

## Valutazione dell'idoneità di materiali flyschoidi derivanti da scavo in sotterraneo per interventi di ripascimento di spiagge ghiaiose

Carlo Cavallo<sup>1</sup>, Andrea Cevasco<sup>2</sup>, Marco Ferrari<sup>2</sup> e Michele Piazza<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Regione Liguria - Settore Ecosistema Costiero, Via D'Annunzio, 111 - 16121 Genova

<sup>2</sup>Dip.Te.Ris. - Università degli Studi di Genova, Corso Europa, 26 - 16132 Genova;  
ferrari@dipteris.unige.it

### Riassunto

Vengono esposti e discussi i risultati di uno studio finalizzato alla valutazione dell'idoneità di materiali di natura eterogenea per interventi di ripascimento di spiagge ghiaiose. Numerosi campioni rappresentativi dei materiali in oggetto, che derivano da scavi in sotterraneo ed appartengono al Flysch di Sanremo, sono stati prelevati in due differenti siti ed indagati attraverso analisi petrografiche e geotecniche al fine di valutarne la stabilità in ambiente litoraneo. L'indagine è stata effettuata non solo attraverso la valutazione della resistenza all'usura dei materiali ma anche in relazione ai fenomeni di alterazione potenzialmente indotti dagli agenti atmosferici e marini. In considerazione della carenza di studi, in letteratura, sulla durevolezza dei materiali in ambiente litoraneo, si è ritenuto opportuno effettuare una serie di test di durevolezza apportando diverse modifiche alle modalità di prova standardizzate. Le prove sono state effettuate sia sul materiale di risulta, sia sul materiale di spiaggia. I risultati ottenuti, aldilà delle difficoltà di lettura legate all'eterogeneità litologica dei campioni analizzati, hanno evidenziato il differente comportamento dei materiali di risulta che subiscono, al contrario dei sedimenti litorali, importanti fenomeni di alterazione, disgregazione ed usura.

Relativamente agli aspetti metodologici, pur tenendo in considerazione il numero limitato di test effettuati, l'utilizzo incrociato dei dati provenienti dalle diverse tipologie di prove effettuate ha dimostrato di poter fornire informazioni utili per valutare l'idoneità dei materiali in oggetto per interventi di ripascimento di spiagge ghiaiose.

**Parole chiave:** Flysch di Sanremo, Point Load Test, Slake Durability Test, ripascimento, spiagge in ghiaia.

### Abstract

*In this paper are exposed and discussed the results of a research to evaluate the suitability of heterogeneous material to be used for gravel beach nourishment works. A large number of samples representative of that material, deriving from tunneling works in the "Flysch di Sanremo" geological formation, have been taken in two different sites and have been analysed both from petrographic and geotechnical point of view aiming to verify their stability on littoral environment. The analyses were carried out not only to evaluate the strength of the material but also to look into alteration processes induced by atmospheric and marine agents. Considering the lack of studies on durability of material in littoral environment, a number of little modifications have been introduced on the standard*

*durability tests. The tests have been carried out both on drilled and natural beach material. The results, besides the difficulties due to the heterogeneity of the samples' litology, put in evidence the behaviour of the drilled material in terms of great rate of wear and deterioration compared to that of beach material.*

*Concerning methodological aspects, a proper use of the test results is confirmed as a good tool to evaluate the suitability of drilled material for gravel beach nourishment works.*

**Keywords:** *Sanremo Flysch, point load test, slake durability test, nourishment, gravel beach.*

## Introduzione

I materiali provenienti da lavori di scavo (gallerie, fondazioni, sbancamenti) sono, in alcuni casi, utilizzati negli interventi di ripascimento di litorali ghiaiosi. In Liguria, vi è una consolidata tradizione di interventi effettuati adottando questa tipologia di materiale, a tale proposito si possono citare i primi interventi di ripascimento effettuati negli anni '60 – '70 del secolo scorso (Hamm et al., 2002).

L'utilizzo di questo materiale offre il vantaggio di razionalizzare e, soprattutto, sfruttare al meglio le risorse naturali, riducendo sensibilmente gli impatti ambientali dovuti all'attività umana. Però, questi materiali spesso presentano caratteristiche litologiche e tessiturali che obbligano gli operatori ad intervenire su di essi prima del loro utilizzo.

Gli aspetti maggiormente penalizzanti sono individuabili nella presenza di clasti di grosse dimensioni spesso associati ad un'abbondante componente fine, che obbligano a trattare il materiale attraverso la frantumazione ed il lavaggio; queste operazioni però producono clasti con forme irregolari e spigolose quindi, almeno nelle fasi iniziali successive all'intervento, qualitativamente poco adatte all'utilizzo in spiagge destinate a scopi balneari.

Il secondo aspetto, spesso trascurato, riguarda le caratteristiche composizionali e tessiturali del materiale utilizzato. Infatti, il detrito naturale generato dall'alterazione delle rocce ad opera degli agenti naturali, subisce prima di giungere al litorale, una importante elaborazione ad opera degli agenti di trasporto e, successivamente, anche ad opera del mare. Questi processi producono una selezione che determina un alto grado di elaborazione tessiturale ai sedimenti che costituiscono il litorale (Carter, 1988).

Per contro, il materiale di scavo, non subendo alcun tipo di elaborazione ad opera degli agenti naturali prima dell'immissione nella spiaggia, spesso presenta comportamenti inaspettati da cui possono derivare importanti perdite di materiale oltre che sensibili danni all'ambiente stesso (Gonzalez-Correa et al., 2008).

Queste problematiche sono tanto maggiori quanto più è elevato il grado di variabilità composizionale della roccia originaria. Un esempio di questo fenomeno può essere osservato considerando il complesso delle unità flyschoidi (complessi di base argillitici, torbiditi arenaceo-pelitiche, torbiditi calcarenitiche e calcareo-marnose), che complessivamente denotano una variabilità litologica relativamente elevata.

In questo lavoro vengono, appunto, presentati i risultati relativi allo studio di litotipi riferibili ad una formazione flyschoidale della Liguria di Ponente (Flysch di Sanremo). Questo materiale è stato indagato al fine di valutarne l'idoneità a scopi di ripascimento. Lo studio è stato sviluppato attraverso analisi petrografiche e geotecniche che potessero valutarne efficacemente la stabilità in ambiente litoraneo anche in relazione della presenza di una abbondante matrice clastica argillosa. Quindi l'indagine è stata effettuata non solo attraverso la valutazione della sua resistenza all'usura ma anche in relazione ai fenomeni di alterazione provocati dagli agenti atmosferici e marini.

### Inquadramento geologico dell'area considerata

Geologicamente, l'area si colloca nel settore delle Alpi Liguri costituito dalle successioni sedimentarie flyschoidi, originariamente pertinenti al Dominio oceanico Piemontese-Ligure: tali successioni sono genericamente caratterizzate da un insieme basale prevalentemente argillitico ("Complessi di base" Auctt.) sul quale riposa stratigraficamente l'insieme dei corpi torbiditici noti in letteratura geologica come Flysch ad Helmintoidi. L'assetto strutturale del settore considerato, peraltro sostanzialmente coerente con quello di tutto il complesso flyschoidi della Liguria di Ponente, vede una successione di pieghe chilometriche con assi orientati WNW-ESE e superfici assiali immergenti verso NE, alle quali si sovraimpongono fasce di taglio semifragili con giacitura sub-verticale e direzioni notevolmente disperse (Giammarino et al., in stampa). Va rilevato che, nell'area considerata, affiorano solamente litotipi riferibili alla formazione del Flysch di Sanremo (Unità Sanremo - Monte Saccarello), rappresentati essenzialmente da corpi torbiditici marnosi, calcarenitici e calcilutitici organizzati in strati spessi con interstrati arenaceo-argillitici (Sagri, 1984; Giammarino et al., in stampa). Queste successioni sono interpretabili come il risultato di una sedimentazione per correnti di torbida su di una piana oceanica ubicata al di sotto della CCD e vengono attribuite al Campaniano superiore - Maastrichtiano superiore (Giammarino et al., in stampa).

