantenendo costanti gli altri parametri.

La variazione di densità comporta variazioni minime nella geometria del geo-tubo, non direttamente percepibili nella forma assunta dall'involucro, e delle lievi differenze della trazione nel geosintetico.

La successiva Tab. I riassume i valori di trazione nel geosintetico, ottenuti, per i vari casi analizzati, con il modello Flac e con il programma GeoCoPS. A titolo di confronto sono riportati anche i valori di trazione T stimabili con la formula di Mariotte, relativa a tubi circolari, in pressione, a parete sottile:

$$T = pD/2 \quad (2)$$

nella quale p è la pressione media, valutata in corrispondenza della sezione verticale centrale e D l'altezza del geo-tubo in tale sezione.

Tabella I. – Trazioni nel geotessile in funzione del peso di volume del riempimento.

Peso di volume riempimento (kN/m ³)	Trazione massima (kN/m)		
	FLAC	GeoCoPS	Mariotte eq. (2)
10	11.8	12.0	11.6
12	14.0	14.0	13.7
14	16.2	16.0	15.8

Tabella II. – Altezza del geo-tubo in funzione del peso di volume del riempimento.

Peso di volume riempimento (kN/m ³)	Altezza geo-tubo (m)	
	FLAC	GeoCoPS
10	2.08	2.08
12	2.07	2.08
14	2.07	2.08

La Tab. II riporta, invece, i valori di altezza massima

del geo-tubo, in corrispondenza dell'asse di simmetria centrale, ottenuti con i due codici di calcolo.

Dall'esame delle tabelle si può osservare come vi sia una sostanziale convergenza dei risultati ottenuti con il modello Flac rispetto a quanto indicato dalla teoria di Leshchinsky et al. (1996). L'incremento del peso di volume del fluido di riempimento si trasferisce in modo quasi proporzionale in incremento di trazione nel geosintetico; si può inoltre osservare come i risultati ottenuti con i due codici di calcolo non differiscano di molto dal risultato della semplice formula di Mariotte, che, per quanto approssimativa, può comunque trovare impiego nella fase di pre-dimensionamento del manufatto. Per quanto riguarda la forma del geo-tubo, invece, si ha una sostanziale indipendenza dal peso di volume del riempimento.

A partire da questo schema di calcolo, si è utilizzato il modello Flac per esaminare l'influenza di alcune condizioni al contorno, che non possono essere esaminate con il metodo di Leshchinsky et al. (1996).

Per prima cosa è stato preso in esame l'effetto dell'attrito sul piano di appoggio: in questo caso, pur mantenendo la fondazione rigida, si è considerata la presenza di un contatto con attrito tra il terreno di fondazione ed il geo-tubo. Un esempio di quanto ottenuto, in termini di trazioni nel geosintetico, è rappresentato nella successiva Fig. 6, relativa ad un riempimento con peso di volume pari a 12 kN/m³: in particolare la Fig. 6a illustra il caso di attrito all'appoggio pari a 10°, mentre la Fig. 6b è relativa al caso di attrito pari a 20°.

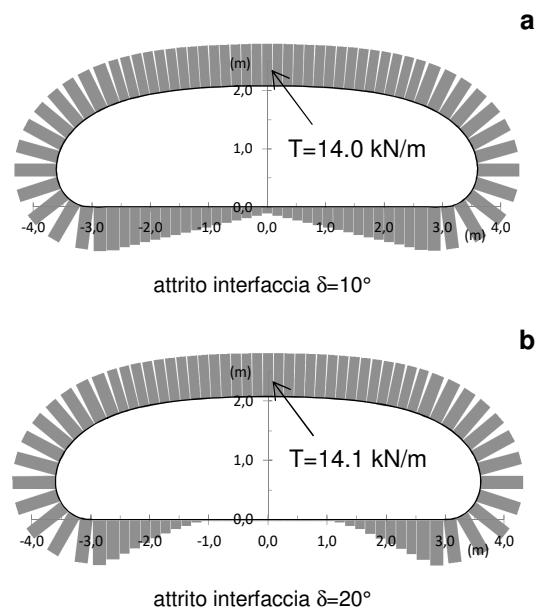


Figura 6 – Trazioni nel geotessile nell'ipotesi di riempimento fluido, appoggio rigido e contatto dotato di attrito: a) caso di angolo d'attrito d'interfaccia pari a 10° e b) caso di angolo d'attrito d'interfaccia pari a 20°.

