



**STABILIZZAZIONE DEI TERRENI CON CALCE:
STUDIO DELLE PROPRIETÀ
E DELLE PRESTAZIONI MEDIANTE
L'IMPIEGO DEGLI ULTRASUONI**

Gianluca Cerni

Istituto di Strade e Trasporti - Università degli Studi di Ancona
Via Brezze Bianche, 60131 Ancona
Tel: +39 071.2204780 - Fax: +39.071.2204510
E-mail: strade2@popcsi.unian.it
E-mail: cerni@libero.it

STABILIZZAZIONE DEI TERRENI CON CALCE: STUDIO DELLE PROPRIETÀ E DELLE PRESTAZIONI MEDIANTE L'IMPIEGO DEGLI ULTRASUONI

GIANLUCA CERNI – Istituto di Strade e Trasporti – Università di Ancona

SOMMARIO

La tecnica di riutilizzare le terre non idonee in campo stradale mediante la miscelazione con calce è una pratica nota da diversi anni. In effetti tale tecnica rappresenta un'economica alternativa, rispettosa dell'ambiente, all'impiego dei misti granulari i cui costi stanno crescendo in diversi paesi. Lo studio di tali miscele però richiede, in fase progettuale, un considerevole impegno di tempo e lavoro. Infatti, per indagare sugli effetti della stabilizzazione ed individuare la miscela ottimale, occorre disporre di un elevato numero di provini da sottoporre a diversi tipi di prove.

Il problema può essere in parte superato ricorrendo ai metodi cosiddetti “non distruttivi”, abbastanza diffusi in molti settori che si occupano del controllo di qualità dei materiali, ma a tutt'oggi scarsamente impiegati nell'analisi delle terre stabilizzate.

Nella presente memoria si è appunto studiata la propagazione degli ultrasuoni nelle terre miscelate con calce al fine di determinare delle leggi empiriche che correlano la misura non distruttiva della velocità, che può essere effettuata più volte sullo stesso campione, con le caratteristiche delle terre stabilizzate con calce. Tale risultato risulta fondamentale perché i tempi di reazione della calce con l'argilla, dai quali dipendono le stesse caratteristiche meccaniche del terreno trattato, non sono noti a priori in quanto fortemente dipendenti dai diversi minerali argillosi presenti nel terreno.

In particolare il monitoraggio delle velocità di propagazione degli ultrasuoni su campioni differenti per umidità e per contenuto di calce, ha permesso di interpretare, attraverso un modello matematico, l'evoluzione nel tempo dei valori delle velocità. In tal modo si sono potute ottenere indicazioni pratiche relative ai periodi di stagionatura da adottare per una corretta realizzazione dell'opera stradale.

Inoltre è stata studiata una relazione matematica fra la velocità degli ultrasuoni e le caratteristiche fisiche del terreno trattato che dipende non solo dalla densità, come avviene ad esempio nei calcestruzzi, ma anche dalla quantità di acqua, essendo il terreno un mezzo polifase.

Ben più utile e di carattere pratico è il risultato ottenuto correlando i valori di velocità con i parametri meccanici a rottura dei provini. In particolare sono state trovate relazioni non lineari, analoghe a quella dei calcestruzzi, capaci di fornire i valori di resistenza e di modulo, noti i valori di velocità, tenendo conto anche del contenuto in acqua. L'efficacia di tali formule risulta accentuata dalla loro possibilità di applicazione che può essere effettuata indipendentemente dalla percentuale di calce e dai tempi di stagionatura adottati.

In definitiva i risultati di questa ricerca hanno potuto confermare l'utilità e la convenienza dell'impiego degli ultrasuoni come mezzo di indagine delle terre trattate con calce, così come già avviene in altri settori.

ABSTRACT

The mixing of soil and lime has been a well-known technique for several years, in the reutilization of soils unfit for road construction. As a matter of fact this technique is an economical alternative, as well as being respectful of the environment, using granular mixes which have increasing costs in several countries. Yet, a considerable amount of time is required for the analysis of these mixtures in the planning stage. Indeed, in order to investigate stabilization effects and to determine the optimum mixture, a high number of samples must be arranged and undergo different types of tests.

The problem can be partly overcome with the so-called “nondestructive” testing, widespread enough in many fields and dealing with material quality check, although not frequently used, up to now, in stabilized soil study.

In this paper the ultrasounds propagation in lime-mixed soils has been studied, in order to determine empirical laws correlated with nondestructive speed measurement, which can be carried out repeatedly on the same sample, with lime-stabilized soils characteristics. This result is fundamental, because the times of reaction between lime and clay, which the very mechanical performances of the treated soil depend on, are not known in advance, being greatly affected by the different argillaceous minerals present in the soil.

In particular, with the monitoring of ultrasounds propagation speeds in samples with different contents of moisture and lime, it has been possible to explain, by means of a mathematical model, speed values evolution in time. In this way practical recommendations concerning the curing periods to be adopted for a correct execution of the road work have been obtained.

Moreover a mathematical relation has been studied between ultrasonic velocity and treated soil physical performances. This depends not only on the density, as in the case of concrete for example, but also on water content, the soil being a polyphase material..

Much more useful and of a practical nature is the result obtained correlating speed values with resistance parameters of the samples. In particular, non-linear laws have been found similar to those of concrete and which give resistance and modulus values, once the speed values and water content are known. The effectiveness of such formulas is increased by the fact that they are applicable independently on the lime percentage and curing times which have been adopted.

In conclusion the results of this study have confirmed the usefulness and expedience of using ultrasounds as a form of analysis for lime-treated soils, as already happens in other fields.

1. SCOPO DELLA RICERCA

La progettazione delle miscele terra-calce per la stabilizzazione dei terreni non idonei in campo stradale richiede un considerevole impegno di tempo e lavoro. Infatti, per indagare gli effetti della stabilizzazione ed individuare la miscela ottimale, occorre disporre di un elevato numero di provini da sottoporre a diversi tipi di prove.

La laboriosità di tale indagine è dovuta principalmente ai seguenti motivi:

- le variabili da investigare, che influenzano il processo di stabilizzazione, sono molteplici: l’umidità di trattamento, la percentuale di calce, il tempo di stagionatura e la temperatura;
- le prove sono generalmente di tipo distruttivo (CBR, resistenza, fatica, ecc.) e quindi comportano l’impossibilità di riutilizzo dei provini per altri scopi.

Il problema può essere in parte superato ricorrendo ai metodi cosiddetti “non distruttivi”, abbastanza diffusi in molti settori che si occupano del controllo di qualità dei materiali ma scarsamente applicati nello studio delle miscele terra-calce.

L'impiego di tali metodi ha generalmente molteplici finalità, come ad esempio: la verifica dell'omogeneità dei materiali e del loro degrado meccanico, e inoltre la stima dei parametri di elasticità, di resistenza e dello stato fessurativo. Ognuno degli scopi sopra precisati può essere perseguito attraverso un'attenta scelta del metodo non distruttivo ritenuto più efficace [1].

Il metodo degli ultrasuoni, a differenza di altri, riesce a coprire un ampio ventaglio di esigenze, tanto da rispondere, in modo più o meno ottimale, a tutte le finalità cui si è fatto cenno. Questo metodo consiste nell'eccitare un solido con impulsi acustici, che vengono trasmessi sotto forma di vibrazioni elastiche, ad una frequenza superiore a quella massima percepibile dall'orecchio umano.

La grandezza rilevata è il tempo t di attraversamento delle onde, misurato tra la sonda trasmittente e quella ricevente. Il parametro fondamentale del metodo non-distruttivo in questione è la velocità V di propagazione degli impulsi ultrasonori attraverso il materiale, data dal rapporto $V=S/t$ in cui S rappresenta la distanza fra le sonde.

Le onde ultrasonore presentano delle caratteristiche che le rendono idonee agli usi più svariati. In particolare, avendo una frequenza elevata (f) e quindi una lunghezza d'onda ridotta ($\lambda=V/f$), gli ultrasuoni possiedono:

- un'elevata intensità, in quanto proporzionale al quadrato della frequenza, e di conseguenza un potere penetrante superiore a quello delle onde sonore;
- un'alta direzionalità (dipendente dalla piccola lunghezza d'onda), che riduce il fenomeno della diffrazione e consente alle onde di procedere nel mezzo senza allargamenti, con modalità simili a quelle dei fasci luminosi.

Le suddette caratteristiche consentono di concentrare su piccole superfici notevoli quantità di energia.