Sotto il profilo litologico Sagri (1984) ha individuato all'interno del Flysch di Sanremo quattro gruppi di litotipi predominanti: a) arenarie calcaree, arenarie e siltiti; b) marne siltose; c) calcilutiti, d) argilliti; i diversi litotipi si associano in varie percentuali dando luogo a tre tipi differenti di strati torbiditici (marnoso-arenacei, calcilutitici, arenaceo-argillitici). Essi costituiscono quattro litofacies caratterizzate, sostanzialmente, da una organizzazione ordinata ma con percentuali differenti degli strati precedentemente descritti. La loro distribuzione geografica è schematizzata in Figura 1.

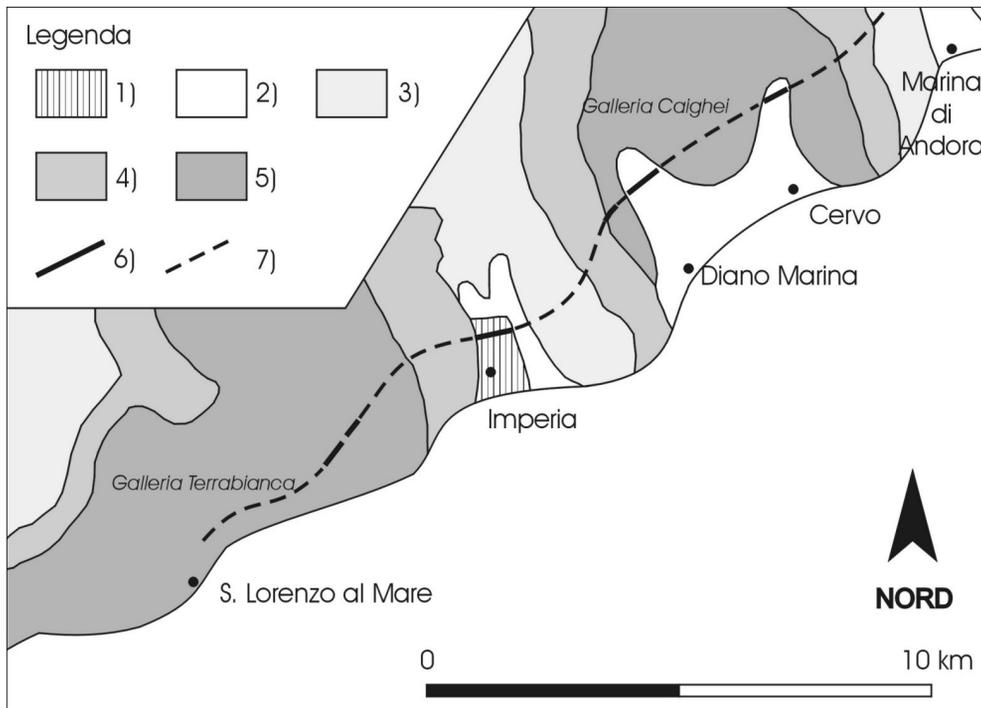


Figura 1 - Schema geologico dell'Unità Sanremo - M.te Saccarello (modificato da Sagri, 1984) con indicazione del tracciato del raddoppio ferroviario Andora - San Lorenzo in corso di realizzazione (ridisegnato da R.F.I., 2005). Legenda: 1) aree urbanizzate; 2) alluvioni e depositi marini; 3) litofacies B: prevalenza di marne e arenarie calcaree, presenza di calcilutiti e torbiditi arenaceo-argillitici; 4) litofacies C: torbiditi arenaceo-argillitici e calcilutiti cui si intercalano megatorbiditi marnoso-arenacei; 5) litofacies D: prevalenza di torbiditi arenaceo-argillitici con intercalazioni di calcilutiti, rari strati marnoso-arenacei; 6) tratti in aperto, ponti, viadotti; 7) tratti in galleria.

Il materiale di risulta studiato proviene dalle gallerie, attualmente in corso di realizzazione, della nuova linea ferroviaria nel tratto S. Lorenzo al Mare - Andora (Riviera Ligure di Ponente) che si sviluppa appunto, in larga misura, nelle unità considerate (Fig. 1). Il tracciato, lungo 18825 m, si sviluppa per 16224 m in galleria. Lo scavo è effettuato con differenti modalità, definite in relazione alle caratteristiche litologiche e geomeccaniche individuate in fase progettuale. In coincidenza dei litotipi più tenaci lo scavo è eseguito mediante l'utilizzo di una fresa meccanica; quest'ultima verrà utilizzata per realizzare quattro delle nove gallerie previste per un totale di 12824 m. I restanti 3800 m, che si sviluppano in coincidenza di rocce più scadenti, sono invece realizzati con tecnica classica, cioè con ripper, martello pneumatico ed eccezionalmente esplosivo. Nell'area del cantiere di Andora sono presenti i materiali di risulta provenienti dalle gallerie realizzate con scavo meccanizzato (materiale *AN*); il materiale derivante dallo scavo con tecnica tradizionale è stato, invece, raccolto nel cantiere di S. Lorenzo (materiale *SL*).

I materiali *AN* e *SL* sono rappresentativi, rispettivamente, della galleria Caighei (2693 m), che collega S. Bartolomeo al Mare con Diano Marina, e delle gallerie Poggi (2129 m), Protesi Rio Inferno (140 m) e Terrabianca (466 m), colleganti S. Lorenzo al Mare rispettivamente con Imperia la prima e con il nuovo tracciato ferroviario le altre due.

### Indagini di laboratorio

Sui materiali *AN* e *SL*, prelevati nei siti di temporaneo accumulo, sono state svolte analisi di laboratorio petrografiche e geotecniche.

L'analisi petrografica è consistita essenzialmente in uno studio di sezioni sottili al microscopio polarizzatore finalizzato al riconoscimento del tipo litologico e delle componenti scheletriche ed interstiziali, le valutazioni percentuali dei componenti sono di tipo semiquantitativo ed ottenute con l'ausilio delle tavole di comparazione (ad es. Baccelle e Bosellini, 1965).

Le analisi geotecniche hanno compreso prove per la stima della resistenza a compressione uniassiale (Point Load Test) e test di durezza (Slake Durability Test) sui materiali oggetto di studio. Per quanto riguarda le prime sono stati testati 143 campioni di materiale *AN* e 152 campioni di materiale *SL*. I test di durezza sono stati svolti con differenti modalità di prova, modificando la metodologia di prova standardizzata ASTM, per un totale di 25 test.

