

## **COMPORTAMENTO IDRO-MECCANICO DI TERRENI ESTRUSI**

Silvia La Rosa

*Università degli Studi di Palermo, Dipartimento di Ingegneria  
silvia.larosa@unipa.it*

Alessio Ferrari

*Università degli Studi di Palermo, Dipartimento di Ingegneria  
alessio.ferrari@unipa.it*

Marco Rosone

*Università degli Studi di Palermo, Dipartimento di Ingegneria  
marco.rosone@unipa.it*

### **Sommario**

Il processo di estrusione dei terreni a grana fina rappresenta uno tra i processi alla base dei metodi di stampa 3D dei terreni.

Nel seguente contributo si sono scelti dei terreni adatti a tale scopo e si è studiato come le variabili dipendenti dal processo di stampa, quali la pressione applicata e la dimensione dell'ugello influissero sul materiale estruso.

### **1. Introduzione**

L'importanza rivestita dalla stampa 3D (o manifattura additiva) assume negli ultimi decenni carattere trasversale, rivelandosi tra i motori della cosiddetta terza rivoluzione industriale, grazie alla possibilità di creare dei prototipi aventi forme irrealizzabili con i metodi sottrattivi classici a basso costo, permeando tutti i settori produttivi. L'ambito geotecnico non ne è stato da meno: le tecniche proprie della stampa 3D sono state utilizzate seguendo due filoni principali. Da un lato è stata utilizzata come strumento atto a condurre caratterizzazione geomeccanica, utilizzando materiali polimerici per riprodurre geomateriali. Dall'altro, grazie alla presenza di stampanti prototipali e commerciali per terreni, i terreni sono stati utilizzati come materiali di stampa; in questo secondo caso, gli stessi vengono spesso trattati come fluidi viscosi, e – nell'ambito delle arti – il mix-design corretto è ottenuto su base meramente empirica (Ju et al., 2014; Matsumura & Mizutani, 2015; Bourke et al., 2016; Dal Ferro & Morari, 2015; Gomez et al., 2019; Hanaor et al., 2016; Perrot et al., 2018; Khoshnevis, 2004; Perrot et al. 2018).

Utilizzando come materiale di stampa dei terreni a prevalente frazione fina, la stampa 3D avviene tramite processo di estrusione, qui inteso come quel processo attraverso il quale del materiale viene fatto fuoriuscire attraverso un ugello di ridotte dimensioni per mezzo di una pressione applicata tramite un pistone. Tale processo ha già trovato applicazioni geotecniche, per esempio come metodo sperimentale nell'ambito della determinazione dei limiti di consistenza (Whyte, 1982; Kayabali & Tufenkci, 2010; Verástegui-Flores, Di Emidio, 2014; Kayabali, et al., 2015). L'intero processo può essere visto attraverso una prospettiva geomeccanica: il materiale, avente un valore del contenuto d'acqua iniziale, un valore iniziale del grado di saturazione, suzione ed indice di porosità, a seguito del processo di estrusione sarà caratterizzato da differenti valori degli stessi parametri ora menzionati. Durante il processo di estrusione, il materiale che fuoriesce, qui chiamato filetto, ha forma cilindrica avente sezione trasversale pari a quella dell'ugello. Agendo sugli spostamenti relativi lungo le tre direzioni tra l'ugello ed il piano di stampa, a seguito del processo di estrusione, è possibile ottenere dei provini di terreno rappresentabili come strati successivi di filetti tra loro adiacenti. Come risultato di

questo processo, i provini sono caratterizzati da un assetto a doppia struttura, con un livello micro-strutturale determinato dalle proprietà del filetto, ed un livello macro-strutturale determinato dalla posizione relativa dei filetti e dai pori tra di essi.

La ricerca in corso mira a una definizione delle caratteristiche dei provini stampati sulla base delle caratteristiche dei materiali utilizzati e delle variabili del processo di stampa. In questo contributo, l'attenzione è posta sullo studio delle caratteristiche del filetto in relazione alla composizione della miscela estrusa, dimensione dell'ugello e carico applicato.