A seconda dell'uso va però considerato lo specifico mezzo di trasmissione, dal momento che ogni materiale presenta un diverso indice di assorbimento. Così avremo una propagazione ottima nei solidi e nei liquidi, e meno buona nei gas, come l'aria.

Le proprietà citate giustificano l'utilizzo diffuso degli ultrasuoni nelle indagini sulle caratteristiche di molti materiali. Per le stesse ragioni si è ritenuto utile studiare la propagazione degli ultrasuoni nelle terre miscelate con calce, campo in cui tali ricerche rivestono un carattere quasi del tutto innovativo.

A tale riguardo, nella presente indagine si è mirato ad individuare, così come in altri settori affini (ad es. nei calcestruzzi [2]), delle leggi empiriche che permettano di correlare la misura non distruttiva della velocità delle onde ultrasonore con le caratteristiche meccaniche delle terre stabilizzate con calce. In tal modo è possibile conoscere, con pochi campioni e quindi con poco onere, l'evoluzione delle proprietà del materiale nel periodo di stagionatura sulla base delle variazioni di velocità misurate. Ciò è particolarmente utile se si considera che i tempi di reazione della calce con l'argilla non sono noti a priori, in quanto fortemente dipendenti dai diversi minerali argillosi presenti nel terreno.

2. PROGRAMMA SPERIMENTALE

La ricerca è stata sviluppata al fine di determinare ed interpretare la propagazione degli ultrasuoni nelle miscele di terra con calce. A tale scopo sono stati realizzati e

sottoposti a prove distruttive e non distruttive, numerosi provini ottenuti con l'aggiunta di diverse combinazioni di calce e acqua.

In particolare il programma sperimentale è stato articolato, in sede di analisi e di interpretazione dei risultati, in più fasi di lavoro, con riferimento ai seguenti scopi:

- monitoraggio della velocità degli ultrasuoni nel tempo;
- confronto fra le proprietà fisiche del materiale e le misure di velocità;
- confronto fra le caratteristiche meccaniche, ricavate dalle prove di compressione semplice, e le velocità rilevate prima della rottura;
- confronto dell'evoluzione nel tempo dei parametri distruttivi e non distruttivi riferiti ad una particolare miscela.

2.1. Materiali utilizzati

Nella sperimentazione si è utilizzata una terra limo-argillosa avente un limite liquido pari a 54 ed un limite plastico pari a 26. Da tali valori dei limiti di consistenza deriva un terreno mediamente plastico, con un indice di plasticità pari a 28, e quindi idoneo al trattamento con calce.

Nella preparazione delle miscele si è utilizzata una calce idrata in polvere e acqua, priva di sostanze organiche, necessaria per ottenere diversi tenori di umidità di trattamento.

2.2. Confezionamento delle miscele e dei provini

La preparazione delle miscele terra-calce-acqua è avvenuta secondo le prescrizioni della norma ASTM D 3551-90 [3].

Dapprima la terra è stata disgregata e poi lasciata ad asciugare all'aria fino al raggiungimento di umidità inferiori a quella minima impiegata nella sperimentazione.

Il confezionamento dei provini è stato effettuato secondo il seguente schema:

- aggiunta di calce alla terra nella percentuale voluta e miscelazione;
- aggiunta di acqua fino al valore di umidità di trattamento prestabilito e ulteriore miscelazione;
- compattazione della miscela.

Quest'ultima fase è avvenuta secondo una procedura diversa a quella prevista per le prove standardizzate di costipamento. Infatti si è potuto constatare, con prove preliminari, che con il metodo di compattazione a 5 strati non si potevano ottenere misure affidabili della velocità ultrasonora, poiché le misure stesse risultavano spesso alquanto differenti per campioni di uguali caratteristiche. Tale variazione è stata ritenuta imputabile essenzialmente alla presenza di microfessure alle interfacce fra stratificazioni adiacenti. In effetti, dopo la somministrazione di 25 colpi, lo strato di terra si presenta spesso molto liscio, tanto da non permettere una perfetta adesione con quello successivo, causando così discontinuità nel provino. In tali condizioni è comprensibile che data la presenza di piccole fessure, o anche di zone a minor densità, la velocità ultrasonora si può ridurre, in quanto notevolmente influenzata dalle caratteristiche del materiale attraversato.

Per ovviare a tali problemi, si è deciso di confezionare campioni più omogenei, distribuendo l'energia di compattazione in modo più uniforme su tutta l'altezza del provino. In pratica l'energia prevista nella prova AASHTO Modificata è stata ripartita su 10 strati anziché su 5 per ottenere campioni con densità comparabile a quella prevista dalla norma e nel contempo più omogenea in tutto il campione. L'esito di tale

operazione è risultato chiaro anche visivamente, per la mancanza pressoché totale dei segni di stratificazione, in genere visibili sulla superficie esterna.

Dopo il costipamento, i campioni, aventi le dimensioni di 101.6 mm di diametro e 116.4 mm di altezza, sono stati estratti dalle fustelle e sottoposti ad una prima misurazione della velocità di attraversamento degli ultrasuoni; successivamente essi sono stati chiusi in sacchetti di plastica a tenuta d'aria, per evitare la carbonatazione della calce, e lasciati a stagionare in condizioni di temperatura costante (20°C).

Le percentuali di calce utilizzate nelle miscele, riferite al peso secco della terra, sono state del 2, 4 e 6%.

Le diverse umidità di trattamento sono state scelte per analizzare il comportamento delle miscele nell'intorno dell'umidità ottima di costipamento. In particolare, si sono presi in esame, per ogni percentuale di calce, numerosi contenuti d'acqua, in modo da ricoprire un ampio intervallo d'indagine.

2.3. Esecuzione delle prove

La prova non distruttiva, con impiego degli ultrasuoni, è stata effettuata mediante un apparato capace di produrre e ricevere impulsi ultrasonici di frequenza pari a 53 kHz.

La prova, svolta in diversi momenti della stagionatura, è consistita nell'applicare a stretto contatto i due trasduttori sulle facce opposte del provino cilindrico. Per migliorare il contatto fra le due superficie, e permettere quindi che la vibrazione del trasduttore fosse trasmessa correttamente al campione, è stato spalmato un grasso sulla superficie del campione.

Al fine di ottenere valori affidabili e confrontabili nel tempo, le posizioni di misura per ciascun provino sono state mantenute invariate per tutto il periodo di sperimentazione.

Una volta messo in funzione, l'apparato fornisce sul display il tempo di attraversamento degli impulsi in microsecondi. Noto il tempo (t) e la distanza percorsa (S), corrispondente all'altezza del provino, è facilmente determinabile la velocità degli ultrasuoni nel mezzo ($V=S/t$).

Il monitoraggio delle velocità è stato effettuato, per quasi tutti i provini, per un tempo di 28 giorni. Per alcuni provini esso si è protratto per periodi di tempo più o meno brevi, fino a raggiungere anche i 60 giorni.

Al termine di questa fase i campioni sono stati sottoposti a prove di compressione semplice, secondo la normativa A.S.T.M. D5102-90 [4]. In particolare, si è imposta una velocità di avanzamento dei piatti della pressa pari a 1/20 di pollice al minuto (1.25 mm/min), equivalente ad una deformazione assiale pari a circa 1%/min, che rientra nell'intervallo previsto dalla norma (0.5±2%/min).

3. ANALISI ED INTERPRETAZIONE DEI RISULTATI

3.1. Monitoraggio delle velocità nel tempo

I valori di velocità degli ultrasuoni, rilevati nel tempo sui campioni differenti per umidità e calce, sono riportati in figura 1 per le 4 percentuali di legante (0, 2, 4 e 6%).

In particolare nel singolo riquadro è possibile osservare una serie di curve aventi un andamento pressoché analogo, sebbene siano state ottenute monitorando provini con contenuto d'acqua diverso. Nei grafici non sono stati riportati i valori di umidità, nonostante essi influiscano sulla posizione delle curve (come evidenziato più oltre, figura 5), perché indicarli in questo tipo di rappresentazione non consentirebbe una facile interpretazione della loro influenza.

