

Sintesi della Relazione Generale presentata al XXIV CNG

## Il rinforzo del terreno con geosintetici Recenti sviluppi tecnologici, progettuali e normativi

Nicola Moraci

Dipartimento di Ingegneria Civile, dell'Energia, dell'Ambiente e dei Materiali, Università degli Studi Mediterranea di Reggio Calabria

L'impiego dei geosintetici ha, negli ultimi vent'anni, profondamente modificato le modalità di progettazione di molti interventi d'ingegneria geotecnica e ambientale. La profonda innovazione generata dall'utilizzo di tali materiali è paragonabile, nell'ambito dell'ingegneria civile, a quella scaturita dall'utilizzo dell'acciaio per il rinforzo del calcestruzzo o, nel campo dell'elettronica e delle telecomunicazioni, a quella connessa alla realizzazione delle fibre ottiche e dei superconduttori.

A testimonianza di quanto suddetto già dieci anni fa si contavano più di 150 differenti applicazioni dei geosintetici nelle opere d'ingegneria civile e nel 2003 si poteva stimare un utilizzo su scala mondiale di circa 1,500 Mm<sup>2</sup> di geosintetici, per una quota di mercato pari a circa 3,950 M\$. Facendo riferimento ai soli muri in terra rinforzata con pannello rigido in facciata realizzati in Giappone, nel periodo 1989-2007, si evidenzia un'estensione longitudinale di opere già costruite superiore ai 100 km.

I geosintetici possono essere utilizzati nelle opere d'ingegneria geotecnica e ambientale per svolgere le funzioni di:

- **separazione:** questa funzione consiste nell'impedire la compenetrazione tra strati di terreno di differenti caratteristiche meccaniche e granulometriche; i geosintetici sono diffusamente impiegati con tale funzione nelle costruzioni di terra e nelle applicazioni stradali, ove la funzione di separazione è spesso accoppiata a quella di filtrazione;
- **filtrazione:** in tale funzione il geosintetico impedisce la migrazione delle particelle fini del terreno di base, per evitarne l'erosione, consentendo all'acqua di muoversi liberamente attraverso il terreno, senza provocare incrementi delle pressioni interstiziali all'interno del sistema filtrante (terreno di base – filtro di geotessile); esempi di applicazioni dei filtri di geotessile sono le dighe di materiali sciolti, le discariche controllate, le trincee drenanti, i dreni verticali ed orizzontali, i rivestimenti di sponda, gli strati di separazione e di rinforzo in fondazioni sommerse, le protezioni di strutture offshore;
- **drenaggio:** il geosintetico (geotessili, georeti accoppiate ad altri geosintetici, geotubi e geocompositi drenanti), di elevate caratteristiche di permeabilità, raccoglie e convoglia acqua o altri fluidi. Il flusso verso il dreno può avvenire a gravità, come nel caso dei muri di sostegno o delle trincee drenanti, o a pressione, come nel caso dei dreni verticali (Mazzucato e Moraci, 1995);
- **protezione dall'erosione superficiale,** causata dall'impatto delle precipitazioni meteoriche e dal ruscellamento delle acque superficiali (Cazzuffi et al., 1991); viene assolta dai geosintetici (geostuoie, geocelle, biostuoie, georeti e bioreti); tale funzione è diffusamente impiegata nella protezione dall'erosione superficiale dei versanti e delle opere di terra;
- **protezione meccanica,** per prevenire il danneggiamento di uno strato di terreno o di un altro materiale in seguito alle sollecitazioni meccaniche agenti durante la fase costruttiva e in esercizio; tale funzione viene ad esempio diffusamente impiegata nella costruzione degli strati barriera delle discariche di rifiuti;
- **barriera impermeabile ai fluidi o ai gas,** diffusamente utilizzata nei sistemi barriera delle discariche di rifiuti, negli strati delle pavimentazioni in asfalto, e nell'impermeabilizzazione di canali, dighe e bacini artificiali.

La Relazione Generale al XXIV CNG (Moraci, 2011) tratta della **funzione di rinforzo** che consiste nel migliorare le caratteristiche di resistenza al taglio e di deformabilità del terreno mediante l'inserimento all'interno dello stesso di geosintetici di elevata resistenza e rigidezza a trazione; risulta in tal modo possibile la realizzazione di muri a paramento verticale, pendii ripidi e rilevati anche utilizzando materiali di caratteristiche meccaniche scadenti.