## 2. Materiali e metodi

### 2.1 Materiali testati

Si è scelto di testare delle miscele di caolino e quarzo, aventi differenti rapporti in peso secco. Il caolino utilizzato nelle prove è stato il caolino Speswhite; il quarzo utilizzato è un quarzo polverizzato avente diametro massimo delle particelle pari a 0.075 mm.

La giustificazione della scelta di tali materiali risiede nel fatto che si vuole avere da un lato una buona lavorabilità della miscela, garantita dalla presenza del caolino, dall'altro una maggiore resistenza data dalla presenza del quarzo. Infine, per entrambi i materiali si è scelto di avere particelle il cui massimo diametro sia inferiore a 0.075 mm cosicché le miscele siano ottimizzate per le stampanti 3D in commercio, aventi generalmente diametro dell'ugello pari a 1.2 mm.

Le miscele studiate sono dunque le seguenti:

- 100K                    100% caolino;
- 90K10Q              90% caolino – 10% quarzo;
- 70K30Q              70% caolino – 30% quarzo;
- 50K50Q              50% caolino – 50% quarzo.

È stato inizialmente determinato il contenuto d'acqua igroscopico del caolino Speswhite, pari all'1%. Tenuto conto di ciò, le miscele sono state preparate pesando i quantitativi dei due materiali in modo da ottenere 2 kg di ciascuna miscela. Per ottenere una miscelazione uniforme, i due materiali sono stati dapprima posti in una teglia, li delicatamente mescolati in modo da ridurre al minimo dispersioni nell'aria. Le miscele sono infine state inserite e conservate all'interno di buste in plastica trasparente sigillate accuratamente così che non venissero contaminate dall'ambiente esterno.

Di ciascuna miscela sono state eseguite prove di identificazione geotecnica, determinando dunque le distribuzioni granulometriche ed i limiti di consistenza. Nella Figura 1 e nella Figura 2 si riportano le distribuzioni granulometriche dei materiali, e i limiti di consistenza.

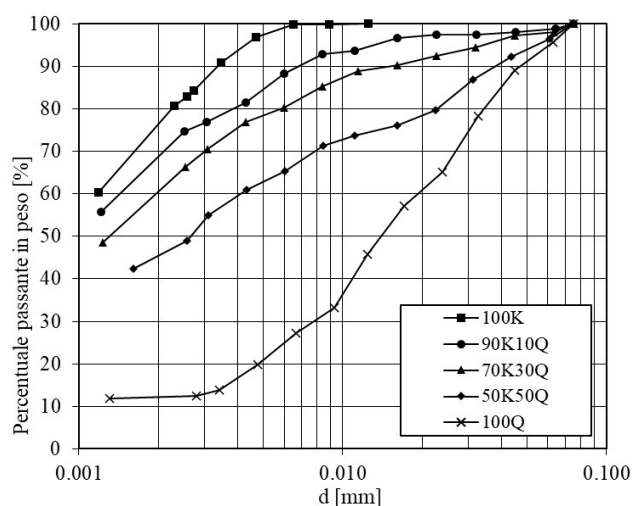


Figura 1. Distribuzione granulometrica delle miscele studiate.

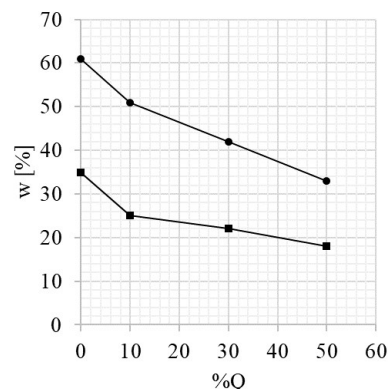


Figura 2. Limiti di consistenza delle miscele studiate.

Si è scelto di testare le miscele aggiungendo ad esse il peso di acqua distillata e demineralizzata corrispondente al raggiungimento di un contenuto d'acqua pari 1.2 volte il limite di liquidità delle stesse. Tale scelta ha garantito l'estrudibilità delle miscele, favorendo da un lato la lavorabilità delle stesse, e dall'altro lato ha consentito di ottenere filetti che mantenessero la loro forma una volta estrusi.