### Point Load Test

La prova, assai semplice, consente di ottenere il valore dell'Indice di carico puntuale ( $I_s$ ) di un provino di materiale roccioso di forma qualsiasi inserito fra due punte coniche e sottoposto ad un carico crescente fino a rottura. Noti il valore del carico di rottura e le caratteristiche geometriche del campione è possibile calcolare il valore di  $I_s$ , che può essere correlato, attraverso un coefficiente opportuno ( $K$ ), alla resistenza a compressione monoassiale ( $\sigma_c$ ). Tale tipologia di prova è largamente impiegata in alternativa alle consuete prove UCS sia per la semplicità dell'attrezzatura necessaria (infatti può essere effettuata, oltreché in laboratorio, anche con attrezzatura portatile) sia per la possibilità di utilizzare campioni di dimensioni irregolari.

Per ogni campione analizzato è stato dapprima registrato il valore del carico di rottura ( $P$ ) e successivamente, in funzione della relativa geometria, ricavato il valore dell'indice di carico puntuale ( $I_s$ ) secondo le procedure standard di riferimento (I.S.R.M., 1985). Poiché è noto, da evidenze sperimentali, che il valore del coefficiente  $K$  è largamente variabile e tende a diminuire per bassi valori di resistenza a compressione, per il relativo calcolo è stata adottata la procedura riportata in Palmström (1995), che suggerisce di variare il valore di  $K$  in funzione del valore ottenuto di  $I_s$ .

### ***Slake durability test***

La metodologia standard ASTM (A.S.T.M., 2007) prevede l'utilizzo di un apparato costituito da un cilindro, realizzato con una griglia con maglia 2 mm, collegato ad un sistema che permette di imporre una rotazione di 20 giri al minuto. All'interno del sistema sono inseriti 10 clasti, di dimensioni 20 - 30 mm, per un totale di  $500 \pm 50$  g immersi in acqua distillata. Al termine di ogni prova il campione è fatto essiccare ad una temperatura di  $105^{\circ}\text{C}$  per 24 ore. Ogni ciclo (essiccazione + prova) permette di definire l'indice di durezza ( $I_{Dn}$ ), definito dalla percentuale di materiale rimanente all'interno del cilindro; si considera quindi il materiale usurato quello che fuoriesce dal cilindro cioè con dimensioni minori di 2 mm.

La prova sostanzialmente consiste nel sottoporre il campione non solo all'usura imposta dall'apparecchiatura, ma anche allo stress causato dai cicli di essiccazione ed immersione. In letteratura sono presenti studi che hanno introdotto modifiche a questa procedura; variando i parametri che determinano le sollecitazioni, in modo da simulare le caratteristiche fisiche dell'ambiente da cui proviene il campione. A tale proposito sono stati effettuati esperimenti che esaltavano gli effetti dell'alterazione, utilizzando ad esempio l'acqua di mare per testare materiale proveniente da zone costiere (Dhakal et al., 2002; Dhakal et al., 2004), oppure facendo variare il pH della soluzione per valutare il comportamento del materiale sottoposto ad attacchi acidi (Gupta e Ahmed, 2007). Altri autori hanno, invece, optato per dare maggior peso all'usura modificando quindi la durata delle prove, ad esempio aumentando il numero dei cicli (Gökçeo lu et al., 2000). Uno studio effettuato presso l'Oregon Department of Transportation (Stephen et al., 1999), ha invece portato la durata della prova a 30 minuti per i primi 4 cicli e di 1 ora per i successivi, ma senza essiccazione del materiale al termine di ogni ciclo. Questa variante risulta essere particolarmente interessante in quanto attribuisce una maggiore importanza alla continuità degli effetti dell'abrasione rispetto ai fenomeni di alterazione.

Poiché in letteratura non sono presenti studi sulla durezza dei materiali in ambiente litoraneo, si è ritenuto opportuno effettuare una serie di test apportando alcune modifiche alle modalità di prova standardizzate. Quindi, anche sulla scorta delle esperienze precedentemente descritte, sono stati realizzati, oltre alla prova standard (*ST*), diversi test che hanno previsto, rispettivamente:

- l'utilizzo di acqua di mare in sostituzione di quella distillata (*STM H20 mare*);
- l'essiccazione del campione a  $60^{\circ}$  anziché a  $105^{\circ}$  (*STM 60^{\circ}*);
- l'abbinamento delle due precedenti tipologie (*STM 60^{\circ} + H20 mare*);
- il mantenimento del campione in condizioni di immersione costante in acqua di mare (*STM D*);
- la variazione della durata della prova secondo quanto proposto da Stephen et al. (1999).

Ogni tipologia di prova è stata applicata a campioni di materiale *AN* e *SL*. Inoltre per valutare l'efficacia delle metodologie utilizzate sul materiale già elaborato, sono stati effettuati test su sedimenti provenienti da spiagge (*sp*), costituite da clasti riferibili al Flysch di Sanremo. Infine, sono state eseguite analisi su campioni misti, costituiti da clasti di spiaggia e materiale di risulta (*AN + sp*; *SL + sp*), allo scopo di valutare il comportamento di quest'ultimo a contatto con materiale di ambiente litorale.

## **Risultati della analisi di laboratorio**

### ***Analisi petrografiche***

L'analisi petrografica condotta sulle sezioni sottili ha permesso di distinguere i differenti litotipi oggetto dell'indagine (Fig. 2). In particolare il materiale del sito di S. Lorenzo è riferibile a due litotipi fondamentali:

a) siltite da media a grossa a cemento spatico e subordinata micrite. Lo scheletro (dimensioni 20-60  $\mu\text{m}$ ) è fortemente addensato e essenzialmente dato da elementi non carbonatici e carbonatici extrabacinali, quali quarzo sia metamorfico sia magmatico (circa 40%), mica bianca (circa 5-10%), minerali opachi (circa 5%), calcite detritica (circa 50%). I fillosilicati sono isoorientati. Le fratture riscontrate sono sigillate da calcite spatica in grandi cristalli. Apparentemente sterile ma con processi di ricristallizzazione piuttosto spinti;

b) siltite da media a grossa a cemento spatico e subordinata micrite. Lo scheletro (20-40  $\mu\text{m}$ ) è disperso e dato da non carbonatici e carbonatici extrabacinali e probabilmente carbonatici intrabacinali. La componente extrabacinale è essenzialmente costituita da quarzo sia metamorfico sia magmatico (circa 15-20%), calcite detritica (circa 30%), mica bianca (circa 5%), minerali opachi (circa 15%). Anche in questo caso i fillosilicati sono isoorientati. La componente intrabacinale è rappresentata da probabili resti fossili (circa 5%) in pessimo stato di conservazione.

Il materiale campionato nel sito di Andora è costituito da una biomicrite parzialmente ricristallizzata con subordinata frazione scheletrica extrabacinale sia carbonatica sia non carbonatica (dimensioni comprese fra 20 e 60  $\mu\text{m}$ ) data da quarzo (circa 5%), mica bianca + minerali opachi (circa 5%) e calcite detritica (circa 10%). La frazione scheletrica è, come anticipato, dominata dalla componente intrabacinale rappresentata da fossili più o meno ricristallizzati, fra i quali si riconoscono: foraminiferi bentonici e planctonici, probabili calcisferulidi e spicole di spugna (lunghe fino a 500  $\mu\text{m}$ ).