Nell'ambito del rinforzo del terreno, i geosintetici (i geotessili tessuti, le geogriglie e le geocelle) possono essere utilizzati con successo per la realizzazione di muri di sostegno, spalle da ponte, rilevati e pendii ripidi in terra rinforzata; per la costruzione di rilevati rinforzati alla base fondati su terreni compressibili (anche in presenza di pali o di trattamenti colonnari); per la realizzazione di colonne di ghiaia o sabbia (GEC) rinforzate; per la costruzione di opere di difesa passiva dalle frane di crollo e di colata, dalle valanghe e di protezione costiera; per l'attraversamento di cavità localizzate superficiali; per il rinforzo di sistemi barriera di copertura e di sponda delle discariche; per ridurre la spinta delle terre agente, in condizioni sismiche, sulle opere di sostegno rigide; per il rinforzo di terreni di fondazione

(incremento della capacità portante e della rigidità) di scadenti caratteristiche meccaniche; per il rinforzo di strade pavimentate e non pavimentate.

Nella Relazione Generale (Moraci, 2011) sono stati evidenziati i principali sviluppi merceologici, tecnologici, progettuali e normativi riferiti all'impiego dei geosintetici con funzione di rinforzo facendo riferimento, solo alla progettazione dei muri in terra rinforzata.

## 1 SVILUPPI TECNOLOGICI E MERCEOLOGICI

L'utilizzo d'inclusioni come rinforzo del terreno risale a epoche remote (3000 - 4000 a.C.) quando, per migliorare il comportamento del terreno per la costruzione di muri, rilevati e argini, venivano utilizzati differenti tipi di inclusioni quali canne, rami di salice, juta, canapa, fibre di palma, vimini, bambù, pali di legno, fascine, ecc. Tra le opere più rilevanti del passato realizzate con tale tecnica si possono citare la grande Muraglia Cinese, la Ziggurat di Agar-Quf, l'imponente Torre di Dunhuang in Cina, le dighe sul Mare di Zuider in Olanda.

L'impiego dei primi materiali polimerici (oggi denominati geosintetici) per il rinforzo del terreno è ovviamente successivo alla scoperta dei primi polimeri sintetici utilizzati per la produzione degli stessi. I primi geosintetici prodotti furono i geotessili. In particolare, le prime produzioni industriali di geotessili nontessuti da fibra corta sono state realizzate in Italia e in Francia nel 1958. Mentre i primi impianti per la produzione di geotessili nontessuti a filo continuo in poliestere e in polipropilene vennero sviluppati rispettivamente in Francia ed in Austria nel 1968.

Il primo esempio d'impiego di materiali polimerici per la realizzazione di un muro in terra rinforzata risale al 1972 in Inghilterra. In tale applicazione gli elementi di rinforzo erano costituiti da fibre di vetro continue inserite all'interno di un rivestimento protettivo di resina. La prima opera in terra rinforzata realizzata negli USA con geotessili risale al 1974 e sempre a metà degli anni settanta furono condotte differenti sperimentazioni su opere in terra rinforzata realizzate utilizzando, come elementi di rinforzo, geotessili tessuti e nontessuti.

Le prime geogriglie polimeriche estruse orientate furono prodotte in Inghilterra negli anni '70 e il primo impiego di geogriglie polimeriche risale alla costruzione di un muro in terra rinforzata realizzato in una stazione ferroviaria dello Yorkshire nel 1979. Agli inizi degli anni '80 il processo produttivo delle geogriglie fu esportato negli USA e la prima applicazione di tali materiali in tale nazione risale ad un progetto di consolidamento di un versante realizzato in Texas nel 1982 mentre il primo muro in terra rinforzata venne realizzato in Oregon nel 1984.

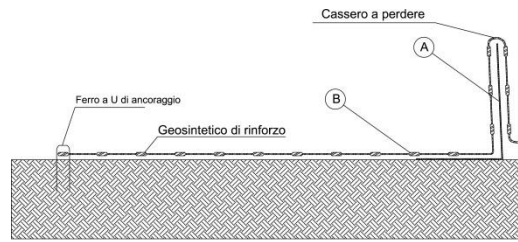
In Italia le prime applicazioni risalgono al 1986, con la realizzazione di un rilevato rinforzato a Modena e di un muro di sostegno alla base NATO di Sigonella.