Come si può osservare confrontando la Fig. 6 con la precedente Fig. 5, la presenza dell'attrito alla base svolge un benefico effetto di riduzione delle trazioni nella parte inferiore del geo-tubo. È altresì interessante osservare

come la forma del geo-tubo non risenta dell'attrito e parimenti come il valore di trazione nella sommità del geo-tubo sia sostanzialmente lo stesso nei tre casi.

Successivamente, si è analizzato l'effetto dell'addensamento del sedimento all'interno del geo-tubo, dopo aver raggiunto il colmo, facendo variare le proprietà del materiale interno da mezzo elastico a mezzo elasto-plastico con peso di volume $\gamma=14 \text{ kN/m}^3$, costanti elastiche $K=8.3 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ e $G=1.8 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ ed angolo di resistenza al taglio pari a 15° . È stato, inoltre, considerato un angolo di attrito d'interfaccia, tra il terreno all'interno del geo-tubo e la parete dell'involucro, pari a 10° . In tale passaggio, non si sono riscontrate variazioni degne di nota, né nella forma del geo-tubo né nello stato tensionale del geotessile.

Dato che, sovente, i geo-tubi vengono sovrapposti, secondo configurazioni piramidali, al fine di formare barriere di maggiore altezza, la fase successiva dello studio ha analizzato l'effetto del sovraccarico trasmesso da un eventuale secondo geo-tubo sovrapposto al primo. Tale azione è stata schematizzata con una pressione uniforme, pari a 24 kN/m^2 , agente nella parte superiore.

Le analisi sono state condotte nelle ulteriori ipotesi di fondazione rigida ed angolo d'attrito pari a 10° all'interfaccia tra geo-tubo e terreno di fondazione. La successiva Fig. 7 mostra la variazione di forma del geo-tubo in seguito all'azione del sovraccarico nelle ipotesi che quest'ultimo venga applicato quando il riempimento è ancora fluido (Fig. 7a) e quando è già addensato, ovvero con comportamento analogo a quello di un terreno (Fig. 7b). Nel primo caso si è considerato un riempimento fluido avente peso di volume pari a 12 kN/m^3 per entrambe le condizioni, di tubo singolo e di tubo con sovraccarico.

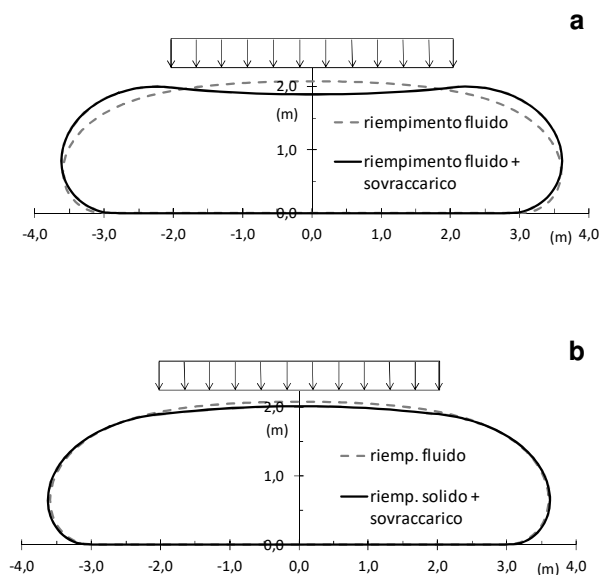


Figura 7 – Variazione della forma di un geo-tubo, su piano rigido, in seguito all'applicazione di un sovraccarico, nell'ipotesi: a) di riempimento ancora fluido e b) di riempimento addensato.