## 2.2 Set-up di prova

Il set-up di prova (Figura 3) è costituito in due estrusori in polietilene aventi diametro interno pari a 2,4 cm ed area pari a 4,52 cm<sup>2</sup>, il primo con ugello in poliuretano a sezione tronco-conica avente diametro di uscita pari a 1,2 mm ed inclinazione delle pareti pari a 7° rispetto alla verticale, il secondo avente diametro di uscita pari a 3,9 mm. All'interno degli estrusori è alloggiato un pistone avente corsa pari a circa 80 mm il cui contatto con la miscela all'interno dell'estrusore è avvenuto per mezzo di una guarnizione impermeabile; sul pistone si è fatta agire una forza verticale tale da esercitare una pressione verticale totale pari a 120 kPa o 200 kPa sulla miscela all'interno dell'estrusore. Il filetto in uscita è stato poi raccolto in un contenitore poggiato su di una bilancia avente risoluzione di 0.01 g.

Le miscele sono state umidificate aggiungendo lentamente il peso d'acqua corrispondente al contenuto d'acqua da raggiungere, lavorando successivamente il materiale con la spatola su un supporto in vetro. L'estrusore veniva riempito con la miscela avente contenuto d'acqua stabilito per mezzo di una piccola spatola, aggiungendone di volta in volta circa 5 g; al termine l'estrusore veniva pesato, in modo da determinare il peso dell'unità di volume del materiale all'interno dello stesso. Durante i test di estrusione, eseguiti a carico costante, venivano misurati gli spostamenti verticali del pistone ed il peso del materiale estruso nel tempo, recidendo il filetto estruso ad intervalli di volume regolari, in modo tale da poter, tramite essiccamento in stufa, quantificare l'evoluzione del contenuto d'acqua della miscela estrusa nel tempo.

Per quantificare il peso dell'unità di volume dei filetti estrusi, si è utilizzato il metodo del picnometro, utilizzando il kerdane – un petrolio dearomatizzato – in qualità di liquido apolare: noto il peso del picnometro riempito con il kerdane, si è estruso il filetto all'interno del picnometro posto al di sopra della bilancia. Riempiendo il restante volume del picnometro con il kerdane e pesando il sistema composto da becker, filetto e kerdane, noto il peso del filetto estruso, è possibile determinare il peso del kerdane che occuperebbe il volume ora occupato dal filetto. Noto il peso specifico del kerdane, si ottiene dunque il volume del filetto estruso.

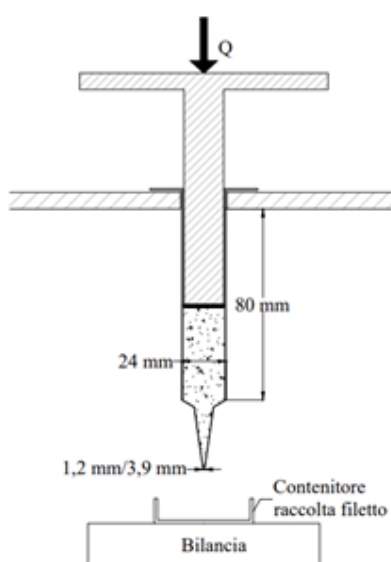


Figura 3. Set-up di prova.

### 3. Risultati ed analisi

La memoria presenta i risultati di 18 test di estrusione. A titolo esemplificativo, nella Figura 4 si illustra l'andamento del peso dell'unità di volume all'interno dell'estrusore in funzione dell'avanzamento del pistone; i risultati mostrano che, nelle prime fasi della prova corrispondenti ad avanzamenti del pistone di circa 50 mm, i valori del peso dell'unità di volume risultavano pressoché costanti, mentre le variazioni sono osservabili nella parte finale del processo di estrusione.