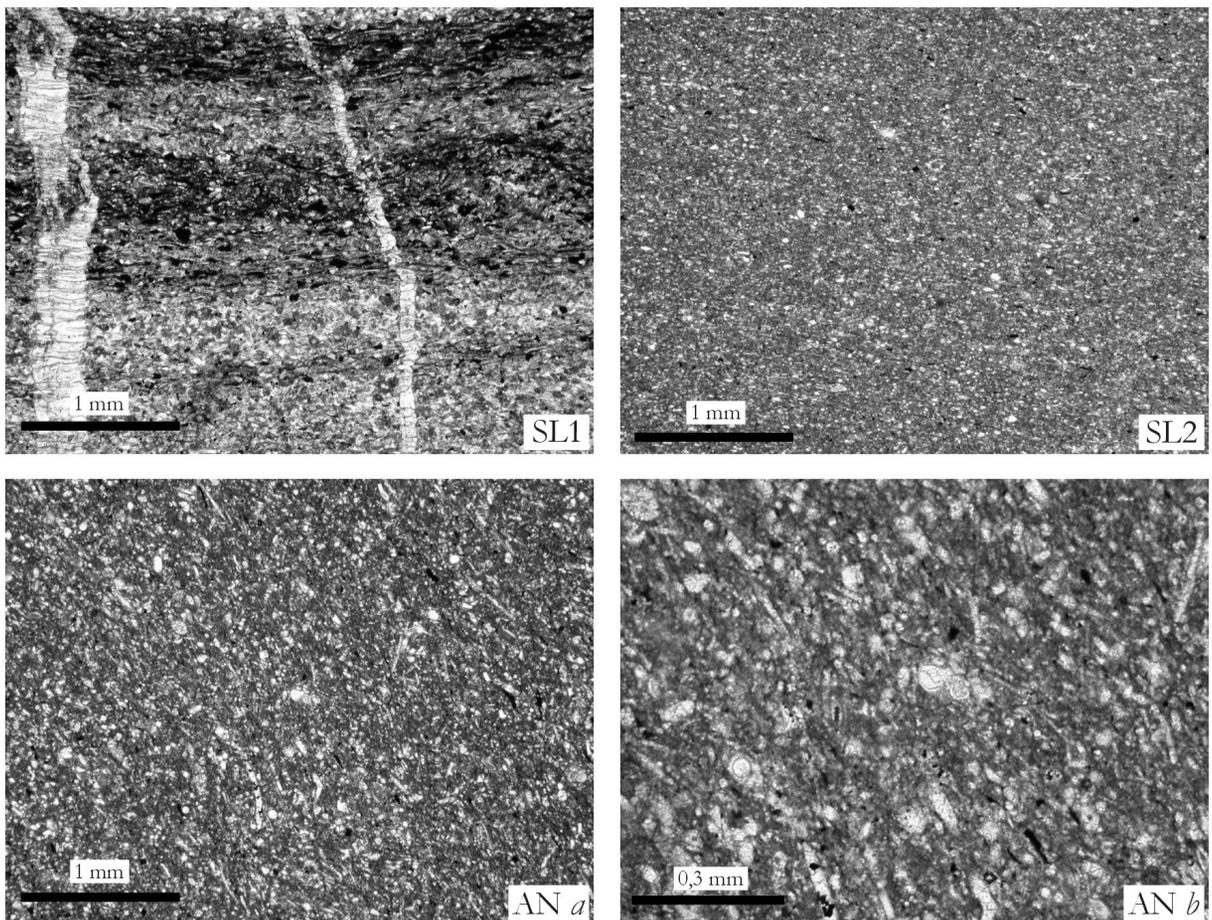


Figura 2 - Sezioni sottili del materiale campionato nei siti di San Lorenzo (campioni SL1 e SL2) e di Andora (AN).

### Point Load Test

I risultati ottenuti attraverso l'esecuzione dei Point Load Test evidenziano, per i campioni sottoposti alla prova, una notevole variabilità dei valori di resistenza a compressione monoassiale. Tale variabilità dipende, prevalentemente, dall'eterogeneità litologica dei termini facenti parte del Flysch di Sanremo.

In Tabella 1 sono riportati, in riferimento ai materiali *AN* ed *SL*, i valori medi (comprensivi delle relative deviazioni standard) e modali ottenuti per diverse associazioni di litotipi così suddivise: a) argilliti e siltiti argillose; b) marne massicce, calcari marnosi e calcilutiti; c) arenarie (talvolta con sottili intercalazioni siltose) e calcareniti.

Si osserva che i valori medi della resistenza a compressione monoassiale, relativi alle diverse associazioni considerate, risultano, nei due casi, simili. Quanto osservato sembra evidenziare che le differenze di comportamento meccanico eventualmente riscontrabili durante lo scavo di gallerie in diversi settori del Flysch di Sanremo, dipendano essenzialmente dalle differenti percentuali nelle quali si associano i vari litotipi che danno origine alle principali litofacies individuate da Saggi (1984).

Considerando il totale dei campioni sottoposti alla prova, i valori più bassi della resistenza a compressione monoassiale si riferiscono ai litotipi argillitici e argillitico-siltosi (media  $37 \pm 23$  MPa, moda  $15 \div 35$  MPa), aumentano notevolmente nelle marne massicce, nei calcari marnosi e nelle calcilutiti ( $123 \pm 68$  MPa, moda  $125 \div 150$  MPa) raggiungendo i valori massimi nelle arenarie e nelle calcareniti ( $168 \pm 76$  MPa, moda  $175 \div 200$  MPa).

**Tabella 1 - Valori medi e modali di  $C_o$  (espressi in Mpa), ottenuti da Point Load Test per diverse associazioni di litotipi.**

<i>Formazione</i>	<i>litotipo</i>	<i>C<sub>o</sub></i> <i>(moda)</i>	<i>C<sub>o</sub></i> <i>(media)</i>	<i>n° campioni</i>
Flysch di Sanremo (materiale <i>SL</i> )	argilliti, siltiti	15-35	$37 \pm 23$	38
	calcilutiti con intercalazioni siltose, calcari, calcilutiti, calcisiltiti	75-100	$122 \pm 77$	76
	arenarie	150-175	$164 \pm 63$	38
Flysch di Sanremo (materiale <i>AN</i> )	siltiti	50-75	55	1
	calcari marnosi, marne massicce, calcilutiti con intercalazioni siltose	125-175	$123 \pm 59$	94
	arenarie, calcareniti	175-200	$172 \pm 86$	48

Secondo la classificazione proposta dall'I.S.R.M. (1979) la resistenza delle associazioni prese in esame può essere considerata, sulla base dei rispettivi valori medi, da "media" a "elevata".

### Slake durability test

Le prove di laboratorio effettuate mostrano un notevole condizionamento dei risultati in funzione della natura dei singoli clasti. Risulta in tal senso significativo il fatto che in molti casi i clasti, provenienti da entrambi i siti, sottoposti alle differenti modalità di prova hanno fornito frammenti di forma lamellare a causa della fissilità dei litotipi cui essi appartengono.

In generale, comunque, sembra possibile affermare che il materiale *SL* presenti un sostanziale minor grado di durezza rispetto al materiale *AN*.

La Tabella 2 riassume i valori, per ogni prova effettuata, dell'indice di durezza ottenuto, rispettivamente, dopo 2 cicli ( $I_{D2}$ ) e 7 cicli ( $I_{D7}$ ). In base ai risultati ottenuti e facendo riferimento alla classificazione ASTM (A.S.T.M., 2007), i materiali *SL* e *AN* presentano, rispettivamente, una durezza "medio - elevata" e "molto elevata". L'analisi dei dati relativi a 7 cicli mostrano ( $I_{D7}$  in Tab. 2) che, indipendentemente dalla metodologia adottata nel corso della prova, il materiale *SL* subisce perdite molto significative; tali perdite possono raggiungere quasi il 60% ( $I_{D7} = 43.08$  % nella prova *ST* effettuata su materiale misto *SL + sp*).