Nel secondo caso, invece, dopo aver raggiunto la configurazione di riempimento, le proprietà del materiale interno sono state cambiate, da mezzo elastico a mezzo elasto-plastico con peso di volume $\gamma=14 \text{ kN/m}^3$, costanti elastiche $K=8.3 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ e $G=1.8 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2$ ed angolo di resistenza al taglio cautelativamente posto pari a 15° . Inoltre, tra il terreno all'interno del geo-tubo e la parete dell'involucro, è stato considerato un angolo di attrito d'interfaccia pari a 10° .

La Fig. 7 mette in luce il diverso comportamento nei due casi: se il riempimento del geo-tubo è ancora fluido il sovraccarico induce un aumento della pressione del fluido interno che comporta una rilevante deformazione del geo-tubo con cedimento della parte superiore e rigonfiamenti ai lati. Diversamente, se il sedimento è addensato, il sovraccarico si trasmette alla fondazione secondo un cono di diffusione delle tensioni e le deformazioni indotte nel geo-tubo sono minime. Anche lo stato tensionale indotto nel geosintetico è nettamente diverso nei due casi, come illustrato in Fig. 8.

Nel primo caso, con riempimento ancora fluido, la tensione passa dalla distribuzione propria del caso di geo-tubo senza sovraccarico (Fig. 6a), con valore massimo di 14.0 kN/m , alla distribuzione di Fig. 8a, con valore massimo di 32.8 kN/m . Diversamente, nel caso di riempimento addensato (Fig. 8b) l'involucro esterno deve sopportare un incremento di tensione assai minore, raggiungendo i 19.2 kN/m nella parte superiore.

Tale aspetto ha un'importante rilevanza pratica, dato che è sicuramente preferibile procedere alla sovrapposizione dei geo-tubi dopo aver lasciato il tempo, ai geo-tubi inferiori, di raggiungere un certo grado di addensamento.

Oltre agli aspetti legati al sovraccarico, si è analizzato l'effetto di un possibile cedimento della fondazione.

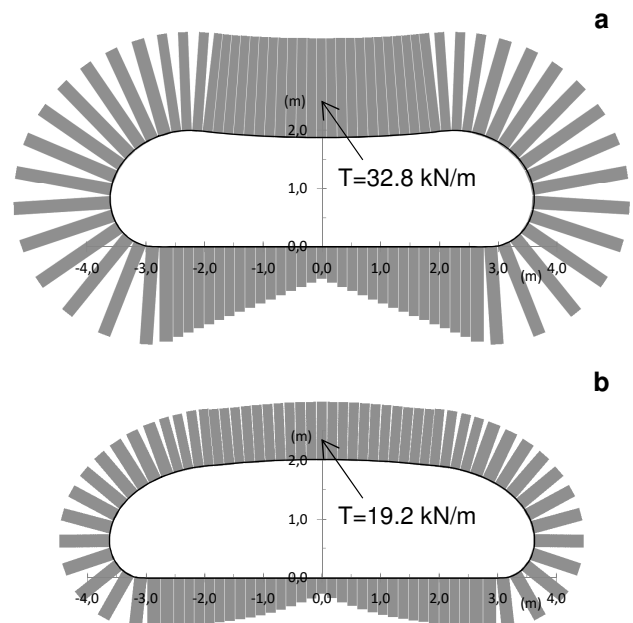


Figura 8 – Stato tensionale in un geo-tubo, su piano rigido, in seguito all'applicazione di un sovraccarico, nell'ipotesi: a) di riempimento ancora fluido e b) di riempimento addensato.

A tal fine, le proprietà del terreno di appoggio sono state modificate, da mezzo elastico a mezzo elastoplastico, con costanti elastiche $K=1.7 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$ e $G=3.4 \cdot 10^4 \text{ N/m}^2$ e parametri di resistenza al taglio $\phi=0$ e $c=10 \text{ kPa}$.