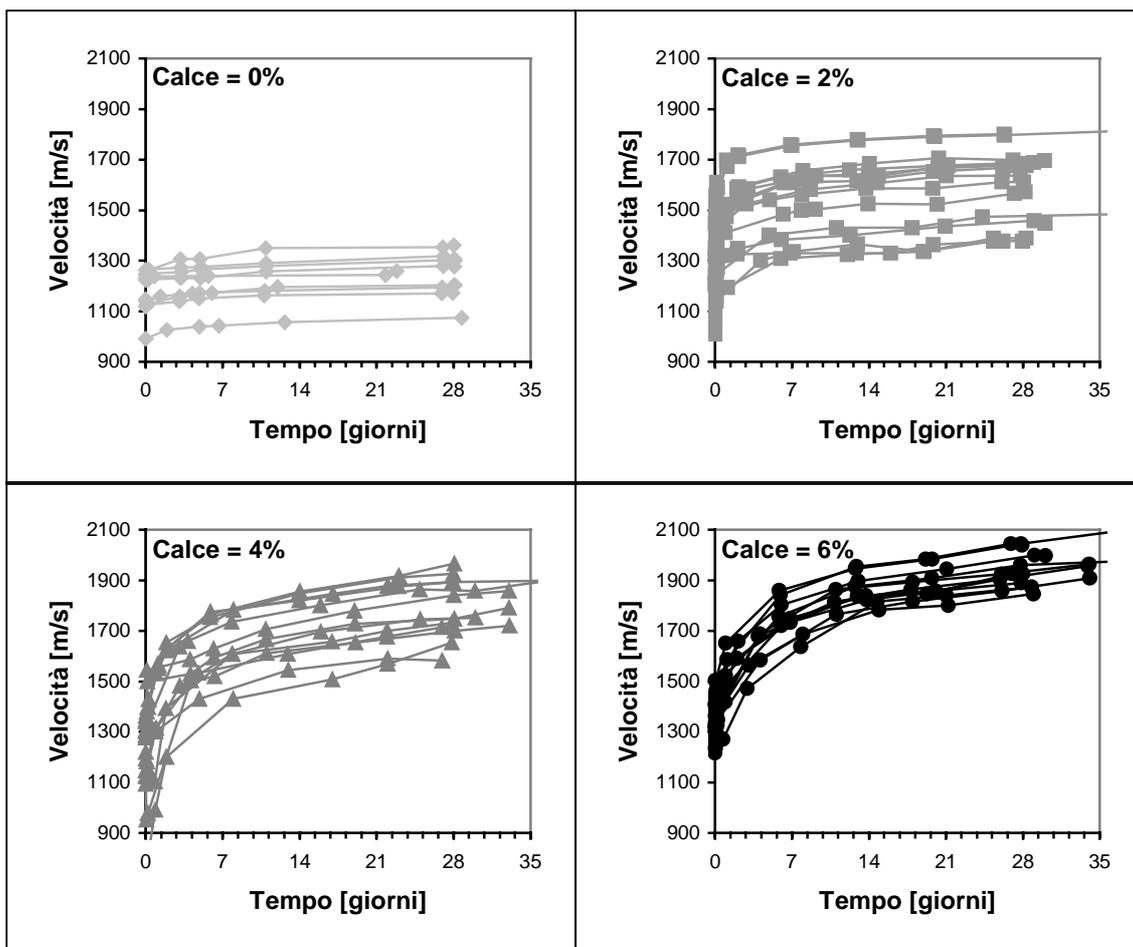


Figura 1 – Andamento della velocità degli ultrasuoni nel tempo, per campioni di terra miscelata con diverse percentuali di calce (0, 2, 4 e 6%) e umidità

E' immediato invece rilevare una generale tendenza all'aumento della velocità nel tempo, e l'andamento della velocità permette di comprendere l'evoluzione della maturazione delle miscele terra-calce. In analogia con quanto avviene nei conglomerati cementizi, si può ritenere che la crescita della velocità nel tempo sia imputabile all'aumento di rigidità del materiale per effetto dei noti fenomeni di stabilizzazione.

A tale riguardo bisogna comunque osservare che anche i provini composti di sola terra presentano un lieve sviluppo delle velocità. Tale fenomeno, rilevabile soprattutto subito dopo il confezionamento dei campioni, può essere messo in relazione con l'incremento nel tempo del modulo resiliente e della resistenza al taglio, che avviene in genere nei terreni di natura argillosa. Secondo precedenti studi [5] ciò è attribuibile ad un progressivo cambiamento nella disposizione delle particelle ed alla variazione della pressione dell'acqua contenuta nei pori del terreno. In ogni caso tale effetto della stagionatura nei provini di sola terra risulta insignificante se confrontato con quello avutosi nelle miscele terra-calce.

Da una attenta comparazione dei quattro riquadri di figura 1 si possono ricavare ulteriori considerazioni:

- con l'aumentare della percentuale di calce si assiste ad uno spostamento delle famiglie di curve verso l'alto;
- lo sviluppo delle velocità nel tempo è suddivisibile in due parti:

- 1-una parte iniziale non lineare e nettamente crescente, che all'aumentare della percentuale di calce si amplia, in termini sia di tempo che di velocità;
- 2-una parte successiva, in cui l'incremento delle velocità sembra stabilizzarsi su rette che presentano pendenze crescenti all'aumentare della percentuale di calce.

In relazione a quanto osservato nel primo punto è possibile ammettere che gli aumenti più consistenti di velocità conseguiti con le percentuali più elevate di calce sono imputabili ai noti incrementi delle caratteristiche meccaniche che il terreno subisce quando viene miscelato con quantità di additivo maggiori.

Una considerazione interessante, nonché utile sul piano pratico, deriva dalla diversità di sviluppo nel tempo delle velocità: maggiori quantità di calce non solo sembrano produrre nel tempo incrementi superiori, ma abbisognano anche di maggiori tempi di reazione e quindi di maturazione. Si osservi che proprio la durata del tratto non lineare (quello in cui la velocità subisce un aumento più marcato) è assimilabile a quella del periodo di stagionatura consigliato nei lavori di stabilizzazione prima della costruzione della pavimentazione, pari a circa 7 giorni [6].

Partendo da tali considerazioni si è cercato di trovare una relazione matematica che permettesse di stimare i valori della velocità nel tempo e quindi di rappresentare i comportamenti sopra evidenziati. Dopo una serie di tentativi si è ritenuta soddisfacente la seguente equazione, che distingue gli sviluppi del primo periodo di tempo da quelli che si verificano successivamente:

$$V(t) = A + Bt + Ce^{Dt} \quad (1)$$

Il termine esponenziale descrive il progressivo e rilevante incremento della velocità che avviene nei primi giorni, mentre quello lineare esprime gli effetti a lungo termine (figura 2). Tale relazione ha sempre fornito coefficienti di correlazione superiori a 0.9 ed è ovviamente affidabile entro i tempi di sperimentazione adottati; in effetti è presumibile che l'espressione non possa essere applicata per tempi troppo lunghi dal momento che essa fornisce valori che crescono in maniera indefinita nel tempo.

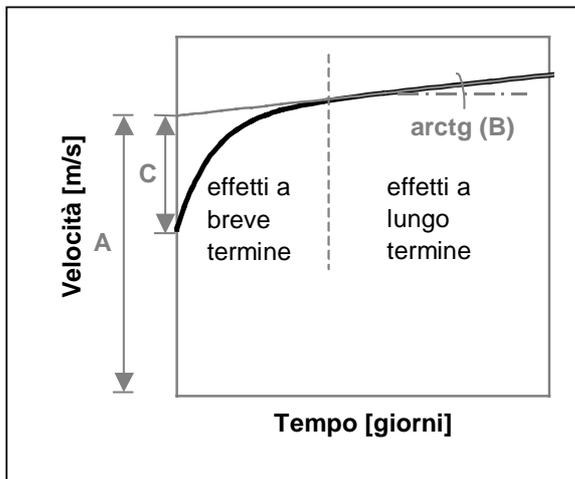


Figura 2 – Modello della velocità in funzione del tempo

meccaniche a distanza di 10 anni [8].

In base all'analisi di regressione condotta su tutti i campioni della sperimentazione, si è riscontrato che i parametri del modello sono influenzati dall'umidità solo in piccola misura, mentre il ruolo della percentuale di calce risulta determinante. Per potere quindi effettuare un confronto semplificato, si è considerata la media dei parametri ottenuti per

umidità diverse. In figura 3 sono riportate le medie dei coefficienti per le percentuali di calce considerate. Per comprendere al meglio l'influenza della variazione dei parametri sugli sviluppi delle velocità nel tempo, in figura 4 sono stati riportati gli andamenti stimati dal modello su un intervallo di 35 giorni.