La prima applicazione di materiali polimerici prodotti utilizzando fibre di elevatissima resistenza (Aramidi - Kevlar) risale al 1993 in cui i geosintetici sono stati utilizzati per la realizzazione di un rilevato stradale su terreni carsici in presenza di cavità.

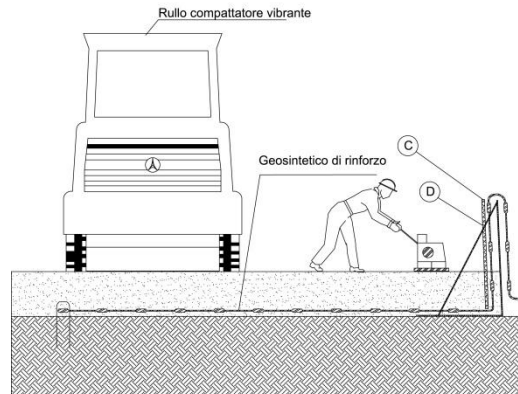
Un'altra recente applicazione di polimeri speciali, in questo caso il PVA (polivinil alcool), è stata proposta per il rinforzo di terreni coesivi stabilizzati a calce caratterizzati da valori di pH molto elevati.

La tecnica più utilizzata in Italia per la realizzazione delle terre rinforzate con geosintetici è quella del risvolto in facciata (*wrap-around*). Tale tecnica, diffusa sin dall'inizio degli anni '80 può essere utilizzata per realizzare sia opere a paramento verticale sia pendii ripidi. Per la realizzazione dell'opera vengono in genere utilizzati casseri a perdere per lo più costituiti da reti elettrosaldate (Figura 1). Tale sistema consente di ottenere una notevole uniformità della facciata con costi di posa in opera relativamente contenuti.

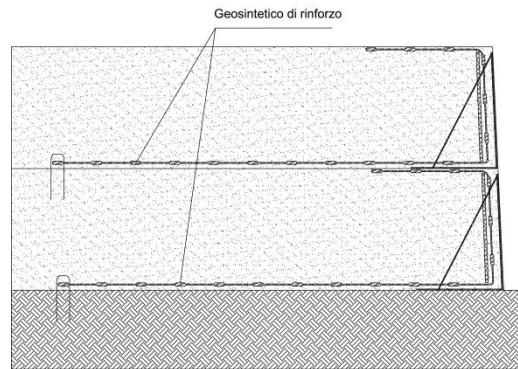
In Giappone è stata sviluppata negli anni '90 una tecnica costruttiva per la realizzazione di muri in terra rinforzata con facciata rigida (GRS-FHR) che è ormai diventata per le ferrovie Giapponesi, alla luce dell'ottimo comportamento manifestato da tali opere in occasione del terremoto di Kobe del 1995, la tecnica standard sia per la realizzazione di nuovi muri di sostegno sia per la ricostruzione di muri e rilevati danneggiati da eventi sismici o alluvionali. La tecnica costruttiva messa a punto si articola nelle fasi descritte in Figura 2.



Livellamento e compattazione del piano di fondazione.  
 Posizionamento ed allineamento dei casseri metallici sovrapponendoli per 50 mm (A).  
 Posizionamento del geosintetico di rinforzo (B)



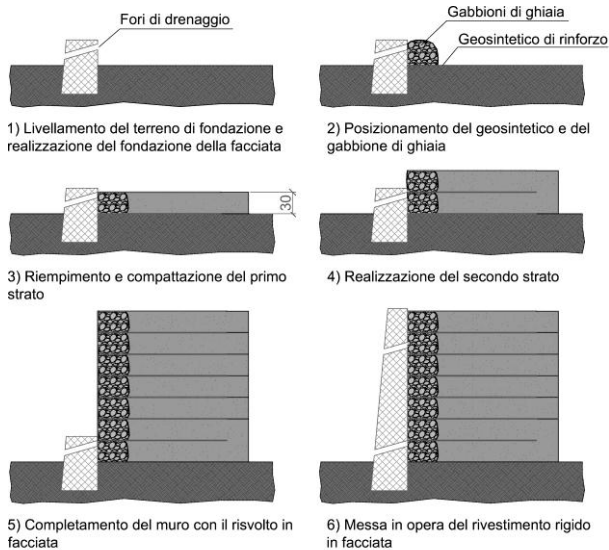
Posizionamento della stuoia in fibre vegetali (geojuta, biostuoia o biofello pre-seminato) (C) e fissaggio del tirante per l'irrigidimento del cassero (D)  
 Stendimento del terreno sopra la geogriglia in strati dello spessore di max 250mm.  
 Livellamento e compattazione del terreno utilizzando, in prossimità della facciata (per circa 1.00m) delle piastre vibranti o vibrocospatori, mentre per la parte centrale utilizzando dei rulli compattatori vibranti.