Anche in questo caso le analisi sono state svolte nelle due ipotesi, di cedimento rapido, contestuale ad un riempimento del geo-tubo ancora fluido e di cedimento lento, schematizzato come avvenuto in una fase successiva all'addensamento del terreno nel geo-tubo. Nei due casi, per il materiale all'interno del geo-tubo e per le interfacce sono stati adottati i medesimi parametri indicati per il caso precedente di geo-tubo con sovraccarico.

I risultati delle analisi sono riportati in Fig. 9 in termini di configurazione deformata del geo-tubo e del terreno di fondazione, rispettivamente per il caso di riempimento ancora fluido (Fig. 9a) e di riempimento addensato (Fig. 9b). Si può osservare come il riempimento del geo-tubo, con la sua diversa rigidezza, interagisca con il terreno di fondazione determinando due diversi profili di cedimento. In particolare, nel caso di riempimento addensato, il cedimento della fondazione appare più omogeneo rispetto al caso di riempimento ancora fluido, che, di fatto, trasmette una pressione pressoché uniforme al piano di appoggio determinando un cedimento maggiore al centro.

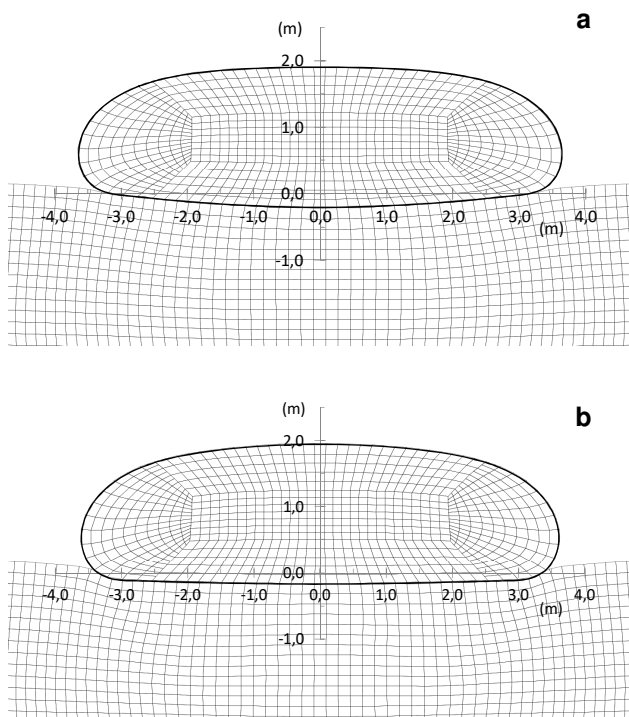


Figura 9 – Variazione della forma di un geo-tubo in seguito a un cedimento del piano di fondazione, nell'ipotesi: a) di riempimento ancora fluido e b) di riempimento addensato.

Tali differenti distribuzioni di cedimento corrispondono a differenti distribuzioni di pressioni sul piano di appoggio e si riflettono anche sullo stato tensionale del geotessile, come illustrato in Fig. 10, rispettivamente per il caso di riempimento fluido (Fig. 10a) e di riempimento addensato (Fig. 10b).

In entrambi i casi si osserva, rispetto allo stato iniziale

(Fig. 6a), una riduzione della tensione nella parte superiore ed un incremento in quella inferiore. Tale incremento è decisamente maggiore nel secondo caso per il quale si raggiunge un valore di tensione nel lembo inferiore pari a 13.3 kN/m , valore assai prossimo al valore massimo, nel lembo superiore nello stato iniziale (14.0 kN/m). Tale circostanza deve suggerire particolare cautela nella realizzazione della cucitura del geo-tubo, che viene generalmente realizzata proprio nel lembo inferiore del geo-tubo, in corrispondenza dell'asse di simmetria. Tale zona, infatti, è quella meno sollecitata nell'ipotesi di piano di appoggio rigido ma, come mostrato dalle analisi, tale circostanza può non essere più vera in caso di cedimento del terreno di fondazione.