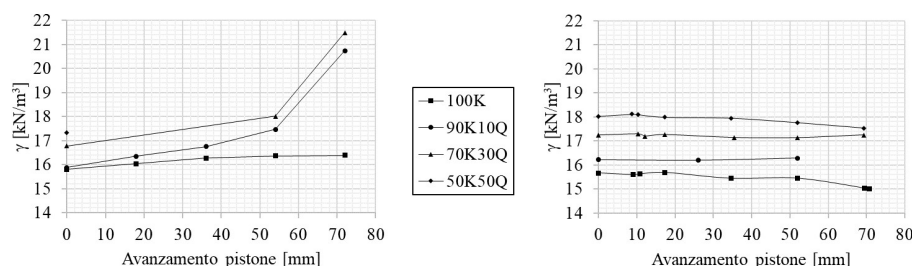


Figura 4. Andamento del peso dell'unità di volume all'interno dell'estrusore all'avanzare del pistone.  
(a) Estrusore con ugello  $d=1,2$  mm, (b) estrusore con ugello  $d=3,9$  mm.

Come riscontrabile nella seguente Figura 5, sovrapponendo le informazioni circa il peso dell'unità di volume del filetto estruso ed il peso dell'unità di volume della miscela all'interno dell'estrusore, ad una riduzione di tale valore nell'uno, corrispondeva un aumento dello stesso nell'altra. Tale comportamento è giustificabile considerando l'estrusione come processo combinato di consolidazione e efflusso, nel quale, all'avanzare del pistone, l'addensamento della miscela nell'estrusore è possibile in relazione alla dissipazione delle pressioni interstiziali.

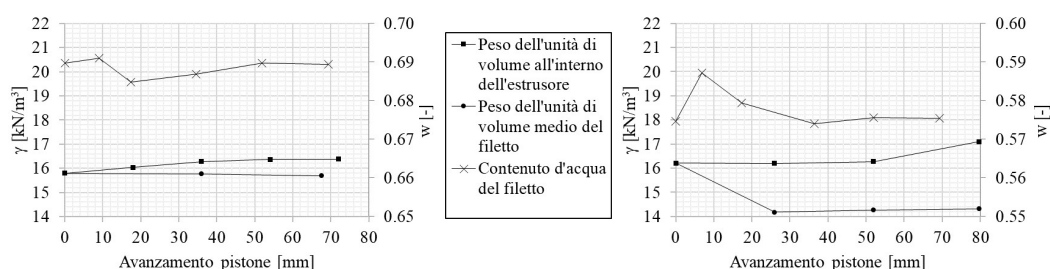


Figura 5. Andamento del peso dell'unità di volume medio del filetto e all'interno dell'estrusore all'avanzare del pistone in relazione al contenuto d'acqua del filetto. (a) Miscela 100K, (b) miscela 90K10Q

Ulteriore riscontro in tal senso si ottiene comparando i risultati ottenuti da due prove di estrusione effettuate a parità di carico e a parità di dimensioni dell'ugello sulla miscela avente percentuale di quarzo pari al 10% e sulla miscela avente percentuale di quarzo pari al 50% (Figura 6). All'aumentare del tempo trascorso dall'inizio della prova, la variazione del peso dell'unità di volume del filetto estruso è maggiormente pronunciata nella miscela contenente maggiori quantitativi di quarzo.

La maggiore presenza di quest'ultimo, infatti, aumentando sia la permeabilità della miscela sia il suo modulo edometrico, ne aumenta il valore del coefficiente di consolidazione, permettendo una più rapida dissipazione delle pressioni interstiziali e permettendo dunque l'addensamento della miscela.

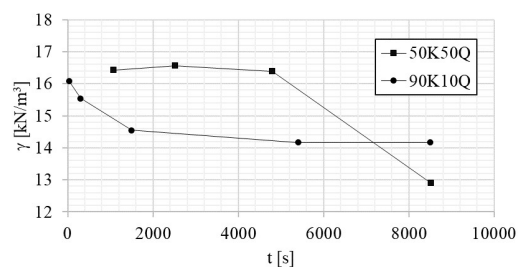


Figura 6. Andamento del peso dell'unità di volume medio del filetto estruso in funzione del tempo di estrusione per due delle miscele studiate.