La procedura si ripete fino al completamento dell'opera.

Figura 1. Fasi di lavoro del sistema costruttivo del cassero a perdere per la realizzazione di muri in terra rinforzata con la tecnica del risolto in facciata.

Il vantaggio di questa tecnologia, rispetto ai muri a mensola tradizionali, è quello di evitare concentrazioni delle tensioni alla base del muro in corrispondenza del piede esterno dell'opera che spesso rende necessario, in tali opere, l'impiego di pali di fondazione. La presenza di una forte connessione in facciata fa sì che la stessa sia soggetta ad azioni simili a quelle agenti in corrispondenza dello stato di equilibrio limite attivo. Tale circostanza implica che il terreno delimitato dalla superficie di rottura sia soggetto a elevate tensioni di confinamento che ne aumentano la resistenza e la rigidità e quindi ne migliorano il comportamento, soprattutto in campo sismico, rispetto al caso di assenza di connessione in facciata.



#### Dettaglio costruttivo della connessione in facciata

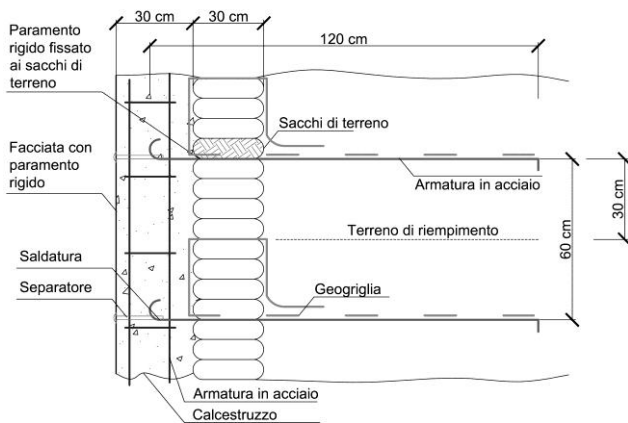


Figura 2. Sistema costruttivo dei muri in terra rinforzata con paramento rigido in facciata (GRS-FHR) sviluppato in Giappone.

In Nord America la tecnologia attualmente più utilizzata per la realizzazione di muri di sostegno e delle spalle da ponte in terra rinforzata è quella che prevede l'utilizzo di blocchi di calcestruzzo in facciata connessi ai geosintetici di rinforzo (SRW – *Segmental Retaining Wall*). In questo caso la connessione è generalmente realizzata durante la costruzione.

Pertanto, oggi, a distanza di circa 30 anni dalle prime applicazioni dei geosintetici nelle opere in terra rinforzata, grazie agli sviluppi merceologici (sviluppi di nuovi polimeri e di nuovi materiali) e tecnologici, i geosintetici sono utilizzati con successo con la funzione di rinforzo in numerosissime applicazioni.

Quando si progetta un'opera in terra rinforzata in cui si utilizza un geosintetico (materiale di produzione industriale) è necessario conoscerne in dettaglio le caratteristiche meccaniche, chimico, fisiche e di durabilità in quanto le stesse condizioneranno il comportamento nel tempo delle opere costruite con tali materiali.

I polimeri sintetici utilizzati per la produzione dei geosintetici (impiegati nelle opere in terra rinforzata) sono prevalentemente il Polipropilene (PP), il Polietilene ad alta densità (HDPE), il Poliammide (PA) e il Poliestere (PET). Per applicazioni particolari sono anche utilizzati il Polivinil Alcool (PVA), le fibre Aramidiche (AR) e il Polistirene nella forma di schiuma espansa (EPS).