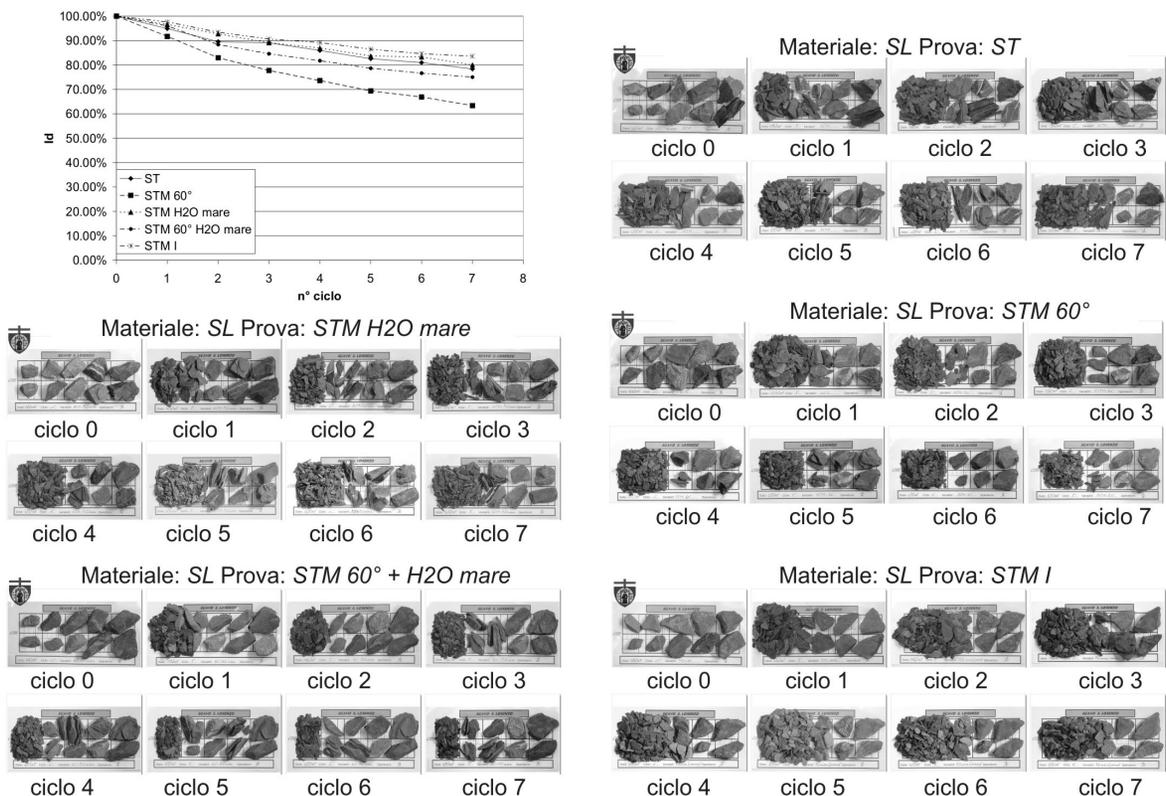
**Tabella 2 - Valori di  $I_{D7}$  delle prove effettuate, in grassetto le perdite più significative (le percentuali contrassegnate con \* sono riferite al solo materiale di risulta).**

Modalità di prova	<i>ST</i>		<i>STM</i> <i>H<sub>2</sub>O mare</i>		<i>STM</i> <i>60°</i>		<i>STM</i> <i>60°</i> <i>+ H<sub>2</sub>O mare</i>		<i>STM I</i>	
	$I_{D2}$	$I_{D7}$	$I_{D2}$	$I_{D7}$	$I_{D2}$	$I_{D7}$	$I_{D2}$	$I_{D7}$	$I_{D2}$	$I_{D7}$
Materiale <i>AN</i>	98.70	97.45	94.71	<b>89.48</b>	98.19	94.86	95.85	<b>88.30</b>	98.99	95.96
Materiale <i>SL</i>	<b>89.51</b>	<b>78.37</b>	<b>82.97</b>	<b>63.34</b>	92.74	<b>80.02</b>	<b>88.37</b>	<b>75.01</b>	93.42	<b>83.56</b>
Materiale <i>sp</i>	99.77	99.65	99.77	99.49	99.78	99.64	99.86	99.71	99.93	99.72
Materiale misto* <i>AN + sp</i>	98.03	95.68	99.15	97.59	98.02	96.25	90.79	<b>61.70</b>	<b>88.20</b>	<b>84.33</b>
Materiale misto* <i>SL + sp</i>	<b>83.89</b>	<b>43.08</b>	90.66	<b>72.34</b>	<b>86.13</b>	<b>72.34</b>	<b>84.84</b>	<b>67.89</b>	<b>86.27</b>	<b>78.38</b>

Il materiale *AN* evidenzia, in generale, un miglior comportamento rispetto al precedente, con perdite generalmente più contenute anche se i risultati appaiono, in alcuni casi, contrastanti. Si osservano, ad esempio per le associazioni *AN + sp*, perdite estremamente contenute nelle prove *ST* e *STM H<sub>2</sub>O mare* (rispettivamente  $I_{D7} = 95.68\%$  e  $I_{D7} = 97.59\%$ ) mentre nei test *STM 60° + H<sub>2</sub>O mare* le perdite raggiungono valori prossimi al 40% ( $I_{D7} = 61.70\%$ ).

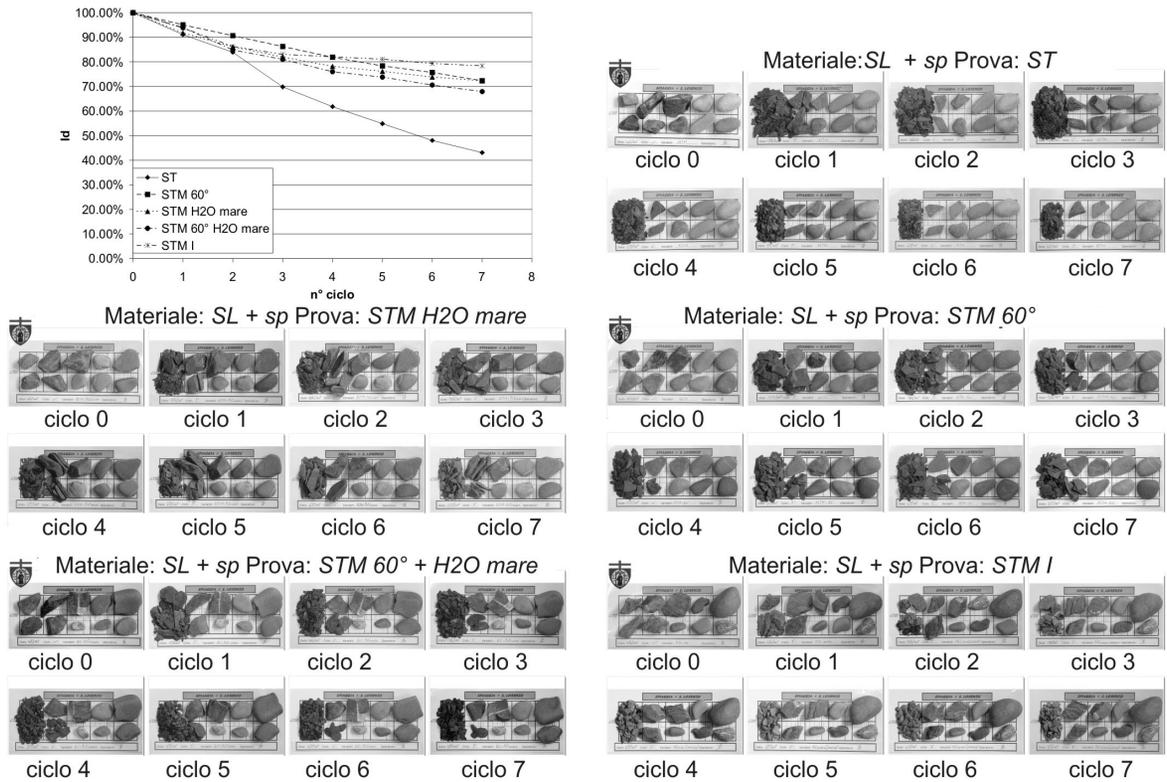
Un comportamento completamente differente è quello desumibile dai risultati registrati durante le prove realizzate su campioni di spiaggia (*sp*). In questo caso le perdite di materiale sono sempre  $<0.5\%$  ( $I_{D7} > 99.5\%$ ) e pertanto assai poco significative.