## 5. Conclusioni

Le prove di estrusione effettuate sulle quattro miscele selezionate hanno fornito una panoramica su come il processo di estrusione sia influenzato dalle variabili considerate.

Considerando l'estrusione dei terreni come processo combinato di consolidazione ed efflusso, affinché la consolidazione possa avvenire, è necessario che le sovrappressioni interstiziali indotte dall'applicazione del carico costante possano dissiparsi. Quando tale condizione è raggiunta (maggiormente visibile in presenza dell'estrusore avente ugello di diametro inferiore) si osserva un addensamento delle miscele all'interno dell'estrusore, cui corrisponde un incremento del peso dell'unità di volume all'interno di esse, compensato da un decremento dello stesso nel filetto estruso. La determinazione del contenuto d'acqua del filetto ha confermato tale andamento, osservando una correlazione tra l'iniziale aumento del contenuto d'acqua ed il decremento del peso dell'unità di volume medio del filetto.

Associando a tali risultati le informazioni fornite dall'osservazione del processo di estrusione nel tempo, si è infine osservato come la presenza del quarzo influenzi il comportamento della miscela nei riguardi dell'addensamento. Confrontando, a parità di altre condizioni, il comportamento delle due miscele con minore e maggiore percentuale in peso di quarzo, si è osservato come la riduzione del peso dell'unità di volume medio del filetto avvenga più rapidamente nel secondo caso, favorendo il quarzo una più rapida dissipazione delle sovrappressioni interstiziali.

## Bibliografia

- Bourke M. et al. (2016). "Innovative applications of laser scanning and rapid prototype printing to rock breakdown experiments", *Earth Surface Processes and Landforms*, 33, 1614-1621.
- Dal Ferro N. and Morari F. (2015). "From real soils to 3D printed soils: Reproduction of complex pore network at the real size in a silty-loam soil", *Soil Science Society of America Journal*, 79 (4), 1008-1017.
- Gomez J.S., Chalaturnyk R.J., Zambrano-Nervaez G. (2019). "Experimental Investigation of the Mechanical Behavior and Permeability of 3D Printed Sandstone Analogues Under Triaxial Conditions", *Transport in porous media*, 129, 541-557.
- Hanaor D.A.H. et al. (2016). "3D printable geomaterials", *Géotechnique*, 66 (4), 323.
- Ju Y. et al. (2014). "Visualization of the complex structure and stress field inside rock by means of 3D printing technology", *Chin. Sci. Bull.*, 59 (36), 5354-5365.
- Kayabali K., Tufenkci O.O. (2010). "Determination of plastic and liquid limits using the reverse extrusion technique", *Geotech. Test. J.* 33 (1), 14-22.
- Kayabali K., Ustun A.B., Ozkeser A. (2015). "Refinement of the reverse extrusion test to determine the two consistency limits", *Bulletin of the Mineral Research and Exploration* 150, 131-144.
- Khoshnevis B. (2004). "Automated construction by contour crafting – related robotics and information technology", *Automation in construction*, 13, 5-19.
- Matsumura S. and Mizutani T. (2015). "3D printing of soil structure for evaluation of mechanical behaviour",

Acta Stereologica, Proceeding of the 14th International Congress for Stereology and Image Analysis, Liège, Belgium, July 6-10.

Perrot A. et al. (2018). “Extrusion of cement-based material – an overview”, *RILEM Technical Letters*, 3, 91-97.

Perrot A., Rangeard D., Courteille E. (2018). “3D printing of earth-based materials: processing aspects”, *Construction and Building Materials*, 172, 670-676.

Veràstegui-Flores R.D., Di Emidio G. (2014). “Assessment of clay consistency through conventional methods and indirect extrusion tests”, *Applied Science* 101, 632-636.

Whyte I.L. (1982). “Soil plasticity and strength – a new approach using extrusion”, *Ground Engineering*, 11 (3), 37.