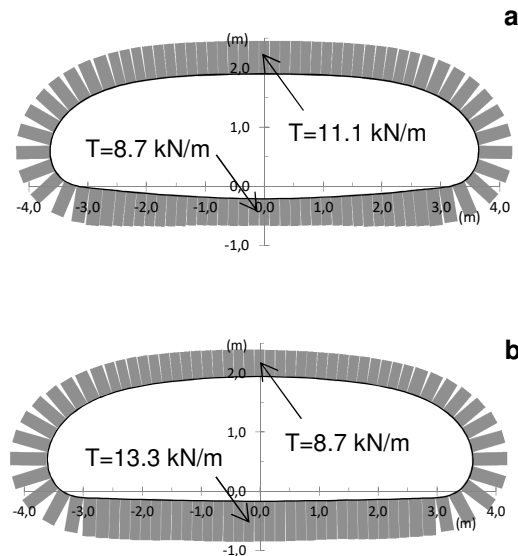


Figura 10 – Stato tensionale in un geo-tubo in seguito a un cedimento del piano di fondazione, nell'ipotesi: a) di riempimento ancora fluido e b) di riempimento addensato.

5 CONCLUSIONI

Nel presente lavoro è stato analizzato il comportamento tenso-deformativo di un geo-tubo sotto diverse condizioni al contorno. Le analisi svolte con un modello numerico implementato nel codice di calcolo Flac hanno mostrato come, per il geo-tubo singolo, la fase di riempimento sia la più critica per il livello di sollecitazione indotta nel geotessile di confinamento. Tale fase è estremamente complessa da modellare dato che, a partire da uno stadio iniziale in cui il materiale di riempimento si comporta come un fluido, si assiste ad un graduale addensamento del materiale interno, con variazione delle sue proprietà meccaniche. Le analisi hanno mostrato in particolare come le variazioni di densità interna comportino variazioni minime nella forma del geo-tubo, mentre possono influenzare in maniera più significativa il livello tensionale dell'involucro.

Relativamente alle condizioni al contorno si è osservato come l'attrito alla base, generalmente trascurato nei metodi di calcolo analitici, comporti un benefico effetto di

riduzione delle tensioni che può tuttavia essere inficiato, del tutto o in parte, dal cedimento della fondazione. Tale circostanza deve essere tenuta in debita considerazione nella localizzazione delle cuciture che danno continuità al geo-tubo e che, normalmente, vengono posizionate proprio nella parte inferiore del manufatto.

Parallelamente si è osservato come il cedimento del piano di fondazione comporti una complessa interazione tra il terreno di fondazione e il materiale di riempimento del geo-tubo, tale per cui lo stato tenso-deformativo del geo-tubo dipende anche dal grado di addensamento raggiunto dal terreno all'interno del tubo stesso.

Infine, è stato analizzato l'effetto di un sovraccarico, mettendo in luce il diverso comportamento tra il caso di riempimento del geo-tubo ancora fluido e già addensato: alla luce della minore sollecitazione indotta nel rivestimento in quest'ultimo caso si deve senza dubbio cercare che la sovrapposizione dei geo-tubi avvenga solo dopo aver dato modo, al geo-tubo inferiore, di addensarsi.