I processi di trasformazione delle materie plastiche utilizzati nel processo produttivo dei geosintetici sono: l'estrusione (utilizzata per produrre le fibre tessili, da cui vengono prodotti i geotessili tessuti e nontessuti, le georeti, le geogriglie, le geostuoie sintetiche e le geocelle), la calandratura (utilizzata per la produzione delle geomembrane), e il soffiaggio (utilizzato per la produzione delle geomembrane e dei film per la produzione di geotessili tessuti a bandelle).

Con il termine geosintetici (GSY) s'indicano quei materiali planari realizzati con polimeri sintetici o naturali, prodotti

nella forma di superfici piane, di strisce o di strutture tridimensionali, utilizzati a contatto con il terreno, la roccia o altri materiali che costituiscono parte integrante di progetti di ingegneria civile o ambientale. I geosintetici possono essere classificati in base al processo di produzione. Nella Relazione Generale (Moraci, 2011) è fornita una più ampia descrizione dei diversi materiali utilizzati per il rinforzo del terreno: geotessili tessuti, geogriglie e geocelle. In sintesi, i geotessili tessuti ( $GTX_w$ ) sono strutture piane e regolari formate dall'intreccio di due o più serie di fili costituite da fibre sintetiche. Le geogriglie (GGR) sono strutture piane che hanno l'aspetto di griglie con maglie aperte (aperture  $>6,35$  mm), possono essere di tipo estruso, tessuto o a nastri saldati. Le Geocelle (GCE) sono reti tridimensionali costituite da strisce di materiale polimerico di modesto spessore (circa 100 mm). Le strisce sono giuntate al fine di formare per interconnessione delle celle che, poi, sono riempite con terreni e, in alcuni casi, con calcestruzzo. In taluni casi si utilizzano strisce con altezza variabile e le geocelle, riempite con barre verticali anch'esse in materiale polimerico, formano le cosiddette geocelle profonde (da 0.5 a 1m) o geomaterassi.

## 2 PROGETTAZIONE DELLE OPERE IN TERRA RINFORZATA

La progettazione dei muri (o dei pendii ripidi) rinforzati deve essere eseguita in modo tale da garantire adeguati margini di sicurezza (nel rispetto delle normative o raccomandazioni esistenti) nei confronti di tutti i possibili stati limite, ultimi e di esercizio, della struttura e del complesso struttura-terreno di fondazione.

I possibili stati limite ultimi riguardano meccanismi di rottura che possono interessare sia l'intero blocco rinforzato ed il terreno di fondazione (stabilità esterna: ribaltamento, scivolamento alla base, capacità portante e stabilità globale) sia superfici di rottura che attraversano il solo blocco rinforzato (stabilità interna) oppure il blocco rinforzato ed il terreno a tergo di esso (stabilità composita).

Gli stati limite di esercizio possono riferirsi sia ai cedimenti del terreno di fondazione (la cui valutazione viene condotta con gli usuali metodi dell'ingegneria geotecnica), sia ai cedimenti del blocco rinforzato e agli effetti viscosi nel geosintetico di rinforzo.

La progettazione di un'opera in terra rinforzata, realizzata alternando strati di geosintetico di rinforzo a strati di terreno compattato, implica quindi la scelta del terreno di riempimento e delle modalità di costipamento; la scelta del geosintetico di rinforzo e del polimero costituente lo stesso; la scelta del tipo di modalità costruttiva e del tipo di facciata; la determinazione della lunghezza e della spaziatura dei rinforzi; la progettazione del sistema di drenaggio a monte ed a tergo dell'opera (di fondamentale importanza come in tutte le opere di sostegno) e la predisposizione delle specifiche tecniche per la realizzazione ed il monitoraggio dell'opera nel tempo (anche in relazione agli aspetti connessi alla durabilità dei materiali sintetici utilizzati). In particolare, nel caso dei geosintetici le specifiche di progetto devono prevedere le caratteristiche generali del geosintetico; le caratteristiche del polimero, che ne garantiscano la durabilità nelle specifiche condizioni ambientali, le proprietà meccaniche e i parametri d'interfaccia (e le procedure sperimentali per la determinazione degli stessi); le giunzioni e le sovrapposizioni; le modalità di installazione e di monitoraggio; le modalità di eventuali interventi di manutenzione o riparazione; i criteri di accettazione dei materiali; le modalità di movimentazione e di immagazzinamento dei geosintetici in cantiere.