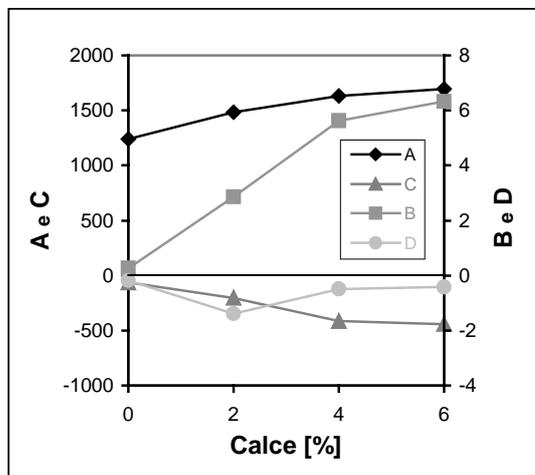


Figura 3 – Valori medi dei coefficienti del modello per le diverse percentuali di calce

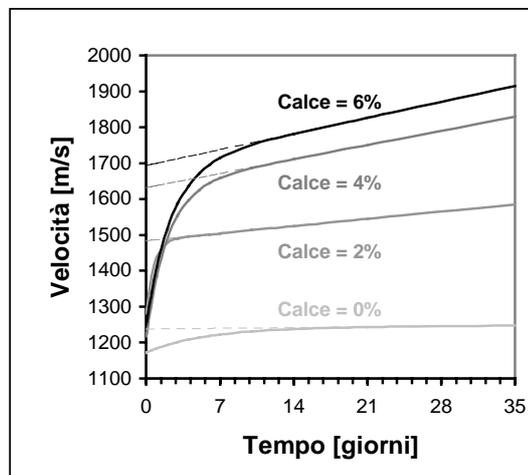


Figura 4 – Andamento della velocità stimata dal modello con i valori medi dei coefficienti per le diverse percentuali di calce

Il parametro A (vedi fig.3) risulta crescente con la percentuale di calce e ciò comporta, come era prevedibile, che le velocità risultano traslate verso l'alto.

Ben più importante è il coefficiente B che nel grafico rappresenta la pendenza della parte lineare della funzione ed esprime quindi il tasso di aumento della velocità a lungo termine. Tale parametro ha un valore prossimo allo zero per la terra non trattata, e aumenta con l'incremento della percentuale di calce utilizzata. In particolare il parametro B cresce sensibilmente fino al 4% di calce, poi tende a stabilizzarsi.

Non meno rilevante è il valore assoluto del coefficiente C, che esprime in termini quantitativi lo sviluppo della velocità a breve termine. Come è possibile rilevare dalle figure 3 e 4 l'aumento della percentuale di calce provoca un incremento di tale parametro, a testimoniare che gli effetti di irrigidimento del primo periodo sono notevolmente influenzati dalla quantità di calce utilizzata.

La dipendenza dal tempo del forte sviluppo iniziale che presenta la velocità è descritto dal parametro D. Ad un primo esame l'andamento del coefficiente in funzione della percentuale di calce appare di non facile interpretazione, in quanto esso cresce in corrispondenza del 2% di calce per poi diminuire con il 4 e il 6%. In realtà non è propriamente corretto confrontare il terreno non trattato con quello stabilizzato con calce dato che in quest'ultimo lo sviluppo della velocità, diversamente che nel primo, è imputabile a reazioni soprattutto di tipo chimico. Pertanto è più opportuno rivolgere l'attenzione al confronto fra i risultati relativi alle diverse dosi di calce. A tale riguardo è ammissibile che la riduzione in valore assoluto del coefficiente D al crescere della percentuale di calce (con conseguente protrarsi degli effetti "a breve termine" visibili in figura 4) dipende dai tempi di reazione più lunghi che sono necessari ad un maggiore quantitativo di calce.

Per rappresentare l'andamento della velocità nel tempo considerando anche le varie umidità impiegate nella sperimentazione, sono stati redatti i grafici di figura 5, per le

quattro percentuali di calce, con i valori di velocità calcolati utilizzando il modello proposto con tempi diversi (0, 1, 7 e 28 giorni). E' possibile osservare come i punti relativi ad uno stesso tempo, sebbene dispersi, forniscono mediamente un andamento di tipo a campana, che nelle figure è descritto da curve interpolatrici del terzo ordine.

Da un confronto dei quattro grafici, volutamente costruiti con la stessa scala, è visibile l'effetto della stabilizzazione nel tempo, che si manifesta con la traslazione verso l'alto delle curve. Tale comportamento è visibilmente esaltato dalle maggiori quantità di calce.

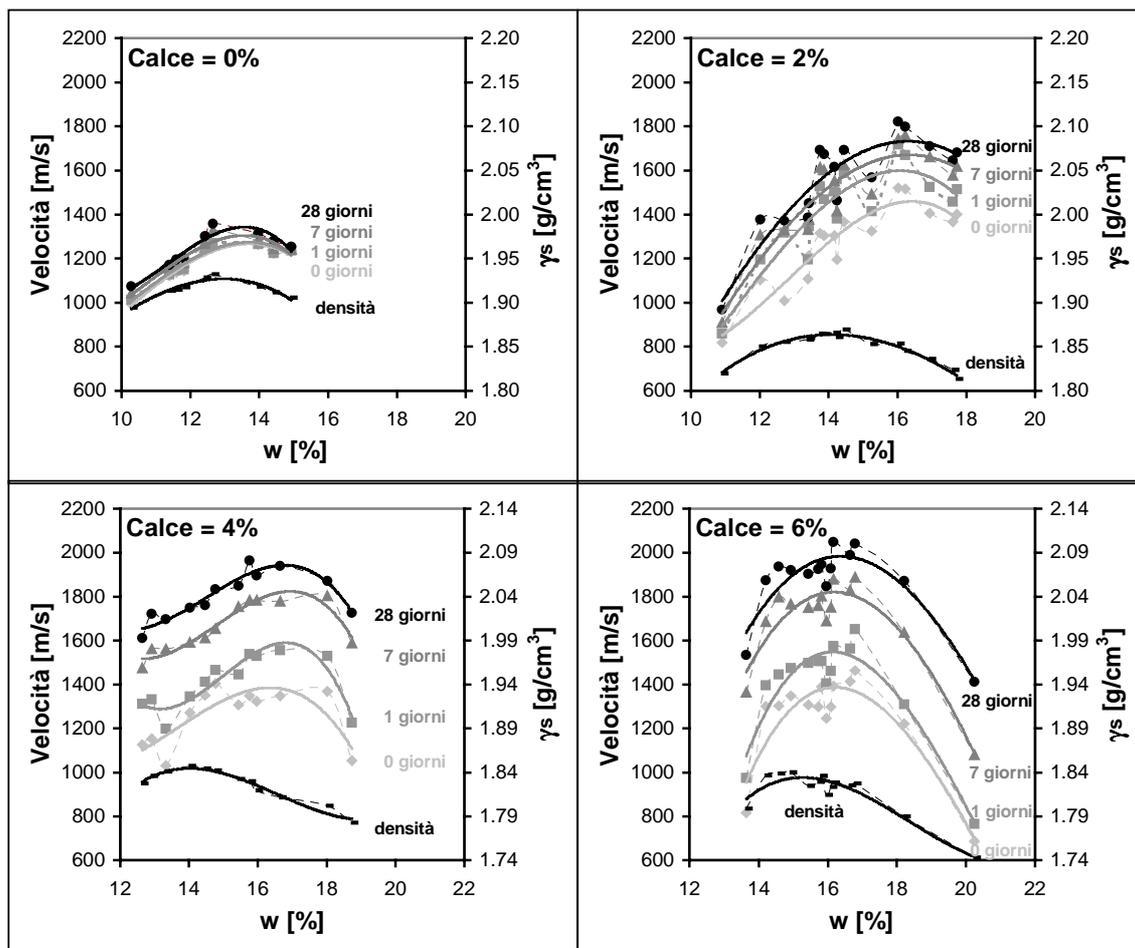


Figura 5 – Curve delle velocità in funzione dell'umidità, con velocità stimate dal modello per tempi diversi (0, 1, 7 e 28 giorni), e curva di densità per le quattro miscele terra-calce

3.2. Confronto fra le proprietà fisiche del materiale e le velocità

Nei grafici di figura 5, in cui sono state messe a confronto le curve velocità vs umidità, si è anche riportata la curva relativa alla densità secca.