Per quanto riguarda il comportamento del materiale in funzione delle diverse modalità di prova anche in questo caso si è osservata una risposta differente da parte dei materiali *AN* e *SL*, anche se in entrambi i casi è risultata evidente una minore durezza dei materiali qualora testati in forma mista (associazioni *AN + sp* e *SL + sp* in Figg. 4 e 6). I risultati delle prove svolte sul materiale *SL* (Fig. 3) evidenziano che il relativo degrado, in questo caso, avviene prevalentemente per rottura e frammen-



**Figura 3 - Risultati dei tests di durabilità del materiale *SL* e variazione della forma dei clasti durante le differenti prove.**

tazione dei clasti mentre i fenomeni di usura, benché presenti, sono piuttosto limitati. Detto materiale sembra, inoltre, risentire maggiormente degli effetti dell'acqua marina rispetto a quelli indotti dalle variazioni di temperatura. Esso, infatti, durante il test *STM I* ha evidenziato una notevole frammentazione dei clasti pur mantenendo un valore piuttosto elevato dell'indice di durezza (83.56%). Lo stesso materiale, in associazione con ciottoli di spiaggia, (*SL + sp* in Fig. 4) ha mostrato un comportamento analogo al caso precedente ma, come precedentemente esposto, l'indice di durezza



è risultato decisamente inferiore (78.38 %). In tal caso, tuttavia, sono stati osservati, oltre a rottura e frammentazione dei clasti, anche rilevanti fenomeni di usura degli stessi.

I test effettuati sui materiali *AN* hanno evidenziato che questi subiscono in minor misura, rispetto ai materiali *SL*, i fenomeni di frammentazione e rottura (Fig. 5).

Questi ultimi, infatti, interessano solo occasionalmente singoli clasti. In tal caso i maggiori effetti sembrano potersi riferire sia allo stress termico che agli effetti dell'acqua marina.

La prova *STM I* è quella che ha fornito i più bassi valori dell'indice di durezza ma permane un certo margine di incertezza al riguardo poiché le perdite sono, in questo caso, dovute alla disintegrazione di un solo clasto e quindi potenzialmente influenzate dai relativi caratteri composizionali. La risposta dell'associazione di materiali *AN + sp* (Fig. 6) è relativamente buona; le perdite sono essenzialmente dovute ad usura o rottura dei clasti, raramente alla frammentazione dei medesimi. Ciò è stato riscontrato, tuttavia, solo nelle prove che hanno previsto l'utilizzo di acqua marina, a conferma della elevata capacità di alterazione di quest'ultima sul materiale in oggetto.

Infine le analisi tessiturali della frazione dispersa hanno mostrato una modesta prevalenza della frazione sabbiosa rispetto a quella pelitica. La pelite è risultata più abbondante nei campioni sottoposti a maggiori temperature e nel caso di immersione continua in acqua di mare. La frazione dispersa non sembra, invece, essere influenzata in alcun modo dal numero dei cicli di prova.

## Discussione

Le analisi petrografiche hanno evidenziato le differenze litologiche fra i materiali campionati nei due siti considerati. Il sito di S. Lorenzo risulta caratterizzato da siltiti da medie a grosse con interstiziali carbonatici e con scheletro più o meno addensato, una discreta variabilità è mostrata anche dalle proporzioni degli elementi scheletrici extrabacinali (ad es. il quarzo). Il sito di Andora è caratterizzato da biomicriti parzialmente ricristallizzate con una frazione clastica fortemente subordinata. Questa sostanziale differenza compositiva si traduce, ovviamente, in un differente risposta alle sollecitazioni geomeccaniche. Entrambe le prove effettuate (Point Load Test, Slake Durability Test) hanno evidenziato che il materiale *SL*, ed in particolare quello con frazione clastica meno abbondante, è dotato di caratteristiche di durezza inferiori rispetto a quelle proprie del materiale *AN*.

È necessario, tuttavia, considerare che le differenti modalità di scavo adottate nei due casi possono aver influenzato, seppure in parte, i risultati.

Infatti, è plausibile ritenere che dallo scavo con fresa, adottato nelle gallerie di Andora, tenda a derivare un materiale già selezionato, con maggiore presenza di frammenti stabili rispetto al materiale derivante dallo scavo con metodo tradizionale. Adottando le usuali classificazioni si osserva che i materiali provenienti da entrambi i siti risultano di qualità da “medio-elevata” a “molto-elevata”, quindi i *range* di valori da esse utilizzati sembrano sovrastimare la qualità del materiale, specie se confrontato con quello proveniente dall'ambiente litorale. Infatti le prove di durezza effettuate sui materiali *sp*, che non hanno subito alcuna alterazione e/o sensibile perdita di materiale indipendentemente dalla metodologia adottata, ne indicano una sostanziale stabilità. Questo aspetto evidenzia che la tipologia di prova adottata non è particolarmente invasiva, se raffrontata agli stress prodotti dall'ambiente litorale sui sedimenti. Infatti, in tale ambiente gli effetti degli agenti naturali si esplicano non solo attraverso l'azione del moto ondoso, e la conseguente usura dei clasti causata