L'evoluzione negli anni della progettazione delle opere in terra rinforzata con geosintetici può essenzialmente essere ricondotta all'evoluzione delle conoscenze inerenti:

1. al comportamento meccanico dei geosintetici;
2. alla durabilità dei geosintetici;
3. all'interazione terreno-rinforzo;
4. ai metodi di calcolo;
5. alle normative tecniche di riferimento.

Molte informazioni su tali argomenti sono contenute nella Relazione Generale (Moraci, 2011), che presenta un'ampia sintesi di quanto riportato nella più recente letteratura scientifica sull'argomento, arricchita dall'ampio patrimonio di esperienza dell'autore e del gruppo di lavoro che coordina.

Nel lavoro ci si sofferma anche sull'evoluzione delle raccomandazioni e delle normative tecniche inerenti alle opere in terra rinforzata è nel seguito descritta facendo riferimento ai paesi in cui le stesse sono disponibili da molti anni, con particolare riferimento a quelle vigenti in Inghilterra, Giappone, Stati Uniti e Francia.

Raccomandazioni sui Geosintetici sono in corso di redazione anche in Italia, ad opera di un Gruppo dell'Associazione Geotecnica Italiana, coordinato dallo stesso autore della Relazione Generale. Tali Raccomandazioni dovrebbero essere disponibili entro il termine del 2013.

## 4. CONCLUSIONI

Nella Relazione Generale al XXIV CNG (Moraci, 2011) è stato affrontato il tema del rinforzo del terreno con geosintetici e, nell'ambito delle numerose applicazioni in cui tali materiali possono essere utilizzati con la funzione di rinforzo, sono state fornite, alla luce delle più recenti ricerche disponibili in letteratura, le conoscenze necessarie per condurre una corretta ed efficiente progettazione delle opere di sostegno in terra rinforzata. In particolare, si è



evidenziato come sia necessario, per sviluppare in maniera adeguata la progettazione, conoscere le modalità costruttive e le tecnologie utilizzate per la realizzazione delle opere, le proprietà indici e le caratteristiche chimiche e meccaniche dei terreni di riempimento, di fondazione ed a tergo dell'opera, le caratteristiche meccaniche, chimiche e di durabilità delle materie prime (polimeri) utilizzate per la produzione dei differenti tipi di geosintetici, le peculiarità del comportamento meccanico, a breve ed a lungo termine, dei differenti geosintetici isolati o interagenti col terreno (in diverse condizioni di sollecitazione e in diverse condizioni chimiche/ambientali) e le metodologie di analisi che possono essere utilizzate per valutare la sicurezza delle opere in terra rinforzata in relazione ai possibili stati limiti ultimi e di esercizio.

Pertanto, il successo degli interventi presuppone, soprattutto in condizioni chimiche e ambientali complesse, adeguate conoscenze oltre che nell'ambito dell'ingegneria geotecnica anche nell'ambito dell'ingegneria dei materiali polimerici.

Alla luce di quanto esposto in tale Relazione si evince quindi con chiarezza come "l'ingegneria con geosintetici", pur essendo una disciplina giovane (le prime applicazioni dei geosintetici risalgono a circa 30 anni fa), per effetto delle numerosissime ricerche che si sono "esponenzialmente" sviluppate nel tempo, per il notevole impulso dell'Accademia, spesso stimolata dall'industria e quindi dai produttori dei geosintetici, sempre alla ricerca di materiali e nuove tecnologie, sia ormai una disciplina ingegneristica matura che consente di progettare correttamente, anche in situazioni chimiche/ambientali e di carico complesse, le opere in terra rinforzata.

Tale circostanza è avvalorata sia dal comportamento in vera grandezza di tali opere in occasione di eventi sismici di notevole magnitudo sia dalla presenza di dettagliate normative e/o raccomandazioni tecniche in nazioni (es. UK, USA, Giappone, Germania e Francia) in cui lo stato della progettazione con geosintetici è ai livelli più avanzati.

#### BIBLIOGRAFIA

Un'ampia bibliografia è riportata nella Relazione Generale:

Moraci N., 2011. *Il Rinforzo del terreno con geosintetici - Recenti sviluppi tecnologici, progettuali e normativi. Atti del XXIV Convegno Nazionale di Geotecnica*. Edizioni AGI, Roma.