Affiancare le curve della velocità a quella della densità è ragionevole non solo per il loro analogo andamento a campana, ma soprattutto per la considerazione che gli ultrasuoni viaggiano più velocemente in un mezzo più denso. E' però possibile rilevare, in ogni riquadro, che il massimo delle varie curve relative alla velocità è spostato verso destra rispetto al massimo della curva di densità.

Questo fenomeno, essendosi verificato per tutte le miscele, non può che essere dovuto a precise cause. Infatti gli ultrasuoni si propagano con velocità diverse a seconda del mezzo attraversato. Il terreno è un mezzo polifase costituito da solido, acqua e aria,

e in esso la velocità di propagazione dipende quindi non solo dalla presenza del solido, ma dalla proporzione tra le varie fasi. Di conseguenza, a parità di densità secca e quindi con pari volume di vuoti (aria più acqua), le velocità hanno valori più elevati se riferite a campioni con maggiore umidità poiché in essi gli ultrasuoni si trasmettono più velocemente, data la maggiore presenza d'acqua nei vuoti acqua (figura 6).

Da ciò discende che in corrispondenza dei valori di densità situati nel ramo discendente della campana (ramo umido) la velocità è più alta che per gli stessi valori di densità presi sul ramo ascendente (ramo secco), e questo motiva lo spostamento verso destra del massimo delle curve di velocità rispetto al picco di densità.

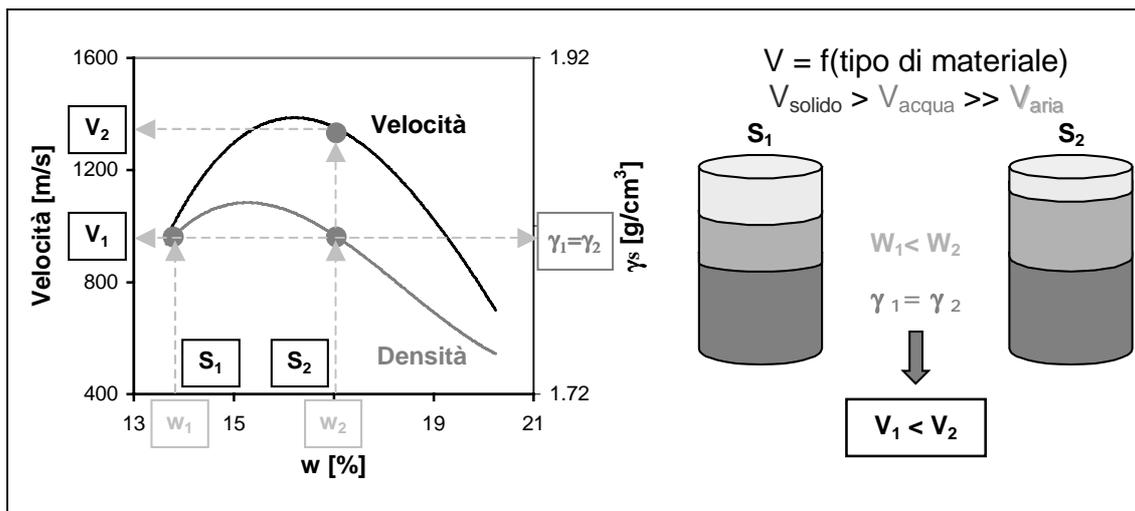


Figura 6 – Esempio di una coppia di campioni aventi la stessa densità secca ($\gamma_1 = \gamma_2$) ma diverso contenuto d'acqua ($w_1 < w_2$) e confronto fra le velocità risultanti ($V_1 < V_2$)

E' quindi logico attendersi che una relazione matematica fra la velocità degli ultrasuoni e le caratteristiche fisiche del terreno debba dipendere non solo dalla densità, come avviene ad esempio nei calcestruzzi, ma anche dalla quantità di acqua. A tale proposito è stata elaborata una relazione per esprimere la velocità come combinazione lineare della densità e dell'acqua:

$$V = a \gamma + b W + c \quad (2)$$

In figura 7 sono riportati gli andamenti della velocità rilevati dopo il costipamento posti a confronto con quelli stimati dal modello e le espressioni matematiche per ogni percentuale di calce. In ognuno dei quattro grafici una terza curva rappresenta la curva di densità.

Si noti come una semplice relazione lineare multipla sia capace di stimare la velocità in modo soddisfacente (R varia tra 0.73 e 0.99).

Nel modello lo spostamento verso destra del massimo di velocità rispetto a quello di densità dipende dal termine b. Dato che quest'ultimo parametro risulta in generale maggiore per il terreno con calce, si ha che sono più traslate le curve di velocità relative ai terreni additivati di quella corrispondente al terreno non trattato.

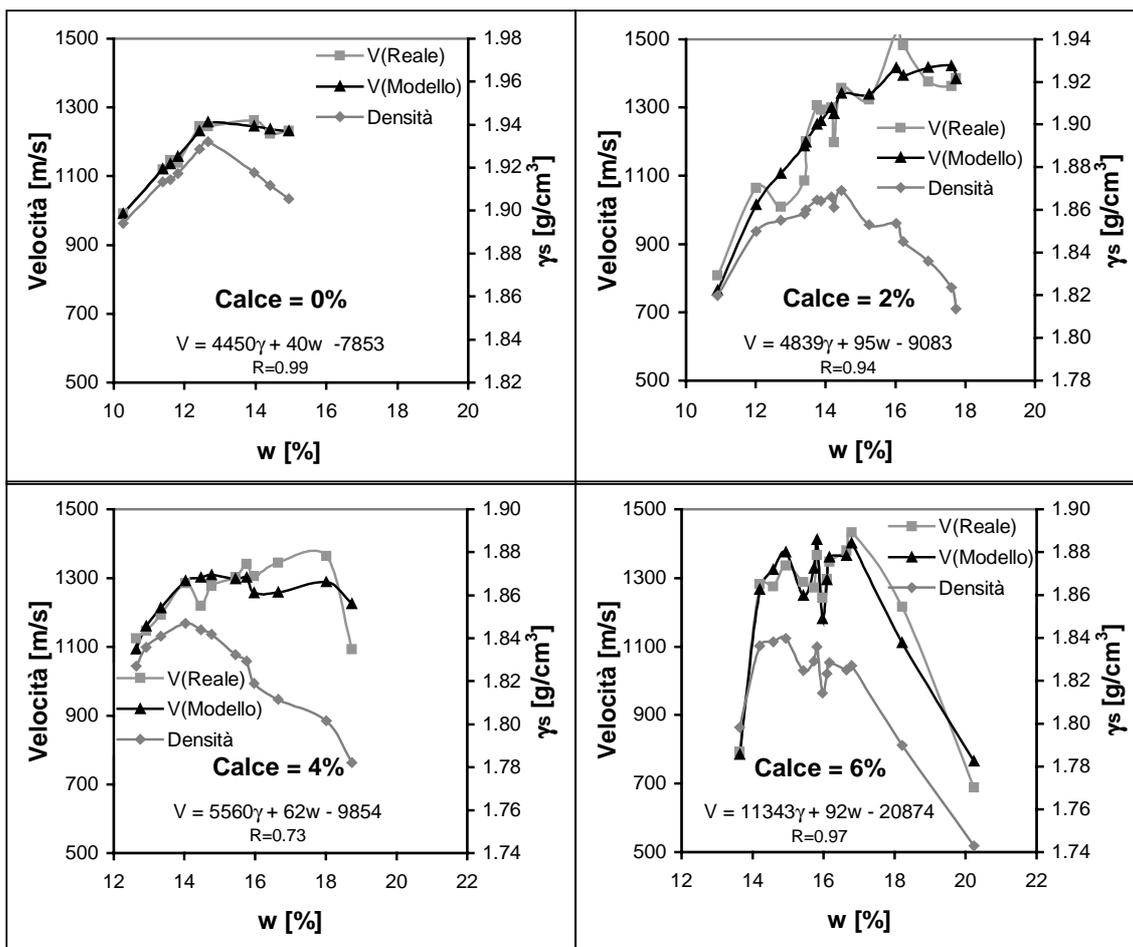


Figura 7 – Velocità misurata dopo il confezionamento a confronto con quella stimata dal modello e valori di densità secca

3.3. Confronto fra le caratteristiche meccaniche e le velocità

Per sfruttare appieno il metodo degli ultrasuoni è opportuno relazionare le proprietà meccaniche del materiale con la velocità rilevata nei campioni prima della prova non distruttiva.