BIBLIOGRAFIA

- Cantré S., 2002. *Geotextile tubes—analytical design aspects*. Geotextiles and Geomembranes, 20 (5), 305-319.
- Cantré S., Saathoff F., 2011. *Design method for geotextile tubes considering strain-formulation and verification by laboratory tests using photogrammetry*. Geotextiles and Geomembranes, 29 (3), 201-210.
- Carroll R. P., 1994. *Submerged geotextile flexible forms using noncircular cylindrical shapes*. Geotechnical Fabrics Report, 12, 4-4.
- Ghavanloo E., Daneshmand F., 2009. *Two-dimensional analytical analysis of equilibrium shape of inflated geomembrane tube resting on rigid foundation with arbitrary shape*. Geotextiles and Geomembranes, 27 (2), 99-106.
- Guo W., Chu J., Yan S., 2011. *Effect of subgrade soil stiffness on the design of geosynthetic tube*. Geotextiles and Geomembranes, 29 (3), 277-284.
- Kazimierowicz K., 1994. *Simple analysis of deformation of sand-sausages*. Fifth International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products, Hydraulic Applications and Related Research, Singapore, vol. 2, 775-778.
- Leshchinsky, D., Leshchinsky, O., Ling, H. I., Gilbert, P. A., 1996. *Geosynthetic tubes for confining pressurized slurry: some design aspects*. Journal of geotechnical engineering, 122 (8), 682-690.
- Leshchinsky, D., Leshchinsky, O. 1996. *Construction Productivity Advancement Research (CPAR) Program: Geosynthetic Confined Pressurized Slurry (GeoCoPS): Supplemental Notes for Version 1.0*. Leshchinsky Inc Newark De.
- Liu, G. S., Silvester R., 1977. *Sand sausages for beach defence work*. Proc. of the Sixth Australasian Hydraulics and Fluid Mechanics Conference, Adelaide, Australia, 340-343.
- Malík J., 2009. *Some problems connected with 2D modeling of geosynthetic tubes*. Nonlinear Analysis: Real World Applications, 10 (2), 810-823.
- Plaut R. H., Klusman C. R., 1999. *Two-dimensional analysis of stacked geosynthetic tubes on deformable foundations*. Thin-Walled Structures, 34 (3), 179-194.
- Plaut R. H., Stephens T. C., 2012. *Analysis of geotextile tubes containing slurry and consolidated material with frictional interface*. Geotextiles and Geomembranes, 32, 38-43.
- Plaut R. H., Suherman S., 1998. *Two-dimensional analysis of geosynthetic tubes*. Acta Mechanica, 129 (3), 207-218.
- Zhu M., Viswanath M., Ebrahimi A., Beech J. F., 2014. *Slope-stability charts for stacked geotextile tubes*. Proc. Geo-Congress 2014: Geo-characterization and Modeling for Sustainability, 3082-3091.

ABSTRACT

GEOSYNTHETIC TUBULAR CONTAINERS FOR THE ENVIRONMENTAL IMPROVEMENT AND RECOVERY

Keywords: geosynthetic, geo-tube, tubular geosynthetic, environmental improvement.

In the last decades, the geosynthetic tubular containers received a growing interest, due to their suitability for many civil, environmental and industrial purposes and to the low cost. Due to the reduced carbon footprint respect to the alternative solutions, these products became widespread also in the rehabilitation and improvement of the environment.

The paper deals with the stress-strain response of a single geo-tube under different boundary conditions.

Analyses were carried out with a numerical model implemented in the code FLAC. The whole behavior of the geo-tube is complex to model; in the initial stage, the filling material behaves like a fluid. During the sedimentation stage, the sludge gradually becomes denser thus varying its mechanical properties. The analysis showed that the filling step is the most critical, due to the high level of stress induced in the geotextile. The initial sludge density did not lead to a substantial shape change of the geo-tube, whereas it affected the stress level in the geosynthetic.

Friction between foundation and geo-tube, generally neglected in the analytical methods, involved a beneficial effect in reducing the tensions in the geosynthetic; otherwise, foundation compressibility may invalidate this beneficial effect, completely or in part. In this regard, the soil-structure interaction induced by the foundation settlements, depended on the sludge density.

Finally, the effect of an overload on a geo-tube filled with both fluid and thickened sludge was analyzed: in the latter case, a lower increase of stress in the geo-tubes was evident. Therefore, as an indication, the overlap of geo-tubes should be done only after the overloaded elements were properly thickened.