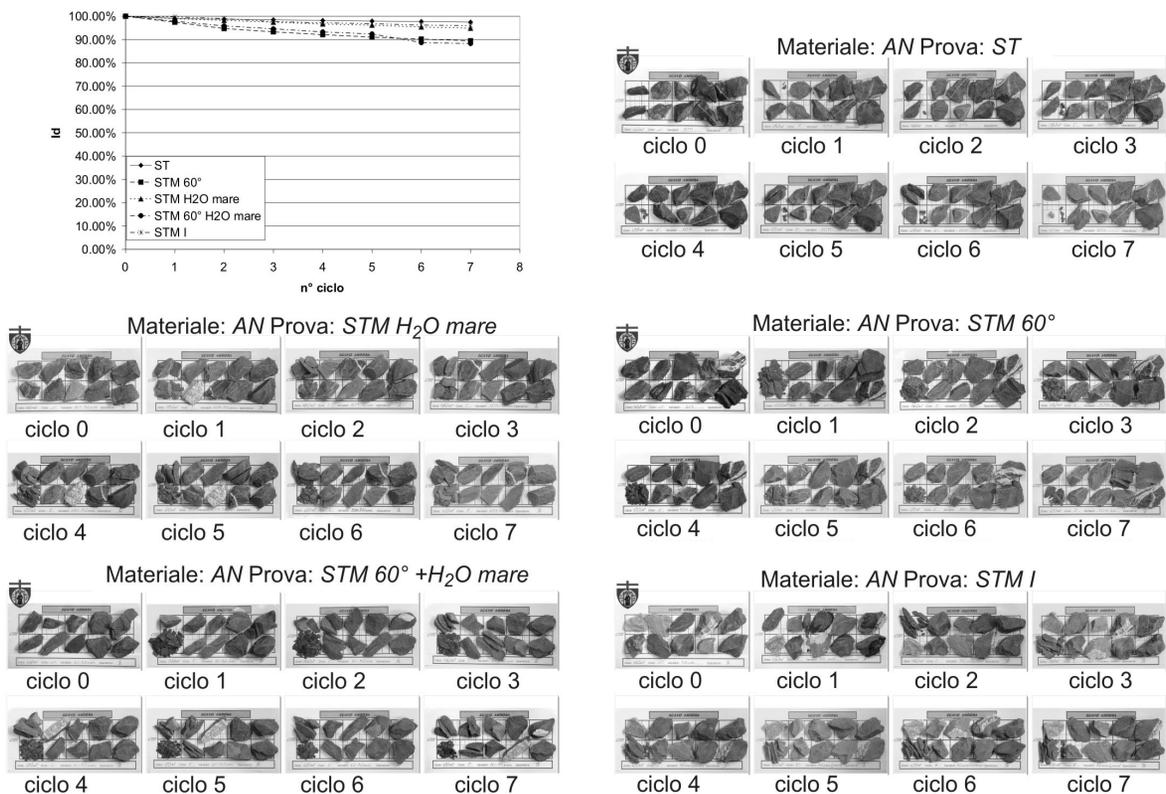
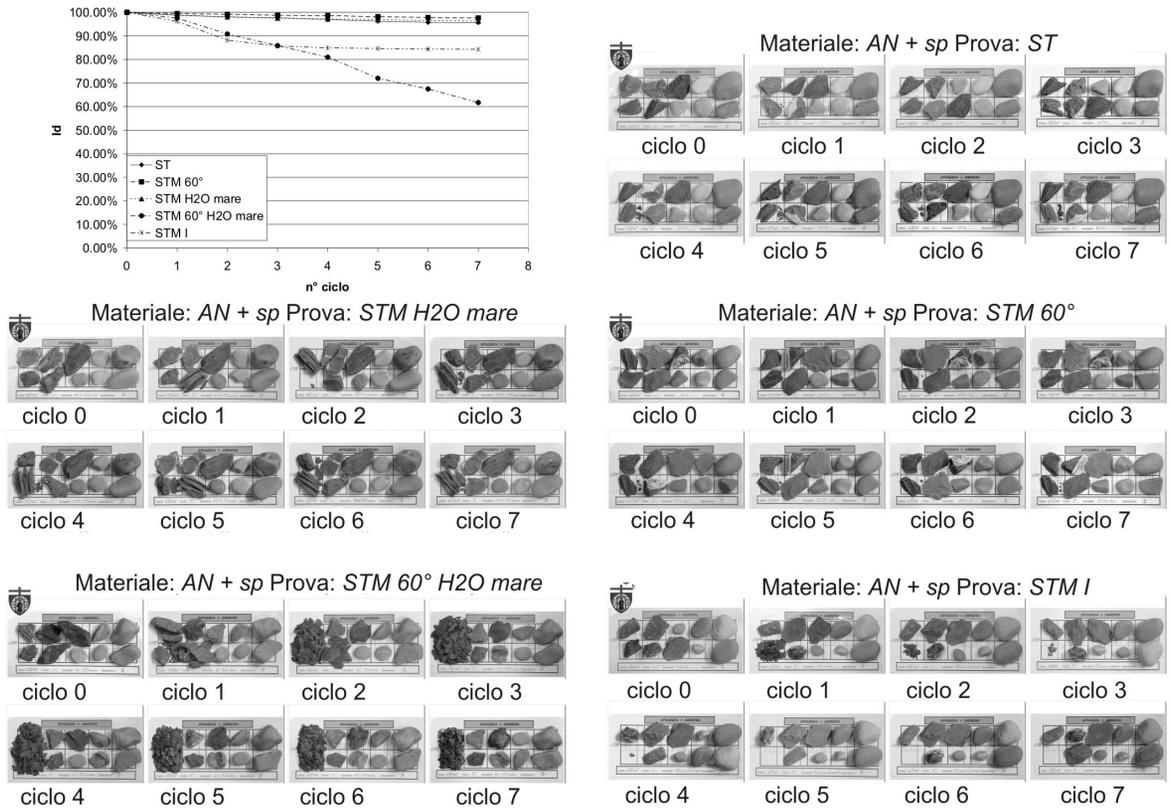


Figura 5 - Risultati dei tests di durabilità del materiale AN e variazione della forma dei clasti durante le differenti prove.



**Figura 6 - Risultati dei tests di durabilità del materiale AN + sp e variazione della forma dei clasti durante le differenti prove.**

dagli urti tra di essi, ma anche attraverso un'alterazione dei sedimenti ad opera degli agenti climatici, terrestri e marini, ed in particolar modo della temperatura, attraverso l'escursione termica, e dell'acqua marina a causa dell'elevato potere solvente.

Durante le prove di durezza il materiale di risulta, al contrario di quello di spiaggia, è quello che subisce, quindi, in maniera più evidente fenomeni non solo di abrasione ma anche di alterazione. L'aspetto più significativo è quello relativo alle sollecitazioni chimico-fisiche indotte. Il materiale risulta molto sensibile sia allo stress termico sia ai processi che possono derivare dalla presenza di acqua marina. In particolare i termini siltosi sembrano risentire maggiormente di questi ultimi, mentre gli altri litotipi, pur avendo un comportamento nel complesso migliore, sembrano subire in ugual misura gli stress indotti da entrambi. Per quanto riguarda la risposta dei materiali testati ai fenomeni di abrasione va evidenziato che questi ultimi risultano meno palesi rispetto ai precedenti, anche se presenti in tutti i casi. Dal confronto dei risultati ottenuti con le diverse prove questi effetti sembrano maggiori sui termini più tenaci (materiali AN) e più evidenti durante le prove in cui detti materiali sono stati associati a ciottoli di spiaggia. In quest'ultimo caso l'effetto degli urti sembra tradursi non solo in una maggior frantumazione ma anche in una maggiore abrasione. I risultati inerenti le modalità di usura si riflettono soprattutto sulla granulometria del detrito prodotto, costituito in parti pressoché uguali di frazione pelitica e sabbiosa. È inoltre verosimile ritenere che quest'ultima, in ambiente naturale, possa continuare nel tempo ad alterarsi dando origine, a lungo termine, ad una frazione esclusivamente fine.

In merito ai rapporti fra durezza e resistenza, l'elevata eterogeneità sotto il profilo litologico, strutturale e tessiturale dei campioni sottoposti alle relative prove non ha consentito di individuare una relazione univoca. È stato, tuttavia, possibile osservare un rapporto fra la resistenza dei

campioni e le modalità di usura degli stessi. In particolare è parso che nei termini caratterizzati da minore resistenza (argilliti e argilliti-siltose), che risultano predominanti nei materiali *SL* e sono interessati da un elevato grado di fissilità, tendano a prevalere i fenomeni di alterazione su quelli di abrasione. Il contrario avviene negli altri termini a maggiore resistenza (marne massicce, calcari marnosi, calcilutiti, arenarie e calcareniti), più diffusi rispetto ai precedenti nei materiali *AN*, dove prevalgono i fenomeni di abrasione.