A tale scopo, al termine della fase di monitoraggio (durata circa quattro settimane) i campioni sono stati sottoposti a prove di compressione, per ricavare informazioni sulle caratteristiche meccaniche delle miscele.

In figura 8 sono messe a confronto la resistenza e la velocità espresse in funzione dell'umidità e suddivise in serie differenti per le varie percentuali di calce. E' possibile osservare che sia i valori sperimentali relativi alla resistenza che quelli relativi alla velocità aumentano all'aumentare del dosaggio di calce. Resistenze e velocità, a parità di percentuale di legante, presentano inoltre innalzamenti e abbassamenti analoghi al variare dell'umidità.

Per quanto detto, può essere significativo il confronto tra la velocità degli ultrasuoni e la resistenze delle miscele. In figura 9 è riportato l'insieme dei dati sperimentali, per le grandezze in questione, che vengono messe in relazione trascurando per il momento i valori di umidità. Le coppie (V, R_C) sono state distinte in serie in base alla percentuale di calce utilizzata.

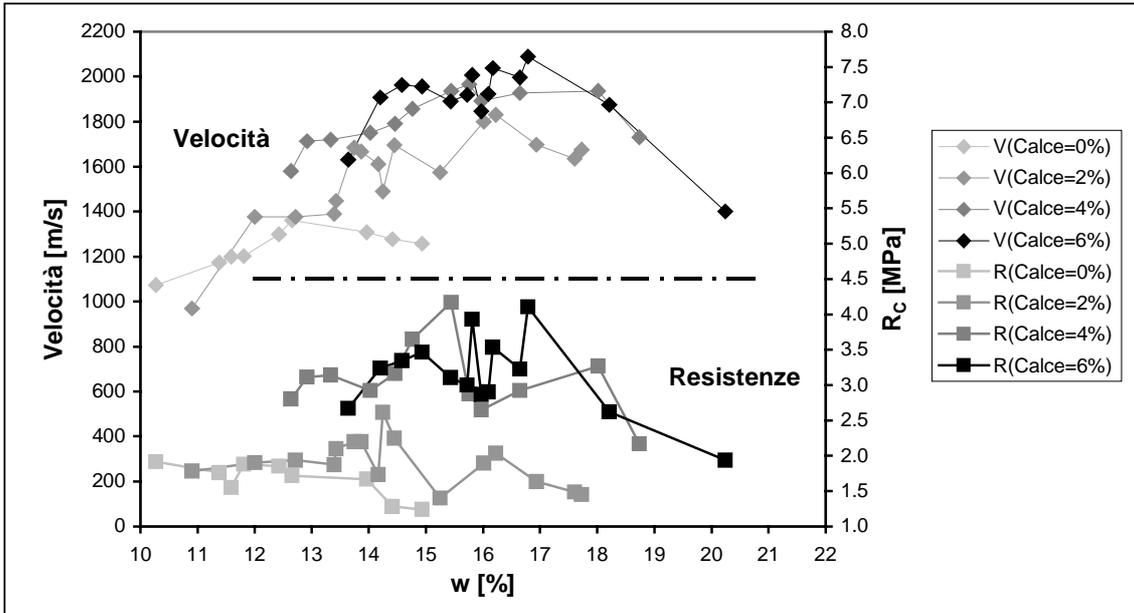


Figura 8 – Resistenza e velocità in funzione dell'umidità, per diverse percentuali di calce

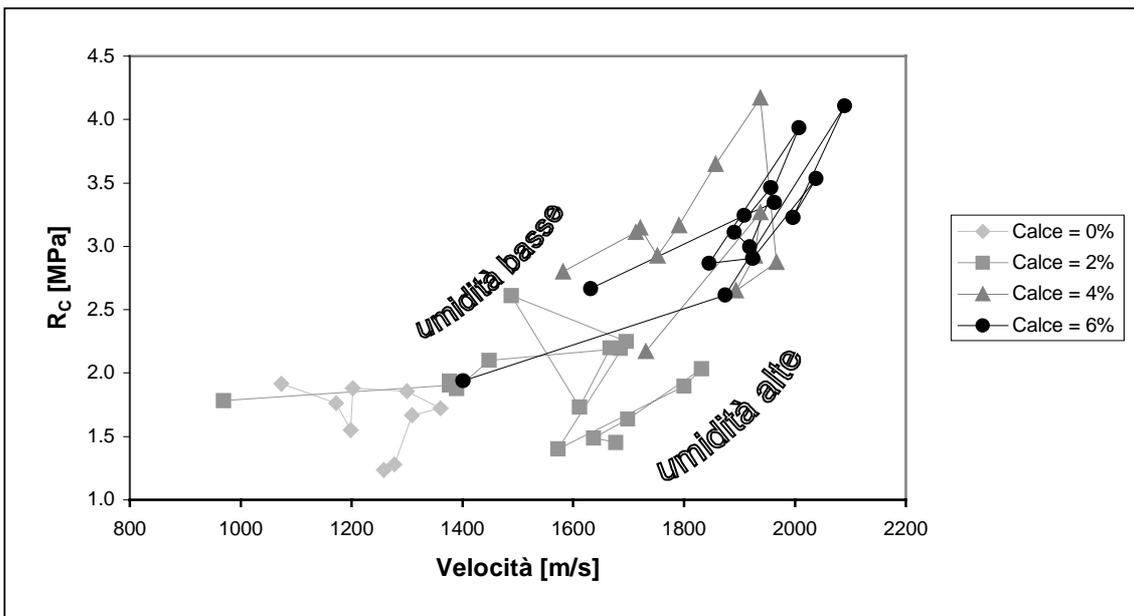


Figura 9 – Resistenza in funzione della velocità, per diverse percentuali di calce

Da un esame del grafico discendono le seguenti considerazioni:

- in generale un aumento di velocità comporta, anche se con una certa dispersione, un aumento di resistenza di tipo non lineare;
- dato che l'aggiunta di calce comporta un innalzamento di entrambi i valori V e R, in una generica relazione tra le due variabili si potrebbe trascurare la dipendenza dalla percentuale di calce;
- la dispersione generale dei valori delle coppie V-R dipende dalla dispersione presente nei gruppi riferiti alle singole miscele; questa è essenzialmente dovuta al diverso valore del contenuto d'acqua dei campioni: in particolare per ogni miscela i punti relativi a basse umidità di confezionamento si trovano nella parte superiore del gruppo e viceversa.

Proprio a causa di quest'ultima osservazione, volendo giungere ad una relazione fra velocità e resistenza non si può prescindere dall'umidità presente nelle miscele.

In definitiva per costruire un modello che spieghi con buona approssimazione i fenomeni indagati e che nel contempo abbia un'utilità pratica, è necessario identificare una espressione matematica capace di fornire una stima della resistenza meccanica con una relazione non lineare in V che contenga anche il parametro umidità; quest'ultimo, tenendo conto dei dati sperimentali e volendo semplificare, si può supporre che agisca linearmente.

Sulla base delle ipotesi ora fatte si è scelta la seguente equazione:

$$R_c = \alpha V^\beta + \delta W + \zeta \quad (3)$$

Da una regressione di tutti i dati si è giunti alla seguente equazione:

$$R_c = 6.23 \cdot 10^{-15} V^{4.43} - 0.135 W + 3.135 \quad (4)$$

che ha fornito un coefficiente di correlazione pari a 0.88.

In figura 10 sono riportati i valori sperimentali raggruppati in serie relative a diversi intervalli di umidità. Nella stessa figura sono riportate le curve del modello parametrizzate in funzione del contenuto d'acqua medio di ogni gruppo.

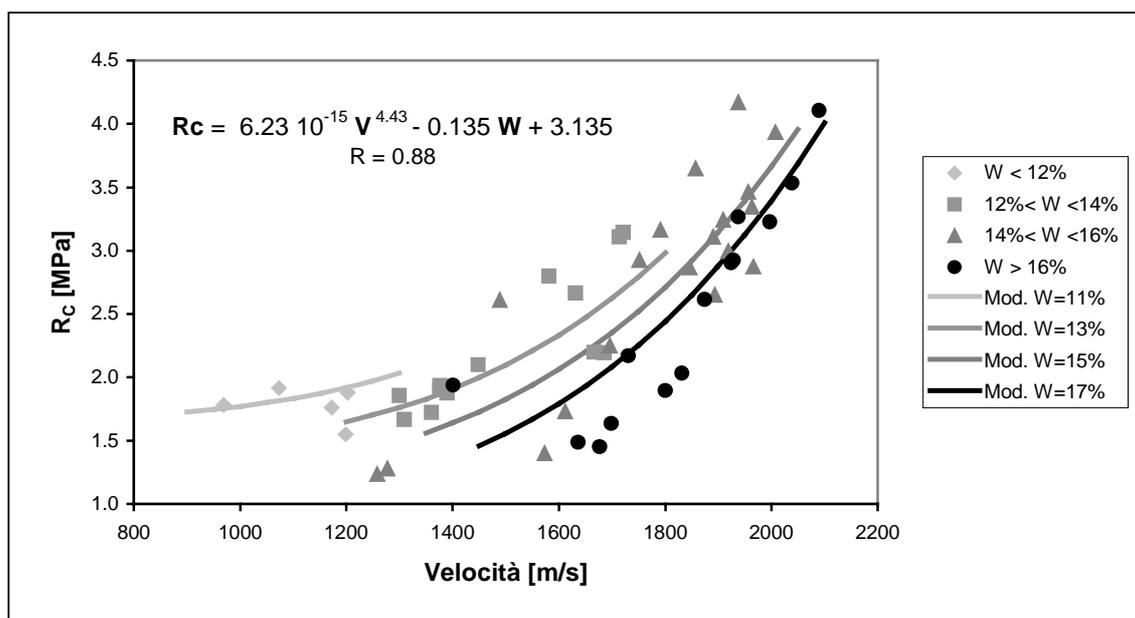


Figura 10 – Resistenza in funzione della velocità, per diversi intervalli di umidità, e confronto con le curve del modello

La forma non lineare del modello è simile a quelle valide per i conglomerati cementizi, come ad esempio quella fornita dalle norme belghe [9]

Per valutare l'affidabilità del modello, nell'intento già detto di utilizzarlo per scopi pratici, è opportuno verificare se la relazione trovata, utilizzando i dati riferiti a provini testati a circa 4 settimane dal confezionamento, possa essere adottata anche per periodi di stagionatura diversi.

A tale scopo sono stati confezionati provini con una miscela ben definita e sono stati testati sia con il metodo degli ultrasuoni sia con prove distruttive dopo tempi di maturazione diversi (compresi fra 0 e 28 giorni).

In figura 11 sono messi a confronto gli andamenti nel tempo della velocità e della resistenza per la terra miscelata con il 4% di calce, con umidità di circa il 17%. E' possibile constatare come tali andamenti siano entrambi di tipo crescente, anche se con modalità differenti: mentre per la velocità si osserva una crescita iniziale rapida, la resistenza ha una crescita meno accentuata che però si mantiene nei tempi successivi, laddove l'incremento della velocità tende a ridursi. Anche in questo caso per quanto osservato si può prevedere una relazione non lineare tra V e R.

Per confrontare tali valori, riferiti a giorni diversi, con quelli stimati dal modello proposto, è stato redatto il grafico di figura 12. E' possibile osservare come la curva del modello, determinata con valori acquisiti nella maggior parte a 28 giorni, risulti prossima ai valori rilevati in tempi diversi. Ciò è confermato da un'analisi statistica, che ha fornito un coefficiente di correlazione fra i dati stimati e quelli ottenuti in questa serie di prove pari a 0.83, analogo al precedente (0.88).

In base alle osservazioni fatte è quindi possibile ritenere che la relazione trovata è capace di stimare la resistenza indipendentemente non solo dalla percentuale di calce utilizzata ma anche dal tempo di stagionatura.

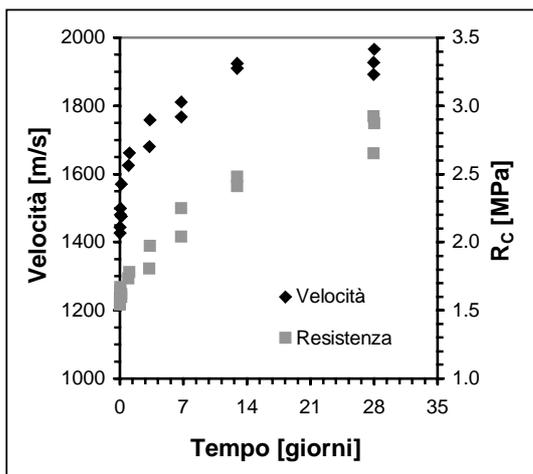


Figura 11 – Resistenza e velocità in funzione del tempo, rilevate in campioni con diversi periodi di stagionatura

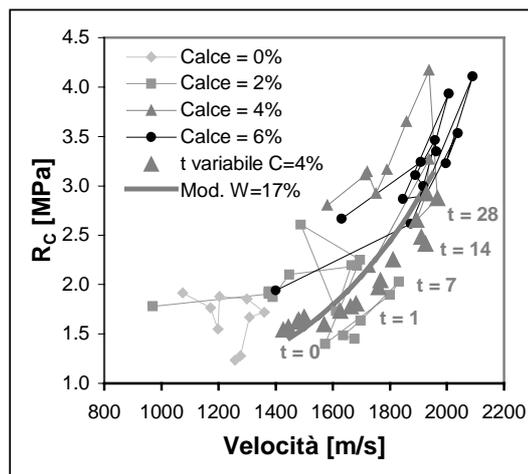


Figura 12 – Coppie (V-Rc) rilevate in campioni con diversi tempi di stagionatura, e confronto con i dati ricavati a circa 28 giorni

Dalla figura 12, in cui sono stati volutamente riportati anche tutti gli altri dati, discende un'ulteriore considerazione. I valori acquisiti in tempi diversi, disponendosi lungo una curva non lineare, attraversano regioni diverse dell'area del grafico:

- per tempi immediatamente successivi alla miscelazione ($t=0$ giorni) i dati si collocano in vicinanza della serie relativa allo 0% di calce;
- i dati rilevati nei primi giorni ($1 < t < 7$) si collocano nella zona relativa al 2 % di calce;
- per tempi maggiori di una settimana i punti entrano nell'area occupata dalla serie relativa alle miscele confezionate con il 4% di calce.

E' quindi possibile ipotizzare che esista, in termini di effetti, un'equivalenza "tempo di maturazione - percentuale di calce": provini confezionati con una certa quantità di calce acquisiscono in pochi giorni le stesse caratteristiche meccaniche e di velocità di propagazione degli ultrasuoni di campioni ottenuti con quantità di calce minori ma stagionati più a lungo.

Per completare il quadro delle conoscenze acquisibili con il metodo degli ultrasuoni, sono stati determinati i valori di modulo statico ricavati dalle curve di rottura σ - ϵ . Ciascun valore è stato calcolato rapportando la tensione corrispondente ad una prestabilita deformazione alla deformazione stessa. Data la ridotta deformabilità dei provini, confermata anche in letteratura, si è scelto un valore di riferimento della deformazione pari allo 0.5%. Lo stesso T.R.B. riporta generalmente per le miscele stabilizzate a calce una deformazione a rottura massima pari all'1%.

Così facendo si ottiene che il modulo è all'incirca coincidente con la pendenza del tratto lineare iniziale del diagramma σ - ϵ . Inoltre in base a studi condotti dallo stesso autore [10] si è potuto appurare che tale modulo, nelle miscele terra-calce, è strettamente legato al modulo resiliente.

Le stesse considerazioni sin qui svolte per la resistenza possono ora essere ripetute per i moduli. In figura 13 sono riportati i valori di modulo statico in relazione alla velocità, suddivisi in serie che differiscono per il contenuto di calce. Anche in questo caso l'utilizzo dell'additivo comporta un aumento di entrambe le variabili e la dispersione dei dati è imputabile alle varie umidità impiegate nella sperimentazione.