Per quanto riguarda, infine, la validità dell'utilizzo della prova di durezza nella valutazione dell'idoneità dei materiali per possibili interventi di ripascimento, le metodologie adottate sono apparse utili nel caso dei litotipi in oggetto. Permangono, tuttavia, incertezze sull'interpretazione dei risultati, legate fondamentalmente all'impossibilità di definire compiutamente gli aspetti litologici, strutturali e tessiturali dei numerosi e differenti termini da cui derivano i clasti sottoposti alle prove.

È presumibile che nel caso in cui il materiale sottoposto alle prove di durezza presenti caratteristiche di relativa omogeneità ed isotropia, quindi laddove risultino più importanti i fenomeni abrasivi, si renda opportuno modificare le modalità di prova intervenendo, ad esempio, sui tempi di durata delle medesime, come proposto da Dickenson e Baillie (1999).

### Conclusioni

Il problema principale nell'interpretazione dei risultati ottenuti con il test di durezza, risiede nel fatto che non sono presenti in letteratura applicazioni per la valutazione dei materiali da impiegare nel ripascimento dei litorali. Inoltre, la natura stessa del materiale costituito da diversi termini a composizione variabile, introduce un ulteriore elemento di difficoltà. Ne consegue che una valutazione inequivocabile sull'idoneità, o meno, dei litotipi studiati risulta alquanto problematica. Il confronto tra i materiali derivanti dagli scavi in sotterraneo (*SL* e *AN*) e quelli provenienti dalla spiaggia (*sp*) ha comunque evidenziato in maniera chiara il differente comportamento dei primi, che subiscono, al contrario dei secondi, importanti fenomeni di alterazione, disgregazione ed usura; tali fenomeni risultano ulteriormente accentuati qualora il materiale di risulta degli scavi venga testato in associazione a ciottoli di spiaggia. Sulla base dei risultati ottenuti è possibile affermare che i litotipi provenienti dal sito di S. Lorenzo (materiale *SL*) presentano caratteristiche tali che li rendono scarsamente idonei ad un utilizzo per ripascimenti. Più complessa risulta l'interpretazione delle prove eseguite sul materiale proveniente dal sito di Andora (materiale *AN*). La risposta ai differenti test è risultata, spesso, contraddittoria e probabilmente conseguenza della occasionale presenza di ciottoli con frazione siltosa relativamente elevata. Inoltre, come si può osservare dai diagrammi rappresentativi dei test svolti, al termine della prova il materiale, in molti casi, non sembra avere ancora raggiunto condizioni di stabilità. Risulta anche evidente che questo materiale avrà tempi di usura decisamente inferiori rispetto a quello naturale. Ne consegue, necessariamente, che in caso di utilizzo a fini di ripascimento, sia da prevedere, nel caso del materiale in oggetto, una ridotta efficacia degli interventi, che si tradurrà in una maggiore frequenza degli stessi. Si ritiene, tuttavia, che l'abbondante frazione pelitica, che è presumibile si venga a formare nel tempo in conseguenza dell'usura del materiale, possa essere allontanata e dispersa dall'azione del moto ondoso. Per quanto riguarda gli aspetti metodologici, pur tenendo conto del numero limitato di test effettuati, l'utilizzo incrociato dei dati provenienti dalle diverse tipologie di prove effettuate in questo studio ha dimostrato di poter fornire informazioni utili per valutare l'idoneità del materiale per interventi di ripascimento. Si ritiene, infine, di grande interesse sia implementare le conoscenze acquisite attraverso questo studio, introducendo nuove modalità di prova e/o modificando quelle adottate, sia confrontare i risultati ottenuti in questa sede con nuove indagini relative a contesti litologici differenti.

**Bibliografia**

- A.S.T.M. (2007) - *D 4644-04. Test Method for Slake Durability of shales and similar weak rocks*. ASTM Vol. 04.08, Soil and Rock (I).
- Baccelle L. e Bosellini A. (1965) - *Diagrammi per la stima visiva della composizione percentuale nelle rocce sedimentarie*. - Ann. Univ. Ferrara, N.S., Sez. IX, Sci. Geol. Paleont., 1/3: 59-62.
- Carter R.W.B. (1988) - *Coastal environments*. Academic Press, London, pp. 617.
- Dhakal G.P., Yoneda T., Kato M. e Kaneko K. (2002) - *Slake durability and mineralogical properties of some pyroclastic and sedimentary rocks*. Engineering Geology, 65: 31-45.
- Dhakal G.P., Kodama J., Yoneda T., Neaupane K. M. e Goto T. (2004) - *Durability characteristics of some assorted rocks*. J. Cold Regions Engineering, ASCE, 18: 110-122.
- Dickenson S.E. e Baillie M.W. (1999) - *Predicting scour in weak rock of the Oregon Coast range Final Report SPR 382*. Oregon Department of Transportation Research Group, OR 97301-5192, Salem. pp. 62.
- Giammarino S., Fanucci F., Orezzi S., Rosti D. e Morelli D. (in stampa) - *Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50:000 - Foglio 258-271 San Remo*. A.P.A.T. - Regione Liguria. pp. 132.
- Gökçeoglu C., Ulusay R. e Sönmez H. (2000) - *Factors affecting the durability of selected weak and clay-bearing rocks from Turkey, with particular emphasis on the influence of the number of drying and wetting cycles*. Engineering Geology, 57: 215-237.
- Gonzalez-Correa J.M., Fernandez Torquemada Y. e Sanchez Lizaso J.L. (2008) - *Long-term effect of beach replenishment on natural recovery of shallow Posidonia oceanica meadows*. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 76: 834-844.
- Gupta V. e Ahmed I. (2007) - *The effect of pH of water and mineralogical properties on the slake durability (degradability) of different rocks from the Lesser Himalaya, India*. Engineering Geology, 95: 79-87
- Hamm L., Capobianco M., Dette H.H., Lechuga A., Spanhoff R. e Stive M.J.F. (2002) - *A summary of European experience with shore nourishment*. Coastal Engineering, 47: 237-264.
- I.S.R.M. (1979) - *Suggested Methods for Determining Water Content, Porosity, Density, Absorption and Related Properties*. International Journal Rock Mechanics. Mining Sci. and Geomechanics Abstr., 16: 141-156.
- I.S.R.M. (1985) - *Suggested methods for determining point load strength*. Commission on Testing Methods, Working Group on Revision of the Point Load Test. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 22: 51-60.
- Palmström A. (1995) - *Rmi - a rock mass characterization system for rock engineering purposes*. PhD thesis, Oslo University, Norway, 400 pp.
- Rete Ferroviaria Italiana (2005) - *La linea Genova-Ventimiglia – Il raddoppio del tratto Andora-San Lorenzo - Le nuove stazioni di Imperia, Diano e Andora*. Stampa xxx, 3/2005 - 1.000.
- Sagri M. (1984) - *Litologia, stratimetria e sedimentologia delle torbiditi di piana di bacino del Flysch di Sanremo (Cretaceo superiore, Liguria Occidentale)*. Mem. Soc. Geol. It., 28: 577-586.

**Manoscritto ricevuto il 28/08/2008, accettato il 17/09/2008.**