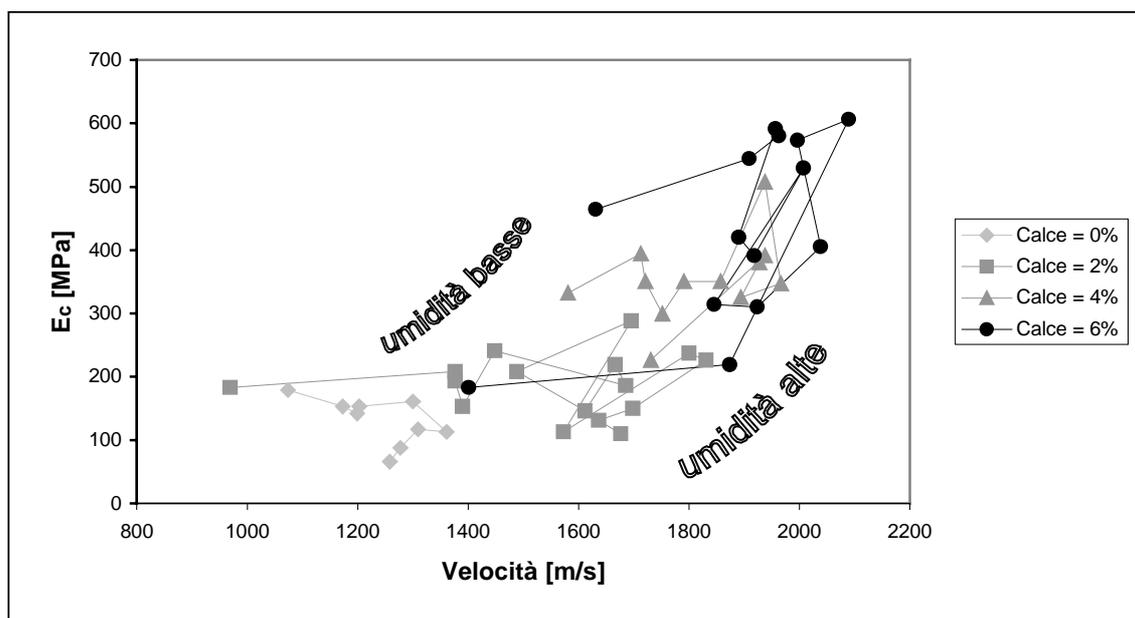


Figura 13 – Modulo in funzione della velocità, per diverse percentuali di calce

Conseguentemente è stata condotta un'indagine statistica analoga a quella presentata in precedenza per la resistenza, che ha fornito l'espressione seguente:

$$E_c = 1.45 \cdot 10^{-14} V^5 - 26.18 W + 440.99 \quad (5)$$

In figura 14 sono riportati i valori di modulo raggruppati in serie distinte per intervallo di umidità. Nella stessa figura sono riportate le curve del modello, parametrizzate in funzione del contenuto d'acqua medio di ogni gruppo.

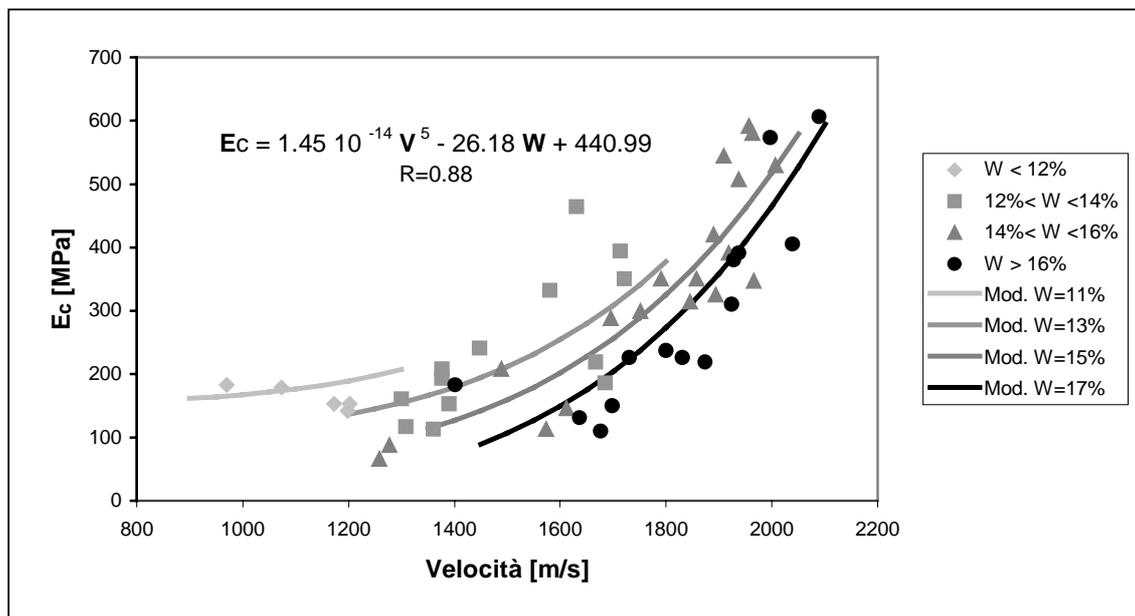


Figura 14 – Modulo in funzione della velocità, per diversi intervalli di umidità, e confronto con le curve del modello

4. CONCLUSIONI

La ricerca ha riguardato lo studio della propagazione degli ultrasuoni nelle miscele terra-calce, preso in considerazione come un efficace metodo di prova che permette di indagare diverse caratteristiche meccaniche dei terreni stabilizzati con calce, evitando il dispendio di energie e di tempo richiesto dalle normali prove distruttive.

Infatti, con un numero di campioni inferiore a quello necessario per l'esecuzione di prove di altro tipo, si è ricavata una notevole quantità di dati che ha permesso di conoscere gli effetti della calce miscelata con terreni limo-argillosi non solo nei tempi di maturazione consueti (7 o 28 giorni) ma lungo tutto il periodo di stagionatura dei provini.

Il monitoraggio della velocità di propagazione degli ultrasuoni su campioni differenti per umidità e per contenuto di calce ha permesso di descrivere con un modello matematico individuato allo scopo l'evoluzione nel tempo dei valori di velocità. In particolare l'espressione trovata si compone di due termini: uno esponenziale, per descrivere il progressivo e rilevante incremento della velocità che avviene nei primi giorni, l'altro lineare, per rappresentare gli effetti a lungo termine.

E' stata anche studiata una relazione matematica tra la velocità degli ultrasuoni e le caratteristiche fisiche del terreno, che dipende, oltre che dalla densità, come per i calcestruzzi, anche dal contenuto d'acqua, per il fatto che il terreno è un mezzo polifase.

Da un punto di vista pratico assume invece rilievo il risultato ottenuto correlando i valori di velocità con i parametri meccanici a rottura dei provini. Le relazioni trovate sono di tipo non lineare, in analogia con quelle dei calcestruzzi, e permettono di stimare i valori di resistenza e di modulo noti che siano i valori di velocità, tenendo anche conto del contenuto d'acqua. L'utilizzo di tali formule è inoltre possibile indipendentemente dalla percentuale di calce impiegata e dal tempo di stagionatura trascorso.

In conclusione, dai risultati di questa ricerca si è potuto constatare che l'impiego degli ultrasuoni nello studio dei terreni stabilizzati con calce può essere considerato un metodo di indagine utile e conveniente, come già avviene in altri settori.

BIBLIOGRAFIA

- [1] AIM, "Le prove non distruttive", Associazione Italiana di Metallurgia, Milano, 1984.
- [2] Pascale G., Di Leo A., "Controllo non distruttivo del calcestruzzo nell'edilizia industrializzata", Atti del congresso CTE 1984, Firenze, novembre 1984.
- [3] ASTM, "Method for Laboratory Preparation of Soil-Lime Mixtures Using a Mechanical Mixer", ASTM D 3551-90.
- [4] ASTM, "Methods for Unconfined Compressive Strength of Compacted Soil-Lime Mixtures", ASTM D5102-90.
- [5] Seed, Chan, Lee, "Resilience characteristic of subgrade soils and their relation to fatigue failure in asphalt pavements", Proc. Int. Conf., Ann Arbor 1962.
- [6] NATIONAL LIME ASSOCIATION, "Lime Stabilization Construction Manual", Bulletin n.326, 1991.
- [7] Giannattasio P., Crispino M., Perneti M., "Le miscele aggregato-argilla-calce nelle sovrastrutture stradali: resistenza e sensibilità", Convegno Nazionale SIIV, Ancona, ottobre 1996.
- [8] TRB Committee On Lime And Lime-Fly Ash Stabilization, "Lime Stabilization", Transportation Research Board 1987.
- [9] NBN, "Essais des bétons: essais non-destructif: mesure de la vitesse du son", Norme Belge B15-229.
- [10] Cerni G., "Il comportamento dinamico dei terreni stabilizzati con calce", Convegno Nazionale SIIV, Catania ottobre 2000.